نشریه علمی

پژوهش‌نامه ریخته‌گری

انجمن علمی ریخته‌گری ایران

مقاله پژوهشی:

ریخته‌گری کامپوزیت پیشرفته پایه زاماک ۵ با فاز فلزی تقویت‌کننده سه‌بعدی پیوسته مسی

سید محمد حسین میرباقری[۱*]، ایلیا امینی[۲]، احسان عبدی بجندی[۲]

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران

۲- دانش‌آموخته دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران

* **نویسنده مکاتبه کننده:** تلفن:۶۴۵۴۲۹۶۱، تقاطع سمیه-حافظ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵، E-mail: smhmirnagheri@aut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۲۵

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۱۱

چکیده:

هدف از پژوهش حاضر ارائه روشی ابتکاری برای تولید کامپوزیت‌های پایه فلزی با فاز تقویت‌کننده الیافی سه‌بعدی پیوسته به‌صورت فوم سلول باز فلزی است. در پژوهش حاضر فاز مادر آلیاژ زاماک ۵ و جنس فاز تقویت‌کننده سه‌بعدی پیوسته، فوم مسی خالص است. در این روش فوم مسی سلول باز در داخل قالب فلزی جایگذاری می‌شود. سپس مذاب زاماک با فوق گداز مناسب از بستر فوم مسی عبور نموده و کل قالب فلزی پر می‌شود. در این صورت کل شبکه سه‌بعدی متخلخل فومی مسی به عنوان فاز دوم صلب در داخل زمینه آلیاژ زاماک قرار می‌گیرد. برای اتصال بین زاماک و شبکه مسی سه‌بعدی نیاز است، فصل مشترک این دو، دارای اتصال نفوذی اندکی باشد که بتواند تنش را به‌خوبی منتقل کند. از این رو این اتصال با فوق گدازهای مختلف و ضخامت‌های مختلف الیاف شبکه مسی، موردبررسی و آزمون قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که ضخامت الیاف مسی باضخامت تقریبی ۸۰۰ میکرومتر، ۸PPI-۱۰ و دمای فوق گداز حدود ۶۵ سلسیوس، بهترین نتایج را برای نفوذ جرمی مس در مفصل مشترک شبکه مسی با زمینه زاماک، بدون عیوب سرد جوشی و نیامد، فراهم می‌آورد. همچنین شبکه سه‌بعدی مسی به‌عنوان مبرد داخلی باعث ساختار دندریتی ریز می‌شود.

واژه‌های کلیدی:

آلیاژ زاماک ۵،

فوم مسی سلول باز سه‌بعدی،

کامپوزیت پایه فلزی پیشرفته،

ریخته‌گری.

ارجاع به این مقاله:

سید محمدحسین میرباقری، ایلیا امینی، احسان عبدی بجندی، ریخته‌گری کامپوزیت پیشرفته پایه زاماک ۵ با فاز فلزی تقویت‌کننده سه‌بعدی پیوسته مسی، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، پاییز ۱۳۹۹، جلد ۴، شماره ۳، صفحات ۱۲۹-۱۳۶.

شناسه دیجیتال: (DOI): 10.22034/frj.2020.253075.1129

۱- مقدمه

امروزه یکی از حوزه‌هایی که نظر محققین و مهندسین مواد را به خود جلب نموده، حوزه مواد پیشرفته است. در این زمینه، مواد مرکب و فوم‌های فلزی، نرخ تولیدات علمی نسبتاً بالایی در ده سال اخیر به خود اختصاص داده‌اند [۱-۲]. لذا در ادامه به‌طور مختصر به شرح این دو موضوع پرداخته می‌شود.

فوم‌های فلزی به‌عنوان یک ماده پیشرفته، هر روزه در حال توسعه هستند. این فوم‌های فلزی به دو صورت سلول باز و سلول بسته، امروزه تولید می‌شوند. در مورد خواص فیزیکی، حرارتی، مکانیکی و غیره، کتب و مقالات زیادی ارائه شده است [۳-۶].

فوم‌های فلزی سلول باز به‌عنوان یک فلز متخلخل به علت دانسیته ظاهری بسیار پایین و سطح تماسی بالا در صنایع مبدل حرارتی و یونی کاربردهای بسیار زیادی را به خود اختصاص داده‌اند [۸،۷]. فوم‌های فلزی سلول باز با توجه به تعداد حفره در واحد اینچ (PPI) و دانسیته مورداستفاده قرار می‌گیرند و خواص آن‌ها بیشتر تابع این دو پارامتر تولیدی است.

میزان عبور سیال از فضای متخلخل فوم‌های فلزی سلول باز تحت عنوان نفوذپذیری بیان می‌شود و دارای واحد سطح است. لذا سختی یا کندی عبور مایع از یک محیط متخلخل با توجه به رابطه دارسی، تابع ویسکوزیته سیال و پارامتر نفوذپذیری مذکور است [۸،۷]. این پارامتر بین صفرتا بی‌نهایت متغیر است. پارامتر نفوذپذیری؛ از میزان سطح در واحد حجم یک محیط متخلخل تبعیت می‌کند. به عبارتی ساده‌تر یک سانتیمتر مکعب فوم متخلخل، چند سانتیمتر مربع سطح تماسی دارد؟. هرچه سطوح تماسی بیشتر و هندسه حفره‌ها یا تودرتو بودن حفرات محیط متخلخل بیشتر باشد، مقاومت سیال مذاب برای نفوذپذیری در

محیط متخلخل فوم مسی سلول باز، بیشتر شده و پر شدن قالب حاوی فوم مذکور، سخت‌تر خواهد شد.

به‌عبارتی‌دیگر هر چه PPI فوم بیشتر باشد، نفوذپذیری آن کاهش‌یافته و پر شدن چنین محیطی با سیال سخت‌تر خواهد شد. یکی از راه‌های غلبه بر اصطکاک، جاری شدن سیال در محیط متخلخل (در PPI ثابت و نفوذپذیری ثابت)، افزایش فشار سیال است. این تابعیت فشار و سرعت جاری شدن؛ در معادله (۱) یا قانون دارسی بیان شده است:

$$U = \left(\frac{K}{\mu}\right)\frac{dP}{dx} + \rho\, g \qquad (۱)$$

که در آن U سرعت متوسط برحسب متر بر ثانیه است و از تقسیم دبی حجمی بر سطح مقطع جریان به دست می‌آید. K پارامتر نفوذپذیری، برحسب مترمربع، μ ویسکوزیته برحسب پاسکال ثانیه و P فشار برحسب مگاپاسکال است [۷].

از طرفی دیگر، مواد مرکب پایه فلزی توسط فاز دوم یا فاز تقویت‌کننده مطرح می‌شوند. عموماً این فاز دوم ازلحاظ هندسه آن به سه صورت ذره‌ای یا پودری، رشته‌ای یا میله‌ای و صفحه‌ای یا پولکی شکل تقسیم می‌شوند. از این‌رو هر کدام از این مورفولوژی‌ها، روی خواص مکانیکی ماده مرکب اثر می‌گذارند و در منابع مختلف به آنها اشاره شده است [۸،۷].

چسبندگی بین فاز تقویت‌کننده و زمینه فلزی از اهمیت بالایی در استحکام و خواص مواد مرکب پایه فلزی برخوردار است. عموماً فاز تقویت‌کننده از غیر فلزات است مانند ذرات یا الیاف SiC در آلیاژ آلومینیم و کمتر ماده مرکب پایه فلزی وجود دارد که در آن فاز دوم، به‌صورت پودر در فلز باشد. اگرچه استفاده از شبکه‌های دوبعدی فلزی (مانند توری آهنی) در آلیاژهای پایه آلومینیم و منیزیم نیز به عنوان فاز تقویت‌کننده استفاده شده که در این صورت فاز تقویت‌کننده، به‌صورت الیاف بافته‌شده است و لذا حالت صفحه‌ای دارد و به‌هیچ‌وجه رفتار هندسی در فضای سه‌بعدی ندارد [۷].

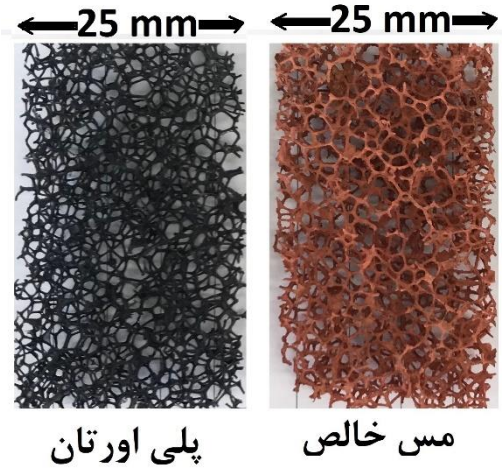
استفاده از الیاف بافته شده سه‌بعدی به دلیل تولید سخت آن‌ها و عدم چسبندگی به فاز زمینه، کمتر استفاده شده و همچنین اتصال بین الیاف ماده مرکب با زمینه فلزی نیاز به طراحی آلیاژ دارد. در غیر این صورت، این اتصال الیاف و زمینه به‌خوبی برقرار نشده و همین مکان‌ها نقاط ضعف در استحکام ماده‌ی مرکب زمینه فلزی است. برای اتصال فاز تقویت‌کننده فلزی به زمینه عموماً از فلز با نقطه ذوب بالاتر استفاده می‌کنند که اندکی قابلیت حل شدن در فاز زمینه فلزی را داشته‌باشد، برای مثال استفاده از توری آهنی در مذاب آلومینیم.

اتصال بین فاز تقویت‌کننده فلزی و زمینه فلزی باید در اثر پدیده نفوذ جرمی رخ دهد. این پدیده تابع دو عامل دما و زمان است؛ و هر دو عامل فوق در فرآیند ریخته‌گری محدود به زمان ریخته‌گری و دمای ریخته‌گری (فوق گداز) می‌شود؛ زیرا در صورتی که با کنترل دما و زمان بارریزی بتوان اتصال نفوذی بین زمینه و شبکه الیاف تقویت‌کننده را فراهم آورد، می‌توان از سیکل عملیات حرارتی بعدی برای ایجاد باند نفوذی جلوگیری نمود [۷].

در پژوهش پیش‌رو، شبکه مستحکم سه‌بعدی فوم مسی سلول باز به‌عنوان فاز تقویت‌کننده برای آلیاژ زاماک ۵ در نظر گرفته شده است. با عبور مذاب از داخل آن و تهیه کامپوزیت پایه فلزی، سعی شده با کنترل PPI شبکه مسی، ابتدا نفوذپذیری کامل مذاب زاماک از این شبکه مسی محقق شده و با کنترل دمای فوق گداز، اتصال نفوذی بین شبکه سه‌بعدی مسی و آلیاژ زمینه به وجود آید.

۲- مواد و روش تحقیق

در تحقیق حاضر، ابتدا به روش شیمی تر اسفنج‌های پلیمری پلی اورتان با PPI ۸-۱۰، به‌صورت سطحی باردار شده، سپس به روش الکترولس روی سطح آنها بین ۵۰ الی ۳۰ میکرومتر مس لایه نشانی شد. در قدم بعد این فوم‌های سلول باز پلی اورتان با سطح مسی، در وان الکترولیز به کمک یک رکتی فایر، لایه مس به ضخامت تقریبی ۶۵۰-۷۲۰ میکرومتر روی آنها الکترولیز شد. شکل (۱)، نمایی از این مراحل را نشان می‌دهد. ابعاد نمونه‌ها ۱۵×۲۵×۶۰ میلی‌متر بود. به طوری که شبکه‌های فومی مسی، کاملاً در وسط قالب فلزی قرار گیرند و یک سانتی‌متر زیر و بالای آنها با آلیاژ زاماک (بدون شبکه مسی) پر شود. لذا نمونه‌هایی که ریخته‌گری می‌شوند، فقط ۵ سانتیمتر از ارتفاع ۷ سانتیمتری آنها توسط شبکه سه‌بعدی مس خالص، تقویت خواهد شد.



شکل ۱- نمایی از تبدیل اسفنج پولی اورتان به فوم مسی [۵ ، ۹].

در مرحله بعد فوم اسفنجی پوشش داده‌شده فوق، در داخل کوره با دمای ۴۵۰ سلسیوس به مدت ۳۰ دقیقه قرار گرفت تا تمام جرم پلی اورتان آن تبخیر و خارج شود. در این صورت فوم اولیه فلزی سلول باز موسوم به پیشماده، تهیه شد. مجدداً این فوم مسی، پس از تمیزکاری سطوح آن، در داخل وان الکترولیز قرارگرفته و ضخامت شبکه مسی نهایتاً به ۸۰۰ میکرومتر می‌رسد (ضخامت کل سه لایه مس). در واقع از این فوم مسی با شبکه سه‌بعدی متخلخل با الیافی پیوسته (باضخامت ۸۰۰ میکرومتر پوشش مس)، به‌عنوان فاز تقویت‌کننده سه‌بعدی، برای ساخت کامپوزیت پایه فلزی زاماک ۵ استفاده می‌شود.

در قدم بعد مطابق شکل (۲)، قالب فلزی از جنس فولاد CK45 با محفظه داخلی به ابعاد ۱۵×۳۰×۸۰ میلی‌متر طراحی‌شده که اختلاف ارتفاع مذاب‌ریزی در آن بتواند بر پارامتر نفوذپذیری مذاب از تخلخل‌های فوم مسی غلبه کند. سپس با قرار دادن فوم مسی در وسط محفظه قالب مذکور و مونتاژ دو لنگه قالب فولادی، قالب آماده برای ریخته‌گری شد. برای ریخته‌گری از آلیاژ زاماک ۵ استفاده شده است.

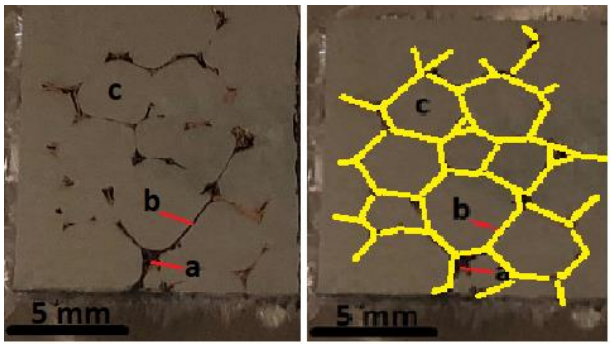
به عبارتی دیگر به کمک معادله (۱) و داشتن سطح مؤثر فوم مس از آزمون BET، معادل ۲۷ سانتی‌متر مربع در هر سی‌سی از فوم مسی، مقدار K/μ با توجه به ارتفاع قالب در معادله (۱) برابر ۱۲۷۲ به دست آمد. لذا با افزایش دما، مقدار K/μ آن‌قدر تغییر می‌یابد تا قالب بدون عیب سرد جوشی پر شود و درعین‌حال ساختار سه‌بعدی فوم مسی در اثر پدیده انحلال از هم فرو نریزد. ترکیب شیمیایی این آلیاژ به روش کوانتومتر تعیین و در جدول (۱) ارائه شده است. دمای خط لیکوئیدوس این آلیاژ ۳۸۶ و دمای سالیدوس آن حدود ۳۸۰ سلسیوس در منابع ارائه شده است [۳-۴].

برای بررسی سرعت سرد شدن، یک ترموکوپل نوع k در محفظه قالب قرار داده شد که انتهای آن متصل به یک دیتا لوگر برای ثبت تغییرات دما برحسب زمان بود. این عملیات فقط برای دقت عبور دما از بین لیکوئیدوس و سالیدوس انجام شد.

در ادامه با آزمون‌های سعی و خطا مقدار PPI مناسب فوم فلزی برای ریخته‌گری موفق باقابلیت کامل نفوذپذیری مذاب به داخل فوم مسی، بین ۸ الی ۱۰ مشخص شد. برش مقطع کامپوزیت زاماک ۵-مس در شکل (۳) نشان داده شده است. در این مقطع، مناطق اتصال یال‌های فوم مسی موسوم به منطقه Plateau، با حرف a و خود یال‌ها با حرف b و زمینه زاماک ۵ با حرف c مشخص‌شده است تا پر شدن و چسبندگی کامل مذاب زاماک ۵ و شبکه سه‌بعدی مس خالص با PPI ۸-۱۰، مشخص شود.

عملیات ذوب‌ریزی آلیاژ زاماک ۵ با آنالیز جدول (۱)، در چهار دمای ۴۰۰، ۴۵۰، ۵۰۰ و ۵۳۰ سلسیوس به‌طور مجزا انجام گرفت. چهار نمونه کامپوزیت زاماک ۵ با الیاف سه‌بعدی مسی (فوم سلول باز مسی) مطابق جدول (۲)، با درصد حجمی تقریباً ۸ درصد مس، تهیه شد. سپس نمونه‌ها در مقطع عرضی بریده و آزمون‌های استریوگراف، متالوگرافی نوری و الکترونی با میکروسکوپ FE-SEM انجام و محل اتصال بین شبکه فوم مسی و زمینه زاماک ۵، از دیدگاه نفوذ جرمی مورد بررسی قرار گرفت.

شکل ۲- نمایی از قالب فلزی طراحی شده برای ریخته‌گری: الف) قالب فلزی، ب) جایگذاری فوم سه‌بعدی سلول باز در قالب و نصب ترموکوپل، ج) مونتاژ قالب برای ذوب‌ریزی و ثبت دما با دیتالوگر، د) قطعه پس از ریخته‌گری زاماک ۵.



شکل ۳- سمت چپ: نمایی مقطع برش خورده کامپوزیت پایه فلزی زاماک ۵- با شبکه مس خالص. (a): گره‌های شبکه مسی، (b): یال‌های شبکه مسی، (c): زمینه زاماک ۵، پس از ریخته‌گری و عبور مذاب زاماک ۵ از شبکه سه‌بعدی مسی. سمت راست: شبکه مسی مشخص‌شده.

جدول ۱- آنالیز آلیاژ زاماک ۵ مصرفی در پژوهش حاضر (درصد وزنی).

روی	آلومینیم	مس	آهن	منیزیم	کادمیم
۹۵/۶	۴/۲۳	۰/۰۰۱	۰/۰۶۶	۰/۰۳۶۹	۰/۰۰۰۸
نیکل	سرب	آنتیموان	قلع	ایندیم	بیسموت
۰/۰۰۳	۰/۰۱	۰/۰۰۵۵	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱۴

جدول ۲- شرایط آزمایش‌های ریخته‌گری برای تولید کامپوزیت زاماک ۵ با فاز تقویت‌کننده به صورت شبکه سه‌بعدی از مس خالص.

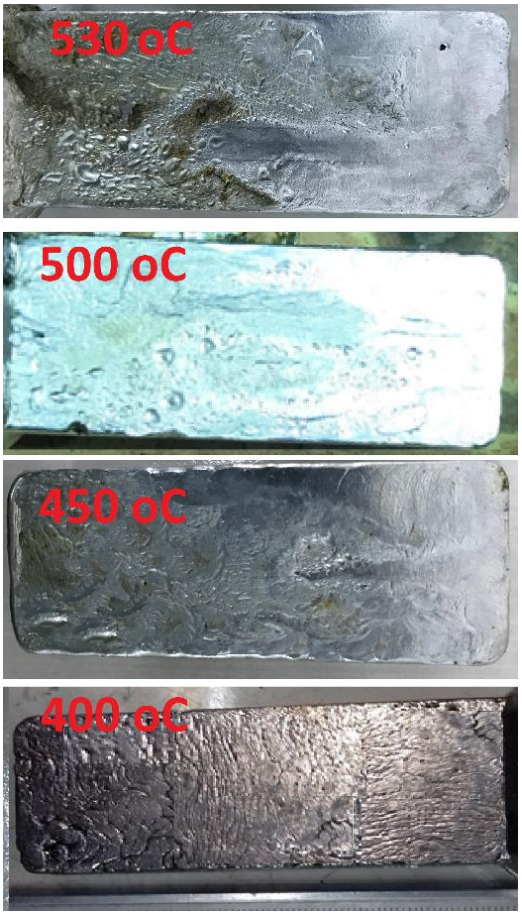
نمونه‌ها	جرم فوم (g)	حجم فوم (cm^3)	چگالی ظاهری (g/cm^3)	دمای ذوب (°C)	درصد حجمی مس در کامپوزیت
نمونه ۱	۴/۴۵۰	۲۲/۵	۰/۲۰۹	۵۰۰	۸/۴۳
نمونه ۲	۵/۴۳	۲۲/۵	۰/۲۴۲	۵۳۰	۸/۶۸
نمونه ۳	۵/۰۵	۲۲/۵	۰/۲۲۴	۴۵۰	۸/۶۵
نمونه ۴	۵/۰۷	۲۲/۵	۰/۲۲۵	۴۰۰	۸/۶۸

۳- نتایج و بحث

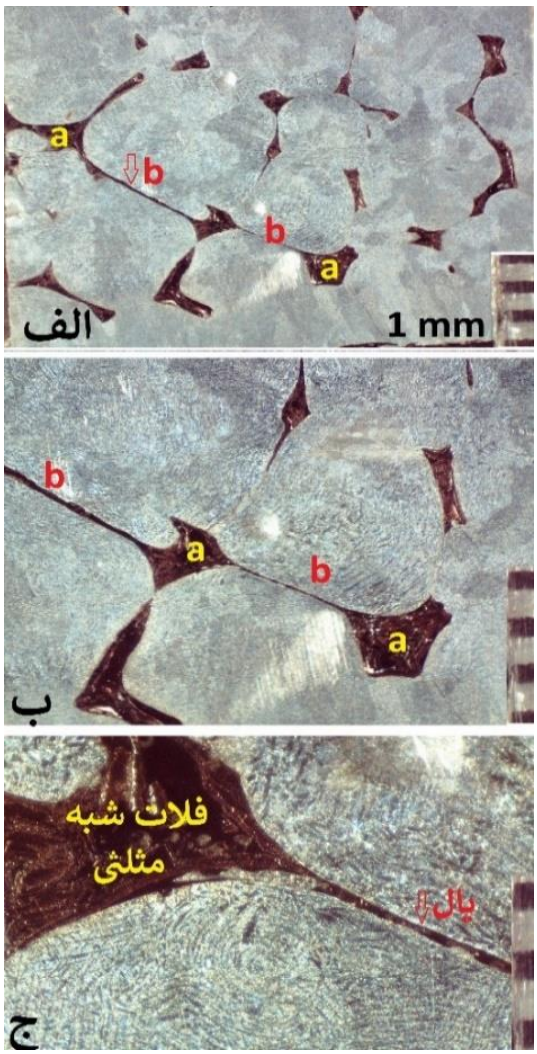
پس از ریخته‌گری ثقلی مذاب زاماک ۵ با چهار فوق‌گداز مندرج در جدول (۲)، نتایج نشان داد که بهترین فوق‌گداز مذاب زاماک که می‌تواند شبکه سه‌بعدی فوم مسی را بدون سرد جوشی و نیامد، پر کند، حدود ۶۵ درجه سلسیوس است. با توجه به برد کوتاه شش درجه انجمادی این آلیاژ (۳۸۶-۳۸۰) یا همان فاصله عمودی خط لیکوئیدوس و سالیدوس، پر نمودن شبکه فومی با میزان تخلخل PPI ۸-۱۰ ، در دما ۴۵۰ درجه سلسیوس موفق بود. در کمتر از این دما، شبکه مسی به دلیل عیب نیامد پر نمی‌شد و در دمای بالای ۴۵۰ درجه حفره‌های گازی در آن به وجود می‌آمد. همچنین ساختار سه‌بعدی فوم مسی در دماهای بالای ۵۰۰ درجه سلسیوس، به علت پدیده انحلال تارهای نازک ۸۰۰ میکرومتری مسی از بین می‌رفت. شکل (۴) نمایی از شمش‌های کامپوزیت پیشرفته زاماک ۵ با شبکه سه‌بعدی مسی را در دماهای ریخته‌گری مختلف نشان می‌دهد.

شکل (۵) نمونه متالوگرافی شمش با دمای ریخته‌گری ۴۵۰ که بهترین کیفیت پر شدن فوم مسی را داشت، در بزرگنمایی‌های پایین ۲۵ برابر نشان می‌دهد. همانطورکه دیده می‌شود، در مقطع برش کامپوزیت موردنظر شبکه مسی کاملاً مشخص است و مذاب زاماک ۵ کاملاً شبکه مسی را جذب نموده و هیچ نیامد یا سرد جوشی بین شبکه مسی و مذاب زاماک ۵ رخ نداده است. همچنین حالت گرداب‌های بسیار ریز مذاب در فضای بین سلول‌های فوم با انجماد دندریت‌ها، در تصویر (ج) شکل (۵)، به‌خوبی مشخص است.

مناطق (a) و (b) در شکل (۳) که به ترتیب به منطقه فلات شبه مثلثی (a) و یال (b) فوم مسی موسوم بودند در شکل (۵) به‌خوبی مشخص هستند. تصاویر (الف) تا (ج) در شکل (۵) که به ترتیب توسط لوپ استریوگراف بزرگنمایی شده‌اند، به‌خوبی پایداری فلات مثلثی شبکه مسی را نشان می‌دهند. ازلحاظ هندسی این مناطق در یک کامپوزیت، به‌عنوان مناطق صلب هندسی، محسوب می‌شوند؛ زیرا می‌توانند مقاومت بالایی به علت ممان مقطع هندسی خود در برابر تغییر فرم نشان دهند؛ اما یال‌های فوم مسی مناطق ضعیف‌تری نسبت به فلات مثلثی محسوب شده و ازلحاظ هندسی مانند بیم دو سر درگیر محسوب می‌شوند و مقاومت به خمش یا تغییر شکل آن‌ها به ممان هندسی مقطع یال‌ها بستگی دارد. از این رو در شکل (۶) به کمک میکروسکوپ الکترونی FE-SEM، تکه‌ای از فوم مسی قبل از ریخته‌گری تهیه و تصویر سه‌بعدی آن در شکل (۶-الف) ارائه‌شده است. در این شکل ضخامت یال‌های فوم که دارای مقطع مثلثی است، تقریباً حدود ۲۰۰ میکرومتر است. در شکل (۶-ب) برش مقطع یکی از یال‌های تصویر (الف)، یعنی مقطع e-e از شکل (۶-الف)، پس از برش در بزرگنمایی بالاتر نشان داده شده و ابعاد آن نیز اندازه زده شده است. مقطع یال‌های فوم مسی به هیچ وجه الزام ندارد مثلث متساوی‌الاضلاع بوده و کاملاً متفاوت نیز می‌تواند باشد و به فیزیک کشش سطحی پیش‌ماده فومی، طی فرایند تولید آن بستگی دارد.



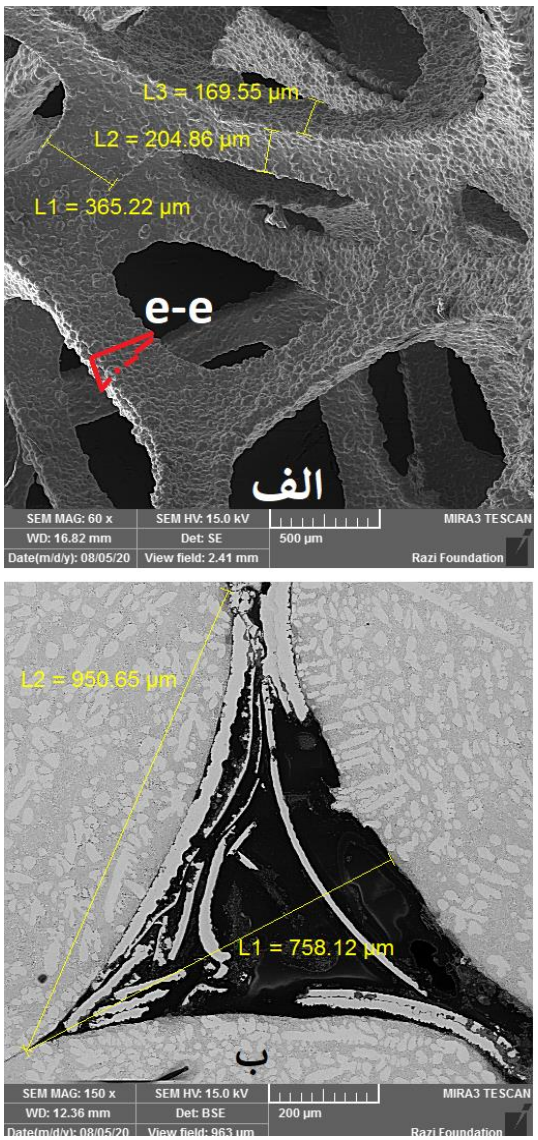
شکل ۴- نمایی از شمش‌های ریخته‌گری کامپوزیت پیشرفته زاماک ۵ با شبکه پیوسته سه‌بعدی مسی در فوق‌گدازهای مختلف ریخته‌گری. دمای ذوب زاماک ۵: حدود ۳۸۶ سلسیوس.



شکل ۵- نمایی از تصاویر اچ شده استریو گرافی از برش عرضی مقطع کامپوزیت زاماک ۵ با شبکه سه‌بعدی فوم مسی برای نمونه ریخته‌گری شده در ۴۵۰ سلسیوس.

یال‌های این فوم مسی عموماً مثلث‌های با اضلاع فرورفته یا مقعر هستند. درصورتی‌که فلات‌های شبه مثلث (که عموماً مثلثی هم نیستند و چندوجهی هستند) اکثراً اضلاع ناهمگون دارند و الزامی به مقعر بودن آن‌ها نیست و در هر برشی در جهت محورهای مختصات عموماً به‌صورت چندوجهی دیده می‌شوند؛ ولی یال‌ها در جهات طولی یال، به صورت نوار باریک مویی و در جهت عمود بر یال، مقطع مثلث دیده می‌شوند. این مثلث به‌صورت سیاه‌رنگ در شکل (۶) دیده می‌شود.

همان‌طور که در متون علمی آمده، دندریت‌های انجمادی در ریخته‌گری فلز روی و آلیاژهای زاماک ۴ و ۵ بسیار درشت هستند. [۹-۱۱]. در تصویر (ج) از شکل (۵) به‌خوبی مشخص است که شبکه مسی، به‌عنوان مبرد عمل نموده و باعث ریز شدن دندریت‌ها در داخل هر چشمه شبکه مسی شده است. در زاماک عدد اندازه دانه حدود ۵-۶ است ولی در شکل (۵-ج) بین ۸ الی ۹ است. همچنین جریان مذاب گردابی در داخل چشمه‌ها آن نیز



شکل ۶- فوم مسی با میکروسکوپ الکترونی FE-SEM، الف) یال‌ها و مناطق فلات شبه مثلثی در فضای سه‌بعدی فوم مسی، ب) بزرگنمایی برش مقطع یال فوم مسی از منطقه e-e در تصویر (الف).

باعث تغییر جهت کریستالی شده است. ازاین‌رو از دیدگاه بارگذاری در مقاومت مصالح، یال‌های فوم مسی، مانند یک تیر دو سر درگیر، با ممان مقطع مثلث تنش‌ها را تحمل می‌کنند. لذا می‌توان شبکه فوم مسی سه‌بعدی حاضر را یک سازه مقاوم در مقابل بارگذاری به خاطر هندسه مقطع و نقاط برخورد یال‌ها (فلات‌ها) دانست که استحکام کامپوزیت را در بارگذاری فشاری، بسیار بالا می‌برد.

به‌منظور چسبندگی زاماک ۵ به فوم سه‌بعدی مسی، برشی از مقطع کامپوزیت مذکور به نحوی انتخاب شد که یال فوم مسی را در جهت طولی قطع نموده باشد. سپس این مقطع مطابق شکل (۷-الف)، با محلول اچ HNO_3+CH_3OH به ترتیب، با نسبت ۱۰ به ۹۰ سی‌سی، متالوگرافی شد تا ساختار فوم مس و زمینه زاماک آن، کاملاً مشخص شود.

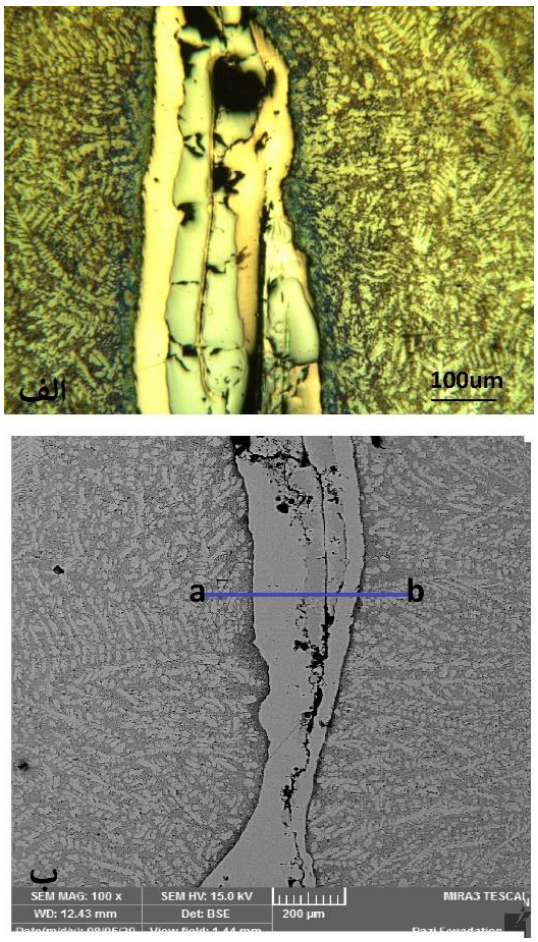
در قدم بعد، در جهت عمود بر یال فوم مسی (جهت a-b) مطابق شکل (۷-ب)، به کمک میکروسکوپ الکترونی، آنالیز Line-Scan عنصری انجام شد تا انحلال مس درزمینه زاماک ۵ مشخص شود. نتایج این آزمون برای ۱۵ نقطه در طول پاره‌خط a-b از شکل (۷-ب)، در شکل (۸) ارائه شده است.

همان‌طور که در تصاویر شکل (۸) دیده می‌شود، آنالیز عنصری ۱۵ نقطه در طول خط a-b از شکل (۷)، پس از پردازش داده‌های EDS ارائه‌شده است. نقطه‌ها روی تصویر شکل (۷) و همچنین محور افقی شکل (۸)، از هم ۱۵ میکرومتر فاصله‌دارند. لذا هر واحد روی محور افقی دیاگرام شکل (۸)، دقیقاً ۱۵ میکرومتر است.

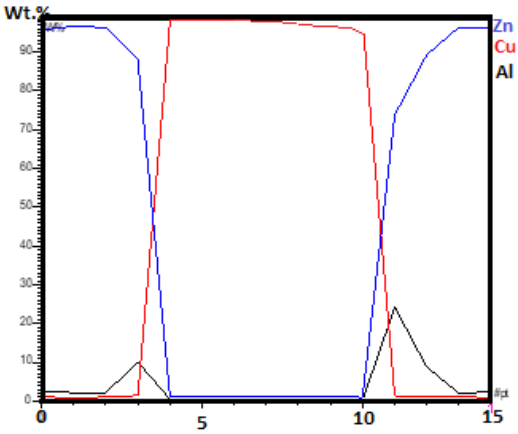
با دقت در سمت چپ نمودار شکل (۸) دیده می‌شود که از واحد ۲ تا ۴ در محور افقی، سه فلز آلومینیم، روی و مس در هم دیگر نفوذ جرمی نموده و یک باند به پهنای تقریبی ۳۰ میکرومتر به وجود آورده‌اند. این باند ۳۰ میکرومتری یک باند کاملاً نفوذی است که در اثر نفوذ جرمی اتم‌های مس به داخل زمینه زاماک، به وجود آمده است؛ ولی چون دما حدود ۴۵۰ سلسیوس و زمان انجماد بسیار کوتاه است، لایه نفوذی بسیار کوچک و شیب غلظت‌ها زیاد است.

در طرف راست نمودار شکل (۸)، از نقطه ۱۰ الی ۱۱ یک باند ۱۵ میکرومتری نفوذی مس-روی-آلومینیم وجود دارد و از نقطه ۱۱ الی ۱۴ یک باند ۴۵ میکرومتری فلز روی-آلومینیم که مربوط به آلیاژ زاماک ۵ است، وجود دارد؛ بنابراین در این کامپوزیت با دمای ریخته‌گری ۴۵۰ سلسیوس و فوق‌گداز حدود ۶۵ درجه، یک باند تقریباً ۱۵ میکرومتری نفوذی مس-زاماک ۵ در دورتادور یال‌های فوم مسی ایجادشده و اتصال محکمی را با زمینه کامپوزیت برقرار نموده است. ترکیب شیمیایی این لایه ۱۵ میکرومتری به‌طور متوسط دارای ۵٪ مس، ۸۵٪ فلز روی و ۱۰٪ آلومینیم در مقیاس درصد وزنی است.

نتایج در فوق گدازهای بالاتر (دمای ریخته‌گری ۵۳۰ درجه سلسیوس) نشان داد بسیاری از یال‌های فوم مسی اصلاً وجود ندارند، یعنی کاملاً درزمینه زاماک ۵ حل شده بودند و پیوستگی فوم مسی در زمینه برای تحمل تنش، از بین رفته بود. لذا تعیین دمای بارریزی کار بسیار دشوار و تابع تخلخل فوم و ضخامت یال‌های فوم مسی است. در این تحقیق، همان‌طور که قبلاً اشاره شده، تخلخل فوم مسی ۸-۱۰ و ضخامت لایه مس تقریباً ۶۵۰-۷۲۰ میکرومتر بود.



شکل ۷- نمایی از برش مقطع طولی یال فوم مسی در کامپوزیت زاماک ۵ با شبکه سه‌بعدی فوم مسی، الف) متالوگرافی یال مسی و زمینه زاماک ۵ اطراف آن، ب) تصویر FE-SEM یال مسی برای آنالیز لاین اسکن عنصری در طول پاره‌خط a-b برای نمونه ریخته‌گری شده در ۴۵۰ سلسیوس.



شکل ۸- نتایج لاین اسکن در امتداد خط a-b پس از پردازش داده‌های EDS از میکروسکوپ الکترونی برحسب درصد وزنی هر عنصر.

۴- نتیجه‌گیری

۱- کامپوزیت فلزی پایه زاماک ۵ با شبکه سه‌بعدی از الیاف مس، به‌صورت فوم مسی سلول باز با ضخامت متوسط ۸۰۰ میکرومتر و تخلخل PPI ۸-۱۰ یا به عبارت ساده‌تر،

کامپوزیت پیشرفته فلز Zamak-8.76Vol%Cu(3D) به روش ریخته‌گری به‌صورت کاملاً سالم و بدون عیب سرد جوشی تولید شد.

۲- برای تهیه کامپوزیت Zamak-8.76Vol%Cu(3D) بایستی دمای بارریزی مذاب ۴۵۰ سلسیوس باشد. کمتر یا بیشتر از این دما، به ترتیب دو پدیده‌ی عیب سرد جوشی و یا تخریب یا تجزیه انحلالی ساختار شبکه سه‌بعدی فوم مسی (در اثر مکانیزم انحلال مس در زاماک) رخ خواهند داد.

۳- در فصل مشترک فوم سه‌بعدی مسی با زمینه فلزی زاماک ۵ در فوق‌گداز ۶۵ سلسیوس یک‌لایه نفوذی در اثر نفوذ جرمی مس-آلومینیم-فلز روی، به پهنای متوسط ۱۵ میکرومتر در دورتادور یال‌های فوم مسی سلول باز به وجود می‌آید که اتصال شبکه سه‌بعدی فوم مسی سلول باز به زمینه زاماک ۵ را، نسبت به اتصال‌های صرفاً مکانیکی، بسیار قوی می‌سازد. درواقع در اینجا، همانند فرایند بریزینگ، یک اتصال نفوذی بین فوم مسی سلول با و زمینه زاماک ۵ به وجود آمد؛ برخلاف اتصال‌های مکانیکی که فاقد لایه نفوذی هستند.

مراجع

[1] Ashby M., Evans T., Hutchinson J.W., Metal Foams: A Design Guide, 1st edition, Butterworth-Heinemann, 2000.

[2] Koponen A., Timonen M.K., Timonen J., Permeability and effective porosity of porous media, Physical Review E, 1997.

[3] Wanhill R.J.H., Hattenberg T., Corrosion -Induced Crack of Model Train Zinc-Aluminum Die Castings, National Aerospace Laboratory NLR, Technical Report, 2005, 205.

[4] Costa E., Vecchia F.D., Scherer M., Dedavid B., Da Costa C.E., Rick C., Dos Santos C.A., Study of the influence of copper and magnesium additions on the microstructure formation of Zn-Al hypoeutectic alloys, Journal of Alloys and Compounds, 2009, 488(1) 89-99.

[5] عبدی بجندی ا.، تولید فوم سلول باز مسی و اندازه‌گیری سطح ویژه آن به منظور تعیین کارایی گرمایی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۹۸.

[6] Kaye A., Street A., Pressure die casting dies, Die Casting Metallurgy, A Volume in Butterworths Monographs in Materials, 1982.

[7] امینی ا.، تعیین شرایط نفوذپذیری مذاب زاماک ۵ در شبکه ۳D فوم سلول باز فلزی، پایان‌نامه کارشناسی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۹۹.

[8] Wang W., Stoll H.W., Conley J.G., Sand Casting Processes. In: Rapid Tool Guidelines for Sand Casting, Mechanical Engineering Series, Springer, Boston, 2010.

[9] پرپنچی ف.، بررسی خواص مکانیکی و ریزساختار در ریخته‌گری فرسایی و فرسایی چرخشی آلیاژ زاماک ۳، پایان‌نامه کارشناسی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۹۸.

[10] Pola A., Tocci M., Goodwin F.E., Review of microstructures and properties of zinc alloys, Metals, 2020, 10, 253, 2-16.

[11] Zhang W., Hu J., Lu Y.D.J.W., Microstructure and mechanical properties of Zamak 3 alloy, Metallurgical and Materials Transactions A, 2019, 50, 5888-5895.

IRANIAN FOUNDRYMEN'S SOCIETY

Founding Research Journal

Research Paper:

To Produce an Advanced Zamak5 Composite with a 3D-Open Cell Copper Foam by Casting Method

Seyed Mohammad Hossein Mirbagheri[1*], Ilia Amini[2], Ehsan Abdi Bejandi[2]

1. Associate Professor, Department of Materials and Metallurgical Engineering, Amirkabir University, Teheran, Iran.
2. Graduated from Department of Materials and Metallurgical Engineering, Amirkabir University, Teheran, Iran.

*** Corresponding Author**: Tel: 64542961, Somayeh-Hafez intersection, Amirkabir University of Technology, PO Box: 4413-15875, E-mail: smhmirnagheri@aut.ac.ir

Paper history:
Received: 16 October 2020
Accepted: 01 December 2020

Keywords:
Zamak5,
3D-Copper Open Cell Foam,
Advanced Composite,
Casting.

Abstract

The aim of the present study is to produce advanced metal matrix composites in an innovative route. In fact, reinforcement phase in the advanced composite is a 3D-copper open cell foam as a continuous precursor and liquid of Zamak5 alloy is penetrated into porous space of the 3D-copper foam by casting method. Then effect of supper-heat was investigated on the liquid permeability of the molten Zamak5 and inter-diffusion at Cu/Zamak5 interface during casting in a metallic mold. Results show that by preparing open-cell copper foam with 800 micrometers thickness, 8-20 PPI, and 65 Celsius degree super-heat for Zamak5 casting alloy, production of an advanced 3D-Cu foam-Zamak5 without misrun and cold shut defects during the filling of the metallic mold can be obtained. These condition led to a complete link between 3D-copper foam and Zamak5 matrix, by interfusion mechanism at interface of Cu (3D)/Zamak5 at 450 casting temperature. Also, the 3D copper foam as an internal chill led to formation of fain dendritic structure.

Please cite this article using:

Seyed Mohammad Hossein Mirbagheri, Iilia Amini, Ehsan Abdi Bejandi, To Produce an Advanced Zamak5 Composite with a 3D-Open Cell Copper Foam by Casting Method, in Persian, Founding Research Journal, 2020, 4(3) 129-136.
DOI: 10.22034/frj.2020.253075.1129

Journal homepage: www.foundingjournal.ir