

اثر نوع لایه واسط بر خواص مکانیکی و ریزساختار اتصال آلومینیوم ۶۰۶۱ از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW)

سید امین کفائی^۱، حامد ثابت^{۲*}، محسن قنبری حقیقی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران.

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

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

*عهده‌دار مکاتبات: h-sabet@kiauo.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۰۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۲۲)

چکیده: در پژوهش حاضر اثر متغیرهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فلز آلومینیوم 6061 با استفاده از لایه واسط و بدون لایه واسط انجام شده است. پس از انجام فرآیند جوشکاری، آزمون‌های میکرو سختی، کشش و بررسی ریزساختار با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد. در بین نمونه‌های جوشکاری شده با لایه‌های واسط آلومینیوم 4043، 5556 و 2024 و بدون لایه واسط، نمونه جوشکاری شده با نسبت سرعت دورانی به خطی ۲۵ دور بر میلی‌متر (سرعت دورانی ۱۲۵۰ دور بر دقیقه و سرعت خطی ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه) با لایه واسط آلومینیوم 2024 دارای بیشترین استحکام کششی به مقدار ۱۹۲ مگاپاسکال و دارای بیشترین سختی با مقدار ۱۵۴ ویکرز بود. کمترین استحکام کششی مربوط به نمونه جوشکاری شده با لایه واسط آلومینیوم 4043 با نسبت سرعت دورانی به خطی ۲۵ دور بر میلی‌متر (سرعت دورانی ۸۰۰ دور بر دقیقه و سرعت خطی ۳۱/۵ میلی‌متر بر دقیقه) به مقدار ۱۶۶ مگاپاسکال بوده و با ۹۶ ویکرز نیز دارای کمترین میزان سختی در قسمت دکمه جوش در بین تمامی نمونه‌ها بود. بررسی ریزساختاری نیز نشان‌دهنده درشت بودن دانه‌ها در نمونه‌های جوشکاری شده با لایه واسط و بدون لایه واسط با نسبت سرعت دورانی به خطی ۳۲ دور بر میلی‌متر به نسبت بقیه نمونه‌ها بود. نمونه جوشکاری شده با لایه واسط آلومینیوم 4043 و در نسبت سرعت دورانی به خطی ۲۵ دور بر میلی‌متر بر دقیقه دارای ریزترین اندازه دانه به مقدار ۹ میکرومتر در بین نمونه‌های جوشکاری شده با لایه واسط بود. نتایج آزمون‌ها نشان می‌دهد استفاده از آلومینیوم 5556 و 2024 به‌عنوان لایه واسط باعث بهبود خواص مکانیکی ناحیه اتصال گردیده است.

واژه‌های کلیدی: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، آلومینیوم 6061، لایه واسط.

۱- مقدمه

روش‌های ذوبی برای آلیاژهای آلومینیوم به دلیل ایجاد ساختارهای بین فلزی، عدم توانایی کنترل دمای مذاب، هدایت حرارتی بالای آلیاژهای آلومینیوم، بالا بودن انبساط و انقباض آلومینیوم و آلیاژهای آن، تغییر فاز در آلیاژهای رسوب سخت شونده، کاهش مقاومت به خوردگی، حلالیت بالای هیدروژن در آلومینیوم مذاب و ... از خواص مکانیکی

جوشکاری به روش اصطکاکی اغتشاشی^۱ برای اولین بار در سال ۱۹۹۱ در موسسه جوشکاری بریتانیا، به‌عنوان تکنیکی برای اتصال در حالت جامد، ابداع شد [۱]. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ابتدا برای اتصال آلیاژ آلومینیوم استفاده شده است ولی امروزه کاربرد آن برای اتصال فلزات غیرهمجنس سبک زیاد شده است. اتصال به دست آمده از

همچنین او مشخص نمود لایه واسط Zn تأثیر چندانی بر استحکام کششی ناحیه اتصال نشان نداد. رضوی و همکاران [۷] اثر استفاده از آلومینیوم 7075 به عنوان لایه واسط در اتصال آلومینیوم 1050 به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را بررسی کردند. آن‌ها برای اولین بار از یک آلیاژ به صورت لایه واسط برای استحکام دهی ناحیه اتصال در روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی استفاده کردند. بررسی آن‌ها نشان داد که با استفاده از یک آلیاژ با استحکام بالا نه تنها در ناحیه اتصال مشکلی در اختلاط دو ماده در حالت خمیری در حین فرآیند به وجود نیامده، بلکه باعث بهبود خواص مکانیکی از جمله استحکام ناحیه جوش می‌شود. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از لایه واسط آلیاژی 7075 باعث افزایش استحکام کششی و سختی ناحیه اتصال در تمامی نمونه‌ها می‌گردد. در این تحقیق اثر متغیرهای جوشکاری FSW برای اتصال ورق آلیاژ 6061 با استفاده و بدون استفاده از لایه واسط مورد بررسی قرار گرفته شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

به منظور انجام این پژوهش از ورق آلومینیوم 6061 برای فلز پایه و برای لایه‌های واسط از آلومینیوم 4043، 5556 و 2024 استفاده شد. خواص مکانیکی بهتر، همخوانی متالورژیکی و رسوباتی همسان با فلز پایه از دلایل انتخاب آلومینیوم‌های 4043، 5556 و 2024 به عنوان لایه واسط برای این تحقیق بوده است. جدول ۱ ترکیب شیمیایی فلزات مصرفی در این تحقیق را که با استفاده از آزمون اسپکتروسکوپی نشر نوری به دست آمده است را ارائه می‌دهد. به منظور انجام فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، ابتدا ورق آلومینیوم 6061-T6 به ابعاد ۲۵۰×۶۵×۵ میلی‌متر برش داده شدند و لایه‌های واسط از جنس آلومینیوم 5556 و 4043 و 2024 به ابعاد ۲۵۰×۲×۵ میلی‌متر جهت قرارگیری در درز اتصال آماده شدند. شکل ۱ شماتیک وضعیت قرارگیری لایه واسط در بین نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

مطلوبی برخوردار نیست. از این رو از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای اتصال این فلز استفاده می‌شود [۲]. این روش نوین امروزه در عرصه صنایعی چون هوافضا، خودروسازی و حتی صنایع کشتی‌سازی جایگاه مهم و حیاتی پیدا نموده است. در حین جوشکاری FSW مواد تحت تغییر فرم پلاستیک شدید قرار گرفته و در اثر ازدیاد دمای حاصل از تغییر فرم پلاستیک، پدیده تبلور مجدد دینامیکی رخ داده که موجب ایجاد دانه‌های هم‌محور در منطقه جوش می‌گردد که باعث بهبود خواص مکانیکی اتصال می‌شود [۳] برای بهبود خواص مکانیکی اتصال در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی تحقیقات محدودی انجام شده است که می‌توان به اضافه نمودن پودر در درز اتصال جهت کامپوزیت سازی در درز اتصال [۲] و یا استفاده از لایه واسط در درز اتصال اشاره نمود [۴-۷]

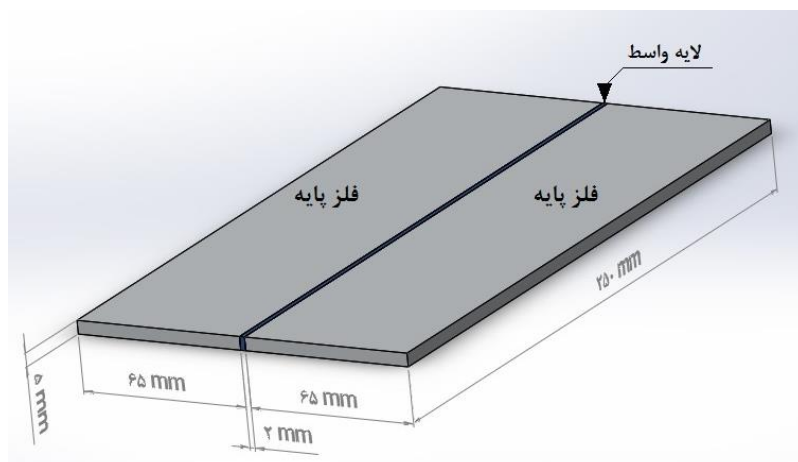
در تحقیق شیرین‌آبادی و همکاران [۴] تأثیر سرعت دورانی ابزار بر اتصال ورق‌های آلومینیوم و منیزیم خالص با وجود لایه میانی Zn با طرح اتصال لب روی هم بررسی شده است. به این منظور سه سرعت دورانی در نظر گرفته و لایه میانی Zn با ضخامت ۱۰۰ میکرومتر مورد استفاده قرار گرفته شده است. نتایج بررسی آنان نشان داد که در فصل مشترک لایه بین فلزی $MgZn_2$ ایجاد شده و همچنین در نواحی نزدیک آلومینیوم انحلال کاملی از آلومینیوم و روی رخ داده است. با افزایش سرعت دورانی ابزار استحکام کششی اتصال افزایش محسوسی یافته است.

هوانگ و همکاران [۵] از یک لایه Zn برای اتصال آلیاژ آلومینیوم 6061 به برنج H62 در روش FSW استفاده کرد. در نتایج این گونه بیان شده است که استفاده از لایه میانی Zn در این اتصال قابلیت جوش‌پذیری آلومینیوم و برنج را به وسیله فازهای جدید تشکیل شده بهبود بخشید.

مکبری [۶] اثر استفاده از مس، برنج و روی خالص بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال آلومینیوم 1050 را به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بررسی نمود. نتایج او نشان داد که تشکیل ترکیبات بین فلزی، هنگام استفاده از لایه واسط برنج و مس، باعث افزایش استحکام کششی اتصال تا ۵۰ درصد و افزایش سختی تا حدود ۸۰ درصد می‌شود.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) مواد مصرفی.

آلیاژ	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn
آلومینیوم 6061	۹۵/۷۰	۰/۲۱	۰/۲۸	۰/۶۵	۱/۰۱	۰/۱۲	۰/۷۲	۰/۱۴	۰/۲۳
آلومینیوم 4043	۹۳/۳۰	-	۰/۳۰	۰/۸۰	۰/۰۵	۰/۰۵	۵/۱۰	۰/۲۰	۰/۱۱
آلومینیوم 5556	۹۳/۳۰	۰/۱۷	۰/۰۲	۰/۳۰	۵/۲۰	۰/۵۱	۰/۲۴	۰/۱۱	۰/۲۵
آلومینیوم 2024	۹۳/۳۰	۰/۰۴	۴/۲۰	۰/۴۰	۱/۵۵	۰/۷۰	۰/۵۰	۰/۱۴	۰/۲۳



شکل (۱): شماتیکی از ابعاد و نحوه قرارگیری لایه‌های واسط در نمونه‌ها.

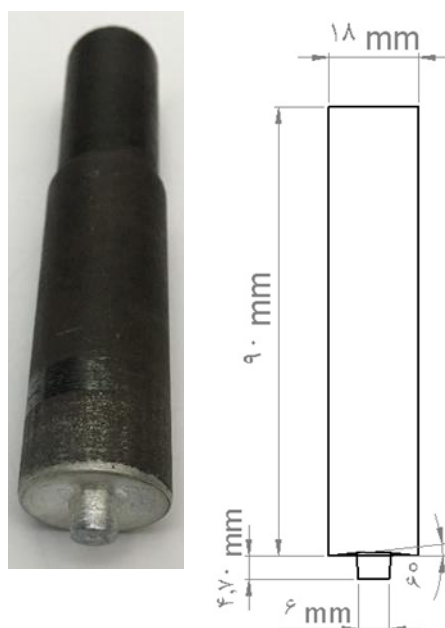
ذکر شده بدون لایه واسط به منظور دستیابی به شرایط مناسب جوشکاری شدند. در این مرحله از تحقیق با مطالعات انجام شده بر روی مقالات مرتبط [۱۰-۱۱] با جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم 6061 سرعت‌هایی انتخاب شد که در آن‌ها استحکام کششی بیشینه به نسبت بقیه حالت‌ها به دست آید و همچنین نسبت سرعت دورانی به خطی نزدیک به ۲۵ دور بر میلی‌متر باشد. در مرحله بعد بر اساس نتایج حاصل از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ۹ نمونه آلیاژ آلومینیوم 6061 تعداد ۷ نمونه با لایه واسط مطابق جدول ۴ جوشکاری شدند.

ابزار (پین) مورد استفاده از جنس فولاد H13 (به شکل استوانه مخروطی) انتخاب و بعد از ساخت آن (مطابق با اطلاعات ارائه شده در جدول ۲) تحت عملیات حرارتی کوئنچ و تمپر (۲ ساعت در دمای ۸۲۵ درجه سانتی‌گراد + کوئنچ در روغن، تمپر به مدت ۱/۵ ساعت در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد + کوئنچ در آب) قرار گرفتند. در نتیجه سختی ابزار به ۴۹ راکول C رسید. شکل ۲ شماتیک ابزار و تصویر ابزار مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

جهت انجام فرآیند جوشکاری، قطعات بر روی نگه‌دارنده (فیکسچر) بسته شدند. مطابق جدول ۳، تعداد ۹ نمونه با شرایط

جدول (۲): مشخصات ابزار مورد استفاده [۸ و ۹].

جنس	شکل پین	طول ابزار (میلی‌متر)	قطر شانه (میلی‌متر)	قطر پین (میلی‌متر)	ارتفاع پین (میلی‌متر)	زاویه تقعر کف شانه (درجه)	زاویه ابزار نسبت به راستای عمود بر نمونه‌ها (درجه)
فولاد گرمکار H13	استوانه‌ای مخروطی	۹۰	۱۸	۶	۴/۷	۶	۲/۵



شکل (۲): الف- شماتیک ابزار مورد استفاده و ب- تصویر ابزار مورد استفاده.

جدول (۳): شرایط جوشکاری برای نمونه‌های بدون لایه واسط.

شماره نمونه	سرعت دورانی (دور بر دقیقه)	سرعت خطی (میلی متر بر دقیقه)
۱	۸۰۰	۳۱/۵
۲	۸۰۰	۵۰
۳	۸۰۰	۸۰
۴	۱۰۰۰	۳۱/۵
۵	۱۰۰۰	۵۰
۶	۱۰۰۰	۸۰
۷	۱۲۵۰	۳۱/۵
۸	۱۲۵۰	۵۰
۹	۱۲۵۰	۸۰

جدول (۴): شرایط جوشکاری نمونه‌های با لایه واسط.

شماره نمونه	نوع لایه واسط استفاده شده	سرعت دورانی (دور بر دقیقه)	سرعت خطی (میلی متر بر دقیقه)
۱۰	آلیاژ آلومینیوم 4043	۸۰۰	۳۱/۵
۱۱	آلیاژ آلومینیوم 4043	۱۰۰۰	۳۱/۵
۱۲	آلیاژ آلومینیوم 4043	۱۲۵۰	۵۰
۱۳	آلیاژ آلومینیوم 5556	۸۰۰	۳۱/۵
۱۴	آلیاژ آلومینیوم 5556	۱۰۰۰	۳۱/۵
۱۵	آلیاژ آلومینیوم 5556	۱۲۵۰	۵۰
۱۶	آلیاژ آلومینیوم 2024	۱۲۵۰	۵۰

نیرو ۱۰ ثانیه بر روی مناطق مختلف جوش، TMAZ، HAZ انجام شد.

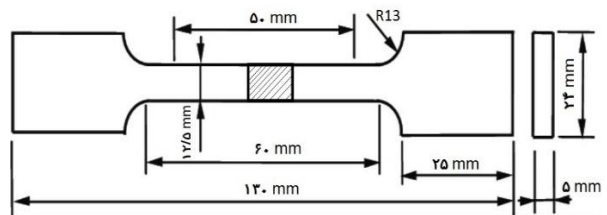
آزمون متالوگرافی نوری مطابق استاندارد ASTM E3 [۱۴] انجام شد. برای این منظور بعد از برش قطعات و پس از انجام آماده‌سازی شامل سوهان زنی، سنباده‌زنی (به ترتیب از ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰، ۲۵۰۰ و ۳۰۰۰) و پولیش (با محلول پودر آلومینا و آب به نسبت ۱ به ۱۰)، قطعات آماده حکاکی شدند. محلول حکاکی مورد استفاده در جدول ۵ ارائه شده است.

پس از حکاکی، ریزساختار نمونه‌ها با استفاده از یک دستگاه میکروسکوپ نوری مدل Meiji مورد بررسی قرار گرفته شدند. همچنین جهت بررسی دقیق‌تر فازهای حاصل در محل اتصال از یک دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل SEM SERON TECH Ais2300c با مود تصویربرداری الکترون ثانویه و ولتاژ کاری KV30 استفاده شد. همچنین آنالیز نقطه‌ای، آنالیز خطی و نقشه عناصر آلیاژی از نمونه‌های منتخب تهیه شد. اندازه دانه و درصد حجمی رسوبات با کمک نرم‌افزار Image J اندازه‌گیری شد.

پس از انجام جوشکاری (مرحله اول و دوم) در ابتدا سطح جوش‌ها مورد بازرسی چشمی قرار گرفته شدند و در ادامه با برش‌زنی سطح مقطع جوش، عیوب احتمالی در آن با استفاده از یک عدد استریو میکروسکوپ مدل NIKON-SMZ1 مورد بررسی قرار گرفته شد. به منظور بررسی استحکام کششی نمونه‌ها و مقایسه آن‌ها با یکدیگر، آزمون کشش بر روی نمونه‌های فاقد عیوب ظاهری (بر اساس نتایج بازرسی چشمی و بررسی با استریو میکروسکوپ) انجام شد. برای هر شرایط جوشکاری دو نمونه مورد آزمون کشش عرضی قرار گرفت و متوسط اعداد به‌عنوان معیار استحکام در نظر گرفته شد. آزمون کشش مطابق استاندارد ASTM E8M [۱۲] و با استفاده از دستگاه کشش مدل SANTAM با سرعت کشش ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. شکل ۳ شماتیک ابعاد نمونه کشش بر اساس استاندارد ASTM-E8M را نشان می‌دهد، همچنین شکل ۴ تصویر محل شکست در نمونه شماره ۹ را نشان می‌دهد. آزمون میکرو سختی ویکرز مطابق استاندارد ASTM E384 [۱۳] و با استفاده از دستگاه مدل BOHLER-ILLINOIS 60044 با بار اعمالی ۱۰۰ گرم و مدت‌زمان اثر



شکل (۴): تصویر محل شکست در نمونه شماره ۹



شکل (۳): شماتیک ابعاد نمونه کشش بر اساس استاندارد ASTM-E8M

جدول (۵): ترکیب شیمیایی محلول‌های حکاکی.

نوع ماده مصرفی	HF	HN _o ₃	HCl	H ₂ O
نمونه‌های بدون لایه واسط و نمونه با لایه واسط آلومینیوم 2024	۱ میلی‌لیتر	۲/۵ میلی‌لیتر	۱/۵ میلی‌لیتر	۹۵ میلی‌لیتر
نمونه‌های با لایه واسط آلومینیوم 5556 و نمونه با لایه واسط آلومینیوم 4043	۱ میلی‌لیتر	۶ میلی‌لیتر	-	۴۰ میلی‌لیتر

۳- نتایج و بحث

جدول ۶ نتایج بررسی ظاهری نمونه‌های سالم (بدون عیب) را ارائه می‌دهد، همان‌گونه که از جدول ۶ مشخص است نمونه شماره ۱ (بدون لایه واسط) با سرعت دورانی ۸۰۰ دور بر دقیقه و سرعت خطی ۳۱/۵ میلی‌متر بر دقیقه، نمونه شماره ۴ (بدون لایه واسط) با سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و سرعت خطی ۳۱/۵ میلی‌متر بر دقیقه و نمونه شماره ۸ (بدون لایه واسط) با سرعت دورانی ۱۲۵۰ دور بر دقیقه و سرعت خطی ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه به‌عنوان نمونه‌های سالم تعیین شدند. نمونه‌های شماره ۲ (بدون لایه واسط)، ۳ (بدون لایه واسط)، ۵ (بدون لایه واسط)، ۶ (بدون لایه واسط)، ۷ (بدون لایه واسط) و ۹ (بدون لایه واسط)، دارای حفره در سطح مقطع جوش و عیوب تونلی به‌عنوان نمونه‌های معیوب شناخته شدند. از علل به وجود آمدن این عیب می‌توان به نامناسب بودن نسبت سرعت دورانی به خطی نام برد که به دلیل کم بودن حرارت کافی مانع از تغییر فرم پلاستیک لازم فلز در ناحیه جوش شده و باعث بروز این عیب گردیده است [۱۵-۱۶].



















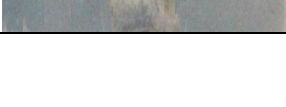

همچنین بررسی جدول ۶ مشخص می‌نماید که نمونه‌های شماره ۱۰ (با لایه واسط)، ۱۱ (با لایه واسط)، ۱۲ (با لایه واسط)، ۱۳ (با لایه واسط)، ۱۴ (با لایه واسط)، ۱۵ (با لایه واسط) و ۱۶ (با لایه واسط)، دارای سطح جوشی سالم، پلیسه کم و عاری از حفره و عیب در سطح مقطع می‌باشند که همگی به‌عنوان نمونه سالم انتخاب شدند.

جدول ۷ نتایج آزمون کشش را برای نمونه‌های (سالم) ارائه می‌دهد، همچنین شکل ۵ نواحی ریزساختاری در ناحیه اتصال نمونه شماره ۱۵ را نشان می‌دهد، همان‌گونه که از شکل مشخص می‌باشد در قسمت اتصال ناحیه دکمه جوش به‌صورت یک بیضی شکل مشخص می‌باشد که در قسمت بالا به سمت پیش‌رونده متمایل تر است، در کنار این ناحیه منطقه تحت تأثیر کار مکانیکی (TMAZ) می‌باشد و در ادامه ناحیه تحت تأثیر حرارت (HAZ) قرار دارد که به نسبت (TMAZ) دارای دانه‌بندی درشت‌تر و شبیه به فلز پایه می‌باشد. شکل ۶ استحکام کششی نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد.



شکل (۵): نواحی ریزساختاری در ناحیه اتصال نمونه شماره ۱۵

جدول (۶): وضعیت ظاهری نمونه‌های سالم.

شماره نمونه	نوع لایه واسط	شرایط جوشکاری		نسبت سرعت دورانی به خطی (دور بر میلی‌متر)	تصویر سطح مقطع جوش	تصویر سطح ظاهری جوش
		سرعت دورانی (دور بر دقیقه)	سرعت خطی (میلی‌متر بر دقیقه)			
۱	بدون لایه واسط	۸۰۰	۳۱/۵	۲۵		
۴	بدون لایه واسط	۱۰۰۰	۳۱/۵	۳۲		
۸	بدون لایه واسط	۱۲۵۰	۵۰	۲۵		
۱۰	آلومینیوم 4043	۸۰۰	۳۱/۵	۲۵		
۱۱	آلومینیوم 4043	۱۰۰۰	۳۱/۵	۳۲		
۱۲	آلومینیوم 4043	۱۲۵۰	۵۰	۲۵		
۱۳	آلومینیوم 5556	۸۰۰	۳۱/۵	۲۵		
۱۴	آلومینیوم 5556	۱۰۰۰	۳۱/۵	۳۲		
۱۵	آلومینیوم 5556	۱۲۵۰	۵۰	۲۵		
۱۶	آلومینیوم 2024	۱۲۵۰	۵۰	۲۵		

جدول (۷): نتایج آزمون کشش برای نمونه‌های سالم.

محل شکست	استحکام کششی (مگاپاسکال)	نسبت سرعت دورانی به خطی (دور بر میلی‌متر)	شرایط جوشکاری		نوع لایه واسط	شماره نمونه
			سرعت دورانی (دور بر دقیقه)	سرعت خطی (میلی‌متر بر دقیقه)		
ناحیه پسرونده	۱۸۲	۲۵	۳۱/۵	۸۰۰	بدون لایه واسط	۱
ناحیه پسرونده	۱۸۰	۳۲	۳۱/۵	۱۰۰۰	بدون لایه واسط	۴
مرکز جوش	۱۴۹	۲۵	۵۰	۱۲۵۰	بدون لایه واسط	۸
ناحیه پسرونده	۱۶۶	۲۵	۳۱/۵	۸۰۰	آلومینیوم 4043	۱۰
مرکز جوش	۱۵۸	۳۲	۳۱/۵	۱۰۰۰	آلومینیوم 4043	۱۱
مرکز جوش	۱۵۳	۲۵	۵۰	۱۲۵۰	آلومینیوم 4043	۱۲
مرکز جوش	۱۵۲	۲۵	۳۱/۵	۸۰۰	آلومینیوم 5556	۱۳
ناحیه پسرونده	۱۶۸	۳۲	۳۱/۵	۱۰۰۰	آلومینیوم 5556	۱۴
ناحیه پسرونده	۱۸۸	۲۵	۵۰	۱۲۵۰	آلومینیوم 5556	۱۵
ناحیه پسرونده	۱۹۲	۲۵	۵۰	۱۲۵۰	آلومینیوم 2024	۱۶

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، در بین نمونه‌های بدون لایه واسط استحکام نمونه ۱ (بدون لایه واسط) بالاتر بوده است. در این نمونه، نسبت سرعت دورانی به خطی ۲۵ دور بر میلی‌متر بوده است که مطابق تحقیقات قبلی [۹ و ۱۷]. زمانی که این نسبت حدود ۲۵ تا ۲۷ باشد، خواص مکانیکی اتصال مقدار بهینه به دست می‌آید [۱۸].

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، در بین نمونه‌های بدون لایه واسط استحکام نمونه ۱ (بدون لایه واسط) بالاتر بوده است. در این نمونه، نسبت سرعت دورانی به خطی ۲۵ دور بر میلی‌متر بوده است که مطابق تحقیقات قبلی [۹ و ۱۷]. زمانی که این نسبت حدود ۲۵ تا ۲۷ باشد، خواص مکانیکی اتصال مقدار بهینه به دست می‌آید [۱۸].

با توجه به مقدار استحکام کششی و محل شکست نمونه‌های جوشکاری شده با لایه واسط آلومینیوم 4043 که دو نمونه از آن از مرکز جوش بوده است و نمونه دیگر دارای استحکام کششی کمتر به نسبت جوشکاری بدون حضور لایه واسط است، مشخص می‌گردد که استحکام کششی نمونه‌های با لایه واسط آلومینیوم 4043 در هر سه حالت مقدار کمینه را دارا بوده است؛ که می‌توان به اختلاط ناقص این آلیاژ با فلز پایه اشاره نمود ضمن آنکه اصولاً استحکام کششی این آلیاژ

(آلومینیوم 4043) کمتر از آلومینیوم 6061 می‌باشد [۱۹]. لذا این لایه واسط برای اتصال آب‌بندی آلیاژ آلومینیوم 6061 مناسب می‌باشد.

بررسی نمونه جوشکاری شده با لایه واسط آلومینیوم 5556، نشان می‌دهد که نمونه ۱۵ دارای استحکام کششی با مقدار ۱۸۸ مگاپاسکال بوده است که این مقدار از استحکام کششی نمونه‌های جوشکاری شده بدون لایه واسط (نمونه‌های ۱ و ۴ و ۸) بیشتر می‌باشد. با توجه به محل شکست این نمونه مشخص می‌گردد که شکست در ناحیه پسرونده رخ داده است که نشان‌دهنده استحکام بیشتر در ناحیه جوش می‌باشد. این موضوع مشخص می‌نماید که در این نمونه اختلاط بهتری نسبت به نمونه‌های دارای لایه واسط آلومینیوم 4043 (نمونه‌های ۱۰ و ۱۱ و ۱۲) رخ داده است، ضمن آنکه استحکام کششی این آلیاژ (آلومینیوم 5556) بیشتر از آلومینیوم 6061

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، در بین نمونه‌های بدون لایه واسط استحکام نمونه ۱ (بدون لایه واسط) بالاتر بوده است. در این نمونه، نسبت سرعت دورانی به خطی ۲۵ دور بر میلی‌متر بوده است که مطابق تحقیقات قبلی [۹ و ۱۷]. زمانی که این نسبت حدود ۲۵ تا ۲۷ باشد، خواص مکانیکی اتصال مقدار بهینه به دست می‌آید [۱۸].

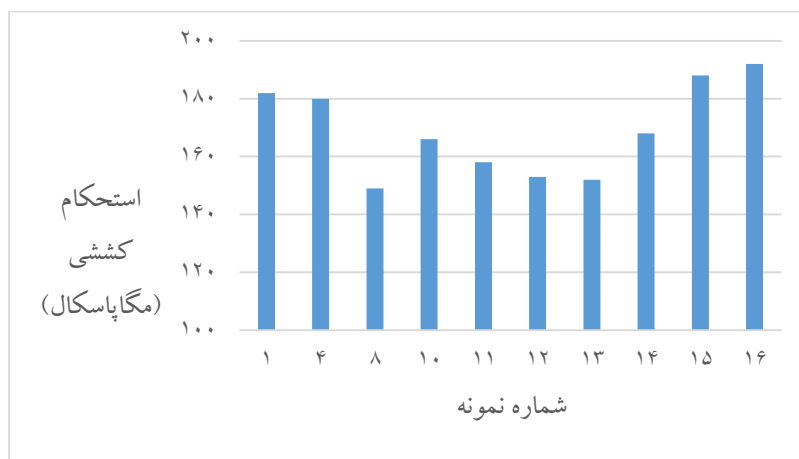
با توجه به مقدار استحکام کششی و محل شکست نمونه‌های جوشکاری شده با لایه واسط آلومینیوم 4043 که دو نمونه از آن از مرکز جوش بوده است و نمونه دیگر دارای استحکام کششی کمتر به نسبت جوشکاری بدون حضور لایه واسط است، مشخص می‌گردد که استحکام کششی نمونه‌های با لایه واسط آلومینیوم 4043 در هر سه حالت مقدار کمینه را دارا بوده است؛ که می‌توان به اختلاط ناقص این آلیاژ با فلز پایه اشاره نمود ضمن آنکه اصولاً استحکام کششی این آلیاژ

با بررسی نتایج جدول ۸ و شکل ۷ مشخص می‌نماید که سختی تمام نمونه‌ها (با لایه واسط یا بدون لایه واسط) نسبت به فلز پایه بیشتر می‌باشد که ناشی از تنش پس‌ماند ناشی از جوشکاری و همچنین به علت استفاده از لایه‌های واسط می‌باشد [۲۱ و ۲۲]. همچنین بررسی نتایج جدول ۸ و شکل ۷ مشخص می‌نماید که کمترین میزان سختی در ناحیه دکمه جوش (در بین کل نمونه‌های جوشکاری شده با لایه واسط و بدون لایه واسط) مربوط به نمونه شماره ۱۰ جوشکاری شده با لایه واسط آلومینیوم 4043 در نسبت سرعت دورانی به خطی ۲۵ دور بر میلی‌متر با مقدار ۹۶ ویکرز می‌باشد. همچنین بیشترین سختی در قسمت دکمه جوش (در بین کل نمونه‌های جوشکاری شده با لایه واسط و بدون لایه واسط) برای نمونه شماره ۱۶ جوشکاری شده با لایه واسط آلومینیوم 2024 در نسبت سرعت دورانی به خطی ۲۵ دور بر میلی‌متر با مقدار ۱۵۴ ویکرز بوده است. با مقایسه نتایج سختی این دو نمونه مشخص می‌گردد که علی‌رغم آنکه نسبت سرعت دورانی به خطی در هر دو نمونه یکسان بوده است ولی نمونه جوشکاری شده با لایه واسط آلومینیوم 2024 دارای سختی بالاتری می‌باشد که علت آن استحکام بالاتر این آلیاژ نسبت به آلیاژ آلومینیوم 4043 می‌باشد [۲۳].

می‌باشد [۲۰]. نمونه جوشکاری شده با لایه واسط آلومینیوم 2024، با نسبت سرعت دورانی به خطی ۲۵ دور بر میلی‌متر، بیشترین استحکام کششی را با ۱۹۲ مگاپاسکال در بین همه نمونه‌ها دارا می‌باشد و با توجه به ناحیه شکست این نمونه که از قسمت پس‌رونده ابزار بوده است، این نتیجه حاصل می‌شود که اختلاط مناسبی در ناحیه اتصال این نمونه رخ داده است، ضمن آنکه اصولاً استحکام کششی این آلیاژ (آلومینیوم 2024) بیشتر از آلومینیوم 6061 و بالاتر از سایر لایه‌های واسط استفاده شده (آلومینیوم 4043 و آلومینیوم 5556) می‌باشد [۲۰] و در نتیجه استحکام بالاتری در ناحیه اتصال ایجاد شده است.

با مقایسه مقادیر استحکام کششی و محل شکست نمونه‌ها مشخص می‌گردد که بالاتر بودن استحکام کششی نمونه ۱۵ (با لایه واسط آلومینیوم 5556) و نمونه ۱۶ (با لایه واسط آلومینیوم 2024) نسبت به نمونه‌های جوشکاری بدون لایه واسط به معنی اثربخشی مثبت لایه‌های واسط آلومینیوم 5556 و 2024 بر خواص کششی ناحیه اتصال فلز آلومینیوم 6061 می‌باشد.

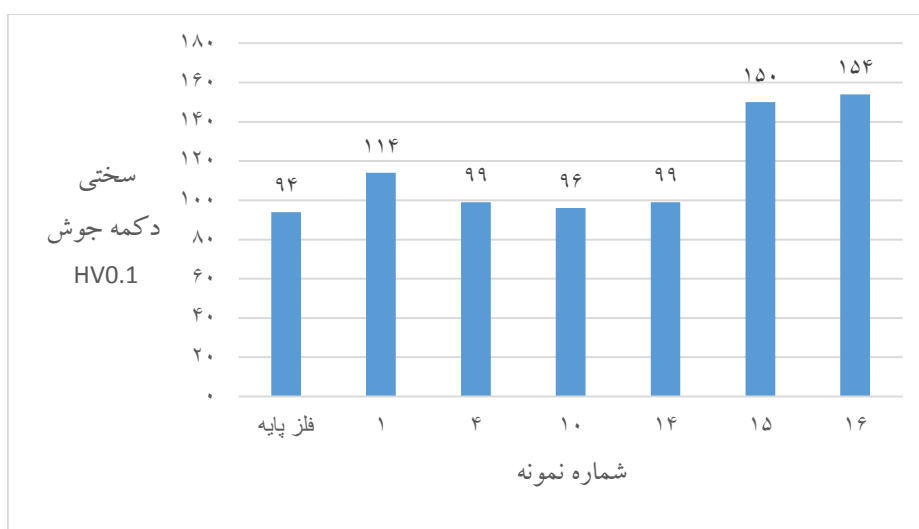
با توجه به نتایج آزمون کشش آزمون سختی فقط از نمونه‌هایی که محل شکست آن‌ها در ناحیه پس‌رونده بودند انجام شد. جدول ۸ نتایج آزمون سختی نمونه‌های مختلف را ارائه می‌دهد همچنین شکل ۷ سختی دکمه جوش نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد.



شکل (۶): نمودار استحکام کششی نمونه‌های مختلف.

جدول (۸): نتایج آزمون سختی نمونه‌ها.

شماره نمونه	نوع لایه واسط	شرایط جوشکاری		نسبت سرعت دورانی به خطی (دور بر میلی‌متر)	سختی دکمه جوش (ویکرز)
		سرعت دورانی (دور بر دقیقه)	سرعت خطی (میلی‌متر بر دقیقه)		
۱	بدون لایه واسط	۸۰۰	۳۱/۵	۲۵	۱۱۴
۴	بدون لایه واسط	۱۰۰۰	۳۱/۵	۳۲	۹۹
۱۰	آلومینیوم 4043	۸۰۰	۳۱/۵	۲۵	۹۶
۱۴	آلومینیوم 5556	۱۰۰۰	۳۱/۵	۳۲	۹۹
۱۵	آلومینیوم 5556	۱۲۵۰	۵۰	۲۵	۱۵۰
۱۶	آلومینیوم 2024	۱۲۵۰	۵۰	۲۵	۱۵۴

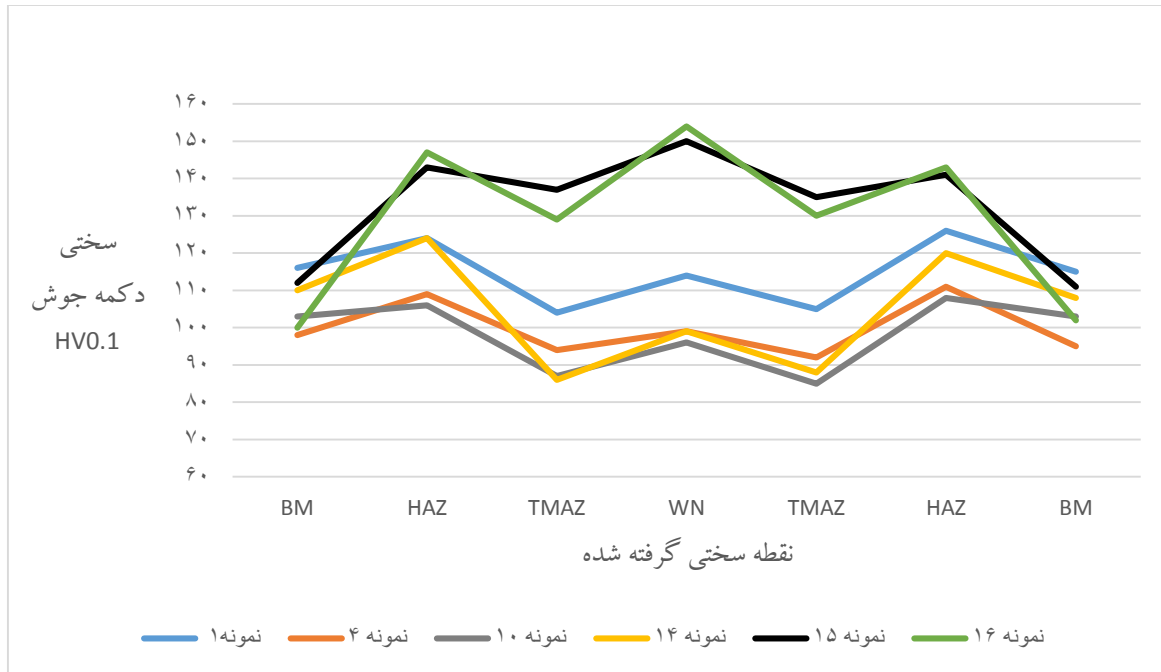


شکل (۷): مقایسه ریز سختی دکمه جوش برای نمونه‌های مختلف.

نسبت سرعت دورانی به خطی بالاتر و در نتیجه رشد بیشتر دانه‌ها و کاهش سختی می‌باشد [۲۴] (که باعث کاهش سختی در نمونه ۱۴ گردیده است). نمونه‌های ۱۵ با لایه واسط آلومینیوم 5556 و ۱۶ با لایه واسط 2024 با داشتن پروفیل سختی بالاتر به نسبت بقیه نمونه‌ها و با نسبت سرعت دورانی به خطی ۲۵ دارای بیشترین سختی در نواحی مختلف ناحیه جوش در بین نمونه‌ها می‌باشند که نشان‌دهنده افزایش سختی به کمک این لایه‌ها در ناحیه جوش و اختلاط کامل بین لایه واسط و فلز پایه در ناحیه اتصال می‌باشد [۲۴].

جدول ۹ مشخصات فازها و اندازه دانه‌های حاصل در دکمه جوش را برای نمونه‌های مختلف ارائه می‌دهد.

شکل ۸ پروفیل سختی منطقه جوش را برای نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشخص است در بین نمونه‌های بدون لایه واسط سختی در نقاط مختلف برای نمونه ۱ از نمونه ۴ بالاتر می‌باشد. نمونه جوشکاری شده با لایه واسط آلومینیوم 4043 دارای کمترین سختی در بین نمونه‌ها می‌باشد که با توجه به پایین بودن سختی آلومینیوم 4043 به نسبت فلز پایه [۲۰] این نتیجه نیز انتظار می‌رفت. در بین نمونه‌های جوشکاری شده با لایه واسط آلومینیوم 5556 سختی نمونه شماره ۱۴ در نسبت سرعت دورانی به خطی ۳۲ دور بر میلی‌متر به مقدار ۹۹ ویکرز از نمونه شماره ۱۵ در نسبت سرعت دورانی به خطی ۲۵ دور بر میلی‌متر به مقدار ۱۵۰ ویکرز کمتر بوده که علت آن حرارت ورودی بالاتر در



شکل (۸): پروفیل سختی منطقه جوش برای نمونه‌های مختلف

جدول (۹): مشخصات فازها و اندازه دانه نمونه‌های مختلف در منطقه دکمه جوش.

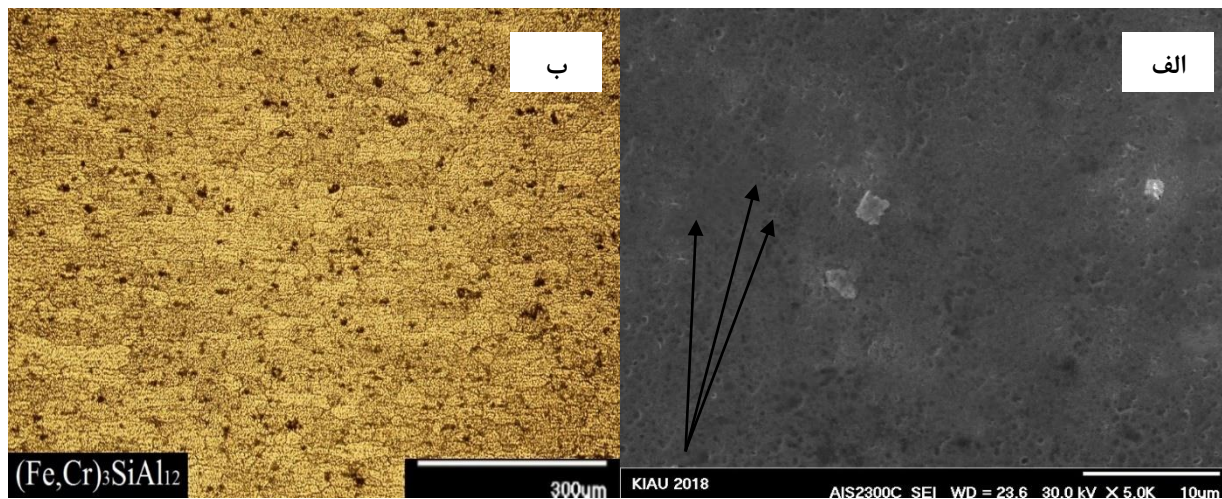
شماره نمونه	سرعت دورانی (دور بر دقیقه)	سرعت خطی (میلی متر بر دقیقه)	نسبت سرعت دورانی به سرعت خطی (دور بر میلی متر)	متوسط اندازه دانه در منطقه اغتشاش (میکرومتر)	نوع فاز	درصد حجمی فاز	متوسط اندازه فاز در منطقه اغتشاش (میکرومتر)
۱	۸۰۰	۳۱/۵	۲۵	۱۰	(Fe,Cr) ₃ SiAl ₁₂	۸	۳
۴	۱۰۰۰	۳۱/۵	۳۲	۱۳	(Fe,Cr) ₃ SiAl ₁₂	۴	۷
۱۰	۸۰۰	۳۱/۵	۲۵	۹	(Fe,Cr) ₃ SiAl ₁₂	۵	۲
۱۴	۱۰۰۰	۳۱/۵	۳۲	۱۲	Fe ₂ Si ₂ Al ₉	۴	۴
۱۵	۱۲۵۰	۵۰	۲۵	۱۰	(Fe,Cr,Mn) ₃ SiAl ₁₂	۵	۳
۱۶	۱۲۵۰	۵۰	۲۵	۱۱	Mg ₂ Al ₃	۳	۴
					(Fe,Cr,Mn) ₃ SiAl ₁₂	۵	۲
					Mg ₂ Al ₃	۳	۲
					(Fe,Mn) ₃ SiAl ₁₂	۵	۲
					Cu ₂ FeAl ₇	۴	۳
					(Fe,Cr) ₃ SiAl ₁₂	۹	۵
					فلز پایه		

در زمینه پخش شده است. اندازه دانه در فلز پایه قبل از عملیات جوشکاری ۳۸ میکرومتر بوده است. همچنین اندازه ترکیبات بین فلزی نامحلول در زمینه ۵ میکرومتر و درصد حجمی آنها

شکل ۹ تصویر میکروسکوپی نوری فلز پایه و رسوبات پراکنده در زمینه و SEM فلز پایه را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل ۹ مشخص است رسوبات به رنگ ذرات تیره‌رنگ

ارائه شده است، با توجه به نتایج جدول ۱۰ مشخص می‌گردد که رسوبات موجود در فلز پایه دارای ترکیب $(Fe,Cr)_3SiAl_{12}$ می‌باشند. شکل ۱۱ تصویر میکروسکوپی نوری و شکل ۱۲ تصویر SEM مربوط به نمونه‌های شماره ۱ و ۴ را نشان می‌دهد.

۹ درصد می‌باشد. رسوبات زمینه از نوع فازهای β و β' (Mg_2Si) می‌باشد که در فرآیند رسوب سختی به وجود آمده است و بسیار ریز (در ابعاد نانومتری) می‌باشند. رسوبات درشت‌تر که قابل‌رؤیت می‌باشند از نوع ترکیبات بین فلزی حاوی آهن می‌باشند که جهت تعیین نوع رسوبات موجود در زمینه آزمون آنالیز EDS انجام شد که نتایج آن در جدول ۱۰



شکل (۹): تصاویر الف- میکروسکوپی نوری فلز پایه و ب- SEM فلز پایه.



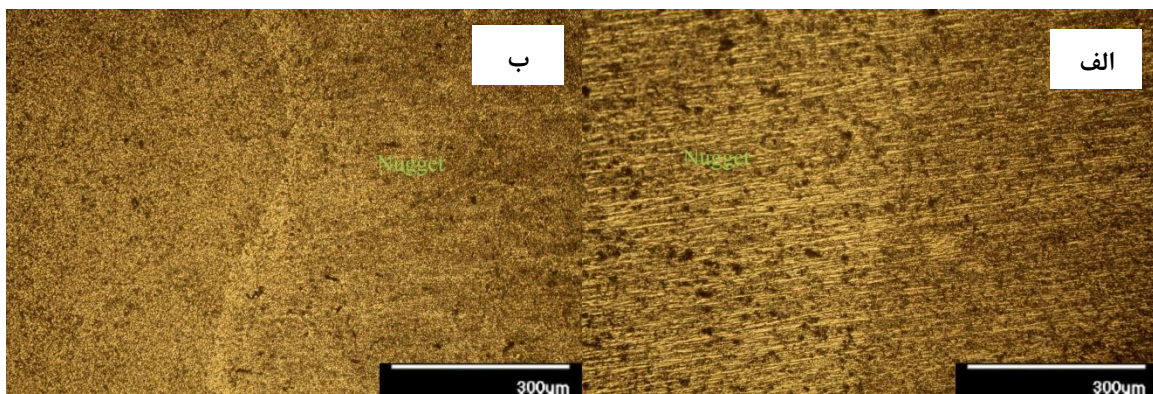
شکل (۱۰): آزمون آنالیز نقطه‌ای از نقطه مشخص شده فلز پایه.

جدول (۱۰): نتایج آزمون آنالیز رسوبات فلز پایه.

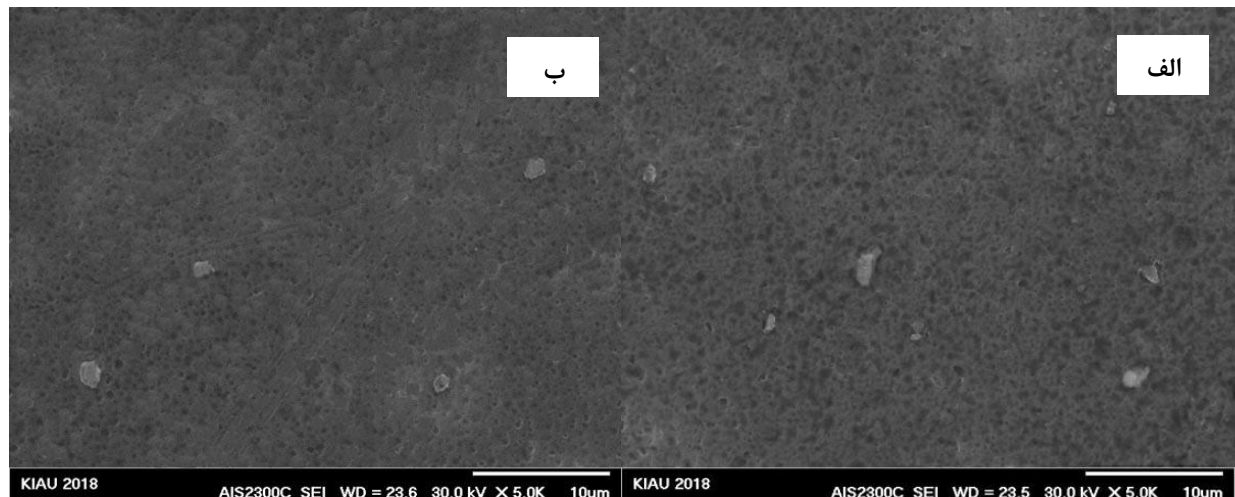
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units	Error 2-sig	MDL 3-sig
Mg	Ka	14/28	1/32	1/218	wt. %	22/114	0/211
Al	Ka	1,143/74	77/14	69/173	wt. %	1/208	0/196
Si	Ka	27/56	4/93	4/066	wt. %	7/58	0/249
Cr	Ka	64/04	2/41	3/905	wt. %	4/532	0/227
Fe	Ka	258/43	14/2	21/638	wt. %	10/242	0/282
			100.000	100.000	wt. %	Total	

رسوبات در این نمونه ۴ درصد می‌باشد. برای شناسایی بهتر رسوبات در نمونه ۱ آنالیز نقطه‌ای از دو نقطه مختلف گرفته شد (شکل ۱۳) که نتایج آن در جدول ۱۱ و ۱۲ ارائه شده است. با توجه به عدم استفاده از لایه واسط در نمونه شماره ۱ و همان‌طور که از نتایج جدول‌های ۱۱ و ۱۲ مشخص است، رسوبات تشکیل شده در این نمونه $(Fe,Cr)_3SiAl_{12}$ می‌باشند. شکل ۱۴ تصویر میکروسکوپی نوری و شکل ۱۵ تصویر SEM مربوط به نمونه شماره ۱۰ را نشان می‌دهد.

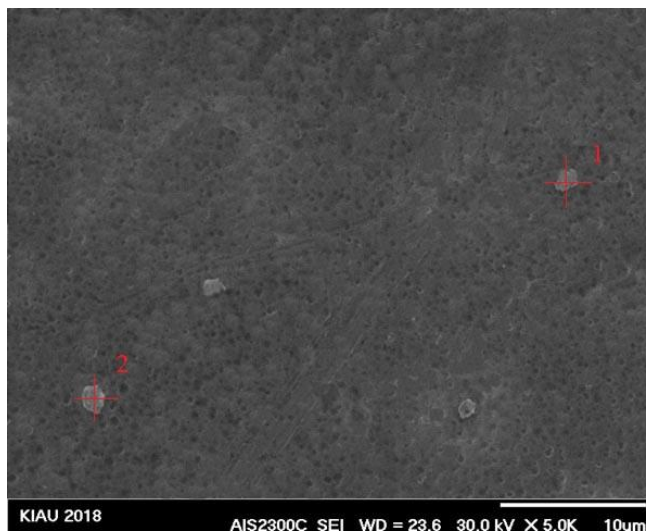
همان‌گونه که از بررسی شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مشخص است اندازه دانه‌ها در منطقه دکمه جوش نمونه ۱ (سرعت دورانی ۸۰۰ و خطی ۳۱/۵) ۱۰ میکرومتر بوده و اندازه دانه‌های نمونه ۴ (سرعت دورانی ۱۰۰۰ و خطی ۳۱/۵) ۱۳ میکرومتر می‌باشد. اندازه رسوبات به‌طور میانگین برای نمونه شماره ۱، ۳ میکرومتر بوده است، همچنین درصد حجمی رسوبات در این نمونه ۸ درصد می‌باشد. اندازه رسوبات به‌طور میانگین برای نمونه شماره ۴، ۷ میکرومتر بوده است. همچنین درصد حجمی



شکل (۱۱): تصویر میکروسکوپی نوری نمونه‌های الف- شماره ۱ و ب- شماره ۴.



شکل (۱۲): تصویر SEM نمونه‌های الف- شماره ۱ و ب- شماره ۴.



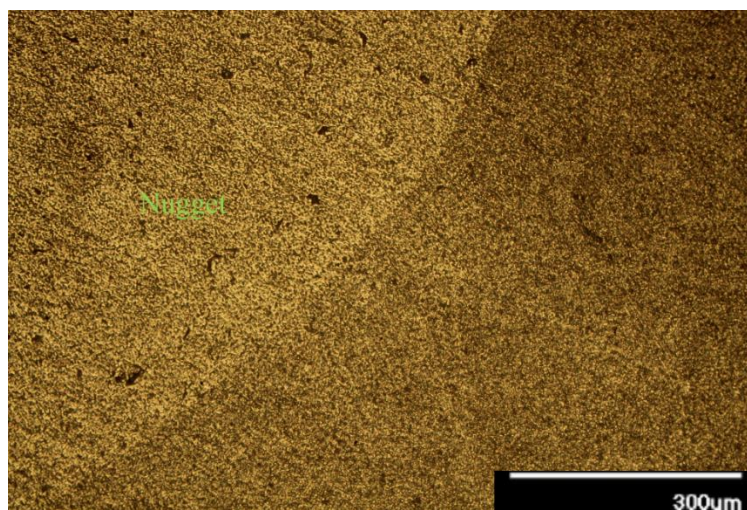
شکل (۱۳): آزمون آنالیز نقطه‌ای از نقاط مشخص شده نمونه شماره ۱.

جدول (۱۱): نتایج آزمون آنالیز نقطه‌ای برای نقطه شماره ۱ نمونه شماره ۱.

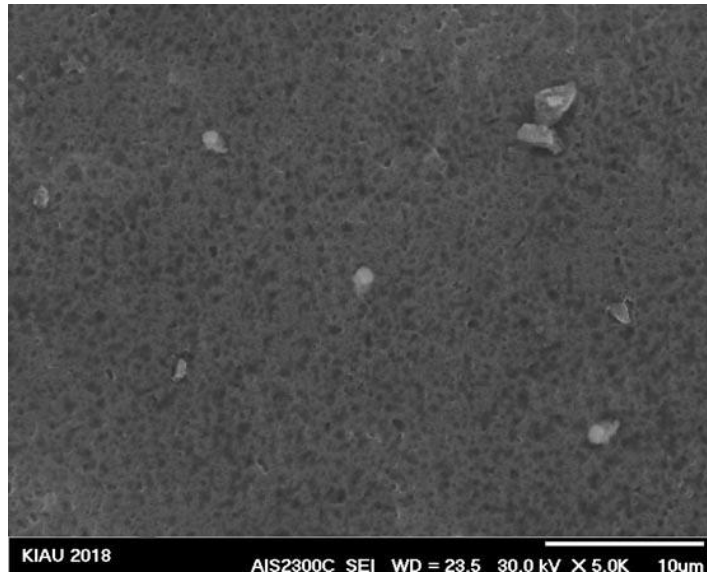
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units	Error 2-sig	MDL 3-sig
Mg	Ka	14.38	0.472	0.353	wt. %	5.071	0.115
Al	Ka	2,147.23	69.608	61.03	wt. %	0.456	0.106
Si	Ka	130.26	6.723	6.271	wt. %	13.815	0.152
Cr	Ka	161.74	4.545	7.15	wt. %	9.579	0.112
Fe	Ka	562.57	18.652	25.196	wt. %	1.822	0.152
Total							
			100.000	100.000	wt. %		

جدول (۱۲): نتایج آزمون آنالیز نقطه‌ای برای نقطه شماره ۲ نمونه شماره ۱.

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units	Error 2-sig	MDL 3-sig
Mg	Ka	8.26	0.447	0.312	wt. %	6.882	0.104
Al	Ka	1,090.82	73.914	60.927	wt. %	0.565	0.097
Si	Ka	63.71	5.527	5.174	wt. %	4.593	0.151
Cr	Ka	128.49	4.756	8.113	wt. %	2.481	0.134
Mn	Ka	6.15	0.163	0.249	wt. %	1.34	0.174
Fe	Ka	253.07	15.193	25.225	wt. %	8.168	0.244
Total							
			100.000	100.000	wt. %		



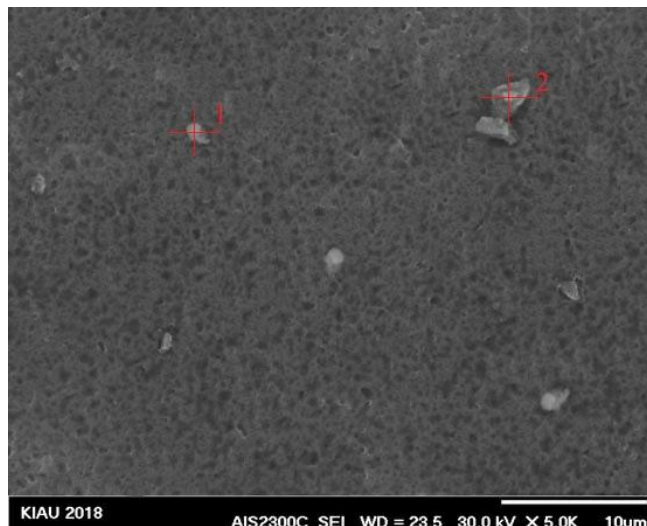
شکل (۱۴): تصویر میکروسکوپی نوری نمونه شماره ۱۰.



شکل (۱۵): تصویر SEM نمونه شماره ۱۰.

همان‌طور که در شکل ۱۴ و ۱۵ مشخص است، اندازه دانه‌ها در منطقه دکمه جوش نمونه ۱۰ (سرعت دورانی ۸۰۰ و خطی ۳۱/۵) ۹ میکرومتر بوده است. برای شناسایی بهتر رسوبات در نمونه ۱۰ آنالیز نقطه‌ای از دو نقطه مختلف گرفته شد (شکل ۱۶) که نتایج آن در جدول ۱۳ و ۱۴ ارائه شده است. با توجه به استفاده از لایه واسط (آلومینیوم ۴۰۴۳) در نمونه شماره ۱۰ و همان‌طور که از نتایج جدول‌های ۱۳ و ۱۴ مشخص است، رسوبات تشکیل شده در این نمونه $(Fe,Cr)_3SiAl_{12}$ و $Fe_2Si_2Al_9$ می‌باشند. اندازه رسوبات $(Fe,Cr)_3SiAl_{12}$ و $Fe_2Si_2Al_9$ (همان‌گونه که از شکل ۱۵ مشخص است) به‌طور میانگین به ترتیب، ۲ و ۴ میکرومتر بوده است، همچنین درصد حجمی این رسوبات ۵ و ۴ درصد می‌باشد. شکل ۱۷ تصویر میکروسکوپی نوری و شکل ۱۸ تصویر SEM ناحیه دکمه جوش مربوط به نمونه‌های اتصال یافته شماره ۱۴، ۱۵ و ۱۶ را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۱۴ و ۱۵ مشخص است، اندازه دانه‌ها در منطقه دکمه جوش نمونه ۱۰ (سرعت دورانی ۸۰۰ و خطی ۳۱/۵) ۹ میکرومتر بوده است. برای شناسایی بهتر رسوبات در نمونه ۱۰ آنالیز نقطه‌ای از دو نقطه مختلف گرفته شد (شکل ۱۶) که نتایج آن در جدول ۱۳ و ۱۴ ارائه شده است. با توجه به استفاده از لایه واسط (آلومینیوم ۴۰۴۳) در نمونه شماره ۱۰ و همان‌طور که از نتایج جدول‌های ۱۳ و ۱۴ مشخص است، رسوبات تشکیل شده در این نمونه $(Fe,Cr)_3SiAl_{12}$ و $Fe_2Si_2Al_9$ می‌باشند. اندازه رسوبات $(Fe,Cr)_3SiAl_{12}$ و $Fe_2Si_2Al_9$ (همان‌گونه که از شکل ۱۵ مشخص است) به‌طور میانگین به ترتیب، ۲ و ۴ میکرومتر بوده است، همچنین درصد حجمی این رسوبات ۵ و ۴ درصد می‌باشد. شکل ۱۷ تصویر میکروسکوپی نوری و شکل ۱۸ تصویر SEM ناحیه دکمه جوش مربوط به نمونه‌های اتصال یافته شماره ۱۴، ۱۵ و ۱۶ را نشان می‌دهد.



شکل (۱۶): آزمون آنالیز نقطه‌ای از نقاط مشخص شده نمونه شماره ۱۰.

جدول (۱۳): نتایج آزمون آنالیز نقطه‌ای برای نقطه شماره ۱ نمونه شماره ۱۰.

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units	Error 2-sig	MDL 3-sig
Mg	Ka	7.41	0.87	0.514	wt. %	6.753	0.123
Al	Ka	1,327.08	70.18	61.238	wt. %	0.607	0.111
Si	Ka	62.3	6.94	7.106	wt. %	8.063	0.183
Cr	Ka	51.37	4.87	6.321	wt. %	5.761	0.139
Mn	Ka	5.63	0.44	0.613	wt. %	9.087	0.168
Fe	Ka	248.92	16.7	24.208	wt. %	1.813	0.179
Total							
			100.000	100.000	wt. %		

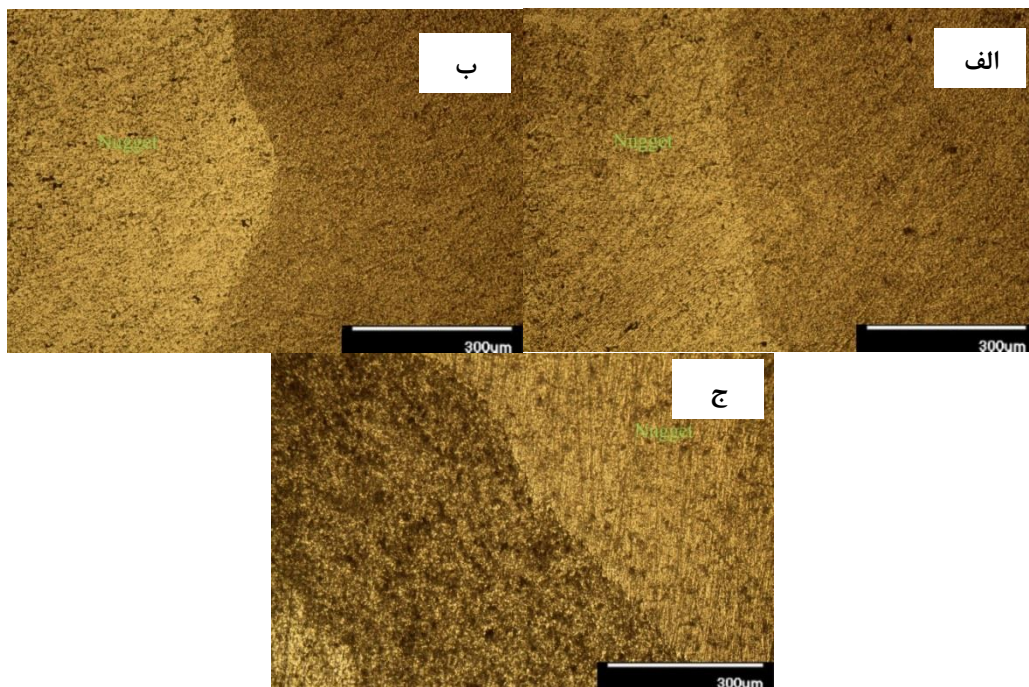
جدول (۱۴): نتایج آزمون آنالیز نقطه‌ای برای نقطه شماره ۲ نمونه شماره ۱۰.

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units	Error 2-sig	MDL 3-sig
Mg	Ka	9.49	0.974	0.642	wt. %	4.731	0.104
Al	Ka	1,257.63	82.428	77.05	wt. %	0.637	0.113
Si	Ka	72.51	8.819	9.062	wt. %	9.071	0.142
Cr	Ka	11.02	0.483	0.957	wt. %	3.618	0.109
Fe	Ka	80.04	7.296	12.289	wt. %	5.639	0.126
Total							
			100.000	100.000	wt. %		

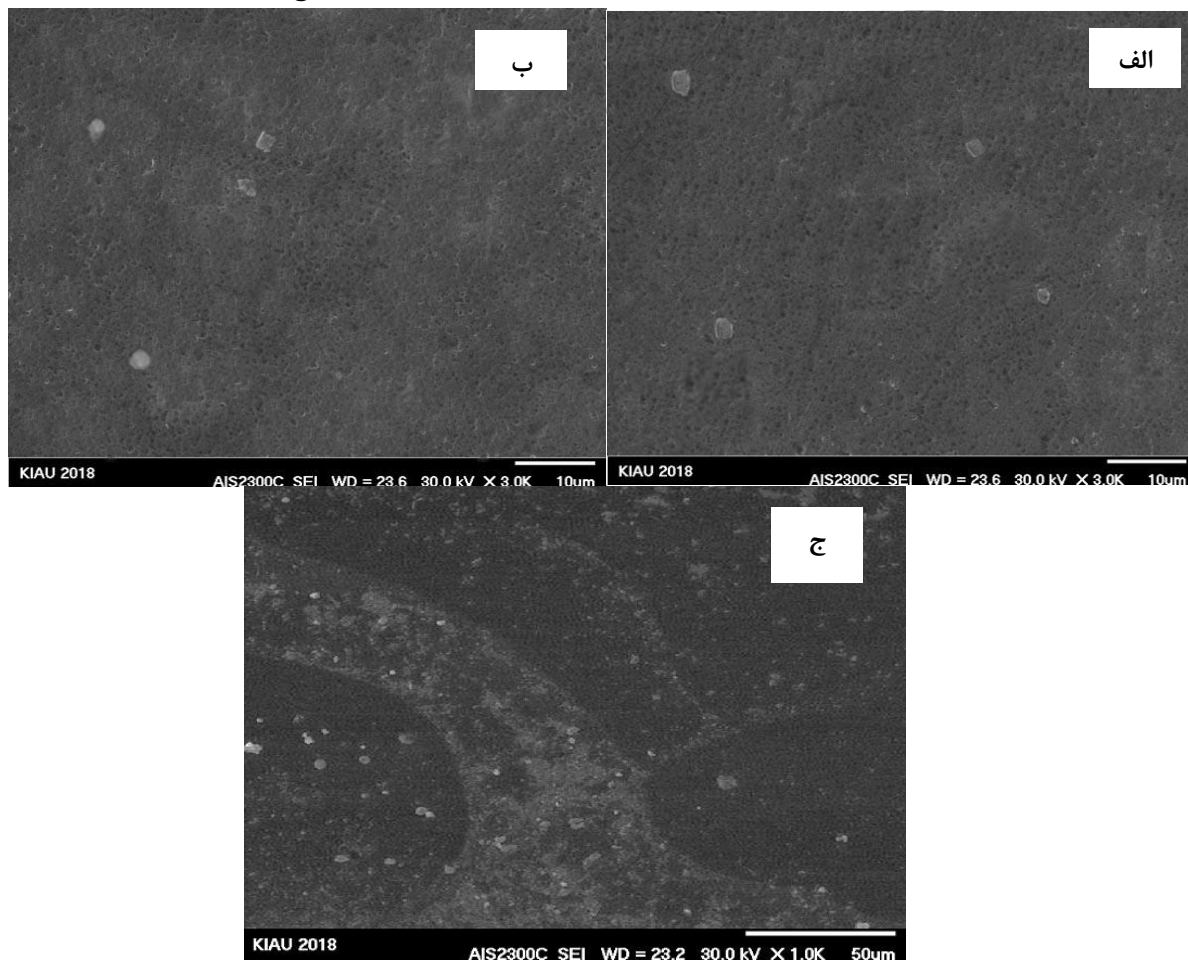
مشخص است، نقطه ۱ آنالیز فاز $(Fe, Mn)_3SiAl_{12}$ را نشان می‌دهد. نقطه شماره ۲ نیز با توجه به وجود عناصر آهن و مس و مطابقت با فازهای موجود در آلومینیوم 2024، فاز Cu_2FeAl_7 می‌باشد [۲۱].

از طرفی بررسی شکل ۱۴ مشخص می‌نماید که برای نمونه ۱۴ (با لایه واسط آلومینیوم 5556) اندازه رسوبات $(Fe, Cr, Mn)_3SiAl_{12}$ و Mg_2Al_3 به‌طور میانگین به ترتیب ۳ و ۴ میکرومتر بوده است، همچنین درصد حجمی این رسوبات نیز ۵ و ۳ درصد می‌باشد. در نمونه ۱۵ (با لایه واسط آلومینیوم 5556) اندازه رسوبات $(Fe, Cr, Mn)_3SiAl_{12}$ و Mg_2Al_3 به‌طور میانگین به ترتیب ۴ و ۲ میکرومتر است، همچنین درصد حجمی این رسوبات نیز ۵ و ۳ درصد است؛ و در نمونه شماره ۱۶ (با لایه واسط آلومینیوم 2024) اندازه رسوبات $(Fe, Mn)_3SiAl_{12}$ و Cu_2FeAl_7 به‌طور میانگین به ترتیب ۲ و ۳ میکرومتر بوده و همچنین درصد حجمی این رسوبات به ترتیب ۵ و ۴ درصد می‌باشد.

همان‌گونه که از شکل‌های ۱۷ و ۱۸ مشخص است اندازه دانه‌ها در منطقه دکمه جوش نمونه ۱۴ (سرعت دورانی ۱۰۰۰ و خطی ۳۱/۵) ۱۲ میکرومتر بوده و اندازه دانه‌های نمونه ۱۵ (سرعت دورانی ۱۲۵۰ و خطی ۵۰) ۱۰ میکرومتر بوده و همچنین اندازه دانه‌های نمونه ۱۶ (سرعت دورانی ۱۲۵۰ و خطی ۵۰) ۱۱ میکرومتر بوده است. برای شناسایی بهتر رسوبات در نمونه ۱۵ آنالیز نقطه‌ای از دو نقطه مختلف گرفته شد (شکل ۱۹) که نتایج آن در جدول ۱۵ و ۱۶ ارائه شده است. با توجه به استفاده از لایه واسط (آلومینیوم 5556) در نمونه شماره ۱۵ و همان‌طور که از نتایج جدول‌های ۱۵ و ۱۶ مشخص است، رسوبات تشکیل شده در این نمونه $(Fe, Cr, Mn)_3SiAl_{12}$ و Mg_2Al_3 می‌باشند. برای شناسایی بهتر رسوبات در نمونه ۱۶ آنالیز نقطه‌ای از دو نقطه مختلف گرفته شد (شکل ۲۰) که نتایج آن در جدول ۱۷ و ۱۸ ارائه شده است. با توجه به استفاده از لایه واسط (آلومینیوم 2024) در نمونه شماره ۱۶ و همان‌طور که از نتایج جدول‌های ۱۷ و ۱۸



شکل (۱۷): تصویر میکروسکوپی نوری نمونه‌های الف- شماره ۱۴ ب- شماره ۱۵ و ج- شماره ۱۶.



شکل (۱۸): تصویر SEM نمونه‌های الف- شماره ۱۴ ب- شماره ۱۵ و ج- شماره ۱۶.



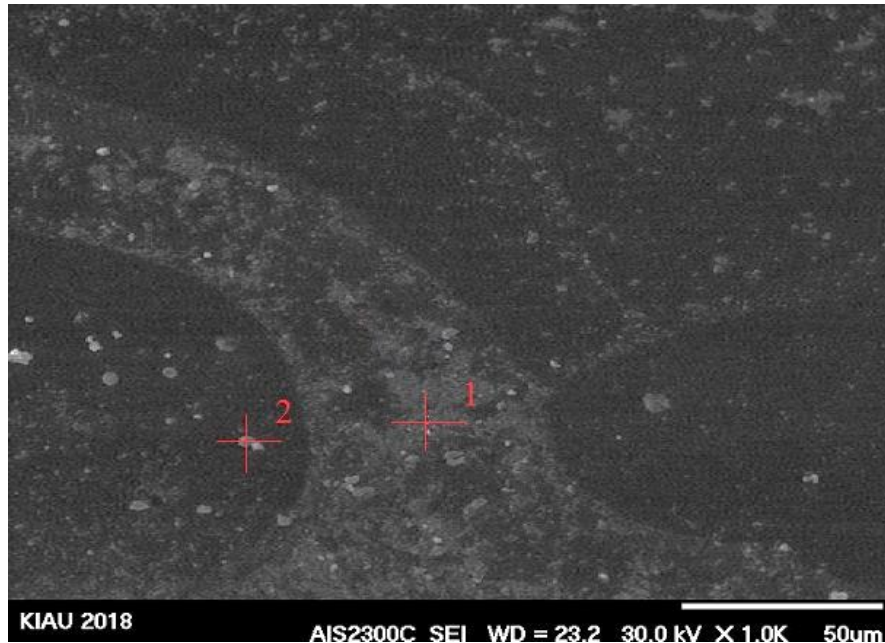
شکل (۱۹): آزمون آنالیز نقطه‌ای از نقاط مشخص شده نمونه شماره ۱۵.

جدول (۱۵): نتایج آزمون آنالیز نقطه‌ای برای نقطه شماره ۱ نمونه شماره ۱۵.

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units	Error 2-sig	MDL 3-sig
Mg	Ka	10.52	1.127	0.461	wt. %	6.438	0.138
Al	Ka	829.63	75.192	65.797	wt. %	0.701	0.129
Si	Ka	31.23	4.673	3.218	wt. %	60.143	0.216
Cr	Ka	68.64	3.417	5.219	wt. %	15.193	0.178
Mn	Ka	20.74	1.105	2.032	wt. %	18.203	0.196
Fe	Ka	252.06	14.486	23.273	wt. %	10.349	0.216
			100.000	100.000	wt. %		Total

جدول (۱۶): نتایج آزمون آنالیز نقطه‌ای برای نقطه شماره ۲ نمونه شماره ۱۵.

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units	Error 2-sig	MDL 3-sig
Mg	Ka	211.37	36.129	32.346	wt. %	0.823	0.116
Al	Ka	985.31	61.215	58.736	wt. %	0.725	0.109
Si	Ka	3.05	0.749	2.795	wt. %	24.572	0.005
Cr	Ka	97.24	0.525	1.612	wt. %	14.579	0.071
Mn	Ka	7.41	0.774	0.692	wt. %	44.567	0.06
Fe	Ka	8.52	0.608	3.819	wt. %	15.237	0.026
			100.000	100.000	wt. %		Total



شکل (۲۰): آزمون آنالیز نقطه‌ای از نقاط مشخص شده نمونه شماره ۱۶.

جدول (۱۷): نتایج آزمون آنالیز نقطه‌ای برای نقطه شماره ۱ نمونه شماره ۱۶.

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units	Error 2-sig	MDL 3-sig
Mg	Ka	7.64	0.612	0.539	wt. %	11.01	0.198
Al	Ka	1,372.06	68.43	57.325	wt. %	0.904	0.181
Si	Ka	62.94	4.82	4.282	wt. %	17.244	0.209
Mn	Ka	15.43	1.94	2.119	wt. %	6.468	0.181
Cu	Ka	11.69	0.986	1.107	wt. %	9.61	0.222
Fe	Ka	148.37	22.315	33.41	wt. %	1.945	0.256
				100.000	100.000	wt. %	Total

جدول (۱۸): نتایج آزمون آنالیز نقطه‌ای برای نقطه شماره ۲ نمونه شماره ۱۶.

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units	Error 2-sig	MDL 3-sig
Mg	Ka	17.36	0.676	0.439	wt. %	9.609	0.142
Al	Ka	2,307.93	74.12	61.354	wt. %	0.602	0.131
Si	Ka	13.74	0.731	0.553	wt. %	8.939	0.192
Cr	Ka	10.29	0.323	0.463	wt. %	4.793	0.144
Fe	Ka	186.22	7.32	9.719	wt. %	1.696	0.187
Cu	Ka	382.97	16.83	27.472	wt. %	4.724	0.227
				100.000	100.000	wt. %	Total

اندازه دانه ۹ میکرومتر کوچک‌ترین دانه‌ها را دارا می‌باشد و همچنین بزرگ‌ترین اندازه دانه در ناحیه اغتشاش (دکمه جوش) مربوط به نمونه‌هایی با نسبت سرعت چرخشی به‌سرعت خطی ۳۲ بوده در این بین نمونه شماره ۴ (بدون لایه واسط) با متوسط اندازه دانه ۱۳ میکرومتر بزرگ‌ترین دانه‌ها را داشت. متوسط اندازه دانه در هر ۲ حالت با استفاده و بدون

بررسی نتایج جدول ۹ و شکل‌های ۹، ۱۱، ۱۲، ۱۴، ۱۵، ۱۷ و ۱۸ (تصاویر میکروسکوپی نوری و SEM نمونه‌های مختلف) مشخص می‌نماید که کوچک‌ترین اندازه دانه در ناحیه اغتشاش (دکمه جوش) مربوط به نمونه‌هایی با نسبت سرعت دورانی به‌سرعت خطی ۲۵ دور بر میلی‌متر بوده در این بین نمونه شماره ۱۰ (با لایه واسط آلومینیوم 4043) با متوسط

4043 جهت جوشکاری این نمونه می‌باشد. در نمونه شماره ۱۴ و ۱۵ جوشکاری شده با لایه واسط آلومینیوم 5556 مشخص می‌گردد که در منطقه دکمه جوش نوع رسوبات (فازها) در هر دو نمونه یکسان بوده و از نوع $(Fe, Cr, Mn)_3SiAl_{12}$ و Mg_2Al_3 می‌باشند ولی با این تفاوت که درصد حجمی و اندازه رسوبات فوق در نمونه‌ها با یکدیگر متفاوت می‌باشند، نتایج جدول ۹ مشخص می‌نماید که با کاهش نسبت دورانی به خطی و تغییر حرارت ورودی اندازه و درصد حجمی رسوبات در این نمونه‌ها تغییر می‌نماید [۲۴-۲۷].

در این نمونه‌ها (نمونه شماره ۱۴ و ۱۵) رسوب (فاز) $(Fe, Cr, Mn)_3SiAl_{12}$ نشان‌دهنده حضور فلز پایه آلومینیوم 6061 و رسوب (فاز) Mg_2Al_3 نشان‌دهنده حضور لایه واسط آلومینیوم 5556 در منطقه اغتشاش می‌باشد. از طرفی بررسی دقیق نتایج جدول ۹ مشخص می‌نماید که کمترین اندازه رسوبات و کمترین درصد حجمی رسوبات در نمونه‌های مختلف مربوط به رسوب (فاز) Mg_2Al_3 در نمونه شماره ۱۵ (با لایه واسط آلومینیوم 5556 در نسبت سرعت دورانی به خطی ۲۵ دور بر میلی‌متر) با مقدار ۲ میکرومتر و با ۳ درصد حجمی می‌باشد.

بررسی نتایج جدول ۹ همچنین مشخص می‌نماید که در نمونه شماره ۱۶ (جوشکاری شده با لایه واسط آلومینیوم 2024 با نسبت سرعت دورانی به خطی، ۲۵ دور بر میلی‌متر) رسوب (فاز) $(Fe, Mn)_3SiAl_{12}$ مربوط به حضور فلز پایه آلومینیوم 6061 و رسوب (فاز) Cu_2FeAl_7 نشان‌دهنده حضور لایه واسط آلومینیوم 2024 می‌باشد.

۴- نتیجه گیری

در تحقیق فوق اثر لایه واسط در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) بر خواص مکانیکی و ریزساختار اتصال آلومینیوم 6061 بررسی و نتایج ذیل حاصل گردید:

۱- در بین نمونه‌ها، استحکام کششی نمونه ۱۶ (با لایه واسط آلومینیوم 2024 و نسبت سرعت دورانی به خطی، ۲۵ دور بر

استفاده از لایه واسط زمانی که نسبت سرعت دورانی به سرعت خطی کاهش می‌یابد کاسته شده است که علت این امر ناشی از اثر حرارت ورودی جوشکاری و ارتباط آن با دما و زمان تبلور مجدد دینامیکی در منطقه اتصال می‌باشد. با کاهش نسبت سرعت دورانی به سرعت خطی زمان برای اعمال حرارت ورودی به قطعه کاهش می‌یابد در نتیجه دانه متبلور شده زمان کمتری برای رشد پیدا می‌کند و ریزتر باقی می‌ماند [۲۵ و ۲۶].

بررسی نتایج جدول ۹ و همچنین شکل‌های ۱۰، ۱۳، ۱۶، ۱۹ و ۲۰ در خصوص رسوبات (فازها) نمونه‌های مختلف مشخص می‌نماید که در اثر جوشکاری آلومینیوم 6061 بدون استفاده از لایه واسط (نمونه شماره ۱) با نسبت سرعت دورانی به خطی، ۲۵ دور بر میلی‌متر، متوسط اندازه رسوبات (فازها) $(Fe, Cr)_3SiAl_{12}$ نسبت به فلز پایه آلومینیوم 6061 کاهش یافته است که علت این امر ناشی از خرد شدن فازهای مذکور در حین عملیات اغتشاش می‌باشد [۲۴-۲۶] ولی در نمونه شماره ۴ (جوشکاری شده بدون لایه واسط با نسبت سرعت دورانی به خطی، ۳۲ دور بر میلی‌متر) متوسط اندازه رسوبات (فازها) $(Fe, Cr)_3SiAl_{12}$ افزایش داشته ولی در مقابل درصد حجمی رسوبات (فازها) $(Fe, Cr)_3SiAl_{12}$ نسبت به فلز پایه آلومینیوم 6061 کاهش داشته است که علت این امر ناشی از حرارت ورودی بالا و ادغام رسوبات $(Fe, Cr)_3SiAl_{12}$ در یکدیگر می‌باشد [۲۶ و ۲۷].

در نمونه شماره ۱۰ (جوشکاری شده با لایه واسط آلومینیوم 4043 با نسبت سرعت دورانی به خطی، ۲۵ دور بر میلی‌متر) درصد حجمی و اندازه رسوبات (فازها) $(Fe, Cr)_3SiAl_{12}$ نسبت به فلز پایه آلومینیوم 6061 کمتر می‌باشد که علت این امر ناشی از امتزاج کمتر فلز پایه آلومینیوم 6061 در منطقه اغتشاش به علت استفاده از لایه واسط آلومینیوم 4043 و همچنین خرد شدن فازهای مذکور در حین عملیات اغتشاش می‌باشد، در این نمونه فاز $Fe_2Si_2Al_9$ در محل دکمه جوش شناسایی شده است که ناشی از استفاده لایه واسط آلومینیوم

۵- مراجع

- [1] O. T. Midling, L. D. Oosterkamp & J. Bersaas, "Friction Stir Welding Aluminum Process and Applications. In: Seventh International Conference INALCO'98", Cambridge, UK, April. 1998.
- [2] R. S. Mishra & Z. Y. Ma, "Friction Stir Welding and Processing", Materials Science and Engineering A, vol. 50, pp, 1-78, 2005.
- [3] C. J. Dawes & W. M. Thomas, "Friction Stir Process Welds Aluminum Alloys". Welding Journal, vol. 75, no. 3, pp, 41-45, 1998.
- [4] M. Shirin Abadi Farahani, M. Delpishe & M. M. Divandari, "Investigation of Microstructure Interface and Mechanical Properties of Dissimilar Al/Mg Welded by FSSW with Zn Interlayer", Congress of Mechanical Engineering, vol. 9, pp, 1-9, 2017.
- [5] G. Huang, X. Feng & Y. Shen, "Friction Stir Brazing of 6061 Aluminum Alloy and H62 Brass: Evaluation of Microstructure", Mechanical and Fracture Behavior, Materials & Design, vol. 99, pp, 403-411, 2016.
- [6] ر. مکبری، "بررسی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ گروه ۱۰۰۰ آلومینیوم با لایه واسط روی، مس و برنج در محل اتصال"، پایان‌نامه دانشگاه صنعتی شریف. ۱۳۹۴.
- [7] ع. رضوی و ح. ثابت، "بررسی اثر حضور لایه واسط AA7075 بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال لب به لب AA1050 جوشکاری شده به روش FSW"، نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال چهارم، ص ۱۸-۱، ۱۳۹۷.
- [8] A. Suri, "An Improved FSW Tool for Joining Commercial Aluminium Plates", Procedia Materials Science, vol. 6, pp, 1857-1864, 2014.
- [9] O. H. Elangovan & Balasubramanian, V. "Influences of Tool Pin Profile and Tool Shoulder Diameter on the Formation of Friction Stir Processing Zone in AA6061 Aluminum Alloy". Materials & Design. vol. 29, pp, 362-373, 2008.
- [10] C. H. Mohana Rao & K. Mallikarjuna Rao, "Studies on Friction Stir Welding of Aluminum Alloys 6061- To- 6061 Similar Metals", International Journal of Mechanical Engineering and Technology, vol. 8, no. 1, pp, 264-269, 2017.
- میلی‌متر) بالاترین مقدار و به میزان ۱۹۲ مگاپاسکال بوده است.
- ۲- در بین نمونه‌ها، استحکام کششی نمونه ۱۰ (با لایه واسط آلومینیوم 4043 و سرعت دورانی به خطی، ۲۵ دور بر میلی‌متر) کمترین مقدار و به میزان ۱۶۶ مگاپاسکال بوده است.
- ۳- استفاده از آلومینیوم 5556 و 2024 به‌عنوان لایه واسط باعث بهبود خواص مکانیکی در نسبت سرعت دورانی به خطی ۲۵ دور بر میلی‌متر در اتصال آلیاژهای آلومینیوم 6061 می‌گردد.
- ۴- بیشترین میزان سختی در ناحیه دکمه جوش مربوط به نمونه شماره ۱۶ جوشکاری شده با لایه واسط آلومینیوم 2024 در نسبت سرعت دورانی به خطی، ۲۵ دور بر میلی‌متر با مقدار ۱۵۴ ویکرز بوده است.
- ۵- کمترین میزان سختی در ناحیه دکمه جوش مربوط به نمونه شماره ۱۰ جوشکاری با لایه واسط آلومینیوم 4043 در نسبت سرعت دورانی به خطی، ۲۵ دور بر میلی‌متر با مقدار ۹۶ ویکرز بوده است.
- ۶- نمونه‌های شماره ۱۰ (با لایه واسط آلومینیوم 4043) و شماره ۱۴ (با لایه واسط آلومینیوم 5556) در نسبت سرعت دورانی به خطی، ۳۲ دور بر میلی‌متر دارای بزرگ‌ترین اندازه دانه‌ها در ناحیه اغتشاش (دکمه جوش) به ترتیب به مقدار ۱۳ و ۱۲ میکرومتر بوده‌اند.
- ۷- کمترین اندازه دانه در بین نمونه‌های مختلف مربوط به نمونه شماره ۱۰ جوشکاری با لایه واسط آلومینیوم 4043 در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و سرعت خطی ۳۱/۵ میلی‌متر بر دقیقه در نسبت سرعت دورانی به خطی ۲۵ دور بر میلی‌متر به مقدار ۹ میکرومتر بود.
- ۷- کمترین اندازه رسوبات (فازها) و کمترین درصد حجمی رسوبات (فازها) در نمونه‌های مختلف مربوط به رسوب Mg_2Al_3 در نمونه شماره ۱۵ (با لایه واسط آلومینیوم 5556) در نسبت سرعت دورانی به خطی ۲۵ دور بر میلی‌متر) با مقدار ۲ میکرومتر و با ۳ درصد حجمی بود.

Nonferrous Alloys and Special-Purpose Material". ASM Handbook, vol. 2, pp, 220-223, 1990.

[21] P. Heurtier, M. J. Jones, C. Desrayaud, J. H. Driver, F. Montheillet & D. Allehau, "Mechanical and Thermal Modeling of Friction Stir Welding". Journal of Materials Processing Technology, vol. 171, pp, 348–357, 2006.

[22] A. Askari, S. Silling, B. London & M. Mahoney, "Modelling, Analysis of Friction Stir Welding and Processing", TMS. 2001.

[23] S. Sheikhi & C. Bolfarini, "Preliminary Study on the Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar Friction Stir Welds in Aircraft Aluminum Alloys 2024-T351 and 6056-T4", Journal of Materials Processing Technology, vol. 206, pp, 132–142, 2007.

[24] Y. Sato, S. H. C. Park, H. Kokawa, "Microstructural Factors Governing Hardness in Friction Stir Welds of Solid Solution Hardened Al Alloys". Metallurgical & Materials Transactions A, vol. 32, no.12, 3033–3042, 2001.

[۲۵] ح. آقاچانی درازکلا، م. الباسی و م. حسین زاده، "بررسی شکل گیری عیوب و لایه‌های بین فلزی در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیم AA1100 به فولاد A441 AISI"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال نهم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۴.

[26] S. Neetesh, S. Chandrashekhar, A. Kumar & V. R. Chary, "Defects Formation During Friction Stir Welding: A Review", International Journal of Engineering and Management Research, vol. 7, pp, 121-125, 2017.

[27] C. Hamilton, S. Dymek, & A. Sommers, "Athermal Model of Friction Stir Welding in Aluminum Alloys". International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 48, pp, 1120–1130, 2008.

۶- پی نوشت

[1] Friction Stir Weldin

[11] G. C. Jadhav, R. S. Dalu, "A Study of Effect Process Parameters in FSW on Tensile Strength of AA6061-T6", International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology, vol. 10, no. 2, pp, 482-490, 2019.

[12] Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM-E8M.

[13] Standard Test Methods for Microindentation Hardness of Materials, ASTM E384.

[14] Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens, ASTM E3.

[15] P. Janaki, R. Ramulu & Narayanan, G, "Internal Defect and Process Parameter Analysis During Friction Stir Welding of Al 6061 Sheets", International Journal of Advance Manufacture Technology, vol. 65, pp, 1515–1528, 2013.

[16] M. Z. H. Khandkar, J. A. Khan & A. P. Reynolds, "Prediction of Temperature Distribution and Thermal History During Friction Stir Welding: Input Torque Based Model". Science and Technology of Welding and Joining, vol. 8, pp, 165–174, 2013.

[17] K. A. A. Hassan, P. B. Pragnell, A. F. Norman, D. A. Price & S. W. Williams, "Effect of Welding Parameters on Nugget Zone Microstructure and Properties in High Strength Aluminum Alloy Friction Stir Welds". Science and Technology of Welding and Joining, vol. 8, pp, 257–268, 2003.

[18] S. Rajakumar, C. Muralidharan & V. Balasubramanian, "Predicting Tensile Strength, Hardness and Corrosion Rate of Friction Stir Welded AA6061-T6 Aluminium Alloy Joints". Materials & Design, vol. 32, pp, 78–90, 2011.

[۱۹] ف. غروی، ا. ابراهیم زاده و ع. سهیلی، "ارزیابی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال لبه روی هم جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلایژ آلومینیم ۶۰۶۱ در سرعت های پیشروی متفاوت"، فصلنامه فرآیند های نوین در مهندسی مواد، سال دهم، شماره دوم، ص ۱۱۵-۱۲۹، تابستان ۱۳۹۵.

[20] A. Kearney, A. Rooy & L. Elwin, "Properties of Wrought Aluminum and Aluminum Alloys, In Langer, Edward L. Properties and Selection:

Effect of Interlayer Type on Mechanical Properties and Microstructure of the 6061 Aluminum Alloy Joint by Friction Stir Welding

Seyed Amin Kafaei¹, Hamed Sabet^{2*}, Mohsen Ghanbari Haghighi³

1- M.Sc Student of Materials Engineering, Islamic Azad University, Karaj, Iran.

2- Associate Professor, Department of Materials Engineering, Islamic Azad University, Karaj, Iran.

3- Assistant Professor, Department of Materials Engineering, Islamic Azad University, Karaj, Iran.*Corresponding author: h-sabet@kiaiu.ac.ir

Abstract

In the current research, the effect of Parameters on friction stir welding of aluminum 6061 metal is carried out using with and without an interlayer. After the welding process, microscopic tests, traction and microscopic examination were performed using optical microscope and scanning electron microscope. Among the welded samples with 4043, 5556, and 2024 aluminum interlayers and without interlayer, the welded specimen with a rotational speed of 1250 rpm and a linear velocity of 50 mm / min with an aluminum interlayer of 2024 has the highest tensile strength 192 MPa and has the most hardness of 154 Vickers. The minimum tensile strength of the welded specimen with the aluminum 4043 as an interlayer at the rotational speed of 800 rpm and the linear velocity of 31.5 mm / min is 166 MPa, and with 96 wickers, it also has the least hardness in the weld button in between All samples were. The microstructure study also showed the larger grain size in the welded samples with the interlayer and without interlayer, with a rotational to linear ratio of 32 rpm as compared to the rest of the specimens. The sample was welded to the aluminum with interlayer of 4043 at a speed of 800 rpm and a linear speed of 31.5 mm / min with the smallest grain size of 9 μm in the samples welded to the interlayer. The results of the tests show that the use of aluminum 5556 and 2024 as an interlayer improves the mechanical properties of the bonding zone.

Keywords: Friction Stir Welding, Aluminum 6061, Interlayer.

Journal homepage: ma.iaumajlesi.ac.ir

Please cite this article using:

Seyed Amin Kafaei, Hamed Sabet, Mohsen Ghanbari Haghighi, Effect of Interlayer Type on Mechanical Properties and Microstructure of the 6061 Aluminum Alloy Joint by Friction Stir Welding, New Process in Material Engineering, 2020, 14(4), 1-23.