



پژوهش‌نامه ریخته‌گری

مقاله پژوهشی:

تولید و بررسی خواص کامپوزیت زمینه آلومینیم تقویت‌شده با ساختار شبکه‌ای منظم یکپارچه مس

شیمای احمدزاده سلوط^۱، سید محمد حسین میرباقری^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران.

۲- استاد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران.

* نویسنده مکاتبه کننده: Email: smhmirbagheri@aut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۱

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۸

چکیده:

هدف از پژوهش حاضر امکان‌سنجی تولید یک کامپوزیت پایه آلومینیم است که فاز تقویت‌کننده مسی آن به روش ریخته‌گری دقیق تهیه شده است. مشخصه اصلی فاز تقویت‌کننده مسی، واحد و یکپارچه بودن آن است. در واقع مدل مومی فاز تقویت‌کننده یکپارچه به روش پرینت سه‌بعدی با هندسه‌ای تکراری از سلول‌های منظم مکعبی با قطر یال‌های ۲ و ۳ میلی‌متر، تهیه شده است. لذا، بعد از قرارگیری مدل در قالب گچی و تخلیه موم و سپس پخت قالب، با ریخته‌گری مذاب مس در آن، یک شبکه سه‌بعدی از مس یکپارچه با ساختار هندسی مشبک lattice structure به دست می‌آید. در مرحله بعدی، با قرار دادن این ساختار مشبک منظم مسی در یک قالب فلزی مکعب مستطیل، عملیات ریخته‌گری رخنه‌دهی توسط مذاب آلومینیم در فضای خالی این شبکه مسی، در داخل یک کوره الکتریکی، انجام می‌گیرد. نهایتاً با کنترل زمان ماند قالب در کوره، سرعت انجماد، قبل از حل شدن شبکه مسی در زمینه آلومینیم، مشخص می‌شود و یک کامپوزیت جدید فلز/فلز ریخته‌گری خواهد شد. در ادامه، خواص فشاری کامپوزیت‌های Al/Cu تولیدی با دو قطر یال ۲ و ۳ میلی‌متر، اندازه‌گیری شده و ساختار فازی آنها به‌منظور بررسی رفتار فشاری آنها تحلیل شده است. نتایج نشان داد، چقرمگی کامپوزیت تقویت‌شده با فاز تقویت‌کننده شبکه‌ای با قطر یال ۲ و ۳ میلی‌متر به ترتیب حدود ۱۱۴ و 168 MJ.mm^{-3} است که نسبت به چقرمگی شبکه مسی آنها حدوداً ۳/۵ برابر افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی:

کامپوزیت، کامپوزیت زمینه آلومینیم، ساختار شبکه‌ای، ساختار شبکه‌ای منظم مس

ارجاع به این مقاله:

شیمای احمدزاده سلوط، سید محمد حسین میرباقری، تولید و بررسی خواص کامپوزیت زمینه آلومینیم تقویت‌شده با ساختار شبکه‌ای منظم یکپارچه مس، پژوهش‌نامه ریخته‌گری،

بهار و تابستان ۱۴۰۲، جلد ۷، شماره ۱، صفحات ۵۷-۶۸.

شناسه دیجیتال: DOI: 10.22034/FRJ.2024.446416.1191

۱- مقدمه

خستگی بالا مورد توجه صنایع مختلف از قبیل صنایع خودروسازی، هوافضا و ساختمان قرار گرفته‌اند [۳،۱]. در میان کامپوزیت‌های زمینه آلومینیم، کامپوزیت Al/Cu بیشترین رفتار شکل‌پذیری را به علت تقارن بالای شبکه FCC در هر دو فلز Cu و Al از خود نشان می‌دهند (1). امروزه، کامپوزیت‌های زمینه آلومینیم تقویت شده با مس (کامپوزیت Al/Cu)، توجهات بیشتری را در صنعت به خود جلب نموده است. زیرا این کامپوزیت‌ها از مزایای هر دو فلز آلومینیم (مقاومت به خوردگی، بالا، وزن کم و به‌صرفه بودن از نظر اقتصادی) و فلز مس (هدایت

در سال‌های اخیر کامپوزیت‌های زمینه فلزی (MMCs)، به‌عنوان موادی با خواص مکانیکی و فیزیکی منحصر به فرد از جمله سختی، نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به سایش و نیز استحکام خستگی بالا مورد توجه صنایع مختلف از قبیل صنایع خودروسازی، هوافضا، ساختمان و غیره قرار گرفته‌اند [۲،۱]. یکی از کامپوزیت‌های پرکاربرد، کامپوزیت‌های زمینه آلومینیم است که به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود از جمله سختی، نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به سایش و نیز استحکام

متعددی برای تولید ساختار شبکه‌ای مس مانند روش ذوب لیزری انتخابی (SLM^1)، روش ماشین‌کاری پرتو الکترونی (EBM^2)، روش ذوب لیزری مبتنی بر بستر پودر ($LPBF^3$) و متالورژی پودر استفاده شده است [۹-۱۱]. در این پژوهش از روش پرینت سه‌بعدی به کمک روش ریخته‌گری دقیق استفاده خواهد شد که تاکنون نسبت به سایر روش‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است [۱۲]. در ادامه کامپوزیت زمینه آلومینیم تقویت شده با ساختار شبکه‌ای سلول باز مس به کمک روش ریخته‌گری آماده شده و ریزساختار و خواص مکانیکی آن مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۲- مواد و روش تحقیق

هدف از تحقیق حاضر تولید کامپوزیت فلزی است که زمینه آن آلومینیم و فاز تقویت‌کننده آن مس است. هر دو فلز مصرفی آلومینیم خالص (Grade 1050- series 1000) و مس خالص (C11000 -Grade 1 (A)) از مفتول‌های کابل با خلوص بالای ۹۹٫۹۸٪ وزنی استفاده شده و برای ساخت مدل مومی از رزین ریخته‌گری مخصوص پرینتر سه‌بعدی رزینی استفاده شده است. ساختار مشبک سه‌بعدی مسی به‌عنوان فاز تقویت‌کننده کامپوزیت، از روش ریخته‌گری دقیق ساخته می‌شود و در مرحله بعد، کامپوزیت اصلی با رخنه‌دهی مذاب آلومینیم در شبکه مسی سه‌بعدی یکپارچه، در یک قالب فلزی ریخته‌گری و تولید می‌شود که در ادامه به شرح هر دو فرایند ریخته‌گری به‌طور مجزا پرداخته می‌شود.

۲-۱- ریخته‌گری دقیق ساختار مشبک سه‌بعدی مسی

در این تحقیق، از آلومینیم خالص به‌عنوان زمینه کامپوزیت فلزی و از ساختار مشبک مسی با هندسه حفرات منظم و باز به‌صورت سه‌بعدی، به‌عنوان تقویت‌کننده این کامپوزیت استفاده شده است. به‌منظور تولید ساختار مشبک سه‌بعدی مس، از روش ریخته‌گری دقیق و برای تولید کامپوزیت از روشی مشابه ریخته‌گری رخنه‌دهی در قالب فلزی استفاده شده است. گام اول در این پژوهش، ساخت ساختار مشبک سه‌بعدی مس است. در روش ریخته‌گری دقیق ابتدا باید مدل مومی یا پیش‌ماده مورد نظر تهیه شود. از این‌رو، مطابق شکل ۱، مدل‌سازی ساختار مشبک سه‌بعدی بر پایه تولید یک سلول واحد یا lattice مشخص، انجام شد.

حرارتی بالا، مقاومت ویژه الکتریکی کم و ... برخوردار هستند که می‌تواند به‌عنوان جایگزین مناسبی برای مس در کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار گیرد. از این‌رو، اکنون به‌طور گسترده در صنایع نفت و گاز، هوانوردی، صنایع شیمیایی، الکترونیک، خودرو و سایر زمینه‌ها استفاده می‌شود [۴].

مواردی از قبلی مورفولوژی، ابعاد و کسر حجمی تقویت‌کننده، نحوه توزیع تقویت‌کننده در زمینه و نیز فصل مشترک تقویت‌کننده و زمینه بر خواص این کامپوزیت‌های زمینه فلزی مؤثر است [۳].

تاکنون کامپوزیت‌های Al/Cu با روش‌هایی مانند متالورژی پودر و با استفاده از ذرات تقویت‌کننده مس و یا به روش اتصال نوردی و با استفاده از ورق‌های مس به‌عنوان تقویت‌کننده و غیره تولید شده‌اند. در این روش‌ها آگلومره شدن ذرات تقویت‌کننده و عدم توزیع همگن آنها سبب یکنواخت نبودن خواص کامپوزیت در تمام جهات می‌شود که می‌تواند منجر به عیوب متعدد حین کار شود [۵،۶].

فوم‌های فلزی و اخیراً ساختارهای شبکه‌ای متخلخل به‌عنوان دسته‌ای از مواد پیشرفته، توانسته‌اند توجه بسیاری از محققان و صنایع مختلف را به خود جلب کنند. این مواد، با ساختار سلولی خود، ویژگی‌های منحصر به فردی از جمله سبکی، استحکام بالا و خواص حرارتی مناسب را ارائه می‌دهند [۷]. ساختارهای مشبک سه‌بعدی متخلخل فلزی به‌ویژه مسی، ساختار سلولی با هندسه تخلخل متفاوت (منظم و نامنظم) دارند و شکل‌پذیری بالای آن‌ها به همراه رسانایی الکتریکی و حرارتی خوب مس، استحکام مکانیکی خوب و قابلیت جذب انرژی مناسب، آن‌ها را در صنایع مختلف مانند سیستم‌های مدیریت مکانیکی-حرارتی بسیار محبوب و پرکاربرد ساخته است. از جمله کاربردهای این فوم می‌توان به مواد دفع‌کننده و جاذب حرارت، مواد حامل کاتالیزورهای شیمیایی، فلیترها، ماده الکتروود باتری، جاذب صدا، مواد تزئینی درجه یک و مواد محافظ الکترومغناطیسی اشاره کرد [۸].

برای گسترش کاربردهای صنعتی ساختارهای مشبک سه‌بعدی متخلخل می‌توان آنها را به‌عنوان تقویت‌کننده در تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی مورد استفاده قرار داد تا بتوان کامپوزیتی با خواص مکانیکی یکنواخت و مطلوب از جمله استحکام و شکل‌پذیری بیشتر نسبت به فلز زمینه تولید کرد. از این‌رو در پژوهش حاضر، ساختار مشبک سه‌بعدی با تخلخل باز و منظم حفرات از جنس فلز مس، ریخته‌گری شده و به‌عنوان تقویت‌کننده در تولید کامپوزیت زمینه آلومینیمی به‌روش ریخته‌گری در قالب فلزی استفاده شده است. تاکنون از روش‌های

³ Laser Powder Bed Fusion

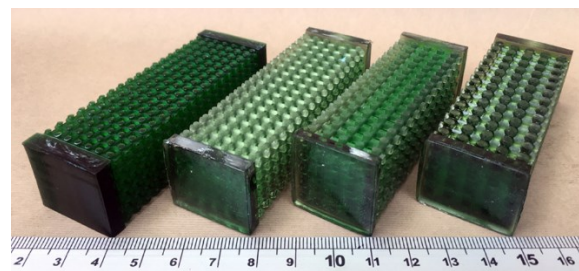
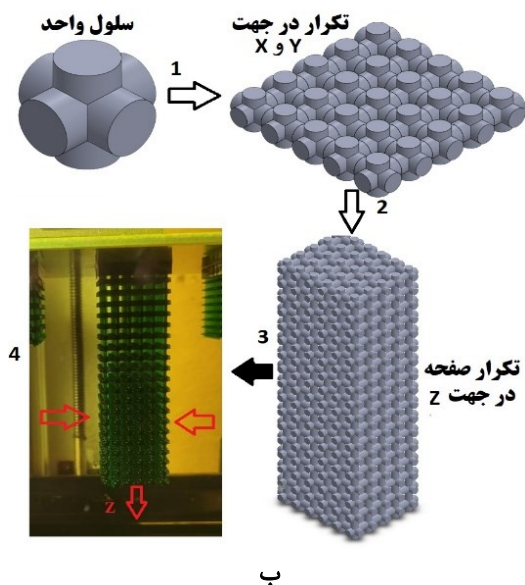
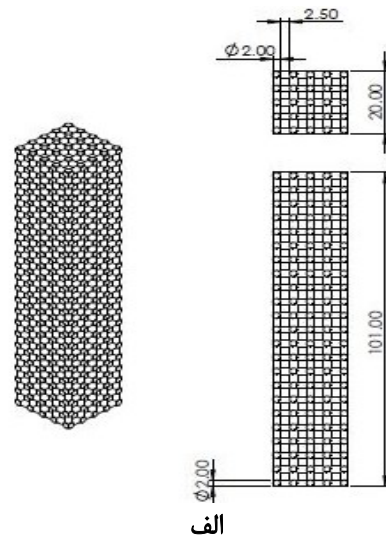
¹ Selective Laser Melting

² Electron Beam Machining

شدند. این طراحی، کسر حجمی برای قطر ۲ میلی‌متر ۳۵/۸۲ و برای قطر ۳ میلی‌متر ۵۲/۸۱ درصد حجمی است. پس از طراحی سالید موم، فایل جی کد شده آن، توسط اپراتور به کمک دستگاه ANYCUBIC-Photon-Mono-X پرینت شد. قبل از پرینت مدل دیجیتال سه‌بعدی، کنترل توپوگرافی شد، تا نقاط انفصال یا عدم تطابق یال‌های ساختار مشبک سه‌بعدی در مدل، وجود نداشته باشد. نهایتاً مدل‌های مومی مطابق شکل ۱-ج، در دو اندازه با قطر یال ۲ و ۳ میلی‌متر پرینت و آماده استفاده شدند.

پس از پرینت مدل سه‌بعدی مشبک، شاخه‌زنی مدل برای طراحی سیستم راهگامی به کمک همان رزین و پرینت سه‌بعدی در هشت کنج مدل مومی شکل ۱-ج، انجام گرفت. کل مدل و سیستم راهگامی متصل به آن از جنس موم، در داخل قالب استوانه‌ای مجوف که مخصوص دستگاه خلأ قالب‌گیری گچی است، قرار داده شد و دوغاب گچی مخصوص ریخته‌گری دقیق روی آن ریخته شد به نحوی که فقط انتهای راهگام بارریز از گچ بیرون باشد. مراحل قالب‌گیری مومی در گچ، مطابق شکل ۲، به شرح زیر است:

مطابق شکل ۲-الف، مدل مومی داخل قالب مخصوص این کار، قرار داده شد، به نحوی که حوضچه بارریز آن، بعداً توسط ملاط (دوغ آب) گچ پر نشود. در قدم بعد، مخلوط دوغاب گچی متشکل از گچ ریخته‌گری و آب دی‌یونیزه شده با نسبت وزنی ۴۰:۱۰۰ با یک هم‌زن ۴۲۰ دور بر دقیقه، هم‌زده و به صورت ملاط نسبتاً غلیظ در آمد. بلافاصله به مدت ۲ دقیقه، مطابق شکل ۲-ب، در دستگاه خلأ، تحت مکش قرار گرفت تا تمام حباب‌های معلق در آن که در اثر هم‌زدن در ملاط حبس شد، خارج شود. سپس ملاط بدون حباب، داخل قالب مخصوص (شکل ۲-الف) ریخته شد تا خودگیری انجام گیرد. این قالب مطابق شکل ۲-ج دارای جداره مجوف است تا مجدداً طی خودگیری و سفت شدن گچ، مطابق شکل ۲-د، به مدت ۵-۷ دقیقه تحت مکش قرار گیرد. در مرحله بعد، به منظور حذف موم مشبک سه‌بعدی از داخل قالب گچی و همچنین استحکام‌بخشی به قالب گچی و حذف رطوبت و آب تبلور، قالب گچی، مطابق شکل ۲-ه، به مدت ۱۳ ساعت در داخل کوره الکتریکی مقاومتی در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. پس از اتمام مراحل پخت، قالب گچی به مدت حداقل یک ساعت، به منظور جلوگیری از ترک خوردن، در دمای ۵۵۰°C نگهداری شد و خاکستر موم با دمش هوا، مطابق شکل ۲-ی، تخلیه شد. مطابق شکل ۳، بایستی قبل از مرحله نهایی پخت قالب گچی، ذوب مس آماده باشد تا ذوب‌ریزی در قالب گچی داغ با دمای ۵۵۰°C انجام گیرد. در غیر این صورت، هم امکان ترک خوردن قالب و هم جوشش مذاب وجود دارد.



شکل ۱- طراحی، رسم نقشه و پرینت ساختار مشبک سه‌بعدی مومی. الف) نقشه طراحی شده، ب) حجم سه‌بعدی ساختار شبکه‌ای، و ج) پیش‌ماده مومی پرینت شده با ساختار مشبک سه‌بعدی و حفرات منظم.

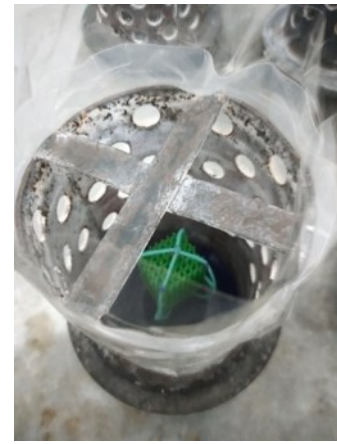
برای تهیه سازه سه‌بعدی مشبک، سلول واحد انتخاب شده، در تمام جهات (X, Y, Z) تکرار می‌شود تا حجم سه‌بعدی آن به دست آید (شکل ۱-ب). سپس سالید به دست آمده پرینت می‌شود. نقشه مدل مومی مشبک سه‌بعدی، مطابق شکل ۱-الف، دارای ابعاد ظاهری ۲۵×۲۰×۱۰۰ میلی‌متر است. همچنین، یال‌های شبکه سه‌بعدی مومی در دو اندازه با قطر یال ۲ و ۳ میلی‌متر انتخاب



ج



ب



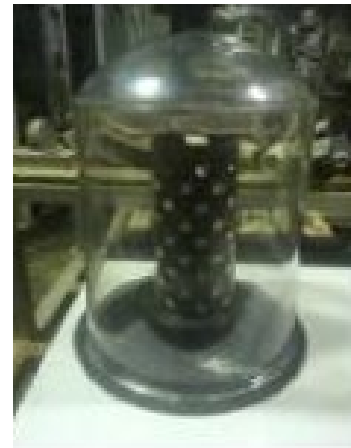
الف



ی



هـ



د

شکل ۲: مراحل قالب گیری ساختار مشبک سه بعدی مومی و تهیه قالب گچی: (الف) جایابی مدل مومی در قالب، (ب) هواگیری اولیه از دوغاب گچی، (ج) پر کردن قالب و مستغرق شدن مدل مومی در ملاط گچ، (د) خودگیری و سفت شدن ملاط گچی داخل قالب همراه با اعمال خلأ، (هـ) پخت قالب گچی در کوره الکتریکی همراه با حذف موم، و (ی) تمیز کردن خاکستر موم در کوره.



ج



ب



الف

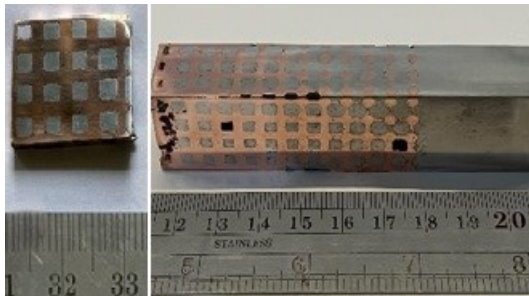
شکل ۳: مراحل ریخته گری دقیق برای تولید ساختار مشبک سه بعدی مسی، (الف) ذوب مس خالص در کوره القایی و گاززدایی، (ب) ریخته گری در قالب گچی داغ همراه با مکش طی ریخته گری و انجماد، (ج) سرد کردن و شستشو در آب و خارج نمودن نمونه های مشبک مسی سه بعدی همراه با سیستم راهگامی آنها.



الف



ب



ج

شکل ۴- مراحل تولید کامپوزیت زمینه آلومینیم تقویت‌شده با سازه مشبک سه‌بعدی مس: الف) طراحی و ساخت قالب فولادی با حجم بزرگتر از پیش‌ماده مشبک مسی، ب) رخنه مذاب آلومینیم در شبکه سه‌بعدی مسی، و ج) کامپوزیت بعد تراشکاری.

حرارت، انتقال جرم و بهره‌گیری از دیاگرام فازی آلومینیم-مس، مشخص شود. مدت زمان نگهداری قالب فلزی و محتوای آن (سازه مشبک سه‌بعدی مسی جامد داغ با دمای حدود 680°C ، بعلاوه مذاب آلومینیم خالص 680°C که آن را احاطه نموده) در کوره به گونه‌ای طراحی شده که فقط قسمتی از سطح شبکه مسی (زیر 200 میکرومتر) در مذاب آلومینیم حل شود. در مرحله بعد، بلافاصله، قالب فلزی از کوره خارج و با اندکی تأمل در دمای محیط برای انجام کامل کامپوزیت (که این زمان نیز طراحی شده)، قالب فلزی و کامپوزیت داخل آن، در مخزن آب

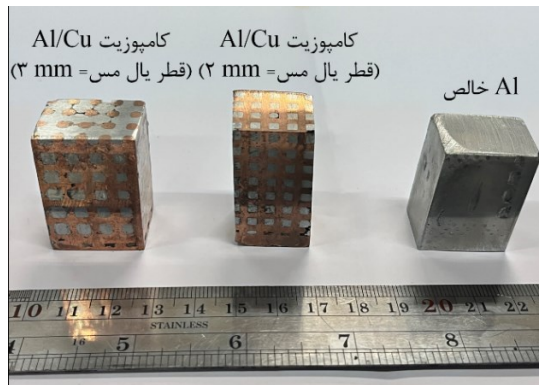
لذا مطابق شکل ۳-الف، عملیات ذوب مس در کوره القایی با ذوب مفتول‌های مسی با خلوص 99.98 درصد وزنی، تحت اتمسفر احیایی انجام گرفت. مذاب مس، قبل از ریخته‌گری در قالب گچی، با زغال مخصوص عملیات گاززدایی انجام شد و بعد از جمع‌آوری سرباره، مطابق شکل ۳-ب، در قالب گچی داغ، که از زیر تحت مکش است، ریخته‌گری می‌شود. عملیات مکش تا انجماد کامل مس در قالب ادامه دارد. دمای بارریزی حدود 100 درجه بالاتر از نقطه ذوب مس تنظیم شد. در مرحله آخر، قالب گچی، مطابق شکل ۳-ج، در مخزن آب انداخته می‌شود تا هم سرد شود و هم گچ آن در آب حل شود و قطعه مسی مشبک سه‌بعدی با ساختار حفرات سلولی منظم، از گچ جدا شود. سپس ساختار مشبک سه‌بعدی مسی از سیستم راهگامی جدا و پولیش و کاملاً تمیز می‌شود. در مرحله بعد این ساختارهای مشبک مس به‌عنوان پیش‌ماده، به‌عنوان فاز تقویت‌کننده، در ساخت کامپوزیت آلومینیم/ مس استفاده می‌شود. آلومینیم خالص، زمینه اصلی کامپوزیت است و ساختار مشبک سه‌بعدی مسی، فاز تقویت‌کننده کامپوزیت خواهد بود.

۲-۲- ریخته‌گری و تولید کامپوزیت آلومینیم / مس در قالب

فلزی

برای تولید کامپوزیت زمینه آلومینیم که فاز تقویت‌کننده مسی آن واحد، یکپارچه و به‌صورت شبکه سه‌بعدی، مطابق شکل ۳-ج است، ابتدا برای حذف هرگونه آلودگی و اکسید از سطح پیش‌ماده مشبک سه‌بعدی مسی، پیش‌ماده در حمام اولتراسونیک حاوی محلول سولفوریک اسید به مدت 10 دقیقه اسیدشویی می‌شود و تا قبل از استفاده برای تزریق مذاب، در محلول احیایی EDTA، نگهداری می‌شود.

در ادامه مطابق شکل ۴-الف، یک قالب فولادی CK45 با حجمی اندکی بیشتر از سازه مشبک سه‌بعدی مسی تراشکاری شده (ابعاد مقطع قالب؛ از ابعاد مقطع سازه مشبک مسی، به‌اندازه 5 میلی‌متر بزرگ‌تر است. این قالب در کوره الکتریکی به دمای 680°C قرار داده می‌شود تا دمای پیش‌گرم قالب تقریباً با کوره یکسان شود. در مرحله بعد، ابتدا مذاب آلومینیم در کوره القایی سریع ذوب می‌شود و با کنترل دمای بوته آلومینیم و رسیدن دما به 750°C ، بلافاصله، سازه مشبک سه‌بعدی مسی در محفظه قالب قرار داده می‌شود و مذاب آلومینیم داخل قالب فلزی داغ حاوی سازه مشبک سه‌بعدی مسی، در داخل کوره مقاومتی، مطابق شکل ۴-ب، ریخته می‌شود (ریخته‌گری در داخل اتمسفر کوره). زمان انجماد، به علت نداشتن تحت تبرید (مجموعه قالب و محتوای مذاب آن که داخل کوره هستند)، می‌تواند بر اساس روابط انتقال



شکل ۵- تصویر نمونه های آزمون فشار آلومینیم خالص و کامپوزیت های زمینه آلومینیم تقویت شده با ساختار شبکه ای با قطرهای یال ۲ و ۳ mm.

ساختار شبکه ای منظم مس است و قسمت تیره نیز متعلق به فاز آلومینیم زمینه است. قطر یال ساختار شبکه ای منظم مس که در این کامپوزیت ۲ mm است نیز در این تصویر مشخص است. از طرفی زمینه آلومینیم در مجاورت یال های سلول ساختار شبکه ای مس نیز در شکل ۶ - ب مشخص شده است که زمینه آلومینیم مربعی با ضلع متوسط ۲,۶۵ mm است. بزرگنمایی های بالاتر از فصل مشترک زمینه آلومینیم و یال ساختار شبکه ای تقویت کننده مس که با مستطیل زرد رنگ در شکل ۶ - ب مشخص شده است در شکل ۷ نشان داده شده است. شکل ۷- الف تصویر FE-SEM فصل مشترک زمینه آلومینیم و یک یال مس، که متعلق به یکی از سلول های ساختار شبکه ای است. شکل ۷- ب نیز بزرگنمایی بالاتری از آن را نشان می دهد. با توجه به تحقیقاتی که در خصوص ترکیبات بین فلزی سیستم دوتایی Al و Cu تاکنون انجام شده است، اطلاعاتی نظیر نام، ساختار و ترکیب شیمیایی فازهای بین فلزی بسته به دما و زمان استحاله بیان شده است [۶]. لذا با توجه به این اطلاعات در پژوهش حاضر، آزمون EDS برای تعیین فازها در استحکام و اتصال لایه فصل مشترک Al/Cu انجام گرفت. نتایج آنالیز نیمه کمی EDS در نقاط A, B, C, D, E, F, G, H, I و J در فصل مشترک نفوذی Al/Cu در شکل ۷- ب، در جدول ۱ ارائه شده است.

با مقایسه نتایج جدول ۱ با نتایج گزارش شده در تحقیقات پیشین [۵] می توان به فازهای موجود در فصل مشترک Al و Cu پی برد. مطابق شکل ۷- ب مشخص است که با حرکت از سمت Cu به سمت آلومینیم (نقاط A تا J)، درصد مس کاهش و درصد آلومینیم افزایش یافته و در جهت عکس آن (نقاط J تا A) نیز درصد آلومینیم کاهش و درصد مس افزایش یافته است. علت این امر، نفوذ اتم های مس جامد به درون مذاب آلومینیم در مدت

سرد کوئنچ می شوند. زمان های مشخص شده فوق تابع دمای کوره هستند و بر اساس روابط انتقال حرارت و تجربه به شرح زیر مشخص شده اند تا پیوند نفوذی بین مس و آلومینیم ایجاد شود. برای اطمینان از ایجاد اتصال نفوذی، قالب فولادی حاوی مذاب زمینه آلومینیم و سازه مشبک مس به مدت ۳۰ ثانیه در داخل کوره مقاومتی با دمای ۶۸۰ °C نگه داشته شد. در ادامه قالب فولادی از کوره خارج شده و در دو مرحله سرد می شود. ابتدا به مدت ۱۲۰ ثانیه در هوا سرد شده و سپس در آب، کوئنچ می شود. سپس کامپوزیت ریختگی به دست آمده، تراشکاری می شود. شکل ۴- ج نمایی از این کامپوزیت ریختگی و برش مقطع آن را بعد از تراشکاری نشان می دهد. در تصاویر شکل ۵، به خوبی ساختار مشبک سه بعدی مسی در زمینه آلومینیم، مشهود است. به منظور بررسی ساختار نمونه های کامپوزیت های تولید شده، از آزمون متالوگرافی نوری با میکروسکوپ نوری Leitz Aristomet استفاده شد و تصاویر توسط نور تک فام و پلاریزه در بزرگنمایی های مختلف، گرفته شدند.

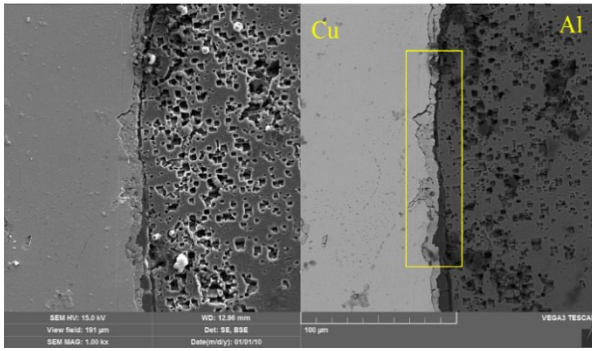
برای حکاکی نمونه های متالوگرافی از محلول اچ حاوی ۱۹۰ میلی لیتر آب، ۵ میلی لیتر اسید نیتریک، و ۱۰ میلی لیتر اسید هیدروکلریک و ۲ میلی لیتر اسید هیدروفلوئوریک استفاده شد. همچنین برای مشاهده دقیق تر ریزساختار و بررسی اتصال نفوذی میان زمینه آلومینیم و فاز تقویت کننده مسی از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FE-SEM) مدل MIRA3 ساخت شرکت TESCAN دارای قدرت تفکیک در حد ۴-۵ نانومتر در ولتاژ ۱۵ KV و ۴/۵ نانومتر در ولتاژ ۱ KV و مجهز به سیستم آشکارساز (EDS)، به صورت نقطه ای و خطی استفاده شد.

برای ارزیابی خواص مکانیکی کامپوزیت تولید شده با دو قطر ۲ و ۳ میلی متر برای فاز تقویت کننده آن و همچنین آلومینیم خالص، آزمون فشار تک محوره بر اساس استاندارد ISO 13314 روی نمونه های استاندارد انجام شد. شکل ۵ نمایی از نمونه های آماده شده برای این آزمون ها را نشان می دهد.

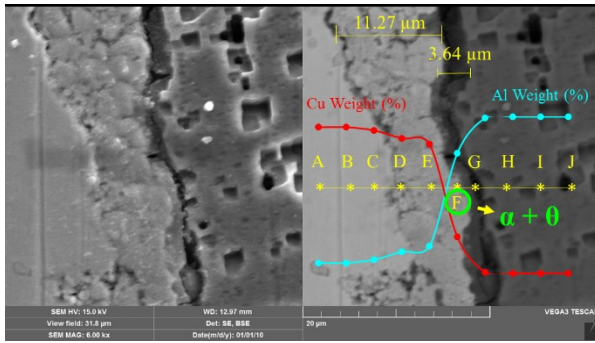
۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی ریزساختار

در ابتدا به منظور بررسی ریزساختار کامپوزیت زمینه آلومینیم تقویت شده با ساختار مشبک سه بعدی مس، از سطح مقطع ماشین کاری شده آنها، برشی به ارتفاع ۵ میلی متر تهیه شد و سپس، بررسی های ریزساختار متالورژیکی، روی آن انجام گرفت. تصویر FE-SEM سطح مقطع کامپوزیت های تولید با قطر یال ۲ mm در شکل ۶- الف نشان داده شده است. همان گونه که در این تصویر نشان داده شده است، قسمت های روشن متعلق به



الف



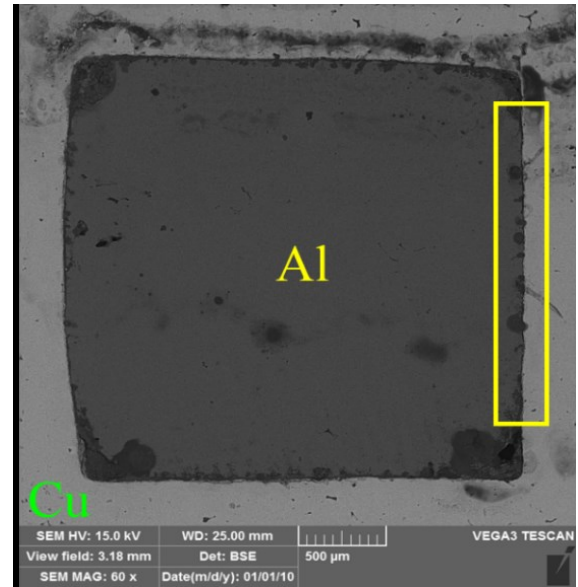
ب

شکل ۷- تصاویر FE-SEM (الف) سطح مقطع کامپوزیت زمینه آلومینیوم تقویت‌شده با ساختار شبکه‌ای منظم مس با قطر یال ۲ mm، (ب) تصویر یک سلول شبکه‌ای مس در مجاورت زمینه آلومینیوم.

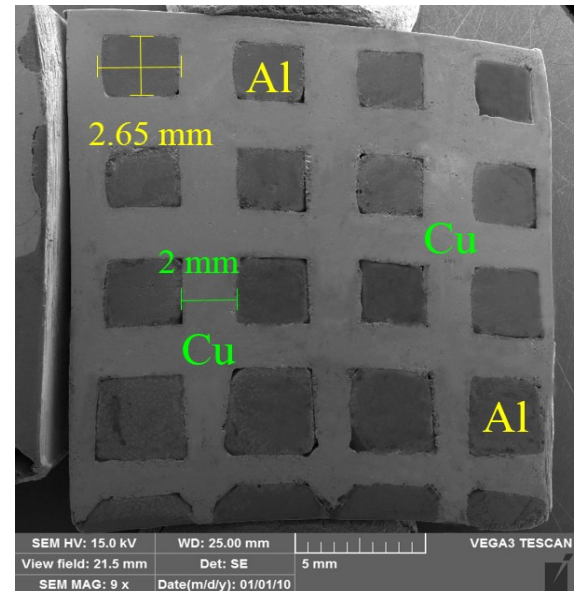
برای اطمینان از وجود فازهای بین فلزی یا محلول جامد، تلاش شد قسمتی از فصل مشترک تحت آزمون XRD قرار گیرد و پراش‌های فازهای به‌دست‌آمده، با توجه به فاصله اتمی، تعیین استوکیومتری شوند. نتایج این پراش در فصل مشترک Al/Cu در شکل ۸ ارائه شده است. مشخص است علاوه بر فازهای مس و آلومینیوم، فاز CuAl_2 یا θ که یک فاز بین فلزی در دیگرام فلزی بعد از محلول جامد α ، است، در فصل مشترک تشکیل شده است. از این رو، علاوه بر این ذرات CuAl_2 توانسته‌اند در فصل مشترک اتصال لازم را ایجاد کنند و به استحکام‌بخشی تا حدی کمک کنند. این مطلب در بخش خواص مکانیکی به تفصیل ارائه خواهد شد.

جدول ۱- آنالیز EDS نقاط مشخص شده در شکل ۷-ب)

Point	Al (W %)	Cu (W %)	Phase
A	7.02	92.98	Cu
B	6.96	93.04	Cu
C	9.01	90.99	Cu
D	14.11	85.89	Cu
E	17.83	82.17	Cu
F	76.68	23.32	$\alpha + \theta$
G	98.79	1.21	α -Al
H	99.70	0.30	α -Al
I	99.72	0.28	α -Al
J	99.72	0.28	α -Al



الف

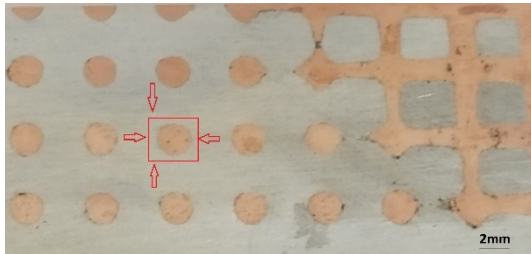


ب

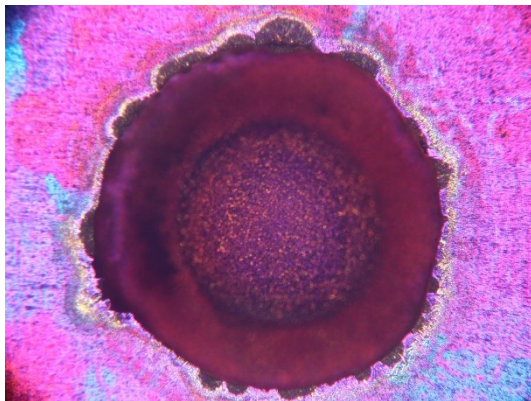
شکل ۶- تصاویر FE-SEM (الف) سطح مقطع کامپوزیت زمینه آلومینیوم تقویت‌شده با ساختار شبکه‌ای منظم مس با قطر یال ۲ mm، (ب) تصویر یک سلول ساختار شبکه‌ای مس در مجاورت زمینه آلومینیوم.

زمان ۳۰ ثانیه‌ای است که کامپوزیت در داخل کوره در دمای 680°C نگهداری شد. در این دما مس جامد و آلومینیوم مذاب است. لذا، نفوذ متقابل فاز مذاب/جامد رخ داده است و ضخامت لایه نفوذی که در اثر نفوذ اتم‌ها در فصل مشترک مذکور حدوداً $15, 18 \mu\text{m}$ است. مطابق شکل ۷-ب، این ضخامت از دو بخش تشکیل شده است: بخش اول مربوط به نقاط D و E که حاوی محلول جامد بر پایه مس است با ضخامت حدود $11, 27 \mu\text{m}$ و بخش دوم مربوط به نقاط F و G که حاوی فاز ترکیب بین فلزی θ - CuAl_2 و فاز α -Al است و ضخامت آن حدود $3, 64 \mu\text{m}$ است.

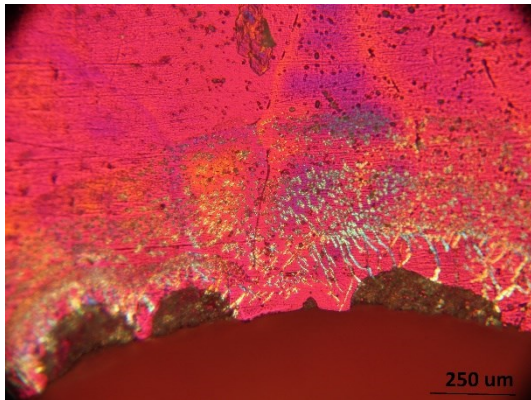
مس ۲ و ۳ میلی متر تحت آزمون فشار تک محوری با نرخ کرنش $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ، طبق استاندارد بین المللی ISO 13314، اندازه گیری و بررسی می شود و سپس با رخنه دهی مذاب آلومینیم خالص در این شبکه مسی، رفتار فشاری کامپوزیت تولید شده، بررسی و سپس با هم دیگر مقایسه می شوند.



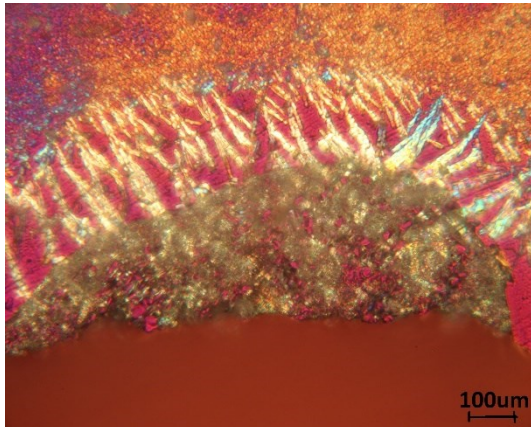
الف



ب

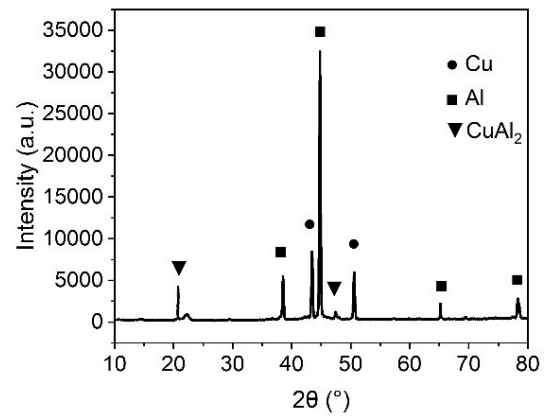


ج



د

شکل ۹- متالوگرافی آلومینیم آلیاژی اطراف سیم مسی ۲mm.



شکل ۸- نتایج XRD در فصل مشترک Al/Cu برای قطر ۲mm

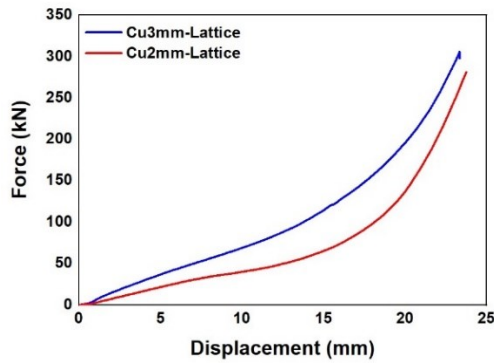
در تصاویر شکل ۹ تلاش شده تا متالوگرافی قسمتی از فصل مشترک Al/Cu برای سیم مسی ۲ میلی متری با حرکت به سمت زمینه آلومینیمی ارائه شود. در شکل ۹-الف قطر سیم های مسی ۲ میلی متری در شبکه یکپارچه مسی بعد تراشکاری (مورب) نشان داده شده است. قسمتی که با کادر قرمز در تصویر شکل ۹-الف، مشخص شده در تصاویر شکل ۹-ب الی ۹-د، با بزرگ نمایی و توسط نور پولاریزه، نمایش داده شده است. همان طور که دیده می شود، با فاصله گرفتن از فصل مشترک مس، زمینه آلومینیم توسط نفوذ اتم های مس آلیاژی شده، (مس جامد بوده و آلومینیم مذاب در مدت زمان ۳۰ ثانیه نگهداری شده در کوره) فاز یوتکتیک ایجاد شده است.

از این رو، طبق دیاگرام مس-آلومینیم، بسته به میزان غلظت مس حل شده در مذاب آلومینیم مجاور آن، غلظت از طرف مس به زمینه آلومینیم مذاب کم می شود. منتهی، تا زمانی که مذاب آلومینیم در مدت نگهداری در کوره مذاب است و دارد با مکانیزم نفوذ در حالت مذاب؛ غلیظ می شود، به صورت تک فاز محلول است. اما با خروج نمونه از کوره و سرد شدن، به ترتیب فازهای محلول (Cu)، یوتکتیک (شامل فاز بین فلزی تتا $(\theta - \text{CuAl}_2)$ و $\alpha\text{-Al}$ و محلول $(\alpha\text{-Al})$ ایجاد خواهد شد و چون بیشترین غلظت مس آلیاژ در تماس با فصل مشترک است، طبق نمودار فازی و نتایج آزمون XRD در شکل ۸، در فصل مشترک آلومینیم و یال مس فاز بین فلزی تتا تشکیل شده است. در آنالیز عنصری نقاط A تا J شکل ۷-ب در جدول ۱ هم این مطلب تأیید شده بود و مشخص شده است که در نقطه F در فصل مشترک، فاز بین فلزی به صورت یوتکتیک $(\alpha + \theta)$ تشکیل شده است.

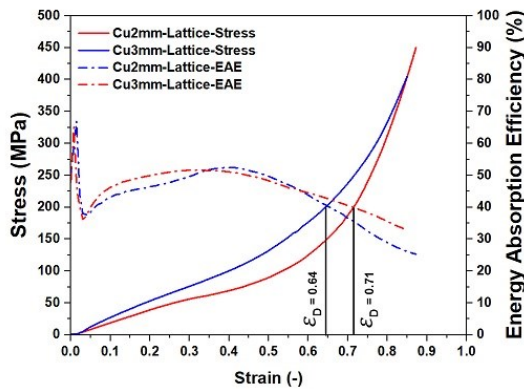
۳-۲- بررسی خواص مکانیکی

برای بررسی تأثیر ساختار شبکه ای منظم و یکپارچه مس به عنوان تقویت کننده در کامپوزیت زمینه آلومینیم، ابتدا رفتار تنش فشاری ساختارهای شبکه ای منظم و یکپارچه مس با قطر یال

در معادله ۲ انرژی جذب بر حجم نمونه‌ها تقسیم شده تا دانسیته جذب انرژی به دست آید، در این صورت مقایسه در حجم یکسان دقیق‌تر خواهد بود. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، دانسیته انرژی جذب، به ازای واحد حجم؛ برای شبکه مسی با قطر ۲ میلی‌متر 50.46 M.J./m^3 و برای قطر ۳ میلی‌متر 67.38 M.J./m^3 است. درحالی‌که مقدار انرژی جذب بر واحد جرم، به ترتیب برای قطر ۲ و ۳ میلی‌متر، برابر $4/2$ و $2/84 \text{ J/g}$ است.

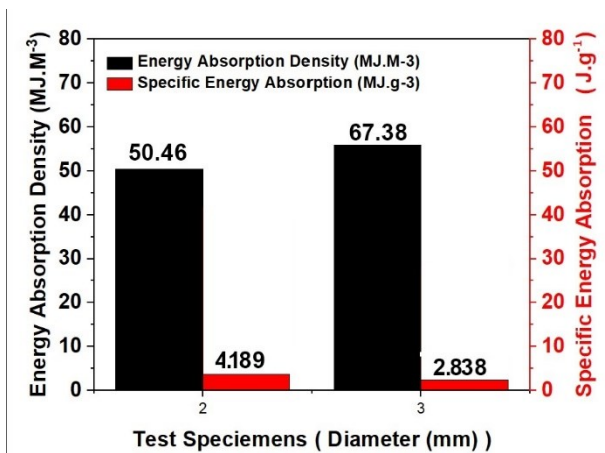


الف



ب

شکل ۱۰- الف) منحنی نیرو-جابجایی، و ب) منحنی تنش-کرنش مهندسی ساختارهای شبکه‌ای مس با قطر یال ۲ و ۳ میلی‌متر.



شکل ۱۱- مقایسه دانسیته انرژی جذب شده برای ساختارهای شبکه‌ای مس با قطر یال ۲ و ۳ میلی‌متر به ازای واحد حجم و وزن.

الف) رفتار فشاری شبکه‌های مسی

نتایج آزمون فشار برای شبکه‌های مسی، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. شکل ۱۰-الف منحنی نیرو-جابجایی و شکل ۱۰-ب منحنی تنش-کرنش ساختارهای شبکه‌ای با یال‌های مسی ۲ و ۳ میلی‌متر را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، منحنی نیرو-جابجایی این ساختارها، رفتار صعودی داشته و مقدار معینی برای عبور از حالت الاستیک به پلاستیک به علت تخلخل مس از خود نشان نداده است. لذا در جایی که شیب منحنی عوض می‌شود (55 MPa)، احتمالاً انتهای ناحیه الاستیک باشد. ساختار شبکه‌ای مس با قطر یال ۳mm نسبت به ساختار شبکه‌ای مس با قطر یال ۲mm نیروی بیشتری را در مقدار جابجایی یکسان تحمل می‌کند و رفتار جذب انرژی بیشتری از خود نشان می‌دهد. از منحنی تنش-کرنش مهندسی ساختارهای شبکه‌ای مسی مطابق شکل ۱۰-ب برای اندازه‌گیری مقدار جذب انرژی استفاده شده است. از آنجایی که برای اندازه‌گیری مقدار جذب انرژی، طی تغییر شکل پلاستیک، می‌توان آن را به دو مرحله دسته‌بندی نمود. مرحله اول که تا قبل از کرنش چگالش^۱ است و مرحله دوم، بعد از کرنش چگالش، که تقریباً فلز به حالت چگال رسیده و تغییر کرنش آن جزئی است. در مبحث جذب انرژی ناشی از ضربه مکانیکی، میزان جذب انرژی بالا، در کرنش‌های وسیع همراه با سطح تنش پایین، مطلوب است. لذا مقدار انرژی جذب شده تا قبل از کرنش چگالش هر دو شبکه مسی، در این پژوهش اهمیت دارد. از این رو، به کمک روابط موجود برای محاسبه راندمان انرژی ابتدا کرنش چگالش مشخص می‌شود [۱۳]:

$$\eta = \frac{1}{\sigma_m \varepsilon_m} \int_0^{\varepsilon_m} \sigma d\varepsilon \quad (1)$$

در معادله فوق، η راندمان جذب انرژی، تا کرنش چگالش ε_d و تنش در این نقطه در تنش چگالش σ_d است. با رسم راندمان انرژی در منحنی تنش-کرنش، در کرنشی که منحنی راندمان ناگهان شکسته می‌شود، خطی عمود نموده و آن را کرنش چگالش می‌نامند. لذا، سطح زیر منحنی تنش-کرنش تا کرنش چگالش به‌عنوان جذب انرژی مؤثر، شناخته می‌شود.

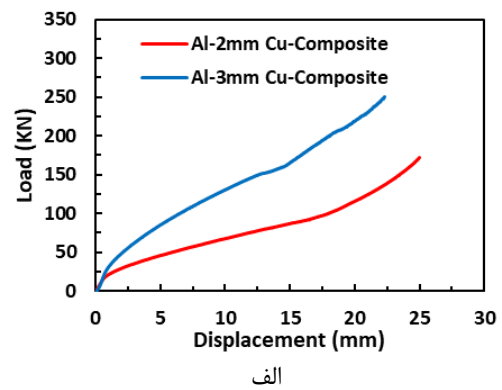
پس از مشخص شدن کرنش چگالش برای شبکه مسی، با قطر یال‌های ۲ و ۳ میلی‌متری، به ترتیب برابر 0.71 و 0.64 کرنش، به کمک معادله ۲، مقدار انرژی جذب تا کرنش‌های چگالش فوق برای هر یک از شبکه‌های مذکور محاسبه شد [۱۴]:

$$u = \frac{1}{V} \int_0^x F \cdot dx \quad (2)$$

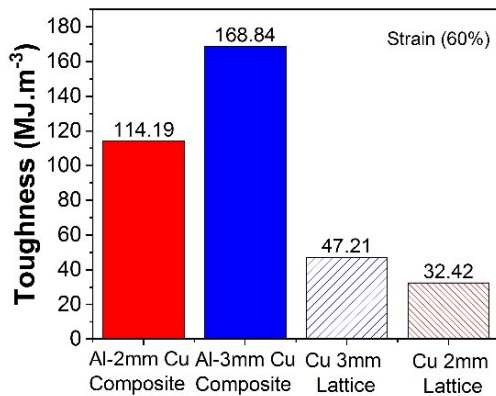
¹ Densification

ب) رفتار فشاری کامپوزیت‌ها

در ادامه برای بررسی مکانیکی کامپوزیت‌های Cu/Al، بعد از رخنه‌دهی مذاب آلومینیم در ساختار شبکه‌ای مس و تولید کامپوزیت Al/3D-Cu، رفتار فشاری آنها برای دو سازه کامپوزیت آلومینیم تقویت شده با شبکه‌های مسی با قطر یال ۲ و ۳ میلی‌متر به کمک آزمون فشار تک‌محور، طبق استاندارد ASTM E8 با نرخ کرنش 1 mm.min^{-1} اندازه‌گیری و با نتایج آزمون فشار شبکه‌های مسی، مقایسه شد. نتایج آزمون فشار برای کامپوزیت‌های تقویت شده با شبکه مسی با قطر یال‌های ۲ و ۳ میلی‌متر؛ در شکل ۱۲-الف برحسب نیرو-جابجایی، ارائه شده است. در شکل ۱۲-ب، نتایج تنش-کرنش مهندسی ارائه شده است و قسمت الاستیک کامپوزیت‌ها نیز



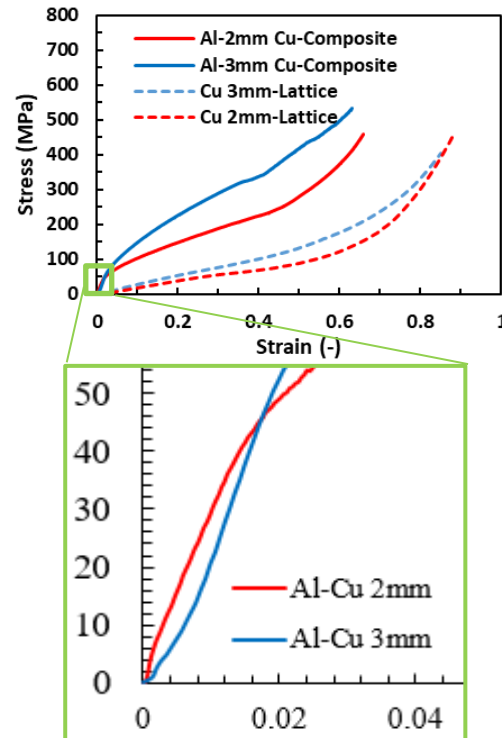
الف



شکل ۱۳- مقایسه چقرمگی برای کامپوزیت‌های تقویت شده شبکه مسی یکپارچه با قطر یال‌های ۲ و ۳ میلی‌متر و نیز شبکه مسی تنها، به ازای واحد حجم.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله کامپوزیت زمینه آلومینیم تقویت شده به کمک ساختار شبکه‌ای مس با دو قطر مختلف ۲ و ۳ میلی‌متر، به روش ریخته‌گری تهیه شد. این فرآیند شامل دو مرحله ریخته‌گری مستقل است. ابتدا شبکه مسی به کمک ریخته‌گری دقیق مومی با انجماد طبیعی تحت مکش تولید شد. سپس این شبکه‌های مسی بعد از تمیزکاری در قالب فلزی قرار گرفته و به روش رخنه



ب

شکل ۱۲-الف) منحنی نیرو-جابجایی کامپوزیت‌ها، ب) منحنی تنش-کرنش مهندسی کامپوزیت‌ها و شبکه‌های مسی با قطر یال‌های ۲mm Al-Cu و 3mm بزرگنمایی ناحیه الاستیک

- [4] Mao A, Zhang J, Yao S, Wang A, Wang W, Li Y, The diffusion behaviors at the Cu-Al solid-liquid interface: A molecular dynamics study, *Results Phys.*, 2020, 1(16) 102998.
- [5] Bajakke P.A., Malik V.R., Saxena K.K., Deshpande A.S., A novel ultrahigh conductive Al-Cu composite produced via microwave sintering and post-treated by friction stir process, *Adv Mater Process Technol.*, 2022, 30(8)(sup.2)) 575-84.
- [6] Kim M.J., Lee K.S., Han S.H., Hong S.I., Interface strengthening of a roll-bonded two-ply Al/Cu sheet by short annealing, *Mater Charact.*, 2021, 1(174) 111021.
- [7] Jagadeesh B., Duraiselvam M., Prashanth K.G., Deformation behavior of metallic lattice structures with symmetrical gradients of porosity manufactured by metal additive manufacturing, *Vacuum*, 2023, 1 (211) 111955.
- [8] Singh G., Pandey P.M., Uniform and graded copper open cell ordered foams fabricated by rapid manufacturing: surface morphology, mechanical properties and energy absorption capacity, *Mater. Sci. Eng. A*, 2019, 22(761) 138035.
- [9] De Pasquale G., Luceri F., Riccio M., Experimental characterization of SLM and EBM Cubic lattice structures for lightweight applications, *Exp. Mech.*, 2019, 59(4) 469-82.
- [10] Liu Y., Zhang J., Niu R., Bayat M., Zhou Y., Yin Y., Manufacturing of high strength and high conductivity copper with laser powder bed fusion, *Nat Commun*, 2024, 15(1) 1283.
- [11] Hassan A., Alnaser I.A., A review of different manufacturing methods of metallic foams, *ACS Omega*, 2024.
- [12] Jiang W., Guan F., Li G., Jiang H., Zhu J., Fan Z., Processing of Al/Cu bimetal via a novel compound casting method, *Mater. Manuf. Process.*, 2019, 34(9)1-10.
- [13] Rohani-Nejad S., Hosseinpour M., Mirbagheri S.M.H., Investigation of Energy Absorption Behavior of Light Sandwich Panel with Nickel/Polymer Open-cell foam core during compression, *Adv. Eng. Mater.*, 2022, 24(12) 1-13.
- [14] Mirbagheri S.M.H., Salehi M., Complementary and normalized energies during static and dynamic uniaxial deformation of single and multi-layer foam-filled tube, *J Sandw Struct Mater.*, 2022, 24(2) 1470-90.

دهی مذاب آلومینیم در فضای شبکه مسی پیش گرم شده در داخل کوره نفوذ داده شد. لذا، زمان انجماد طولانی و کنترل شده (۳۰ ثانیه) برای اتصال نفوذی مس/آلومینیم با چندین آزمون به دست آمد و نهایتاً کامپوزیت آلومینیم تقویت شده با شبکه مسی پیوسته و یکپارچه منظم (Lattice) تولید شد.

نتایج بررسی مخرب برای دست‌یابی به ریزساختار و خواص مکانیکی شبکه مسی مذکور و کامپوزیت تولید شده از آن به شرح زیر است:

۱- با نفوذ اتم‌های مس و آلومینیم در فصل مشترک یال شبکه‌ای مس و زمینه، اتصال نفوذی میان یال تقویت‌کننده و زمینه آلومینیم رخ داده و ترکیب بین فلزی CuAl_2 و محلول جامد در این فصل مشترک توسط آزمون‌های XRD و EDS تأیید شد. همچنین در تصاویر متالوگرافی نوری و الکترونی دیده می‌شود، با دور شدن از فصل مشترک، فاز یوتکتیک نیز تشکیل شده است.

۲- ساختارهای شبکه‌ای مس با قطر یال ۲ و ۳ میلی‌متر در کرنش چگالش خود، حداکثر تنش در حدود 200 MPa را تحمل کرده‌اند. این کرنش برای شبکه مسی با قطر ۲ و ۳ میلی‌متر، ۷۱ و ۶۴ درصد هستند.

۳- مقدار جذب انرژی شبکه‌های مسی با قطر ۲ و ۳ میلی‌متر در بارگذاری فشاری به ترتیب دارای چگالی انرژی جذب شده معادل 50 MJ.m^{-3} و 67 MJ.m^{-3} هستند.

۴- تنش تسلیم الاستیک دو کامپوزیت تقویت‌شده با شبکه مسی با قطر یال‌های ۲ و ۳ میلی‌متر تقریباً نزدیک به هم و حدود 50 MPa است.

۵- چقرمگی کامپوزیت‌های مذکور برای فاز تقویت‌کننده شبکه‌ای با قطر یال ۲ و ۳ میلی‌متر، به ترتیب تقریباً ۱۱۴ و ۱۶۸ MJ.m^{-3} هستند که برای قطر ۳ میلی‌متر حدود ۴۸٪ نسبت به قطر ۲ میلی‌متر افزایش داشته است.

۶- چقرمگی کامپوزیت‌های تولید شده نسبت به شبکه مسی آنها تقریباً ۳/۵ برابر افزایش یافته است.

مراجع

- [1] Mulyukov R.R., Korznikova G.F., Nazarov K.S., Khisamov R.K., Sergeev S.N., Shayachmetov R.U., Annealing-induced phase transformations and hardness evolution in Al-Cu-Al composites obtained by high-pressure torsion, *Acta Mech.*, 2021, 232(5)1815-28.
- [2] Zhang P., Mao F., Wang Y., Chen C., Xiong M., Wei S., Effect of rare-earth Sc on the interface microstructure and mechanical properties of Al/steel bimetallic composites prepared by liquid-solid casting, *J Mater Res Technol.*, 2023, 1(24) 808-823.
- [3] Chakrapani P., Suryakumari T.S.A., Mechanical properties of aluminium metal matrix composites-A review, *Mater. Today Proc.*, 2021,1(45) 5960-4.

IRANIAN FOUNDRYMEN'S
SOCIETY

Founding Research Journal

Research Paper:

Production and Characterization of Properties of Al Matrix Composite Reinforced with integrated ordered Cu Lattice Structure

Shima Ahmadzadeh Salout¹, Seyed Mohammad Hossein Mirbagheri^{2*}

1. Ph.D. Student, in Materials Science and Metallurgical Engineering, Amirkabir University of Technology, Iran,
2. Professor, Materials Science and Metallurgical Engineering, Amirkabir University of Technology, Iran

* Corresponding author, smhmirbagheri@aut.ac.ir

Paper history:

Received: 30 Feb 2024
Accepted: 28 May 2024

Abstract:

The current research aims to evaluate the feasibility of producing an aluminum-based composite whose Cu reinforcement phase is prepared by investment casting. The key characteristic of the Cu reinforcement is its unity and integration. The resin model of the integrated reinforcing phase has been prepared by the 3D printing method with a repeating geometry of ordered cubic cells with strut diameters of 2 and 3 mm. Hence, after placing the resin model in the plaster mold and draining the resin, and then baking the mold, by pouring molten copper into it, an integrated 3D Cu lattice structure is obtained. In the following, by placing this ordered Cu lattice structure in a rectangular cube metal mold, the penetration casting operation is performed by molten Al in the space of this Cu lattice, inside an electric furnace. Finally, by controlling the soaking time in the furnace, the solidification speed will be determined before the Cu lattice structure dissolves in the aluminum matrix, and a new metal/metal composite will be cast. Then, the compressive properties of the produced Al/Cu composites reinforced with Cu lattice structure with 2 and 3mm strut diameters were measured, and their phase structure was analyzed to investigate their compressive behavior. The results showed that the toughness of the composites reinforced with 2 and 3-mm lattice structures is about 114 and 168 MJ.mm⁻³, respectively, which is about 3.5 times higher than the toughness of their copper lattice structures.

Keywords:

Composite,
Al-based composite,
Lattice structure,
Cu ordered lattice structure.

Please cite this article using:

Shima Ahmadzadeh Salout, Seyed Mohammad Hossein Mirbagheri, Production and Characterization of Properties of Al Matrix Composite Reinforced with integrated ordered Cu Lattice Structure, in Persian, Founding Research Journal, 2023, 7(1) 57-68.

DOI: 10.22034/FRJ.2024.446416.1191

Journal homepage: www.foundingjournal.ir