



مقاله پژوهشی:

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

سید عباس حصاصی<sup>۱</sup>، مجید عباسی<sup>۲\*</sup>، سید جمال حسینی‌پور<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مواد و صنایع دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد و صنایع دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۳- استاد، دانشکده مهندسی مواد و صنایع دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

\* نویسنده مکاتبه کننده: تلفن: ۰۱۱-۳۵۵۰۱۸۰۶، Email: abbm@nit.ac.ir

چکیده:

تاریخ دریافت: ۲۴ شهریور ۱۴۰۴

تاریخ بازنگری: ۰۸ آذر ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: ۰۸ آذر ۱۴۰۴

در این مقاله، مشخصه‌های ریزساختاری فصل مشترک دوفلزی آلومینیم با پیش‌ماده مسی با ساختار شبکه‌ای سه‌بعدی منظم تولید شده به روش ریخته‌گری کوبشی، به صورت عددی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. به این منظور، اثرات سه متغیر فرایندی ضخامت دیواره سلول مشبک مسی (به اختصار ضخامت پیش‌ماده) بین ۰/۷۵ تا ۱/۲۵ میلی‌متر، دمای بارریزی مذاب آلومینیم بین ۷۲۰ تا ۷۶۰ درجه سانتیگراد و فشار کوبش بین ۵۰ تا ۱۰۰ MPa بر سه مشخصه ریزساختاری ضخامت فصل مشترک، ضخامت سل یوتکتیک و ضخامت فاز  $\Theta$  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 رگرسیون و واریانس و توابع اثرات اصلی و متقابل با استفاده از نمودارهای سطحی استفاده شد. ریزساختار فصل مشترک توسط میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی مجهز به پردازشگر تصویر و EDS بررسی شد. مشاهده‌های میکروسکوپی نشان دادند که ریزساختار فصل مشترک دوفلزی از چهار لایه مس خالص، فاز  $\Theta$ ، یوتکتیک  $\alpha+\Theta$  و فاز آلفا آلومینیم تشکیل شده است که ضخامت آنها متأثر از سه متغیر مورد مطالعه است. همچنین مورفولوژی فاز  $\Theta$  در پیش‌ماده با ضخامت ۰/۷۵ میلی‌متر به صورت ستونی، در ضخامت ۱ میلی‌متر به صورت تلفیقی از ستونی و هم‌محور و در ضخامت ۱/۲۵ میلی‌متر، به صورت کامل هم‌محور است. نمودار اثرات اصلی نشان داد که تغییرات هر سه شاخص ریزساختاری با افزایش دمای بارریزی، کاملاً افزایشی بوده و در مقابل با افزایش فشار کوبش و ضخامت پیش‌ماده، کاهش یافته است. همچنین ارزیابی‌های واریانس مشخص نمود که ضخامت پیش‌ماده با سهمی بیش از ۷۵ درصد، موثرترین عامل روی اندازه مشخصه‌های ریزساختاری فصل مشترک است و پس از آن دمای بارریزی و فشار کوبش قرار دارند. ضخامت‌های فصل مشترک، سل یوتکتیک و فاز  $\Theta$  با افزایش دمای بارریزی، به ترتیب ۲۴/۴۷٪، ۲۰/۶۲٪ و ۵۰/۵۴٪ افزایش یافته و با افزایش فشار کوبش، به ترتیب ۱۸/۳۲٪، ۲۰/۴۸٪ و ۳۱/۳۱٪ کاهش یافته و با افزایش ضخامت جداره پیش‌ماده، به ترتیب به میزان ۴۷/۲۶٪، ۴۵/۲۱٪ و ۵۸/۳۸٪ کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی:

دوفلزی آلومینیم/مس، ریخته‌گری کوبشی، پیش‌ماده با ساختار شبکه‌ای سه بعدی منظم، تحلیل عددی، ریزساختار فصل مشترک.

ارجاع به این مقاله:

سید عباس حصاصی، مجید عباسی، سید جمال حسینی‌پور، تحلیل عددی اثرات متغیرهای ریخته‌گری کوبشی بر ریزساختار فصل مشترک دوفلزی آلومینیم/مس با ساختار شبکه‌ای سه بعدی منظم، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، پاییز و زمستان ۱۴۰۴، جلد ۹، شماره ۲، صفحات ۱۰۵-۱۲۰.

شناسه دیجیتال: (DOI): 10.22034/frj.2025.547148.1210

۱- مقدمه

خالص)، سبکی و مقاومت به خوردگی مناسب فلز آلومینیم بسیار کاربردی است [۱]. قیمت آلومینیم به مراتب ارزان‌تر از مس است و از طرفی، آلومینیم به ازای هر واحد جرم، دو برابر مس توانایی انتقال جریان الکتریکی را دارد و ظرفیت گرمایی ویژه دو برابری

در میان انواع دوفلزی‌های فلز/فلز استفاده از دوفلزی آلومینیم/مس به دلیل خواصی همچون قابلیت هدایت حرارتی، الکتریکی و استحکام مناسب فلز مس (در مقایسه با آلومینیم

انجماد<sup>۱</sup> اولیه شده و متعاقباً نرخ جوانه‌زنی افزایش می‌یابد در نتیجه ریز شدن دانه‌ها صورت می‌پذیرد [۱۷]. اندازه فاصله هوایی<sup>۲</sup> بین آلیاژ منجمد شده و دیواره قالب و همچنین میزان مادون انجماد، دو مورد از مهم‌ترین ویژگی‌هایی است که روی ریزساختار تاثیرگذار است و متعاقباً ویژگی‌های ذکر شده تاثیرپذیری بسیار زیادی از فاکتورهای اعمال فشار مانند میزان مدت زمان اعمال فشار دارند [۱۸].

در فرآیند ریخته‌گری کوبشی عوامل مختلف دیگر نظیر کیفیت و کمیت مذاب، قابلیت تجهیزات و ابزار آلات، دمای بارریزی، دمای پیش گرم ابزار، زمان تاخیر قبل از اعمال فشار، ضخامت روانکار، مقدار و مدت زمان اعمال فشار هم روی کیفیت قطعات تولید شده تاثیرگذار است [۱۳، ۱۹]. لذا طراحی مناسب فرایند ریخته‌گری کوبشی با تعداد زیاد متغیر مستلزم استفاده از روش‌های مناسب مبتنی بر علم آمار و ریاضی است. به این منظور استفاده از روش‌های مختلف طراحی آزمایش نظیر تاگوچی که مبتنی بر تحلیل‌های عددی و آنالیزهای رگرسیون و واریانس است بسیار مورد توجه می‌باشد [۱۷-۲۱].

از سوی دیگر، توسعه فناوری پرینت سه‌بعدی امکان ساخت قطعات با ساختارهای مشبک و منظم را فراهم نموده است [۹، ۲۲]. از این رو ساخت دوفلزی‌های فلز/فلز با استفاده از پیش‌ماده فلزی با ساختار شبکه‌ای منظم یا تابعی هم مطرح است. لذا هدف از این پژوهش، ارزیابی فصل مشترک دوفلزی آلومینیم/مس تولید شده به روش ریخته‌گری کوبشی است که پیش‌ماده مس آن به شکل یک ساختار شبکه‌ای سه‌بعدی منظم در ضخامت‌های مختلف ساخته شده است. اثر متغیرهای اصلی فرایند بر مشخصه‌های ریزساختاری فصل مشترک با استفاده از روش‌های عددی مبتنی بر تحلیل‌های واریانس و رگرسیون ارزیابی شده است.

## ۲- مواد و روش تحقیق

### ۲-۱- روند پژوهش

در پژوهش حاضر اثر بخشی متغیرهای ضخامت جداره پیش‌ماده، دمای بارریزی و فشار کوبش بر مشخصه‌های ریزساختار فصل مشترک شامل ضخامت و مورفولوژی سل یوتکتیک و فاز  $\theta$  مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور ساخت پیش‌ماده مسی با ساختار مکعبی مشبک منظم با ضخامت جداره مختلف توسط فرآیند ریخته‌گری مکشی و ساخت دوفلزی نهایی توسط فرآیند ریخته‌گری کوبشی انجام شد. ترتیب انجام آزمون‌ها بر اساس روش طراحی آزمایش طرح مرکب مرکزی آرایه L15 با ۲ بار

نسبت به مس ارائه می‌دهد [۲]. استفاده از این دوفلز در کنار هم می‌تواند به کاهش ۳۰ تا ۴۰ درصدی قیمت تمام‌شده و ۴۰ تا ۶۰ درصدی وزن نسبت به زمانی شود که از فلز مس به تنهایی استفاده شود [۳].

روش‌های متعددی ریخته‌گری، جوشکاری انفجاری، اتصال با نورد و اتصال نفوذی، برای تولید این نوع دوفلزی مورد تحقیق قرار گرفته است [۱-۶]. در سیستم‌های آلیاژی ناهمسان مانند Al-Cu و Al-Fe، تشکیل ترکیبات بین‌فلزی مختلف مبتنی بر سازوکارهای نفوذی غالب است. از آنجا که این فازها اغلب ساختار لایه‌ای دارند، به عنوان لایه‌های بین‌فلزی در فصل مشترک شناخته می‌شوند. ولی در سیستم‌های همسان مانند Al-Al، Fe-Fe و Cu-Cu پیوند عمدتاً تحت تأثیر فرآیندهای نفوذ، ذوب مجدد و تبلور مجدد قرار دارد که منجر به تشکیل محلول‌های جامد در فصل مشترک می‌شود [۷، ۸].

در میان روش‌های ساخت دوفلزی‌ها، استفاده از روش‌های جامد/مایع به دلیل اتصال قوی‌تر در فصل مشترک دوفلز، دارای چسبندگی مناسب‌تری است. لذا روش‌های ریخته‌گری کوبشی [۹] و کامپوند [۲-۴، ۱۰] برای تولید این نوع دوفلزی مورد ارزیابی محقق قرار گرفته است و مشخص شد که برای ارتقاء خواص عملکردی محصول باید ضخامت لایه‌های مختلف در فصل مشترک را با طراحی صحیح متغیرهای اصلی فرایند، تحت کنترل قرار داد. لذا شناخت اثر عوامل مختلف فرایند نظیر دمای ذوب، اتمسفر محافظ محیط، ضخامت لایه اولیه مس، سرعت سرد شدن، فشار کوبش و دمای پیش‌گرم قالب بر ماهیت فصل مشترک مس/آلومینیم بسیار ضروری است [۹-۱۱].

ریخته‌گری کوبشی، موسوم به آهن‌گری فلز، فرآیندی است که فلز مذاب تحت فشار خارجی در یک قالب فلزی منجمد می‌شود [۱۳]. این فرآیند با نام‌هایی همچون پرس‌کاری مایع، کریستالی شدن تحت فشار، ریخته‌گری اکستروژن و شکل‌دهی کوبشی نیز شناخته می‌شود که برای ساخت قطعات کامپوزیتی 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

<sup>2</sup> Air gap

<sup>1</sup> Under cooling

سطحی در دستگاه تمیزکننده فراصوتی انجام شد و سپس پیش‌ماده مسی با ساختار شبکه‌ای سه بعدی در دسیکاتور نگهداری شده است. جزییاتی بیشتر این فرایند در مرجع [۹] ارائه شده است.

### ۲-۳- فرآیند ریخته‌گری کوبشی دوفلزی آلومینیم/مس

به منظور ساخت دوفلزی 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 بوته گرافیتی با ظرفیت یک کیلوگرم استفاده شد. جنس قالب استوانه‌ای از فولاد ابزار گرم‌کار 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 شکل ۳-ب تجهیزات پیش‌گرم قالب نشان داده شده است. روان‌کاری قالب توسط گرافیت کلوئیدی انجام شد. با توجه به اینکه پیش‌ماده مسی به عنوان تقویت‌کننده و آلومینیم خالص به عنوان زمینه است، محصول نهایی دوفلزی آلومینیم/مس است (مطابق با شکل ۳-ج).

### ۲-۴- طراحی آزمایش‌ها

طراحی آزمایش‌ها برای بررسی متغیرهای فرآیند ریخته‌گری کوبشی طبق روش طرح مرکب مرکزی، طرح L15، مطابق با جدول ۱، با سه متغیر و در سه سطح انجام پذیرفت. انتخاب ترتیب انجام آزمون‌های ریخته‌گری به صورت اتفاقی و با حداقل

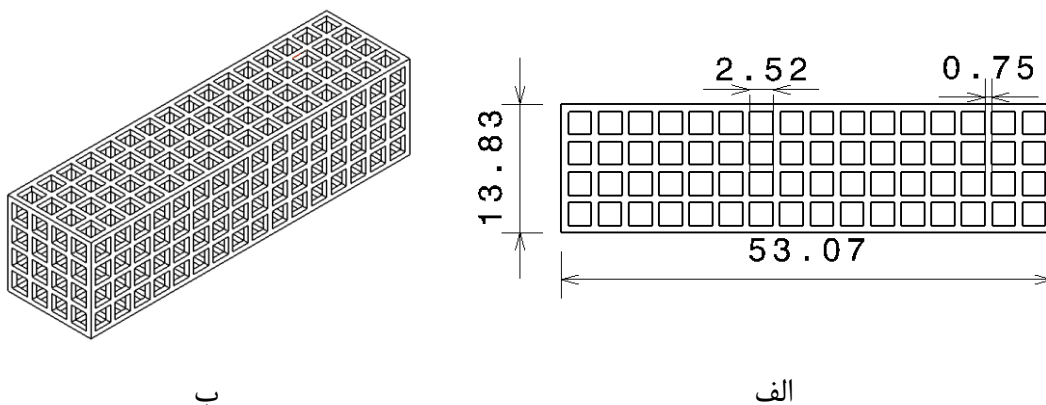
تکرار صورت گرفت و سپس سهم اثربخشی هر یک از متغیرها به صورت جداگانه و اثرات اصلی و متقابل آنها بر مشخصه‌های ریزساختاری فصل مشترک تحلیل شد.

### ۲-۲- فرآیند ساخت پیش‌ماده مسی با ساختار شبکه‌ای

#### سه‌بعدی منظم

برای ساخت مدل پیش‌ماده مسی با ساختار شبکه‌ای سه‌بعدی منظم از دستگاه پرینتر سه‌بعدی به روش SLA<sup>۱</sup> با دقت ابعادی ۰/۰۱ 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). به این منظور مدل شبکه‌ای مکعبی با سه ضخامت دیواره ۰/۷۵، ۱ و ۱/۲۵ میلی‌متر با فاصله بین شبکه‌ها ۲/۵۲ میلی‌متر ساخته شد (منظور از ضخامت پیش‌ماده طول و عرض دیواره مدل سه بعدی است، مطابق با شکل ۱). در ادامه مدل به راهگاه و راهبار مومی مونتاژ شده است. قالبگیری با گچ انجام شد که برای حذف حباب‌های هوا، تحت خلا قرار گرفت. برای حذف مدل مومی از داخل قالب گچی، حرارت‌دهی در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد.

عملیات ذوب مس خالص تجاری با خلوص ۹۹/۹۰٪ در کوره المنتی تحت خلا با قابلیت دمش گاز آرگون انجام شد. قالب پیش‌گرم شده در محفظه بسته شده تحت خلا در زیر بوته نصب شد که در آن، مذاب از طریق یک خروجی زیر بوته وارد قالب می‌شود. جریان مذاب برای ورود به قالب تحت تاثیر فشار ثقل مذاب و همچنین تحت مکش ناشی از خلا‌ای است که در محفظه قالب ایجاد شده است. بنابراین عملیات بارریزی با حداقل فوق ذوب در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و تحت خلا ۱۰<sup>-۱</sup> بار انجام شد (شکل ۲-الف). پس از خروج شبکه مسی از قالب گچی، عملیات تمیزکاری نهایی آن به منظور حذف اکسیدهای



ب

الف

شکل ۱- نقشه سه بعدی مدل پیش‌ماده با ساختار شبکه‌ای ساده.

<sup>1</sup> Stereolithography



ب

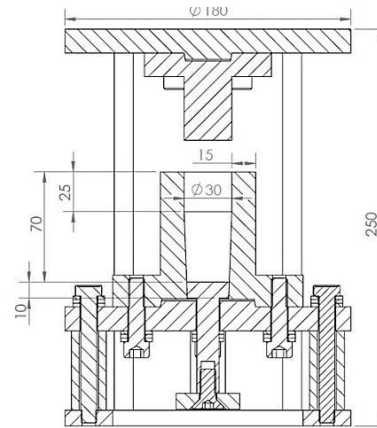


الف

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



ب



الف



ج

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

#### ۲-۵- بررسی ریزساختاری

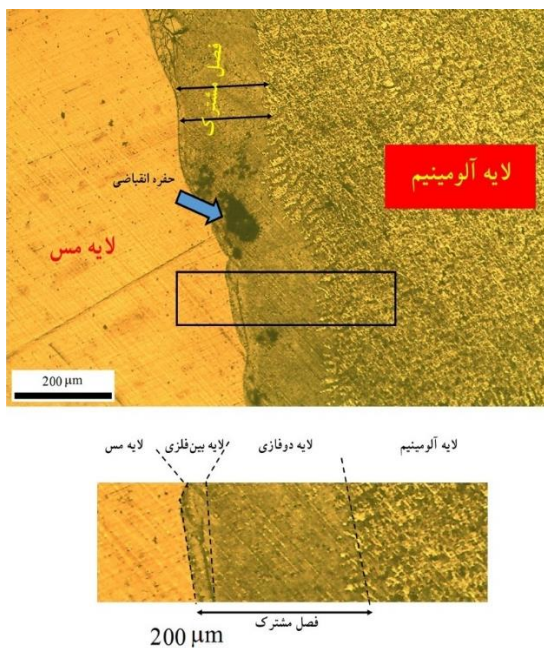
تصاویر ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری MDS مدل 120A-NJF با بزرگنمایی‌های مختلف و میکروسکوپ الکترونی روبشی Philips مدل XL30 مجهز به دستگاه آنالیز عنصری EDS به صورت‌های نقطه‌ای، خطی و سطحی یا MAP صورت گرفت. همچنین نمونه‌گیری از فاصله ۲۰ میلی‌متری سطح انجام شده است. متالوگرافی تمامی نمونه‌ها بعد از آماده‌سازی و پولیش توسط محلول Kellers با ترکیب ( 3ml

دوبار تکرار انجام شد. تحلیل‌های عددی داده‌های آزمایش (تعیین اثر اصلی متغیرها در سطوح مختلف) و رسم نمودارهای مرتبط با استفاده از برنامه‌های Minitab، Design Expert و DOE Pro انجام شده است. به منظور تحلیل داده‌ها از آنالیزهای رگرسیون، واریانس و نمودارهای اثرات اصلی و متقابل متغیرها از Contour Plot و Scatter Plot استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی ریزساختار فصل مشترک

شکل ۴، تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار فصل مشترک دوفلزی نمونه R331 را به صورت موردی نشان داده است. مشاهده می‌شود که فصل مشترک این دوفلزی از دو لایه میانی در دو طرف لایه‌های آلومینیم و مس تشکیل شده است. مشخصه‌یابی متالورژیکی این فصل مشترک در مقاله‌ای دیگر از نویسندگان در مرجع شماره [۹] منتشر شده است. هدف این مقاله تحلیل‌های عددی تغییرات ابعاد این لایه‌ها در فصل مشترک بر حسب عوامل فرایندی است. با این وجود، جزییاتی از این مشخصه‌یابی برای تحلیل عددی ارائه می‌شود.



شکل ۴- تصویر میکروسکوپ نوری از فصل مشترک دوفلزی در نمونه ABC133

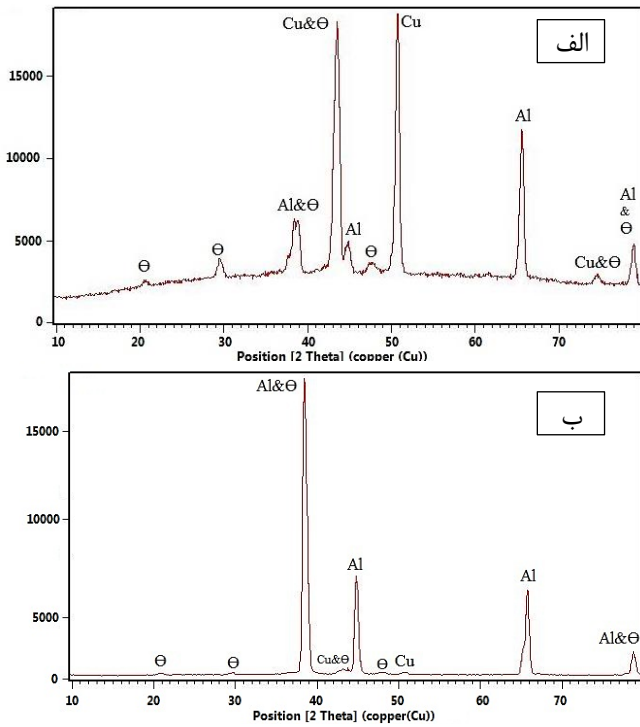
شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار به همراه آنالیزهای عنصری خطی و سطحی، MAP، مربوط به فصل مشترک دوفلزی چند نمونه را به صورت موردی نشان داده است. مشاهده می‌شود که دو لایه میانی شامل لایه تک فاز بین فلزی  $\Theta$  ( $Al_2Cu$ ) و لایه دوفلزی با ساختار انجمادی یوتکتیک  $\Theta + \alpha$  در دو طرف لایه‌های آلومینیم و مس است. نتایج آنالیز XRD از نمونه‌های ABC223 و ABC331 در شکل ۷ نشان می‌دهد که ترکیبات بین فلزی دیگر نظیر  $Al_4Cu_9$ ،  $AlCu$  و  $Al_2Cu_3$  که در مرجع [۲] اشاره شده، تشکیل نشده است. ایجاد چنین لایه‌هایی به نفوذ اتمی عناصر در حالت جامد و در نتیجه به زمان و دمای کافی نیاز دارد که این شرایط برای موارد مطالعه در این تحقیق فراهم نیست. به عبارت دیگر، تشکیل این فازها

HCl, 2ml HF, 90 ml H<sub>2</sub>O, 5ml HNO<sub>3</sub> صورت گرفت. بررسی ریزساختار شامل بررسی نوع و اندازه‌گیری ضخامت لایه‌های فصل مشترک در ۲۰ تصویر از گوشه تا مرکز نمونه توسط نرم‌افزار تحلیل تصاویر ریزساختاری MIP4 صورت گرفت. به منظور شناسایی فاز از آزمون پراش پرتو ایکس (XRD) شرکت Philips مدل PW1730 استفاده شد. آزمون پراش اشعه ایکس در حالت نرمال و از زاویه ۱۰ تا ۸۰ درجه صورت گرفت. ولتاژ ثانویه، جریان اولیه و طول موج اشعه ایکس استفاده شده برابر با ۴۰ KV، ۳۰ mA، ۱/۵۴۰۶ آنگستروم بوده است. همچنین اندازه گام و زمان توقف برابر با ۰/۰۵ درجه و ۱ ثانیه بوده است.

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

ترتیب	کد ABC*	دمای بارریزی، A، (°C)	فشار کوبش، B، (MPa)	ضخامت جداره پیش‌ماده، C (mm)
1	ABC 111	۷۲۰	۵۰	۰/۷۵
2	ABC 113	۷۲۰	۵۰	۱/۲۵
3	ABC 131	۷۲۰	۱۰۰	۰/۷۵
4	ABC 133	۷۲۰	۱۰۰	۱/۲۵
5	ABC 311	۷۶۰	۵۰	۰/۷۵
6	ABC 313	۷۶۰	۵۰	۱/۲۵
7	ABC 331	۷۶۰	۱۰۰	۰/۷۵
8	ABC 333	۷۶۰	۱۰۰	۱/۲۵
9	ABC 222	۷۴۰	۷۵	۱
10	ABC 122	۷۲۰	۷۵	۱
11	ABC 322	۷۶۰	۷۵	۱
12	ABC 212	۷۴۰	۵۰	۱
13	ABC 232	۷۴۰	۱۰۰	۱
14	ABC 221	۷۴۰	۷۵	۰/۷۵
15	ABC 223	۷۴۰	۷۵	۱/۲۵

\* اعداد ۱، ۲ و ۳ در کد ABC، نشان‌دهنده مقدار سطوح هر یک از متغیرها در هر مورد از آزمایش است.



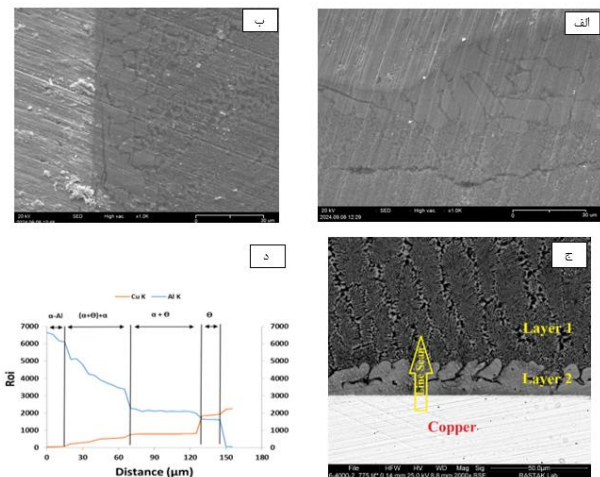
شکل ۷- نتایج آزمون پراش اشعه X از نمونه‌های: الف- ABC331 و ب- ABC223

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

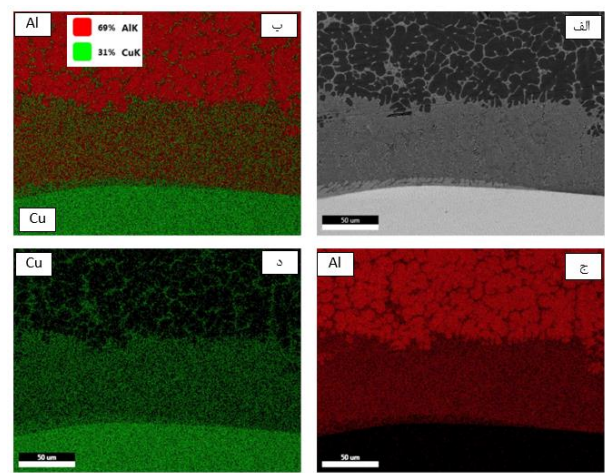
در جدول ۲، نتایج ارزیابی مشخصه‌های ریزساختار به صورت اندازه ضخامت‌های لایه سل یوتکتیک، لایه فاز بین‌فلزی  $\Theta$  و لایه فصل مشترک (مجموع دو لایه) در شرایط مختلف آزمایشی نشان داده شده است. همچنین در جدول‌های ۳ تا ۵ نتایج آنالیز واریانس، ANOVA، مربوط به این دو پاسخ به همراه درصد مشارکت هر یک از متغیرها نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، متغیر ضخامت پیش‌ماده برای هر سه پاسخ، مهم‌ترین عامل تاثیرگذار است و تقریباً به میزان بیش از ۷۵ درصد اثربخشی دارد. مطابق جدول ۳، متغیر فشار کوبش در رتبه دوم و متغیر دمای بارریزی در رتبه سوم اثرگذاری بر ضخامت سل یوتکتیک قرار دارد. در مقابل، مطابق جدول ۴، متغیر دمای بارریزی در رتبه دوم و متغیر فشار کوبش در رتبه سوم اثرگذاری بر ضخامت فاز  $\Theta$  را دارند. به این ترتیب مطابق جدول ۵، برای پاسخ ضخامت فصل مشترک، سهم هر دو متغیر فشار کوبش و دمای بارریزی تقریباً به میزان مساوی به دست آمده است.

بر اساس آنالیز واریانس، سهم اثرات متقابل متغیرها نسبت به یکدیگر به صورت درصد مشارکت با نمادهای AB، AC و BC در جداول ۳ تا ۵ محاسبه شده است. مشخص است که سهم اثرات متقابل نسبت به سهم اثرات اصلی عوامل بر تغییرات ضخامت

نسبت به لایه بین‌فلزی  $\Theta$  که از مذاب جوانه زده و رشد می‌کند، دشوارتر است [۸]. در پژوهش حاضر به دلیل اعمال فشار کوبش و استفاده از قالب فلزی (در کنار استفاده از شبکه مسی)، زمان نفوذ 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 [۶، ۹]. در تحقیق کیم و همکاران [۵] به موضوع عملیات حرارتی سه‌فلزی Cu/Al/Cu اشاره شد که می‌توان با عملیات حرارتی و تغییر فازهای موجود در فصل مشترک، استحکام خمشی آن را تغییر دهد.



شکل ۵- تصاویر SEM از فصل مشترک دوفلزی آلومینیم/مس در: الف- نمونه ABC222 ب- نمونه ABC223 ج- نمونه ABC331 د- شدت نسبی تغییرات غلظت عنصری آلومینیم و مس در فصل مشترک نمونه ABC331 به دست آمده از آنالیز خطی EDS.



شکل ۶- الف- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فصل مشترک نمونه ABC331 و نقشه توزیع سطحی عناصر، MAP، در آن: ب- آنالیز عنصری آلومینیم و مس با یکدیگر، ج) آنالیز عنصری آلومینیم د) آنالیز عنصری مس.

لایه های فصل مشترک ناچیز است. در مورد ضخامت سل یوتکتیک مشاهده می‌شود که دو اثر متقابل AC (دمای بارریزی و ضخامت پیش‌ماده) و AB (دمای بارریزی و فشار کوبش) به ترتیب به میزان ۳/۹۹ و ۲/۷۹ درصد سهم دارند. بیشترین اثر متقابل مربوط به متغیر AC (یعنی اثر متقابل دمای بارریزی و

ضخامت جداره پیش‌ماده) است. یعنی می‌توان انتظار داشت که شدت اثر افزایش دمای بارریزی با افزایش ضخامت جداره پیش‌ماده تغییر کند و برعکس. این اثر را در ادامه در بخش بعد با نمودارهای اثر مقابل و نمودارهای محیطی به صورت تصویری نشان داده و تحلیل می‌شود.

جدول ۲- نتایج ارزیابی مشخصه‌های ریزساختاری نمونه‌ها در شرایط مختلف آزمایشی.

متغیر وابسته یا پاسخ (مشخصه فصل مشترک)			متغیر مستقل فرایند			کد ABC	ردیف
متوسط ضخامت فصل مشترک (μm)	متوسط ضخامت لایه ترکیب بین‌فلزی Θ (μm)	متوسط ضخامت لایه دوفازی Alpha+Θ (μm)	ضخامت جداره پیش‌ماده، C (mm)	فشار کوبش، B (MPa)	دمای بارریزی، A، C		
216	29	187	0.75	50	720	ABC 111	1
108	9	99	1.25	50	720	ABC 113	2
177	27	150	0.75	100	720	ABC 131	3
59	9	50	1.25	100	720	ABC 133	4
241	37	204	0.75	50	760	ABC 311	5
143	16	127	1.25	50	760	ABC 313	6
215	38	177	0.75	100	760	ABC 331	7
107	18	89	1.25	100	760	ABC 333	8
164	21	143	1	75	740	ABC 222	9
147	17	130	1	75	720	ABC 122	10
174	28	146	1	75	760	ABC 322	11
160	25	135	1	50	740	ABC 212	12
151	19	132	1	100	740	ABC 232	13
190	30	160	0.75	75	740	ABC 221	14
131	15	116	1.25	75	740	ABC 223	15

جدول ۳- آنالیز واریانس، ANOVA، برای ارزیابی ضخامت لایه سل یوتکتیک.

Source	SS	df	MS	F	P	% Contrib
A-Pouring Temperature (°C), T	4855.6	2	2427.8	98.410	0.000	7.55%
B-Squeeze Preassure (MPa), P	7235.9	2	3618.0	146.652	0.000	11.26%
C-Preform Thickness (mm), t	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				

جدول ۴- آنالیز واریانس، ANOVA، برای ارزیابی ضخامت لایه بین‌فلزی فاز  $\Theta$ .

Source	SS	df	MS	F	P	% Contrib
A-Pouring Temperature ( $^{\circ}$ C), T	641.2	2	320.6	118.844	0.000	18.59%
B-Squeeze Pressure (MPa), P	7.8240	2	3.9120	1.450	0.261	0.23%
C-Preform Thickness (mm), t	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 واریانس، ANOVA، برای ارزیابی ضخامت لایه فصل مشترک.

Source	SS	df	MS	F	P	% Contrib
A-Pouring Temperature ( $^{\circ}$ C), T	8981.2	2	4490.6	176.059	0.000	9.57%
B-Squeeze Pressure (MPa), P	7693.2	2	3846.6	150.810	0.000	8.20%
C-Preform Thickness (mm), t	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				

جداره، اندازه همه لایه‌های فصل مشترک به شدت کاهش می‌یابد.

- با مقایسه شیب تغییرات در نمودارهای اثر اصلی، مشاهده می‌شود که در محدوده‌های مورد بررسی، ضخامت جداره بیشترین تاثیر را بر مشخصه‌های ریزساختاری فصل مشترک دارد. سپس دمای بارریزی و بعد از آن میزان فشار کوبش می‌تواند از اهمیت بیشتر برخوردار باشد. این نتیجه‌گیری از تحلیل واریانس داده‌ها هم به صورت دقیق مشخص شده بود.
- با افزایش دمای بارریزی از ۷۲۰ به ۷۶۰ درجه سانتیگراد، ضخامت‌های فصل مشترک، سل یوتکتیک و فاز  $\Theta$  به ترتیب ۲۴٪/۴۷، ۲۰٪/۶۲ و ۵۰٪/۵۴ افزایش یافته است.
- با افزایش فشار کوبش از ۵۰ و ۱۰۰ MPa، ضخامت‌های فصل مشترک، سل یوتکتیک و فاز  $\Theta$  به ترتیب ۱۸٪/۳۲، ۲۰٪/۴۸ و ۴٪/۳۱ کاهش یافته است.
- با افزایش ضخامت پیش‌ماده از مقدار ۰/۷۵ به ۱/۲۵ میلی‌متر، ضخامت‌های فصل مشترک، سل یوتکتیک و فاز  $\Theta$  به ترتیب به میزان ۴۷٪/۲۶، ۴۵٪/۲۱ و ۵۸٪/۳۸ کاهش یافته است.

### ۳-۳- بررسی اثرات اصلی متغیرهای ریخته‌گری

بر اساس داده‌های اولیه در جدول ۲، میانگین داده‌ها برای هر متغیر در هر سطح مشخص و در جدول ۶ نشان داده شده است. بر اساس این داده‌ها، مطابق با شکل ۷، نمودارهای اثرات اصلی متغیرها بر ضخامت‌های لایه‌های سل یوتکتیک، فاز  $\Theta$  و فصل مشترک رسم شد. از مقایسه نمودارهای اثرات اصلی مشاهده می‌شود که:

- اثر افزایش دمای بارریزی بر همه ضخامت‌های فصل مشترک، کاملاً افزایشی است. یعنی با افزایش دما، اندازه همه لایه‌های فصل مشترک بزرگ‌تر می‌شوند و نقطه حداکثر یا حداقل در محدوده مورد بررسی قرار ندارد.
- اثر افزایش فشار کوبش بر همه مشخصه‌های فصل مشترک، کاملاً کاهش‌ی است. یعنی با افزایش فشار کوبش، اندازه همه لایه‌های فصل مشترک کوچک‌تر می‌شوند. البته مطابق شکل ۷-ب، نمودار آبی، اثر تغییرات فشار کوبش بر تغییرات ضخامت لایه بین‌فلزی  $\Theta$  را می‌توان ناچیز فرض کرد.
- اثر افزایش ضخامت جداره پیش‌ماده بر همه مشخصه‌های فصل مشترک، کاملاً کاهش‌ی است. یعنی با افزایش ضخامت

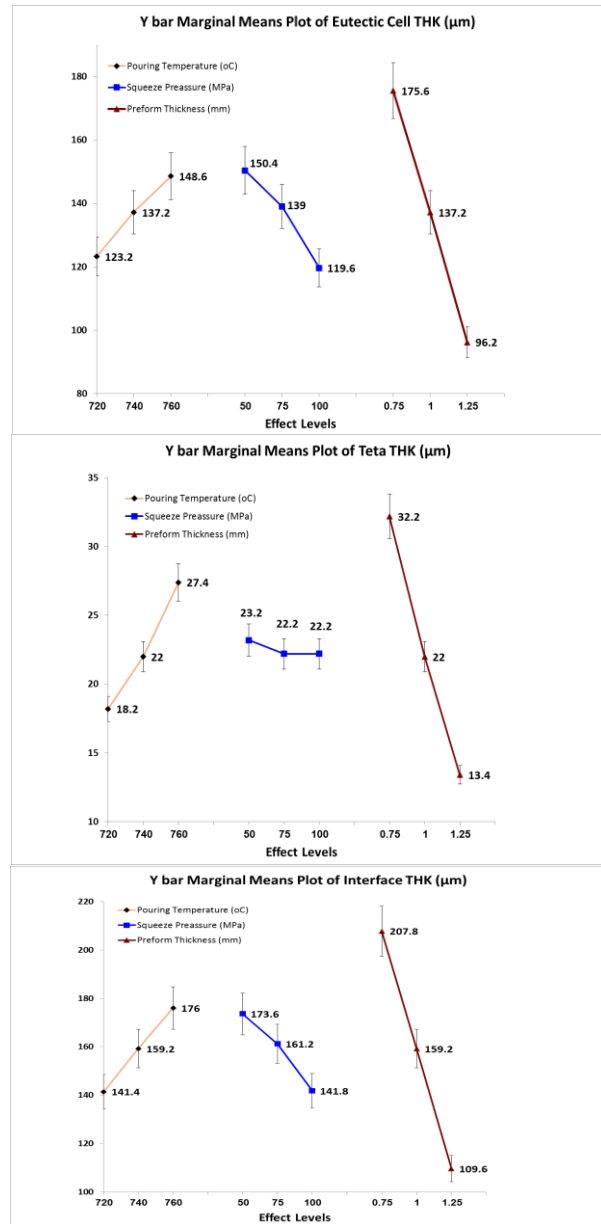
جدول ۶- بررسی اثرات اصلی متغیرها بر مشخصه‌های ریزساختاری.

متغیر	سطح	مقدار	میانگین ضخامت فصل مشترک (میکرومتر)	میانگین ضخامت لایه دوفازی با سل یوتکتیک (میکرومتر)	میانگین ضخامت لایه فاز $\Theta$ (میکرومتر)
دمای بارریزی (°C) A	۱	۷۲۰	۱۴۱/۴	۱۲۳/۲	۱۸/۲
	۲	۷۴۰	۱۵۹/۲	۱۳۷/۲	۲۲
	۳	۷۶۰	۱۷۶	۱۴۸/۶	۲۷/۴
فشار کوبش (MPa) B	۱	۵۰	۱۷۳/۶	۱۵۰/۴	۲۳/۲
	۲	۷۵	۱۶۱/۲	۱۳۹	۲۲/۲
	۳	۱۰۰	۱۴۱/۸	۱۱۹/۶	۲۲/۲
ضخامت پیش‌ماده C (mm)	۱	۰/۷۵	۲۰۷/۸	۱۷۵/۶	۳۲/۲
	۲	۱	۱۵۹/۲	۱۳۷/۲	۲۲
	۳	۱/۲۵	۱۰۹/۶	۹۶/۲	۱۳/۴

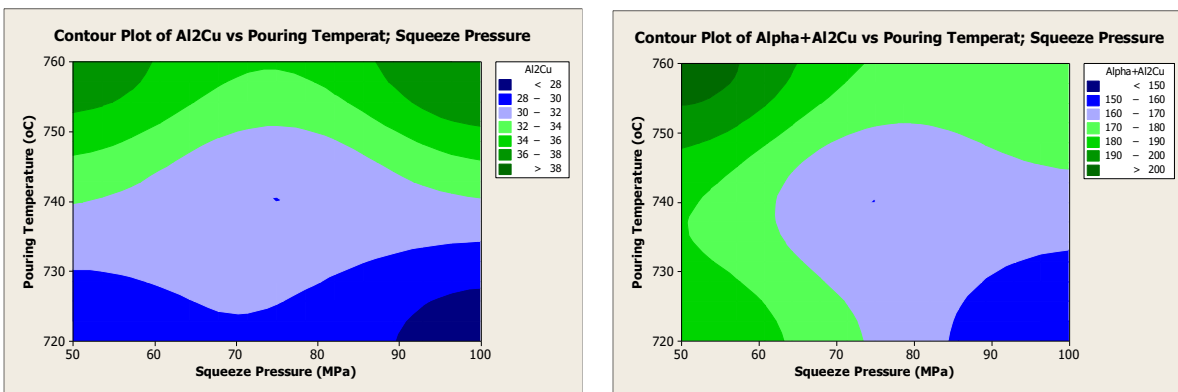
۳-۳- بررسی اثرات متقابل متغیرهای ریخته‌گری

الف- نمودارهای تفکیک محیطی

شکل‌های ۹ الی ۱۱، نمودارهای تفکیک محیطی اثرات متقابل فشارکوبش و دمای بارریزی بر ضخامت‌های لایه‌های فصل مشترک را که ضخامت جداره پیش‌ماده ثابت و به ترتیب برابر ۰/۷۵، ۱ و ۱/۲۵ میلی‌متر، نشان می‌دهد. این نمودارها بر اساس داده‌های آنالیز رگرسیون و با کمک نرم‌افزار Design Expert به دست آمده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، پایین‌ترین ضخامت سل یوتکتیک در شرایط فشار حداکثری و دمای حداقلی حاصل شد. بررسی تغییرات در ضخامت پیش‌ماده ۰/۷۵ میلیمتر مطابق شکل ۹-ب نشان می‌دهد که پایین‌ترین ضخامت فاز  $\Theta$  در محدوده دمایی ۷۲۰ درجه سانتیگراد و فشار ۱۰۰ MPa قابل دستیابی است. با این حال وابستگی به دما در این ضخامت بیش از فشار است زیرا که متغیر فشارکوبش تأثیر به‌سزایی در تعیین میانگین داده نخواهد داشت و دمای بارریزی در هر سطح مشخصی موجب دستیابی به محدوده‌ای از ضخامت  $\Theta$  می‌گردد. با افزایش ضخامت پیش‌ماده در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ 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 تأثیر 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  $\Theta$  به حداقل فشار ۷۵ MPa است. در این ضخامت پیش‌ماده نیز متغیر دمای بارریزی روند کلی نمودار را تعیین می‌نماید. در ضخامت ۱/۲۵ میلیمتر مطابق شکل ۱۱-ب نیز عدم وابستگی محسوس به فشارکوبش را در کلیه شرایط می‌توان مشاهده نمود.



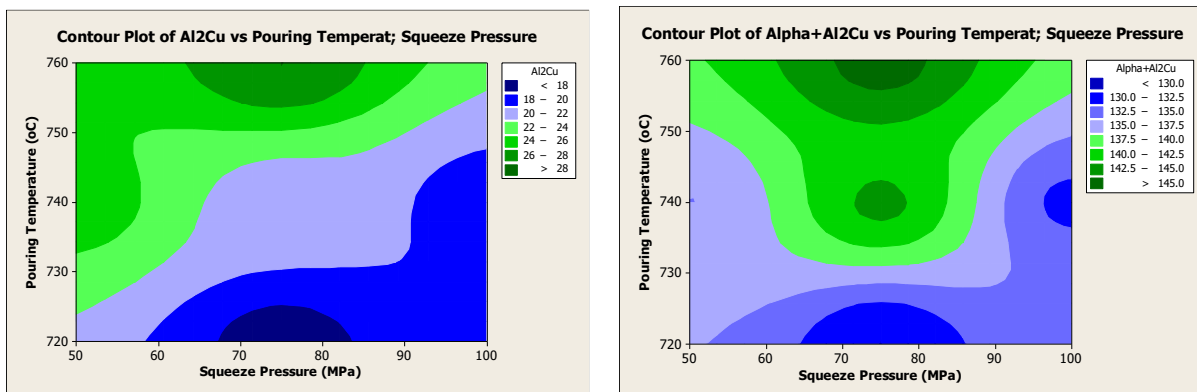
شکل ۸- نمودارهای اثرات اصلی سه متغیر مورد مطالعه بر تغییرات ضخامت لایه‌های: الف) دوفازی با سل یوتکتیک (ب) تک فاز  $\Theta$  و ج) فصل مشترک.



ب

الف

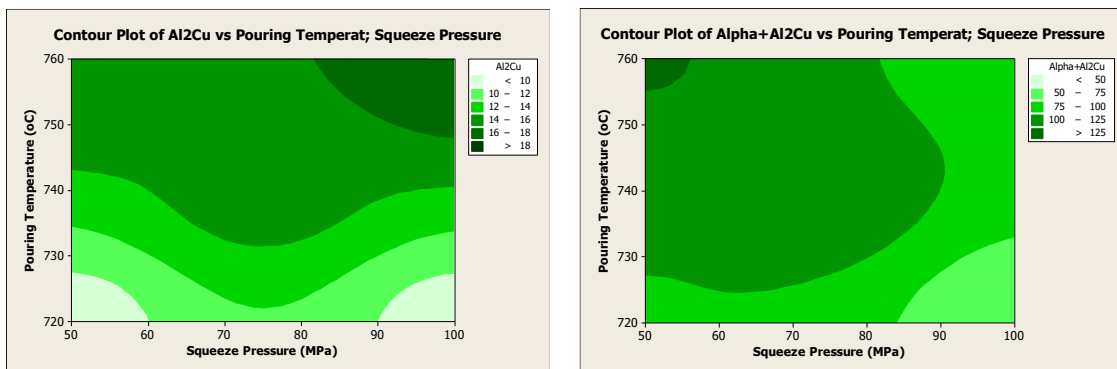
شکل ۹- نمودار تفکیک محیطی اثرات متقابل فشارکوبش و دمای بارریزی در ضخامت پیش‌ماده ۰/۷۵ میلی‌متر بر: الف) ضخامت لایه دوفلزی با سل یوتکتیک و ب) ضخامت لایه تک فاز  $\Theta$ .



ب

الف

شکل ۱۰- نمودار تفکیک محیطی اثرات فشارکوبش و دمای بارریزی در ضخامت پیش‌ماده ۱ میلی‌متر بر: الف) ضخامت لایه دوفلزی با سل یوتکتیک و ب) ضخامت لایه تک فاز  $\Theta$ .



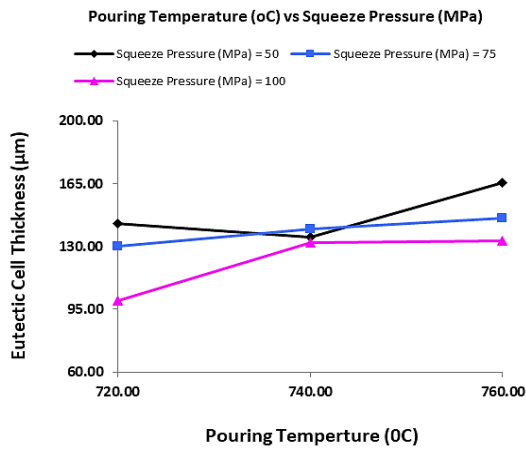
ب

الف

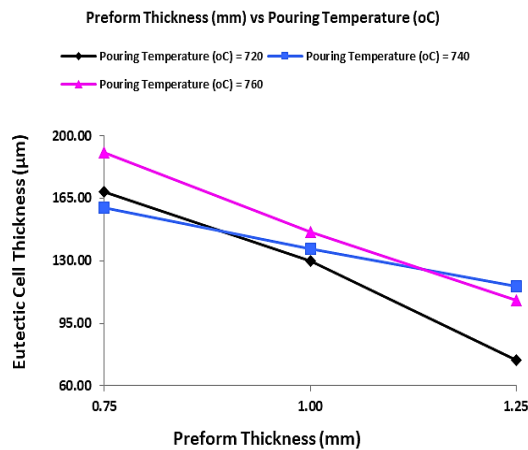
شکل ۱۱- نمودار تفکیک محیطی اثرات فشارکوبش و دمای بارریزی در ضخامت پیش‌ماده ۱/۲۵ میلی‌متر بر: الف) ضخامت لایه دوفلزی با سل یوتکتیک و ب) ضخامت لایه تک فاز  $\Theta$ .

مطابق با شکل ۱۲-الف، بررسی اثر متقابل دمای بارریزی و فشار کوبش (عامل AB) نشان می‌دهد که در فشار کوبش ثابت ۷۴۰ MPa، اثرگذاری دمای بارریزی بر ضخامت سل یوتکتیک تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد است ولی در فشار کوبش ثابت ۵۰ MPa اثرگذاری محسوس در محدوده ۷۴۰ تا ۷۶۰ درجه سانتی‌گراد است. این مسئله به این دلیل است که فشار کوبش ۱۰۰ MPa موجب کاهش اثر افزایش دمای بارریزی در افزایش ضخامت سل

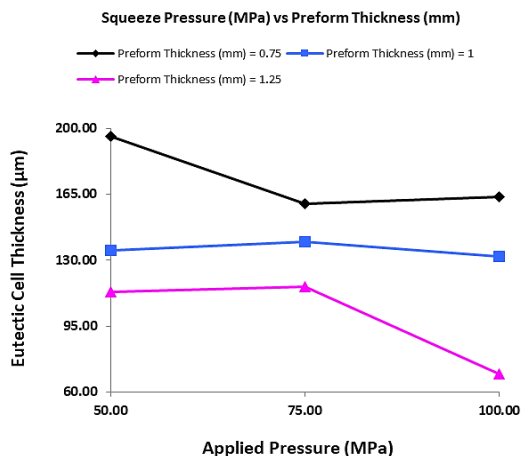
ب- نمودارهای خطی اثرات متقابل شکل‌های ۱۲ الی ۱۴، نمودارهای خطی اثرات متقابل دمای بارریزی، عامل A، فشارکوبش، عامل B، و ضخامت پیش‌ماده، عامل C، بر ضخامت‌های لایه دوتایی با سل یوتکتیک، لایه تک فاز  $\Theta$  و لایه فصل مشترک (مجموع دو لایه) را نشان می‌دهد که با استفاده از نرم‌افزار DOE Pro استخراج شده است.



الف



ب



ج

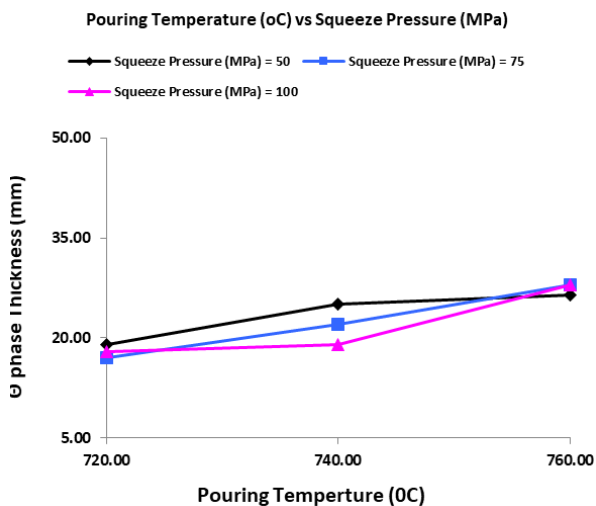
شکل ۱۲- نمودارهای اثر متقابل متغیرهای ریخته‌گری بر ضخامت سل یوتکتیک: الف: عامل AB، ب: عامل AC و ج: عامل BC.

در حقیقت در همه ضخامت‌های جداره پیش‌ماده‌ها، اثرگذاری 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

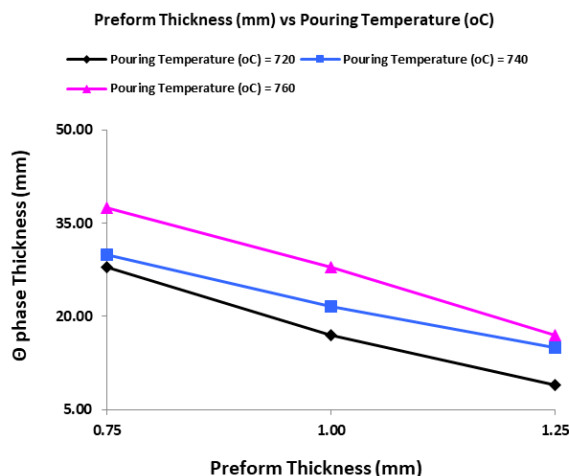
یوتکتیک می‌گردد. زیرا ارتباط بین ضخامت لایه نفوذ و زمان نفوذ از یک رابطه پارابولیک تبعیت می‌کند یعنی زمانی که توان تبریدی قالب با افزایش فشار و ضخامت پیش‌ماده از سطح مشخصی عبور می‌کند، رفتار پارابولیک نمودار با افزایش دمای بارریزی قابل رویت است [۲]. این مسئله به این دلیل است که با افزایش دمای بارریزی از سطح ۷۴۰ به ۷۶۰ درجه سانتیگراد تشکیل محلول جامد فاز آلفا افزایش یافته و اتم‌های 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 است. در فشار ثابت ۷۵ 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 ۷۵ MPa و ۱۰۰ MPa تا حد زیادی اثر دمای بارریزی حداکثری در افزایش ضخامت سل یوتکتیک را خنثی می‌نماید ولی در سطح ۵۰ MPa این اثرگذاری محدود است. مهم‌ترین عامل افزایش ضخامت سل یوتکتیک با افزایش دمای بارریزی مربوط به افزایش دو متغیر نفوذپذیری و زمان نفوذ است [۶]. سازوکار تشکیل این لایه شامل انحلال مس در 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 [۲۳]. چنین رفتاری را در شکل ۱۲-الف و ۱۳-الف، می‌توان مشاهده نمود.

مطابق با شکل ۱۲-ب، بررسی اثر متقابل دمای بارریزی و ضخامت پیش‌ماده (عامل AC) نشان می‌دهد که شیب نمودار تغییر ضخامت سل یوتکتیک با افزایش ضخامت پیش‌ماده در هر سه دمای بارریزی کاهش یافته است. نرخ کاهش برای دمای بارریزی ۷۲۰ درجه سانتی‌گراد در محدوده ضخامت ۱ تا ۱/۲۵ میلی‌متر به نسبت محدوده ۰/۷۵ تا ۱ میلی‌متر شدیدتر است که این مسئله می‌تواند به دلیل غالب شدن اثر تبریدی پیش‌ماده مسی (در ضخامت ۱ میلی‌متر به بالا) بر دمای بارریزی باشد. با افزایش ضخامت پیش‌ماده در دمای بارریزی ۷۶۰ درجه سانتی‌گراد، ضخامت سل یوتکتیک با یک شیب تقریباً ثابت کاهش می‌یابد. مطابق با شکل ۱۲-ج، بررسی اثر متقابل فشار کوبش و ضخامت پیش‌ماده (عامل BC) نشان می‌دهد که اثر فشار کوبش در کاهش ضخامت سل یوتکتیک برای ضخامت ۰/۷۵ میلی‌متر در محدوده ۵۰ تا ۷۵ مگاپاسکال و برای ضخامت ۱/۲۵ میلی‌متر در محدوده ۷۵ تا ۱۰۰ مگاپاسکال غالب است.

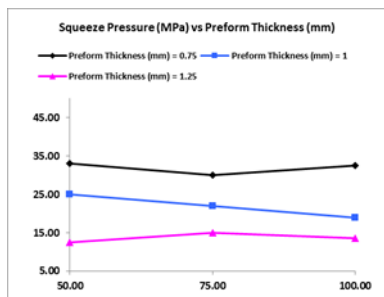
ماده ۰/۷۵ میلی متر در محدوده فشار کوبش ۵۰ تا ۷۵ مگاپاسکال است. در حقیقت برای دستیابی به حداقل ضخامت فصل مشترک، در ضخامت پیش ماده ۱/۲۵ میلی متر به حداقل فشار ۱۰۰ مگاپاسکال و برای ضخامت پیش ماده ۰/۷۵ میلی متر به حداقل فشار ۷۵ مگاپاسکال نیاز است.



الف



ب



ج

شکل ۱۳- نمودارهای اثرات متقابل متغیرهای ریخته‌گری بر ضخامت فاز  $\Theta$ : الف: عامل AB، ب: عامل AC و ج: عامل BC.

مس به داخل مذاب آلومینیم می‌گردد (کاهش زمان در دسترس برای نفوذ)، ثانیاً تغییر در دیگرام 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 [۲۴]. 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 [۴]. به طور کلی لایه یوتکتیک به دلیل اینکه در رنج وسیعی از درصد وزنی مس شامل از ۵/۶۵٪ تا ۵۲/۵۰٪ احتمال تشکیل دارد، نسبت به بقیه لایه‌ها ضخیم‌تر است [۲۵].

مطابق با شکل ۱۳-الف، بررسی اثر متقابل دمای بارریزی و فشار کوبش (عامل AB) بر ضخامت فاز  $\Theta$  نشان‌دهنده افزایش ضخامت فاز  $\Theta$  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 ۱۳-ب، بررسی اثر متقابل دمای بارریزی و ضخامت پیش‌ماده (عامل AC) نشان می‌دهد که در کلیه دماهای بارریزی با افزایش ضخامت پیش‌ماده، ضخامت فاز  $\Theta$  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 ۱۳-ج، بررسی اثر متقابل فشار کوبش و ضخامت پیش‌ماده (عامل BC) نشان‌دهنده عدم تاثیر محسوس متغیر فشار کوبش بر ضخامت فاز  $\Theta$  در کلیه ضخامت‌های پیش‌ماده است.

مطابق با شکل ۱۴-الف، بررسی اثر متقابل دمای بارریزی و فشار کوبش بر ضخامت فصل مشترک، نشان‌دهنده روند کاهشی ضخامت فصل مشترک در دماهای بارریزی مختلف و با تغییر فشار کوبش است. مطابق با شکل ۱۴-ب، بررسی اثر متقابل ضخامت پیش‌ماده و دمای بارریزی نشان می‌دهد که در کلیه دماهای بارریزی با افزایش ضخامت پیش‌ماده، ضخامت فصل مشترک کاهش می‌یابد. میانگین داده مطابق انتظار برای دمای بارریزی ۷۲۰ درجه سانتی‌گراد کمتر از دمای ۷۴۰ و ۷۶۰ درجه سانتی‌گراد است. مطابق با شکل ۱۴-ج، بررسی اثر متقابل فشار کوبش و ضخامت پیش‌ماده نشان‌دهنده افزایش شدید روند کاهشی شیب نمودار برای ضخامت پیش‌ماده ۱/۲۵ میلی‌متر در محدوده فشار کوبش ۷۵ تا ۱۰۰ مگاپاسکال و برای ضخامت پیش

### • اثر دمای بارریزی

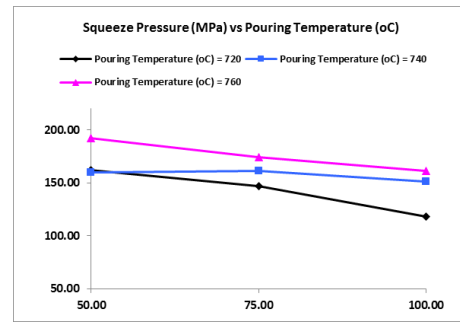
مطابق شکل ۱۵، با توجه به دمای انتخاب شده برای بارریزی که بین ۷۲۰ تا ۷۶۰ درجه سانتیگراد بوده است، تشکیل ترکیب بین‌فلزی  $\Theta$  با رابطه  $\text{CuAl}_2$  و واکنش یوتکتیک  $\alpha + \Theta$  قابل پیش‌بینی است. تشکیل ترکیب بین‌فلزی  $\Theta$  در دمای ۵۸۳ درجه سانتیگراد و غلظت اسمی ۳۲ درصد اتمی (۵۵ درصد وزنی) مس انجام می‌شود. همچنین استحاله یوتکتیکی در دمای ۵۴۸ درجه سانتیگراد و در غلظت اسمی ۱۷ درصد اتمی (۳۳ درصد وزنی) مس رخ می‌دهد. این مقایسه نشان می‌دهد که در مرحله اول، تشکیل ترکیب بین‌فلزی  $\Theta$  که نقطه ذوب و غلظت بالاتری از مس دارد، فراهم است. افزایش دمای بارریزی این امکان را فراهم می‌کند تا حرارت بیشتری به پیش‌ماده وارد شده، ذوب سطحی بیشتری رخ دهد و در نتیجه فاز  $\Theta$  و همچنین ضخامت لایه یوتکتیکی بیشتر تشکیل شود.

### • اثر فشار کوبش

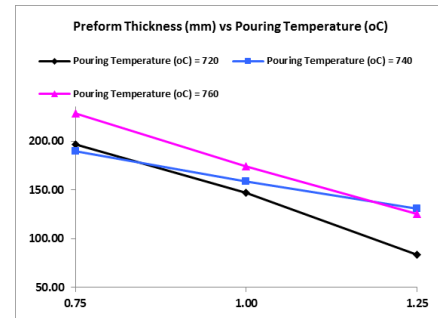
اعمال فشار به مذاب بعد از بارریزی، این فرصت را فراهم می‌کند که شبکه‌های نازک پیش‌ماده از قالب پر شود و اتصال بین پیش‌ماده و فلز مذاب بیشتر شود. بنابراین مزیت اصلی روش ریخته‌گری کوبشی برای تولید این نوع دوفلزی‌ها با ساختار شبکه‌ای نازک، پر شدن مناسب قالب و کاهش ریزمک‌های انقباضی همراه با ریزساختار ظریف است که خواص مکانیکی زمینه را می‌تواند نسبت به روش‌های ریخته‌گری ثقلی بهبود دهد [۹، ۲۸، ۲۹].

سرعت انجماد مذاب به مقدار فشار کوبش هم مرتبط است [۱۳، ۲۸-۳۱]، اما از آنجا که فضای موجود در ساختار شبکه‌ای پیش‌ماده مسی بسیار کوچک و سرعت انجماد بسیار زیاد است، عملاً فشار کوبش در پرشدن مذاب داخل منافذ پیش‌ماده و برقراری ارتباط بین سطوح آزاد قطعه ریخته‌گری با بدنه قالب موثر است. نقش افزایش فشار کوبش در تغییر دمای استحاله‌های فازی و شرایط تعادلی انجماد طبق روابط ترمودینامیکی (رابطه کلایزس-کلاپیرون) در این مورد محسوس نیست [۱۳، ۳۰].

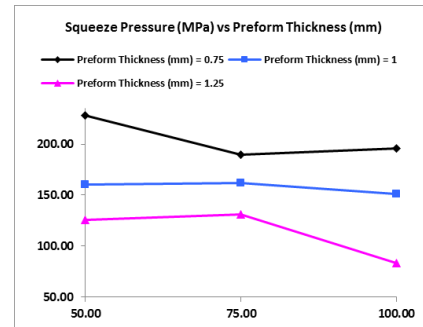
از سوی دیگر، با توجه به قابلیت تجهیزات بکار رفته در این تحقیق و نوع پرس، افزایش فشار کوبش با افزایش سرعت حرکت فک بالایی ماشین ریخته‌گری کوبشی همراه است. لذا با افزایش فشار کوبش، سرعت حرکت فک بالایی پرس به سمت پایین بیشتر شده و در نتیجه، مذاب سریع‌تر و با فشار بیشتر قالب را پر می‌کند و منجمد می‌شود. از این رو، با افزایش فشار کوبش، انتقال حرارت و انجماد سریع‌تر شده و زمان لازم برای نفوذهای اتمی و ذوب‌های سطحی کمتر می‌شود. با این وجود اثر تغییرات



الف



ب



ج

شکل ۱۴- نمودارهای اثرات متقابل متغیرهای ریخته‌گری بر ضخامت فصل مشترک: الف: عامل AB، ب: عامل AC و ج: عامل BC.

### ۴-۳- تحلیل اثر عوامل ریخته‌گری بر ضخامت فصل مشترک

در شکل ۱۵ نمونه‌ای از نمودار فازی دو عنصر مس و آلومینیوم نشان داده شده است [۲۶]. دو فلز مس و آلومینیوم دارای دو نقطه ذوب بسیار متفاوت به ترتیب برابر ۱۰۸۰ و ۶۶۰ درجه سانتیگراد بوده و از حلالیت نسبی در حالت جامد برخوردارند. همچنین می‌توانند انواع ترکیبات بین‌فلزی و چندین واکنش همدمای یوتکتیک، پریکتیک و یوتکتوئیدی در غلظت‌های مختلف از خود بروز بدهند. در تولید دوفلزی مورد نظر، فلز مذاب آلومینیوم در تماس با مس جامد قرار می‌گیرد، لذا مذاب آلومینیوم باید بتواند با ذوب سطحی مس، شرایط را برای تشکیل یک ترکیب دوتایی فراهم نماید. بنابراین برای تحلیل تاثیر پارامترهای ریخته‌گری بر ضخامت فصل مشترک باید به فرایندهای ذوب سطحی پیش‌ماده و سپس انجماد این دو ترکیب و سرعت‌های جوانه‌زنی و رشد در طول فرایند تولید آنها اشاره نمود [۶، ۹، ۱۰، ۲۷].

(۳) تحلیل واریانسی و عددی نتایج نشان داد که ضخامت جداره‌های پیش‌ماده با سهمی نزدیک به ۷۵ درصد، بیشترین تاثیر را بر همه مشخصه‌های ریزساختاری مورد مطالعه در فصل مشترک دارد. پس از آن، دمای بارریزی روی ضخامت فاز  $\Theta$  و فشار کوبش روی ضخامت سل یوتکتیک اثرگذار هستند.

(۴) تغییرات همه مشخصه‌های ریزساختاری (ضخامت لایه‌های فصل مشترک) با افزایش دمای بارریزی، کاملاً افزایشی و در مقابل با افزایش فشار کوبش و افزایش ضخامت جداره پیش‌ماده، کاملاً کاهش یافته است.

(۵) با افزایش ضخامت پیش‌ماده از سطح ۰/۷۵ به ۱/۲۵ میلی‌متر، میانگین ضخامت سل یوتکتیک به میزان ۴۵/۲٪ و میانگین ضخامت فاز  $\Theta$  به میزان ۵۸/۳٪ کاهش یافته است.

(۶) با افزایش دمای بارریزی از ۷۲۰ به ۷۶۰ درجه سانتیگراد، میانگین ضخامت سل یوتکتیک و  $\Theta$  به ترتیب ۲۰/۶٪ و ۵۰/۴٪ افزایش یافته است.

(۷) با افزایش فشار کوبش از ۵۰ و ۱۰۰ MPa، ضخامت‌های سل یوتکتیک و  $\Theta$  به ترتیب ۲۵/۷٪ و ۴/۳٪ کاهش یافته است.

(۸) سهم اثرات متقابل عوامل در مقایسه با سهم اثرات اصلی عوامل بر تغییرات ضخامت لایه‌های فصل مشترک، کمتر از ۴ درصد بوده است.

### مراجع

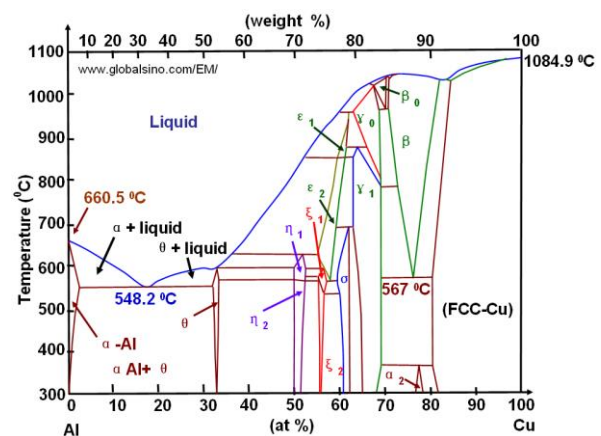
- [1] Fu Y., Zhang Y.B., J. Chuan Jie, Svyarenko K., Liang C. H., Li T.J., Interfacial phase formation of Al-Cu bimetal by solid-liquid casting method, China Foundry, 2017, 14(3) 194–198, doi: 10.1007/s41230-017-6057-7.
- [2] Guan F., Jiang W., Li G., Jiang H., Zhu J., Fan Z., Interfacial bonding mechanism and pouring temperature effect on Al/Cu bimetal prepared by a novel compound casting process, Materials Research Express, 2019, 6(9) 096529, doi: 10.1088/2053-1591/ab2d8f.
- [3] Tavassoli S., Abbasi M., Tahavvori R., Controlling of IMCs layers formation sequence, bond strength and electrical resistance in Al-Cu bimetal compound casting process, Materials and Design, 2016, 108, 343–353, doi: 10.1016/j.matdes.2016.06.076.
- [4] Liu G., Wang Q., Zhang L., Ye B., Jiang H., Ding W., Effects of melt-to-solid volume ratio and pouring temperature on microstructures and mechanical properties of Cu/Al bimetal in compound casting process, Metallurgical and Materials Transaction A, Physical Metallurgy and Materials Science, 2019, 50(1) 401–414, doi: 10.1007/s11661-018-4981-9.
- [5] Kim I. K., Hong S. I., Effect of heat treatment on the bending behavior of tri-layered Cu/Al/Cu composite plates, Materials and Design, 2013, 47, 590–598, doi: 10.1016/j.matdes.2012.12.070.
- [6] Liu T., Wang Q., Sui Y., Wang Q., Ding W., An investigation into interface formation and mechanical properties of aluminum-copper bimetal by squeeze casting, Materials and Design, 2016, 89, 1137–1146, doi: 10.1016/j.matdes.2015.10.072.

فشار در محدوده مورد بررسی، تغییرات معنی‌داری بر مشخصه‌های کیفی فصل مشترک ندارد.

### • اثر ضخامت جداره پیش‌ماده

توجه شود که از زمان شروع بارریزی مذاب به داخل قالب، سرد شدن مذاب آلومینیم شروع شده و با برقراری تماس بین مذاب و پیش‌ماده مسی، سرد شدن سریع‌تر می‌شود. توان تبریدی مس به علت بالا بودن نقطه ذوب، چگالی، ظرفیت حرارتی و ضریب هدایت حرارتی آن بسیار زیاد است [۳۲].

توان تبریدی پیش‌ماده از یک سو به ضخامت جداره مسی آن و از سوی دیگر به حجم مذاب آلومینیم مربوط است [۹]. با افزایش ضخامت جداره پیش‌ماده، هم توان تبریدی آن افزایش می‌یابد و هم حجم موثر مذاب آلومینیم در فضای شبکه‌ای آن کمتر می‌شود. بنابراین با افزایش ضخامت جداره پیش‌ماده مسی، سرعت انجماد مذاب آلومینیم به شدت افزایش می‌یابد. در این شرایط فرصت ذوب شدن لایه‌های مس برای تشکیل آلیاژی از مس و آلومینیم کمتر می‌شود و در نتیجه ضخامت لایه تک فاز بین‌فلزی  $\Theta$  و لایه دوفازی یوتکتیک و در کل ضخامت فصل مشترک به شدت کم می‌شود.



شکل ۱۴- نمودار فازی دوتایی آلومینیم-مس [۲۶].

### ۴- نتیجه‌گیری

(۱) لایه فصل مشترک در دوفلزی آلومینیم با پیش‌ماده مسی با ساختار شبکه‌ای، از دو لایه تشکیل شده است که لایه اول به صورت تک فاز شامل ترکیب بین‌فلزی  $\Theta$  و لایه دوم به صورت یوتکتیکی از فازهای  $\alpha$  و  $\Theta$  است. لایه اول به مس و لایه دوم به آلومینیم متصل است.

(۲) ضخامت لایه‌های فاصل مشترک در دوفلزی مورد مطالعه با تغییر در دمای بارریزی، فشار کوبش و ضخامت جداره پیش‌ماده مسی تغییر می‌کند.

- Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 26(4) 1141–1147, doi: 10.1007/s12206-012-0215-z.
- [20] Souissi N., Souissi S., Niniven C. L., Ben Amar M., Bradai C., Elhalouani F., Optimization of squeeze casting parameters for 2017 A wrought Al alloy using Taguchi method, *Metals*, 2017, 3(4) 141–154, doi: 10.3390/met4020141.
- [21] Hassasi S.A., Abbasi M., Hosseinipour S.J., Parametric investigation of squeeze casting process on the microstructure characteristics and mechanical properties of A390 aluminum alloy, *International Journal of Metalcasting*, 2020, 14, 69–83. <https://doi.org/10.1007/s40962-019-00325-0>
- [22] Heidari Ghaleh M., Hosseinipour S. J., Abbasi M., Solidification microstructure of ultra-thin cellular Al-11Si alloy produced by hybrid additive manufacturing and suction casting, *International Journal of Metalcasting*, 2025, 17 July accepted, <https://doi.org/10.1007/s40962-025-01684-7>.
- [23] Mao A., Zhang J., Yao S., et al., The diffusion behaviors at the Cu-Al solid-liquid interface: A molecular dynamics study, *Results in Physics*, 2020, 16, 102998, doi: 10.1016/j.rinp.2020.102998.
- [24] Vijian P., Arunachalam V. P., Optimization of squeeze cast parameters of LM6 aluminium alloy for surface roughness using Taguchi method, *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 180, 1–3, 161–166, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.05.016.
- [25] Pelzer R., Woehlert S., Koerner H., Khatibi G., Walter J., Growth behavior and physical response of Al-Cu intermetallic compounds, 2014 IEEE 16th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC), Singapore, 2014, 372–377, doi: 10.1109/EPTC.2014.7028259.
- [26] Yougui L., Practical Electron Microscopy and Database, An Online Book, Second Edition, 2006, <https://www.globalsino.com/EM/page2000.html>
- [27] میرباقری س. م. ح.، امینی ا.، عبدی بجنده ا.، ریخته‌گری کامپوزیت پیشرفته پایه زاماک ۵ با فاز فلزی تقویت کننده سه بعدی پیوسته مسی، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، ۱۳۹۹، ۴(۳) ۱۳۶–۱۲۹.
- [۲۸] نوروزی ف.، حسینی پور س. ج.، عباسی م.، اثر متغیرهای ریخته‌گری کوبشی بر مشخصه‌های ریزساختاری کامپوزیت زاماک ۵ تقویت شده با پیش ماده آلومینایی، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، ۱۴۰۱، ۶(۳) ۲۰۳–۲۱۲.
- [۲۹] حصاصی س. ع.، عباسی م.، حسینی پور س. ج.، بررسی ریزساختار انجمادی آلیاژ آلومینیم A390 تولید شده به روش ریخته‌گری کوبشی، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، ۱۳۹۷، ۲(۱) ۱–۱۰.
- [۳۰] حصاصی س. ع.، عباسی م.، حسینی پور س. ج.، بررسی اثر متغیرهای ریخته‌گری کوبشی بر خواص مکانیکی و رفتار سایشی آلیاژ آلومینیم A356، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، ۱۳۹۷، ۲(۴) ۲۶۳–۲۷۳.
- [31] Hassasi S.A., Abbasi M., Hosseinipour S.J., Effect of squeeze casting parameters on the wear properties of A390 aluminum alloy, *International Journal of Metalcasting*, 2021, 15, 852–863, doi: 10.1007/s40962-020-00507-1
- [۳۲] حجازی ج.، انجماد و اصول متالورژیکی ریخته‌گری، چاپ سوم، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۷۳.
- [7] Pintore M., Wölck J., Mittler T., Greß T., Tonn B., Volk W., Composite casting and characterization of Cu–Al bilayer compounds, *International Journal of Metalcasting*, 2020, 14, 155–166, doi: 10.1007/s40962-019-00344-x.
- [8] Liang S. M., Schmid-Fetzer R., Thermodynamic assessment of the Al-Cu-Zn system, part II: Al-Cu binary system, *Calphad: Computer Coupling of Phase Diagrams Thermochemistry*, 2015, 51, 252–260, doi: 10.1016/j.calphad.2015.10.004.
- [9] Hasasi S.A., Abbasi M., Hosseinipour S. J., Squeeze casting of aluminum–copper preform with regular lattice structure: effect of preform wall thickness on the interfacial microstructure and mechanical properties, *International Journal of Metalcasting*, 2025, 19 July accepted, <https://doi.org/10.1007/s40962-025-01683-8>
- [10] Ahmadzadeh S. S., Mirbagheri S. M. H., Microstructural and mechanical characterization of Al/Cu interface in a bimetallic composite produced by compound casting, *Scientific Reports*, 2024, 14(1) 1–13, doi: 10.1038/s41598-024-57849-7.
- [11] Fromm A.C., Barianti K., Selmanovic A. et al., Oxygen-free compound casting of aluminum and copper in a silane-doped inert gas atmosphere: a new approach to increase thermal conductivity, *International Journal of Metalcasting*, 2023, 17(3) 2171–2183, doi: 10.1007/s40962-022-00910-w.
- [12] Liu G., Wang Q., Zhang L., Ye B., Jiang H., Ding W., Effect of cooling rate on the microstructure and mechanical properties of Cu/Al bimetal fabricated by compound casting, *Metallurgical and Materials Transaction A, Physical Metallurgy and Materials Science*, 2018, 49(2) 661–672, doi: 10.1007/s11661-017-4427-9.
- [13] Ghomashchi M.R., Vikhrov A., Squeeze casting: an overview, *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 101 (1-3) 1–9, doi:10.1016/S0924-0136(99)00291-5.
- [14] Zhao J. W., Sen Wu S., Microstructure and mechanical properties of rheo-diecasted A390 alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, 20, SUPPL. 3, s754–s757, doi: 10.1016/S1003-6326(10)60576-6.
- [15] Amin K.M., Mufti N.A., Investigating cooling curve profile and microstructure of a squeeze cast Al-4%Cu alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(8) 1631–1639, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2012.02.017.
- [16] Maleki A., Niroumand B., Shafyei A., Effects of squeeze casting parameters on density, macrostructure and hardness of LM13 alloy, *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 428(1) 135–140, doi: 10.1016/j.msea.2006.04.099.
- [17] Patel M. G.C., Parasad K., Parappagoudar M.B., An intelligent system for squeeze casting process—soft computing-based approach, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86(1) 3051–3065, doi: 10.1007/s00170-016-8416-8.
- [18] Patel M. G.C., Shettigar A.K., Parappagoudar M.B., A systematic approach to model and optimize wear behaviour of castings produced by squeeze casting process, *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 32, 199–212, doi: 10.1016/j.jmapro.2018.02.004.
- [19] Senthil P., Amirthagadeswaran K.S., Optimization of squeeze casting parameters for non-symmetrical AC2A aluminium alloy castings through Taguchi method,

IRANIAN FOUNDRYMEN'S  
SOCIETY

# Founding Research Journal

*Research Paper:*

## Numerical Analysis of the Effects of Squeeze Casting Variables on the Interfacial Microstructure of Aluminum/Copper Bimetal with a Regular 3D Lattice Structure

Seyed Abbas Hassasi<sup>1</sup>, Majid Abbasi<sup>2\*</sup>, Seyed Jamal Hosseinipour<sup>3</sup>

1. PhD. Student, in Materials Engineering, Faculty of Materials and Industrial Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Mazandaran, Iran
2. Associate Professor, Faculty of Materials and Industrial Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Mazandaran, Iran.
3. Professor, Faculty of Materials and Industrial Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Mazandaran, Iran.

\* Corresponding author: abbasim@nit.ac.ir

### Paper history:

Receive Date: 15 Sep. 2025  
Revise Date: 29 Nov. 2025  
Accept Date: 29 Nov. 2025

### Abstract:

In this paper, the microstructural characteristics of the bimetallic interface of aluminum with copper precursor with a regular three-dimensional lattice structure produced by the squeeze casting method have been numerically analyzed. For this purpose, the effects of three process variables: copper lattice cell wall thickness (precursor thickness) between 0.75 and 1.25 mm, molten aluminum pouring temperature between 720 and 760 °C, and squeeze pressure between 50 and 100 MPa on three microstructural characteristics: interface thickness, eutectic cell thickness, and  $\Theta$  phase thickness have been investigated. The L15 matrix was used to design the experiment, with all three independent variables located at three levels with the same variation interval. Numerical analyses of regression and variance, and main and interaction effects functions using surface diagrams were used. The microstructure of the interface was examined by optical and electron microscopes equipped with image processors and EDS. Microscopic observations showed that the microstructure of the bimetallic interfacial layer consists of four layers of pure copper,  $\Theta$  phase,  $\alpha+\Theta$  eutectic and alpha aluminum phase, whose thickness is affected by the three variables under study. Also, the morphology of the  $\Theta$  phase in the 0.75 mm thick preform is columnar, in the 1 mm thick preform is a combination of columnar and equiaxed, and in the 1.25 mm thick preform, it is completely equiaxed. The main effects diagram showed that the changes in all three microstructural characters were completely increasing with increasing pouring temperature, and on the contrary, they were decreasing with increasing squeeze pressure and preform thickness. Also, variance evaluations revealed that the thickness of the preform is the most effective factor on the size of the microstructural characteristics of the interfacial layer, with a contribution of more than 75 percent, followed by pouring temperature and pressing pressure. The thicknesses of the interface, eutectic cell, and  $\Theta$  phase increased by 24.47%, 20.62%, and 50.54%, respectively, with increasing pouring temperature, and decreased by 18.32%, 20.48%, and 4.31%, respectively, with increasing squeeze pressure, and decreased by 47.26%, 45.21%, and 58.38%, respectively, with increasing precursor thickness.

### Keywords:

Aluminum/Copper bimetal,  
Squeeze casting,  
Regular 3D lattice preform,  
Numerical analysis,  
Interfacial microstructure.

### Please cite this article using:

Seyed Abbas Hassasi, Majid Abbasi, Seyed Jamal Hosseinipour, Numerical Analysis of the Effects of Squeeze Casting Variables on the Interfacial Microstructure of Aluminum/Copper Bimetal with a Regular 3D Lattice Structure, in Persian, Founding Research Journal, 2025, 9(2) 105-120.

DOI: 10.22034/frj.2025.547148.1210