

بررسی شکل‌گیری عیوب و لایه‌های بین‌فلزی در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم AA1100 به فولاد A441 AISI

حامد آقاجانی درازکلا*^۱، مجید الیاسی^۲، مرتضی حسین زاده^۳

۱- دانش‌آموخته، گروه مواد، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران

۲- استادیار، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۳- استادیار، گروه مواد، واحد آیت‌الله‌آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران

*h.aghajany@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۹۳/۰۷/۱۲، تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۹/۱۲)

چکیده

در این پژوهش، اثرات پارامترهای مختلف جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در شکل‌گیری ترکیبات بین‌فلزی، عیوب و مقاومت کششی اتصالات آلومینیوم AA1100 به فولاد A441 AISI مورد بررسی قرار گرفت. در سرعت‌های جوشکاری پایین و سرعت‌های دورانی بالا، لایه‌های بین‌فلزی شکل گرفته ضخیم‌تر از حالت‌های دیگر بود. ترکیب این لایه‌ها Al_6Fe و Al_3Fe_2 بود که در فصل مشترک دو قطعه کار شکل گرفتند. عمده عیوب شکل گرفته در این اتصالات عیوب تونلی و در سرعت دورانی پایین به دلیل تولید و توزیع حرارت نامناسب عیوب تونلی شکل گرفته با افزایش سرعت خطی و سرعت دورانی ابزار کوچک شدند. به دلیل تولید گرمای بیشتر در اثر افزایش عمق نفوذ ابزار عیوب داخلی کوچکتر شدند. با کنترل پارامترهای مکانیکی فرآیند و در سرعت دورانی ۸۰۰ دور بر دقیقه و سرعت خطی ۶۳ میلی‌متر بر دقیقه و عمق نفوذ ۰٫۲ میلی‌متر مستحکم‌ترین اتصال تولید شد که در حدود ۹۰ درصد فلز پایه‌ی آلومینیومی استحکام داشت.

واژه‌های کلیدی:

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، آلومینیوم AA1100، فولاد A441 AISI، ترکیبات بین‌فلزی، عیوب منطقه‌ی جوش

۱- مقدمه

انواع اتصالات غیرهمجنس که با روش‌های دیگر جوشکاری اتصال بین آنها سخت و یا دشوار بود، به راحتی انجام پذیر شد [۲-۴]. مواردی همچون ممزوج نشدن کامل دوفلز، اختلاف زیاد خواص حرارتی و متالورژیکی و یا شکل‌گیری لایه‌های ترد و شکننده بین‌فلزی سبب می‌شود تا اتصال مواد غیرهمجنس تنها با روش‌های اتصال دائم حالت جامد مانند FSW انجام گیرد.

جوش اصطکاکی اغتشاشی (FSW) اولین بار توسط موسسه جوش (TWI) جهت اتصال آلایژهای آلومینوم اختراع شده است که هم‌اکنون نیز به طور گسترده در صنعت بکار می‌رود [۱]. با توجه به ماهیت این فرآیند، با انتخاب صحیح پارامترهای جوشکاری، بدون ذوب فلزات پایه می‌توان اتصال مناسب با استحکام بالا تولید کرد. با توسعه‌ی این روش توسط محققان،

منطقه اغتشاش شکل می‌گیرند. تاناکا و همکاران [۹] به تحلیل اثر سرعت چرخش ابزار (در محدوده ۴۰۰ تا ۱۲۰۰ دور در دقیقه) بر روی درجه حرارت و استحکام اتصال آلومینیوم ۷۰۷۵ و فولاد نرم در سرعت ثابت جوشکاری ۱۰۰ میلیمتر بر دقیقه پرداختند. چن و کواکویچ [۱۰] اثر موقعیت پین ابزار را در توزیع دما و ریزساختار منطقه جوش در چرخش ابزار و سرعت خطی ثابت بر روی جوشکاری آلومینیوم ۶۰۶۱ و فولاد AISI 1018 بررسی کردند. در مقاله‌ای که توسط آنها به چاپ رسید عنوان شد که ترکیبات بین فلزی Fe_2Al_5 و Fe_4Al_{13} در اطراف ذرات فولادی گسترده شده در منطقه اغتشاش شکل گرفت. موحدی و همکاران [۱۱] با بررسی ترکیبات بین فلزی در اتصال آلومینیوم ۵۰۸۳ و فولاد St-12 یافتند که لایه‌هایی با قطر کمتر از ۲ میکرومتر بر روی کیفیت مکانیکی اتصال اثر مخربی ندارند. مشابه این نظریه توسط لی و همکارانشان [۱۲] عنوان شد. در دستاورد مشترکی که در پژوهش‌های جداگانه توسط آقایان ییلیمز و همکاران [۱۳] و نیز بوزی [۱۴] و همکارانش به دست آمد، مشخص شد که لایه‌های ضخیم بین فلزی (در حدود ۸ میکرومتر) که در مرز مشترک فلز آلومینیوم و فولاد در FSW، شکل می‌گیرند محل تولد و رشد انواع ترک‌ها بوده و سبب کاهش چشمگیر استحکام اتصال می‌شوند.

در تحقیقاتی که در زمینه‌ی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی انجام شده است، چند معادله برای توصیف اثر پارامترهای جوشکاری بر میزان حرارت وارد شده به منطقه جوش ارائه شده است. آقای تاناکا و همکاران [۹] و هیراتا و همکاران [۱۵] گزارش داند که رابطه گرما ورودی به منطقه‌ی اتصال در واحد طول در فرآیند FSW را می‌توان بدون استفاده از پارامترهای μ و P بصورت زیر بیان کرد:

$$\frac{Q}{V} = \frac{4\pi^2 \omega R^3}{3V} \quad (1)$$

که در آن Q گرمای شبکه بر حسب وات، μ ضریب اصطکاک، ω سرعت دورانی بر حسب دور بر دقیقه، P فشار جوشکاری بر حسب پاسکال و R شعاع شانه‌ی ابزار بر حسب میلیمتر است. V

در میان اتصالات غیرهمجنسی که توسط فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی انجام می‌گیرد، جوشکاری بین آلیاژهای آلومینیوم و فولاد را می‌توان یکی از پراهمیت‌ترین اتصالاتی دانست که می‌تواند کاربردهای صنعتی فراوانی داشته باشد. یکی از چالش‌های موجود در اتصال بین آلومینیوم‌ها و فولادها، شکل‌گیری لایه‌های ترد و شکننده Al_xFe_y است. این ترکیبات بسیار ترد و شکننده هستند و سبب کاهش بسیار زیاد استحکام اتصال بین دو فلز می‌شوند. کنترل شکل‌گیری این ترکیبات می‌تواند راهگشای تولید فراوان انواع مختلف آلومینیوم و فولاد به یکدیگر باشد. در بررسی‌های انجام شده در اتصال بین آلومینیوم و فولاد مشخص شد که حلالیت کم آهن در آلومینیوم سبب تشکیل لایه‌های بین فلزی ترد و شکننده مانند ترکیبات $FeAl$ ، $FeAl_3$ ، Fe_2Al_5 و Fe_4Al_{13} در منطقه جوش بخصوص در جوشکاری ذوبی می‌شود [۵]. با توجه به تفاوت خواص فیزیکی و حرارتی در اتصال نامتجانس آلومینیوم به فولاد انتظار می‌رود که اغتشاش و جریان مواد در منطقه جوش ناهمگن‌تر از جوشکاری متجانس بین دو ورق مشابه فولادی و یا آلومینیومی باشد. این پارامتر مهم منبع شکل‌گیری انواع مختلف عیوب در محل اتصال می‌شود که علاوه بر ایجاد لایه‌های ضخیم بین فلزی، باید تحت کنترل قرار گیرد.

در زمینه‌ی اتصال آلومینیوم به فولاد به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مقالات قابل توجهی منتشر شده است. اوزون و همکاران [۶] به بررسی ریز ساختار، سختی و خستگی خواص اتصال لب به لب آلومینیوم ۶۰۱۳ و فولاد ضد زنگ 10X5CrNi18 پرداختند. قوش و همکاران [۷] با جوشکاری بین آلومینیوم خالص و فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ پی به وجود Fe_3Al در مرز اتصال بردند. اتانابه و همکاران [۸] اثر سرعت چرخش و موقعیت پین ابزار را بر روی استحکام کششی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ و فولاد مورد بررسی قرار دادند. اتصال انجام شده توسط آنها ۸۶٪ استحکام کششی نهایی آلیاژ آلومینیوم پایه، استحکام داشت. آنها گزارش دادند که در زاویه‌های مختلف ابزار ترکیبات $FeAl$ ، $FeAl_3$ و Fe_2Al_5 در مرز

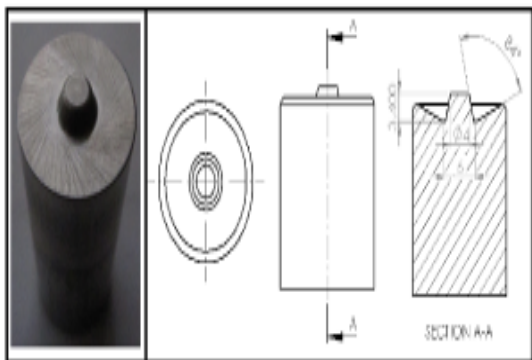
جدول (۱): ترکیب شیمیایی فلزات پایه [۲۲-۲۴]

فولاد A441 AISI						
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Al
0.3	0.8	0.04	0.01	0.3	0.25	98.7
آلومینیم AA1100						
Si	Cu	Mn	C	P	S	Fe
0.4	0.2	1.0	0.22	0.04	0.05	97

جدول (۲): خواص مکانیکی فلزات پایه [۲۲-۲۴]

خواص مکانیکی	فولاد A441 AISI	آلومینیم AA1100
σ_{UTS} (MPa)	580	90
σ_Y (MPa)	344	35
Elongation (%)	15	35
Hardness (HV)	270	38
ρ (Kg/m ³)	7800	2710

فرآیند جوشکاری توسط یک ابزار سخت که دارای پین مخروطی شکل و از جنس تنگستن بود، اجرا شد. قطر شانه‌ی ابزار ۲۰ میلی‌متر، قطر بزرگ بین ابزار ۶ میلی‌متر و قطر کوچک ابزار ۴ میلی‌متر بود. جهت دوران ابزار خلاف جهت گردش عقربه‌های ساعت بود و محور ابزار ۲ درجه انحراف نسبت به بردار نرمال صفحات داشت. برای جلوگیری از گرم شدن بیش از حد آلیاژ آلومینوم و کاهش سایش ابزار، ابزار جوشکاری به اندازه ۱/۳ میلی‌متر در درون آلومینوم قرار گرفت. ابزار فرآیند دارای سرعت‌های دورانی ۵۰۰، ۶۳۰، ۷۱۰ و ۸۰۰ دور بر دقیقه و سرعت خطی ۲۵، ۴۰، ۶۳ و ۸۰ میلی‌متر بر دقیقه بود. شکل هندسی ابزار مورد استفاده در این فرآیند در شکل (۱) مشاهده می‌شود.



شکل (۱): ابزار مورد استفاده در طول این پژوهش

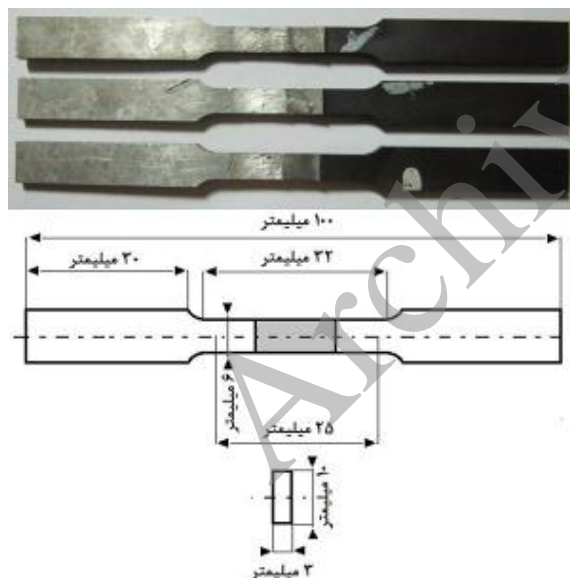
به سرعت خطی ابزار اشاره دارد که با واحد متر بر ثانیه معرفی می‌شود. در این پژوهش فشار واقعی فرآیند در جهت عمودی اندازه گیری نشد ولی بر اساس تحقیقات انجام شده می‌توان گفت که در عمق نفوذ ثابت ابزار، فشار جوشکاری اعمال شده ثابت می‌ماند [۱۶]. از طرف دیگر، ضریب اصطکاک در طول جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نیز تقریباً ثابت باقی می‌ماند [۱۷]. البته بعضی از محققان بر این باورند بدون در نظر گرفتن فشار جوشکاری و ضریب اصطکاک، گرمای وارد بر منطقه‌ی اتصال در واحد طول قابل حصول است. از آنجا که در فرآیند FSW، ابزار زمان کوتاهی جهت نرم کردن و حرکت مواد در اطراف پین را دارد، در سرعت دورانی کم، حداکثر دمای تولید شده در حین جوشکاری کاهش می‌یابد. بر همین اساس برای تغییر شکل نیاز به تنش جریان بیشتری است. در چنین شرایطی ابزار نمی‌تواند خط جوش را به اتمام برساند و نمی‌تواند مواد اطراف خود را در منطقه جوش یکی کند و در نتیجه عیوب درونی در محل اتصال شکل می‌گیرند [۱۸]. بسیاری از محققان بر این باورند که شکل گیری عیب تونلی در جوش حاصل تولید حرارت کم در طول فرآیند است [۱۹-۲۱].

با توجه به تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی اتصال آلیاژهای آلومینوم به انواع فولاد و دشوار بودن جوشکاری این دو فلز، می‌توان به این نتیجه رسید که توسعه‌ی ارزان و کاربردی این اتصالات به روش‌های نوین ضروری به نظر می‌رسد. بر همین اساس، هدف این مقاله بررسی اثرات پارامترهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی جهت تولید اتصال مناسب با کنترل مقدار لایه‌های بین فلزی و عیوب داخلی در اتصال آلومینوم AA1100 و فولاد A441 AISI می‌باشد.

۲- رویه آزمایش

در این تحقیق ورق‌های ۳ میلی‌متری آلومینوم AA1100 و فولاد A441 AISI توسط یک ماشین فرز معمولی بهم جوش داده شدند. خواص شیمیایی و مکانیکی فلزات مورد استفاده در این تحقیق در جداول (۱) و (۲) نشان داده شده است.

نتایج میانگین ۳ نمونه در این پژوهش گزارش شد که در شکل (۳) نشان داده شده است. مطالعات متالوگرافی با استفاده از میکروسکوپ نوری (OM) ساخت شرکت صایران مدل IMM.420 و میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM) مدل VEGA/TESCAN مجهز به سیستم الکترون ثانویه (SE) و تحت ولتاژ شتاب دهنده ۱۵ KV انجام گرفت. جهت بررسی ساختار و لایه های بین فلزی در منطقه جوش و در فصل مشترک دو فلز از آنالیزهای EDS و XRD استفاده شد. دستگاه XRD مورد استفاده در این پژوهش مدل D8-Advance ساخت شرکت Bruker AXS بود. تیوب تولید کننده پرتو ایکس در این دستگاه یک تیوب مسی بود که طول موج آن برابر با یک ممیز پنجاه و چهار آنگستروم بود. در حین آنالیز ولتاژ روی ۴۰ کیلو ولت و آمپراژ روی ۳۰ میلی آمپر تنظیم شده بود. جهت تشخیص فازهای بین فلزی، نمونه ها با طول و عرض ۳ میلیمتر آماده سازی شدند.



شکل (۳): نمونه های آزمون کشش

۳- بحث و نتایج

۳-۱- اثر سرعت دورانی ابزار

برای بدست آوردن یک اتصال مناسب مطالعه بر روی شرایط تشکیل لایه های بین فلزی و عیوب داخلی جوش و ارتباط آنها با

قبل از قرارگیری ورق ها در درون قید و بند جوشکاری، سطح تماس دو ورق با سمباده صاف و اکسید زدائی شد. در طراحی فرآیند آزمایش، آلومینیوم به عنوان ناحیه ی پسر و فولاد به عنوان ناحیه ی قسمت پیشرو در قید و بند جوشکاری قرار گرفتند. نمایی از قرارگیری ورق ها در قید و بند جوشکاری در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): نحوه ی قرارگیری ورق ها در قید و بند جوشکاری

قابل ذکر است که در سرعت های دورانی کمتر از ۵۰۰ دور در دقیقه، فرآیند جوش قابل انجام نبود و در دورهای بالای ۸۰۰ دور در دقیقه نیز به دلیل ارتعاش بیش از حد ابزار، فرآیند جوشکاری قابل انجام نبود. بنابراین سرعت های دورانی ابزار در محدوده ۵۰۰ تا ۸۰۰ دور در دقیقه انجام شد. از طرف دیگر با توجه به امکانات ماشین جوشکاری، نمونه هایی با سرعت های خطی مختلفی جوشکاری شدند. در سرعت های خطی بالاتر از ۸۰ میلیمتر در دقیقه عمدتاً بین ابزار شکسته می شد و کمترین سرعت خطی دستگاه نیز ۲۵ میلیمتر در دقیقه بود. با توجه به شرایط مذکور در این پژوهش، سرعت خطی ابزار بین ۲۵ تا ۸۰ میلیمتر در دقیقه انتخاب شد.

به منظور بررسی رفتار منطقه ی جوش در آزمون کشش، نمونه های آزمون کشش عمود بر خط جوش مطابق با استاندارد ASTM/E8-M03 آماده سازی شدند. از هر ورق جوشکاری شده ۳ نمونه تست کشش توسط دستگاه وایرکات بریده شد و

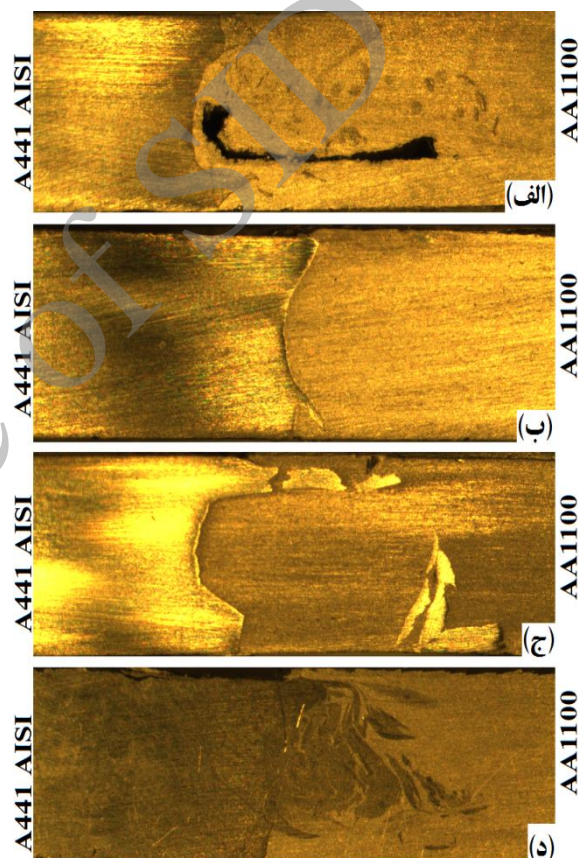
می‌شود. این مساله سبب ایجاد تغییر شکل پلاستیکی بیشتر، بخصوص در سمت فلز پایه آلومینیمی می‌گردد. بر همین اساس می‌توان گفت که در سرعت دورانی ۶۳۰ دور بر دقیقه تولید حرارت بیشتر می‌شود. به دنبال این پدیده، نفوذ گرما به قسمت‌های زیرین اتصال نیز بیشتر شده و سبب ممزوج شدن بهتر دو فلز پایه می‌گردد. در این سرعت دورانی اختلاط بین دو فلز زیاد نیست، ولی ضعف پر شدن منطقه اغتشاش بطور کامل از بین رفته است (شکل ب).

در سرعت دورانی ۷۱۰ (شکل ج)، تولید حرارت بازهم بالاتر رفته و سبب نرم‌تر شدن لبه فولادی در سطح تماس با ابزار میشود. چسبندگی بین ابزار و لبه خمیری شده فولادی سبب می‌گردد تا قسمتی از این لبه بصورت تکه‌هایی ریز جدا شوند و در اثر چرخش ابزار در منطقه اغتشاش پراکنده گردند. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، به علت تولید گرما و کار مکانیکی بیشتر توسط شانه‌ی ابزار در ناحیه‌ی بالایی اتصال، کشیدگی فولاد به سمت آلومینیم از آن ناحیه شروع شده است. نوارهای نازک فولادی که در قسمت پایین پنجره‌ی اتصال دیده می‌شود، حاصل فورج مواد به سمت پایین است. در سرعت دورانی ۷۱۰ دور بر دقیقه مقدار گرما به اندازه‌ای نبوده است که ناحیه‌ی گسترده‌ای از فولاد را تحت تاثیر قرار دهد. به همین دلیل تنها ناحیه‌ی نازکی از فولاد تحت تاثیر تغییر شکل پلاستیکی و حرارت قرار گرفت. در سرعت دورانی ۸۰۰ دور بر دقیقه مقدار حرارت ورودی به محل اتصال در مقایسه با سرعت‌های دورانی قبل بیشتر شد. این افزایش گرما سبب شده تا ناحیه‌ی وسیع‌تری از فولاد خمیری شود. در اثر این پدیده، تکه‌های بیشتری از فولاد به درون منطقه اغتشاش نفوذ کرده و علاوه بر ایجاد ترکیبات لایه‌ای، ساختار شبه کامپوزیتی را پدید آورند. تصویر تهیه شده توسط SEM از منطقه اغتشاش که در سرعت دورانی ۸۰۰ دور بر دقیقه تولید شده است در شکل (د) به نمایش در آمده است.

مشابه با رفتار فوق، شکل‌گیری لایه‌های بین‌فلزی نیز با تغییرات گرمای ورودی به محل اتصال تغییر می‌کند. بطور کلی با افزایش

مقدار گرمای ورودی به محل اتصال برای هر وضعیت جوشکاری ضروری به نظر می‌رسد.

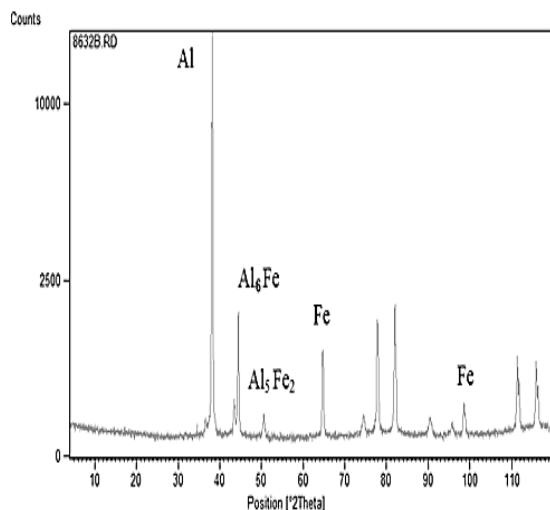
بنابراین، برای ایجاد یک اتصال بی نقص در فصل مشترک آلومینوم AA1100 و فولاد A441 AISI، نیاز به دستیابی گرمای بهینه ورودی احساس می‌شود. شکل (۴) نمای برش خورده‌ی عرضی از محل اتصال جوش‌هایی که با سرعت خطی ۸۰ میلیمتر بر دقیقه و سرعت‌های دورانی مختلف به هم پیوند خورده‌اند را نشان می‌دهد.



شکل (۴): نمای برش خورده عرضی اتصالی که با سرعت دورانی (الف): ۵۰۰، (ب): ۶۳۰، (ج): ۷۱۰ و (د): ۸۰۰ دور بر دقیقه بهم جوش داده شدند

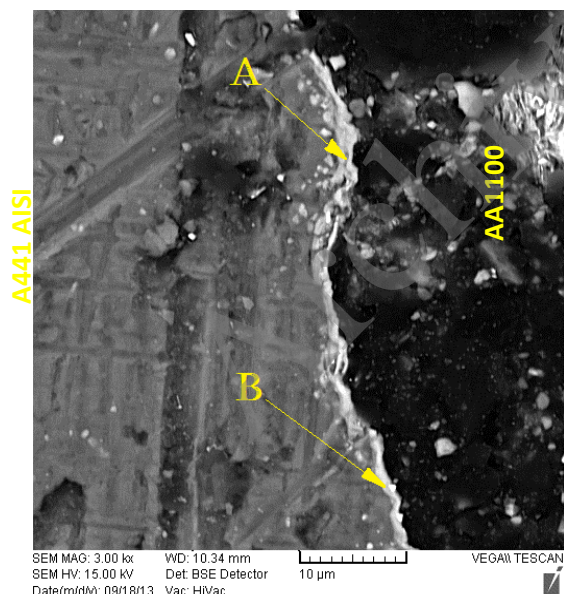
همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، در اتصالی که در سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه تولید شد (شکل الف)، حفره‌ی کرمی شکل، در قسمت زیرین محل اتصال شکل گرفته است. علت این پدیده را می‌توان در تولید و توزیع کم حرارت دانست. با افزایش سرعت دورانی، گرمای بیشتری توسط شانه ابزار تولید

نشان می دهد.



شکل (۶): نتایج آنالیز XRD از لایه‌های بین فلزی شکل گرفته در سرعت دورانی ۶۳۰ دور بر دقیقه

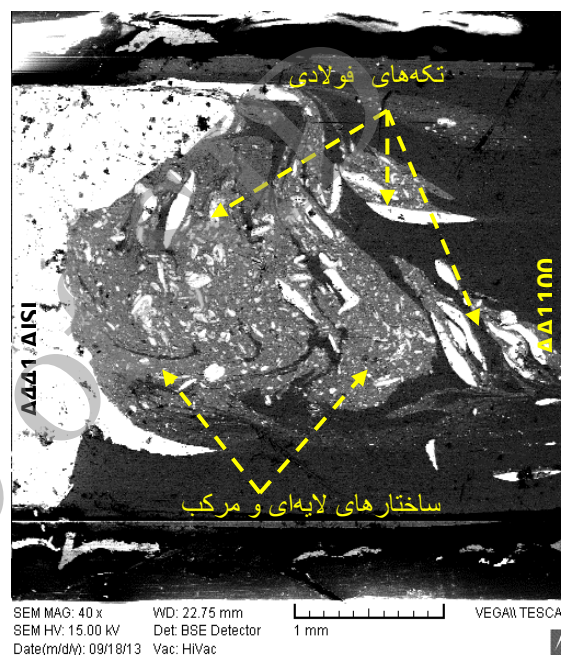
نقاط مورد آنالیز در هنگام تصویر برداری SEM از خط جوش در شکل (۷) نشان داده شده است. این نقاط با حروف A و B در شکل مشخص شده‌اند که ترکیب شیمیایی این نقاط Al_6Fe بود.



شکل (۷): لایه‌ی بین فلزی شکل گرفته در سرعت دورانی ۶۳۰ دور بر دقیقه

همانطور که در شکل مشاهده می‌شود این ترکیب بین فلزی را می‌توان بصورت یک لایه‌ی نازک، باریکی متفاوت از فلز پایه آلومینیومی و فولادی را دید که در بین دو فلز قرار گرفته است.

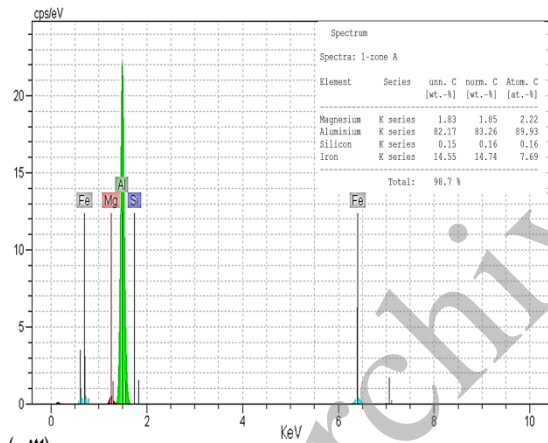
دما تمایل فلز آلومینیوم برای واکنش با آهن جهت تولید فازهای ترکیبی با ساختار شیمیایی Al_xFe_y بیشتر می‌شود [۲۵]. این ترکیبات Al_xFe_y یا همان ترکیبات بین فلزی، ساختارهای ترد و شکننده‌ای هستند که دارای سختی زیادتری نسبت به هر دو فلز پایه‌ی آلومینیومی و فولادی می‌باشند. این ترکیبات بطور عمده در فصل مشترک بین دو فلز پایه شکل می‌گیرند [۲۵].



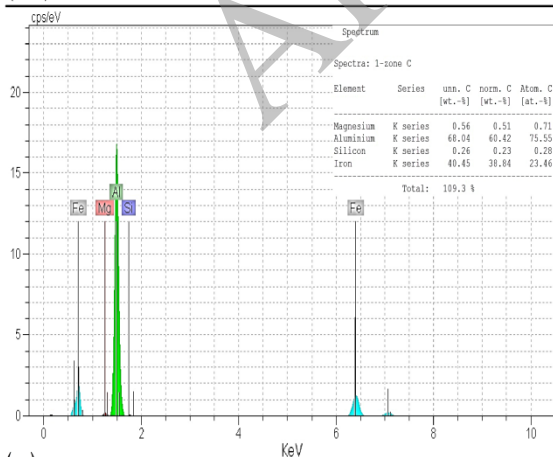
شکل (۵): تصویر SEM از محل اغتشاش اتصالی که با سرعت دورانی ۸۰۰ دور بر دقیقه جوشکاری شد

با افزایش سرعت دورانی در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، گرمای وارد شده به محل اتصال افزایش می‌یابد و بر همین اساس واکنش بین آلومینیوم و فولاد زیاد می‌شود. بطور کلی با افزایش سرعت دورانی در منطقه‌ی اتصال، از ۶۳۰ به ۸۰۰ دور در دقیقه، قطر لایه‌ی بین فلزی بیشتر می‌شود. قطر این لایه‌ها در اتصالاتی که با سرعت دورانی ۶۳۰، ۷۱۰ و ۸۰۰ دور در دقیقه بهم جوش داده شدند به ترتیب ۱، ۲ و ۴ میکرومتر است. پس از آنالیز در فصل مشترک دو ورق آلومینیوم و فولاد مشخص شد که ترکیب شیمیایی این لایه‌ها Al_6Fe و Al_5Fe_2 است. شکل (۶) نمونه‌ای از آنالیز XRD را در مرز اتصالی که در سرعت دورانی ۷۱۰ دور در دقیقه جوشکاری شده بود را

این رخداد سبب ایجاد ترکیباتی می‌شود که در آنها درصد اتمی آلومینیم بیشتر از آهن است. از طرفی دیگر جهت پیشروی رشد عمقی این لایه‌ها به شکل منظم از سمت فلز پایه فولادی به سمت فلز پایه آلومینیومی است. این در حالی است که در سرعت دورانی ۷۱۰ و ۸۰۰، ترکیب لایه‌ی بین‌فلزی شکل گرفته در فصل مشترک ورق‌ها Al_5Fe_2 بود. تولید حرارت و دوران بیشتر سبب شد تا شکل‌گیری این لایه‌های بین‌فلزی با تناسب شیمیایی بیشتری از آلومینیوم و آهن ایجاد شود. این مساله بیانگر میل بیشتر آلومینیوم به ترکیب با فولاد در دماهای بالاتر است. نقاطی که ترکیب شیمیایی آنها توسط آنالیز EDS مورد بررسی قرار گرفتند در شکل (۸) و نتایج حاصل از آزمون EDS در شکل (۹) نشان داده شده‌اند.



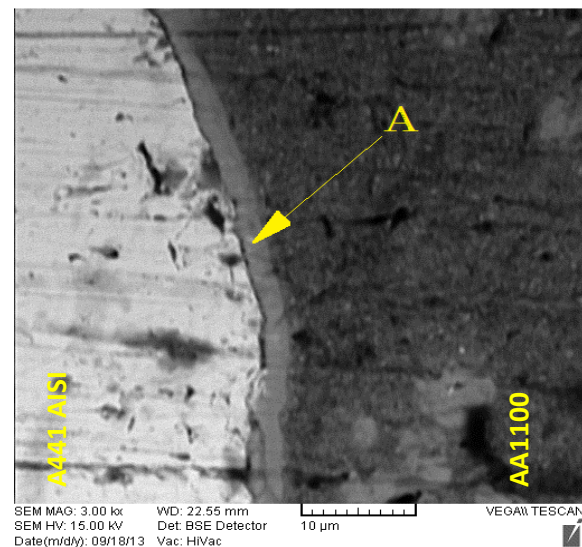
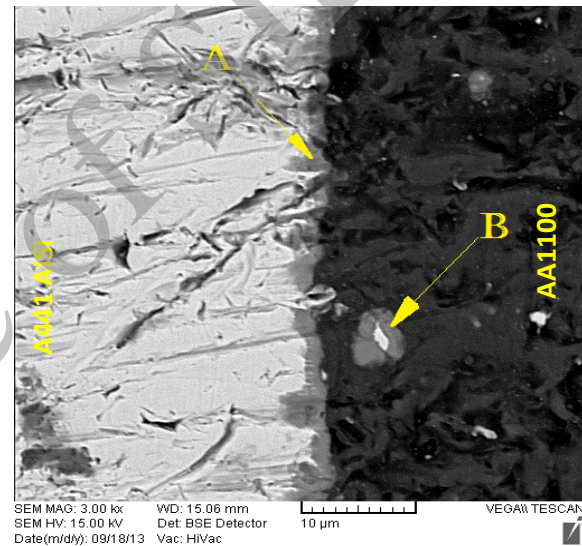
(الف)



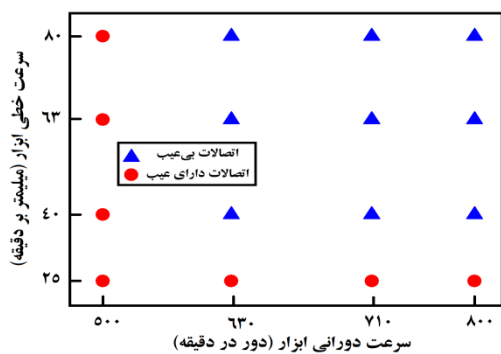
(ب)

شکل (۹): نتایج آنالیز EDS در جوشکاری با سرعت دورانی ۷۱۰ دور بر دقیقه (الف): در نقطه A، (ب): در نقطه B شکل (۸)

این لایه دارای دو وجه است. سمتی که با فلز AA1100 مشترک است دارای انحنا نرم و شکست کم است. اما ضلع مشترکی که با فلز پایه فولادی است دارای شکل دندانه‌ای می‌باشد. محل‌های فرورفتگی که در لبه فولاد قرار دارند، در واقع محل تولد جوانه‌های ترکیبات بین‌فلزی هستند که پس از جذب اتم‌های آلومینیم و فولاد در دمای بالا در جهت‌های طولی و عرضی رشد می‌کنند. به دلیل آنکه دمای فولاد در حین جوشکاری خیلی بالا نمی‌رود، مقدار زیادی از اتم‌های فولاد به درون این جوانه‌ها نفوذ نمی‌کنند ولی اتم‌های آلومینیوم به درون محل جوانه زنی نفوذ کرده و سبب قطور شدن این لایه‌ها می‌شوند.



شکل (۸): لایه‌ی بین‌فلزی شکل گرفته (الف): در سرعت دورانی ۷۱۰ دور بر دقیقه (ب): در سرعت دورانی ۸۰۰ دور بر دقیقه

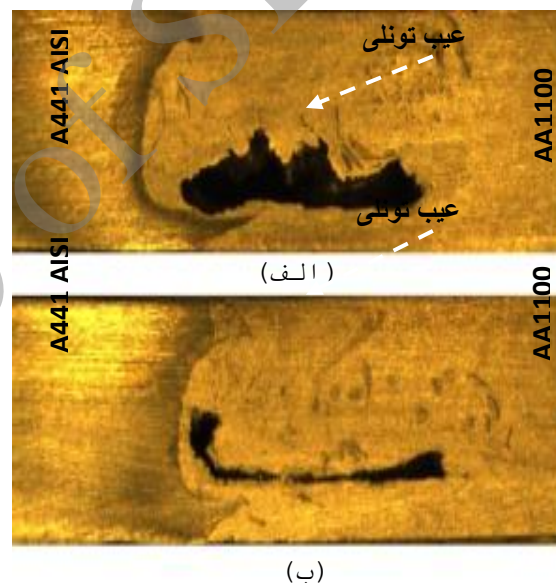


شکل (۱۱): نمودار شکل‌گیری عیوب بر اساس سرعت دورانی و خطی ابزار

همانطور که در شکل مشخص است با وجود تغییرات گرمای ورودی ابزار که ناشی از تغییر سرعت دورانی است، تمامی اتصالاتی که در سرعت خطی ۲۵ میلیمتر در دقیقه به یکدیگر جوش داده شده‌اند، دارای عیب می‌باشند. با افزایش سرعت خطی و افزایش حجم ورودی ماده خمیری از جلوی ابزار به درون منطقه‌ی اغتشاش این عیوب بر طرف می‌شوند. به علت تولید حرارت کم در سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه تنها ابعاد این عیوب کوچکتر می‌شوند ولی این عیوب از بین نمی‌روند. ارتباط سرعت خطی بر روی شکل‌گیری لایه‌های بین‌فلزی، کمی با ارتباط آن با عیوب داخلی اتصال متفاوت است. حلقه‌ی اتصال بین سرعت خطی با لایه‌های بین‌فلزی، نرخ خنک‌شوندگی و حرکت منبع گرما است. در اتصال بین آلومینیم و فولاد، توزیع حرارت فاکتوری اساسی همانند تولید حرارت است. سرعت خطی اثر مستقیم بر روی توزیع حرارت بخصوص در سمت فلز پایه آلومینیم می‌گذارد. افزایش سرعت خطی سبب گذر زود منبع حرارت از منطقه اغتشاش می‌شود که در پی آن افزایش نرخ خنک‌شوندگی و کاهش حرارت حداکثر به وجود می‌آید. در سرعت‌های خطی پایین، حرارت تولید شده در سمت آلومینیم فرصت بیشتری خواهد داشت تا به سمت فولاد نفوذ کند و بر همین اساس ترکیب ترکیب اتم‌های آلومینیم و فولاد بیشتر شده و سبب افزایش قطر لایه‌های بین‌فلزی در لبه اتصال می‌شود. علت این مساله در زمان کافی برای نفوذ و فعل و انفعالات شیمیایی بین اتم‌های آلومینیم و آهن است. در این وضعیت، بدون توجه به سهم قسمت‌های مختلف ابزار در تولید

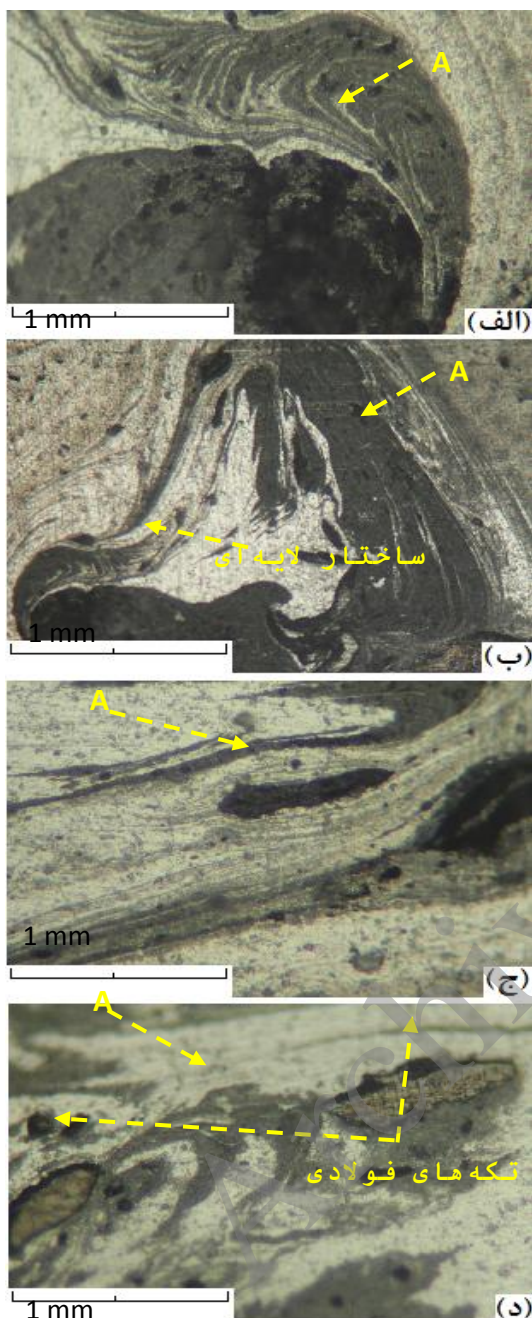
۳-۲- اثر سرعت خطی جوشکاری

همانند سرعت دورانی ابزار، حرکت خطی روبه جلوی ابزار در طول فرآیند نیز سبب تغییرات جریان مواد و شکل‌گیری عیوب و یا لایه‌های بین‌فلزی می‌شود. در حالت کلی اثر حرکت خطی ابزار کمتر از تغییرات ناشی از سرعت دورانی ابزار است. فورج مواد از جلوی ابزار به درون محل اتصال و تغییرات نرخ خنک‌شوندگی مهمترین اثرات سرعت خطی بر روی منطقه‌ی اغتشاش هستند. شکل (۱۰) تصویر میکروسکوپ نوری را از سطح مقطع عرضی جوش نشان می‌دهد که در سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه حاصل شده است.



شکل (۱۰): اتصال ایجاد شده در سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه و سرعت خطی (الف): ۲۵ میلیمتر به دقیقه و (ب): ۸۰ میلیمتر بر دقیقه

همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت خطی ابزار، از سرعت خطی ۲۵ میلیمتر بر دقیقه تا سرعت ۸۰ میلیمتر بر دقیقه فورج مواد از سمت جلو ابزار به درون محل اتصال بیشتر شده و سبب پر شدن حفره‌ی تونلی شکل گرفته می‌شود. با ثابت در نظر گرفتن سرعت دورانی، این روند در اتصالاتی که دارای عیوب هستند، بهتر قابل درک است. شکل (۱۱) نمودار تغییرات عیوب محل اتصال را بر اساس سرعت دورانی و خطی ابزار نشان می‌دهد.



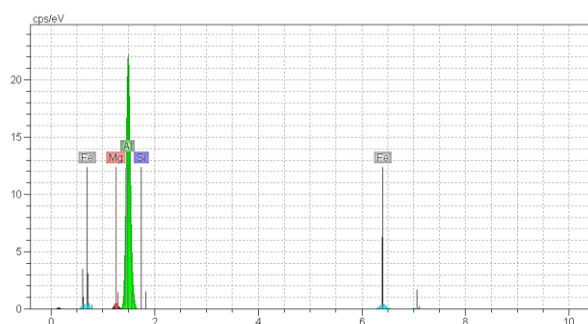
شکل (۱۲): ساختارهای لایه‌ای در شکل گرفته در سرعت‌های خطی (الف):

۲۵، (ب): ۴۰، (ج): ۶۳ و (د): ۸۰ میلی‌متر بر دقیقه

با افزایش سرعت خطی، ابزار فرآیند با سایش لایه‌ی بیرونی قطعه کار فولادی در صفحه‌ی مشترک دو قطعه کار، تکه‌های ریز فولاد را از فلز پایه جدا کرده و آنها را در بستر منطقه‌ی اغتشاش پراکنده می‌کند. در سرعت دورانی ثابت، افزایش سرعت خطی ابزار تنها بر روی ابعاد فازهای بین‌فلزی و قطر لایه‌ی بین‌فلزی در محل اتصال تاثیر دارد ولی اثر چندانی بر روی

حرارت می‌توان ترکیبات بین‌فلزی در منطقه بالایی اتصال، وسط و ریشه جوش دید. با افزایش سرعت خطی ابزار و بیشتر شدن نرخ خنک‌شدن شونده‌ی ابعاد منطقه‌ی بین‌فلزی بطور قابل ملاحظه کاهش می‌یابد و تشکیل منطقه بین‌فلزی در ناحیه‌ی بالایی جوش اتفاق می‌افتد [۲۶]. علت این پدیده در سهم بیشتر شانه ابزار در تولید حرارت است که سبب می‌شود ترکیبات بین‌فلزی در آن منطقه شکل گیرند. در سرعت جوش کم، کل ضخامت قطعه جوش تحت چرخه دمایی بالایی قرار دارد ولی از آنجا که در FSW بخش عمده‌ای از حرارت توسط شانه ابزار تولید می‌شود، در سرعت جوشکاری بالاتر تشکیل لایه‌های بین‌فلزی محدود به نزدیک‌ترین منطقه به شانه ابزار می‌شود. با حرکت سریع ابزار، فلزات خمیری فرصت کافی جهت واکنش دادن با یکدیگر را ندارند و در اثر سریع سرد شدن منطقه اغتشاش، ترکیبات لایه‌ای شکل می‌گیرد که در اطراف آن نیز ریز ساختار فلزات دانه‌بندی ظریف پیدا می‌کنند. این مساله بیانگر این پدیده است که لایه‌های بین‌فلزی شکل گرفته در منطقه اغتشاش همانند لایه‌هایی که در صفحه‌ی مشترک دو فلز شکل می‌گیرند، دارای ترکیبات غنی از آلومینیم و فولاد نیستند. شکل (۱۲) ساختارهای لایه‌ای آلومینیم و فولاد را نشان می‌دهد که در سرعت دورانی ۸۰۰ دور در دقیقه و سرعت‌های خطی مختلف شکل گرفته‌اند. نواحی تیره رنگ دارای دانه‌بندی‌های فلزی ریز هستند. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود با افزایش سرعت خطی از ۲۵ تا ۸۰ میلی‌متر در دقیقه وسعت این مناطق کوچکتر می‌شوند. تحلیل EDS از این لایه‌های تیره رنگ نشان می‌دهد که این مناطق Al_6Fe هستند. نقاطی که دارای ترکیب شیمیایی Al_6Fe هستند در شکل (۱۲) با حرف A نشان داده شده‌اند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که لایه‌های بین‌فلزی در قسمت‌هایی از ناحیه اغتشاش بصورت پیوسته شکل گرفته‌اند. گستردگی این لایه‌ها در بعضی از قسمت‌های منطقه اغتشاش به اندازه‌ای است که اطراف تکه‌های ریز فولادی را نیز محاصره کرده‌اند.

نتایج حاصل از آنالیز EDS از درصد عناصر آلیاژی لایه های بین فلزی اطراف ذرات فولادی در شکل (۱۴) نشان داده شده است.

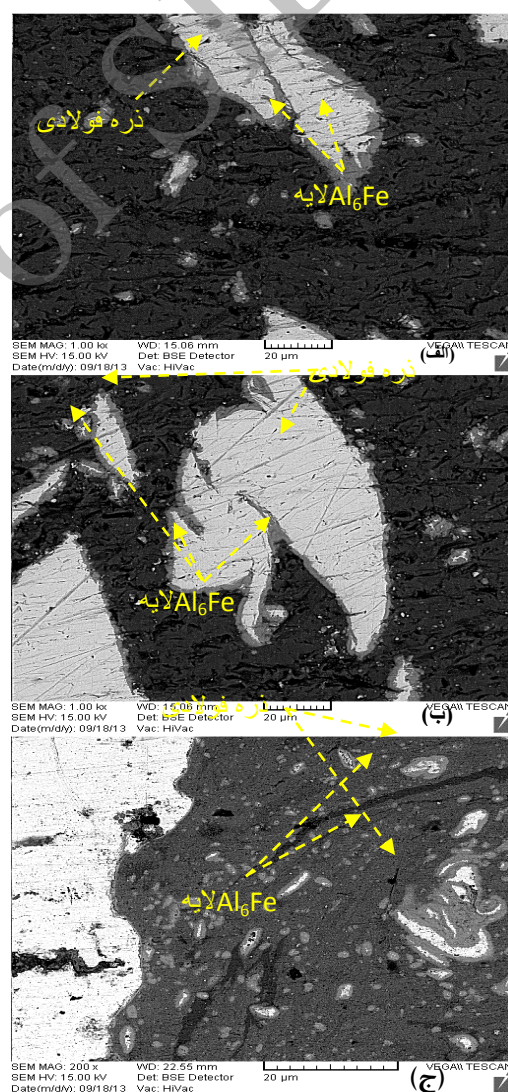


شکل (۱۴): آنالیز EDS از لایه ی بین فلزی اطراف تکه فولادی

۳-۳- اثر عمق نفوذ ابزار

عمق نفوذ ابزار به مقدار فرورفتگی شانه ابزار از سطح قطعه کار و یا فاصله کف پین ابزار از انتهای قطعه کار، در هنگام شروع پیشروی ابزار تعریف می شود. با افزایش عمق نفوذ ابزار، تعامل بین شانه ابزار و قطعه کار افزایش می یابد که در نتیجه ی آن گرمای اصطکاکی تولید شده بیشتر شده و به دنبال آن نرم سازی کافی مواد اتفاق می افتد [۲۷]. برخی از محققین این رابطه را با مدل سازی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نشان دادند [۱۹، ۲۷-۲۸]. همانطور که در معادله ی (۱) ذکر شد، معادله ی گرمای اصطکاکی در فرایند FSW به فشار جوشکاری وابستگی خطی دارد. به علت ارتباط مستقیم و خطی بین دو پارامتر فشار جوشکاری و گرمای ورودی به منطقه ی اتصال در این معادله، این استنباط بدیهی خواهد بود که با افزایش فشار جوشکاری، گرمای حاصل از اصطکاک نیز زیاد خواهد شد. در حقیقت، افزایش فشار جوشکاری سبب بیشتر شدن تعامل قسمت های مختلف ابزار با قطعه کار می شود که نتیجه ی آن تولید بیشتر گرمای اصطکاکی و تغییر شکل پلاستیک بیشتر مواد اطراف ابزار است [۱۶]. فشار جوشکاری وابسته به عمق نفوذ ابزار است و با افزایش عمق نفوذ ابزار به درون محل اتصال، فشار جوشکاری نیز بیشتر می شود [۲۹]. تمامی عوامل فوق سبب تسهیل حرکت مواد در اطراف پین ابزار می شوند و باعث از بین

نوع آن اثری ندارد. تقریباً یک رابطه خطی بین کاهش ضخامت لایه ی بین فلزی و افزایش سرعت جوشکاری وجود دارد که در آن با افزایش سرعت خطی ابزار قطر لایه ی بین فلزی کاهش می یابد و با کاهش سرعت خطی قطر لایه ی بین فلزی در فصل مشترک دو ورق افزایش می یابد. شکل (۱۳) مناطق Al_6Fe گرفته در اطراف تکه های فولادی را نشان می دهد که توسط SEM تهیه شده است. همانطور که مشاهده می شود با کاهش سرعت دورانی، اندازه ذرات فولادی کوچکتر می شود و لایه ی بین فلزی شکل گرفته در اطراف این ذرات نیز نازکتر می شوند.

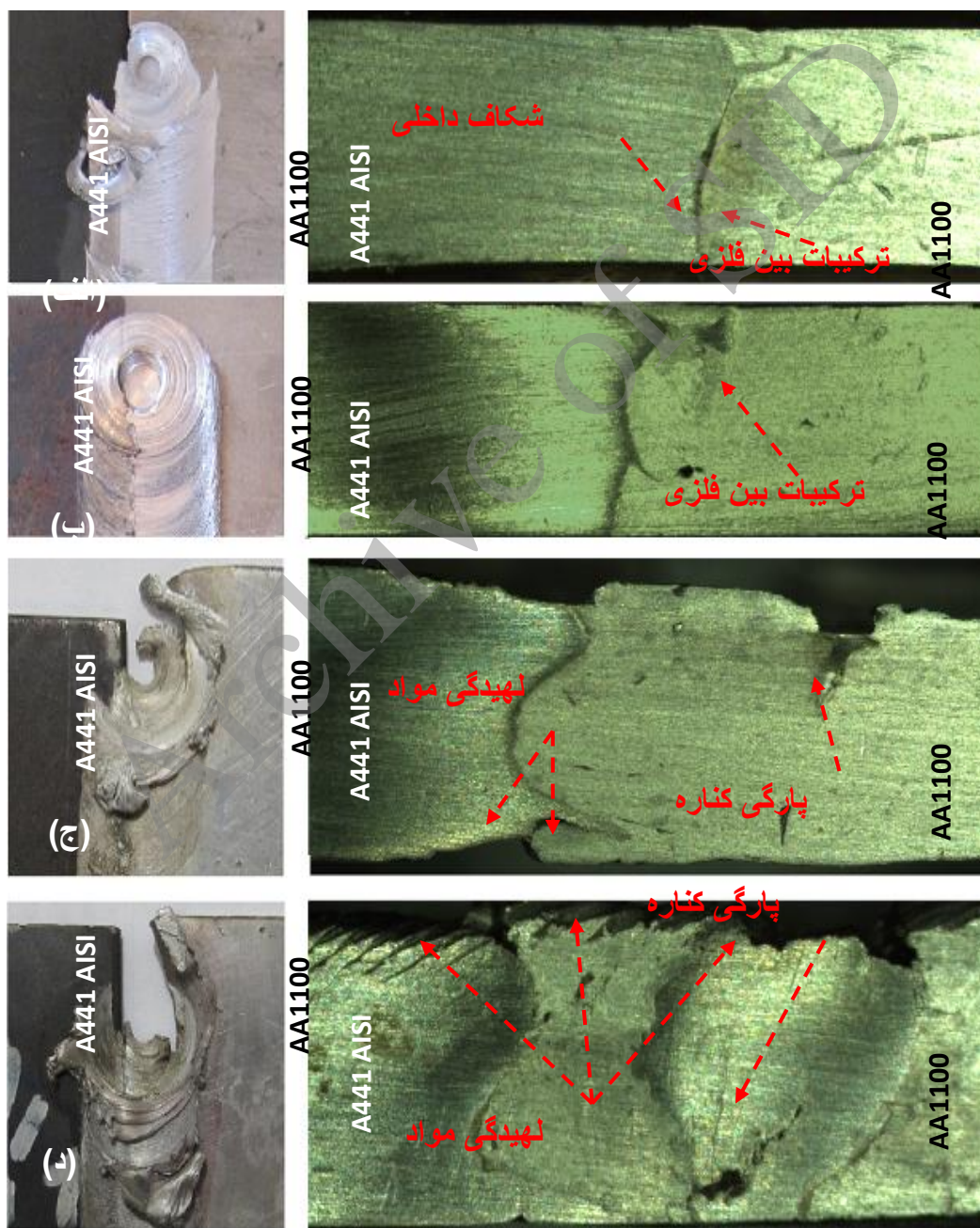


شکل (۱۳): لایه ی بین فلزی Al_6Fe شکل گرفته در سرعت دورانی (الف):

۸۰۰، (ب): ۷۱۰ و (ج): ۶۳۰ دور در دقیقه

و کنترل فشار اعمال شده به لحاظ کمی ممکن نبود. ولی با کنترل عمق نفوذ ابزار به کنترل کیفی فشار کاربردی پرداخته شد. آزمون های انجام شده در این قسمت با سرعت دورانی ۷۱۰ دور در دقیقه و سرعت خطی ۶۳ میلیمتر بر دقیقه انجام شد. شکل (۱۴) تصویر مقطع عرضی و سطح جوش را نشان می دهد که توسط دوربین VMM در عمق های نفوذ متفاوت گرفته شد.

رفتن عیوب تونلی می شوند. با این حال مقدار نفوذ ابزار نباید بیش از حد شود. با توجه به تولید حرارت بیشتر از اندازه، تعامل زیاد که همراه با فشار عمودی باشد در ناحیه جوش سبب فرار مواد به سمت خارج منطقه اتصال و تشکیل منطقه گسترده ای از ترکیبات بین فلزی در منطقه اغتشاش می شود. با افزایش عمق نفوذ ابزار، افزایش بار محوری و در نتیجه فشار اعمال شده در طول جوشکاری افزایش می یابد [۱۹]. در این تحقیق اندازه گیری



شکل (۱۴): پنجره ی اتصالی که در عمق نفوذ (الف): ۰/۱ میلیمتر، (ب): ۰/۲ میلیمتر، (ج): ۰/۴ میلیمتر و (د): ۰/۶ میلیمتر جوشکاری شد

قسمت‌های پایینی منطقه اغتشاش ایجاد شدند و بیانگر تغییرات غیر یکنواخت همزمان با فشار در منطقه‌ی اغتشاش می‌باشند.

۳-۴- استحکام کششی نهایی

نتایج حاصل از آزمون کشش در شکل (۱۵) نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است با افزایش سرعت دورانی، استحکام کششی محل اتصال افزایش می‌یابد. بیشینه مقدار استحکام در اتصالات جوشکاری شده برابر با ۹۰ درصد فلز پایه‌ی آلومینیومی بود که در سرعت دورانی ۸۰۰ دور در دقیقه و سرعت خطی ۶۳ میلی‌متر در دقیقه حاصل شد و کمینه‌ی آن ۳۰ درصد فلز پایه‌ی آلومینیوم بوده است. در تمامی نمونه‌های آزمون کشش، محل شکست در قسمت آلومینیم قرار داشت. با توجه به موارد مشاهده شده می‌توان به این نتیجه رسید که محل شکست در آزمون کشش وابسته به ساختار کریستالی و عیوب موجود در محل اتصال است. استحکام اتصالاتی که در سرعت دورانی ۵۰۰ به همدیگر جوشکاری شدند دارای کمترین استحکام تسلیم در مقایسه با دیگر اتصالات هستند. علت این نوع رفتار وجود عیوب تونلی و گرمی شکل در قسمت‌های زیرین محل جوش است که سبب کاهش مقاومت در مقابل نیروهای کششی می‌شوند. محل شکست اتصالاتی که در سرعت‌های دورانی، ۵۰۰ و ۶۳۰ دور در دقیقه و سرعت‌های خطی ۲۵ میلی‌متر در دقیقه و نیز اتصالاتی که در سرعت دورانی ۵۰۰ دور در دقیقه و سرعت خطی ۴۰ میلی‌متر در دقیقه جوشکاری شده بود، در آزمون کشش از وسط عیب تونلی موجود در داخل اتصال بود. علت این پدیده زیاد بودن ابعاد این عیب در محل اتصال بود که سبب کاهش استحکام این اتصالات شده بود. با افزایش سرعت خطی شرایط حرارتی محل اتصال به سمتی سوق پیدا می‌کند که نتیجه‌ی آن کوچک‌تر شدن عیوب در محل اتصال می‌شود. این پدیده تاثیر مستقیم بر روی خواص فیزیکی محل اتصال دارد. همانطور که در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود، استحکام کششی محل اتصال نیز با افزایش سرعت دورانی افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت دورانی، گرمای ورودی به

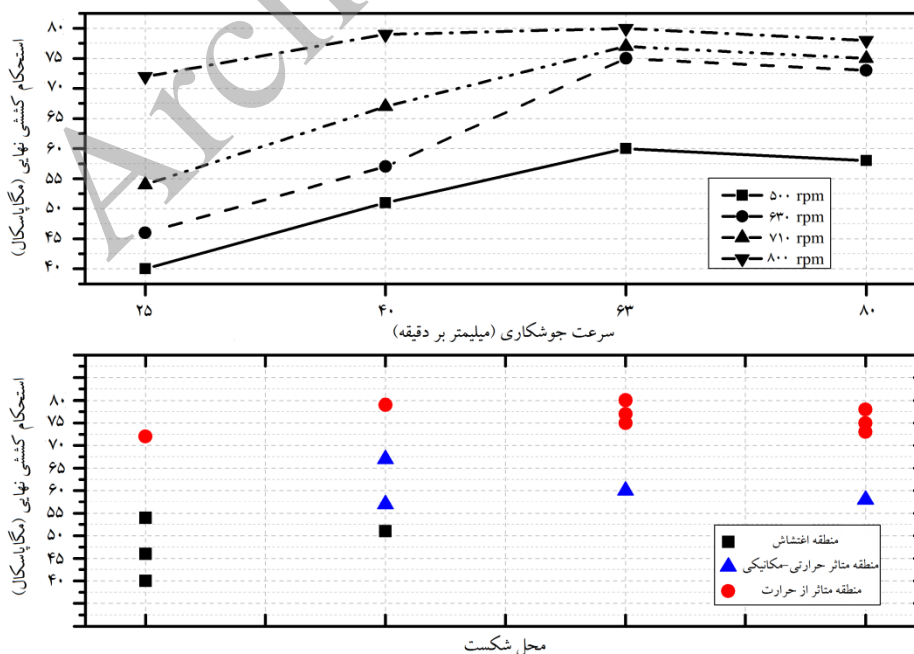
در مقدار عمق نفوذ ۰/۱ میلی‌متر، تنها ناحیه بالایی فصل مشترک دو ورق بهم جوش خوردند ولی کم بودن مقدار نفوذ ابزار سبب شد تا بین ابزار به خوبی و با فاصله مناسب در درون خط اتصال نفوذ نکند. این رخداد باعث شد تا ترکیب ناقص و جریان ناکامل سطحی در این اتصال بوجود آید. از طرف دیگر قرارگیری نامناسب بین ابزار باعث ایجاد شکاف بین دو ورق در وسط اتصال شد (شکل ۱۴-الف) که نشان دهنده نفوذ و جریان ناکامل و همزمان حرارت و مواد در این منطقه است. در عمق نفوذ ۰/۲ میلی‌متر، مقدار جریان و کشیدگی مواد در درون همدیگر بیشتر شده است و نسبت به حالت قبل شکل یکنواخت-تری به خود گرفته است. در این عمق نفوذ، ترکیبات بین‌فلزی در ناحیه‌ی بالایی اتصال ایجاد شد و جریان سطحی مواد با تناسب کاملتری نسبت به حالت قبل ایجاد شد (شکل ۱۴-ب). علت این مساله در ایجاد سطح درگیر مناسب بین شانه ابزار با سطح و نیز فاصله کافی انتهای ابزار از کف دو ورق است. افزایش مقدار عمق نفوذ تا ۰/۴ میلی‌متر، سبب بیشتر شدن فشار جوشکاری شد و به دلیل تولید گرمای بیشتر و چسبندگی مواد به شانه‌ی ابزار، منطقه اتصال لهیده شد (شکل ۱۴-ج). در این عمق نفوذ پنجره‌ی اتصال شکل نامنظم به خود گرفت. در اثر فشار زیاد جوشکاری، بیرون‌زدگی مواد، پارگی و جدایش ناشی از چسبندگی به شانه ابزار در سطح بالای اتصال دیده می‌شود. در این اتصال قسمت‌های زیرین اتصال، به علت فشار زیاد ابزار در جهت مخالف منطقه‌ی جوش و به سمت فلزات پایه رانده شدند. بیشتر شدن مقدار نفوذ ابزار تا عمق ۰/۶ میلی‌متر، سبب تولید گرما و سیلان بیش از اندازه مواد خمیری، چسبیدن مواد به سطح شانه ابزار و شکل‌گیری پلیسه در اطراف ناحیه سطح اتصال می‌گردد (شکل ۱۴-د). تکه‌های بزرگ آلومینیومی و فولادی موجود در نمای عرضی اتصال، نشان دهنده‌ی چسبندگی و فشار بیش از اندازه‌ی جوشکاری بر روی مواد است که سبب جابجایی آنها بصورت تکه‌های بزرگ شده است. این فشار زیاد سبب شد تا منطقه‌ی اتصال به خوبی شکل نگیرد و پارگی و حفره‌های ریز در محل اتصال به وجود بی‌آید. این ترک‌ها در کناره‌ها و

مستحکم تری تولید می شود. اثر سرعت خطی در این اتصالات با شیفت شدن محل اتصال از SZ به TMAZ نمایان می شود. این پدیده نشان از استقامت بیشتر منطقه ی اغتشاش در مقابل نیروی کششی دارد. جوش هایی که با سرعت دورانی ۵۰۰ دور در دقیقه و سرعت های خطی ۶۳ و ۸۰ میلیمتر تولید شدند و اتصالاتی که در سرعت خطی ۴۰ میلیمتر دقیقه و سرعت های دورانی ۶۳۰ و ۷۱۰ دور در دقیقه جوشکاری شدند در آزمون کشش از ناحیه ی TMAZ شکسته شدند.

افزایش همزمان سرعت دورانی و سرعت خطی ابزار در دورهای بالاتر از ۷۱۰ ریزساختار محل اتصال شکل منسجم تر و مناسب تری به خود می گیرند و همین مساله باعث بالاتر رفتن استحکام ناحیه های SZ و TMAZ می شود. این تغییرات همزمان در حرارت ورودی و نیروی فورج ابزار سبب می شود تا محل شکست اتصالات مذکور در ناحیه ی HAZ قرار بگیرد. اتصالاتی که با سرعت دورانی ۸۰۰ بهم جوش شدند و نیز جوش هایی که با سرعت های دورانی ۶۳۰ و ۷۱۰ دور در دقیقه و سرعت های خطی ۶۳ و ۸۰ میلیمتر بر دقیقه ۸۰ به هم پیوند خوردند در آزمون کشش از ناحیه ی HAZ شکسته شدند.

محل اتصال نیز افزایش یافته و این افزایش دما سبب نرم تر شدن دو فلز می شود. این رخداد در هم فرورفتگی بیشتر قطعه کارها، شکل گیری لایه ی شبه کامپوزیتی و بیشتر شدن استحکام محل اتصال می شود. همانطور که در شکل (۱۵-الف) مشاهده می شود بیشترین استحکام تسلیم مربوط به اتصالاتی است که با پارامترهای ۸۰۰ دور در دقیقه و سرعت خطی ۶۳ میلیمتر بر دقیقه جوشکاری شده است و استحکام آن ۸۰ مگاپاسکال بود. مقدار ضعیفترین استحکام تسلیم ۴۰ مگاپاسکال بود و مربوط به اتصالاتی بود که با سرعت دورانی ۵۰۰ و سرعت خطی ۲۵ جوش داده شده بود. محل شکست اتصالاتی که استحکام کششی آنها کمتر از ۵۵ مگاپاسکال است، ناحیه ی SZ می باشد. ورق هایی که با سرعت های دورانی ۵۰۰، ۶۳۰ و ۷۱۰ دور بر دقیقه و سرعت خطی ۲۵ میلیمتر بر دقیقه و نیز سرعت دورانی ۵۰۰ دور در دقیقه و سرعت خطی ۴۰ میلیمتر بر دقیقه بهم جوش داده شدند دارای این مشخصه می باشند.

علت این مساله تولید حرارت کم در سرعت دورانی ۵۰۰ دور در دقیقه و فورج نامناسب مواد در سرعت خطی ۲۵ میلیمتر در دقیقه است. با افزایش سرعت خطی در سرعت های دورانی ۵۰۰، ۶۳۰ و ۷۱۰ دور در دقیقه و بیشتر شدن نیروی فورج ابزار، اتصالات



شکل (۱۵): نتایج حاصل از آزمون کشش

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم AA1100 و فولاد A441 AISI با سرعت‌های دورانی ۵۰۰، ۶۳۰، ۷۱۰ و ۸۰۰ دور در دقیقه و سرعت‌های خطی ۲۵، ۴۰، ۶۳ و ۸۰ میلیمتر بر دقیقه مورد بررسی قرار گرفت. اثر سرعت خطی، دورانی، عمق نفوذ و زاویه‌ی ابزار بر روی شکل‌گیری عیوب و ترکیبات بین‌فلزی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این بررسی‌ها بصورت زیر ارائه می‌گردد:

۱- با افزایش سرعت دورانی ابزار، گرمای ورودی به محل اتصال بیشتر می‌شود و به دلیل واکنش بالای آلومینوم با آهن در دمای بالا، ضخامت لایه‌های بین‌فلزی تشکیل شده در صفحه‌ی مشترک دو ورق بیشتر می‌شود. ترکیب شیمیایی لایه‌های بین‌فلزی تشکیل شده در اتصال بین آلومینیوم AA1100 و فولاد A441 AISI بصورت Al_3Fe_2 و Al_6Fe بود.

۲- عیب کرمی شکل که در سمت فلز پایه‌ی آلومینومی قرار گرفته بود، مهمترین و حجیم‌ترین نقص موجود در این اتصالات به شمار می‌رفت. با افزایش سرعت خطی ابزار، نیروی فورج و ورود مواد از جلوی ابزار به درون منطقه اغتشاش بیشتر شد و همین مساله سبب شد تا عیوب داخلی محل اتصال کوچکتر شوند. از طرف دیگر افزایش سرعت خطی ابزار از ۲۵ میلیمتر در دقیقه تا ۸۰ میلیمتر در دقیقه سبب کوچکتر شدن قطر لایه‌ی بین‌فلزی شد که علت آن نیز ماندگاری کمتر منبع گرما در محل اتصال و نرخ خنک‌شوندگی بالاتر در منطقه‌ی اغتشاش بود.

۳- با توجه به دستگاه موجود در این پژوهش و انتخاب مقادیر مربوط به عمق نفوذ ابزار، بهترین اندازه‌ی عمق نفوذ ۰/۲ میلیمتر بود. مقدار عمق‌های نفوذ ۰/۴ و ۰/۶ میلیمتر که بیشتر از ۰/۲ میلیمتر بودند، سبب لهیدگی مواد در اطراف محل اتصال و شکل‌گیری عیوب و ترک‌های ریز در درون اتصال می‌شدند.

۴- با کنترل پارامترهای مکانیکی فرآیند و تغییرات ریز ساختاری می‌توان به یک اتصال مستحکم دست یافت. کوچک شدن عیوب داخلی و جلوگیری از شکل‌گیری لایه‌های ضخیم بین‌فلزی مهمترین فاکتورها، جهت دستیابی به این نتیجه هستند. بر

همین اساس، مستحکم‌ترین اتصال تولید شده در این پژوهش نزدیک به ۹۰ درصد فلز پایه‌ی آلومینومی استحکام داشت با سرعت دورانی ۸۰۰ دور در دقیقه و سرعت خطی ۶۳ میلیمتر بر دقیقه حاصل شد.

۵- مراجع

- [1] R. S. Mishra & Z. Y. Ma, "Friction stir welding and processing", *Materials Science and Engineering*, Vol. 50, pp. 1-78, 2005.
- [2] Sh. Wei, Ch. Hao & J. Chen, "Study of friction stir welding of 01420 aluminum-lithium alloy", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 453, pp. 170-177, 2007.
- [3] H. Bisadi, A. Tavakoli, M. Tour Sangsaraki & K. Tour Sangsaraki, "The influences of rotational and welding speeds on microstructures and mechanical properties of friction stir welded Al5083 and commercially pure copper sheets lap joints", *Materials and Design*, Vol. 43, pp. 80-88, 2013.
- [4] H. R. Akramifard, M. Shamanian, M. Sabbaghian & M. Esmailzadeh, "Microstructure and mechanical properties of Cu/SiC metal matrix composite fabricated via friction stir processing", *Materials and Design*, Vol. 54, pp. 838-844, 2014.
- [5] H. Baker, Alloy phase diagram, p.1, *ASM Handbook*, Vol. 3, 10th ed, ASM International, Ohio, 1993.
- [6] C. Uzun, C. Dalle Donne, A. Argagnotto & T. Ghidini & C. Gambaro, "Friction stir welding of dissimilar Al 6013-T4 To X5CrNi18-10 stainless steel", *Materials and Design*, Vol. 26, pp. 41-46, 2005.
- [7] M. Ghosh, A. Kar, K. Kumar & S. Kailas, "Structural characterisation of reaction zone for friction stir welded aluminium-stainless steel joint", *Materials Technology : Advanced Performance Materials*, Vol. 27, pp. 169-172, 2012.
- [8] T. Watanabe, H. Takayama & A. Yanagisawa, "Joining of aluminum alloy to steel by friction stir welding", *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 178, pp. 342-349, 2006.
- [9] T. Tanaka, T. Morishige & T. Tomotake Hirata,

- [19] YG. Kim, H. Fujii, T. Tsumur, T. Komazaki & K. Nakata, "Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy", *Material Science and Engineering A*, Vol. 415, pp. 250–254, 2006.
- [20] R. Zettler, T. Vugrin & M. Schmucker, *Friction stir welding from basics to applications*, Woodhead publishing, New York, pp. 245-265, 2010.
- [21] K. Kumar & SV. Kailas, "On the role of axial load and the effect of interface position on the tensile strength of a friction stir welded aluminum alloy", *Materials and Design*, Vol. 29, pp. 791–797, 2008.
- [22] W. H. Kielhorn, *Aluminum and aluminum alloys*, 12th ed, Chapter 1, AWS welding Handbook, Ohio, Vol. 3, p. 1, 1998.
- [23] J. R. Davis, *properties and selection: nonferrous alloys and special purpose materials*, 10th ed, p. 3, ASM handbook, Ohio, 1998.
- [24] G. R. Speich, *Physical Metallurgy of Dual-Phase Steels*, in *Fundamentals of Dual-Phase Steels*, pp. 1-45, the Metallurgical Society, 1981.
- [25] R. S. Coelho, A. Kostkac, J. F. dos Santos & A. Kaysser-Pyzalla, "Friction-stir dissimilar welding of aluminium alloy to high strength steels: Mechanical properties and their relation to microstructure", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 556, pp. 175–183, 2012.
- [26] M. Dehghani, A. Amadeh & S. A. A. Akbari Mousavi, "Investigations on the Effects of Friction Stir Welding Parameters on Intermetallic and Defect Formation in Joining Aluminum Alloy to Mild Steel", *Materials and Design*, Vol. 49, pp. 433-441, 2013.
- [27] H. Schmidt & J. Hattel, "Thermal modelling of friction stir welding", *Scripta Materialia*, Vol. 58, pp. 332–337, 2008.
- [28] T. Nandan, T. DebRoy & HKDK. Bhadeshia, "Recent advances in friction stir welding process, weldment structure and properties", *Progress in Material Science*, Vol. 53, pp. 980-1023, 2008.
- [29] S. Elliott, ER. Wallach, *Joining aluminum to steel part 1: diffusion bonding*, *Method Constructs*, Vol. 3, pp. 167-171, 1981.
- [10] C. Chen & R. Kovacevic, "Joining of Al 6061 alloy to AISI 1018 steel by combined effects of fusion and solid state welding", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, pp. 1205–1214, 2004.
- [11] M. Movahedi, A. Kokabi, S. Reihani & H. Najafi, "Effect of tool travel and rotation speeds on weld zone defects and joint strength of aluminium steel lap joints made by friction stir welding", *Science Technology of Welding and Joining*, Vol. 17, pp. 162–167, 2012.
- [12] CY. Lee, DH. Choi, YM. Yeon & SB. Jung, "Dissimilar friction stir spot welding of low carbon steel and Al-Mg alloy by formation of IMCs", *Science Technology of Welding and Joining*, Vol. 14, pp. 216-220, 2009.
- [13] M. Yilmaz, M. Çöl & M. Acet, "Interface properties of aluminum/steel friction welded components", *Materials Characterization*, Vol. 49, pp. 421–429, 2002.
- [14] S. Bozzi, A. Helbert-Etter, T. Baudin, B. Criqui & J. Kerbiguet, "Intermetallic compounds in Al 6016/IF-steel friction stir spot welds", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, pp. 4505-4509, 2010.
- [15] T. Hirata, T. Oguri, H. Hagino, T. Tanaka, SW. Chung & Y. Takigawa, "Influence of friction stir welding parameters on grain size and formability in 5083 aluminum alloy", *Material Science and Engineering A*, Vol. 456, p. 344-349, 2007.
- [16] WB. Lee, M. Schmuecker, U. Alfaro Mercado, G. Biallas & S. Jung, "Interfacial reaction in steel–aluminum joints made by friction stir welding", *Scripta Materialia*, Vol. 55, pp. 355-358, 2006.
- [17] Ø. Frigaard, Ø. Grong & OT. Midling, "A process model for friction stir welding of age hardening aluminum alloys", *Metallurgical and materials transactions A*, Vol. 32, pp. 1189-1200, 2001.
- [18] H. Zhang, SB. Lin, L. Wu, JC. Feng & Sh. Ma, "Defects formation procedure and mathematic model for defect free friction stir welding of magnesium alloy", *Materials and Design*, Vol. 27, pp. 805-809, 2006.