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

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

Volume 10, Number 2, 2025



Investigating the mechanical behavior and microstructure of AISI 316L stainless steel sheets welded by resistance spot welding method using copper interface layer

H. Abedi Chermahini, M. Piran, A. Esmaeili Chamgordani, M. Atapoor*
Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan 84156-83111, Iran.

Received 16 August 2024 ; Accepted 4 October 2024

Abstract

In this research, the mechanical and microstructural properties of AISI 316L sheets welded by RSW method using copper interlayer were investigated. In this regard, two types of connections were made, one without the use of an interlayer and the other with the use of a copper interlayer in different currents. In order to choose the optimal current for both types of connections, tensile tests were first performed, and microstructural, microhardness, elemental evaluation and failure mode tests were conducted on the selected samples. According to the obtained results, by increasing the electric current, the heat input in the welding pool is sufficiently high and the microstructural and mechanical properties of the welding zone were improved(Conversion of coarse grain to fine grain). Also, due to the optimality of the electric current in both samples with and without the interface layer, both samples had environmental failure, which indicates the high strength of the interface and their welding point. Changes in the chemical composition in different welding zones were insignificant and the distribution of elements was uniform in all zones. Also, the hardness changes from the base metal to the center of the welding zone were in the order of welding zone > base metal > heat-affected zone, which was consistent with the results obtained from the microstructural investigations. According to the results obtained for both cases with and without the use of an interface layer, the resistance spot welding method showed a successful connection for both types of cases.

Keywords:AISI 316L Sheet, Copper Interlayer, Resistance Spot Welding.

*Corresponding Author M. Atapoor, m.atapour@cc.iut.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.04]

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

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال دهم، شماره2، پاییز و زمستان 1403



بررسی رفتار مکانیکی و ریزساختار ورق‌های فولاد زنگ‌نزن AISI 316L جوش‌داده‌شده به روش جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای با استفاده از لایه واسط مس

حسین عابدی چرمهینی، محمدمهدی پیران، علی اکبر اسماعیلی چمگردانی، مسعود عطاپور *

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان 84156-83111، ایران.

دریافت مقاله: 1403/05/26 ؛ پذیرش مقاله: 1403/07/13

چکیده

در پژوهش حاضر به بررسی خواص مکانیکی و ریزساختار ورق‌های فولاد زنگ نزن گرید 316L جوش داده شده به روش جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای با استفاده از لایه واسط مس پرداخته شد. در همین راستا دو حالت، یکی بدون استفاده از لایه واسط و دیگری با استفاده از لایه واسط مس در جریان‌های مختلف اتصال داده شدند. به منظور انتخاب جریان بهینه برای هر دو نوع اتصال ابتدا آزمون کشش انجام شد. پس از آن بررسی‌های ریزساختاری، ارزیابی‌های ریزسختی، توزیع عنصری و حالت شکست بر روی نمونه‌های بهینه انجام شد. بنابر نتایج بدست آمده با افزایش جریان الکتریکی حرارت ورودی در حوضچه جوش تا حد مناسبی بالا رفته و خواص مکانیکی با ریزتر شدن دانه‌های ناحیه جوش بهبود یافته است. همچنین بدلیل بهینه بودن جریان الکتریکی در هر دو نمونه "با و بدون" لایه واسط، هر دو نمونه دچار شکست محیطی شدند که نشان از استحکام بالای فصل مشترک و نقطه جوش آن‌ها دارد. تغییرات ترکیب شیمیایی در نواحی مختلف جوش ناچیز بوده و توزیع عناصر در تمامی نواحی یکنواخت گزارش شد. همچنین بیشترین سختی با حرکت از سمت فلز پایه به سمت مرکز جوش به فلز جوش اختصاص داشت و سپس به ترتیب فلز پایه و ناحیه متاثر از حرارت قرار داشتند. با نتایج بدست آمده از بررسی‌های ریزساختاری نیز مطابقت داشت.

کلمات کلیدی: جوشکاری همزن اصطکاکی، مس، آلومینیم، پودر نیکل.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: مسعود عطاپور، m.atapour@cc.iut.ac.ir

1- مقدمه

در فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای، سطوحی که روی هم قرار گرفته‌اند، از طریق حرارت تولید شده، در یک یا چند نقطه به یکدیگر متصل می‌شوند. گرمای تولید شده در این نقاط حاصل از جریان الکتریکی است که بین الکترودها برقرار می‌شود و از میان قطعات نیز عبور می‌کند [1]. ضمن اینکه الکترودها در این وضعیت با اعمال فشاری خاص، سطوح را بهم نزدیک می‌کنند. عوامل شدت جریان و زمان جوشکاری، از طریق دستگاه جوشکاری قابل کنترل هستند. اما مقاومت الکتریکی به عوامل مختلفی از جمله جنس و ضخامت، قطعه

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.04]

کار، فشار بین الکترودها، اندازه و شکل و جنس الکترودها و چگونگی سطح کار یعنی میزان صافی و تمیزی آن بستگی دارد. دستگاه‌های جوشکاری مقاومتی شامل دو واحد کلی می‌باشند. اولی برای بالابردن درجه حرارت موضع مورد جوش؛ دومی به منظور ایجاد فشار لازم برای اتصال دو قطعه در محل جوش است. نیروهای اعمالی می‌توانند به صورت دستی، هیدرولیک، پنوماتیک و هیدروپنوماتیک ایجاد شوند [2].

عدم نیاز به مواد مصرفی، گاز محافظ و فلزپرکننده از جمله مزایای این فرایند به حساب می‌آیند؛ همچنین از نظر محیط‌زیستی نیز این فرایند کاملا سالم می‌باشد [3].

از جمله فلزات قابل جوشکاری با این فرایند، فولادها می‌باشند که در بین آن‌ها فولادهای زنگ نزن شهرت زیادی دارند. در بین فولادهای زنگ نزن نیز، فولادهای زنگ نزن آستنیتی شاخص‌تر هستند و نسبت به سایر گروه‌ها در تناژ بالاتری تولید و در بازار عرضه می‌شوند. این فولادها به دلیل برخورداری خواص مکانیکی مناسب در مواردی که نیاز به مقاومت به خوردگی قابل ملاحظه در اتمسفر و یا دماهای بالا است به کار گرفته می‌شوند. فولاد زنگ نزن گرید 316L یکی از مهم‌ترین انواع فولادهای زنگ نزن آستنیتی است که از فازهای آستنیت و فریت در ریزساختار تشکیل شده است. همانطورکه گزارش شد، این گرید به دلیل مقاومت بالا در برابر خوردگی، ظاهر تزئینی و جوش‌پذیری عالی به طور گسترده در کاربردهای مختلف صنعتی مورد استفاده قرار می گیرد. علاوه بر این، محتوای کربن کم باعث کاهش تشکیل کاربیدها در مرزهای دانه در جوشکاری می‌شود [4]. با این حال، یکی از محدودیت‌های عمده فولاد زنگ‌نزن آستنیتی، منطقه متاثر از گرما (HAZ) است که در آن رسوب کاربید غنی از کروم بین دانه‌ای در طول فرایند جوشکاری شکل می‌گیرد و منجر به کاهش مقاومت به خوردگی در اتصال جوش داده شده می‌شود. برای حل این مسئله، دو راه پیشنهاد شد: (1) استفاده از فولاد زنگ نزن آستنیتی با محتوای کربن کم مانند 316L و (2) فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای (RSW) که می تواند تشکیل این موارد نامطلوب را کاهش دهد. ترک داغ یکی دیگر از مسائلی است که در ناحیه جوش داده شده رخ می‌دهد. البته مقدار کمی از فریت دلتا در ریزساختار قطعه جوش، می‌تواند از مشکل ترک داغ جلوگیری کند و ممکن است حساسیت را در مناطق جوشکاری HAZ کاهش دهد[5].

کیانرسی و همکاران، تاثیر جریان را بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی جوش مقاومتی نقطه ای ورق‌های 316L مورد مطالعه قرار دادند، در نتیجه دریافتند که افزایش جریان تا 8 کیلو آمپر منجر به تشکیل فریت دلتا سوزنی در کنار فریت دلتا اسکلتی در ناحیه جوش شد، که علت آن هم نرخ سرمایش شدید به علت افزایش فشار الکترود آبگرد در برخی نواحی جوش ذکر شد، و تشکیل این فریت‌های سوزنی درشت دانه، سبب کاهش میکروسختی فلزجوش شد [6].

جعفری و همکارانش به ارزیابی خواص منطقه اتصال جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای فولاد زنگ نزن 304L فوق ریزدانه/نانو ساختار تولید شده به روش ترمومکانیکی مارتنزیت پرداختند. مشاهدات آن‌ها حاکی از وجود ساختار ریختگی دکمه جوش همراه با شکل‌گیری فاز زمینه آستنیت و حدود 3 درصد فاز فریت دلتا در ناحیه جوش بود. نتایج حاصل از جوشکاری نمونه‌ها در اندازه دانه متفاوت نشان از کاهش نیروی شکست با افزایش اندازه دانه داد[7].

مستعان و همکارانش به بررسی تجربی و عددی اثر لایه واسط از جنس فولاد زنگ نزن 347 بر ریزساختار، خواص مکانیکی و حالت شکست جوش‌های نقطه‌ای مقاومتی ورق‌های فولاد زنگ‌نزن 321 پرداختند. بدین منظور دو نوع اتصال، یکی بدون استفاده از لایه واسط و دیگری با لایه واسط با ضخامت 0/05 میلی‌متر در جریان‌ها و زمان‌های مختلف جوشکاری ایجاد شد و مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که افزایش جریان و زمان جوشکاری سبب تغییر حالت شکست از فصل مشترکی به حالت شکست محیطی به دلیل افزایش در اندازه ناحیه ذوب می‌شود. تغییرات ترکیب شیمیایی در اثر حضور لایه واسط در منطقه جوش در کنار سرعت سرد شدن بیشتر در شرایطی که از لایه واسط استفاده می‌شود، سبب می‌شود تا فازهای متفاوتی در منطقه جوش شکل

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.04]

گرفته و فازمارتنزیت به صورت پراکنده در این منطقه مشاهده گردد[8]. در این مطالعه، برای بهبود ویژگی‌های جوشکاری متعدد از جمله اندازه دکمه جوش، منطقه متاثر از حرارت (HAZ) کوچکتر، ظرفیت تحمل بار کششی-برشی مواد جوش داده شده، حالت‌های شکست و انرژی شکست و تاثیر لایه‌میانی مسی، مطالعات بهینه‌سازی انجام و شرایط بهینه به دست آمده برای بررسی‌های مکانیکی و ریزساختاری انتخاب شد. همانطورکه انتظار می‌رفت، فرایند جوشکاری سریع منجر به تشکیل ریزساختارهای پیچیده در HAZ و نواحی جوش و در نتیجه دشواری پیش‌بینی فازهای تشکیل شده در جوش شد.

در تحقیق حاضر به مطالعه خواص مکانیکی و ریزساختاری قطعات جوشکاری شده به روش مقاومتی نقطه‌ای از جنس فولاد زنگ نزن 316L به دو صورت با و بدون لایه واسط مس پرداخته شده است.

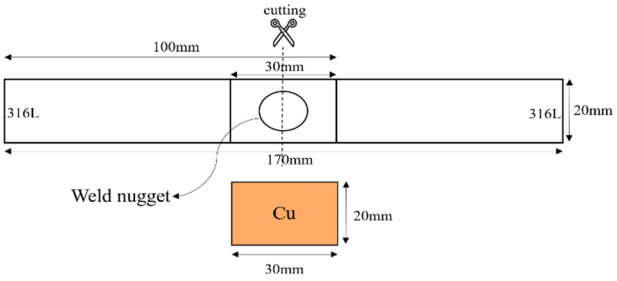
2-مواد و روش انجام پژوهش

در این پژوهش از ورق‌های فولاد زنگ نزن 316L به ضخامت یک میلی‌متر و فویل مس به ضخامت 0/1 میلی‌متر به عنوان لایه واسط استفاده شده است. ترکیب شیمیایی ورق فولادی مورد استفاده در جدول(1) برحسب درصد وزنی ارائه شده است.

جدول1- ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن 316L

Fe	Cr	Mn	Ni	Mo	Si	C	Cu	Cr_{eq}/Ni_{eq}
Bal	16.9	1.3	10.2	2.0	0.5	0.02	0.05	1.69

ورق‌های فولادی در ابعاد 20×100 میلی‌متر و فویل مس در ابعاد 20×30 میلی‌متر در نمونه‌های دارای لایه واسط مورد استفاده قرار گرفتند. نمونه‌های برش خورده مطابق شکل(1) در حضور و غیاب لایه واسط با استفاده از دستگاه جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای مدل CU900 ساخت شرکت نوین سازان و در جریان‌های متفاوت ارائه شده در جدول (2) و (3) به یکدیگر متصل شدند. برای نمونه‌های دارای لایه میانی مس، جریان دستگاه برای هر نمونه به مقدار 1/25 آمپر افزایش یافت همچنین زمان جوشکاری از 8 به 10 سیکل و نیروی الکترود نیز از 306 به 407 کیلوگرم در نیوتون به صورت افزایشی انتخاب شد که دلیل این امر، اضافه شدن دو مقاومت در بالا و پایین لایه میانی مس به تعداد مقاومت‌های موجود بود.



شکل1- طرح‌واره و ابعاد نمونه‌های جوشکاری شده.

جدول2-پارامترهای جوشکاری برای نمونه‌های دارای لایه واسط مس.

شماره نمونه	جریان (کیلوآمپر)	زمان جوشکاری (سیکل)	نیروی الکترود (کیلوگرم در نیوتون)
1	5/25	10	407
2	7/25	10	407
3	9/25	10	407
4	11/25	10	407
5	13/25	10	407

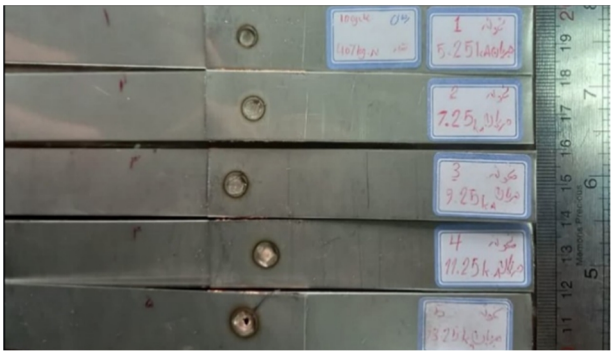
جدول3-پارامترهای جوشکاری برای نمونه‌های بدون لایه واسط مس.

شماره نمونه	جریان (کیلوآمپر)	زمان جوشکاری (سیکل)	نیروی الکترود (کیلوگرم در نیوتون)
1	4	8	306
2	6	8	306
3	8	8	306
4	10	8	306
5	12	8	306

پس از انجام فرایند جوشکاری از بین نمونه‌های موجود در شکل(2) و (3)، نمونه بهینه برحسب بیشترین نیروی استحکام کششی اندازه‌گیری شده به کمک دستگاه تست کشش HOUNSFIELD مدل H50KS انتخاب شد. نمونه‌های بهینه منتخب از هردو مدل جوشکاری شده "با و بدون" لایه واسط، مطابق شکل (1) قسمت نقطه چین، از وسط نقطه‌جوش به صورت عرضی مقطع زده شدند. سپس برای بررسی ریزساختار، مورد آماده‌سازی متالوگرافی قرار گرفتند. برای این منظور نمونه ابتدا به صورت مانت گرم درآمده و سپس از

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.04]

سنباده مش80 تا 2500 سنباده زنی شده و با محلول اچانت حاوی تیزاب حاوی HCl و HNO_3 به نسبت 3 و 1 و مدت زمان 30 ثانیه اچ شدند. نمونه‌های اچ شده در مرحله اول توسط میکروسکوپ نوری Nikon مدل EPIPHOT300 و در مرحله دوم توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی(SEM) PHILIPS مدل XLC به صورت دقیق‌تر مورد بررسی و تصویربرداری قرارگرفتند. پس از بررسی‌های ریزساختاری و در مرحله سوم، نمونه‌ها تحت بررسی ریزسختی توسط دستگاه ریزسختی‌سنجی MICROHARDNESS TESTER مدل MH3 با نیروی 10 گرم و زمان اعمال بار 10 ثانیه قرار گرفتند.



شکل2- نمونه‌های جوشکاری شده با لایه واسط.

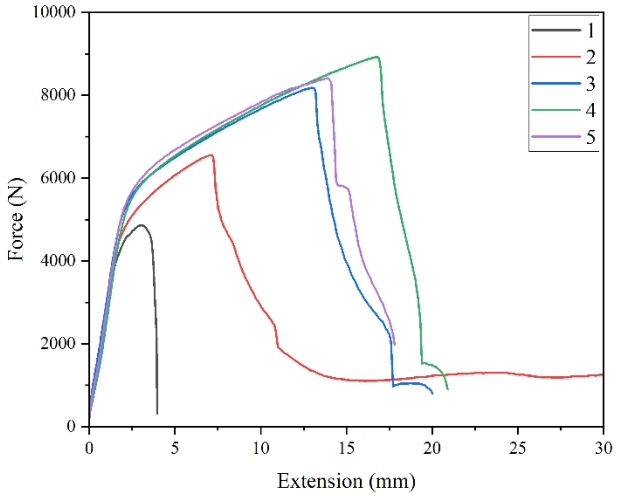


شکل3- نمونه‌های جوشکاری شده بدون لایه واسط.

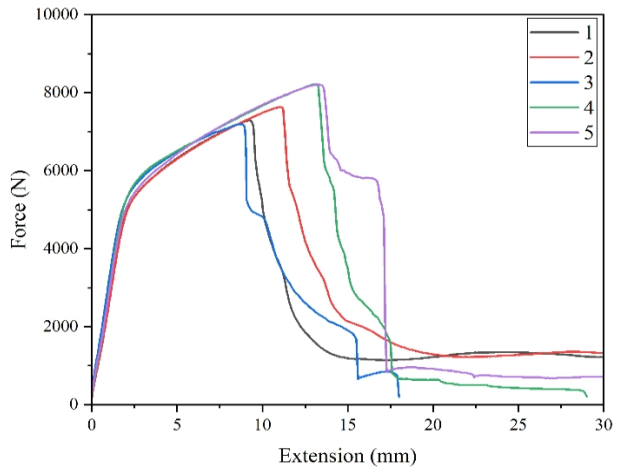
3- نتایج و بحث

3-1-کشش

به منظور انتخاب نمونه با جریان بهینه و انجام ارزیابی‌ها و مقایسه‌های بعدی از آزمون کشش استفاده شد. منحنی‌های نیرو-جابه‌جایی نمونه‌های جوشکاری شده بدون لایه واسط و با لایه واسط در جریان‌های الکتریکی مختلف به ترتیب در شکل‌های(4و5) قابل مشاهده است. مطابق با شکل‌های(4و 5) مشاهده می‌شود که به طور کلی با افزایش جریان الکتریکی استحکام نهایی نمونه‌های مورد آزمایش تا نمونه 4 افزایش یافته است.



شکل4- منحنی‌های نیرو-جابه‌جایی حاصل از آزمون کشش مربوط به نمونه‌های بدون لایه واسط.



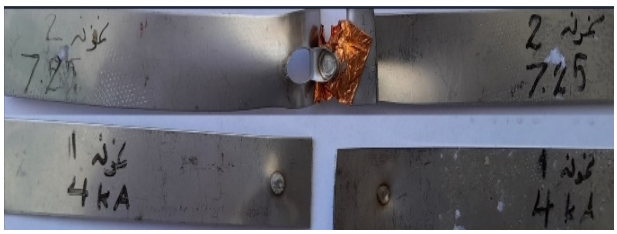
شکل5- منحنی‌های نیرو-جابه‌جایی حاصل از آزمون کشش مربوط به نمونه‌های با لایه واسط.

مهم‌ترین پارامتر کنترل‌کننده ظرفیت تحمل نیرو، قطر دکمه‌جوش است. با بزرگ‌تر شدن قطر دکمه جوش، مقاومت آن در برابر تغییر شکل بیشتر می‌شود. به عبارت دیگر، اندازه دکمه‌جوش تأثیر مستقیمی بر توزیع تنش‌ها در فصل مشترک و محیط دکمه جوش دارد. هر چه قطر دکمه جوش کوچک‌تر باشد، مقاومت به شکست در فصل مشترک کاهش یافته و

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.04]

احتمال وقوع حالت شکست فصل مشترک افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، با افزایش مساحت ناحیه اتصال، مقاومت به شکست فصل مشترک نیز بیشتر می‌گردد. پدیده بیرون‌زدگی مذاب زمانی رخ می‌دهد که نیروی داخلی دکمه جوش که ناشی از فشار داخلی در دکمه مذاب می‌باشد به دلایل ذوب شدن، انبساط مذاب و عوامل دیگر، از نیروی اعمال شده توسط الکترودها بیشتر شود. مراجع ذکر شده نشان می‌دهند که با وقوع پدیده بیرون‌زدگی مذاب همزمان با اندازه دکمه جوش، استحکام جوش‌ها دیگر افزایش نمی‌یابد[10]. با بررسی مودشکست در نمونه‌های بهینه درشکل شماره (7) می‌توان دریافت که در هر دو حالت با و بدون لایه واسط استحکام ناحیه جوش بدلیل بهینه بودن جریان الکتریکی بالاتر از بقیه نواحی بوده و شکست محیطی رخ داده است. بنابراین با وجود بالابودن جریان الکتریکی نمونه‌های مورد آزمایش نسبت به نمونه‌های دیگر در بخش کشش، جریان استفاده شده بهینه بوده و شاهد پدیده بیرون زدگی مذاب نبوده و استحکام این ناحیه حفظ شده است.



شکل6- حالت شکست در نمونه‌ها: تصویر بالا شکست محیطی، تصویر پایین شکست فصل مشترکی.

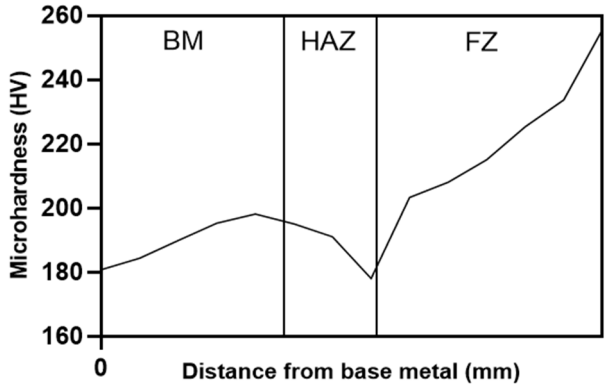


شکل7- شکست محیطی در نمونه‌های بهینه: تصویر بالا مربوط به نمونه با لایه واسط، تصویر پایین مربوط به نمونه بدون لایه واسط.

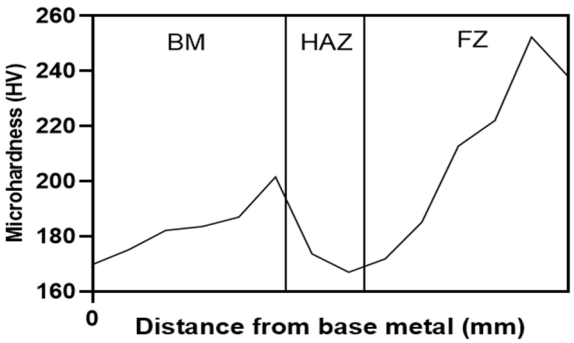
3-2- میکروسختی

بر طبق نتایج بدست آمده از آزمون میکروسختی (شکل8 و9)، تغییرات سختی از جهت فلزپایه به سمت ناحیه جوش از بیشترین به کمترین مقدار به ترتیب ابتدا ناحیه جوش سپس فلزپایه و در انتها ناحیه متاثر از حرارت گزارش می‌شود.

نتایج بدست آمده در توافق با گزارش‌های پژوهش‌های پیشین است. فلزپایه (BM) معمولاً ساختار دانه یکنواخت‌تری دارد، در حالی‌که ناحیه (HAZ) چرخه‌های حرارتی را تجربه می‌کند که منجر به درشت شدن دانه و کاهش سختی می‌شود [11]. در ناحیه جوش، سرد شدن و انجماد سریع منجر به دانه‌بندی بهبود یافته و چگالی نابجایی بالاتر می‌شود که به افزایش سختی کمک می‌کند [12].



شکل8- نمودار ریزسختی نواحی جوش مربوط به نمونه بدون لایه واسط.



شکل9- نمودار ریزسختی نواحی جوش مربوط به نمونه با لایه واسط.

3-3- ارزیابی عنصری طیف سنجی تفکیک انرژی پرتو ایکس نقشه توزیع عناصر

جداول(4و5) نشان دهنده توزیع عناصر مختلف در نمونه‌های بهینه با و بدون لایه واسط مطابق با شکل‌های(10و11) است. طبق این جداول در هر دو نمونه‌های با و بدون لایه واسط توزیع عناصر در تمام نواحی جوش یکنواخت بوده که نشان‌دهنده پارامترهای مناسب جوشکاری در طول فرایند است.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.04]

جدول4- توزیع عناصر مختلف در نمونه با لایه واسط برگرفته از آزمون طیف سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس.(منطبق با شکل10)

الف

Element	Weight%
C	۰/۵۵
O	۲/۳۱
Si	۰/۶۱
P	۰/۳
Mo	۵/۱۴
S	۰/۹۸
Cr	۱۵/۲۱
Mn	۲/۱۵
Fe	۶۰/۱۸
Ni	۱۲/۵۴
Cu	۲/۰۲

ب

Element	Weight%
C	۱/۲۲
O	۱/۷۷
Si	۰/۷۸
P	۰/۴۹
Mo	۴/۲۷
S	۱/۰۲
Cr	۱۵/۹۵
Mn	۱/۲۲
Fe	۶۲/۲۵
Ni	۸/۴۷
Cu	۲/۵۵

ج

Element	Weight%
C	۳/۳۳
O	۱/۲۶
Si	۱/۶۵
P	۱/۳۲
Mo	۵/۹۸
S	۱/۰۷
Cr	۱۴/۴
Mn	۲/۰۳
Fe	۵۷/۹۸
Ni	۹/۵۷
Cu	۱/۴

جدول5- توزیع عناصر مختلف در نمونه بدون لایه واسط برگرفته از آزمون طیف سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس.(منطبق با شکل 11)

الف

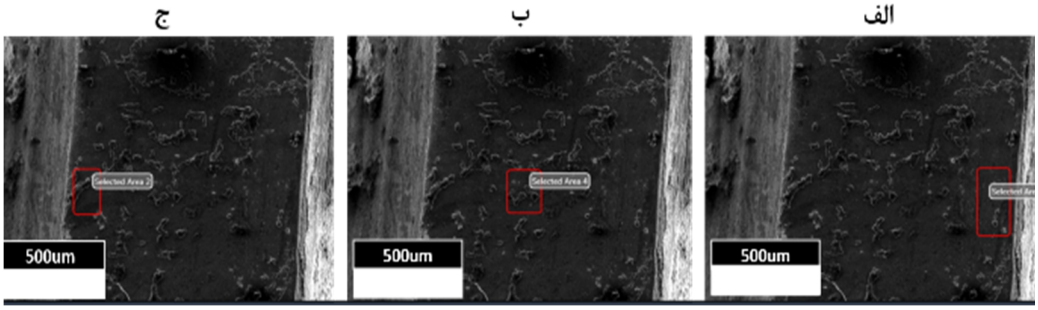
Element	Weight%
C	۱/۸۹
O	۳/۲۸
Si	۱/۲۱
P	۱/۴۱
Mo	۵/۴۴
S	۰/۰۱
Cr	۱۵
Mn	۲/۵۸
Fe	۶۰/۳۱
Ni	۸/۸۷

ب

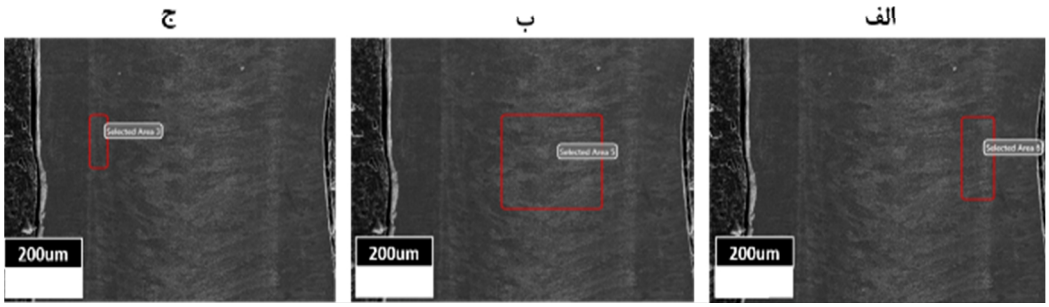
Element	Weight%
C	۲/۵۰
O	۲/۶۹
Si	۱/۵۲
P	۱/۴۴
Mo	۵/۰۹
S	۰/۰۱
Cr	۱۴/۹۸
Mn	۱/۹۲
Fe	۶۰/۵۱
Ni	۹/۳۴

ج

Element	Weight%
C	۳/۱۱
O	۲/۱۳
Si	۱/۶۳
P	۱/۳۳
Mo	۴/۹۳
S	۰/۰۱
Cr	۱۵/۸۷
Mn	۲/۷۷
Fe	۵۸/۷۴
Ni	۹/۴۹



شکل10-نتایج آزمون طیف سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس به صورت زمینه ای مربوط به نمونه با لایه واسط.
الف- ناحیه متاثر از حرارت، ب- ناحیه جوش، ج- ناحیه فلزپایه.



شکل11-نتایج آزمون طیف سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس به صورت زمینه ای مربوط به نمونه بدون لایه واسط.
الف- ناحیه متاثر از حرارت، ب- ناحیه جوش، ج- ناحیه فلزپایه.

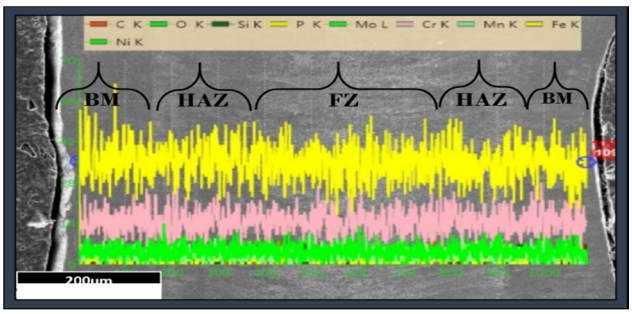
با مقایسه درصد عناصر در هر دو نمونه با و بدون لایه واسط، می‌توان گفت با اضافه شدن مس درصد عناصر دیگر به ویژه آهن کاهش یافته که ناشی از انحلال موفق مس در ساختار جوش بوده است.

با بررسی نتایج بدست آمده و مطالعات پیشین، می‌توان چنین گزارش کرد که تقریبا هیچگونه فاز بین فلزی در نواحی مختلف جوش شکل نگرفته است. فرایند جوشکاری به کمک لایه واسط مس منجر به تکامل ریزساختاری قابل توجهی

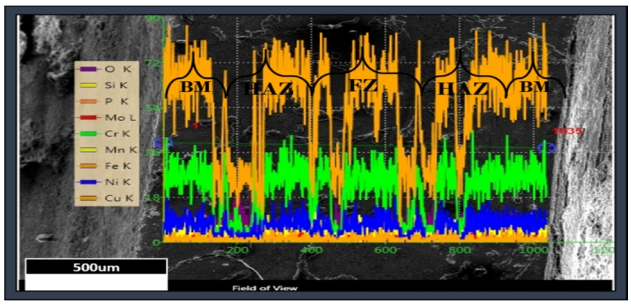
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.04]

می‌شود. همچنین طبق گفته‌های قبلی در ناحیه فصل مشترک بین مس و فولاد زنگ نزن 316L با توجه به عدم تشکیل ترکیبات بین‌فلزی و مطابق با نمودارهای بدست آمده از آزمون کشش، به هم پیوستگی مکانیکی را نیز می‌توان استنتاج کرد [13].

همچنین بنابر تغییرات درصد عناصر مس و کروم در نمونه با لایه واسط در نواحی مختلف جوش، مشخص شد که ارتباط به هم پیوسته‌ای بین تغییرات درصد این دو عنصر وجود دارد به طوری‌که با افزایش و کاهش عنصر مس، عنصر کروم نیز به طور همزمان افزایش و کاهش یافته است. نتایج آزمون EDS ناحیه‌ای و خطی (شکل‌های10و11و12و13) در ناحیه جوش و نواحی متاثر از حرارت (HAZ)، غلظت‌های متفاوتی از کروم و مس را نشان می‌دهند که ممکن است با ویژگی‌های نفوذ وابسته مس و کروم در طول فرایند جوشکاری مرتبط باشد [14]. برهمکنش بین مس و کروم همچنین می‌تواند تحت تأثیر چرخه‌های حرارتی ناشی از تغییرات جریان الکتریکی تجربه‌شده در حین جوشکاری باشد که منجر به افزایش یا کاهش همزمان غلظت آن‌ها می‌شود [15].



شکل12-آزمون طیف سنجی پراکندگی خطی انرژی پرتو ایکس به صورت خطی مربوط به نمونه بدون لایه واسط.



شکل13-آزمون طیف سنجی پراکندگی خطی انرژی پرتو ایکس به صورت خطی مربوط به نمونه با لایه واسط.

همانطور که در بخش حالت شکست نیز گفته شد هر دو نمونه با و بدون لایه واسط دچار شکست محیطی شدند. دلیل این رخداد می‌تواند مرتبط با یکنواختی توزیع عناصر در کل ناحیه اتصال باشد که از شکست از ناحیه اتصال جلوگیری می‌کند. همچنین همانطور که در جدول(4) آمده است با نزدیک شدن به ناحیه جوش درصد وزنی عناصر کروم و مس افزایش یافته است. افزایش درصد وزنی مس باعث بهبود چقرمگی و شکل‌پذیری می‌شود، از طرفی افزایش درصد وزنی کروم منجر به افزایش تردی ناحیه جوش می‌شود [16].

با توجه به افزایش درصد وزنی کروم در هر دو نمونه با و بدون لایه واسط در ناحیه جوش می‌توان انتظار داشت سختی در این ناحیه افزایش پیدا کند که منطبق با نتایج بدست آمده از بخش ریزسختی است. همچنین افزایش درصد وزنی عناصر گفته شده می‌تواند موجب شکل‌گیری ساختار ریزدانه شود که موجب بهبود خواص مکانیکی می‌شود [17].

3-4- بررسی ریزساختاری

ریزساختار نمونه‌های با و بدون لایه واسط در شکل (14و15) نشان داده شده است. همانطور که مشهود است در نمونه با لایه‌واسط از عرض ناحیه جوش به وسط به ترتیب شکل‌گیری دانه‌بندی درشت و ستونی در ناحیه متاثر از حرارت و فریت استخوانی و دانه‌های هم‌محور ریز در مرکز جوش مشاهده می‌شود. همچنین در نمونه بدون لایه واسط با یک دید ماکرو می‌توان شکل‌گیری رشد جهت دار را تایید کرد.

دانه‌های درشت در فلزپایه اغلب در نتیجه گرمای ورودی بالا در حین جوشکاری است که می‌تواند منجر به درشت شدن دانه شود. خواص مکانیکی، مانند چقرمگی و استحکام کششی، به طور قابل توجهی تحت تاثیر اندازه دانه اولیه است، به طوری که دانه‌های درشت‌تر معمولاً خواص مکانیکی ضعیف‌تری از خود نشان می‌دهند [18].

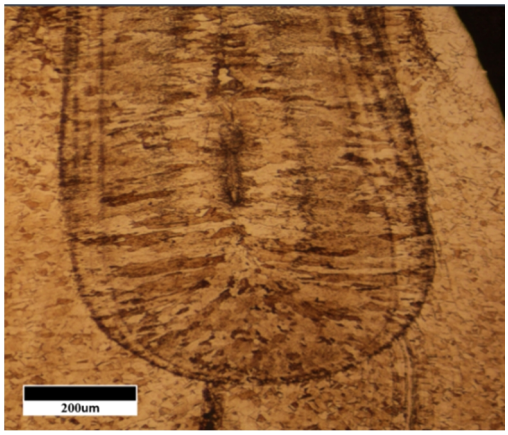
منطقه متاثر از حرارت به طور معمول رشد دانه‌های ستونی را به دلیل گرادیان حرارتی در حین جوشکاری نشان می‌دهد، جایی‌که سرعت خنک شدن در مقایسه با حوضچه جوش کندتر است و به طبع آن خواص مکانیکی کمتری را از خود نشان

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]

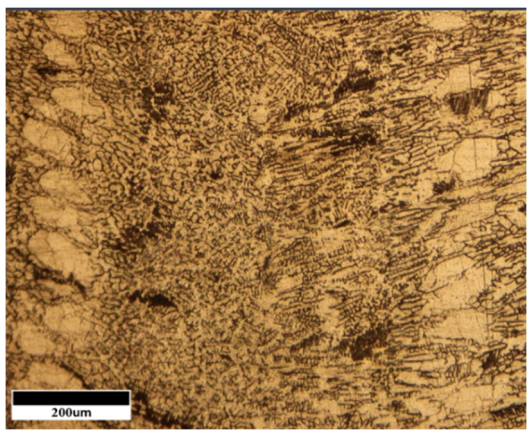
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.04]

می‌دهند. دانه‌های هم‌محور ریز در حوضچه جوش به دلیل خنک شدن و انجماد سریع تشکیل می‌شوند که باعث جوانه‌زنی یکنواخت می‌شود. در داخل قطعه جوش، دانه‌های ریز هم‌محور به بهبود خواص کششی، از جمله استحکام کششی نهایی (UTS) کمک می‌کنند. به عنوان مثال، مطالعات مقادیر استحکام کششی نهایی را در حدود 535 مگاپاسکال مرتبط با ساختارهای دانه هم‌محور ریز در اتصالات RSW گزارش کرده‌اند [6].

اما با بررسی ریزساختار ناحیه جوش آن از سمت فلزپایه به وسط ناحیه جوش، به ترتیب دانه‌بندی درشت و ستونی در ناحیه متاثر از حرارت و دانه‌بندی هم‌محور در وسط ناحیه‌جوش مشاهده می‌شود. با توجه به درصد کم کربن ساختار فلزپایه تشکیل ماتنزیت در هیچ یک از دو نمونه مشاهده نمی‌شود. نتایج بدست آمده از این بخش منطبق برنتایج بخش میکروسختی است.



شکل14- تصویر میکروسکوپ نوری مربوط به ریزساختار نمونه بدون لایه واسط.



شکل15- تصویر میکروسکوپ نوری مربوط به ریزساختار نمونه با لایه واسط.

4-نتیجه‌گیری

در این پژوهش خواص ریزساختاری و مکانیکی ورق‌های 316L جوش داده شده با روش جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای با و بدون استفاده از لایه واسط بررسی شد. بدین منظور در شرایطی‌که بقیه پارامترهای جوشکاری مثل زمان جوشکاری و نیروی الکترودها ثابت در نظر گرفته شد با تغییر جریان الکتریکی 5 نمونه مطابق پژوهش‌های قبلی برای هر دو نوع اتصال آماده شدند. برای انتخاب نمونه‌های بهینه آزمون کشش انجام شد و مابقی آزمون‌ها بر روی نمونه‌های انتخاب شده صورت گرفت. نتایج بدست آمده به طور کلی به شرح زیر است.

- آزمون کشش نشان داد که به طورکلی با افزایش جریان الکتریکی استحکام نقطه جوش افزایش پیدا کرد.
- بررسی حالت شکست اتصال ورق‌های 316L حاکی از وقوع شکست محیطی برای هر دو نمونه بود که ناشی از خواص مکانیکی مطلوب نمونه‌ها در نقطه اتصال می‌باشد.
-منحنی تغییرات سختی از فلزپایه به وسط ناحیه جوش مقادیر سختی را از بیشترین مقدار به کمترین مقدار به ترتیب ناحیه‌جوش، فلزپایه و ناحیه متاثر از حرارت نشان داد.
-نتایج آنالیز عنصری نشان داد که توزیع عناصر در سراسر ناحیه جوش یکنواخت بود. تغییرات غلظت مس و کروم نشان داد که افزایش و کاهش هر دو عنصر به طور همزمان بوده است که می‌تواند به برهمکنش بین مس و کروم تحت تأثیر چرخه‌های حرارتی ناشی از تغییرات جریان الکتریکی تجربه شده در حین جوشکاری باشد.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از همکاری و راهنمایی‌های مسئولین محترم دانشکده مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه صنعتی اصفهان که در پیشبرد اهداف این پروژه همکاری نمودند تشکر و قدردانی می‌نماییم.

منابع

1-P. Podržaj, I. Polajnar, J. Diaci, and Z. Kariž, "Overview of resistance spot welding control", Science and technology of welding and joining, 2008, 13, p.215-224.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.04]

2-S. Sobhani, 1396. Welding metallurgy and weldability of dissimilar joint of advanced high strength martensitic steel and duplex stainless steel in resistance spot welding process. Sharif University of Technology. Tehran. I.R. Iran.
3-Charles Wick, John T. Benedict, Raymond F. Veilleux, Tool and Manufacturing Engineer's Handbook, Society of Manufacturing Engineers, 1998.
4- J.R. Davis, Stainless steels . ASM international, 1994.
5- H. Inoue and T. Koseki, “ Solidification mechanism of austenitIic stainless steels solidified with primary ferrite, ” Acta Mater., 2017. 124: p. 430 –436.
6-Danial Kianersi et all "Resistance spot welding joints of AISI 316L austenitic stainless steel sheets: Phase transformations, mechanical properties and microstructure characterizations", Materials & Design, 2014, 61: P. 251-263.
7-Hamid Jafari, 2015, "Resistance spot welding of ultra-fine grained/nano structured 304L austenitic stainless steel produced by martensite thermomechanical process and evaluation of weldment properties, Isfahan University of Technology, Isfahan, I.R. Iran.
8- H. Mostaan et all., "Study and Investigation on the Effect of Presence of Interlayer on the Microstructure, Mechanical Properties and Fracture Mode of AISI 321 Stainless Steel Resistance Spot Welds" Journal of Welding Science and Technology of Iran, 2018, 4: p. 101-112.
9-B. Marco et all,. "Experimental Study On Electroplastic Effect In AISI 316L Austenitic Stainless Steel" Applied Mechanics and Materials, 2015, 792: p. 568-571.
10- A. Kumar Perka et all,. "Advanced High-Strength Steels for Automotive Applications: Arc and Laser Welding Process, Properties, and Challenges" Journal of Properties and Challenges Metals, 2022, 12: p. 1051.
11-D, Lanka et all,. "Microstructural and mechanical behaviour of friction welded SS316L components fabricated by selective laser melting" Materials Today Communications, 2023, 37: p. 107430
12- Y. Fan et all,. "Microstructures and mechanical properties of the fusion zone of 316L-316LN stainless steel multi-pass gas tungsten arc welded joint" Journal of Materials Science, 2021, 56: p. 17306-17318.
13- Gautier Huser et all,. "Effect of Tool Geometry on the Microstructure of Friction Stir Welding of Copper and 316L Stainless Steel" Wiley Advanced Engineering Materials 2024, 26: p. 7.
14- Hari Prasadarao Pydi et all,. "Study on microstructure, behavior and Al_2O3 content flux A-TIG weldment of SS-316L steel", Materials Today: Proceedings, 2022, 51: p. 728-734.
15- RS Silva et all,. "Analysis of dissimilar welding joint between Inconel 718 and AISI 316L by GTAW multipass process" Journal of Soldagem & Inspecao, 2021, 27: p. 2709.
16- Pankaj Sahlot et all, " Towards attaining dissimilar lap joint of CuCrZr alloy and 316L stainless steel using friction stir welding" Science and Technology of Welding and Joining,2018,8:p.715-720.
17- Beata Skowrońska et all, "Microstructural Investigation of a Friction-Welded 316L Stainless Steel with Ultrafine-Grained Structure Obtained by Hydrostatic Extrusion", 2021, 14(6):p.1537.
18- M Eroğlu et all, "microstructure and mechanical properties of weld metal and HAZ of a low carbon steel", 1999, 269:p.59-66.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.04]