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

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

Volume 8, Number 2, 2023



Investigation of mechanical properties in welding of SA240-TP316 stainless steel and SA516-GR60 steel cladded with SA240-TP316

S. Kazemi, Gh. Khalaf, A. Afsari*, M. J. Marzban
Department of Mechanical Engineering, Shiraz Branch - Islamic Azad University - Shiraz, Iran.

Received 3 October 2022 ; Accepted 18 December 2022

Abstract

Stainless steel cladding is the formation of an alloy by creating a thin layer of stainless steel on another metal. In this research, a layer of SA240-TP316 austenitic stainless steel was coated on SA516-GR60 steel. Experiments were conducted to compare the mechanical properties of SA240-TP316 and claded SA516-GR60 steel welds in order to investigate the possibility of replacing the SA240-TP316 steel alloy. Two goups of samples prepared for this research. In first group claded SA516 steels were welded and in second group SA-240 stainless steels welded with each other and then strength, hardness and bending test were conducted for comparing 2 group. Examining the results of the chemical analysis of SA240-TP316 alloy shows that the coating has a similar chemical composition to SA240 alloy and with increasing depth, the hardness of the weld metal and the percentage of chromium is higher and the percentage of molybdenum in the weld alloy is lower. Comparing the ultimate strength of SA516 alloy after cladding and welding with each other and SA240 stainless base alloy after welding with each other, shows the improvement of tensile strength of SA516 Steel. In the first group, the strength changed in the range of 470 to 503 MPa while in the second group in the range of 477 to 570 MPa. The highest hardness was obtained in the heat affected area. Bending tests showed no cracking up to 180 degree angle that is a sign of weld ductility and soundness. The results of the impact tests also show the ability to absorb energy, especially around the voltage of 150 volts.

Keywords: TIG Welding, Cladding, Mechanical Properties, SA516-GR60 Steel, SA240-TP316 Stainless Steel.

Corresponding Author: ah.afsari1338@iau.ac.ir

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

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

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال هشتم، شماره2، پاییز و زمستان 1401



بررسی خواص مکانیکی جوش فولاد زنگ نزن SA240-TP316 و فولاد SA516-GR60 کلد شده با فولاد زنگ نزن SA240-TP316

صمد کاظمی، غلامحسین خلف، احمد افسری*، محمدجواد مرزبان

گروه مهندسی مکانیک، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران.

دریافت مقاله: 1401/07/11 ؛ پذیرش مقاله: 1401/09/27

چکیده

کلدینگ فولاد ضد زنگ، به معنی تشکیل آلیاژ با ایجاد یک لایه نازک فولاد ضدزنگ بر روی یک فلز دیگر می‌باشد. در این پژوهش یک لایه فولاد ضدزنگ آستنیتی SA240-TP316 بر روی فولاد SA516-GR60 پوشش داده شد. آزمایش‌هایی برای مقایسه خواص مکانیکی جوش فولاد ضد زنگ اولیه و فولاد کلد شده SA516-GR60 انجام گردید تا امکان‌پذیری جایگزینی پوشش ایجاد شده به جای فولاد زنگ‌نزن بررسی شود. بدین منظور درگروه اول نمونه‌هایی از فولاد SA516 روکش شده را به همدیگر ودر گروه دوم فولاد زنگ‌نزن SA240 به همدیگر جوشکاری شدند و خواص آن‌ها مقایسه گردید. بررسی نتایج آنالیز شیمیایی نشان می‌دهد روکش انجام شده بر روی فولاد SA516 دارای همان ترکیب شیمیایی آلیاژ SA240 بوده و با افزایش عمق، سختی فلزجوش و درصد کرم بیشتر و درصد مولیبدن در آلیاژ جوش کمتر شده است. مقایسه استحکام نهایی پس از جوشکاری آلیاژ SA516 روکش شده با آلیاژ پایه زنگ‌نزن SA240 جوشکاری شده نشان از بهبود استحکام‌های کششی فولاد SA516 روکش شده دارد. در گروه اول استحکام‌ها در محدوده 470 تا503 مگاپاسکال و در گروه دوم در محدوده 477 تا 570 مگاپاسکال تغییر می کند که نشان از استحکام جوش معادل در دوگروه است. بیشترین سختی نیز در ناحیه متاثر از حرارت بدست آمده است. تست خمش بدون وجود ترک تا زاویه 180 درجه نیز نشانه داکتیل ماندن فلز جوش موجود در هر دوگروه می باشد. نتایج آزمایش ضربه نیز نشان دهنده قابلیت جذب انرژی مناسب بخصوص در حوالی ولتاژ 150 ولت می‌باشد.

کلمات کلیدی: جوشکاری قوسی تنگستنی، کلدینگ یا پوشش‌دهی، خواص مکانیکی، فولاد زنگ‌نزن SA240-TP316، فولاد SA516-GR60.

* پست الکترونیکی: ah.afsari1338@iau.ac.ir

1- مقدمه

جوشکاری در صورتی‌که با دقت و با روشی صحیح انجام پذیرد، با توجه به مشخصه‌های مکانیکی جوش در مقایسه به سایر روش‌های اتصال، این مزیت را دارد که می‌تواند دو قطعه اتصالی را به خوبی به صورت یک قطعه واحد درآورد به گونه‌ای که تشخیص محل اتصال دشوار گردد. در صنایع نفت و گاز و پتروشیمی از فلزات مختلفی استفاده می‌شود که یکی از پرکاربردترین آن‌ها، فولادهای زنگ‌نزن است. در استفاده از فولادهای زنگ‌نزن مشکل قیمت بالا و خوردگی بین دانه‌ای در زمان جوشکاری در دماهای بالای 600 درجه سانتی‌گراد وجود دارد. در این نوع فولادها اگر درصد کربن در ناحیه متاثر از حرارت بیشتر از 0/05 درصد باشد در زمان‌های متداول برای

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

جوشکاری، احتمال به وجود آمدن خوردگی بین دانه‌ای افزایش می‌یابد. پدیده فاسد شدن جوش در برخی فولادهای زنگ نزن رسوب کاربید کرم در مرزدانه‌ها و خالی شدن اطراف مرز از کرم می‌باشد. بنابراین کنترل پارامترهای ورودی از قبیل دما، سرعت جوشکاری، انتخاب نوع الکترود و نحوه سرد کردن جوش در بهبود خواص مکانیکی جوش موثر می‌باشد. [1].

کلدینگ یا پوشش دادن از طریق جوشکاری برای بهره‌مندی از ویژگی‌های سطحی مواد پوششی زمانی‌که بهره‌مندی از این ویژگی‌های مورد نظر از مواد پایه امکان‌پذیر نباشد، یک راه حل اساسی است. در کلدینگ فولاد زنگ‌نزن با تشکیل یک لایه نازک فولاد زنگ‌نزن بر روی یک فلز سعی می‌شود که از خواص فولاد زنگ نزن استفاده شود. بخصوص وقتی از جنبه‌های اقتصادی استفاده کامل از فولاد زنگ‌نزن ممکن نباشد فرایند پوشش دادن اهمیت می‌یابد. فرایند پوشش‌دهی با فولاد زنگ‌نزن در واقع مقاومت لازم را نسبت به خوردگی، سایش و اکسایش فراهم می‌کند و مواد پایه مقاومت مکانیکی و انتقال حرارت و شکل پذیری را تامین می‌نماید. کلدهای زنگ‌نزن به شکل‌های ورق، لوله، میله و سیم تولید می‌شوند. جوشکاری پوششی برای مواردی به کار می‌رود که لایه‌ای با ضخامت بیش از 3 میلی‌متر از فلزجوش برای تشکیل یک لایه ضد خوردگی به وجود آید. برای سختی سطحی معمولا از یک پوشش نازک‌تر در کلدینگ جوشکاری استفاده می‌شود. معمولا فولادهای کربنی با درصد کربن‌کم به عنوان فلزپایه برای ساخت مخازن تحت فشار، رآکتورهای اوره و مخازن، رآکتورهای هسته‌ای در کلدینگ جوشکاری استفاده می‌شوند.[2 و 3].

خواص حاصل از روکش‌کردن یا کلدینگ فولاد کربنی و فولاد زنگ‌نزن توسط اسچینو و تستانی [4] بررسی شده است. از فرایند هم‌پوشانی جوشکاری قوس زیرآبی برای این منظور استفاده شده است. به دلیل توزیع عناصری از آهن، کروم، نیکل و منگنز، یک لایه 1,5 میلی‌متری تشکیل شد که بر مقاومت در برابر خوردگی تأثیر می‌گذارد. مقاومت حفره‌ای با اندازه‌گیری دمای حفره‌ای بحرانی ارزیابی شد.

بررسی ریزساختار و خواص ورق فولادی زنگ‌نزن TA1-304 با پوشش‌دادن به روش جوشکاری انفجاری توسط لیانگیو و همکاران [5] انجام شده است. مشاهده شده که اتصال صفحه روکشی به صورت موج‌دار و با پیوند متالورژیکی در سطح مشترک می‌باشد و صفحه روکش آزمایش شده دارای مقاومت عالی در برابر خوردگی بود. دهیب و همکاران [6 و 7] برای درک روابط بین ساختار میکروسکوپی و ویژگی‌های مکانیکی کلدینگ فولاد زنگ‌نزن آستنیتی بر روی فولاد کم‌کربن آزمایش‌هایی انجام دادند. آزمایش چقرمگی بیانگر این حقیقت است که ناحیه شکست فقط در ناحیه کنار محدوده کلد شده رخ داده و ناحیه پوششی از مقاومت خوبی برخوردار خواهد بود. ویژگی‌های ابعادی و متالورژیکی کلد فولاد زنگ‌نزن 316L را بر روی فولاد معمولی بررسی کردند. ضخامت کلد، عمق نفوذ مذاب و عرض محدوده متاثر از حرارت (HAZ) بررسی شد. مشاهده گردید که مقادیر سختی با تغییر ضخامت کلد از 0/5 به 1 میلی‌متر و از حدود 400-450 سختی به حدود 320-380 سختی ویکرز تغییر کرد [8 و 9]. کائو و همکاران [10] تاثیر درصد کرم و عملیات حرارتی را بر روی ریزساختار و رفتار اکسایشی کلدهای جوش شده زنگ‌نزن در آب با دمای بالا بررسی کردند. درصد کرم بیشتر مقاومت حفره‌ای را بیشتر نموده و عملیات حرارتی باعث افزایش عمق سوراخ‌های حفره‌ای به علت ایجاد کاربید افزایش نرخ اکسایش می‌شود.

ساندهو و شاهی [11] کلدینگ جوش آلیاژ اینکونل 625 را از نظر متالورژیکی، سایش و خستگی بررسی کردند و دریافتند که نمونه‌های با کلد با ضخامت بیشتر، خواص خستگی بهتری نسبت به نمونه‌های با کلد کمتر دارد. خصوصیات ریزساختاری روکش Ni-201 با جوشکاری تیگ بر روی بستر فولاد 304 توسط شی و همکاران [12] مورد بررسی قرار گرفته است و مشخص گردید که سختی لایه‌های روکش شده از سطح نهایی به سطح اولیه کاهش یافته و لایه روکش نهایی مقاومت عالی در برابر خوردگی نمک‌های مذاب FLiNaK از خود نشان می‌دهد. اثرات شرایط پردازش بر روی انجماد و منطقه متاثر از حرارت در روکش‌های فولادی زنگ‌نزن 309L بر روی فولاد کربنی با استفاده از رسوب سیم هدایت‌شده تحقیقی است

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

که توسط بوزمن و همکاران [13] انجام شده است. ریزساختار جوش نشان می‌دهد که میزان اختلاط فلزپایه در جوش تابعی از پارامترهای پردازش و تعداد لایه‌های روکش است. روکش دو یا چند لایه برای کاهش عیوب، کاهش رقت، و تولید یک سطح آلیاژی مناسب برای محافظت در برابر خوردگی مفید می‌باشد.

سانگ و همکاران [14] در تحقیقی اثر عملیات حرارتی را بر روی مقاومت به خوردگی فلز کلد شده و ویژگی‌های مکانیکی فلزپایه برای کاربرد در بدنه کشتی بررسی کردند. در این تحقیق شرایط عملیات حرارتی بهینه، برای حداکثر نمودن مقاومت خوردگی فلز کلد سوپر داپلکس (S32750) و مقاومت مکانیکی فلزپایه (EH401) در مقیاس آزمایشگاهی بدست آمد.

تجزیه و تحلیل تجربی میدان دما و اعوجاج در جوشکاری چند پاسی فولاد زنگ‌نزن پوشش داده توسط قوربل و همکاران [15] صورت گرفته است. مشخص شد که اتصال جوش داده شده استحکام کششی مکانیکی بالاتری نسبت به فلز اصلی دارد و هیچ‌گونه جدایی، شکستگی یا پارگی روی سطح اتصال جوش پس از آزمایش خمش ظاهر نمی‌شود.

افسری و همکاران [16] در مقاله‌ای به بررسی اثر تغییر ضخامت و تعداد لایه‌های پوششی اتصال غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 316 به فولاد کربنی A516 با روش جوشکاری سرباره الکتریکی (الکترود نواری) پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد کربن، حساسیت فولاد زنگ‌نزن به خوردگی مرزدانه‌ای افزایش یافته و با کاهش درصد فریت، حساسیت به ترک گرم افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش ضخامت اولین لایه پوششی، درصد کربن لایه پوششی افزایش و باعث کاهش درصد فریت می‌گردد. ضمنا با کاهش حرارت ورودی و سرعت بالای پوشش‌دهی، نرخ سرد شدن افزایش یافته و باعث افزایش سختی لایه‌های پوششی می‌شود.

اثر عملیات حرارتی پس از جوش و دمای عملیاتی بر رفتار تریبولوژیکی پوشش استلایت 21 با روکش لیزری پژوهشی است که توسط سریدران و همکاران [17] صورت گرفته است. این پوشش لیزری، یکپارچگی بالا با تخلخل کم و پیوند خوب با بستر را نشان می‌دهد. پوشش استلایتی اصطکاک کمتر و سطح تماس صاف‌تری ایجاد می‌کند، اما در مقایسه با فولادهای نیکل دار مقاومت سایشی پایین‌تری خواهند داشت.

بهاتی و همکاران [18] طی تحقیقی تاثیر خواص حرارتی - مکانیکی فولادهای مختلف روی تنش پسماند و اعوجاج زاویه‌ای در جوشکاری را مورد بررسی قرار داده‌اند و با روش المان محدود فرایند شبیه‌سازی شده و تنش با مدول یانگ خاص فولاد و با نرم افزار خاص استفاده شده است.

رفتار اکسیداسیون طولانی مدت و پایداری حرارتی روکش‌های فولادی زنگ‌نزن مقاوم در برابر حرارت که توسط فرایند جوشکاری تیگ بر روی فولاد زنگ نزن AISI 316 مورد مطالعه قرار گرفته است [19] مشخص شد که فرایند اکسیداسیون به طور قابل توجهی استحکام پیوند سطوح مشترک را کاهش نمی‌دهد. داده‌های افزایش وزن نشان داد که هر دو روکش پوششی جوش از قانون نرخ سهموی اکسیداسیون پیروی می‌کنند و رفتار اکسیداسیون فولاد زنگ نزن AISI 316 را بهبود می‌بخشد. رفتار اکسیداسیون نمونه‌های روکش‌شده با ضرایب انتشار عناصر، تنش‌های حرارتی توضیح داده شد.

مطالعه شکل‌گیری سطح مشترک و مکانیزم‌های اتصال صفحه روکش فولاد زنگ‌نزن با روش نورد گرم توسط لیو و همکاران [20] انجام شده است. نتایج نشان داد پیوند قوی در ناحیه فصل مشترک در اثر نفوذ کربن و عناصر آلیاژی کرم ونیکل می‌باشد. علاوه بر این، استحکام برشی سطح مشترک و چقرمگی نیز تحت‌تاثیر فاز رسوب لایه‌ای و اکسیدهای متعدد قرار دارد.

جانگ و همکاران [21] خصوصیات مکانیکی جوش حاصل از فولاد زنگ‌نزن 304 از جنس آستنیت با انجام عملیات حرارتی پس از جوشکاری را مورد ارزیابی قرار داده‌اند و نتیجه گرفتند که عملیات حرارتی مناسب پس از عملیات جوشکاری منجر به بهبود خصوصیات مکانیکی جوش می‌گردد زیرا ساختار مواد جوش داده شده را همگن نموده و تشکیل فازهای مفید و مضر را کنترل می‌نماید.

بنابراین هدف از این تحقیق کنترل پارامترهای ورودی آمپر و ولتاژ جوشکاری در عملیات جوشکاری فولاد زنگ‌نزن

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

SA240-TP316 و فولاد SA516-GR60 کلد شده با فولاد زنگ‌نزنSA240-TP316 می‌باشد تا بتوان خواص مکانیکی جوش حاصل را بهبود بخشید. کاهش ریز ترک‌ها و ترک‌های ناشی از ذوب انتخابی، جلوگیری از ایجاد تنش در اتصالات جوش داده شده، جلوگیری از ترک و اعوجاج، کاهش مقاومت به خوردگی، در عملیات جوشکاری فولاد زنگ‌نزن SA240-TP316 و فولاد SA516-GR60 کلد شده با فولاد زنگ‌نزن SA240-TP316 در این تحقیق بررسی می‌شود. فرایند جوشکاری مناسب و ملاحظاتی در انتخاب موادپرکننده وجود دارد که برای ایجاد جوش‌های بی عیب و نقص با خواص مناسب در فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی باید در نظر گرفته شود.

2- مواد و روش‌ها

این پژوهش به بررسی خواص مکانیکی فولاد زنگ‌نزن SA240-TP316 و فولاد SA516-GR60 کلد شده با فولاد زنگ‌نزن SA240-TP316 و مقایسه نتایج حاصل شده با یکدیگر می‌پردازد. متغیرهای آزمایش شامل جریان الکتریکی با سه سطح 120، 150 و 180 آمپر، ولتاژ ورودی با سه سطح 12، 15 و 18 ولت و نوع آلیاژ فیلر جوشکاری می‌باشد. در کل تعداد 18 آزمایش طراحی گردید. قطعات از جنس فولاد زنگ‌نزن SA240-TP316 و آلیاژ SA516-GR60 انتخاب شدند که در اندازه‌های مساوی و استاندارد به صورت 100×200 میلی‌متر برش داده شد. عملیات با فرایند کلدینگ جوشکاری با روش جوشکاری برقی با الکترود مصرف نشدنی تنگستن و گاز محافظ (TIG) انجام شد. پس از انجام عملیات جوشکاری قطعات جهت آزمایش‌های کشش، خمش و سختی آماده شدند.

2-1 -آماده سازی قطعات

پس از تهیه مواد اولیه فولادهای SA516-GR60 و SA240-TP316، برشکاری 18 قطعه از هر کدام توسط دستگاه برش پلاسما انجام گرفت (شکل1). سپس فرایند کلدینگ بر روی قطعاتی از جنس SA516-GR60 و توسط فولاد SA240-TP316 انجام شد (شکل2). نمونه‌های برش‌کاری شده برای انجام عملیات جوشکاری به وسیله سنگ فرز تا زاویه 37/5 درجه براساس استاندارد ASME SEX II پخ زده شدند وپس از انجام عملیات تمیزکاری و چربی زدایی کلیه نمونه‌ها برای انجام عملیات جوشکاری آماده شدند.

در این پژوهش از دو نوع فلزپرکننده ER70S-6 برای جوشکاری فولاد SA516-GR60 و فلزپرکننده ER316-L برای جوشکاری فولاد SA240-TP316 استفاده گردید و در جداول (1و2) به ترتیب مشخصات‌این دو فلز پرکننده آورده شده است.



شکل1- نمونه‌های برشکاری شده از آلیاژهای SA516-GR60 و SA240-TP316 برای تهیه PQR.



شکل2- نمونه آلیاژ SA516-GR60 قبل و بعد از کلدینگ با SA240-TP316.

2-2- آنالیز شیمیایی آلیاژهای SA516-GR60 و SA240-TP316 قبل از انجام عملیات جوشکاری

برای اندازه‌گیری درصد عناصر فولادهای مد نظر از دستگاه کوانتومتری استفاده گردید. بررسی نتایج آنالیز شیمیایی آلیاژ رسوب داده شده SA240-TP316 نشان می‌دهد آنالیز شیمیایی سطح تغییری نکرده و همچنین با افزایش عمق پوشش، سختی فلزجوش و درصد کرم در آلیاژ جوش بیشتر شده است. نتایج حاصل از آنالیز شیمیایی شباهت بسیار آلیاژ پوششی جوشکاری شده SA240-TP316 را با آلیاژ پایه SA240-TP316 نشان می‌دهد.

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

جدول1- ترکیب شیمیایی فلزپرکننده ER70S-6 (درصد وزنی).

Cr	Ni	P	cu	S	Mm	Si	C	سیم یامفتول
0.03	0.03	0.015	0.12	0.013	1.32	0.74	0.06	ER70S-6

جدول2- ترکیب شیمیایی فلزپرکننده ER316-L (درصد وزنی).

N	Mo	Cr	Ni	P	cu	S	Mm	Si	C	سیم یامفتول
0.04	2.6	18.1	12	0.014	0.08	0.01	1.6	0.4	0.015	ER316-L

جدول3- مشخصات گاز آرگون.

فرمول مولکولی	وزن مولکولی	نقطه جوش	دمای بحرانی	نقطه ذوب	غلظت بخار	حجم مخصوص	چگالی بخار
AR	۳۹/۹۵	−۱۸۵	−۱۲۲	−۱۸۹	۱/۳۸	۹/۷	۰/۱۰۳

جدول4- نمونه‌ها و شرایط جوشکاری.

شماره نمونه	نوع مواد	جریان (آمپر)	ولتاژ (ولت)	شماره نمونه	نوع مواد	جریان (آمپر)	ولتاژ (ولت)
۱	SA516-GR60 claded	120	12	۱۰	SA240-TP316	120	12
۲	SA516-GR60 claded	120	15	۱۱	SA240-TP316	120	15
۳	SA516-GR60 claded	120	18	۱۲	SA240-TP316	120	18
۴	SA516-GR60 claded	150	12	۱۳	SA240-TP316	150	12
۵	SA516-GR60 claded	150	15	۱۴	SA240-TP316	150	15
۶	SA516-GR60 claded	150	18	۱۵	SA240-TP316	150	18
۷	SA516-GR60 claded	180	12	۱۶	SA240-TP316	180	12
۸	SA516-GR60 claded	180	15	۱۷	SA240-TP316	180	15
۹	SA516-GR60 claded	180	18	۱۸	SA240-TP316	180	18

2-3- شرایط جوشکاری و طراحی آزمایش

برای آغاز عملیات جوشکاری ابتدا قطعات دو به دو با یکدیگر مونتاژ گردیدند. سپس با محاسبه و اندازه‌گیری مقدار آمپر و ولتاژ آزمایش‌ها به ترتیب انجام شد. در هر مرحله از جوشکاری ابتدا قطعه به طور کامل تمیز می‌شد و پس از اتمام جوشکاری لایه جوشکاری شده توسط آزمایش مایع نافذ (PT) بررسی می‌شد. در صورتی‌که علائم ظاهری فلز جوشکاری شده مناسب بود لایه بعدی جوشکاری می‌گردید.

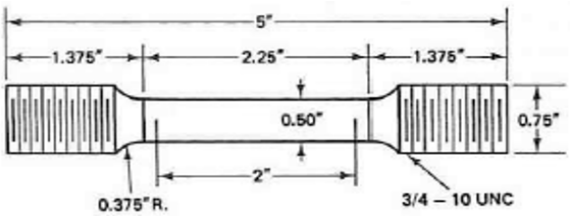
دستگاه جوش مورد استفاده از نوع تیگ AC/DC مدل DIGITIG 401 می‌باشد. پارامترهای موثر در جوشکاری در اینجا، نوع جوش و اتصال، نوع جریان، شدت جریان، طول قوس و سرعت حرکت می‌باشد و انتخاب هر کدام از آن‌ها روی اجرای جوشکاری و احتمال بوجود آمدن عیوب در جوش تاثیرگذار است [22]. گاز آرگون مورد استفاده در این پژوهش در داخل کپسول‌های5 تا10 کیلویی‌و با فشار 150 بار و خلوص 99/99 درصد تهیه گردید که دارای ویژگی‌های مندرج در جدول (3) می‌باشد. به طور کلی 18 نمونه برای این پژوهش تهیه شد. نه عدد از جنس SA516-GR60 و نه نمونه دیگر از جنس SA240-TP316 بوده و در سه سطح آمپر و هر سطح در سه سطح ولتاژ جوشکاری انجام شد. شماره نمونه‌ها همراه با مشخصه جنس، آمپر و ولتاژ جوشکاری در جدول (4) آورده شده است. پس از اتمام عملیات جوشکاری، از هر نمونه جوشکاری شده یک نمونه برای آزمایش کشش، یک نمونه برای آزمایش خمش و یک نمونه هم برای آزمایش سختی تهیه گردید.

3- انجام آزمایش‌ها

آزمایش سختی، کشش و خمش بر روی نمونه‌ها انجام پذیرفت. برای انجام آزمایش سختی در این پژوهش از شاخص ویکرز جهت اندازه‌گیری سختی نمونه‌های جوشکاری شده استفاده

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

گردید و از میکروسکوپ جهت به دست آوردن قطر مربع فرو رفته در قطعه با دقت 0/001 میلی‌متر استفاده شد. جهت آماده‌سازی نمونه‌ها برای آزمایش کشش ابتدا با استفاده از دستگاه فرز نمونه‌ها فرزکاری شدند. اندازه‌های مربوط به نمونه آماده شده برای آزمایش کشش در شکل (3) آورده شده است. قطعات نهایی آماده شده برای آزمایش کشش در شکل (4) نشان داده شده است.

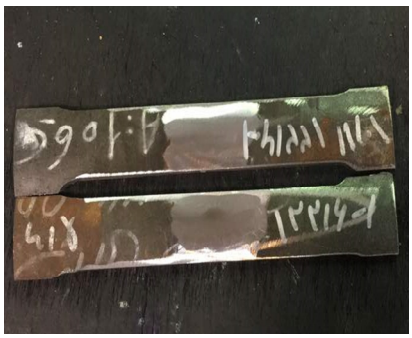


شکل3- قطعات آماده شده برای آزمایش کشش.

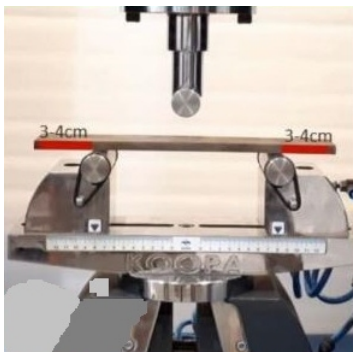


شکل 4- نمونه قطعه آماده شده برای آزمایش کشش.

آزمایش خمش نوعی آزمون خواص مکانیکی مواد است که در آن مقاومت قطعه در برابر خم شدگی مورد سنجش قرار می‌گیرد. این آزمون معمولا توسط دستگاه آزمایش کشش یونیورسال و به دو صورت، سه نقطه‌ای و چهار نقطه‌ای انجام می‌شود. در این تحقیق ابتدا نمونه‌ها برای آزمایش خمش آماده شد با ابعاد152×9/5×55 آماده شد (شکل 5) و پس از آماده‌سازی نمونه‌ها توسط دستگاه یونیورسال، آزمایش خمش به روش سه نقطه‌ای آزمایش بر روی نمونه‌ها انجام شد (شکل 6). در این آزمایش سمبه با قطر 40 میلی‌متر با سرعت 10 میلی‌متر بر دقیقه به سمت قطعه مورد آزمون حرکت می‌کرد. هنگام برخورد به قطعه نیروی اعمالی به آن افزایش می‌یابد و همچنین قطعه در محل برخورد با سمبه به سمت پایین حرکت می‌کند. حرکت سمبه تا زمانی که قطعه کار 180 درجه خم بشود ادامه پیدا می‌کرد.



شکل5- نمونه قطعات آماده شده جهت انجام آزمایش خمش.



شکل 6-نمونه قطعه قرارداده شده در دستگاه آزمایش خمش.

3-1- آنالیز شیمیایی نمونه‌های جوشکاری شده

آنالیز شیمیایی با روش تخلیه الکتریکی نشری انجام می‌گیرد که متداول‌ترین نوع آنالیز برای صنعت متالورژی است. در این تحقیق از هر دو آلیاژ جوشکاری شده به ترتیب سه نمونه کوانتومتری تهیه گردید که نتایج آنالیزها به ترتیب در جداول (5-10) آورده شده‌اند. روش نمونه‌برداری به این صورت بود که یک آنالیز در سطح فلزجوش شده، یک آنالیز از عمق یک میلی‌متری و یک آنالیز هم از عمق سه میلی‌متری انجام شد. آنالیز عناصر اندازه‌گیری شده بیانگر رعایت شرایط جوشکاری و تشکیل مناسب ریزساختارهای مورد نظر است.

بررسی نتایج آنالیز شیمیایی نشان می‌دهد جوش کلد انجام شده دارای ترکیب شیمیایی آلیاژ SA240-TP316 می‌باشد، به عبارت دیگر فولاد SA516 که مقدار کرم و نیکل ومولیبدن کمی دارد بعد از روکش کاری و سپس جوشکاری دارای کرم-نیکل ومولیبدن معادل فولاد SA240 شده است.

ترکیب شیمیایی‌سطح حاوی 2,28مولیبدن‌و 12,29 درصد نیکل و 18,1 درصد کرم می‌باشد. همچنین بررسی این آنالیز مشخص

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

جدول 5- آنالیز شیمیایی جوشکاری آلیاژ SA516-GR60 کلد شده توسط آلیاژ SA240-TP316 (سطح) (درصد وزنی).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu
0.01	0.45	1.45	0.024	0.01	18.04	2.28	12.29	0.004	0.05	0.15
Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	Se	Fe			
0.016	0.01	0.06	0.03	<0.01	0.006	<0.005	Base			

جدول6- آنالیز شیمیایی جوشکاری آلیاژ SA516-GR60 کلد شده توسط آلیاژ SA240-TP316(عمق یک میلی‌متری کلد) (درصد وزنی).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu
0.011	0.45	1.45	0.023	0.009	18.16	2.19	12.55	0.006	0.05	0.15
Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	Se	Fe			
0.016	0.01	0.06	0.04	<0.01	0.006	<0.005	Base			

جدول7- آنالیز شیمیایی جوشکاری آلیاژ SA516-GR60 کلد شده توسط آلیاژ SA240-TP316 (عمق سه میلی‌متری کلد) (درصد وزنی).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu
0.015	0.47	1.46	0.022	0.011	18.55	2.02	12.01	0.006	0.07	0.18
Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	Se	Fe			
0.012	0.01	0.06	0.04	<0.01	0.004	<0.005	Base			

می‌کند که با افزایش عمق، سختی فلزجوش بیشتر شده است. همچنین با افزایش عمق، درصد کرم بیشتر و درصد مولیبدن کمتر شده و درصد نیکل تقریباً ثابت باقی می‌ماند.

3-2- استحکام کششی

رفتار تنش- کرنش آلیاژهای پایه SA516-GR60 و SA240-TP316 در دمای اتاق در شکل‌های (8و9) نشان داده شده است. آلیاژ SA-516 رفتار معمول فولادهای کربنی را با تنش تسلیم بالا و پایین از خود نشان می‌دهد (شکل 7). استحکام نهایی آلیاژ SA240-TP316 در حد 600 تا 700 مگاپاسکال است که حدود 70 درصد از استحکام نهایی SA516-GR60 بیشتر است ولی استحکام تسلیم در نمونه فولاد زنگ نزن کمتر بنظر می‌رسد. فولاد SA240 از نوع زنگ نزن آستنیتی بوده و به همین دلیل استحکام کشش بالایی دارد،قابل انعطاف بالای این آلیاژ هم جزو خواص ذاتی این آلیاژ است. فولاد SA-516 گرید60 انتظار می‌رود که استحکام بین60 تا70 کیلو پاسکال و قابلیت انعطاف حدود 20 درصد براساس استاندارد مربوطه داشته باشد که نتایج آزمایش کشش در مورد هر دو آلیاژ مطابق استاندارد مربوطه است. فولاد SA-516 یک فولاد فریتی-پرلیتی است که برای ساخت مخازن تحت فشار و در صنعت نفت و گاز کاربرد فراوان دارد.

3-3 - نتایج آزمایش‌های استحکام کششی

براساس نتایج بدست آمده از آزمون کشش نمونه‌های جوشکاری شده جدول(12) براساس تنش تسلیم و استحکام نهایی آلیاژ بدست آمده است. بررسی نتایج آزمایش کشش نمونه‌های شماره 10الی 18 بطور کلی حاکی از این است که تنش تسلیم در آلیاژ A-240 از تنش تسلیم در آلیاژ SA516 کمتر است. همچنین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که به دلیل شکست قطعه از ناحیه فلزپایه، جوش انجام شده از مقاومت خوبی برخوردار است. در مقابل تنش کششی نهایی در نمونه‌های SA240 از تنش کششی نهایی در نمونه‌های SA516 بیشتر است این نتیجه گیری کلی از روی دیتاهای فلزات جوش شده در انطباق با رفتار این آلیاژها در حالت جوش نشده است. عمل جوشکاری و پوشش دادن باعث افزایش استحکام کششی فولاد SA-516 اولیه از حدود 375 به570-477 و کاهش استحکام کششی فولاد SA-516 از حدود 600 به حدود 503-472 گشته است به عبارت دیگر محصولات جوش شده دارای خواص کششی بینابین دو فولاد گشته اند.

3-4- بررسی خواص خمشی و مقاومت خمشی آلیاژهای جوشکاری شده

آزمایش خمش یکی از آزمایش‌های استاندارد جوش برای تعیین

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

جدول8- آنالیز شیمیایی جوشکاری آلیاژ SA240-TP316 (سطح)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu
0.011	0.46	1.42	0.023	0.01	18.1	2.30	12.26	0.004	0.06	0.17
Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	Se	Fe			
0.013	0.01	0.06	0.03	<0.01	0.004	<0.005	Base			

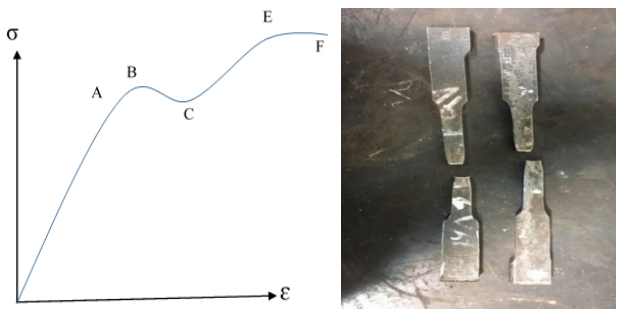
جدول9-آنالیز شیمیایی جوشکاری آلیاژ SA240-TP316 (عمق یک میلی‌متری)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu
0.012	0.45	1.45	0.023	0.009	18.14	2.12	12.60	0.006	0.06	0.17
Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	Se	Fe			
0.014	0.01	0.05	0.04	<0.01	0.006	<0.005	Base			

جدول10- آنالیز شیمیایی جوشکاری آلیاژ SA240-TP316 (عمق سه میلی‌متری)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu
0.014	0.47	1.46	0.022	0.011	18.60	2.02	12.01	0.006	0.05	0.16
Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	Se	Fe			
0.013	0.01	0.06	0.04	<0.01	0.005	<0.005	Base			

کیفیت جوش است. در این تحقیق برای ارزیابی میزان سلامت و کیفیت جوش، آزمایش خمش بر روی 18 نمونه که ابعاد همه آن‌ها برابر با10×43 میلی‌متر بود انجام شد. در حالی‌که از سنبه‌ای به قطر 40 میلی‌متر استفاده گردید و حداکثر زاویه خمش برابر با 180 درجه انتخاب گردید. هنگامی‌که نمونه آزمایش در معرض خمش قرار می‌گیرد، در سطح بالایی آن تنش فشاری و در سطح پایینی آن تنش کششی به وجود می‌آید. تنش‌های کششی می‌توانند باعث ایجاد ترک در سطح پایینی شوند. در صورتی که جسم در مقابل تنش‌های کششی و فشاری مقاومت کند، خم می‌شود و هیچ علامتی از شکست و ترک در آن دیده نمی‌شود. در این تحقیق از همه 18 نمونه جوشکاری شده آزمایش خمش تهیه شده و در طی آزمایش خمش هیچ اثری از ترک یا شکست ترد دیده نشد. در شکل(10) نمودار شماتیک نمودار نیرو- جابه‌جایی مربوط به آزمایش خمش سه نقطه‌ای آورده شده است. در این نمودار نواحی الاستیک، پلاستیک و نقاط تسلیم و شکست نشان داده شده‌اند. در شکل(11) نیز نمونه‌ای بعد از آزمایش خمش دیده می‌شود. پس از برداشتن نیرو مقداری از تغییر شکل بصورت الاستیک بازگشت می‌کند. خمش نمونه‌های دارای SA516-GR60 کلد شده و همچنین نمونه‌های دارای SA240-TP316 در بردارنده نتایج مشابهی هستند. هر دو آلیاژ دارای استحکام کششی نزدیک به یکدیگر بودند. همه نمونه‌ها در آمپر متوسط و بالا دارای زاویه خمش 180 درجه می‌باشد. خمش بدون ترک تا زاویه 180 درجه نشانه داکتیل ماندن فلزجوش شده می‌باشد. همچنین از نتایج آزمایش خمش مشخص می‌شود که افزایش آمپر و ولتاژ تا 150 آمپر و 15 ولت منجر به افزایش داکتیلیتی می‌شود هرچند افزایش از 150 به 180 آمپر و از 15 تا 18 ولت تغییر چندانی در داکتیلیتی آلیاژ جوش شده ایجاد نکرده است.



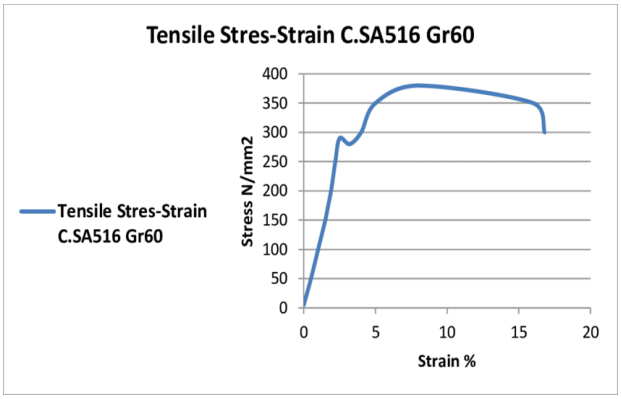
شکل7- نمودار تنش کرنش.

3-5- سختی سنجی

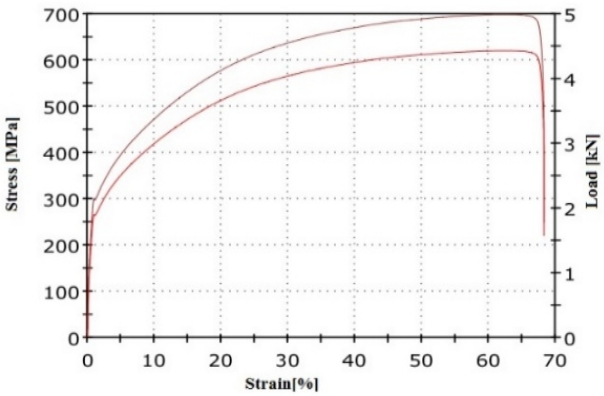
آزمون سختی ویکرز یا آزمون سختی هرم – الماس بر روی نمونه‌ها انجام شده و عدد سختی هرم الماسی(DPH) یا عدد سختی ویکرز (VPH-VHN) بدست آمد. در سختی سنجی

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

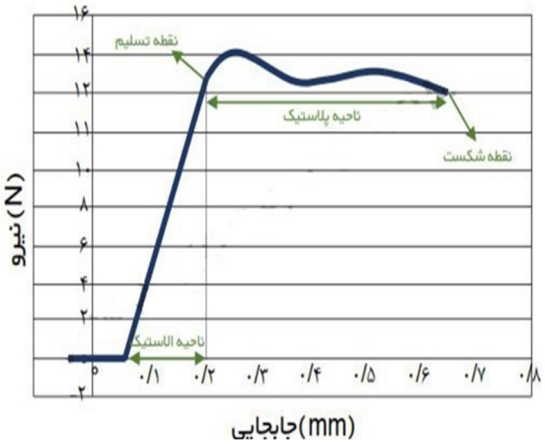
نیروی 9/8 کیلوگرم به مدت 15 ثانیه وارد شده و اندازه قطرهای محل اثر با بزرگ‌نمایی 70 اندازه‌گیری شده و نتایج به دست آمده در جدول (12) نمایش داده شده است. در شکل (12) نحوه نمونه برداری از مقطع آلیاژ جوشکاری شده نیز نشان داده شده است. سختی نشان داده شده متوسط سختی هر نمونه در نقاط مختلف است.



شکل8- نمودار تنش کرنش برای آلیاژ SA516-GR60.



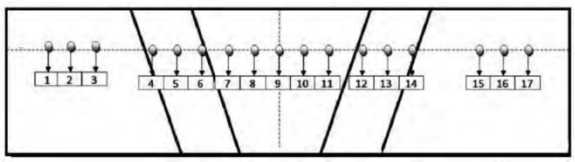
شکل9- نمودار تنش کرنش برای آلیاژ SA240-TP316.



شکل10- نمودار نیرو-جابه‌جایی مربوط به آزمایش خمش مواد چکش خوار.



شکل11- نمونه بعد از اتمام آزمایش خمش.



شکل12- توزیع نقاط آزمایش سختی در مقطع جوشکاری شده .

با توجه به جدول (11) میانگین سختی در دو آلیاژ SA516 کلد شده و SA240 به ترتیب 189,2 و 194,6 ویکرز بود. این نتایج نشان‌دهنده نزدیکی سختی تقریبا یکسان دو آلیاژ بعد از جوشکاری است. می‌توان از مقایسه سختی‌ها نتیجه گرفت که امکان جایگزینی فولاد SA516-GR60 کلد شده به جای فولاد SA240-TP316 وجود دارد.

جدول11- سختی نمونه‌ها به روش ویکرز

شماره نمونه	سختی	شماره نمونه	سختی	شماره نمونه	سختی
۱	175	7	188	13	200
۲	190	8	170	14	232
۳	192	9	175	15	175
۴	210	10	208	16	150
۵	225	11	210	17	219
۶	178	12	183	18	175

نتایج آزمایش‌های کشش و سختی براساس اطلاعات جدول (11و12) در شکل‌های (14، 15 و 16) نشان داده شده است. نمونه‌های دارای پوشش با حرف C نشان داده شده و اعداد 12-15 و 18 قید شده در هر مورد مربوط به شدت جریان برحسب آمپر و اعداد 120-150-180 مربوط به ولتاژ جوشکاری برحسب ولت هستند. بیشترین استحکام‌های کششی در نمونه‌های SA-516 جوشکاری شده با شدت جریان15 آمپر

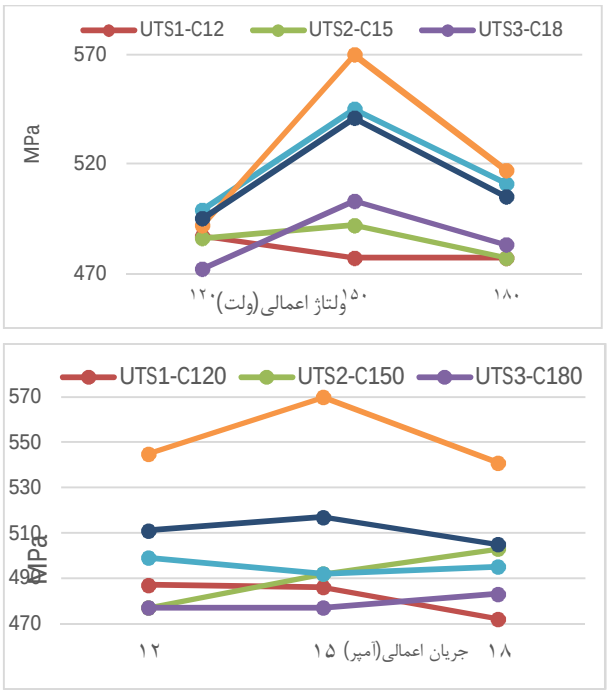
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]

جدول12- نتایج آزمون کشش.

شماره نمونه	نوع مواد	تنش تسلیم (Mpa)	استحکام نهایی (Mpa)	شماره نمونه	نوع مواد	تنش تسلیم (Mpa)	استحکام نهایی (Mpa)
۱	SA516-GR60 claded	279	487	۱۰	SA240-TP316	288	499
۲	SA516-GR60 claded	273	486	۱۱	SA240-TP316	282	492
۳	SA516-GR60 claded	273	472	۱۲	SA240-TP316	281	570
۴	SA516-GR60 claded	259	477	۱۳	SA240-TP316	292	545
۵	SA516-GR60 claded	265	492	۱۴	SA240-TP316	288	495
۶	SA516-GR60 claded	283	503	۱۵	SA240-TP316	293	541
۷	SA516-GR60 claded	280	477	۱۶	SA240-TP316	288	511
۸	SA516-GR60 claded	260	477	۱۷	SA240-TP316	298	517
۹	SA516-GR60 claded	275	483	۱۸	SA240-TP316	288	505

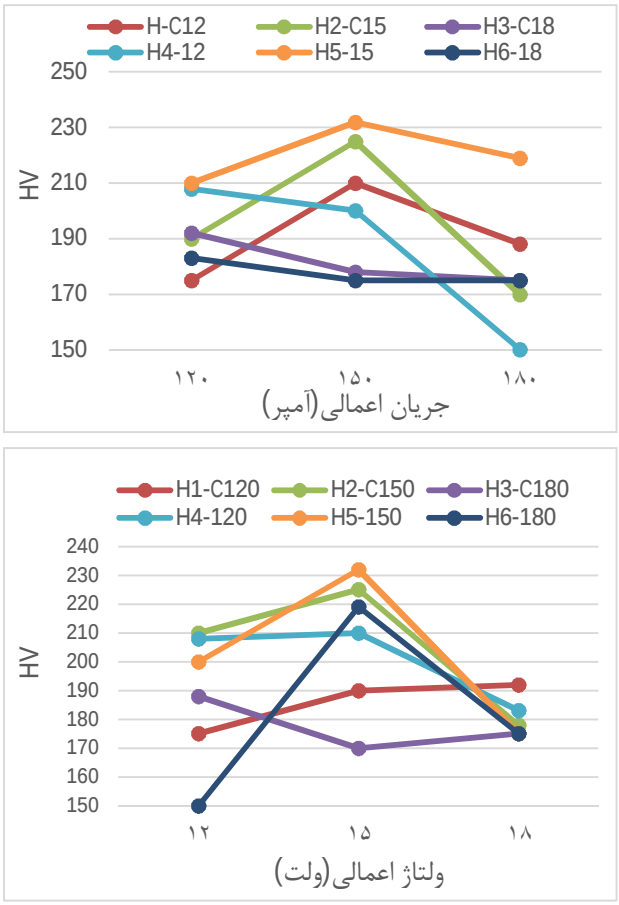
بدست آمده است. با توجه به شکل(13) دیده می‌شود که در شدت جریان ثابت، تمامی نمونه‌های SA-516 دارای استحکام کششی نهایی بیشتر از نمونه‌های SA-240 هستند. با افزایش ولتاژ در 150 ولت در همه نمونه‌های SA-516 به بیشترین استحکام رسیده و با افزایش بیشتر ولتاژ، استحکام کششی افت می کند. در نمونه‌های SA-240 نیز تقریباً رفتار مشابهی دیده شده و در این مورد نیز بیشترین استحکام‌ها را در ولتاژ 150 داریم. تغییرات استحکام کششی با تغییرات جریان اعمالی در جوشکاری نیز نشان دهنده تفاوت زیاد استحکام‌ها در هر جریانی در ولتاژ 180 و بخصوص 150 ولت است. افزایش ولتاژ و جریان در جوشکاری هردو باعث افزایش حرارت ورودی به جوش می‌شوند. با افزایش حرارت ورودی میزان آستنیته شدن و ایجاد فازهای ناشی از آن تغییر کرده و باعث تغییر خواص می‌شود. کمتر یا بیشتر بودن حرارت ورودی با تغییر ولتاژ یا جریان باعث تغییر در میزان کروی شدن سمانتیت و درشت شدن دانه‌ها می‌گردد که تاثیر منفی بر استحکام جوش دارد. در ترکیب خاصی از ولتاژ و جریان بهترین حالت تعادلی بین عوامل تقویت کننده و تضعیف کننده استحکام ایجاد می‌شود. با توجه به شکل(14) دیده می‌شود که بیشترین سختی در نمونه‌های SA-516 و در ولتاژهای 150 و 180 دیده می‌شود. بنابراین بین سختی و استحکام کششی جوش ارتباط مناسبی برقرار است. این ارتباط درفولادها بین سختی و استحکام کششی از قبل شناخته شده است.

تغییرات تنش تسلیم با ولتاژ و جریان نیز در نمونه‌های مختلف کلد شده و ساده در شکل(15) نشان داده شده است. در تمامی موارد تنش تسلیم نمونه‌های بدون پوشش از نمونه‌های پوشش‌دار بیشتر بوده ولی تغییرات با تغییر ولتاژ و جریان شدید نبوده و بنابراین ایجاد پیک در 150 ولت در بعضی نمونه‌ها دیده نمی‌شود. رفتار الاستیک در فلزات و آلیاژها نسبت به استحکام کششی و سختی کمتر تحت تاثیر عملیات حرارتی و کار مکانیکی قرار می‌گیرد.



شکل 13-نحوه تغییرات تنش کششی نهایی با ولتاژ در شدت جریان ثابت و با جریان در ولتاژ ثابت.

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

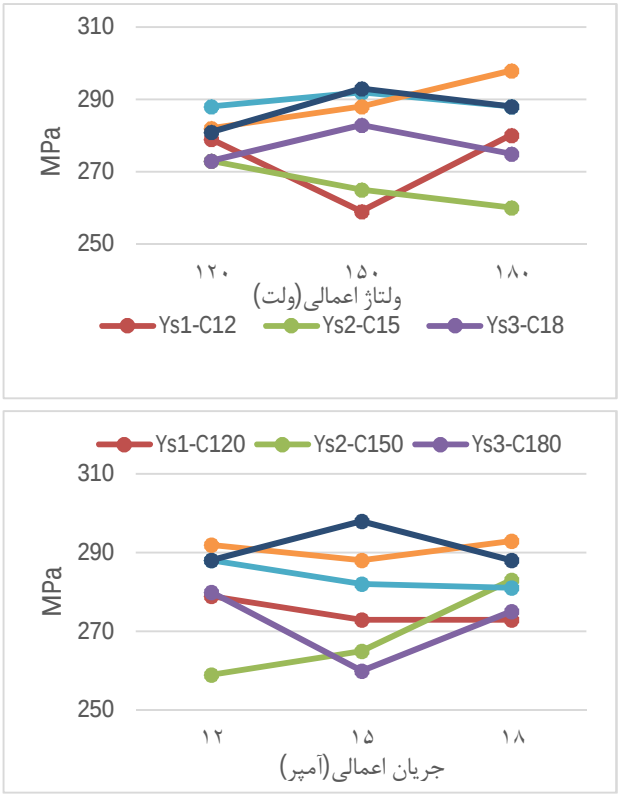


شکل 14-نحوه تغییرات سختی ویکرز با ولتاژ در شدت جریان ثابت و با جریان در ولتاژ ثابت.

دیده می‌شود که استحکام تسلیم تمامی نمونه‌های دارای پوشش (حرف C) بیشتر از نمونه‌های فلزپایه زنگ نزن است. در نمونه‌های اولیه قبل از روکش‌کاری و جوش تفاوت زیادی بین تنش تسلیم مشاهده نشده بود. در مقابل استحکام کششی تمامی نمونه‌های دارای پوشش کمتر از نمونه زنگ‌نزن اولیه است ولی این تفاوت ناچیز است در حالی‌که در نمونه‌های اولیه استحکام کششی نمونه‌های زنگ نزن حدود 60 تا 85 درصد از استحکام کششی نمونه‌های SA-516 بیشتر بود به عبارت دیگر پوشش دادن در ارتقاء استحکام کششی بسیار موفق عمل کرده است.

3-6- آزمایش ضربه

در این آزمایش انرژی جذب شده تا مرحله شکست با مقیاس ژول مشخص می‌شود. نوع آزمایش چاپی بوده و آزمایش دردمای منفی 30 درجه انجام می‌شود. نتایج آزمایش در جدول (13) نشان داده شده است.



شکل 15-نحوه تغییرات تنش تسلیم با ولتاژ در شدت جریان ثابت و با جریان در ولتاژ ثابت.

جدول 13- نتایج آزمون ضربه برحسب ژول در ولتاژ ها و جریان‌های اعمالی

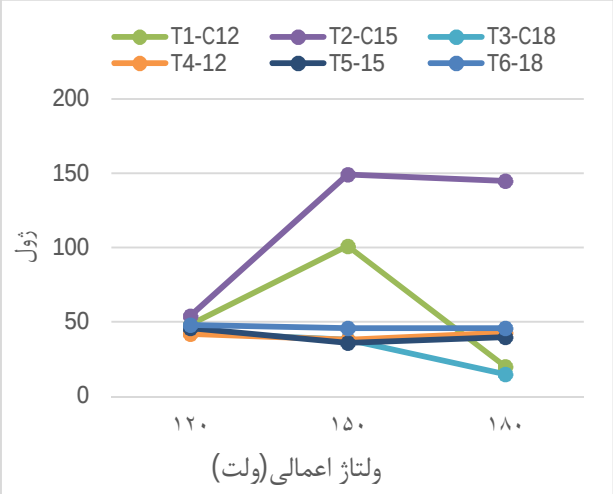
V	T1-C120	T2-C150	T3-C180	T4-120	T5-150	T6-180
12	48	101	20	42	38	43
15	54	149	145	46	36	40
18	43	38	15	48	46	46
A	120	150	180	120	150	180
No	1,2,3	4,5,6	7,8,9	10,11,12	13,14,15	16,17,18

براساس اطلاعات این جدول نحوه تغییرات با ولتاژ در شکل(16) نشان داده شده است.

همانگونه که مشخص است تمامی نمونه‌های فولاد SA-516 دارای انرژی جذب تقریبا ثابت حدود 40 ژول هستند ولی تغییرات انرژی جذب شده در نمونه‌های کلد شده ممکن است متغیر باشد. در این مورد نیز در ولتاژ 150 ولت تغییرات زیادی دیده می‌شود. مشخص است که با کنترل پارامترهای جوشکاری

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

می‌توان چقرمگی و قابلیت جذب انرژی بسیار بهتری برای نمونه‌های جوش شده برای کاربردهای همراه با ضربه بدست آورد.



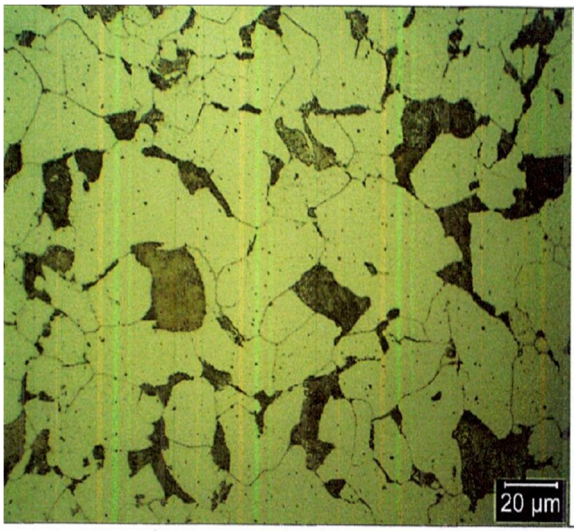
شکل 16-نحوه تغییرات انرژی جذب شده در آزمون ضربه با ولتاژ در شدت جریان‌های ثابت

4- ساختار میکروسکوپی

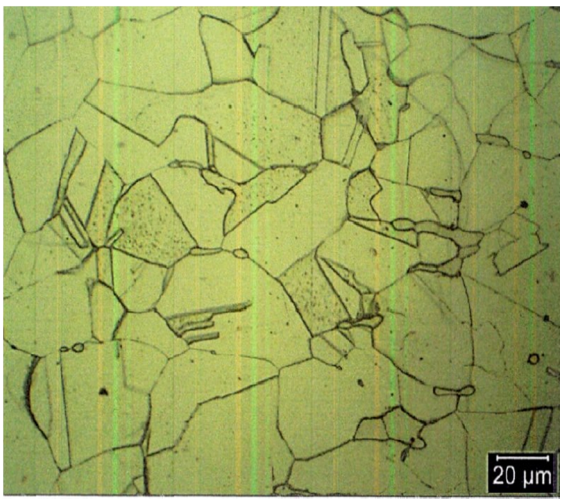
ساختار میکروسکوپی در فلزپایه در دو آلیاژ SA-516 و SA-240 در شکل(17 و 18) نشان داده شده است.

دیده می‌شود که در آلیاژ SA-516 ساختار اولیه فریتی-پرلیتی و در فولاد زنگ نزن SA-214 ساختار آستنیتی داریم. در فولاد SA-516 ساختار از انتهای منطقه تحت تاثیر حرارت و وسط این منطقه تا منطقه نزدیک به کلد نشان‌دهنده فازهای فریت وپرلیت و همچنین بینیت با نزدیک‌تر شدن به کلد می‌باشد. تغییرات ترکیب شیمیایی و سرعت سرد شدن باعث تشویق ایجاد فاز غیر تعادلی بینیت در ساختار و طبیعتاً سخت‌تر شدن منطقه جوش و کاهش چقرمگی جوش می‌شود. در شکل‌های(19 و 20) زیر ساختارها با دورتر شدن از فلز پایه در SA-516 نشان داده شده‌اند. مقایسه این ساختار با فلزپایه نشانه با بزرگنمایی مشابه، نشان‌دهنده تاثیر عمیق عملیات جوشکاری در ریز شدن دانه‌ها و فازهای مربوطه است

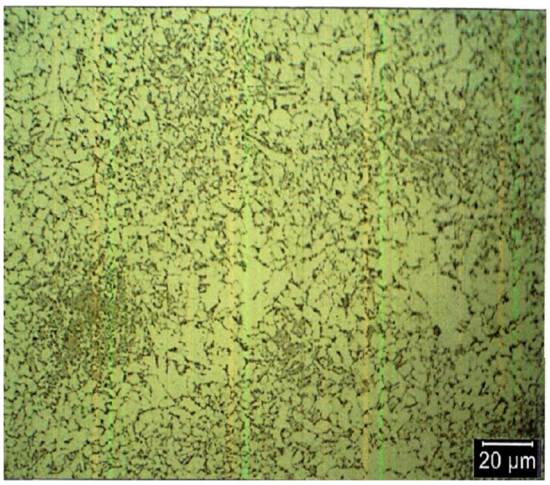
ساختار همچنان بسیار ظریف است منتها فاز پرلیت کاملاً بعد از تبدیل به آستنیت در اثر حرارت ورودی مربوط به جوشکاری حذف و به بینیت تبدیل شده است.



شکل 17-ساختار فریتی-پرلیتی در SA-516 در فلزپایه با بزرگنمایی 500X.

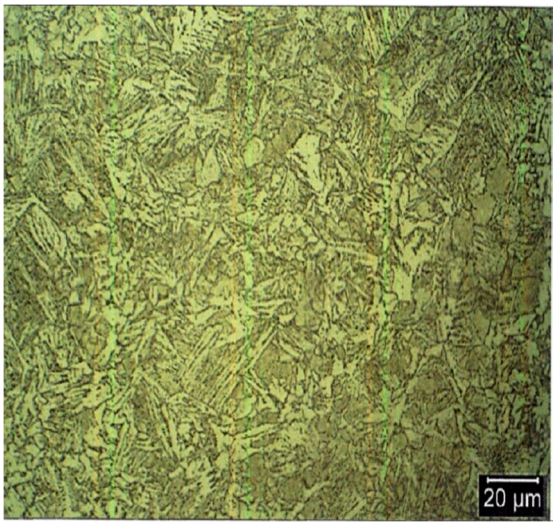


شکل 18-ساختار آستنیتی در فلزپایه در SA-214 با بزرگنمایی 500X همراه با مناطق دو قلویی.

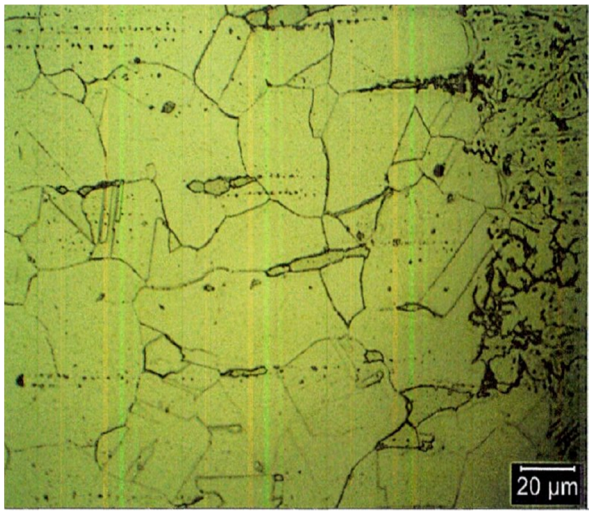


شکل19-ساختار فریتی-پرلیتی بسیار ظریف در انتهای منطقه تحت تاثیر حرارت با بزرگنمایی 500X.

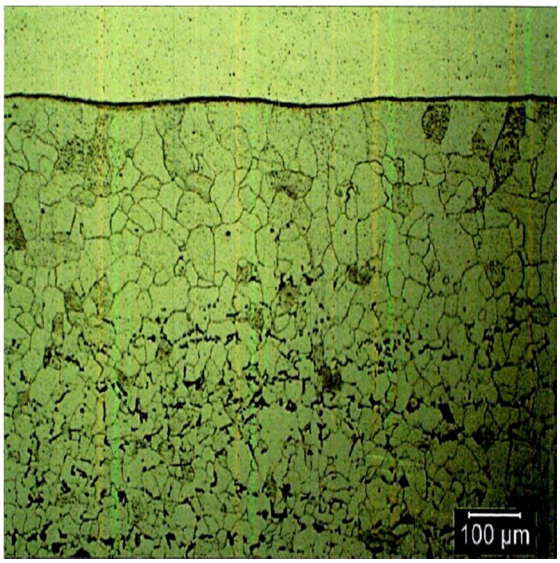
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]



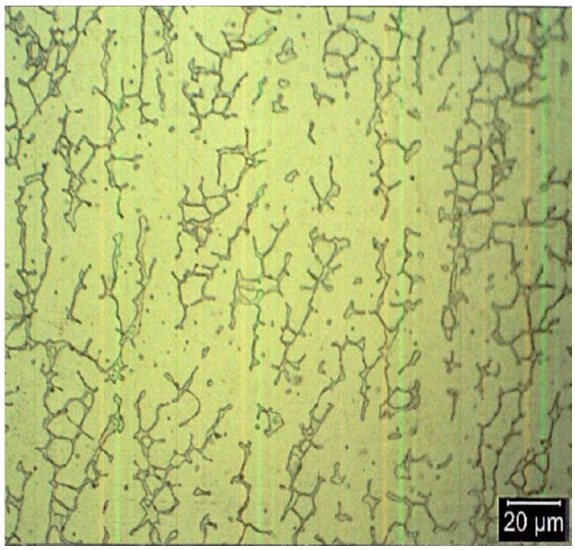
شکل 20-ساختار فریتی-بینیتی در وسط منطقه تحت تاثیر حرارت با بزرگنمایی 500X.



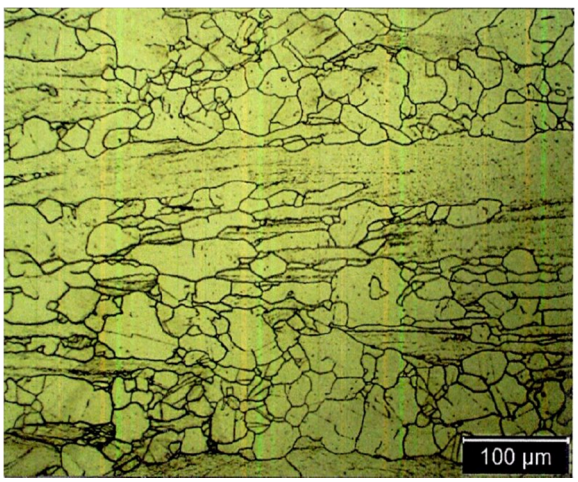
شکل 23-ساختار در مجاورت خط مذاب- دانه‌های آستنیتی همراه با مناطق دوقلویی در سمت چپ و فریت دلتا در سمت راست-بزرگنمایی 500X.



شکل 21-ساختار فریتی در منطقه تحت تاثیر حرارت در مجاورت کلد در بزرگنمایی 200X.



شکل 24-ساختار آستنیتی-فریتی ظریف در منطقه ذوب با توزیع یکنواخت فریت جزیره‌ای در داخل زمینه آستنیتی با بزرگنمایی 500X.



شکل 22-ساختار دانه‌های آستنیتی در منطقه کلد شده با فولاد SA-240.

در شکل(21) دیده می‌شود که ایجاد پوشش از فولاد زنگ نزن و جوشکاری باعث درشت شدن دانه‌ها در مجاورت پوشش و تبدیل فاز سمانتیت به ذرات کروی بسیار کوچک شده است شکل(22) نشان می‌دهد که در خود منطقه کلد با فولاد SA-240 نیز ساختار آستنیتی باقی می‌ماند البته دانه‌های کشیده در کنار دانه‌های هم محور وجود دارند. کشیدگی دانه‌ها بدلیل جهت‌دار بودن جوشکاری حین پوشش دادن است.

در خط مذاب و در وسط منطقه منطقه ذوب شده در اثر جوشکاری نیز تاثیرات حرارتی جوش و تغییرات ترکیب

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

شیمیایی را داریم. ساختار در خط مذاب در شکل (23) نشان داده‌شده است. با نزدیک‌تر شدن به مرکز مذاب ساختار جدیدی ایجاد می‌شود. زمینه را فاز آستنیتی تشکیل داده و فریت بصورت جزیره‌ای در داخل آستنیت نمایان می‌شود(شکل 24).

5- نتیجه‌گیری

بررسی نتایج آنالیز شیمیایی آلیاژ SA240-TP316 نشان می‌دهد روکش انجام شده توسط جوشکاری دارای ترکیب شیمیایی شبیه به آلیاژ SA240 می‌باشد، همچنین بررسی این آنالیز مشخص می‌کند که با افزایش عمق، سختی فلزجوش و درصد کرم بیشتر و درصد مولیبدن در آلیاژ جوش کمتر شده است. نتایج حاصل از آنالیز شیمیایی شباهت بسیار آلیاژ جوشکاری شده کلد با آلیاژ پایه SA240-TP316 را نشان می‌دهد.

مقایسه استحکام نهایی آلیاژ SA516 پس از کلد شدن و جوشکاری با آلیاژ پایه زنگ نزن SA240 نشان از بهبود استحکام‌های کششی دارد. در حالت اول استحکام در محدوده 470 تا503 مگاپاسکال و در حالت دوم در محدوده 477 تا 570 مگاپاسکال تغییر می‌کند.

بنابراین از دیدگاه استحکام کششی می‌توان گفت که آلیاژ ایجاد شده پس از روکش کاری کاملاً قابل جایگزینی بجای فولاد زنگ نزن می‌باشد. همچنین به دلیل شکست تمامی قطعات کششی از ناحیه فلز پایه می‌توان نتیجه گرفت که جوش انجام شده از مقاومت خوبی برخوردار است. در این تحقیق نشان داده شد که افزایش ولتاژ از120 ولت به 150 ولت و به میزان کمتری افزایش جریان از12 آمپر به 15 آمپر باعث افزایش مقاومت کششی و افزایش ولتاژ از 150 به 180 یا افزایش شدت جریان از 15 آمپر به 18 آمپر باعث کاهش مقاومت کششی می‌گردد. بهترین نتایج در حالت 150 ولت و 15 آمپر گرفته می‌شود. آزمایش خمش نمونه‌های SA516-GR60 کلد شده و همچنین نمونه‌های SA240-TP316 داری نتایج مشابهی هستند و هر دو آلیاژ، دارای استحکام خمشی نزدیک به یکدیگر می‌باشند. همه نمونه‌ها از جنس هر دو آلیاژ جوشکاری شده در آمپر متوسط و بالا دارای زاویه خمش 180 درجه می‌باشد. خمش بدون ترک تا زاویه 180 درجه نشانه داکتیل ماندن فلزجوش می‌باشد. همچنین از نتایج آزمایش خمش مشخص می شود که افزایش آمپر و ولتاژ تا 150 آمپر و 15 ولت موجب افزایش داکتیلیتی می‌شود هر چند افزایش از 150 به 180 آمپر و از 15 تا18 ولت تغییر چندانی در داکتیلیتی آلیاژ جوش داده شده ندارد. میانگین سختی در نواحی فلزپایه، فلزجوش و ناحیه متاثر از حرارت به ترتیب تقریبا برابر با 185، 200 و 225 است. بنابراین بیشترین سختی در ناحیه متاثر از حرارت به دست آمده است.

سختی در نمونه از فلزپایه به سمت منطقه متاثر از حرارت افزایش پیدا کرده است. با افزایش آمپر و ولتاژ جوشکاری، سختی در هر سه ناحیه فلزپایه، فلز جوش شده و ناحیه متاثر از حرارت افزایش پیدا کرد. در مقایسه با ولتاژ نیز نتایج مشابهی را در بر داشت. میانگین سختی در دو آلیاژ SA516-GR60 کلد شده و SA240-TP316 به ترتیب برابر با 189 و 194 ویکرز است. این نتایج نشان دهنده نزدیکی سختی تقریبا یکسان دو آلیاژ جوشکاری شده می‌باشد. نتایج آزمایش ضربه نیز نشان دهنده قابلیت جذب انرژی مناسب بخصوص در حوالی ولتاژ150 ولت می‌باشد. سختی بالا در منطقه تحت تاثیر حرارت با توجه به وجود بینیت و ساختار دانه‌ای بسیار ریز قابل درک است.وجود فاز زمینه آستنیتی در کنار فریت جزیره‌ای با توزیع یکسان در برابرمنطقه تحت تاثیر حرارت با فاز ترد بینیتی گواهی بر دلیل شکست قطعات در خارج از منطقه جوش می‌باشد.

به طور کلی از بررسی نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های جوشکاری شده SA516-GR60 کلد شده و SA240-TP316 می‌توان استنباط کرد که امکان جایگزینی آلیاژ SA516-GR60 کلد شده به جای آلیاژ SA240-TP316 از نظر مقاومت کششی، مقاومت خمشی و سختی و قابلیت جذب انرژی وجود دارد. آلیاژ SA516-GR60 کلد شده آزمایش شده در این تحقیق در بردارنده نتایج مشابه و نزدیکی از نظر مقاومت کششی، مقاومت خمشی و سختی به آلیاژ SA240-TP316 است. این در حالی است که جایگزینی این آلیاژ به جای آلیاژ ذکر شده از نظر اقتصادی بهره‌وری بسیار زیادی را دربرخواهد داشت.

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

منابع

1-Wan, Z., Wang, H. P., Chen, N., Wang, M., & Carlson, B. E. "Characterization of intermetallic compound at the interfaces of Al-steel resistance spot welds." Journal of Materials Processing Technology, Vol. 242, pp. 12-23, 2017.

2-Sun, D., Zhang, Y., Liu, Y., Gu, X., & Li, H. "Microstructures and mechanical properties of resistance spot welded joints of 16Mn steel and 6063-T6 aluminum alloy with different electrodes." Materials & Design Vol. 109, pp. 596-608, 2016.

3- ربیعی زاده، ا، افسری، ا. "اثر افزودن نانولوله‌های کربنی بر کیفیت اتصال غیرهمجنس آلیاژهای آلومینیم به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی." *مجله علمی-پژوهشی علوم و فناوری جوشکاری ایران* جلد 4، شماره 2، صفحه 23 -34 . 2019

4- Di Schino, A., & Testani, C. "Corrosion behavior and mechanical properties of AISI 316 stainless steel clad Q235 plate." Metals Vol. 10.4, pp. 552, 2020.

5-Liangyu, L., Yong, S., Jian, C., Yu, F., Xiaoyuan, X., & Jin, Y. "Study on microstructure and properties of TA1-304 stainless steel explosive welding cladding plate." Materials Research Express, Vol. 7.2, pp. 026557, 2020.

6-Dhib, Z., Guermazi, N., Ktari, A., Gasperini, M., & Haddar, N. "Mechanical bonding properties and interfacial morphologies of austenitic stainless steel clad plates." Materials Science and Engineering, Vol. A 696, pp. 374-386, 2017.

7-Dhib, Z., Guermazi, N., Gaspérini, M., & Haddar, N. "Cladding of low-carbon steel to austenitic stainless steel by hot-roll bonding: microstructure and mechanical properties before and after welding." Materials Science and Engineering, Vol. A 656, pp. 130-141, 2016.

8-Rashid, R. R., Abaspour, S., Palanisamy, S., Matthews, N., & Dargusch, M. S. "Metallurgical and geometrical characterisation of the 316L stainless steel clad deposited on a mild steel substrate." Surface and Coatings Technology, Vol. 327, pp. 174-184, 2017.

9- AghaAli, I., Farzam, M., Golozar, M. A., & Danaee, I. "The effect of repeated repair welding on mechanical and corrosion properties of stainless steel 316L." Materials & Design, Vol. 54, pp. 331-341, 2014.

10-Cao, X. Y., Ding, X. F., Lu, Y. H., Zhu, P., & Shoji, T. "Influences of Cr content and PWHT on microstructure and oxidation behavior of stainless steel weld overlay cladding materials in high temperature water." Journal of Nuclear Materials, Vol. 467, pp. 32-41, 2015.

11- Sandhu, S. S., & Shahi, A. S. "Metallurgical, wear and fatigue performance of Inconel 625 weld claddings." Journal of Materials Processing Technology, Vol. 233, pp. 1-8, 2016.

12- Shi, X., Yu, K., Jiang, L., Li, C., Li, Z., & Zhou, X. "Microstructural characterization of Ni-201 weld cladding onto 304 stainless steel." Surface and Coatings Technology, Vol. 334, pp. 19-28, 2018.

13-Bozeman, S. C., Isgor, O. B., & Tucker, J. D. "Effects of processing conditions on the solidification and heat-affected zone of 309L stainless steel claddings on carbon steel using wire-directed energy deposition." Surface and Coatings Technology, Vol. 444, pp. 128698, 2022.

14- Song, H., Shin, H., & Shin, Y. "Heat-treatment of clad steel plate for application of hull structure." Ocean Engineering, Vol. 122, pp. 278-287, 2016.

15-Ghorbel, R., Ktari, A., & Haddar, N. "Experimental analysis of temperature field and distortions in multi-pass welding of stainless cladded steel." The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 113.11, pp. 3525-3542, 2021.

16-Afsari, A., Fazel, D., Karimisharifabadi, J., & Mehrabi, V. "Study the Percentage of Carbon and Ferrite in Layers of Steel (SA-516) by Strip Cladding with E316L." Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production , Vol. 9.3, pp. 41-50, 2020.

17-Roy, S., Sridharan, N., Cakmak, E., Ghaednia, H., Gangopadhyay, A., & Qu, J. "Post weld heat treatment and operating temperature effect on tribological behavior of laser cladded stellite 21 coating." Wear , Vol. 482, pp. 203990, 2021.

18-Bhatti, A. A., Barsoum, Z., Murakawa, H., & Barsoum, I. "Influence of thermo-mechanical material properties of different steel grades on welding residual stresses and angular distortion." Materials & Design, Vol. 65, pp. 878-889, 2015.

19-Hedaiat, F., Dehmolaei, R., Khorasanian, M., & Lotfi, B. "Long-term oxidation behaviour and thermal stability of heat-resistant stainless steel claddings deposited on AISI 316 stainless steel by the GTAW process." Surface and Coatings Technology, Vol. 424, pp. 127605, 2021.

20-Liu, B. X., An, Q., Yin, F. X., Wang, S., & Chen, C. X. "Interface formation and bonding mechanisms of hot-rolled stainless steel clad plate." Journal of Materials Science, Vol. 54.17, pp. 11357-11377, 2019.

21-Jang, D., Kim, K., Kim, H. C., Jeon, J. B., Nam, D. G., Sohn, K. Y., & Kim, B. J. "Evaluation of mechanical property for welded austenitic stainless Steel 304 by following post weld heat treatment." Korean Journal of Metals and Materials, Vol. 55.9, pp. 664-670, 2017.

22. رسولی، ا، رفیعی، م، "ارزیابی خواص اتصال غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI316 به فولاد زنگ نزن فریتی AISI430 جوشکاری شده توسط فرایند GTAW." مجله علمی-پژوهشی علوم و فناوری جوشکاری ایران، جلد 4 شماره 2، صفحه 111-126، 2019

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