نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال چهارم، شماره 1، بهار و تابستان1397، صفحه 112-101

مطالعه و بررسی اثر حضور لایه واسط بر ریزساختار، خواص مکانیکی و تغییر حالت شکست اتصالات حاصل از جوشکاری مقاومتی نقطه ای فولاد زنگ نزن AISI321

حسین مستعان*[1]، مهدی صفری[2]، علی سنبلی[1]، میلاد حدادی[1]، آرمین طاهرخانی[1]

۱-گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک

۲-دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک

(دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۲۱ ؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۲۶)

چکیده

در این مقاله به بررسی تجربی و عددی اثر لایه واسط از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۴۷ AISI بر ریزساختار، خواص مکانیکی و حالت شکست جوش‌های نقطه‌ای مقاومتی ورق‌های فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ AISI پرداخته شده است. بدین منظور دو نوع اتصال، یکی بدون استفاده از لایه واسط و دیگری با استفاده از لایه واسط با ضخامت ۰/۰۵ میلیمتر در جریان‌ها و زمان‌های مختلف جوشکاری ایجاد شد و مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. به منظور ارزیابی خواص مکانیکی شامل بیشینه نیرو و حالت شکست، آزمایش کشش ـ برش جوش‌های نقطه‌ای صورت پذیرفت. نتایج به دست آمده نشان دادکه افزایش جریان و زمان جوشکاری سبب تغییر حالت شکست از فصل مشترکی به حالت شکست محیطی به دلیل افزایش در اندازه ناحیه ذوب می‌شود.تغییرات ترکیب شیمیایی در اثر حضور لایه واسط در منطقه جوش در کنار سرعت سرد شدن بیشتر در شرایطی که از لایه واسط استفاده می‌شود سبب می‌شودتا فازهای متفاوتی در منطقه جوش شکل گرفته و فاز مارتنزیت به صورت پراکنده در این منطقه مشاهده گردد.

کلمات کلیدی: جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی؛ فولاد زنگ نزن ۳۲۱ AISI؛ تحولات ریزساختاری؛ خواص مکانیکی: حالت شکست.

Study and Investigation on the Effect of Presence of Interlayer on the Microstructure, Mechanical Properties and Fracture Mode of AISI 321 Stainless Steel Resistance Spot Welds

H. Mostaan*[1], M. Safari[2], A. Sonboli[1], M. Haddadi[1], A. Taherkhani[1]

1- Department of Materials Engineering and Metallurgy, Faculty of Engineering,Arak University

2- Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology

(Received 13 October 2017 ; Accepted 15 April 2018)

Abstract

In this paper, numerical and empirical investigations of the effect of AISI 347 stainless steel interlayer on the microstructure, mechanical properties and fracture mode of AISI 321 stainless steel resistance spot welds have been conducted. For this purpose, two types of joints, the first free from inter layer and the second contains interlayer with 0.05 mm thickness as well as difference currents and times,were evaluated. In order to examine the mechanical properties including maximum force and tensile mode, tensile – shear test of the spot welds was done. The obtained

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: hossein.mostaan@gmail.com

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-02]

results indicated that an increase in the welding time and current resulted in a change in fracture mode from interfacial to peripheral owing to an increase in fusion zone volume. The change in the chemical composition because of the presence of interlayer and an increase in cooling rate caused the formation of different phases as well as observation of the dispersed Martensite phase in fusion zone.

Keywords: Resistance Spot Welding, AISI 321 Stainless Steel, Phase Transformations, Mechanical Properties, Fracture Mode.

1- مقدمه

جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی به طور گسترده در مراحل مختلف ساخت و تولید در صنایعی همچون هوافضا، الکترونیک و به ویژه در صنایع خودروسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. دلیل گستردگی استفاده از این فرایند بهره‌وری بالا، قابلیت انعطاف و مناسب بودن آن برای جوشکاری بسیاری از فلزات است[۱و ۲]. میزان استفاده از این فرایند در صنایع خودروسازی بسیار بالا و به طور معمول بین ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ نقطه جوش در یک وسیله نقلیه موتوری وجود دارد.

می‌توان اظهار نمود که خواص مکانیکی نقطه جوش‌های ایجادشده در یک وسیله نقلیه تعیین‌کننده ایمنی خودرو در حین تصادف می‌باشد که این موضوع به نوبه خود تحت عنوان توانایی ساختار وسیله نقلیه در حفاظت سرنشینان در برابر ضربه‌های وارده در حین تصادف تعریف می‌شود[۳]. امروزه، با افزایش تقاضا برای دست‌یابی به ساختارهای بدنه خودرو با وزن کمتر، جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای سه ورقه به طور فزاینده‌ای در جوشکاری ساختارهای پیچیده نظیر ستون‌های A، B و Cو سقف خودرو مورد توجه قرار گرفته است. در مقایسه با فرایند جوشکاری دو ورقه، اتصال سه ورق به علت وجود فصل مشترک‌های بیشتر و تفاوت در ترکیب شیمیایی و ضخامت ورق‌ها پیچیده‌تر می‌باشد. بنابراین، این موضوع حائز اهمیت است که رشد دکمه جوش و رفتار شکست جوش‌های نقطه‌ای سه ورقه‌ای مورد بررسی و مطالعه دقیق قرار گیرد[۴-۶].

برخی از محققان رشد دکمه جوش و خواص مکانیکی جوش‌های نقطه‌ای سه‌ورقه‌ای را مورد مطالعه قرار داده‌اند. هارلین و همکارانش پی برده‌اند که موقعیت ایجاد حرارت اولیه مستقل از ضخامت ورق و وضعیت قرارگیری لایه میانی می‌باشد[۷]. آنها همچنین دریافتند که افزایش نیروی فشاری الکترود منجر به جابجایی موقعیت اولیه تشکیل دکمه جوش از محل فصل مشترک ورق/ورق به مرکز لایه میانی می‌شود[۸]. نیلسن و همکاران[۹] جوش‌پذیری ورق‌های نازک از جنس فولاد ساده کم‌کربن را از طریق طراحی آزمایش فاکتوریل و مطالعات آماری مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها به این نتیجه رسیدند که دست‌یابی به یک جوش مناسب و بدون عیب و با استحکام مناسب امکان‌پذیر است. پورانوری و مرعشی [۱۰]جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی ورق‌های فولادی با ضخامت‌های یکسان را مورد بررسی قرار دادند.

تحقیقات آنها نشان داد که یک ضخامت بحرانی به اندازه ۱/۵میلیمتر وجود دارد که در آن اندازه منطقه جوش در فصل مشترک ورق/ورق تقریبا برابر با منطقه جوش در مرکز هندسی اتصال می‌باشد. آنها همچنین رفتار شکست جوش فولاد کم‌کربن سه ورقه را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که طراحی اتصال به طور قابل ملاحظه‌ای خواص مکانیکی جوش‌ها و تمایل به شکست به صورت سطحی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بر طبق نتایج به دست آمده توسط این محققان، به طورکلی با افزایش جریان جوشکاری، ظرفیت تحمل نیرو و قابلیت جذب انرژی جوش‌های نقطه‌ای در آزمایش کشش-برش افزایش می‌یابد، اما با وقوع بیرون‌زدگی مذاب انرژی شکست به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

مطالعات زیاد دیگری با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود فرایند تشکیل دکمه جوش را مورد بررسی قرار داده است. شن و همکاران کوپلی از مدل الکتریکی-حرارتی-مکانیکی را به منظور پیش‌بینی تشکیل دکمه جوش در حین فرایند جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی سه ورقه‌ای را به کار گرفته‌اند[۴]. لی و

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-02]

همکاران[۱۱]، یک مدل المان محدود دوبعدی را در شبیه‌سازی تشکیل دکمه جوش در جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی سه‌ورقه‌ای بر روی فولاد ساده کربنی مورد بررسی قرار داده‌اند.

اگرچه مطالعات زیادی بر روی خواص مکانیکی و تشکیل دکمه جوش را در جوش‌های نقطه‌ای مقاومتی سه ورقه انجام شده است، اما بسیاری از این مطالعات بر روی فولادهای ساده کربنی و یا فولادهای استحکام بالا بوده است. استفاده از فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی در صنایع مختلف نظیر نفت و گاز و صنایع شیمیایی به تدریج روبه افزایش می‌باشد زیرا از خود مقاومت به خوردگی بسیار عالی نشان می‌دهند. با این وجود، بنابر جستجوهای گسترده صورت گرفته توسط نویسندگان این مقاله، گزارشی در ارتباط با جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای سه‌ورقه فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی یافت نگردید. لذا هدف اصلی از انجام این پژوهش بررسی جوش‌پذیری ورق فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI ۳۲۱ با و بدون استفاده از لایه وسط از جنس فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI ۳۴۷می‌باشد. همچنین در این تحقیق، حالت شکست نقطه جوش‌های ایجادشده در حالت‌های مختلف (با و بدون استفاده از لایه واسط) و نیز اثر متغیرهای فرایند بر سختی و استحکام شکست نقطه جوش‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است فولادهای فریتی و مارتنزیتی کمتر با این روش جوش داده می‌شوند. اما فولادهای آستنیتی پایدار و ناپایدار را به راحتی می‌توان از طریق جوش مقاومتی اتصال داد، به ویژه این که هدایت حرارتی و الکتریکی کمتری نسبت به فولادهای معمولی دارند و سیکل جوش باید در زمان کوتاه‌تری انجام شود.

2- مواد و روش انجام پژوهش

در این پژوهش از فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۲۱ به عنوان فلز پایه استفاده شد. ترکیب شیمیایی این فولاد توسط آنالیز کوانتومتری مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج آن در جدول (۱) آورده شده است.

ضخامت نمونه ها برابر با ۱ میلیمتر بوده ونمونه‌هایی به ابعاد ۱۵×۵۰ میلیمتر تهیه گردید. جوشکاری توسط دستگاه جوش نقطه‌ای با توان ۲۰۰kVA ساخت شرکت پارس پایا انجام شد. این دستگاه قابلیت تنظیم متغیرهای زمان و جریان جوشکاری را به صورت آنالوگ دارا بود. برای جوش دادن نمونه‌ها از الکترود گروهA و مطابق کلاس ۲ استفاده شد. در این پژوش که هدف اصلی بررسی اثر لایه واسط بر روی حالت شکست و ریزساختار جوش نقطه‌ای ایجاد شده می‌باشد، متغیرهای زمان و جریان جوشکاری به عنوان مهمترین متغیرهای فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفتند.

آزمایش‌ها به دو گروه با و بدون فلز واسط انجام شد. فلز واسط از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۴۷ (که به عنوان فلز پرکننده فولاد زنگ نزن ۳۲۱ در جوشکاری‌های ذوبی جهت جلوگیری از ترک‌های انجمادی مورد استفاده قرار می‌گیرد) انتخاب شد. ضخامت لایه واسط نیز ۰/۰۵ میلیمتر در نظر گرفته شد. در جدول (۲) ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن AISI ۳۴۷ که به عنوان لایه واسط استفاده شده است، نشان داده شده است.

نیروی بیشینه شکست با استفاده از میانگین به دست آمده از انجام سه آزمون کشش-برش محاسبه و گزارش شد. اندازه دکمه جوش‌ها نیز از روی سطح شکست اتصالات جوش نقطه‌ای مقاومتی اندازه‌گیری شد. سرعت حرکت فک‌ها نیز ۱۰میلی‌متر بر دقیقه تنظیم گردید. برای بررسی‌های ریزساختاری پس از سپری نمودن مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها مطابق با استاندارد، ابتدا نمونه‌ها را با محلول شیمیایی با ترکیب (10 gr $FeCl_3$+20 ml C_2H_5OH+20 ml HCl) حکاکی کرده و از ریزساختار منطقه جوش تصاویر متالوگرافی تهیه گردید.

آزمایش ریزسختی‌سنجی توسط دستگاه ریزسختی‌سنج با نیروی ۷۵ گرم در امتداد قطر دکمه جوش انجام شد. امتداد قطر به گونه‌ای انتخاب شد که مناطق مختلف ریزساختاری شامل دکمه جوش، منطقه متأثر از حرارت و فلز پایه را شامل شود. به منظور ارزیابی سرعت سرد شدن در شرایط مختلف شبیه سازی توسط نرم افزار آباکوس انجام گردید. بدین منظور با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس دو ورق از جنس فولاد AISI ۳۲۱ به ضخامت ۱ میلیمتر توسط دو الکترود مسی به یکدیگر جوش داده می‌شوند. دو نوع شبیه‌سازی با شرایط

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-02]

جدول (1). ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن AISI321 مورد استفاده در این پژوهش.

نام عنصر	کربن	کروم	آهن	منگنز	نیکل	فسفر	سیلسیوم	گوگرد	تیتانیوم
درصد وزنی	۰/۰۸	۱۸/۲	مابقی	۲	۱۱/۵	۰/۰۴۵	۱	۰/۰۳	۰/۴

جدول (2). ترکیب شیمیایی لایه واسط از جنس فولاد زنگ نزن AISI347 مورد استفاده در این پژوهش.

نام عنصر	کربن	کروم	آهن	منگنز	نیکل	فسفر	سیلسیوم	گوگرد	نیوبیوم
درصد وزنی	۰/۰۸	۱۷	۶۸	۲	۱۱	۰/۰۴۵	۱	۰/۰۳	۰/۸

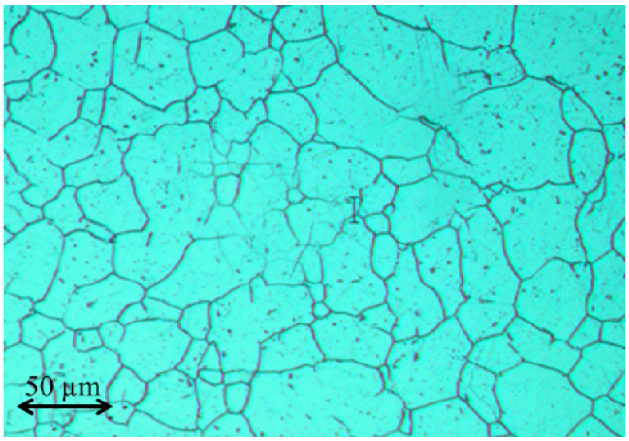
بدون لایه واسط و با لایه واسط شبیه‌سازی می‌شوند. لایه واسط همانند بررسی‌های تجربی از جنس فولاد زنگ‌نزن AISI ۳۴۷ انتخاب شده و خواص الکتریکی، حرارتی و مکانیکی آن در نرم‌افزار وارد می‌شود. به منظور انجام شبیه‌سازی از تکنیک حل هم‌زمان مسائل الکتریکی–حرارتی–مکانیکی استفاده می‌شود. مراحل مختلف فرآیند جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی شامل اعمال نیرو از طرف الکترودها، اعمال جریان الکتریکی و مرحله سردشدن جوش عیناً همانند آزمایش‌های تجربی در شبیه‌سازی عددی انجام می‌شوند.

در شبیه‌سازی‌های عددی علاوه بر شرایط تماسی مکانیکی، شرایط تماسی الکتریکی و حرارتی نیز بین سطح ورق‌ها با یکدیگر و همچنین ورق‌ها و الکترودها در نظر گرفته می‌شوند. همچنین کلیه شرایط مرزی حرارتی، الکتریکی و مکانیکی همانند آزمایش‌های تجربی در شبیه‌سازی‌ها اعمال می‌شوند. به منظور شبکه‌بندی نیز از المان هشت‌گره‌ای هگزاهدرال Q3D8 که مناسب برای حل همزمان الکتریکی–حرارتی–مکانیکی استفاده می‌شود.

3- نتایج و بحث

3-1- مشاهدات ریزساختاری

در شکل (۱) تصویر حاصل از میکروسکوپ نوری از فلز پایه فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۲۱ نشان داده شده است. اندازه میانگین دانه‌ها در حدود ۴۷ میکرومتر بوده که این اندازه دانه برابر با عدد اندازه G=۰/۶ مطابق با استاندارد ASTM E112-12 می‌باشد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، فلز پایه در شرایط آنیل کامل می‌باشد.

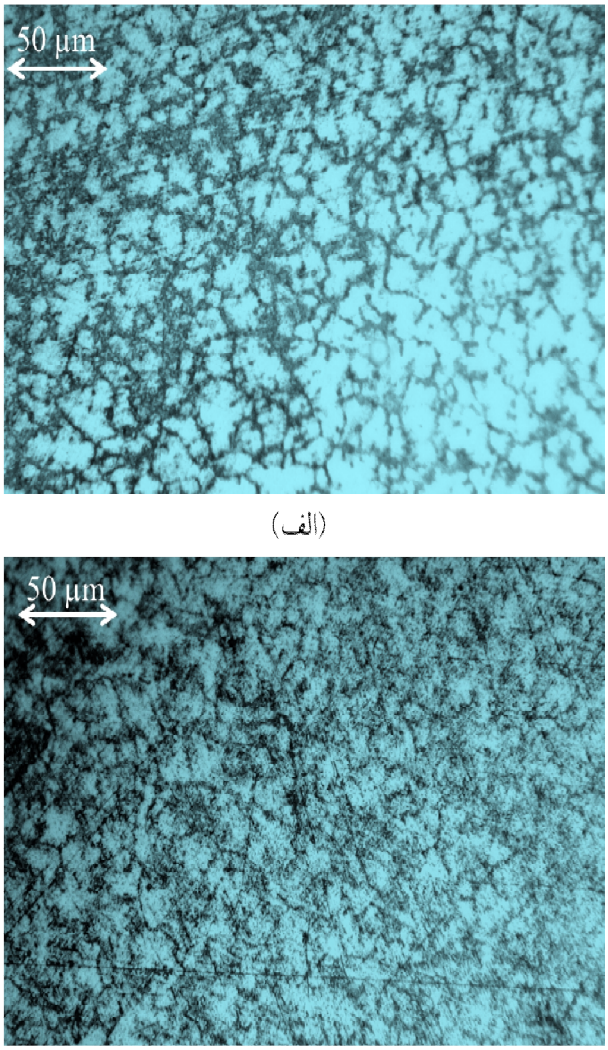


شکل1- ریزساختار حاصل از میکروسکوپ نوری فلز پایه AISI321 .

در تصاویر (۲) الف و ب نیز ریزساختار حاصل از میکروسکوپ نوری از مرکز فلز جوش به ترتیب برای دکمه جوش ایجاد شده بدون لایه واسط و با لایه واسط AISI ۳۴۷ نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود دانه‌های تقریبا هم‌محور در مرکز فلز جوش جوانه‌زنی کرده‌اند. نسبت G/R تعیین‌کننده حالت انجماد بوده و مقدار G×R که معرف آهنگ سرد شدن است، اندازه ساختار انجماد یافته و یا فاصله بین دندریت‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. G بیان‌گر شیب دمایی و R نیز نشان‌دهنده سرعت سرد شدن است. نسبت G/R در خط مرکزی جوش بسیار کمتر از این مقدار در خط ذوب خواهد بود. در نسبت‌های G/R کمتر، تحت انجماد ترکیبی کمتر بوده و لذا شرایط برای تشکیل ساختار دندریتی هم‌محور مهیا می‌باشد. تشکیل ساختاری هم‌محور در ناحیه جوش برای ورق‌های با ضخامت کم بسیار با اهمیت می‌باشد، چرا که وجود این دانه‌های هم‌محور باعث بهبود خواص مکانیکی منطقه جوش می‌شوند[۱۲]. در مرکز نقطه جوش‌های ایجاد شده با

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-02]

توجه به کمتر بودن میزان نسبت G/R تحت انجماد ترکیبی بیشتر بوده و لذا دانه‌های با مورفولوژی تقریبا هم‌محور مورد انتظار است که تصاویر ریزساختاری نشان داده شده در شکل(۲) مؤید این موضوع هستند.



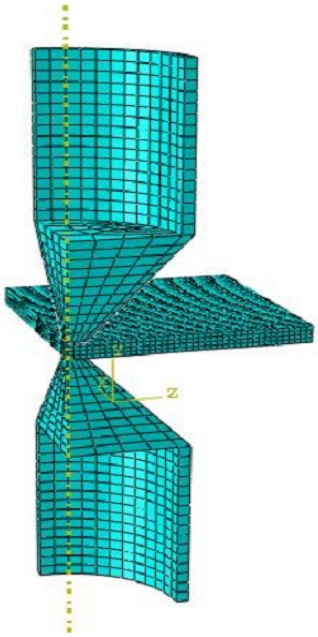
شکل2- تصویر حاصل از میکروسکوپ نوری از مرکز فلز جوش نقطه ای فولاد زنگ نزن AISI321 در حالت (الف) بدون استفاده از لایه واسط و (ب) با استفاده از لایه واسط از جنس فولاد زنگ نزن AISI347 .

بنابر نمودار شفلر، مقدار فریت دلتا در فلز جوش فولاد زنگ‌نزن AISI ۳۲۱ برابر با ۵ درصد می‌باشد و ترکیب فلز جوش به صورت آستنیت+فریت دلتا می‌باشد. این موضوع در ریزساختار نشان داده شده در شکل (۲) الف نیز مشهود است.

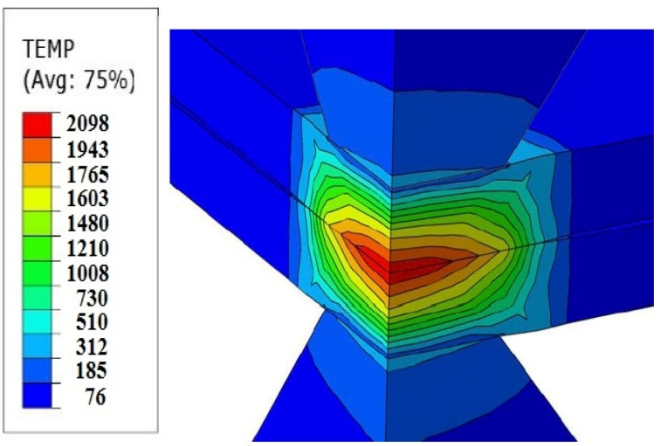
نکته قابل تأمل در ریزساختار نشان داده در شکل (۲) الف آن است که به نظر می‌رسد مقدار فریت دلتای تشکیل شده در ریزساختار بیشتر از مقدار فریت دلتای پیش‌بینی شده توسط نمودار شفلر می‌باشد. همان گونه که ملاحظه می‌شود فریت دلتای شکل گرفته در فلز جوش بدون لایه واسط AISI ۳۴۷ به صورت بین‌دانه‌ای می‌باشد و فریت‌ها شکل مرزدانه‌ها را به خود گرفته‌اند. این نوع مورفولوژی از فریت زمانی به وجود می‌آید که سرعت سرد شدن فلز جوش بسیار زیاد باشد[۱۳]. با توجه به سرعت بسیار بالای سرد شدن در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای (با در نظر گرفتن این نکته که حرارت به صورت موضعی است و حجم جوش ایجاد شده بسیار کم است) این مورفولوژی فریت دلتا در فلز جوش قابل انتظار خواهد بود. در این حالت تبدیل فریت به آستنیت به علت وقوع استحاله بدون نفوذ و توده‌ای امکان‌پذیر خواهد بود. لذا می‌توان اظهار داشت که علت تشکیل فریت دلتا در فلز جوش به میزانی بیشتر از آنچه که توسط نمودار شفلر پیش‌بینی می‌شود، به علت وقوع استحاله بدون نفوذ و توده‌ای و عدم فرصت کافی جهت تبدیل فریت دلتا به آستنیت خواهد بود. با در نظر گرفتن رقت به میزان ۸۰ درصد، مقدار فریت دلتا در ریزساختار بنابر نمودار شفلر در حدود ۵ درصد بوده با این تفاوت که مقداری مارتنزیت نیز در ساختار پیش‌بینی می‌شود. به نظر می‌رسد به علت افزایش عناصر افزایش دهنده سختی‌پذیری نظیر نیکل و نیوبیوم شرایط برای تشکیل مارتنزیت در حالت استفاده از لایه واسط از جنس AISI ۳۴۷ مهیا می‌شود. در ریزساختارنشان داده شده در شکل(۲–ب) نیز نشانه‌هایی از وجود مارتنزیت در بین دانه‌های آستنیت که توسط فریت دلتا احاطه شده‌اند، مشاهده می‌شود. تشکیل مارتنزیت در جوش نقطه‌ای فولادهای مختلف (با کربن کمتر از ۰/۱ درصد) توسط بسیاری از محققان گزارش شده است[۱۴و ۱۵]. سرعت سرد شدن در فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای در مقایسه با سرعت سرد شدن در دیگر فرآیندهای اتصال از جمله جوشکاری‌های قوسی و حتی جوشکاری پرتوالکترونی و جوشکاری لیزر بالاتراست. ولگر گزارش کرده است

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-02]

که سرعت سرد شدن درفرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای هنگامی که زمان نگهداری صفر باشد به ۱۰۰۰ درجه بر ثانیه می‌رسد[۱۶–۱۸]. با افزایش زمان نگهداری به علت اثر کوئنچ الکترودهای مسی، سرعت سرد شدن تا بیشتر از ۱۰۰۰۰ درجه بر دقیقه نیزمی‌رسد. این سرعت سرد شدن در دیگرفرآیندهای اتصال به وجود نمی‌آید. این سرعت بالای سرد شدن ناشی از حضور الکترودهای آبگرد مسی و اثر کوئنچ آنها و همچنین زمان کوتاه سیکل حرارتی اعمال شده بر محل اتصال است.



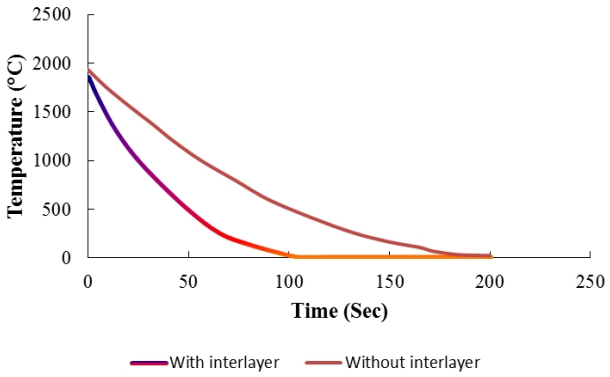
شکل3- شبکه بندی مجموعه الکترودها و ورق ها با المان هشت گره ای هگزاهدرال Q3D8.



شکل4- میدان حرارتی مربوط به شبیه سازی عددی جوشکاری نقطه ای مقاومتی ورق های فولادی AISI 321 بدون حضور لایه واسط.

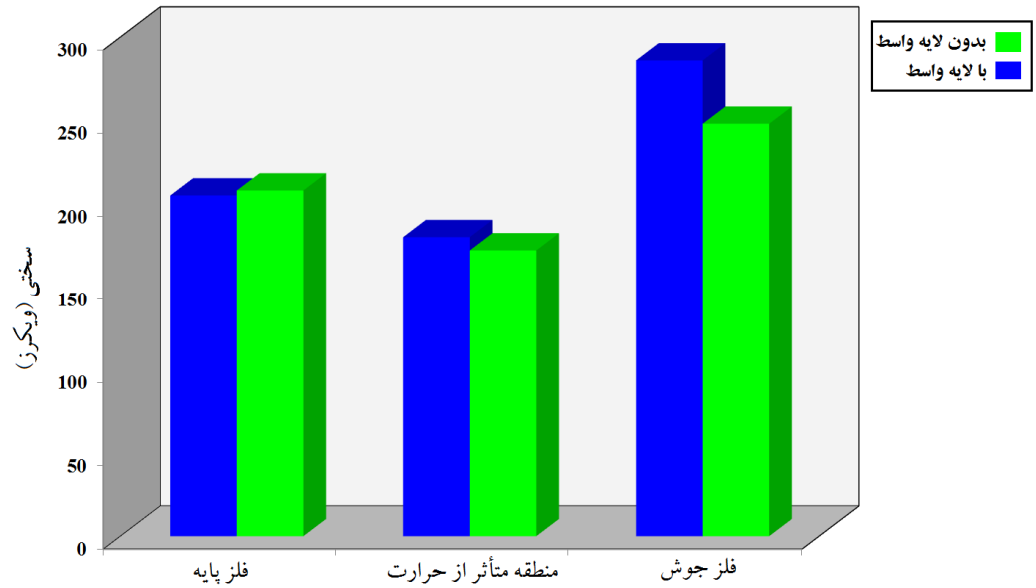
3-2-ریزسختی‌سنجی

مقادیر سختی در امتداد قطری (در سه ناحیه فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و مرکز فلز جوش) مربوط به نمونه‌های جوشکاری شده با لایه واسط AISI ۳۴۷ و بدون لایه واسط در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، سختی در فلز پایه در حدود ۲۰۰ ویکرز می‌باشد که با توجه به ساختار تک‌فاز آستنیتی که در حالت آنیل کامل می‌باشد، کاملا منطقی به نظر می‌رسد. سختی در منطقه متأثر از حرارت نیز نسبت به فلز پایه کاهش پیدا کرده و حدود ۱۸۰ و ۱۷۰ ویکرز به ترتیب برای نمونه‌های جوشکاری شده با لایه واسط و بدون لایه واسط رسیده است. علت کاهش سختی در این منطقه رشد دانه‌ها دراین منطقه ناشی از تمرکز حرارت تشکیل مذاب در نقطه جوش می‌باشد. از سوی دیگر ملاحظه می‌شود که سختی در این منطقه در نمونه جوشکاری شده با لایه واسط نسبت به نمونه جوشکاری شده بدون لایه واسط اندکی بیشتر است. علت این موضوع را می‌توان به حرارت فروکش بیشتر در نمونه جوشکاری شده با لایه واسط از جنس AISI ۳۴۷ و در نتیجه رشد کمتر دانه‌ها در این منطقه ارتباط داد. در این ارتباط وبه منظور تعیین نرخ سرد شدن در حالت‌های مختلف جوشکاری (با استفاده و یا بدون استفاده از لایه واسط) و همچنین بررسی میدان حرارتی در نقطه جوش در دو حالت بدون لایه واسط و با لایه واسط از شبیه سازی‌های عددی استفاده شد. در شکل(۳) مجموعه الکترودها و ورق ها که شبکه‌بندی گشته‌اند نشان داده شده است.

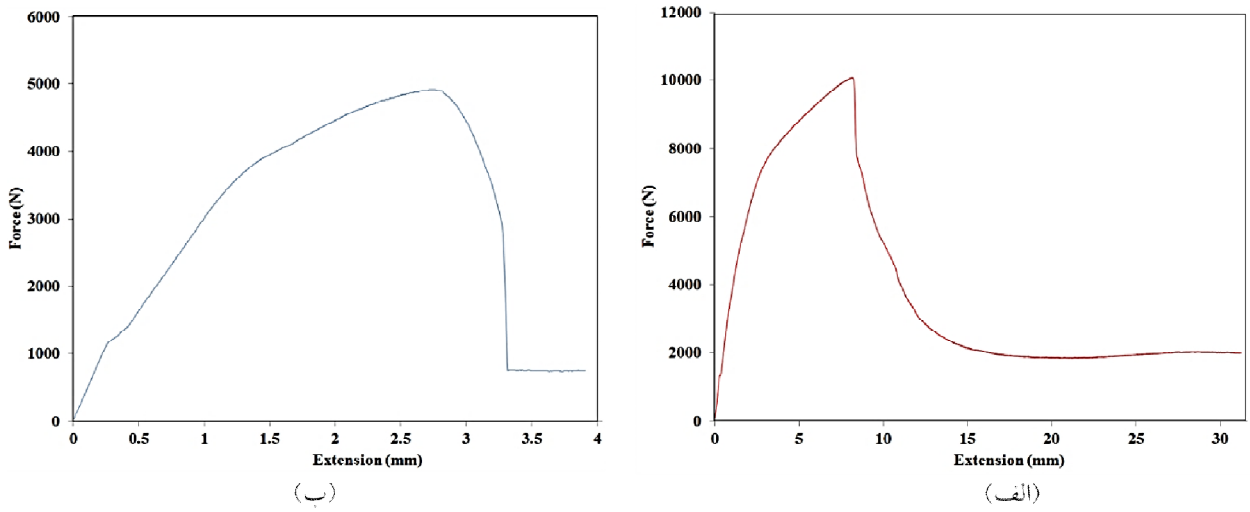


شکل 5- منحنی های تغییرات دمایی بر حسب زمان در شرایط استفاده از لایه واسط و بدون استفاده از لایه واسط.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-02]



شکل6- مقادیر سختی در مناطق مختلف نمونه های جوشکاری شده با و بدون استفاده از لایه واسط AISI 347.

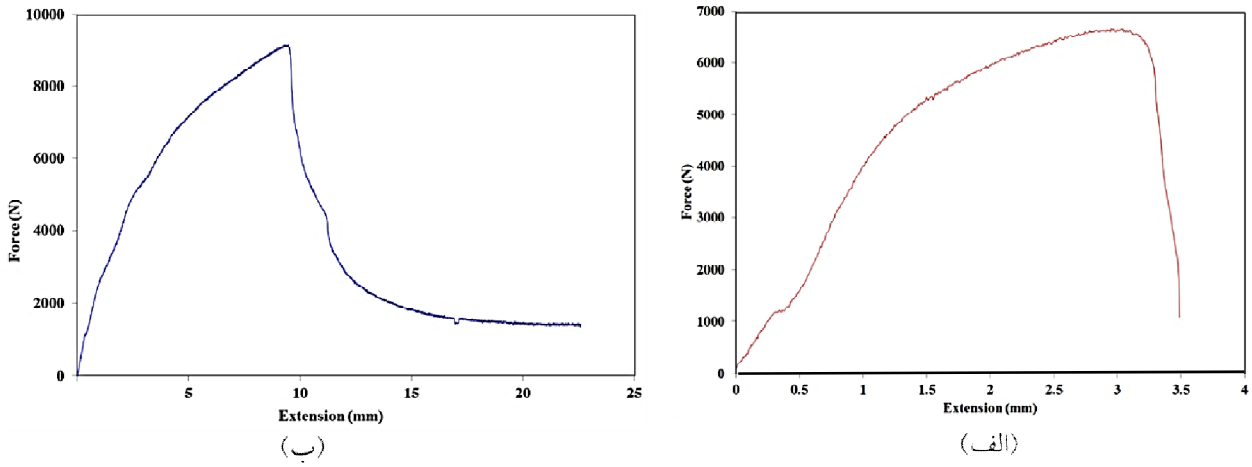


شکل7- نمودار نیرو ـ جابجایی اتصالات با (الف) بیشینه (جریان جوشکاری برابر با 90 آمپر و مدت زمان عبور جریان 3 ثانیه) و (ب) کمینه (جریان جوشکاری برابر با 55 آمپر و مدت زمان عبور جریان 3 ثانیه) استحکام کششی – برشی مربوط به نمونه های جوشکاری شده بدون لایه واسط.

در شکل(۵) نمودارهای بدست آمده از شبیه‌سازی‌های عددی مربوط به نرخ سرد شدن نقطه مرکزی دکمه جوش در جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی فولاد AISI ۳۲۱ بدون حضور لایه واسط و با حضور لایه واسط نشان داده شده است. همانطور که از این شکل دیده می شود نرخ سرد شدن (شیب منحنی تغییرات دمایی با زمان)در حالت استفاده از لایه واسط از جنس فولاد زنگ‌نزن AISI ۳۴۷ بیشتر از حالت بدون استفاده از لایه واسط است. این موضوع به علت ضخامت بیشتر و در نتیجه حرارت فروکش بیشتر[1] می‌باشد. همان‌گونه که بحث شد، این موضوع یکی از دلایل تغییرات ریزساختاری و تشکیل فازهای متفاوت در شرایطی است که از لایه واسط AISI ۳۴۷ استفاده شده است.سختی در منطقه فلز جوش مربوط به هر دو نمونه جوشکاری شده با و بدون لایه واسط نسبت به فلز پایه افزایش نشان می‌دهد. این موضوع ناشی از تشکیل دانه‌های هم‌محور با اندازه‌های کمتر نسبت به فلز پایه و از همه مهم‌تر تشکیل ریزساختاری دوفازی (آستنیت+فریت دلتا) می‌باشد.

1-Heat Sink

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-02]



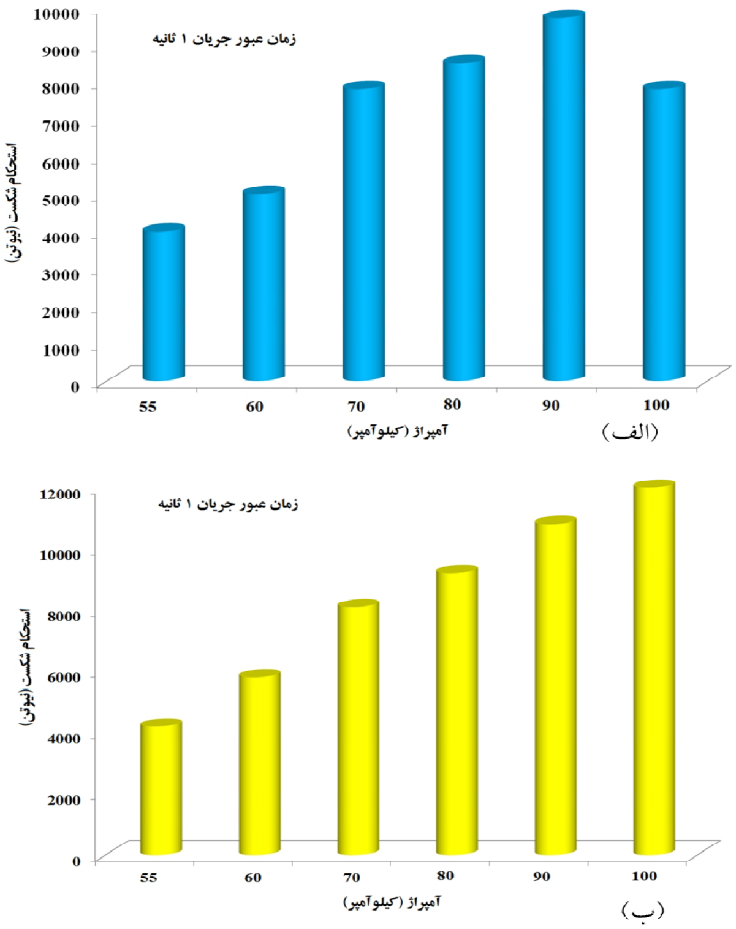
شکل (8). نمودار نیرو ـ جابجایی اتصالات مربوط به (الف) نمونه جوشکاری شده بدون لایه واسط و (ب) با حضور لایه واسط AISI347 (جریان جوشکاری برابر با 90 آمپر و مدت زمان عبور جریان 3 ثانیه).

فاز فریت اگرچه نسبت به فاز آستنیت سختی کمتری دارد، اما نحوه قرارگیری آن در زمینه و تشکیل ساختاری مرکب می‌تواند افزایش سختی در این منطقه را در پی داشته باشد. نکته قابل ذکر دیگر بیشتر بودن سختی در فلز جوش نمونه جوشکاری شده با لایه واسط از جنس AISI ۳۴۷ می‌باشد. همان‌گونه که در بررسی‌های ریزساختاری عنوان شد و بر طبق پیش‌بینی‌های صورت گرفته توسط نمودار شفلر، ریزساختار فلز جوش مربوط به نمونه جوشکاری با لایه واسط شامل مقداری مارتنزیت (یا فریت‌توده‌ای) می‌باشد. وجود چنین ساختاری در فلز جوش را می‌توان به عنوان مهمترین عامل افزایش سختی در این نمونه بیان نمود.

3-3- نتایج آزمایش کشش

در شکل(۷)، نمودار نیرو–جابجایی مربوط به آزمایش‌های کشش–برش اتصالات با بیشترین و کمترین استحکام نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل دیده می‌شود با تغییر جریان جوشکاری از ۶۰ تا ۱۰۰ کیلوآمپر، تفاوت محسوسی در استحکام اتصالات ایجاد می‌شود که در ادامه به بحث و بررسی در این رابطه پرداخته می‌شود.

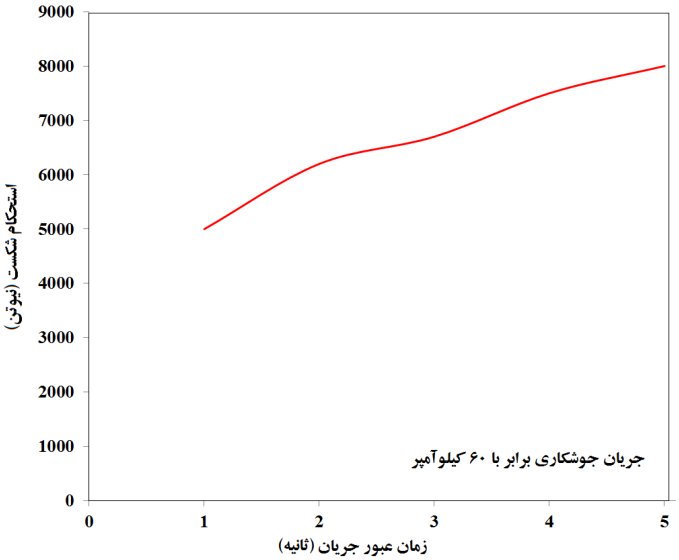
همچنین در شکل(۸) دو نمودار نیرو–جابجایی مربوط به دو نمونه جوشکاری شده با پارامترهای جوشکاری مشابه با و



شکل9- اثر جریان جوشکاری بر استحکام جوش های نقطه ای مقاومتی فولاد زنگ نزن 321 در دو حالت (الف) بدون لایه واسط و (ب) با لایه واسط از جنس فولاد زنگ نزن AISI 347.

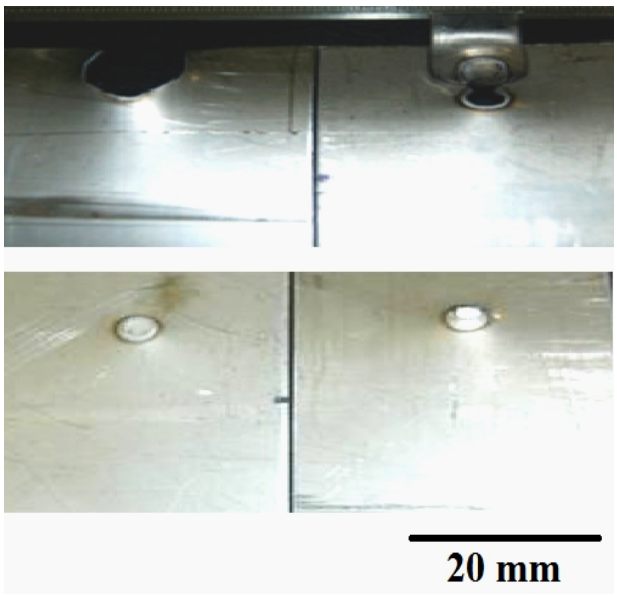
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-02]

بدون لایه واسط AISI ۳۴۷ نشان داده شده است. در این تصویر هم ملاحظه می‌شود که وجود لایه واسط در بین دو ورق از جنس فولاد زنگ‌نزن AISI ۳۲۱ منجر به افزایش چشم‌گیر استحکام شکست نمونه جوشکاری شده می‌شود. با توجه به ریزساختار و فازهای تشکیل شده در دکمه جوش ایجاد شده با حضور لایه واسط از جنس AISI ۳۴۷، یعنی ریزساختاری متشکل از آستنیت، فریت دلتا و جزایر مارتنزیتی، بدیهی است در این نمونه‌ها استحکام شکست بالاتری مورد انتظار خواهد بود.در ادامه به بررسی روند تغییرات استحکام برشی نمونه‌های جوشکاری شده در دو حالت با و بدون لایه واسط از جنس AISI ۳۴۷ پرداخته می‌شود.



شکل10-تغییرات استحکام شکست نمونه های جوشکاری شده با جریانی برابر با 60 کیلوآمپر و زمان های مختلف عبور جریان از الکترودها.

در شکل(۹) نتایج حاصل از آزمایش کشش-برش برای جوش‌های نقطه‌ای مقاومتی مختلف که در آنها جریان جوشکاری تغییر یافته است نشان داده شده است. همانطور که از این شکل دیده می شود در داده‌های مربوط به نمونه‌های جوشکاری شده بدون لایه واسط با افزایش جریان جوشکاری، استحکام جوش‌های نقطه‌ای مقاومتی نیز بیشتر می‌شود. دلیل این موضوع این است که با افزایش جریان جوشکاری، حرارت ایجاد شده در ناحیه اتصال الکترودها و ورق‌ها افزایش یافته و در نتیجه نواحی پلاستیک بیشتری در ناحیه اتصال ایجاد شده و به دنبال آن استحکام جوش نقطه‌ای نیز بیشتر می‌شود.



شکل11- حالت های شکست مختلف در آزمایش کشش ـ برش جوش های نقطه ای مقاومتی فولاد زنگ نزن AISI321 .

همچنین همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش جریان جوشکاری ابتدا به علت افزایش قطر دکمه و عمق نفوذ جوش، استحکام شکست افزایش می‌یابد. اما با رخ دادن بیرون زدگی مذاب، به علت افزایش عمق فرورفتگی الکترود استحکام شکست جوش به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. نکته جالب توجه در داده‌های مربوط به نمونه‌های جوشکاری شده با لایه واسط از جنس فولاد AISI ۳۴۷ آن است که تقریبا در تمام جریان‌های جوشکاری استحکام شکست نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های جوشکاری‌شده بدون لایه واسط بیشتر است. همچنین ملاحظه می‌شود که بر خلاف نمونه‌های جوشکاری شده بدون لایه واسط، روند کاهش استحکام شکست در نمونه‌های جوشکاری شده با لایه واسط مشاهده نمی‌شود. دلیل این موضوع را می‌توان به ظرفیت گرمایی بالاتر ورق‌ها در حضور لایه واسط مربوط دانست. در این حالت پذیرش حرارت ایجاد شده توسط الکترودها در منطقه جوش بیشتر بوده و پدیده بیرون‌زدگی مذاب حتی در جریان‌های جوشکاری ۱۰۰ کیلوآمپر نیز مشاهده نمی‌شود.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-02]

جدول3- تغییرات حالت شکست بر حسب جریان مورد استفاده در جوشکاری در حالت بدون استفاده از لایه واسط.

جریان (کیلوآمپر)	۵۰	۵۵	۶۰	۶۵	۷۰	۸۰	۱۰۰
حالت شکست	فصل مشترکی	فصل مشترکی	فصل مشترکی	محیطی	محیطی	محیطی	فصل مشترکی

جدول 4-تغییرات حالت شکست بر حسب جریان مورد استفاده در جوشکاری فولاد زنگ نزن AISI321 به همراه لایه واسط AISI347

جریان (کیلوآمپر)	۵۰	۵۵	۶۰	۶۵	۷۰	۸۰	۱۰۰
حالت شکست	فصل مشترکی	فصل مشترکی	فصل مشترکی	محیطی	محیطی	محیطی	محیطی

در شکل(۷) ملاحظه می‌شود که زمان جوشکاری نیز روند مشابهی بر استحکام شکست نمونه‌های جوشکاری شده دارد.

برای آزمون کشش -برش نیروی محرکه مود محیطی تنش کششی و نیروی محرکه حالت فصل مشترکی تنش برشی در خط مرکز جوش است. از نقطه نظر مهندسی، می‌توان گفت هر نیروی محرکه یک مقدار بحرانی دارد و رخ دادن هر حالت شکست به این بستگی دارد که کدام نیروی محرکه زودتربه مقدار بحرانی‌اش می‌رسد. مهمترین پارامتر کنترل کننده توزیع تنشی در جوش نقطه‌ای، اندازه دکمه جوش است. با کاهش قطر دکمه‌جوش، تنش برشی بوجود آمده پیش از آن که تنش کششی موجب گلویی شدن شود، به مقدار بحرانی خود می‌رسد و در نتیجه شکست در حالت فصل مشترکی رخ می‌دهد.

در صورتی که اندازه دکمه جوش از یک مقدار بحرانی بیشتر باشد، تنش برشی بوجود آمده روی فصل مشترک به حدی نخواهد بود که موجب رشد ترک از میان دکمه جوش شود و در نتیجه دکمه جوش در اثر تنش‌های کششی تولید شده در اطراف دکمه جوش، در حالت محیطی دچار شکست خواهد شد.در شکل(۸)، نمونه‌هایی از شکست جوش‌های نقطه‌ای مقاومتی با حالت‌های شکست فصل محیطی و شکست محیطی نشان داده شده‌اند.

همچنین تاثیر جریان جوشکاری بر حالت شکست جوش‌های نقطه‌ای فولاد زنگ نزن ۳۲۱ AISI در حالت بدون لایه واسط، در جدول(۳) آورده شده است.همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش جریان جوشکاری در هر دوحالت با و بدون استفاده از لایه واسط و به تبع آن افزایش قطر دکمه جوش، نیروی شکست بیشینه نیز افزایش می‌یابد و این افزایش نیروی شکست بیشینه تغییر حالت شکست از حالت فصل مشترکی به حالت محیطی را در پی دارد[۱۵]. در واقع مهمترین پارامتر کنترل کننده ظرفیت تحمل نیرو، قطر دکمه جوش است. با افزایش قطر دکمه جوش، مقاومت آن در برابر تغییر شکل بیشتر خواهد شد. به عبارتی می‌توان گفت که اندازه دکمه جوش، توزیع تنش‌ها در فصل مشترک و محیط دکمه جوش را تحت تاثیر قرار می‌دهد. هر چه اندازه دکمه جوش کمتر شود مقاومت به شکست در فصل مشترک ناحیه جوش کمتر شده و احتمال وقوع مود شکست فصل‌مشترکی بیشتر می‌شود. از طرف دیگر هرچه مساحت ناحیه اتصال بیشتر باشد، مقاومت به شکست فصل‌مشترکی بیشتر می‌شود. در تعریف پدیده بیرون‌زدگی مذاب اشاره کرده‌اند که وقتی که نیروی داخل دکمه جوش که به واسطه فشار داخلی در دکمه مذاب ناشی از ذوب شدن، انبساط مذاب و فاکتورهای دیگر به وجود می‌آید، از نیروی اعمالی توسط الکترودها بیشتر شود، بیرون زدگی مذاب رخ می‌دهد [۱۵]. در مراجع اشاره شده است که با وقوع پدیده بیرون‌زدگی مذاب همزمان با اندازه دکمه جوش، استحکام جوش‌ها دیگر افزایش نمی‌یابد. همان‌گونه که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، حالت شکست در جریان‌های بسیار بالا به علت رخداد پدیده بیرون‌زدگی به صورت فصل

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-02]

مشترکی بوده است.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی تجربی فرآیند جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی فولاد زنگ نزن AISI ۳۲۱ پرداخته شد. بدین منظور در شرایطی که پارامترهای زمان سرد شدن و نیروی الکترودها ثابت بودند اثر جریان جوشکاری و زمان جوشکاری بر تغییرات ریزساختاری، خواص مکانیکی و حالت شکست جوش‌های نقطه‌ای مقاومتی ایجاد شده مورد بررسی قرار گرفت.

همچنین اثر وجود لایه واسط از جنس فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI ۳۴۷ بر روی حالت شکست، تغییرات ریزساختاری و استحکام شکست نقطه جوش‌های ایجاد شده مورد بررسی قرار گرفت. به منظور تعیین استحکام و حالت شکست جوش‌های نقطه‌ای فولاد زنگ نزن AISI ۳۲۱، از آزمایش کشش-برش استفاده شد.

همچنین با انجام آزمایش‌های استاندارد متالوگرافی، تغییرات ریزساختاری ناحیه مذاب مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از دستگاه سختی‌سنجی، سختی نواحی مختلف جوش نقطه‌ای شامل فلز پایه، ناحیه متاثر از حرارت و فلز جوش تعیین گردید. در مجموع نتایج زیر از این پژوهش استخراج گردید:

– امکان اتصال موفقیت‌آمیز ورق‌های فولاد زنگ‌نزن AISI ۳۲۱ با استفاده از فرایند جوشکار مقاومتی نقطه‌ای در حالت استفاده از لایه واسط از جنس فولاد زنگ‌نزن AISI ۳۴۷ و بدون استفاده از آن وجود دارد.

– از نتایج استنباط شد که افزایش جریان و زمان جوشکاری سبب تغییر حالت شکست از فصل مشترکی به مود شکست محیطی به دلیل افزایش در اندازه ناحیه ذوب می شود.

– در جریان‌های بسیار بالا به علت پدیده بیرون‌زدگی مذاب استحکام جوش در حالتی که از لایه واسط استفاده نمی‌شود، کاهش می‌یابد.

– از پروفیل سختی ناحیه اتصال مشخص شد که در جوش‌های نقطه‌ای فولاد زنگ نزن AISI ۳۲۱، سختی دکمه جوش از سختی فلز پایه بیشتر و سختی منطقه متاثر از حرارت کمتر از سختی فلزپایه است.

– علت کاهش شدید سختی در منطقه متأثر از حرارت رشد دانه‌ها دراین منطقه ناشی از تمرکز حرارت تشکیل مذاب در نقطه جوش می‌باشد. از سوی دیگر نتایج نشان داد که سختی در این منطقه در نمونه جوشکاری شده با لایه واسط نسبت به نمونه جوشکاری شده بدون لایه واسط اندکی بیشتر است. علت این موضوع را می‌توان به حرارت فروکش بیشتر در نمونه جوشکاری شده با لایه واسط از جنس AISI ۳۴۷ و در نتیجه رشد کمتر دانه‌ها در این منطقه ارتباط داد.

– شبیه‌سازی حرارتی انجام شده نشان می‌دهد که سرعت سردشدن منطقه جوش در حالتی که از لایه واسط استفاده می‌شود نسبت به حالتی که از لایه واسط استفاده نمی‌شود بیشتر است.

– تغییرات ترکیب شیمیایی در اثر حضور لایه واسط در منطقه جوش در کنار سرعت سرد شدن بیشتر در شرایطی که از لایه واسط استفاده می‌شود نسبت به حالتی که از لایه واسط استفاده نمی‌شود سبب می‌شود تا فازهای متفاوتی در منطقه جوشی که در آن لایه واسط حضور داشته متفاوت باشد و فاز مارتنزیت و یا فریت توده‌ای به صورت پراکنده در این منطقه مشاهده شود.

منابع

1-Chao., Y. J.,"Ultimate strength and failure mechanism of resistance spot weld subjected to tensile, shear, or combined tensile/shear loads",*Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 125.pp. 125–132, 2003.

2- Philips, D., Welding Engineering, An Introduction, John Wiley & Sons,2016.

3-Manladan,.S.M., Yusof,F., Ramesh.S., Zhang,Y., Luod, Z., Ling, Z., "Microstructure and mechanical properties of resistance spot welded in welding-brazing mode and resistance element welded magnesium alloy/austenitic stainless steel joints", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 250. pp. 45-54, 2017.

4-Jianbin, C.,Xinjian,Y.,Zhan,Hu.,Ting,L.,Kanglong. W.,Ci.L., "Improvement of resistance-spot-welded joints for DP 600 steel and A5052 aluminum alloy with Zn slice interlayer" *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 30.pp. 396-405, 2017.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-02]

spot welding process with three sheets assemblies". *Procedia Engineering*, Vol.16.pp. 622–631, 2011.
12-Kou,S., Welding Metallurgy, vol. 2nd. 2003, pp. 1–467.
13-Lippold,J. C., Kotecki,D. J., Welding Metallurgy and Weldability of stainless steel, John Wiley and Sons, 2005.
14- Khan,M. I., Kuntz,M. L, Zhou,Y., "Effects of Weld Microstructure on Static and Impact Performance of Resistance Spot Welded Joints in Advanced High Strength Steels",*Sci. Technol. Weld. Joining*, Vol. 13, pp. 294-304, 2008.
15-Gould,J. E., Khurana,S. P., Li.T., "Predictions of Microstructures when Welding Automotive Advanced High-Strength Steels", *Welding Journal*, Vol. 86. pp. 111s-116s, 2006.
16- Volger , M, "Investigation of Resistance Spot Weld Formation", Ph. D. Thesis of Stanford University, Palo Alto, CA, USA, 1993.
17-Pouranvari M., Marashi, S. P. H., "Failure mode transition in AISI 304 resistance spot welds", *Welding Journal*, Vol. 91.pp. 303s-309s, 2012.
18-Zhang H. J., "Expulsion and Its Influence on Weld Quality", *Welding Journal*, Vol. 78, No. 11. pp. 373-380, 1999.
5- Pouranvari, M., Marashi, S. P. H.,"Failure behavior of three-steel sheets resistance spot welds: effect of joint design",*Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 21(8).pp. 1669–1675, 2012.
6- Shen, J., Zhang, Y. S., Lai, X. M., Wang, P. C.,"Modeling of resistance spot welding of multiple stacks of steel sheets". *Materials & Design*, Vol. 32.pp.550–560, 2011.
7- Harlin, N., Jones, T. B., Parker, J. D.,"Weld growth mechanisms during resistance spot welding of two and three thickness lap joints",*Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 7(1).pp. 35–41, 2002.
8- Harlin, N., Jones, T. B., Parker, J. D.,"Weld growth mechanism of resistance spot welds in zinc coated steel", *Journal of Materials Processing Technology*,Vol. 143–144. pp. 448–453, 2003.
9- Nielsen, C. V., Friis, K. S., Zhang, W., Bay, N.,"Three-sheet spot welding of advanced high-strength steels",*Welding Journal*, Vol. 90(2), pp. 32-s -40-s, 2011.
10- Pouranvari, M., Marashi, S. P. H.,"Critical sheet thickness for weld nugget growth during resistance spot welding of three-steel sheets",*Science and Technology of Welding and Joining*,Vol. 16(2). pp. 162–165, 2011.
11-Lei, Z. Z., Kang, H. T., Liu, Y. G.,"Finite element analysis for transient thermal characteristics of resistance

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-02]