

ارزیابی اتصالات ناهمجنس آلایژ آلومینیوم T6-6061 / فولاد دو فازی DP590 ایجاد شده توسط روش همزن اصطکاکی نقطه‌ای

امین نیرومند جدیدی^۱، سید فرشید کاشانی بزرگ^{۱*}

^۱ دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، قطب علمی مهندسی سطح و حفاظت از خوردگی در صنایع، تهران، ایران.

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۴/۹/۱۹، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۵/۳/۹، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۵/۳/۱۱

چکیده اتصال ناهمجنس آلایژ آلومینیوم T6-6061 بر فولاد دو فازی DP590 به روش همزن اصطکاکی نقطه‌ای ایجاد شد. در این راستا، تأثیر متغیرهای فرآیند شامل سرعت چرخشی و زمان توقف ابزار برای رسیدن به اتصال مناسب با استفاده از مطالعات ریزساختاری توسط میکروسکوپی نوری و الکترونی روبشی و خواص مکانیکی به کمک آزمون‌های کششی-برشی و ریزسختی، مورد بررسی قرار گرفت. در اثر فرایند همزن اصطکاکی، ساختار با دانه‌بندی ریز در ناحیه همزده آلومینیوم و نیز دانه‌های فوق‌ریز فریتی احاطه شده با مرزهای مارتنزیتی در فولاد تشکیل شد به طوری که متوسط اندازه دانه‌های فاز فریت به کمتر از $1 \mu\text{m}$ رسید. همچنین در فصل مشترک اتصال این دو آلایژ لایه بین فلزی تشکیل گردید که میزان ضخامت آن متأثر از متغیرهای فرآیندی است. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت چرخشی ابزار در زمان توقف ثابت، استحکام کششی-برشی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد و مشابه همین رفتار نیز در سرعت چرخشی ثابت با افزایش زمان توقف ابزار رخ می‌دهد. میزان استحکام کششی-برشی متأثر از ضخامت لایه بین فلزی است. بیشینه استحکام کششی-برشی ۲۰۵ MPa در نمونه اتصال یافته با سرعت چرخشی ۲۰۰۰ rpm و زمان توقف ۴ ثانیه حاصل شد که از استحکام تسلیم برشی آلایژ آلومینیوم T6-6061 افزون تر است.

کلمات کلیدی: جوشکاری همزن اصطکاکی نقطه‌ای، اتصال ناهمجنس، آلایژ آلومینیوم، فولاد دو فازی، فوق‌ریز دانه.

Assessment Of Dissimilar 6061-T6 Al/DP590 Dual Phase Steel Welds Produced Using Friction Stir Spot Welding

Amin Niroumand-Jadidi¹, Seyed Farshid Kashani-Bozorg^{1*}

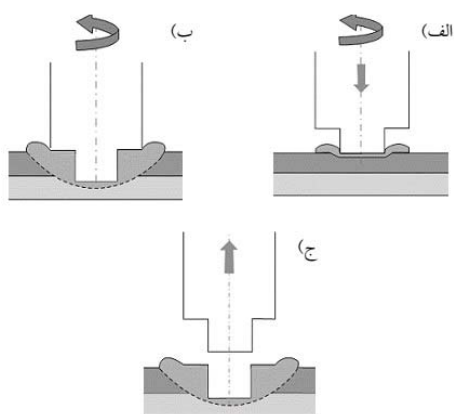
¹ University of Tehran, School of Metallurgy and Materials Engineering, Center of Excellence for Surface Engineering and Corrosion Protection of Industries, Tehran, Iran.

Abstract Dissimilar 6061Al alloy/DP590 dual phase steel joints were fabricated using friction stir spot welding. The influence of rotation speed and dwell time on the feasibility of sound joints were examined by microstructural and mechanical evaluations. Microstructural examinations by optical and scanning electron microscopy exhibited fine grains structure in the stir zone of aluminum and dominant ultrafine ferrite grains with mean grain size of less than a micron and minor martensite at ferrite grain boundaries in the steel side. In addition, an intermetallic component layer was produced along the joint interface; its thickness was a function of process parameters. The tensile-shear strength of the joint was initially found to increase with increasing of tool rotation speed at constant dwell time and then decrease with further increasing. Same trend was observed with increasing of dwell time at constant tool rotation speed. Tensile-shear strength is influenced by the thickness of the intermetallic layer. A maximum tensile-shear strength of 205MPa was achieved for the joint produced using tool rotation and dwell time of 2000rpm and 4s, respectively; this is higher than the shear yield strength of 6061-T6 Al.

Keywords: Friction stir spot welding, Dissimilar joining, Aluminum alloy, Dual-phase steel, Ultra-fine grains.

۱- مقدمه

خودرو RX-۸ اجرا شد. این روش بعد از اتمام جوشکاری از خود یک سوراخ برجای می‌گذارد [۶].



شکل ۱. جوشکاری همزن اصطکاکی نقطه‌ای. الف) مرحله فرورفتن ابزار. ب) زمان توقف. ج) مرحله بیرون کشیدن ابزار [۷].

در پژوهش حاضر دو آلیاژ آلومینیوم T۶-۶۰۶۱ و فولاد دوفازی DP۵۹۰ به روش جوشکاری همزن اصطکاکی نقطه‌ای با یافتن متغیرهای بهینه برای دستیابی به اتصال مطلوب با استحکام کششی-برشی بیشینه، به یکدیگر اتصال یافته‌اند. برای رسیدن به این منظور متغیرهای فرآیند مورد بررسی قرار گرفته و تأثیر آنها بر ریزساختار و خواص مکانیکی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲- روش تحقیق

آلیاژهای آلومینیوم T۶-۶۰۶۱ و فولاد دوفازی DP۵۹۰ به ضخامت‌های به ترتیب ۱/۶ mm و ۱/۲ mm برای این اتصال در نظر گرفته شده‌اند. تجزیه شیمیایی مواد مذکور با روش طیف‌سنجی نشر نوری انجام و در جدول‌های (۱) و (۲) ارائه شده است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱.

عنصر	کروم	آهن	مس	سیلیسیوم	منیزیوم	آلومینیوم
درصد وزنی	۰/۱۸	۰/۵۸	۰/۲	۰/۷۲	۰/۹۳	باقی‌مانده

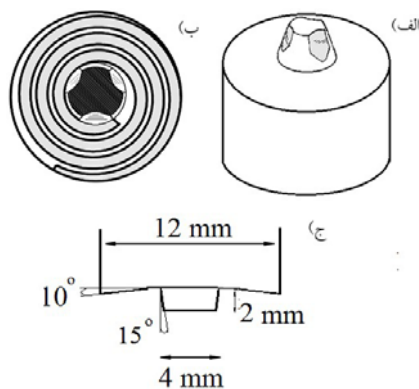
ابتدا ورق‌ها در ابعاد ۳۰ mm عرض و ۱۰۵ mm طول با ناحیه هم‌پوشانی ۳۵×۳۰ mm² مطابق با استاندارد ISO ۱۴۷۳-۲۰۰۰ برش خوردند شکل (۲) و سپس با استون چربی زدایی و به ترتیب با کاغذهای سنباده کاربید سیلیسیوم با

استفاده از آلیاژهای سبک در صنعت خودروسازی در حال افزایش است و از عمده موارد کاربرد آن در بخش‌هایی از خودرو نظیر درب و قطعات مرتبط با آن در راستای کاهش وزن و مصرف سوخت می‌باشد. فولاد در صنعت خودرو به خاطر داشتن استحکام بالا و از همه مهم‌تر هزینه کم در مقایسه با سایر آلیاژهای سبک مانند آلومینیوم، تیتانیوم و منیزیوم از اهمیت بالایی برخوردار است [۱-۲]. به منظور کاهش وزن و مصرف سوخت همراه با تامین استحکام کافی قطعات، اتصال ناهمجنس آنها مطرح می‌گردد [۳]. روش‌های مختلفی مانند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای و پرچ‌کاری خود سوراخ شونده در خصوص اتصال مذکور صورت گرفته، اما این روش‌ها دارای معایبی از جمله مصرف انرژی بالنسبه زیاد، استفاده از ماده مصرفی و بروز مشکلاتی همچون انقباض انجمادی و تشکیل ترکیبات بین فلزی ضخیم و ترد در فرآیندهای ذوبی است [۴-۵]. یکی از فرآیندهای جدید ابداع شده برای اتصال نقطه‌ای، روش جوشکاری همزن اصطکاکی نقطه‌ای می‌باشد که به رقابت با دو روش ذکر شده و سایر روش‌های اتصال نقطه‌ای می‌پردازد. در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای بخصوص در رابطه با آلومینیوم باید از انرژی بیشتر نسبت به روش جوشکاری همزن اصطکاکی استفاده کرد. همچنین روش پرچ‌کاری خود سوراخ شونده نیاز به پرچ و هزینه بیشتر نسبت به آن دارد [۶].

روش جوشکاری همزن اصطکاکی نقطه‌ای مشابه با روش همزن اصطکاکی ولی بدون داشتن حرکت طولی است. در این روش با فرورفتن یک ابزار سخت در حال چرخش به درون قطعه کار و تبدیل انرژی ناشی از اصطکاک و کار پلاستیکی، گرم و نرم شدن قطعه کار واقع می‌شود تا عمل اتصال صورت گیرد.

فرآیند همزن اصطکاکی نقطه‌ای از سه مرحله تشکیل شده است. در ابتدا ابزار چرخنده تا عمق مناسب وارد قطعه کار می‌شود (شکل ۱- الف) و با صرف مدت زمانی در این عمق، با سرعت چرخشی ثابت، (شکل ۱- ب) در نهایت بیرون کشیده می‌شود (شکل ۱- ج). این فرآیند برای اولین بار توسط شرکت مزدا در سال ۲۰۰۳ میلادی بر روی درب عقبی

الماسه، توسط محلول نایتال ۲٪ و کلر حکاکی شیمیایی شده و توسط میکروسکوپ نوری مدل Olympus و میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل CamScan MV۲۳۰۰ مجهز به طیف‌سنج انرژی پرتو ایکس، جهت بررسی ریزساختاری مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. همچنین آزمون پراش پرتو ایکس توسط دستگاه پراش پرتو ایکس مدل Philips X'Pert Pro با استفاده از پرتو $Cu-K\alpha$ صورت گرفت.



شکل ۳. هندسه ابزار به کار رفته در اتصال ناهم‌جنس آلیاژ آلومینیوم بر فولاد دوفازی. الف) نمای کلی ابزار، ب) نمای سطح شانه و ج) نمای جانبی ابزار.

آزمون ریزسختی روی مقطع اتصال تحت بار ۲۰۰ گرم و زمان بارگذاری ۱۵ ثانیه با گام ۰/۲۵ mm در سمت آلیاژ آلومینیوم و با گام ۰/۱۵ mm در سمت فولاد دوفازی انجام شد. از آنجایی که برای فرآیند همزن اصطکاکی نقطه‌ای استاندارد بخصوصی ارائه نشده، لذا برای انجام آزمون کششی-برشی از استاندارد تعریف شده جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای استفاده شد. آزمون کششی-برشی به‌منظور بررسی استحکام اتصال نمونه‌های جوشکاری شده، با نرخ کرنش 1 mm.min^{-1} با دستگاه Santam STM۱۵۰ انجام گرفت. برای دقت در صحت نتایج به دست آمده هر یک از آزمون‌ها سه مرتبه انجام شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج ریزساختاری

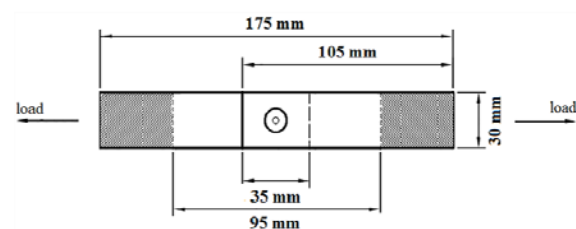
مقطع عرضی اتصال ناهم‌جنس آلیاژ آلومینیوم و فولاد دوفازی برای نمونه‌های منتخب در شکل (۴) نشان داده شده است. مطابق این شکل اتصال بین دو ورق مذکور به همراه یک

دانه‌بندی‌های مختلف مسطح و عاری از لایه‌های اکسیدی گردیدند.

جدول ۲. ترکیب شیمیایی فولاد دوفازی DP۵۹۰.

عنصر	کروم	نیکل	منگنز	سیلیسیوم	کربن	آهن
درصد وزنی	۰/۰۱	۰/۲۴	۱/۸۶	۰/۵	۰/۰۷۵	باقی‌مانده

جهت انجام فرآیند همزن اصطکاکی نقطه‌ای، ابزاری متشکل از دو بخش فولادی و کاربرد تنگستن ساخته شد (شکل ۳). شانه به قطر ۱۲ mm با سطح مقعر به زاویه 10° همراه با رزوه مارپیچی به عمق ۰/۴ mm و پهنای ۰/۸ mm با فاصله ۰/۲ mm از جنس فولاد ابزار گرم کار H۱۳ که تحت عملیات آستینیتی در دمای 1040°C به مدت ۴۰ دقیقه در حمام نمک و با تبرید در روغن در دمای محیط و سپس دو مرحله بازپخت در دمای 530°C به مدت ۴۵ دقیقه به سختی ۵۰ HRC رسید. پین به قطر ۴ mm و طول ۲ mm به صورت مخروط ناقص با زاویه رأس 30° که در روی سطح خود سه فرورفتگی با زاویه 120° نسبت به یکدیگر دارد از جنس $WC-8\%Co$ ساخته شد. پین درون سوراخی از پیش تعبیه شده در شانه قرار گرفت و با پیچ M۵ داخل آن محکم گردید.

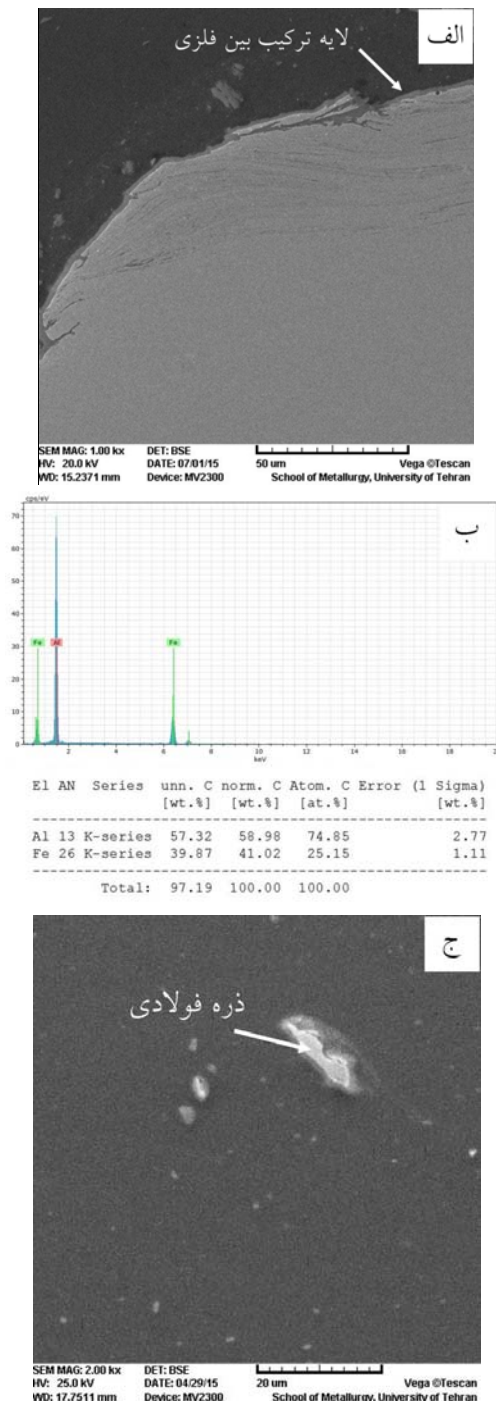


شکل ۴. هندسه نمونه‌های آزمون استحکام کششی-برشی.

متغیرهای جوشکاری شامل سرعت‌های چرخشی ۱۶۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ دور بر دقیقه (rpm) و زمان‌های توقف ۲، ۴ و ۶ ثانیه است. عمق نفوذ شانه در تمام نمونه‌های جوشکاری شده ۰/۳ mm انتخاب شد. نرخ ورود ابزار به درون قطعه کار نیز برای تمامی نمونه‌های جوشکاری شده ثابت در نظر گرفته شد. پشت‌بند و نگه‌دارنده از جنس فولاد CK۴۵ ساخته و مورد استفاده قرار گرفت. اتصال توسط ماشین فرز عمودی مدل FP۴M انجام گردید.

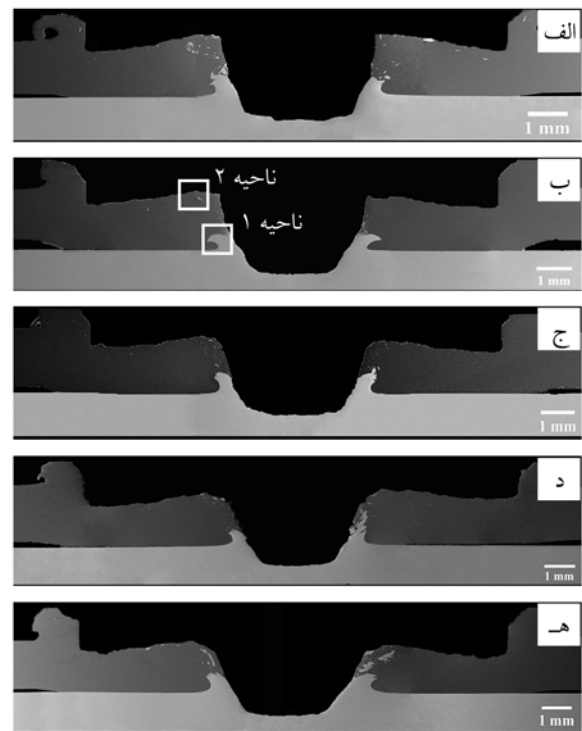
نمونه‌ها پس از سنباده‌زنی و پرداخت‌کاری با خمیر

افزایش یافته و در نتیجه منجر به رشد لایه بین فلزی می گردد. روند مشابهی نیز با افزایش زمان توقف ابزار از ۲ به ۶ ثانیه در سرعت چرخشی ثابت ۲۰۰۰ rpm در اثر افزایش زمان رشد لایه بین فلزی رخ داده است.



شکل ۵. الف) فصل مشترک اتصال بین دو ورق فولادی و آلومینیومی در ناحیه ۱ از اتصال نشان داده شده در شکل ۴-ب، ب) تجزیه شیمیایی توسط طیف سنجی انرژی پرتو ایکس از لایه بین فلزی در تصویر الف، و ج) ذره فولادی درون ناحیه همزده آلومینیوم از ناحیه ۲ از اتصال نشان داده شده در شکل ۴-ب.

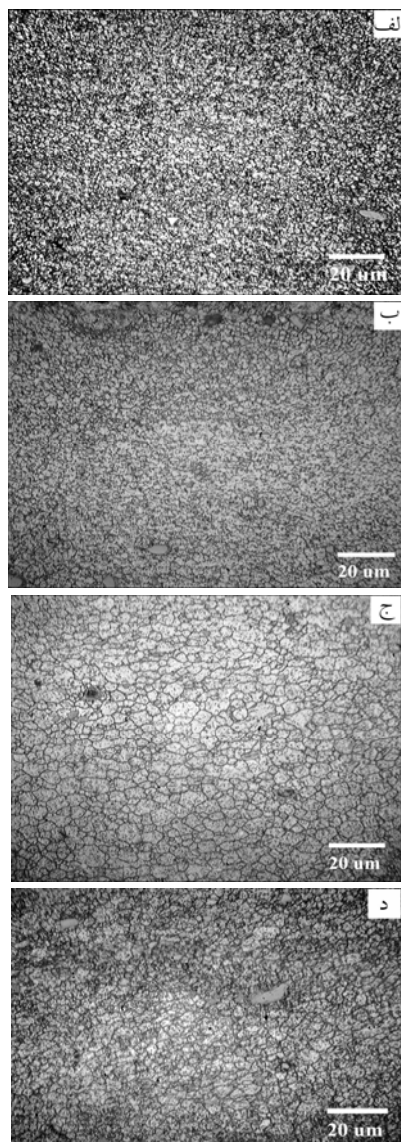
قفل مکانیکی، هوک فولادی که در ورق آلومینیومی بالایی وارد گردیده، برقرار شده است. در فصل مشترک اتصال این دو آلیاژ لایه‌ای از ترکیبات بین فلزی مشاهده می‌شود (شکل ۵-الف). تجزیه شیمیایی توسط طیف‌سنجی انرژی پرتو ایکس نشان می‌دهد که این لایه از ترکیبات بین فلزی Al-Fe می‌باشد (شکل ۵-ب). همچنین می‌توان حضور ذرات فولادی پراکنده در این ناحیه را با لایه نازکی از ترکیب بین فلزی به دور آن مشاهده نمود (شکل ۵-ج).



شکل ۴. مقاطع عرضی اتصال ناهمجنس آلیاژ آلومینیوم به فولاد دوفازی، تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی، الف) سرعت چرخشی ۱۶۰۰ rpm و زمان توقف ۴ ثانیه، ب) سرعت چرخشی ۲۰۰۰ rpm و زمان توقف ۴ ثانیه، ج) سرعت چرخشی ۲۵۰۰ rpm و زمان توقف ۴ ثانیه، د) سرعت چرخشی ۲۰۰۰ rpm و زمان توقف ۲ ثانیه و ه) سرعت چرخشی ۲۰۰۰ rpm و زمان توقف ۶ ثانیه.

در جدول (۳) ضخامت متوسط این لایه‌ها در فصل مشترک اتصال بین دو ورق برای اتصال‌های ناهمجنس شکل (۴) ارائه شده است. ضخامت این لایه‌های بین فلزی متأثر از متغیرهای فرآیندی می‌باشد. مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت چرخشی از ۱۶۰۰ به ۲۵۰۰ rpm، در زمان توقف ثابت ۴ ثانیه، ضخامت متوسط این لایه‌ها افزایش یافته است. با افزایش سرعت چرخشی ابزار، حرارت تولیدی در حین فرآیند

با فلز پایه دارد اما در اثر حرارت کمی از کشیدگی دانه‌ها کاسته شده است [۹]. پس از ناحیه متأثر از حرارت، منطقه متأثر از حرارت و کار مکانیکی قرار دارد (شکل ۶-ج). در این منطقه، حرارت و تغییر شکل پلاستیک سبب شده تا دانه‌ها ریزتر از فلز پایه گردد و در جهت جریان پلاستیک ماده به دور ناحیه همزده کشیده شوند. برخلاف ناحیه همزده، در این منطقه حرارت و تغییر شکل پلاستیک در حدی نبوده که سبب تبلور مجدد دینامیکی گردد [۶]. در ناحیه همزده به خاطر بالا بودن دما و نرخ کرنش پلاستیک، فرایند ترمیم دینامیکی رخ داده است [۶، ۱۰] (شکل ۷).

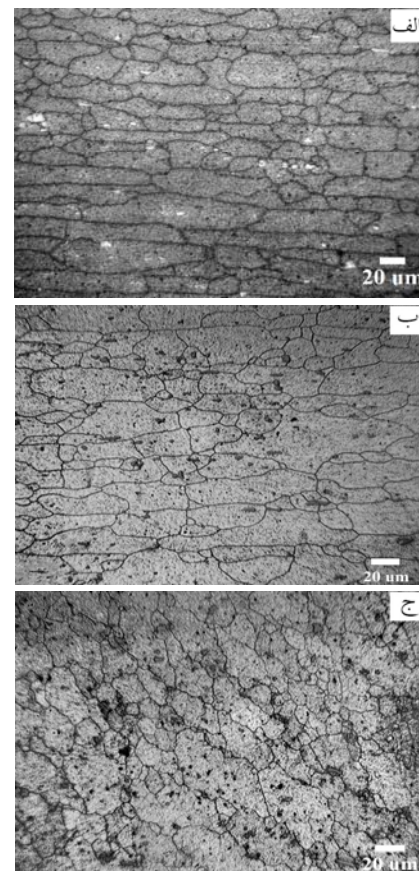


شکل ۷. ریزساختار ناحیه همزده آلومینیوم ۶۰۶۱ در جوشکاری با سرعت‌های چرخشی و زمان‌های توقف مختلف، (الف) سرعت چرخشی ۱۶۰۰ rpm و زمان توقف ۴ ثانیه، (ب) سرعت چرخشی ۲۰۰۰ rpm و زمان توقف ۴ ثانیه، (ج) سرعت چرخشی ۲۵۰۰ rpm و زمان توقف ۴ ثانیه و (د) سرعت چرخشی ۲۰۰۰ rpm و زمان توقف ۶ ثانیه.

جدول ۳. ضخامت متوسط لایه ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک اتصال.

ضخامت لایه بین فلزی (μm)	اتصال
۱/۶	۴ ثانیه و ۱۶۰۰ rpm
۲/۰	۴ ثانیه و ۲۰۰۰ rpm
۲/۵	۴ ثانیه و ۲۵۰۰ rpm
۱/۵	۲ ثانیه و ۲۰۰۰ rpm
۳/۴	۶ ثانیه و ۲۰۰۰ rpm

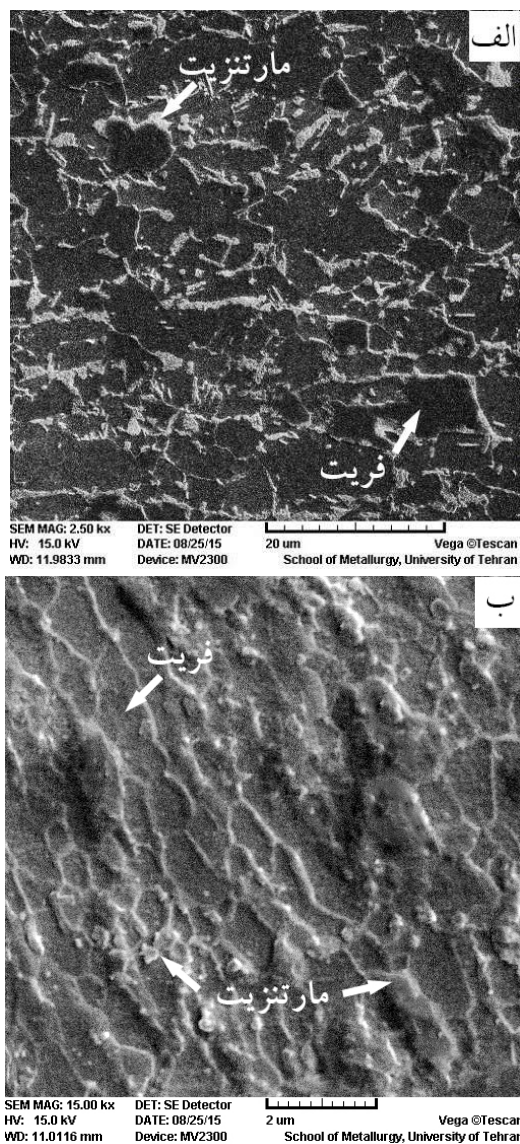
ریزساختار مقطع اتصال آلومینیوم حاصل از فرآیند جوشکاری همزن اصطکاکی نقطه‌ای در شکل (۶) ارایه شده است.



شکل ۶. تصاویر ریزساختار از مقطع آلومینیوم ۶۰۶۱ در اتصال ناهم‌جنس با سرعت چرخشی ۲۰۰۰ rpm و زمان توقف ۴ ثانیه. (الف) فلز پایه، (ب) ناحیه متأثر از حرارت، (ج) ناحیه متأثر از حرارت و کار مکانیکی.

همان‌طور که مشاهده می‌شود ریزساختار فلز پایه به صورت دانه‌های کشیده شده آلومینیوم در جهت نورد است، همچنین ذرات فاز α -AlFeSi، از فازهای اولیه موجود در آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ [۸]، به صورت پراکنده در ساختار ملاحظه می‌شود (شکل ۶-الف). پس از اعمال فرآیند جوشکاری، در مجاورت فلز پایه و به سمت محل اتصال، ناحیه متأثر از حرارت واقع شده که مطابق با شکل (۶-ب) ساختاری مشابه

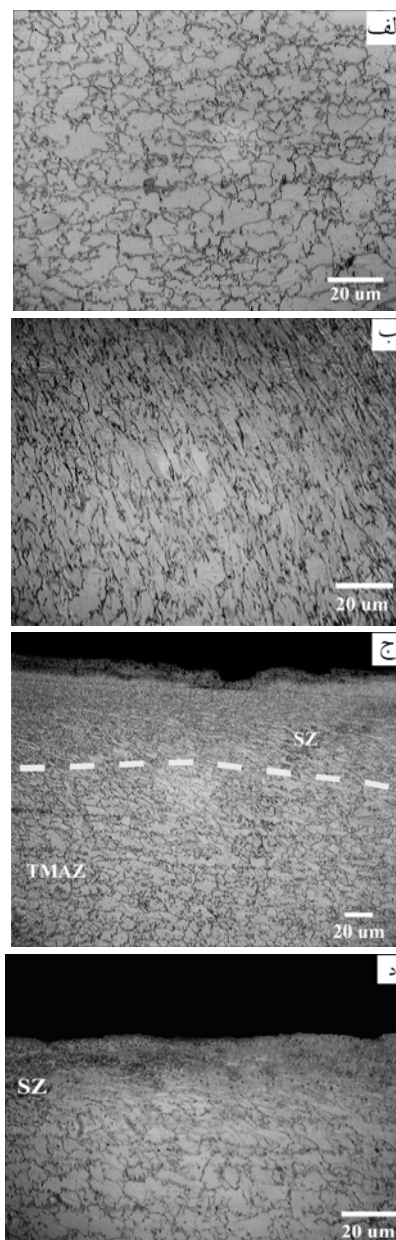
کمتر از یک میکرون است. تصاویر میکروسکوپی الکترونی رویشی گواه وجود فازهای فریت فوق ریزدانه با فازهای ریز مارتنزیت در مرز دانه‌های آن می‌باشد (شکل ۹-ب). بروز فرآیندهای ترمیم در حین اعمال کرنش پلاستیک و دمای بالا منجر به بروز ریزساختار فوق ریزدانه در این نوع فولادها می‌شود [۱۱].



شکل ۹. ریزساختار فولاد دوفازی، الف) فلز پایه و ب) ناحیه همزده، در اتصال ناهمجنس با سرعت چرخشی ۲۰۰۰ rpm و زمان توقف ۴ ثانیه.

همچنین به منظور بررسی دقیق، آزمون پراش پرتو ایکس از ناحیه همزده فولاد صورت گرفت که حضور فازهای فریت و مارتنزیت در این ناحیه را تایید می‌نماید (شکل ۱۰).

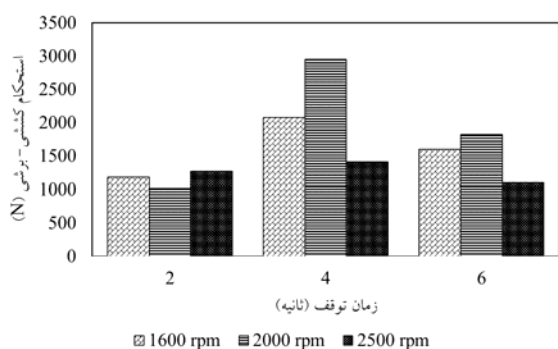
ریزساختار مقطع فولاد دوفازی حاصل از فرآیند همزن اصطکاکی نقطه‌ای در شکل (۸) مشاهده می‌شود. ریزساختار اولیه قبل از فرآیند شامل زمینه غالب فاز فریت به همراه فاز مارتنزیت در مرز دانه‌های فریت است (شکل ۸-الف). پس از فرآیند اتصال می‌توان مشاهده کرد که ساختار ناحیه متأثر از حرارت و کار مکانیکی شامل دانه‌های کشیده و ریز شده در جهت جریان پلاستیک ماده می‌باشد (شکل ۸-ب).



شکل ۸. تصاویر ریزساختار از مقطع فولاد دوفازی در اتصال ناهمجنس با سرعت چرخشی ۲۰۰۰ rpm و زمان توقف ۴ ثانیه. الف) فلز پایه، ب) ناحیه متأثر از حرارت و کار مکانیکی، ج) ناحیه همزده واقع شده در زیر ابزار، د) ناحیه همزده واقع شده در زیر ابزار در اتصال ناهمجنس با سرعت چرخشی ۲۵۰۰ rpm و زمان توقف ۴ ثانیه.

ناحیه همزده دارای ساختار فوق ریزدانه با اندازه دانه

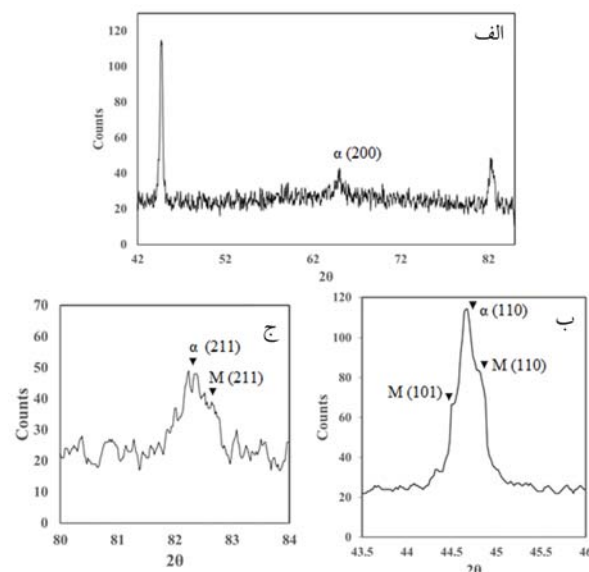
کششی- برشی مشاهده نمود. در واقع بیشینه استحکام کششی- برشی در اتصال برقرار شده تحت سرعت چرخشی rpm ۲۰۰۰ و زمان توقف ۴ ثانیه مشاهده شده که ضخامت متوسط لایه بین فلزی آن حدود ۲ μm بوده است. با افزایش و یا کاهش ضخامت متوسط لایه بین فلزی از مقدار بهینه ۲ μm ، استحکام کششی- برشی اتصال کاهش یافته است. چنین اثری نیز توسط بوزی^۱ و همکاران در اتصال ناهمجنس IF/steel AA۶۰۱۶ گزارش شده است [۳].



شکل ۱۱. تغییرات استحکام کششی- برشی در سرعت‌های چرخشی و زمان‌های توقف ابزار مختلف.

استحکام اتصال در فرآیند همزن اصطکاکی نقطه‌ای براساس نیرو گزارش می‌شود؛ اما به‌منظور درک بهتر از مناسب بودن اتصال و با ذکر این نکته که آزمون ارزیابی مکانیکی برشی است، به‌واسطه اینکه نیروی وارد شده موازی با مقطع اتصال است، لذا می‌توان استحکام برشی اتصال را با استحکام برشی فلزات پایه مقایسه کرد.

با محاسبات انجام شده مقطع اتصال در نمونه اتصال یافته با سرعت چرخشی rpm ۲۰۰۰ و زمان توقف ۴ ثانیه در حدود $14/45 \text{ mm}^2$ است که استحکام برشی اتصال را به میزان ۲۰۵ MPa رقم می‌زند. با توجه به این‌که استحکام تسلیم آلیاژ آلومینیوم T۶-۶۰۶۱ و فولاد DP۵۹۰ به ترتیب ۲۸۰ MPa و ۴۲۰ MPa است و براساس معیار تسلیم فون میز^۸ استحکام برشی آلومینیوم T۶-۶۰۶۱ و فولاد DP۵۹۰ به‌طور تقریبی به ترتیب باید ۱۶۰ MPa و ۲۴۲ MPa باشد. از این رو می‌توان مشاهده نمود که استحکام برشی اتصال از کمترین استحکام



شکل ۱۰. آزمون پراش پرتو ایکس از ناحیه همزده فولاد دوفازی در نمونه اتصال یافته با سرعت چرخشی rpm ۲۰۰۰ و زمان توقف ۴ ثانیه، الف) الگوی حاصل نشانگر حضور انعکاس‌های فریت، ب) الگوی حاصل تحت سرعت پراش سنج کمتر حول قله اول و ج) حول قله سوم نشانگر انعکاس‌های مارتنزیت که به انعکاس‌های فریت بسیار نزدیک هستند.

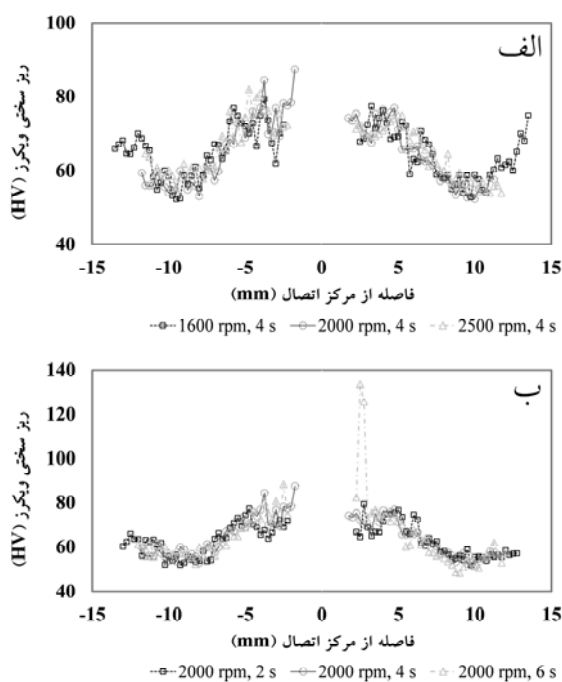
۲-۳- نتایج آزمون کششی- برشی

نتایج حاصل از آزمون کششی- برشی اتصالات در شکل (۱۱) نشان داده شده است. مطابق این شکل می‌توان دریافت که با افزایش سرعت چرخشی ابزار در زمان توقف ثابت، استحکام کششی- برشی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. به‌طور مثال در زمان توقف ۴ ثانیه و سرعت چرخشی rpm ۱۶۰۰، استحکام کششی- برشی ۲۰۷۵ N بوده و با افزایش سرعت چرخشی ابزار به rpm ۲۰۰۰، استحکام کششی- برشی به ۲۹۵۰ N افزایش یافته و مجدد با افزایش سرعت چرخشی به rpm ۲۵۰۰، استحکام کششی- برشی به N ۱۴۰۵ کاهش یافته است. همچنین در سرعت چرخشی ثابت با افزایش زمان توقف، استحکام کششی- برشی ابتدا افزایش ولی با افزایش دوباره زمان توقف، استحکام کششی- برشی کاهش می‌یابد. به‌طور مثال استحکام کششی- برشی در سرعت چرخشی ثابت rpm ۲۰۰۰ و زمان توقف ۲ ثانیه، ۱۰۲۰ N بوده و با افزایش زمان توقف به ۴ و ۶ ثانیه به ترتیب استحکام کششی به مقادیر N ۲۹۵۰ و N ۱۸۲۵ رسیده است.

با توجه به جدول (۳) و شکل (۱۱)، می‌توان ارتباطی بین اثر ضخامت متوسط لایه بین فلزی و استحکام

^۱ Bozzi

۲۷۵ به ۳۰۵ HV رسیده؛ اما با افزایش مجدد سرعت چرخشی به ۲۵۰۰ rpm بیشینه سختی به حدود ۲۵۵ HV کاهش می‌یابد. (شکل ۱۳-الف). این در حالی است که سختی فلز پایه حدود ۱۹۰ HV می‌باشد. این افزایش سختی در ناحیه همزده فولاد دوفازی به خاطر فوق ریزدانه شدن ساختار است (شکل ۹-ب). در واقع به علت بالا بودن فشار جوشکاری در زیر ابزار، ناحیه همزده فولاد که در زیر پین قرار گرفته، به ساختار فوق‌ریز دانه تبدیل شده است [۱۵-۱۳].



شکل ۱۲. نمودار ریز سختی از مقطع آلومینیوم ۶۰۶۱ (الف) در سرعت‌های چرخشی و (ب) در زمان‌های توقف مختلف.

تأثیر تغییر سرعت چرخشی ابزار بر رفتار سختی نواحی مختلف ریزساختاری در آلومینیوم به اندازه فولاد بارز نیست (شکل ۱۲-الف). با افزایش سرعت چرخشی ابزار از ۱۶۰۰ به ۲۰۰۰ rpm، میانگین سختی در ناحیه همزده آلومینیوم از حدود ۷۱ به ۷۴ HV افزایش یافته و تغییر محسوسی در سختی ناحیه همزده رخ نداده است. حتی تصاویر ریزساختاری ناحیه همزده تفاوت زیادی در تغییر اندازه دانه نشان نمی‌دهد. (شکل ۷-الف و ب). با افزایش سرعت چرخشی ابزار به ۲۵۰۰ rpm علی‌رغم افزایش اندازه دانه در ناحیه همزده آلومینیوم (شکل ۷-ج) کاهش اندکی در میانگین سختی ناحیه همزده آلومینیوم، ۷۰ HV، مشاهده می‌شود (شکل ۱۲-الف). در کل سختی در ناحیه همزده به خاطر انحلال و یا درشت شدن

برشی ماده به کار رفته در اتصال، یعنی آلومینیوم T۶-۶۰۶۱، بیشتر است. بنابراین می‌توان گفت که همواره یک شرایط بهینه از متغیرها برای رسیدن به یک اتصال مناسب وجود دارد. بهترین شرایط برای اتصال در شرایطی از سرعت چرخشی و زمان توقف حاصل می‌شود که ضخامت لایه بین فلزی تشکیل شده در فصل مشترک اتصال دو ورق به مقدار بهینه رسیده باشد که در کنار آن ساختار با دانه‌بندی ریزتری در ناحیه همزده (شکل ۷-ب و شکل ۸-ج) تشکیل شده است. کم بودن سرعت چرخشی ابزار سبب می‌شود تا عمل همزنی به خوبی انجام نگرفته و همچنین حرارت تولیدی در حین فرآیند پایین باشد که منجر به ایجاد لایه بین فلزی کم ضخامت‌تر از مقدار بهینه می‌گردد. از طرفی هم بالا بودن سرعت چرخشی سبب افزایش حرارت ورودی و ضخیم‌تر شدن لایه بین فلزی از مقدار بهینه و از طرفی درشت‌دانه شدن ریزساختار ناحیه همزده می‌شود (شکل ۷-ج و شکل ۸-د) که در هر دو اتصال استحکام کششی- برشی کاهش می‌یابد [۱۲، ۳]. همچنین با افزایش زمان توقف ابزار به خاطر بیشتر شدن مدت زمان مواجه با حرارت ورودی و افزایش پلاستیسیته و تسهیل کردن عمل همزنی، ریزساختار ناحیه همزده ریزتر و ضخامت لایه بین فلزی به مقدار بهینه نزدیکتر شده و استحکام اتصال افزایش می‌یابد؛ اما با افزایش بیشتر زمان توقف، اندازه دانه در ناحیه همزده افزایش یافته (شکل ۷-د) و افزایش ضخامت لایه بین فلزی از مقدار بهینه منجر به افت استحکام اتصال می‌گردد [۵، ۳].

۳-۳- نتایج آزمون ریزسختی

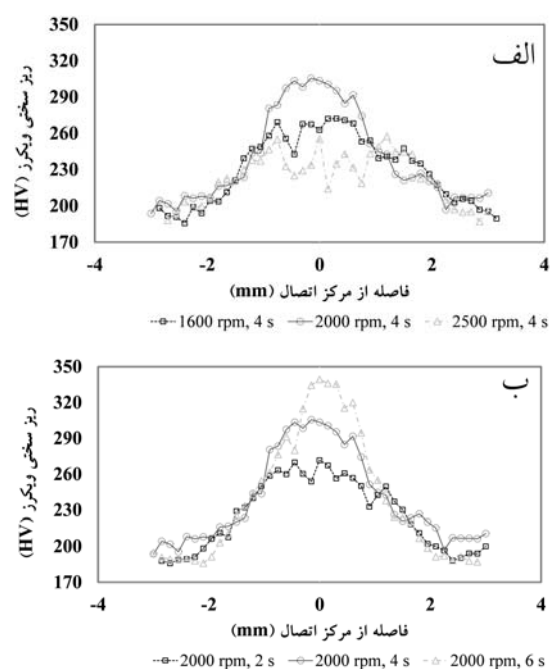
آزمون ریزسختی از مقطع اتصال آلیاژ آلومینیوم و فولاد دوفازی را در سرعت‌های چرخشی و زمان توقف مختلف نشان می‌دهد که با افزایش سرعت چرخشی ابزار در زمان توقف ثابت سختی در ناحیه همزده کاهش می‌یابد. (شکل ۱۲-الف و شکل ۱۳-الف). درشت‌دانه شدن ریزساختار در ناحیه همزده در اثر افزایش حرارت ورودی با افزایش سرعت چرخشی ابزار، سبب کاهش سختی در این ناحیه شده است (شکل ۸-ج و د). به‌طور مثال با افزایش سرعت چرخشی از ۱۶۰۰ به ۲۰۰۰ rpm در زمان توقف ۴ ثانیه، بیشینه سختی در ناحیه همزده فولاد دوفازی از حدود

در برخی از نمودارها به خاطر وجود ذرات پراکنده فولادی موجود در ناحیه همزده است (شکل ۵-ج) که در حین فرآیند اتصال از ورق زیرین جدا شده و در اثر جریان پلاستیک ماده به ورق رویی منتقل شده‌اند و سبب افزایش سختی ناگهانی می‌شوند (شکل ۱۲-ب).

۴- نتیجه گیری

۱. اتصال ناهم جنس آلیاژ آلومینیوم T6-۶۰۶۱ بر فولاد دوفازی DP۵۹۰ به روش همزن اصطکاکی نقطه‌ای تحت سرعت چرخشی و زمان توقف ابزار متفاوت انجام و ریزساختار و استحکام اتصال مورد بررسی قرار گرفت.
۲. ساختار ناحیه همزده در فولاد فوق‌ریز دانه گردیده به طوری که متوسط اندازه دانه‌های فاز فریت کمتر از $1 \mu\text{m}$ است. این درحالی است که متوسط اندازه دانه ساختار ناحیه همزده در آلومینیوم بیش از این مقدار می‌باشد. همچنین لایه‌ای با ترکیب بین فلزی Al-Fe در فصل مشترک تشکیل می‌شود که با افزایش حرارت ورودی ضخیم تر می‌گردد.
۳. افزایش سرعت چرخشی ابزار در زمان توقف ثابت، درشت دانه شدن ساختار ناحیه همزده فولاد و آلومینیوم را باعث می‌شود، این در حالی است که افزایش زمان توقف ابزار سبب درشت‌دانه شدن ناحیه همزده در آلومینیوم ولی ریز دانه‌تر شدن ناحیه همزده در فولاد می‌گردد.
۴. سختی ناحیه همزده آلومینیوم و فولاد با افزایش سرعت چرخشی ابزار در ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. با افزایش زمان توقف سختی در ناحیه همزده آلومینیوم ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته ولی سختی در ناحیه همزده فولاد در حال افزایش است.
۵. متغیرهای فرآیند تأثیر بیشتری در تغییرات سختی اتصال در مقطع فولاد در قیاس با مقطع آلومینیوم داشته است.
۶. استحکام کششی- برشی اتصال با افزایش سرعت چرخشی ابزار در زمان توقف ثابت، افزایش یافته و سپس با افزایش بیشتر سرعت چرخشی ابزار، کاهش می‌یابد. چنین رفتار مشابهی در افزایش زمان توقف ابزار در سرعت چرخشی ثابت نیز مشاهده می‌شود. با افزایش زمان توقف ابتدا استحکام کششی- برشی افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

رسوبات نسبت به فلز پایه کاهش یافته است [۱۰، ۱۳].



شکل ۱۳. نمودار ریز سختی از مقطع فولاد دوفازی، الف) در سرعت‌های چرخشی و ب) در زمان‌های توقف مختلف.

با افزایش زمان توقف از ۲ به ۴ و سپس به ۶ ثانیه، به ترتیب بیشینه سختی ناحیه همزده فولاد از ۲۷۰ به ۳۰۵ HV و سپس به ۳۴۰ HV افزایش یافته است (شکل ۱۳-ب). با ثابت نگه‌داشتن سرعت چرخشی ابزار مقدار حرارت ورودی به قطعه نیز ثابت می‌باشد. با افزایش زمان توقف در سرعت چرخشی ثابت، قطعه مدت زمان بیشتری در معرض حرارت ورودی قرار می‌گیرد. پلاستیک شدن فولاد، به خاطر داشتن نقطه ذوب بالا در قیاس با آلومینیوم، حرارت ورودی بیشتر و یا مدت زمان قرارگیری در معرض حرارت ورودی بیشتری را نیاز دارد. از این رو با افزایش زمان توقف تا ۶ ثانیه، به سبب افزایش پلاستیسیته و همزنی بیشتر، سختی ناحیه همزده افزایش یافته است.

هرچند که تغییرات زمان توقف بر سختی ناحیه همزده آلومینیوم به اندازه تغییرات سختی در ناحیه همزده فولاد دوفازی محسوس نیست، اما مشاهده می‌شود که برخلاف فولاد با افزایش زمان توقف از ۲ به ۴ ثانیه، ابتدا سختی میانگین ناحیه همزده آلومینیوم از حدود ۶۷ به ۷۴ HV افزایش و سپس با افزایش زمان توقف به ۶ ثانیه، سختی میانگین ناحیه همزده به حدود ۶۹ HV افت می‌کند. افزایش ناگهانی سختی

- Microstructure and tensile properties", *Acta Materialia*, 2005, 53, 3125-3134.
12. Figner, G., Vallant, R., Weinberger, T., Schrottner, H., Pasic, H., and Enzinger, N., "Friction Stir Spot Welds Between Aluminium and Steel Automotive Sheets: Influence of Welding Parameters on Mechanical Properties and Microstructure", *Welding in the World*, 2009, 53, 13-23.
 13. Sun, Y. F., Fujii, H., Takaki, N., and Okitsu, Y., "Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar Al Alloy/Steel Joints Prepared by a Flat Spot Friction Stir Welding Technique", *Materials and Design*, 2013, 47, 350-357.
 14. Sarkar, R., Pal, T. K., and Shome, M., "Microstructures and Properties of Friction Stir Spot Welded DP590 Dual Phase Steel Sheets", *Science and Technology of Welding and Joining*, 2014, 19, 436-442.
 15. Ohashi, R., Fujimoto, M., Mironov, S., Sato, Y. S., and Kokawa, H., "Effect of Contamination on Microstructure in Friction Stir Spot Welded DP590 Steel", *Science and Technology of Welding and Joining*, 2009, 14, 221-227.

میزان استحکام برشی بیشینه حدود ۲۰۵ MPa در نمونه اتصال یافته با سرعت چرخشی ۲۰۰۰ rpm و زمان توقف ۴ ثانیه حاصل شد که از استحکام تسلیم برشی آلیاژ آلومینیوم T۶-۶۰۶۱ (۱۶۰ MPa) افزون تر است. ضخامت لایه بین فلزی اتصال با میزان بیشینه استحکام، حدود ۲ μm است و با کاهش و یا افزایش ضخامت متوسط لایه بین فلزی در فصل مشترک اتصال، استحکام کششی - برشی کاهش می یابد.

سپاسگزاری

به این وسیله از استاد بزرگوار جناب آقای دکتر عباس زارعی هنرکی به خاطر در اختیار قرار دادن مواد اولیه تشکر و سپاسگزاری می گردد.

مراجع

1. Reilly, A., "Modelling of Friction Stir Spot Welding", Ph.D. Thesis, University of Cambridge, 2013.
2. Liyanage, T., Kilbourne, J., Gerlich, A. P., and North, T. H., "Joint Formation in Dissimilar Al Alloy/Steel and Mg Alloy/Steel Friction Stir Spot Welds", *Science and Technology of Welding and Joining*, 2009, 14, 500-508.
3. Bozzi, S., Helbert-Etter, A. L., Baudin, T., Criqui, B., and Kerbiguet, J. G., "Intermetallic Compounds in Al 6016/IF-Steel Friction Stir Spot Welds", *Materials Science and Engineering A*, 2010, 527, 4505-4509.
4. Bakavos, D., and Prangnell, P. B., "Effect of Reduced or Zero Pin Length and Anvil Insulation on Friction Stir Spot Welding Thin Gauge 6111 Automotive Sheet", *Science and Technology of Welding and Joining*, 2009, 14, 443-456.
5. Miyagawa, K., Tsubaki, M., Yasui, T., and Fukumoto, M., "Spot Welding Between Aluminium Alloy And Low-Carbon Steel by Friction Stirring", *Welding International*, 2009, 23, 559-564.
6. Mishra, R. S., and Mahoney, M. W., *Friction Stir Welding and Processing*, 1st ed., p. 235, ASM International, Ohio, 2007.
7. Yang, X. W., Fu, T., and Li, W. Y., "Friction Stir Spot Welding: A Review on Joint Macro- and Microstructure, Property, and Process Modelling", *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014, 11-18.
8. Vander Voort, G. F., *ASM handbook - metallography and microstructures*, ASM International, California, 2004.
9. Wang, D. A., Lee, S. C., "Microstructures and failure mechanisms of friction stir spot welds of aluminum 6061-T6 sheets", *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 186, 291-297.
10. Sato, Y. S., Urata, M., and Kokawa, H., "Parameters Controlling Microstructure and Hardness During Friction-Stir Welding of Precipitation-Hardenable Aluminum Alloy 6063", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2002, 33, 625-635.
11. Son, Y. I., Lee, Y. K., Park, K. T., Lee, C. S., Shin, D. H., "Ultrafine grained ferrite-martensite dual phase steels fabricated via equal channel angular pressing: