

ارزیابی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال لبه روی هم جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ در سرعت های پیشروی متفاوت

فرهاد غروی^{۱*}، ایمان ابراهیم زاده^۲، علی سهیلی^۳

مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

*drfgharavi@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۸/۳۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۰۶)

چکیده

در این تحقیق ورق هایی از جنس آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ با طرح اتصال لبه روی هم بوسیله روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی جوش داده شدند. تاثیر پارامتر سرعت پیشروی ابزار روی ریز ساختار و خواص مکانیکی اتصالات جوشکاری شده مورد ارزیابی قرار گرفت. فرآیند جوشکاری در شرایط سرعت دورانی ثابت (۱۰۰۰ دور بر دقیقه) و سرعت های پیشروی متغیر (۲۰ تا ۶۰ میلیمتر بر دقیقه) انجام پذیرفت. نتایج حاصله نشان داد با افزایش سرعت پیشروی، استحکام برشی-کششی و راندمان اتصال به ترتیب از حدود ۱۲۶ تا ۱۳۲ مگا پاسکال و از حدود ۴۰/۶ تا ۴۲/۵ درصد افزایش یافت. اگرچه میزان متوسط سختی در ناحیه دکمه جوش (NZ) نسبت به ناحیه متاثر از حرارت (HAZ) با افزایش سرعت پیشروی، افزایش یافت ولی اندازه متوسط دانه در ناحیه دکمه جوش و ناحیه متاثر از حرارت به ترتیب از حدود ۴۳ به ۳۲ میکرومتر و از حدود ۹۹ به ۸۷ میکرومتر کاهش یافت. همچنین میزان پارامتر ضخامت موثر ورق^۱ (EPT) با افزایش سرعت پیشروی از حدود ۳/۴ تا ۴/۱ میلیمتر افزایش یافت و باعث محدود شدن شکل و ابعاد عیب نازک شدگی^۲ از ناحیه دکمه جوش تا فصل مشترک نواحی دکمه جوش و متاثر از کار مکانیکی (TMAZ) گردید. حالت و شیوه شکست در اتصالاتی با بالاترین استحکام برشی-کششی به صورت جدایش ورق در امتداد عیب نازک شدگی در سمت پیشرو در درون ناحیه دکمه جوش نمایان شد.

کلمات کلیدی:

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، اتصال لبه رویهم، آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱، سرعت پیشروی، خواص مکانیکی.

۱- مقدمه

شدن جای داده شده و متعاقباً در امتداد خط اتصال حرکت داده میشود، مورد استفاده قرار می گیرد [۱]. به دلیل اینکه در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی عیوب متداول در اتصال ذوبی همچون ترک های ناشی از انجماد و ذوب موضعی،

فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بعنوان یک تکنولوژی سبز حالت جامد در اتصال ورق های فلزی بر مبنای یک عملیات ترمومکانیکی که توسط یک ابزار چرخان مصرف نشدنی با بین و شانه و با طراحی خاص در لبه های مجاور ورق ها برای متصل

گذاری کاهش یافته و راندمان اتصال کم خواهد شد [۷-۹].

تأثیر برخی از پارامترهای موثر در این نوع جوشکاری همچون حرارت ورودی، سرعت پیشروی و سرعت دورانی ابزار بر میزان خواص مکانیکی و ریز ساختار آلیاژهای آلومینیوم جوشکاری شده توسط محققان زیادی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۰-۱۴]. در این راستا، امینی و همکاران [۱۵] تأثیر حرارت ورودی بر ریز ساختار و خواص خوردگی ناحیه جوش آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۶ را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که بیشترین دانسیته جریان خوردگی مربوط به فلز پایه بوده و نواحی متأثر از جوش و دکمه جوش از مقاومت بهتری نسبت به فلز پایه برخوردار می باشند. همچنین پورمند و همکاران [۱۶] تأثیر میزان حرارت ورودی و عملیات حرارتی پس از جوشکاری را روی ریز ساختار و خواص مکانیکی ناحیه جوش غیر مشابه آلیاژ آلومینیوم ۶۰۱۳ به منبزمخالص را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که جوش های تولید شده در شرایط جوشکاری ۱۶۰۰ دور بر دقیقه و ۳۵ میلیمتر بر دقیقه بدون عیب ریز ساختاری بوده ولی استحکام کششی و درصد ازدیاد طول جوش حاصل شده نسبت به فلزات پایه کمتر بود. همچنین نشان دادند که لایه های بین فلزی با افزایش زمان عملیات حرارتی پسگرم ضخیم تر شدند. اکثر این محققین از طرح اتصال لب به لب استفاده نموده اند ولی تحقیق و بررسی روی طرح اتصال لبه رویه کمتر مورد توجه قرار گرفته است [۱۷-۲۲]. بنابراین با توجه اینکه طرح اتصال لبه روی هم توسط محققین کمتر مورد مطالعه قرار می گیرد، در این تحقیق به بررسی اثرات سرعت پیشروی ابزار بر ریز ساختار و خواص مکانیکی اتصال لبه روی هم آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ پرداخته شد. به منظور بررسی خواص مکانیکی اتصال ها از آزمون های برش-کشش و میکرو سختی استفاده گردید. تأثیر پارامتر ضخامت ورق موثر نیز بر استحکام برشی-کششی اتصالات لبه روی هم بررسی گردید. بعد از انجام آزمون برش-کشش سطح مقطع و حالت شکست مقاطع جوشکاری شده مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین مقطع عرضی اتصالات به کمک روش متالوگرافی و میکروسکوپ

تشکیل حفرات و آخال های میکرونی، حذف شده است لذا این روش جوشکاری به سرعت توسعه و گسترش یافته است [۲].

فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می تواند بعنوان یک فرآیند سودمند و باصرفه برای اتصال آلیاژ های آلومینیوم مورد استفاده قرار گیرد چرا که در این فرآیند اولاً عمل اتصال در دمایی زیر نقطه ذوب آلیاژ انجام می گیرد و ثانیاً این فرآیند کارایی و انعطاف پذیری مناسبی جهت اتصال آلیاژ های ریختگی، اکستروود شده و نورد شده را دارد بدون اینکه احتیاج به آماده سازی پیچیده سطح و یا نیاز به استفاده از گاز محافظ داشته باشد [۳-۴]. فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می تواند جهت اتصال مواد با طرح اتصالات متفاوتی همچون اتصال لبه روی هم، اتصال لب به لب و نیز اتصال T-شکل مورد استفاده قرار گیرد. در این میان اتصال لبه روی هم بطور گسترده در صنایع خودرو سازی، کشتی سازی و هوافضا کاربرد دارد و همچنین از این نوع اتصال می توان بعنوان جایگزین اتصال پرچ نیز استفاده نمود [۵-۶]. در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با طرح اتصال لبه رویه هم چون نازک شدگی در دو سمت پیشرو و پسرو وجود دارد که می تواند بر خواص مکانیکی اتصالات جوشکاری شده تأثیر گذار باشد [۴ و ۷-۸].

افزایش سرعت دورانی یا کاهش سرعت پیشروی می تواند بر اندازه و شکل این عیب تأثیر داشته باشد، زیرا افزایش سرعت دورانی یا کاهش سرعت پیشروی موجب افزایش حرارت ورودی به موضع جوش شده و باعث می شود که اندازه این عیب بزرگتر شده و در نتیجه خواص مکانیکی اتصال کاهش یابد. همچنین با کاهش حرارت ورودی که در اثر کاهش سرعت دورانی یا افزایش سرعت پیشروی اتفاق می افتد از یک سو می توان اندازه این عیب را کاهش داد و از سوی دیگر می توان باعث عدم پیوستگی آن شد که نتیجه این امر بهبود خواص مکانیکی می باشد [۴ و ۷-۸]. از طرف دیگر وجود این عیب باعث کاهش میزان پارامتر ضخامت موثر ورق (EPT) در یکی از ورق های بالایی یا پایینی گردد که در نتیجه آن میزان تحمل نیروی وارده بر این گونه مقاطع جوشکاری شده در هنگام بار

الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی و اثرات سرعت پیشروی بر ریز ساختار اتصالات مورد مطالعه قرار گرفت. ورق هایی از جنس آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ با ضخامت ۵ میلیمتر مورد استفاده قرار گرفت. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی ورق ها در جدول ۱ و ۲ ارایه شده است.

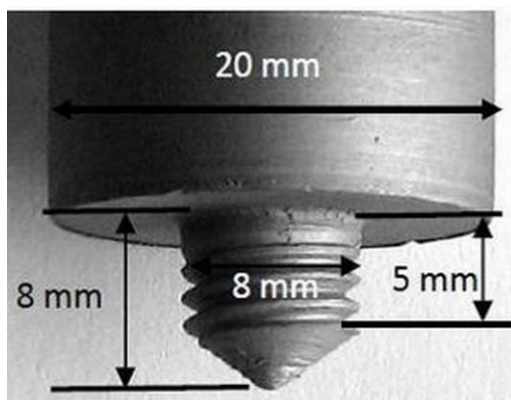
۲- مواد و انجام روش تحقیق

جدول (۱): ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ بر حسب درصد وزنی (%wt)

	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr
AA6061	پایه	۰/۶۶	۰/۳	۰/۲۷	۰/۰۷	۱/۰	۰/۱۸

جدول (۲): خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱

استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی (MPa)	درصد ازدیاد طول (%)	سختی (HV)
۲۸۰	۳۱۰	۱۵	۱۰۵



شکل (۱): مشخصات ابزار مورد استفاده

ابعاد ورق ها مطابق با استاندارد [۲۳] ASTM D17.3 بصورت $220\text{mm} \times 140\text{mm}$ انتخاب گردید. ورق ها روی یک فیکسچر با مقدار برهم نهی ۵۰ میلیمتر روی یکدیگر قرار گرفته و گیره بندی شدند. از یک ابزار از جنس فولاد گرم کار AISI H13 با سختی حدود ۵۵HRC جهت انجام جوشکاری استفاده گردید. شمایی از شکل و ابعاد ابزار مورد استفاده در شکل ۱ نشان داده شده است. شرایط جوشکاری اعمال شده در این تحقیق در جدول ۳ ارایه گردیده است.

جدول (۳): پارامتر های جوشکاری اعمال شده

کد نمونه	سرعت پیشروی (mm/min)	سرعت دورانی (rpm)	زاویه انحراف پین (درجه)	عمق نفوذ پین (mm)
۱	۲۰	۱۰۰۰	۳	۹/۸
۲	۴۰	۱۰۰۰	۳	۹/۸
۳	۵۰	۱۰۰۰	۳	۹/۸
۴	۶۰	۱۰۰۰	۳	۹/۸

اساس استاندارد [۲۴] ASTM E340 اچ گردیدند. همچنین جهت مشاهده ریز ساختار آلیاژ پایه و نواحی جوش، سطوح نمونه ها بر اساس استاندارد [۲۵] ASTM E407 اچ شد. برای ارزیابی مورفولوژی دانه های نواحی جوش و آلیاژ پایه، نمونه ها

جهت شناسایی نواحی مختلف جوش، متالوگرافی ماکروسکوپی انجام گرفت. نمونه هایی با ابعاد $60 \times 10 \times 5\text{mm}$ عمود بر جهت جوشکاری بریده شد. سطح مقطع عرضی نمونه ها توسط فرآیند سنباده زنی و پولیش کاری آماده گردید. سطوح آماده شده بر

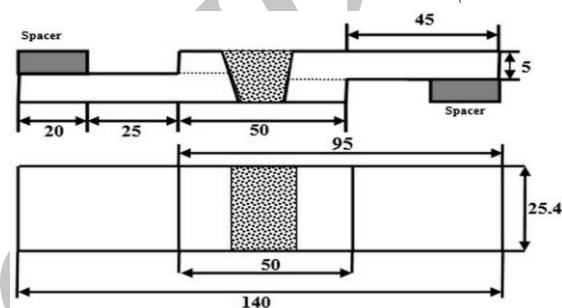
ساخت کشور ایتالیا با نیروی ۱۰۰ گرم با زمان توقف ۱۰ ثانیه و در فواصل ۲ میلیمتر اعمال گردید. بررسی های میکرو ساختاری و سطح مقطع شکست نمونه ها توسط میکروسکوپ نوری (OM) با مارک (Olympus) مدل CK40M و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با مارک LEO-VP435 ساخت کشور امریکا انجام پذیرفت. از آنالیز عنصری طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) به منظور بررسی فازهای تشکیل شده استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی ماکروسکوپی نواحی جوش

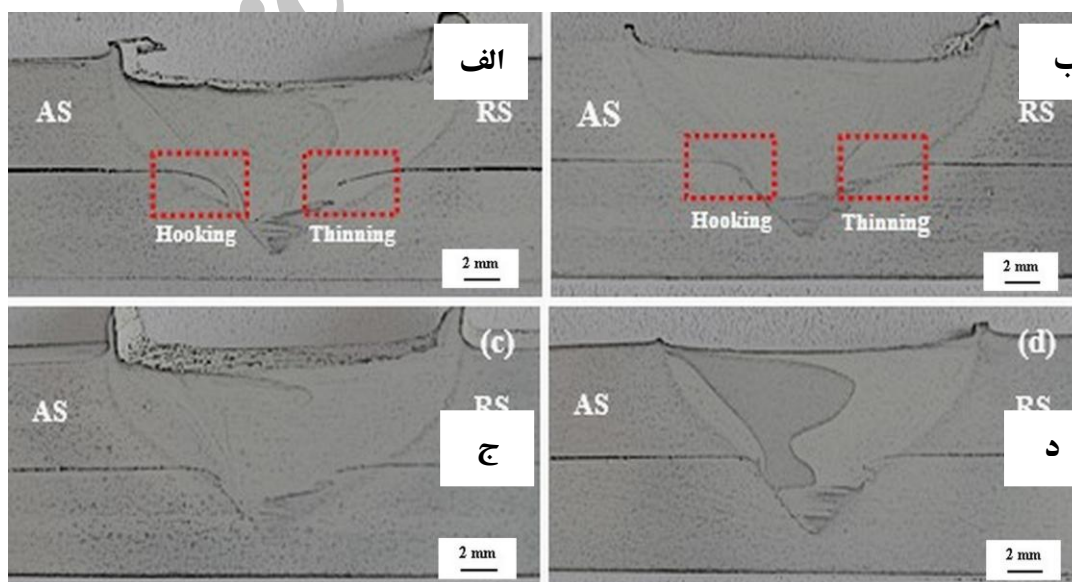
جهت مشخص شدن نواحی مختلف جوش و نیز معین شدن ابعاد و شکل عیب نازک شدگی بررسی ماکروسکوپی انجام گرفت. شکل ۳ تصاویر ماکروسکوپی از اتصالات جوشکاری شده را در سرعت های پیشروی مختلف نشان می دهد. در این تصاویر عیب نازک شدگی در دو سمت پیشرو (AS) و پسرو (RS) نشان داده شده اند. با توجه به شکل ۳ مشاهده می شود که ابعاد و شکل این عیوب با تغییر شرایط جوشکاری تغییر یافته اند. بر این اساس با کاهش سرعت پیشروی عیب حاصله به سمت پایین و در جهت ناحیه دکمه جوش امتداد یافته اند.

توسط استاندارد [۲۵] ASTM E407 آماده گردید و اندازه دانه های حاصله بر اساس استاندارد [۲۶] ASTM E112 و با استفاده از روش خطوط متقاطع مورد محاسبه قرار گرفتند. جهت بررسی استحکام برشی اتصالات، نمونه هایی عمود بر جهت جوشکاری تهیه گردید، بطوریکه ناحیه جوش در وسط نمونه ها قرار دارد. ابعاد و هندسه نمونه ها بر اساس استاندارد ASTM برای اتصال روی هم در شکل ۲ نشان داده شده است [۲۳]. آزمون کشش توسط دستگاه کشش مدل Instron 4486 ساخت کشور انگلستان انجام گرفت.



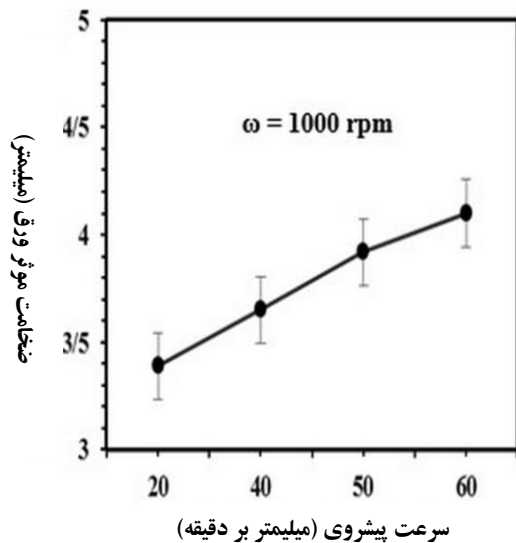
شکل (۲): ابعاد و هندسه نمونه آزمون برشی-کششی [۲۳] (واحد ابعاد mm)

محل شکست نمونه ها پس از انجام آزمون برشی-کششی ثبت و سطح مقطع شکست مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمون ریزسختی ویکرز مطابق با استاندارد [۲۷] ASTM E384 جهت رسم پروفایل سختی توسط دستگاه سختی سنجی مدل Koopa MH1



شکل (۳): تصاویر ماکروسکوپی از مقطع عرضی اتصالات جوشکاری شده در سرعت پیشروی: (الف): ۲۰، (ب): ۴۰، (ج): ۵۰ و (د): ۶۰ میلیمتر بر دقیقه

تواند معیاری برای بیان اهمیت عیب نازک شدگی در میزان استحکام اتصالات جوشکاری شده باشد. در این راستا نیز برخی محققین نیز اهمیت این پارامتر را بر میزان استحکام اتصالات جوشکاری شده مورد ارزیابی قرار داده اند [۲۹،۲۲۸]. در شکل ۴ تغییرات پارامتر ضخامت موثر ورق (EPT) برای تمامی اتصالات جوشکاری شده در سرعت های پیشروی متفاوت ارایه شده است. مطابق با این شکل می توان بیان نمود که میزان پارامتر EPT که بستگی به تغییرات اندازه و ارتفاع عیب نازک شدگی دارد، کاهش یافته است چرا که میزان ارتفاع عیب افزایش یافته است. با توجه به شکل ۴، با افزایش سرعت پیشروی از ۲۰ تا ۶۰ میلیمتر بر دقیقه، میزان EPT به اندازه ۰/۷۹ میلیمتر افزایش یافته است. بنابراین با افزایش EPT پیش بینی می شود که استحکام مکانیکی اتصالات جوشکاری شده افزایش خواهد یافت.



شکل (۴): اثر سرعت پیشروی بر ضخامت موثر ورق (EPT)

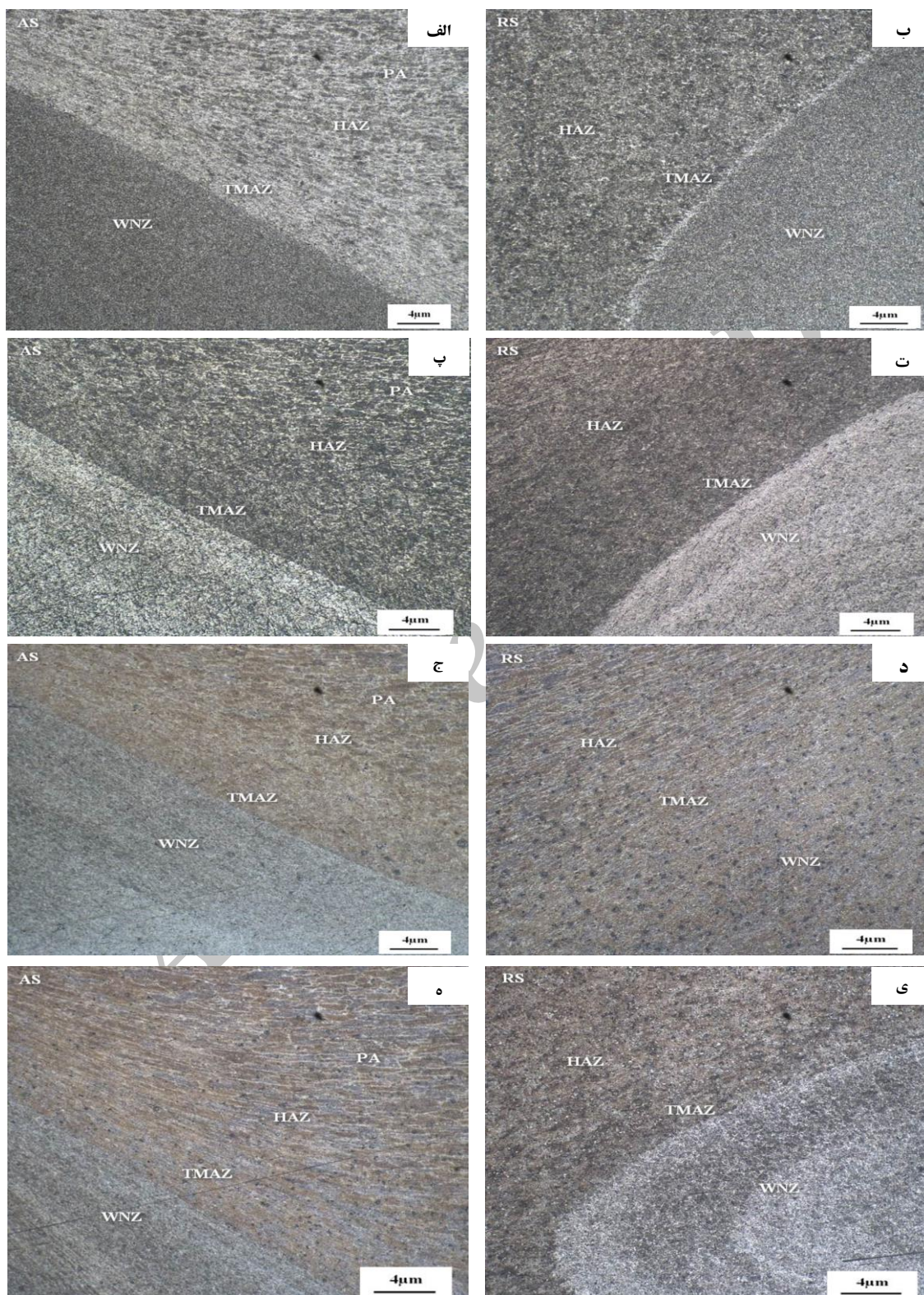
۳-۲- بررسی میکروسکوپی نواحی جوش

تصاویر متالوگرافی از ریز ساختار مشاهده شده در نواحی مختلف جوش برای تمامی اتصالات در شکل ۵ ارایه شده است.

این حالت بیان می کند که جریان مواد در ناحیه متأثر از کار مکانیکی (TMAZ) و در نزدیکی فصل مشترک این ناحیه با ناحیه دکمه جوش متمایل به پایین بوده است. همچنین واضح است که عیب حاصله فقط در ناحیه TMAZ بوده و تا فصل مشترک این ناحیه با ناحیه دکمه جوش محدود شده است.

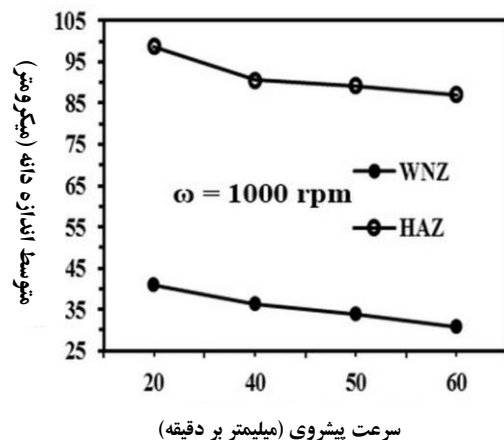
بایستی در نظر گرفت که با عبور ابزار در درون ناحیه جوش و با ایجاد کرنش و حرارت، تغییر فرم پلاستیک شدید در ناحیه جوش حاصل خواهد شد. در این راستا، ناحیه متأثر از کار مکانیکی در بر گیرنده حداقل کرنش پلاستیک و میزان حرارت نسبت به ناحیه دکمه جوش می باشد. بر خلاف ناحیه TMAZ عیب نازک شدگی در ناحیه HAZ نیز ظاهر شده باینکه این ناحیه تحت تاثیر حرارت ناشی از جوشکاری می باشد. از طرف دیگر واضح است که با کاهش سرعت پیشروی از ۶۰ به ۲۰ میلیمتر بر دقیقه، جهت عیب نازک شدگی در ناحیه پسرو به سمت پایین بوده و تا مرز ناحیه دکمه جوش امتداد یافته است. این بدین معنی است که وقتی که سرعت پیشروی افزایش می یابد، امتداد پیشروی عیب نازک شدگی محدود به مرز ناحیه دکمه جوش نشده و به سرعت به سمت درون ناحیه دکمه جوش گسترش می یابد.

از طرف دیگر با افزایش سرعت پیشروی، میزان حرارت ورودی کاهش یافته و این کاهش حرارت منجر به کوچک شدن و محدود شدن عیب نازک شدگی در فصل مشترک ناحیه دکمه جوش با ناحیه متأثر از کار مکانیکی می گردد. از نگاه دیگر بایستی تاکید نمود که اگرچه با کاهش سرعت پیشروی جهت حرکت عیب نازک شدگی در سمت پیشرو تقریباً ثابت می ماند، اما شکل هندسی عیب در سمت پیشرو می تواند بتدریج به شکل خمیده تغییر شکل دهد و یا حتی می تواند جهت پیشروی آن بطور ناگهانی تغییر نماید [۹،۱۱،۲۸]. بر این اساس می توان عنوان نمود که استحکام اتصالات جوش داده شده در صورتی که میزان پیشروی عیب محدود به فصل مشترک ناحیه TMAZ و ناحیه دکمه جوش شود، افزایش خواهد یافت. بایستی به این نکته توجه داشت که پارامتر ضخامت موثر ورق^۱ (EPT) می

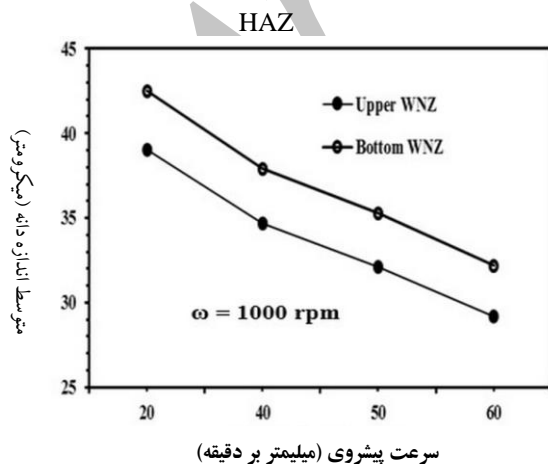


شکل (۵): تصاویر متالوگرافی از ریز ساختار نواحی جوش در شرایط جوشکاری: (الف و ب): (۲۰-۱۰۰۰)، (پ و ت): (۴۰-۱۰۰۰)، (ج و د): (۵۰-۱۰۰۰) و (ه و ی): (۱۰۰۰-۶۰) (دور بر دقیقه - میلیمتر بر دقیقه)

این ناحیه با افزایش سرعت پیشروی کاهش یافته است و این کاهش فرصت لازم برای رشد دانه در این ناحیه را فراهم نمی کند. همانگونه که از شکل ۶ مشاهده می شود در ناحیه HAZ همانند ناحیه دکمه جوش، اندازه متوسط دانه با افزایش سرعت پیشروی از میزان ۹۸/۸ میکرومتر به ۸۷/۱ میکرومتر کاهش یافته است. تاثیر سرعت پیشروی بر میزان تغییرات متوسط اندازه دانه در ناحیه دکمه جوش بالایی و پایینی در شکل ۷ آمده است. بایستی توجه نمود که بعلاوه وجود فشار بالا روی ورق بالایی که می تواند ناشی از تماس مستقیم شانه ابزار با ورق بالایی نسبت به ورق پایینی باشد، باعث شده است که متوسط اندازه دانه در تمامی اتصالات جوشکاری شده در ناحیه دکمه جوش بالایی بمراتب کمتر از دکمه جوش پایینی باشد [۳۳].



شکل (۶): اثر سرعت پیشروی بر متوسط اندازه دانه در نواحی دکمه جوش و



شکل (۷): اثر سرعت پیشروی بر تغییرات متوسط اندازه دانه در دکمه جوش بالایی و پایینی

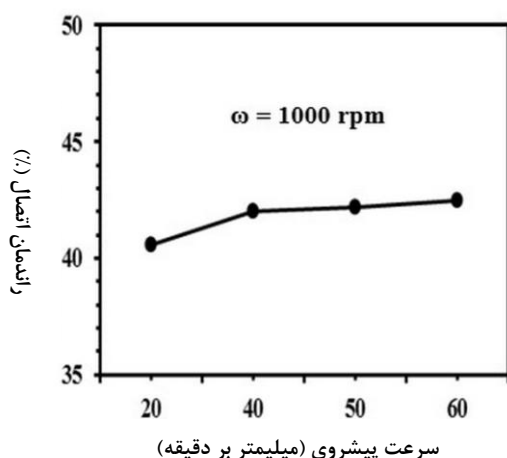
بر طبق ریزساختار مشاهده شده می توان به این موارد اشاره نمود:
۱- آلیاژ پایه بعنوان بخشی از اتصالات جوش که از ناحیه جوش دور بوده، دستخوش هیچ گونه تغییر متالورژیکی حاصل از فرآیند جوشکاری نشده است و ساختار اولیه آن حفظ شده است.

۲- در مقایسه با آلیاژ پایه، در ناحیه HAZ مقداری تغییر در ریزساختار آن مشاهده می شود که این بدان معنی است که تغییرات این ناحیه ناشی از سیکل حرارتی ایجاد شده در طول فرآیند جوشکاری بوده است. در این حالت، ناحیه HAZ دارای دانه های درشتی شبیه به آلیاژ پایه بوده ولی اندازه آنها کوچکتر می باشد. اصلاح ساختار در ناحیه HAZ می تواند مربوط به القاء شدن حرارت در این ناحیه و میزان سرعت سرد شدن آن بعد از فرآیند جوشکاری باشد [۴ و ۱۸ و ۳۰-۳۲].

۳- واضح است که ریز ساختار اولیه بطور میکروسکوپی در ناحیه TMAZ ناپدید شده و این ناحیه بصورت یک ناحیه کوتاه و گذرا بین نواحی HAZ و دکمه جوش وجود دارد. در این راستا در تمامی اتصالات جوشکاری شده دیده می شود که ناحیه TMAZ در سمت پیشرو بوضوح قابل رویت بوده ولی در سمت پسرو چندان آشکار نمی باشد. در ناحیه TMAZ ریز ساختار بصورت ساختار با دانه های بازبایی دینامیکی شده است بطوریکه دانه ها در جهت طولی و در یک امتداد کشیده شده اند. علت ایجاد این نوع ساختار ناشی از آن است که شرایط حرارتی و تغییر شکل به اندازه کافی جهت ایجاد یک ساختار با دانه های تبلور مجدد کامل وجود نداشته است. اندازه دانه ها درون ناحیه جوش بطور معمول با تغییر شرایط جوشکاری تغییر می یابد. بنابراین واضح است که اندازه دانه با زیاد شدن میزان حرارت ورودی در درون ناحیه جوش افزایش می یابد [۴ و ۳۰-۳۱]. در این راستا، شکل ۶ میزان تغییرات متوسط اندازه دانه را در نواحی HAZ و دکمه جوش در سرعت های پیشروی متفاوت نشان می دهد. با توجه به شکل دیده می شود که با افزایش سرعت پیشروی، اندازه دانه در ناحیه دکمه جوش کاهش یافته است. واضح است که میزان حرارت ورودی و دمای جوشکاری در

۳-۳- بررسی خواص مکانیکی

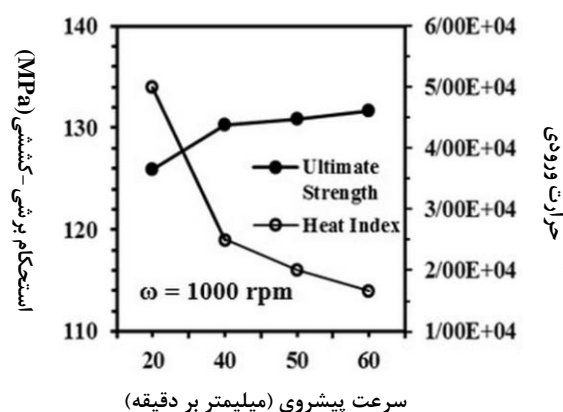
اتصال جوشکاری شده به استحکام کششی آلیاژ در نظر گرفته شده است. بر این اساس، با افزایش سرعت پیشروی میزان راندمان اتصال بطور خطی از حدود ۴۰/۶۰ درصد به ۴۲/۵۰ درصد افزایش یافته است. نتایج بدست آمده از راندمان اتصال در سرعت های پیشروی متفاوت می تواند مرتبط با اثر پارامتر EPT و میزان حرارت ورودی بر استحکام برشی-کششی اتصالات جوشکاری شده باشد.



شکل (۹): اثر سرعت پیشروی بر راندمان اتصال نمونه های جوشکاری شده

تغییرات میکروسختی در ورق های بالایی و پایینی اتصالات جوشکاری شده در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به پروفایل های سختی ارایه شده مشخص است که میزان سختی بتدریج از آلیاژ پایه به سمت ناحیه HAZ کاهش و سپس به آرامی تا ناحیه TMAZ افزایش و در نهایت در ناحیه دکمه جوش کاهش یافته در حالی که کمترین سختی در ناحیه HAZ در سمت پیشرو در تمامی اتصالات جوشکاری شده مشاهده شده است. با توجه به شکل ۱۰ می توان عنوان نمود که بر خلاف شرایط جوشکاری، تمامی اتصالات جوشکاری شده دارای یک ناحیه نرم تری همچون ناحیه دکمه جوش و HAZ در مقایسه با آلیاژ پایه هستند. در این راستا بایستی توجه نمود که میزان متوسط سختی در ناحیه دکمه جوش (از ۵۹/۸۵ تا ۶۵/۹۵ ویکرز) نسبت به آلیاژ پایه (۱۰۵ ویکرز) کمتر می باشد. اگرچه سختی بالا در ناحیه دکمه جوش در مقایسه با ناحیه HAZ مربوط

در شکل ۸ تاثیر سرعت پیشروی بر میزان استحکام برشی-کششی و میزان حرارت ورودی اتصالات جوشکاری شده ارایه شده است. بوضوح می توان دریافت که با کم شدن سرعت پیشروی، میزان استحکام برشی-کششی به علت افزایش نیروی شکست، کاهش یافته است. بایستی تاکید کرد که کاهش میزان استحکام اتصالات به علت تغییر در ریز ساختار ناحیه جوش، عیب نازک شدگی و یا پارامتر EPT در طول فرآیند جوشکاری باشد. میزان پارامتر EPT با تغییر در اندازه و ارتفاع عیب نازک شدگی تغییر می کند و هر چقدر میزان آن بزرگتر باشد مقدار استحکام برشی-کششی بالاتر خواهد بود [۲۲، ۲۰، ۱۱، ۸، ۲۹]. بنابراین با افزایش پارامتر EPT، میزان نیروی شکست افزایش می یابد. همچنین بر طبق شکل ۸ می توان عنوان نمود که با افزایش سرعت پیشروی، میزان حرارت ورودی کاهش می یابد و لذا کمتر شدن حرارت ورودی میزان کارسختی را افزایش می دهد [۳۰، ۳۴]. بر این اساس اندازه و ابعاد عیب نازک شدگی کاهش پیدا می کند و در نتیجه آن با افزایش میزان پارامتر EPT مقدار استحکام برشی-کششی افزایش می یابد.

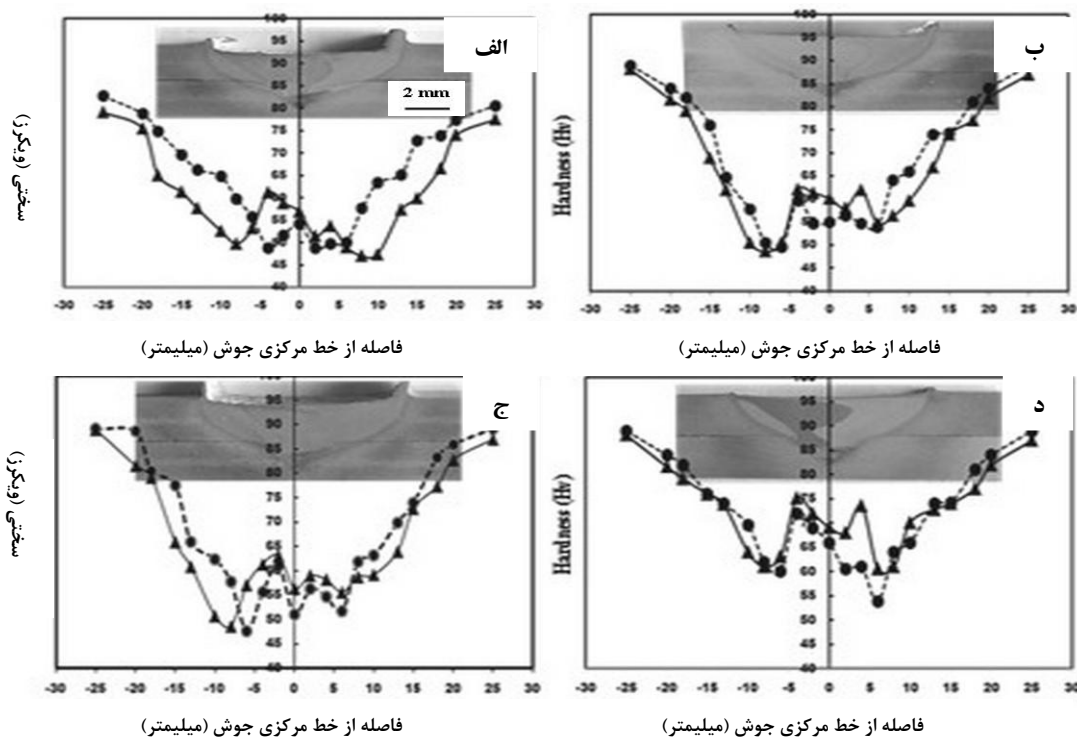


شکل (۸): اثر سرعت پیشروی بر استحکام برشی-کششی و میزان حرارت ورودی

شکل ۹ میزان راندمان اتصال مقاطع جوشکاری شده را در سرعت های پیشروی متفاوت نشان می دهد. بایستی توجه نمود که پارامتر راندمان اتصال برابر با نسبت استحکام برشی-کششی

کاهش سختی در دو ناحیه دکمه جوش و HAZ نسبت به آلیاژ پایه باشد [۳۵].

به ریز شدن دانه ها در این ناحیه می باشد ولی انحلال رسوبات بین فلزی بوسیله کار مکانیکی و افزایش حرارت ورودی ناشی از کاهش سرعت پیشروی می توانند عوامل دیگری در ایجاد

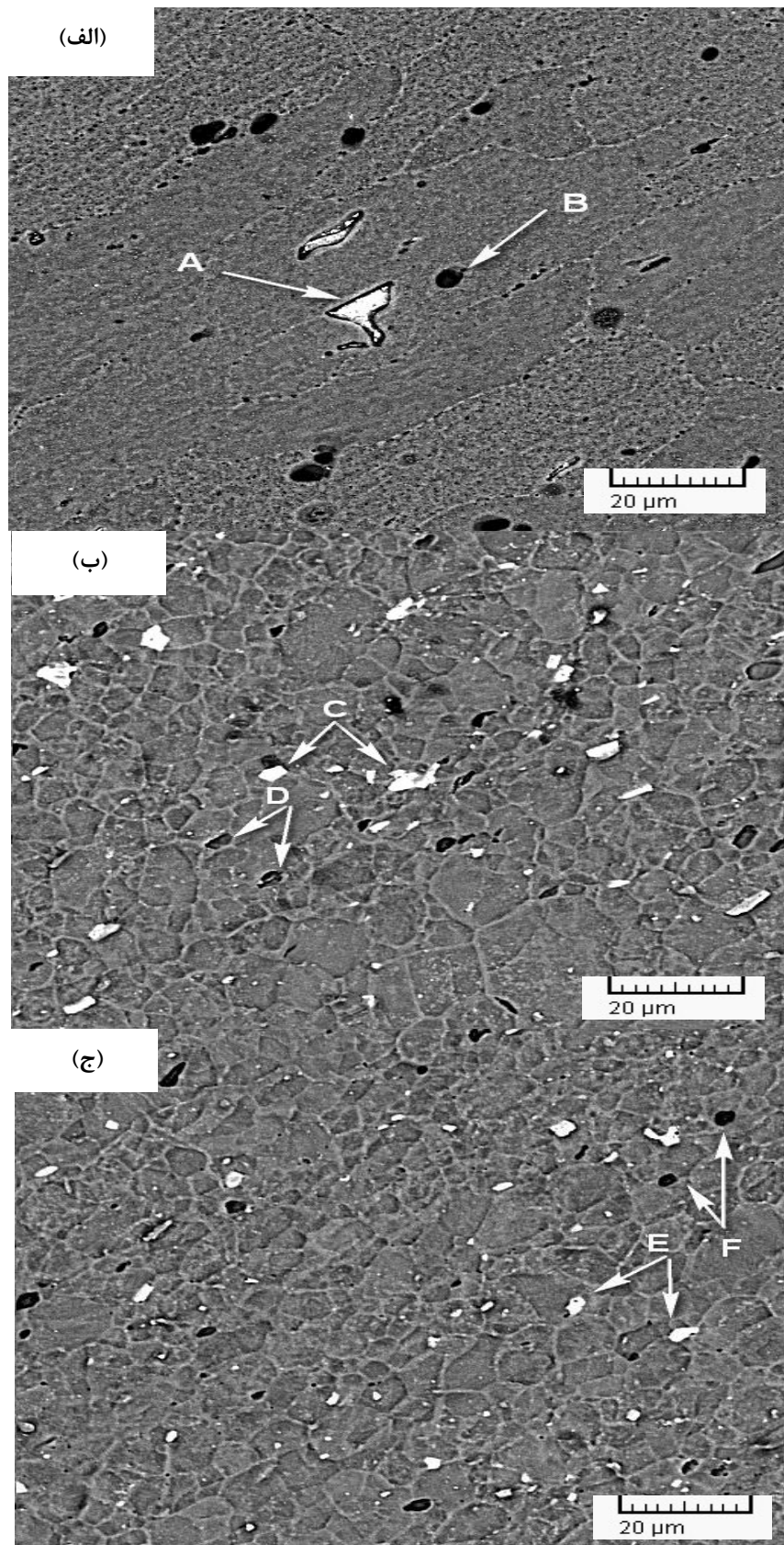


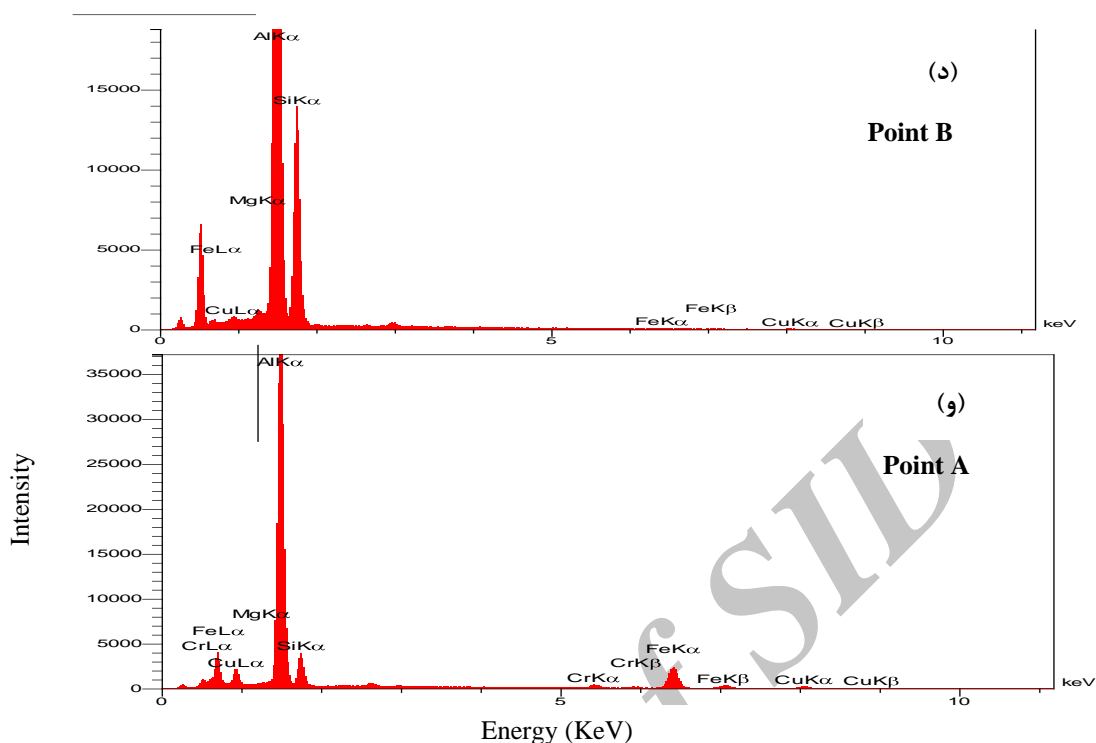
شکل (۱۰): اثر سرعت پیشروی: (الف): ۲۰، (ب): ۴۰، (ج): ۵۰ و (د): ۶۰ میلیمتر بر دقیقه روی توزیع سختی در طول ضخامت میانی ورق های بالایی و پایینی

میزان کرنش پلاستیک در این سمت نسبت به سمت پسر و باشد. به بیان دیگر کمتر بودن سختی در سمت پیشرو می تواند مربوط به بالا بودن دمای بحرانی جوشکاری در این سمت باشد که باعث شده در سمت پیشرو دانه ها رشد بیشتری داشته باشند [۹]. بر طبق شکل ۱۰ مشخص است که برای تمامی نمونه ها سختی ناحیه دکمه جوش نسبت به آلیاژ پایه کمتر می باشد بطوریکه میزان متوسط سختی در ناحیه دکمه جوش با افزایش سرعت پیشروی از حدود ۵۹ درصد تا ۶۱ درصد نسبت به سختی آلیاژ پایه تغییر یافته است. بنابراین می توان در نظر گرفت که نتایج حاصل شده از پروفایل های سختی انطباق مناسبی با نتایج کسب شده از استحکام برشی-کششی و اندازه دانه در ناحیه دکمه جوش دارد.

در این راستا تصاویری از توزیع و اندازه رسوبات بین فلزی در شرایط جوشکاری ۶۰-۱۰۰۰ (میلیمتر بر دقیقه - درو بر دقیقه) بعنوان مثال در شکل ۱۱ ارائه شده است.

بایستی در نظر گرفت که ناحیه TMAZ در سمت پسر و کلیه اتصالات جوشکاری شده در مقایسه با سایر نواحی از میزان سختی بالاتری در تمامی سرعت ها برخوردار است که این حالت می تواند ناشی از درشت شدن کمتر دانه ها و نیز اثر کار سختی حاصل در این ناحیه باشد. با مشاهده شکل ۱۰ مشخص است که اگرچه میزان سختی در سمت پیشرو کمتر از سمت پسر و است ولی منحنی پروفایل سختی تقریباً بصورت متقارن در دو سوی خط مرکزی جوش مشخص می باشد. می توان عنوان نمود که کمتر بودن سختی در سمت پیشرو ناشی از بالا بودن



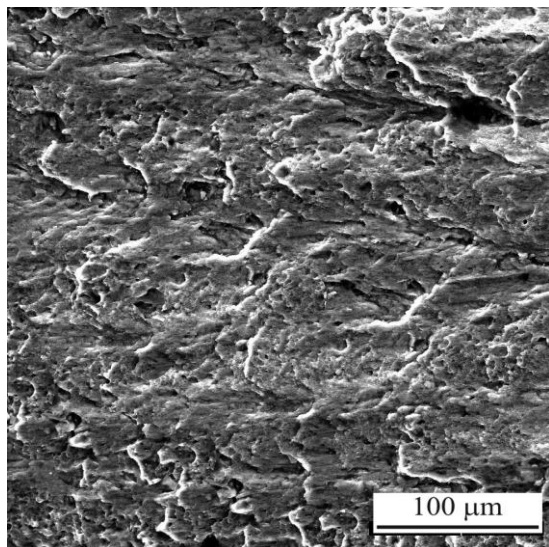


شکل (۱۱): تصاویر میکروسکوپ الکترونی (الکترون برگشتی) از توزیع و اندازه ترکیبات بین فلزی از: (الف): فلز پایه، (ب): ناحیه متأثر از حرارت، (ج): ناحیه دکمه جوش و (د، و): آنالیز عنصری EDS در نمونه جوشکاری شده ۶۰-۱۰۰۰ (دور بر دقیقه-میلیمتر بر دقیقه)، نقاط سیاه رسوبات غنی از سیلیس (Si) و نقاط سفید رسوبات غنی از آهن (Fe)

۴-۳- بررسی رفتار شکست اتصالات جوشکاری شده
اثرات سرعت پیشروی بر خواص شکست اتصالات جوشکاری شده در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول (۴): اثر سرعت جوشکاری بر خواص شکست اتصالات جوشکاری شده

	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴
سرعت دورانی (دور بر دقیقه)	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰
سرعت پیشروی (میلیمتر بر دقیقه)	۲۰	۴۰	۵۰	۶۰
تصویر اتصال شکسته شده				



شکل (۱۳): سطح شکست نمونه های جوش داده شده در سرعت های پیشروی بالا

۴- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر تاثیر سرعت پیشروی بر ریز ساختار و خواص مکانیکی جوش اتصالات لبه روی هم آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ مورد بررسی قرار گرفت و نتایج ذیل حاصل گردید.

۱- با افزایش سرعت پیشروی، عیب نازک شدگی در دو سمت پیشرو و پسرو ناحیه جوش در جهت پایین و به سمت ورق پایینی و تا فصل مشترک ناحیه دکمه جوش و TMAZ امتداد یافت.

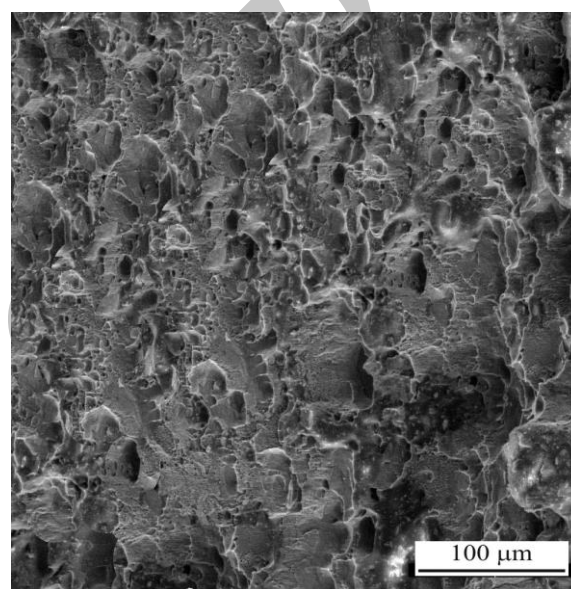
۲- با افزایش سرعت پیشروی استحکام برشی-کششی و راندمان اتصال به ترتیب از حدود ۱۲۶ تا ۱۳۲ مگا پاسکال و از حدود ۴۰/۶ تا ۴۲/۵ درصد افزایش یافت.

۳- با کاهش حرارت ورودی، میزان متوسط سختی در ناحیه دکمه جوش (NZ) نسبت به ناحیه متاثر از حرارت (HAZ) افزایش یافت ولی اندازه متوسط دانه در ناحیه دکمه جوش و ناحیه متاثر از حرارت به ترتیب از حدود ۴۳ به ۳۲ میکرومتر و از حدود ۹۹ به ۸۷ میکرومتر کاهش یافت.

۴- با افزایش سرعت پیشروی اندازه متوسط دانه در ناحیه دکمه جوش بالایی (ورق بالایی) از حدود ۴۲/۵ به ۳۲ میکرومتر و اندازه متوسط دانه در ناحیه دکمه جوش پایینی (ورق پایینی) از حدود ۳۹ به ۲۹ میکرومتر کاهش یافت.

همانگونه که از جدول مشخص است در سرعت های پیشروی پایین شکست درون ناحیه دکمه جوش و در سمت پسرو در ورق پایینی اتفاق افتاده ولی در سرعت های بالا شکست ناشی از جدا شدن دو ورق از ناحیه دکمه جوش و در امتداد عیب نازک شدگی بوده است.

شکل ۱۲ مربوط به سطح شکست اتصالات در سرعت های پیشروی پایین را نشان می دهد.



شکل (۱۲): سطح شکست نمونه های جوش داده شده در سرعت های پیشروی پایین

بر طبق آن مشخص است که سطح شکست دارای حفراتی^۵ با اندازه و شکل های متفاوت و جدا شده با نواحی پارگی^۶ می باشد که این نوع شکست نشان دهنده شکست از نوع نرم^۷ می باشد [۳۶]. همچنین شکل ۱۳ مربوط به سطح شکست اتصالات جوشکاری شده در سرعت های پیشروی بالا بوده که نشان می دهد سطح شکست دارای حفراتی با عمق کم^۸ همراه با سطوح شکافتگی بریده شده^۹ می باشد که این نوع شکست نشان دهنده شکست از نوع مختلط (نرم-ترد) خواهد بود [۳۷].

- [7] G. M. D. Cantin, S. A. David, W. M. Thomas, E. Lara-Curzio & S. S. Babu, "Friction skew-stir welding of lap joints in 5083-O aluminium", *Science Technology Welding and Joining*, Vol. 10, pp. 268-280, 2005.
- [8] L. Cederqvist & A. P. Reynolds, "Factors affected the properties of friction stir welded aluminium lap joints", *Welding Journal (Res. Supplement)*, Vol. 80, pp. 281-287, 2001.
- [9] M. Ericsson, L. Z. Jin & R. Sandstrom, "Fatigue properties of friction stir overlap welds" *International Journal of Fatigue*, Vol. 29, pp. 57-68, 2007.
- [10] S. R. Ren, Z. Y. Ma & L. Q. Chen, "Effect of welding parameters on tensile properties and fracture behavior of friction stir welded Al-Mg-Si alloy", *Scripta Materialia*, Vol. 56, pp. 69-72, 2007.
- [11] X. Cao & M. Jahazi, "Effect of tool rotational speed and probe length on lap joint quality of friction stir welded magnesium alloy" *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 1-11, 2011.
- [12] S. Yazdani & Z. W. Chen, "Effect of friction stir lap welding conditions on joint strength of aluminium alloy 6060", *IOP Conf. Series: Materials science and Engineering 4*, Vol. 012021, 2009.
- [13] S. Golezani, M. Esmaily & N. Mortazavi, "A Study on the Sub-Structure and Mechanical Properties of Friction Stir Processed AA 6061-T6 Joints with Ultra-Fine Grained Structure", *Journal of Advanced Materials and Processing*, Vol. 2, No. 1, pp. 33-46, 2014.
- [۱۴] ح. آقاجانی درازکلا، م. الیاسی و م. حسین زاده، "بررسی شکل گیری عیوب و لایه های بین فلزی در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم AA1100 به فولاد A441 AISI"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیند های نوین در مهندسی مواد، سال نهم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۴.
- [۱۵] ک. امینی، ف. غروی، ا. چمی، م. امیرخانی و ح. قاسمی، "بررسی رفتار خوردگی مقطع جوشکاری شده آلایژ آلومینیوم ۵۰۸۶ به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیند های نوین در مهندسی مواد، سال هشتم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۹۳.
- ۵- اندازه سختی در ناحیه دکمه جوش با افزایش سرعت پیشروی در تمامی اتصالات جوشکاری شده نسبت به ناحیه HAZ بالاتر بود در حالی که میزان سختی در طول ناحیه TMAZ در سمت پیشرو از سمت پسرو در تمامی نمونه ها کمتر بود.
- ۶- میزان پارامتر ضخامت موثر ورق (EPT) با افزایش سرعت پیشروی از حدود ۳/۴ تا ۴/۱ میلیمتر افزایش یافت.
- ۷- دو نوع مکانیزم شکست در اتصالات جوشکاری شده مشاهده گردید و نتیجه شد که نمونه هایی که دارای استحکام برشی-کششی بالایی هستند شکست آنها ناشی از جدا شدن دو ورق از ناحیه دکمه جوش و در امتداد عیب نازک شدگی بوده است.
- ۵- مراجع**
- [1] W. M. Thomas, "Friction stir welding", international patent application PCT/GB92, Patent application GB9125978.8, Vol. 6, 1991.
- [2] C.Y. Lee, W. B. Lee, J. W. Kim, D. H. Choi, Y. M. Yeon & S. B. Jung, "Lap joint properties of FSWed dissimilar formed 5052Al and 6061Al alloys with different thickness", *Journal of Materials Science*, Vol.43, pp. 3296-32304, 2008.
- [3] H. B. Chen, K. Yan, T. Lin, S. B. Chen, C. Y. Jiang & Y. Zhao, "The investigation of typical welding defects for 5456 aluminium alloy friction stir welds", *Materials Science and Engineering*, Vol. 433A, pp. 64-69, 2006.
- [4] R. S. Mishra & Z. Y. Ma, "Friction stir welding and processing", *Materials Science and Engineering*, Vol. 50R, pp. 1-78, 2005.
- [5] L. Dubourg, A. Merati & M. Jahazi, "Process optimization and mechanical properties of friction stir lap welds of 7075-T6 stringers on the 2024-T3 skin", *Materials and Design*, Vol. 31, pp. 3324-3330, 2010.
- [6] M. W. Mahoney, C. G. Rhodes, J. G. Flintoff, R. A. Spurling & W. H. Bingel, "Properties of friction stir welded 7075-T651 aluminium", *Metallurgical and Materials Transaction*, Vol. 29A, pp. 955-964, 1998.

- [26] S. Yazdaniyan, Z. W. Chen & G. Littlefair, "Effect of friction stir lap welding parameters on weld features on advancing side and fracture strength of AA6060-T5 welds", *Journal of Materials Science*, Vol. 47, pp. 1251-1261, 2012.
- [27] American Welding Society, AWS D17.3/ D13.3M, "Specification for Friction Stir Welding of Aluminium Alloys for Aerospace Applications", American national standard, 2010.
- [28] "Standard Test Method for Macro etching Metals and Alloys", ASTM Standard, E340, 1999.
- [29] "Standard Test Method for Micro etching Metals and Alloys", ASTM Standard, E407, 2007.
- [30] "Standard Test Methods for Determining Average Grain Size", ASTM Standard, E112, 2013.
- [31] "Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials", ASTM Standard, E384, 2011.
- [32] Q. Yang, X. Li, K. Chen & Y. J. Shi, "Effect of tool geometry and process condition on static strength of magnesium friction stir lap linear weld", *Materials Science and Engineering*, Vol. 528A, pp. 2463-2478, 2011.
- [33] S. Babu, G. D. Janaki Ram, P. V. Venkitakrishnan, G. Madhusudhan Reddy & K. Prasad Rao, "Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Lap Welded Aluminum Alloy AA2014", *Journal of Materials Science and Technology*, Vol. 28, pp. 414-426, 2012.
- [34] R. Nandan, T. Debroy & H. K. Bhadeshia, "Recent advances in friction stir welding-process, weldment structure and properties", *Progress in Materials Science*, Vol. 53, pp. 980-1023, 2008.
- [35] L. Liu, H. Nakayama, S. J. Fukumoto, A. Yamamoto & H. Tsubakino, "Microscopic Observations of Friction Stir Welded 6061 Aluminium Alloy", *Materials Transactions*, Vol. 45, pp. 288-291, 2004.
- [36] Z. Y. Ma, "Friction Stir Processing Technology: A Review", *Metallurgical and Materials Transaction*, Vol. 39A, pp. 642-658, 2008.
- [37] S. Rajakumar, C. Muralidharan & V. Balasubramaian, "Statistical analysis to predict grain size and hardness of the weld nugget of
- [16] P. Pourahmad, M. Abbasi & H. A. Mehrabi, "Bimetal Friction Stir Welding of Aluminum to Magnesium", *Journal of Advanced Materials and Processing*, Vol. 1, No. 1, pp. 27-38, 2013.
- [17] C. Bitondo, U. Prisco, A. Squillace, G. Giorleo, P. Buonadonna, G. Dionoro & G. Campanile, "Friction stir welding of AA2198-T3 butt joints for aeronautical application", *International Journal of Materials Forming*, Vol. 3, pp. 1079-1082, 2010.
- [18] H. Aydin, M. Tutar, A. Durmus, A. Baryram & T. Sayaca, "Effect of welding parameters on tensile properties and fatigue behavior of friction stir welded 2014-T6 aluminium alloy", *Transaction Indian Institute of Metals*, Vol. 65, pp. 21-30, 2012.
- [19] S. Lim, S. A. Kim, C. Lee & S. U. Kim, "Tensile behaviour of friction stir welded Al 60601-T651", *Metallurgical and Materials Transaction*, Vol. 35A, pp. 2829-2835, 2004.
- [20] S. A. Khodir, T. Shibayanagi & M. Naka, "Microstructure and mechanical properties of friction stir welded AA2024-T3 aluminium alloy", *Materials Transactions*, Vol. 47, pp. 185-193, 2006.
- [21] G. D'Urso & C. Giardini, "The influences of process parameters and tool geometry on mechanical properties of friction stir welded aluminium lap joints", *International Journal of Materials Forming*, Vol. 3, pp. 1011-1014, 2010.
- [22] C. Sharma, D. K. Dwivedi & P. Kumar, "Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded joints of AA7039 aluminium alloy", *Materials and Design*, Vol. 36, pp. 379-390, 2012.
- [23] Haydarzadeh, H. Khodaverdizaden, A. Mahmoudi & E. Nazari, "Tensile behavior of friction stir welded AA6061-T4 aluminium alloy joints", *Materials and Design*, Vol. 37, pp. 166-173, 2012.
- [24] G. Buffa, G. Campanile, L. Fratini & A. Prisco, "Friction stir welding of lap joints: influence of process parameters on the metallurgical and mechanical properties", *Materials Science and Engineering*, Vol. 519A, pp. 19-26, 2009.
- [25] X. Xu, X. Yang, G. Zhou & J. Tong, "Microstructures and fatigue properties of friction stir lap welds in aluminium alloy AA6061-T6", *Materials and Design*, Vol. 35, pp. 175-183, 2012.

friction stir welded AA6061-T6 aluminium alloy joints”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 57, pp. 151-165, 2011.

[38] S. Rajakumar, C. Muralidharan & V. Balasubramanian, “Predicting Tensile Strength, Hardness and Corrosion Rate of Friction Stir Welded AA6061-T6 Aluminium Alloy Joints”, Materials and Design, Vol. 32, pp. 2878-2890, 2011.

[39] R. Rai, A. De, H. K. D. H. Bhadeshia & T. DebRoy, “Review: friction stir welding tools”, Science Technology of Welding and Joining, Vol. 16, pp. 325-342, 2011.

[40] W. Xu, J. Liu, G. Luan & C. Dong, “Temperature evolution, microstructure and mechanical properties of friction stir welded thick 2219-O aluminium alloy joints”, Materials and Design, Vol. 30, pp. 1886-1893, 2009.

[41] Zadpoor, J. Sinke & R. Benedictus, “Fracture mechanism of aluminium friction stir welded blanks”, International Journal of Materials Forming, Vol. 2, pp. 319-322, 2009.

۶- پی نوشت

- [1] Effective Plate Thickness (EPT)
- [2] Hooking Defect or Thinning Defect
- [3] Advancing Side (AS)
- [4] Retreating Side (RS)
- [5] Dimples
- [6] Tear Ridges
- [7] Ductile
- [8] Shallow Dimples
- [9] Shear Cleavage Facets