



تحلیل تجربی اثر پارامترهای جوش مقاومت نقطه‌ای بر رفتار کششی اتصالات فولاد دوفازی فریت-مارتنزیت به روش آماری تاگوچی

حمیدرضا قنبری¹، محمود شریعتی^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

* مشهد، صندوق پستی 9177948944، mshariati44@um.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 27 بهمن 1395

پذیرش: 27 اردیبهشت 1396

ارائه در سایت: ۰۲ تیر ۱۳۹۶

کلید واژگان:

جوش مقاومت نقطه‌ای

دکمه‌ی جوش

فولاد دوفازی

تاگوچی

در این مقاله ضمن تولید فولاد دوفازی فریت-مارتنزیت توسط عملیات حرارتی آنیل میان بحرانی، رفتار کششی جوش مقاومت نقطه‌ای در این نوع فولادها و همچنین اثر پارامترهای جوش مقاومت نقطه‌ای بر رفتار و حالت‌های شکست مورد بررسی قرار گرفته است. طراحی آزمایش‌ها به وسیله روش آماری تاگوچی انجام گرفته و با توجه به تعداد پارامترها و عوامل مورد بررسی آرایه‌ی L8 انتخاب شده است. پارامترهایی که در جوش مقاومت نقطه‌ای قابل کنترل هستند شامل زمان جوش کاری، شدت جریان الکتریکی عبوری از الکترودها و نیروی فشاری اعمالی که در این تحقیق به عنوان عوامل مؤثر بر عملیات در نظر گرفته شده است. فاکتور استحکام کششی نمونه جوش داده شده به عنوان پاسخ آزمایش مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای پیش‌بینی پارامترهای بهینه جوش کاری مقاومت نقطه‌ای از نسبت سیگنال به نویز در روش آماری تاگوچی استفاده می‌شود. عموماً دو نوع شکست فصل مشترکی و شکست محیطی در جوش‌های مقاومت نقطه‌ای مشاهده می‌شود. نتایج آزمایش کشش نشان می‌دهد با افزایش قطر دکه جوش، شکست به نوع محیطی و محیطی همراه با پارگی ورق تمایل بیشتری پیدا می‌کند. نتایج روش آماری تاگوچی نیز نشان می‌دهد که تأثیر پارامتر جریان دستگاه جوش بر استحکام کششی نقطه جوش نسبت به سایر پارامترها بیشتر بوده و با افزایش شدت جریان این تأثیرگذاری کمتر می‌شود، همچنین تصویربرداری به وسیله میکروسکوپ الکترونی از ناحیه جوش و سطوح شکست انجام گرفته است که نتایج، شکست نرم را در مود محیطی و شکست ترد را در مود فصل مشترکی نشان می‌دهد.

Experimental analysis of spot welded parameters on tensile behavior of ferrite-martensite dual phase steel with Taguchi statistical method

Hamid Reza Ghanbari, Mahmoud Shariati*

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran.

* P.O.B. 9177948944 Mashhad, Iran, mshariati44@um.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 15 February 2017

Accepted 17 May 2017

Available Online ۲۳ June 2017

Keywords:

Resistance spot weld

Weld nugget

Dual phase steel

Taguchi

ABSTRACT

In this paper, we show how Ferrite- martensite steel is produced by annealing operation, meanwhile tensile behavior of resistance spot weld and the effects of the resistance spot welding parameter and tensile failure modes in this type of steel will be examined. Design experiments were done by Taguchi statistical method and because of the number of studied parameters and factors, we chose L8 array. Parameters which could be controlled in resistance spot welding include welding time, the electrical current through the electrodes and the pressure which here is considered as factors affecting the operation and tensile strength welded factor is examined as a test answer. In order to predict the optimal parameters of the resistance spot welding, signal to noise ratio is used in Taguchi statistical method. Generally, spot weld failure occurs in two modes: interfacial and pullout. The results show that by increasing the diameter of the weld nugget, pullout failure and the pullout with tear sheets becomes more likely to happen. Results of Taguchi statistical method also show that the impact of the electrical current parameter of the spot welding machine compared to other properties was higher and it is less effective with increasing current. As well as SEM images of weld fracture, surfaces have been taken and the results indicate ductile fracture in pullout mode and cleavage in interfacial mode of fracture.

1- مقدمه

دارد. از این‌رو این نوع اتصال به طور گسترده‌ای جهت اتصال اجزای بدنه و شاسی خودروها در صنعت اتومبیل‌سازی استفاده می‌شود.

همچنین در سال‌های اخیر جهت کاهش وزن خودرو و افزایش ایمنی سرنشینان، کاربرد فولادهای دوفازی^۱ که دارای استحکام و شکل‌پذیری بیشتری نسبت به فولادهای معمولی است و استفاده از ورق‌های نازک‌تر را

جوش کاری مقاومت نقطه‌ای برای اتصال مجموعه‌های حاصل از ورق‌های فلزی در بدنه خودروها، وسایل خانگی، تولیدات ساختمانی، صنایع نظامی و به میزان محدودی در ساخت قطعات هواپیما کاربرد دارد. تولید بیشتر مجموعه‌هایی که نیازی به نشی‌ناپذیری ندارند با جوش کاری مقاومت نقطه‌ای، صرفه اقتصادی بیشتری نسبت به سایر روش‌های اتصال مکانیکی

¹ Dual phase steel

Please cite this article using:

H. R. Ghanbari, M. Shariati, Experimental analysis of spot welded parameters on tensile behavior of ferrite-martensite dual phase steel with Taguchi statistical method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 6, pp. 342-350, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

زمان خنک‌شدن جوش را بر رفتار کششی جوش مقاومت نقطه‌ای فولاد پرکربن ASI 1075 بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش زمان و جریان جوش کاری مقاومت کششی اتصال افزایش می‌یابد و با افزایش نیروی الکترود و زمان خنک شدن مقاومت کششی کاهش می‌یابد [7]. آشتیانی و همکارانش نیز تأثیر قطر الکترود بر توزیع دمایی فرایند و شکل‌گیری دکمه جوش در فرایند جوش کاری مقاومت نقطه‌ای سوپرآلیاژ اینکونل 625، با روش اجزای محدود را مورد بررسی قرار دادند. با مقایسه نتایج مدل شبیه‌سازی آن‌ها با نتایج تجربی، مدل ارائه شده می‌تواند با دقت قابل قبولی توزیع دما و ابعاد دکمه جوش را پیش‌بینی کند [8]. صدیقی و همکاران نیز نشان دادند با افزایش شدت جریان و زمان اعمال جریان در جوش کاری مقاومتی نقطه‌ای آلیاژهای منیزیم اندازه دکمه جوش افزایش می‌یابد، همچنین نیروی الکترود و زمان اعمال نیرو بر اندازه دکمه جوش تأثیر چندانی ندارد [9]. وانگ و همکارانش اثر شکل هندسی نوک الکترود را بر شکل دکمه جوش و کیفیت آن بررسی کردند و نشان دادند شکل هندسی نوک الکترود بر اندازه و شکل دکمه جوش تأثیرگذار است [10]. شریعتی و مغربی اثر تغییر ضخامت ورق را بر رفتار خستگی جوش‌های مقاومت نقطه‌ای در نمونه‌های U شکل فولاد نرم مورد بررسی قرار دادند [11]. آن‌ها نشان دادند همواره رشد ترک در ورق نازک‌تر شروع می‌شود و ورق نازک‌تر دچار شکست می‌شود. آن‌ها در تحقیقی دیگر بر اتصالات کششی-برشی نشان دادند که اگر به ورق‌ها بار بیش از حد اعمال شود بدون آن‌که قادر باشند بارگذاری خستگی را تحمل کنند ناگهان گسیخته می‌شوند و دکمه جوش از جای خود کنده می‌شود [12]. ژانگ و همکاران اثر ناهمجنس بودن ماده و نابرابری ضخامت ورق‌های فولاد دوفازی را در اتصال جوش مقاومت نقطه‌ای بررسی کردند و مودهای شکست حاصل از نیروی کششی برشی را در اتصال جوش مقاومت نقطه‌ای فولاد DP600 با DP780 مورد بررسی قرار دادند [4]. شکست محیطی برخلاف انتظار با اشاعه ترک در فلز مقاوم‌تر در نمونه‌های ناهمجنس گسترش پیدا کرده و تغییر شکل پلاستیک و در نهایت شکست نهایی در فلز مقاوم‌تر (DP780) اتفاق می‌افتد و در فلز ضعیف‌تر (DP600) فقط پدیده گلوپی شدن رخ می‌دهد. بانرجی و همکاران اثر قطر دکمه جوش و همچنین نوع ناچ ایجاد شده در ناحیه جوش داده شده را بر رفتار خستگی ورق‌های فولاد دوفازی DP500 بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند در بارگذاری با نیروی بالا، اتصالات با قطر کوچک دچار شکست فصل مشترکی می‌شوند و عمر خستگی در بارگذاری با نیروی پایین به شکل هندسی ناچ وابسته است [13]. نتایج مشابه در تحقیقی دیگر که بر فولادهای کم کربن انجام شده به صورت روابط (2,1)، به‌دست آمده است [14].

$$D_{cr} = 4\sqrt{t} \quad (1)$$

$$D_{cr} = 5\sqrt{t} \quad (2)$$

در این مقاله ضمن ساخت ورق فولاد دوفازی توسط عملیات حرارتی آنیل^۱ میان بحرانی، آزمایشات کشش-برش توسط روش آماری تاگوچی طراحی شده و اثر پارامترهای زمان، جریان و فشار دستگاه جوش مقاومت نقطه‌ای بر مقاومت کششی این نوع فولادها بررسی می‌شود. اثر قطر الکترود بر استحکام اتصال نیز بررسی شده است. مقاومت کششی یک نمونه اتصال از فولاد دوفازی شده با نمونه مشابه آن که از فولاد ST52-3 به هم جوش داده شده است که مقایسه می‌شود.

میسر می‌کند، در ساخت بدنه خودروها مورد توجه خودروسازان معتبر قرار گرفته است. استفاده از آن‌ها در صنعت خودروسازی به دلیل بالاتر بودن قابلیت جذب انرژی فولادهای دوفازی موجب افزایش امنیت سرنشینان می‌شود [1].

تحقیق بر فولادهای دوفازی با کار هیامی و فوراکاوا در سال 1975 و رشید در سال 1976 آغاز شده است [2]. هیامی و فوراکاوا نشان دادند که آنیل پیوسته فولادهای ورق منیزیم-سیلیسیم نورد سرد شده در محدوده دمایی میان بحرانی، فولادهایی با ریزساختار فریت-مارتنزیت^۱ تولید می‌کند که به دلیل حضور ذرات سخت مارتنزیت در فاز انعطاف‌پذیر فریت، انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا^۲ دارند. رشید نیز نشان داد که عملیات حرارتی میان بحرانی فولاد کم آلیاژ استحکام بالا برای تولید ریزساختارهای فریت-مارتنزیت منجر به افزایش انعطاف‌پذیری بدون تغییر در استحکام کششی می‌شود. رشید برای این‌که ساختار فریتی-مارتنزیتی را از ساختارهای فریتی-پرلیتی حاصل از عملیات متداول بر فولادهای کم کربن یا کم آلیاژ استحکام بالا متمایز کند، نام دوفازی را بر این نوع فولادها نهاد [3].

استفاده از مزایای فولادهای دوفازی در صنعت خودروسازی نیازمند بررسی جوش‌پذیری این نوع فولادهاست. از این‌رو بهینه‌سازی فرایند جوش کاری مقاومت نقطه‌ای^۳ فولادهای دوفازی تحقیقات وسیعی را به خود اختصاص داده است. بررسی‌های انجام‌شده بر مقاومت کششی جوش مقاومت نقطه‌ای در فولادهای دوفازی دو نوع شکست را نشان می‌دهد: شکست فصل مشترکی^۴ و شکست محیطی^۵ [4,5]. در مود شکست فصل مشترکی، شکست از طریق اشاعه ترک از میان دکمه جوش صورت می‌گیرد و در مود شکست محیطی، شکست با بیرون کشیده شدن کامل دکمه جوش از یک ورق صورت می‌گیرد. مود شکست محیطی به دلیل تغییر شکل پلاستیک و قابلیت جذب انرژی بالای همراه با آن، مود شکست ترجیحی است. شکست فصل مشترکی موجب کاهش شدید قابلیت اعتماد به خودرو در شرایط تصادف می‌شود؛ بنابراین برای این‌که جوش‌های نقطه‌ای در حین سرویس دچار تخریب زودرس نشوند، متغیرهای فرایند جوش باید به گونه‌ای تنظیم شوند که از دستیابی به مود شکست محیطی اطمینان حاصل شود. مهم‌ترین عامل در استحکام یک جوش مقاومت نقطه‌ای اندازه دکمه جوش^۶ است. اگر قطر دکمه جوش از حد معینی کوچک‌تر باشد، معمولاً شکست فصل مشترکی رخ می‌دهد و با افزایش اندازه قطر دکمه جوش شکست به سمت مود محیطی متمایل می‌شود [4]. امروزه در صنعت اتومبیل‌سازی قطر بهینه دکمه جوش براساس رابطه (1) محاسبه می‌شود و برای اطمینان بیشتر از حصول شکست مود محیطی در فولادهای دوفازی از رابطه (2) نیز استفاده می‌شود [6]. صفری و همکارانش اثر جریان جوش، زمان جوش کاری، نیروی الکترود و زمان خنک شدن جوش را بر رفتار کششی جوش مقاومت نقطه‌ای فولاد زنگ‌نزن ASI 201 بررسی کردند [5]. نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش زمان و جریان جوش کاری مقاومت کششی اتصال افزایش می‌یابد، همچنین نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی اثر جریان بر اندازه قطر دکمه جوش نزدیکی قابل قبولی با نتایج تجربی دارد [5]. در پژوهشی دیگر صفری و مستعان اثر جریان جوش، زمان جوش کاری، نیروی الکترود و

2- روش تحقیق

¹ Ferrite-Martensite

² High strength low alloy (HSLA)

³ Resistance spot weld

⁴ Interfacial fracture

⁵ Pullout fracture

⁶ Weld nugget

⁷ Necking

⁸ Annealing

1-2- ساخت فولاد دوفازی

در این تحقیق جهت تولید فولاد دوفازی فریت-مارتنزیت ورق فولادی ST52-3 که دارای ریز ساختار فریت-پرلیت¹ است به ابعاد 1103 سانتی‌متر و ضخامت 0.9 میلی‌متر تحت عملیات حرارتی آنیل میان بحرانی قرار گرفته است. جدول 1 عناصر تشکیل دهنده این نوع فولاد را نشان می‌دهد.

در روش آنیل میان بحرانی نمونه مورد نظر تا محدوده ناحیه دوفازی فریتی-آستنیتی² در نمودار فازی آهن-کربن، حرارت داده می‌شود و برای مدت زمان معینی در آن دما نگه داشته می‌شود، سپس نمونه‌ها از دمای آنیل میان بحرانی در محلول آب سرد و 10٪ نمک سریع سرد می‌شوند. آستنیت موجود در ناحیه دوفازی به فاز مارتنزیت تبدیل می‌شود و در نهایت نمونه‌ای با ساختاری به صورت جزایر مارتنزیتی در زمینه فریتی تولید می‌شود. مدت زمان نگهداری در محدوده دوفازی به ترکیب شیمیایی، ضخامت و غیره بستگی دارد [15].

2-2- طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی

در روش‌های سنتی جهت انجام آزمایش و تعیین اثر عوامل مختلف بر سیستمی که دارای چندین متغیر است، باید آزمایش‌های متعددی برای بررسی تأثیر تمام عوامل انجام گیرد. بررسی سیستم‌هایی که عوامل زیادی روی آن‌ها تأثیر دارد با این روش بسیار زمان‌بر و پرهزینه خواهد بود. تاگوچی برای کاهش زمان و هزینه‌ای که صرف آزمایش‌های مهندسی می‌شود، شروع به توسعه روش‌های جدید برای بهینه‌سازی فرآیند آزمایش‌های مهندسی کرد و فلسفه روش تاگوچی را بنیان نهاد. در روش تاگوچی برای طراحی آزمایش‌ها از آرایه‌های ارتوگونال³ استفاده می‌شود. فرآیند طراحی آزمایش‌ها شامل آرایه‌های ارتوگونال مناسب، اختصاص دادن عوامل به ستون‌های مناسب و تعیین شرایط برای آزمایشات است. وقتی آزمایشات شامل تکرار در هر موقعیت آزمایشی باشد و نتایج به صورت کمی اندازه‌گیری شود، تاگوچی نسبت سیگنال به نویز⁴ را توصیه می‌کند. نسبت سیگنال به نویز نشان دهنده حساسیت مشخصه کیفی مورد بررسی به عوامل خارجی اثرگذار و غیرقابل کنترل در یک فرآیند کنترل شده است. در روش تاگوچی از این مفهوم برای به‌دست آوردن شرایط بهینه در آزمایشات استفاده می‌شود. در هر آزمایش یافتن بالاترین نسبت سیگنال به نویز در نتایج هدف است. مقدار سیگنال به نویز بالا نشان دهنده این است که اثر پارامترهای قابل کنترل بیش از اثر پارامترهای غیرقابل کنترل است. طراحی فرآیند با بالاترین نسبت سیگنال به نویز همواره سبب ایجاد بهترین کیفیت با حداقل واریانس است.

در این پژوهش اثر سه عامل شدت جریان، زمان جوش کاری و نیروی اعمالی بر مقاومت کششی اتصال بررسی شده است. با توجه به این‌که اثر شدت جریان در چهار سطح و اثرات زمان جوش کاری و نیروی اعمالی هر یک در دو سطح بررسی شده است با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب⁵ آرایه ارتوگونال L8 برای طراحی آزمایش‌ها انتخاب می‌شود.

مقادیر سطوح برای پارامترها در جدول 2 آورده شده و جدول 3 نیز مربوط به طراحی آزمایش‌هاست.

3-2- فرایند جوش کاری مقاومت نقطه‌ای

درجوش کاری مقاومتی برای برقراری اتصال از فشار و ایجاد حرارت استفاده می‌شود. حرارت به دلیل مقاومت قطعات کار و تماس آن‌ها در فصل مشترک درمقابل عبور جریان برق به‌وجود می‌آید. فشار مشخصی برای نگه‌داشتن دو قطعه کار بر آن‌ها اعمال و به این ترتیب مقاومت الکتریکی محل فصل مشترک نیز کنترل می‌شود. دمای لازم برای اتصال به دلیل این‌که در این نوع جوش کاری از فشار استفاده می‌شود پایین‌تر از دمای جوش کاری با شعله گاز است. از آن‌جا که می‌توان به سرعت به دمای لازم رسیده و جوش کاری را در کمتر از یک ثانیه تمام کرد، جوش کاری مقاومتی فرایندی بسیار سریع و اقتصادی است. در نتیجه این فرایند برای کارهای تولیدی بسیار مناسب بوده و در انبوه‌سازی به مقیاس وسیعی به کار می‌رود.

کاربرد صحیح جوش کاری مقاومتی به عملکرد مناسب و کنترل متغیرهای جریان، فشار و زمان جوش کاری بستگی دارد. جهت ایجاد نقطه جوش مناسب به جریان کافی برای گرم کردن فلزات مورد نظر و همچنین رسانیدن آن‌ها به حد خمیری‌شان نیاز است. گرمای لازم برای جوش کاری مقاومتی از طریق عبور جریان شدید از درون قطعه کار برای مدت زمان کوتاه از رابطه (3) به دست می‌آید.

$$H = RI^2T \quad (3)$$

در جوش کاری مقاومتی فشار بر مقاومت تماس تأثیر دارد و سبب می‌شود که بتوان جوش کاری را در دمای پایین‌تری انجام داد. از این‌رو کنترل اندازه و زمان آن بسیار اهمیت دارد. اگر فشار خیلی کم باشد، مقاومت تماس بالا رفته و سطح تماس الکترودها سوخته و خال می‌افتد. از طرفی فشار خیلی زیاد سبب ایجاد محل‌های تمرکز تنش می‌شود [16].

جوش کاری در این تحقیق توسط دستگاه WIM مدل JPC 35kVA صورت گرفته است و از الکترودهایی از جنس مس-کروم-زیرکونیوم و با قطر 5 و 6 میلی‌متر استفاده شده است. نمونه جوش داده شده با الکترودی به قطر 6 میلی‌متر جهت مقایسه تأثیر قطر الکتروود بر مقاومت کششی در آزمایش 4 ساخته شده است.

4-2- بررسی‌های ریزساختار و سختی‌سنجی

مراحل آماده‌سازی نمونه جهت مشاهده ریز ساختار با میکروسکوپ شامل مانع⁶ کردن نمونه، سنباده‌زنی، صیقلی کردن، اچ کردن⁷ و در نهایت بررسی میکروسکوپی است. نمونه‌ها پس از مانع کردن و سنباده‌زنی و صیقلی کردن توسط محلول‌های نایتال⁸ 2% و یا محلول لپرا⁹ اچ شده و ریزساختارشان توسط میکروسکوپ نوری مشاهده شده است. پس از مشاهده ریز ساختار با استفاده از نرم‌افزار MIP درصد و اندازه دانه هریک از فازها مشخص می‌شود. تصویر برداری SEM از سطوح شکست برای مشاهده سطوح شکست انجام گرفته است.

آزمون سختی‌سنجی نیز با استفاده از دستگاه بیوهلر¹⁰ با نیروی 500 گرم در مدت زمان 15 ثانیه برای تعیین سختی ویکرز¹¹ فلز پایه، پیش و پس از عملیات حرارتی انجام شده است. به منظور تعیین سختی دکمه جوش و ناحیه متأثر از حرارت سختی‌سنجی ویکرز در راستای محدوده جوش داده شده صورت گرفته است.

⁶ Mount

⁷ Etching

⁸ Nital

⁹ Lepera

¹⁰ Buehler

¹¹ Vickers hardness

¹ Ferrite-Pearlite

² Ferrite-Austenite

³ Orthogonal array

⁴ Signal to noise

⁵ Minitab

جدول 1 عناصر تشکیل‌دهنده فولاد ST52-3

Table 1 chemical composition of ST52-3	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S	Mo	W
ST52-3	0.111	1	0.357	0.56	0.236	0.325	0.029	0.003	0.008	0.013

چندین عملیات حرارتی در دما و زمان‌های مختلف برای دستیابی به فولادی با درصد مارتنزیت کمتر از 20% انجام گرفت. ابتدا در دمای 720°C و زمان 15 دقیقه عملیات حرارتی انجام شد، پس از مشاهده ریزساختار ملاحظه شد که ساختار دانه‌های مارتنزیت تشکیل نشده است. با افزایش دما تا 735°C و قرار دادن نمونه در کوره به مدت 15 دقیقه در ساختاری که پس از کویچینگ² کردن به دست آمد مشاهده شد که فاز مارتنزیت به خوبی شکل نگرفته و ذرات کرومی سمنتیت³ در فاز مارتنزیت قابل مشاهده بود و ماده دارای ساختاری بایمدال⁴ شده بود. سپس عملیات حرارتی در دمای 780°C و به مدت 40 دقیقه انجام گرفت که پس از مشاهده ریز ساختار توسط میکروسکپ نوری و تعیین درصد فاز مارتنزیت توسط نرم‌افزار MIP، درصد این بیش از حد بود و دانه‌های مارتنزیت به هم پیوسته بودند که منجر به تردی زیاد نمونه می‌شود [17]. درنهایت با نگهداری نمونه‌ها در کوره با دمای 745°C به مدت 25 دقیقه و سپس کویچینگ کردن آن در محلول آب و نمک، فولادی دوفازی با مقدار 17% مارتنزیت تولید شد. شکل 3 تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار فولاد دوفازی شده که با محلول لپرا اچ شده را نشان می‌دهد.

2-3- خواص کششی فلز پایه

نمونه‌های آزمایش کشش براساس استاندارد ASTM E646-98 تهیه شد و توسط دستگاه تست کشش از نمونه‌های فولاد ST52-3 و فولاد دوفازی ساخته شده با مقدار 17% مارتنزیت انجام گرفت. براساس شکل 4 رفتار کششی فولاد پس از عملیات آنیل میان بحرانی دارای تسلیم پیوسته است و نوارهای لودر⁵ که موجب ناپیکنواختی در رفتار تغییر شکل فولاد ST52-3 می‌شود. در منحنی تنش-کرنش فولاد دوفازی شده دیده نمی‌شود. می‌توان بیان کرد این رفتار پیوسته در تغییر شکل فولاد دوفازی به دلیل وجود ناهمگایی‌های⁶ متحرک با چگالی بالا در ساختار این نوع از فولادهاست [18].



Fig. 2 Microstructure of ST52-3

شکل 2 ریز ساختار فولاد ST52-3

² Quenching

³ Cementite

⁴ Bimodal microstructure

⁵ Lyders band

⁶ Dislocations

جدول 2 مقادیر سطوح پارامترهای دستگاه جوش نقطه‌ای

Table 2 Value of spot weld machine parameters	سطح 1	سطح 2	سطح 3	سطح 4
فاکتور	6.5	7.5	8.5	9.5
شدت جریان (kA)	8	10		
زمان جوش کاری (Cycle)	3	3.5		
نیروی الکترو (kN)				

جدول 3 طراحی آزمایش به روش تاگوچی

Table 3 Design of tests with taguchi method	شدت جریان (kA)	زمان (Cycle)	نیرو (kN)	شماره آزمایش
1	6.5	8	3	1
2	6.5	10	3.5	2
3	7.5	8	3	3
4	7.5	10	3.5	4
5	8.5	8	3.5	5
6	8.5	10	3	6
7	9.5	8	3.5	7
8	9.5	10	3	8

5-2- آزمون کشش

شکل 1 ابعاد نمونه‌های ساخته شده جهت آزمون کشش برش را نشان می‌دهد. آزمون کشش برش توسط دستگاه زوئیک/روئل¹ و با سرعت 1 میلی‌متر بر دقیقه و در دمای محیط انجام شد. جهت جلوگیری از به وجود آمدن گشتاور خمشی و چرخش دکمه جوش از دو واسطه در گیره‌ها استفاده می‌شود.

3- نتایج و مباحث

1-3- عملیات حرارتی و بررسی ریزساختار فلز پایه

در این تحقیق ابتدا ساختار فلز پایه پیش از عملیات حرارتی بررسی شد. نمونه پس از مانع کردن و سنباده‌زنی و صیقلی کردن با محلول اچانت نایتال 2% اچ شد و بررسی‌های ساختاری توسط میکروسکوپ نوری ساختار فریتی-پرلیتی را در فولاد ST52-3 نشان می‌دهد. شکل 2 تصویر ریز ساختار فولاد ST52-3 که در آن فاز با رنگ روشن، فریت و فاز با رنگ تیره، پرلیت است. برای تعیین درصد هریک از فازها از نرم‌افزار MIP استفاده شد که مقدار فاز پرلیت 14% و فریت 86% پس از بررسی درصد فازهای 10 نمونه و میانگین‌گیری از مقادیر آن‌ها به دست آمد.

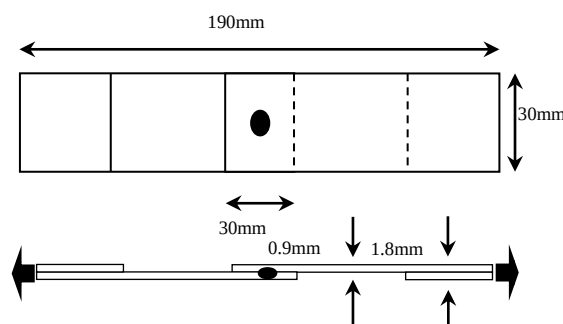


Fig. 1 Tensile shear specimen dimensions

شکل 1 ابعاد نمونه آزمون کشش

¹ Zwick/Roell

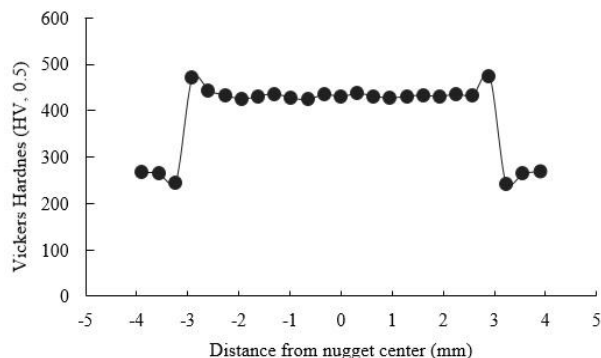


Fig. 5 Typical cross-section of weld under the condition of fourth test and corresponding of Vickers hardness across the weld

شکل 5 سطح مقطع جوش تحت شرایط آزمایش چهارم و سختی ویکرز متناظر با آن

دوفازی مشاهده می‌شود. مناطقی از منطقه متأثر از حرارت که در مجاورت دکمه جوش قرار دارند تحت تأثیر حرارت جوش کاری با افزایش دما به مقدار قابل توجه مواجه می‌شوند. این افزایش دما تا حدی است که کل زمینه و سپس با فاصله گرفتن از دکمه جوش فقط مناطق مارتنزیت آن به آستنیت تبدیل شده و با توجه به گذر آب از داخل الکترودهای دستگاه جوش مقاومت نقطه‌ای سریع سرد شده و این آستنیت‌ها به بینیت و مارتنزیت تبدیل می‌شود. این ریز ساختار سبب افزایش قابل ملاحظه سختی در این منطقه می‌شود. سختی این منطقه تا 470 ویکرز هم می‌رسد. درجه حرارت جوش کاری در مناطق دورتر و در مجاورت فلز پایه کمتر از درجه حرارت آستنیت شدن است [20,19]. در این مناطق ریزساختار پس از اتصال از فریت و مارتنزیت برگشت یافته³ تشکیل شده است. بازگشت مارتنزیت در این منطقه موجب کاهش استحکام و سختی فلز و افزایش شکل‌پذیری آن می‌شود. این منطقه منطقه نرم‌شده نام دارد و در تمامی اتصالات ایجاد می‌شود. سختی این منطقه از فلز پایه کمی کمتر بوده و در حدود 244 ویکرز است. این منطقه عامل ضعف جوش کاری نقطه‌ای فولاد دوفازی و در بیشتر موارد محل شکست نمونه‌ها در آزمون کشش-برش همین منطقه است.

3-3-3- دکمه‌ی جوش

فصل مشترک دو ورق هنگام برقراری جریان برق در الکترودها به سرعت گرم شده و ذوب می‌شود. با قطع شدن جریان برق و در اثر تماس با الکترودهای آبگرد مسی دستگاه جوش، منطقه اتصال به سرعت سرد می‌شود. سرعت سرد شدن در فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای در مقایسه با سرعت سرد شدن در دیگر فرآیندهای اتصال از جمله جوشکاری‌های قوسی، جوشکاری پرتو الکترونی و جوشکاری لیزر بالاتر است. با قطع جریان برق و در اثر تماس با الکترودهای مسی آبگرد که در تماس با فلز هستند، محل اتصال با سرعتی بیش از 1000 C°/s سرد می‌شود [19]. شکل 6 تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار دکمه جوش و ناحیه اطراف آن را نشان می‌دهد. ریزساختار دکمه جوش بیشتر متشکل از مارتنزیت است و مقداری



Fig. 3 Microstructure of dual phase steel

شکل 3 ریز ساختار فولاد دوفازی شده

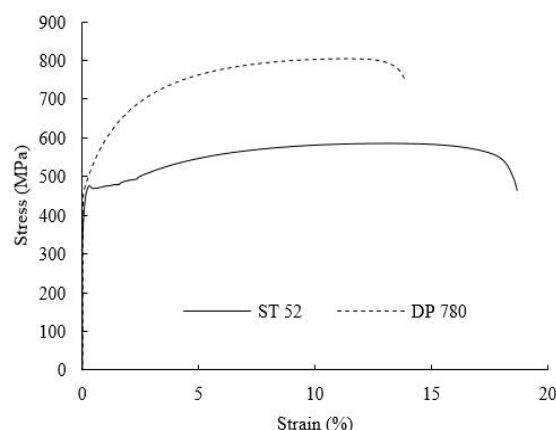


Fig. 4 Stress-strain diagram of ST52-3 and dual phase steel

شکل 4 نمودار تنش-کرنش فولاد ST52-3 و فولاد دوفازی شده

مقدار به میزان 37% افزایش یافته و به 804MPa می‌رسد.

3-3-3- ماکروسختی محل اتصال

شکل 5 سطح مقطع ناحیه اتصال در جوش مقاومت نقطه‌ای و پروفیل سختی جوش آن را در فولاد دوفازی شده، تحت شرایط آزمایش 4 را نشان می‌دهد. با توجه به این که پروفیل سختی معیاری برای تغییرات خواص مکانیکی در امتداد محل اتصال و سختی هر نقطه تابع ریزساختار آن نقطه است از لحاظ ساختاری محل اتصال را می‌توان به 3 ناحیه فلز پایه¹، منطقه متأثر از حرارت² و دکمه جوش تقسیم کرد.

1-3-3- فلز پایه

شکل 3 ریز ساختار فلز پایه فولاد دوفازی مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. این تصویر پس از انجام عملیات پرداخت سطح و اچ کردن توسط محلول لپرا توسط میکروسکوپ نوری و با بزرگ‌نمایی 500 برابر گرفته شده است. فازی که به رنگ روشن دیده می‌شود مارتنزیت را نشان می‌دهد. این فاز به صورت جزایر مارتنزیتی در زمینه نرم فریتی و مشخص شده به رنگ تیره وجود دارد. میانگین سختی فلز پایه 265 ویکرز است که با ساختار آن همخوانی دارد.

2-3-3- منطقه متأثر از حرارت

دو پدیده مهم در منطقه متأثر از حرارت اتصال جوش کاری نقطه‌ای فولاد

¹ Base metal

² Heat affected zone (HAZ)

³ Tempering martensite

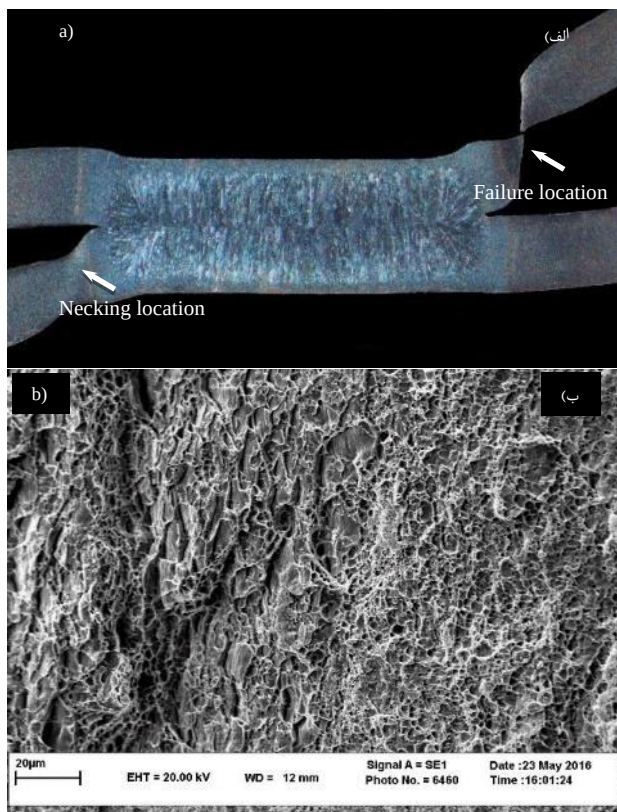


Fig. 7 a) Macro structure of pullout fracture after tensile test of fourth sample tested. b) SEM image of pullout failure surface

شکل 7 الف- ماکروساختار اتصال پس از شکست محیطی در آزمایش 4، ب- تصویر SEM از سطح شکست در مود محیطی

منجمد می‌شود، با کاهش مذاب روبه‌رو شده و در نتیجه با انجماد مذاب باقی‌مانده حفره تشکیل می‌شود. گزارش‌های متعددی راجع به وجود ترک‌های انقباضی در دکمه جوش ارائه شده است [21]. همان‌طور که در شکل 8-ب مشاهده می‌شود، ساختار دندریتی⁴ در اطراف حفره انقباض نشان‌دهنده شکست ترد در دکمه جوش است. در بزرگ‌نمایی بالاتر و در مجاورت حفره انقباضی ساختار دیمپلی در سطح شکست ملاحظه می‌شود که نشان‌دهنده وجود شکست نرم در این نواحی است (شکل 8-ج). هر چند بیشتر نواحی شکست در مود فصل مشترکی ساختاری دندریتی داشته که بیان‌کننده شکست ترد است که این خود نشان‌دهنده سختی بالای ناحیه دکمه جوش است؛ اما وجود دانه‌های مارتنزیت با درصد کربن پایین شکل دیمپلی به برخی نواحی داده است.

وجود حفره‌های انقباضی یکی از دلایل اصلی شکست در مود فصل مشترکی است. در این نمونه هم با توجه به این که قطر دکمه جوش از مقدار قطر بحرانی آن جهت حصول اطمینان از شکست محیطی که از رابطه‌های (2,1) به‌دست می‌آید، بیشتر است؛ ولی به دلیل وجود حفره انقباضی که یکی از عیوب جوش مقاومت نقطه‌ای است، شکست فصل مشترکی در سطح مقطع جوش اتفاق می‌افتد.

3-5- آزمون کشش - برش و نمودارهای سیگنال به نویز

جدول 4 استحکام کششی و قطر دکمه جوش اتصالات ساخته شده براساس روش آماری تاگوچی در این تحقیق را نشان می‌دهد. هدف از تحلیل تاگوچی بیشینه کردن مقدار استحکام تسلیم است؛

فریت ویدمن اشتاتن¹ و بینیت² نیز در آن وجود دارد. این ساختار با ساختار دوفازی اولیه متفاوت، بسیار مستحکم و سختی آن از فولاد دوفازی نیز بیشتر است. میانگین سختی این منطقه حدود 430 ویکرز است.

3-4- بررسی مودها و سطوح شکست

شکست محیطی در این آزمایش‌ها شکست غالب در نمونه‌های ساخته شده است. در بیشتر نمونه‌ها شکست با گسترش ترک از اطراف دکمه جوش به سمت سطح فلز و همراه با پارگی ورق اتفاق می‌افتد. تصاویر گرفته شده توسط میکروسکوپ نوری از محل اتصال پس از شکست (شکل 7) نشان می‌دهد که محل شکست در منطقه متأثر از حرارت و در مجاورت فلز پایه است. در واقع محل شکست همان منطقه نرم شده بوده که دارای کمترین میزان سختی است. همان‌طور که در شکل 7-الف مشاهده می‌شود، فلز در ناحیه شکست ابتدا دچار تغییر شکل پلاستیک شده و در نهایت با افزایش بیشتر نیرو شکست در این ناحیه اتفاق می‌افتد. فلز مقابل فقط دچار تغییر شکل پلاستیک شده است. همان‌گونه که در شکل 7-الف ملاحظه می‌شود، تغییر در سطح مقطع فلز و گلوبی شدن در ناحیه مجاور دکمه جوش اتفاق می‌افتد.

شکل 7-ب تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع شکست محیطی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل 7-ب مشاهده می‌شود، در سطح شکست دیمپل‌های³ فراوانی وجود دارد که بیانگر وجود شکستی نرم در این ناحیه است.

همچنین یک نمونه ساخته شده آزمایش 1 در این آزمایش‌های دچار شکست فصل مشترکی شد. بررسی سطح شکست در این نمونه نشان داد که وجود عیب ناشی از تشکیل حفره انقباضی در سطح دکمه جوش دلیل استحکام پایین و رخ دادن شکست فصل مشترکی در این نمونه است. شکل 8 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح این شکست را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود وجود حفره و ترک‌های زیاد در ساختار دکمه جوش به وضوح قابل مشاهده است. این نوع ترک‌ها در دکمه جوش در اثر انقباض دکمه در حین انجماد به وجود می‌آید. از طرفی می‌دانیم مذاب درون دکمه جوش هنگام انجماد دچار کاهش حجم شده و آخرین قسمتی که

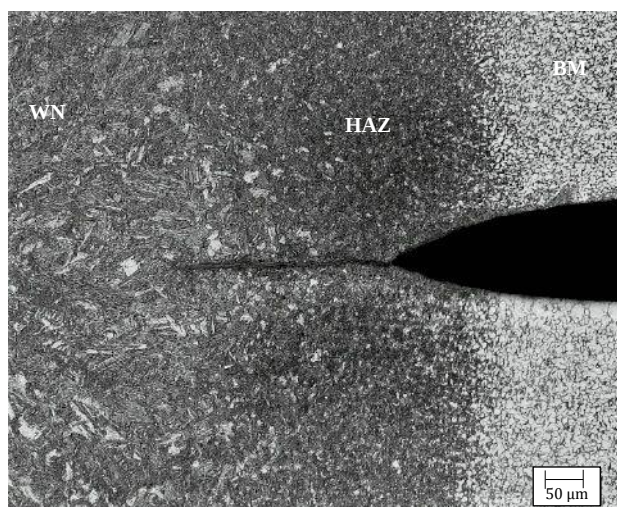


Fig. 6 Optical microscope image of weld nugget and heat affected zone

شکل 6 تصویر میکروسکوپ نوری از دکمه جوش و ناحیه متأثر از حرارت

¹ Widmanstatten ferrite

² Bainite

³ Dimpels

⁴ Dendrites

بیشتر شدن جریان از 8.5 کیلوآمپر تأثیر عکس بر استحکام کششی اتصال دارد و سبب کاهش استحکام کششی اتصال می‌شود. افزایش زمان جوش کاری سبب افزایش استحکام (شکل 10) و افزایش در میزان نیروی اعمالی نیز سبب کاهش میزان استحکام اتصال شده است (شکل 11). با توجه به نمودارهای سیگنال به نویز مشخص است که بیشترین تأثیر را بر استحکام اتصال جوش مقاومت نقطه‌ای مقدار شدت جریان دارد و تأثیر تغییر در زمان جوش کاری و نیروی اعمالی الکترودها بر استحکام اتصال کمتر است. تغییر استحکام اتصال نمونه‌های ساخته شده را می‌توان به تغییرات میزان استحکام فلز در ناحیه شکست تحت تأثیر عملیات برگشت مارتنزیت نسبت داد. تغییر در پارامترهای دستگاه جوش نقطه‌ای سبب تغییر در میزان حرارت ایجاد شده در اطراف دکمه جوش و دمای بازگشت مارتنزیت می‌شود. افزایش شدت جریان و زمان جوش کاری سبب افزایش میزان حرارت تولید شده می‌شود. افزایش فشار (افزایش نیرو در الکترودها) باعث کاهش مقاومت تماسی بین دو فلز و کم شدن مقدار حرارت تولید شده می‌گردد. این تغییرات بر دمای بازگشت مارتنزیت در ناحیه شکست تأثیرگذار بوده و باعث تغییر در میزان استحکام کششی نواحی متأثر از حرارت می‌شود.

جدول 4 استحکام کششی و قطر دکمه جوش در نمونه‌های آزمایش به روش تاگوچی
Table 4 Tensile strength and weld nugget diameter of samples in taguchi method

شماره آزمایش	مقاومت کششی (kN)	قطر دکمه جوش (mm)
1	8.518	4.7
2	8.513	4.8
3	9.317	5.2
4	9.266	5.2
5	9.305	5.4
6	9.425	5.4
7	8.843	5.7
8	9.143	5.8

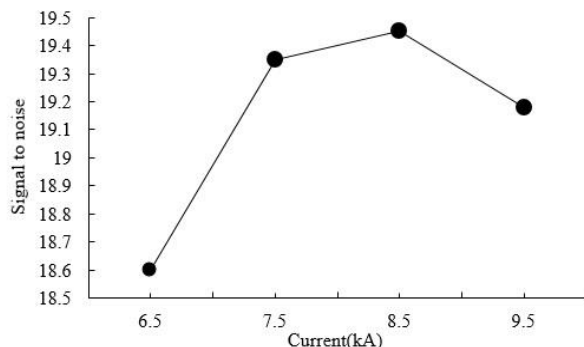


Fig. 9 Signal to noise ratio of current parameter

شکل 9 نسبت سیگنال به نویز شدت جریان

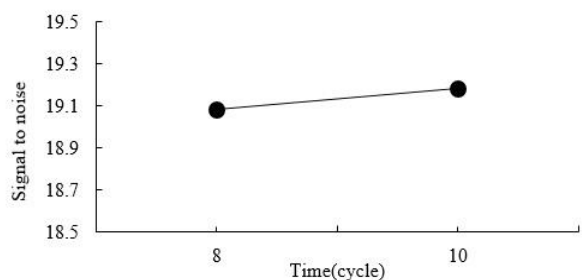


Fig. 10 Signal to noise ratio of time parameter

شکل 10 نسبت سیگنال به نویز پارامتر زمان

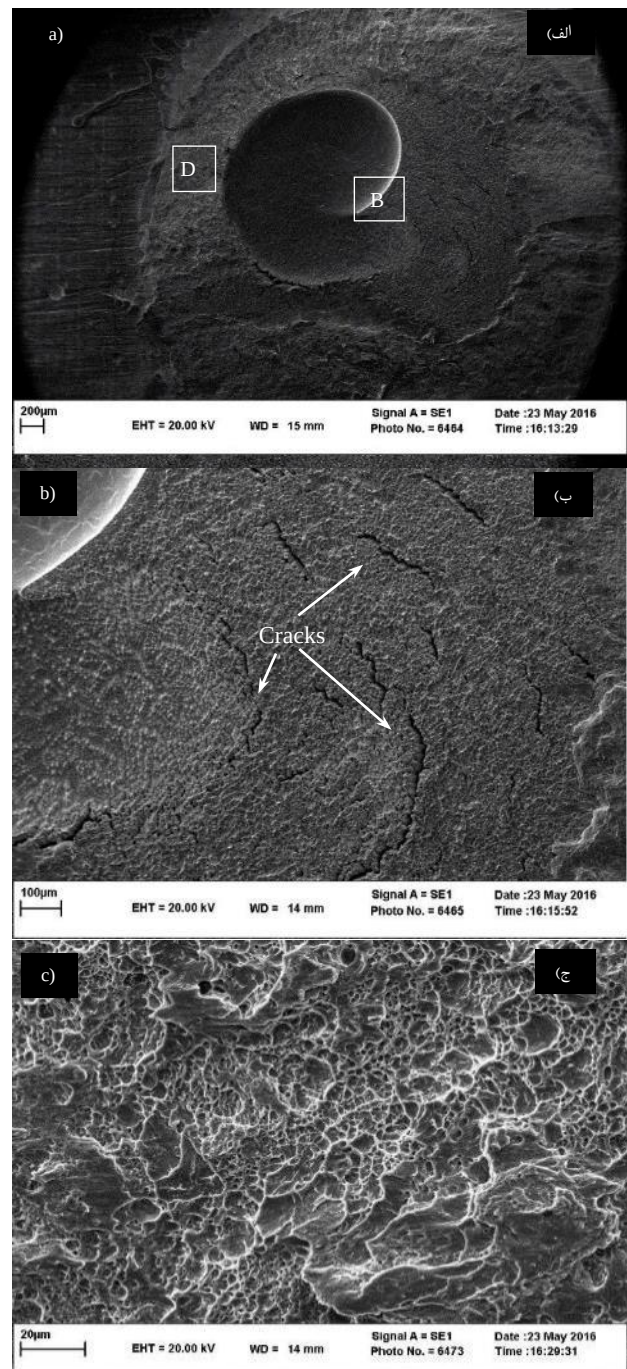


Fig. 8 Typical characteristic of the interfacial fracture after the tensile shear test, (a) overview of the fractured surface, (b) magnified views of regions B marked in (a), (c) magnified views of regions D marked in (a)

شکل 8 تصویر ویژگی‌های سطح شکست فصل مشترکی پس از تست کشش، الف-

تصویر کلی از سطح شکست، ب- بزرگ‌نمایی ناحیه B که در (الف) مشخص شده، ج- بزرگ‌نمایی ناحیه D که در (الف) مشخص شده

بنابراین جهت پیشنهاد کردن این عامل باید بالاترین نسبت سیگنال به نویز مورد توجه قرار گیرد. شکل‌های 9-11 نمودارهای سیگنال به نویز پارامترهای دستگاه جوش مقاومت نقطه‌ای که توسط نرم‌افزار مینی‌تب رسم شده را نشان می‌دهد. براساس شکل 9 افزایش جریان در سطوح پایین تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر افزایش استحکام اتصال دارد. مقدار این تأثیر در افزایش استحکام اتصال با افزایش جریان از 7.5 به 8.5 کیلوآمپر کمتر شده است.

5- مقاومت تسلیم اتصال جوش مقاومت نقطه‌ای وابسته به مقدار مقاومت تسلیم فلز پایه بوده و مقدار مقاومت تسلیم اتصال با کاهش مقدار مقاومت فلز پایه نیز کاهش می‌یابد.

5- فهرست علائم

H	انرژی گرمایی تولید شده (J)
T	زمان جوش کاری (Second)
I	شدت جریان الکتریکی (A)
t	ضخامت (mm)
D_{cr}	قطر بحرانی (mm)
R	مقاومت الکتریکی بین قطعات (Ω)

6- مراجع

- [1] J. Gould, S. Khurana, T. Li, Predictions of microstructures when welding automotive advanced high-strength steels, *Welding Journal New York*, Vol. 85, No. 5, pp. 111, 2006.
- [2] G. Speich, Physical metallurgy of dual-phase steels, *Proceedings of a Symposium Sponsored by the Heat Treatment Committee of the Metallurgical Society of AIME, and the Asm/Msd Structures Activity Committee at the 110th AIME Conference, Fundamentals of Dual-Phase Steels*, pp. 3-45, Chicago, February 23-24, 1981.
- [3] G. Krauss, *Principles of heat treatment of steel*, pp. 291, Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 1980.
- [4] H. Zhang, X. Qiu, F. Xing, J. Bai, J. Chen, Failure analysis of dissimilar thickness resistance spot welded joints in dual-phase steels during tensile shear test, *Materials & Design*, Vol. 55, pp. 366-372, 2014.
- [5] M. Safari, H. Mostaan, H. Y. Kh, D. Asgari, Effects of process parameters on tensile-shear strength and failure mode of resistance spot welds of AISI 201 stainless steel, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 89, No. 5, pp. 1-11, 2017.
- [6] T. K. Pal, K. Bhowmick, Resistance spot welding characteristics and high cycle fatigue behavior of DP 780 steel sheet, *Materials Engineering and Performance*, Vol. 21, No. 2, pp. 280-285, 2012.
- [7] M. Safari, H. Mostaan, Experimental investigation of the effects of process parameters on the strength of eutectoid steel (AISI 1075) sheet resistance spot welds, *Metallurgical Research & Technology*, Vol. 113, No. 3, pp. 305, 2016.
- [8] H. R. Rezaei Ashtiani, R. Zarandooz, M. Sohrabian, The numerical investigation of influence of electrode diameter on nugget diameter and thermal distribution in the resistance spot welding (RSW) of Inconel 625, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 8, pp. 116-124, 2015. (in Persian)
- [9] M. Seddighi, F. Nazari, D. Afshari, Investigation of welding parameters effect on Nugget size in resistance spot welding of Magnesium alloy, *Modelling Journals*, Vol. 14, No. 44, pp. 1-9, 2016. (in Persian)
- [10] B. Wang, L. Hua, X. Wang, Y. Song, Y. Liu, Effects of electrode tip morphology on resistance spot welding quality of DP590 dual-phase steel, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 83, No. 9-12, pp. 1917-1926, 2016.
- [11] M. Shariati, M. J. Maghrebi, An experimental investigation of initiation, propagation and the fatigue life of modified coach peel (MCP) spot weld specimens, *Applied Engineering Research*, Vol. 2, No. 4, pp. 637-657, 2007.
- [12] M. Shariati, M. J. Maghrebi, Experimental study of crack growth behavior and fatigue life of spot weld tensile-shear specimens, *Journal of applied science*, Vol. 9, No. 3, pp. 438-448, 2009.
- [13] P. Banerjee, R. Sarkar, T. Pal, M. Shome, Effect of nugget size and notch geometry on the high cycle fatigue performance of resistance spot welded DP590 steel sheets, *Materials Processing Technology*, Vol. 238, pp. 226-243, 2016.
- [14] G. Mukhopadhyay, S. Bhattacharya, K. Ray, Strength assessment of spot-welded sheets of interstitial free steels, *Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 4, pp. 1995-2007, 2009.
- [15] A. Bayram, A. Uğuz, M. Ula, Effects of microstructure and notches on the mechanical properties of dual-phase steels, *Materials Characterization*, Vol. 43, No. 4, pp. 259-269, 1999.
- [16] H. Lee, N. Kim, T. S. Lee, Overload failure curve and fatigue behavior of spot-welded specimens, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 72, No. 8, pp. 1203-1221, 2005.
- [17] C. Peng-Heng, A. Preban, The effect of ferrite grain size and martensite volume fraction on the tensile properties of dual phase steel, *Acta Metallurgica*, Vol. 33, No. 5, pp. 897-903, 1985.
- [18] S. Hansen, R. Pradhan, Structure-Property relationships and continuous yielding behavior in dual-phase steels, *Proceedings of a Symposium Sponsored by the Heat Treatment Committee of the Metallurgical Society of AIME, and the Asm/Msd Structures Activity Committee at the 110th AIME*

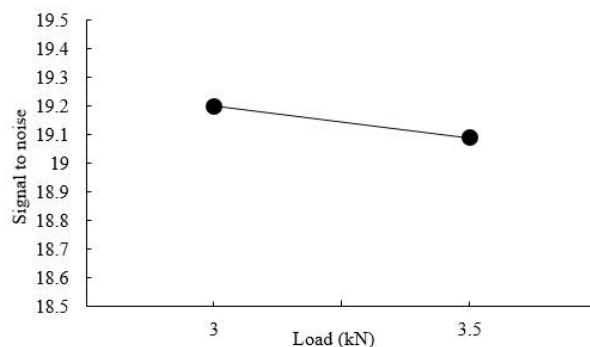


Fig. 11 Signal to noise ratio of load parameter

شکل 11 نسبت سیگنال به نویز پارامتر نیرو

ایجاد اتصال با شرایط آزمایش 4 با الکترودی به قطر 6 میلی‌متر و انجام تست کشش بر آن افزایشی در حدود 5% را بر مقاومت کششی اتصال نشان می‌دهد.

آزمایش 4 برای اتصال جوش داده شده از فولاد ST52-3 جهت بررسی تأثیر مقاومت فلز پایه بر استحکام کششی جوش مقاومت نقطه‌ای تکرار شد. نتیجه آزمایش کشش نشان داد که مقاومت کششی این اتصال 7.67kN بوده که به میزان 20% کمتر از نمونه مشابه جوش داده شده از فولاد دوفازی است. در واقع می‌توان نتیجه گرفت به دلیل این‌که شکست در منطقه متأثر از حرارت و در مجاورت فلز پایه اتفاق می‌افتد، مقاومت کششی فلز پایه تأثیر قابل توجهی بر استحکام جوش نقطه‌ای دارد و تغییر ساختار فریت-پرلیت به فریت-مارتنزیت سبب افزایش استحکام اتصال جوش مقاومت نقطه‌ای می‌شود.

4- نتیجه‌گیری

در این مقاله نشان داده شد که با انجام عملیات حرارتی آنیل میان بحرانی می‌توان ساختار فریت-پرلیت فولاد ST52-3 را به ساختار فریت-مارتنزیت تبدیل کرد و نوعی فولاد دوفازی تولید کرد. سپس در این تحقیق به مطالعه ریزساختار و سختی و مقاومت کششی اتصال جوش مقاومت نقطه‌ای فولاد دوفازی و تأثیر پارامترهای جریان، زمان و نیروی الکتروود دستگاه جوش مقاومت نقطه‌ای پرداخته شده که نتایج زیر حاصل گردید:

- 1- ساختار فولاد از فریت-پرلیت با انجام عملیات حرارتی آنیل میان بحرانی بر فولاد ST52-3 و کوپینگ کردن آن در محلول آب نمک به فریت-مارتنزیت تغییر می‌یابد و مقدار مقاومت کششی فولاد دوفازی فریت-مارتنزیت به میزان 37% بیشتر از فولاد ST52-3 می‌شود.
- 2- سختی ناحیه‌ی جوش در فولاد دوفازی متغیر است و در منطقه متأثر از حرارت و در مجاورت فلز پایه کمترین مقدار را دارد. سختی در منطقه متأثر از حرارت و در مجاورت دکمه‌ی جوش بیشینه است.
- 3- شکست کششی در نمونه‌ها بیشتر در مود محیطی و همراه با پارگی ورق در منطقه‌ای با کمترین سختی اتفاق می‌افتد.
- 4- مقدار شدت جریان الکتریکی دستگاه نقطه‌جوش بیشترین تأثیر را بر مقاومت کششی جوش نقطه‌ای دارد و تا جریان 8.5 کیلوآمپر سبب افزایش مقدار مقاومت شده و با افزایش بیشتر جریان مقدار مقاومت کششی اتصال کاهش می‌یابد. تأثیر زمان و فشار جوش کاری بر مقاومت کششی اتصال کمتر بوده و افزایش زمان سبب افزایش مقاومت کششی، ولی افزایش فشار باعث کاهش مقاومت کششی اتصال می‌شود.

- [20] S. Dancette, V. Massardier-Jourdan, D. Fabrègue, J. Merlin, T. Dupuy, M. Bouzekri, HAZ microstructures and local mechanical properties of high strength steels resistance spot welds, *the iron and steel institute of japan International*, Vol. 51, No. 1, pp. 99-107, 2011.
- [21] M. Marya, X. Gayden, Development of requirements for resistance spot welding dual-phase (DP600) steels Part 1: The causes of interfacial fracture, *Welding Journal*, Vol. 84, No. 11, pp. 172-182, 2005.

- Conference, Fundamentals of Dual-Phase Steels*, pp. 113-144, Chicago, February 23-24, 1981.
- [19] S. Dancette, D. Fabrègue, V. Massardier, J. Merlin, T. Dupuy, M. Bouzekri, Experimental and modeling investigation of the failure resistance of advanced high strength steels spot welds, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 78, No. 10, pp. 2259-2272, 2011.