بررسی تاثیر هندسه‌ی پین بر ریزسختی و مود شکست در اتصالات نامشابه فولاد گالوانیزه کم کربن و آلومینیوم ۶۰۶۱ به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای

وحید فیض الهی[۱]، علی حیدری مقدم[۲*]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران
[۲] استادیار گروه مهندسی مواد، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

دریافت: پاییز ۹۶ پذیرش: زمستان ۹۶

چکیده

در این پژوهش پین استوانه‌ای و مخروطی در اتصالات غیرمشابه فولاد گالوانیزه کم کربن و آلومینیوم ۶۰۶۱ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. پارامترهای متغیر انتخاب شده در این مقاله سرعت دورانی و زمان توقف ابزار می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که پین مخروطی توانسته است نسبت به پین استوانه‌ای، ریزسختی بالاتری را ایجاد کند. این بدلیل تاثیر فلز روی (Zn) در جوش‌های تولید شده با این ابزار می‌باشد. همچنین نیروی کششی برشی برای پین مخروطی بسیار بالاتر از پین استوانه‌ای است. پین مخروطی بدلیل اینکه از نظر هندسی منطقه‌ی اغتشاشی وسیع‌تری را نسبت به نوع استوانه‌ای تولید می‌کند، اتصالات مستحکم‌تری را ایجاد کرده است. حالت شکست برشی برای هر دو نوع پین هنگام استفاده کردن از پین‌های کوتاه از نوع شکست فصل‌مشترکی بود.

* **عهده‌دار مکاتبات:** alheidarym@yahoo.com

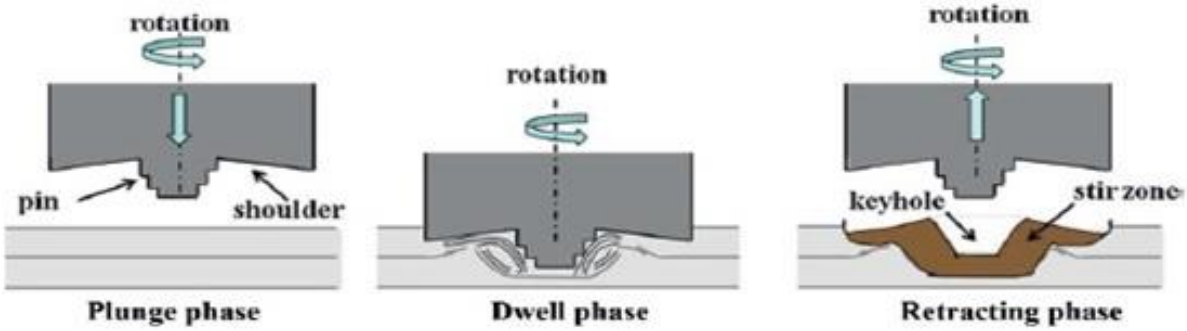
کلمات کلیدی: سرعت دورانی و زمان توقف ابزار، ریزسختی، نیروی کششی برشی، پین مخروطی، پین استوانه‌ای

۱- مقدمه:

به منظور دست یافتن به عملکرد بالا و ذخیره سازی انرژی در ماشین ها و ساختارها، بکار بردن مواد سبک وزن از جمله آلیاژهای منیزیم و آلومینیوم در سیستم‌های حمل و نقل به ویژه در صنایع خودروسازی و صنایع هوافضا، افزایش یافته است. در ماشین های تولیدی و ساختارها، اتصال‌دهی اجزاء ضروری است. بنابراین تکنیک‌های اتصال‌دهی از جمله جوشکاری، پرچ کردن و میخ کردن برای اتصال‌دهی صفحات این مواد بکار رفته است. جوشکاری ذوبی بیشترین و متداول‌ترین تکنیک مورد استفاده است[۱]. یکی از مهمترین فرآیندهای اتصال‌دهی بویژه استفاده شده در صنعت خودروسازی، جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای (RSW) است. هرچند این فرآیند مشکلات و معایبی را درهنگام جوشکاری موادی که نقطه‌ی ذوب پایینی دارند مانند آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم به همراه دارد. این مشکلات شامل زمان کارکرد پایین الکترودهای جوشکاری، مصرف بالای انرژی، و سطوح مختلف شکست‌های معمول جوشکاری می‌باشد[۲]. اخیرا، FSSW برای اتصال‌دهی صفحه‌ی آلیاژ آلومینیوم بوسیله‌ی شرکت مزداموتور و صنعت سنگین کاواساکی توسعه داده شده است. این فرآیند در اصل شاخه‌ای مشتق شده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است که بوسیله‌ی موسسه TWI انگلستان در سال ۱۹۹۱ معرفی شده است. FSSW یک تکنیک جوشکاری در حالت جامد می‌باشد[۳]. این تکنولوژی اولین بار در جوشکاری نقطه‌ای در پنل درب عقب مزدا RX-8 در ۲۰۰۳ استفاده شده است. ادعا شده که انرژی مصرفی نسبت به فرآیندهای ذوبی سنتی تا ۹۹٪ کاهش داشته است. در طی این فرآیند دو صفحه بر روی یکدیگر قرار قرار گرفته، سپس یک ابزار چرخشی با یک پینی که درانتهای آن تعبیه شده است، برای مدت زمان معینی درون مواد صفحه‌ی بالائی فرو می‌رود. این کار به منظور تولید کردن گرمای اصطکاکی انجام می‌شود. مواد بر اثر گرمای اصطکاکی ایجاد شده به شکل خمیری در آمده و مواد نرم شده‌ی مجاور ابزار باعث ایجاد یک جریان پلاستیکی می‌شود. همچنین، شانه‌ی ابزار یک نیروی فشرده‌سازی قوی به مواد وارد می‌کند. در نهایت ابزار از مواد بیرون کشیده شده، یک جوش فاز جامد بین صفحات بالائی و پایینی تولید شده است. شکل ۱ نشاندهنده‌ی ظاهر و پیکره‌بندی بخش متقاطع از یک اتصال FSSW می‌باشد[۴].

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.4.1.3]



شکل ۱: شماتیک فرآیند اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای . فاز اول: فاز فرو رفتن ابزار، فاز دوم: فاز توقف و فاز سوم: فاز بیرون کشیده شدن ابزار است[۵]

Badarinarayan گزارش داده که هندسه‌ی قلاب نقش مهمی در تعیین کردن استحکام استاتیکی جوشها داشته است. بعلاوه هندسه‌ی پین ابزار، تاثیر مهمی بر شکل و خصوصیات قلاب دارد[۶]. Babu پیشنهاد داده که عملکرد مکانیکی جوش‌های FSSW را عمدتا می‌توان بوسیله‌ی خصوصیات هندسی ابزار آن کنترل کرد[۷]. Zhao نشان داده که بارگذاری شکست کششی برشی اتصال وابسته به هندسه‌ی قلاب است. شکل‌شناسی جریان مواد بر استحکام اتصال اثرگذار است. زیرا که شکل قلاب و خصوصیات قلاب تشکیل شده، استحکام جوش را تعیین می-کند[۸]. Su پیشنهاد داده که در هم آمیختن مواد در طی دوره‌ی توقف، بدلیل مشارکت صفحه‌ی بالائی و مواد صفحه‌ی پایینی بر روی پین چرخنده و جابجایی سریع آنها بطرف پایین درون منطقه‌ی اغتشاشی می-باشد[۹]. Fujimoto نشان داده که مواد نزدیک پین، بطرف پایین رانده شده و مواد اصلی از صفحه‌ی پایینی بطرف بیرون و نیز بطرف بالا فشرده می‌شوند. بطور مشابه Lin گزارش داده که پین استوانه‌ای می‌تواند جریان محوری مواد در طی FSSW را افزایش دهند[۱۰]. Fujimoto نشان داده که سطح پین برای تولید کردن جریان پلاستیک در جهت ضخامت ابزار، در طی جوشکاری FSSW بسیار مهم هستند[۱۱]. Tozaki، FSSW را با استفاده از ابزارها با سه طول پین مختلف انجام داده و پیشنهاد کرده که استحکام اتصال متناسب با طول پین است[۱۲]. Yuan تاثیر سرعت‌های چرخشی مختلف ابزار و جهت‌ها بر روی بارگذاری کشش برشی را بررسی کرده است. بالاترین بارگذاری در حالتی که شکست در صفحه‌ی بالائی رخ داده بود، بدست آمده است[۱۳]. Sakano و Arul نشان داده‌اند که بارگذاری برشی Lap ابتدا افزایش یافته و سپس همانطوری که سرعت چرخش ابزار زیاد شده، پایین می‌آید[۱۴و۱۵]. Freeny گزارش داده که استحکام جوشکاری بالاتر می‌تواند منسوب به اندازه‌ی ناحیه‌ی اغتشاشی بزرگتری باشد که درهنگام سرعت چرخشی کمتر ابزار ایجاد می‌شود[۱۶]. اگرچه Lathabai گزارش داده که یک سرعت چرخشی ابزار بالاتر از ۳۰۰۰ rpm برای آلیاژ آلومینیوم 6060-T5 بهینه است و عمق نفوذ تاثیر مهمی بر روی استحکام کششی برشی داشت[۱۷]. در پژوهشی دیگر Mitlin گزارش داده‌اند که افزایش یافتن عمق نفوذ هیچ تاثیری بر روی بارگذاری شکست نداشته است[۱۸]. Tran نشان داده که بارگذاری شکست آلیاژ غیرمشابه آلومینیوم در جوش های اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای با افزایش یافتن زمان فرآیند، ایجاد شده است[۱۹].

اغلب پارامترهای فرآیند ممکن است، نقش مهمی را در استحکام و خصوصیات بهینه اتصالات ایفا کنند. مهمترین پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای شامل هندسه‌ی ابزار، سرعت دورانی ابزار، زمان نگهداری و عمق نفوذ ابزار می‌باشند. این قبلا پیشنهاد شده بود که این جنبه‌های ذکر شده اثر مهم بر روی قابلیت جوش پذیری و خصوصیات اتصال دارند بخصوص عمق نفوذ و هندسه‌ی ابزار که در برخی منابع بعنوان مهمترین پارامترهای جوشکاری در این نوع فرآیند از آنها یاد شده است (مقاله ۱۲). در یک مطالعه‌ی دیگر اشاره شده که جوشکاری FSW آلومینیوم با فولاد پوشش‌دار Zn، بارگذاری شکست بالاتری را در مقایسه با آنهایی که شامل فولاد غیرپوشش‌دار بودند را نشان می‌داد. بعلاوه در نوع پوشش‌دار، فاکتور مهم دیگر در استحکام اتصال در جوشکاری FSW غیرمشابه فولاد-آلومینیوم، عمق نوک پین در سطح فولاد است. گزارش شده که عملکرد غیرمشابه اتصال فولاد-آلومینیوم وابستگی شدیدی به عمق نفوذ پین ابزار در سطح صفحه‌ی فولادی پایینی دارد. تمامی این مطالعات اشاره کرده‌اند که زمانی که ابزار اندکی در سطح فولاد وارد می-شود. استحکام اتصال بیشتر از زمانی است که نوک پین به سطح فولاد نرسیده است. هرچند این همچنین نیازمند مواد ابزاری است که استحکام بسیار بالاتر از فولاد را داشته باشد ازجمله کارباید یا دیگر سرامیک‌ها مانند PCBN. (مقاله ۱۲). هدف از این پژوهش، مقایسه کردن پین‌های مخروطی با استوانه‌ای در جوشکاری نامشابه آلومینیوم ۶۰۶۱ به فولاد گالوانیزه کم کربن است. در این پژوهش سرعت دورانی ابزار و زمان توقف ابزار بعنوان متغیر در نظر گرفته شده است که دو پارامتر بسیار تاثیرگذار در این فرآیند می‌باشند. در این مقاله، این تغییرات بر روی ریزسختی، بارگذاری شکست کششی برشی بررسی شده و همچنین عیوب پیش آمده در حین فرآیند مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- روند انجام آزمایشات:

به منظور اتصال‌دهی به روش اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای، از صفحات آلومینیومی AA۶۰۶۱ و فولاد گالوانیزه‌ی کم‌کربن استفاده شده است. ضخامت صفحه‌ی آلومینیومی ۲ میلی‌متر و ضخامت صفحه‌ی فولادی ۲.۴ میلی‌متر است. ترکیب شیمیایی فولاد و آلومینیوم برطبق استاندارد ۱۱-ASTM E ۱۲۵۱ به ترتیب در جداول ۱ و ۲ آمده است.

دو ابزار از فولاد H۱۳ تراشیده شده که یکی به شکل استوانه‌ای و دیگری مخروطی شکل می‌باشد. قطر پین ابزار استوانه‌ای ۳.۶ میلی‌متر و طول

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.4.1.3]

پین آن ۱.۷ میلی‌متر بود. برای پین‌های مخروطی، قطر خارجی پین ۳.۶ میلی متر بوده و طول پین هم مشابه با پین استوانه‌ای ۱.۷ میلی‌متر بود. تمامی ابزارها دارای قطر شانه‌ی ۲۰ میلی‌متر بودند. شانه‌ی ابزارها به‌اندازه‌ی ۳ درجه مقعر در نظر گرفته شده بودند. تصاویر ابزارها در شکل ۲ آمده است.

جدول۱: ترکیب شیمیایی فولاد گالوانیزه‌ی کم‌کربن برحسب درصد وزنی (wt%)

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Zn	other
Base	0.0556	0.0182	0.197	0.0075	0.0037	0.0055	0.0235	0.0031	0.0025	

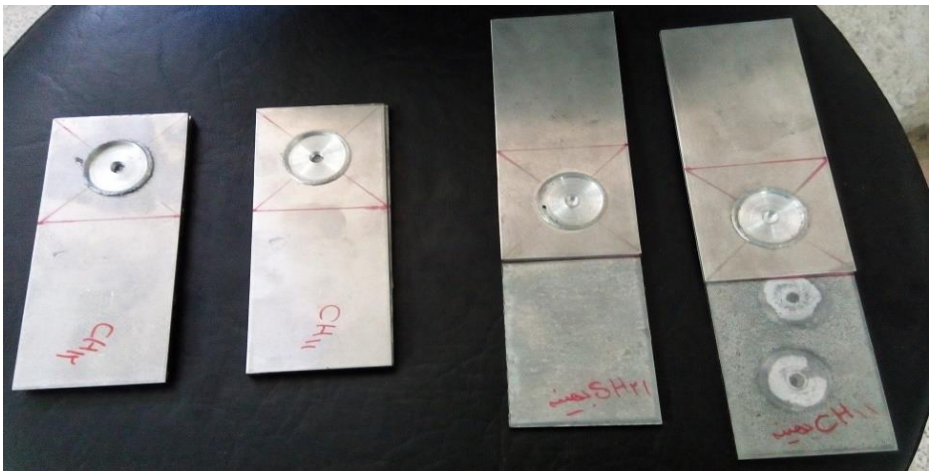
جدول۲: ترکیب شیمیایی آلومینیوم AA۶۰۶۱ برحسب درصد وزنی(wt%)

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	other
Base	0.0596	0.352	0.231	0.0311	0.986	0.187	0.0051	0.0069	



شکل ۲- نمایی از پین های کوتاه تراشیده شده: سمت چپ پین مخروطی و سمت راست پین استوانه‌ای

صفحات مورد نظر در ابعاد ۴.۵ سانتی‌متر × ۱۰.۵ سانتی‌متر بریده شده و به‌منظور برطرف کردن اکسیدهای سطحی، با سمباده‌های مختلف، به ترتیب از شماره‌های درشت به ریز سمباده زنی شدند. قطعات به‌وسیله‌ی بست و فیکسچر در دو چیدمان بر روی دستگاه فرز بسته شدند. نحوه قرار-گیری صفحات در چیدمان اول به‌صورت همپوشانی شده (Overlap) و با یک ناحیه‌ی همپوشانی ۴۵ میلی‌متر × ۴۵ میلی‌متر است که قطرهای مربع در ناحیه‌ی همپوشانی شده، مکان نشستن ابزار بر روی صفحات می-باشد. در چیدمان دیگر، صفحات بر روی یکدیگر قرارگرفته که برای آزمون‌های ریزسختی سنجی و متالوگرافی فراهم‌شده اند. لازم به ذکر است که صفحه‌ی آلومینیومی همیشه در بالا قرار گرفت. دستگاه مورد استفاده در این پژوهش از دستگاه فرز بلاروس مدل FU450R استفاده شد. نمونه‌هایی از قطعات جوش شده در شکل ۳ آمده است.



شکل ۳- نمونه‌هایی از قطعات جوش شده در دو پیکره‌بندی مختلف

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

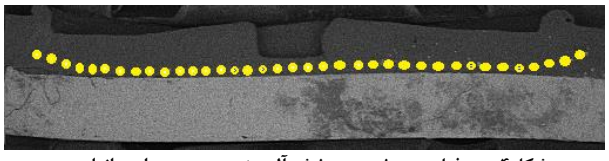
[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.4.1.3]

پارامترهای متغیر در این پژوهش، هندسه و طول پین، زمان توقف ابزار بر روی صفحات و همچنین سرعت دورانی ابزار است که زمان‌های توقف به ترتیب ۱ ثانیه و ۳ ثانیه و ۵ ثانیه و سرعت‌های دورانی به ترتیب rpm ۹۰۰ و rpm ۱۱۰۰ و rpm ۱۴۵۰ انتخاب شدند. نمونه های همپوشانی شده که به منظور آزمون کشش اتصال‌دهی شده بودند بوسیله‌ی دستگاه تست کشش مدل SANTAM STM-150 براساس استاندارد ASTM A370 [۲]، تحت سرعت ۵ میلی‌متر بر ثانیه بریده شده و منحنی‌های تنش – کرنش از آنها استخراج گردید. نمونه‌های آزمون ریزسختی و متالوگرافی نیز بوسیله‌ی کاتر مدل SQ80 SPECIMEN از کناره‌ی دکمه‌ی جوش بریده شده و سپس بوسیله‌ی سنباده‌های مختلف از شماره‌های ۶۰ تا ۲۰۰۰ صیقلی شدند. قطعات بوسیله‌ی محلول پودر اکسید آلومینیوم پالیش شده و با دستگاه ریزسختی‌سنجی INNOVA TEST براساس استاندارد ASTM E384 [۲]، تحت نیروی ۰.۰۲۵ نیوتون به مدت ۲۰ ثانیه قرار گرفت. سپس نمونه‌های انتخاب شده متالوگرافی شدند. نمونه‌ها به منظور بررسی‌های ریزساختاری در دو مرحله اچ شدند. ابتدا صفحه‌ی آلومینیومی بوسیله‌ی محلول keller به مدت ۱۰ ثانیه اچ شده و سپس با میکروسکوپ اسکن الکترونی عمل عکسبرداری از نقاط مورد نظر انجام گرفت. سپس نمونه‌ها به منظور بررسی ریزساختاری قسمت فولادی در محلول نایتال با ترکیب شیمیایی ۲٪ اسیدنیتریک و ۹۸٪ الکل به مدت ۵ ثانیه قرار گرفت. نمونه‌های انتخاب شده تحت آنالیز SEM و EDX قرار گرفته و سپس نتایج بدست آمده تحلیل و بررسی شد.

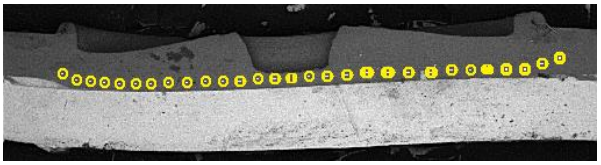
۳-بحث:

۳-۱- ریزسختی:

با استفاده از آنالیز EDS و آنالیز ترکیب خطی در لایه‌های بین فلزی تشکیل شده، مشخص شد که با افزایش زمان توقف ابزار، درصد ذرات روی (Zn) موجود در لایه فصل‌مشترک بصورت نسبی افزایش یافته است. افزایش درصد فلز روی (Zn) و همچنین ذرات فولادی در ناحیه متاثر از کار ترمومکانیکالی و ناگت جوش در بخش آلومینیومی، منجر به افزایش مقادیر ریزسختی در این ناحیه شده است. اما این افزایش بصورت خیلی جزئی رخ داده و مقادیر ریزسختی خیلی نزدیک بهم می‌باشند. می‌توان اینگونه استنباط کرد که با افزایش میزان توقف ابزار بصورت جزئی میزان ذرات روی (Zn) و فولادی که عامل مهم افزایش سختی در جوش هستند، افزایش یافته است. در بعضی از نقاط عدد ریزسختی به یکباره بالا رفته که در این نواحی فلز روی (Zn) بر اثر دوران پین ابزار بصورت تصادفی و یکباره در این محل‌ها، متمرکز شده است و به همین دلیل میزان ریزسختی به یکباره افزایش قابل توجهی داشته است. افزایش یافتن سرعت دورانی ابزار، بدلیل اغتشاش بهتر ناحیه‌ی جوش و ترکیب کردن مناسب‌تر ذرات، مقادیر ریزسختی را افزایش داده است که در مقایسه با تاثیر زمان توقف ابزار، تاثیر بسیار بالاتری را ارائه داده است. بیشترین مقدار ریزسختی که در پین‌های کوتاه مخروطی اندازه‌گیری شده، در بخش آلومینیومی ۹۸.۶ ویکرز بوده است. این مقادیر برای پین‌های استوانه‌ای ۱۰۳ ویکرز در مرکز جوش بوده است. بطور کلی پین‌های مخروطی بدلیل شکل ابزار و همچنین ناحیه‌ی اغتشاشی وسیع‌تر نسبت به پین‌های استوانه‌ای، ریزسختی بالاتری را ارائه داده‌اند. پین‌های مخروطی بصورت کاملا مشهودی درصد ذرات فلز روی بالاتری را در ناحیه‌ی جوش، نسبت به پین‌های استوانه‌ای داشتند. بطور کلی با افزایش یافتن ذرات روی در ناحیه‌ی جوش، مقادیر ریزسختی بهتر شده است. البته با افزایش یافتن سرعت دورانی ابزار میزان ذرات فولادی در مرکز جوش و ناحیه متاثر از ترمومکانیکالی نیز بالاتر رفته است. با دور شدن از منطقه‌ی جوش و بررسی ناحیه متاثر از حرارت نیز، ریزسختی کاهش می‌یابد. این مقادیر تقریبا با اندازه‌ی ریزسختی فلز پایه مشابه بود. که احتمالا بدلیل حل شدن اندک ذرات در این قسمت و نیز میزان گرمای اصطکاکی کمی است که این ناحیه در طی فرآیند جوشکاری دریافت کرده است. بر اثر دمای اصطکاکی ایجاد شده، در بخش متاثر از ترمو مکانیکالی تغییرشکل پلاستیکی رخ داده که این تغییر شکل یافتن مسئول افزایش یافتن در مقادیر ریزسختی می‌باشد. همچنین در قسمت اغتشاشی تبلور مجدد دینامیکی رخ می‌دهد که این پدیده متاثر از تغییرشکل پلاستیکی بالا بدلیل دماهای بالای ایجاد شده است. شکل ۴ پروفیل ریزسختی گرفته شده در صفحه آلومینیومی را در اتصالات ایجاد شده با پین استوانه‌ای نشان داده است. شکل ۵ پروفیل گرفته شده در صفحه آلومینومی را در هنگامی که از پین مخروطی استفاده شده را نشان داده است. همچنین در شکل ۶ مقایسه تغییرات مقادیر بدست آمده در صفحه آلومنیومی بین پین‌های استوانه‌ای و مخروطی نشان داده شده است.



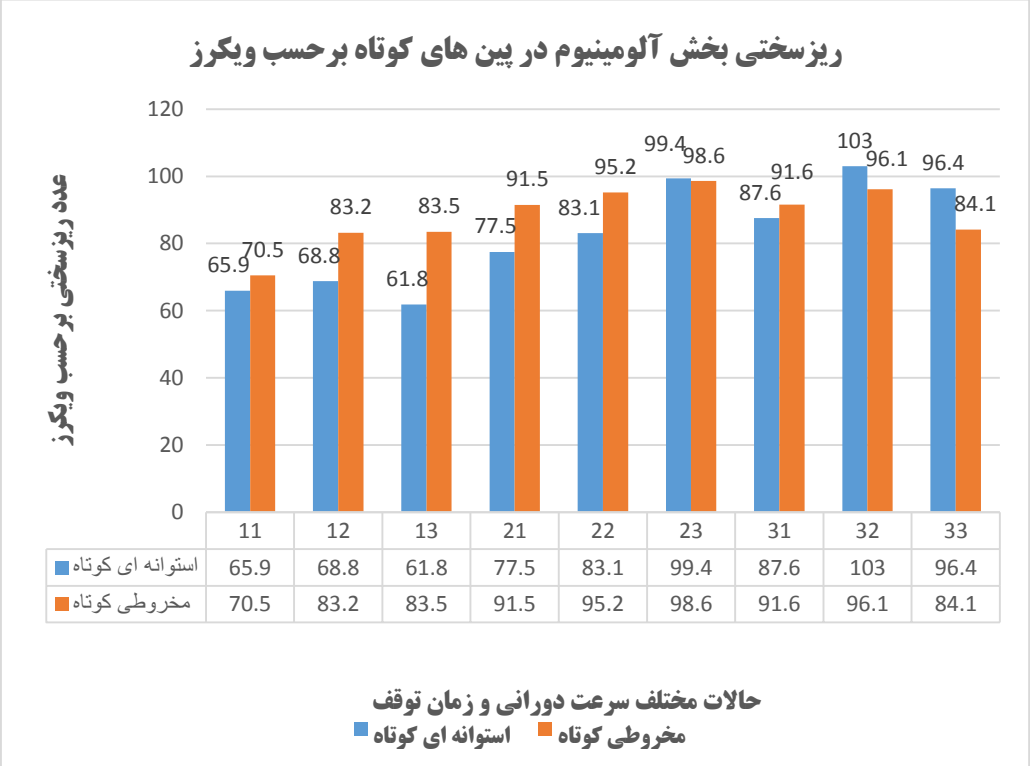
شکل۴- پروفیل ریزسختی در بخش آلومینیومی در پین استوانه‌ای



شکل ۵- پروفیل ریزسختی در صفحه آلومینیومی در پین مخروطی

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.4.1.3]



شکل ۶- ریزسختی بخش آلومینیوم در پین‌های استوانه‌ای و مخروطی

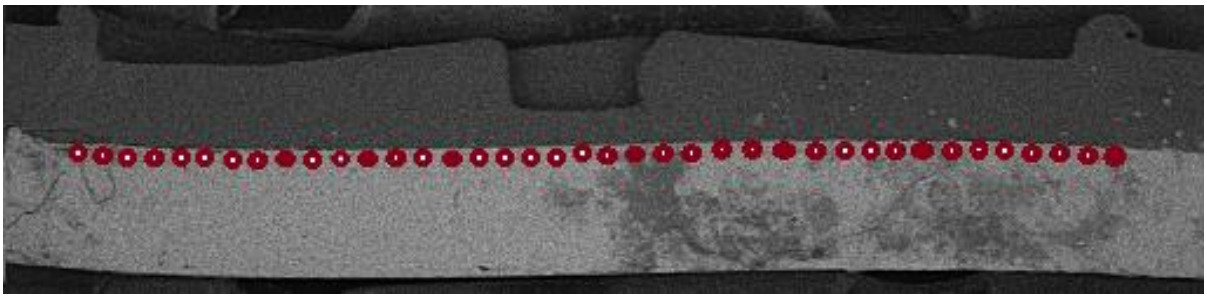
در بخش فولادی نیز تقریبا شرایط تحلیلی مشابه با ناحیه‌ی آلومینیومی، ایجاد شده است. با این تفاوت که در این قسمت پین‌های استوانه‌ای بدلیل شکل هندسی و ناحیه‌ی اغتشاشی متمرکزتر نسبت به پین‌های مخروطی، در مقایسه با پین‌های مخروطی مقادیر ریزسختی بالاتری را داشته‌اند. این به این دلیل است که پین‌های استوانه‌ای ذرات روی (Zn) را بیشتر در صفحه‌ی فولادی پخش کرده و سختی را در این قسمت بالاتر برده‌اند. در صفحات فولادی ریزسختی با فاصله گرفتن از مرکز جوش و رسیدن به ناحیه‌ی متاثر از ترمومکانیکالی افزایش یافته است که ذرات روی (Zn) از بخش مرکزی به کناره‌های حفره‌ی پین پخش شده‌اند و با فاصله گرفتن از این قسمت و وارد شدن به ناحیه‌ی متاثر از حرارت مجددا ریزسختی‌ها کاهش یافته است. بیشترین مقادیر ریزسختی ثبت شده در قسمت فولادی برای پین استوانه‌ای ۲۳۷.۱ ویکرز در ناحیه‌ی متاثر از ترمومکانیکالی و ۲۳۳.۵ ویکرز در مرکز جوش بوده است. مقادیر بیشینه برای پین‌های مخروطی ۲۳۱.۷ در ناحیه‌ی متاثر از ترمومکانیکالی و ۲۲۸.۸ ویکرز در مرکز جوش می‌باشند. البته به طور قابل توجهی درصد ریزسختی در پین‌های استوانه‌ای بسیار بالاتر از پین‌های مخروطی بوده است که در نمودارهای ارائه شده نیز بطور واضحی قابل ملاحظه است. شکل ۷ پروفیل ریزسختی گرفته شده در بخش فولادی اتصالات بوجود آمده در هنگام استفاده از پین استوانه‌ای را نشان داده است. شکل ۸ پروفیل ریزسختی گرفته شده در صفحه فولادی را در هنگام استفاده کردن از پین مخروطی را نشان داده است. همچنین در نمودار شکل ۹ تغییرات ریزسختی بدست آمده در صفحه فولادی بین دو پین استوانه‌ای و مخروطی نشان داده شده است.

همانطوری که از تصاویر میکروسکوپ اسکن الکترونی مشخص شده است، یک لایه‌ی بین فلزی در فصل مشترک آلومینیوم و فولاد در هنگام استفاده از پین استوانه‌ای، تشکیل شده است. همچنین از آنالیز EDX وجود داشتن فلز روی (Zn) که ناشی از ترکیب شدن لایه گالوانیزه در منطقه اغتشاشی می‌باشد نیز قابل اثبات است.

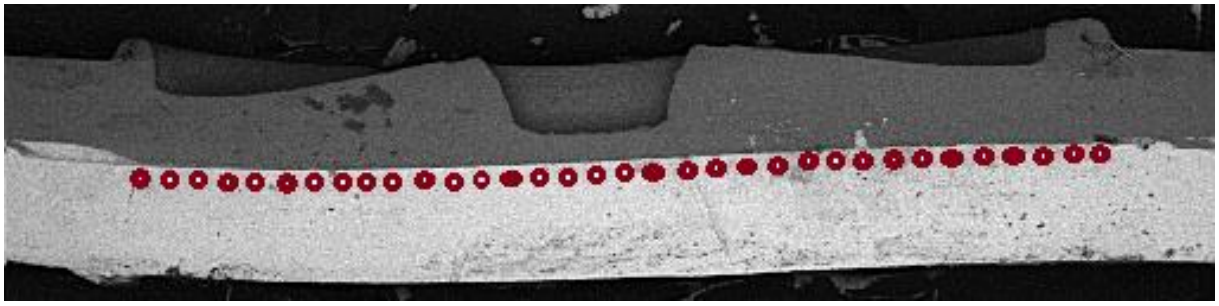
تصویر ۱۲ نشاندهنده‌ی لایه بین فلزی در هنگام استفاده از پین مخروطی است. همانطوری که از تصاویر میکروسکوپ اسکن الکترونی مشخص شده است، این لایه در فصل مشترک بین فولاد و آلومینیوم تشکیل شده است. همچنین آنالیز EDX مشارکت فلز روی (Zn) موجود در پوشش گالوانیزه را نشان داده است. همانطوری که از آنالیز به اثبات رسیده است، میزان فلز روی (Zn) در پین مخروطی نسبت به پین استوانه‌ای بیشتر می‌باشد که این امر بدلیل گرمای اصطکاکی بالاتر فرآیند در هنگام استفاده از پین مخروطی است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

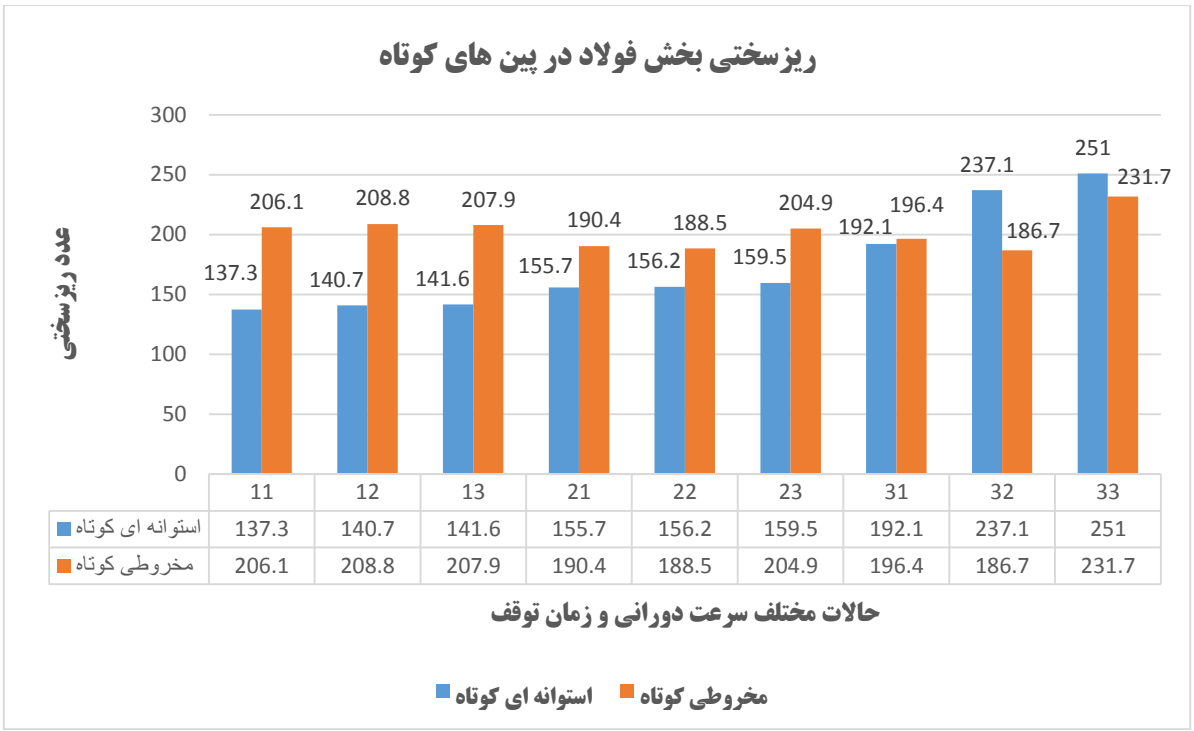
[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.4.1.3]



شکل ۷- پروفیل ریزسختی گرفته شده در صفحه فولادی در پین استوانه‌ای



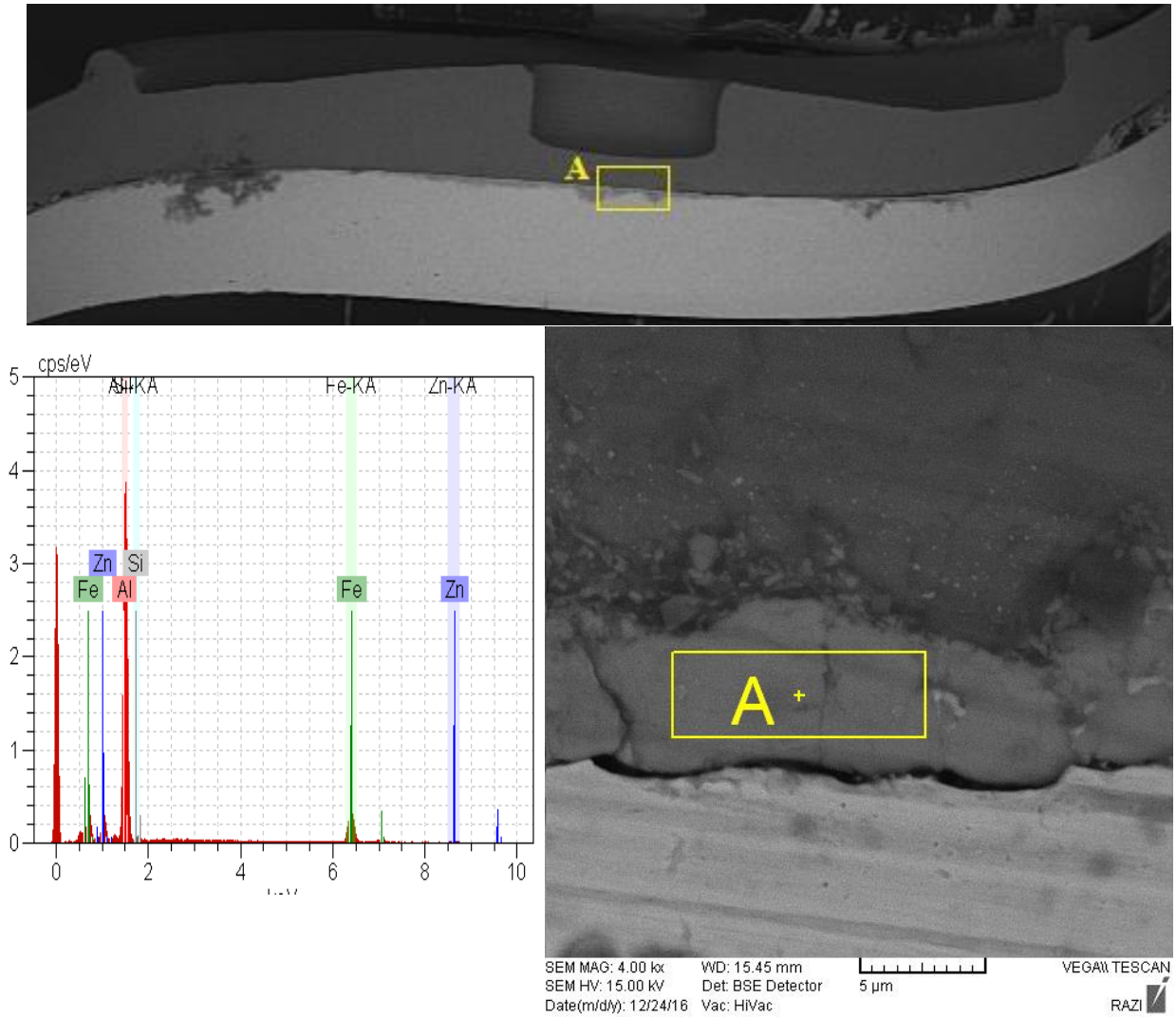
شکل ۸- پروفیل ریزسختی در صفحه فولادی در پین مخروطی



شکل ۹- ریزسختی بخش فولادی در پین‌های استوانه‌ای و مخروطی

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

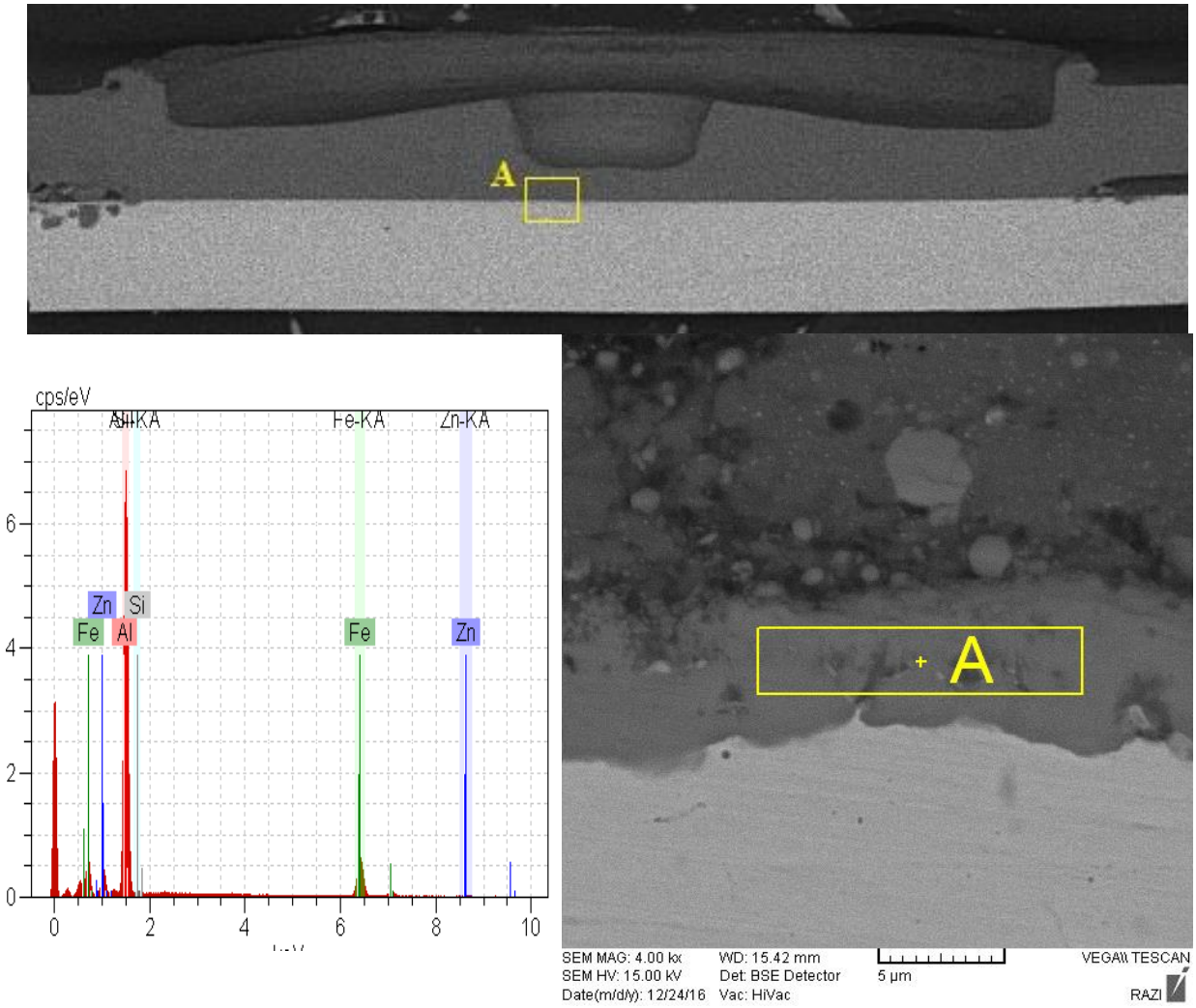
[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.4.1.3]



شکل ۱۰- تصویر SEM و آنالیز خطی از لایه‌ی بین فلزی در پین‌های استوانه‌ای کوتاه در حالت سرعت پایین همانطور که از آنالیز خطی مشخص است میزان وجود داشتن فلز روی بسیار پایین است

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.4.1.3]



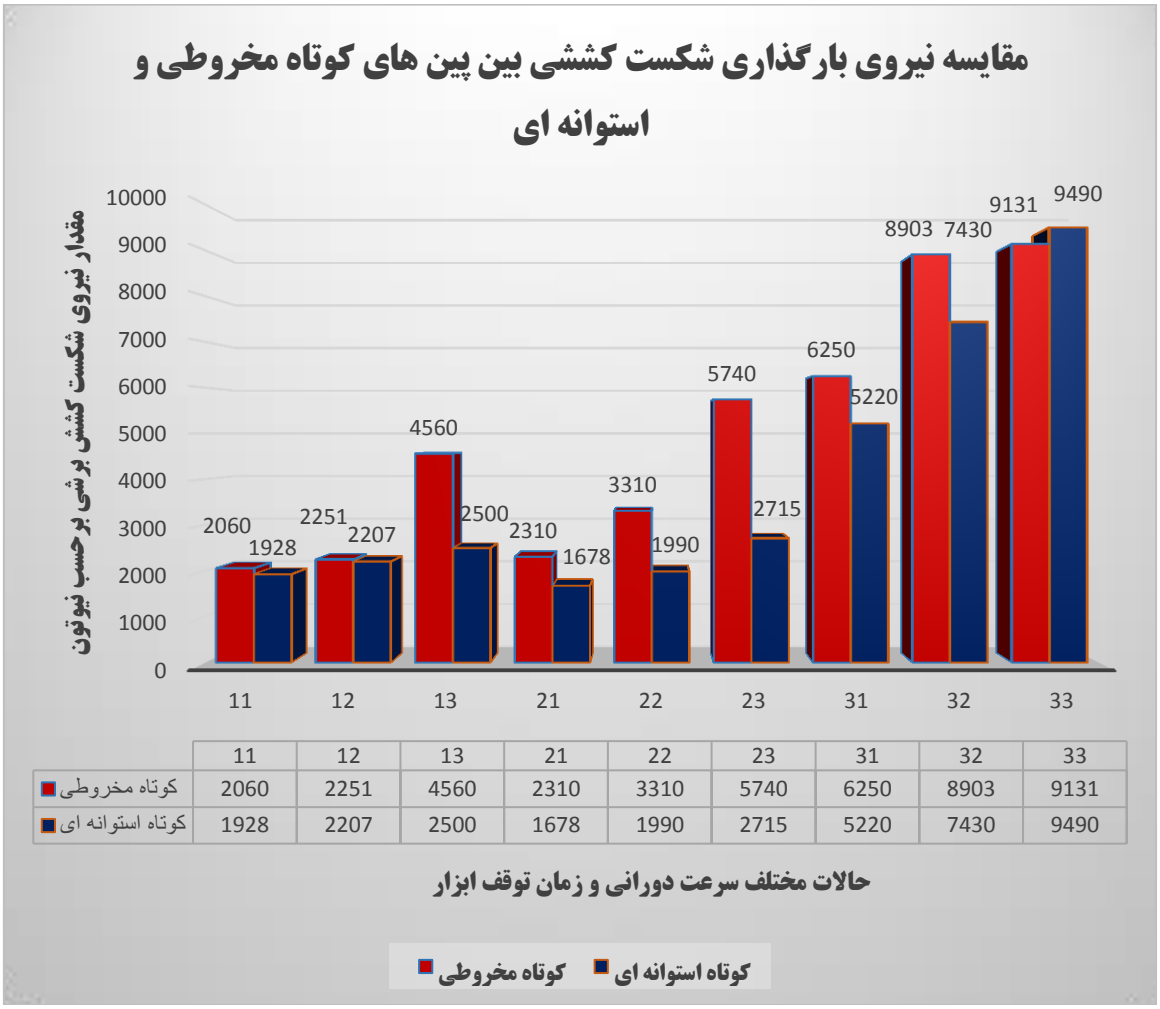
شکل ۱۱- تصویر SEM و آنالیز خطی از لایه‌ی بین فلزی در پین‌های مخروطی کوتاه در حالت سرعت پایین همانطوری که از آنالیز خطی پیداست میزان فلز روی میزان بالاتری را پیدا کرده است

۳-۲- نیروی کششی:

بطور کلی گرمای اصطکاکی بوجود آمده در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای، عامل مهمی برای پیشرفت فرایند و بوجود آمدن پیوندهای متالورژیکی است. گرمای اصطکاکی بوجود آمده باعث می‌شود که پوشش گالوانیزه‌ی فولاد، که دمای کمتری نسبت به فولاد داشته بعنوان یک فلز واسطه در محل اتصال مشارکت کند. هرچه گرمای اصطکاکی بالاتر رود، اتصالات مستحکم‌تری ایجاد شده و درنتیجه نیروی برشی افزایش خواهد یافت. نیروی کششی برشی با افزایش یافتن زمان توقف ابزار، بطور کاملا واضحی افزایش یافته است. همانطوری که از نمودارها قابل استنباط است، بیشترین مقادیر نیروی کششی برشی در حالتی بوجود می‌آید که زمان توقف ابزار بر روی صفحات بیشینه بوده است. زمان توقف ابزار بیان کننده‌ی میزان فشار شانه‌ی ابزار بر روی صفحات بوده که این فشار تاثیرات ترمومکانیکالی بر روی فصل‌مشترک جوش را بوجود می‌آورد. نیروی برشی با افزایش یافتن سرعت دورانی ابزار نیز افزایش چشمگیری را داشته که تاثیر این پارامتر، از زمان توقف ابزار نیز بیشتر می‌باشد. سرعت دورانی بیشتر باعث اختلاط بهتر مواد و تولید گرمای اصطکاکی بیشتر می‌شود که افزایش این دو مشخصه باعث مستحکم‌تر شدن اتصال ایجاد شده می‌شود. با مقایسه بین مقادیر بدست آمده از دو پین استوانه‌ای و مخروطی مشخص می‌شود که نیروی کششی برشی در حالتی که طول پین کوتاه می‌باشد، برای پین‌های مخروطی بسیار بالاتر از آنها درهنگامی می‌باشد که از پین‌های استوانه‌ای استفاده شده است. پین مخروطی بدلیل پهن شدگی قاعده‌ی انتهایی آن، از نظر هندسی حجم بزرگتری را در منطقه‌ی جوش ایجاد می‌کند. پین مخروطی بدلیل حجم منطقه‌ی اغتشاشی وسیع‌تر که نسبت به پین‌های استوانه‌ای ایجاد کرده است، توانسته که اتصالات مستحکم‌تری را نسبت به نوع استوانه‌ای ایجاد کنند. حالت شکست جوشها در هر دو نوع استوانه‌ای و مخروطی برای تمامی حالات و پارامترها، از نوع شکست فصل‌مشترکی می‌باشد. همچنین در نوع

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.4.1.3]

دیگری از بررسی شکست، در هر دو نمونه شکست‌ها حالت ترکیبی داشتند. یعنی در برخی نقاط شکست بصورت نرم و در برخی دیگر از نقاط بصورت ترد شکسته شده بودند. شکل ۱۲ نمودار نیروی کشش برشی را در پین‌های مخروطی و استوانه‌ای به تصویر کشیده است.

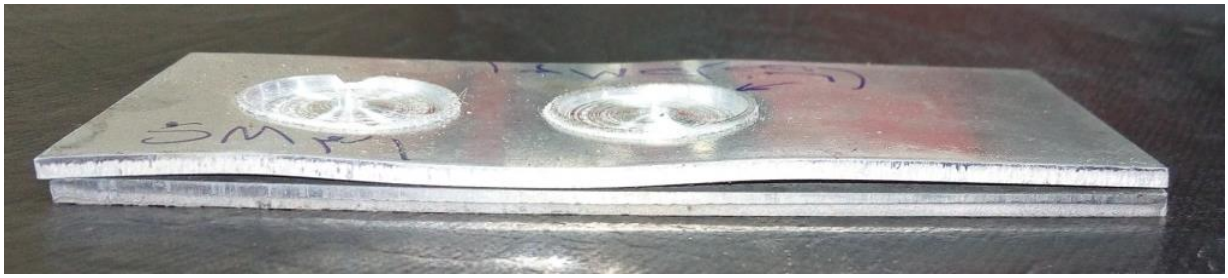


	11	12	13	21	22	23	31	32	33
کوتاه مخروطی	2060	2251	4560	2310	3310	5740	6250	8903	9131
کوتاه استوانه ای	1928	2207	2500	1678	1990	2715	5220	7430	9490

شکل ۱۲- مقایسه‌ی نیروی شکست کششی برشی بین پین‌های کوتاه مخروطی و استوانه‌ای

۳-۴- عیوب جوشکاری پیش آمده در حین فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای:

در حین انجام فرآیند جوشکاری بعلت تنظیم نبودن برخی پارامترها و یا بعلت بعضی پیشامدهای رخ داده، جوشهای ایجاد شده با مشکل مواجه شده و عیوبی شکل می‌گرفتند. بطور مثال در بعضی مواقع، درهنگامیکه جوشها در فواصل خیلی کمی از یکدیگر ایجاد شده بودند، گرمای اصطکاکی بر روی صفحات، بالا رفته و موجب تابیده شدن صفحه‌ی آلومینیومی می‌شد. که در پایین نمونه‌ای از این قابل مشاهده می‌باشد.

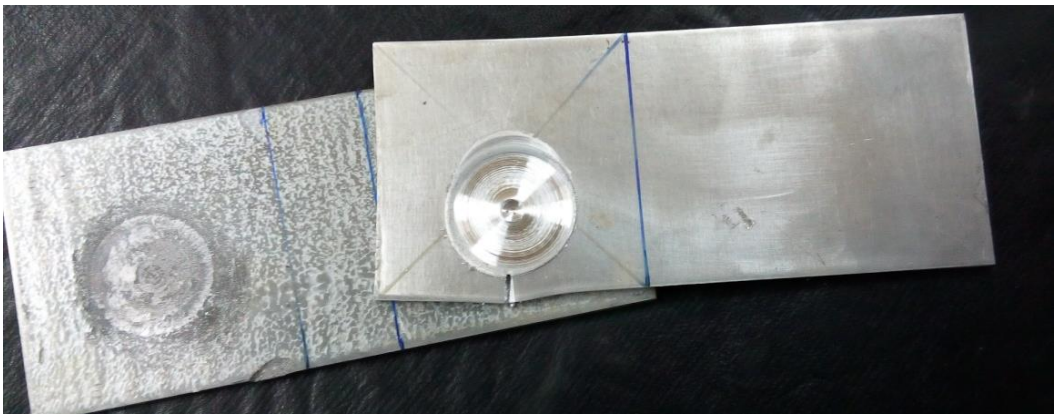


شکل ۱۳- تابیده شدن صفحه‌ی آلومینیومی در اثر حرارت اصطکاکی زیاد و بوجود آمدن عیب در نمونه

در مواقعی که بست و فیکسچرها، بطور محکم بسته نشده بودند، هنگام نشستن شانه‌ی ابزار بر روی صفحات و شروع اعمال نیرو بر روی نمونه‌ها، صفحه‌ی آلومینیومی از زیر ابزار لغزش پیدا کرده و باعث شکسته شده جوش می‌شد که در پایین نمونه‌ای از این مورد قابل مشاهده است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.4.1.3]



شکل ۱۴- حرکت صفحات در اثر محکم بسته نشدن بست‌ها و درنتیجه شکست شدن جوش



شکل ۱۵- حرکت کردن صفحه در هنگام فرود آمدن ابزار و درنتیجه خراب شدن جوش زده شده

در برخی اوقات بدلیل وجود مواد زائد و ناخالصیهایی که بر روی صفحات قرار گرفته و یا بر روی پین ابزار چسبیده شده بود، سبب ایجاد منطقه‌ی اغتشاشی نامناسب و صدمه دیده در جوش می‌شد، که تصویر نمونه‌ای از آن در شکل ۱۲ قابل مشاهده می‌باشد.



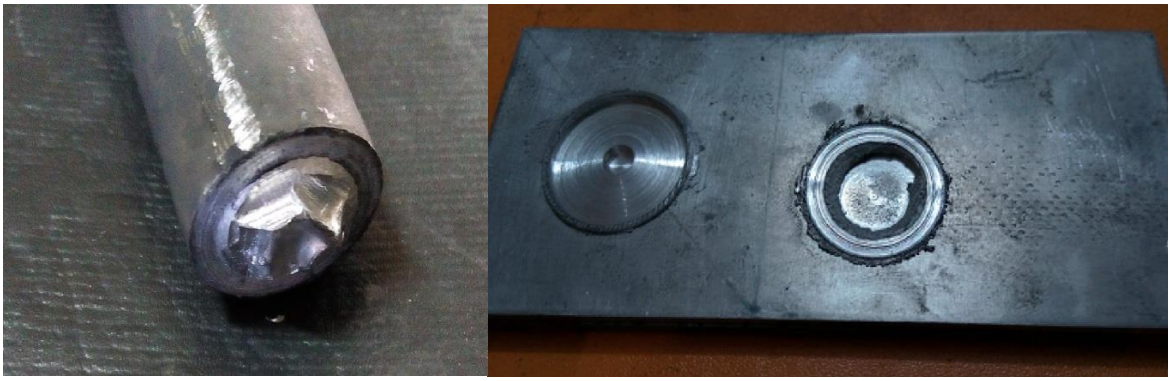
شکل ۱۶- منطقه‌ی اغتشاشی نامناسب که وجود برخی ناخالصیها و مواد زائد، بر روی صفحات یا پین ابزار را نشان می‌دهد

بالا بودن سرعت فرود آمدن ابزار بر روی صفحه، منجر به این می‌شد که گرمای اصطکاکی به صفحه‌ی پایینی منتقل نشده و پس از نشستن ابزار بر روی صفحه‌ی آلومینیومی، گرمای ناشی از اصطکاک منتقل شود. این امر منجر به این شده که بجای اینکه منطقه‌ی اغتشاشی بین دو صفحه ایجاد

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.4.1.3]

شود، این ناحیه بین ابزار و صفحه‌ی آلومینیومی برقرار شود. ماحصل این پدیده منجر به اتصال صفحه‌ی آلومینیومی به پین ابزار و درنتیجه جدا شدن ناحیه‌ی اغتشاشی از صفحه آلومینیومی و چسبیدن این ناحیه به پین ابزار شده است. تصاویر عیب مذکور در پایین قابل مشاهده است.



شکل ۱۷- جدا شدن منطقه‌ی اغتشاشی و چسبیدن آن به پین ابزار بدلیل سرعت زیاد نشستن ابزار بر روی صفحات

۴- نتایج بدست آمده:

گرما و فشار ایجاد شده به منظور برقراری اتصالات در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی کافی بود. صفحه‌ی آلومینیومی بدون اینکه تغییرشکل پلاستیکی شدیدی داشته باشد، بر روی صفحه‌ی فولادی متصل شده بود. خلاصه‌ی نتایج بدست آمده در این پژوهش بطور خلاصه به شرح زیر می‌باشد:

۱- پین‌های مخروطی بدلیل شکل ابزار و همچنین ناحیه‌ی اغتشاشی وسیع‌تر نسبت به پین‌های استوانه‌ای، ریزسختی بالاتری را ارائه داده‌اند.

۲- پین‌های مخروطی بصورت کاملا مشهودی درصد ذرات فلز روی بالاتری را در ناحیه‌ی جوش، نسبت به پین‌های استوانه‌ای داشتند.

۳- بطور کلی با افزایش یافتن ذرات روی در ناحیه‌ی جوش، مقادیر ریزسختی بهتر شده است.

۴- نیروی کششی برشی برای پین‌های مخروطی بسیار بالاتر از پین‌های استوانه‌ای است. پین‌های مخروطی بدلیل منطقه‌ی اغتشاشی وسیع‌تر توانسته‌اند که اتصالات مستحکم‌تری را ایجاد کنند.

۵- حالات شکست برشی برای هر دو نوع پین هنگام استفاده کردن از پین‌های کوتاه از نوع شکست فصل‌مشترکی بود.

سپاسگزاری‌ها:

با تشکر از جناب دکتر عبدالمحمد رضاوند بدلیل مشاوره و توصیه‌های ایشان در بهبود مقاله. تشکر از آقای علی شهروزیان بخاطر توصیه‌های ایشان در تنظیم مقاله. تشکر از جناب آقای امید حکیم پور برای مشارکت در انجام برخی از آزمایشات صورت گرفته، و سپاس ویژه از آقای حسین صاحبی بزاز و آقای محمد گل‌شکوه برای انجام کمک‌های بی دریغ ایشان در انجام این پژوهش.

منابع و ماخذ:

[1] Y. Tozaki, Y. Uematsu and K. Tokaji, "Effect of processing parameters on static strength of dissimilar friction stir spot welds between different aluminium alloys" ، Department of Mechanical and Systems Engineering, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu 143-148

[2] Joaquin M. Piccini, Hernan G. Svoboda، "Effect of pin length on Friction Stir Spot Welding (FSSW) of dissimilar Aluminum-Steel joints" ،Procedia Materials Science 9 (2015) 504 – 513.

[3] W. Yuan, R.S. Mishra, S. Webb, Y.L. Chen, B. Carlson, D.R. Herling, G.J. Grant, Effect of tool design and process parameters on properties of Al alloy 6016 friction stir spot welds, Journal of Materials Processing Technology 211 (2011) 972–977.

[4] Joaquín M. Piccini, Hernán G. Svoboda، "Effect of the tool penetration depth in Friction Stir Spot Welding (FSSW) of dissimilar aluminum alloys " ، Procedia Materials Science 8 (2015) 868 – 877.

[5] Vinayak Malik, Sanjeev N K, H. Suresh Hebbar, Satish V. Kailas, Finite Element Simulation of Exit Hole Filling for Friction Stir Spot Welding – A Modified Technique to Apply Practically, Procedia Engineering 97 (2014) 1265 – 1273

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.4.1.3]

[6] Badarinarayan, H., Shi, Y., Li, X., Okamoto, K., 2009a. Effect of tool geometry on hook formation and static strength of friction stir spot welded aluminum 5754-O, sheets. Int. J. Mach. Tool. Manu. 49, 814–823.

[7] Babu, S., Sankar, V.S., Janaki Ram, G.D., Venkitakrishnan, P.V., Madhusudhan Reddy, G., Prasad Rao, K., 2013. Microstructures and mechanical properties of friction stir spot welded aluminum alloy AA2014. J. Mater. Eng. Perform. 22, 71–84.

[8] Zhao, Y.Q., Liu, H.J., Chen, S.X., Lin, Z., Hou, J.C., 2014. Effects of sleeve plunge depth on microstructures and mechanical properties of friction spot welded alclad 7B04-T74 aluminum alloy. Mater. Des. 62, 40–46.

[9] Su, P., Gerlich, A., North, T.H., Bendzsak, G.J., 2007. Intermixing in dissimilar friction stir spot welds. Metall. Mat. Trans. A 38, 584–595.

[10] Fujimoto, M., Koga, S., Abe, N., Sato, S.Y., Kokawa, H., 2008. Analysis of plastic flow of the al alloy joint produced by friction stir spot welding. Yosetsu Gakkai Ronbunshu/Quarterly J. Japan Weld. Soc. 26, 67–73.

[11] Fujimoto, M., Koga, S., Abe, N., Sato, S.Y., Kokawa, H., 2009. Analysis of plastic flow of the Al alloy joint produced by friction stir spot welding. Weld. Int. 23, 589–596.

[12] Tozaki, Y., Uematsu, Y., Tokaji, K., 2007. Effect of tool geometry on microstructure and static strength in friction stir spot welded aluminium alloys. Int. J. Machine Tools Manuf. 47, 2230–2236

[13] Yuan, W., Mishra, R.S., Webb, S., Chen, Y.L., Carlson, B., Herling, D.R., Grant, G.J., 2011. Effect of tool design and process parameters on properties of Al alloy 6016 friction stir spot welds. J. Mater. Process. Technol. 211, 972–977.

[14] Sakano, R., Murakami, K., Yamashita, K., Hyoe, T., Fujimoto, M., Inuzuka, M., Nagao, U., Kashiki, H., 2001. Development of spot FSW robot system for automobile body members. In: Proceedings of the Third International Symposium of Friction Stir Welding, Kobe, Japan.

[15] Arul, S.G., Miller, S.F., Kruger, G.H., Pan, T.Y., Mallick, P.K., Shih, A.J., 2008. Experimental study of joint performance in spot friction welding of 6111-T4 aluminum alloy. Sci. Technol. Weld. Join. 13, 629–637.

[16] Freeney, T., Sharma, S.R., Mishra, R.S., 2006. Effect of Welding Parameters on Properties of 5052 Al Friction Stir Spot Welds. SAE Technical Series 2006-01-0969.

[17] Lathabai, S., Painter, M.J., Cantin, G.M.D., Tyagi, V.K., 2006. Friction spot joining of an extruded Al–Mg–Si alloy. Scripta Mater. 55, 899–902.

[18] Mitlin, D., Radmilovic, V., Pan, T., Chen, J., Feng, Z., Santella, M.L., 2006. Structure–properties relations in spot friction welded (also known as friction stir spot welded) 6111 aluminum. Mater. Sci. Eng. A 441, 79–96.

[19] Tran, V.-X., Pan, J., Pan, T., 2008. Fatigue behavior of aluminum 5754-O and 6111-T4 spot friction welds in lap-shear specimens. Int. J. Fatigue 30, 2175–2190.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.4.1.3]

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.4.1.3]