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



Microstructural and corrosion evaluation of AH36 low-alloy steel cladded with nickel and copper alloy filler wires using GTAW

H.Abedi Chermahini[1], M. Atapoor[1*], M. Esmailzadeh[2]

1- Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan 84156-83111, Iran

2-Department of Mechanical Engineering, Persian Gulf University, Bushehr, 75169, Iran.

Received 16 August 2024 ; Accepted 22 October 2024

Abstract

Nowadays, in order to achieve the combined properties of multiple alloys for important applications such as automotive and marine industries, the use of cladding method is common. Cladding, which is a type of coating through welding, is one of the widely used methods for surface modification of metal parts and sheets in industry. AH36 low-alloy steel is a steel used in shipbuilding, known for its toughness and good corrosion resistance, making it a significant condidcate among other steels used in this industry. In this research, to enhance the corrosion properties of AH36 steel, the cladding process was performed using Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) with copper/nickel filler wire. Two samples, one from the coated (weld metal) and one from the uncoated (base metal) sections, were prepared and subjected to microstructural and corrosion investigations. The results indicated an increase in grain size in the heat-affected zone of the weld metal sample, leading to a reduction in mechanical properties. The cyclic polarization test showed that the base metal had higher susceptibility to pitting corrosion compared to the weld metal. Additionally, the weld metal exhibited a higher tendency for repassivation or repairing of the pits. The results of the electrochemical impedance spectroscopy (EIS) test indicated that both the base metal and weld metal samples had a single-loop equivalent circuit. The larger diameter of the Nyquist semicircle for the base metal compared to the weld metal suggests better uniform corrosion behavior of the base metal relative to the weld metal.

Keywords:Low-Alloy Steel, AH36, Shipbuilding Steel, Nickel/Copper.

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

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.10]

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 ریزساختار و رفتار خوردگی فولاد کم‌آلیاژ (AH36) روکش‌کاری شده به روش جوشکاری قوسی تنگستن (GTAW) با سیم جوش از جنس نیکل و مس

حسین عابدی چرمهینی[1]، مسعود عطاپور[1*]، مجتبی اسماعیل‌زاده[2]

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

2- دانشگاه خلیج‌فارس، بوشهر، ایران.

دریافت مقاله: 1403/06/26 ؛ پذیرش مقاله: 1403/08/01

چکیده

امروزه در دنیا به منظور دستیابی هم‌زمان به خواص چند آلیاژ متفاوت در کاربردهای مهم نظیر خودروسازی و دریایی، استفاده از روش روکش‌کاری سطح مرسوم است. پوشش‌دهی به روش جوشکاری (روکش‌کاری) یکی ازروش‌های پراستفاده در اصلاح سطح قطعات و ورق‌های فلزی در صنعت است. فولاد کم‌آلیاژ AH36 یک از فولادهای مورد استفاده در صنعت کشتی‌سازی به شمار می‌رود که به جهت چقرمگی و مقاومت به خوردگی خوب، شهرت فراوانی در بین سایر فولادهای مورد استفاده در این صنعت پیدا کرده است. در این تحقیق به‌منظور بهبود خواص خوردگی این فولاد، فرایند روکش‌کاری به روش جوشکاری قوسی تنگستن با گاز محافظ با استفاده از سیم‌جوش از جنس مس/نیکل انجام شد. سپس دو نمونه از قسمت‌های با و بدون روکش تحت عنوان فلزپایه و فلزجوش تهیه شده و مورد بررسی‌های ریزساختاری و خوردگی قرار گرفت. نتایج حاصل حاکی از افزایش اندازه دانه در منطقه متأثر از حرارت نمونه فلزجوش و به دنبال آن کاهش خواص مکانیکی بود. آزمون پلاریزاسیون سیکلی نشان داد که فلز پایه حساسیت بالاتری به خوردگی حفره‌ای نسبت به فلز جوش دارد. همچنین، فلزجوش تمایل بالاتری برای ترمیم مجدد حفرات از خود نشان داد. نتایج آزمون امپدانس الکتروشیمیایی الکتروشیمیایی نشان داد که نمونه فلزپایه و فلزجوش مدار معادل تک حلقه‌ای دارند. قطر حلقه نایکوییست بزرگتر فلزپایه نسبت به فلزجوش نشان‌دهنده رفتار بهتر خوردگی یکنواخت فلزپایه نسبت به فلزجوش بود.

کلمات کلیدی: فولاد کم‌آلیاژ، AH36، فولاد کشتی، نیکل/مس.

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

1- مقدمه

خواص و ویژگی‌های سطح قطعات و سازه‌های فلزی یکی از مباحث قابل‌توجه به‌ویژه در صنعت است؛ زیرا بسیاری از مکانیزم‌های تخریب قطعات از این قسمت یعنی سطح آغاز می‌شود. لذا حفاظت و مقاوم‌سازی سطح از مسائل بسیار حساس و حائز اهمیت است که تعیین‌کننده کیفیت و عمر قطعات و بهای تمام شده محصول است. به‌منظور بهبود شرایط سطح، فرایندهای متالورژی سطح به‌صورت گسترده و در

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.10]

روش‌های مختلف صورت می‌گیرد. متداول‌ترین فرایندهای روکش‌دهی عبارتند از: سخت‌کاری آندی، آبکاری الکتریکی و جوشکاری سطحی که دو روش اول اعمال پوشش نازک داشته و در پوشش ایجاد شده در تنش‌های اعمالی بالا ممکن است دچار شکست شود [1]. از طرف دیگر، تغییر ترکیب شیمیایی در فصل مشترک فلزجوش- فلزپایه و اثر سرعت سرد شدن بر روی ریزساختارهای فلزپایه و لایه‌های روکش‌کاری شده در اثر جوشکاری، باعث ایجاد تغییرات در رفتار مکانیکی و متالورژیکی در لایه‌های روکش‌کاری می‌شود. به همین دلیل روش سوم با ایجاد پوششی ضخیم‌تر، با تشکیل فازهای سخت مانند کاربیدها و ترکیبات فلزی متفاوت می‌تواند یک سطح مقاوم به سایش و خوردگی ایجاد کند [2].

در سالیان اخیر روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز (GTAW) برای ایجاد پوششی با خواص سطحی عالی بر روی فلزات مختلف، مورد توجه قرار گرفته است. ویژگی‌های این روش عبارتند از: نرخ رسوب گذاری بالا، چسبندگی خوب پوشش به زیرلایه به دلیل ایجاد پیوند متالورژیکی و ضخامت بالای پوشش که موجب کاربرد گسترده آن در صنایع مختلف گردیده است [3].

انتخاب پارامترهای مناسب جوشکاری برای رسیدن به پوشش مناسب با خواص موردنظر اهمیت ویژه‌ای دارد. در این فرایند دو روش عمده جهت اعمال پوشش وجود دارد که در یکی از الکترود و در دیگری از پودر پوشش موردنظر استفاده می‌شود. در روش اول پوشش موردنظر با ذوب الکترود به کمک روش جوشکاری قوسی تنگستن بر روی سطح زیرلایه تهیه می‌شود. این روش در صنایع مختلف بسیار رایج بوده و برای پوشش‌دهی انواع قطعات فولادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش دیگر در ایجاد پوشش، تهیه مخلوط پودری موردنظر و اعمال آن بر روی سطح زیرلایه است. در این روش نیز از فرایند جوشکاری به‌عنوان عامل ذوب پودرها بدون حضور الکترود مصرفی استفاده می‌شود [4]. کیفیت فولاد برای صنعت کشتی‌سازی ملی توسط اداره حمل‌ونقل آمریکا نظارت می‌شود. مواد دارای گواهی ABS برای صنعت کشتی‌سازی تأیید شده است. فولادهای مورد تأیید این سازمان شامل مجموعه‌ای کامل با نام‌های AH36، EH36 و DH36 در پرکاربردترین انواع هستند. فولاد AH36 برای مقاومت در برابر شرایط سخت و محیط‌های دریایی طراحی شده است و از فناوری میکرو آلیاژی برای افزایش عملکرد آن استفاده می‌شود. عناصری مانند Nb، V، Ti و سایر عناصر آلیاژی، همراه با فرایند نورد کنترل شده، با کنترل اندازه دانه باعث بهبود چقرمگی می‌گردد. به‌عنوان یکی از فولادهای تولید شده با بالاترین عملکرد در جهان، سری H فولادهای کشتی تقریباً برای تمام خواص مکانیکی بهینه شده‌اند. فولاد AH36 تقریباً به طور انحصاری برای کشتی‌سازی، تجهیزات دریایی، سکوهای حفاری نفت در دریا و سایر کاربردهای دریایی استفاده می‌شود [5].

در سال‌های اخیر، تحقیقات متعددی در زمینه بررسی رفتار خوردگی فولاد AH36 در محیط دریایی انجام شده است. همان‌طور که بیان شد این فولاد به دلیل استحکام بالا و مقاومت در برابر خوردگی در صنایع دریایی و کشتی‌سازی کاربرد گسترده‌ای دارد. با این حال، محیط خورنده دریایی می‌تواند تأثیر منفی بر خواص مکانیکی و سطح این فولادها داشته باشد. در همین راستا، مطالعه رفتار خوردگی در شرایط متفاوت به‌خصوص در معرض محیط دریایی بر روی خواص این فولاد ضروری است.

در مطالعه‌ای، تغییرات خواص مکانیکی و وضعیت سطح جوشکاری شده فولاد AH36 در معرض محیط دریایی به مدت 12 و 24 ماه بررسی شد. نتایج نشان داد که محیط خورنده دریایی، بیشترین تأثیر را بر مقاومت کششی و استحکام تسلیم داشت. همچنین، تغییرات شدیدتری در سطح نمونه‌ها در طول سال اول قرارگیری در معرض محیط دریایی رخ داد [6].

در مطالعه دیگری، رفتار خوردگی فولاد AH36 با دو نوع پوسته اکسید متداول (سیاه و قرمز) در محیط ذخیره‌سازی بررسی شد. نتایج نشان داد که پوسته اکسید می‌تواند پتانسیل خوردگی را افزایش و چگالی جریان خوردگی را به طور قابل توجهی کاهش دهد. همچنین، مقاومت به خوردگی پوسته اکسید سیاه به دلیل ضخامت و فشردگی بیشتر نسبت به پوسته

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.10]

قرمز برتری دارد. پوسته سیاه پس از 119 روز قرارگیری در معرض محیط ذخیره‌سازی با رطوبت نسبی72% در دمای تقریبی 23/4 درجه سلسیوس شروع به تاول‌زدن کرد، درحالی‌که پوسته قرمز زنگ‌زدگی آشکاری از خود نشان داد [7].

به منظور بهبود خواص مکانیکی و ریزساختاری فولاد AH36، در تحقیق دیگری تاثیر افزودن فلاکس‌های اکسیدی و دوبلکس در روش جوشکاری تیگ مورد بررسی قرار گرفت. این تحقیق به شناسایی بهترین ترکیبات فلزات پرکننده برای بهبود خواص جوش فولاد AH36 کمک کرد و بینشی جدید در زمینه تکنیک‌های جوشکاری ارائه داد. نتایج نشان داد که استفاده از فلاکس‌های دوپلکس نظیر TiO2 50% + Fe2O3 50%, SiO2 50% +ZnO 50%, باعث افزایش عمق نفوذ و کاهش حرارت ورودی در فرایند جوشکاری می‌شود [8].

در مطالعه‌ای دیگر، خواص مکانیکی و مقاومت در برابر خوردگی صفحات فولاد A36 پوشش‌داده شده با استیل زنگ‌نزن 309 از طریق فرایند جوشکاری الکترود پوشش دار(SMAW) مورد بررسی قرارگرفت. مطابق با گزارشات نویسندگان، لایه پوششی وزن از دست رفته توسط آزمون خوردگی را حدود 24% کاهش داد؛ همچنین، حجم از دست رفته در آزمایش‌های سایش حدود 9% کاهش یافت.

در واقع استفاده از پوشش استیل ضد زنگ به طور قابل توجهی خواص‌مکانیکی و مقاومت به خوردگی فولاد A36 روکش‌کاری شده را افزایش می‌دهد و آن را برای کاربردهای محیط‌های سخت مناسب می‌سازد [9].

محققین در تحقیقی دیگر، تأثیر مقدار منیزیم در الکترودهای E6013 بر روی خواص میکروساختاری و مکانیکی فولاد AH-36 روکش کاری شده توسط الکترود نامبرده را بررسی کردند. این مطالعه نشان داد که افزایش مقدار منیزیم در الکترود E6013 منجر به بهبود خواص مکانیکی به دلیل پیوند متالورژیکی بهتر در ناحیه جوش می‌شود. همچنین افزایش محتوای منیزیم باعث ریز شدن میکروساختار و کاهش ناخالصی‌های غیرفلزی شد. در واقع معرفی الکترودهای اصلاح‌شده با منیزیم رویکرد جدیدی برای بهبود قابلیت جوشکاری و عملکرد مکانیکی در کاربردهای فولاد AH-36 ارائه داد [10].

در مجموع محیط دریایی خورنده می‌تواند بر خواص مکانیکی و سطح فولاد AH36 تأثیر منفی داشته باشد. بنابراین، بررسی دقیق رفتار خوردگی این فولاد در محیط دریایی و ارائه راهکارهای مناسب برای افزایش عمر مفید آن امری ضروری است. برای دستیابی به این هدف تاکنون تحقیقات بسیاری برروی روکش‌کاری فولاد مذکور با استفاده از الکترودهایی از جنس‌های مختلف انجام شده است؛ به همین منظور و به دلیل خواص خوردگی منحصر به فرد الکترودهای مس/نیکل، در این پژوهش به مقایسه رفتار خوردگی فولاد دریای AH36 با و بدون روکش‌کاری توسط فرایند جوشکاری قوسی تنگستن-گاز به کمک الکترود مس/نیکل پرداخته شده است.

2ـ مواد و روش تحقیق

در این مطالعه به بررسی ریزساختار و رفتار خوردگی فولاد کشتی روکش‌کاری شده با استفاده از الکترود جوشکاری مس/نیکل به روش جوشکاری قوسی تنگستن با گاز محافظ پرداخته شده است. برای این منظور ابتدا قطعه‌ا در ابعاد 5×5 سانتی‌متر با قطر 5 میلی‌متر از فولاد مورد نظر با استفاده از سنگ فرز برش داده شد. ترکیب شیمیایی فولاد نامبرده در جدول(1) قابل مشاهده می‌باشد. پس از برش قطعه سطح آن برای بهبود شرایط جوشکاری به دقت تمیز شد. این کار به وسیله سنباده با مش 1200 و پس از آن شستشو با الکل انجام شد. عملیات جوشکاری با پارامترهای موجود در صنعت و ذکر شده در جدول(2) و با استفاده از دستگاه جوشکاری تنگستن و الکترود جوش با ترکیب شیمیایی ذکر شده در جدول(3) انجام پذیرفت. پس از پایان سه پاس جوشکاری لب‌به‌لب با هدف روکش‌کاری قطعه، نمونه‌ای جهت بررسی ریزساختار به صورت مقطع‌زنی عرضی از قطعه استخراج گردید. برای بهبود کار جهت انجام آزمایش متالوگرافی نمونه به صورت مانت گرم تهیه شد. سپس به منظور نمایان شدن ریزساختار عملیات سنباده، پولیش و اچ کردن نمونه آغاز شد. نمونه مورد نظر با استفاده از سنباده با

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.10]

مش 80 تا سنباده با مش 2400 سنباده‌زنی شد و پس از آن با استفاده از پارچه پولیش و پودر آلومینا فاقد هرگونه خش بر روی سطح در زیر میکروسکوپ گردید. سپس نمونه نامبرده با استفاده از محلول تیزاب با ترکیب شیمیایی هیدروکلریک اسید و اسید نیتریک به نسبت حجمی 3 به 1، اچ شد.

جدول1- ترکیب شیمیایی فولاد AH36.

Fe	Mn	Si	Ni	Cu	Cr	C	Mo	P	Nb	Al
باقیمانده	۱/۲	۰/۷	۰/۴	۰/۳۲	۰/۲۱	۰/۱۷	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۱۳

جدول2- پارامترهای مربوط به دستگاه جوشکاری قوس تنگستن با گاز محافظ.

گازمحافظ	آرگون
نرخ دمش گاز	۷ (لیتر بر دقیقه)
نوع جریان	DCEN
ولتاژ	۲۵ ولت
آمپر	۱۱۰ آمپر
نوع سیم جوش	ERCuNi70/30
قطر سیم جوش	۲،۴ میلیمتر
نوع الکترود تنگستن	EWTh-2/WT20

پس از اچ کردن نمونه‌ها به منظور بررسی ریزساختار، با استفاده از میکروسکوپ نوری مدل Nikon EPIPHOT300 تصویربرداری از نمونه‌ها انجام شد.

برای مطالعه رفتار خوردگی، دو آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و امپدانس الکتروشیمیایی بر روی دو قسمت دارای روکش مس/ نیکل و فاقد آن انجام شد. پس از استخراج نمونه‌های تهیه شده از ناحیه‌های مورد نظر، جهت آماده سازی برای آزمون‌های خوردگی، عملیات سنباده‌زنی تا سنباده 1200 انجام شد. تمامی آزمون‌ها در یک سلول سه الکترودی شامل نمونه کار به‌عنوان الکترود کار، الکترود Ag/AgCl به‌عنوان الکترود مرجع و الکترود پلاتین به‌عنوان الکترود شمارنده انجام شد. آزمون‌های خوردگی در محلول شبیه سازی شده آب دریا (NaCl 3/5%) و به کمک دستگاه گالوانواستات مدل IVIUMStat XRe انجام شد. در ابتدا آزمون پتانسیل مدار باز انجام شد و نمونه در پتانسیل مداربار 154- میلی‌ولت به پایداری رسید. پس از آن آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی(EIS) از فرکانس10 میلی هرتز تا 100 کیلوهرتز انجام شد. در ادامه آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در نرخ روبش یک میلی ولت بر ثانیه انجام شد.

3ـ نتایج و بحث

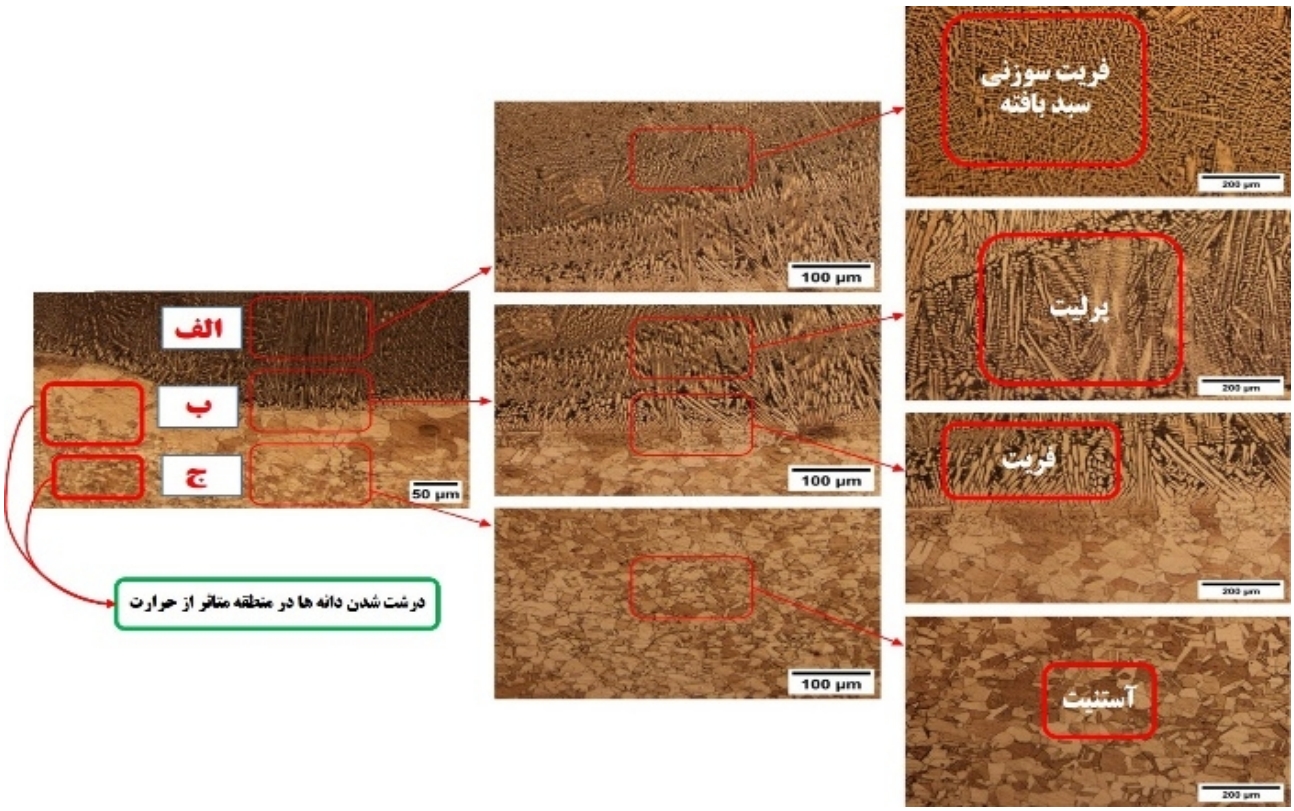
3-1-ریزساختار

ریزساختار مربوطه به فلزپایه و فلزجوش در شکل(1) ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود از پایین به بالا در نزدیک فصل مشترک، در منطقه متاثر از حرارت (HAZ) رشد دانه اتفاق افتاده است که منجر به افزایش اندازه دانه نسبت به زیرلایه شده است. همین موضوع باعث افزایش میانگین اندازه دانه و به طبع آن و طبق رابطه هال پچ، نیز باعث می‌شود خواص مکانیکی نظیر سختی و استحکام کاهش یابد. همانطور که در تصویر قسمت (الف) و (ب) مشخص است، ریزساختارهای متفاوتی با توجه به مرفولوژی انجماد در نواحی مختلف پوشش وجود دارد. در واقع ریزساختار انجماد در ساختار فلزجوش تابعی از G/R می‌باشد که R بیانگر سرعت حرکت یا نرخ رشد فصل مشترک و G نشان‌دهنده گرادیان دمایی است. با تغییر نسبت گفته شده، ریزساختار انجماد می‌تواند از شکل سلولی به دندریتی ستونی و نهایتا به دندریتی هم‌محور تبدیل شود. در واقع ریزساختار در ناحیه پوشش به این صورت شکل می‌گیرد که ابتدا رشد رونشستی دانه‌های ستونی در امتداد دانه‌های فلزپایه مشاهده می‌شود. سپس با حرکت جبهه انجماد به سمت سطح پوشش نرخ رشد افزایش یافته و نسبت G/R کاهش می‌یابد که همین امر باعث تبدیل ریزساختار از سلولی به دندریتی ستونی و دندریتی هم‌محور می‌شود. در بزرگنمایی‌های بالاتر این موضوع به وضوح قابل مشاهده است.

یکی دیگر از فاکتورهای موثر در شکل و اندازه دانه، مقدار G*R می‌باشد که بیانگر سرعت سرد شدن از سمت فصل مشترک به سمت سطح پوشش بوده و این مقدار درحال افزایش است.

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.10]



شکل1- ریزساختار فلزپایه و فلزجوش با بزرگنمایی‌های متفاوت الف- فلزجوش، ب- فصل مشترک فلزپایه و فلزجوش، ج- فلزپایه

جدول3-ترکیب شیمیایی الکترود جوش مورد استفاده در روکش‌کاری.

Cu	Ni	Mn	Fe	Co	Zn	C	Sn	P	S	Pb
باقیمانده	۳۲-۳۰	۱/۰-۵/۵	۰-۱/۴	۰/۱	۰/۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۲

افزایش مقدار این فاکتور نیز منجر به ریزدانه‌تر شدن ریزساختار می‌گردد که تصاویر با بزرگنمایی بالاتر نشان دهنده این موضوع است. همچنین می‌توان شکسته شدن نوک دندریت‌ها در بین دندریت‌های ستونی به علت تلاطم حوضچه مذاب حین جوشکاری را نیز ناشی از ریز شدن دانه‌بندی در برخی مناطق این ناحیه دانست[11].

همانطورکه در تصاویر مربوط به ریزساختار مشاهده می‌شود فاز مربوط به فلزپایه تماما آستنیتی بوده و ریزساختار در نواحی بالاتر حاوی ترکیبی از فازهای فریت و پرلیت است.

فاز پرلیت در این ناحیه فاز سخت شمرده شده که استحکام بالا دارد و فاز فریت موجود فازی نرم بوده و در واقع شکل پذیری بهتر را به دنبال دارد. در قسمت‌های بالاتر ناحیه جوش (گرده جوش) فریت‌های سوزنی به صورت سبد بافته شده و ریز و به شکل دندریت‌های هم محور قابل شهود است.

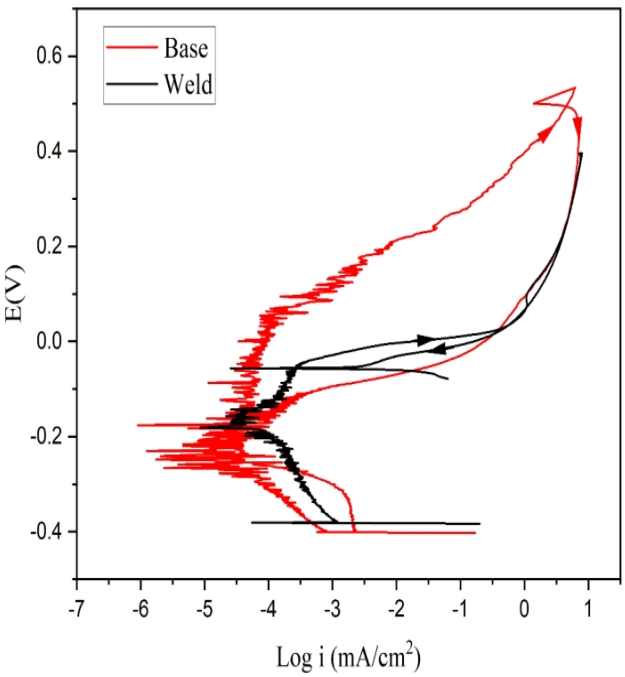
این فاز با شکل ریز و سبد بافته خود طبق گزارشات چقرمگی و استحکام بالایی در شرایط اعمال تنش از خود نشان می‌دهد. همچنین به دلیل ریز بودن ساختار در این ناحیه نمونه مورد نظر می‌تواند مقاومت زیادی از خود در برابر رشد ترک و بارهای ضربه‌ای نشان می‌دهد[12].

3-2- آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک

منحنی‌های پلاریزاسیون سیکلی برای هر دو نمونه فلزپایه و فلزجوش در شکل(2) رسم شده است. فلزپایه بصورت واضح یک ناحیه رویین را نشان داده است که در آن چگالی جریان در یک دامنه پتانسیلی (از -2/. تا 0/1+) تقریبا مقدار کم و ثابتی را ارایه کرده است. در مقایسه، دامنه پتانسیلی ناحیه رویین فلز روکش‌کاری شده کاهش داشته و در دامنه 0/15- تا نزدیک به پتانسیل 0/05- امتداد داشته است.

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.10]



شکل2- نمودار پلاریزاسیون مربوط به فلزجوش(رنگ مشکی) و فلزپایه(رنگ قرمز) در محلول3/5% NaCl.

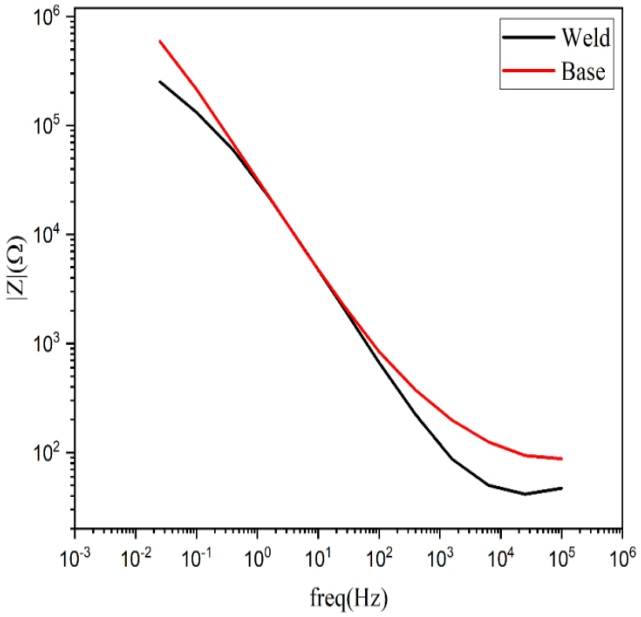
به این صورت که در ناحیه اول نرخ انحلال آهن نمی‌تواند بیشتر از نرخ نفوذ این کاتیون‌ها به داخل محلول باشد لذا در دانسیته جریان حدی معادل 0/75 میلی آمپر بر سانتی‌متر مربع، پلاریزاسیون غلظتی برای شاخه آندی رخ می‌دهد. همچنین وجود نویزهای کمتر در منحنی فلزجوش نشان دهنده سطح صاف‌تر و پایداری بهتر نمونه در محلول 3/5 درصد وزنی NaCl است. منحنی مربوط به هر دو فلز پس از اعمال پتانسیل در سیکل برگشت دارای حلقه هیسترزیس مثبت هستند. اما منحنی مربوط به فلزپایه حلقه هیسترزیس بزرگتری نسبت به منحنی فلزجوش دارد که می‌توان گفت مقاومت به رشد حفره کمتری نسبت به فلزجوش دارد.

حلقه هیسترزیس فلزجوش به میزان قابل توجهی کوچک‌تر از فلزپایه است که از این مشاهده مقاومت به رشد حفره‌ای بهتر آن استنتاج می‌شود. همچنین پتانسیل ترمیم حفرات برای هر دو فلزپایه و جوش به ترتیب برابر 1/7- و 0/5- ولت است که بیانگر اینست که فلزجوش قابلیت بیشتری برای ترمیم حفرات در صورت شکل‌گیری حفرات پایدار دارد.

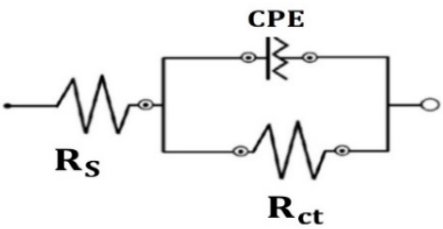
در حالت کلی هرچه مقادیر پتانسیل مدار باز و پتانسیل ترمیم حفرات یک نمونه به هم نزدیک‌تر باشد، نشان از رفتار بهتر خوردگی موضعی دارد که این مطلب در مورد فلزجوش از روی نمودار تفاوت قابل توجهی دارد [13و14].

3-3-آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی

نمودار نایکوئیست بدست آمده از آزمون امپدانس در شکل(3) برای هر دوفلزپایه و جوش نمایش داده شده است. مدار معادل حاصل یک مدار تک حلقه دارای اجزا مقاومت محلول (Rs)، مقاومت نمونه (Rct) و المان فاز ثابت مربوط به نمونه (CPE) می‌باشد که در شکل(4) قابل مشاهده است. همچنین مقادیر بدست آمده اجزا ذکر شده، پس از فیت کردن نمودار در جدول (4) گزارش شده است.



شکل3-نمودار نایکوئیست مربوطه به فلزپایه و فلزجوش در محلول3/5% NaCl.



$Fe^{2+} + 2e \rightarrow Fe$
$O_2 + 2H_2O + 4e \rightarrow 4OH^-$

شکل4-مدار معادل استفاده شده برای تطابق نمودارهای آزمون امپدانس الکتروشیمیایی.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.10]

جدول4- نتیجه طیف امپدانس الکتروشیمیایی برای خوردگی فلزپایه و فلزجوش.

نمونه	$R_s(\Omega cm^2)$	$R_{ct}(\Omega cm^2)$	CPE (F. cm^2)	n (0-1)
فلز پایه	100	5.6×10^6	7.4577×10^{-6}	0.77819
فلز جوش	104	277590	8.9913×10^{-6}	0.80100

همچنین در این نمودار تنها یک نیم دایره مشاهده می‌شود که مطابق با تک حلقه بودن مدار معادل است. عدم مشاهده یک خط با شیب واحد در انتهای نمودار نایکوئیست، بیانگر اینست که پدیده واربورگ رخ نداده و واکنش رخ داده کاملا توسط انتقال بار کنترل می‌شود. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که نمونه فاقد پوشش است و لایه رویین تشکیل نشده است.

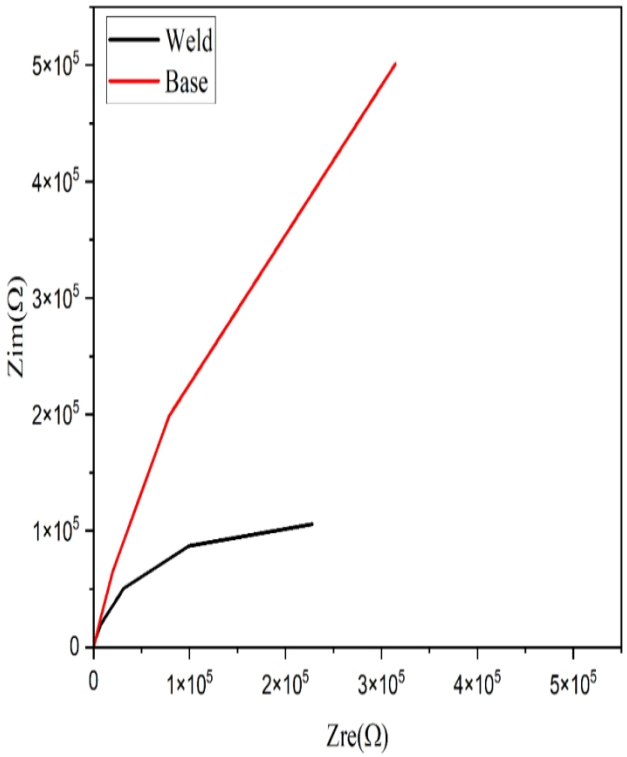
این نتایج در تحلیل‌های پیش از این نیز استخراج گردید و بنابراین تاییدی بر این مطلب است که فلزهای جوش و پایه در محیط کلرید سدیم دچار پدیده پاسیواسیون نمی‌شوند. ملاحظه می‌شود که میزان مقاومت انتقال بار که از قطر دایره نمودار نایکوییست بدست می‌آید، برای فلزپایه بیشتر از فلزجوش است. می‌توان نتیجه گرفت که این فلز مقاومت بیشتری در برابر انتقال بار نسبت به فلزجوش دارد.

در مدل‌های ارائه شده به دلیل اختلاف از حالت ایده‌آل دی الکتریک، به واسطه ناهمگونی‌های سطحی، از پارامتر المان فاز ثابت (CPE) برای محاسبه ظرفیت خازنی استفاده شده است که مطابق با رابطه $\mathbf{Z_c} = \frac{1}{\mathbf{j(c\omega)^n}}$ تعیین می‌شود.

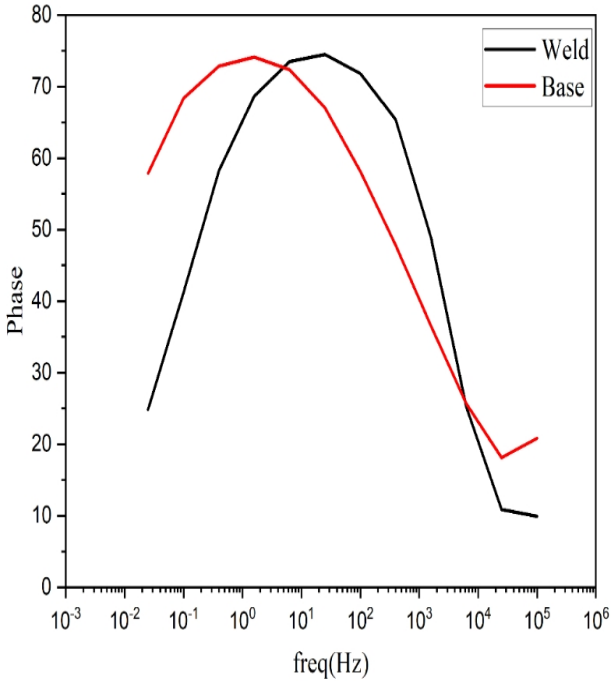
همان‌طور که از جدول(1) استنتاج می‌شود، مقدار n در این رابطه برای فلزپایه و جوش به ترتیب برابر 0/78 و 0/80 بدست آمده است که نشان‌دهنده این است که رفتار هر دو فلز تا حدودی از رفتار خازن ایده‌آل فاصله دارد.

نمودار باد بدست آمده در شکل(5) نشان داده شده‌است. فاصله کم دو منحنی بیان می‌کند که رفتار خوردگی یکنواخت هر دو فلز تا حدودی نزدیک به هم است.

شکل(6) نمودار باد_فاز حاصل از آزمون امپدانس را نشان می‌دهد. حضور تنها یک پیک در این نمودار بیانگر تک حلقه بودن مدار و فاقد پوشش بودن هر دو نمونه است. خوشبختانه این نتایج درتطابق با بخش‌های قبل است. همچین پهنای قابل توجه این پیک در زوایای بالاتر (حدود 75 درجه) نشان دهنده رفتار خوردگی یکنواخت و نسبتا مناسب فلزها در در محیط سدیم کلرید است[15].



شکل5-نمودار باد مربوطه به فلزپایه و فلزجوش در محلول3/5% NaCl.



شکل6- نمودار باد_فاز مربوط به فلز پایه و فلز جوش در محلول 3/5% NaCl.

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.10]

4-نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ریزساختار و رفتار خوردگی فولاد کم آلیاژ AH36 روکش کاری شده به روش جوشکاری قوسی تنگستن با گاز محافظ با استفاده از سیم جوش از جنس نیکل و مس بررسی و مطالعه گردید.

پارامترهای صنعتی بهینه جهت انجام فرایند جوشکاری به منظور روکش کاری توسط اپراتور انتخاب شدند. نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر است:

- طبق بررسی‌های ریزساختاری، در منطقه متاثر از حرارت، رشد دانه اتفاق افتاد که کاهش خواص مکانیکی را به دنبال داشت. همچنین ساختار فلزجوش در تبعیت از نسبت G/R شامل دانه‌های ستونی حاصل از رشد رونشستی، دندریتی ستونی و دندریتی هم‌محور می‌باشد. فاز مربوط به فلزپایه، فاز آستنیت و فاز مربوط به فلزجوش نیز ترکیبی از فازهای فریت و پرلیت گزارش شد.

- ارزیابی رفتار خوردگی نمونه‌ها با استفاده از آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیکی سیکلی نشان داد که هر دو فلزپایه و فلزجوش ناحیه رویین کوچکی ارایه داده ولی رفتار خوردگی موضعی کاملا متفاوتی دارند. فلزپایه نرخ خوردگی کمتر و دامنه رویینگی بیشتری را نسبت به فلزجوش نشان داد. با وجود این، وجود حلقه هیسترزیس بزرگتر برای فلزپایه، نشان از حساسیت بیشتر این فلز به خوردگی حفره‌ای نسبت به فلزجوش بود.

- در آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی، نتایج آزمون امپدانس الکتروشیمیایی برای هر دو نمونه مورد ارزیابی قرار گرفت. نمودار نایکوییست فلزپایه و فلزجوش یک تک حلقه را نشان داد که نشانه وجود رفتار خازنی هر دو فلز است. قطر حلقه نایکوییست بزرگتر فلزپایه نسبت به فلزجوش نشان‌دهنده رفتار بهتر خوردگی یکنواخت فلزپایه نسبت به فلزجوش بود.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از همکاری و راهنمایی‌های جناب آقای مهندس مجید شیرویه کمال تشکر را داریم. همچنین از مسئولین محترم دانشکده مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه صنعتی اصفهان که در پیشبرد اهداف این پروژه همکاری نمودند قدردانی می‌نماییم.

منابع

1-ASM Handbook: Vol. 5, Surface Engineering - American Society for Metals.; ASM International.; Handbook Committee Google Booksn.d. https://books.google.com/books/about/ASM_Handbook_Vol_5_Surface_Engineering.html?id=oihCtAEACAAJ (accessed March 17, 2020)

2-B. Silwal, J. Walker, D. West., "Hot-wire GTAW cladding: inconel 625 on 347 stainless Steel", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 12: p. 1-10.

3-H.Abed, et al., "Characterization of Fe49Cr18Mo7B16C4Nb6 high-entropy hardfacing layers produced by gas tungsten arc welding (GTAW) process", Surface and Coatings Technology, 2018, 352: p. 360-369.

4- Liu, A., Guo, M., Ma, Y., Hu, H., "Improved Erosion Resistance of Austenitic Stainless Steel in Corrosive Environment with Gas Tungsten Arc Melt Injection", Journal of Materials Engineering and Performance, 2013, 226: p. 1655-1659.

5- www.metalsusa.com

6- Goran Vukelic,.et al., " Analysis of prolonged marine exposure on properties of AH36 steel" Journal of Engineering Failure Analysis, 2022, 135: p. 106132.

7- FAN Yi. et al., "Corrosion Behavior of Hot-rolled AH36 Plate in Indoor Storage Environment" Journal of Journal of Chinese Society for Corrosion and protection, 2020, 40: p. 10-16.

8-K. Vijaya Kumar et all., "influence of oxide fluxes and duplex fluxes on microstructural, mechanical properties and weld morphology of a TIG AH-36 steel weldments" Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR), 2021, 8:9.

9-Pavaret Preedawiphat et all, " Mechanical Investigations of ASTM A36 Welded Steels with Stainless Steel Cladding" journal on coatings and surface engineering published by MDPI,2020, 10: 844.

10-Dewin Purnama et all., "Microstructure and Mechanical Properties of Ah-36 Steel Weldment Welded using Magnesium Modified E6013 Electrode" International Journal of Technology, 2020, 11: p. 48-59.

11-M.Shamanian, A. Ashrafi, "Welding Metallurgy_Sindo Kou", Isfahan university of technology, Publishing center of isfahan university of technology, 2014.

12-K. Vijaya Kumar,. Et al., "Analysis ofMechanical,Microstructural Properties and WeldMorphology ofA-TIG WeldedAH-36Marine-Grade Steels with Oxide and Duplex Flux Coating" International Journal of Automotive and Mechanical Engineering (IJAME), 2021, 18, ISSUE 3, 9101-9112.

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.10]

13-S. Varmaziar,. Et al., "Effect of fillermetal on microstructure and corrosion behavior of welded AISI316L using GTAW process" Journal of Welding Science and Technology of Iran, 2020, 8: 1.
14-M. Ahl Sarmadi , M. Shamanian., et al,. "Investigation of Corrosion Behavior and Galvanic Corrosion Simulation of Super Duplex Stainless Steel UNS S32750 Weld Zone" Journal of Welding Science and Technology of Iran, 2017, 1: p. 113-126.
15-Xin Li., et al., "Study on Galvanic Corrosion Behavior of AH36 Steel and TC4 Alloy Processed by Plasma Electrolytic Oxidation", Journal of Materials Engineering and Performance, 2024, 6: p. 1-16.

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.10]