



بررسی خواص مکانیکی و متالورژیکی نمونه‌های کامپوزیت فلزی Al6061/SiC حاصل از ریخته‌گری فراصوتی

امیرحسین مقیمی¹، رضوان عابدینی^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

* تهران، صندوق پستی 16846-13114، rezvanabedini@iust.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

با رشد روز افزون استفاده از کامپوزیت‌های پایه فلزی در صنایع پیشرفته، روش‌های مختلف ساخت قطعات از جنس این کامپوزیت‌ها بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. یکی از این روش‌ها استفاده از فناوری فراصوت توان بالا در فرایند ریخته‌گری می‌باشد. بدین منظور در پژوهش حاضر اثر اعمال ارتعاشات فراصوتی بر ریخته‌گری آلیاژ آلومینیوم 6061 (Al6061) و کامپوزیت فلزی پایه آلومینیوم 6061 تقویت شده با میکروذرات کاربید سیلیسیوم (Al6061/SiC) مورد بررسی قرار گرفته است. فرایند ریخته‌گری در دو حالت با و بدون اعمال ارتعاشات فراصوتی برای دو ماده ذکر شده انجام و اثر زمان اعمال ارتعاشات فراصوتی (1 و 2 دقیقه) بر پارامترهای خروجی فرایند شامل سختی و استحکام فشاری و اندازه دانه و توزیع اندازه ذرات تقویتی SiC ارزیابی شد. در عین حال در آزمون‌های مختلف اثر ذرات تقویت کننده (SiC) و اعمال ارتعاشات فراصوتی به طور مستقل نیز مورد توجه قرار گرفت. نتایج نشان داد در هر دو نمونه آلومینیوم پایه و کامپوزیت آلومینیوم-کاربید سیلیسیوم اعمال ارتعاشات فراصوتی موجب ایجاد ساختار ریزدانه در ریخته‌گری شده (تا 57.8 درصد کاهش اندازه دانه) و در نتیجه سختی (تا 37.7 درصد) و استحکام فشاری (تا 12.8 درصد) نمونه افزایش یافته است. همچنین در نمونه‌های کامپوزیت (Al6061/SiC) اعمال ارتعاشات فراصوتی موجب توزیع ریزتر و یکنواخت تر ذرات SiC در ماده پایه آلومینیوم شده است. این پدیده‌ها به اثر کاویتاسیون و جریان فراصوتی در مذاب نسبت داده شدند.

دریافت: 1404/05/27

پذیرش: 1405/01/29

کلیدواژگان

ریخته‌گری فراصوتی، کاویتاسیون، کامپوزیت زمینه فلزی، Al6061/SiC، استحکام فشاری

Investigation of mechanical and metallurgical properties of Al6061/sic metal matrix composite obtained by ultrasonic casting

Amir Hosain Moghimi¹, Rezvan Abedini^{1*}

1- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, rezvanabedini@iust.ac.ir

Keywords

Ultrasonic casting,
Cavitation,
Al6061/SiC,
Metal Matrix Composite (MMC),
Compressive strength

Abstract

As Metal Matrix Composites (MMC) are increasingly used in advanced industries, various manufacturing methods for parts made from these materials have attracted growing attention. One such method is the use of high-power ultrasound during the casting process. This study investigates the effect of ultrasonic vibrations during the casting of aluminum alloy 6061 (Al6061) and Al6061/SiC metal matrix composites. Casting was performed in two modes (with and without ultrasonic vibrations) for both materials, and the effect of ultrasonic time (1 and 2 minutes) on output parameters—including hardness, compressive strength, grain size, and the size distribution of SiC reinforcing particles—was evaluated. Additionally, the independent effects of the SiC reinforcement and ultrasonic vibrations were examined in separate tests. Results show that for both Al6061 and Al6061/SiC composite, applying ultrasonic vibrations produced a finer-grained structure in the casting, with grain-size reductions of up to 57.8%. Consequently, hardness increased by up to 37.7% and compressive strength by up to 12.8%. Moreover, in the composites, ultrasonic vibrations yielded a finer and more uniform distribution of SiC particles within the aluminum matrix. These effects are attributed to cavitation and ultrasonic streaming in the metal melt.

1- مقدمه

ساخت بسیاری از قطعات در صنایع پیشرفته امروز بدل نموده است. با این وجود نواقصی در روش‌های ریخته‌گری وجود دارد که با وجود ابزارهای مختلف راهکار جامعی برای رفع آن‌ها وجود ندارد. مهمترین این معایب ایجاد تخلخل

ریخته‌گری یکی از قدیمی‌ترین فرایندهای ساخت و تولید در زندگی بشر می‌باشد. اما مزایای این فرایند در ساخت قطعات پیچیده، آن را به گزینه اصلی

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Moghimi, A. H., Abedini, R., "Investigation of mechanical and metallurgical properties of Al6061/SiC metal matrix composite obtained by ultrasonic casting," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 12, No. 3, pp. 2823-2830, 2026.
https://doi.org/10.22068/jstc.2025.2067571.1932

و توزیع بهتر ذرات تقویتی در اثر اعمال ارتعاشات فراصوتی نسبت داده شده است [16]. بایپای و همکاران [17] پدیده‌های کاویتاسیون و جریان فراصوتی را دو عامل مهم شکستن دسته‌های نانوذره SiC در ریخته‌گری فراصوتی آلیاژ Al7075 معرفی کردند. این عامل موجب بهبود استحکام کششی نمونه حاصل از عملیات ریخته‌گری فراصوتی شده است.

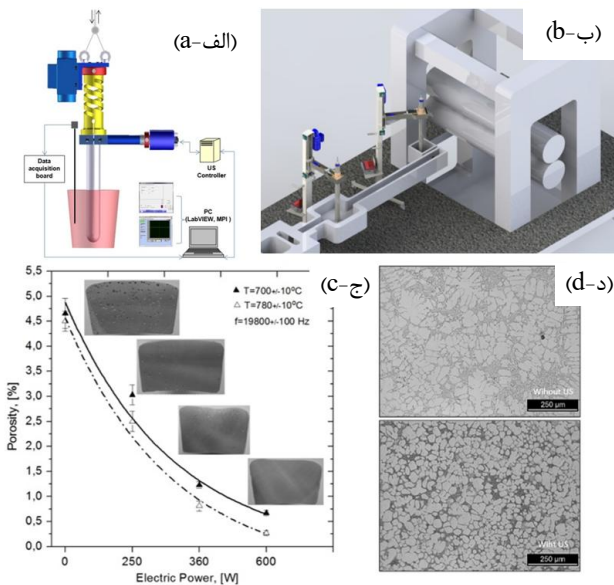


Fig. 1 a) Laboratory setup for vibratory and ultrasonic melt processing, b) Industrial conceptual design of continuous ultrasonic casting, c) Effect of ultrasonic power on porosity content in aluminum casting, and d) Dendritic structure (without ultrasound) and spherical fine grain structure (resulting from ultrasound processing)

شکل 1 الف) چیدمان آزمایشگاهی اعمال ارتعاشات فراصوتی و مکانیکی به طور همزمان، ب) طرح مفهومی صنعتی فرایند ریخته‌گری فراصوتی پیوسته، ج) اثر توان فراصوت بر درصد تخلخل در ریخته‌گری آلومینیوم و د) ساختار دندریتی (بدون فراصوت) و ساختار ریزدانه کروی (حاصل از فراصوت)

یکی از مسائل مهم در ریخته‌گری فراصوتی ایجاد نواحی گره و شکم ارتعاشی در حجم مذاب است، این باعث می‌شود در مواردی بخشی از مایع بیشتر و بخشی دیگر کمتر تحت پردازش فراصوتی قرار گیرند و اثر فراصوتی در موقعیت‌های مختلف قطعات بزرگ یکنواخت نباشد. در این موارد از روش استفاده از چند مود ارتعاشی و یا تغییر فرکانس (حول فرکانس رزونانس) استفاده شده است. پوگا و همکاران از فناوری جدید ارتعاشات چند فرکانس، چند مود و مدوله شده⁶ در فرایند ریخته‌گری استفاده نمودند (شکل 1-الف). نتایج آن‌ها نشان داد اعمال فراصوت تشکیل دانه‌های کروی کوچک Al- α را گسترش، اندازه و مورفولوژی ترکیبات بین فلزی را تغییر داده و آن‌ها را به‌طور یکنواخت در سراسر قطعات ریخته‌گری توزیع کرد [18]. آن‌ها همچنین اثر دمای مذاب بر تاثیرگذاری فراصوت را در ریخته‌گری کامپوزیت Al-Mg-Mn/Al-5Ti-1B مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد افزایش دمای مذاب تحت پردازش از 670 به 700 درجه سانتیگراد، موجب کاهش تاثیرگذاری فراصوت با هدف ریزدانه کردن میکروساختار حاصل شده است [19]. پراگاتی و همکاران نیز ریزدانه شدن Al- α را در ریخته‌گری

در ساختار قطعات، ایجاد ساختار درشت دانه و دندریتی و استحکام پایینتر قطعات حاصل از ریخته‌گری نسبت به فرایندهایی نظیر فورج می‌باشد. برای رفع این مشکلات فرایندهای ریخته‌گری با فناوری‌های نوین ترکیب شده‌اند. روش‌های مختلفی برای گاززدایی در فرایند ریخته‌گری از قبیل تزریق گاز خنثی و یا اعمال ارتعاشات فراصوتی توان بالا (مکانیکی)، استفاده از نمک‌های گاززدا (شیمیایی) و کاهش فشار و انجام ریخته‌گری در خلا (فیزیکی) و [1] و [2].

راهکار دیگر در جهت ارتقای کیفیت و عملکرد قطعات، تولید کامپوزیت‌های پایه پلیمری و فلزی¹ با قابلیت‌های استحکام و عمر بالا می‌باشد [3]. برای تولید کامپوزیت‌های پایه فلزی از روش‌های مختلفی مانند ریخته‌گری [4]، ساخت افزایشی [5] و آلیاژسازی اصطکاکی اغتشاشی² (FSA) [6] استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر ساخت افزودنی کامپوزیت‌های پایه فلزی و پلیمری مورد توجه قرار گرفته است. در ساخت افزایشی کامپوزیت پایه پلیمری با اضافه کردن ذرات مس به پلیمر پایه PP در عملیات لایه نشانی مایع³ (LDM) می‌توان به خواص استحکامی بالاتری دست یافت [5].

استفاده از فناوری فراصوت توان بالا امروزه در بسیاری از حوزه‌های ساخت و تولید اعم از شکل‌دهی [7] و [8] ماشینکاری [9] و اتصال‌دهی [10] گسترش یافته است. در سال‌های اخیر از این فناوری برای پخش کردن ذرات با اهداف خاص در انواع کامپوزیت‌های پایه پلیمری [11] و پایه فلزی [12] استفاده شده است. اعمال ارتعاشات توان بالای فراصوتی در فرایند ریخته‌گری آلیاژها و کامپوزیت‌های پایه فلزی به ریخته‌گری فراصوتی⁴ معروف است. در عملیات ریخته‌گری فراصوتی اعمال ارتعاشات مکانیکی فرکانس بالا موجب ایجاد پدیده کاویتاسیون⁵ و جریان فراصوتی⁶ شده که به هم پیوستن گازهای محلول در مذاب و بالا آمدن آنها حین فرایند انجماد را در پی دارد [13]. دو پدیده مهم یاد شده موجب اثرات فیزیکی و شیمیایی در محیط مایعات شده و در عملیات ریخته‌گری نیز هرکدام نتایج بهبوددهنده شامل کاهش تخلخل و افزایش چگالی، ریزدانه شدن، شکست ساختار دندریتی و توزیع یکنواخت ذرات تقویتی را در پی دارند. در ادامه به نتایج تحقیقات محققان در این باره اشاره شده است. ژیان و همکاران اثر فراصوت را در ریخته‌گری آلیاژ A356 مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد اعمال ارتعاشات فراصوتی موجب شکست ساختار دندریتی متداول و دستیابی به ساختار با دانه‌های کروی ریز شده است. در عین حال هسته‌زایی ناهمگن⁷ ناشی از کاویتاسیون، نقش مهم‌تری نسبت به تکه‌تکه شدن دندریت در تشکیل دانه‌های کروی ایفا می‌کند [14]. کومار و همکاران کامپوزیت Al6061 با ذرات تقویتی نانو SiC، BN و گرافن را به دو روش هم‌زدن معمولی و ترکیب فراصوت و هم‌زدن انجام دادند. نتایج نشان داده است اعمال ارتعاشات فراصوتی موجب پراکندگی یکنواخت تر ذرات تقویتی شده است. این مساله موجب افزایش زیاد استحکام نهایی (تا 143 درصد افزایش)، استحکام خمشی (تا 116 درصد افزایش) و سختی (تا 105 درصد افزایش) نسبت به نمونه با هم‌زدن معمولی شده است [15]. ادیسی و مراد استفاده از میکروذرات تقویتی SiC (متوسط اندازه 40 میکرومتر) را در ریخته‌گری آلومینیوم به روش متداول و فراصوتی با درصد وزنی 3، 5، 8 و 10 برای ذرات تقویتی انجام دادند. افزایش درصد وزنی ذرات تقویتی موجب افزایش سختی و استحکام نمونه شده است. اعمال ارتعاشات فراصوتی مستقل از مقدار درصد‌های وزنی موجب افزایش سختی و استحکام شده است. این نتیجه به کاهش تخلخل

⁵ Cavitation

⁶ Acoustic Streaming

⁷ Cavitations-induced heterogeneous nucleation

⁸ Multifrequency, Multimode, Modulated Sonic & Ultrasonic Vibrations (MMM)

¹ Metal Matrix Composites (MMC)

² Friction Stir Alloying (FSA)

³ Liquid Deposition Modeling (LDM)

⁴ Ultrasonic Casting

فرکانس رزونانس مجموعه ارتعاشی بیش از 1 کیلوهرتز افت می‌نماید، مجموعه فراصوتی در دمای محیط دارای فرکانس نزدیک به 21 کیلوهرتز داشته است و با ورود هورن به درون مذاب و همدم شدن مجموعه، فرکانس رزونانس به حدود 19800 هرتز کاهش می‌یابد. با توجه به فرسایش هورن، در طول آزمون، سطح روی هورن و کف هورن ماشینکاری شد تا اثرات آلومینیوم و ذرات تیتانیوم با اتصال ضعیف از روی سطح هورن زدوده شوند.

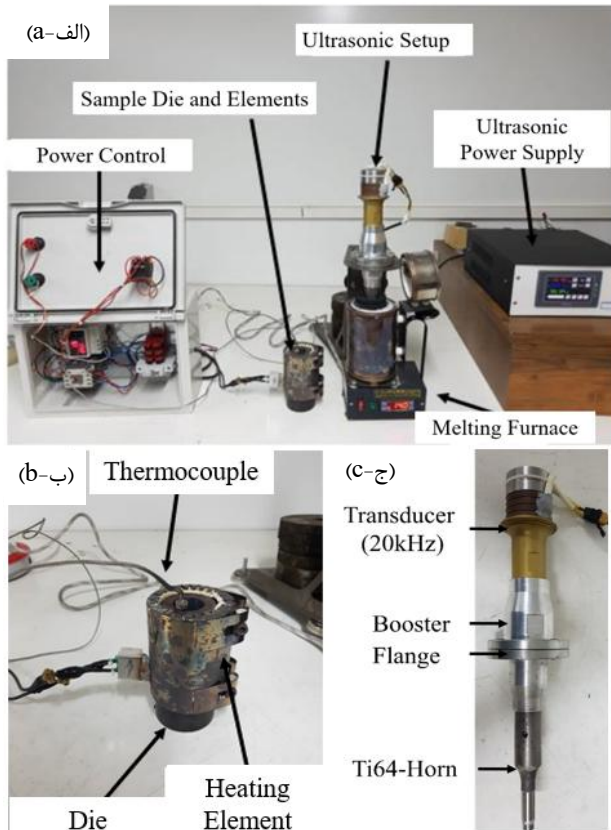


Fig. 2 a) Ultrasonic setup, power supply, casting mold and element, melting furnace, mold temperature control panel, b) Molding Die, and c) Ultrasonic system: transducer, booster, and horn.

شکل 2 الف) چیدمان فراصوت، منبع تغذیه، قالب ریخته‌گری و المنت قالب، کوره ذوب، تابلو برق کنترل دمای قالب، ب) قالب ریخته‌گری و ج) مجموعه ارتعاشی فراصوت شامل ترانسدیوسر، بوستر و هورن

جدول 1 پارامترهای فرایند ریخته‌گری فراصوتی کامپوزیت Al6061/SiC

Table 1 Ultrasonic casting process parameters of Al6061/SiC composite

واحد	مقدار	پارامتر
درجه سانتیگراد	950	بیشینه دمای کاری کوره
درجه سانتیگراد	300	دمای ذوب‌ریزی (پیش گرم قالب)
درجه سانتیگراد	650	دمای ذوب آلومینیوم 6061
درصد وزنی	2	مقدار پودر SiC
دقیقه	1	زمان هم زدن مذاب با SiC
دقیقه	1 و 2	زمان اعمال فراصوت (نمونه‌های با فراصوت)
کیلوهرتز	19-21	فرکانس دستگاه فراصوت
میکرومتر	50	دامنه ارتعاش دستگاه فراصوت
میلی‌متر در دقیقه	1	سرعت فک دستگاه آزمون فشار

فراصوتی Al-SiC گزارش کردند که منجر به افزایش در حدود 65 درصدی سختی و استحکام شده است [20]. این فناوری یک نوآوری مهم در تحقیقات ریخته‌گری ایجاد نمود و به کاربرد صنعتی ریخته‌گری فراصوتی منجر شده است. شکل 1-ب طرح مفهومی صنعتی فرایند ریخته‌گری فراصوتی پیوسته را نشان داده است. مجموعه فراصوتی اول برای گاززدایی و مجموعه فراصوتی دوم برای ریزدانه نمودن مذاب قبل از انجماد استفاده شده است [21]. شکل 1-ج نشان داده است با افزایش توان ارتعاشات فراصوتی در فرکانس 20kHz و دماهای 700 و 780 درجه سانتیگراد در ریخته‌گری آلیاژ آلومینیوم، مقدار تخلخل کاهش یافته است. در عین حال اعمال ارتعاشات فراصوتی در همین آلیاژ موجب تغییر ساختار دندریتی به ساختار دانه‌های کروی ریز شده است (شکل 1-د).

با توجه به نتایج تحقیقات بیان شده در پژوهش حاضر اثر دو عامل مهم شامل ذرات تقویت کننده از جنس SiC و اعمال ارتعاشات فراصوتی بر خصوصیات مکانیکی و متالورژیکی قطعات حاصل از ریخته‌گری مورد بررسی قرار خواهد گرفت. بدین منظور چیدمان ریخته‌گری فراصوتی شامل مجموعه ارتعاشی فراصوتی 20 کیلوهرتز و کوره و قالب ریخته‌گری آماده سازی شده است. آزمون‌ها در دو حالت بدون و با اعمال ارتعاشات فراصوتی انجام می‌شوند. همچنین اثر زمان اعمال ارتعاشات فراصوت (1 و 2 دقیقه) نیز بر بهبود خواص مورد توجه قرار گرفته است. برای ارزیابی مکانیکی آزمون سختی سنجی ویکرز و آزمون فشار و برای ارزیابی میکروساختاری نمونه‌های حاصل آزمون تصویربرداری نوری و تصویربرداری الکترونی مد نظر قرار گرفته است. در تصویربرداری نوری اندازه دانه در حالت‌های مختلف با هم مقایسه شده اند. همچنین در تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی، اندازه و توزیع ذرات تقویتی SiC مورد بررسی قرار گرفته است.

2- روش تحقیق

2-1- عملیات ریخته‌گری فراصوتی و ساخت نمونه

عملیات ریخته‌گری به کمک ارتعاشات توان بالای فراصوتی بر روی دو ماده آلومینیوم پایه Al6061 و کامپوزیت فلزی Al6061/SiC انجام گرفت. برای تولید کامپوزیت فلزی از پودر SiC با متوسط اندازه ذرات 10 میکرون به مقدار 2 درصد وزنی استفاده گردید. شکل 2 چیدمان فرایند ریخته‌گری فراصوتی شامل کوره ذوب، مجموعه فراصوتی، قالب ریخته‌گری و پنل کنترل دما را نشان داده است. در عملیات ریخته‌گری ابتدا ماده خام آلومینیوم در کوره ذوب قرار گرفت، با افزایش دما نمونه ذوب شده و آماده اعمال ارتعاشات توان بالای فراصوتی شد. در نمونه‌های کامپوزیت، در کنار ماده خام آلومینیوم پودر نیز درون کوره ذوب ریخته شد. برای اطمینان از عدم به هم چسبیدن ذرات پودر، توسط یک میله گرافیتی در حدود 1 دقیقه ذوب به هم زده شد. پس از اجرای عملیات ماده مذاب در قالب ریخته‌گری از جنس فولاد ریخته شد تا قطعه نهایی را ایجاد نماید (شکل 2-ب). برای اجتناب از سریع سرد شدن مذاب به محض ورود به قالب، از یک قلاف حرارتی سرامیکی به دور قالب فولادی استفاده شد. برای اعمال ارتعاشات توان بالای فراصوتی از مبدل فراصوتی با فرکانس 20 کیلوهرتز و توان نامی 1 کیلووات و هورن از جنس تیتانیوم گرید 5 (Ti-6Al-4V) استفاده شد (شکل 2-ج). برق شهر توسط منبع تغذیه فراصوتی به فرکانس 20 کیلو هرتز تبدیل شده و توسط مبدل ارتعاشی به ارتعاشات مکانیکی در حدود 50 میکرومتر در انتهای هورن تبدیل می‌شود. عامل افزایش دما (از 20 درجه به حدود 800 درجه سانتیگراد) تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر خواص الاستیک و آکوستیکی هورن دارد. بدین واسطه در اثر دمای زیاد

البته افزایش زمان پردازش فراصوتی، مقدار سختی آلومینیوم پایه و کامپوزیت Al6061/SiC افزایش یافته است. برای نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی خالص، از نتایج جدول 2 مشاهده می‌شود، اعمال فراصوت به مدت 1 دقیقه موجب افزایش 14.7٪ در میانگین سختی نسبت به نمونه آلیاژ آلومینیوم پایه شد. با افزایش زمان فراصوت به 2 دقیقه، بهبود سختی به 19.0٪ رسید. در نمونه‌های آلومینیوم کامپوزیتی Al6061/SiC به مقدار 26.3 درصد سختی بالاتری نسبت به نمونه آلیاژ آلومینیوم پایه حاصل شده است. ملاحظه می‌شود به طور مشخص حضور ذرات تقویتی SiC به طور متوسط موجب 18 درصد افزایش سختی قطعات گردیده است. با اعمال ارتعاشات فراصوتی به ترتیب در زمان 1 و 2 دقیقه در ریخته‌گری آلومینیوم کامپوزیت، به ترتیب افزایش سختی معادل 28.8 و 37.7 درصد نسبت به آلیاژ آلومینیوم پایه و افزایش سختی معادل 2 و 9 درصد نسبت به نمونه کامپوزیت آلومینیوم Al6061/SiC حاصل شده است. این بهبود مقدار سختی می‌تواند ناشی از مکانیسم‌های ریزدانه‌شدن ساختار، کاهش مقدار تخلخل و توزیع یکنواخت‌تر ذرات تقویتی باشد. بیشترین سختی در نمونه کامپوزیت Al6061/SiC با اعمال ارتعاشات فراصوتی به مدت 2 دقیقه برابر با HV 93.2 مشاهده شد.

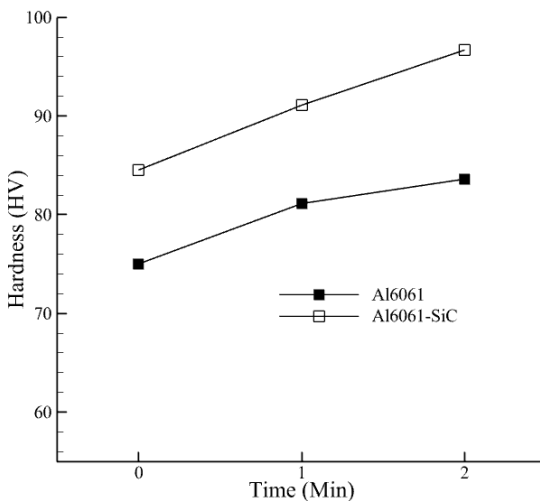


Fig. 3 Effect of ultrasonic time on the average hardness of ultrasonic melt processing samples

شکل 3 اثر زمان اعمال فراصوتی بر متوسط سختی نمونه‌های ریخته‌گری فراصوتی

2-2- اندازه دانه

براساس تصاویر مختلف در مقیاس 10 و 20 میکرومتر، متوسط اندازه در نمونه‌ها تعیین شده است. شکل 4 تصویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های آلومینیوم پایه (Al6061) و کامپوزیت فلزی (Al6061/SiC) با مقیاس 20 میکرومتر را نشان داده است. براساس داده‌های پردازش شکل 5 نمودار تغییر اندازه دانه برحسب زمان اعمال ارتعاشات فراصوتی در نمونه آلومینیوم پایه (Al6061) و کامپوزیت آلومینیوم (Al6061/SiC) را نشان داده است. از نتایج ملاحظه می‌شود هر دو عامل اضافه نمودن ذرات تقویتی و اعمال ارتعاشات فراصوتی موجب کاهش اندازه دانه شده‌اند. در آزمون‌های بدون اعمال ارتعاشات فراصوتی، میانگین اندازه دانه در آلومینیوم تقویت شده با SiC (37 میکرومتر) کمتر از آلومینیوم پایه (45 میکرومتر) است که بیانگر تاثیر مستقل افزودن ذرات تقویت کننده SiC بر ریزدانه شدن ساختار آلومینیوم پایه Al6061 (کاهش 18 درصدی اندازه دانه) است. این امر احتمالاً به دلیل نقش ذرات SiC به عنوان مانع در برابر رشد دانه‌ها است [15 و 22].

پس از پایان فرایند ریخته‌گری، نمونه‌های حاصل از عملیات ابتدا تراشکاری شده و نمونه استوانه‌ای آزمون فشار و نمونه مناسب برای مانع و تهیه تصویربرداری نوری و میکروسکوپ الکترونی (SEM) از آن استخراج شد. جدول 1 به طور خلاصه پارامترهای فرایند ریخته‌گری فراصوتی کامپوزیت Al6061/SiC را ارائه نموده است.

2-2- ارزیابی مکانیکی و متالورژیکی نمونه‌ها

برای ارزیابی خواص مکانیکی نمونه‌های حاصل دو آزمون (1) سختی ویکرز و (2) آزمون فشار انجام گرفته است. در آزمون سختی سنجی، سختی سطح نمونه استوانه‌ای و سختی سطح نمونه مانع شده در دو مرحله اندازه‌گیری و متوسط سختی در جدول 2 ذکر شده است. در آزمون فشار نمونه استوانه‌ای به قطر 16.8 و طول 25 میلیمتر (نسبت طول به قطر 1.5) از قطعه حاصل از فرایند ریخته‌گری فراصوتی ساخته شد. برای آزمون فشار از دستگاه پرس زوئیک 25 تن با سرعت حرکت فک در حدود 1 میلیمتر بر دقیقه استفاده شد. برای اندازه‌گیری تغییرات اندازه دانه، از پردازش تصویر حاصل از میکروسکوپ نوری در دو مقیاس 20 و 50 میکرون بهره گرفته شد. اندازه‌گیری دانه براساس استاندارد ASTM E112 انجام شد. در این روش یک خط از روی تصویر نمونه رسم می‌شود و تعداد مرزهای دارای تلاقی با خط شمارش شده و در نهایت اندازه دانه براساس روابط تعیین می‌شوند. همچنین برای بررسی پراکندگی و اندازه ذرات و توزیع عناصر از دستگاه میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM) استفاده گردید.

3- نتیجه و بحث

در بخش نتایج پارامترهای خروجی عملیات ریخته‌گری فراصوتی شامل سختی، اندازه دانه، استحکام فشاری و توزیع ذرات تقویتی SiC در فاز زمینه فلزی Al6061 مورد بررسی قرار گرفته‌اند. جدول 2 به طور خلاصه نتایج آزمون سختی و اندازه دانه و درصد افزایش/کاهش سختی و اندازه دانه را در نمونه‌های مختلف آزمون نشان داده است.

جدول 2 اثر ذرات تقویتی (SiC) و زمان اعمال فراصوت بر میانگین اندازه دانه در ریخته‌گری آلومینیوم Al6061

Table 2 Effect of SiC and ultrasonication time on the average grain size in Al6061 castings

نمونه	افزایش سختی (درصد)	کاهش اندازه دانه (درصد)
Al6061(پایه)	67.6	45
Al6061+UT1MIN	77.6	29
Al6061+UT2MIN	80.5	23.5
Al6061+SiC	85.5	37
Al6061+SiC+UT1MIN	87.2	23
Al6061+SiC+UT2MIN	93.2	19

1-1- سختی

شکل 3 اثر ذرات تقویتی، اعمال ارتعاشات فراصوتی و زمان آن را بر سختی نمونه‌های آلومینیوم پایه و کامپوزیت Al6061/SiC را نشان داده است. به طور کلی ملاحظه می‌شود اضافه نمودن ذرات SiC به طور قابل ملاحظه سختی آلومینیوم پایه را افزایش داده است. همچنین با اعمال ارتعاشات فراصوتی و

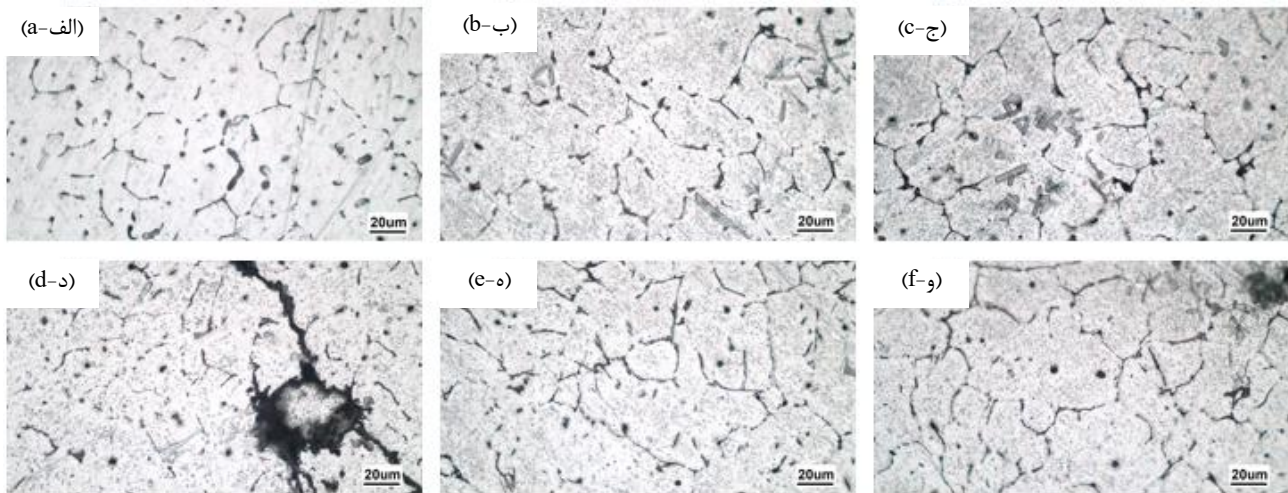


Fig. 4 Optical microscope images of samples at 20 μm scale: a) Al6061, b) Al6061+UT1min, c) Al6061+UT2min, d) Al6061/SiC, e) Al6061/SiC+UT1min, f) Al6061/SiC+UT2min

شکل 4 تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌ها با مقیاس 20 میکرومتر: (الف) Al6061، (ب) Al6061+UT1min، (ج) Al6061+UT2min، (د) Al6061/SiC، (ه) Al6061/SiC+UT1min، (و) Al6061/SiC+UT2min

نوبه خود موجب افزایش استحکام قطعات گردیده است (براساس قانون هال-پیچ). شکل 7 الف و ب، به ترتیب، نمودار نتایج آزمون فشار نمونه‌های آلومینیوم پایه (Al6061) و نمونه‌های آلومینیوم با 1 و 2 دقیقه پردازش فراصوتی (Al6061-UT-1 و Al6061-UT-2) را نمایش داده‌اند. از شکل 7-الف ملاحظه می‌شود اعمال ارتعاش فراصوتی به طور متوسط موجب 8 درصد افزایش استحکام فشاری نمونه آلومینیوم پایه (Al6061) شده است. اما به نظر می‌رسد زمان تاثیر قابل توجهی بر استحکام فشاری نمونه نداشته است. شکل 7-ب نمودار نتایج آزمون فشار نمونه‌های کامپوزیت آلومینیوم Al6061-SiC و اثر پردازش فراصوتی در زمان 1 و 2 دقیقه (Al6061-SiC-UT-1 و Al6061-SiC-UT-2) را نشان داده است. در نمونه‌های کامپوزیت آلومینیوم (مشابه نمونه‌های آلومینیوم پایه) اعمال ارتعاشات فراصوتی موجب افزایش استحکام فشاری نمونه‌ها شده است. در عین حال افزایش زمان پردازش در 1 و 2 دقیقه در این نمونه‌ها به ترتیب باعث افزایش متوسط 9.7 و 12.8 درصدی استحکام فشاری نسبت به نمونه ریخته‌گری بدون فراصوت شده است. هرچند تاثیر آن از اثر اعمال یا عدم اعمال فراصوت کمتر بوده است.

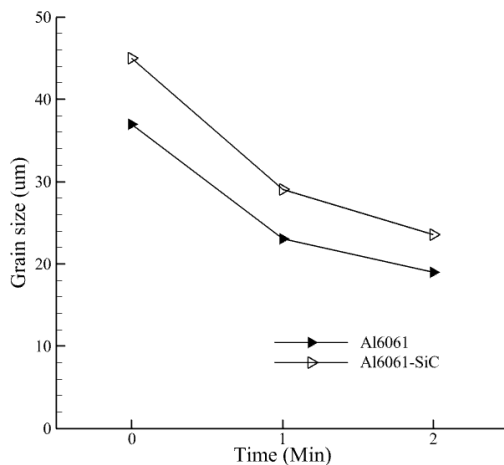


Fig. 5 Effect of ultrasonic vibration (UT) and process time (1 and 2 minutes) on the compressive strength of (a) Al6061 and (b) Al6061/SiC MMC

شکل 5 تغییر اندازه دانه برحسب زمان اعمال ارتعاشات فراصوتی در نمونه آلومینیوم (Al6061) و کامپوزیت فلزی (Al6061/SiC)

در نمونه‌های بدون ذرات تقویتی، نمونه با دو دقیقه اعمال ارتعاشات فراصوتی، میانگین 23.5 میکرومتر در مقایسه با 45 میکرومتر نمونه آلومینیوم پایه (کاهش 48 درصدی اندازه دانه) را نشان می‌دهد. همچنین، در نمونه‌های کامپوزیت آلومینیوم با ذرات تقویتی SiC، نمونه با دو دقیقه اعمال ارتعاشات فراصوتی میانگین 19 میکرومتر در مقایسه با 37 میکرومتر اندازه دانه نمونه کامپوزیت فلزی Al6061/SiC (کاهش 49 درصدی) را نشان داده است. مشاهده می‌شود در هر دو دسته نمونه آلومینیوم پایه (Al6061) و کامپوزیت فلزی (Al6061/SiC)، افزایش زمان اعمال ارتعاشات فراصوتی نیز به عنوان یک عامل تاثیرگذار موجب ریزدانه شدن بیشتر نمونه‌ها شده است. ریزدانه شدن ساختار حاصل را می‌توان به اثر پدیده کاویتاسیون و جریان مذاب حاصل از ارتعاشات فراصوتی نسبت داد [9 و 13]. براساس نتایج تحقیقات مختلف به نظر می‌رسد کاویتاسیون از سه طریق موجب ریزدانه شدن ساختار در ریخته‌گری فراصوتی می‌شود: (1) ترکیدن حباب‌های گازی در پدیده کاویتاسیون، دمای موضعی را به سرعت کاهش می‌دهد. این سرمایه ناگهانی، شرط سرمایه فوق اشباع را ایجاد کرده و هسته زایی را افزایش می‌دهد [9]. (2) از طرفی جریان آکوستیک حاصل از کاویتاسیون، نیروی برشی شدیدی ایجاد می‌کند و این باعث تکه تکه شدن شاخه‌های دندریتی در حال رشد می‌شود [10]. (3) از سوی دیگر کاویتاسیون مانع کلوخه شدن (به هم چسبیدن) ذرات تقویت کننده و هسته‌زا در فرایند ریخته‌گری می‌شود [9]. لازم به ذکر است ریزدانه شدن تنها عاملی در خصوصیات متالورژیکی مواد است که به طور همزمان استحکام و انعطاف پذیری یا چقرمگی قطعات را افزایش می‌دهد.

3-3- استحکام فشاری

شکل 6 مقایسه نتایج آزمون فشار نمونه آلومینیوم پایه و کامپوزیت فلزی Al6061/SiC را نشان داده است. ملاحظه می‌شود حضور ذرات تقویتی SiC به طور متوسط موجب 9 درصد افزایش استحکام فشاری شده است. این مساله را می‌توان به دو عامل نسبت داد: اول حضور ذرات تقویتی به عنوان یک نایجایی در تغییر شکل ماده عمل کرده و مقاومت ماده در برابر سیلان را افزایش خواهد داد. دوم همانطور که در بخش بررسی اندازه دانه ذکر شد، حضور ذرات تقویتی موجب ریزدانه شدن ساختار شده است (مطابق شکل 5) که این عامل نیز به

فراصوتی (شکل 8-الف) بیشتر و بزرگتر از نمونه‌های با اعمال ارتعاشات فراصوتی (شکل 8-ج و ه) می‌باشد. در نمونه بدون اعمال فراصوت مشاهده می‌شود (شکل 8-الف و ب)، ذرات SiC با اندازه بزرگتر به صورت یکنواخت توزیع نشده‌اند و تمایل به تجمع در مرزخانه‌ها را نشان می‌دهند. در حالی که در نمونه‌های با اعمال ارتعاشات فراصوتی در زمان 1 و 2 دقیقه (شکل 8-ج و ه)، نتایج نشان‌دهنده توزیع یکنواخت‌تر ذرات تقویت‌کننده در سراسر زمینه آلومینیومی بوده و اندازه خوشه‌های ذرات به‌طور مؤثری کاهش یافته است. ذرات مشاهده شده در (شکل 8-د و و) تیتانیوم جدا شده از هورن هستند که به داخل مذاب نفوذ کرده‌اند. این مساله نشان‌دهنده فرسایش هورن در تماس با مذاب در شرایط حضور ارتعاشات فراصوتی است. مشکل خوردگی و فرسایش هورن‌های تیتانیومی (عمدتاً گرید 5) در ریخته‌گری فراصوتی ناشی از ترکیب عوامل متعددی از جمله شوک‌های حرارتی، کاویتاسیون شدید، خوردگی شیمیایی توسط مذاب فعال (مثل آلومینیوم)، و سایش مکانیکی است. در نتیجه در کاربردهای صنعتی لازم است تمهیداتی برای جلوگیری از خوردگی هورن مانند اعمال پوشش‌های خاص و یا استفاده از هورن‌های سرامیکی اندیشیده شود.

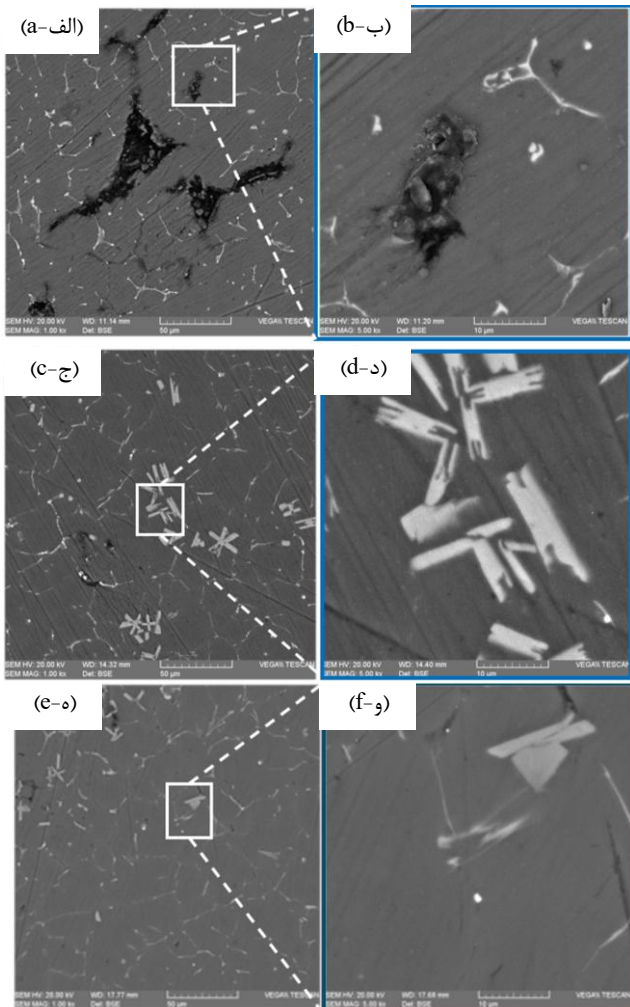


Fig. 8 Effect of ultrasonic melt processing time in Al6061/SiC MMC: (a and b) without ultrasonic treatment, (c and d) 1 min of, and (e and f) 2 min of ultrasonic treatment

شکل 8 نمودار اثر اعمال و زمان عملیات فراصوتی در ریخته‌گری کامپوزیت فلزی Al6061/SiC: (الف و ب) بدون اعمال فراصوتی، (ج و د) 1 دقیقه و (ه و و) 2 دقیقه اعمال فراصوت

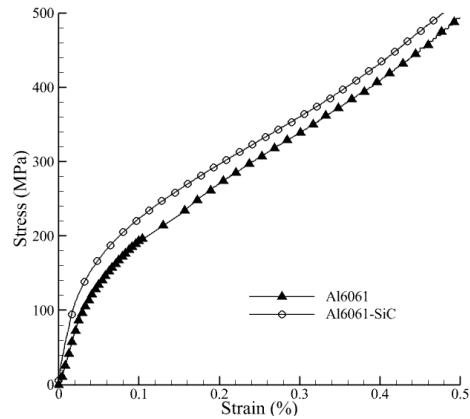


Fig. 6 Effect of SiC reinforcement particles on the compressive strength of Al6061 aluminum obtained from the casting process

شکل 6 اثر ذرات تقویتی SiC بر استحکام فشاری آلومینیوم Al6061 حاصل از فرایند ریخته‌گری

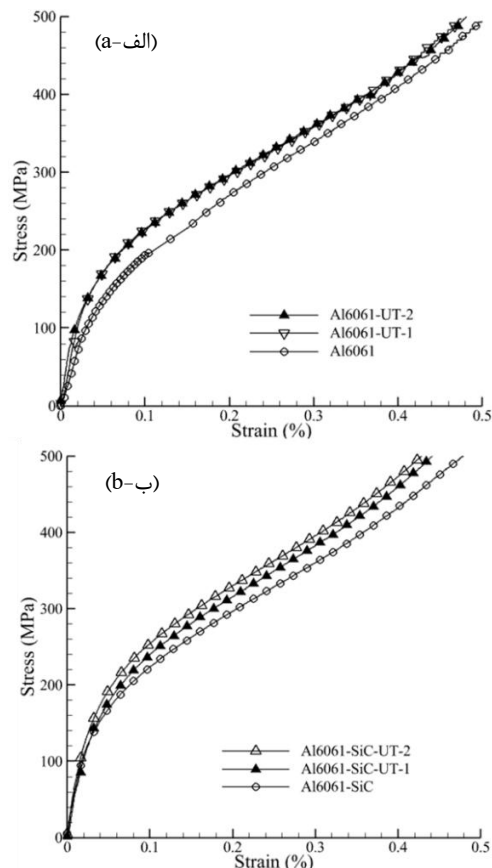


Fig. 7 Effect of ultrasonic vibration (UT) and process time (1 and 2 minutes) on the compressive strength of (a) Al6061 and (b) Al6061/SiC MMC

شکل 7 اثر اعمال ارتعاشات فراصوتی (UT) و زمان فرایند (1 و 2 دقیقه) بر استحکام فشاری (الف) آلومینیوم پایه Al6061 و (ب) کامپوزیت آلومینیوم Al6061/SiC

4-3- توزیع ذرات تقویت‌کننده

شکل 8 توزیع ذرات تقویتی SiC را در ماتریس آلومینیوم AA6061 برای نمونه‌های کامپوزیت AA6061/SiC بدون اعمال فراصوتی (الف و ب) و با اعمال فراصوت به ترتیب در زمان‌های 1 دقیقه (ج و د) و 2 دقیقه (ه و و) نشان داده است. تصاویر در دو مقیاس 50 و 10 میکرومتر ارائه شده‌اند. ناحیه تیره در این شکل بیانگر تخلخل باقیمانده در مذاب است که در نمونه بدون اعمال

5- تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله کمال تشکر و قدردانی خود را از شرکت فراصوت تجهیز ایرانیان برای تامین مجموعه فراصوتی تقدیم می‌دارند.

6- مراجع

[1] Campbell, J., "Complete casting handbook: metal casting processes, metallurgy, techniques and design," Butterworth-Heinemann; 2015.

[2] Viswanathan, S., Apelian, D., Donahue, R. J., DasGupta, B., Gywn, M., Jorstad, J. L., "Casting," ASM International; 2008.

[3] Gupta, M., Brabazon, D., "Introduction to Metal Matrix Composite Materials: An Introduction," Encyclopedia of Materials: Composites. Oxford: Elsevier; 2021; pp. 1-10.

[4] Alizadeh, A., Heydari Beni, M., Rezaei, A., Eskandari Jam, J., "Fabrication and mechanical properties of AA5083/TiB2 in situ Composite by stir casting process," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites. Vol. 11, No. 3, pp. 2525-2535, 2024.

[5] Mohammadi Jazi, H., Vahdati, M., Mahdavi, A., "Modeling and optimization of variables affecting tensile properties of printed PP/Cu composite samples using LDM process," In Persian, Iranian Journal of Manufacturing Engineering. Vol. 11, No. 8, pp. 10-19, 2024.

[6] Vahdati, M., "Modelling and optimization of parameters affecting the tensile strength and ductility of aluminum-based composite produced by FSA via RSM," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 4, pp. 1207-1216, 2021.

[7] Abedini, R., Fartashvand, V., Abdullah, A., Alizadeh, Y., "Evaluation of process parameters and ultrasonic vibration in hot pressing of metal powders," Materials Science and Engineering: B., Vol. 281, 2022.

[8] Vahdati, M., Varedi-Koulaei, S. M., "Optimization of multilayer perceptron neural network structure for simulating the effect of input variables on the spring-back phenomenon in the ultrasonic vibration assisted single point incremental forming," AUT J. Mech Eng., Vol. 8, No. 4, pp. 337-350, 2024.

[9] Abdullah, A., Sotoodezadeh, M., Abedini, R., Fartashvand, V., "Experimental study on ultrasonic use in dry creep-feed up-grinding of aluminum 7075 and Steel X210Cr12," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 14, No. 2, pp. 191-198, 2013.

[10] Zamani, M. A., Abedini, R., Ghorbani, H., "The effect of parameters on joint strength in continuous ultrasonic welding of polypropylene reinforced with woven glass fibers," In Persian, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 11, No. 10, pp. 56-65, 2024.

[11] Karimzad Ghavidel, A., Zashakoyan, M., Kiani, G., "Fabrication of Carbon Nanotubes-Based Efficient Electromagnetic Waves Shields Nanocomposites Using Electro-Mechanically Dispersion Technique," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 3, pp. 1737-1744, 2021.

[12] Li, X., Yang, Y., Cheng, X., "Ultrasonic-assisted fabrication of metal matrix nanocomposites," Journal of Materials Science, Vol. 39, No. 9, pp. 3211-3212, 2004.

[13] Eskin, D. G., Tzanakis, I., Chapter 20. "Applications to solidification and casting of metals," Gallego-Juárez, J. A., Graff, K. F., Lucas, M., editors, Power Ultrasonics (Second Edition): Woodhead Publishing, pp. 489-507, 2023.

[14] Jian, X., Xu, H., Meek, T. T., Han, Q., "Effect of power ultrasound on solidification of aluminum A356 alloy". Materials Letters, Vol. 59, No. 2, pp. 190-193, 2005.

[15] Soni, S. K., Manimaran, D., Thomas, S. B., Thomas, B., "Microstructure and mechanical characterization of Al6061 based composite and nanocomposites prepared via conventional and ultrasonic-assisted melt-stirring techniques," Materials Today Communications, Vol. 34, pp. 105222, 2023.

[16] Idrisi, A. H., Mourad, A-HI., "Conventional stir casting versus ultrasonic assisted stir casting process: Mechanical and physical characteristics of AMCs," Journal of Alloys and Compounds, Vol. 805, pp. 502-508, 2019.

در ساخت کامپوزیت‌های پایه فلزی به روش ریخته‌گری، ناهمگنی در توزیع ذرات تقویتی در نمونه (بدون فراصوت) می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر خواص مکانیکی نهایی کامپوزیت داشته باشد، چرا که مناطق با تراکم بالای ذرات ممکن است به عنوان نقاط تمرکز تنش عمل کنند و رفتار مکانیکی ماده را تحت تأثیر قرار دهند. این پدیده به‌ویژه در بارگذاری‌های دینامیکی با شرایط کاری با تنش‌های متناوب می‌تواند حائز اهمیت باشد. در حالی که در نمونه‌های با اعمال ارتعاشات فراصوتی، بهبود توزیع ذرات تأثیر مستقیمی بر یکنواختی خواص مکانیکی ماده داشته و نقاط تمرکز تنش را به‌طور محسوسی کاهش می‌دهد. این پیشرفت‌ها به‌ویژه در کاربردهای حساس به خستگی و بارگذاری‌های دینامیکی می‌تواند مزایای قابل‌توجهی ایجاد کند.

4- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر اثر ذرات تقویت کننده SiC و اعمال ارتعاشات فراصوتی و زمان اعمال ارتعاشات در ریخته‌گری آلومینیوم Al6061 و کامپوزیت فلزی Al6061/SiC مورد بررسی قرار گرفته است. به طور خلاصه نتایج ذیل حاصل شده است:

- استفاده از ذرات تقویتی در نمونه‌های آلومینیوم کامپوزیتی Al6061/SiC به مقدار 26.3 درصد سختی بالاتری نسبت به نمونه آلیاژ آلومینیوم پایه حاصل شده است. در عین حال اعمال ارتعاشات فراصوتی در نمونه‌های آلومینیوم Al6061 و کامپوزیت آلومینیوم Al6061/SiC به ترتیب برابر 16.8 و 5.5 درصد سختی نمونه‌های حاصل را افزایش داده است. این افزایش سختی به ریزدانه شدن ساختار و توزیع یکنواخت تر ذرات تقویتی با اعمال ارتعاشات فراصوتی نسبت داده شده است.
- نتایج آزمون فشار نشان داد اضافه شدن ذرات تقویتی SiC به آلومینیوم پایه (Al6061) موجب 9 درصد افزایش استحکام فشاری نمونه شده است. به علاوه اضافه شدن ارتعاشات فراصوتی نیز به نوبه خود استحکام فشاری را بهبود بخشیده است (متوسط 10 درصد). هر چند افزایش زمان (1 و 2 دقیقه) به مقدار کم موجب افزایش استحکام فشاری شده است. اگرچه در نمونه کامپوزیت آلومینیوم Al6061/SiC زمان اثر بهبود دهنده بیشتری نسبت به نمونه آلومینیوم پایه (Al6061) داشته است.
- نتایج تصویربرداری میکروسکوپ نوری و تعیین اندازه دانه نشان داد اعمال امواج فراصوت موجب کاهش اندازه دانه‌ها، ریز شدن و کاهش تخلخل در آلیاژهای مورد مطالعه شده است. اگرچه اضافه کردن ذرات تقویتی نیز باعث ریزتر شدن ساختار شده است (17 درصد). اما اعمال ارتعاشات فراصوتی در هر دو نمونه آلومینیوم (Al6061) و کامپوزیت فلزی (Al6061/SiC) موجب ریزتر شدن ساختار تا نزدیک به 50 درصد اندازه دانه نمونه بدون فراصوت شده است (در زمان اعمال 2 دقیقه). کاهش اندازه دانه به پدیده‌های حاصل از کویتاسیون و جریان فراصوتی شامل، سرمای فوق اشباع، نیروی برشی شدید و توزیع یکنواخت ذرات تقویتی نسبت داده شده است.
- نتایج تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی (SEM) بیانگر توزیع یکنواخت تر ذرات تقویتی SiC در نمونه‌های با اعمال ارتعاشات فراصوتی نسبت به نمونه بدون فراصوت می‌باشد. در این بین افزایش زمان موجب بهبود بیشتر این یکنواختی شده است.

- [17] Bajpai, G., Tiwari, A., Purohit, R., Namdev, A., Shubham, S. K., "Development of Al 7075 alloy with nano SiC composites through ultrasonic assisted stir casting techniques and mechanical testing of properties," *Advances in Materials and Processing Technologies*, Vol. 10, No. 4, pp. 2780-2790, 2024.
- [18] Puga, H., "Influence of ultrasonic melt treatment on microstructure and mechanical properties of AlSi9Cu3 alloy," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211, pp. 1729-1735, 2011.
- [19] Puga, M., Prokic, N., Dongen, "Breakthrough in Ultrasonic assisted industrial continuous casting," *Aluminium International Today*, 2014.
- [20] Pragathi, P., Elansezhian, R., "Mechanical and microstructure behaviour of aluminum nanocomposite fabricated by squeeze casting and ultrasonic aided squeeze casting: A comparative study," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 956, pp. 170203, 2023.
- [21] Prokic, M., "Wideband Multi-Frequency, Multimode, and Modulated (MMM) Ultrasonic Technology," Feng, H., Barbosa-Canovas, G., Weiss, J., editors, *Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing*. New York, NY: Springer New York, pp. 125-140, 2011.
- [22] Don-Hyun, C., Yong-Il, K., Dae-Up, K., Seung-Boo, J., "Effect of SiC particles on microstructure and mechanical property of friction stir processed AA6061-T4," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 22, pp. 614-618, 2012.