



پژوهش‌نامه ریخته‌گری

Numerical Analysis of the Effects of Squeeze Casting Variables on the Interfacial Microstructure of Aluminum/Copper Bimetal with a Regular 3D Lattice StructureSeyed Abbas Hasasi¹, Majid Abbasi^{*2}, Seyed Jamal Hosseini Pour³

¹- PhD Student, Department of Materials and Industrial Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Hasasabbas@gmail.com

²- Associate Professor, Department of Materials and Industrial Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, abbasim@nit.ac.ir

³- Professor, Department of Materials and Industrial Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, j.hosseini@nit.ac.ir

Abstract

This paper presents a numerical analysis of the microstructural characteristics of the interface in a bimetallic aluminum with a regular 3D lattice copper preform produced by squeeze casting. The effects of three variables—the wall thickness of the lattice copper preform, the pouring temperature of the aluminum melt, and the squeeze pressure—on the interface thickness, eutectic cell thickness, and θ -phase thickness were investigated. An L_{15} orthogonal array was employed for the experimental design, with all three independent variables set at three equally spaced levels. Numerical regression analysis, analysis of variance (ANOVA), and main and interaction effect functions using surface plots were utilized to demonstrate the effects of the variables. The interfacial microstructure was examined using optical and electron microscopes equipped with image analysis and EDS. The results indicate that the interfacial microstructure of the composite consists of four distinct layers: pure copper, the θ phase, the $\alpha+\theta$ eutectic, and the aluminum α phase. The preform thickness was identified as the most influential factor affecting the thickness and morphology of the intermetallic compounds at the interface, followed by pouring temperature and squeeze pressure. For the preform thickness parameter, the highest and lowest values for both the eutectic cell thickness and θ -phase thickness responses were observed at the 0.75 mm and 1.25 mm levels, respectively. Increasing the preform thickness from 0.75 mm to 1.25 mm resulted in a 45.2% decrease in the average eutectic cell thickness and a 58.3% decrease in the θ -phase thickness. For the pouring temperature parameter, increasing the temperature from 720°C to 760°C led to a 20.6% increase in the average eutectic cell thickness and a 50.4% increase in the θ -phase thickness. For the squeeze pressure parameter, increasing the pressure from 50 MPa to 100 MPa resulted in a 25.7% decrease in the eutectic cell thickness and a 4.3% decrease in the θ -phase thickness. The morphology of the θ -phase in the preform with a thickness of 0.75 mm was columnar; at 1 mm thickness, it exhibited a mixed columnar and equiaxed structure; and at 1.25 mm thickness, it became fully equiaxed.

Keywords: Aluminum/Copper Bimetal, Squeeze Casting, Preform Thickness, Numerical Analysis, Interfacial Microstructure.



پژوهش‌نامه ریخته‌گری

تحلیل عددی اثرات متغیرهای ریخته‌گری کوبشی بر ریزساختار فصل مشترک دوفلزی آلومینیم/مس با ساختار شبکه‌ای سه بعدی منظم

سید عباس حصاصی^۱، مجید عباسی^{۲*} و سید جمال حسینی پور^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مواد و صنایع دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، Hasasabbas@gmail.com

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد و صنایع دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، abbasim@nit.ac.ir

۳- استاد، دانشکده مهندسی مواد و صنایع دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، j.hosseini@nit.ac.ir

چکیده

در این مقاله به صورت عددی، مشخصه‌های ریزساختاری فصل مشترک دوفلزی آلومینیم با پیش ماده مسی با ساختار شبکه‌ای سه بعدی منظم تولید شده به روش ریخته‌گری کوبشی، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. به این منظور، اثرات سه متغیر ضخامت دیواره سلول مشبک مسی (پیش‌ماده)، دمای بارریزی فلز آلومینیم و فشار کوبش بر ضخامت فصل مشترک، ضخامت سل یوتکتیک و ضخامت فاز Θ بررسی شده است. برای طراحی آزمایش از ماتریس L_{15} ، استفاده شد که هر سه متغیر مستقل در سه سطح با فاصله تغییرات یکسان قرار داشتند. از تحلیل‌های عددی رگراسیون و واریانس و توابع اثرات اصلی و متقابل با استفاده از نمودارهای سطحی برای نشان داده اثرات متغیرها استفاده شد. ریزساختار فصل مشترک توسط میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی مجهز به آنالیزگر تصویر و EDS بررسی شد. نتایج نشان دادند که ریزساختار فصل مشترک کامپوزیت از چهار لایه مس خالص، فاز Θ ، یوتکتیک $\Theta+\alpha$ و فاز آلفا آلومینیم تشکیل شده است. ضخامت پیش‌ماده موثرترین عامل تاثیرگذار بر ضخامت و مورفولوژی ترکیبات بین‌فلزی در فصل مشترک است و پس از آن دمای بارریزی و فشار کوبش قرار دارند. برای متغیر ضخامت پیش‌ماده بالاترین و پایین‌ترین داده‌ها هر دو پاسخ ضخامت سل یوتکتیک و فاز Θ به ترتیب در سطح $0/75$ و $1/25$ میلی‌متر میانگین داده‌ها برای پاسخ ضخامت سل یوتکتیک به میزان $45/2\%$ و ضخامت فاز Θ به میزان $58/3\%$ کاهش یافته است. همچنین برای متغیر دمای بارریزی با افزایش سطوح از 720 به 760 درجه سانتیگراد، میانگین داده‌های پاسخ ضخامت سل یوتکتیک و Θ به ترتیب $20/6\%$ و $50/4\%$ افزایش یافته است و برای متغیر فشار کوبش از سطح 50 MPa و 100 MPa پاسخ‌های ضخامت سل یوتکتیک و Θ به ترتیب $25/7\%$ و $4/3\%$ کاهش یافته است. مورفولوژی فاز Θ در پیش‌ماده با ضخامت $0/75$ میلی‌متر، به صورت ستونی، در ضخامت 1 میلی‌متر به صورت تلفیقی از ستونی و هم‌محور و با افزایش بیش‌تر به ضخامت $1/25$ میلی‌متر، به صورت کامل هم‌محور است.

واژه‌های کلیدی: دوفلزی آلومینیم/مس، ریخته‌گری کوبشی، ضخامت پیش‌ماده، تحلیل عددی، ریزساختار فصل مشترک.



پژوهش‌نامه ریخته‌گری

۱- مقدمه

امروزه یکی از حوزه‌هایی که نظر محققین و مهندسين مواد را به خود جلب نموده است، حوزه مواد پیشرفته است. در این بین استفاده از کامپوزیت‌های فلز/فلز که شامل تلفیقی از دو فلز یا آلیاژ با خواص منحصر به فرد است، مورد توجه محققین و صنایع مختلف است [۱]. این دسته از مواد دارای خواص فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی متفاوتی در مقایسه با شرایطی است، که از یک آلیاژ به طور مستقل و برای تامین دسته‌ای از خواص استفاده گردد [۲]. روش‌های متعددی مانند جوشکاری انفجاری، اتصال با نورد، اتصال نفوذی، ریخته‌گری و ... برای تولید این نوع کامپوزیت از آلیاژهای مختلف استفاده میشوند [۳]. استفاده از کامپوزیت‌های فلز/فلز به جای کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت‌شده با سرامیک‌ها دارای مزیت‌هایی از جمله؛ برخورداری از تلفیقی از استحکام و چقرمگی، هزینه ماده اولیه و تولید کمتر، عدم مشکل ترشوندگی بین دو فلز است [۴]. در سیستم‌های آلیاژی ناهمسان مانند Al-Cu و Al-Fe، تشکیل لایه‌های بین فلزی مبتنی بر سازوکارهای نفوذی غالب است. از آنجا که این فازها اغلب ساختار لایه‌ای دارند، به عنوان لایه‌های بین فلزی شناخته می‌شوند [۵].

در سیستم‌های همسان مانند Al-Al، Cu-Cu و Fe-Fe پیوند عمدتاً تحت تأثیر فرآیندهای نفوذ، ذوب مجدد و تبلور مجدد قرار دارد که منجر به تشکیل محلول‌های جامد در فصل مشترک می‌شود [۶]. ترکیبات بین‌فلزی η (AlCu)، θ (Al₂Cu) و β (Al₄Cu) و γ از جمله ترکیبات بین‌فلزی تشکیل شده در حین انجماد هستند [۷]. افزایش دمای بارریزی فلز آلومینیم با افزایش دمای فصل مشترک موجب ذوب موضعی فلز مس به خصوص در قسمت‌هایی که دارای ضخامت پایین می‌باشند، می‌گردد و در نتیجه تشکیل یوتکتیک شامل محلول جامد مس در آلومینیم در کنار فاز θ (Al₂Cu) محتمل است [۸]. در میان انواع کامپوزیت‌های فلز/فلز استفاده از کامپوزیت آلومینیم/مس به دلیلی خواصی همچون قابلیت هدایت حرارتی، الکتریکی و استحکام مناسب (در مقایسه با آلومینیم خالص)، سبکی و مقاومت به خوردگی مناسب فلز آلومینیم بسیار کاربردی است [۹]. عملکرد بسیاری از دستگاه‌ها مانند دیوهای نورافشان پرتوان با افزایش دما کاهش می‌یابد. برای مقابله با این مسئله، راه‌حل‌های خنک‌کننده‌ای که هم عملکرد بالا و هم مقرون به صرفه بودن را همزمان ارائه دهند، برای قطعات الکترونیکی مدرن ضروری هستند [۱۰]. این دو نیاز را می‌توان با استفاده از گرماخورهای ترکیبی متشکل از آلومینیم (با چگالی کم و رسانایی گرمایی خوب) و مس (با رسانایی گرمایی بالا) برآورده کرد [۱۱]. در میان روش‌های ساخت دوفلزی‌ها، استفاده از روش‌های جامد/مایع به دلیل اتصال قوی‌تر در فصل مشترک دوفلز، دارای چسبندگی مناسب‌تری است. با این حال، با افزایش دما امکان بروز واکنش‌های ناخواسته در فصل مشترک وجود دارد و این موضوع یکی از چالش‌های اصلی پیش‌رو برای محققین است [۱۲]. ریخته‌گری کوبشی، همچنین به عنوان آهنگری فلز مذاب شناخته می‌شود، فرآیندی است که فلز مذاب تحت فشار خارجی در قالب فلزی که بین صفحاتی از یک پرس قرار گرفته است، منجمد می‌شود [۱۳]. این فرآیند با نام‌هایی همچون پرس کاری مایع، کریستالی شدن تحت فشار، ریخته‌گری اکستروژن و شکل‌دهی کوبشی نیز شناخته می‌شود، همچنین برای ساخت قطعات کامپوزیتی یا غیرکامپوزیتی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۴]. با افزایش فشار اعمالی در فرآیند ریخته‌گری کوبشی از فواصل بین‌اتمی در مذاب کاسته شود که این موضوع در واقع لازمی ذوب و انجماد در این فرآیند است. همچنین با افزایش فشار انتظار می‌رود که ضریب خود انحلالی عناصر تشکیل دهنده آلیاژ و عناصر جزئی نیز افزایش یابد [۱۵]. سرد کردن سریع آلیاژ منجمد شده سبب کاهش و یا حذف منطقه هوایی بین دیواره قالب و پوسته جامد شده خواهد شد و در نتیجه سطح تماس بیشتری بین مذاب و دیواره قالب بوجود خواهد آمد [۱۶]. در واقع ازدیاد فشار موجب وقوع یک مادون انجماد اولیه شده و متعاقباً نرخ جوانه‌زنی افزایش می‌یابد در نتیجه ریز شدن دانه‌ها صورت می‌پذیرد [۱۷]. اندازه فاصله هوایی^۱ بین آلیاژ منجمد شده و دیواره قالب و همچنین میزان تحت‌تبرید^۲، دو مورد از مهم‌ترین ویژگی‌هایی است که روی ریزساختار

¹ Air gap

² Under cooling



پژوهش‌نامه ریخته‌گری

تاثیرگذار است و متعاقبا ویژگی‌های ذکر شده تاثیرپذیری بسیار زیادی از فاکتورهای اعمال فشار مانند میزان و مدت زمان اعمال فشار دارند [۱۸]. عوامل مختلفی بر روی کیفیت قطعات تولید شده توسط فرآیند ریخته‌گری کوبشی تاثیرگذار است که برخی از آنها عبارت‌اند از کیفیت و کمیت مذاب، تجهیزات و ابزار آلات، دمای ریخته‌گری، دمای ابزار، زمان تاخیر قبل از اعمال فشار، ضخامت روانکار، مقدار و مدت زمان اعمال فشار [۱۹]. با توجه به حساسیت‌های موجود در کنترل متغیرهای فرآیند ریخته‌گری کوبشی همواره سعی بر این است که با انتخاب یک سطح مناسب از متغیرها بتوان خصوصیات ریزساختاری و مکانیکی آلیاژها را بهبود بخشید و در همین راستا استفاده از روش‌های مختلف طراحی آزمایش راهگشا است [۲۰]. استفاده از ساختار شبکه‌ای با سلول باز موجب دستیابی به توزیع همگن تقویت کننده در زمینه می‌گردد [۲۱]. در این پژوهش به منظور ساخت پیش ماده به عنوان فاز تقویت کننده با ساختار شبکه‌ای سه‌بعدی منظم از فرآیند ریخته‌گری مکشی استفاده شد. در ادامه توسط فرآیند ریخته‌گری کوبشی تلاش برای دستیابی به توزیع یکنواختی از فاز زمینه و تقویت کننده صورت گرفت. همچنین تاثیر کسر حجمی فاز تقویت کننده و متغیرهای ریخته‌گری بر ضخامت و نوع ترکیبات بین فلزی ایجاد شده در فصل مشترک مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور انجام بررسی آماری توسط روش طراحی آزمایش طرح مرکب مرکزی (اثربخشی متغیرها و تداخل اثر آن‌ها بر یکدیگر) مورد استفاده قرار گرفت.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- روند پژوهش

در پژوهش حاضر اثر بخشی متغیرهای ضخامت پیش ماده، دمای بارریزی و فشار کوبش بر مشخصه‌های ریزساختار فصل مشترک شامل ضخامت و مورفولوژی سل یوتکتیک و فاز θ مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور ساخت پیش ماده توسط فرآیند ریخته‌گری مکشی و ساخت کامپوزیت نهایی توسط فرآیند ریخته‌گری کوبشی انجام شد. ترتیب انجام آزمون‌ها بر اساس روش طراحی آزمایش طرح مرکب مرکزی به آرایه L15 با ۲ تکرار صورت گرفت و سپس سهم اثربخشی هر یک از متغیرها به صورت جداگانه و اثر متقابل آنها بر یکدیگر تحلیل شد.

۲-۲- فرآیند ساخت پیش ماده مسی با ساختار سه بعدی منظم

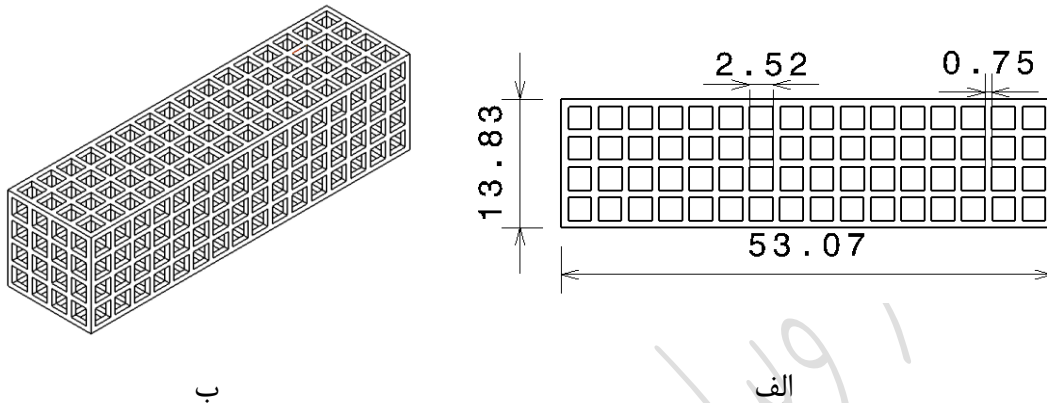
به منظور ساخت مدل از پیش ماده مسی با ساختار شبکه‌ای سه‌بعدی منظم از دستگاه پرینتر سه‌بعدی با روش SLA^3 با دقت ابعادی $0/01$ میلی‌متر و با استفاده از رزین پلیمری استفاده شد (با زمان تابش معمول ۳ ثانیه، تعداد لایه‌های زیرین ۶ لایه و زمان تابش لایه زیرین ۵۰ ثانیه). بدین منظور مدل شبکه‌ای از سه ضخامت دیواره ۰/۷۵، ۱ و ۱/۲۵ میلی‌متر با فاصله بین شبکه‌ها ۲/۵۲ میلی‌متر ساخته شد (منظور از ضخامت پیش ماده طول و عرض دیواره مدل سه بعدی است، مطابق با شکل ۱). در ادامه مدل توسط راهگاه و راهبار مومی به قالب متصل شد به منظور انجام قالبگیری گچی، گچ و آب به نسبت مشخص مخلوط شده و سپس برای حذف حباب‌های هوا، تحت خلا قرار گرفت. به منظور حذف مدل مومی از داخل قالب گچی، حرارت دهی در دماهای ۳۵۰، ۴۷۰، ۶۵۰ و سپس ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد (هر کدام به مدت ۴۵ دقیقه) انجام شد. به منظور ساخت پیش ماده از مس خالص تجاری با خلوص ۹۹/۹۰٪ و با ساختار شبکه‌ای منظم، روش ریخته‌گری مکشی با استفاده از کوره‌المنتی تحت خلا با قابلیت دمش گاز آرگون استفاده شد (شکل ۲-الف). دمای بارریزی مس

³ Stereolithography



پژوهش‌نامه ریخته‌گری

خالص تجاری ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، و فشار خلا ۱- بار است. پس از خروج شبکه مسی از قالب تمیزکاری آن‌ها به منظور حذف اکسیدهای سطحی در دستگاه تمیزکننده آلتراسونیک انجام و در دسیکاتور قرار گرفته است.



شکل ۱- نقشه سه بعدی مدل پیش ماده با ساختار مشبک ساده.



شکل ۲- تصاویر الف) تجهیزات فرآیند ریخته‌گری مکشی، ب) نمونه پیش ماده مسی با ضخامت دیواره ۱ میلی‌متر.

۲-۳- فرآیند ریخته‌گری کوبشی دوفلزی آلومینیم/مس

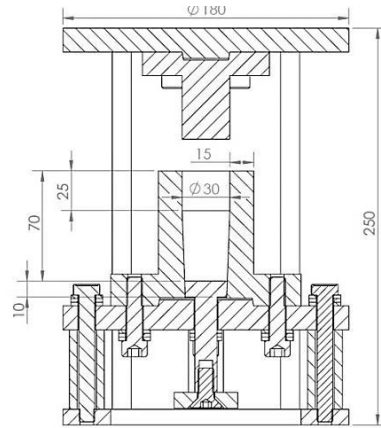
به منظور ساخت کامپوزیت آلومینیم/مس از آلومینیم خالص تجاری AA-1050 به عنوان فاز زمینه استفاده شد. برای ریخته‌گری کوبشی از یک دستگاه پرس هیدرولیک با ظرفیت ۲۰ تن و با قابلیت کنترل نیروی اعمالی و همچنین برای انجام عملیات ذوب از کوره مقاومتی با ظرفیت ۲۰ کیلوگرم به همراه بوتله گرافیتی با ظرفیت یک کیلوگرم استفاده شد. جنس قالب استوانه‌ای از فولاد ابزار گرم کار H13 به قطر ۳۰ و ارتفاع ۶۰ میلی‌متر که دارای یک المنت با سیستم کنترل دما (تا دمای پیش‌گرم ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد) است، مورد قرار گرفت. همچنین از یک ترموکوپل در عمق ۵ میلی‌متری بدنه قالب به منظور اطمینان از کنترل دقیق دمای قالب استفاده شد. در شکل ۳- الف هندسه قالب و در ۳- ب تجهیزات پیش‌گرم قالب نشان داده شده است. روان‌کاری قالب توسط گرافیت کلئیدی انجام شد. با توجه به اینکه پیش ماده مسی به عنوان تقویت کننده و آلومینیم خالص به عنوان زمینه است، محصول نهایی کامپوزیت آلومینیم-مس است (مطابق با شکل ۳-ج).



پژوهش‌نامه ریخته‌گری



ب



الف



ج

شکل ۳- تصاویر الف) هندسه قالب فرآیند ریخته‌گری کوبشی (ابعاد بر حسب میلی‌متر) ب) تجهیز پیشگرم قالب ج) نمونه کامپوزیت آلومینیم-مس.

۲-۴- طراحی آزمایش‌ها

طراحی آزمایش‌ها برای بررسی متغیرهای طراحی و فرآیند ریخته‌گری کوبشی طبق روش طراحی آزمایشات طرح مرکب مرکزی مطابق با جدول ۱، طرح L15 با سه متغیر و در سه سطح انجام پذیرفت. انتخاب ترتیب انجام آزمون‌های ریخته‌گری به صورت اتفاقی و با حداقل دوبار تکرار انجام شد. تحلیل‌های عددی داده‌های آزمایش (تعیین اثر اصلی متغیرها در سطوح مختلف) و رسم نمودارهای مرتبط با استفاده از برنامه Minitab، Design Expert و DOE Pro انجام شده است. به منظور تحلیل داده‌ها از آنالیزهای واریانس و واریانس ANOVA و Main Effect و به منظور بررسی اثرات اصلی و متقابل متغیرها از Contour Plot و Scatter Plot استفاده شد.



پژوهش‌نامه ریخته‌گری

جدول ۱- طراحی آزمایش‌ها و مقدار متغیرها در هر آزمایش.

کد نمونه	فشار کوبش، (MPa)	دمای بارریزی، (°C)	ضخامت پیش‌ماده، (mm)
R1	۵۰	۷۲۰	۰/۷۵
R2	۵۰	۷۲۰	۱/۲۵
R3	۱۰۰	۷۲۰	۰/۷۵
R4	۱۰۰	۷۲۰	۱/۲۵
R5	۵۰	۷۶۰	۰/۷۵
R6	۵۰	۷۶۰	۱/۲۵
R7	۱۰۰	۷۶۰	۰/۷۵
R8	۱۰۰	۷۶۰	۱/۲۵
R9	۷۵	۷۴۰	۱
R10	۷۵	۷۲۰	۱
R11	۷۵	۷۶۰	۱
R12	۵۰	۷۴۰	۱
R13	۱۰۰	۷۴۰	۱
R14	۷۵	۷۴۰	۰/۷۵
R15	۷۵	۷۴۰	۱/۲۵

۲-۵- بررسی ریزساختاری

تصاویر ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری MDS مدل 120A-NJF با بزرگنمایی‌های مختلف و میکروسکوپ الکترونی روبشی Philips مدل XL30 مجهز به دستگاه آنالیز عنصری EDS صورت گرفت. همچنین به نمونه‌گیری از فاصله ۲۰ میلی‌متری سطح انجام شده است. متالوگرافی تمامی نمونه‌ها بعد از آماده‌سازی و پولیش توسط محلول Kellers با ترکیب (2ml HF, 90 ml H₂O, 5ml HNO₃, 3ml HCl) صورت گرفت. بررسی ریزساختار شامل بررسی نوع و اندازه‌گیری ضخامت ترکیبات فصل‌مشتک در ۲۰ تصویر از گوشه تا مرکز نمونه توسط نرم‌افزار تحلیل تصاویر ریزساختاری MIP4 صورت گرفت.

۳- نتایج و بحث

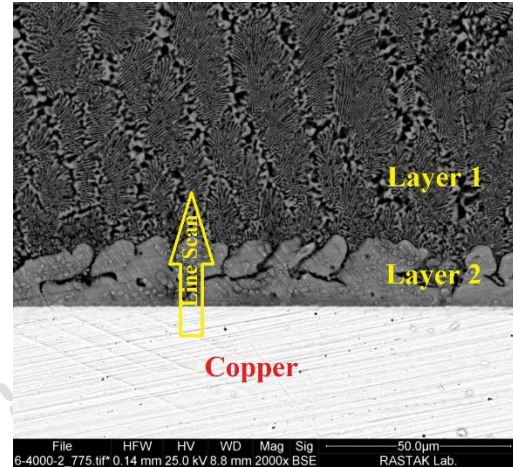
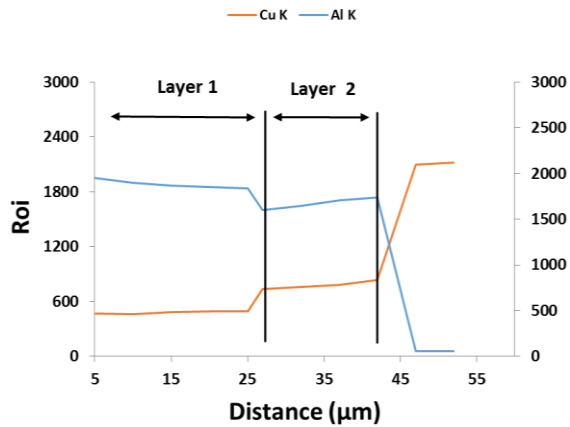
۳-۱- بررسی ریزساختار فصل مشترک

در شکل ۴ تصویر ریزساختار به همراه آنالیز خطی مربوط به فصل مشترک کامپوزیت آلومینیم-مس تولید شده توسط فرآیند ریخته‌گری کوبشی را نشان می‌دهد. فصل مشترک این کامپوزیت از ۴ لایه مس خالص، فاز Θ ، سل یوتکتیک $\Theta+\alpha$ و فاز آلفا آلومینیم تشکیل شده است. پیشتر در مقالات منتشر شده لایه‌های دیگری از ترکیبات بین فلزی هم‌چون Al_4Cu_9 ، $AlCu$ و Al_2Cu_3 و... نیز تشکیل شده‌اند. تشکیل چنین لایه‌هایی به دلیل نیاز به نفوذ حالت جامد (زمان و دما) دارای انرژی فعال‌سازی بیشتری نسبت به ترکیب بین فلزی Θ است [۲۲]. به عنوان مثال انرژی فعال‌سازی برای تشکیل ترکیب Al_4Cu_9 ، $138/9$ و برای $AlCu$ $148/4$ کیلو ژول بر مول است. در پژوهش

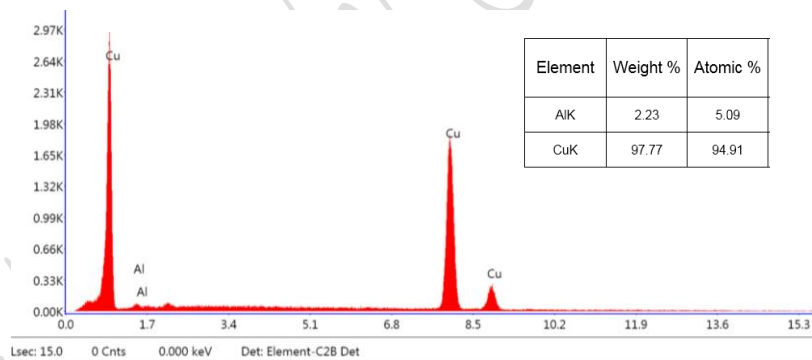


پژوهش‌نامه ریخته‌گری

حاضر به دلیل دو عامل اصلی الف) اعمال فشار کوبش و ب) استفاده از قالب فلزی (در کنار استفاده از شبکه مسی)، زمان نفوذ نسبت به سایر مقالات به نحو محسوسی کاهش یافته است و به همین دلیل از تشکیل سایر ترکیبات بین‌فلزی که تشکیل آنها مستلزم نفوذ حالت جامد است جلوگیری شد [۲].



ب

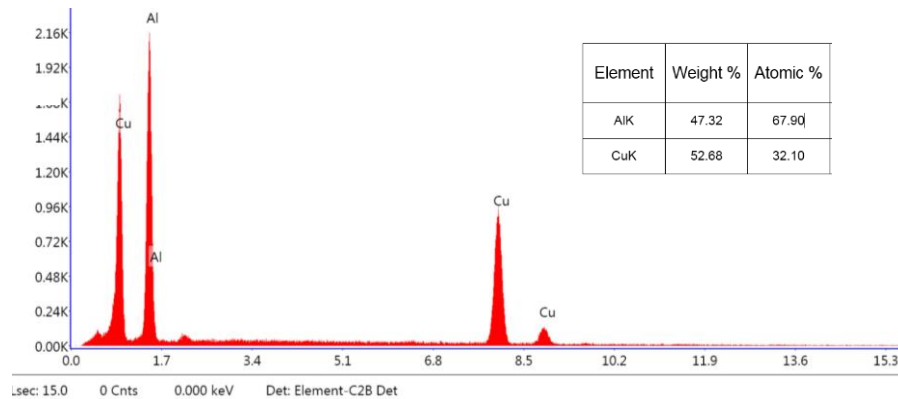


الف

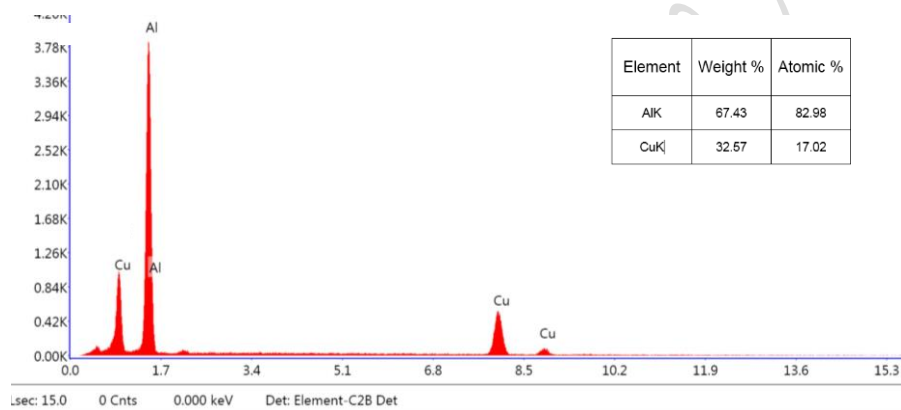
ج



پژوهش‌نامه ریخته‌گری



د



ه

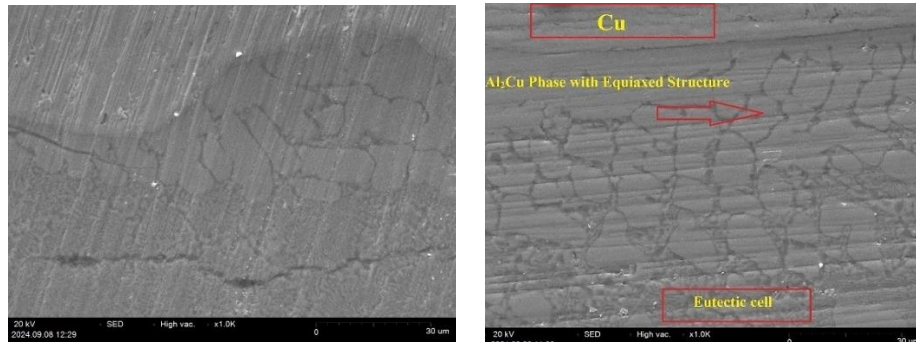
شکل ۴- بررسی الف) ریزساختار SEM کامپوزیت آلومینیم/مس ب) آنالیز خطی ج) آنالیز عنصری منطقه ۱ د) لایه ۱، ۵) لایه ۲.

در شکل ۵، ۶ و ۷ روند کلی تغییرات ضخامت θ با تغییر ضخامت پیش ماده در دما و فشار ثابت نشان داده شده است. ریز ساختار نمونه R14 و R9 و R15 دارای متغیرهای ثابت دمای بارریزی ۷۴۰ درجه سانتی گراد و فشار کوبش ثابت ۷۵ MPa در شکل ۵ نشان داده شده است. در ضخامت پیش ماده ۰/۷۵ میلی‌متر به دلیل ضخامت جداره نازک تر و متعاقبا سرعت انتقال پایین تر، مورفولوژی فاز θ شامل ساختار صفحه‌ای و هم‌محور است. با افزایش ضخامت پیش ماده به ۱ میلی‌متر مطابق با شکل ۵- ب به دلیل افزایش توان تبریدی قالب ناشی از کاهش حجم فاز مذاب، ضخامت فاز θ به نحو محسوسی کاهش یافته است و مورفولوژی فاز θ شامل ساختار سلولی و هم‌محور است. با افزایش ضخامت پیش ماده به ۱/۲۵ میلی‌متر مطابق شکل ۵- ج ضخامت نیز به نحو محسوسی کاهش یافته است و ساختار هم‌محور ریز و دارای پیوستگی در فصل مشترک می‌باشد. با افزایش ضخامت پیش ماده توان تبریدی قالب افزایش یافته و در نهایت کاهش زمان نفوذ و



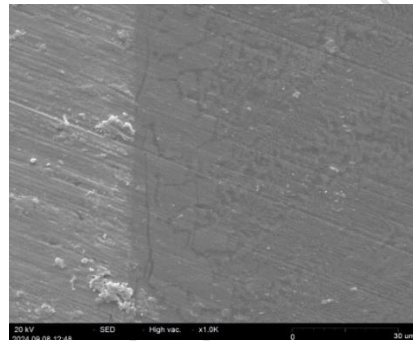
پژوهش‌نامه ریخته‌گری

نفوذپذیری موجب تغییر در مورفولوژی فاز Θ می‌گردد. به عبارت دیگر افزایش ضخامت پیش‌ماده با افزایش توان تبریدی قالب، موجب افزایش سرعت انجماد و متعاقباً افزایش سرعت جوانه‌زنی می‌گردد [۳].



ب

الف



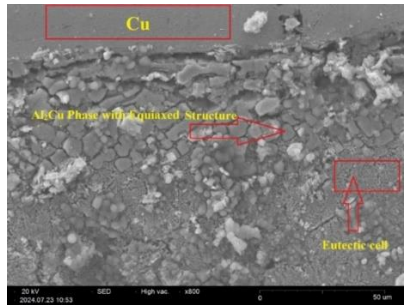
ج

شکل ۵- بررسی ریزساختار SEM مربوط به نمونه‌های الف (R14 ب) R9 (ج) R15.

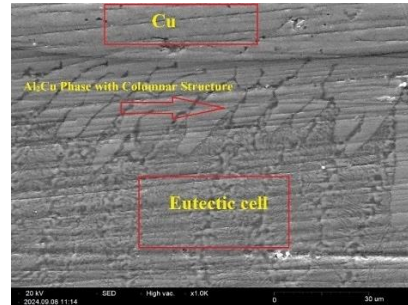
مطابق با شکل ۶ بررسی‌ها در نمونه‌های R1 (با ضخامت پیش‌ماده ۰/۷۵ میلی‌متر، فشار کوبش ۵۰ MPa و دمای بارریزی ۷۲۰ درجه سانتیگراد) و R5 (با ضخامت پیش‌ماده ۰/۷۵ میلی‌متر، فشار کوبش ۵۰ MPa و دمای بارریزی ۷۶۰ درجه سانتیگراد) نشان می‌دهد، که افزایش دما تاثیر محسوس بر مورفولوژی فاز Θ ندارد و تنها موجب تغییر در ضخامت آن می‌گردد. نکته حائز اهمیت دیگر این است که در هیچ یک از نمونه‌ها دمای بارریزی بر نوع ترکیبات بین فلزی شکل گرفته در فصل مشترک اثر نداشته است و تنها بر ضخامت و مورفولوژی و ابعاد ترکیبات فلزی اثرگذار بوده است. چنین نتایج مشابهی توسط گوآن و همکاران [۲۳]، در زمینه اثربخشی دمای بارریزی بر ترکیبات بین فلزی شکل گرفته در فصل مشترک نیز حاصل شد. بررسی اثربخشی عامل فشار کوبش مطابق با شکل ۷ نشان می‌دهد که افزایش فشار کوبش به غیر از اثربخشی محسوس بر ضخامت لایه فصل مشترک موجب افزایش فشردگی ساختار فاز α غنی از آلومینیم می‌گردد. افزایش فشار اعمالی از ۵۰ مگاپاسکال به ۱۰۰ مگاپاسکال، ساختار فاز α تدریجاً اصلاح نموده، اندازه آن را کاهش داده و ساختار یکنواخت‌تر و فشرده‌تری تولید می‌کند. در نتیجه خواص مکانیکی فصل مشترک تقویت می‌شود.



پژوهش‌نامه ریخته‌گری

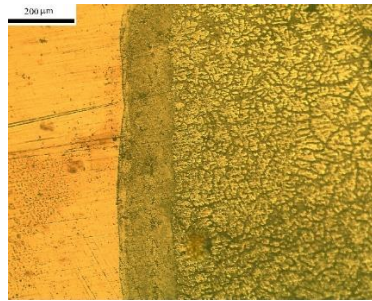


ب

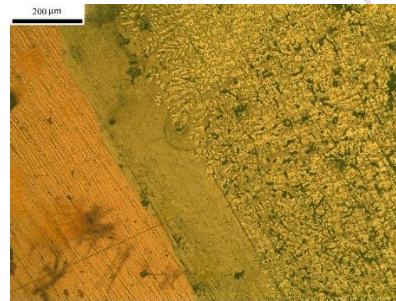


الف

شکل ۶- بررسی ریزساختار SEM نمونه‌های الف (R1) و ب (R5).



ب



الف

شکل ۷- بررسی ریزساختار با میکروسکوپ نوری نمونه‌های الف (R2) و ب (R4).

۳-۲- بررسی عددی مشخصه‌های ریزساختاری فصل مشترک (آنالیز واریانس)

در جدول ۲ نتایج آنالیز ریزساختار در قالب پاسخ‌های ضخامت سل یوتکتیک، فاز θ و ضخامت فصل مشترک در شرایط مختلف آزمایشی نشان داده شده است. هم‌چنین در جدول‌های ۳ و ۴ نتایج آنالیز ANOVA مربوط به این دو پاسخ به همراه درصد مشارکت هر یک از متغیرها نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد متغیر ضخامت پیش‌ماده برای هر سه پاسخ تقریباً به یک میزان ثابتی اثر بخشی دارد و مهم‌ترین عامل تاثیرگذار است. برای پاسخ ضخامت سل یوتکتیک متغیر فشار کوبش پس از ضخامت پیش‌ماده و برای پاسخ ضخامت فاز θ متغیر دمای بارریزی پس از ضخامت پیش‌ماده تاثیرگذار می‌باشند. اما برای پاسخ ضخامت فصل مشترک، سهم هر دو متغیر فشار کوبش و دمای بارریزی تقریباً به میزان مساوی است.



پژوهش‌نامه ریخته‌گری

جدول ۲- نتایج آنالیز ریزساختار نمونه‌ها در شرایط مختلف آزمایشی.

Row	Pouring Temperature (°C)	Squeeze Pressure (MPa)	Preform Thickness (mm)	THK Alpha+θ (μm)	THK θ (μm)	THK IMC (μm)
1	720	50	0.75	187	29	216
2	720	50	1.25	99	9	108
3	720	100	0.75	150	27	177
4	720	100	1.25	50	9	59
5	760	50	0.75	204	37	241
6	760	50	1.25	127	16	143
7	760	100	0.75	177	38	215
8	760	100	1.25	89	18	107
9	740	75	1	143	21	164
10	720	75	1	130	17	147
11	760	75	1	146	28	174
12	740	50	1	135	25	160
13	740	100	1	132	19	151
14	740	75	0.75	160	30	190
15	740	75	1.25	116	15	131

جدول ۳- آنالیز ANOVA نتایج ریزساختار ضخامت سل یوتکتیک.

Source	SS	df	MS	F	P	% Contrib
A-Pouring Temperature (oC)	4855.6	2	2427.8	98.410	0.000	7.55%
B-Squeeze Preassure (MPa)	7235.9	2	3618.0	146.652	0.000	11.26%
C-Preform Thickness (mm)	47286.4	2	23643.2	958.367	0.000	73.57%
AB	1796.3	4	449.1	18.203	0.000	2.79%
AC	2567.6	4	641.9	26.019	0.000	3.99%
BC	231.4	4	57.9	2.345	0.094	0.36%
Error	444.066	18	24.670			0.49%
Total	64275.500	44				



پژوهش‌نامه ریخته‌گری

جدول ۴- آنالیز ANOVA نتایج ریزساختار ضخامت فاز Θ .

Source	SS	df	MS	F	P	% Contrib
Pouring Temperature (oC)	641.2	2	320.6	118.844	0.000	18.59%
Squeeze Preassure (MPa)	7.8240	2	3.9120	1.450	0.261	0.23%
Preform Thickness (mm)	2652.5	2	1326.2	491.625	0.000	76.90%
AB	62.6	4	15.7	5.803	0.004	1.82%
AC	32.2	4	8.1	2.988	0.047	0.93%
BC	4.7492	4	1.1873	0.440	0.778	0.14%
Error	48.558	18	2.698			1.40%
Total	3449.240	44				

جدول ۵- آنالیز ANOVA نتایج ریزساختار ضخامت لایه فصل مشترک.

Source	SS	df	MS	F	P	% Contrib
Pouring Temperature (oC)	8981.2	2	4490.6	176.059	0.000	9.57%
Squeeze Preassure (MPa)	7693.2	2	3846.6	150.810	0.000	8.20%
Preform Thickness (mm)	72334.7	2	36167.4	1417.978	0.000	77.06%
AB	1349.1	4	337.3	13.223	0.000	1.44%
AC	3040.9	4	760.2	29.805	0.000	3.24%
BC	171.1	4	42.8	1.677	0.199	0.18%
Error	459.113	18	25.506			0.32%
Total	93873.140	44				

۳-۳- بررسی اثرات اصلی متغیرهای ریخته‌گری

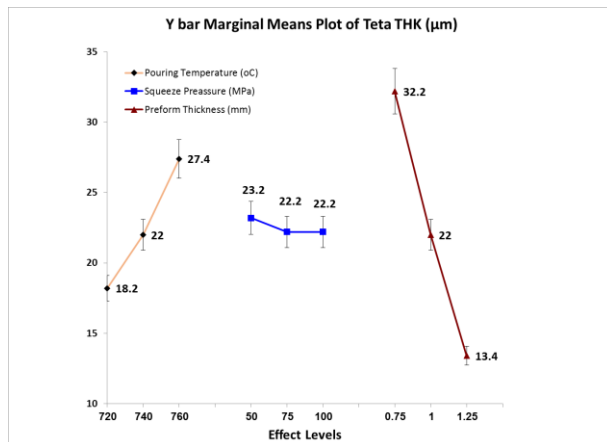
جدول ۵ میانگین داده‌ها را برای هر متغیر در سطوح مشخص نشان می‌دهد. همچنین مطابق با شکل ۱۰ نمودار اثر اصلی متغیرها بر پاسخ ضخامت سل یوتکتیک، فاز Θ و ضخامت فصل مشترک نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد برای متغیر ضخامت پیش‌ماده بالاترین و پایین‌ترین داده‌ها هر دو پاسخ ضخامت سل یوتکتیک و فاز Θ به ترتیب در سطح ۰/۷۵ و ۱/۲۵ میلی‌متر حاصل شد. با افزایش ضخامت پیش‌ماده از سطح ۰/۷۵ به ۱/۲۵ میلی‌متر میانگین داده‌ها برای پاسخ ضخامت سل یوتکتیک به میزان ۴۵/۲٪ و ضخامت فاز Θ به میزان ۵۸/۳٪ کاهش یافته است. همچنین برای متغیر دمای بارریزی با افزایش سطوح از ۷۲۰ به ۷۶۰ درجه سانتیگراد، میانگین داده‌های پاسخ ضخامت سل یوتکتیک و Θ به ترتیب ۲۰/۶٪ و ۵۰/۴٪ افزایش یافته است و برای متغیر فشار کوبش از سطح ۱۰۰ MPa و ۵۰ MPa پاسخ‌های ضخامت سل یوتکتیک و Θ به ترتیب ۲۵/۷٪ و ۴/۳٪ کاهش یافته است.



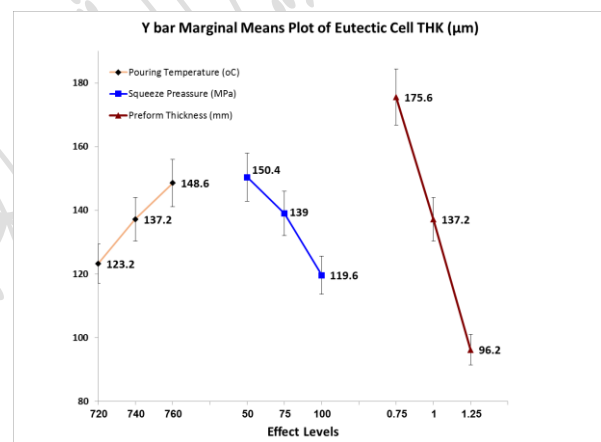
پژوهش‌نامه ریخته‌گری

جدول ۵- بررسی اثرات اصلی متغیرها بر مشخصه‌های ریزساختاری.

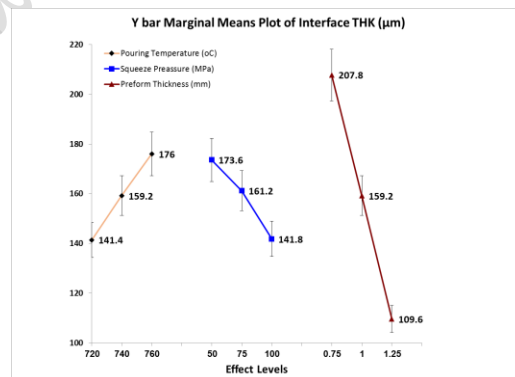
متغیر	سطح	میانگین ضخامت سل یوتکتیک (میکرومتر)	میانگین ضخامت فاز Θ (میکرومتر)	میانگین ضخامت فصل مشترک (میکرومتر)
ضخامت پیش‌ماده (میلی‌متر)	۰/۷۵	۱۷۵/۶	۳۲/۲	۲۰۷/۸
ضخامت پیش‌ماده (میلی‌متر)	۱	۱۳۷/۲	۲۲	۱۵۹/۲
ضخامت پیش‌ماده (میلی‌متر)	۱/۲۵	۹۶/۲	۱۳/۴	۱۰۹/۶
دمای بارریزی ($^{\circ}\text{C}$)	۷۲۰	۱۲۳/۲	۱۸/۲	۱۴۱/۴
دمای بارریزی ($^{\circ}\text{C}$)	۷۴۰	۲/۱۳۷	۲۲	۱۵۹/۲
دمای بارریزی ($^{\circ}\text{C}$)	۷۶۰	۱۴۸/۶	۲۷/۴	۱۷۶
فشار کوبش (MPa)	۵۰	۱۵۰/۴	۲۳/۲	۱۷۳/۶
فشار کوبش (MPa)	۷۵	۱۳۹	۲۲/۲	۱۶۱/۲
فشار کوبش (MPa)	۱۰۰	۱۱۹/۶	۲۲/۲	۱۴۱/۸



ب



الف



ج

شکل ۱۰- نمودار اثر اصلی تغییرات الف) ضخامت سل یوتکتیک ب) Θ و ج) ضخامت فصل مشترک با تغییر متغیرها.

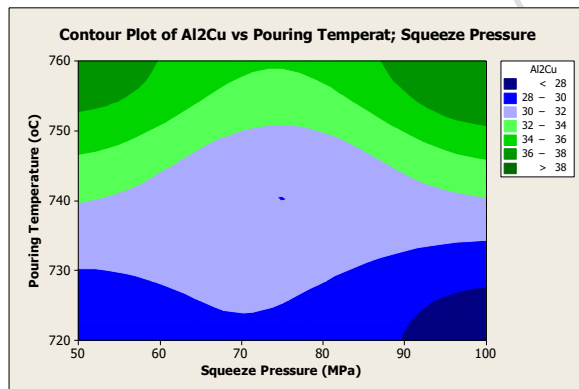


پژوهش‌نامه ریخته‌گری

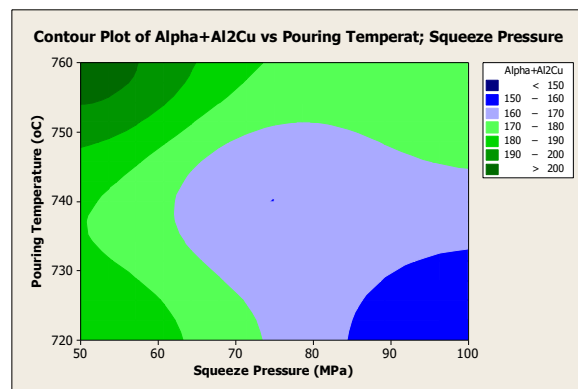
افزایش ضخامت پیش‌ماده با افزایش توان تبریدی قالب و کاهش زمان نفوذ موجب کاهش تمایل به تشکیل لایه Θ می‌گردد. به عبارت دیگر با افزایش نسبت حجمی مایع زمان انجماد فاز α آلومینیم افزایش یافته و متعاقباً میزان انحلال مس نیز در داخل فاز α آلومینیم افزایش می‌یابد. بنابراین با افزایش ضخامت پیش‌ماده به دلیل کاهش حجم آلومینیم مذاب، زمان انجماد فاز α آلومینیم نیز افت می‌نماید و در ادامه اتم‌های مس کمتری نفوذ کرده و از ضخامت سل یوتکتیک کاسته می‌شود [۳]. مطابق با جدول ۲، تغییرات ضخامت فاز Θ با ضخامت پیش‌ماده در صورت ثابت در نظر گرفتن مقادیر متغیر فشارکوبش و دمای بارریزی نشان داده شده است. در شرایط فشار 100 MPa و دمای 720 درجه سانتیگراد و افزایش ضخامت پیش‌ماده از 0.75 به 1 و سپس $1/25$ میلی‌متر ضخامت فاز Θ به ترتیب $29/6\%$ و $52/6\%$ کاهش می‌یابد و در شرایط فشار کوبش 50 MPa و دمای بارریزی 760 درجه سانتیگراد با افزایش ضخامت پیش‌ماده از 0.75 به 1 و سپس $1/25$ میلی‌متر ضخامت فاز Θ به ترتیب $32/4\%$ و 36% کاهش می‌یابد. با این حال میانگین داده‌ها در شرایط دمای بارریزی 760 درجه سانتیگراد و فشار کوبش 50 MPa برابر با 26 میکرومتر و در شرایط دمای بارریزی 720 درجه سانتیگراد و فشارکوبش 100 MPa برابر با $18/3$ میکرومتر است.

۳-۳- بررسی اثرات متقابل متغیرهای ریخته‌گری

در شکل ۱۱ روند کلی تغییرات ضخامت سل یوتکتیک با تغییر متغیرهای فشارکوبش و دمای بارریزی و ضخامت پیش‌ماده 0.75 میلی‌متر نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد پایین‌ترین ضخامت سل یوتکتیک در شرایط فشار حداکثری و دمای حداقلی حاصل شد. بررسی تغییرات در ضخامت پیش‌ماده 0.75 میلی‌متر مطابق شکل ۱۱-ب نشان می‌دهد که پایین‌ترین ضخامت فاز Θ در محدوده دمایی 720 درجه سانتیگراد و فشار 100 MPa قابل دستیابی است. با این حال وابستگی به دما در این ضخامت بیش از فشار می‌باشد زیرا که متغیر فشارکوبش تاثیر به سزایی در تعیین میانگین داده نخواهد داشت و دمای بارریزی در هر سطح مشخصی موجب دستیابی به محدوده‌ای از ضخامت Θ می‌گردد.



ب



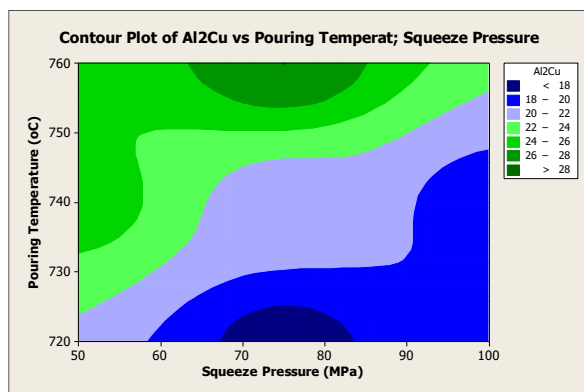
الف

شکل ۱۱- روند کلی تغییرات الف) ضخامت سل یوتکتیک و ب) فاز Θ با تغییر متغیرهای فشارکوبش و دمای بارریزی در ضخامت پیش‌ماده 0.75 میلی‌متر.

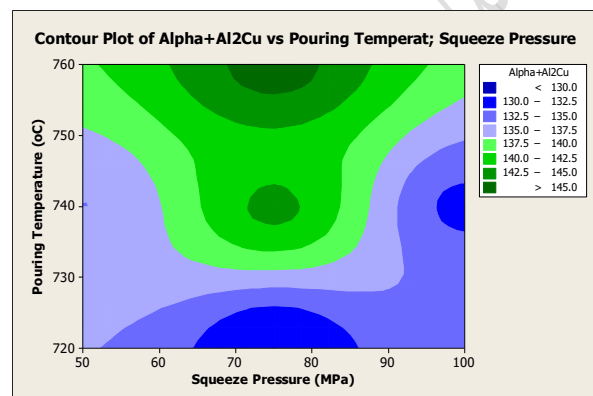


پژوهش‌نامه ریخته‌گری

با افزایش ضخامت پیش‌ماده در شکل ۱۲ و ۱۳ رفتار مشابهی قابل مشاهده است، ولی اثر فشار به منظور دستیابی به حداقل ضخامت سل یوتکتیک کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش ضخامت پیش‌ماده توان تبریدی قالب افزایش یافته و تاثیر متغیرهای ریخته‌گری مانند فشارکوبش و دمای بارریزی کاهش می‌یابد. بررسی تغییرات در ضخامت پیش‌ماده ۱ میلی‌متر در شکل ۱۲-ب نشان می‌دهد، جهت دستیابی به حداقل ضخامت Θ به حداقل فشار ۷۵ MPa می‌باشد. در این ضخامت پیش‌ماده نیز متغیر دمای بارریزی روند کلی نمودار را تعیین می‌نماید. در ضخامت ۱/۲۵ میلی‌متر مطابق شکل ۱۳-ب نیز عدم وابستگی محسوس به متغیر فشارکوبش را در کلیه شرایط می‌توان مشاهده نمود. در این ضخامت پیش‌ماده نیز متغیر دمای بارریزی تعیین کننده روند کلی نمودار است.

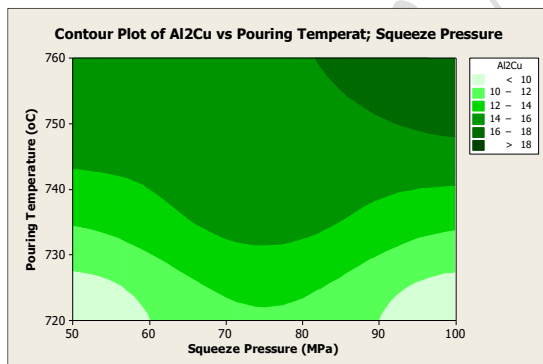


ب

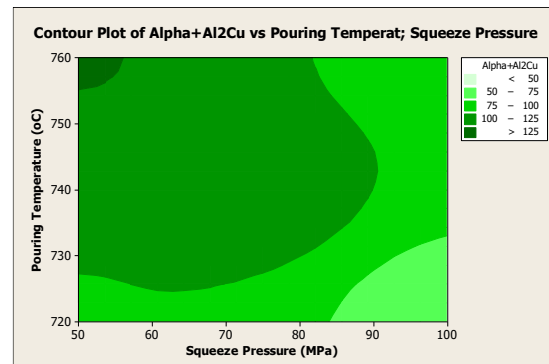


الف

شکل ۱۲-رند کلی تغییرات الف) ضخامت سل یوتکتیک و ب) فاز Θ با تغییر متغیرهای فشارکوبش و دمای بارریزی در ضخامت پیش‌ماده ۱ میلی‌متر.



ب



الف

شکل ۱۳-رند کلی تغییرات الف) ضخامت سل یوتکتیک و ب) فاز Θ با تغییر متغیرهای فشارکوبش و دمای بارریزی در ضخامت پیش‌ماده ۱/۲۵ میلی‌متر.



پژوهش‌نامه ریخته‌گری

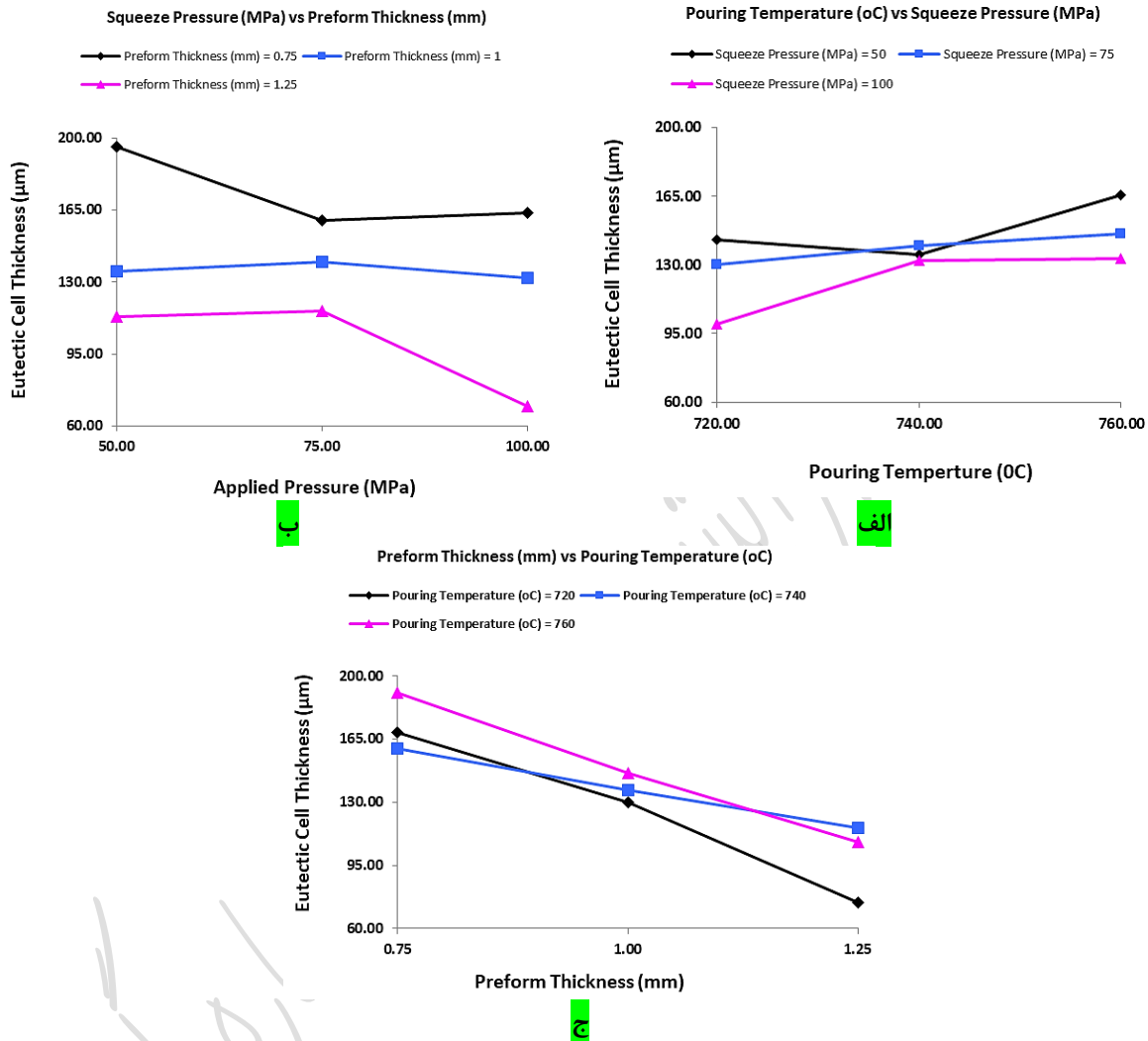
مطابق با شکل ۱۴-الف، بررسی اثر متقابل دمای بارریزی و فشار کوبش نشان می‌دهد که در فشار کوبش ثابت 100 MPa ، اثربخشی محسوس دمای بارریزی بر ضخامت سل یوتکتیک تا 740 درجه سانتی‌گراد است ولی در فشار کوبش ثابت 50 MPa اثربخشی محسوس از محدوده 740 تا 760 است. این مسئله به این دلیل است که فشار کوبش 100 MPa موجب کاهش اثربخشی افزایش دمای بارریزی در افزایش ضخامت سل یوتکتیک می‌گردد. زیرا که به طور کلی ارتباط بین ضخامت لایه نفوذ و زمان نفوذ از یک رابطه پارابولیک تبعیت می‌کند یعنی زمانی که توان تبریدی قالب با افزایش فشار و ضخامت پیش‌ماده از سطح مشخصی عبور می‌کند رفتار پارابولیک نمودار با افزایش دمای بارریزی قابل رویت است [۲]. این مسئله به این دلیل است که با افزایش دمای بارریزی از سطح 740 به 760 درجه سانتی‌گراد تشکیل محلول جامد فاز آلفا افزایش یافته و اتم‌هایی مس کمتری برای تشکیل سل یوتکتیک در دسترس خواهند بود به عبارت دیگر عمق نفوذ در چنین شرایطی دارای رابطه خطی با دمای سیستم است ولی ضخامت لایه یوتکتیک دارای رابطه پارابولیک می‌باشد. در فشار ثابت 75 MPa ، تغییرات ضخامت سل یوتکتیک محسوس نیست، و فشار کوبش تا حد زیادی اثر افزایش ضخامت سل یوتکتیک در اثر افزایش دمای بارریزی را کنترل می‌نماید. در حقیقت فشار کوبش در سطح 75 MPa و 100 MPa تا حد زیادی اثر دمای بارریزی حداکثری در افزایش ضخامت سل یوتکتیک را خنثی می‌نماید ولی در سطح 50 MPa این اثربخشی محدود است. مهم‌ترین عامل افزایش ضخامت سل یوتکتیک با افزایش دمای بارریزی مربوط به افزایش دو متغیر نفوذپذیری و زمان نفوذ است [۲۴]. سازوکار تشکیل این لایه شامل انحلال مس در داخل مذاب آلومینیم و انجام واکنش یوتکتیک است، بدیهی است با افزایش دمای بارریزی زمان در دسترس برای نفوذ اتم‌های مس به داخل مذاب آلومینیم افزایش یافته (افزایش عمق نفوذ) و موجب افزایش ضخامت این لایه می‌گردد. چنین رفتاری را در شکل ۱۴-الف و ۱۵-الف، می‌توان مشاهده نمود.

مطابق با شکل ۱۴-ب، بررسی اثر متقابل ضخامت پیش‌ماده و دمای بارریزی نشان می‌دهد، شیب نمودار تغییر ضخامت سل یوتکتیک با افزایش ضخامت پیش‌ماده در هر 3 دمای بارریزی کاهشی است. نرخ کاهش برای دمای بارریزی 720 درجه سانتی‌گراد در محدوده ضخامت 1 تا $1/25$ میلی‌متر به نسبت محدوده $0/75$ تا 1 میلی‌متر شدیدتر است که این مسئله می‌تواند به دلیل غالب شدن اثر تبریدی پیش‌ماده مسی (در ضخامت 1 میلی‌متر به بالا) بر دمای بارریزی باشد. با افزایش ضخامت پیش‌ماده در دمای بارریزی 760 درجه سانتی‌گراد، ضخامت سل یوتکتیک با یک شیب تقریباً ثابت کاهش می‌یابد.

مطابق با شکل ۱۴-ج، بررسی اثر متقابل فشار کوبش و ضخامت پیش‌ماده نشان می‌دهد، اثر فشار کوبش در کاهش ضخامت سل یوتکتیک برای ضخامت $0/75$ میلی‌متر در محدوده 50 تا 75 مگاپاسکال و برای ضخامت $1/25$ میلی‌متر در محدوده 75 تا 100 مگاپاسکال غالب است. در حقیقت در کلیه ضخامت پیش‌ماده‌ها اثربخشی هم‌زمان دو عامل الف) اثر تبریدی ناشی از پیش‌ماده مسی با ضخامت بالا و ب) اعمال فشار کوبش حداکثری موجب کاهش شدید ضخامت سل یوتکتیک می‌گردد. افزایش فشار کوبش به دو دلیل اثر محسوسی بر ضخامت سل یوتکتیک دارد، اولاً افزایش فشار با حذف فاصله هوایی میان پوسته انجمادی و دیواره قالب موجب افزایش ضریب انتقال حرارت و کاهش نفوذپذیری اتم‌های مس به داخل مذاب آلومینیم می‌گردد (کاهش زمان در دسترس برای نفوذ)، ثانیاً تغییر در دیاگرام فازی با تغییر در دمای خط مایع و جامد و ترکیب یوتکتیک به نحوی که در سمت غنی از آلومینیم برای تشکیل سل یوتکتیک نیاز به مقدار غلظت مس بیشتری می‌باشد [۲۶]. بنابراین به منظور انجام واکنش یوتکتیک، اتم‌های مس بیشتری باید مصرف شوند. به عبارت دیگر افزایش فشار خارجی موجب کاهش عمق نفوذ مس در آلومینیم در فصل مشترک می‌گردد ولی این اثر برای دما کاملاً معکوس است. دلیل کاهش نفوذ اتم‌ها در اثر افزایش فشار کوبش به دلیل کاهش فاصله بین اتم‌های مایع آلومینیم و متعاقباً کاهش فضای در دسترس برای نفوذ مس در آن محدوده است [۳]. به طور کلی لایه یوتکتیک به دلیل اینکه در رنج وسیعی از درصد وزنی مس شامل از $5/65\%$ تا $52/50\%$ احتمال تشکیل دارد، نسبت به بقیه لایه‌ها ضخیم‌تر است [۲۷].



پژوهش‌نامه ریخته‌گری

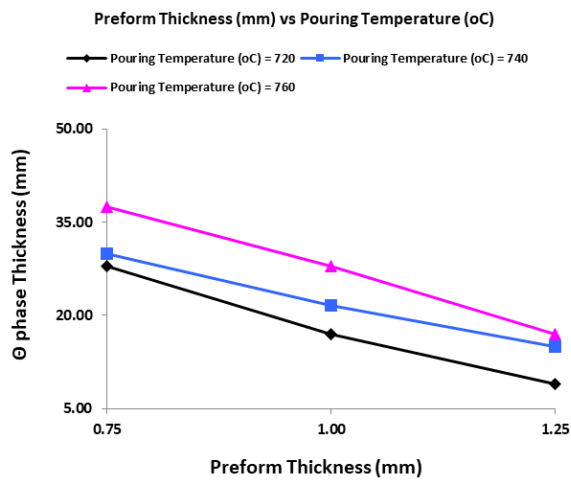


شکل ۱۴- نمودارهای اثر متقابل متغیرهای ریخته‌گری بر پاسخ ضخامت سل یوتکتیک.

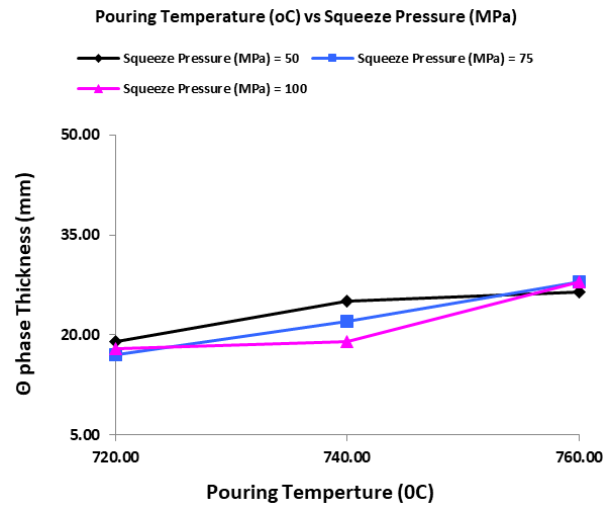
مطابق با شکل ۱۵-الف، بررسی اثر متقابل دمای بارریزی و فشار کوبش بر ضخامت فاز Θ نشان دهنده افزایش ضخامت فاز Θ با افزایش دمای بارریزی در کلیه فشارهای کوبش است با این حال میانگین داده در فشار کوبش ۱۰۰ MPa به میزان جزئی کمتر است. مطابق با شکل ۱۵-ب، بررسی اثر متقابل ضخامت پیش ماده و دمای بارریزی نشان می‌دهد، در کلیه دماهای بارریزی با افزایش ضخامت پیش ماده، ضخامت فاز Θ کاهش می‌یابد. شیب کاهشی برای همه دماها تقریباً به میزان ثابتی است ولی میانگین داده مطابق انتظار برای دمای بارریزی ۷۲۰ درجه سانتی‌گراد کمتر از دمای ۷۴۰ و ۷۶۰ درجه سانتی‌گراد است. مطابق با شکل ۱۵-ج، بررسی اثر متقابل فشار کوبش و ضخامت پیش ماده نشان دهنده عدم تاثیر محسوس متغیر فشار کوبش بر ضخامت فاز Θ در کلیه ضخامت‌های پیش ماده است.



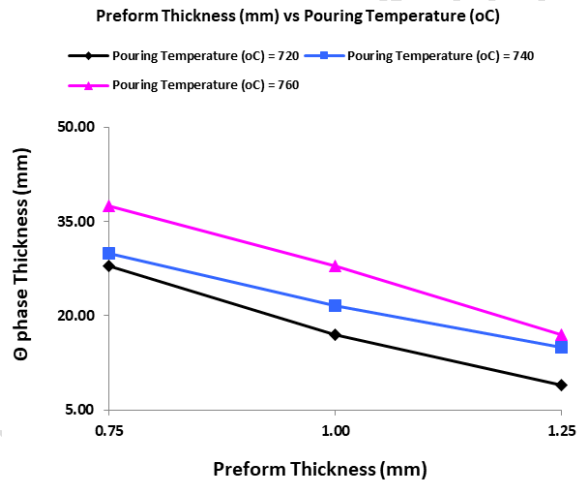
پژوهش‌نامه ریخته‌گری



ب



الف



ج

شکل ۱۵- نمودارهای اثر متقابل متغیرهای ریخته‌گری بر پاسخ ضخامت فاز Θ .

۴- نتیجه‌گیری

- فصل مشترک کامپوزیت از ۴ لایه مس خالص، فاز Θ ، یوتکتیک $\Theta+\alpha$ و فاز آلفا آلومینیم تشکیل شده است.
- ضخامت پیش‌ماده مهم‌ترین عامل تاثیرگذار بر ضخامت و مورفولوژی ترکیبات بین‌فلزی در فصل مشترک است. پس از آن به ترتیب متغیرهای دمای بارریزی روی ضخامت فاز Θ و فشار کوبش بر ضخامت سل یوتکتیک اثرگذار هستند.
- بالاترین ضخامت سل یوتکتیک و پایین‌ترین ضخامت فاز Θ متغیر، به ترتیب در ضخامت پیش‌ماده ۰/۷۵ و ۱/۲۵ میلی‌متر حاصل شد.



پژوهش‌نامه ریخته‌گری

- ۴) با افزایش ضخامت پیش‌ماده از سطح ۰/۷۵ به ۱/۲۵ میلی‌متر، میانگین داده‌ها برای ضخامت سل یوتکتیک به میزان ۰/۴۵/۲٪ و ضخامت فاز θ به میزان ۰/۵۸/۳٪ کاهش یافته است.
- ۵) برای متغیر دمای بارریزی با افزایش سطوح از ۷۲۰ به ۷۶۰ درجه سانتیگراد، میانگین داده‌های پاسخ ضخامت سل یوتکتیک و θ به ترتیب ۰/۲۰/۶٪ و ۰/۵۰/۴٪ افزایش یافته است و برای متغیر فشار کوبش از سطح ۵۰MPa و ۱۰۰MPa ضخامت‌های سل یوتکتیک و θ به ترتیب ۰/۲۵/۷٪ و ۰/۴/۳٪ کاهش یافته است.
- ۶) برای دستیابی به حداقل ضخامت فصل مشترک، در ضخامت پیش‌ماده ۱/۲۵ میلی‌متر به حداقل فشار ۱۰۰ مگاپاسکال و برای ضخامت پیش‌ماده ۰/۷۵ میلی‌متر به حداقل فشار ۷۵ مگاپاسکال نیاز است.

۵-مراجع

- [1] I. K. Kim and S. I. Hong, "Effect of heat treatment on the bending behavior of tri-layered Cu/Al/Cu composite plates," *Mater. Des.*, vol. 47, pp. 590–598, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2012.12.070.
- [2] T. Liu, Q. Wang, Y. Sui, Q. Wang, and W. Ding, "An investigation into interface formation and mechanical properties of aluminum-copper bimetal by squeeze casting," *Mater. Des.*, vol. 89, pp. 1137–1146, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2015.10.072.
- [3] G. Liu, Q. Wang, L. Zhang, B. Ye, H. Jiang, and W. Ding, "Effects of Melt-to-Solid Volume Ratio and Pouring Temperature on Microstructures and Mechanical Properties of Cu/Al Bimetals in Compound Casting Process," *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 50, no. 1, pp. 401–414, 2019, doi: 10.1007/s11661-018-4981-9.
- [4] A. Ramanathan, P. K. Krishnan, and R. Muraliraja, "A review on the production of metal matrix composites through stir casting – Furnace design, properties, challenges, and research opportunities," *J. Manuf. Process.*, vol. 42, no. September 2018, pp. 213–245, 2019, doi: 10.1016/j.jmapro.2019.04.017.
- [5] M. Pintore, J. Wölk, T. Mittler, T. Groß, B. Tonn, and W. Volk, "Composite Casting and Characterization of Cu–Al Bilayer Compounds," *Int. J. Met.*, vol. 14, no. 1, pp. 155–166, Jan. 2020, doi: 10.1007/s40962-019-00344-x.
- [6] ASM International. Handbook Committee., "ASM handbook," vol. 2.
- [7] S. M. Liang and R. Schmid-Fetzer, "Thermodynamic assessment of the Al-Cu-Zn system, part II: Al-Cu binary system," *Calphad Comput. Coupling Phase Diagrams Thermochem.*, vol. 51, pp. 252–260, 2015, doi: 10.1016/j.calphad.2015.10.004.
- [8] S. Tavassoli, M. Abbasi, and R. Tahavvori, "Controlling of IMCs layers formation sequence, bond strength and electrical resistance in Al–Cu bimetal compound casting process," *Mater. Des.*, vol. 108, pp. 343–353, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2016.06.076.
- [9] Y. Fu, Y. bo Zhang, J. chuan Jie, K. Svyrenko, C. hai Liang, and T. ju Li, "Interfacial phase formation of Al-Cu bimetal by solid-liquid casting method," *China Foundry*, vol. 14, no. 3, pp. 194–198, 2017, doi: 10.1007/s41230-017-6057-7.
- [10] S. Ahmadzadeh Salout and S. M. H. Mirbagheri, "Microstructural and mechanical characterization of Al/Cu interface in a bimetallic composite produced by compound casting," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–13, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-57849-7.
- [11] A. C. Fromm *et al.*, "Oxygen-Free Compound Casting of Aluminum and Copper in a Silane-Doped Inert Gas Atmosphere: A New Approach to Increase Thermal Conductivity," *Int. J. Met.*, vol. 17, no. 3, pp. 2171–2183, 2023, doi: 10.1007/s40962-022-00910-w.
- [12] G. Liu, Q. Wang, L. Zhang, B. Ye, H. Jiang, and W. Ding, "Effect of Cooling Rate on the Microstructure and Mechanical Properties of Cu/Al Bimetal Fabricated by Compound Casting," *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 49, no. 2, pp. 661–672, 2018, doi: 10.1007/s11661-017-4427-9.
- [13] M. R. Ghomashchi and A. Vikhrov, "Squeeze casting : an overview," vol. 101, no. May 1998, pp. 1–9, 2000.
- [14] J. W. Zhao and S. Sen Wu, "Microstructure and mechanical properties of rheo-diecasted A390 alloy," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed.)*, vol. 20, no. SUPPL. 3, pp. s754–s757, 2010, doi: 10.1016/S1003-



پژوهش‌نامه ریخته‌گری

- 6326(10)60576-6.
- [15] K. M. Amin and N. A. Mufti, "Investigating cooling curve profile and microstructure of a squeeze cast Al-4%Cu alloy," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 212, no. 8, pp. 1631-1639, 2012, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2012.02.017.
- [16] A. Maleki, B. Niroumand, and A. Shafyei, "Effects of squeeze casting parameters on density, macrostructure and hardness of LM13 alloy," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 428, no. 1, pp. 135-140, 2006, doi: 10.1016/j.msea.2006.04.099.
- [17] M. P. G. C., P. Krishna, and M. B. Parappagoudar, "An intelligent system for squeeze casting process—soft computing based approach," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, pp. 1-15, Feb. 2016, doi: 10.1007/s00170-016-8416-8.
- [18] M. Patel G C, A. K. Shettigar, and M. B. Parappagoudar, "A systematic approach to model and optimize wear behaviour of castings produced by squeeze casting process," *J. Manuf. Process.*, vol. 32, pp. 199-212, 2018, doi: 10.1016/j.jmapro.2018.02.004.
- [19] P. Senthil and K. S. Amirthagadeswaran, "Optimization of squeeze casting parameters for non symmetrical AC2A aluminium alloy castings through Taguchi method †," vol. 26, no. 4, pp. 1141-1147, 2012, doi: 10.1007/s12206-012-0215-z.
- [20] N. Souissi, S. Souissi, C. Le Niniven, M. Ben Amar, C. Bradai, and F. Elhalouani, "Optimization of Squeeze Casting Parameters for 2017 A Wrought Al Alloy Using Taguchi Method," **Vol. 3, no. 4, pp.** 141-154, 2017, doi: 10.3390/met4020141.
- [۲۱] جابر اسدی، بهمن کروجی، سید علیرضا حسینی، مصطفی علیشاهی، "بررسی خواص مکانیکی و سرعت خوردگی در محلول شبیه‌سازی بدن فوم های سلول باز منیزیمی ریخته‌گری"، پژوهش ریخته‌نامه‌گری، جلد ۴، شماره ۳، صفحات ۱۶۵-۱۵۵.
- [22] س.م.ا.ا.ع. بجندی، "ریخته‌گری کامپوزیت پیشرفته پایه زاماک ۵ با فاز فلزی تقویت کننده سه بعدی پیوسته مسی"، پژوهش‌نامه ریخته‌گری جلد ۴، شماره ۳، صفحات ۱۳۶-۱۲۹.
- [23] F. Guan, W. Jiang, G. Li, H. Jiang, J. Zhu, and Z. Fan, "Interfacial bonding mechanism and pouring temperature effect on Al/Cu bimetal prepared by a novel compound casting process," *Mater. Res. Express*, vol. 6, no. 9, 2019, doi: 10.1088/2053-1591/ab2d8f.
- [24] T. Liu, Q. Wang, Y. Sui, Q. Wang, and W. Ding, "An investigation into interface formation and mechanical properties of aluminum-copper bimetal by squeeze casting," *Mater. Des.*, vol. 89, pp. 1137-1146, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2015.10.072.
- [25] A. Mao *et al.*, "The diffusion behaviors at the Cu-Al solid-liquid interface: A molecular dynamics study," *Results Phys.*, vol. 16, no. 100, 2020, doi: 10.1016/j.rinp.2020.102998.
- [26] P. Vijian and V. P. Arunachalam, "Optimization of squeeze cast parameters of LM6 aluminium alloy for surface roughness using Taguchi method," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 180, no. 1-3, pp. 161-166, 2006, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.05.016.
- [27] R. Pelzer, S. Woehlert, H. Koerner, G. Khatibi, and J. Walter, *Growth behavior and physical response of Al-Cu intermetallic compounds*. 2014, pp. 372-377.