E-ISSN: 2676-6787 | P-ISSN: 2476-583X

Journal of
Welding Science and Technology of Iran
jwsti.iut.ac.ir

Volume 10, Number 1, 2024



Investigating microstructure and mechanical properties of dissimilar resistance spot welding of AISI 430 to S500 MC

A. R. Nazari, A. Taherizadeh*, M. Atapour
Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan 84156-83111, Iran.

Received 12 December 2023 ; Accepted 17 February 2024

Abstract

In this study, the microstructure and mechanical properties of dissimilar resistance spot welding of AISI 430 steel and S500 MC steel were investigated. To carry out this research, Taguchi's L9 array was used to determine the number of samples and determine the range of variables of each sample, and after welding the samples and performing the shear tensile test, the sample with the highest tensile shear strength (13740 N) and the highest amount of fracture energy (102160 Joules), was considered as the best example; Also, the variables of this sample, i.e., welding current of 12 kW, welding time of 12 cycles, and electrode force of 3 kN, had the highest signal-to-noise values, and these values were chosen among the best range of variables among the proposed variables. Then, a microhardness test was performed on the welded sample with the above variables, and microstructural studies were performed by optical microscope and scanning electron microscope. The hardness of the weld zone was observed to be about 400 Vickers, and the microstructure of the weld metal consisted of ferrite, martensite, and Widmannstatten ferrite.

Keywords:Resistance Spot Welding, AISI 430, S500 MC Steel.

*Corresponding Author: A. Taherizadeh, a.taheri@iut.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.15]

شاپا: 2476-583X | شاپا الکترونیکی: 2676-6787

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال دهم، شماره1، بهار و تابستان 1403

بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیرمشابه به روش جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی فولاد AISI 430 به فولاد خودرویی S500 MC

احمدرضا نظری، ابوذر طاهری زاده*، مسعود عطاپور

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، کدپستی83111-84156، اصفهان، ایران.

دریافت مقاله: 1402/09/21 ؛ پذیرش مقاله: 1402/11/28

چکیده

در این مطالعه به بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیرمشابه جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی فولاد AISI 430 و فولاد S500 MC پرداخته شد. برای انجام این پژوهش از آرایه L9 تاگوچی برای مشخص شدن تعداد نمونه‌ها و تعیین محدوده متغیرهای هر نمونه استفاده شد و پس از جوشکاری نمونه‌ها و انجام آزمون کشش برشی، نمونه‌ای که دارای بیشترین استحکام کشش برشی(13740 نیوتن) و بیشترین مقدار انرژی شکست(102160ژول) بود، به عنوان بهترین نمونه در نظر گرفته شد؛ همچنین متغیرهای این نمونه یعنی جریان جوشکاری 12 کیلووات، زمان جوشکاری 12 سیکل و نیروی الکترود 3 کیلو نیوتن دارای بیشترین مقادیر سیگنال به نویز بودند و این مقادیر جز بهترین محدوده متغیرها در بین متغیرهای پیشنهادی انتخاب شدند. سپس بر روی نمونه جوشکاری شده با متغیرهای فوق، آزمون میکروسختی انجام شد و مطالعات ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شدند. سختی ناحیه جوش حدود 400 ویکرز مشاهده شد و ریزساختار فلزجوش از فریت، مارتنزیت و فریت ویدمن اشتاتن تشکیل شده بود.

کلمات کلیدی: جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی، فولاد AISI 430، فولاد S500 MC.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: ابوذر طاهری زاده، a.taheri@iut.ac.ir

1- مقدمه

امروزه به علت رخ دادن تصادفات جاده‌ای و در پی آن فوت بیشمار انسان‌ها و آلودگی هوا که یکی از بزرگ‌ترین معضلات زیست محیطی است، خودروسازها مجبور به افزایش ایمنی خودروها و کاهش مصرف سوخت آن‌ها هستند. مشخص شده است که کاهش 10 درصدی وزن خودرو منجر به کاهش 68 درصدی مصرف سوخت خودروها خواهد شد. یکی از راه‌های کاهش وزن خودرو و افزایش همزمان ایمنی خودروها، استفاده از فولادها با نسبت استحکام به وزن بالا است. این فولادها تحت عنوان فولادهای پیشرفته با استحکام بالا شناخته می‌شوند. یکی از مهم‌ترین فرایندهایی که در ساخت خودروها مورد استفاده قرار می‌گیرد، فرایند جوشکاری است که تا 40 درصد بر کیفیت خودرو تأثیر می‌گذارد[1].

در صنعت خودروسازی، به دلیل اینکه فرایند جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی روشی آسان برای سیستم‌های تحت اتوماسیون است و با استفاده از ربات‌ها امکان جوشکاری سریع‌تر و دقیق‌تر فراهم می‌شود، رایج‌ترین روش جوشکاری در این صنعت است. متناسب با اندازه و ابعاد خودروها حدود 2000 تا

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.15]

5000 نقطه جوش در خودروها وجود دارد[2]. پارامترهای فرایند جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی به طور کلی عبارتند از: جریان جوشکاری، زمان جوشکاری، نیروی الکترود، جنس الکترود، شکل الکترود، قطر الکترود، زمان فشار و زمان نگهداری هستند. در فرایند جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی مهمترین پارامترهایی که بر ریزساختار و استحکام اتصال تاثیرگذار هستند شامل جریان جوشکاری، زمان جوشکاری و نیروی الکترود هستند[3و4].

با افزایش جریان جوشکاری و زمان جوشکاری مطابق با قانون ژول ($Q = RI^2t$) به دلیل افزایش حرارت ورودی به ناحیه جوش، استحکام کشش برشی و سختی اتصال افزایش پیدا می‌کند. ذکر این نکته حائز اهمیت است که افزایش جریان جوشکاری نسبت به زمان جوشکاری تاثیر بیشتری بر استحکام و سختی اتصال دارد. البته افزایش زیاد متغیرهای جریان و زمان جوشکاری، منجر به بازپخت فازهای سخت مانند مارتنزیت شده و سختی اتصال را کاهش می‌دهد. با افزایش نیروی الکترود، فاز آستنیت تبدیل شده به مارتنزیت متراکم‌تر می‌شود و سختی منطقه جوش افزایش می‌یابد؛ همچنین افزایش نیروی الکترود باعث افزایش قطر و عرض منطقه جوش و افزایش فرورفتگی الکترود در قطعه خواهد شد[5-7].

نتایج مطالعه سلیمی بنی و همکاران [8] درباره بررسی ریزساختار، خواص مکانیکی و حالت شکست جوش‌های نقطه‌ای مقاومتی فولاد گالوانیزه IF نشان می‌دهد که با افزایش حرارت ورودی در اثر افزایش جریان و زمان جوشکاری فازمارتنزیت موجود در منطقه جوش کاهش یافته و سختی اتصال کاهش می‌یابد؛ همچنین مشاهده شد که در اثر افزایش این دو پارامتر، قطر منطقه جوش افزایش یافته است. در بررسی تاثیر پارامترهای فرایند جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی بر روی سختی و استحکام فولادهای DP600 و DP800، آیدین و همکاران [9] به این نتیجه رسیدند که با افزایش جریان جوشکاری، استحکام کشش برشی زیاد شده و سختی ناحیه متاثر از حرارت در سمت فولاد دو فازی DP800 بیشتر از سختی ناحیه متاثر از حرارت فولاد DP600 است. مطالعات ژائو و همکاران[10] نشان می‌دهد که استفاده از نیروی الکترود مختلف، اندازه منطقه جوش متفاوتی را حاصل می‌کند و یک نیروی الکترود بحرانی وجود دارد که با آن اندازه منطقه جوش و خواص مکانیکی اتصال جوش داده شده می‌تواند به حداکثر میزان خود برسد.

در این پژوهش از دو فولاد S500 MC و فولاد AISI 430 استفاده می‌شود. فولاد خودرویی S500 MC فولادی نورد سرد شده است که دارای استحکام بالایی است. کاربرد این فولاد در ستون‌های بدنه اتومبیل و شاسی خودروها است. فولاد AISI 430 به طور گسترده در قطعات اگزوز و قطعات تزیینی خودرو کاربرد دارد و یک عضو جدایی ناپذیر در صنعت خودرو به دلیل خواص فوق العاده مقاومت به خوردگی با توجه به میزان بالای کروم آن است[11-13].علیزاده و همکاران[14] به بررسی جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی فولاد AISI 430 به ضخامت 1/2 میلی‌متر پرداختند و آن‌ها در این مطالعه بر روی ریزساختار قطعه جوشکاری شده، رفتار شکست و خواص مکانیکی اتصال متمرکز شدند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که ناحیه متاثر از حرارت قطعه جوشکاری شده از سه ناحیه تشکیل شده است. این نواحی شامل ناحیه متاثر از حرارت دما بالا، ناحیه متاثر از حرارت دما متوسط و ناحیه متاثر از حرارت دما پایین هستند؛ همچنین با افزایش جریان جوشکاری اندازه ناحیه جوش افزایش یافته و رابطه بین جریان جوشکاری و خواص مکانیکی جوش از نظر نیروی اعمالی و انرژی شکست بررسی شد. با افزایش ناحیه جوش، انرژی شکست و میزان نیروی اعمالی افزایش می‌یابد. بینا و همکاران[15و16] به بررسی تاثیر جریان جوشکاری و زمان جوشکاری بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیرمشابه جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی فولادهای AISI 430 و AISI 304 پرداختند. ریزساختار ناحیه جوش شامل آستنیت، مارتنزیت و فریت دلتا بود. افزایش جریان و زمان جوشکاری باعث درشت شدن فلزجوش و ناحیه متاثر از حرارت شد. در جریان و زمان جوشکاری کم، حالت شکست قطعات به صورت فصل مشترکی است و در مقادیر بالاتر جریان و زمان جوشکاری،

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.15]

حالت شکست به صورت محیطی است.

بادکوبه و همکاران[17] بر روی تحولات فازی و خواص مکانیکی اتصال غیرمشابه فولاد AISI 430 و فولاد AISI 321 به روش جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند که ریزساختار فلزجوش از فازهای فریت، مارتنزیت و آستنیت تشکیل شده است. ریزساختار ناحیه متاثر از حرارت فولاد AISI 430 از دانه‌های بزرگ فریت و مارتنزیت موجود در مرزدانه‌ها تشکیل شده بود و ناحیه متاثر از حرارت فولاد AISI 321 از دانه‌های بزرگ آستنیت به همراه دوقلویی‌ها تشکیل شده بود. ژانگ و همکاران[18] در بررسی اتصال مشابه فولاد AISI 304 به فولاد AISI 304، فولاد AISI 430 به فولاد AISI 430 و اتصال غیرمشابه فولاد AISI 430 به AISI 304 و مقایسه آن‌ها با یکدیگر متوجه شدند که اتصال غیرمشابه فولاد AISI 430 به فولاد AISI 304 دارای ریزساختار قوی‌تری شامل دانه‌های فریت ستونی، آستنیت و مارتنزیت است. حضور مارتنزیت در مرزدانه‌ها باعث ایجاد سختی به نسبت برابری، مشابه اتصال فولاد AISI 430 به فولاد AISI 430 می‌شود. از طرفی چقرمگی شکست اتصال غیرمشابه فولاد AISI 430 به فولاد AISI 304 بیشتر از اتصال مشابه فولاد AISI 430 به AISI 430 است. اتصال فولاد AISI 304 به فولاد AISI 430 به دلیل سختی بیشتر و چقرمگی شکست بالاتر، تمایل بیشتری به شکست محیطی دارد و احتمال شکست به صورت فصل مشترکی بسیار کم است. راویچاندران و همکاران [19] به بررسی اتصال غیرمشابه فولاد AISI 430 به فولاد 1080 پرداختند. آن‌ها تلاش کردند مقدار بهینه پارامترهای فرایند جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی را برای این اتصال غیرمشابه محاسبه کنند، در نهایت نتایج آن‌ها نشان می‌دهد مقدار بهینه پارامترها برای این اتصال غیرمشابه به شرح زیر است:

جریان جوشکاری 8 کیلو وات، زمان فشار 14/75 سیکل و زمان جوشکاری6/3 سیکل(هر سیکل 0/02 ثانیه)[19].

در بررسی اتصال غیرمشابه فولاد S500 MC و SPFC390 به روش جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی که توسط حسین اکبری[13] انجام گرفت، تلاش شد با تغییر جریان و زمان جوشکاری و ثابت نگه داشتن سایر پارامترها نظیر نیروی الکترود، تاثیر این متغیرها را بر روی خواص مکانیکی و ریزساختار اتصال بررسی کند. به دلیل نرخ سرمایش بسیار زیاد فرایند، مارتنزیت سوزنی و لایه‌ای با بسته‌های درشت و خشن در ریزساختار مشاهده شد. با بررسی سختی ناحیه فلزجوش، سختی این ناحیه 420 ویکرز بود که ساختار مارتنزیتی جوش را تایید می‌کند. از طرفی با عبور از منطقه فلزجوش و حرکت به سمت فلزات پایه، با توجه به کم شدن حرارت سختی نیز کاهش یافته است.

از بین مقالاتی که در زمینه جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی کار شده‌اند، تنها مقالات محدودی دارای طراحی آزمایش با روش تاگوچی هستند. به عنوان مثال می‌توان به تحقیق میشرا و همکاران [20] اشاره کرد که در پژوهش خود برای بررسی سه متغیر در سه سطح مختلف از آرایه L9 تاگوچی استفاده کردند. تعیین محدوده متغیرها برای رسیدن به استحکام بالا، به خواص شیمیایی، خواص فیزیکی و ضخامت ورق فولادی مورد استفاده بستگی دارد. در تحقیق حاضر نیز تلاش می‌شود برای بررسی متغیرهای جریان جوشکاری، زمان جوشکاری و نیروی الکترود در سه سطح مختلف از آرایه L9 تاگوچی استفاده شود.

به دلیل توسعه فولادهای پیشرفته با استحکام بالا و تنوع بسیار شدید این فولادها و با توجه به اهمیت فرایند جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی، نیاز است تا نسبت به شناسایی رفتار و خواص جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی این فولادها مطالعات لازم انجام شود. تا به امروز تحقیقات بسیار کمی برای شناسایی رفتار و خواص اتصال جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی فولاد S500 MC انجام شده است، در این راستا تلاش می‌شود تا بررسی رفتار اتصال غیرمشابه جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی فولاد AISI 430 و فولاد خودرویی S500 MC انجام شود.

2- مواد و روش‌ها

در این پژوهش از دو ورق فولادی که هر کدام به ضخامت 1/5 میلی‌متر بودند استفاده شد. ترکیب شیمیایی این دو فولاد در جدول (1 و 2) از طریق آنالیز کوانتومتری براساس استاندارد ASTM 1068 آورده شده است.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.15]

جدول1- ترکیب شیمیایی فولاد S500 MC (درصد وزنی).

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Ti	%V	%Nb	%Al	%Fe
۰/۱۷	۰/۲۸	۱/۲۴	۰/۰۱۹	۰/۰۱۸	۰/۰۱۹	۰/۰۰۴	۰/۰۱۷	۰/۰۲۶	بالانس

جدول2- ترکیب شیمیایی فولاد AISI 430 (درصد وزنی).

%C	%Si	%Mn	%Cr	%P	%S	%Mo	%Ni	%Co	%Cu	%V	%Al	%As	%Fe
۰/۰۵۴	۰/۳۸۱	۰/۳۲۳	۱۶/۴۳	۰/۰۲۶	۰/۰۰۳	۰/۰۱۵	۰/۱۰۴	۰/۰۱۷	۰/۰۱۸	۰/۰۹	۰/۰۰۳	۰/۰۳۳	بالانس

برای بررسی تاثیر سه متغیر فرایند جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی یعنی جریان جوشکاری، زمان جوشکاری و نیروی الکترود در سه سطح مختلف، از آرایه L9 تاگوچی استفاده شد. محدوده این متغیرها با در نظر گرفتن خواص فیزیکی، خواص شیمیایی و ضخامت ورق‌های مورد استفاده تعیین شده و در جدول (3) قابل مشاهده است.

نمونه‌های جوشکاری مطابق با استاندارد AWS D8.9 در ابعاد 20×100 میلی‌متر تهیه شدند. نمونه‌ها در فاصله 25 میلی‌متر بر روی یکدیگر قرار گرفته و جوشکاری شدند. پس از انجام آزمون‌های جوشکاری، بر روی نمونه‌های جوشکاری شده آزمون کشش برشی مطابق با استاندارد ASTM E8M با سرعت 10 میلی‌متر بر دقیقه صورت گرفت. نمونه‌ای که دارای بیشترین میزان استحکام کشش برشی و انرژی شکست بود به عنوان بهترین نمونه انتخاب شد و برای بررسی ریزساختار و آزمون ریزسختی سنجی آماده‌سازی شد. برای انجام آزمون متالوگرافی و مطالعه ریزساختار فلزات پایه و بهترین نمونه جوشکاری شده، نمونه‌ها از سنباده 80 تا 1200 سنباده زنی شدند و پس از مراحل سنباده‌زنی، نمونه‌ها توسط پارچه پولیش و پودر آلومینا آینه‌ای شدند. برای مشاهده ریزساختار فولاد S500 MC از محلول حکاکی نایتال 2 درصد در مدت زمان 15-20 ثانیه و برای مشاهده ریزساختار فولاد AISI 430 از محلول حکاکی سوپر پیکرال در مدت زمان 2 دقیقه استفاده شد. نمونه جوشکاری شده نیز با محلول سوپر پیکرال در مدت زمان 3 دقیقه اچ شد. برای مشاهده ریزساختار نمونه‌ها، ازمیکروسکوپ‌نوری BH2-UMA Olympus و میکروسکوپ الکترونی روبشیPhilips X130 استفاده شد. آزمون ریزسختی سنجی نیز بر روی بهترین نمونه جوشکاری شده مطابق با استاندارد ASTM E384 از طریق اعمال نیروی 100 گرمی در مدت زمان 10 ثانیه انجام شد.



شکل1- تصویری از نمونه‌های جوشکاری شده بوسیله دستگاه جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی.

3- نتایج و بحث

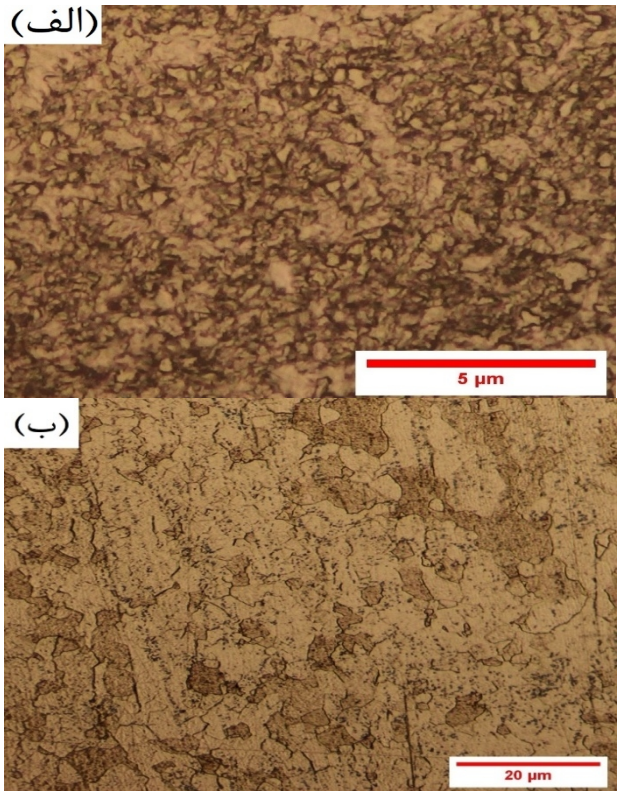
3-1- ریزساختار فلزات پایه، فلزجوش و ناحیه متاثر از حرارت

ریزساختار فولاد S500 MC در شکل(2-الف) آورده شده است. فولاد S500 MC یک فولاد میکروآلیاژی با استحکام بالا(HSLA) است. این فولاد به دلیل اینکه تحت فرایند نورد

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.15]

سرد قرار گرفته است، دارای دانه‌های بسیار ریز فریتی می‌باشد و در تصاویر ریزساختار این فولاد مرزدانه‌ها و دانه‌های فریتی در بزرگنمایی 500 برابر به خوبی قابل مشاهده هستند؛ همچنین انجام فرایند نورد سرد و ریزشدن دانه‌ها باعث افزایش شدید استحکام این فولاد نسبت به فولاد AISI 430 شده است.



شکل2-الف- ریزساختار فولاد S500 MC در بزرگنمایی 500 برابر و ب- ریزساختار AISI 430 در بزرگنمایی 100 برابر(مقطع RD-TD).

ریزساختار فولاد AISI 430 در شکل(2-ب) آورده شده است. ریزساختار فولاد AISI 430 به طور کلی از مرزدانه‌ها و دانه‌های فریتی به همراه رسوبات کاربید کروم تشکیل شده است. وجود کاربید کروم در ریزساختار این فولاد به دلیل داشتن مقادیر زیاد کروم و ترکیب آن با کربن است که باعث تشکیل کاربید کروم می‌شود. این فولاد به دلیل داشتن ساختار تماما فریتی، دارای انعطاف پذیری بسیار خوبی است ولی در مقابل دارای استحکام کششی و سختی پایینی می‌باشد. به دلیل حرارت ورودی بسیار بالا و نرخ سرمایش بسیار شدیدی که در اثر خنک‌سازی سیستم آبگرد الکترودهای مسی تامین می‌شود، امکان تشکیل فازهای سخت در ناحیه جوش فراهم می‌شود. با بررسی تصاویر میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی، مشابه تحقیقات صورت گرفته[12و13] مشخص شد فلزجوش از فازهای فریت، مارتنزیت و فریت ویدمن اشتاتن تشکیل شده است؛ همچنین با بررسی نمودار شفلر و محاسبه مقادیر کروم معادل و نیکل معادل از طریق فرمول‌های زیر نیز می‌توان ریزساختار فلزجوش را پیش بینی کرد.

$$\text{Equivalent chrome} = \%Cr + \%Mo + 1.5\%Si + 0.5\%Nb + 2\%Ti \quad (1)$$

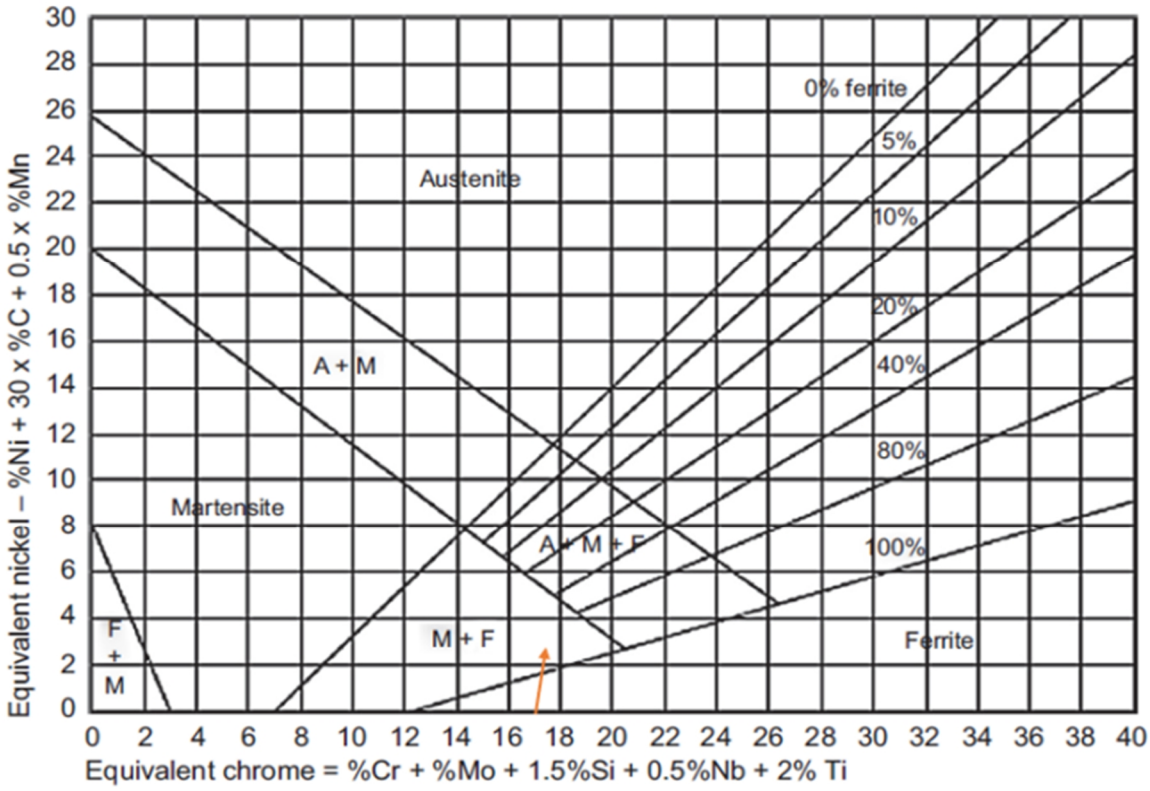
$$\text{Equivalent nickel} = \%Ni + 30\,\%C + 0.5\,\%Mn \quad (2)$$

با بدست آوردن مقادیر کروم معادل و نیکل معادل مشاهده می‌شود که براساس نمودار شفلر آورده شده در شکل (3)، ریزساختار از فازهای فریت و مارتنزیت تشکیل می‌شود. در تصاویر ریزساختار مشاهده شد که فریت موجود در ناحیه فلزجوش به دو شکل فریت ویدمن اشتاتن و فریت دلتا هستند. وجود فاز فریت دلتا در ناحیه فلزجوش با توجه به منحنی سرمایش و تشکیل فازهای مختلف در دکمه جوش(شکل 4) مشاهده می‌شود که اولین فاز جامدی که در دکمه جوش تشکیل می‌شود، فاز فریت دلتا است و با ادامه نرخ سرمایش فاز آستنیت تشکیل می‌شود که در اثر نرخ سرمایش زیاد آستنیت به مارتنزیت تبدیل می‌شود. علاوه بر این در جریان جوشکاری12 کیلو وات و زمان جوشکاری 12 سیکل که موجب ایجاد حرارت بسیار شدید در ناحیه جوش می‌شود و از طرفی دیگر نرخ سرمایش بسیار شدید (حدود1000تا10000 درجه سانتی‌گراد بر ثانیه)[21]، باعث شد تیغه‌های مارتنزیتی درشت و خشن تشکیل شوند. شماتیکی از مناطق مختلفی که مورد بررسی ریزساختار فلزجوش قرار گرفته‌اند، در شکل (5) آورده شده است. ریزساختار فلزجوش در شکل (6) و ریزساختار ناحیه متاثر از حرارت در شکل‌های (8) و (9) آورده شده است.

مشابه تحقیق علیزاده و همکاران[14] ناحیه متاثر از حرارت سمت فولاد AISI 430 از سه ناحیه تشکیل شد. این نواحی شامل ناحیه متاثر از حرارت دما بالا، ناحیه متاثر از حرارت دما متوسط و ناحیه متاثر از حرارت دما پایین است. محدوده دمایی این نـــواحی را می‌توان در نمودار فـــازی آهن، کربن و کـروم

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

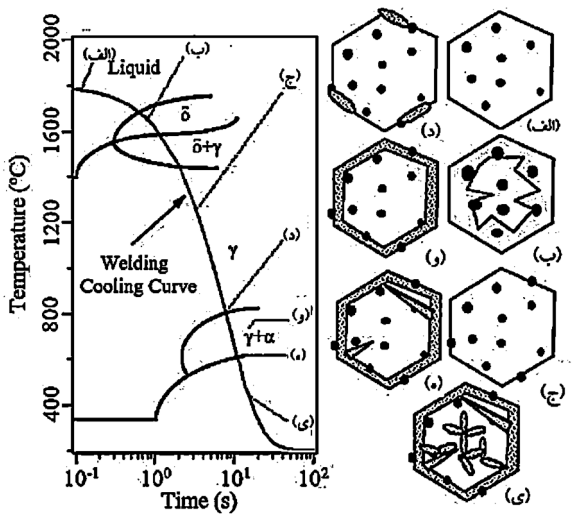
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.15]



شکل3-پیش بینی فازهای موجود در فلزجوش براساس مقادیر کروم معادل و نیکل معادل.

مشاهده کرد (شکل 7). در ناحیه متاثر از حرارت دما بالا مطابق با نمودار فازی آهن، کربن و کروم، فریت دلتا تشکیل می‌شود. با توجه به نرخ سرمایش بسیار بالای فرایند جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی، فرصتی برای تشکیل فاز آستنیت بوجود نمی‌آید. در نتیجه در اثر نرخ سرمایش بسیار زیاد، ساختار مارتنزیتی تشکیل نمی‌شود. عدم حضور ساختار مارتنزیتی در مرزدانه امکان رشد دانه‌های فریت دلتا را فراهم می‌کند.[14].

در ناحیه متاثر از حرارت دما متوسط ریزساختار از فازهای فریت دلتا و آستنیت تشکیل می‌شود. فاز آستنیت در مرزدانه‌های فریت دلتا تجمع می‌کند و مانع رشد دانه‌های فریت دلتا می‌شود. به دلیل نرخ سرمایش بسیار بالای فرایند، آستنیت موجود در مرزدانه‌های فریت دلتا به مارتنزیت تبدیل می‌شود. در ناحیه متاثر از حرارت دما پایین، فاز فریت دلتا و آستنیت تشکیل می‌شود. فاز مارتنزیت در مرزدانه‌های فریت دلتا به دلیل فاصله این ناحیه از فلزجوش و نرخ سرمایش کمتر تشکیل نشد[14]. در ناحیه متاثر از حرارت فولاد AISI 430 به دلیل اختلاف در حد حلالیت کروم و کربن در فازهای آستنیت و فریت دلتا، کربن و کروم در زمینه پس زده شده و امکان تشکیل کاربید کروم را در این ناحیه امکان پذیر می‌کند.



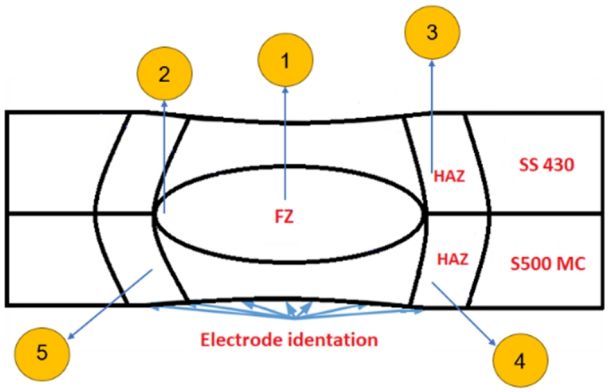
شکل4-نمودار منحنی سرمایش و تشکیل فازهای مختلف در دکمه جوش [22].

مطابق با تحقیقات اکبری[13] و حسینی[23] ناحیه متاثر از حرارت فولاد S500 MC از سه ناحیه تشکیل شد. این نواحی شامل ناحیه متاثر از حرارت درشت دانه (ناحیه بالا بحرانی)،

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.15]

ناحیه متاثر از حرارت ریز دانه (ناحیه میان بحرانی) و ناحیه متاثر از حرارت درون بحرانی(ناحیه زیر بحرانی) است. ناحیه متاثر از حرارت درشت دانه نزدیک‌ترین ناحیه به فلزجوش است در نتیجه حرارت ورودی به این ناحیه بسیار بالاست (دمای این ناحیه بالاتر از خط AC_3 در نمودار فازی آهن و کربن است). در اثر حرارت ورودی بسیار زیاد به این ناحیه،

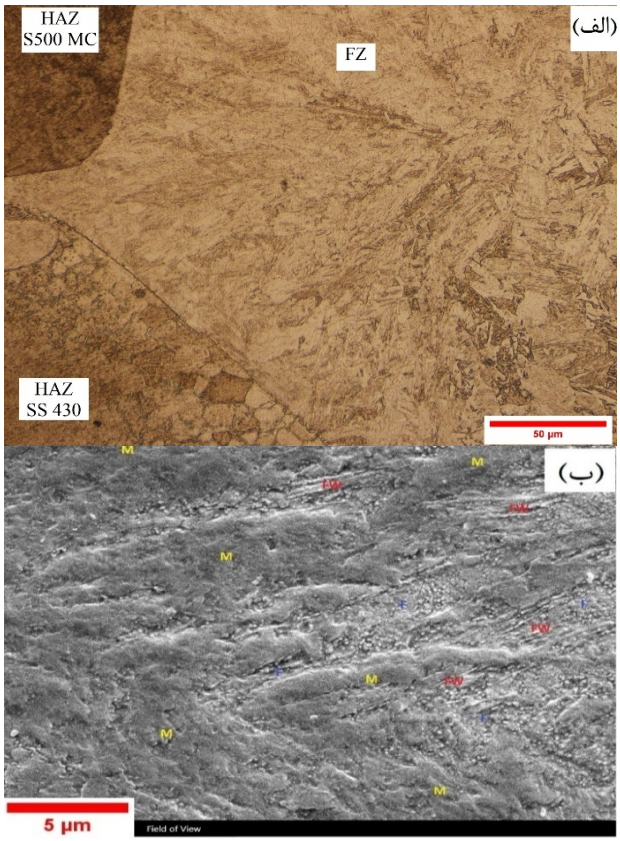
فاز فریت به آستنیت تبدیل شده و در اثر نرخ سرمایش زیاد، آستنیت به تیغه‌های درشت و خشن به همراه فریت تبدیل می‌شود[13 و 23].



شکل5- شماتیکی از مناطق مختلفی که مورد بررسی ریزساختاری قرار گرفته‌اند.

در ناحیه متاثر از حرارت ریزدانه نرخ حرارت ورودی کاهش پیدا می‌کند(دمای این ناحیه بین خطوط AC_3 و AC_1 در نمودار فازی آهن و کربن است). این ناحیه نیز مشابه ناحیه متاثر از حرارت درشت دانه فریت به آستنیت تبدیل شده و در اثر نرخ سرمایش، آستنیت به مارتنزیت و فریت تبدیل می‌شود. حرارت ورودی کمتر به این ناحیه باعث می‌شود که تیغه‌های درشت مارتنزیت به تیغه‌های ظریف‌تر تبدیل شود[13 و 23].

ناحیه متاثر از حرارت درون بحرانی نزدیک‌ترین ناحیه به فلزپایه است، در نتیجه حرارت ورودی به این ناحیه از دو ناحیه قبلی کمتر است (دمای این ناحیه نزدیک به خط AC_1 در نمودار فازی آهن و کربن است). مشابه دو ناحیه قبلی، در این ناحیه نیز فریت به آستنیت تبدیل شده و در اثر نرخ سرمایشی که توسط سیستم آبگرد الکترودهای مسی فراهم می‌شود، آستنیت به فریت، مارتنزیت و آستنیت باقی‌مانده تبدیل می‌شود. در این ناحیه به دلیل جدایش عناصری مانند منگنز و کربن در حین سرمایش و به علت سریع بودن آن، سختی پذیری آستنیت به وجود آمده نسبت به سختی فلزپایه بیشتر خواهد بود[13و 23]. به گفته برخی منابع کسر مارتنزیت موجود در ناحیه متاثر از حرارت درون بحرانی که زیر 20 درصد است تا ناحیه متاثر از حرارت درشت دانه که بالای 80 درصد است افزایش پیدا می‌کند[13 و 23]. خطوط دمایی و نواحی مختلف ناحیه متاثر از حرارت در شکل (10) قابل مشاهده است.



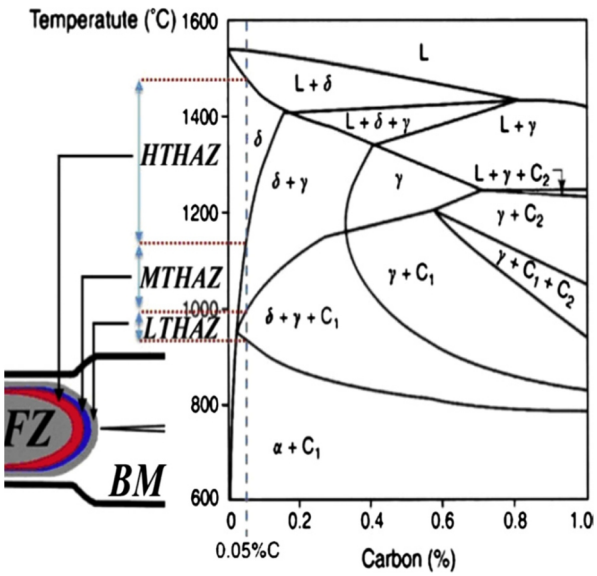
شکل6-الف- تصویر میکروسکوپ نوری و ب- تصویر میکروسکوپ الکترونی از ریزساختار فلزجوش(مقطع TD-ND موقعیت 1 و 2) شامل فریت(F)، مارتنزیت(M)، فریت ویدمن اشتاتن(FW) و تا حد بسیار کمی آستنیت باقی‌مانده.

در شکل(11) نمودار CCT فولاد S500 MC آورده شده است. با توجه به عناصر موجود در این فولاد، دماغه نمودار به سمت راست حرکت کرده و سختی پذیری آن افزایش یافته است. با

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.15]

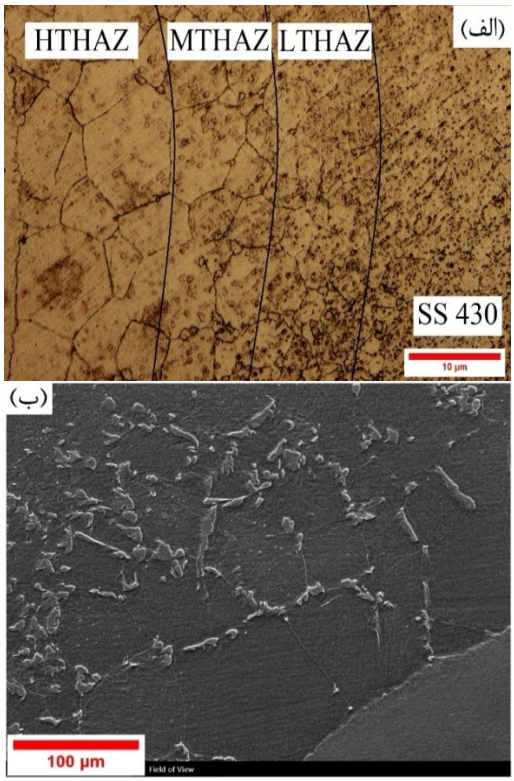
توجه به این نمودار می‌توان گفت با حرکت از فلزپایه به سمت فلزجوش، میزان کسر آستنیت در هر ناحیه از نواحی فوق افزایش یافته است، در نتیجه با توجه به نرخ سرمایش شدیدی که توسط الکترودهای آبگرد مسی فراهم می‌شود، تبدیل آستنیت بوجود آمده به مارتنزیت راحت‌تر صورت می‌پذیرد.



شکل7- نمودار فازی آهن-کروم-کربن حاوی مناطق ناحیه متاثر از حرارت[14].

3-2-خواص مکانیکی

نتایج آزمون کشش برشی به صورت نمودارهای نیرو-جابجایی است. شکل(12-الف) نمودار نیرو-جابجایی کلیه نمونه‌های جوشکاری شده به همراه فلزات پایه و قطر دکمه جوش هر نمونه در شکل(12-ب) قابل مشاهده است. همان طور که مشاهده می‌شود، فلزپایه فولاد S500 MC دارای بیشترین استحکام در بین کلیه نمونه‌ها است. دلیل استحکام زیاد این فولاد همان طور که قبلا ذکر شد، انجام کار سرد و ریزدانه شدن این فولاد است. پس از فولاد S500 MC، فولاد AISI 430 و نمونه جوشکاری شده S9 دارای بیشترین استحکام هستند. به دلیل استحکام کشش برشی و انرژی شکست زیاد نمونه S9 در بین کلیه نمونه‌های جوشکاری شده، این نمونه به عنوان بهترین نمونه از لحاظ استحکام کششی برشی و انرژی شکست انتخاب شد.

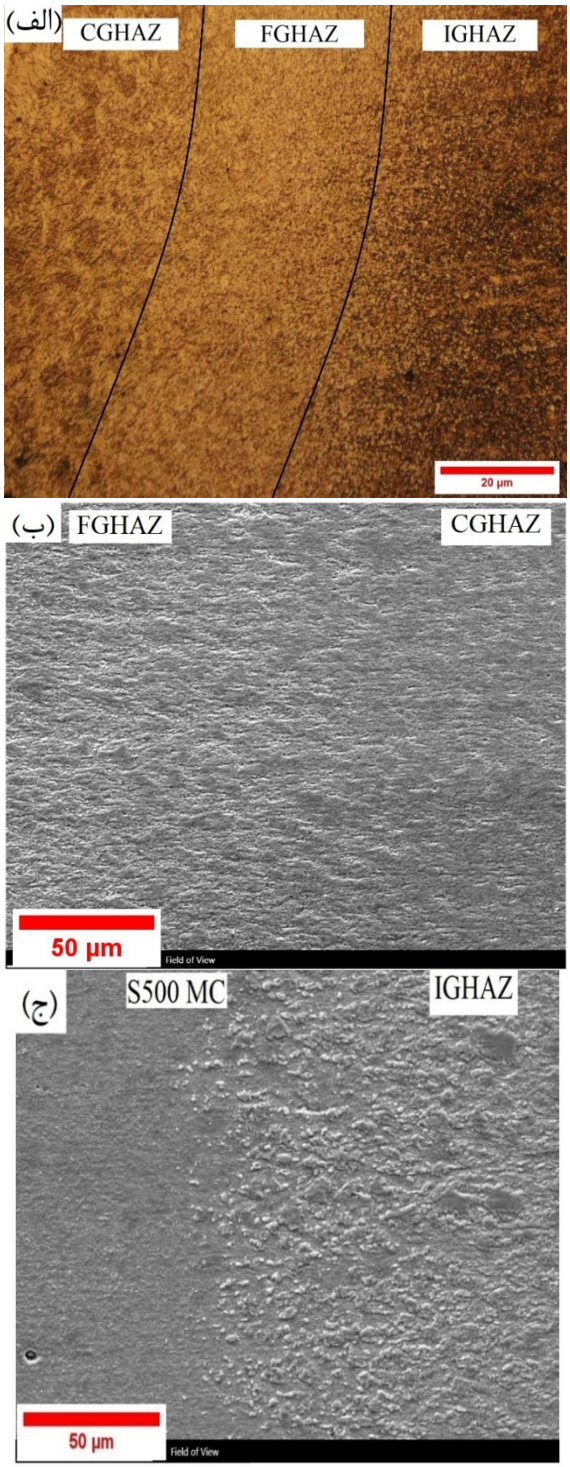


شکل8-الف-تصویر میکروسکوپ نوری و ب- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ناحیه متاثر از حرارت فولاد AISI 430 (مقطع TD-ND موقعیت 2 و 3).

متغیرهای نمونه S9 شامل جریان جوشکاری 12 کیلو وات، زمان جوشکاری 12 سیکل و نیروی الکترود 3 کیلو نیوتن هستند. به دلیل اعمال جریان جوشکاری 12 کیلو وات و زمان جوشکاری 12 سیکل، حرارت ورودی (براساس قانون ژول $Q=RI^2t$) بسیار بالاست و از طرف دیگر نرخ سرمایشی که توسط سیستم آبگرد الکترودهای مسی فراهم می‌شود، باعث تشکیل تیغه‌های درشت و خشن مارتنزیت در زمینه پیوسته فریت می‌شود؛ همچنین با اعمال نیروی الکترود 3 کیلونیوتن، ساختار فلزجوش دچار فشردگی و تراکم می‌شود که به تنهایی استحکام کشش برشی و سختی فلزجوش را افزایش می‌دهد. وجود تیغه‌های خشن مارتنزیت در زمینه پیوسته فریت همراه با فشردگی ساختار در اثر اعمال نیروی الکترود باعث تشکیل نوعی ساختار پیچیده در فلزجوش می‌شود، در نتیجه استحکام فلزجوش را افزایش داده و مقدار آن بیشتر از استحکام فلزپایه فولاد AISI 430 است.

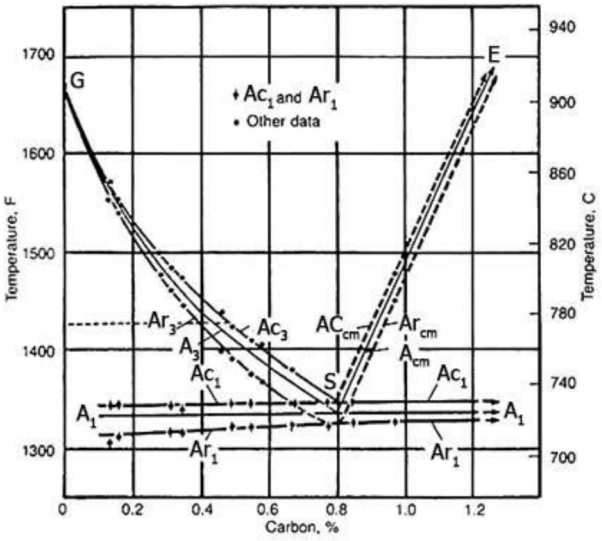
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.15]

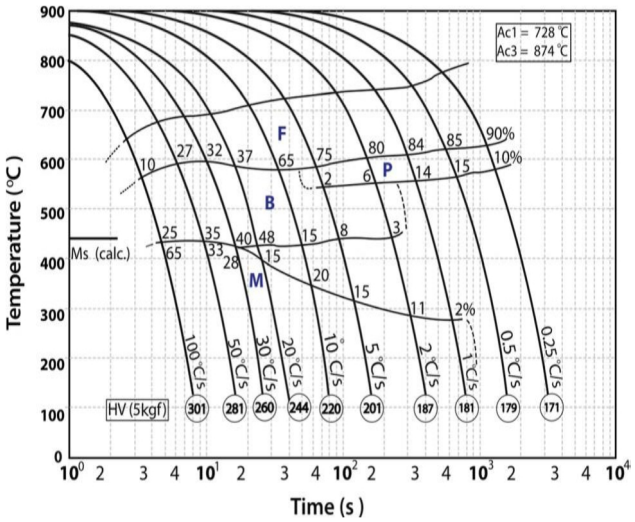


شکل9-الف- تصویر میکروسکوپ نوری و ب و ج- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نواحی مختلف ناحیه متاثر از حرارت فولاد S500 MC (مقطع TD-ND موقعیت 4 و 5).

در نمودار نیرو-جابجایی نمونه S9 مشاهده می‌شود که مقدار جابجایی(انعطاف پذیری) بسیار بالاست که علت آن به خاطر اعمال کرنش در بخش فلز پایه فولاد AISI 430 در اتصال نمونه S9 است و در نهایت این بخش اتصال دچار پدیده گلویی و در نهایت شکست می‌شود.



شکل10-خطوط دمایی و نواحی مختلف ناحیه متاثر از حرارت[24] .

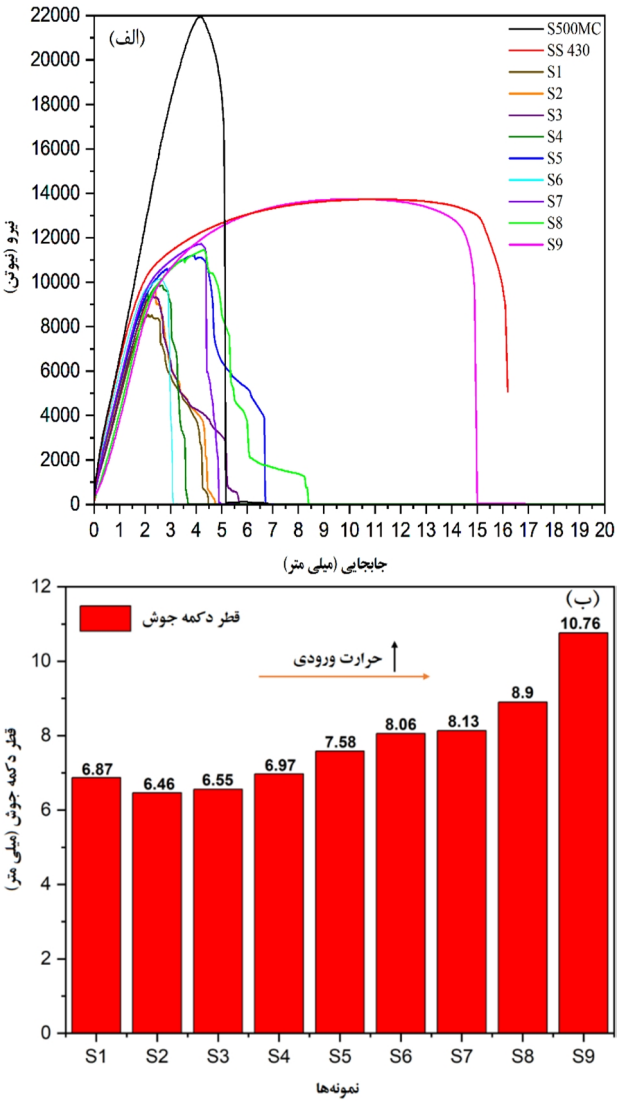


شکل 11- نمودار CCT فولاد S500 MC [25].

با بررسی گراف‌های سیگنال به نویز آورده شده در شکل (13-الف) و (13-ب) که مربوط به استحکام کشش برشی و انرژی شکست هستند، مشاهده می‌شود که متغیرهای نمونه S9 شامل جریان جوشکاری 12 کیلووات، زمان جوشکاری 12 سیکل و نیروی الکترود 3 کیلو نیوتن دارای بیشترین مقادیر سیگنال به نویز هستند، لذا در بین متغیرهای پیشنهادی آورده

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.15]

شده در جدول (3) این مقادیر بهترین حالت در نظر گرفته شده است و نمونه جوشکاری شده با این متغیرها دارای بیشترین استحکام کشش برشی و انرژی شکست است. از طرف دیگر اگر اختلاف مقادیر بیشترین سیگنال به نویز را از کمترین مقدار سیگنال به نویز برای هر متغیر محاسبه شود، متغیری به نام دلتا تعریف می‌شود که با مقایسه مقادیر دلتا برای هر سه متغیر جریان جوشکاری، زمان جوشکاری و نیروی الکترود در گراف‌های استحکام کشش برشی و انرژی شکست، ترتیب اهمیت متغیرها شناسایی می‌شود. جدول‌های (4) و (5) جداول پاسخ برای نسبت سیگنال به نویز استحکام کشش برشی و انرژی شکست هستند.



شکل12-الف- نمودار نیرو-جابجایی کلیه نمونه‌های جوشکاری شده به همراه فلزات پایه و ب- اندازه قطر دکمه جوش هر نمونه.

با بررسی مقالات مختلف انجام شده پیرامون جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی فولادها و نتایج بدست آمده از تاگوچی (جداول 4 و 5)، متغیرهایی که بر روی استحکام کشش برشی و انرژی شکست بیشترین تاثیر را دارند به ترتیب جریان جوشکاری، زمان جوشکاری و نیروی الکترود هستند. به دلیل اینکه نیروی الکترود مطابق با قانون ژول($Q=RI^2t$) تاثیری در حرارت ورودی ندارد، از تغییرات آن صرف نظر شد. شکل (14) نمودار نیرو- جابجایی را در زمان جوشکاری ثابت نشان می‌دهد. ترتیب تمامی نمونه‌ها به صورتی است که جریان جوشکاری از 6 کیلو وات تا 12 کیلو وات افزایش می‌یابد و مشاهده می‌شود که استحکام کشش برشی و انرژی شکست نمونه‌ها افزایش یافته است.

همان طور که ذکر شد علت افزایش استحکام کشش برشی و انرژی شکست به دلیل افزایش حرارت ورودی در اثر افزایش جریان جوشکاری است که سبب افزایش قطر دکمه جوش خواهد شد؛ همچنین با افزایش جریان جوشکاری، حرارت ورودی به ناحیه جوش افزایش یافته و در اثر سرمایش شدیدی که توسط سیستم آبگرد الکترودهای مسی فراهم می‌شود، فازهای سختی مانند مارتنزیت درون ناحیه جوش تشکیل شده است که استحکام کشش برشی را به شدت بالا می‌برد. ذکر این نکته حائز اهمیت است که افزایش جریان جوشکاری تا حدی باعث افزایش استحکام کشش برشی و انرژی شکست می‌شود، زیرا با افزایش جریان جوشکاری احتمال رخ دادن پدیده پاشش مذاب افزایش یافته و حتی موجب سوراخ شدن دکمه جوش خواهد شد که در نهایت سبب کاهش استحکام کشش برشی و انرژی شکست نمونه‌ها می‌شود.

شکل (15) نمودار نیرو-جابجایی را در جریان جوشکاری ثابت نشان می‌دهد. مشابه با شکل (14) ترتیب نمونه‌ها به صورتی است که زمان جوشکاری از 6 سیکل تا 12 سیکل افزایش پیدا می‌کند. تاثیر افزایش زمان جوشکاری مشابه افزایش جریان جوشکاری است و با افزایش زمان جوشکاری، استحکام کشش برشی و انرژی شکست افزایش می‌یابد. در شکل(15-الف) و (ب) مشاهده می‌شود هنگامی که زمان جوشکاری از 6 سیکل

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.15]

جدول3- محدوده متغیرهای هر نمونه.

نمونه	جریان جوشکاری(KW)	زمان جوشکاری(سیکل)	نیروی الکترود(KN)
S1	۶	۶	۲
S2	۶	۹	۳
S3	۶	۱۲	۴
S4	۹	۶	۳
S5	۹	۹	۴
S6	۹	۱۲	۲
S7	۱۲	۶	۴
S8	۱۲	۹	۲
S9	۱۲	۱۲	۳

جدول4- جدول پاسخ برای نسبت سیگنال به نویز استحکام کشش برشی.

نیروی الکترود	زمان جوشکاری	جریان جوشکاری	سطوح تغییر
۱۹/۹۷	۱۹/۹۸	۱۹/۲۸	۱
۲۰/۸۲	۲۰/۶۴	۲۰/۳۵	۲
۲۰/۶۱	۲۰/۷۸	۲۱/۷۷	۳
۰/۸۵	۰/۸	۲/۴۹	دلتا
۲	۳	۱	ترتیب اهمیت متغیرها

جدول5-جدول پاسخ برای نسبت سیگنال به نویز انرژی شکست.

نیروی الکترود	زمان جوشکاری	جریان جوشکاری	سطوح تغییر
۲۴/۸۹	۲۴/۷۳	۲۱/۳۴	۱
۲۸/۸۶	۲۷/۴۶	۲۶	۲
۲۷/۲۹	۲۸/۸۵	۳۳/۷۰	۳
۳/۹۷	۴/۱۲	۱۲/۳۶	دلتا
۳	۲	۱	ترتیب اهمیت متغیرها

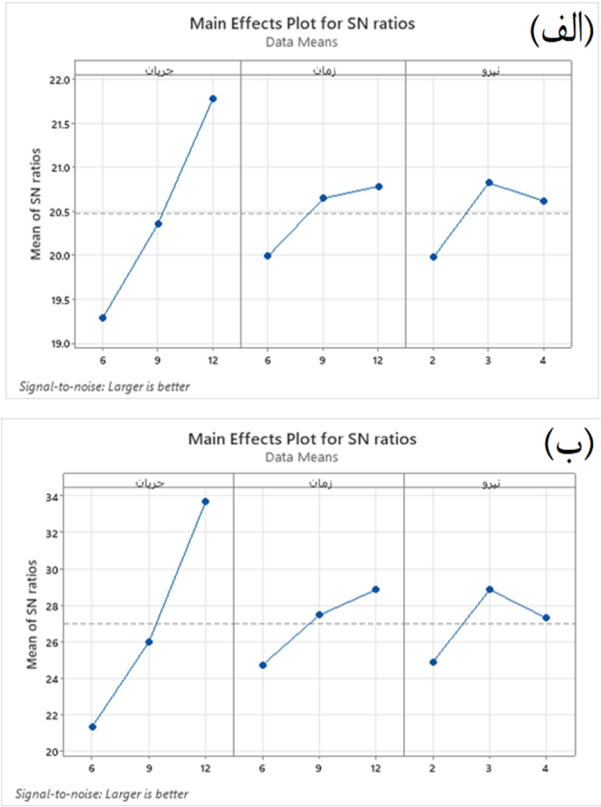
به 9 سیکل افزایش یافته است، مقادیر استحکام کشش برشی و انرژی شکست افزایش می‌یابد ولی با افزایش زمان جوشکاری از 9 سیکل تا 12 سیکل مقادیر استحکام کشش برشی و انرژی شکست کاهش یافته است. علت این پدیده به دلیل تاثیر سایر پارامترهای جوشکاری نظیر نیروی الکترود است. با این حال با مقایسه دو شکل (14) و (15) مشاهده می‌شود که تاثیر افزایش جریان جوشکاری بر روی استحکام کشش برشی و انرژی شکست بسیار بیشتر از تاثیر افزایش زمان جوشکاری است؛ همچنین این موضوع نیز از رابطه قانون ژول($Q=RI^2t$) قابل اثبات است، زیرا در این رابطه جریان جوشکاری (I) دارای توان 2 است ولی زمان جوشکاری (t) دارای توان 1 اســـت، در نتیجه افزایش جریان جوشکاری تاثیر بسیار بالاتری بر روی استحکام کشش برشی و انرژی شکست نسبت به زمان جوشکاری دارد.

پروفیل سختی نمونه S9 در شکل(16) قابل مشاهده است. مطابق این شکل، سختی ناحیه متاثر از حرارت فولاد AISI 430 نسبت به سختی ناحیه متاثر از حرارت فولاد S500 MC کمتر است. علت آن انجام فرایند نورد سرد بر روی این فولاد است که باعث ریزدانه شدن و افزایش سختی می‌شود؛ همچنین هرچه از فولاد AISI 430 به سمت فولاد S500 MC حرکت کرده، سختی فلزجوش نیز افزایش می‌یابد. علت آن تشکیل تیغه‌های مارتنزیت درشت و خشن در نزدیکی فولاد S500 MC است.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.15]

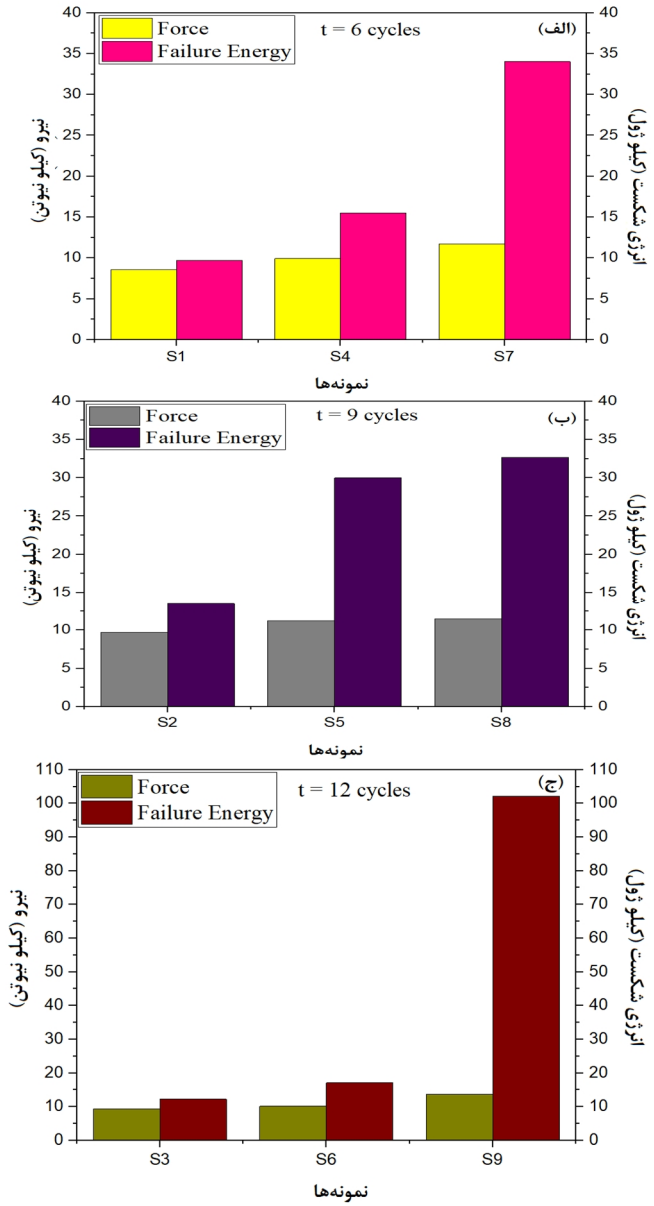
به طور میانگین سختی فلزجوش حدود 400 ویکرز است که حضور فازهای سخت مانند مارتنزیت در ناحیه فلزجوش را ثابت می‌کند. برخی از نواحی فلزجوش دارای سختی کمتری هستند که در این نواحی زمینه پیوسته فریت درون ریزساختار مشاهده شد.



شکل13- گراف سیگنال به نویز برای (الف) استحکام کشش برشی و (ب) انرژی شکست.

3-3-حالت شکست

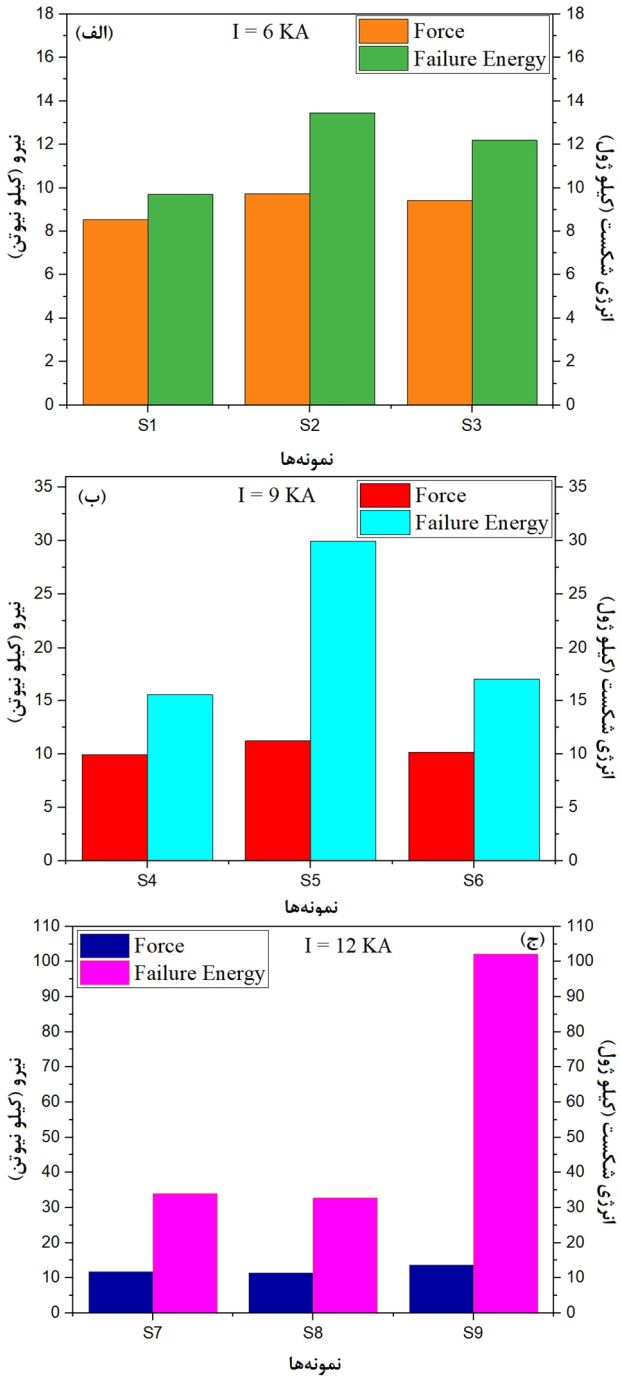
حالت شکست نمونه‌های جوشکاری شده توسط فرایند جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی به دو صورت فصل مشترکی و محیطی است. در شکست فصل مشترکی شکست از ناحیه اتصال شروع و گسترش می‌یابد. این حالت شکست بدترین نوع شکست در بین حالات شکست در فرایند جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی محسوب می‌شود و اثرات زیان آوری برای خواص مکانیکی دارد. شکست محیطی در واقع همراه با کندگی دکمه جوش از یک ورق است. در این حالت، ترک از طریق اطراف دکمه جوش در یک ورق رشد می‌کند. این ترک ممکن است از ناحیه متاثر از حرارت، فلزپایه یا فصل مشترک فلزپایه-ناحیه متاثر از حرارت آغاز شود. شروع و رشد ترک بستگی به خواص متالورژیکی و هندسه ناحیه جوش و میزان نیروی ورودی به جوش دارد. معمولا شکست محیطی بهترین حالت شکست و تخریب به حساب می‌آید، زیرا بیشترین خواص مکانیکی را به دنبال دارد و نشان از استحکام بالا و قدرت اتصال دارد[26].



شکل14- تاثیر جریان جوشکاری بر استحکام و انرژی شکست در زمان‌های جوشکاری ثابت.

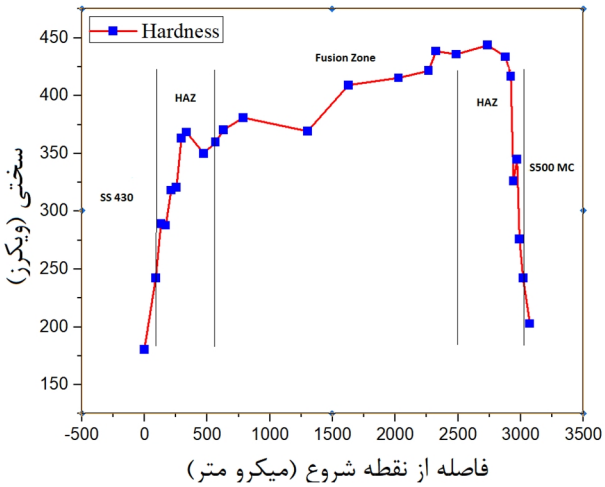
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.15]



شکل15- تاثیر زمان جوشکاری بر استحکام و انرژی شکست در جریان‌های جوشکاری ثابت.

شکل (17) تصویر شکست کلیه نمونه‌ها را نشان می‌دهد. در این پژوهش تمامی نمونه‌ها به جز نمونه S9 به صورت محیطی شکسته شدند. به دلیل استحکام بسیار بالای دکمه جوش در نمونه S9، این نمونه از سمت فلزپایه فولاد AISI 430 دچار پدیده گلویی و در نهایت از این مقطع شکسته شد. به دلیل اینکه نمونه S9 از سمت فلزپایه دچار شکست شده است و دکمه جوش آن سالم و بدون عیب بود، تصاویر شکست نگاری از مقطع شکست فلزپایه مورد بررسی قرار گرفتند که در شکل (18) قابل مشاهده است. حضور دیمپل‌ها در تصاویر شکست نگاری از سطح مقطع شکست نمونه S9 نشان می‌دهد که شکست این نمونه به صورت کاملا نرم اتفاق افتاده است.



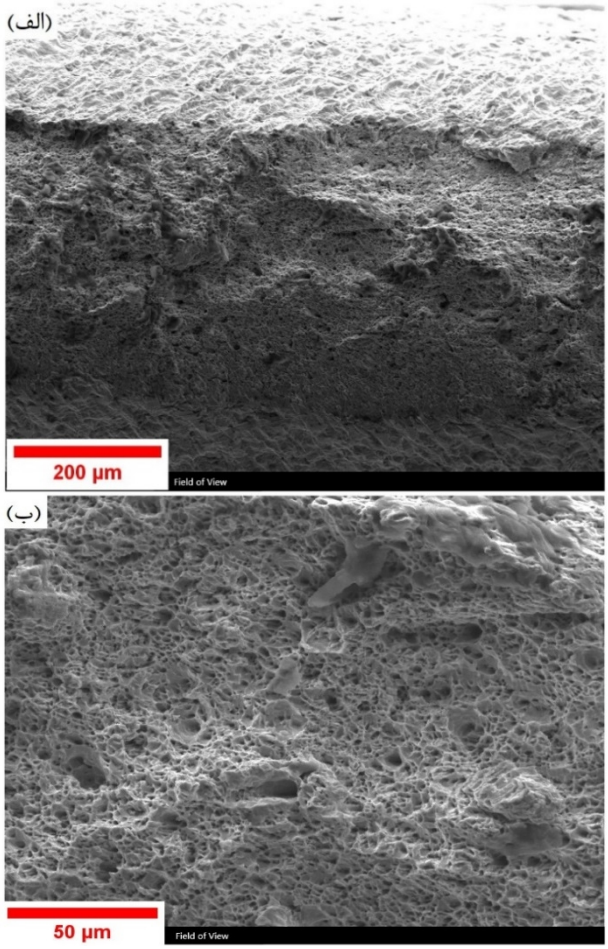
شکل16- پروفیل سختی نمونه جوش S9.



شکل17- تصویر شکست نمونه‌ها پس از آزمون کشش برشی.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.15]



شکل18-تصویر شکست نگاری از سطح مقطع شکست فولاد AISI 430 در دو بزرگنمایی متفاوت.

4-نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیرمشابه جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی فولاد430 AISI به فولاد S500 MC پرداخته شد. نتایج این مطالعه به شرح زیر است:

- ریزساختار فولاد AISI 430 از مرزدانه‌ها و دانه‌های فریت به همراه رسوبات کاربید کروم تشکیل شده و ریزساختار فولاد S500 MC از دانه‌های بسیار ریز فریت به همراه مرزدانه‌ها تشکیل شده است. براساس نمودار شفلر ریزساختار فلزجوش از فریت، مارتنزیت و فریت ویدمن اشتاتن تشکیل شده است.

- ناحیه متاثر از حرارت هر دو فولاد، از سه ناحیه تشکیل شد که علت پیدایش این سه ناحیه، حرارت ورودی و نرخ سرمایش متفاوتی است که این سه ناحیه دریافت می‌کنند.

- با افزایش جریان و زمان جوشکاری، استحکام کشش برشی و انرژی شکست نمونه‌ها به دلیل حرارت ورودی زیاد و نرخ سرمایش بسیار شدید که منجر به تشکیل فازهای سخت مانند مارتنزیت می‌شود افزایش یافته است.

- سختی بسیار زیاد فلزجوش(400 ویکرز) حضور فازهای سخت مانند مارتنزیت در ناحیه فلزجوش را اثبات می‌کند.

- شکست تمامی نمونه‌ها به جز نمونه S9 به صورت محیطی بود. نمونه S9 به دلیل استحکام زیاد دکمه جوش از سمت فلزپایه فولاد AISI 430 دچار شکست شد. حضور دیمپل‌ها در تصاویر شکست نگاری نمونه S9، نشان دهنده شکست نرم این نمونه است.

منابع

1-Rudra, Amitava, et al. "Study of processing map and effect of hot rolling on mechanical properties of aluminum 5083 alloy." Transactions of the Indian Institute of Metals 73 (2020): 1809-1826.

2-Kim, Gwang-Gook, et al. "Mechanical Properties of Aluminum 5083 Alloy GMA Welds with Different Magnesium and Manganese Content of Filler Wires." Applied Sciences 11.24 (2021): 11655.

3-Liu, Xiaoru, et al. "Mechanical property comparisons between CrCoNi medium-entropy alloy and 316 stainless steels." Journal of Materials Science & Technology 108 (2022): 256-269.

4-Olugbade, Temitope, and Jian Lu. "Enhanced corrosion properties of nanostructured 316 stainless steel in 0.6 M NaCl solution." Journal of Bio-and Tribo-Corrosion 5 (2019): 1-11.

5-Jabraeili, Reza, et al. "Effect of FSW process parameters on microstructure and mechanical properties of the dissimilar AA2024 Al alloy and 304 stainless steel joints." *Materials Science and Engineering: A* 814 (2021): 140981.

6-Alimadadi, M., M. Goodarzi, and S. M. A. Boutorabi. "The effect of tool transverse speed on the properties of aluminum-steel dissimilar joint by friction stir welding." Journal of Welding Science and Technology of Iran 7.1 (2021): 41-50.

7-Wallerstein, Daniel, et al. "Recent developments in laser welding of aluminum alloys to steel." *Metals* 11.4 (2021): 622.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.15]

Atsushi Yanagisawa. "Joining of aluminum alloy to steel by friction stir welding." Journal of Materials Processing Technology 178.1-3 (2006): 342-349.

18-ASTM A370-22. " Standard test methods and definitions sor mechanical testing of steel product." ASTM International:2022.

19-Handbook, A. S. M. "Metallography and microstructures." *Edited by GF Vander Voort, ASM Intenational* 9 (2004).

20-Ma, Z. Y., S. R. Sharma, and R. S. Mishra. "Microstructural modification of as-cast Al-Si-Mg alloy by friction stir processing." Metallurgical and Materials Transactions A 37 (2006): 3323-3336.

21-Elangovan, K., and V. Balasubramanian. "Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy." Materials & design 29.2 (2008): 362-373.

22-Pilkey, Walter D., Deborah F. Pilkey, and Zhuming Bi. *Peterson's stress concentration factors*. John Wiley & Sons, 2020.

23-Zhang, Shucai, et al. "Refinement mechanism of cerium addition on solidification structure and sigma phase of super austenitic stainless steel S32654." *Journal of Materials Science & Technology* 102 (2022): 105-114.

24-Qin, Yong–Qiang, et al. "Research status and development trend of preparation technology of ceramic particle dispersion strengthened copper-matrix composites." *Journal of Alloys and Compounds* 848 (2020): 156475.

25-Dieter, Paupler PGE. *Mechanical Metallurgy. M c Graw-Hill Book Co., New York 1986. XXIII+ 751 p., DM 138.50*. Vol. 23. No. 2. ISBN 0–07–016893–8. Crystal Research and Technology, 1988.

8-Atabaki, M. Mazar, et al. "Welding of aluminum alloys to steels: an overview." journal for Manufacturing Science and Production 14.2 (2014): 59-78.

9-Mohan, Dhanesh G., Jacek Tomków, and S. Gopi. "Induction assisted hybrid friction stir welding of dissimilar materials AA5052 aluminium alloy and X12Cr13 stainless steel." Advances in Materials Science 21.3 (2021): 17-30.

10-Sun, Yumeng, et al. "A review of the friction stir welding of dissimilar materials between aluminum alloys and copper." Metals 12.4 (2022): 675.

11-Anvari, Seyedeh Zahra, and Meysam Khandozi. "Effect of friction stir welding parameters on the microstructure and mechanical properties of dissimilar AA2024-AA6061 joints." Journal of Welding Science and Technology of Iran 7.2 (2022): 113-125.

12-Tanaka, Tsutomu, Taiki Morishige, and Tomotake Hirata. "Comprehensive analysis of joint strength for dissimilar friction stir welds of mild steel to aluminum alloys." Scripta Materialia 61.7 (2009): 756-759.

13-Karimi, Namdar, et al. "Joining of 1100 Al alloy to AISI 1045 carbon steel by friction stir welding." *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 152. Trans Tech Publications Ltd, 2012.

14-Beygi, R., et al. "Design of friction stir welding for butt joining of aluminum to steel of dissimilar thickness: heat treatment and fracture behavior." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 112 (2021): 1951-1964.

15-Liu, Xun, Shuhuai Lan, and Jun Ni. "Analysis of process parameters effects on friction stir welding of dissimilar aluminum alloy to advanced high strength steel." Materials & Design 59 (2014): 50-62.

16-Coelho, R. S., et al. "Friction-stir dissimilar welding of aluminium alloy to high strength steels: Mechanical properties and their relation to microstructure." Materials Science and Engineering: A 556 (2012): 175-183.

17-Watanabe, Takehiko, Hirofumi Takayama, and

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.15]