ماهنامه علمى پژوهشى





mme.modares.ac.ir

تحلیل تجربی اثر یارامترهای جوش مقاومت نقطهای بر رفتار کششی اتصالات فولاد دوفازی فریت- مارتنزیت به روش آماری تا گوچی

حميدرضا قنبري¹، محمود شيريعتي²*

1- دانشجوی کارشناسیارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

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

* مشهد، صندوق يستى 9177948944 wm.ac.ir هشهد، صندوق يستى

اطلاعات مقاله	چکیدہ
مقاله پژوهشی کامل دریافت: 27 بهمن 1395 پذیرش: 27 اردیبهشت 1396 ارائه در سایت: ۲۰ تیر ۱۳۹۶	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 اَماری تاگوچی انجام گرفته و با توجه به تعداد پارامترها و عوامل مورد بررسی اَرایهی L8 انتخاب شده است. پارامترهایی که در
<i>کلید واژگان:</i> جوش مقاومت نقطهای دکمهی جوش فولاد دوفازی تاگوچی	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 می گیرد. برای پیش بینی پارامترهای بهینه جوش کاری مقاومت نقطهای از نسبت سیگنال به نویز در روش آماری تاگوچی استفاده می شود. عموماً دو نوع شکست فصل مشترکی و شکست محیطی در جوش های مقاومت نقطهای مشاهده می شود. نتایج آزمایش نشان می دهد با افزایش قطر دکمه جوش، شکست به نوع محیطی و محیطی همراه با پارگی ورق تمایل بیشتری پیدا می کند. نتایج روش آماری تاگوچی نیز نشان می دهد که تأثیر پارامتر جریان دستگاه جوش بر استحکام کششی نقطه جوش نسبت به سایر پارامترها بیشتر بوده و با افزایش
	سد جزین این نامبر نداری نمبر می شود، همچنین نصویربرداری به وسینه میدوسدوپ انگیرونی از ناخیه جوس و سطوح شخست انجام نرفته است که نتایج، شکست نرم را در مود محنطی و شکست ترد را در مود فصل مشته که رنشان مردهد.

Experimental analysis of spot welded parameters on tensile behavior of ferritemartensite 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

ABSTRACT In this paper, we show how Ferrite- martensite steel is produced by annealing operation, meanwhile Original Research Paper Received 15 February 2017 tensile behavior of resistance spot weld and the effects of the resistance spot welding parameter and Accepted 17 May 2017 tensile failure modes in this type of steel will be examined. Design experiments were done by Taguchi Available Online YY June 2017 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 Keywords: current through the electrodes and the pressure which here is considered as factors affecting the Resistance spot weld operation and tensile strength welded factor is examined as a test answer. In order to predict the optimal Weld nugget parameters of the resistance spot welding, signal to noise ratio is used in Taguchi statistical method. Dual phase steel 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

دارد. از این رو این نوع اتصال به طور گستردهای جهت اتصال اجزای بدنه و

شاسی خودروها در صنعت اتومبیل سازی استفاده می شود. همچنین درسال های اخیر جهت کاهش وزن خودرو و افزایش ایمنی سرنشینان، کاربرد فولادهای دوفازی^۱ که دارای استحکام و شکلیذیری 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 نشتیناپذیری ندارند با جوشکاری مقاومت نقطهای، صرفه اقتصادی بیشتری نسبت به سایر روشهای اتصال مکانیکی

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

1- مقدمه

Taguchi

زمان خنکشدن جوش را بر رفتار کششی جوش مقاومت نقطهای فولاد

پركربن ASI 1075 بررسى كردند. نتايج آنها نشان داد با افزايش زمان و

جریان جوش کاری مقاومت کششی اتصال افزایش می یابد و با افزایش نیروی

الكترود و زمان خنك شدن مقاومت كششى كاهش مى يابد [7]. آشتيانى و

همکارانش نیز تأثیر قطر الکترود بر توزیع دمایی فرایند و شکل گیری 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 نتايج تجربي، مدل ارائه شده مي تواند با دقت قابل قبولي توزيع دما و

ابعاد دكمه جوش را پیشبینی كند [8]. صدیقی و همكاران نیز نشان دادند با

افزایش شدت جریان و زمان اعمال جریان در جوش کاری مقاومتی نقطهای

آلياژهای منيزيم اندازه دکمه جوش افزايش می يابد، همچنين نيروی 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 کیفییت

آن بررسی کردند و نشان دادند شکل هندسی نوک الکترود بر اندازه و شکل

دكمه جوش تأثير گذار است [10]. شريعتي و مغربي اثر تغيير 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 می شود و ورق نازکتر دچار شکست می شود. آن ها در تحقیقی

ديگر بر اتصالات كششى- برشى نشان دادند كه اگر به ورق ها بار بيش از حد

اعمال شود بدون آن که 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

شكل پلاستيك و در نهايت شكست نهايى در فلز مقاومتر (DP780) اتفاق

میافتد و در فلز ضعیفتر (DP600) فقط پدیده گلویی شدن^۷ 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 می شوند و عمر خستگی در بارگذاری با

نيروى پايين به شكل هندسي ناچ وابسته است [13]. نتايج مشابه در تحقيقي

دیگر که بر فولادهای کم کربن انجام شده به صورت روابط (2,1) بهدست

در این مقاله ضمن ساخت ورق فولاد دوفازی توسط عملیات حرارتی

آنیل^ میان بحرانی، آزمایشات کشش- برش توسط روش آماری تاگوچی

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 مى شود [1].

تحقیق بر فولادهای دوفازی با کار هیامی و فوراکاوا در سال 1975 و رشيد در سال 1976 آغاز شده است [2]. هيامي و فوروكاوا نشان دادند كه آنیل پیوسته فولادهای ورق منیزم- سیلیسیم نورد سردشده در محدوده دمایی میان بحرانی، فولادهایی با ریزساختار فریت- مارتنزیت^۱ تولید می کند که به دلیل حضور ذرات سخت مارتنزیت در فاز انعطاف پذیر فریت، انعطاف پذیری بیشتری نسبت به فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا^۲ دارند. رشيد نيز نشان داد كه عمليات حرارتي ميان بحراني فولاد كم آلياژ استحكام بالا برای تولید ریزساختارهای فریت- مارتنزیت منجر به افزایش انعطاف پذیری بدون تغییر در استحکام کششی می شود. رشید برای این که 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 جوش پذیری 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 مشتركي[†] و شكست محيطي⁶ [5,4]. در مود شكست فصل مشتركي، شکست از طریق اشاعه ترک از میان دکمه جوش صورت می گیرد و در مود شکست محیطی، شکست با بیرون کشیده شدن کامل دکمه جوش از یک ورق صورت می گیرد. مود شکست محیطی به دلیل تغییر شکل پلاستیک و قابلیت جذب انرژی بالای همراه با آن، مود شکست ترجیحی است. شكست فصل مشتركي موجب كاهش شديد قابليت اعتماد به خودرو در شرایط تصادف می شود؛ بنابراین برای این که جوش های 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. مهم ترین عامل در استحکام یک جوش مقاومت نقطه ای اندازه دکمه جوش⁹است. اگر قطر دکمه جوش از حد معینی کوچکتر باشد، معمولا شکست فصل مشترکی رخ میدهد و با افزایش اندازه قطر دکمه جوش شکست به سمت مود محیطی متمایل می شود [4]. امروزه در صنعت اتومبیلسازی قطر بهینه دکمه جوش براساس رابطه (1) محاسبه می شود و برای اطمینان بیشتر از حصول شکست مود محیطی در فولادهای دوفازی از رابطه (2) نيز استفاده مي شود [6]. صفري و همكارانش اثر جريان 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 جوشکاری مقاومت کششی اتصال افزایش می یابد، همچنین نتایج حاصل از مدل سازی 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

آمده است [14].

شده است که مقایسه می شود.

2- روش تحقيق

(1)

(2)

 $D_{cr} = 4\sqrt{t}$

 $D_{cr} = 5\sqrt{t}$

Ferrite-Martensite

High strength low alloy (HSLA) Resistance spot weld

Interfacial fracture

Pullout fracture

⁶ Weld nugget

طراحی شده و اثر پارامترهای زمان، جریان و فشار دستگاه جوش مقاومت نقطهای بر مقاومت کششی این نوع فولادها بررسی می شود. اثر قطر الکترود بر استحكام اتصال نيز بررسي شده است. مقاومت كششي يك نمونه اتصال از فولاد دوفازی شده با نمونه مشابه آن که از فولاد ST52-3 به هم جوش داده 7 Necking 8 Annealing

1-2- ساخت فولاد دوفازی

در این تحقیق جهت تولید فولاد دوفازی فریت- ماتنزیت ورق فولادی ST52-3 که دارای ریز ساختار فریت- پرلیت^۱ است به ابعاد 11[.]3 سانتیمتر و ضخامت 0.9 میلیمتر تحت عملیات حرارتی آنیل میان بحرانی قرار گرفته است. جدول 1 عناصر تشكيل دهنده اين نوع فولاد را نشان مىدهد.

در روش آنیل میان بحرانی نمونه مورد نظر تا محدوده ناحیه دوفازی فریتی- آستنیتی^۲ در نمودار فازی آهن-کربن، حرارت داده می شود و برای مدت زمان معینی در آن دما نگه داشته می شود، سپس نمونه ها از دمای آنیل میان بحرانی در محلول آب سرد و 10٪ نمک سریع سرد میشوند. آستنیت موجود در ناحیه دوفازی به فاز مارتنزیت تبدیل می شود و درنهایت 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- طراحي آزمايشها به روش تاگوچي

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 میشد، 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 ارتوگونال^۳ استفاده می شود. 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 نویز^۴ را توصیه می کند. نسبت سیگنال به نویز نشان دهنده حساسیت مشخصه کیفی مورد بررسی به عوامل خارجی اثرگذار و غیرقابل کنترل در یک فرآیند کنترلشده است. در روش تاگوچی از این مفهوم برای بهدست آوردن شرایط بهینه در آزمایشات استفاده می شود. 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 يارامترهاي غيرقابل كنترل است. طراحي فرآيند با بالاترين نسبت سيگنال به نویز همواره سبب ایجاد بهترین کیفیت با حداقل واریانس است.

در این پژوهش اثر سه عامل شدت جریان، زمان جوشکاری و نیروی اعمالی بر مقاومت کششی اتصال بررسی شده است. با توجه به این که 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 مینی تب⁴ آرایه ارتوگونال L8 برای طراحی آزمایشها انتخاب میشود.

مقادیر سطوح برای پارامترها در جدول 2 آورده شده و جدول 3 نیز مربوط به طراحي آزمايش هاست.

3-2- فرايند جوشكاري مقاومت نقطهاي

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

 $H = RI^2T$

در جوشکاری مقاومتی فشار بر مقاومت تماس تأثیر دارد و سبب می شود که بتوان جوش کاری را در دمای پایین تری انجام داد. از این رو کنترل اندازه و زمان آن بسیار اهمیت دارد. اگر فشار خیلی کم باشد، مقاومت تماس بالا رفته و سطح تماس الكترودها سوخته و خال مىافتد. از طرفى فشار خيلى زياد سبب ايجاد محلهاي تمركز تنش مي شود [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 الکترود بر مقاومت کششی در آزمایش 4 ساخته شده است.

4-2- بررسی های ریزساختار و سختی سنجی

(3)

مراحل آمادهسازی نمونه جهت مشاهده ریز ساختار با میکروسکوپ شامل مانت⁶ کردن نمونه، سنبادهزنی، صیقلی کردن، اچ کردن^۷ و درنهایت بررسی میکروسکوپی است. نمونهها پس از مانت کردن و سنبادهزنی و صیقلی کردن توسط محلول های نایتال^ % 2 و یا محلول لپرا اچشده 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 می شود. تصویر برداری SEM از سطوح شکست برای مشاهده سطوح شکست انجام گرفته است.

آزمون سختی سنجی نیز با استفاده از دستگاه بیوهلر^{۱۰} با نیروی 500 گرم در مدت زمان 15 ثانیه برای تعیین سختی ویکرز^{۱۱} فلز پایه، پیش و پس از عمليات حرارتي انجام شده است. به منظور تعيين سختي دكمه جوش و ناحیه متأثر از حرارت سختیسنجی ویکرز در راستای محدوده جوش داده شده صورت گرفته است.

DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.6.37.7]

Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-28

درجوش کاری مقاومتی برای برقراری اتصال از فشار و ایجاد حرارت استفاده می شود. حرارت به دلیل مقاومت قطعات کار و تماس آن ها در فصل مشترک درمقابل عبور جریان برق بهوجود میآید. فشار مشخصی برای نگهداشتن دو قطعه كار بر آنها اعمال و به اين ترتيب مقاومت الكتريكي محل فصل مشترک نیز کنترل می شود. دمای لازم برای اتصال به دلیل این که در این نوع جوشکاری از فشار استفاده میشود پایینتر از دمای جوشکاری 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، جوشکاری 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 می رود.

⁶ Mount Etching

⁸ Nital

⁹ Lepera Buehler

¹¹ Vickers hardness

Ferrite-Pearlite

Ferrite-Austenite

Orthogonal array Signal to noise

⁵ Minitab

جدول 1 عناصر تشكيل دهنده فولاد ST52-3

چندین عملیات حرارتی در دما و زمانهای مختلف برای دستیابی به فولادی

با درصد مارتنزیت کمتر از 20% انجام گرفت. ابتدا در دمای 720 و زمان 15 دقيقه عمليات حرارتي انجام شد، پس از مشاهده ريزساختار ملاحظه شد که ساختار دانههای ماتنزیت تشکیل نشده است. با افزایش دما تا °735C و قرار دادن نمونه در کوره به مدت 15 دقیقه در ساختاری که پس از کویینچ كردن به دست آمد مشاهده شد كه فاز مارتنزیت به خوبی شكل نگرفته و

ذرات کروی سمنتیت^۳ در فاز مارتنزیت قابل مشاهده بود و ماده دارای ساختاری بایمدال $^{\circ}$ شده بود. سپس عملیات حرارتی در دمای $^{\circ}780$ و به مدت 40 دقيقه انجام گرفت كه پس از مشاهده ريز ساختار توسط میکروسکپ نوری و تعیین درصد فاز مارتنزیت توسط نرمافزارMIP، درصد این بیش از حد بود و دانههای مارتنزیت به هم پیوسته بودند که منجر به تردی زیاد نمونه می شود [17]. درنهایت با نگهداری نمونه ها در کوره با دمای 745C° به مدت 25 دقیقه و سپس کوینچکردن 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

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

كششى فولاد پس از عمليات آنيل ميان بحراني داراي تسليم پيوسته است و

نوارهای لودر^۵ که موجب نایکنواختی در رفتار تغییر شکل فولاد ST52-3

می شود. در منحنی تنش-کرنش فولاد دوفازی شده دیده نمی شود. می توان

بیان کرد این رفتار پیوسته در تغییر شکل فولاد دوفازی به دلیل وجود

نابهجاییهای^۶ متحرک با چگالی بالا در ساختار این نوع از فولادهاست [18].

585MPa است که پس انجام عملیات حرارتی آنیل میان بحرانی و به دلیل

وجود ذرات سخت مارتنزیت در زمینه نرم فریتی در فولاد دوفازی شده، این

با انجام آزمایش کشش مشخص شد مقدار تنش تسلیم در فولاد اولیه

حميدرضا قنبرى و محمود شريعتى

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

را نشان میدهد.

2-3- خواص کششی فلز پایه

شکل 2ریز ساختار فولاد ST52-3

جدول 2 مقادیر سطوح پارامترهای دستگاه جوش نقطهای

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

جدول 3 طراحی آزمایش به روش تاگوچی

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

5-2- آزمون کشش

شکل 1 ابعاد نمونه های ساخته شده جهت آزمون کشش برش را نشان مىدهد. آزمون كشش برش توسط دستگاه زوئيك/ روئل 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 مىشود.

3- نتايج و مباحث

1-3- عمليات حرارتي و بررسي ريزساختار فلز پايه

در این تحقیق ابتدا ساختار فلز پایه پیش از عملیات حرارتی بررسی شد. نمونه پس از مانت 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 3-ST52 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 پرليت 14% و فريت 86% پس از بررسي درصد فازهاي 10 نمونه و میانگین گیری از مقادیر آنها به دست آمد.



شكل 1 ابعاد نمونه آزمون كشش



⁴ Bimodal microstructure

340

Fig. 2 Microstructure of ST52-3

	-
	-
	ĽJ
	5
	1
	1
- i	- Colorest

¹ Zwick/Roell

Lyders band

⁶ Dislocations





دوفازی مشاهده می شود. مناطقی از منطقه متأثر از حرارت که در مجاورت دکمه جوش قرار دارند تحت تأثیر حرارت جوشکاری با افزایش دما به مقدار قابل توجه مواجه مىشوند. اين افزايش دما تا حدى است كه كل زمينه 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 می شود. این ریز ساختار سبب افزایش قابل ملاحظه سختی در این منطقه مىشود. سختى اين منطقه تا 470 ويكرز هم مىرسد. درجه حرارت جوش کاری در مناطق دورتر و در مجاورت فلز پایه کمتر از درجه حرارت آستنیته شدن است [20,19]. در این مناطق ریزساختار پس از اتصال از فریت و مارتنزیت برگشت یافته^۳ تشکیل شده است. بازگشت مارتنزیت در این منطقه موجب كاهش استحكام و سختى فلز و افزايش شكل پذيرى آن می شود. این منطقه منطقه نرم شده نام دارد و در تمامی اتصالات ایجاد می شود. سختی این منطقه از فلز پایه کمی کمتر بوده و در حدود 244 ویکرز است. این منطقه عامل ضعف جوشکاری نقطهای فولاد دوفازی و در بیشتر موارد محل شکست نمونه ها در آزمون کشش- برش همین منطقه است.

3-3-3- دكمەي جوش

فصل مشترک دو ورق هنگام برقراری جریان برق در الکترودها به سرعت گرم شده و ذوب می شود. با قطع شدن جریان برق و در اثر تماس با الکترودهای آبگرد مسی دستگاه جوش، منطقه اتصال به سرعت سرد می شود. سرعت سرد شدن در فرآیند جوشکاری مقاومتی نقط ای 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 °s (2000 سرد می شود [19]. شکل 6 تصویر میکروسکوپ نوری از ریز ساختار دکمه جوش و ناحیه اطراف آن را نشان می دوسد. ریز ساختار دکمه جوش و ناحیه اطراف آن را نشان



Fig. 3 Microstucture of dual phase steel

شکل 3ریز ساختار فولاد دوفازیشده



Fig. 4 Stress-strain diagram of ST52-3 and dual phase steel شکل **4** نمودار تنش-کرنش فولاد 3-ST52 و فولاد دوفازی شده

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

3-3- ماكروسختي 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 اینکه پروفیل سختی معیاری برای تغییرات خواص مکانیکی در امتـداد محل اتصال و سختی هر نقطه تابع ریزساختار آن نقطه است از لحاظ ساختاری محل اتصال را میتوان به 3 ناحیه فلزپایه^۱، منطقه متأثر از حرارت^۲ و دکمه جوش تقسیم کرد.

1-3-3– فلز پا يه

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 اچکردن 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 جوشکاری نقطهای فولاد

DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.6.37.7

³ Tempering martensite

¹ Base metal

² Heat affected zone (HAZ)

فریت ویدمن اشتاتن^۱ و بینیت^۲ 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.

4-3- 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. همان طور 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. همان گونه که در شکل 7-الف ملاحظه میشود، تغییر در سطح مقطع فلز و گلویی شدن در ناحیه مجاور دکمه جوش اتفاق میافتد.

شکل 7-ب تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع شکست محیطی را نشان میدهد. همان گونه که در شکل 7-ب مشاهده میشود، در سطح شکست دیمپلهای^۳ 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. همان گونه که ملاحظه می شود 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 می آید. از طرفی می دانیم 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



Fig. 7 a) Macro structure of pullout fracture after tensile test of fourth sample tested. b) SEM image of pullout faliure surface شكل 7 الف- ماكروساختار اتصال پس از شكست محيطي در آزمايش ۴، ب- تصوير SEM از سطح شكست در مود محيطي

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 ارئه شده است [21]. همان طور که در شکل 8-ب مشاهده میشود، ساختار دندریتی[†] 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 نشان دهنده 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 تره 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.

5-3- 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 تحليل تاگوچی بيشينه کردن مقدار استحکام تسليم است؛

¹ Widmanstatten ferrite

² Bainite ³ Dimpels

⁴ Dendrites



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 B 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 بیشینه 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 مینی تب 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.

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 در استحكام اتصال نمونههای ساخته شده را می توان به تغییرات میزان استحكام 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 می شود. افزایش شدت جریان و زمان جوشکاری سبب افزایش میزان حرارت تولید شده می شود. افزایش فشار (افزایش نیرو در الکترودها) باعث کاهش مقاومت تماسی بین دو فلز و کم شدن مقدار حرارت تولید شده می گردد. 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 strenght and weld nugget diameter of samples in taguchi method



Fig. 10 Signal to noise ratio of time parameter شکل 10 نسبت سیگنال به نویز پارامتر زمان



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 3-ST52 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 این که 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- نتیجه گیری

در این مقاله نشان داده شد که با انجام عملیات حرارتی آنیل میان بحرانی میتوان ساختار فریت- پرلیت فولاد 3-ST52 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 الکترود 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 3-ST52 و کویینچ 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 3-ST52 می شود.
- 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 منطقه ی با کمترین سختی اتفاق می افتد.
- 4- مقدار شدت جریان الکتریکی دستگاه نقطه جوش بیشترین تأثیر را بر مقاومت کششی جوش نقطه ای دارد و تا جریان 8.5 کیلوآمپر سبب افزایش مقدار مقاومت شده و با افزایش بیشتر جریان مقدار مقاومت کششی اتصال کاهش می یابد. 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 می شود.

5- مقاومت تسليم اتصال جوش مقاومت نقطه اى وابسته به مقدار مقاومت تسليم فلز پايه بوده و مقدار مقاومت تسليم اتصال با كاهش مقدار مقاومت فلز پايه نيز كاهش مى يابد.

H انرژی گرمایی تولید شده (J)

(Second) زمان جوش کاری (Second)
 ۲ شدت جریان الکتریکی (A)

-خامت (mm)

(
$$\Omega$$
) مقاومت الكتريكي بين قطعات (R

6- مراجع

- 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 Ashtiani1, R. Zarandooz1, M. Sohrabian, The numerical investigation of influence of electrode diameteron 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, فارسی)
- [9] M. Seddighi, F. Nazari, D. Afshari, Investigation of welding parameters effect on Nuget size in resistance spot welding of Magnesium alloy, *Modelling Journals*, Vol. 14, No. 44, pp. 1-9, 2016. (in persian (فارسی))
- [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 spotwelded 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

DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.6.37.7

حميدرضا قنبرى و محمود شريعتى

- [20] S. Dancette, V. Massardier-Jourdan, D. Fabrègue, J. Merlin, T. Dupuy, M. [20] S. Dancette, V. Massardier-Jourdan, D. Fabregue, J. Merlin, I. 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.