

بررسی تاثیر عملیات حرارتی بر ریزساختار و خواص متالورژیکی اتصال انفجاری ورق‌های فولاد زنگ نزن ۳۰۴- فولاد کربنی CK45

محسن الله دادی^{۱*} محمدرضا خانزاده قره شیران^۲

چکیده

در این پژوهش به بررسی تاثیر عملیات حرارتی بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال انفجاری ورق‌های فولاد زنگ نزن ۳۰۴ به فولاد کربنی CK45 که با بار انفجار ثابت و فاصله توقف متفاوت اتصال یافته پرداخته شده است. برای بررسی تاثیر دما و زمان بر روی نمونه های جوشکاری شده، نمونه ها در دماهای 250°C ، 350°C و زمان های دو و چهار ساعت در کوره، عملیات حرارتی شدند. بررسی های آزمایشگاهی با استفاده از آزمون های میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی، آزمون های ریز سختی سنجی و استحکام کششی برشی انجام شد. میزان نفوذ عناصر، آهن، نیکل، منگنز، کروم و ترکیب مناطق مذاب موضعی با استفاده از آنالیز EDS در نمونه ها مشخص شدند. نتایج نشان داد که با افزایش فاصله توقف از ۴ به ۵ میلی متر، انرژی جنبشی برخوردی افزایش یافته و تغییر شکل پلاستیکی شدیدتری در فصل مشترک اتصال ایجاد شده است. نتایج متالوگرافی، نمایانگر موجی - گردابه ای شدن فصل مشترک با افزایش میزان فاصله توقف بوده است. همچنین انجام عملیات حرارتی در دمای 350°C و زمان ۲ ساعت باعث افزایش ضخامت ترکیبات بین فلزی فصل مشترک شده است. سختی نیز با انجام عملیات حرارتی در دمای 350°C و زمان ۲ ساعت در نمونه های با فاصله توقف ۴ و ۵ میلی متر، نسبت به قبل از عملیات حرارتی به ترتیب از ۲۷۰/۹۱ به ۱۷۱/۰۰ ویکرز و از ۲۷۹/۰۰ به ۱۹۵/۰۰ ویکرز کاهش یافته است. همچنین استحکام نمونه ها به ترتیب از ۴۴۹/۲۱ به ۳۷۰/۸۰ مگاپاسکال و از ۵۱۰/۵۷ به ۴۳۲/۸۳ مگاپاسکال کاهش یافته است. تغییرات سختی و استحکام به دلیل تغییرات ضخامت منطقه بین فلزی و همچنین افزایش اندازه دانه ها بوده است.

واژه‌های کلیدی: عملیات حرارتی، جوشکاری انفجاری، ترکیبات بین فلزی، فاصله توقف، گردابه.

۱- کارشناس ارشد مهندسی مواد جوشکاری، واحد شهرضا، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرضا، ایران
 ۲- استادیار، مرکز تحقیقات مهندسی پیشرفته، واحد شهر مجلسی، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران
 * - نویسنده مسؤل مقاله: mohsenalahdadi@gmail.com

پیشگفتار

جوشکاری انفجاری، یکی از انواع فرآیندهای جوشکاری حالت جامد است که در اثر برخورد مایل دوفلز با سرعت زیاد و در شرایط کنترل شده اتصال تشکیل می‌شود. در این روش از مواد منفجره به عنوان منبع تولید انرژی برخورد استفاده می‌شود. با توجه به این که برخورد (به صورت مورب انجام می‌گیرد) در فشار بسیار بالا و در کسری از ثانیه انجام می‌شود، انتظار می‌رود که سطوح دو فلز در هنگام تماس با یکدیگر رفتار هیدرودینامیکی داشته باشند [۱]. در اثر برخورد دو سطح به یکدیگر، یک میدان خمیری موضعی در فصل مشترک اتصال ایجاد می‌شود. در اثر فشار برخوردی بالا یک جت با سرعت بالا از دو سطح اتصال تشکیل می‌شود که موجب ایجاد سطوح اتصالی تمیز در فصل مشترک جوشکاری و حذف آلودگی‌های سطحی می‌شود. تشکیل این جت از شرایط اساسی ایجاد پیوند مناسب در جوشکاری انفجاری می‌باشد. [۱،۲،۳]. متغیرهای اصلی این روش، میزان بار انفجاری (نسبت وزن ماده منفجره به وزن صفحه پرنده) و فاصله توقف است. این متغیرها، تاثیر مستقیمی بر خواص متالورژیکی و مکانیکی روکش کاری خواهد داشت. می‌توان سرعت برخورد ورق‌ها را به عنوان تابعی از این متغیرها در نظر گرفت. در این حالت با افزایش سرعت برخورد، نوع فصل مشترک از حالت صاف به حالت موجی تبدیل می‌شود. با ادامه این روند، گره‌هایی در مجاورت موج‌ها تشکیل شده و ممکن است ترکیبات بین فلزی و یا بسته‌های مذاب در فصل مشترک ایجاد شود. در نهایت این ترکیبات بین فلزی به صورت لایه گسترده‌ای در سرتاسر فصل مشترک پخش خواهد شد. پژوهش‌های بسیاری بر روی اثر متغیرهای جوشکاری انفجاری بر مورفولوژی و خواص اتصال در مورد آلیاژهای گوناگون صورت گرفته است [۴،۲]. در تمامی این پژوهش‌ها نتایج کلی نشان داده، با افزایش میزان بار انفجار و فاصله توقف، فصل مشترک از حالت صاف به حالت موجی تبدیل می‌شود و با افزایش بیش‌تر این متغیرها، بر اثر نیروی فشار و انرژی بیش از حد ترکیبات بین فلزی و حتی مذاب در فصل مشترک اتصال تشکیل شده است.

فولادهای زنگ نزن آستنیتی به واسطه خواص مکانیکی، مقاومت به خوردگی و قابلیت جوشکاری بسیار

عالی، به شکل وسیعی در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این وجود، فولادهای کربنی به دلیل قیمت پایین و قابلیت جوشکاری بسیار مناسب به سایر فولادهای گران قیمت ترجیح داده می‌شود که ضرورت اتصال فولادهای زنگ نزن به فولادهای کربنی در برخی کاربردهای خاص را ایجاب می‌کند. اتصالات غیر همجنس بین فولادهای زنگ نزن آستنیتی و فولادهای کربنی به شکل گسترده‌ای در سیستم‌های انتقال انرژی با دمای بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳].

در بررسی صورت پذیرفته بر روی اتصال ورق فولاد کم کربن به فولاد آستنیتی ۳۰۴ عملیات حرارتی شده در دمای ۲۵۰ درجه سانتیگراد و زمان‌های مختلف، مشاهده شده که زمان‌های عملیات حرارتی ۲ تا ۴ ساعت افزایش اندازه دانه‌ها (سه برابر) را به دنبال داشته و سختی به طور محسوس کاهش یافته است [۵]. در اتصال فولاد به فولاد با ضخامت‌های متفاوت با فرآیند جوشکاری انفجاری نیز مشاهده شده که انجام عملیات حرارتی در زمان‌های طولانی‌تر سبب افت استحکام کششی برشی گردیده است [۶،۷]. در بررسی تاثیر عملیات حرارتی بر رفتار اتصال انفجاری فولاد ۳۰۴ به تیتانیوم مشخص شده که میزان فاصله نفوذ تیتانیوم در فولاد ۳۰۴ کم‌تر از نفوذ عناصر آلیاژی مانند کروم، نیکل و آهن در لایه‌های تیتانیوم بوده است [۸].

هم‌چنین محققین تغییر خواص مکانیکی با متغیرهای دما و زمان عملیات حرارتی را برای اتصال آلومینیوم به فولاد بررسی کرده‌اند. آن‌ها دما را بین 450°C - 200°C در زمان‌های یک تا سیصد روز در نظر گرفتند. نتایج نشان داد که با افزایش دما ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک شکل گرفته و نیز ضخامت آن‌ها رابطه مستقیم با افزایش دما و زمان داشته است [۹]. محققین تاثیر عملیات حرارتی آنیل بر اتصال سه لایه Al/Cu/Al را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که افزایش دمای آنیل سبب افزایش ضخامت لایه بین فلزی در فصل مشترک شده و منجر به تغییرات سختی فصل مشترک گردیده است. آن‌ها مشاهده کردند که نمونه‌های آنیل شده در دمای ۴۰۰

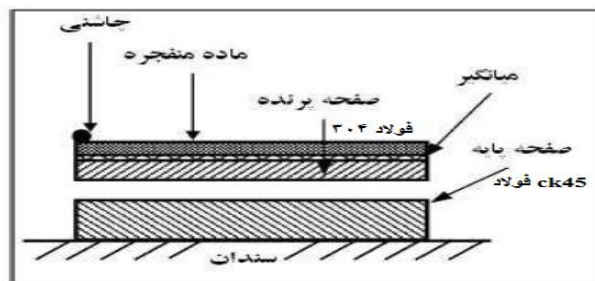
ماده منفجره در پشت آن تعبیه شده و پس از انفجار و اعمال نیروی حرکتی با سرعت بالا به صفحه پایه برخورد کرده و باعث ایجاد اتصال شده به ابعاد 260×260 میلیمتر مربع و صفحه پایه به ابعاد 230×230 میلیمتر مربع طراحی شده است. ماده منفجره از نوع آماتول ۱۰-۹۰ با ترکیب تری نیترو تولوئن ۱۰ درصد و نیترات آمونیم ۹۰ درصد با سرعت انفجار 2500 متر بر ثانیه بوده است. چگالی مواد مورد استفاده $0/85$ گرم بر سانتی متر مکعب با دانه بندی ۲۰۰ میکرون بوده که در داخل یک جعبه چوبی با ابعاد مناسب در بالای ورق پرنده مستقر گردید است [۵].

عملیات حرارتی پس از جوشکاری بر روی نمونه‌ها انجام شد. هم‌چنین جهت بررسی تاثیر متغیرهای دما و زمان بر روی ترکیبات بین فلزی و خواص آن‌ها، نمونه‌ها در زمان ثابت و دمای متغیر مطابق با جدول ۱، تحت انجام عملیات حرارتی قرار گرفتند.

درجه سانتیگراد و زمان ۳۰ دقیقه لایه بین فلزی در حد ۵ میکرون از نوع $AlCu$ ، Al_2Cu ، $AlCu_3$ در فصل مشترک تشکیل شده. هم‌چنین، ترک‌های ریز در بالا و پایین نمونه‌های آنیل شده مشاهده شده است [۱۰]. در این پژوهش بررسی تاثیر دما و زمان عملیات حرارتی در دماهای ۲۵۰ و ۳۵۰ درجه سانتیگراد بر خواص متالورژیکی ریزساختار اتصال انفجاری صورت گرفته و ارتباط دقیق خواص مکانیکی با ریز ساختار پس از عملیات حرارتی مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه از ورق‌های فولاد زنگ نزن ۳۰۴ با ابعاد 260×260 میلی‌متر مربع، ضخامت ۵ میلیمتری و فولاد CK45 با ابعاد 230×230 میلیمتر مربع و ضخامت ۷ میلیمتر استفاده شده است. در این پژوهش اتصال غیر همجنس بین فولاد کربنی CK45 و فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ به روش جوشکاری انفجاری انجام گرفته است. شکل (۱)، نحوه تنظیم اولیه صفحات جهت انجام جوشکاری انفجاری را نشان داده است. صفحه پرنده که



شکل ۱- نحوه تنظیم اولیه صفحات جهت انجام جوشکاری انفجاری [۳]

جدول ۱- نام گذاری نمونه‌ها بر اساس فاصله توقف، دما و زمان عملیات حرارتی

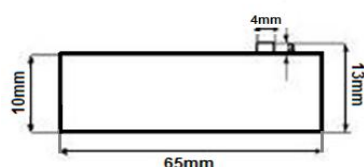
شماره نمونه	فاصله توقف (mm)	دما ($^{\circ}C$)	زمان (hr)
AS1	۴	۲۵۰	۲
AS2	۵	۲۵۰	۲
AS3	۴	۲۵۰	۴
AS4	۵	۲۵۰	۴
AS5	۴	۳۵۰	۲
AS6	۵	۳۵۰	۲

شکست قطعه، ماکزیمم نیروی شکست اندازه گیری شده و تنش شکست محاسبه گردیده است. سختی سنجی بر حسب ویکرز، به وسیله دستگاه مدل koopa انجام گرفته است. نیروی اعمالی ۲۰۰ g در مدت ۲۰ ثانیه اعمال شده است، برای هر نمونه ۸ اثر ریزسختی از مناطق مختلف جوش و فلز پایه و با فواصل ۵۰، ۱۵۰، ۲۵۰ و ۳۵۰ میکرون از فصل مشترک هر دو جزء اتصال یافته اندازه گیری شده است. این آزمون برای نمونه ها با استاندارد مرجع ASTM E384-11 در دمای آزمایشگاهی صورت پذیرفته است.

نتایج و بحث

بررسی ریزساختار نمونه‌ها قبل و بعد از عملیات حرارتی توسط میکروسکوپ نوری

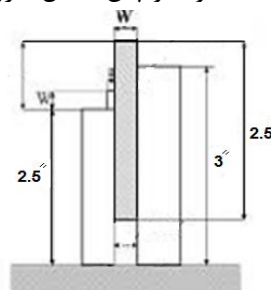
شکل ۳- الف و ب، موج‌های ایجاد شده در راستای طولی اتصال نمونه‌های قبل از عملیات حرارتی را نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود، فصل مشترک اتصال در نمونه با فاصله توقف ۴ میلی متر به صورت موجی کوتاه بوده و فصل مشترک اتصال در نمونه با فاصله توقف ۵ میلی متر به صورت موجی بزرگ‌تر شده و افزایش فاصله توقف، سرعت صفحه پرند بیشتر شده و تغییر شکل پلاستیک بیش‌تری در فصل مشترک اتصال اتفاق افتاد. همچنین، انرژی جنبشی نیز افزایش یافته که فصل مشترک نمونه با فاصله توقف ۵ میلی متر نسبت به نمونه با فاصله توقف ۴ میلی متر، دارای موج‌های بزرگ‌تری است.



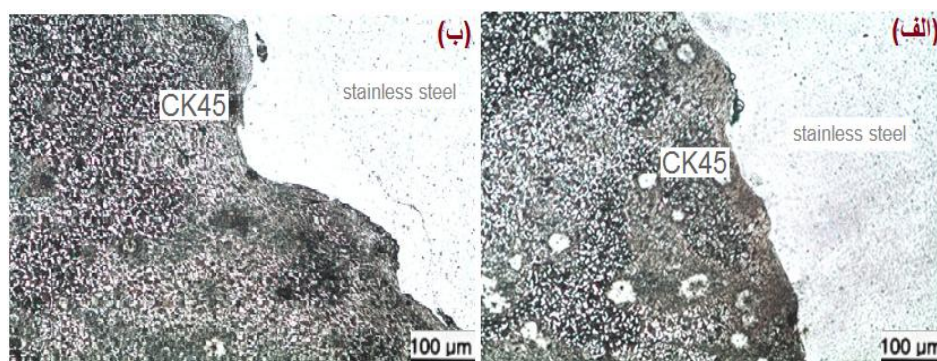
مطالعات قبلی بر روی اتصال انفجاری فولاد به فولاد توسط محققان در محدوده دمایی 250°C با بازه‌های زمانی کوتاه مدت و بازه‌های زمانی طولانی ۱-۴ ساعت انجام شده بود. بنابراین، انتخاب دمای 250°C و 350°C در این پژوهش به دلیل بحرانی بودن این دما برای اتصال فولاد - فولاد، بررسی عملکرد مواد روکش شده (اتصال) به روش جوشکاری انفجاری در شرایط کاری با این محدوده دمایی طبق گزارش فن‌دیک و همکارانش است [۵].

پس از اتمام جوشکاری به منظور آماده سازی نمونه‌ها برای متالوگرافی ابتدا، سطح نمونه‌ها توسط کاغذ سنباده شماره ۶۰ تا ۲۵۰۰ سنباده زنی شده است. پس از رفع خطوط و ناهمواری‌های سطحی، به وسیله دستگاه و توسط نمد و با استفاده از محلول اکسید آلومینیوم پولیش زده شدند. پس از پولیش سطح نمونه فولاد کربنی با استفاده از محلول نایتال ۲٪ و سطح نمونه فولاد زنگ نزن با استفاده از محلول یک میلی لیتر اسید نیتریک (HNO_3) با غلظت ۶۳٪، یک میلی لیتر اسید کلریدریک (HCl) با غلظت ۳۷/۵٪ و یک میلی لیتر آب (H_2O) اچ شدند.

جهت ارزیابی خواص استحکام کششی برشی، نمونه‌های تهیه شده مطابق استاندارد DIN ۵۰۱۶۲ طراحی شده‌اند [۱۱]. آزمون‌ها بر روی نمونه‌های عمود بر جهت انفجار در فصل مشترک صورت پذیرفته‌اند. شکل و ابعاد نمونه‌ها طراحی شده مطابق شکل ۲ است. همچنین نمونه‌ها داخل قید و بست، قرار گرفته و بر روی فک پایینی دستگاه آزمون کششی برشی ۵۰ تن مدل GT-700I-LC50 قرار گرفته است. سرعت حرکت فک دستگاه یک میلی متر بر دقیقه بوده و پس اعمال نیرو و



شکل ۲- آزمون استحکام برشی ورق‌های پوشش داده شده به همراه ابعاد نمونه‌ها مطابق استاندارد DIN ۵۰۱۶۲ [۱۱]



شکل ۳- فصل مشترک اتصال نمونه‌های قبل از عملیات حرارتی با فاصله توقف الف) ۴ میلی متر و ب) ۵ میلی متر

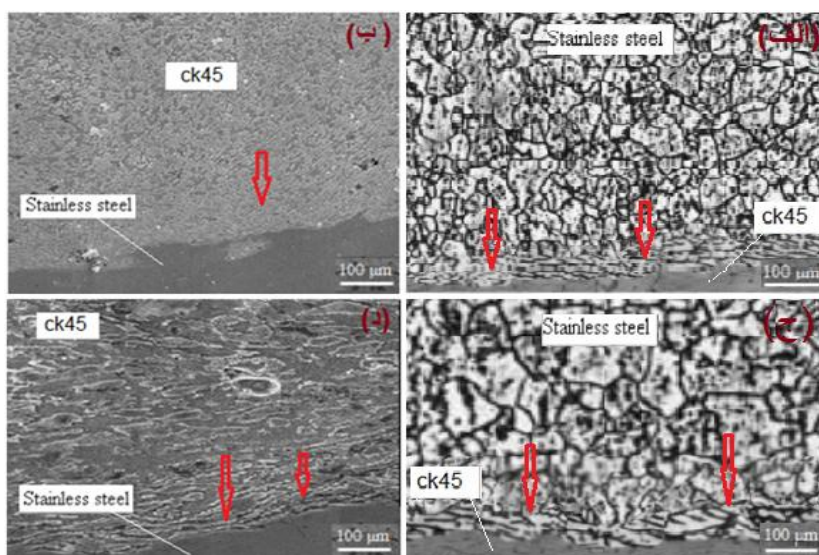
زمان بر اتصال انفجاری فولاد کم کربن به فولاد آستنیت ۳۰۴ داشتند، نشان دادند که با افزایش زمان عملیات حرارتی از یک ساعت به چهار ساعت در دمای ثابت 250°C اندازه دانه‌ها افزایش یافته، تفاوت عمده این تحقیق با پژوهش آقای فندیک و همکارانش در دما و زمان‌های مختلف عملیات حرارتی، فاصله توقف متفاوت بین دو صفحه پرنده و صفحه پایه و همچنین درصد عناصر الیاژی متفاوت فولاد کربنی بوده است [۵].

در شکل ۵-ج و د بزرگ‌تر شدن اندازه دانه‌های نمونه AS6 عملیات حرارتی شده در دمای 350°C و زمان ۲ ساعت نسبت به شکل ۵-الف و ب نمونه AS2 عملیات حرارتی شده در دمای 250°C و زمان ۲ ساعت مشاهده می‌شود.

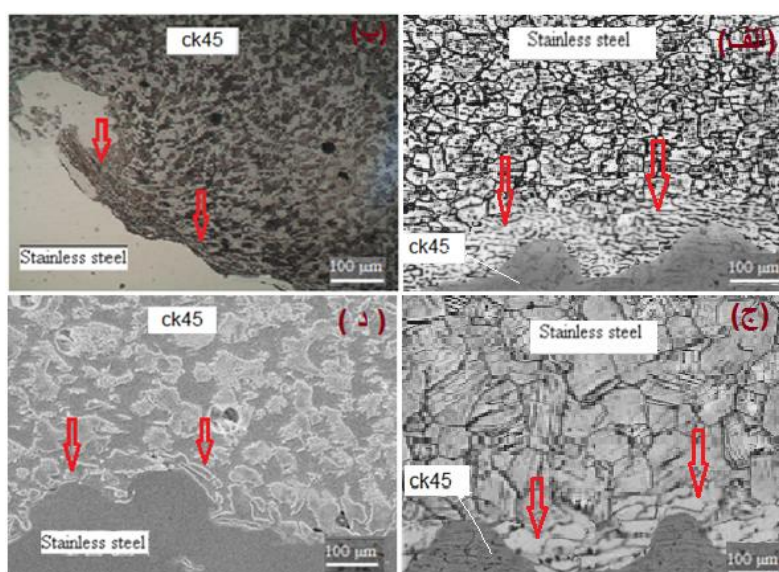
لوکاج^۴ و همکاران [۱۲] نیز با بررسی عملیات حرارتی اتصال انفجاری آلومینیوم به فولاد آستنیتی نشان دادند که با افزایش دمای عملیات حرارتی، اندازه دانه‌ها افزایش یافته است. درشت شدن دانه‌ها در اثر حرارت دهی و آزاد شدن انرژی داخلی فصل مشترک می‌باشد. فصل مشترک اتصال به دلیل انرژی جنبشی ناشی از برخورد، تغییر شکل پلاستیکی شدید و تجمع نابجایی‌ها دارای سطح انرژی بالایی است.

قسمتی از انرژی جنبشی مصرفی در فصل مشترک به انرژی پتانسیل تبدیل شده و سبب می‌شود که ورق‌ها در طول سطح برخورد تغییر شکل داده، با افزایش انرژی جنبشی مصرفی تلاطم شدیدی در فصل مشترک ایجاد و فلز کار سخت‌تر شده که در نهایت منجر به ایجاد موج‌هایی با طول موج و دامنه بیشتر و ریزدانه‌تر شدن دانه‌ها و کشیده شدن آن‌ها در جهت انفجار در فصل مشترک شده است.

شکل ۴- الف و ب نشان داده که انجام عملیات حرارتی در دمای 250°C و زمان ۲ ساعت در نمونه AS1 سبب افزایش اندازه دانه‌ها نسبت به قبل از عملیات حرارتی شده که این افزایش اندازه دانه در سمت فولاد زنگ نزن ۳۰۴ بیشتر مشاهده شده است. همچنین، مطابق شکل ۴-ج و د عملیات حرارتی در دمای 250°C و زمان ۴ ساعت در نمونه AS3 باعث افزایش بیشتر اندازه دانه‌ها، درشت‌دانی بیشتر در نزدیک فصل مشترک و مناطق اطراف آن به ویژه در فولاد زنگ نزن ۳۰۴، نسبت به نمونه AS1 عملیات حرارتی شده در دمای 250°C و زمان ۲ ساعت شده است. همان‌گونه که در شکل نشان داده شده، پیکان‌ها کشیده شدن دانه‌ها در نزدیک فصل مشترک را نشان می‌دهند که به دلیل برخورد شدید دو صفحه ناشی از نیروی بالای انفجار ماده منفجره و تغییر شکل پلاستیکی شدید فصل مشترک است. فیندیک^۳ و همکاران [۵] نیز در مطالعاتی که بر روی تاثیر دما و



شکل ۴- فصل مشترک اتصال نمونه‌ها با فاصله توقف ۴ میلی متر: الف) و ب) نمونه AS1 عملیات حرارتی شده در دمای 250°C و زمان ۲ ساعت، ج) و د) نمونه AS3 عملیات حرارتی شده در دمای 250°C و زمان ۴ ساعت (پیکان‌ها تغییر اندازه و کشیده شدن دانه‌ها در نزدیک فصل مشترک را نشان می‌دهند)



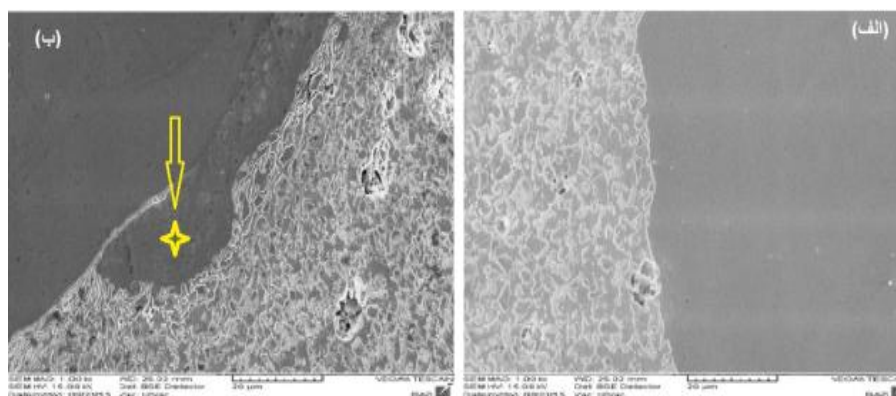
شکل ۵- فصل مشترک اتصال نمونه‌های با فاصله توقف ۵ میلی متر: الف) و ب) نمونه AS2 عملیات حرارتی شده در دمای 350°C و زمان ۲ ساعت، ج) و د) نمونه AS6 عملیات حرارتی شده در دمای 350°C و زمان ۲ ساعت (پیکان‌ها تغییر اندازه و کشیده شدن دانه‌ها در نزدیک فصل مشترک را نشان می‌دهند)

گونه حفره و منطقه ذوبی در فصل مشترک به وجود نیامده است. کاکار و همکاران [۷] گزارش داده‌اند که در نسبت‌های بالای بار انفجاری در اتصال فولاد-فولاد، یک منطقه ذوب در فصل مشترک به وجود می‌آید. هم‌چنین، در نمونه با فاصله توقف ۵ میلی متر شکل ۶- ب به دلیل افزایش فاصله توقف، یک لایه مذاب در فصل مشترک به وجود آمده است.

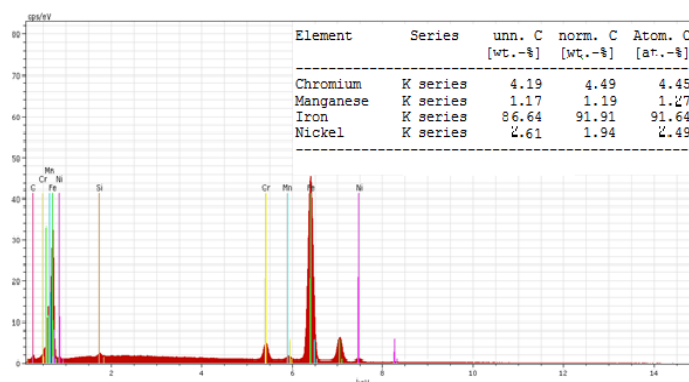
بررسی ریزساختار نمونه‌ها توسط میکروسکوپ

الکترونی روبشی

شکل ۶، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌های قبل از عملیات حرارتی و شکل لایه ذوب موضعی در فصل مشترک را نشان داده است. همان گونه که در شکل ۶- الف برای نمونه با فاصله توقف ۴ میلی متر قبل از انجام عملیات حرارتی نشان داده شده، هیچ



شکل ۶- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فصل مشترک نمونه های عملیات حرارتی نشده (الف) نمونه با فاصله توقف ۴ میلی متر (ب) نمونه با فاصله توقف ۵ میلی متر



شکل ۷- آنالیز الکترون برگشتی از لایه ذوب موضعی به وجود آمده در نمونه قبل از عملیات حرارتی با فاصله توقف ۵ میلی متر نشان داده شده در شکل ۶

نشان داده که در نمونه AS1 به دلیل فاصله توقف کم تر، انرژی جنبشی برخوردی کم تر در نتیجه، عملیات حرارتی در دمای 250°C و زمان ۲ ساعت قادر به ایجاد نفوذی در فصل مشترک نگرديد و هیچ لایه نفوذی در فصل مشترک به وجود نیامده است. در نمونه AS2 مشخص شده که در اثر افزایش فاصله توقف، انرژی جنبشی برخوردی صفحات افزایش یافته؛ در نتیجه، عملیات حرارتی در دمای 250°C و زمان ۲ ساعت قادر به ایجاد نفوذ در فصل مشترک گردیده است. شکل ۹، آنالیز الکترون برگشتی از لایه نفوذی ایجاد شده در فصل مشترک نمونه AS2 با فاصله توقف ۵ میلی متر و عملیات حرارتی شده در دمای 250°C و زمان ۲ ساعت را نشان داده است. آنالیز از دو نقطه A و B و در مناطق مختلف

در شکل ۷ نیز آنالیز EDS^۵ ترکیبات موجود در فصل مشترک نشان داده شده است. ترکیب شیمیایی لایه مذاب شامل ۹۱/۴۴ درصد اتمی آهن، ۴/۴۵ درصد اتمی کروم و ۲/۴۹ درصد اتمی نیکل بوده که دلیل به وجود آمدن منطقه ذوب موضعی، ترکیب شدن صفحات پایه و پرنده در اثر چرخش جت جهنده محبوس شده در فصل مشترک است.

شکل ۸- الف، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه AS1 با فاصله توقف ۴ میلی متر و عملیات حرارتی شده در دمای 250°C و زمان ۲ ساعت و شکل ۸- ب نمونه AS2 با فاصله توقف ۵ میلی متر و عملیات حرارتی شده در دمای 250°C و زمان ۲ ساعت را نشان داده است. نتایج

5-Energy-dispersive spectroscopy-(EDS)

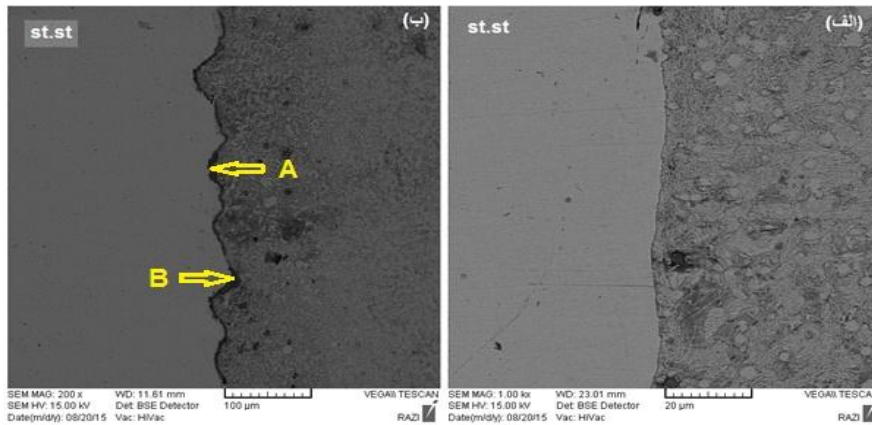
آهن، ۱۱/۱۸ درصد اتمی کروم و ۵/۵۱ درصد اتمی نیکل بوده که نشان می‌دهد، عناصر کروم و نیکل از طرف فولاد زنگ نزن با افزایش دمای عملیات حرارتی در فصل مشترک نفوذ کرده است. در نقطه B ترکیب شیمیایی شامل ۹۳/۳۷ درصد اتمی آهن، ۳/۲۴ درصد اتمی کروم و ۱/۶۴ درصد اتمی نیکل بوده است. از آنجایی که ضریب هدایت حرارتی فولاد زنگ نزن ۳۰۴ (14W/mK) کم‌تر از ضریب هدایت حرارتی فولاد CK45 (15W/mK) بوده، در هنگام سرد شدن منطقه مذاب منجمد شده در یک سمت امواج متمرکز و به دلیل انتقال حرارت بیشتر در سمت فولاد CK45 مشاهده می‌شوند.

اکبری موسوی و همکاران [۸] نیز در بررسی عملیات حرارتی بر رفتار اتصال انفجاری فولاد ۳۰۴ به تیتانیوم نشان دادند که با افزایش حرارت عرض مناطق بین فلزی فصل مشترک به دلیل واکنش عناصر آلیاژی و افزایش نفوذ بیشتر شده است.

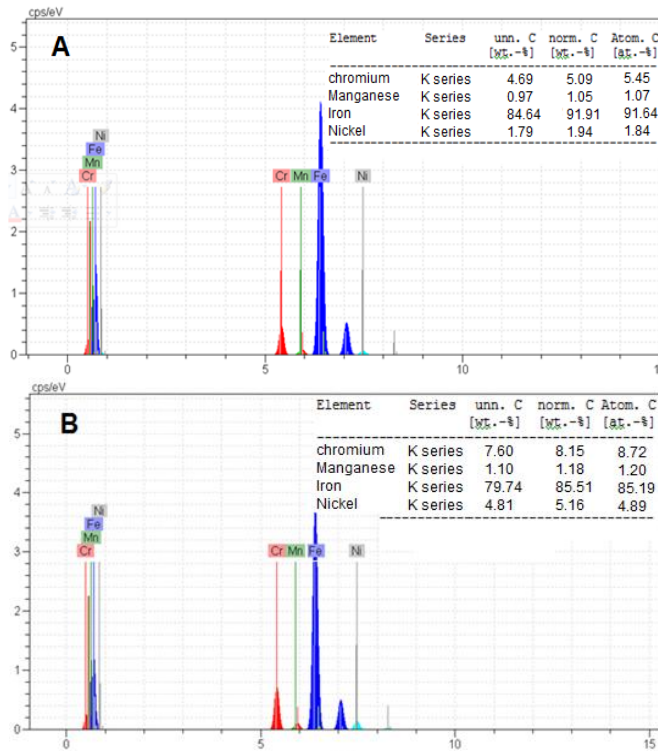
گرفته شده است. در نقطه A شکل ۹ ترکیب شامل ۹۱/۶۴ درصد اتمی آهن، ۵/۴۵ درصد اتمی کروم و ۱/۸۴ درصد اتمی نیکل بوده است. در نقطه B شکل ۱۱ ترکیب شیمیایی شامل ۸۵/۱۹ درصد اتمی آهن، ۸/۷۲ درصد اتمی کروم و ۴/۸۹ درصد اتمی نیکل است. جان بانکر و همکاران نیز تغییر خواص مکانیکی اتصال آلومینیوم به فولاد با متغیرهای دما و زمان را بررسی کرده‌اند. آن‌ها دما را بین 450°C - 200°C در زمان‌های یک تا سیصد روز در نظر گرفتند. نتایج آن‌ها نشان داده است که با افزایش دما، ترکیبات بین فلزی به تدریج شکل گرفته و نیز ضخامت آن‌ها رابطه مستقیم با افزایش دما و زمان داشته است [۹]. به دلیل ماهیت دینامیکی برخورد و تغییر زاویه برخورد در فصل مشترک، میزان سرعت صفحه پرنده در طول برخورد متغیر است. انرژی جنبشی ناشی از برخورد در فصل مشترک با تغییر سرعت صفحه پرنده در طول فصل مشترک تغییر می‌نماید. در نتیجه، تغییرات انرژی فصل مشترک، پس از عملیات حرارتی ترکیب لایه نفوذی در مناطق مختلف فصل مشترک یکسان نمی‌باشد.

شکل ۱۰-الف تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی AS5 با فاصله توقف ۴ میلی‌متر و عملیات حرارتی شده در دمای 350°C و زمان ۲ ساعت و شکل ۱۰-ب نمونه AS6 با فاصله توقف ۵ میلی‌متر و عملیات حرارتی شده در دمای 350°C و زمان ۲ ساعت را نمایش می‌دهد. در مقایسه با شکل ۸، نتایج نشان می‌دهد که در نمونه AS5 با افزایش دمای عملیات حرارتی به 350°C و در زمان ۲ ساعت یک لایه نفوذی در فصل مشترک مشاهده شده است. نفوذ تابع دماست و این افزایش دما شرایط را باری نفوذ عناصر در فصل مشترک فراهم نموده است. در نمونه AS6 با فاصله توقف ۵ میلی‌متر و عملیات حرارتی شده در دمای 350°C و زمان ۲ ساعت، مشخص شده که در اثر افزایش فاصله توقف (انرژی برخورد) و دمای عملیات حرارتی حرارت از 250°C به 350°C و فرصت نفوذ بیشتر ضخامت لایه ترکیبات بین فلزی نسبت به حالت‌های قبل افزایش یافته است.

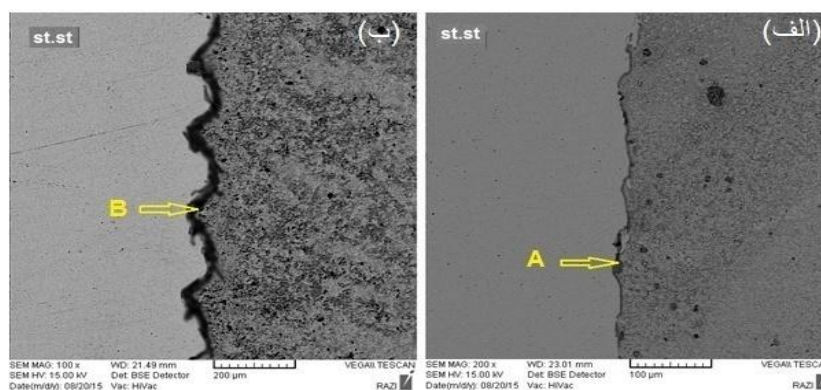
در شکل ۱۱ آنالیز الکترون برگشتی از دو نقطه A و B در نمونه‌های AS5 و AS6 گرفته شده است. در نمونه AS5 نقطه A شکل ۱۱ ترکیب شامل ۸۱/۶۰ درصد اتمی



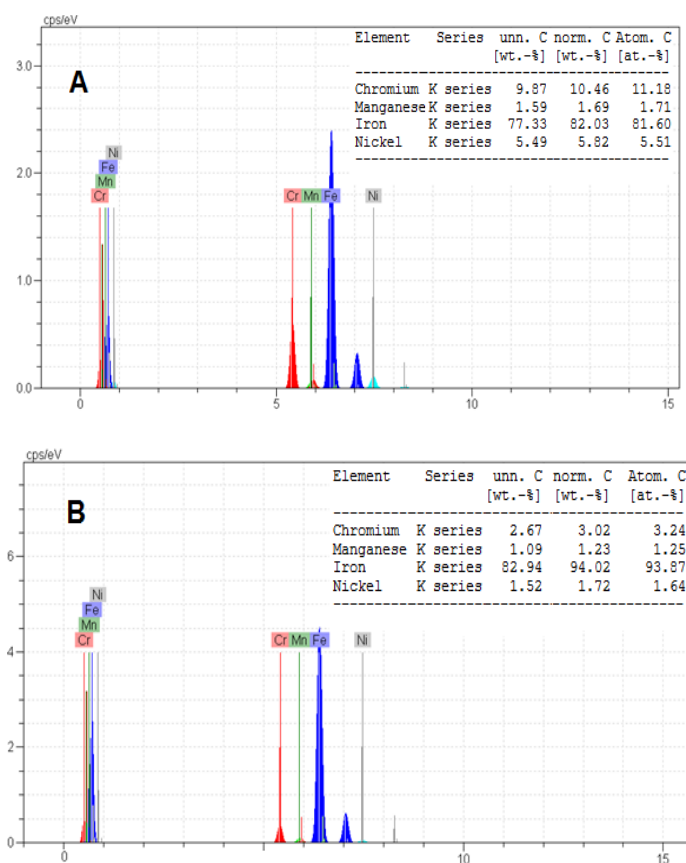
شکل ۸- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فصل مشترک (الف) نمونه AS1 با فاصله توقف ۴ میلی متر و عملیات حرارتی شده دردمای 250°C و زمان ۲ ساعت ب) نمونه AS2 با فاصله توقف ۵ میلی متر و عملیات حرارتی شده دردمای 250°C و زمان ۲ ساعت



شکل ۹- آنالیز الکترون بازگشتی از لایه نفوذی مناطق A و B در فصل مشترک نمونه AS2 با فاصله توقف ۵ میلی متر و عملیات حرارتی شده دردمای 250°C و زمان ۲ ساعت، نشان داده شده در شکل ۸



شکل ۱۰- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فصل مشترک (الف) نمونه AS5 با فاصله توقف ۴ میلی متر و عملیات حرارتی شده دردمای 350°C و زمان ۲ ساعت (ب) نمونه AS6 با فاصله توقف ۵ میلی متر و عملیات حرارتی شده دردمای 350°C و زمان ۲ ساعت



شکل ۱۱- آنالیز الکترون بازگشتی از لایه نفوذی مناطق A و B در فصل مشترک نمونه های AS5 و AS6، عملیات حرارتی شده دردمای 350°C و زمان ۲ ساعت شکل ۱۰

ارزیابی خواص مکانیکی با استفاده از آزمون

ریزسختی سنجی

شکل ۱۲، تغییرات ریزسختی سنجی نمونه‌های قبل از عملیات را نشان داده است.

ریزسختی سنجی از محل و دو سمت ناحیه جوش در فلزات پایه انجام پذیرفته است. سختی اولیه فولاد ۳۰۴، ۱۷۷ ویکرز و فولاد کربنی ۲۲۰ ویکرز بوده است. نتایج نشان داده به دلیل سخت شدن شوکی ناشی از انفجار با نزدیک شدن به فصل مشترک سختی افزایش یافته است. این افزایش سختی در نمونه با فاصله توقف بزرگ‌تر به دلیل افزایش سرعت حرکت صفحه پرنده و انرژی جنبشی برخوردی، بیش‌تر بوده است. بیشینه سختی در فصل مشترک نمونه با فاصله توقف ۴ میلی متر ۲۷۰/۱۹ ویکرز و در نمونه با فاصله توقف ۵ میلی متر ۲۷۹/۰۰ ویکرز بوده است. افزایش فاصله توقف سبب می‌شود، سرعت حرکت صفحه پرنده و زاویه دینامیکی برخورد افزایش یافته و در نتیجه، انرژی جنبشی برخوردی نیز افزایش یافته و تغییر شکل پلاستیکی شدیدی در فصل مشترک اتصال ایجاد و سخت شدن ناشی از امواج انفجار ایجاد شود. افزایش ریزسختی فصل مشترک اتصال با افزایش فاصله توقف توسط محققان دیگر مانند آکارر^[۱۳] گزارش شده است. شکل ۱۳، سختی‌های اندازه‌گیری شده در طول فصل مشترک نمونه‌های عملیات حرارتی شده AS1، AS3 و AS5 با فاصله توقف ۴ میلی متر را گزارش می‌کند. نتایج نشان می‌دهند که در تمامی نمونه‌ها در نواحی نزدیک فصل مشترک، مقدار سختی بالاست و در مناطق دورتر از فصل مشترک مقدار سختی کاهش یافته است. شکل ۱۳ نشان می‌دهد که با افزایش دما و زمان عملیات حرارتی سختی کاهش یافته است. با افزایش دما، زمان و با کاهش انرژی داخلی توسط آرایش مجدد نابجایی‌ها، جابجایی‌های خالی به منظور صعود و لغزش نابجایی‌ها و در نتیجه حذف تنش‌های داخلی سختی در نزدیک فصل مشترک کاهش یافته است. سختی مناطق مجاور فصل مشترک قبل از عملیات حرارتی براساس شکل ۱۲ در مقایسه با نمونه‌های بعد از عملیات حرارتی بالاتر است. دلیل کاهش سختی در

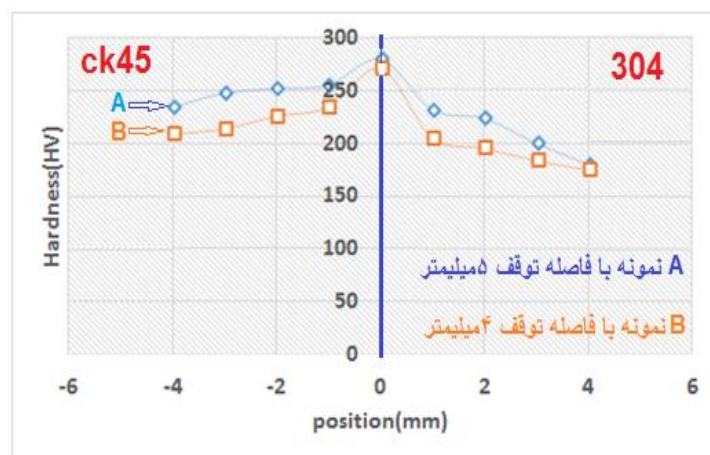
نمونه‌های بعد از عملیات حرارتی، افزایش اندازه دانه‌ها در اثر حرارت مطابق شکل ۵ و آزاد شدن انرژی داخلی بوده است.

شکل ۱۴، تغییرات ریزسختی نمونه‌های عملیات حرارتی شده AS2، AS4 و AS6 با فاصله توقف ۵ میلی متر را نشان می‌دهد. نتایج بیان می‌کند که با افزایش فاصله توقف به دلیل تغییر شکل پلاستیکی شدید ناشی از انرژی برخورد صفحات و کار سختی، در تمامی نمونه‌ها به ویژه در مناطق نزدیک فصل مشترک سختی افزایش یافته است. با افزایش دما و زمان عملیات حرارتی به دلیل بزرگ‌تر شدن دانه‌ها، سختی کاهش و انعطاف پذیری افزایش می‌یابد. شکل ۱۴ نشان می‌دهد که نمونه عملیات حرارتی شده در زمان دو ساعت و دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد، بالاترین مقدار سختی در مجاور فصل مشترک را دارد. افزایش دما و زمان عملیات حرارتی، سبب کاهش سختی در مناطق مجاور فصل مشترک شده است. فیندیک^۸ و همکاران نیز در مطالعاتی که بر روی تاثیر دما و زمان بر اتصال انفجاری فولاد کم کربن به فولاد آستنیتی ۳۰۴ داشتند، نشان دادند که با انجام عملیات، سختی تغییرات محسوسی داشته است. در شکل ۴ نشان داده شده است که با افزایش زمان عملیات حرارتی از یک ساعت به چهار ساعت در دمای ثابت ۲۵۰°C به دلیل درشت دانه شدن ساختار، میزان سختی کاهش یافته است [۵].

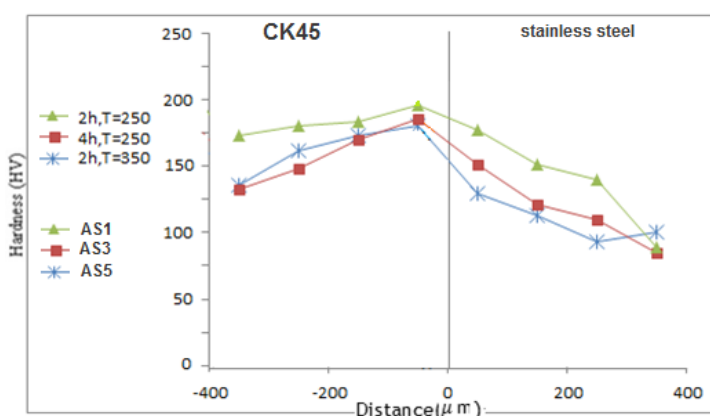
مقایسه شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان می‌دهد که پس از عملیات حرارتی سختی در نمونه با فاصله توقف ۵ میلی متر بیش‌تر از نمونه فاصله توقف ۴ میلی متر است. افزایش فاصله توقف، سبب افزایش سرعت برخوردی صفحه پرنده به صفحه پایه، افزایش انرژی جنبشی برخوردی و کارسختی بیش‌تر شده است. هم‌چنین، با افزایش دما و زمان عملیات حرارتی به دلیل افزایش اندازه دانه‌ها سختی در هر دو نمونه با فاصله توقف ۴ و ۵ میلی متر کاهش یافته است.

جدول ۲ نیز نمایانگر مقادیر سختی در فاصله ۵۰ میکرونی مجاور فصل مشترک اتصالات قبل و پس از عملیات حرارتی است. سختی مناطق مجاور فصل مشترک در سمت فولاد Ck45 در تمامی نمونه‌ها در قبل و بعد از

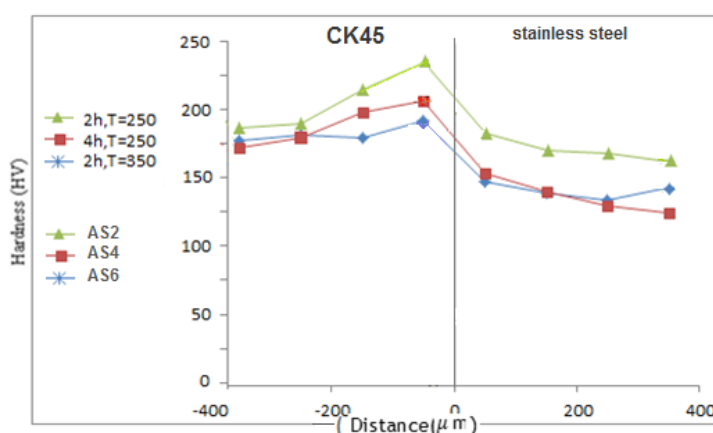
عملیات حرارتی نسبت به فولاد زنگ نزن ۳۰۴ بیش تر نسبت به فولاد زنگ نزن نیز مرتبط است. بوده که این موضوع به سخت تر بودن ذاتی فولاد کربنی



شکل ۱۲- تغییرات ریزسختی نمونه های جوشکاری شده قبل از عملیات حرارتی با فاصله توقف ۵ و ۴ میلی متر



شکل ۱۳- تغییرات ریزسختی نمونه های جوشکاری شده بعد از عملیات حرارتی با فاصله توقف ۴ میلی متر



شکل ۱۴- تغییرات ریزسختی نمونه های جوشکاری شده بعد از عملیات حرارتی با فاصله توقف ۵ میلی متر

جدول ۲- تغییرات ریز سختی نمونه‌ها قبل و بعد عملیات حرارتی با فاصله ۵۰ میکرون از فصل مشترک اتصال

نمونه	Ck45		Ck45	
	قبل از عملیات حرارتی	بعد از عملیات حرارتی	قبل از عملیات حرارتی	بعد از عملیات حرارتی
AS1	۲۳۲/۴۴	۱۹۶/۳۲	۲۰۱/۵۲	۱۶۶/۲
AS2	۲۵۰/۸	۲۳۰/۴۱	۲۲۹/۶۳	۱۸۱/۳۵
AS3	۲۳۲/۴۴	۱۸۰/۲۵	۲۰۱/۵۲	۱۵۰/۸
AS4	۲۵۰/۸	۲۰۴/۶۵	۲۲۹/۶۳	۱۵۴/۳۵
AS5	۲۳۲/۴۴	۱۷۸/۵۶	۲۰۱/۵۲	۱۲۷/۳
AS6	۲۵۰/۸۱	۱۹۱/۹۱	۲۲۹/۶۳	۱۵۰/۲۹

آزمون استحکام کششی برشی

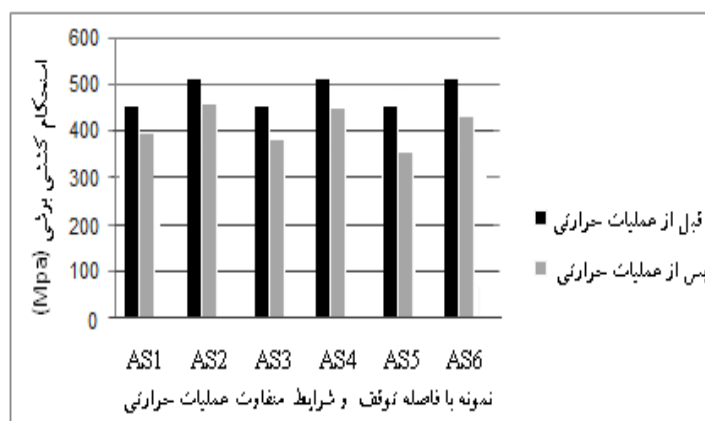
مگاپاسکال تغییر یافته، این تغییرات برای سایر نمونه‌ها در جدول ۳ ارائه شده، همچنین نتایج آن در شکل ۱۵ نشان داده شده است. مطالعات دشتی و همکاران [۱۴] نیز نشان داد که به دلیل افزایش لایه های ترد بین فلزی، استحکام برشی فصل مشترک اتصال پس از انجام عملیات حرارتی سریع کاهش می‌یابد.

در جدول ۳، تغییرات استحکام کششی برشی فصل مشترک نمونه‌ها در دما و زمان‌های متفاوت عملیات حرارتی آمده است. نتایج این آزمون نشان داد که میزان استحکام کششی برشی نمونه‌ها قبل از عملیات با فاصله توقف ۴ و ۵ میلی متر به ترتیب ۴۴۹/۲۱ و ۵۱۰/۵۷ مگاپاسکال به دست آمده است. همان گونه که نتایج نشان داده، با افزایش فاصله توقف از ۴ به ۵ میلی متر، دامنه امواج به دلیل افزایش انرژی برخورد دو صفحه نسبت به هم و تغییر شکل پلاستیکی بیش‌تر، افزایش یافته در نتیجه استحکام کششی برشی نمونه‌ها افزایش یافته است. همچنین، شکل ۳- ب نشان داده که فصل مشترک موجهی‌تر شده و یک قفل مکانیکی در آن به وجود آمده که بر افزایش استحکام مؤثر است.

انجام عملیات حرارتی در دماهای 250°C ، 350°C و زمان‌های ۲ و ۴ ساعت، سبب افزایش ضخامت لایه ترکیبات ترد بین فلزی در فصل مشترک نمونه‌ها و تمرکز تنش در این منطقه شده که در شکل ۱۰- ب افزایش ضخامت قابل رویت است. همچنین، انجام عملیات حرارتی باعث کاهش استحکام و حذف تاثیر تغییر شکل پلاستیکی نیروی ناشی از انفجار گردیده در نتیجه، استحکام کششی برشی آن‌ها نیز در مقایسه با قبل از انجام عملیات حرارتی کاهش یافته است، به طوری که در نمونه AS1، استحکام قبل از عملیات حرارتی ۴۴۹/۲۱ مگاپاسکال بوده؛ اما پس از عملیات حرارتی به ۳۹۸/۱۷

جدول ۳- تغییرات استحکام کششی برشی در دما و زمان‌های متفاوت عملیات حرارتی

نمونه	فاصله توقف (mm)	دمای عملیات حرارتی (C)	زمان عملیات حرارتی (hr)	استحکام قبل از عملیات (Mpa)	استحکام پس از عملیات (Mpa)
AS1	۴	۲۵۰	۲	۴۴۹/۲۱	۳۹۸/۱۷
AS2	۵	۲۵۰	۲	۵۱۰/۵۷	۴۶۳/۶۷
AS3	۴	۲۵۰	۴	۴۴۹/۲۱	۳۸۹/۷۸
AS4	۵	۲۵۰	۴	۵۱۰/۵۷	۴۵۱/۵۹
AS5	۴	۳۵۰	۲	۴۴۹/۲۱	۳۷۰/۸۱
AS6	۵	۳۵۰	۲	۵۱۰/۵۷	۴۳۲/۸۳



شکل ۱۵- نمودار نتایج آزمون استحکام برشی کششی نمونه‌ها در دما و زمان‌های متفاوت

نتیجه گیری

۴. در نمونه‌های عملیات حرارتی شده در دماها و زمان‌های بالا، نفوذ قابل ملاحظه‌ای در فصل مشترک رخ داده و ضخامت ترکیبات بین فلزی افزایش یافته است.
 ۵. افزایش فاصله توقف از چهار به پنج میلی متر، سبب تغییر شکل پلاستیکی بیشتر و موجی‌تر شدن فصل مشترک اتصال شده و استحکام اتصال قبل از عملیات حرارتی را از ۴۴۹/۲۱ مگا پاسکال به ۵۱۰/۵۷ مگا پاسکال افزایش داده است.

۱. نتایج نشان داده در فاصله توقف ۴ میلی متر فصل مشترک به صورت موجی کوتاه بوده که با افزایش فاصله توقف به ۵ میلی متر فصل مشترک موجی گردابه‌ای شده است.
 ۲. انجام عملیات حرارتی در دمای 350°C و زمان ۲ ساعت در نمونه، سبب افزایش بیش‌تر اندازه دانه‌ها در نزدیک فصل مشترک و مناطق اطراف آن نسبت به سایر دماها و زمان‌های عملیات حرارتی شده است.
 ۳. با افزایش دما و زمان عملیات حرارتی، سختی در مناطق مجاور فصل مشترک کاهش یافته است.

References:

1- B. S. Zlobin, " Explosion Welding of Steel with Aluminum", Materials and Design, Vol. 24, No. 3, pp. 617–622, 2003.

۲- ح. بختیاری، م. خانزاده قره شیران، "تاثیر عملیات حرارتی بر ترکیبات بین فلزی فصل مشترک جوش انفجاری فولاد زنگ نزن ۳۲۱ به آلومینیوم ۱۲۳۰"، مجله مواد نوین مرودشت، جلد پنجم، شماره چهارم، ۱۳۹۴.

3- Tricarico L, Spina R, Sorgente D, Brandizzi M., "Effect of heat treatments on mechanical properties of Fe/AL explosionwelded", structural transition joints. Materials and Design, Vol. 30, pp. 693-700, 2009.

4- B. S. Zlobin, " Explosion Welding of Steel with Aluminum", Combustion, Explosion, and Shock Waves, Vol. 38, No. 3, pp. 374-377, 2002.

5- F. Findik, R. Yilmaz and T. Somyurek, "The effects of heat treatment on the microstructure and microhardness of explosive welding", Scientific Research and Essays, 8 September, Vol. 6(19), pp. 4141-4151, 2011.

6- M.Acarer, B.Gulenc, F. Findik, " Investigation of explosive welding parameters and their effects on microhardness and shear strength", Materials and Design, Vol. 24, pp. 659-664, 2003.

7- R. Kacar, M.Acarer, "An investigation on the explosive cladding of 316L

stainless steel-din-P355GH steel", Materials processing Technology, Vol.

153, pp. 91-96, 2009.

8- S.A.A.Akbari Mousavi, P.farhadi sartangi, " Effect of Post-weld heat treatment on the interface microstructure of explosively welded titanium-stainless steel composite",

9- J. Banker, " Aluminum-Steel Electric Transition Joints, Effects of Temperature and Time upon Mechanical Properties", Draft of Paper for presentation TMS 131st Annual Meeting, 2002.

10-M.Honarprishch, M.Asemabadi and M.Sedighi "Investigation of annealing treatment on the interfacial properties of explosive-welded Al/Cu/Al multilayer". Materials and Design 2012; Vol.37, pp.122–7.

11- DIN Standard Number No ۱۶۲, "Determination of shear strength between cladding metal and parent metal in shear test", ۱۹۷۵.

12-J. Lokaj and M.Benak, " X ray microanalysis of Al-austenitic steel boundary formed by explosion welding", metal, Vol. 5, PP. 18-20, 2010.

13- M. Acarer, B. Gulenc and F. Findik, "Study of some welding parameters of explosively joined steel parts, Proceedings of the 8th Denizli materials symposium, Denizli, Turkey; 2000. 2000, Vol.244, pp: 154-164.

۱۴- ع دشتی، ا. حلواپی، "بررسی اثر عملیات حرارتی بر استحکام اتصال آلومینیوم به فولاد در جوش انفجاری"، هفتمین سمینار ملی مهندسی سطح و عملیات حرارتی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۵.

