



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

H.Abedi Chermahini<sup>1</sup>, M. Atapoor<sup>1\*</sup>, M. Esmailzadeh<sup>2</sup>

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 candidate 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](mailto:m.atapour@cc.iut.ac.ir)



## بررسی ریزساختار و رفتار خوردگی فولاد کم آلیاژ (AH36) روکش کاری شده به روش جوشکاری قوسی تنگستن (GTAW) با سیم جوش از جنس نیکل و مس

حسین عابدی چرمهینی<sup>1</sup>، مسعود عطاپور<sup>1\*</sup>، مجتبی اسماعیل زاده<sup>2</sup>

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

2- دانشگاه خلیج فارس، 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 روکش کاری سطح مرسوم است. پوشش‌دهی به روش جوشکاری (روکش کاری) یکی از روش‌های 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 به منظور بهبود خواص خوردگی این فولاد، فرایند روکش کاری به روش جوشکاری قوسی تنگستن با گاز محافظ با استفاده از سیم جوش از جنس مس/نیکل انجام شد. سپس دو نمونه از قسمت‌های با و بدون روکش تحت عنوان فلز پایه و فلز جوش تهیه شده و مورد بررسی‌های ریزساختاری و خوردگی قرار گرفت. نتایج حاصل حاکی از افزایش اندازه دانه در منطقه متأثر از حرارت نمونه فلز جوش و به دنبال آن کاهش خواص مکانیکی بود. آزمون پلاریزاسیون سیکنی نشان داد که فلز پایه حساسیت بالاتری به خوردگی حفره‌ای نسبت به فلز جوش دارد. همچنین، فلز جوش تمایل بالاتری برای ترمیم مجدد حفرات از خود نشان داد. نتایج آزمون امپدانس الکتروشیمیایی الکتروشیمیایی نشان داد که نمونه فلز پایه و فلز جوش مدار معادل تک حلقه‌ای دارند. قطر حلقه نایکویبست بزرگتر فلز پایه نسبت به فلز جوش نشان‌دهنده رفتار بهتر خوردگی یکنواخت فلز پایه نسبت به فلز جوش بود.

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

\* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: مسعود عطاپور، [m.atapour@cc.iut.ac.ir](mailto:m.atapour@cc.iut.ac.ir)

### 1- مقدمه

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

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

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، سکوه‌های 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

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 رسوب‌گذاری 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 الکتروود و در دیگری از پودر پوشش موردنظر استفاده می‌شود. در روش اول پوشش موردنظر با ذوب الکتروود 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 الکتروود 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

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 بر روی 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 الکتروده مس/نیکل پرداخته شده است.

## 2- مواد و روش تحقیق

در این مطالعه به بررسی ریزساختار و رفتار خوردگی فولاد کشتی روکش‌کاری شده با استفاده از الکتروده جوشکاری مس/نیکل به روش جوشکاری قوسی تنگستن با گاز محافظ پرداخته شده است. برای این منظور ابتدا قطعه‌ها در ابعاد 5x5 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 الکتروده 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

قرمز برتری دارد. پوسته سیاه پس از 119 روز قرارگیری در معرض محیط ذخیره‌سازی با رطوبت نسبی 72% 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 تأثیر 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  $\text{TiO}_2$  50% +  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  50%,  $\text{SiO}_2$  50% +  $\text{ZnO}$  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 زنگ‌زن 309 از طریق فرایند جوشکاری الکتروده پوشش‌دار (SMAW) مورد بررسی قرار گرفت. مطابق با گزارشات نویسنندگان، 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 خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی فولاد A36 روکش‌کاری شده را افزایش می‌دهد و آن را برای کاربردهای محیط‌های سخت مناسب می‌سازد [9].

محققین در تحقیق دیگر، تأثیر مقدار منیزیم در الکترودهای E6013 بر روی خواص میکروساختاری و مکانیکی فولاد AH-36 روکش‌کاری شده توسط الکتروده نامبرده را بررسی کردند. این مطالعه نشان داد که افزایش مقدار منیزیم در الکتروده 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

پایداری رسید. پس از آن آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) از فرکانس 10 میلی هرتز تا 100 کیلوهرتز انجام شد. در ادامه آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در نرخ روبش یک میلی ولت بر ثانیه انجام شد.

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- ریزساختار

ریزساختار مربوطه به فلز پایه و فلز جوش 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 فلز جوش 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 نهایتاً 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 فلز پایه 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 در حال افزایش است.

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.

جدول 1- 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

جدول 2- پارامترهای مربوط به دستگاه جوشکاری قوس تنگستن با گاز محافظ.

آرگون	گاز محافظ
۷ (لیتر بر دقیقه)	نرخ دمش گاز
DCEN	نوع جریان
۲۵ ولت	ولتاژ
۱۱۰ آمپر	آمپر
ERCuNi70/30	نوع سیم جوش
۲.۴ میلیمتر	قطر سیم جوش
EWTh-2/WT20	نوع الکتروود تنگستن

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 الکتروود کار، الکتروود Ag/AgCl به‌عنوان الکتروود مرجع و الکتروود پلاتین به‌عنوان الکتروود 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 مدار باز 154- میلی‌ولت به



شکل 1- ریزساختار فلزپایه و فلزجوش با بزرگنمایی‌های متفاوت الف- فلزجوش، ب- فصل مشترک فلزپایه و فلزجوش، ج- فلزپایه

جدول 3- ترکیب شیمیایی الکتروود جوش مورد استفاده در روکش کاری.

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

این فاز با شکل ریز و سبب 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 -0/2 تا +0/1) تقریباً مقدار کم و ثابتی را ارایه کرده است. در مقایسه، دامنه پتانسیلی ناحیه رویین فلز روکش کاری شده کاهش داشته و در دامنه 0/15- تا نزدیک به پتانسیل 0/05- امتداد داشته است.

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].

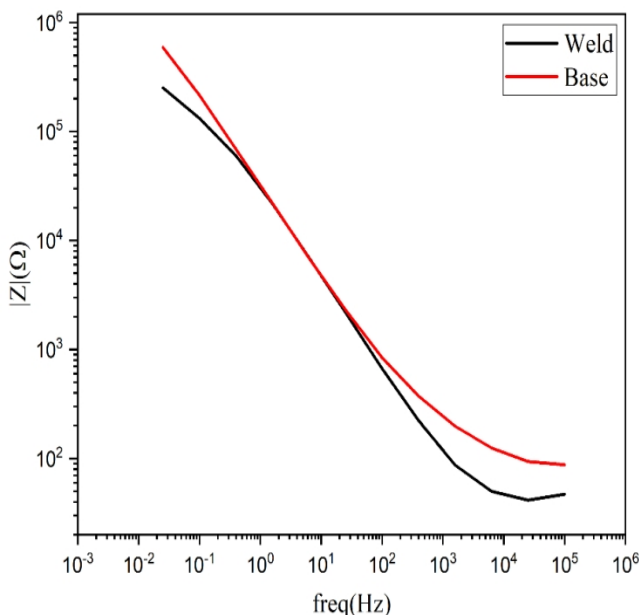
همانطور که در تصاویر مربوط به ریزساختار مشاهده می‌شود فاز مربوط به فلزپایه تماماً آستنیتی بوده و ریزساختار در نواحی بالاتر حاوی ترکیبی از فازهای فریت و پرلیت است.

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 سبب بافته شده و ریز و به شکل دندریت‌های هم محور قابل شهود است.

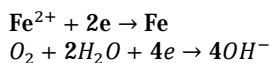
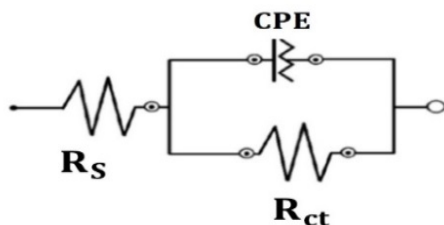
حفرات یک نمونه به هم نزدیک تر باشد، نشان از رفتار بهتر خوردگی موضعی دارد که این مطلب در مورد فلزجوش از روی نمودار تفاوت قابل توجهی دارد [13 و 14].

### 3-3-آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی

نمودار نایکوئیست بدست آمده از آزمون امپدانس در شکل (3) برای هر دو فلز پایه و جوش نمایش داده شده است. مدار معادل حاصل یک مدار تک حلقه دارای اجزا مقاومت محلول ( $R_s$ )، مقاومت نمونه ( $R_{ct}$ ) و المان فاز ثابت مربوط به نمونه (CPE) می باشد 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.

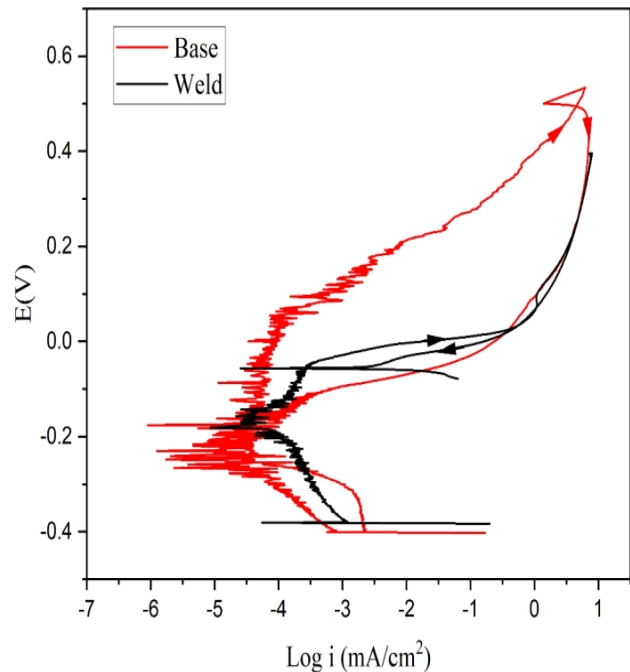


شکل 3- نمودار نایکوئیست مربوطه به فلز پایه و فلزجوش در محلول 3/5% NaCl.



شکل 4- مدار معادل استفاده شده برای تطابق نمودارهای

آزمون امپدانس الکتروشیمیایی.



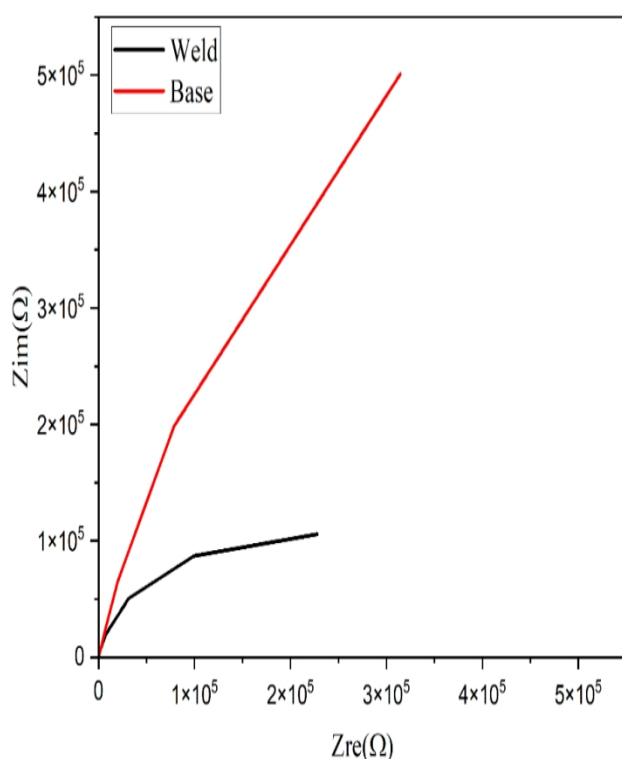
شکل 2- نمودار پلاریزاسیون مربوط به فلزجوش (رنگ مشکی) و فلز پایه (رنگ قرمز) در محلول 3/5% NaCl.

به این صورت که در ناحیه اول نرخ انحلال آهن نمی تواند بیشتر از نرخ نفوذ این کاتیون ها به داخل محلول باشد لذا در دانسیته جریان حدی معادل 0/75 میلی آمپر بر سانتی متر مربع، پلاریزاسیون غلظتی برای شاخه آندی رخ می دهد. همچنین وجود نویزهای کمتر در منحنی فلزجوش نشان دهنده سطح صاف تر 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 هیستریزس مثبت هستند. اما منحنی مربوط به فلز پایه حلقه هیستریزس بزرگتری نسبت به منحنی فلزجوش دارد که می توان گفت مقاومت به رشد حفره کمتری نسبت به فلزجوش دارد.

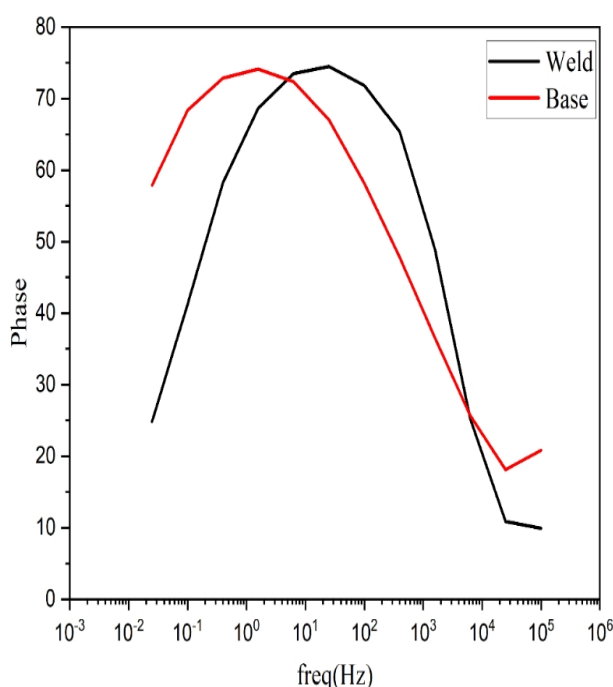
حلقه هیستریزس فلزجوش به میزان قابل توجهی کوچک تر از فلز پایه است که از این مشاهده مقاومت به رشد حفره ای بهتر آن استنتاج می شود. همچنین پتانسیل ترمیم حفرات برای هر دو فلز پایه و جوش به ترتیب برابر 1/7- و 0/5- ولت است که بیانگر اینست که فلزجوش قابلیت بیشتری برای ترمیم حفرات در صورت شکل گیری حفرات پایدار دارد.

در حالت کلی هرچه مقادیر پتانسیل مدار باز و پتانسیل ترمیم

رفتار خوردگی یکنواخت و نسبتاً مناسب فلزها در محیط سدیم کلرید است [15].



شکل 5- نمودار باد مربوطه به فلز پایه و فلز جوش در محلول 3/5% NaCl.



شکل 6- نمودار باد-فاز مربوط به فلز پایه و فلز جوش در محلول 3/5% NaCl.

جدول 4- نتیجه طیف امپدانس الکتروشیمیایی برای خوردگی فلز پایه و فلز جوش.

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

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

این نتایج در تحلیل های 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 نمی شوند. ملاحظه می شود که میزان مقاومت انتقال بار که از قطر دایره نمودار نایکوئیست بدست می آید، برای فلز پایه بیشتر از فلز جوش است. می توان نتیجه گرفت که این فلز مقاومت بیشتری در برابر انتقال بار نسبت به فلز جوش دارد.

در مدل های ارائه شده به دلیل اختلاف از حالت ایده آل دی الکتریک، به واسطه ناهمگونی های سطحی، از پارامتر المان فاز ثابت (CPE) برای محاسبه ظرفیت خازنی استفاده شده است که مطابق با رابطه  $Z_c = \frac{1}{j(\omega)^n}$  تعیین می شود. همان طور که از جدول (1) استنتاج می شود، مقدار n در این رابطه برای فلز پایه و جوش به ترتیب برابر 0/78 و 0/80 بدست آمده است که نشان دهنده این است که رفتار هر دو فلز تا حدودی از رفتار خازن ایده آل فاصله دارد.

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

شکل (6) نمودار باد-فاز حاصل از آزمون امپدانس را نشان می دهد. حضور تنها یک پیک در این نمودار بیانگر تک حلقه بودن مدار و فاقد پوشش بودن هر دو نمونه است. خوشبختانه این نتایج در تطابق با بخش های قبل است. همچنین پهنای قابل توجه این پیک در زوایای بالاتر (حدود 75 درجه) نشان دهنده



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](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](http://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 al., "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 of Mechanical, Microstructural Properties and Weld Morphology of A-TIG Welded AH-36 Marine-Grade Steels with Oxide and Duplex Flux Coating" International Journal of Automotive and Mechanical Engineering (IJAME), 2021, 18, ISSUE 3, 9101-9112.

#### 4- نتیجه گیری

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 متأثر 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 فلز پایه، 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 فلز پایه و فلزجوش ناحیه رویین کوچکی ارائه داده ولی رفتار خوردگی موضعی کاملاً متفاوتی دارند. فلز پایه نرخ خوردگی کمتر و دامنه رویینگی بیشتری را نسبت به فلزجوش نشان داد. با وجود این، وجود حلقه هیستریزس بزرگتر برای فلز پایه، 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 نایکویست فلز پایه و فلزجوش یک تک حلقه را نشان داد که نشانه وجود رفتار خازنی هر دو فلز است. قطر حلقه نایکویست بزرگتر فلز پایه نسبت به فلزجوش نشان‌دهنده رفتار بهتر خوردگی یکنواخت فلز پایه 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

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.

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