

## پژوهش‌نامه ریخته‌گری

### مقاله پژوهشی:

## بررسی فصل مشترک Al / AISI 321 در ریخته‌گری مرکب در دمای ۸۴۰ درجه سانتیگراد

علی بختیاری<sup>۱</sup>، زهرا سادات سیدرئوفی<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران.

\* نویسنده مکاتبه کننده: Email: z.seydraoufi@kiaui.ac.ir

### چکیده:

دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۸

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۰۸

ریخته‌گری کامپوزیت یک فرآیند تولید تخصصی است که برای ایجاد اجزا یا ساختارهای متشکل از دو فلز مجزا استفاده می‌شود. در این تحقیق، کامپوزیت‌های دوفلزی متشکل از AISI 321 و آلومینیم به روش ریخته‌گری کامپوزیت تولید شدند. این فرآیند شامل ریختن آلومینیم مذاب بر روی یک هسته فولادی است. در طول فرآیند ریخته‌گری، آلومینیم مذاب هسته فولادی را احاطه می‌کند و منجر به برهمکنش دینامیکی بین آلومینیم مایع و فولاد جامد می‌شود. این فعل و انفعال یک رابط منحصربه‌فرد بین دو ماده ایجاد می‌کند و در نتیجه ترکیبات بین فلزی در این رابط ایجاد می‌شود. در این تحقیق تأثیر دو عامل کلیدی نسبت حجم فلز مذاب به حجم هسته جامد و دمای ریختن بررسی شده است. این متغیرها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی (SEM) با آنالیز نقطه عنصری (EDS) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد افزایش نسبت حجم مذاب به جامد منجر به افزایش ضخامت فصل مشترک آلومینیم و فولاد می‌شود. هنگامی که نسبت حجم مذاب به جامد افزایش یافت، زمان انجماد آلومینیم نیز افزایش یافت. این افزایش زمان انجماد تأثیر مستقیمی بر میزان نفوذ فولاد در آلومینیم در حال انجماد دارد. نتایج تجزیه و تحلیل EDS نشان داد که فصل مشترک دوفلزی از ترکیبات بین فلزی مختلف تشکیل شده است که شامل  $FeAl$ ،  $FeAl_2$ ،  $Fe_2Al_5$ ،  $FeAl_3$  هستند. این ترکیبات به دلیل واکنش‌های شیمیایی بین آلومینیم و فولاد در سطح مشترک ایجاد می‌شوند و حضور آنها در درک خواص و رفتار ساختار کامپوزیت اهمیت زیادی دارد.

### واژه‌های کلیدی:

ریخته‌گری مرکب، ترکیبات بین‌فلزی، فصل مشترک، اتصال متالورژیکی.

### ارجاع به این مقاله:

علی بختیاری، زهرا سادات سیدرئوفی، بررسی فصل مشترک Al / AISI 321 در ریخته‌گری مرکب در دمای ۸۴۰ درجه سانتیگراد، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، بهار و تابستان ۱۴۰۲، جلد ۷، شماره ۱، صفحات ۳۵-۴۴.

شناسه دیجیتال: (DOI): 10.22034/FRJ.2024.422960.1187

### ۱- مقدمه

امروز، به‌صورت هم‌زمان نیاز به چند خاصیت مختلف وجود دارد که دوفلزی‌ها توانایی سرویس‌دهی در این شرایط را دارند [۳]. به‌عنوان مثال، در شرایط کاری خاص، یک لوله با صرفه‌جویی اقتصادی همراه با مقاومت مناسب وظیفه انتقال سیال خورنده را بر عهده دارد. در چنین شرایطی، انتخاب یک لوله فولادی ساده کربنی که درونی آن با روش ریخته‌گری سانتریفیوژی با آلومینیم پوشانده شده است، به‌عنوان گزینه‌ای مناسب به نظر می‌رسد [۴]. [۵]

چندفلزی‌ها با استفاده از روش‌های مختلفی از جمله ریخته‌گری مرکب، ریخته‌گری سانتریفیوژی، اتصال به‌وسیله نورد تجمعی، اتصال به‌وسیله پرس تجمعی، اکستروژن و دیگر روش‌های

در حال حاضر، به دنبال تأمین نیازهای صنعت، از مواد جدیدی با استحکام بالا و چگالی کم استفاده می‌شود، اما این انتظار را نمی‌توان به‌تنهایی با استفاده از یک ماده واحد برآورده نمود. استفاده از مواد مرکب، علاوه بر برآورده کردن این نیاز، سبب افزایش مقاومت به سایش، سختی، خوردگی و هدایت الکتریکی و حرارتی می‌شود. مواد مرکب دوفلزی یا چندفلزی، موادی هستند که از دو یا چند فلز ساخته شده‌اند [۱، ۲].

معمولاً، چندفلزی‌ها بر اساس خواص مهندسی موردنیاز، به شکل ورق، لوله، شفت، قوطی و یا شکل خاص دیگری طراحی و در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. در دنیای صنعت

بیشتری در پژوهش‌های آینده است. در روش ریخته‌گری مرکب، مذاب یک فلز در اطراف فلز جامد دیگر ریخته‌گری می‌شود و در اثر تداخل دو فلز، یک منطقه نفوذی - واکنشی شکل می‌گیرد. این منطقه، منجر به اتصال دو فلز می‌شود و در نتیجه، تولید دوفلزی ایجاد می‌گردد. با استفاده از ریخته‌گری مرکب، می‌توان قطعاتی با سطح صاف و استحکام بالا تولید کرد که برای کاربردهای مختلف قابل استفاده هستند. با توجه به اینکه روش ریخته‌گری مرکب، یکی از روش‌های نوین و پیشرفته در تولید قطعات فلزی است، بهره‌برداری بیشتر از آن در صنایع مختلف پیشنهاد می‌شود. همچنین، انجام پژوهش‌های بیشتری برای بهبود و بهینه‌سازی این روش، می‌تواند به توسعه و بهبود صنایع مرتبط با آن کمک کند [۸-۱۱].

همان‌طور که اشاره شد، لایه‌های شکل‌گرفته در مرز مشترک دو فلز، در تمامی روش‌های تولید، به شرایط مختلفی نظیر شرایط مغزه، دمای ذوب، نرخ انتقال حرارت و نسبت حجم مذاب به جامد، وابسته هستند [۹]. خصوصیت فیلم بین فلزی در اتصال، تأثیر به‌سزایی بر خواص نهایی دوفلزی دارد. در این تحقیق، سعی بر آن است تا شرایط تولید دوفلزی نوین فولاد زنگ‌نزن و آلومینیوم خالص به روش ریخته‌گری مرکب و خواص و شرایط فصل مشترک مورد بررسی قرار گیرد.

## ۲- مواد و روش آزمون

### ۲-۱- مواد اولیه

در تحقیق حاضر از فولاد زنگ‌نزن آستنیتی با مقادیر بالای کروم و نیکل به‌عنوان مغزه یا همان هسته جامد جهت ریخته‌گری مرکب استفاده شده است. این مغزه استوانه‌ای شکل به قطر ۱۲ و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. همچنین از آلومینیوم خالص تجاری به‌صورت کلاف سیم به‌منظور ریخته‌گری دوفلزی AI / AISI 321 استفاده شد. در جدول ۱ و ۲ ترکیب شیمیایی فولاد و آلومینیوم خالص که به روش کوانتومتری اندازه‌گیری شده است، به ترتیب بیان شده است.

### ۲-۲- قالب‌گیری

در شکل ۱ تصویر مربوط به قرارگیری ماهیچه‌ها در قالب و طرح واره دوبعدی راهگاه، راهواره‌ها و قطعه نهایی نشان داده شده است. قطر ماهیچه‌ها با یکدیگر متفاوت است. این عمل به جهت ایجاد تفاوت در نسبت حجمی مذاب (متغیر) به نسبت حجمی مغزه جامد (ثابت) انجام شده است. این عمل تفاوت در زمان انجماد، نرخ نفوذ، سرعت سرد شدن و لایه‌های بین فلزی ایجاد شده و در نهایت استحکام اتصال را در پی دارد. بنابراین تفاوت در حجم

جوشکاری ساخته می‌شوند. خواص مطلوب چندفلزی‌ها به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر پارامترهای خاص هر فرایند قرار می‌گیرند. به‌عنوان مثال، در فرایند نورد تجمعی، افزایش فشار و در نتیجه افزایش درصد کاهش سطح مقطع، منجر به افزایش ضخامت باند متالورژیکی در فصل مشترک دو فلز و انتقال شکست از نرم به ترد می‌شود [۶، ۷]. توسلی و همکاران [۸] در تحقیق خود نشان دادند که در تولید ماده دوفلزی آلومینیوم - مس به روش ریخته‌گری مرکب، دمای پیش گرمای قالب مسی نسبت به دمای فوق‌گداز آلومینیوم، تأثیر به‌مراتب بیشتری بر تشکیل و رشد لایه بین فلزی موجود در فصل مشترک دارد. همچنین، آنها نشان دادند که باند متالورژیکی تشکیل شده دارای سه‌لایه است:

(الف) لایه سمت مس که ضخیم‌ترین لایه است و ساختار یوتکتیک  $\theta + \alpha$  دارد (AI + Al<sub>2</sub>Cu).

(ب) لایه بین فلزی که کاملاً متشکل از فاز  $\theta$  است (Al<sub>2</sub>Cu).

(ج) لایه‌نازک آخر که سمت آلومینیوم است و از چندین ترکیب بین فلزی متفاوت تشکیل شده است.

مقایسه بررسی توسلی با تحقیقات صورت‌گرفته در روش جوش‌های حالت جامد، نشان می‌دهد که در این روش، لایه (الف) به دولایه (ب) و (ج) اضافه می‌شود. این مسئله، وجود انجماد غیر هم‌دما در این روش را نشان می‌دهد. توسلی در تحقیق خود نشان داد که در ابتدا، لایه (ب) با مکانیزم جوانه‌زنی و رشد بر سطح مس تشکیل می‌یابد. پس از آن، لایه (الف) با مکانیزم انحلال - جامد، در زیر دمای ۵۴۸ °C تشکیل می‌شود. در پایان، لایه (ج) با مکانیزم نفوذ و استحاله حالت جامد، تشکیل می‌یابد. نتایج سختی‌سنجی نشان می‌دهد که سختی در باند متالورژیکی به بیشینه مقدار خود می‌رسد. این مقدار برای هر یک از لایه‌ها و فازهای مطرح شده می‌تواند متفاوت باشد. همچنین، او نشان داد که با افزایش ضخامت باند متالورژیکی، مقاومت الکتریکی ویژه افزایش و هدایت الکتریکی کاهش می‌یابد. به‌طور مشابه، با افزایش ضخامت باند متالورژیکی، استحکام اتصال کاهش می‌یابد و لایه‌های (ب) و (ج) به دلیل سختی بالایشان و ایجاد تردی بسیار پررنگ، در این میان نقش مهمی دارند [۸-۱۱].

روش ریخته‌گری مرکب، یکی از روش‌های مؤثر در ایجاد اتصال بین فلزات است. با استفاده از این روش، علاوه بر اتصال، می‌توان شکل نهایی قطعات را نیز به دست آورد. این روش، از جمله روش‌های نوین و پیشرفته است که پتانسیل بالایی برای استفاده در تولیدات مختلف دارد. باین‌حال، تعدادی از صنعتگران و محققین هنوز بهره‌برداری کافی از این روش را ندارند، درحالی که پتانسیل بالای آن برای کاربردهای مختلف، بیانگر ضرورت

شدت جریان ۴۵ آمپر قرار داده شد. ریخته‌گری یا ذوب ریزی در دمای  $840^{\circ}\text{C}$  انجام شد. در نسبت حجمی مذاب به جامد پایین قطعه به‌طور کامل پر نشده است؛ لذا در ادامه این دو نسبت حذف و دو نسبت حجمی مذاب به جامد بالاتر به پژوهش حاضر اضافه گردید. در جدول ۳، نام‌گذاری نمونه‌ها بر اساس شرایط ریخته‌گری شرح داده شده است.

مذاب به مغزه جامد به‌عنوان یکی از متغیرهای این پژوهش در نظر گرفته شده است.

### ۲-۳- ریخته‌گری

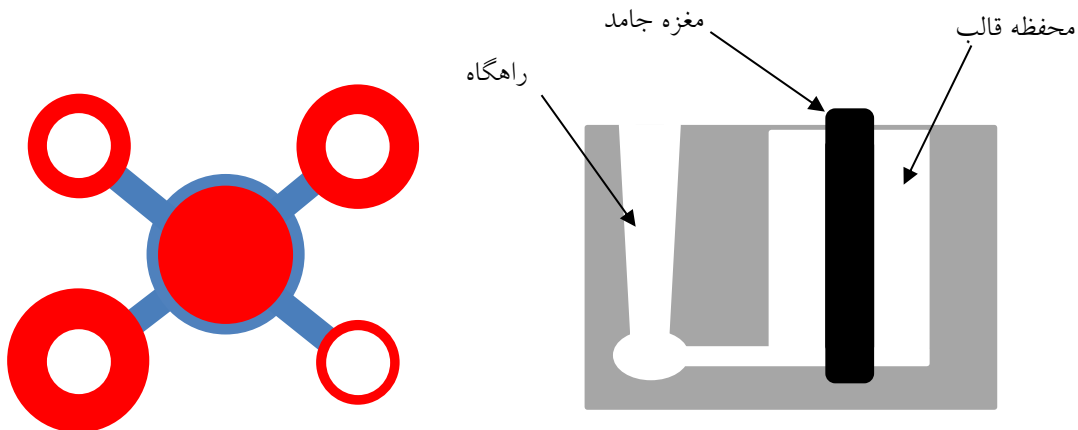
کلاف آلومینیم خالص، خرد شده و درون یک بوته سرامیکی (SiC) ریخته شده است. بوته جهت تولید ذوب در یک کوره القایی فرکانس پایین (۵۱۱۳ هرتز) با ولتاژ کاری ۴۹۰ ولت و

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد AISI 321 برحسب درصد وزنی.

عنصر	کربن	سیلیسیم	منگنز	فسفر	گوگرد	کروم	مولیبدن	نیکل
درصد وزنی	۰/۰۲۵	۰/۵۷	۱/۴۰	۰/۰۲۳	۰/۰۰۵	۱۷/۳۷	۰/۲۱	۹/۲۷
عنصر	آلومینیم	کبالت	مس	تیتانیوم	وانادیم	تنگستن	نیوبیم	آهن
درصد وزنی	۰/۰۶	۰/۱۰	۰/۰۹	۰/۳۲	۰/۱۲	۰/۰۲	۰/۰۱۷	بالانس

جدول ۲ ترکیب شیمیایی آلومینیم خالص برحسب درصد وزنی.

عنصر	آهن	سیلیسیم	مس	منیزیم	روی	کروم	کلسیم	نیکل
درصد وزنی	۰/۱۲	۰/۰۴	ناچیز	۰/۰۵	۰/۰۰۸	ناچیز	۰/۰۰۲	۰/۰۰۹
عنصر	آلومینیم	قلع	سدیم	تیتانیوم	وانادیم	بیسموت	بور	گالیم
درصد وزنی	پایه	۰/۰۰۲	ناچیز	ناچیز	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳	۰/۰۰۰۹	۰/۰۱

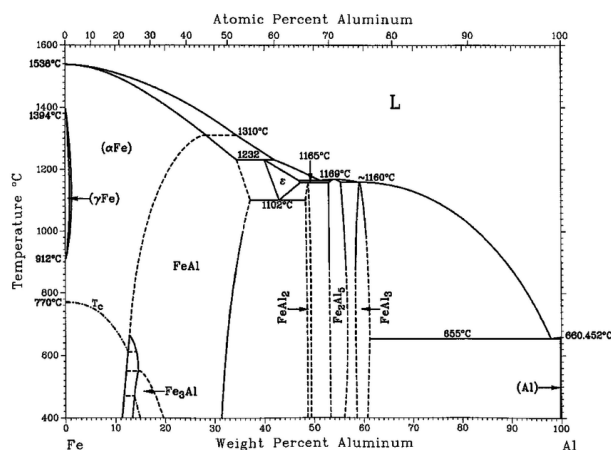


شکل ۱- شماتیک دوبعدی راهگاه، راهواره‌ها و قطعه اولیه.

جدول ۳ نام‌گذاری نمونه‌ها بر اساس شرایط ریخته‌گری مرکب.

نسبت حجم مذاب به حجم مغزه (mm <sup>3</sup> )	مذاب			مغزه			دمای ریخته‌گری (°C)	کد نمونه
	حجم (mm <sup>3</sup> )	ضخامت (mm)	ارتفاع (mm)	حجم (mm <sup>3</sup> )	قطر (mm)	ارتفاع (mm)		
۶	۳۲۲۰۹/۸	۱۲/۰۰	۹۰	۱۰۷۳۶/۶	۱۲	۹۰	۸۴۰	۱-۸۴۰
۵	۴۲۹۴۶/۴	۱۳/۵۰					۸۴۰	۲-۸۴۰
۴	۵۳۶۸۳	۱۴/۷۵					۸۴۰	۳-۸۴۰
۳	۶۴۴۱۹/۶	۱۵/۹۰					۸۴۰	۴-۸۴۰

مشترک تشکیل می‌شود. دمای ذوب آلومینیم و دمای پیش گرم فولاد جامد از عوامل اثرگذار در دمای فصل مشترک است. با توجه به شکل ۲ می‌توان دریافت که حلالیت آلومینیم در آهن زیاد بوده و حلالیت معکوس کم (آهن در آلومینیم)، و اختلاف نقطه ذوب زیاد وجود دارد که نشان‌دهنده نرخ‌های نفوذ نامتعادل است. سیستم‌هایی که نیروی محرکه زیادی برای تشکیل ترکیب از خود نشان می‌دهند، به ویژه در برابر تشکیل تخلخل در طول آلیاژسازی حساس هستند. همچنین با توجه به دیاگرام می‌توان یافت که تحولات فازی بین آلومینیم و آهن از جمله تحولات یوتکتیک در دمای حدود ۱۱۶۵°C و یوتکتوئید در دمای ۱۱۰۲°C رخ می‌دهد. بخش غنی از آهن نمودار فازی آهن آلومینیم از سه فاز اصلی تشکیل شده است. فاز A2 نامنظم (A-Fe<sub>3</sub>Al)، گروه فضایی Im3m، فاز B2 منظم (FeAl)، گروه فضایی Pm3m و فاز DO3 منظم (Fe<sub>3</sub>Al)، گروه فضایی Fm3m [۱۳].



شکل ۲- نمودار فازی آهن - آلومینیم [۱۴].

شکل ۳ تصاویر میکروسکوپ نوری از مقطع میله دوفلزی AISI 321 / Al در نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد که در آن وجود فصل مشترک چندلایه شامل ترکیبات بین فلزی FeAl<sub>3</sub>،

#### ۴-۲- بررسی ریزساختاری

به‌منظور بررسی ریزساختار فصل مشترک و ترکیبات بین فلزی ایجاد شده، نمونه‌ها توسط دست و دستگاه سنگ‌زنی از سناده شماره ۱۲۰ تا ۲۵۰۰ سناده‌زنی شده و سپس به‌وسیله نم‌شماره ۶ μm و سوسپانسیون حاوی ۷ درصد نانو آلومینا پولیش شدند و جهت اچ کردن از محلول گلیسرژیا (گلیسرین+ اسید نیتریک + اسید کلریدریک) استفاده شد. فصل مشترک نمونه های فولادی و جداره آلومینیمی ریخته‌گری شده با استفاده از میکروسکوپ نوری (OM) مدل PRIOR ENGLAND و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM<sup>2</sup>) مدل Philips / T130 مجهز به آنالیز نقطه‌ای عناصر (EDS<sup>3</sup>) بررسی شدند.

#### ۵-۲- آزمون میکروسختی‌سنجی

در این تحقیق آزمون ریزسختی ویکرز توسط دستگاه مدل Buhler بر اساس استاندارد ASTM E384-11 به شرح زیر صورت گرفت. جهت انجام آزمون میکروسختی با نیروی اعمالی ۱۰۰ گرم از مناطق مختلف ضخامت لایه بین فلزی انجام شد و میانگین سه اثر ریزسختی به‌عنوان میزان ریزسختی ترکیبات بین فلزی نمونه‌ها در نظر گرفته شد [۱۲].

#### ۳- نتایج و بحث

زمانی که آلومینیم مذاب بعد از ریخته‌گری با دیواره فولاد جامد تماس پیدا می‌کند، حرارت مذاب از طریق مناطق در تماس، به فولاد جامد منتقل می‌شود. در چنین شرایطی اگر دمای مذاب به میزان کافی باشد، باعث ذوب سطحی لایه فولاد خواهد شد و اتم‌های فولاد از سطح جدا شده و وارد مذاب آلومینیم می‌شوند که باعث ایجاد یک محلول مذاب فوق اشباع آلومینیم-آهن در اطراف دیواره فولاد می‌شود. با شروع فرایند انجماد به تدریج از انحلال اتم‌های فولاد درون مذاب کاسته شده و ترکیبات بین فلزی با توجه به دیاگرام دوتایی آلومینیم-آهن (شکل ۲) در فصل

<sup>3</sup> Energy Dispersive X-ray Spectroscopy

<sup>1</sup> Optical Microscopy

<sup>2</sup> Scanning Electron Microscope

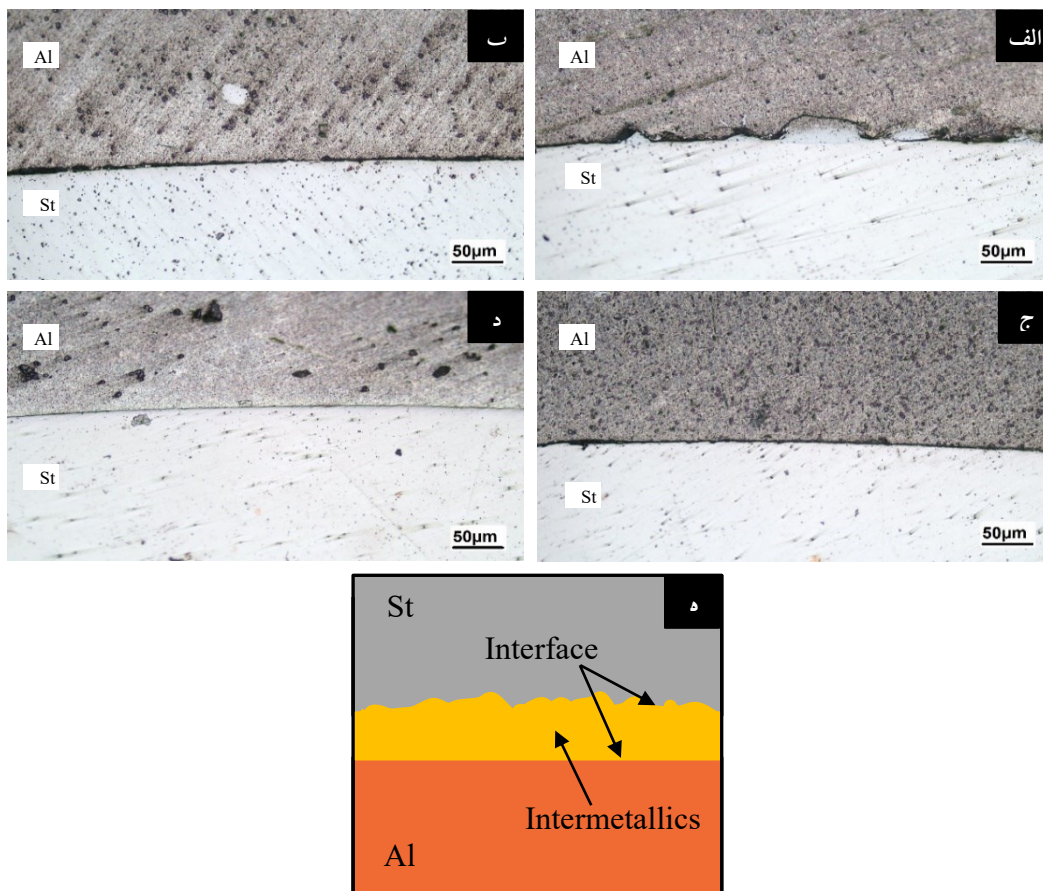
و نمونه ۴-۸۴۰ دارای کمترین مقدار رشد ضخامت لایه فصل مشترک در بین دیگر نمونه‌ها است که این اتفاق به دلیل حجم مذاب متغیر رخ داده است.

در نمونه ۱-۸۴۰ به دلیل وجود مذاب بیشتر فرایند انجماد طولانی‌تر شده و سرعت سرد شدن کمتر بوده و زمان بیشتری برای رشد فصل مشترک وجود داشته ولی در نمونه ۴-۸۴۰ به دلیل مذاب کمتر فرایند انجماد سرعت بیشتری داشته و زمان برای رشد فصل مشترک کمتر بوده است. در شکل ۳-ه شماتیک فصل مشترک بین فولاد و آلومینیم نشان داده شده است. در منطقه بین فولاد / آلومینیم در حین انجماد، آلومینیم مذاب لایه رویی فولاد را ذوب کرده و فولاد در مذاب آلومینیم نفوذ می‌کند. پس از نفوذ با توجه به حجم مذاب آلومینیم و گرمای وارد شده میزان نفوذ فولاد متغیر بوده و به این دلیل ترکیبات مختلفی تشکیل می‌شود. به دلیل اینکه در این محدوده دمایی آلومینیم و فولاد به صورت تک فاز در یکدیگر حل نمی‌شوند پس ترکیبات دوتایی تشکیل می‌شوند. در شکل ۴ نمودار مقایسه ضخامت فصل مشترک نمونه‌های ریخته‌گری شده مشاهده می‌شود.

$FeAl$  و  $FeAl_2$ ،  $Fe_2Al_5$  بین فولاد و آلومینیم مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، در هر چهار وضعیت اتصال برقرار شده و فصل مشترک نفوذی تقریباً بدون نقص، یکنواخت، بدون اکسید و فاصله<sup>۱</sup> است.

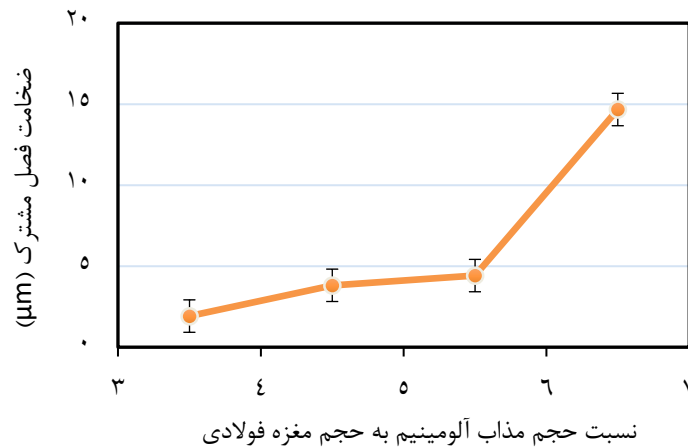
### ۳-۱- ضخامت فصل مشترک

شکل ۳ تصاویر میکروسکوپ نوری در شرایط ریخته‌گری مختلف و در بزرگ‌نمایی یکسان از دوفلزی  $Al / AISI 321$  تهیه شده به روش ریخته‌گری مرکب را نشان می‌دهد. در اتصال به روش ریخته‌گری مرکب، به دلیل اینکه فصل مشترک در دمای بالا تشکیل شده، اتم‌های فولاد می‌تواند در آلومینیم مذاب با سرعت مناسبی حل شوند. در نتیجه فصل مشترک میله‌های دوفلزی تولید شده دارای ضخامت مناسبی است. با توجه به شکل و نتایج به‌دست آمده، ضخامت فصل مشترک در نمونه‌های ۱-۸۴۰ برابر با  $14/67 \mu m$ ، ۲-۸۴۰ برابر با  $4/42 \mu m$ ، ۳-۸۴۰ برابر با  $3/82 \mu m$  و ۴-۸۴۰ برابر با  $1/92 \mu m$  است. بنابراین نمونه ریخته‌گری شده ۱-۸۴۰ دارای بیشترین مقدار رشد ضخامت لایه فصل مشترک



شکل ۳ - تصاویر میکروسکوپ نوری قطعه دوفلزی  $Al / AISI 321$  تهیه شده با ریخته‌گری مرکب با حجم‌های متفاوت مذاب آلومینیم، الف: نمونه ۱-۸۴۰، ب: نمونه ۲-۸۴۰، ج: نمونه ۳-۸۴۰ و د: نمونه ۴-۸۴۰، ه: شماتیک فصل مشترک ریخته‌گری شده.

<sup>1</sup> Gap



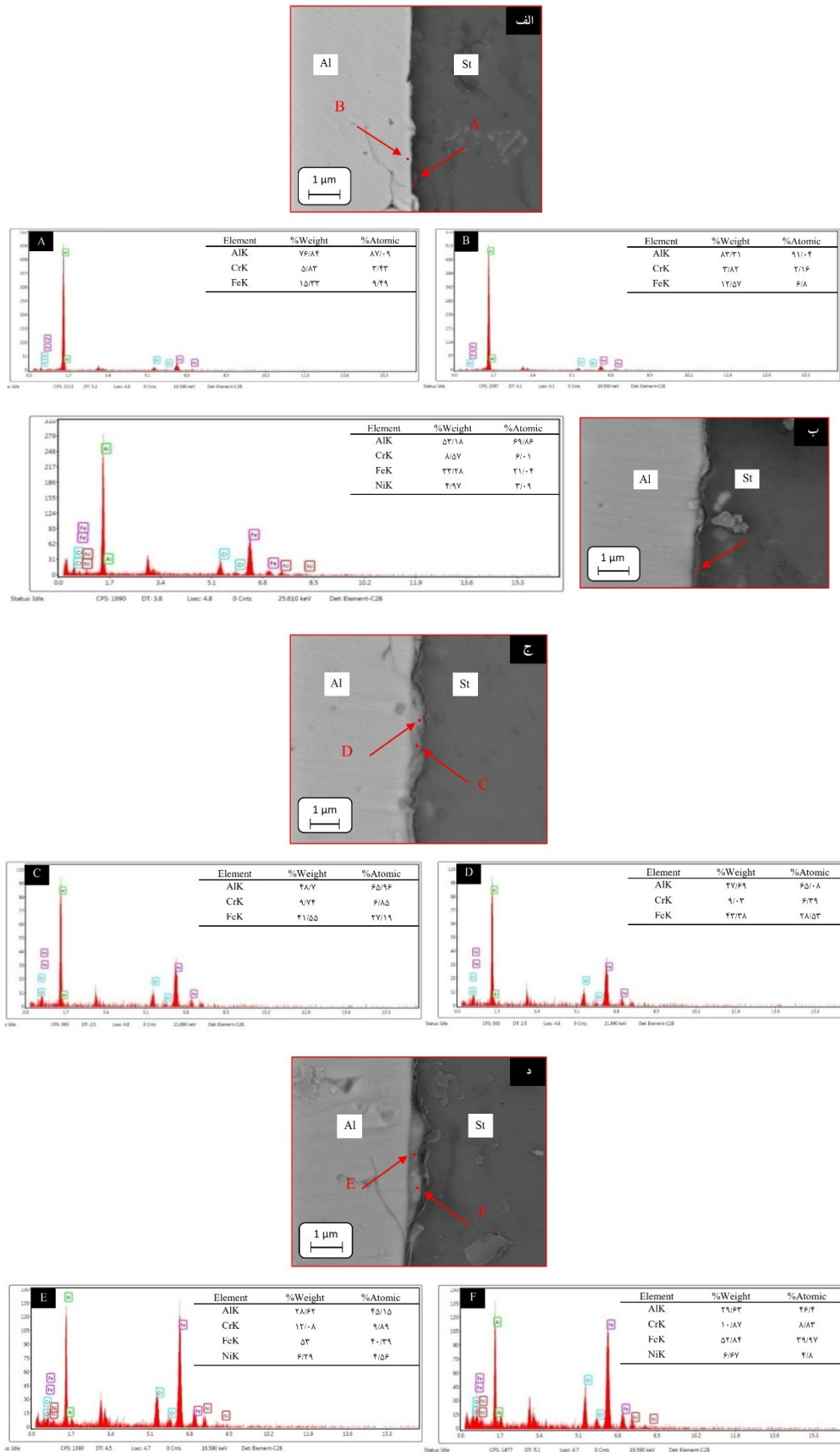
شکل ۴- نمودار مقایسه ضخامت فصل مشترک نمونه‌های تولید شده در شرایط ریخته‌گری متخلف.

### ۲-۳- ریزساختار

اتمی کروم و ۴/۵۶ درصد اتمی نیکل است و نقطه F شامل ۴۶/۴ درصد اتمی آلومینیم، ۳۹/۹۷ درصد اتمی آهن، ۸/۸۳ درصد اتمی کروم و همچنین ۴/۸ درصد اتمی نیکل است. با توجه به آنالیز شیمیایی فصل‌مشترک در شکل ۵-د و با توجه به نمودارهای فاز، می‌توان دریافت که لایه بین فلزی در ناحیه FeAl قرار دارد [۱۵-۱۷]. وجود ترکیبات بین فلزی متفاوت ناشی از وجود شرایط حجمی متفاوت مذاب آلومینیم و در نتیجه تغییر زمان انجماد در هر نمونه است. از این رو میزان آلومینیم نفوذ کرده در نمونه‌ها یکسان نیست و با توجه به دیاگرام، تغییر درصد آلومینیم و آهن، ترکیبات بین‌فلزی مختلفی تشکیل می‌شود. در نمونه ۱-۸۴۰ حجم مذاب از باقی نمونه‌ها و گرمای انتقالی از مذاب کمتر و سرعت انجماد به نسبت سایر نمونه‌ها بیشتر است. در نتیجه زمان برای نفوذ آلومینیم در آهن، در نمونه ۱-۸۴۰ کمترین است که با توجه به نتایج EDS صحت این مطلب تأیید می‌شود. بنابراین زمان انجماد برای نمونه‌های ۱-۸۴۰، ۲-۸۴۰، ۳-۸۴۰ و ۴-۸۴۰ از کم به زیاد است و به همین دلیل زمان نفوذ آلومینیم در آهن نیز متغیر است.

با توجه به مطالعات گذشته، مشخص شده است که اتصال فولاد و آلومینیم از جمله سخت‌ترین نوع اتصالات است و برای بهبود آن و ایجاد فصل مشترک، نیاز به فرایندهایی مانند عملیات سطحی برای بهبود سطح و غوطه‌وری بر روی مغزه فولادی وجود دارد [۱۸، ۱۹]. در تحقیقات مربوط به ریخته‌گری مرکب، پوشش برای برقراری بهتر اتصال متالورژیکی ایجاد می‌شود [۲۰]. با این حال، در این تحقیق، بدون پوشش و عملیات بهبود سطح بر روی مغزه فولادی و یا حتی اضافه کردن عنصری به مذاب، اتصال تقریباً مناسب، بدون نقص و فاصله برای شرایط ریخته‌گری مختلف، به دست آمده است. این نتیجه با یافته‌های چو و جیانگ در مورد تشکیل فصل مشترک همخوانی دارد [۱۸، ۱۹].

در شکل ۵ تصاویر SEM در شرایط ریخته‌گری و در بزرگ‌نمایی‌های مختلف از دوفلزی Al / AISI 321 تهیه شده به روش ریخته‌گری مرکب به همراه نتایج آنالیز EDS آن‌ها به صورت نموداری نشان داده شده است. تصاویر SEM از مقطع میله دوفلزی تولید شده در نمونه‌ها با نسبت حجم مذاب به جامد مختلف، نشان‌دهنده لایه‌های ترکیبات بین فلزی، بین Al / AISI 321 است. همان‌طور که دیده می‌شود مذاب آلومینیم قادر به انجام واکنش با مغزه فولادی و تشکیل فصل مشترک بوده، این فصل مشترک در اثر نفوذ اتم‌ها ایجاد شده و احتمالاً به دلیل تشکیل ترکیبات بین فلزی ایجاد شده در اثر واکنش اتم‌های نفوذی در فصل مشترک است. در شکل ۵-الف نقطه A شامل ۸۷/۰۹ درصد اتمی آلومینیم، ۹/۴۹ درصد اتمی آهن و ۳/۴۳ درصد اتمی کروم و نقطه B شامل ۹۱/۰۴ درصد اتمی آلومینیم، ۶/۸ درصد اتمی آهن و ۲/۱۶ درصد اتمی کروم است. با توجه به نسبت اتمی آنها و همچنین دیاگرام فاز آلومینیم-آهن (شکل ۲) لایه بین فلزی در شکل ۵-الف احتمالاً در منطقه FeAl<sub>3</sub> قرار دارد. در شکل ۵-ب منطقه نشان‌داده شده شامل ۶۹/۸۶ درصد اتمی آلومینیم، ۲۱/۰۴ درصد اتمی آهن، ۶/۰۱ درصد اتمی کروم و ۳/۰۹ درصد اتمی نیکل است. در مورد شکل ۵-ب با توجه به اطلاعات به‌دست آمده لایه بین فلزی احتمالاً در منطقه Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> قرار دارد. نقطه C در شکل ۵-ج شامل ۶۵/۹۶ درصد اتمی آلومینیم، ۲۷/۱۹ درصد اتمی آهن و ۶/۸۵ درصد اتمی کروم و نقطه D شامل ۶۵/۰۸ درصد اتمی آلومینیم، ۲۸/۵۳ درصد اتمی آهن و ۶/۳۹ درصد اتمی کروم است. با توجه به نمودارهای فاز Al-Fe و نسبت اتمی آهن و آلومینیم احتمال وجود ترکیب بین فلزی FeAl<sub>2</sub> در این مناطق است. در شکل ۵-د نقطه E شامل ۴۵/۱۵ درصد اتمی آلومینیم، ۴۰/۳۹ درصد اتمی آهن، ۹/۸۹ درصد



شکل ۵- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از تغییرات ترکیبات بین‌فلزی مشخص شده در فصل مشترک آنالیز الکترون بازگشتی از ترکیبات بین‌فلزی مشخص شده نمونه‌ها.  
 الف: نمونه ۱-۸۴۰، ب: نمونه ۲-۸۴۰، ج: نمونه ۳-۸۴۰ و د: نمونه ۴-۸۴۰

تماس بین مغزه فولادی و فلز مذاب، فرصت بیشتری برای انجام فرایندهای شیمیایی و نفوذی بین دو فلز فراهم می‌شود و در نتیجه، اتصال تقریباً خوبی ایجاد می‌شود و فصل مشترک بهبود می‌یابد. نسبت حجمی مذاب و مغزه جامد ( $V_m/V_s$ ) و دمای ریخته‌گری دو فاکتور اصلی هستند که می‌تواند بر زمان تماس بین مغزه جامد و مذاب اثر داشته باشد [۲۳].

وجود عناصری مانند کروم و نیکل که عدد اتمی بالایی دارند، منجر به کاهش ضریب نفوذ خواهد شد. به همین دلیل است که تشکیل ترکیبات بین فلزی و رشد آنها در این تحقیق محدود بوده است [۲۴]. در تحقیقات گذشته مشخص بود که در صورت آلیاژی نبودن فولاد مورد استفاده ضخامت بین فلزی بیشتر از این حالت است [۲۵].

### ۳-۳- سختی سنجی

نتایج به دست آمده از آزمون سختی سنجی ویکرز در جدول ۴ بیان شده است. نتایج آزمون سختی سنجی نشان می‌دهد که میزان سختی در هر ۴ نمونه با عبور از نواحی فلزات پایه و رسیدن به فصل مشترک و نواحی متأثر از نفوذ از هر دو فلز پایه افزایش یافته است. این امر به دلیل نفوذ اتمی و تشکیل ترکیبات فازهای جدید از جمله ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک است. با توجه به نتایج آزمون سختی سنجی، فولاد دارای سختی بیشتری نسبت به آلومینیم خالص بوده و سختی کمتری نسبت به فصل مشترک دارد. همچنین نمونه ۱-۸۴۰ و نمونه ۲-۸۴۰ به ترتیب بیشترین (HV ۳۷۹/۸۲) و کمترین سختی (HV ۲۵۷/۳۷) در فصل مشترک را دارند. دلیل این مسئله را می‌توان به وجود ترکیب بین فلزی  $FeAl_3$  در فصل مشترک نمونه ۱-۸۴۰ که سختی بیشتری نسبت به ترکیب بین فلزی  $Fe_2Al_5$  موجود در نمونه ۲-۸۴۰ دارد، ربط داد.

جدول ۴ - نتایج آزمون میکروسختی.

نمونه	سختی فولاد (HV)	سختی فصل مشترک (HV)	سختی آلومینیم خالص (HV)
۱-۸۴۰	۱۹۸/۶۵	۳۷۹/۸۲	۳۸/۶۱
۲-۸۴۰	۱۹۳/۸۹	۲۵۷/۳۷	۳۵/۲۳
۳-۸۴۰	۱۸۶/۰۸	۲۸۳/۴۸	۳۲/۷۱
۴-۸۴۰	۱۸۱/۲۹	۳۲۶/۰۸	۳۰/۳۴

تشکیل فصل مشترک متالورژیکی بین مغزه فلزی جامد و فلز مذاب، بر اساس نفوذ عناصر در یکدیگر شکل می‌گیرد که این نفوذ تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار دارد. بر اساس تحقیقات گذشته، عواملی که بر افزایش نفوذ تأثیر می‌گذارند، بر تشکیل فصل مشترک تأثیر مؤثری دارند [۲۱].

در ریخته‌گری مرکب آلومینیم/فولاد، حضور لایه اکسید بر سطح آلومینیم منجمد شده و یا هر لایه اکسید سطحی موجود بر سطح فولاد جامد، به عنوان سدی در برابر نفوذ اتم‌های موجود در طول فصل مشترک شناخته می‌شود. این لایه اکسید سطحی بر کشش سطحی مذاب و در نتیجه بر ترشوندگی تأثیرگذار است. ترشوندگی یکی از مهم‌ترین عوامل برای نفوذ بهتر عناصر و در نتیجه ایجاد اتصال متالورژیکی مناسب است. لایه اکسیدی باعث کاهش کشش سطحی مذاب می‌شود، به گونه‌ای که کشش سطحی مذاب با لایه اکسیدی، کمتر از کشش سطحی بدون لایه اکسیدی است [۲۲]. با توجه به دلایل نفوذی و شیمیایی اعلام شده، ظاهراً حضور اکسید فیلم بر روی سطح فولاد و آلومینیم، مانع از تشکیل فصل مشترک متالورژیکی قوی بین این دو فلز می‌شود و اتصال ضعیف و بافاصله در فصل مشترک دوفلزی ایجاد می‌شود؛ بنابراین، به نظر می‌رسد حذف یا کاهش ضخامت اکسید فیلم، می‌تواند باعث افزایش نفوذ و ایجاد یک فصل مشترک قوی و مناسب متالورژیکی بین دو فلز شود. البته باید توجه داشت که احتمال وجود اکسید فیلم بر روی سطح دو فلز، همچنان وجود دارد؛ ولی با انجام عملیاتی مانند صیقل و سنباده‌زنی، احتمال تشکیل اکسید فیلم بر روی سطح فولاد کاهش یافته یا به طور کامل از بین می‌رود. البته نمی‌توان گفت که اکسید فیلم در سطح دو فلز ایجاد نشده است. در حین اتصال آلومینیم به فولاد، اکسید فیلم روی سطح دو فلز ایجاد می‌شود، اما به دلیل ضخامت کم این لایه (حدود چند نانومتر)، قابل مشاهده نیست. همچنین، با توجه به مطالعات گذشته [۱۹، ۱۸]، احتمال تشکیل اکسید فیلم بر روی سطح فولاد و آلومینیم وجود دارد؛ اما با توجه به دلایلی که در ادامه بیان می‌شود، احتمالاً ضخامت این لایه روی مغزه کاهش می‌یابد و یا این احتمال وجود دارد که کاملاً از بین برود. در ابتدا با انجام عملیات مانند صیقلی و سنباده‌زنی، سعی در کاهش احتمال تشکیل اکسید فیلم بر روی سطح فولاد شد و به نظر می‌رسد که با این کار، ضخامت لایه اکسید فیلم روی سطح فولاد کاهش یافته است.

با توجه به زمان تماس کوتاه بین مغزه و مذاب فولادی و آلومینیم، فرایندهای شیمیایی و نفوذی بین این دو فلز به صورت کافی انجام نمی‌شوند و دمای مذاب به شدت کاهش می‌یابد، به طوری که این فرایندها به صورت کامل پایان نمی‌یابند [۱۹، ۱۸]. با افزایش زمان

## ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به روش ریخته‌گری مرکب دوفلزی فولاد/آلومینیوم با نسبت‌های حجمی مذاب به جامد مختلف تولید شده است و ریزساختار فصل مشترک آن بررسی شد که در زیر به برخی از مهم‌ترین نتایج آن اشاره شده است:

۱- با استفاده از فرایند ریخته‌گری مرکب و بدون پوشش و عملیات سطحی بر روی مغزه فولاد، تنها با مقدار زیاد نسبت حجمی مذاب به جامد می‌توان اتصال متالورژیکی مناسب بین دو فلز غیرهمجنس آلومینیوم و فولاد ایجاد کرد. با افزایش حجم مذاب در واقع انرژی گرمایی وارده به سیستم بیشتر می‌شود، پس به بیان دیگر با افزایش نسبت حجمی مذاب به جامد و یا افزایش دما در نسبت حجمی ثابت اتصال متالورژیکی صورت می‌گیرد.

۲- باتوجه به نتایج آنالیز EDS در فصل مشترک AISI 321 / Al ترکیبات بین فلزی شامل  $FeAl$ ،  $FeAl_2$ ،  $Fe_2Al_5$ ،  $FeAl_3$  تشکیل شد.

۳- با افزایش حجم مذاب نسبت به حجم جامد درصد بیشتری از حجم نمونه را آلومینیوم تشکیل داده و به دلیل چگالی کم نسبت به فولاد، فصل مشترک AISI 321 / Al در ریخته‌گری مرکب می‌تواند به‌عنوان یک جایگزین مناسب و بهینه در برخی کاربردهای صنعتی با مقاومت بالا و همچنین وزن کم مورد استفاده قرار گیرد.

۴- با افزایش نسبت حجمی مذاب به جامد، ضخامت فصل مشترک نمونه‌ها افزایش می‌یابد.

۵- نتایج ریزسختی سنجی نشان داد که مقدار سختی به ترتیب برای آلومینیوم خالص در محدوده ۳۰ تا ۴۰، برای فصل مشترک در محدوده ۲۵۰ تا ۴۰۰ و برای فولاد در محدوده ۱۸۰ تا ۲۰۰ ویکرز به دست آمد. بنابراین تشکیل ترکیبات بین فلزی سختی فصل مشترک توسط فرایند ریخته‌گری مرکب افزایش می‌یابد.

۶- بیشینه سختی در فصل مشترک نمونه ۱-۸۴۰ بوده که این افزایش سختی به دلیل بیشتر بودن حجم مذاب در این نمونه نسبت به سایر نمونه‌ها است که باعث نفوذ بیشتر عناصر و تشکیل ترکیب بین‌فلزی متفاوت شده است.

۷- وجود عناصر آلیاژی مانند کروم مانع نفوذ عنصر آلومینیوم شده و باعث می‌شود ضخامت فصل مشترک کمتر شود.

## مراجع

- bimetal produced by a compound casting, *J. Mater. Process. Technol.*, 2018, 258, 239-250.
- [3] Samandari M., Abrinia K., Akbarzadeh A., Bulaqi H. A., Faraji G., Properties and mechanism of Al/St bimetal tube bonding produced by cold spin-bonding (CSB) process, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2017, 70(10) 2673-2682.
- [۴] برادران مهرآباد هـ، دیواندری م، ثقفیان لاریجانی ح، اثر زمان و دما بر مشخصات فصل مشترک آلومینیوم خالص و فولاد ساده کربنی، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، ۱۳۹۷، ۷(۱) ۵۷-۷۰.
- [5] Tolaminejad B., Hoseini Athar M. M., Arabi H., Karimi Taheri A., Enhanced grain refinement of commercial pure copper using the ECAE of Al-Cu-Al tri-layer composite, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2016, 19(1) 254-259.
- [6] Heydari Vini M., Daneshmand S., Forooghi M., Roll bonding properties of Al/Cu bimetallic laminates fabricated by the roll bonding technique, *Technologies*, 2017, 5 32-42.
- [7] Hajjari E., Divandari M., Razavi S. H., Emami S. M., Homma T., Kamado S., Dissimilar joining of Al/Mg light metals by compound casting process, *Journal of Materials Science*, 2011, 46, 6491-6499.
- [۸] توسلی س، عباسی م، تهوری ر، بررسی تشکیل ترکیبات بین فلزی در ریخته‌گری مرکب دوفلزی مس-آلومینیوم، مواد پیشرفته در مهندسی، ۱۳۹۵، ۳۵(۲) ۱۱۵-۱۲۹.
- [9] Xu H., Liu C., Silberschmidt V.V., Pramana S.S., White T.J., Chen Z., Acoff V.L., Behavior of aluminum oxide, intermetallics and voids in Cu-Al wire bonds, *Acta Materialia*, 2011, 59, 5661-5673.
- [۱۰] توسلی س، عباسی م، تهوری ر، بررسی تشکیل ترکیبات بین فلزی روی استحکام و مقاومت الکتریکی دوفلزی Al-Cu تولید شده به روش ریخته‌گری استاتیک ترکیبی، مواد نوین، ۱۳۹۶، ۷(۳) ۲۷-۴۴.
- [11] Tavassoli S., Abbasi M., Tahavvori R., Controlling of IMCs layers formation sequence, bond strength and electrical resistance in AlCu bimetal compound casting process, *Materials & Design*, 2016, 108, 343-353.
- [12] Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials, ASTM E384-11, 2011.
- [13] Rabin B.H., Wright R.N., Synthesis of iron aluminides from elemental powders: Reaction mechanisms and densification behavior, *Metall. Trans. A*. 1991, 22, 277-286.
- [14] Fartushna I., Samelyuk A., Meleshevich K., Tikhonova I., Novichenko V., Bulanova M., An experimental investigation of phase transformations in the Al-Fe-V system, *Materials Characterization*, 2023, 205.
- [15] Shao L., Shi Y., Huang J. K., Wu S. J., Effect of joining parameters on microstructure of dissimilar metal joints between aluminum and galvanized steel, *Mater. Des.*, 2015, 66, 453-458.
- [16] Pontevischi S., Bosselet F., Barbeau F., Peronnet M., Viala J. C., Solid-liquid phase equilibria in the Al-Fe-Si system at 727 °C, *J. Phase Equilib. Diffus.*, 2004, 25, 528-537.
- [17] Springer H., Kostka A., Payton E. J., Raabe D., Kaysser-Pyzalla A., Eggeler G., On the formation and growth of intermetallic phases during interdiffusion between low-carbon steel and aluminum alloys, *Acta Mater.*, 2011, 59, 1586-1600.
- [18] Jiang W., Fan Z., Li C., Improved steel/aluminum bonding in bimetallic castings by a compound casting process, *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 226, 25-31.
- [19] Choe K., et al., Study of the interface between steel insert and aluminum casting in EPC, *Journal of Materials Science and Technology*, 2008, 24(1) 60-64.
- [1] Guo Z. L., Liu M., Bian X. F., Liu M. J., Li J. G., An Al-7Si alloy/cast iron bimetallic composite with super-high shear strength, *J. Mater. Res. Technol.*, 2019, 8, 3126-3136.
- [2] Jiang W. M., Li G. Y., Wu Y., Liu X. W., Fan Z. T., Effect of heat treatment on bonding strength of aluminum/steel

- [24] Ferro P., Fabrizi A., Bonollo F., Berto F., Influence of aluminum casting alloys chemical composition on the interaction with a 304L stainless steel insert, *Procedia Structural Integrity*, 2021, 33, 189-197.
- [25] Mesbahzadeh A., Abdolmaleki H., Seyedraoufi Z.S., Ahmadi A., Mirzavand K., Shajari Y., Bakhtiari H., Interfacial Investigation of St13/Molten Zn-5% Al and Corrosion Behavior of Formed Layer via Hot-Dip Process, *Surf Engin Appl Electrochem*, 2021, 57, 124-135.
- [20] Liu, T., et al. An investigation into interface formation and mechanical properties of aluminum-copper bimetal by squeeze casting, *Materials & Design*, 2016, 89, 1137-1146.
- [21] Dybkov V. I., Reaction Diffusion and Solid State Chemical Kinetics, *Trans Tech Publ*, 2010.
- [22] Locke C., Guggemos M., Gruber M., Maier L., Mayr L., Weiß T., Volk W., Günther D., Compound casting of aluminum with sheet steel in 3d sand casting using an inductive heating system, *Metals*, 2023, 13(2) 354.
- [23] Noguchi T., et al., Application of flow and solidification simulation in cast-in insertion processing, *International Journal of Cast Metals Research*, 2015, 18(4) 214-220.



IRANIAN FOUNDRYMEN'S  
SOCIETY

## Founding Research Journal

### Research Paper:

### Investigation of AISI 321/Al Interface in Compound Casting at 840 °C

Ali Bakhtiari<sup>1</sup>, Zahrasadat Seyedraoufi<sup>2\*</sup>

1. M.Sc., Department of Metallurgy and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran
2. Assistant Professor, Department of Materials Engineering and Metallurgy, Karaj Branch, Islamic Azad University Karaj, Iran.

\* Corresponding author: z.seyedraoufi@kiaou.ac.ir

#### Paper history:

Received: 19 November 2023  
Accepted: 28 January 2024

#### Keywords:

Compound casting,  
Intermetallic compounds,  
Interface,  
Metallurgical bonding,

#### Abstract:

Compound casting is a specialized manufacturing process used to create components or structures composed of two separate metals. In this research, bimetallic compounds consisting of AISI 321 and Co. were produced by the compound casting method. This process involves pouring molten metal onto a steel core. During the casting process, the molten metal surrounds the core and can solidify due to the dynamic interaction between the liquid and the steel. This agent and passivity create a unique relationship between two substances and as a result, intermetallic compounds are created. In this research, two key factors with the volume of the molten metal to the volume of the solid core have been investigated. These changes were analyzed using electron microscopy (SEM) with elemental point analysis (EDS). The results show that increasing the ratio of the volume of the melt to the solid is related to the increase of the thickness of the joint and the steel. When the ratio of melt to solid volume increased, the solidification time also increased. This increase in freezing time has an effect on the amount of steel penetration in the solid metal being frozen. The results of EDS analysis showed that the bimetallic master chapter consists of different intermetallic compounds, which include FeAl<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>, FeAl<sub>2</sub>, and FeAl. These compounds are formed due to the chemical reactions between steel and steel at the interface, and their presence is important in understanding the properties and behavior of the composite structure.

#### [Please cite this article using:](#)

Ali Bakhtiari, Zahrasadat Seyedraoufi, Investigation of AISI 321/Al Interface in Compound Casting at 840 °C, in Persian, *Founding Research Journal*, 2023, 7(1) 35-44.

DOI: 10.22034/FRJ.2024.422960.1187