نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال پنجم، شماره 1، بهار و تابستان1398، صفحه 29-13

جوشکاری غیرهمجنس فولاد کربنی EN 10025 به فولاد زنگ نزن AISI 316L توسط جوشکاری همزنی اصطکاکی

محسن عباسی بهارانچی* ، سید باقر عسکری

مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

(دریافت مقاله: 1397/01/20 ؛ پذیرش مقاله: 1397/04/05)

چکیده

در این پژوهش جوشکاری ورق های فولادی EN 10025 و 316 L به روش جوشکاری همزنی - اصطکاکی مورد بررسی قرار گرفت و پارامترها توسط نرم افزار روش سطح پاسخ بهینه سازی شدند. جهت بررسی خواص مکانیکی و متالورژیکی اتصال، آزمایش های ریز سختی و آزمایش کشش و متالوگرافی توسط میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی مجهز به سیستم آنالیز شیمیایی انجام و مناطق مختلف شامل ناحیه همزده، مناطق متأثر از حرارت، فصل مشترک ها و ناحیه متأثر از حرارت و کار مکانیکی مورد ارزیابی قرار گرفت.نتایج بهینه سازی نشان داد که بهترین اتصال با بیشترین استحکام در سرعت چرخش 950 دور بر دقیقه، حرکت خطی 90 میلی متر بر دقیقه و زاویه انحراف 3 درجه حاصل می شود شکست در تمامی آزمایش های کشش ازفلز پایه EN 10025 سمت پیش رونده اتفاق افتاد و بیشترین استحکام با پارامترهای بهینه در 312MPa اتفاق می افتد. نتایج متالوگرافی نشان داد که اندازه دانه در ناحیه همزده 10تا 20 برابر کاهش می یابد و باعث بهبود خواص مکانیکی اتصال می شود. همچنین نتایج آنالیز شیمیایی خطی و نتایج سختی بر روی نمونه جوشکاری شده با پارامترهای بهینه نشان از اختلاط نسبتاً مناسب در ناحیه همزده می باشد.

کلمات کلیدی: جوشکاری همزنی، EN 10025 ، 316L ، خواص مکانیکی.

Dissimilar Welding of EN 10025 Carbon Steel to AISI 316L Stainless Steel by Friction Stir Welding

M. Abasi Baharanchi* , S. B. Askari

Faculty of Engineering, Department of Materials and Metallurgical engineering. Najafabad University, Iran.

(Received 9 April 2018 ; Accepted 26 June 2018)

Abstract

In the present Study, a dissimilar joint of carbon steel sheet EN 10025 with 316L has been welded by FSW and the welding parameters were optimized by RSM software method. For investigation of mechanical properties and microstructural analysis carried out by using optical, scanning electron microscopes with EDS analysis, tensile and

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: SBA1357@yahoo.com

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

hardness test of different area of joints, SZ, TMAZ, HAZ, their interfaces and Base metal. The optimized result were shown that best of joints within maximum strength (UTS) 312 MPa by rotational speed 950 rpm, transverse speed 90 mm/min and tool angle 3° was achieved. The failures were happened at base metal of EN 10025 to advancing side. Metallographic results were shown that grain size at SZ is 10 to 20 time more reduced caused improved of mechanical properties. Also chemical analysis and hardness result on welded samples by optimized parameters were shown that quite good mixing was happened at SZ.

Keywords: Friction Stir Welding, EN 10025 , 316 L, Mechanical Properties.

1- مقدمه

امروزه با توجه به پیشرفت‌های فراوان که در صنایع مختلف از جمله صنعت جوشکاری و اتصالات صنعتی صورت گرفته است، تحقیق و توسعه در این صنعت یک امر الزامی به نظر می‌رسد. فرایند جوشکاری همزنی یک روش اتصال دهی پیشرفته و نوین است که امروزه در صنایع مختلف از جمله صنایع خودرو، صنایع هوایی، صنایع نظامی، صنایع ریلی و صنایع پتروشیمی و پالایشگاه به کار گرفته می‌شود [1] که در این میان به دلیل مزایای منحصر بفرد این فرایند در صنعت خودروسازی بطور گسترده مورد توجه قرار گرفته است [2]. جوشکاری همزنی- اصطکاکی به دلیل عدم ذوب قطعات مورد اتصال و عدم وجود مشکلات و عیوب موجود در فرایندهای جوشکاری ذوبی، دارای ظاهر و کیفیت بسیار بالایی می‌باشد [3] و در اتصالات فلزات غیر همجنس و فلزات غیر آهنی مورد توجه قرار گرفته است [4]. تحقیقات صورت گرفته نشان می‌دهد که پارامترهای فرایند جوشکاری همزنی نقش بسیار مهمی در کیفیت و خواص مکانیکی اتصال دارد [2،3،5و6] که از جمله اثرگذارترین این پارامترها سرعت چرخش ابزار، سرعت پیش روی، زاویه انحراف، قطر پین، قطر شانه[1] و پین، جهت چرخش ابزار، هندسه ابزار می‌باشد. به عنوان مثال در اکثر مطالعات انجام شده مشخص گردید با انتخاب پارامترهای جوشکاری همزنی در یک بازه محدودی می‌توان اتصال قابل قبول و عاری از عیوبی ایجاد کرد و انتخاب پارامترها خارج از این محدوده، خواص مکانیکی اتصال را به شدت کاهش می‌دهد[7و8]. همچنین ملاحظه گردید انتخاب و تنظیم پارامترها به طور قابل ملاحظه‌ای بستگی به ضخامت و جنس ورق‌های مورد اتصال دارد [9و10]. به عنوان مثال انتخاب سرعت چرخش و سرعت پیش روی ابزار برای اتصال آلومینیوم با ضخامت 3 میلی متر بسیار متفاوت است با یک فولاد با همان ضخامت، که این موضوع اهمیت صحیح انتخاب پارامترهای فرایند جوشکاری همزنی- اصطکاکی را نشان می‌دهد. جعفرزادگان و همکاران [11] فولادهای St37 و فولاد زنگ نزن 304 را به روش جوشکاری همزنی - اصطکاکی، با سرعت پیش‌روی ثابت و با سرعت چرخش‌های 400 و 800 دور بر دقیقه جوشکاری کردند. آنها دریافتند نمونه‌ای که با سرعت چرخش کمتری جوشکاری شده، نسبت به نمونه‌ای که با سرعت چرخش بیشتر جوشکاری شده دارای درصد ازدیاد طول بیشتر و استحکام کمتری است. همچنین در سطح مقطع نمونه‌ای که با سرعت چرخش بیشتری جوشکاری شده ذرات کاربید تنگستن مشاهده شد، که باعث کاهش انعطاف پذیری جوش شد. غفارپور و همکاران [2] آلومینیوم 6061 و 5083 را توسط فرایند جوشکاری همزنی- اصطکاکی اتصال دادند و تاثیر سرعت چرخش و سرعت پیش روی ابزار، قطر پین، قطر شانه، توسط نرم افزار دیزاین اکسپرت[2] (DOE) طراحی آزمایش، و پارامترهای فوق‌را بهینه‌سازی کردند و یک بازه امنی‌برای انتخاب پارامترها معرفی کردند، همچنین در ادامه تست‌هایی نظیر ارتفاع محدود گنبدی[3] بر روی نمونه‌های جوشکاری انجام دادند و ملاحظه کردند نمونه جوشکاری شده با پارامترهای بهینه بیشترین‌شکل‌پذیری را درمقایسه با دیگر نمونه‌ها دارد. یزدی‌پور و همکاران[12] آلومینوم 5083 و فولاد زنگ نزن 316 L را

1-Shoulder

2-Design of Expert
3-Height Limited Dome

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

توسط فرایند جوشکاری همزنی اتصال دادند، در آن پژوهش در سرعت چرخش ابزار ثابت با اعمال تغییر سرعت پیش روی ابزار (160،200 mm/min، 250، 315) ملاحظه شده است که با افزایش سرعت پیش‌روی از 160 و 200 میلی متر بر دقیقه بیشتر، عیوبی از جمله تکه‌های بزرگ فولاد در سطح مقطع فولاد بوجود می‌آید که باعث کاهش استحکام اتصال می‌شود. آقای رامش و همکاران [13] فولاد کم آلیاژ استحکام بالا[1](HSLA) را با فرایند جوشکاری همزنی اتصال دادند و ارتباط بین میکروساختار و استحکام کششی را مورد بررسی قرار دادند، ملاحظه شده است که در سرعت‌های پیش‌روی 57،67،77 mm/min استحکام قابل قبول و مناسبی حاصل می‌شود، اما در سرعت‌های بیشتر از 77 mm/min استحکام بشدت کاهش می‌یابد. چو[2] و همکاران، [14] فولاد فریتی 409 را توسط روش جوشکاری همزنی با موفقیت اتصال دادند. آنها دریافتند که در ناحیه همزده[3] ساختار کاملا ریزدانه و دارای سختی بالا است که این امر به دلیل تبلور مجدد ناشی از تغییر شکل برشی و حرارت بالا می‌باشد. در این پژوهش در مرحله اول امکان‌سنجی تولید و قابلیت این روش جوشکاری در ایجاد ورق‌های جوش‌خورده ترکیبی مورد بررسی قرار گرفته و سپس در مرحله دوم تاثیر پارامترهای این روش مورد مطالعه قرارگرفته است. همانطور که گفته شد، ورق‌های جوش خورده‌ترکیبی بسیار در صنایع مورد توجه است، ولی متأسفانه تحقیقات بسیار اندکی روی فرایند جوشکاری همزنی ورق‌های فولادی جوش‌خورده‌ترکیبی غیرهمجنس با ضخامت کم انجام گرفته است. از این رو جوشکاری فولادهای غیرهمجنس، فولاد کربنی EN 10025 و فولاد زنگ نزن L 316 توسط جوشکاری همزنی- اصطکاکی و بررسی خواص مکانیکی و متالورژیکی آن احساس شد.

2- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش عملیات‌جوشکاری همزنی- اصطکاکی روی ورق‌های فولاد ساده کربنی EN 10025 و فولاد زنگ نزن آستنیتی L 316 به ضخامت 1/5 میلی متر با پارامترهای متفاوت انجام شد. ترکیب شیمیایی دو فولاد فوق در جدول (1) گزارش شده است. برای جوشکاری از ابزار کاربید تنگستن با پین مخروطی استفاده شده است. شکل (1) هندسه ابزار کاربید تنگستن مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. همچنین برای جوشکاری از دستگاه فرز سه محوره و قید فولادی از جنس St57 استفاده شد. شکل (2) دستگاه فرز و سیستم قید و بند را نشان می‌دهد. همچنین با توجه به نتایج آزمایشگاهی ملاحظه گردید بهترین نتیجه جوشکاری زمانی اتفاق می‌افتد که فولاد EN 10025 سمت پیش ران و فولاد زنگ نزن L 316 در سمت پس ران قرار گیرند و اگر جای فولادها تغییر کند جوش حاصله از لحاظ بازرسی چشمی کیفیت مناسب را ندارد. بنابراین در تحقیق حاضر تمامی فولادهای EN 10025 در سمت پس را قرار داده شده اند. بعد از انجام جوشکاری همزنی، نمونه‌های تهیه شده پس از سنباده کاری توسط محلول نایتال 2 درصد در مدت زمان 20 ثانیه حکاکی شدند [11] و ریزساختاری نمونه‌ها در بزرگنمایی مختلف با استفاده از میکروسکوپ نوری مجهز به نرم افزار تحلیل تصاویر و میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به آنالیز عنصری صورت گرفت و از نمونه جوشکاری شده با پارامترهای بهینه آنالیز عنصری خطی در مناطق فلز پایه، منطقه متأثر از حرارات و ناحیه همزده گرفته شد. نمونه‌های آزمایش کشش بر اساس استاندارد ASTM-E8 [15] مطابق شکل (3) آماده سازی شدند. ریز سختی ویکرز روی سطح مقطع نمونه‌ها و عمق 0/75 میلی متری زیر سطح انجام شد و میزان بار دستگاه 100 گرم و مدت زمان اعمال بار 15 ثانیه تنظیم شد [16].

3- نتایج و بحث

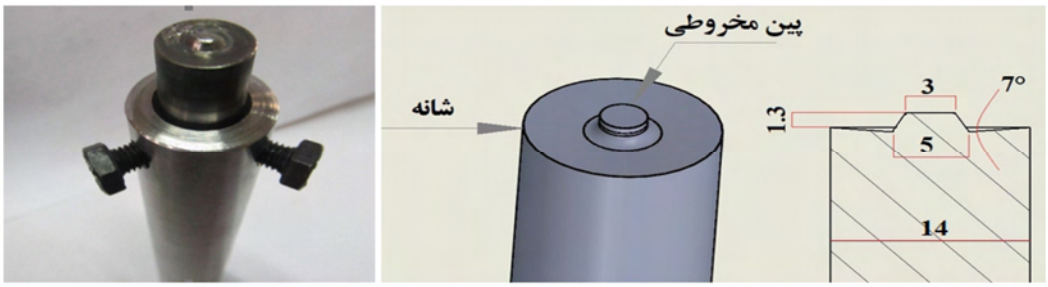
در این بخش ابتدا برای بررسی نتایج سه پارامتر سرعت چرخش، سرعت پیش روی ابزار و زاویه انحراف و تاثیر هر یک از پارامترهای فوق آزمایش‌هایی از طریق باکس و بنکن تحت رویه مونتگومری، توسط نرم‌افزار DOE طراحی آزمایش

1- High Strength Low-Alloy Steel
2 Cho
3 Stir Zone (SZ)

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

جدول1- ترکیب شیمیایی فولادهای EN 10025 و L 316

عنصر	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	N	Fe
EN ۱۰۰۲۵	۰/۱۷	-	-	-	-	-	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۰۹	باقیمانده
۳۱۶ L	۰/۰۳	۱۷	۱۲	۳	۲	۰/۷۵	۰/۰۴۵	۰/۰۳	۰/۱	باقیمانده



شکل1- هندسه ابزار و سه نظام تعبیه شده برای نگه داشتن ابزار.

شده است و سپس تابع هدف بصورت مدل ریاضی تعریف چهار نمونه (a)، (b)، (c) و (d) خواص مکانیکی و متالورژیکی آنها مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. از این‌رو ابتدا به بررسی آزمایش کشش و سختی و در ادامه به متالوگرافی نمونه‌ها و بررسی ریزساختار توسط تصاویر میکروسکوپ الکترونی مجهز به آنالیز عنصری پرداخته می‌شود.



شکل 2- دستگاه فرز سه محوره و قید مورد استفاده در این تحقیق.



شکل3-: نمونه آزمایش کشش، طبق استاندارد ASTM E8.

3-1- طراحی آزمایش توسط روش سطح پاسخ (RSM)

در شکل (4) نقاط سفید رنگ و نقاط مشکی ملاحظه می‌گردد که نقاط سفید بیانگر ایجاد جوش با ظاهر غیر قابل قبول و نقاط مشکی بیانگر ایجاد جوش با ظاهر قابل قبول می‌باشد. با توجه به آزمایش‌های انجام شده در شکل (4) و مطالعه منابع [1،3،8و11] مشخص گردید، محدوده سرعت چرخش بین 500 تا 1500 دور بر دقیقه می‌تواند جوش‌های قابل قبولی از لحاظ ظاهری ایجاد کند و برای سرعت پیش روی محدوده 31/5 تا 160 میلی متر بهترین بازه می‌باشد. در شکل (6) بعضی از نمونه‌ها جوشکاری شده با پارامترهای عنوان شده در شکل (4) نشان داده شده است. همچنین محدوده زاویه انحراف بین 2 تا 4 درجه [8و9] در نظر گرفته شده است. برای طراحی آزمایش سه پارامتر سرعت چرخش، سرعت پیش روی و زاویه انحراف به‌عنوان عوامل مسئله، هرکدام با سه سطح مشخص شده‌اند. جدول (2) مقادیر سطوح بالا و پایین این 3 پارامتر متغیر را که بر اساس اصول روش مونتگومری صورت گرفته است را نشان می‌دهد. سطح میانی منظور شده در جدول (2) برای هر عامل مطابق روش باکس بنکن میانگین مربوط به سطوح بالا و پایین می‌باشد. برای بررسی پارامترهای متغیر برای دست‌یابی به ورق جوشکاری شده جدول طراحی آزمایش‌ها به‌کمک نرم افزار از روش باکس و بنکن[1] استخراج شده‌است.

جدول (3) 17 عدد آزمایش طراحی شده و استحکام نهایی ورق‌های جوش‌خورده مطابق با پارامترهای مشخص شده در طراحی آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. اطلاعات ورودی در این

1-Box-Behnken

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

جدول2- سطوح بالا و پایین و میانی عوامل مورد بررسی.

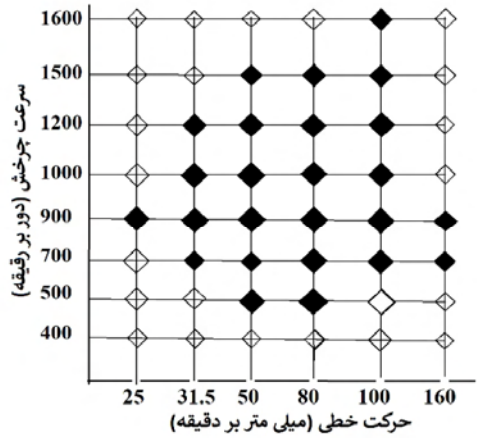
پارامترها	سطح پایین	سطح میانی	سطح بالا
سرعت دورانی ابزار(دور بر دقیقه)	۵۰۰	۱۰۰۰	۱۵۰۰
سرعت حرکت خطی ابزار(میلی بر دقیقه)	۳۱/۵	۹۵	۱۶۰
زاویه انحراف (درجه)	۲	۳	۴

جدول3- آزمایش های طراحی شده به روش باکس و بنکن و نتایج استحکام نهایی در آزمایش کشش برای هر آزمایش.

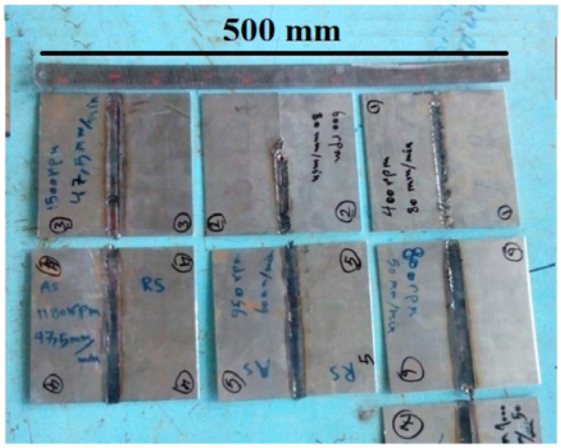
شماره آزمایش	سرعت دورانی(rpm)	سرعت خطی(mm/min)	زاویه انحراف (Degree)	استحکام نهایی(Mpa)
۱	۱۰۰۰	۳۱/۵	۲	۲۴۰
۲	۱۵۰۰	۹۵/۷۵	۲	۲۵۰
۳	۱۰۰۰	۳۱/۵	۴	۱۵۰
۴	۱۰۰۰	۹۵/۷۵	۳	۳۰۷
۵	۱۰۰۰	۱۶۰	۴	۱۸۰
۶	۱۰۰۰	۹۵/۷۵	۳	۳۱۴
۷	۱۰۰۰	۹۵/۷۵	۳	۳۱۲
۸	۵۰۰	۹۵/۷۵	۲	۲۵۰
۹	۵۰۰	۳۱/۵	۳	۲۷۰
۱۰	۵۰۰	۹۵/۷۵	۴	۱۹۰
۱۱	۱۰۰۰	۱۶۰	۲	۲۱۰
۱۲	۱۵۰۰	۱۶۰	۳	۲۲۰
۱۳	۱۵۰۰	۳۱/۵	۳	۲۰۰
۱۴	۵۰۰	۱۶۰	۳	۲۰۰
۱۵	۱۵۰۰	۹۵/۷۵	۴	۱۸۰
۱۶	۱۰۰۰	۹۵/۷۵	۳	۳۰۰
۱۷	۱۰۰۰	۹۵/۷۵	۳	۳۰۸

نرم افزار دیزاین اکسپرت مطابق با جدول (2) و (3) می‌باشد و خروجی این نرم افزار شکل‌های (7)، (8) و (9) و جدول (4) است. لازم به ذکر است که رویه این طراحی آزمایش‌ها و بهینه-سازی مطابق اصول روش مونتگومری صورت گرفته است.جدول (4) مقادیر بهینه این پارامترها را برای جوشکاری همزنی-اصطکاکی ورق فولادی EN 10025 و ورق زنگ نزن L 316، با ضخامت 1/5 میلی‌متر را نشان می‌دهد. مطابق با جدول (4) پارامترهای بهینه پیش‌بینی شده سرعت چرخش، سرعت خطی و زاویه انحراف به ترتیب عبارتند از:
(923/1rpm)، (87/53mm/min) و(2/72deg) از آنجایی که امکان جوشکاری دقیقا با پارامترهای پیش بینی با دستگاه فرز در جدول (4) سه محوره امکان‌پذیر نبود بنابراین پارامترهای جایگزین اشاره شده در چدول(4) نمونه بهینه جوشکاری شد. نمونه بهینه در این تحقیق نمونه (a) نام گذاری شده است. مطابق با جدول (4) اتصال ایجاد شده با پارامترهای بهینه دارای 312MPa می‌باشد. از قیاس این نتایج ملاحظه می‌شود حداکثر استحکام پیش بینی 313/5 MPa است، در حالی که حداکثر استحکام بدست آمده در نمونه جوشکاری شده با پارامترهای جایگزین و در دسترس 312 MPa می‌باشد. اختلاف این دو عدد کمتر از 1% است. این موضوع بیانگر صحت پیش بینی استحکام توسط طراحی آزمایش می‌باشد. شکل‌های (7)، (8) و (9) گراف‌های خروجی طراحی آزمایش DOE و روش سطح پاسخ RSM را نشان می‌دهد پیش از تحلیل این گراف‌ها ذکر این قائده الزامی است که با افزایش سرعت چرخش و کاهش

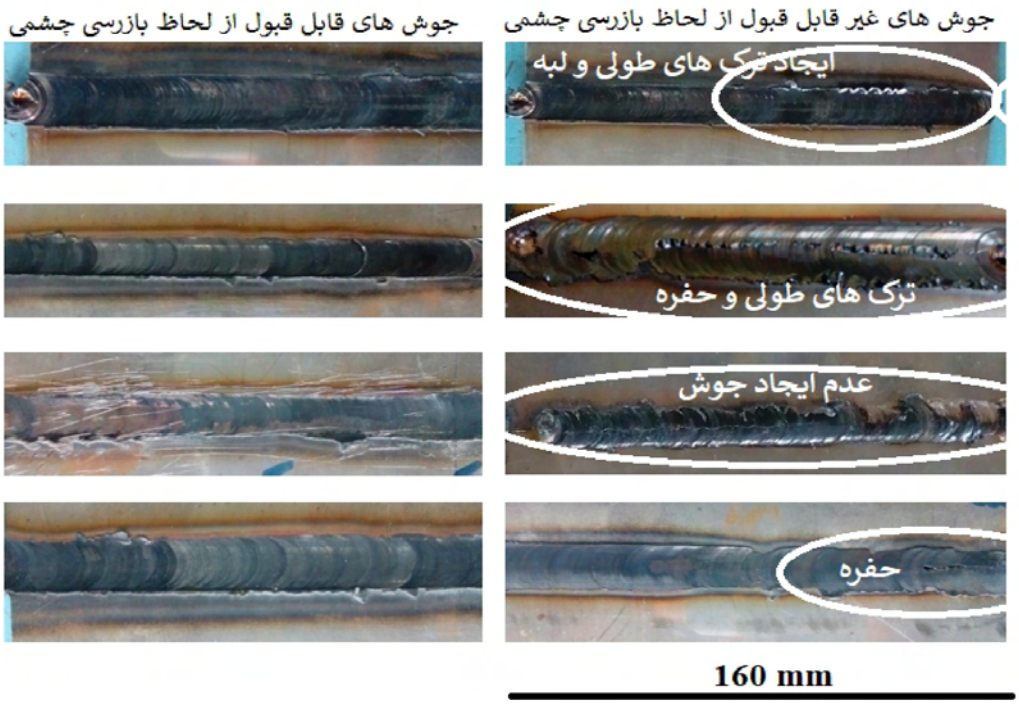
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



شکل 4- تعیین سطوح بالا و پایین سرعت حرکت خطی و دورانی ابزار، نقاط مشکی اتصال سالم و نقاط سفید اتصال معیوب



شکل5- چند نمونه از اتصالات سالم و معیوب مطابق پارامترهای شکل (4)



شکل 6- چند نمونه از اتصالات سالم و معیوب، جوشکاری شده با پارامترهای شکل (4)

سرعت پیش روی، حرارت ورودی به ناحیه همزده افزایش می‌یابد و برعکس کاهش سرعت چرخش و افزایش سرعت پیش‌روی حرارت ورودی را کاهش می‌دهد و این موضوع در فرایند جوشکاری همزنی یک قاعده کلی محسوب می‌شود [3،7و17] و هر سه پارامتر فوق بر روی تابع هدف (استحکام کششی نهایی) تاثیر مستقیم می‌گذرد [18].

با توجه به شکل (7) سرعت چرخش 500 rpm و زاویه انحراف 4 درجـه ای تقریبـاً سرعت چـرخش و زاویه انحراف تاثیر همزمانی را بر روی تابع هدف می‌گذارند. یعنی در کمترین استحکام و در سرعت‌های نزدیک به 1000 rpm و زاویه انحراف 3 درجه بیشترین استحکام حاصل می‌شود.

دلیل این موضوع را می‌توان به میزان اصطکاک و به دنبال آن حرارت ایجاد شده دانست. البته این حرارت ایجاد شده یک حد ماکزیمم دارد که با افزایش حرارت می‌تواند استحکام کششی یا همان تابع هدف را کاهش دهد. همانطور که در شکل (7) مشخص است با افـزایش سرعت چرخش 1500 rpm و زاویه

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

جدول 4- مقادیر بهینه، پیش بینی شده توسط مدل متدولوژی سطح پاسخ و پارامترهای جایگزین در دسترس.

-		پیش بینی شده	جایگزین و در دسترس
معیارها	سرعت دورانی (rpm)	۹۲۳/۱	۹۵۰
	سرعت خطی (mm/min)	۸۷/۵۳	۹۰
	زاویه انحراف (Degree)	۲/۷۲	۳
نتایج	استحکام کششی (MPa)	۳۱۳/۵	۳۱۲

جدول 5- پارامترهای جوشکاری شده نمونه های (a تا d)

نمونه	سرعت چرخش (rpm)	حرکت خطی (mm/min)	زاویه انحراف (درجه)	استحکام کششی نهایی (MPa)
(a)	۹۵۰	۹۰	۳	۳۱۲
(b)	۸۰۰	۸۰	۳	۳۰۶
(c)	۱۵۰۰	۴۷/۵	۳	۳۰۰
(d)	۷۵۰	۹۰	۲	۲۷۵

جدول 6- مقایسه نتایج آزمایش کشش نمونه (a) با فلزات پایه.

نمونه	(۳۱۶ L)	EN ۱۰۰۲۵	نمونه (a) (حالت بهینه)
سرعت دوران(rpm)	---	---	۹۵۰
زاویه انحراف (درجه)	---	---	۳
سرعت حرکت‌خطی (mm/min)	---	---	۹۰
استحکام نهایی (MPa)	۵۲۰	۳۲۰	۳۱۲
کرنش (٪)	۶۰	۳۰	۱۵
محل شکست نمونه	فلز پایه	فلز پایه	فلز پایه EN ۱۰۰۲۵

انحراف 2 و 4 درجه کمترین استحکام کششی حاصل می‌گردد. نمودارهای شکل (8) و (9) با در نظر گرفتن پارامترهای ثابت و متغیر دیگری نیز پاسخی مشابه نمودار شکل (7) دارند.

با پیاده سازی متدولوژی سطح پاسخ و جوشکاری ورق‌های فولادی EN 10025 و فولاد زنگ نزن 316 L در حالت بهینه می‌توان به بیشترین استحکام اتصال دست یافت.

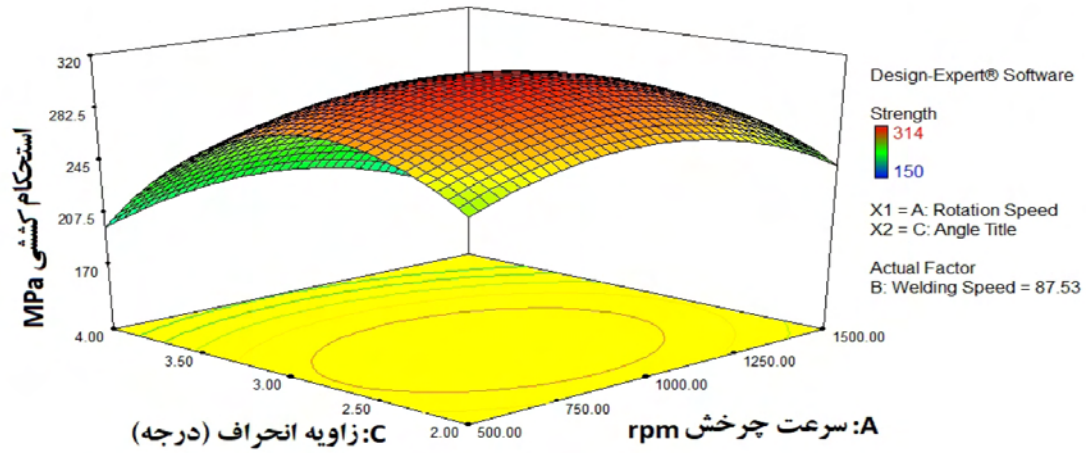
3-2- متالوگرافی

برای بررسی بهتر ریزساختار فلز جوش 4 نمونه مطابق با پارامترهای اشاره شده در جدول (5) جوشکاری شده اند و هریک از نمونه‌ها به طور مجزا مورد بررسی قرار می‌گیرند. شکل (10) ماکروگرافی[1] نمونه‌های جوشکاری شده با پارامترهای متفاوت‌را توسط فرایند جوشکاری همزنی اصطکاکی را نشان می‌دهد. نمونه (a) که با پارامترهای بهینه جوشکاری شده است به دلیل حرارت ایجاد شده و عملیات مکانیکی، مناطق مختلف با خصوصیات مختلف در محل اتصال ایجاد می‌شود.با توجه به مطالعه مراجع [3،8،9،11 و19] می‌توان گفت دما در ناحیه همزده حدوداً به 900-1000 درجه سانتی گراد، می‌رسد. بنابراین انتظار می‌رود که دانه‌های فریت در طرف EN 10025 رشد کنند و بزرگتر شوند. از طرفی توسط دوران پین و شانه در ناحیه همزده عملیات مکانیکی صورت می‌گیرد که باعث خرد شدن و ریزشدن دانه‌ها حدود10-20 برابر می‌شود و در نهایت باعث بالا رفتن خواص مکانیکی اتصال می‌شود. در کمی دورتر از ناحیه همزده و ناحیه متأثر از ترمومکانیک[2](TMAZ) قرار دارد، این ناحیه بطور هم زمان تحت تاثیر حرارت و تحت تاثیر عملیات مکانیکی قرار

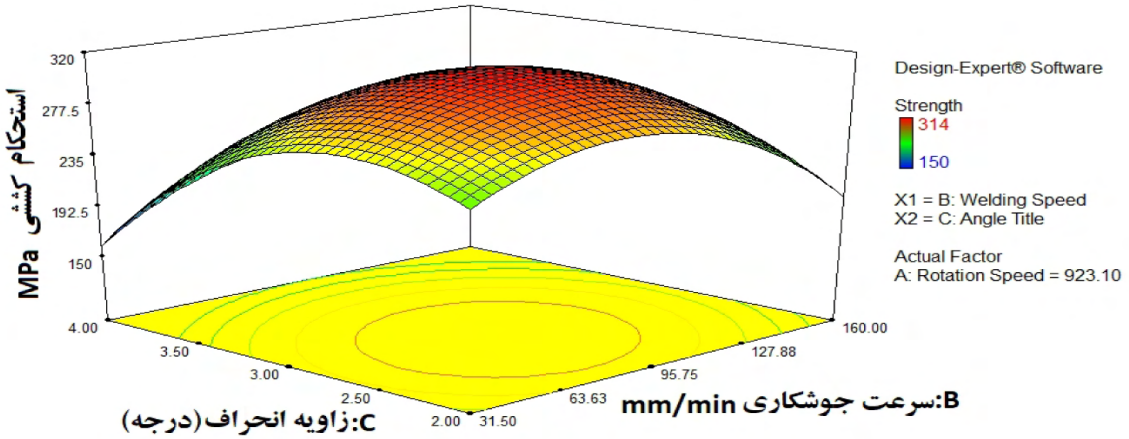
1-Macro graphic

2-Thermo-Mechanically Affected Zone (TMAZ)

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



شکل 7- اثر پارامترهای متغیر سرعت دورانی ابزار و زاویه انحراف بر روی استحکام کششی ورق های جوش خورده



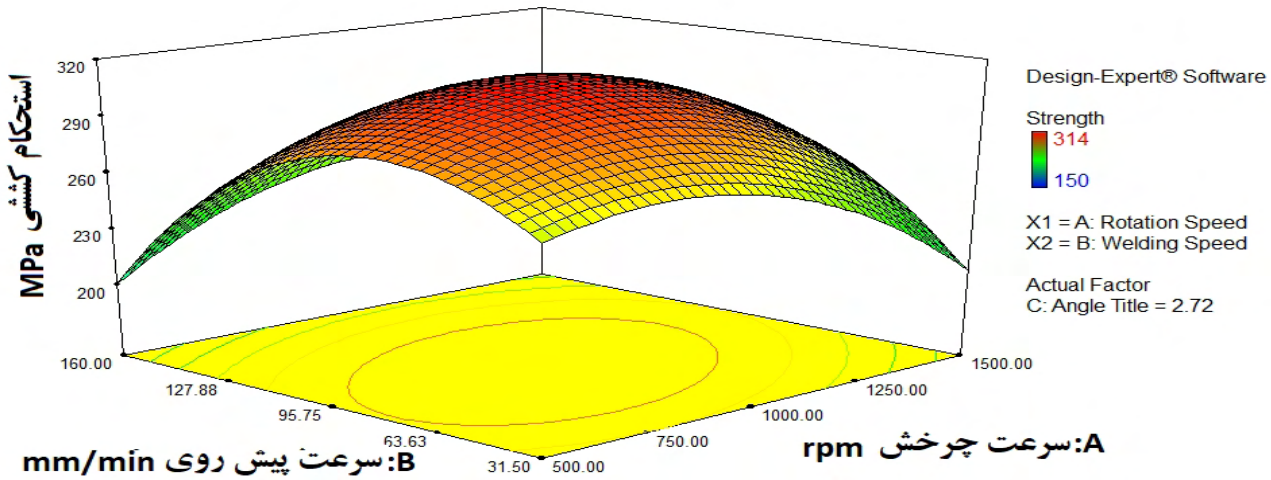
شکل 8- اثر پارامترهای متغیر سرعت خطی ابزار و زاویه انحراف بر روی استحکام کششی ورق های جوش خورده .

می‌گیرد که شـدت آن نسبت به ناحیه همزده به مراتب کمتر است. این موضوع باعث ریز شدن ساختار می‌شود. ناحیه متأثر از حرارت[1] (HAZ) بین ناحیه فلز پایه و ناحیه TMAZ قرار دارد. این ناحیه تحت تاثیر حرارت قرار می‌گیرد و عملیات مکانیکی در این منطقه صورت نمی‌گیرد. در این ناحیه مشاهده شد در بعضی قسمت‌ها اندازه دانه‌ها کشیده تر و بزرگتر از دانه‌های فلز پایه می‌باشد و یا اینکه حداقل اندازه دانه در منطقه HAZ برابر با فلز پایه می‌باشد دلیل این موضوع حضور دما و زمان می‌باشد که می‌تواند باعث رشد دانه‌های فریت بشود. با توجه به شکل (11) تصویر نمونه (a) جوشکاری شده با پارامترهای بهینه در سمت پیش ران مربوط به فولاد ساده کربنی EN 10025 مشـخص است و بطور همزمان 4 ناحیه فلـز پایه، منطقه HAZ، منطقه TMAZ و ناحیه همزده نشان داده شده است. در این تصویر به خوبی و به طور همزمان شدت کار مکانیکی انجام شده در ناحیه همزده و منطقه TMAZ نشان داده شده است. اصطکاک بین ابزار و قطعه کارها باعث افزایش دما در ناحیه همزده می‌شود که این پدیده موجب تبلور مجدد شدید می‌شود. نتیجه آن کاهش چگالی نابجایی‌ها، رشد و افزایش اندازه دانه خواهد بود که در نهایت افزایش سختی و استحکام را به دنبال دارد [20].

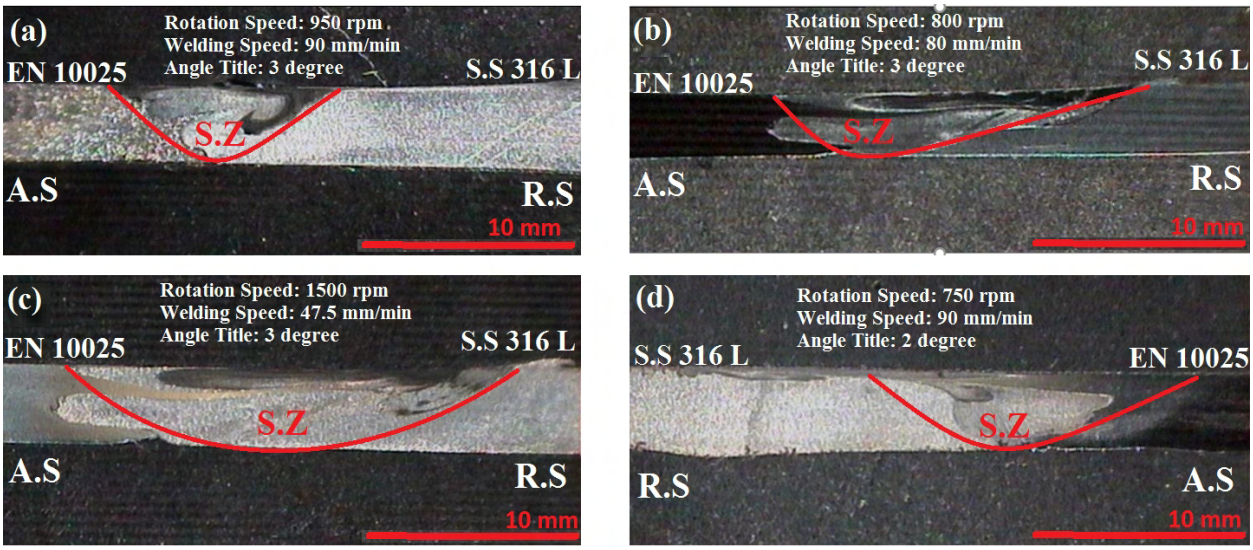
شکل (12) تصویر میکروسکپی ناحیه همزده مربوط به نمونه (a) و جوشکاری شده با پارامترهای بهینه و سمت پس ران و فلز پایه L 316 است. در ناحیه همزده کار مکانیکی انجام شده و موجب ریـزدانـه شدن دانـه‌ها می‌گـردد و این موضوع باعث

1-Heat Affected Zone (HAZ)

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



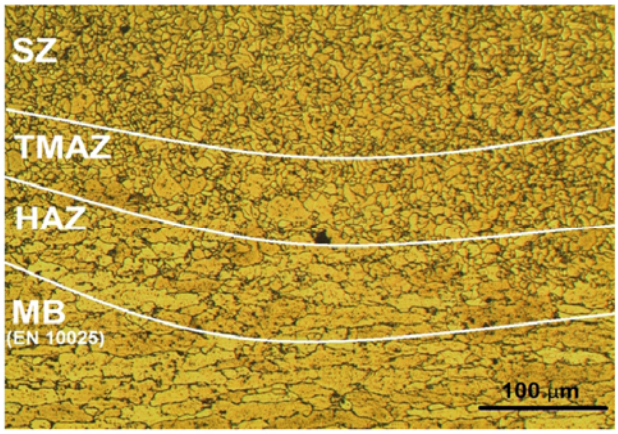
شکل 9- اثر پارامترهای متغیر سرعت دورانی و سرعت خطی ابزار بر روی استحکام کششی ورق های جوش خورده.



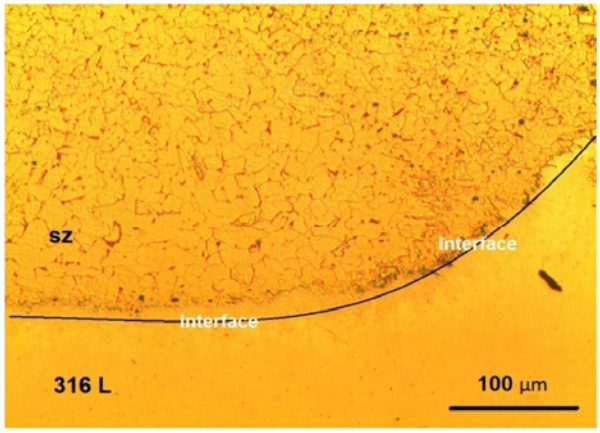
شکل 10- تصاویر ماکروگرافی نمونه های (a,b,c,d) جوشکاری شده توسط فرایند جوشکاری همزنی مطابق با جدول (5)

بهبود خواص مکانیکی در این ناحیه شده است. نمونه (b) که تقریباً با پارامترهای نزدیک به پارامترهای (a) جوشکاری شده است باعث ایجاد حرارت ورودی متعارف در نمونه (b) شده است. همچنین این نمونه دارای استحکام کششی مناسبی می‌باشد که با ساختار فلز جوش تناسب دارد. در شکل (13) تصویر (الف) که فلز پایه EN 10025 را نشان می‌دهد حاوی دانه‌های فریت همراه با توزیع ذرات سمانتیت در زمینه و مرز دانه‌ها می‌باشد. تصویر (ب) که تحت تاثیر حرارت و کار مکانیکی قرار گرفته است باعث ریز دانه شدن دانه نسبت به فلز پایه شده است و باعث بهبود خواص از جمله سختی در این ناحیه شده است، همچنین نواحی کوچک پرلیت در آن مشاهده می‌شود و تصویر (ج) مربوط به فلز پایه فولاد زنگ نزن 316 L می‌باشد، دانه‌های آستنیت حاوی نواحی دوقلویی به همراه ذرات دلتا فریت را نشان می‌دهد. تصویر (د) مربوط به منطقه متأثر از عملیات ترمومکانیکی می‌باشد و به دلیل حرارت و کار مکانیکی دانه‌ها 2 تا 3 برابر ریز دانه تر شده اند و حاوی نواحی دوقلویی به همراه ذرات دلتا فریت می‌باشد و قسمت (ه) مربوط به ناحیه همزده می‌باشد که در این قسمت با دلیل

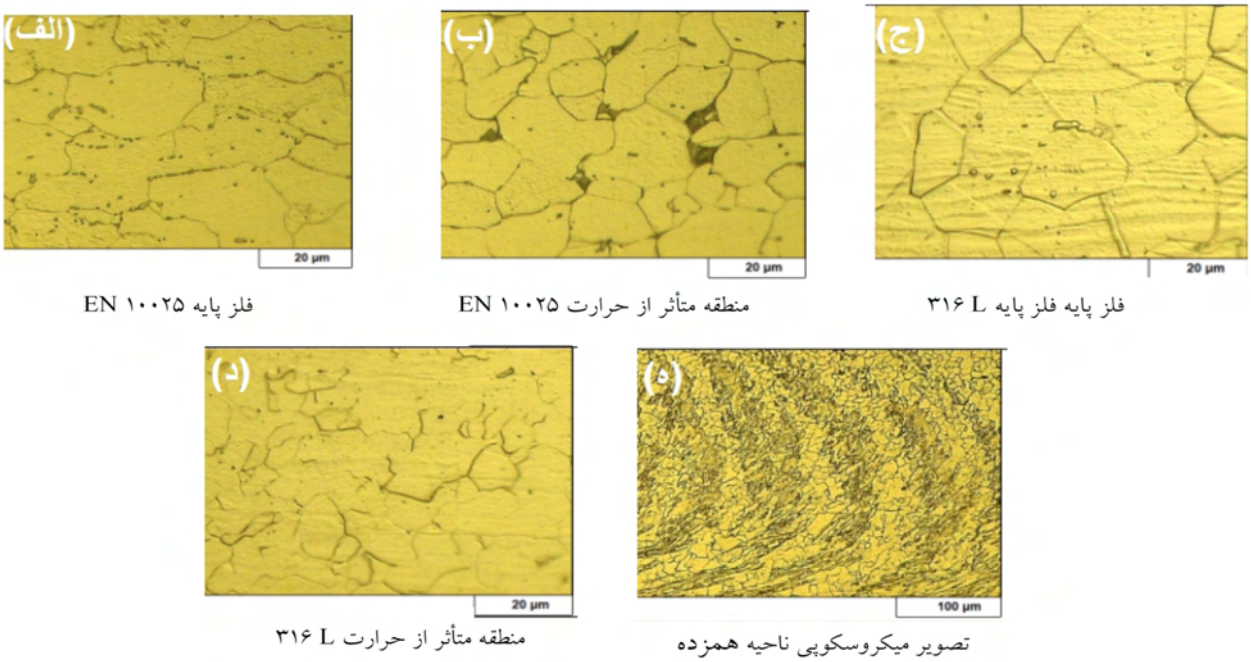
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



شکل11- تصویر ماکروسکوپی مقطع نمونه (a) جوشکاری شده با پارامترهای بهینه فولاد L 316 به EN 10025 سمت پیش رونده.



شکل 12- تصویر ماکروسکوپی مقطع نمونه (a) جوشکاری شده با پارامترهای بهینه فولاد L 316 به EN 10025 سمت پس رونده.



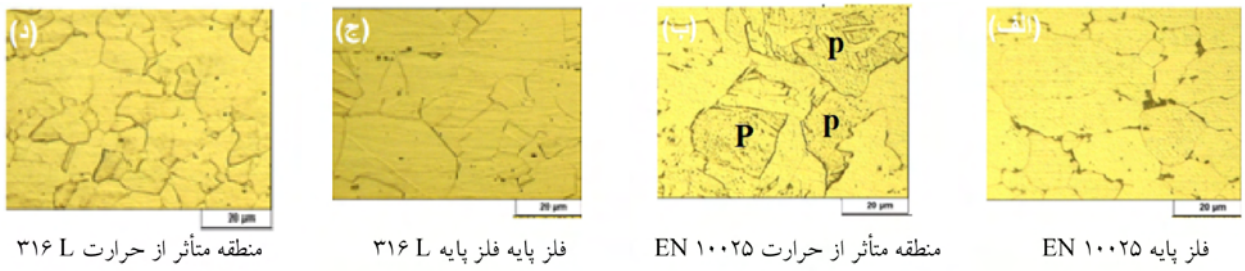
شکل 13- تصاویر متالوگرافی نمونه (b) مطابق با جدول (5)

حرارت و کار مکانیکی بسیار زیاد اندازه دانه‌ها 10 تا 20 برابر کاهش پیدا کرده است و باعث افزایش استحکام اتصال شده است.

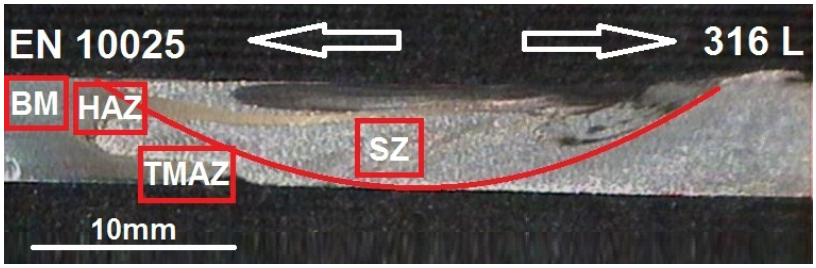
همچنین در این قسمت به دلیل اختلاط صورت گرفته بین دو فولاد ساده کربنی EN 10025 و فولاد زنگ نزن L 316 لایه‌های فقیر و غنی از کروم و دیگر عناصر تشکیل شده و باعث ایجاد حلقه های پیازی شکل در ناحیه همزده گردیده است. حلقه‌های پیازی ایجاد شده در تصویر (ه) به خوبی مشخص است.

مشخص است. همانطور که از جدول (5) مشخص است در نمونه‌های (c) میزان سرعت چرخش نسبت به حالت (a) بیشتر و سرعت پیش‌روی نیز نسبت به حالت (a) کمتر است، به عبارتی به دلیل سرعت چرخش بیشتر و حرکت خطی کمتر، میزان اصطکاک بین شانه-قطعه کار و پین-قطعه کار بیشتر است و نتیجه آن میزان حرارت ورودی بیشتر در قطعه کار است، در این شرایط انتظار می‌رود اندازه دانه‌ها در منطقه HAZ که تحت تاثیر حرارت قرار می‌گیرد با رشد همراه شود این موضوع در شکل (14) تصویر (ب) در منطقه HAZ فولاد EN 10025

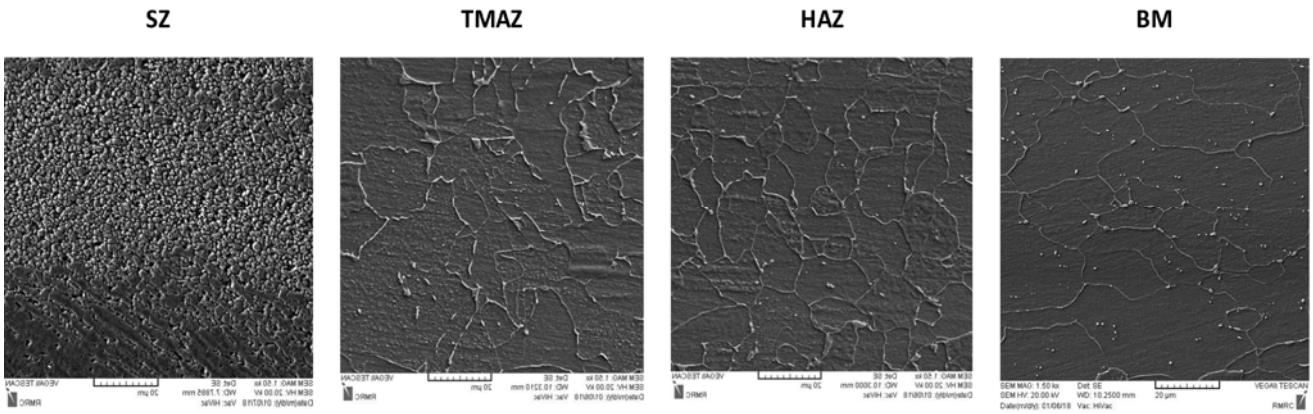
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



شکل 14- تصاویر متالوگرافی نمونه (c) مطابق با جدول (5)



شکل 15- مناطق مشخص شده در تصویر ماکروگرافی و تصویر برداری از مناطق مشخص شده مرتبط با شکل(16).



شکل 16-تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه های (a)، مطابق با مناطق مشخص شده در شکل (15)

کاملا مشهود است و ساختار ایجاد شده زمینه فرلیتی همراه با پرلیت بیشتر نسبت به دیگر نمونه‌ها است. لازم به ذکر است نمونه (c) به دلیل حرارت ورودی بالا و فشار از طرف شانه دچار کاهش ضخامت بیشتری در ناحیه همزده می‌شود و عملیات فورجینگ بیش از حد انتظار در این قسمت اتفاق می‌افتد و این موضوع می‌تواند عاملی برای کاهش استحکام کششی اتصال شود.

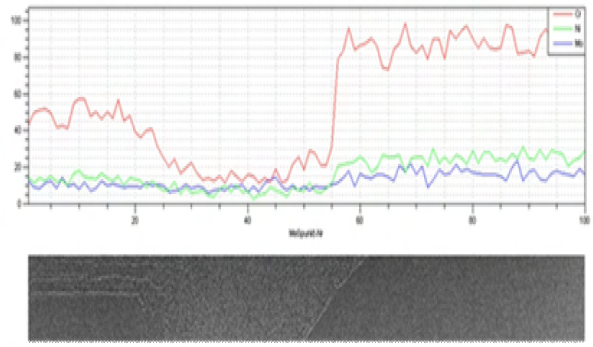
3-3- تصاویر میکروسکوپ الکترونی و آنالیز عنصری

همانطور که در قسمت مقدمه ذکر شد پارامترهای فرایند جوشکاری همزنی بخصوص سرعت چرخش ابزار و سرعت حرکت پیش روی تاثیر فراوانی بر روی خواص مکانیکی و متالورژیکی اتصال دارد، بنابراین در این بخش توسط میکروسکوب الکترونی روبشی با استفاده از آشکارساز برگشتی[1] به بررسی تصاویر و عنصری پرداخته می‌شود.

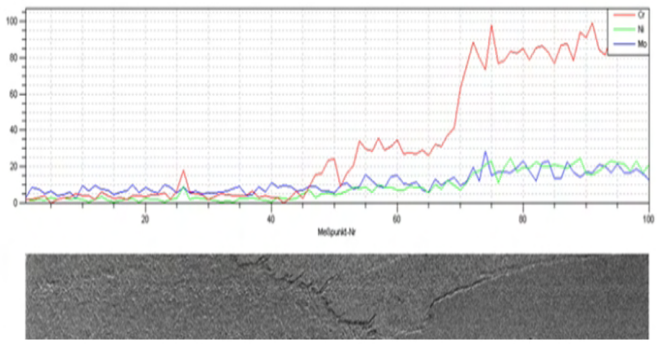
با بررسی ریزساختار فلز پایه ملاحظه شد، که فلز پایه EN 10025 ساختاری با زمینه کاملا فریتی با مقدار کمی پرلیتی است، بطور میانگین اندازه دانه‌های فریت 150 تا 200 میکرومتر است این در حالی است که اندازه دانه در منطقه TMAZ به دلیل عملیات مکانیکی و حرارتی اندازه دانه‌ها به 50 تا 100 میکرومتر کاهش پیدا می‌کند که این موضوع طبق معادله هال-پیچ رابطه (1) باعث افزایش استحکام، و به دلیل افزایش

1-Back-Scattered Electron Detector (BSE)

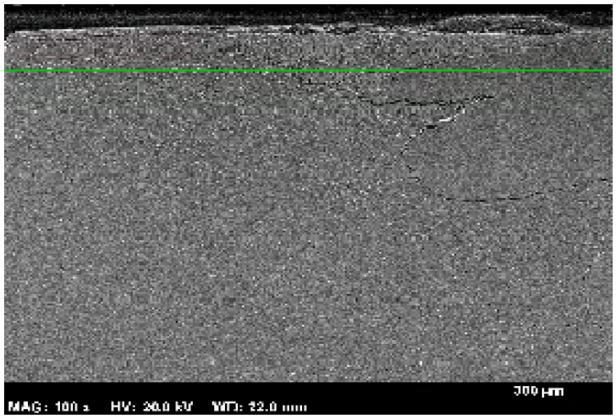
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

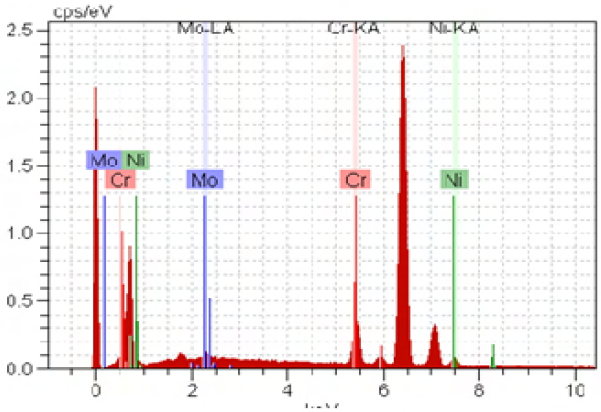


شکل 17- گراف توزیع عناصر از فولاد L 316 به طرف منطقه همزده در نمونه (a).

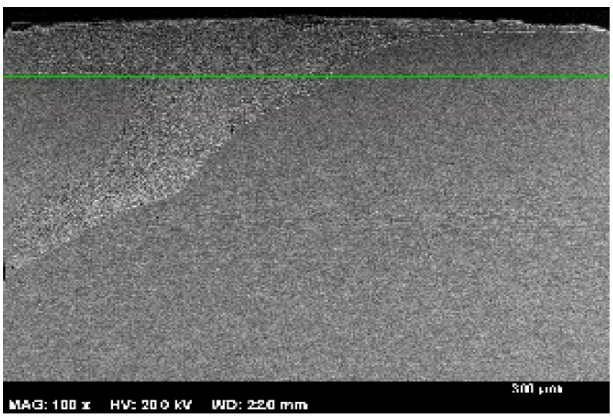


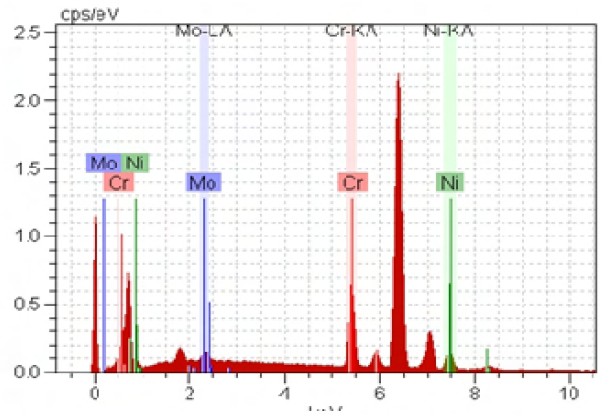
شکل 18- گراف توزیع عناصر از فولاد ساده کربنی EN 10025 به طرف منطقه همزده در نمونه (a).





شکل 19- تصویر میکروسکوپ الکترونی و توزیع عناصر در آنالیز خطی در نمونه (a) از سمت فولاد ساده کربنی EN 10025 به طرف ناحیه همزده.





شکل 20- تصویر میکروسکوپ الکترونی و توزیع عناصر در آنالیز خطی در نمونه (a) از سمت فولاد L 316 به طرف ناحیه همزده.

مرز دانه‌ها باعث انعطاف‌پذیری بیشتر می‌شود [21]. در رابطه (1) σ تنش جریان یا استحکام، σ^* و K ثابت های هم ارز و d قطر متوسط دانه می‌باشد.

در شکل (15) مناطق مشخص شده در تصویر ماکروگرافی و در شکل (16) تصاویر میکروسکوپ الکترونی مناطق فوق بطور مجزا از ناحیه همزده به سمت فلز پایه EN 10025 نشان داده شده است. در فلز پایه L 316 زمینه حاوی ساختار آستنیت همراه با دانه‌های هم محور می‌باشد. از آنجایی که در ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن L 316 عناصر فریت‌زایی نظیر کروم، مولیبدن و سیلسیم می‌باشد، همواره مقداری فریت در ساختار

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



شکل 21- نمونه های آزمایش کشش نمونه بهینه با فلزات پایه.

وجود دارد. با توجه به کرم معادل و نیکل معادل میزان فریت موجود در فولاد زنگ نزن 316 L بین 5%-10% می‌باشد[9].

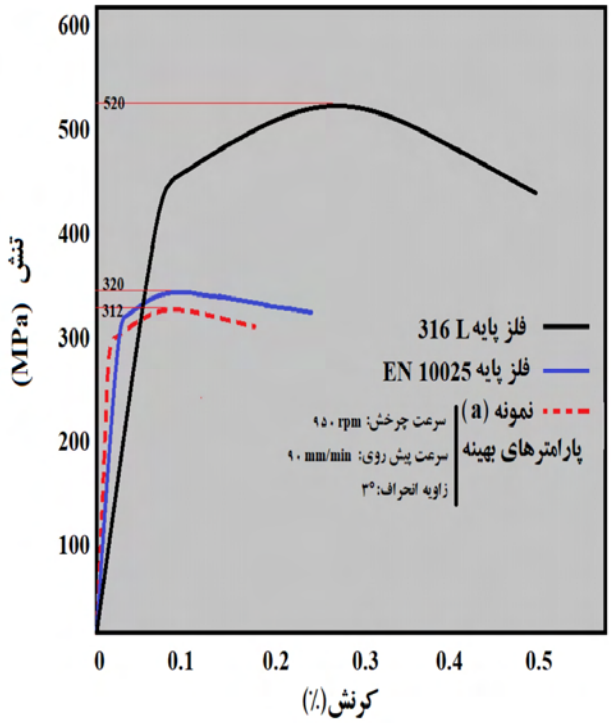
3-4- آنالیز خطی

در این قسمت به منظور بررسی تاثیر سرعت چرخش و سرعت پیش روی ابزار بر روی میزان اختلاط فلزات مورد اتصال و توزیع عناصر آلیاژی، آنالیز خطی EDS انجام شده است. بدین منظور از نمونه (a) آنالیز عنصری خطی گرفته شده است. لازم به توضیح است به دلیل بزرگ بودن طول خط Map در یک تصویر امکان Map از فلز پایه EN 10025 به طرف فلز پایه 316 L نمی‌باشد بنابراین این آنالیز عنصری خطی در دو مرحله انجام شده است. یک مرتبه از طرف فلز پایه EN 10025 به سمت ناحیه همزده و بار دیگر از طرف 316 L به سمت ناحیه همزده گرفته شده است. این تصاویر میکروسکوپی و آنالیز عنصری خطی در شکل های (17) و (18) نشان داده شده است. شکل (19) تصاویر میکروسکوپی الکترونی و حضور عناصر تاثیر گذار نیکل کروم و مولیبدن را از سمت فلز پایه EN 10025 به طرف ناحیه همزده نشان می دهد. با توجه به اینکه نمونه (a) با پارامترهای بهینه جوشکاری شده است، انتظار می‌رود توزیع عناصر بطور یکنواخت تر باشد همانطور که از شکل‌های (17) و(18) مشخص است عنصر کروم در قسمت فلزپایه EN 10025 نزدیک به صفر است و در ناحیه همزده شیب غلظتی عنصر کروم بطور قابل ملاحظه-ای افزایش می یابد و مجدداً در قسمتی از ناحیه همزده کروم کاهش پیدا می کند و آنالیز خطی وقتی به فلز پایه 316 L می‌رسد مجدداً کروم با افزایش روبرو می شود. این موضوع در مورد عناصر مولیبدن و نیکل نیز با شدت کمتری صادق است که نشان از اختلاط دو فولاد مورد اتصال در یکدیگر می باشد. این نوع توزیع عناصر آلیاژی از فلز پایه EN 10025 به سمت فولاد زنگ نزن 316 L مؤید انتخاب صحیح پارامترهای فرایند جوشکاری همزدنی می باشد و صحت انجام طراحی آزمایش DOE و متدولوژی سطح پاسخ را تأیید می کند. همچنین شکل (20) تصویر میکروسکوپ الکترونی و حضور عناصر آلیاژی در آنالیز خطی نمونه (a) از سمت فولاد 316 L به طرف ناحیه همزده را نشان می دهد.

3-5- آزمایش کشش

نمودارهای تنش بر حسب کرنش برای فولاد ساده کربنی EN 10025 و فولاد 316 L و همچنین نمونه (a) جوشکاری شده با پارامترهای بهینه در شکل های (21) و (22) نشان داده شده است.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



شکل 22- نمودار تنش کرنش. فلزات پایه و نمونه جوش خورده با پارامترهای بهینه.

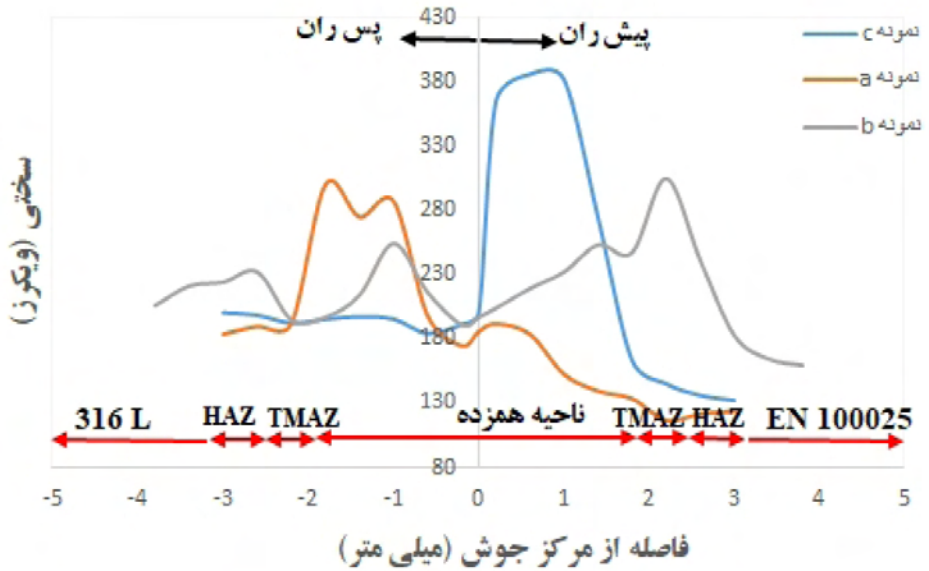
در مقایسه با نمونه‌های معمول کشش، فرایند تغییر شکل و شکست در نمونه‌های جوشکاری شده از نواحی مختلف با خواص و رفتار متفاوت، تشکیل شده است. رفتار هر کدام از مناطق موجود در یک اتصال می‌تواند بر روی مناطق مجاور آن تأثیرگذار باشد. به عنوان مثال تطابق کرنش یک ناحیه نرم با ناحیه سخت مجاور آن می‌تواند دشوار بوده و تغییر شکل ناحیه نرم را محدود سازد. کار سختی ناشی از تغییر شکل کششی که ابتدا در ناحیه نرم تر رخ می‌دهد و تأثیر متقابل آن با ناحیه سخت می‌تواند ناحیه شکست نهایی را به موقعیت متفاوت دیگری انتقال دهد [3و22]. همانطور که از شکل (22) نمودار تنش و کرنش بر می آید، فولاد EN 10025 دارای استحکام کمتر (320MPa) نسبت به فولاد 316 L (520MPa) می باشد و مشاهده می‌شود نمونه جوشکاری شده با پارامترهای (a) اشاره شده در جدول (6) و در شرایط بهینه توسط روش سطح پاسخ جوشکاری شده است، از فلز پایه EN 10025 و از سمت پیش رونده (AS) دچار شکست می‌شود که این موضوع بیانگر انتخاب صحیح پارامترها می‌باشد. همچنین با توجه به شکل (22) فولاد زنگ نزن آستنیتی 316 L دارای بیشترین استحکام و بیشترین کرنش و نمونه (a) با پارامترهای بهینه دارای کمترین کرنش می باشد. دلیل آن را می توان ایجاد ناحیه سخت در ناحیه همزده دانست [23] که منتج به کاهش شکل پذیری و کاهش کرنش می شود [23]. نکته ی قابل تأمل در کرنش های بدست آمده این است که علی رغم شکست در فلز پایه EN 10025 در هر دو نمونه بدون جوش و نمونه جوش خورده با پارامترهای حالت بهینه میزان کرنش به ترتیب 30 و 15 درصد است. علت کرنش 15 درصد بوجود آمده در نمونه (a) جوشکاری شده با پارامترهای حالت بهینه را می توان ناشی از ریزدانه شدن در ناحیه همزده دانست که این موضوع می تواند باعث افزایش سختی و استحکام شود و به دنبال آن میزان تغییر شکل و کرنش را کاهش دهد بنابراین کرنش 15 درصدی ایجاد شده در نمونه جوشکاری شده با پارامترهای حالت (a) امری عادی و قابل قبول می باشد. جدول (6) مقایسه نتایج آزمایش کشش نمونه بهینه با فلزهای پایه را نشان می دهد.

3-6- آزمایش سختی سنجی

پروفیل توزیع ریز سختی افقی و عمودی نمونه های (a)،(b) و (c) در شکل (23) نشان داده شده است. لازم به ذکر است نمونه (a) پارامتر بهینه و 950 rpm و 90 mm/min و نمونه (b) با پارامترهای 800 rpm و 80 mm/min و نمونه (c) با پارامترهای1500 rpm و5/47 mm/min مطابق جدول (5) جوشکاری شده است.

در شکل (23) همانطور که ملاحظه می‌شود به دلیل اتصال غیرهمجنس فولاد ساده کربنی EN 10025 و فولاد زنگ نزن 316 L توزیع غیر یکنواخت سختی در هر سه نمونه ملاحظه می شود. در نمونه (a) که با پارامترهای بهینه جوشکاری شده است نسبتاً با توزیع سختی یکنواخت تری همراه است که این موضوع می‌تواند دلیلی بر توزیع یکنواخت ناحیه همزده باشد. همانطور که ازنمونه (a) بر می آید افزایش سختی از سمت فولاد ساده کربنی EN 10025 به سمت فولاد زنگ نزن 316 L می‌باشد و این افزایش سختی در ناحیه همزده، به دلیل

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



شکل23- پروفیل ریز سختی سنجی افقی نمونه های جوشکاری شده مطابق با پارامترهای جدول (5).

اختلاط از سمت فولاد EN 10025 به سمت فولاد 316 L می باشد که توزیع اختلاط در تصویر ماکروگرافی شکل (10) نمونه (a) و در قسمت آنالیز خطی در شکل های (17) و (18) به خوبی نشان داده شده است. در نمونه (a) حداقل سختی در منطقه فلز پایه EN 10025 حدوداً (130HV) می باشد که با محل شکست نمونه در آزمایش کشش همخوانی دارد. همچنین در نمونه (a) به دلیل بهینه سازی پارامترهای فرایند جوشکاری، حرارت ورودی بهینه می باشد و ساختار در ناحیه همزده به دلیل عملیات مکانیکی ریزدانه می‌شود و باعث افزایش سختی در این منطقه می شود. در منطقه TMAZ به دلیل اینکه کمتر تحت عملیات ترمومکانیکی قرار گرفته است، نسبت به ناحیه همزده درشت دانه تر شده است و سختی با شیب کمتری نسبت به ناحیه همزده افزایش پیدا کرده است. در منطقه HAZ نیز به دلیل درشت دانه تر شدن دانه ها، سختی بصورت نامحسوس تری افزایش پیدا کرده است. در نمونه (b) که با پارامترهای قابل قبول جوشکاری شده است در منطقه فلز پایه EN 10025 دارای حداقل سختی (140HV) می باشد با بررسی نتیجه آزمایش کشش نمونه (b) و مقایسه آن با توزیع پروفیل سختی این نمونه ملاحظه می شود که این توزیع سختی نیز با آزمایش کشش همخوانی دارد.

در ناحیه همزده این نمونه در فاصله 2 تا 3 میلی متری از مرکز جوش و به سمت فولاد ساده کربنی EN 10025 ملاحظه می گردد سختی بطور قابل توجهی افزایش پیدا کرده است و این موضوع بیانگر اختلاط مناسب فولادهای مورد اتصال در یکدیگر است و همانطور که از تصویر ماکروگرافی این نمونه شکل (10) نمونه (b) بر می آید فولاد 316 L در ناحیه همزده به سمت فولاد EN 10025 کشیده شده است. در نمونه (c) که با پارامترهای قابل قبول نیز جوشکاری شده است به دلیل سرعت حرکت خطی پایین و سرعت چرخش بالا نسبت به نمونه بهینه سازی شده (سرعت چرخش 1500 rmp و سرعت حرکت خطی 50mm/min) اصطکاک زیادی بین شانه ابزار-قطعه کار و پین-قطعه کار بوجود می آید که نتیجه آن بالا رفتن دمای پین و حرارت ورودی در قطعه کار می باشد. همچنین عملیات ترمو مکانیکی باعث ریز شدن دانه ها می‌گردد [1] و این امر باعث بالا رفتن سختی در ناحیه همزده می شود و انعطاف پذیری منطقه جوش را کاهش می‌دهد[3و6].

4-نتیجه گیری

-ورق‌های‌غیرهمجنس‌فولاد زنگ‌نزن 316L و فولاد EN10025

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

با ضخامت یکسان 1/5 میلی متر را می توان از طریق جوشکاری همزنی جوش داد.

-پارامترهای بهینه برای جوشکاری ورق های غیر همجنس EN 10025 و L 316 عبارتند از سرعت چرخش(950 دور بر دقیقه)، سرعت پیش روی (90 میلی متر بر دقیقه) و زاویه انحراف (3 درجه) و همچنین سرعت حرکت خطی، زاویه انحراف به ترتیب روی استحکام ورق های جوش خورده بیشترین اثر را از خود نشان داده اند.

-با توجه به کار مکانیکی اندازه دانه ها در ناحیه همزده تا 20 برابر کاهش پیدا می کند و این موضوع باعث ریزدانه شدن و افزایش مرزدانه ها می شود در نتیجه خواص مکانیکی بهبود می یابد.

-نتایج حاصل از آنالیز خطی نشان از اختلاط دو فولاد مورد اتصال در یکدیگر می باشد.

-اتصال غیر همجنس فولاد EN 10025 و فولاد زنگ نزن L 316 از سمت پیش ران می شکند و دارای استحکام نهایی 312 MPa می باشد.

-سختی در نمونه جوشکاری شده با پارامترهای بهینه دارای شیب منفی تقریباً یکسانی از طرف فولاد زنگ نزن L 316 به سمت فولاد EN 10025 می باشد و در ناحیه همزده به دلیل اختلاط دو فولاد، شیب سختی بصورت متناوب گاهی با افزایش و کاهش مواجه است.

منابع

1-Mishra, Rajiv S., and Z. Y. Ma. "Friction stir welding and processing." Materials Science and Engineering: R: Reports50, no. 1-2 (2005): 1-78.

2-Ghaffarpour, Morteza, Sina Kolahgar, Bijan Mollaei Dariani, and Kamran Dehghani. "Evaluation of dissimilar welds of 5083-H12 and 6061-T6 produced by friction stir welding." Metallurgical and Materials Transactions A 44, no. 8 (2013): 3697-3707.

3-علیمحمدی، ا، جوشکاری فولاد ساده کربنی به روش جوشکاری همزنی و ارزیابی خواص اتصال، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، گزارش علمی،زمستان 1392.

4-Ahmed, M. M. Z., Sabbah Ataya, MM El-Sayed Seleman, H. R. Ammar, and Essam Ahmed. "Friction stir welding of similar and dissimilar AA7075 and AA5083." Journal of Materials Processing Technology 242 (2017): 77-91

5-Meran, C., and O. E. Canyurt. "Friction Stir Welding of austenitic stainless steels." parameters 6 (2010): 13.

6-Chung, Young Dong, Hidetoshi Fujii, Yufeng Sun, and Hiroyasu Tanigawa. "Interface microstructure evolution of dissimilar friction stir butt welded F82H steel and SUS304." Materials Science and Engineering: A 528, no. 18 (2011): 5812-5821.

7-Husain, Md M., R. Sarkar, T. K. Pal, N. Prabhu, and M. Ghosh. "Friction stir welding of steel: heat input, microstructure, and mechanical property co-relation." Journal of Materials Engineering and Performance 24, no. 9 (2015): 3673-3683.

8-Fazel-Najafabadi, M., S. F. Kashani-Bozorg, and A. Zarei-Hanzaki. "Joining of CP-Ti to 304 stainless steel using friction stir welding technique." Materials & Design 31, no. 10 (2010): 4800-4807.

9-Chung, Y. D., H. Fujii, R. Ueji, and N. Tsuji. "Friction stir welding of high carbon steel with excellent toughness and ductility." Scripta Materialia 63, no. 2 (2010): 223-226.

10-Bilgin, Mehmet Burak, and Cemal Meran. "The effect of tool rotational and traverse speed on friction stir weldability of AISI 430 ferritic stainless steels." Materials & Design 33 (2012): 376-383.

11-Jafarzadegan, M., A. H. Feng, A. Abdollah-Zadeh, T. Saeid, J. Shen, and H. Assadi. "Microstructural characterization in dissimilar friction stir welding between 304 stainless steel and st37 steel." Materials Characterization 74 (2012): 28-41.

12-Yazdipour, A., and A. Heidarzadeh. "Effect of friction stir welding on microstructure and mechanical properties of dissimilar Al 5083-H321 and 316L stainless steel alloy joints." Journal of Alloys and Compounds 680 (2016): 595-603.

13-Ramesh, R., I. Dinaharan, Ravi Kumar, and E. T. Akinlabi. "Microstructure and mechanical characterization of friction stir welded high strength low alloy steels." Materials Science and Engineering: A 687 (2017): 39-46.

14-Cho, Hoon-Hwe, Heung Nam Han, Sung-Tae Hong, Jong-Hwan Park, Yong-Jai Kwon, Seok-Hyun Kim, and Russell J. Steel. "Microstructural analysis of friction stir welded ferritic stainless steel." Materials Science and Engineering: A 528, no. 6 (2011): 2889-2894.

15-Standard, A. S. T. M. "E8," Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials." Annual book of ASTM standards3 (2004): 57-72.

16-Fujii, Hidetoshi, Ling Cui, Nobuhiro Tsuji, Masakatsu Maeda, Kazuhiro Nakata, and Kiyoshi Nogi. "Friction stir welding of carbon steels." Materials Science and Engineering: A 429, no. 1-2 (2006): 50-57.

17-Ahn, B. W., D. H. Choi, D. J. Kim, and S. B. Jung. "Microstructures and properties of friction stir welded

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

409L stainless steel using a Si3N4 tool." Materials Science and Engineering: A 532 (2012): 476-479.
18-Ghaffarpour, Morteza, Ahmad Aziz, and Taha-Hossein Hejazi. "Optimization of friction stir welding parameters using multiple response surface methodology." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications 231, no. 7 (2017): 571-583.
19-Kalvala, Prasad Rao, Javed Akram, Mano Misra, Damodaram Ramachandran, and Janaki Ram Gabbita. "Low temperature friction stir welding of P91 steel." Defence Technology 12, no. 4 (2016): 285-289.
20-Fratini, L., G. Buffa, and R. Shivpuri. "Improving friction stir welding of blanks of different thicknesses." Materials Science and Engineering: A 459, no. 1-2 (2007): 209-215.
21-Hosseini, M., and H. Danesh Manesh. "Immersed friction stir welding of ultrafine grained accumulative roll-bonded Al alloy." Materials & Design 31, no. 10 (2010): 4786-4791.
22-Qu, S., C. X. Huang, Y. L. Gao, G. Yang, S. D. Wu, Q. S. Zang, and Z. F. Zhang. "Tensile and compressive properties of AISI 304L stainless steel subjected to equal channel angular pressing." Materials Science and Engineering: A 475, no. 1-2 (2008): 207-216.
23-Habibi, M., R. Hashemi, M. Fallah Tafti, and A. Assempour. "Experimental investigation of mechanical properties, formability and forming limit diagrams for tailor-welded blanks produced by friction stir welding." Journal of Manufacturing Processes 31 (2018): 310-323.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]