

بررسی خواص فیزیکی کامپوزیت زمینه منیزیمی $ZX51-Al_2O_3$ ساخته شده به روش ریخته‌گری گردابی و اکستروژن گرم

رضا رحمانی گرجی^۱، حسن جعفری^{۲*}، علی علیزاده^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، (r_rahmany@ymail.com)

۲- استادیار گروه متالورژی و مواد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، (hjafari@srttu.edu)

۳- استادیار گروه فلز-سرامیک مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت دانشگاه صنعتی مالک اشتر، (alizadehh53@gmail.com)

Investigating physical properties of ZX51- Al_2O_3 magnesium matrix composite fabricated by stir casting and hot extrusion

R. Rahmany-Gorji¹, H. Jafari^{2*}, A. Alizadeh³

1- MSc Student, Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, (r_rahmany@ymail.com)

2- Assistant Professor, Materials Engineering Department, Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, (hjafari@srttu.edu)

3- Assistant Professor, Metal-Ceramics Department, Faculty of Materials & Manufacturing Processes, MUT, (alizadehh53@gmail.com)

چکیده

در پژوهش پیش رو کامپوزیت‌های زمینه منیزیمی $ZX51-xAl_2O_3$ (درصد حجمی ۶/۷۵ و ۴/۵، ۲/۲۵، ۰) به روش ریخته‌گری گردابی ساخته شدند و سپس تحت فرایند اکستروژن گرم در دماهای ۳۰۰، ۳۵۰ و ۴۰۰ درجه سانتیگراد قرار گرفتند. پس از اندازه‌گیری دقیق چگالی بر اساس اصل ارشمیدس، خواص فیزیکی کامپوزیت‌های تولیدی شامل چگالی ظاهری، چگالی نسبی و درصد حجمی تخلخل بررسی گردید و همچنین به کمک رگرسیون، مورد تحلیل آماری قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار ذرات تقویت کننده، چگالی ظاهری و درصد حجمی تخلخل به ترتیب به صورت خطی و به صورت درجه دوم برای هر دو دسته کامپوزیت‌های ریختگی و اکستروژن شده افزایش پیدا می‌کند، در حالی که چگالی نسبی کامپوزیت‌ها با پیروی از تابعی درجه دوم کاهش می‌یابد. با این حال به ازای تمامی درصدهای حجمی، چگالی‌های ظاهری و نسبی کامپوزیت‌های اکستروژن شده بالاتر از نمونه‌های مشابه ریختگی قرار داشت. در مقابل، برای درصد حجمی تخلخل، عکس این رفتار مشاهده گردید؛ که بیانگر کاهش میزان تخلخل بر اثر انجام اکستروژن می‌باشد. بر خلاف اثرگذاری جدی درصد حجمی ذرات آلومینا، ظاهراً خواص فیزیکی کامپوزیت‌های اکستروژن شده مستقل از دمای اکستروژن رفتار می‌نمود.

واژه‌های کلیدی: کامپوزیت زمینه منیزیمی، چگالی، تخلخل، ریخته‌گری گردابی، اکستروژن گرم

Abstract

In this paper, ZX51- xAl_2O_3 ($x=0, 2.25, 4.5, \text{ and } 6.75 \text{ vol}\%$) magnesium matrix composites were fabricated by stir casting and then were hot extruded at 300, 350, and 400°C. After precise measuring of density based on Archimedes' principle, physical properties of produced composites including apparent density, relative density, and volume percentage of porosity were investigated and also were statistically analyzed with the aid of Regression. The results showed that the apparent density and volume percentage of porosity increase linearly and quadratically respectively for both as-cast and extruded composites, while the relative density of the composites decreases by a second-order polynomial function when the amount of particle reinforcements increases. However, for all volume percentages of reinforcement, the apparent and relative densities of the extruded composites were higher than those of the as-cast counterparts. In contrast, an opposite behavior was observed for volume percentage of porosity; indicative of decreasing porosity content in consequence of extrusion processing. Contrary to serious effects of alumina particles volume percentage, physical properties of the extruded composites seemingly behaved independent of extrusion temperature.

Keywords: Magnesium matrix composite, Density, Porosity, Stir casting, Hot extrusion

(کد: ۹۱۱۰۶۲)

مهمتر از آن اثرات زیان‌بار این عیب بر خواص مکانیکی از جمله استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی، انعطاف پذیری و چقرمگی، سختی، مقاومت خزشی، مقاومت خستگی و حتی رفتار سایشی کامپوزیت‌ها است. چرا که در صورت وجود تخلخل، در واقع سطح تحمل‌کننده بار کوچکتر است و همچنین تنش‌های چند بعدی در سطح مقطع بوجود می‌آورد و سبب تمرکز موضعی تنش می‌گردد [۱۲]. با این حال علیزاده و همکارانش [۱۵] اظهار داشتند که میزان تخلخل بر استحکام فشاری کامپوزیت‌های مورد مطالعه آن‌ها اثر چندانی مخربی نداشته است. افزایش میزان تخلخل طول مورد نیاز جهت اشاعه ترک برای پیوستن به دیگر ترک‌ها را که نهایتاً به کندگی^۱ ختم می‌شود، کاهش می‌دهد. تخلخل حتی برای مقاومت به خوردگی نیز می‌تواند مخرب باشد [۳].

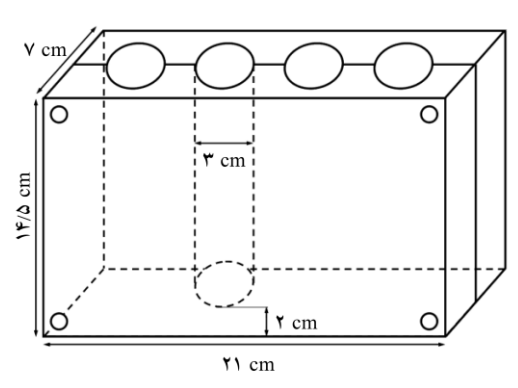
بدین ترتیب جای تردیدی باقی نمی‌ماند که این عیب موجب تنزل عملکرد، کارایی و کیفیت قطعه تولیدی شده و از این رو باید تا حد امکان به حداقل رسانده شود تا خواص مطلوبی در کامپوزیت زمینه فلزی حاصل آید. بر این اساس می‌توان از تخلخل به عنوان یک معیار ابتدایی به منظور ارزیابی کیفیت کامپوزیت‌ها بهره جست [۱۶]. خصوصاً تخلخل در قطعات صنعتی حساس باید کنترل گردد؛ چرا که پایداری طولانی مدت حین کارکرد چنین قطعاتی بسیار حائز اهمیت بوده و باید تضمین شده باشد. حذف یا کاهش تخلخل از جمله تأثیرات مهمی است که اعمال تغییرشکل مومسان در پی دارد. لذا فرایندهای متداول شکل دهی از جمله نورد، اکستروژن و فورج می‌توانند ضمن شکل دادن به کامپوزیت‌های زمینه فلزی، از میزان تخلخل نیز بکاهند [۱۲]. در این میان اکستروژن به دلیل تنش‌های هیدروستاتیکی فشاری بزرگ، یکی از رایج‌ترین فرایندهای ثانویه محسوب می‌گردد [۱۵].

در این پژوهش به ساخت کامپوزیت‌های زمینه منیزیمی، که به سبب چگالی پایین مورد توجه فراوانی قرار دارند، به روش ریخته‌گری گردابی و متعاقباً اکستروژن گرم اقدام شده و سپس چگالی کامپوزیت‌های تولیدی مورد سنجش قرار گرفته است؛ چرا که با اندازه‌گیری دقیق چگالی می‌توان میزان تخلخل یک نمونه را ارزیابی نمود [۱۷]. بدین ترتیب کمیت‌های چگالی و تخلخل که در زمره خواص فیزیکی می‌گنجد، تحت بررسی قرار گرفته و در این راستا از تحلیل آماری بهره جسته شده است تا روابطی تجربی

کامپوزیت‌های زمینه فلزی دسته‌ای از مواد پیشرفته مهندسی هستند که خواصی را عرضه می‌دارند که در صورت استفاده از مواد معمول، قابل دستیابی نیستند [۱]. هدف اصلی از طراحی کامپوزیت‌های زمینه فلزی، تلفیق خصوصیات مطلوب سرامیک‌ها و فلزات است [۳، ۲]. به عنوان مثال در این کامپوزیت‌ها، هدایت حرارتی بالای یک فلز با ضریب انبساط حرارتی پایین یک سرامیک تلفیق شده است [۴]. فرایندهای متنوعی برای تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی توسعه داده شده است. در این میان ریخته‌گری گردابی^۱ از مزایایی نظیر سادگی، وفق پذیری، امکان تولید اشکال پیچیده و یا قطعات بسیار بزرگ، هزینه تولید کم، و نرخ تولید بالا برخوردار است [۵، ۲]. لذا اغلب به سایر شیوه‌ها ترجیح داده می‌شود و هم‌اینک به عنوان روشی کارا برای تولید تجاری از سوی صنعت مورد پذیرش واقع شده است [۲]. با این حال فرایند ریخته‌گری گردابی با چالش‌هایی جدی از جمله تخلخل زیاد نیز روبرو است [۳]. ناگفته نماند که معضل تخلخل تنها گریبان‌گیر این روش نبوده بلکه سایر فرایندهای ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی نیز کم و بیش با این مشکل مواجه هستند. محصولات متالورژی پودر که با استفاده از شیوه معمول پرس و تفجوشی تولید می‌شوند، عموماً از وجود تخلخل رنج می‌برند [۶]. همچنین در کامپوزیت‌های ساخته شده به روش رسوب نشانی پاششی^۲ [۷]، فرایند اصطکاکی اغتشاشی^۳ [۸]، درجا [۹]، و رخنه‌دهی غیرفشاری^۴ [۱۰] بروز تخلخل گزارش شده است. هر چند اعمال فشار طی انجام، از تشکیل تخلخل جلوگیری می‌کند [۱۲، ۱۱] با این حال حتی در کامپوزیت‌های تولید شده با استفاده از روش‌های رخنه‌دهی فشاری (رخنه‌دهی با فشار گاز [۱۱] و رخنه‌دهی کوبشی^۵ [۱۳]) وجود تخلخل به تأیید رسیده است. بدین سان تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی فاقد تخلخل همچنان یک چالش تکنیکی مهم باقی مانده است که ناشی از پیچیدگی سازوکارهای نهفته در پس تشکیل این عیب می‌باشد [۱۴].

خواص مواد مهندسی به طور عام و کامپوزیت‌ها به طور خاص تحت تأثیر جدی تخلخل می‌باشد. وجود تخلخل بر رسانایی الکتریکی و نیز هدایت حرارتی کامپوزیت‌ها اثرگذار است؛ اما

اسمی ۰٪ (آلیاژ تقویت نشده)، ۲/۲۵٪، ۴/۵٪ و ۶/۷۵٪ بدست آمدند. در ادامه به منظور حصول اطمینان از ترکیب شیمیایی آلیاژ زمینه، روش زوج پلاسمای القایی-طیف سنجی نشر نوری^۸ مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۱. تصویری شماتیک از قالب ریخته‌گری

۲-۲- اکستروژن گرم

سنجه، محفظه و قالب اکستروژن از جنس فولاد ابزار گرمکار ۱.۲۳۴۴ سختکاری شده (با سختی HRC ۴۸) ساخته شد. به منظور تأمین دمای مورد نیاز در حین فرایند اکستروژن، از یک کوره گرمکن الکتریکی مقاومتی استوانه‌ای بهره گرفته شد که مجموعه شمشال به همراه سنجه، محفظه و قالب را تا پایان عملیات احاطه می‌نمود. پس از رسیدن به دمای مورد نظر، جهت حصول حالت پایا در دمای شمشال، اجازه داده می‌شد تا مدت زمانی یک ساعته سپری گردد. سپس توسط یک دستگاه پرس عمودی سرو-هیدرولیکی با ظرفیت ۱۰۰۰ kN، نیروی لازم برای اکستروژن اعمال گردید. از یک گریس نسوز مس‌دار نیز به عنوان روانساز استفاده شد. بدین ترتیب کامپوزیت‌های ریخته‌گری با ۲/۲۵ و ۴/۵ درصد حجمی Al_2O_3 در سه دمای ۳۰۰، ۳۵۰ و ۴۰۰ درجه سانتیگراد با نسبت اکستروژن ۱:۱۰ و سرعت سنجه ثابت^۹ ۱ mm.s تحت عملیات اکستروژن سرعت پایین به صورت گرم قرار گرفتند و محصولات خروجی تا دمای محیط در هوا خنک شدند.

۳- مطالعه ریزساختار

آماده‌سازی نمونه‌ها جهت بررسی ریزساختار طبق استاندارد

برقرار گردد که به عنوان مبنایی برای مدل‌های کمی می‌تواند بسیار سودمند واقع شود. چنین اطلاعات و یا مدل‌هایی برای طراحان قطعات و سازه‌های مهندسی حائز اهمیت و افری بوده چرا که طراحی و توسعه موادی با کارایی بالا در گرو شناخت همه-جانبه و کنترل دقیق خواص قرار دارد.

مواد و روش تحقیق

۱- مواد

ذرات Al_2O_3 به عنوان تقویت کننده و آلیاژ منیزی $ZX51$ به عنوان زمینه کامپوزیت‌های مورد مطالعه انتخاب شدند. بر این اساس پودر Al_2O_3 با خلوص بالا به همراه شمش‌های خالص تجاری منیزیم، روی و کلسیم تهیه گردیدند. سپس آنالیز اندازه ذرات^۷ به روش پراکنش لیزر به صورت تر بر روی پودر Al_2O_3 مصرفی انجام پذیرفت و متوسط اندازه ذرات این پودر برابر 0.26 ± 1.89 میکرون (میانگین \pm انحراف معیار) تعیین شد.

۲- فرایند ساخت

فرایندهای ریخته‌گری گردابی و به دنبال آن اکستروژن گرم برای ساخت کامپوزیت‌های مورد مطالعه در این پژوهش به کار بسته شدند و بدین ترتیب دو دسته کلی کامپوزیت‌های ریخته‌گری کامپوزیت‌های اکستروژن شده جهت مقایسه حاصل آمدند.

۲-۱- ریخته‌گری گردابی

عملیات تهیه نوب، آلیاژسازی و کامپوزیت سازی درون بوت‌های از جنس فولاد نسوز و با استفاده از یک کوره الکتریکی مقاومتی در دمای $800^\circ C$ انجام پذیرفت. به هنگام کامپوزیت سازی، مذاب توسط پروانه‌ای گرافیتی با سرعت ۴۰۰ rpm و به مدت ۵ min همزده شد. در حین همزدن به منظور اختلاط مناسب‌تر ذرات Al_2O_3 با مذاب و حذف مناطق مرده، پروانه همزن در جهات افقی و عمودی حرکت داده می‌شد. سپس مذاب درون یک قالب فولادی (شکل ۱) پیشگرم شده تا دمای $200^\circ C$ ریخته شد.

تمامی مراحل ریخته‌گری شامل تهیه نوب، آلیاژسازی، کامپوزیت سازی و ذوب‌ریزی درون قالب، تحت محافظت گاز آرگون انجام پذیرفت. بدین ترتیب کامپوزیت‌های ریخته‌گری با درصد‌های حجمی

ASTM E۳-۰۱ انجام پذیرفت. نمونه‌ها پس از سنباده‌زنی تا شماره P۲۰۰۰، پولیش شده و به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ (SEM) مجهز به تفنگ تنگستنی و با استفاده از آشکارساز الکترون‌های ثانوی، تحت بررسی ریزساختاری قرار گرفتند.

۴- اندازه‌گیری خواص فیزیکی

چگالی ظاهری کامپوزیت‌های ساخته شده طبق استاندارد ۱۳- ASTM B۳۱۱ تعیین گردید. اساس این روش بر اصل ارشمیدس مبنی بر جابجایی آب استوار است. پس از اندازه‌گیری وزن نمونه در هوا (وزن خشک) و وزن نمونه در حالت غوطه‌وری در سیالی با چگالی معلوم (وزن تر)، چگالی ظاهری نمونه‌ها به کمک معادله ۱ [۱۸] محاسبه شد.

$$\rho_a = \frac{w_d}{w_d - w_w} \times \rho_f \quad (1)$$

در این معادله ρ_a چگالی ظاهری نمونه، w_d وزن خشک، w_w وزن تر و ρ_f چگالی سیال (محیط غوطه‌وری) می‌باشد. به منظور تعیین چگالی نمونه‌های آماده شده به شکل استوانه‌ای به قطر ۱ cm و ارتفاع ۲ cm، آب مقطر در دمای ۲۴°C که طبق استاندارد مزبور از چگالی ۰/۹۹۷۳ g.cm^{-۳} برخوردار است، به عنوان سیال غوطه‌وری انتخاب شد و از دستگاه چگالی سنج (سارتوریوس^۱ مدل LA۲۳۰S) که وزن خشک و تر را با دقت ۰/۰۰۰۱ g اندازه‌گیری می‌کند، استفاده گردید. لازم به ذکر است برای دستیابی به دقت بالا، چگالی ۳ نمونه از هر کامپوزیت، به طور مجزا اندازه‌گیری و سپس میانگین آن‌ها گزارش شد.

در ادامه، میزان تخلخل نمونه‌ها بر اساس اختلاف بین چگالی تئوری و چگالی اندازه‌گیری شده، با کمک معادله ۲ [۱۰] تخمین زده شد.

$$\varphi = \frac{\rho_t - \rho_a}{\rho_t} \times 100 = \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_t} \right) \times 100 \quad (2)$$

در این معادله φ درصد حجمی تخلخل‌های بسته، ρ_a چگالی ظاهری (اندازه‌گیری شده) و ρ_t چگالی تئوری است که با استفاده از قانون مخلوط‌ها^{۱۱} (ROM) از معادله ۳ [۱۹] محاسبه می‌گردد.

$$\rho_C = \rho_R V_R + \rho_M V_M \quad (3)$$

در این معادله V معرف کسر حجمی بوده و اندیس‌های C ، R و M به ترتیب به کامپوزیت، تقویت کننده و زمینه اشاره دارند. چگالی تئوری آلیاژ زمینه نیز بر حسب ترکیب شیمیایی آن از معادله ۴ که اساساً منتج شده از قانون مخلوط‌ها می‌باشد، قابل محاسبه است [۲۰].

$$\rho_{alloy} = \frac{100}{\frac{wt\%/A}{\rho_A} + \frac{wt\%/B}{\rho_B} + \dots} \quad (4)$$

در این معادله A و B معرف عناصر آلیاژی می‌باشند. نهایتاً پردازش داده‌ها در قالب تحلیل‌های آماری و رگرسیون با کمک نرم‌افزارهای مایکروسافت اکسل نسخه ۲۰۰۷ و سیگماپلات نسخه ۱۲ انجام شد. در این راستا صرفاً به حصول ضریب تعیین^{۱۲} (R^2) بالا اکتفا نگردید بلکه صحت رگرسیون‌های انجام پذیرفته با آزمون تی-آماره^{۱۳} و پی-مقدار^{۱۴} نیز محک زده شد.

نتایج و بحث

نتیجه آنالیز شیمیایی آلیاژ ریخته شده در جدول ۱ آورده شده است که تأیید می‌کند آلیاژ زمینه کامپوزیت در محدوده ترکیب شیمیایی آلیاژ منیزیمی ZX۵۱ قرار می‌گیرد. با معلوم شدن مقدار عناصر موجود در آلیاژ، با استفاده از معادله ۴ و به کمک جدول ۲ چگالی تئوری زمینه کامپوزیت محاسبه گردید. چگالی تئوری ذرات Al_2O_3 نیز برابر ۳/۹۶ g.cm^{-۳} در نظر گرفته شد [۲۱].

نتایج حاصل از محاسبه چگالی تئوری و اندازه‌گیری چگالی ظاهری برای کامپوزیت‌های ریختگی در جدول ۳ و برای کامپوزیت‌های اکستروود شده در جدول ۴ مندرج گردیده و مقادیر خطای استاندارد چگالی‌های اندازه‌گیری شده به طور تجربی نیز درون پرانتز ارائه شده است. نیازی به توضیح نیست که چگالی تئوری برای هر دو دسته کامپوزیت‌های ریختگی و اکستروود شده، قطع نظر از فرایند ساخت یا دمای اکستروژن یکسان خواهد بود و طبق قانون مخلوط‌ها (معادله ۳) صرفاً تابعی از کسر حجمی فاز تقویت کننده می‌باشد.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلیاژ زمینه کامپوزیت (ZX۵۱)

عنصر	Zn	Ca	Mn	Al	Si	Cu	Fe	Mg
مقدار (wt%)	۵/۲۸۱	۱/۲۰۵	۰/۰۲۲	۰/۰۲۰	۰/۰۰۳	۰/۰۰۸	۰/۰۰۳	بقیه

جدول ۲. چگالی تقریبی عناصر شیمیایی حاضر در آلیاژ زمینه کامپوزیت [۲۲]

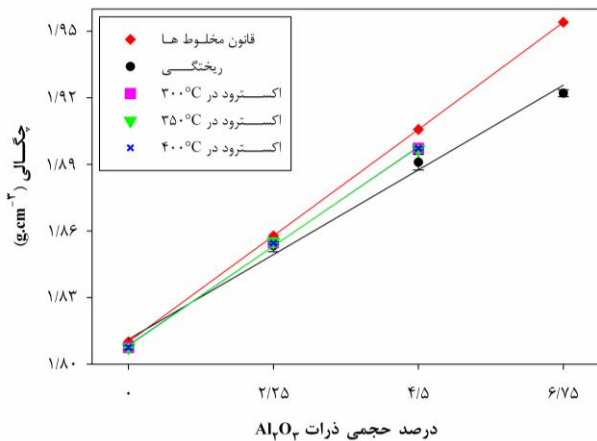
عنصر	Mg	Zn	Ca	Mn	Al	Si	Cu	Fe
چگالی (g.cm ^{-۳})	۱/۷۴	۷/۱۴	۱/۵۴	۷/۲	۲/۷	۲/۳۳	۸/۹۲	۷/۸۶

جدول ۳. مقادیر چگالی محاسبه شده و اندازه‌گیری شده برای کامپوزیت‌های ZX۵۱-Al_۲O_۳ ریختگی

چگالی نسبی	چگالی ظاهری (g.cm ^{-۳})	چگالی تئوری (g.cm ^{-۳})	مقدار ذرات Al _۲ O _۳ (vol%)
۰/۹۹۸۵	۱/۸۰۷۴ (±۰/۰۰۰۹)	۱/۸۱۰۱	۰
۰/۹۹۷۶	۱/۸۵۳۳ (±۰/۰۰۲۷)	۱/۸۵۷۸	۲/۲۵
۰/۹۹۲۲	۱/۸۹۱۰ (±۰/۰۰۳۵)	۱/۹۰۵۸	۴/۵
۰/۹۸۳۶	۱/۹۲۲۱ (±۰/۰۰۱۶)	۱/۹۵۴۰	۶/۷۵

جدول ۴. مقادیر چگالی ظاهری بدست آمده برای کامپوزیت‌های ZX۵۱-Al_۲O_۳ اکستروژن شده (واحد: g.cm^{-۳})

دمای اکستروژن (°C)	مقدار ذرات Al _۲ O _۳		
	۰ vol%	۲/۲۵ vol%	۴/۵ vol%
۳۰۰	۱/۸۰۷۵ (±۰/۰۰۰۳)	۱/۸۵۴۷ (±۰/۰۰۱۰)	۱/۸۹۷۳ (±۰/۰۰۰۶)
۳۵۰	۱/۸۰۷۵ (±۰/۰۰۰۴)	۱/۸۵۵۰ (±۰/۰۰۱۹)	۱/۸۹۶۹ (±۰/۰۰۰۳)
۴۰۰	۱/۸۰۷۵ (±۰/۰۰۰۸)	۱/۸۵۴۶ (±۰/۰۰۰۵)	۱/۸۹۷۲ (±۰/۰۰۰۵)



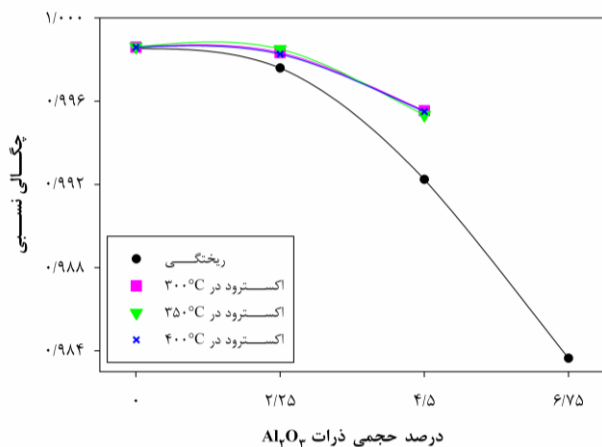
شکل ۲. چگالی تئوری و ظاهری کامپوزیت‌های ZX۵۱-Al_۲O_۳

دور از انتظار نیست که افزودن ذرات سرامیکی به زمینه‌ای فلزی تغییر اندکی در چگالی ایجاد کند. تغییر در چگالی بر اثر افزودن فاز تقویت کننده را می‌توان به کمک قانون مخلوط‌ها پیش بینی نمود که چگالی تئوری را بدست می‌دهد. نظر به این که چگالی Al_۲O_۳ بیش از دو برابر چگالی آلیاژ ZX۵۱ می‌باشد، انتظار می‌رود که با افزایش مقدار ذرات Al_۲O_۳ چگالی کامپوزیت‌های ZX۵۱-Al_۲O_۳ چه ریختگی و چه اکستروژن شده افزایش بیابد. این مطلب در شکل ۲ برای هر دو چگالی تئوری و ظاهری به روشنی پیداست. سکتیول و همکارانش [۲] نیز افزایش در چگالی کامپوزیت‌های Al_۲SiC بر اثر افزایش مقدار ذرات تقویت کننده را به چگالی بالاتر SiC (در مقایسه با آلیاژ آلومینیم) نسبت داده‌اند.

نکته حائز اهمیتی که در شکل ۲ به چشم می‌آید، اختلاف میان چگالی پیش بینی شده به صورت تئوری و چگالی‌های اندازه‌گیری شده به طور تجربی است؛ به گونه‌ای که چگالی ظاهری به ازای تمامی درصدهای حجمی، پایین‌تر از چگالی تئوری قرار دارد. محققین دیگری [۲۳] نیز مشاهدات مشابهی را گزارش کرده‌اند. ضمناً با افزایش درصد حجمی ذرات Al_2O_3 این اختلاف بیشتر شده و همچنین کامپوزیت‌های اکستروژده شده از چگالی تئوری، کمتر فاصله گرفته‌اند؛ یا به بیان دیگر کامپوزیت‌های اکستروژده شده چگالی بالاتری از کامپوزیت‌های ریختگی دارند. چگالی نسبی از این لحاظ کمیت گویاتری است که به صورت نسبت چگالی تجربی به چگالی تئوری تعریف می‌شود. مقادیر محاسبه شده چگالی نسبی برای کامپوزیت‌های ریختگی بیشتر در جدول ۳ ارائه گردیده و برای کامپوزیت‌های اکستروژده شده به طور مجزا در جدول ۵ درج شده است. روند تغییرات چگالی نسبی برای کامپوزیت‌های تولید شده را می‌توان در شکل ۴ مشاهده نمود.

جدول ۵. مقادیر چگالی نسبی بدست آمده برای کامپوزیت‌های $ZX51-Al_2O_3$ اکستروژده شده

دمای اکستروژن (°C)	مقدار ذرات Al_2O_3		
	۰ vol%	۲/۲۵ vol%	۴/۵ vol%
۳۰۰	۰/۹۹۸۶	۰/۹۹۸۳	۰/۹۹۵۵
۳۵۰	۰/۹۹۸۶	۰/۹۹۸۵	۰/۹۹۵۳
۴۰۰	۰/۹۹۸۶	۰/۹۹۸۳	۰/۹۹۵۵



شکل ۴. چگالی نسبی کامپوزیت‌های $ZX51-Al_2O_3$

معادلات تجربی بدست آمده از شکل ۲ ارتباط بین چگالی تئوری (معادله ۵) و چگالی ظاهری کامپوزیت‌های ریختگی (معادله ۶) و اکستروژده شده (معادلات ۷ الی ۹) را متناظر با درصد حجمی ذرات Al_2O_3 (vol%) به طور کمی بیان می‌دارد:

$$\rho_t = 0.021(\text{vol}\%) + 1/810 \quad R^2 = 1 \quad (5) \text{ قانون مخلوطها}$$

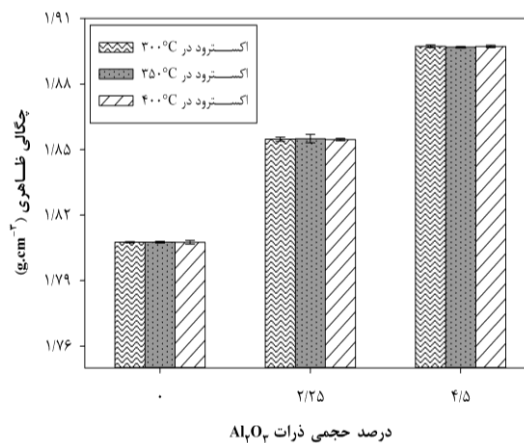
$$\rho_a = 0.017(\text{vol}\%) + 1/811 \quad R^2 = 0.992 \quad (6) \text{ ریختگی}$$

$$\rho_a = 0.0199(\text{vol}\%) + 1/8083 \quad R^2 = 0.9991 \quad 300^\circ\text{C} \quad (7)$$

$$\rho_a = 0.0199(\text{vol}\%) + 1/8085 \quad R^2 = 0.9987 \quad 350^\circ\text{C} \quad (8)$$

$$\rho_a = 0.0199(\text{vol}\%) + 1/8082 \quad R^2 = 0.9992 \quad 400^\circ\text{C} \quad (9)$$

چگالی تئوری کامپوزیت‌ها طبق قانون مخلوطها از تابعی خطی پیروی می‌کند [۲]. چنانچه مقدار چگالی تئوری آلیاژ $ZX51$ ($g.cm^{-3}$) Al_2O_3 تئوری (جدول ۳) و چگالی تئوری Al_2O_3 ($g.cm^{-3}$) (۳/۹۶) در معادله ۳ قرار داده شود و البته کسر حجمی به درصد حجمی تبدیل گردد، معادله حاصله با نتیجه بدست آمده از رگرسیون (معادله ۵) همسان خواهد بود. در ضمن ملاحظه می‌شود که چگالی ظاهری کامپوزیت‌های تولید شده نیز تابع خطی از درصد حجمی ذرات Al_2O_3 دارند. از دیگر نکات قابل توجه عدم تأثیر دمای اکستروژن بر چگالی کامپوزیت‌های اکستروژده شده می‌باشد که از برهم افتادگی منحنی‌های مربوطه در شکل ۲ نمایان است. این مطلب همچنین با رجوع به جدول ۴ و یا مقایسه معادلات ۷ تا ۹ قابل استنباط می‌باشد و در شکل ۳ نیز مشاهده می‌شود.

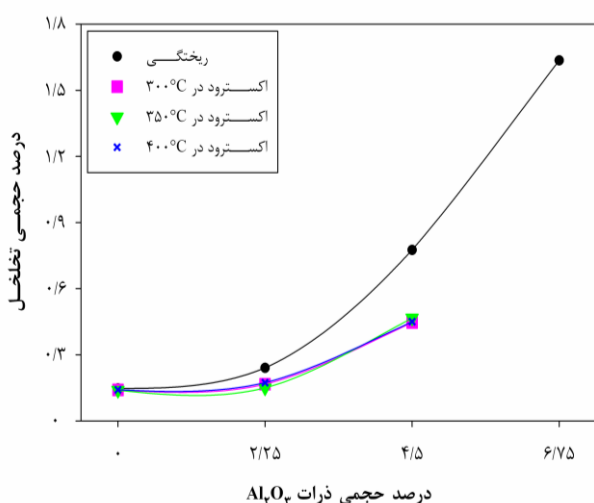


شکل ۳. اثر دمای اکستروژن بر چگالی ظاهری کامپوزیت‌های اکستروژده شده

ریختگی و اکستروژن شده کاهش یافته و همچنین چگالی نمونه‌های ریختگی پایین‌تر از نمونه‌های اکستروژن شده با مقدار تقویت کننده یکسان بوده است. وی وجود تخلخل را دلیل این امر قلمداد کرده و در واقع اختلاف بین چگالی تئوری و چگالی تجربی توسط محققین عموماً به وجود تخلخل نسبت داده می‌شود [۱۲، ۲۳]. میزان تخلخل تخمین زده شده برای کامپوزیت‌های تولیدی در جدول ۶ مندرج گشته و در شکل ۶ ترسیم شده است.

جدول ۶. درصد حجمی تخلخل‌های بسته برای کامپوزیت‌های ساخته شده

مقدار ذرات (vol%) Al_2O_3	ریختگی	اکستروژن شده در دمای		
		۳۰۰°C	۳۵۰°C	۴۰۰°C
۰	۰/۱۴۷۲	۰/۱۴۰۵	۰/۱۳۸۹	۰/۱۴۱۲
۲/۲۵	۰/۲۴۰۵	۰/۱۶۶۶	۰/۱۴۹۸	۰/۱۷۳۸
۴/۵	۰/۷۷۵۸	۰/۴۴۶۲	۰/۴۶۶۶	۰/۴۵۰۱
۶/۷۵	۱/۶۳۵۸	-	-	-



شکل ۶. میزان تخلخل تخمینی در کامپوزیت‌های $ZX51-Al_2O_3$

معادلات تجربی بدست آمده از شکل ۶ (معادلات ۱۴ الی ۱۷) حاکی از تابعیت درجه دوم درصد حجمی تخلخل‌های بسته از درصد حجمی ذرات Al_2O_3 می‌باشد.

(۱۴) ریختگی

$$\phi = 0.033 (\text{vol}\%)^2 + 0.109 \quad R^2 = 0.998$$

معادلات تجربی بدست آمده از شکل ۴ (معادلات ۱۰ الی ۱۳) نشانگر تابعیت درجه دوم چگالی نسبی (ρ_r) از درصد حجمی ذرات Al_2O_3 می‌باشد.

(۱۰) ریختگی

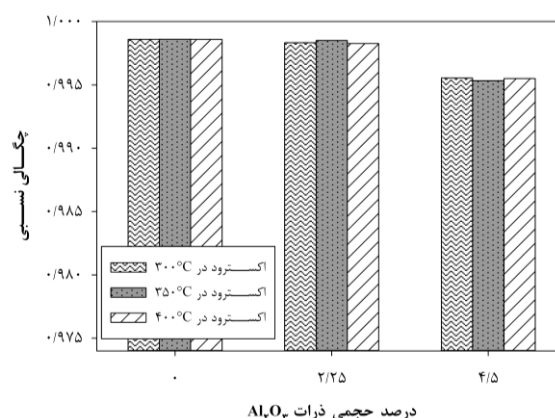
$$\rho_r = -0.0003 (\text{vol}\%)^2 + 0.9989 \quad R^2 = 0.9979 \quad 300^\circ\text{C} \quad (11)$$

$$\rho_r = -0.0003 (\text{vol}\%)^2 + 0.0004 (\text{vol}\%) + 0.999 \quad R^2 = 1 \quad 350^\circ\text{C} \quad (12)$$

$$\rho_r = -0.0003 (\text{vol}\%)^2 + 0.0006 (\text{vol}\%) + 0.999 \quad R^2 = 1 \quad 400^\circ\text{C} \quad (13)$$

$$\rho_r = -0.0002 (\text{vol}\%)^2 + 0.0004 (\text{vol}\%) + 0.999 \quad R^2 = 1$$

همانطور که در شکل ۴ مشهود است، اولاً چگالی نسبی تمامی کامپوزیت‌های تولیدی از مقدار ایده‌آل یک فاصله دارد؛ ثانیاً با افزایش درصد حجمی ذرات Al_2O_3 ، چگالی نسبی کامپوزیت‌ها رو به کاستی می‌گذارد؛ ثالثاً چگالی نسبی کامپوزیت‌های اکستروژن شده بالاتر از نمونه‌های ریختگی مشابه خود می‌باشد؛ و رابعاً منحنی‌های مربوط به کامپوزیت‌های اکستروژن شده تقریباً برهم افتادگی دارند؛ که به معنای مستقل بودن چگالی نسبی از دمای اکستروژن می‌باشد و این مطلب را می‌توان در شکل ۵ نیز مشاهده کرد.



شکل ۵. اثر دمای اکستروژن بر چگالی نسبی کامپوزیت‌های اکستروژن شده

در پژوهش انجام پذیرفته توسط عزیززاده و همکارانش [۱۵] نیز با افزایش مقدار ذرات تقویت کننده چگالی نسبی در کامپوزیت‌های

$$300^{\circ}\text{C} \quad (15)$$

$$\varphi = 0.025(\text{vol}\%)^2 - 0.045(\text{vol}\%) + 0.140 \quad R^2 = 1$$

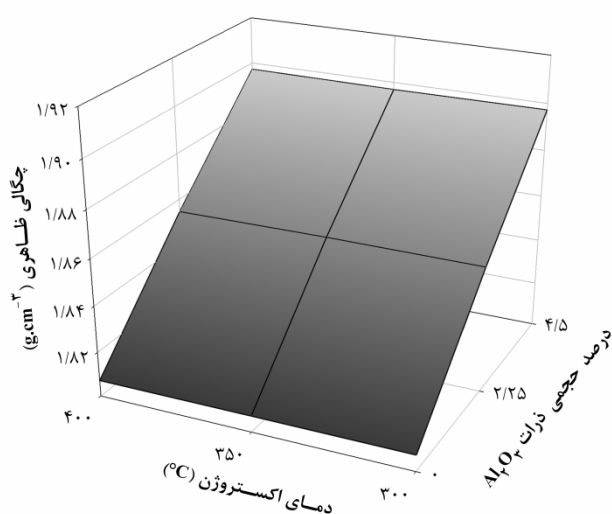
$$350^{\circ}\text{C} \quad (16)$$

$$\varphi = 0.030(\text{vol}\%)^2 - 0.063(\text{vol}\%) + 0.139 \quad R^2 = 1$$

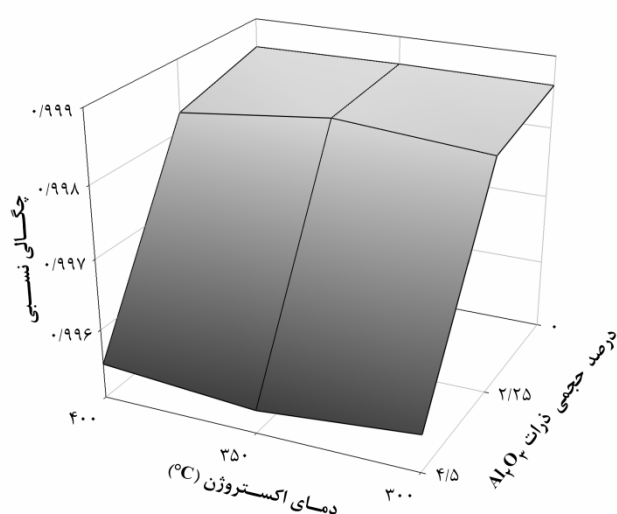
$$400^{\circ}\text{C} \quad (17)$$

$$\varphi = 0.024(\text{vol}\%)^2 - 0.040(\text{vol}\%) + 0.141 \quad R^2 = 1$$

در شکل‌های ۸ تا ۱۰ ارتباط کمیت‌های چگالی ظاهری، چگالی نسبی، و درصد حجمی تخلخل در کامپوزیت‌های اکسترود شده بر حسب متغیرهای مورد مطالعه در این پژوهش (درصد حجمی ذرات Al_2O_3 و دمای اکستروژن) را به طور توأمان می‌توان مشاهده نمود. ضمناً این ارتباط در معادلات ۱۹ الی ۲۱ نیز به صورت کمی بیان گردیده است.



شکل ۸. چگالی ظاهری کامپوزیت‌های اکسترود شده بر حسب درصد حجمی ذرات Al_2O_3 و دمای اکستروژن

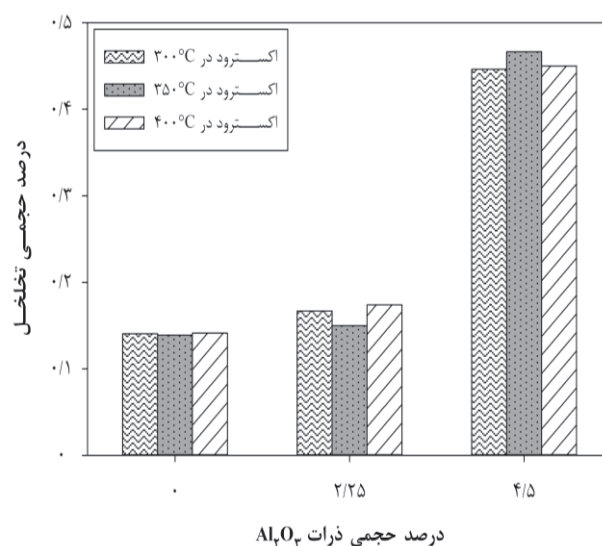


شکل ۹. چگالی نسبی کامپوزیت‌های اکسترود شده بر حسب درصد حجمی ذرات Al_2O_3 و دمای اکستروژن

ببندودماوان و همکارانش [۲۴] نیز گزارش کرده‌اند که در کامپوزیت‌های $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}$ ساخته شده به روش ریخته‌گری گردابی، ارتباط بین درصد حجمی تخلخل متناظر با درصد حجمی ذرات تقویت کننده از نوع چندجمله‌ای درجه دوم به صورت معادله ۱۸ می‌باشد:

$$\varphi = -0.006(\text{vol}\%)^2 + 0.36(\text{vol}\%) + 2.19 \quad R = 0.9998 \quad (18)$$

از این گذشته با توجه به عدم تأثیر دمای اکستروژن بر چگالی ظاهری و چگالی نسبی کامپوزیت‌های اکسترود شده در این پژوهش، توقع آن می‌رفت که تخلخل نیز رفتار مشابهی از خود نشان دهد و همانطور که در شکل ۶ و همچنین شکل ۷ می‌توان مشاهده نمود این مطلب به واقعیت پیوسته است.

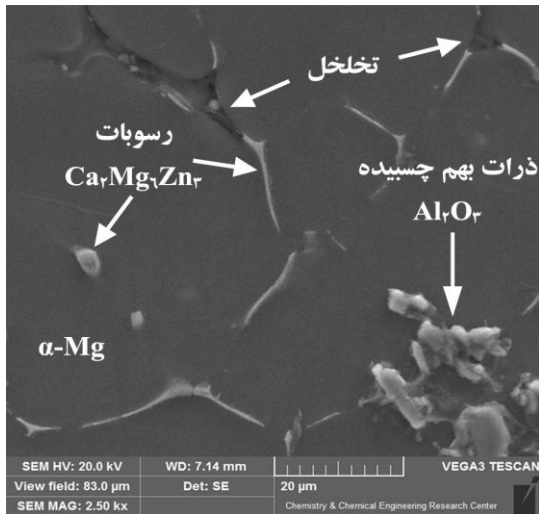


شکل ۷. اثر دمای اکستروژن بر میزان تخلخل کامپوزیت‌های اکسترود شده

$$\rho_a = 0.0199 (\text{vol}\%) - 7.4 \times 10^{-5} (T) + 1.8086 \quad R^2 = 0.999 \quad (19)$$

$$\rho_r = -0.0003 (\text{vol}\%)^2 + 0.0005 (\text{vol}\%) - 3.9 \times 10^{-5} (T) + 0.9987 \quad R^2 = 0.9972 \quad (20)$$

$$\varphi = 0.026 (\text{vol}\%)^2 - 0.049 (\text{vol}\%) + 3.9 \times 10^{-5} (T) + 0.126 \quad R^2 = 0.997 \quad (21)$$



شکل ۱۱. تصویر SEM از ریزساختار کامپوزیت ۲/۲۵ vol% ریختگی

به طور کلی تشکیل تخلخل در کامپوزیت‌های زمینه فلزی به هنگام تولید با استفاده از فرایندهای ساخت موجود، اجتناب ناپذیر است [۲۴]. در خصوص ریخته‌گری گردابی که در این پژوهش به عنوان فرایند ساخت اولیه برای تولید کامپوزیت‌های مورد مطالعه به کار بسته شد، همزدن باعث جذب هوا و گاز به درون مذاب و حبس آن می‌گردد که عاملی برای ایجاد تخلخل است [۲۵]. مخصوصاً اگر نزدیک سطح مذاب تلاطم بوجود آید [۲۶] یا بر سطح مذاب گرداب (ورتکس) تشکیل شود [۳]. اما اگر دلیل فوق صرفاً مسبب ایجاد تخلخل در کامپوزیت‌های مورد مطالعه در این پژوهش باشد، با توجه به یکسان بودن شرایط ساخت و پارامترهای ریخته‌گری گردابی (دمای مذاب، سرعت و مدت همزدن، شکل هندسی همزن و غیره) برای تمامی کامپوزیت‌های تولیدی می‌بایست میزان تخلخل تقریباً یکسانی ایجاد می‌شد. چرا که حبس گاز اصولاً به نحوه همزدن، نحوه مذاب ریزی، زمان نگهداری، سرعت همزدن، اندازه و موقعیت همزن، ... بستگی دارد [۲۵]. لذا بالا رفتن میزان تخلخل بر اثر افزایش مقدار ذرات تقویت کننده را که در این پژوهش نیز مشاهده می‌گردد (شکل ۶) توجیه

در این معادلات T معرف دمای اکستروژن می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود عدم تأثیر دمای اکستروژن بر خواص فیزیکی مورد مطالعه از ضرایب بسیار کوچک این متغیر در معادلات ۱۹ الی ۲۱ هویداست. با صرف نظر از دمای اکستروژن و انجام مجدد رگرسیون، معادلات تصحیح شده ۲۲ الی ۲۴ برای کامپوزیت‌های اکستروژن شده بدست می‌آید:

$$\rho_a = 0.0199 (\text{vol}\%) + 1.8083 \quad R^2 = 0.999 \quad (22)$$

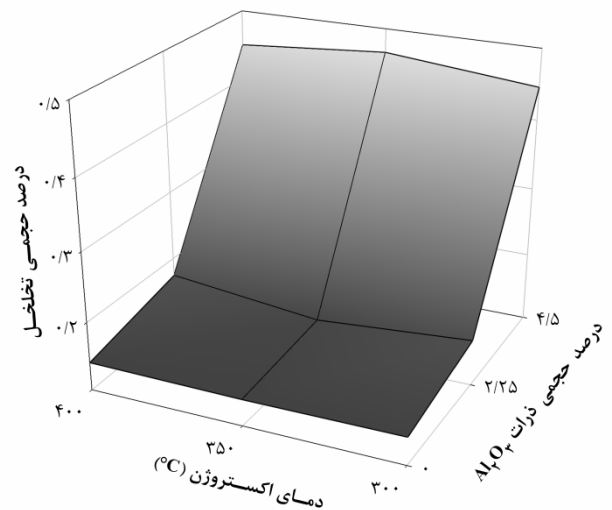
$$\rho_r = -0.0003 (\text{vol}\%)^2 + 0.0005 (\text{vol}\%) \quad (23)$$

$$+ 0.9986 \quad R^2 = 0.9971$$

$$\varphi = 0.026 (\text{vol}\%)^2 - 0.049 (\text{vol}\%) \quad (24)$$

$$+ 0.140 \quad R^2 = 0.997$$

بررسی‌های ریزساختاری نیز وجود تخلخل در کامپوزیت‌های ریختگی را به تأیید رساند که به عنوان نمونه در شکل ۱۱ ریزساختار کامپوزیت ریختگی حاوی ۲/۲۵ vol% Al₂O₃ نشان داده شده است.



شکل ۱۰. میزان تخلخل کامپوزیت‌های اکستروژن شده بر حسب درصد حجمی ذرات Al₂O₃ و دمای اکستروژن

نمی‌کند. از طرفی به دلیل حضور تقویت کننده‌های جامد، مذاب منیزیم از ویسکوزیته بالایی برخوردار خواهد بود که هر چه درصد حجمی ذرات بیشتر و یا دمای مذاب پایین‌تر باشد، ویسکوزیته بالاتر می‌رود. افزایش ویسکوزیته خروج گازهای حبس شده و یا حل شده را از مذاب بیش از پیش با مشکل مواجه نموده و منجر به تشکیل تخلخل بیشتر می‌شود. با توجه به عدم پیشگرم کردن ذرات Al_2O_3 در این پژوهش و در نتیجه افزایش ویسکوزیته، محتمل به نظر می‌رسد که تخلخل‌های موجود در کامپوزیت‌های مورد مطالعه نشأت گرفته از ورود هوا و گاز همراه ذرات به مذاب و هیدروژن حل شده باشد. منشأ عمده دیگر برای تشکیل تخلخل، انقباض حین انجماد است [۱۴]. با توجه به درصد بالای انقباض حجمی حین انجماد آلیاژهای منیزیم، حدود ۴/۲٪ [۲۷]، تشکیل تخلخل انقباضی در کامپوزیت‌های ساخته شده در پژوهش حاضر نیز دور از انتظار نیست.

از این گذشته، در کامپوزیت‌های ریختگی تولید شده در این پژوهش حضور تخلخل در فصل مشترک کامپوزیت مشاهده نگردید (شکل ۱۱). به طور کلی تشکیل تخلخل در فصل مشترک کامپوزیت منوط به وجود مکان‌های مساعد جوانه‌زنی همانند فصل مشترک تر نشده می‌باشد. به بیان دیگر جوانه‌زنی تخلخل بر فصل مشترک‌هایی که ویژگی ترشوندگی خوبی دارند دشوار است [۱۴]. از این لحاظ مذاب منیزیم به خاطر قابلیت زیاد در ترکندگی اکثر الیاف و ذرات تقویت کننده از مزیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار است [۲۸]. علاوه بر این گزارش شده که سیستم « $Mg+Al_2O_3$ » رفتار ترشوندگی خوبی از خود نشان می‌دهد [۲۷]. خوشه‌ای شدن و بهم چسبیدن^{۱۵} ذرات تقویت کننده نیز عامل دیگری برای ایجاد تخلخل‌های فصل مشترکی است [۱۲]. بهم چسبیدن تقویت کننده‌ها مانع از جریان پیدا کردن مذاب به درون خوشه‌ها می‌شود و پیش از این که مذاب بتواند میان ذرات به هم چسبیده نفوذ کند، ممکن است انجماد کامپوزیت به اتمام برسد و لذا در این نواحی ریزحفراتی بوجود بیاید. خصوصاً اگر ویسکوزیته مذاب زیاد باشد فضاهای موجود میان ذرات مجاور به خوبی پر نمی‌گردد. ضمناً بدیهی است که هر چه درصد حجمی تقویت کننده‌ها در کامپوزیت بالاتر باشد بهم چسبیدن ذرات محتمل‌تر بوده و تعداد خوشه‌های بیشتری وجود خواهد داشت.

هر چند بررسی ریزساختار کامپوزیت‌های ریختگی، خوشه‌ای شدن شدید ذرات Al_2O_3 را نشان داد که در شکل ۱۱ نیز قابل مشاهده است، اما نشانه‌ای از وجود تخلخل در بین ذرات خوشه‌ای شده به چشم نخورد. ذکر این نکته ضروری است که اگر تخلخل‌های موجود در یک کامپوزیت بر مبنای موقعیت و محل قرارگیری به دو گروه (۱) تخلخل‌های واقع در فصل مشترک و نواحی مجاور، و (۲) تخلخل‌های واقع در زمینه و به دور از تقویت کننده‌ها دسته‌بندی شوند [۱۱] تخلخل‌های گروه (۱) مسلماً اثرات به مراتب زیان‌بارتری به همراه دارند. چرا که وقتی تخلخل‌ها در مرز زمینه با تقویت کننده قرار می‌گیرند، فصل مشترک کامپوزیت در آن قسمت شدیداً معیوب و ضعیف می‌باشد و در نتیجه اتصال میان زمینه و تقویت کننده مستحکم نخواهد بود. بدین ترتیب انتقال بار از زمینه به ذرات به خوبی صورت نمی‌پذیرد و استحکام بخشی کافی بدست نمی‌آید. ضمناً تقویت کننده‌ها می‌توانند تحت تنش‌های پایینی، از زمینه منفصل^{۱۶} گردند [۱۲]. حتی هدایت حرارتی نیز از مستحکم بودن اتصال در فصل مشترک بین زمینه و تقویت کننده تأثیر می‌پذیرد [۲۹]. از این منظر کامپوزیت‌های ساخته شده در این پژوهش از مزیت قابل توجهی برخوردارند.

با نگاهی دوباره به شکل ۶ مشاهده می‌شود که هر چند میزان تخلخل در هر دو دسته نمونه‌های ریختگی و اکستروژن شده با افزایش مقدار ذرات تقویت کننده افزایش یافته است، با این حال میزان تخلخل در کامپوزیت‌های ریختگی بالاتر از کامپوزیت‌های اکستروژن شده می‌باشد. دلیل این مطلب، اعمال تنش‌های حین شکل‌دهی (به‌خصوص برای اکستروژن گرم) می‌باشد که قادر است تخلخل را کاهش دهد و به عنوان راهکاری برای رفع تخلخل‌ها مطرح باشد. با اعمال فرایندهای شکل‌دهی از جمله اکستروژن به سبب شکسته شدن خوشه‌های ذرات بهم چسبیده، از میزان تخلخل کاسته خواهد شد [۳۰]؛ که البته با توجه به عدم مشاهده این نوع تخلخل در ریزساختار کامپوزیت‌های تولیدی، مکانیزم مذکور برای پژوهش حاضر صادق نمی‌باشد. مکانیزم دیگری که کاهش تخلخل بر اثر اکستروژن را تشریح می‌کند سیلان فلز/آلیاژ تحت مؤلفه‌های تنش برشی است که موجب پر شدن حفرات می‌شود [۳۱]. در ضمن تنش‌های هیدروستاتیکی فشاری بزرگ از

جمله ویژگی‌های فرایند اکستروژن به حساب می‌آید که این تنش‌ها بستن تخلخل‌های کوچک یا فاصله‌های خالی در فصل مشترک را موجب می‌شوند [۳۲].

نتیجه‌گیری

در این پژوهش کامپوزیت زمینه منیزیمی ZX5۱ تقویت شده با درصد‌های حجمی مختلف از ذرات میکرونی Al_2O_3 به روش ریخته‌گری گردابی و متعاقب آن اکستروژن گرم ساخته شد. با اندازه‌گیری دقیق چگالی نمونه‌های تولیدی امکان بررسی خواص فیزیکی شامل چگالی ظاهری، چگالی نسبی و درصد حجمی تخلخل در کامپوزیت‌ها فراهم آمد و همچنین به منظور تحلیل آماری از رگرسیون کمک گرفته شد. ضمناً به گمانه‌زنی در خصوص منشأ احتمالی تخلخل در کامپوزیت‌های تولیدی پرداخته شد. بر اساس ارزیابی‌های انجام پذیرفته می‌توان نتیجه گرفت:

۱- با افزایش درصد حجمی ذرات Al_2O_3 در هر دو دسته کامپوزیت‌های ریختگی و اکستروژن شده، چگالی ظاهری و درصد حجمی تخلخل افزایش، و چگالی نسبی کاهش یافت. چگالی ظاهری از درصد حجمی ذرات Al_2O_3 به صورت خطی تبعیت نمود، در حالی که چگالی نسبی و درصد حجمی تخلخل تابعیتی درجه دوم از خود نشان دادند. با این حال به ازای تمامی درصد‌های حجمی از ذرات Al_2O_3 ، چگالی ظاهری و چگالی نسبی کامپوزیت‌های اکستروژن شده همواره بالاتر از کامپوزیت‌های ریختگی قرار گرفت، اما میزان تخلخل رفتاری برعکس از خود نشان داد.

۲- بر خلاف درصد حجمی ذرات Al_2O_3 که به طور جدی بر خواص فیزیکی اثر گذاشت، دمای اکستروژن تأثیر محسوسی بر چگالی ظاهری، چگالی نسبی و درصد حجمی تخلخل در کامپوزیت‌های اکستروژن شده نداشت.

۳- مطالعات ریزساختاری نیز حضور تخلخل در کامپوزیت‌های ریختگی را تأیید نمود که احتمالاً برخاسته از گازهای حل شده در مذاب طی فرایند ساخت و نیز انقباض حین انجماد باشد، اما خوشبختانه تخلخل‌های فصل مشترکی ناشی از خوشه‌ای شدن ذرات و یا ترشوندگی ضعیف در ریزساختار

کامپوزیت‌های تولید شده مشاهده نگردید. البته امکان تشخیص این که از میزان تخلخل تخمین زده شده چه سهمی به گازهای حل شده و چه سهمی به انقباض حین انجماد اختصاص دارد، چندان میسر نیست.

۴- با انجام عملیات اکستروژن گرم از میزان تخلخل کاسته شد (حداکثر حدود ۴۱٪ به طور متوسط برای کامپوزیت‌های حاوی ۴/۵ درصد حجمی ذرات Al_2O_3) اما به مقدار صفر نرسید که ممکن است به سبب ناکافی بودن شرایط اکستروژن برای بستن کامل تخلخل‌ها بوده باشد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از حمایت‌های دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی در راستای اجرای این پژوهش قدردانی به عمل می‌آورند.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Stir Casting
- 2- Spray Deposition
- 3- Friction Stir Processing
- 4- Pressureless Infiltration
- 5- Squeeze Infiltration
- 6- Delamination
- 7- Particle Size Analysis (PSA)
- 8- Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry (ICP-OES)
- 9- Scanning Electron Microscope
- 10- SARTORIUS
- 11- Rule Of Mixtures
- 12- Coefficient of Determination
- 13- t-statistic
- 14- P-value
- 15- Agglomeration
- 16- Debonding

منابع و مراجع

- [1] S. Naher, D. Brabazon, and L. Looney, "Simulation of the stir casting process", *Journal of Materials Processing Technology*, Vols. 143-144, pp. 567-571, 2003.
- [2] A. Sakthivel, R. Palaninathan, R. Velmurugan, and P. Raghothama Rao, "Production and mechanical properties of SiCp particle-reinforced 2618 aluminum alloy composites", *Journal of Materials Science*, Vol. 43, pp. 7047-7056, 2008.
- [3] J. Hashim, L. Looney, and M. S. J. Hashmi, "Metal matrix composites: Production by the stir casting method",

- [15] A. Alizadeh, E. Taheri-Nassaj, and M. Hajizamani, "Hot extrusion process effect on mechanical behavior of stir cast Al based composites reinforced with mechanically milled B₄C nanoparticles", *Journal of Materials Science and Technology*, Vol. 27, pp. 1113-1119, 2011.
- [16] N. Altinkok, and R. Koker, "Modelling of the prediction of tensile and density properties in particle reinforced metal matrix composites by using neural networks", *Materials and Design*, Vol. 27, pp. 625-631, 2006.
- [17] Y. D. Huang, L. Froyen, and M. Wevers, "Quality control and nondestructive tests in metal matrix composites", *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 20, pp. 113-132, 2001.
- [18] D. S. Prasad, C. Shoba, and N. Ramanaiyah, "Investigations on mechanical properties of aluminum hybrid composites", *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 3, pp. 79-85, 2014.
- [19] N. Chawla, and K. K. Chawla, "Metal Matrix Composites", Second Edition, New York: Springer Science+Business Media, 2013.
- [۲۰] ر. رحمانی گرجی، "بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه منیزیومی Al_{۱۰}O_۳/ZrO_۲ ساخته شده به روش ریخته‌گری گردابی و اکستروژن گرم"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، ۱۳۹۳.
- [21] Md. Ershadul Alam, A. M. S. Hamouda, Q. B. Nguyen, and M. Gupta, "Improving microstructural and mechanical response of new AZ41 and AZ51 magnesium alloys through simultaneous addition of nano-sized Al₂O₃ particulates and Ca", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 574, pp. 565-572, 2013.
- [22] J. Park, and R. S. Lakes, "Biomaterials: An introduction", Third Edition, Springer Science+Business Media LLC, 2007.
- [23] V. Bharath, M. Nagaral, V. Auradi, and S. A. Kori, "Preparation of 6061Al-Al₂O₃ MMC's by stir casting and evaluation of mechanical and wear properties", *Procedia Materials Science*, Vol. 6, pp. 1658-1667, 2014.
- [24] P. N. Bindumadhavan, T. K. Chia, M. Chandrasekaran, H. K. Wah, L. N. Lam, and O. Prabhakar, "Effect of particle-porosity clusters on tribological behavior of cast aluminum alloy A356-SiCp metal matrix composites", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 315, pp. 217-226, 2001.
- [25] H. Z. Ye, and X. Y. Liu, "Review of recent studies in magnesium matrix composites", *Journal of Materials Science*, Vol. 39, pp. 6153-6171, 2004.
- [26] H. Su, W. Gao, H. Zhang, H. Liu, J. Lu, and Z. Lu, "Optimization of stirring parameters through numerical simulation for the preparation of aluminum matrix composite by stir casting process", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 132, pp. 011001-011007, 2010.
- [4] M. Schobel, W. Altendorfer, H. P. Degischer, S. Vaucher, T. Buslaps, M. Di Michiel, and M. Hofmann, "Internal stresses and voids in SiC particle reinforced aluminum composites for heat sink applications", *Composites Science and Technology*, Vol. 71, pp. 724-733, 2011.
- [5] M. Habibnejad-Korayem, R. Mahmudi, and W. J. Poole, "Enhanced properties of Mg-based nano-composites reinforced with Al₂O₃ nano-particles", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 519, pp. 198-203, 2009.
- [6] I. Montealegre Melendez, E. Neubauer, and H. Danninger, "Consolidation of titanium matrix composites to maximum density by different hot pressing techniques", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, pp. 4466-4473, 2010.
- [7] J. S. Zhang, X. J. Liu, H. Cui, X. J. Duan, Z. Q. Sun, and G. L. Chen, "Microstructure and properties of spray-deposited 2014+15 vol pct SiC particulate-reinforced metal matrix composite", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 28A, pp. 1261-1269, 1997.
- [8] M. Barmouz, and M. K. Besharati Givi, "Fabrication of in situ Cu/SiC composites using multi-pass friction stir processing: Evaluation of microstructural, porosity, mechanical and electrical behavior", *Composites: Part A*, Vol. 42, pp. 1445-1453, 2011.
- [9] A. A. Hamid, P. K. Ghosh, S. C. Jain, and S. Ray, "Influence of particle content and porosity on the wear behaviour of cast in situ Al(Mn)-Al₂O₃(MnO₂) composite", *Wear*, Vol. 260, pp. 368-378, 2006.
- [10] F. Ortega-Celaya, M. I. Pech-Canul, J. Lopez-Cuevas, J. C. Rendon-Angeles, and M. A. Pech-Canul, "Microstructure and impact behavior of Al/SiCp composites fabricated by pressureless infiltration with different types of SiCp", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 183, pp. 368-373, 2007.
- [11] R. Etemadi, K. M. Pillai, P. K. Rohatgi, and S. A. Hamidi, "On porosity formation in metal matrix composites made with dual-scale fiber reinforcements using pressure infiltration process", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 46A, pp. 2119-2133, 2015.
- [12] C. Tekmen, I. Ozdemir, U. Cocen, and K. Onel, "The mechanical response of Al-Si-Mg/SiCp composite: influence of porosity", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 360, pp. 365-371, 2003.
- [13] M. Schobel, G. Requena, G. Fiedler, D. Tolnai, S. Vaucher, and H. P. Degischer, "Void formation in metal matrix composites by solidification and shrinkage of an AlSi7 matrix between densely packed particles", *Composites: Part A*, Vol. 66, pp. 103-108, 2014.
- [14] O. J. Ilegbusi, and J. Yang, "Porosity nucleation in metal matrix composites", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 31A, pp. 2069-2074, 2000.

- [30] R. Rahmani Fard, and F. Akhlaghi, "Effect of extrusion temperature on the microstructure and porosity of A356-SiCp composites", *Journal of Materials Processing Technology*, Vols. 187-188, pp. 433-436, 2007.
- [31] A. R. Kennedy, and S. M. Wyatt, "The effect of processing on the mechanical properties and interfacial strength of aluminium/TiC MMCs", *Composites Science and Technology*, Vol. 60, pp. 307-314, 2000.
- [۳۲] ج. ای. دیترا، "متالورژی مکانیکی"، ترجمه ش. شهیدی، چاپ دوم، تهران: مرکز نشر دانشگاهی، ۱۳۸۶.
- 061007 (1-7), 2010.
- [27] K. U. Kainer, "*Magnesium: Alloys and technology*", Translated by F. Kaiser, Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, 2003.
- [28] I. J. Polmear, "*Light alloys: From traditional alloys to nanocrystals*", Fourth Edition, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006.
- [29] C. Tatar, and N. Ozdemir, "Investigation of thermal conductivity and microstructure of the α -Al₂O₃ particulate reinforced aluminum composites (Al/Al₂O₃-MMC) by powder metallurgy method", *Physica B*, Vol. 405, pp. 896-899, 2010.