



Effect of Inconel 625 Coating on the Mechanical and Chemical Properties of API 5LX52 Steel Pipes

Faezeh Nazari¹, Ali Shahrjerdi^{2*} 

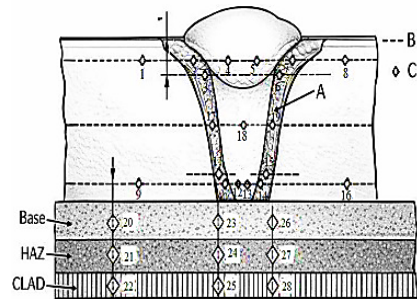
¹ Assistant Professor, Faculty of Engineering, Malayer University, Malayer, Iran. (*Correspondence: shahrjerdi@malayeru.ac.ir)

² Master Student, Malayer University, Malayer, Iran. Email:nazarifaezehh@gmail.com

HIGHLIGHTS

- Cladding process
- Improved corrosion resistance
- Stable chemical composition

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 13 February 2026

Received in revised form: 01 May 2026

Accepted: 13 May 2026

Available online: 22 May 2026

*Correspondence:
shahrjerdi@malayeru.ac.ir

Keywords:

Steel Pipe

Inconel 625

Mechanical Properties

Corrosion Behavior

Cladding

ABSTRACT

Seamless API 5L X52 steel pipes are widely used in oil and gas transmission systems, but under harsh operating conditions including corrosive and abrasive environments, they have relatively limited corrosion and wear resistance, which can lead to reduced service life and increased maintenance costs. In this study, with an industrial-oriented approach and with the aim of simultaneously improving mechanical properties and corrosion behavior, a coating of nickel-based alloy Inconel 625 was applied to the surface of API 5L X52 steel pipes by metal cladding method. As a common industrial welding process, this method has the practical implementation capability on an industrial scale. After the coating operation, the chemical composition of the coating was determined by emission spectrometry and the mechanical properties including hardness, tensile, bending and impact were evaluated at a temperature of -30 °C. Also, the corrosion behavior was investigated by performing pitting corrosion tests and susceptibility to intergranular corrosion by immersing the samples in a boiling solution containing 25 g of ferric sulfate and 236 ml of sulfuric acid for 120 hours. The results showed that the Inconel 625 coating had a stable and uniform chemical composition at different surface and thicknesses and resulted in a 51% increase in the hardness of the steel substrate. Also, the corrosion rates were 0.000193 g/cm² and 1.278 (mm/year) in the pitting and intergranular corrosion tests, respectively, indicating a significant improvement in corrosion resistance along with an increase in mechanical properties of API 5L X52 steel after applying the Inconel 625 coating.

Cite this article: Shahrjerdi A[©], Nazari F. Effect of Inconel 625 Coating on the Mechanical and Chemical Properties of API 5LX52 Steel Pipes. Journal of Aerospace Mechanics. 2025; 22 (1): 73-84.

DOI: <https://doi.org/10.47176/MAJ.2025.1545>

© Author(s) retain the copyright and full publishing rights

Publisher: Imam Hossein Comprehensive University.



1. Introduction

Corrosion is a natural and destructive phenomenon that occurs due to the tendency of materials to reach their lowest free energy state through reactions with the surrounding environment. This phenomenon leads to gradual degradation, loss of surface appearance, reduction in weight and gloss, and ultimately a decline in performance during service. Contrary to common belief, non-metallic materials are also susceptible to corrosion; therefore, corrosion engineering must develop strategies for a wide range of materials. The rate and severity of corrosion depend on the material and environmental conditions. In the oil, gas, and petrochemical industries, corrosion and wear are among the most critical damage mechanisms affecting equipment and facilities. This is particularly significant in pipelines transporting corrosive fluids such as carbon dioxide (CO_2) and hydrogen sulfide (H_2S). Additionally, at metal-to-metal contact points, wear is a primary cause of component degradation. Designing equipment for long-term service life (approximately 30 years in offshore industries) requires materials with high resistance to corrosion and wear. Moreover, phenomena such as fatigue cracking are directly related to surface wear, as these cracks often originate from microscopic grooves formed by repeated contact.

Despite the excellent performance of corrosion-resistant metals such as chromium- and nickel-based alloys, their application is limited due to high cost and welding difficulties. Low-carbon steels like API 5L X52 are widely used in pipelines because of their reasonable cost and acceptable mechanical properties, but they exhibit low resistance to corrosion and wear. Coating these steels with nickel-based alloys such as Inconel 625 can significantly enhance corrosion, wear, and oxidation resistance. Various surface coating techniques, including weld cladding, thermal spraying, laser cladding, and plasma transferred arc (PTA), provide uniform, well-adhered layers with reduced cracking and porosity. Previous studies have shown that Inconel 625 improves the mechanical and corrosion performance of components and pipelines under industrial conditions. Furthermore, the microstructure resulting from heat treatment has a direct influence on both the mechanical properties and corrosion behavior of the steel.

In the present study, cladding was performed using the widely available GTAW method in accordance with ASME Section VIII and Section IX standards on real pipes used in oil and gas transmission lines. Unlike many previous studies that mainly focused on laboratory specimens or advanced and costly methods such as laser cladding or plasma transferred arc, this research demonstrates the possibility of simultaneously improving mechanical properties and corrosion resistance using a conventional industrial method. Furthermore, conducting a series of mechanical tests (tensile, bending, and low-temperature impact) and standard corrosion tests provides a practical and generalizable insight into the performance of Inconel 625 coatings under industrial service conditions.

2. Methodology

In this study, to investigate the performance of the corrosion-resistant alloy Inconel 625 as an internal coating for steel pipes, a pipe made of API 5L X52 steel with an outer diameter of 168 mm, a wall thickness of 22.5 mm, and a length of 150 mm was initially prepared. After the preliminary preparation, the inner surface of the pipe was carefully degreased and cleaned using alcohol and acetone to ensure proper conditions for the coating process.

The coating was applied using orbital multi-pass tungsten inert gas (TIG) welding. For this purpose, an AWS ER-NiCrMo-3 electrode wire with a diameter of 2 mm was used, and the process continued until an approximate coating thickness of 15 mm was achieved. To evaluate the quality of the applied coating, coated samples were prepared for microstructural analysis, Microhardness testing, and corrosion behavior assessment under laboratory conditions.

The chemical compositions of the steel pipe and Inconel 625 alloy are presented in Table 1. Due to its nickel-chromium-based structure, Inconel 625 exhibits excellent mechanical properties and corrosion resistance. This alloy demonstrates high stability in corrosive environments and at elevated temperatures, forming a stable and passive oxide layer on its surface that prevents the penetration of corrosive agents into the substrate. Therefore, it is widely and effectively used for internal coatings of pipelines transporting corrosive fluids in the oil and gas industry. Table 2 presents the welding parameters used for applying the Inconel 625 internal coating on the steel pipe, including voltage, current, travel speed, preheating, and inter-pass temperatures, which are essential to ensure repeatability and accuracy of the experiments.

3. Evaluation of Properties

The microstructure and porosity of the Inconel 625-cladded API 5L X52 steel samples were evaluated using optical emission spectrometry. Samples were first ground, polished, and thoroughly cleaned to ensure a smooth, uniform, and contaminant-free surface. Spark spectroscopy was performed on the prepared areas to determine the elemental composition, with emission intensity directly correlated to the concentration of each element using standard calibration curves. Quantitative spectrometry confirmed that the Inconel 625 coating fully met the required chemical specifications.

Mechanical testing was carried out on samples prepared according to ASTM and ASME standards. Tensile specimens had a width, thickness, and cross-section of 18/19 mm, 12/66 mm, and 242/82 mm², respectively, while bending tests were conducted on samples 22.5 mm wide and 10.6 mm thick using a 40 mm mandrel and 180° rotations. Impact tests were performed according to ASTM E23 at -30°C on specimens 10×55 mm with a 2 mm V-notch. Vickers Microhardness measurements were carried out at 28 points along the coating-substrate interface

using a 10 kg load for 10–15 seconds, revealing significant hardness improvements. Results indicated that the deposited coating was dense, uniform, and of adequate thickness. Minimal porosity was observed, attributed to uniform powder particle distribution and controlled heat input during welding. The coating's hardness was influenced by porosity, particle morphology, degree of melting, grain size, and orientation.

Corrosion resistance was assessed through pitting and intergranular corrosion tests. Pitting tests were conducted per ASTM G48-11 by immersing samples in ferric chloride solution at 22°C for 72 hours. Intergranular corrosion susceptibility was evaluated by immersing samples in a boiling solution of 25 g ferric sulfate and 236 ml sulfuric acid for 120 hours. Cylindrical samples machined from coated pipes using EDM were used for tensile tests, while rectangular billets containing up to 50% substrate and 50% coating were used for compressive tests. Fracture tests were performed per ASTM E1820-01, with specimens machined to dimensions of 150×12.5×30 mm. Holes were introduced in fracture specimens near the coating-substrate interface to facilitate crack initiation and propagation. The coated layer exhibited excellent bonding with the substrate, uniform microstructure, low porosity, and enhanced mechanical and corrosion-resistant properties. These results demonstrate the effectiveness of Inconel 625 internal cladding in improving surface hardness, mechanical performance, and durability of API 5L X52 steel pipes under severe service conditions

4. Results

4.1. Chemical Composition

The chemical composition of the Inconel 625 coating on the surface and 1 mm below the surface of the clad sample is presented in Tables 2 and 3. The minimal differences in elemental weight percentages between the surface and subsurface confirm the uniformity and homogeneity of the coating. A consistent chemical composition ensures uniform mechanical and corrosion properties across the coating thickness.

4.2. Mechanical Properties:

The Microhardness measurements in Table 4 show that the base metal, HAZ, and Inconel 625 coating exhibit average hardness values of HV 154, HV 167, and HV 232, respectively, indicating a 51% increase in base metal hardness due to the coating. Elemental diffusion during welding, particularly Nb and Mo, contributes to hardness enhancement in the HAZ. Finer grain sizes on the coating surface increase hardness through higher grain boundary density. Hardness uniformity across the weld pool (HV 235–245) further confirms consistent chemical composition and mechanical properties.

Tensile tests (Table 5) show that the yield and ultimate tensile strengths increased from 311 MPa to 381 MPa and 396 MPa to 487 MPa, respectively, corresponding to 22.5% and 22.9% improvements due to Inconel 625 cladding. Bending tests (Table 6) revealed no delamination or cracks, indicating excellent coating adhesion. Impact tests at -30°C (Table 7) showed an average absorbed energy of 109 J, reflecting good toughness and ductility. Fracture surfaces exhibited both shear and flat fracture modes, confirming energy absorption during failure and overall material toughness.

4.3. Corrosion Behavior:

Pitting and intergranular corrosion tests (Table 8) showed low weight loss values of 0.000193 g/cm² and a corrosion rate of 1.278 mm/year, respectively. Optical microscopy (Figure 6) confirmed the coating's resistance to corrosion. Improved corrosion resistance in conjunction with enhanced mechanical properties makes Inconel 625-clad API 5L X52 steel suitable for oil and gas pipeline applications.

5. Conclusions

In this study, Inconel 625 was applied via metallic cladding to API 5L X52 steel pipes to enhance mechanical and corrosion resistance properties. Key findings include:

- 1- Uniform chemical composition throughout the coating thickness and a 51% increase in base metal hardness due to Inconel 625.
- 2- Improved tensile properties, with yield and ultimate strengths increasing by 22.5% and 22.9%, respectively, along with enhanced impact resistance and coating adhesion.
- 3- Significant improvement in corrosion resistance, with pitting and intergranular corrosion rates of 0.000193 g/cm² and 1.278 mm/year, respectively, demonstrating suitability for harsh oil and gas environments.
- 4- The welding process produced a strong metallurgical bond between the coating and substrate, ensuring durability, reduced defects, and combined mechanical and corrosion performance.

These results confirm that Inconel 625 cladding provides a practical and effective solution for enhancing the operational performance of steel pipelines under severe service conditions.

***Data Availability Statement

All data generated or analyzed during this study are included in this published article. The datasets supporting the findings of this study are therefore fully available within the paper, including all tables, figures, and supplementary information. No additional raw data or materials were generated outside of the experimental and analytical results reported here.



تأثیر پوشش اینکونل ۶۲۵ بر بهبود خواص مکانیکی و شیمیایی لوله‌های فولادی API 5LX52

فائزه نظری^۱، علی شهرجردی^{۲*} 

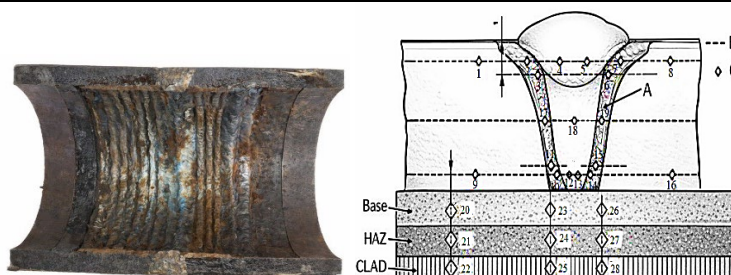
^۱ دانشجویار، دانشکده مهندسی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. (نویسنده مسئول: shahrjerd@malayeru.ac.ir)

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. nazarifaezehh@gmail.com

برجسته‌ها

- فرایند روکش‌دهی فلزی
- بهبود مقاومت به خوردگی
- ترکیب شیمیایی پایدار

چکیده گرافیکی



مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۲۴ بهمن ۱۴۰۴

بازنگری: ۱۱ اردیبهشت ۱۴۰۵

پذیرش: ۲۳ اردیبهشت ۱۴۰۵

ارائه آنلاین: ۰۱ خرداد ۱۴۰۵

*نویسنده مسئول:

shahrjerd@malayeru.ac.ir

کلید واژه‌ها:

لوله فولادی

اینکونل ۶۲۵

خواص مکانیکی

رفتار خوردگی

روکش فلزی

چکیده

لوله‌های بدون درز فولادی API 5L X52 به طور گسترده در سامانه‌های انتقال نفت و گاز مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما در شرایط عملیاتی سخت شامل محیط‌های خورنده و سایش‌زا، از مقاومت به خوردگی و سایش نسبتاً محدودی برخوردارند که می‌تواند منجر به کاهش طول عمر کاری و افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری شود. در این پژوهش، با رویکردی صنعتی محور و باهدف بهبود هم‌زمان خواص مکانیکی و رفتار خوردگی، پوشش آلیاژ پایه نیکل اینکونل ۶۲۵ به روش روکش فلزی سطح لوله‌های فولادی API 5L X52 اعمال گردید. این روش به‌عنوان یک فرایند جوشکاری متداول صنعتی، قابلیت پیاده‌سازی عملی در مقیاس صنعتی را دارا است. پس از انجام عملیات پوشش‌دهی، ترکیب شیمیایی پوشش با روش اسپکترومتری نشری تعیین گردید و خواص مکانیکی شامل سختی، کشش، خمش و ضربه در دمای 30°C مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین، رفتار خوردگی با انجام آزمون‌های خوردگی حفره-ای و حساسیت به خوردگی مرزانه‌ای از طریق غوطه‌وری نمونه‌ها در محلول جوشان حاوی 25 g فریک سولفات و 236 ml اسیدسولفوریک به مدت 120 ساعت بررسی شد. نتایج نشان داد که پوشش اینکونل ۶۲۵ دارای ترکیب شیمیایی پایدار و یکنواخت در سطح و ضخامت‌های مختلف است و منجر به افزایش 51% درصدی سختی زیرلایه فولاد گردید. همچنین، نرخ خوردگی به ترتیب برابر با g/cm^2 و 0.00193 و $1/278$ (mm/year) در آزمون‌های خوردگی حفره‌ای و مرزانه‌ای به دست آمد که حاکی از بهبود قابل توجه مقاومت به خوردگی در کنار افزایش خواص مکانیکی فولاد API 5L X52 پس از اعمال پوشش اینکونل ۶۲۵ است.

استناد: شهرجردی، علی^۱، نظری، فائزه^۲، تأثیر پوشش اینکونل ۶۲۵ بر بهبود خواص مکانیکی و شیمیایی لوله‌های فولادی API 5LX52، مکانیک هوا فضا، (۱۴۰۵)؛ ۲۲ (۱): ۷۳-۸۴.

<https://doi.org/10.47176/MAJ.2025.1545>

 نویسنده(گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می‌دارند.



ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع).

OPEN ACCESS

۱- مقدمه

خوردگی یک پدیده طبیعی و مخرب است که در پی تمایل مواد به رسیدن به پایین‌ترین سطح انرژی آزاد خود، در اثر واکنش با محیط اطراف به وقوع می‌پیوندد. این پدیده منجر به تخریب تدریجی ماده، از بین رفتن شکل ظاهری، کاهش وزن و براقیت، و در نهایت افت کارایی آن در زمان بهره‌برداری می‌شود. برخلاف برخی دیدگاه‌ها که خوردگی را مختص فلزات می‌دانند، امروزه مشخص شده است که مواد غیرفلزی نیز در معرض خوردگی قرار می‌گیرند، بنابراین مهندسی خوردگی باید برای طیف وسیعی از مواد طراحی و راهکار ارائه کند. میزان و شدت خوردگی به ماهیت ماده و شرایط محیطی بستگی دارد. در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی، خوردگی و سایش از مهم‌ترین عوامل آسیب‌زا به تجهیزات و تأسیسات هستند. این موضوع به‌ویژه در لوله‌هایی که حامل سیالات خورنده‌ای مانند دی‌اکسید کربن (CO_2) و سولفید هیدروژن (H_2S) هستند، اهمیت بیش‌تری پیدا می‌کند [۱]. همچنین در نقاط تماس فلز با فلز، سایش به‌عنوان عامل اصلی تخریب قطعات مطرح است [۲]. در چنین محیط‌هایی، طراحی تجهیزات برای دستیابی به عمر سرویس‌دهی طولانی‌مدت (حدود ۳۰ سال در صنایع دریایی) مستلزم استفاده از مواد مقاوم در برابر خوردگی و سایش است. از سوی دیگر، پدیده‌هایی نظیر ترک خوردگی خستگی نیز ارتباط مستقیمی با سایش سطحی دارند. این ترک‌ها اغلب از شیارهای میکروسکوپی ایجادشده در اثر تماس‌های تکراری نشئت می‌گیرند [۳، ۴]. باوجود عملکرد مطلوب فلزات مقاوم به خوردگی نظیر آلیاژهای حاوی کروم و نیکل، استفاده از آن‌ها به دلیل قیمت بالا و دشواری در فرایندهای جوشکاری محدودیت‌هایی ایجاد می‌کند. در نتیجه، استفاده از فولادهای کم‌کربن مانند فولاد API 5LX52 به دلیل قیمت مناسب و خواص مکانیکی قابل قبول، در ساخت لوله‌ها و خطوط انتقال رواج زیادی یافته است. با این حال، این فولادها دارای مقاومت ضعیفی در برابر خوردگی و سایش هستند. آلیاژهای پایه نیکل مانند اینکونل ۶۲۵ که از ترکیب عناصر نیکل، کروم، مولیبدن و نیوبیوم تشکیل شده‌اند، در دماهای بالا عملکرد بسیار مطلوبی از خود نشان می‌دهند. از مهم‌ترین ویژگی‌های آن‌ها می‌توان به مقاومت اکسیداسیون، پایداری فازی و مقاومت خزشی اشاره کرد. به همین دلیل، پوشش‌دهی فولادهای معمولی نظیر API 5LX52 با اینکونل ۶۲۵ می‌تواند به طور چشمگیری مقاومت به خوردگی، سایش و اکسیداسیون سطح را بهبود دهد [۵]. همچنین، استفاده از فرایندهای پوشش‌دهی فلزی نظیر جوشکاری پوششی، پاشش حرارتی، جوشکاری قوسی یا لیزری، به‌عنوان راهکاری مؤثر جهت اعمال پوشش‌های مقاوم به سطح قطعات و لوله‌ها شناخته شده است. جوشکاری پوششی به‌عنوان یکی از متداول‌ترین روش‌ها، از طریق قراردادن لایه‌های متعدد فلز پرکننده بر سطح داخلی یا خارجی لوله، موجب ایجاد یک لایه

محافظ مقاوم می‌شود [۶]. این روش نه تنها باعث افزایش استحکام و سختی سطح بدون نیاز به عملیات حرارتی می‌گردد، بلکه مقاومت در برابر خوردگی موضعی، تنشی و کلریدی را نیز به طور چشمگیری افزایش می‌دهد [۷]. در نهایت، پوشش‌دهی سطح داخلی لوله‌های فولادی API 5LX52 با آلیاژهایی مانند اینکونل ۶۲۵ راهکاری مؤثر در بهبود خواص عملکردی لوله‌ها در شرایط کاری شدید محسوب می‌شود. این رویکرد نه تنها موجب افزایش طول عمر تجهیزات و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری می‌شود، بلکه ایمنی و پایداری عملکرد سیستم‌های انتقال نفت و گاز را نیز تضمین می‌کند. از نظر روش‌های اعمال پوشش، روش‌هایی مانند جوشکاری پالس [۸]، لیزر روکش فلزی [۹] و پلاسما ترانسفر آرک [۱۰] به‌عنوان روش‌های مؤثر جهت اعمال پوشش اینکونل ۶۲۵ بر سطح لوله‌های فولادی معرفی شده‌اند. این روش‌ها علاوه بر چسبندگی مناسب، منجر به کاهش ترک و تخلخل در لایه پوشش شده‌اند. استوان [۱۱]، ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد A283 رویه‌کاری شده توسط اینکونل ۶۲۵ و فولاد ۳۴۷ به روش GTAW بررسی کردند. دانشمند و همکارانش [۱۲]، در مطالعه‌ای تأثیر مقدار اینکونل ۶۲۵ بر روی خواص مکانیکی و تریبولوژیکی کامپوزیت‌های زمینه تفلون را بررسی کردند. در این مطالعه از پودر اتمیزه آلیاژ اینکونل ۶۲۵ به‌عنوان فاز تقویت‌کننده برای ساخت کامپوزیت زمینه تفلون استفاده شده است. تأثیر درصد وزنی تقویت‌کننده بر روی خواص مکانیکی و تریبولوژیکی کامپوزیت‌ها بررسی شده است. علاوه از روش شبیه‌سازی دینامیک مولکولی به‌منظور بررسی سایش کامپوزیت استفاده شد. افزودن اینکونل ۶۲۵ به طور قابل توجهی مقاومت سایش تفلون را بهبود بخشید.

افزایش مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون این لوله‌ها از طریق اعمال پوشش‌های سطحی به‌ویژه آلیاژهای نیکل پایه مانند اینکونل ۶۲۵ همواره مورد توجه محققان بوده است. رانگل و همکارانش [۱۳] در مطالعه‌ای نشان دادند که پوشش‌دهی داخلی لوله فولادی API 65 با آلیاژ اینکونل ۶۲۵ به روش GTAW، روشی مؤثر و مقرون به صرفه برای افزایش مقاومت به خوردگی در محیط‌های خورنده است. این پوشش نیکل پایه عملکرد مناسبی روی زیرلایه فولادی نشان داد. انگلبرت و همکارانش [۱۴]، در پژوهشی اثر نوع عملیات حرارتی بر خوردگی فولاد API 5LX52 در محیط حاوی CO_2 را بررسی کردند. آن‌ها نمونه‌هایی با دو نوع عملیات حرارتی بازپخت و آبدهی و بازپخت را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج نشان داد که اگرچه نمونه آبدیده و بازپخت شده مقاومت مکانیکی بیش‌تری دارد، اما نرخ خوردگی بالاتری نسبت به نمونه بازپخت شده دارد؛ بنابراین، نوع ریزساختار حاصل از عملیات حرارتی تأثیر مستقیم بر خواص خوردگی و مکانیکی دارد.

در این مطالعه، پوشش‌دهی به روش متداول و قابل دسترس GTAW مطابق با الزامات استانداردهای ASME Section VIII و

زنی قرار گرفت، به طوری که سطح آن کاملاً صاف و یکنواخت شده و از هرگونه آلودگی و چربی پاک گردید. سپس نمونه پرداخت شده از همان ناحیه آماده سازی شده، بر روی محل مورد نظر جهت ایجاد اسپارک قرار داده شد. اصول این آزمون بر پایه نشر نوری استوار است. در اثر تخلیه الکتریکی، ماده نمونه تبخیر شده و اتم ها و یون های حاصل تحریک می گردند و تابش نوری ایجاد می کنند. نور گسیل شده از طریق فیبر نوری وارد طیف سنج نوری شده و مورد تحلیل قرار می گیرد. باتوجه به محدوده طول موج نشر هر عنصر، مناسب ترین خط نشری برای اندازه گیری غلظت آن عنصر انتخاب می شود. شدت نشر هر عنصر متناسب با غلظت آن در نمونه بوده و با استفاده از نمونه های استاندارد و منحنی های کالیبراسیون، درصد عناصر موجود در نمونه به صورت مستقیم محاسبه می شود.



شکل ۱: جوشکاری پوششی اینکونل ۶۲۵ بر روی سطح داخلی لوله API 5L X52

جدول ۱: ترکیب شیمیایی اسمی فولاد API 5L X52 و اینکونل ۶۲۵

عناصر	API 5L X52	اینکونل ۶۲۵
C	۰/۲۴	۰/۰۱
Mn	۱/۴	۰/۰۶
Si	۰/۴۵	۰/۰۷
Cr	۰/۳	۲۱/۷۲
Ni	۰/۳	۶۰/۵۵
Mo	۰/۱۵	۸/۹
S	۰/۰۰۹	<۰/۰۰۱
Cu	۰/۰۵	---
Ti	۰/۰۴	۰/۲۸
Nb	۰/۰۵	۳/۴۷
Al	۰/۰۳۲	۰/۱۹
Fe	Balance	۴/۳۵

جدول ۲: پارامترهای جوشکاری لایه پوشش داخلی ۶۲۵

دما بین پاس ها °C	دما پیش گرم °C	سرعت پیشروی cm/min	جریان جوشکاری (A)	ولتاژ جوشکاری (V)
۲۵۰	۲۰	۵-۱۰	۱۳۰-۱۰۰	۱۸-۲۲

Section IX بر روی لوله واقعی مورد استفاده در خطوط انتقال نفت و گاز انجام شده است. برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین که عمدتاً بر نمونه های آزمایشگاهی یا روش های پیشرفته و پرهزینه ای نظیر لیزر کلدینگ یا پلاسما ترانسفر آرک متمرکز بوده اند، این پژوهش امکان دستیابی به بهبود هم زمان خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی را با استفاده از یک روش صنعتی رایج نشان می دهد. علاوه بر این، انجام مجموعه ای از آزمون های مکانیکی (کشش، خمش و ضربه در دمای پایین) و آزمون های خوردگی استاندارد، دیدی کاربردی و قابل تعمیم از عملکرد پوشش اینکونل ۶۲۵ در شرایط بهره برداری صنعتی ارائه می کند.

۲- روش تحقیق

در این پژوهش، به منظور بررسی عملکرد آلیاژ مقاوم به خوردگی اینکونل ۶۲۵ به عنوان پوشش داخلی لوله فولادی، ابتدا لوله ای از جنس API 5L X52 با قطر خارجی ۱۶۸ mm، ضخامت ۲۲/۵ mm و طول ۱۵۰ mm تهیه شد. پس از آماده سازی اولیه، سطح داخلی لوله با استفاده از الک و استون به دقت چربی زدایی و تمیز گردید تا شرایط لازم برای فرایند پوشش دهی فراهم شود. فرایند پوشش دهی با استفاده از جوشکاری قوسی تنگستن تحت گاز محافظ به صورت اوربیتالی و چند پاسه انجام گرفت. برای این منظور، از سیم الکترود AWS ER-NiCrMo-3 با قطر ۲ mm استفاده شد و فرایند تا دستیابی به ضخامت تقریبی ۱۵ mm در لایه پوششی ادامه یافت. به منظور ارزیابی کیفیت پوشش اعمال شده، نمونه های پوشش دار جهت بررسی های ریز ساختاری، میکروسختی، و رفتار خوردگی در شرایط آزمایشگاهی آماده شدند. ترکیب شیمیایی لوله فولادی و آلیاژ اینکونل ۶۲۵ در جدول (۱) ارائه شده است. آلیاژ اینکونل ۶۲۵ به دلیل ساختار پایه نیکل - کروم خود، از خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی بسیار بالایی برخوردار است. این آلیاژ در برابر محیط های خورنده و دماهای بالا پایداری مناسبی دارد و با تشکیل لایه اکسیدی پایدار و غیر فعال در سطح، از نفوذ عوامل خورنده به زیر لایه جلوگیری می کند. به همین دلیل، استفاده از آن برای پوشش داخلی لوله های انتقال سیالات خورنده در صنایع نفت و گاز بسیار رایج و مؤثر است. جدول (۲)، پارامترهای جوشکاری استفاده شده برای اعمال پوشش داخلی آلیاژ اینکونل ۶۲۵ بر روی لوله فولادی را نشان می دهد. این پارامترها شامل ولتاژ، جریان، سرعت پیشروی، دماهای پیش گرم و بین پاس ها که برای تضمین تکرار پذیری و صحت آزمایش ها ضروری هستند.

۳- ارزیابی خواص

بررسی میکروسکوپی نمونه پوشش داده شده و آزمون تخلخل - سنجی پوشش ها با استفاده از اسپکترومتری نشری انجام گرفت. بدین منظور، ابتدا سطح نمونه تحت عملیات آماده سازی و سنگ -

آهن و آزمون تعیین حساسیت به خوردگی مرزدانه‌ای اشاره کرد. جهت انجام آزمایش خوردگی حفره‌ای مطابق با استاندارد ASTM G48-11، نمونه در محلول فریک کلرید غوطه‌ور شده و به مدت ۷۲ ساعت در دمای 22°C قرار گرفته است. سپس کاهش وزن نمونه اندازه‌گیری شده و نمونه تحت بررسی خوردگی حفره‌ای قرار گرفته است. حساسیت به خوردگی مرزدانه‌ای نیز به‌وسیله غوطه‌وری نمونه در محلول جوشان حاوی 25 g فریک سولفات و 236 ml اسیدسولفوریک به مدت ۱۲۰ ساعت قرار گرفته است. تکه‌های استوانه‌ای زیرلایه و پوشش‌های جوشکاری از لوله‌هایی گرفته شده که توسط EDM پوشش داده شده‌اند و به‌عنوان نمونه‌های استوانه‌ای آزمون کشش، طبق استاندارد ASTM E8/E8M [۱۵] استفاده می‌شوند. همچنین، شمش‌های چهارگوش که شامل حداکثر 50% زیرلایه و 50% پوشش جوشکاری هستند به‌عنوان نمونه‌های آزمایش تنش فشاری استفاده می‌شوند. آزمون‌های شکست طبق استاندارد ASTM E1820-01 [۱۶] انجام می‌شود. شکل ۳ طرح کلی لوله پوشیده شده و شکل هندسی نمونه‌های آزمایش برای آزمون شکست را نشان می‌دهد. برای ساخت نمونه آزمایش برای آزمون تنش فشاری واحدهایی با ابعادی با ابعاد $30 \times 12/5 \times 150$ ماشین‌کاری می‌شوند. برای ساخت ۸ عدد نمونه آزمایش برای آزمون تنش فشاری واحدهایی با ضخامت $12/5\text{ mm}$ و عرض 25 mm ماشین‌کاری می‌شوند

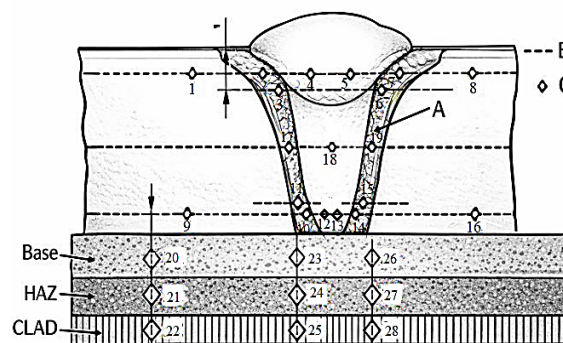
جدول ۳: ترکیب شیمیایی نمونه بر حسب درصد وزنی برای سطح

نمونه و 1 mm زیر سطح نمونه

Element	سطح نمونه	۱mm زیر سطح نمونه
Si	۰/۱۴	۰/۱۳
Mn	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴
Cr	۲۰/۸۳	۱۹/۹۶
Mo	۸/۲۹	۸/۱۷
Cu	۰/۰۳	۰/۰۴
Fe	۴/۹۳	۸/۸۷
Co	۰/۰۷	۰/۰۷
Ti	۰/۲۱	۰/۲
Al	۰/۰۸۴	۰/۰۸۳
Nb	۳/۳۷	۳/۳۱
W	<۰/۰۱	<۰/۰۱
V	<۰/۰۵	<۰/۰۵
C	۰/۰۳۶	۰/۰۴
P	۰/۰۱۱	۰/۰۱۱
S	۰/۰۵	۰/۰۵
Sn	<۰/۰۵	<۰/۰۵
Mg	۰/۰۰۷	۰/۰۰۷
Zr	۰/۰۰۶	۰/۰۰۶
B	<۰/۰۱	<۰/۰۱
Ni	Base	Base

ابتدا جهت اطمینان از ترکیب شیمیایی پوشش اینکونل ۶۲۵ بر روی سطح لوله API 5LX52، روش کوانتومتری مورد استفاده قرار گرفته، سپس نمونه‌های آزمون کشش، خمش، سختی، خوردگی حفره‌ای و حساسیت به خوردگی مرزدانه‌ای از لوله‌های API 5LX52 مطابق با استانداردهای مشخص تهیه و در دمای 25°C و رطوبت ۴۱ درصد در بنیاد علوم کاربردی رازی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. آزمون کشش مطابق با استاندارد ASME SEC IX به‌وسیله نمونه با عرض، ضخامت و سطح مقطع به ترتیب $19/18\text{ mm}$ ، $12/66\text{ mm}$ و $242/82\text{ mm}^2$ ، همچنین آزمون خمش به‌وسیله نمونه با عرض و ضخامت به ترتیب $22/5\text{ mm}$ و $10/6\text{ mm}$ تحت ماندلر با قطر 40 mm و زاویه چرخش 180° درجه انجام شده است. آزمون ضربه مطابق با استاندارد ASTM E23 بر روی نمونه با ابعاد 55 mm در 10 mm دارای ناچ V با عمق 2 mm در دمای 30°C انجام شده و ماکرو سختی نمونه مطابق پروفایل نشان‌داده‌شده در شکل (۲)، از ۲۸ نقطه به‌وسیله روش ویکرز مطابق با استاندارد ISO 6507-1 با هرم الماسه تحت بار 10 kg و مدت‌زمان اعمال نیرو ۱۰ تا ۱۵ ثانیه انجام شده است.

نتایج نشان می‌دهد که پوشش به‌دست‌آمده کاملاً متراکم و یکنواخت است و ضخامت مناسبی دارد. پوشش دارای تخلخل بسیار کمی است و عامل اصلی این تخلخل مناسب توزیع یکنواخت ذرات پودر است. هرچه توزیع ذرات یکنواخت‌تر باشد، پوشش به‌دست‌آمده دارای کم‌ترین میزان ذرات ذوب نشده و تخلخل است. هرچند حرارت حاصل از جوشکاری نیز بی‌تأثیر نمی‌باشد. همچنین عواملی مانند تخلخل و جهت‌گیری آن‌ها، مقدار ذرات ذوب نشده و نیمه ذوب، ذرات ذوب شده و سریع منجمد شده، اندازه دانه و مورفولوژی آن‌ها از عوامل تأثیرگذار بر سختی پوشش است.



شکل ۲: پروفیل ماکرو سختی نمونه API 5LX52

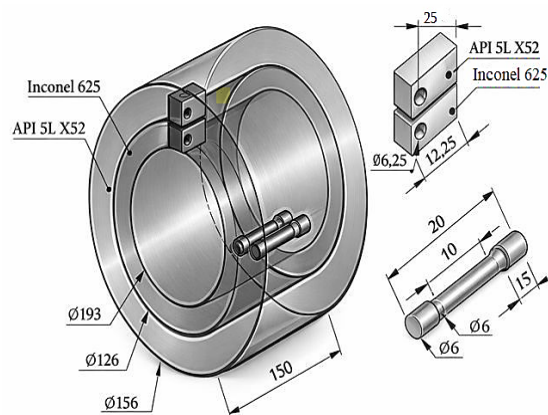
خوردگی یک واکنش شیمیایی یا الکتروشیمیایی بین یک ماده، معمولاً یک فلز و محیط اطراف آن است که موجب تخریب ماده و تغییر خواص آن می‌شود. آزمون‌های متفاوتی در آزمایشگاه خوردگی انجام می‌شود که از جمله آن‌ها به آزمون تعیین مقاومت به خوردگی حفره‌دار شدن در فولادها با استفاده از محلول کلرید

۴-۲- خواص مکانیکی پوشش

در جدول (۴) سختی سه قسمت فلز پایه، منطقه HAZ و پوشش جوشکاری شده نمونه مطابق شکل (۲) آورده شده است که به طور میانگین به ترتیب برابر با $154/1$ HV، $167/3$ و $232/6$ است و به خوبی بیانگر افزایش ۵۱ درصدی سختی زیرلایه فولاد API 5LX52 در اثر اعمال پوشش اینکونل ۶۲۵ است. با انجام پوشش دهی، نفوذ عناصر مختلف حین جوشکاری به ناحیه متأثر حرارت اتفاق می افتد که افزایش سختی منطقه متأثر از حرارت می تواند ناشی از تغییرات ترکیبات شیمیایی منطقه این ناحیه نسبت به زیرلایه در اثر نفوذ عناصر آلیاژی همانند نیوبیوم و مولیبدن است. همچنین بالاتر بودن سرعت انتقال حرارت در سطح نمونه نسبت به منطقه متأثر از حرارت نسبت به سطح پوشش شده و اندازه دانه منطقه متأثر از حرارت نسبت به سطح پوشش شده و در نتیجه سختی سطح نمونه به دلیل کوچک تر بودن اندازه دانه ها و افزایش تعداد مرزدانه ها افزایش پیدا کرده است که باتوجه به وجود ذرات ریزودرشت سنگ در حفاری صنایع نفت و گاز، استفاده از لوله های با سختی بالا بسیار اهمیت دارد. از طرف دیگر باتوجه به اطلاعات موجود در جدول (۴)، قسمت های مختلف حوضچه مذاب دارای سختی نزدیک به هم و بین 235 HV تا 245 است که این سختی تقریباً یکسان قسمت های مختلف حوضچه مذاب یعنی نقاط $4, 5, 12, 13$ بیانگر ترکیب شیمیایی یکسان و خواص یکسان در سطح و عمق پوشش جوشکاری شده اینکونل ۶۲۵ است.

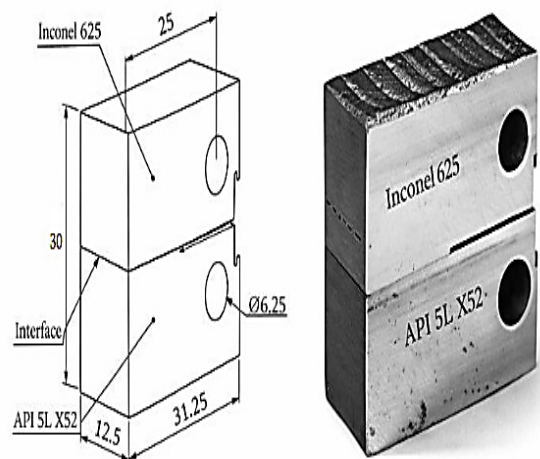
با استفاده از آزمون کشش، خواص مکانیکی همانند استحکام تسلیم و استحکام نهایی نمونه بدون پوشش API5LX52 و نمونه دارای پوشش اینکونل ۶۲۵ تعیین و در جدول (۵) نشان داده شده است. باتوجه به نتایج به دست آمده استحکام نهایی نمونه دارای پوشش 487 Mpa و استحکام نهایی نمونه بدون پوشش 396 Mpa است. همچنین استحکام تسلیم نمونه های دارای پوشش و بدون پوشش به ترتیب 381 Mpa و 311 Mpa به دست آمده است که نتایج به خوبی بیانگر بهبود استحکام تسلیم و استحکام نهایی در اثر اعمال پوشش اینکونل ۶۲۵ به ترتیب به میزان $22/5\%$ و $22/9\%$ است؛ بنابراین جوشکاری پوشش اینکونل ۶۲۵ علاوه بر ایجاد سختی مناسب در نمونه، با بهبود استحکام تسلیم و استحکام نهایی، مقادیر استاندارد لازم جهت استفاده در تجهیزات نفت و گاز را نیز به دست می آورد که با نتایج به دست آمده توسط یانی و همکارانش برای آلیاژ اینکونل ۶۲۵ مطابقت دارد. [۱۶]

علاوه بر استحکام تسلیم و نهایی نمونه دارای پوشش، چسبندگی و قابلیت جذب انرژی که معیاری از تردی و نرمی شکست نمونه است، از اهمیت به سزایی در کاربرد فولاد API5LX52 در صنعت برخوردار است. با انجام آزمون خمش و بازدید سطح نمونه می توان عیوب ایجاد شده در پوشش نمونه را مورد بررسی قرارداد



شکل ۳: جوشکاری پوششی اینکونل ۶۲۵ بر روی سطح داخلی لوله API 5LX52

نمونه های شکست به منظور تسهیل در بالابردن رشد ترک در فصل مشترک زیرلایه روکش کاری شده، سوراخ شده اند. همچنین نوک سوراخ ها تا حد امکان نزدیک به سطح مرز بین زیرلایه و کلد، ماشین کاری می شود. در شکل (۴) جزئیات هندسی نمونه های آزمایش شکست قابل مشاهده است.



شکل ۴: هندسه نمونه شکست

۴- بحث و نتایج

۴-۱- ترکیب شیمیایی

در جدول ۲ ترکیب شیمیایی پوشش جوشکاری شده اینکونل ۶۲۵ در سطح نمونه پوشش دار و 1 mm زیر سطح نمونه پوشش دار نشان داده شده است. همان طور که در جدول (۳) مشخص است، اختلاف درصد وزنی عناصر مختلف موجود در سطح نمونه و 1 mm زیر سطح نمونه بسیار کم است که تأیید کننده ایجاد پوشش اینکونل ۶۲۵ و همچنین یکنواخت و همگن بودن ترکیب شیمیایی پوشش در ضخامت های مختلف است. وجود ترکیب شیمیایی یکنواخت منجر به ایجاد خواص مکانیکی و خوردگی یکسان و یکنواختی در نمونه می گردد.

جدول ۶: نتایج حاصل از آزمون خمش از ۴ قسمت نمونه API5LX5 دارای پوشش اینکونل ۶۲۵

نمونه برداری محل	ضخامت×عرض mm×mm	قطر ماندل mm	زاویه خمش (درجه)	توضیحات	نتیجه آزمون
Side I	۱۰ ۲۲/۵×	۴۰	۱۸۰	عیبی مشاهده نشد	قابل قبول
Side II	۱۰ ۲۲/۵×	۴۰	۱۸۰	عیبی مشاهده نشد	قابل قبول
Side III	۱۰ ۲۲/۵×	۴۰	۱۸۰	عیبی مشاهده نشد	قابل قبول
Side IV	۱۰ ۲۲/۵×	۴۰	۱۸۰	عیبی مشاهده نشد	قابل قبول

آزمون ضربه برای تعیین مقاومت در برابر ضربه یا چقرمگی نمونه با محاسبه مقدار انرژی جذب شده در هنگام شکستگی انجام شد. آزمون ضربه یکی از رایج‌ترین آزمون‌ها برای اندازه‌گیری انرژی شکست یک ماده است. با استفاده از این آزمون می‌توان مقاومت و یا حساسیت یک ماده را به ضربه اندازه‌گیری کرد. از طرف دیگر میزان انرژی جذب شده در آزمون ضربه به‌نوعی معرف میزان حساسیت ماده به ترک و معیاری برای تخمین میزان چقرمگی ماده نیز است. چقرمگی یک ماده به مقاومت آن در برابر انتشار ترک یا توانایی آن برای جذب انرژی در تغییر شکل پلاستیک گفته می‌شود. در واقع چقرمگی بیانگر کاری است که بر واحد حجم ماده بدون شکست می‌تواند انجام شود. این مفهوم همان سطح زیر منحنی تنش - کرنش حقیقی است که از آزمون کشش نیز به دست می‌آید.

مطابق جدول (۷) آزمون ضربه بر روی سه نمونه با ابعاد یکسان در دمای °C ۳۰- انجام شده است. نتایج آزمون ضربه در دمای °C ۳۰- نشان‌دهنده انرژی جذب شده J ۱۲۱ و J ۱۱۰ و J ۹۷ برای سه نمونه است که به طور میانگین انرژی جذب شده نمونه‌ها J ۱۰۹/۳ بوده و در نتیجه استحکام و انعطاف‌پذیری مناسب نمونه API5LX52 دارای پوشش اینکونل ۶۲۵ را نشان می‌دهد. شکل ۵ تصویر قطعه پس از آزمون ضربه را نشان می‌دهد. باتوجه به سطح شکست دو ناحیه متفاوت شامل شکست کج و شکست مسطح قابل مشاهده است. قسمت‌های مسطح در نزدیکی شیار و همچنین لبه‌های داخلی نمونه دیده می‌شود که نشان‌دهنده رشد ترک در مد اول شکست است. نواحی کج در نزدیکی لبه‌های شکست دیده می‌شود که ناحیه برشی است و مد دوم شکست در این نواحی اتفاق افتاده است. قسمت‌های غیر

که سطح نمونه‌های آزمون شده بدون عیب بوده و جدایش پوشش اینکونل از فلز پایه دیده نشد. مطابق جدول (۶) نتایج آزمون خمش از ۴ قسمت نمونه دارای پوشش اینکونل ۶۲۵ بیانگر چسبندگی خوب پوشش و عدم ایجاد ترک در هنگام آزمون خمش است. موضوع بیان شده را می‌توان با مقایسه سختی نقاط موجود در پوشش و فلز پایه نمونه در جدول (۳) مشاهده کرد. پیوستگی سختی منطقه بین پوشش و زیرلایه در جدول (۳) می‌تواند تأییدکننده این مطلب باشد.

جدول ۴: سختی سنجی ویکرز قسمت‌های مختلف پوشش منطقه متأثر از حرارت و زیرلایه مطابق پروفیل نشان‌داده‌شده در شکل ۲

موقعیت سختی سنجی	سختی (HV)
نقطه ۱	۱۵۱/۴
نقطه ۲	۱۵۷
نقطه ۳	۱۵۶
نقطه ۴	۲۳۸
نقطه ۵	۲۳۶
نقطه ۶	۱۶۵
نقطه ۷	۱۶۴
نقطه ۸	۱۶۳
نقطه ۹	۱۶۵
نقطه ۱۰	۱۵۷
نقطه ۱۱	۱۵۶
نقطه ۱۲	۲۴۰
نقطه ۱۳	۲۴۲
نقطه ۱۴	۱۷۰
نقطه ۱۵	۱۶۸
نقطه ۱۶	۱۵۷
نقطه ۱۷	۱۵۱/۴
نقطه ۱۸	۲۴۵
نقطه ۱۹	۱۵۵
نقطه ۲۰	۱۵۷

جدول ۵: نتایج آزمون کشش نمونه بدون پوشش API5LX52 و نمونه پوشش جوشکاری اینکونل ۶۲۵

ضخامت×عرض mm×mm	سطح مقطع S ₀ (mm ²)	استحکام تسلیم R _e (Mpa)	استحکام نهایی R _m (Mpa)	نمونه
۱۹/۱۸×۱۲/۶۶	۲۴۲/۸۲	۳۸۱	۴۸۷	دارای پوشش
۱۹/۲۲×۱۲/۸۰	۲۴۶/۰۲	۳۱۱	۳۹۶	بدون پوشش

جدول ۸: نتایج حاصل از آزمون خمش از ۴ قسمت نمونه API5LX5 دارای پوشش اینکونل ۶۲۵

نوع آزمایش	وزن اولیه (gr)	وزن کاهش (gr)	سطح نمونه (cm ²)	سرعت خوردگی
خوردگی حفره‌ای	۱۱/۱۴۳۰	۱۱/۱۳۹۸	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۰۱۹ (gr/cm ²)
خوردگی حساسیت مرزدانه‌ای	۱۱/۹۰۰۱	۱۱/۶۶۹۱	۰/۲۳۱	۱/۲۷۸ (mm/year)



شکل ۶: تصویر سطح نمونه دارای پوشش اینکونل ۶۲۵ بعد از آزمون خوردگی حفره‌دار شدن

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، پوشش اینکونل ۶۲۵ به روش روکش‌کاری فلزی بر سطح لوله‌های فولادی API 5L X52 باهدف بهبود خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی اعمال شد. نتایج به‌دست‌آمده به شرح زیر است:

۱- ترکیب شیمیایی پایدار پوشش اینکونل ۶۲۵ در سطح و ضخامت‌های مختلف پوشش همراه با افزایش ۵۱ درصدی سختی زیرلایه فولاد API 5LX52 در اثر اعمال پوشش اینکونل ۶۲۵ است. ۲- نتایج آزمون‌های خوردگی نمونه دارای پوشش اینکونل ۶۲۵ به ترتیب برای خوردگی حفره‌ای و آزمون حساسیت به خوردگی مرزدانه‌ای (gr/cm²) ۰/۰۰۰۱۹۳ و (mm/year) ۱/۲۷۸ به دست آمد که بیانگر بهبود مقاومت به خوردگی در کنار ارتقا خواص مکانیکی فولاد API 5LX52 در اثر اعمال پوشش اینکونل ۶۲۵ به‌منظور استفاده در لوله‌های انتقال نفت و گاز است.

۳- جوشکاری پوششی به دلیل دارا بودن فصل مشترک شیمیایی بین پوشش اینکونل ۶۲۵ و زیر لایه فولادی API5LX52، دارای چسبندگی و استحکام مناسب است و کنترل پارامترهای جوشکاری و در نهایت سردشدن پوشش منجر به کاهش نواقص پوشش و فصل مشترک بین زیرلایه و پوشش، و در نهایت بهبود مقاومت به ضربه و استحکام تسلیم و استحکام نهایی همراه با مقاومت به خوردگی مناسب نمونه فولادی API5LX52 دارای پوشش اینکونل ۶۲۵ گردیده است.

براق سطح شکست از نواحی براق بیش‌تر بوده و این نشان‌دهنده جذب انرژی مناسب نمونه و شکست تقریباً نرم است.



شکل ۵: تصویر قطعه پس از آزمون ضربه

جدول ۷: نتایج آزمون ضربه نمونه API5LX52 دارای پوشش اینکونل ۶۲۵

ابعاد نمونه mm	انرژی ضربه J	دمای آزمون °C
۵۵×۱۰×۱۰	۱۲۱	-۳۰
۵۵×۱۰×۱۰	۱۱۰	-۳۰
۵۵×۱۰×۱۰	۹۷	-۳۰

باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده، کم‌بودن اختلاف درصد وزنی عناصر مختلف موجود در سطح نمونه و یک میلی‌متر زیر سطح نمونه نشان‌دهنده ترکیب شیمیایی یکنواخت است. همچنین افزایش ۵۱ درصدی سختی زیرلایه فولاد API 5LX52 در اثر اعمال پوشش اینکونل ۶۲۵، بهبود استحکام تسلیم و استحکام نهایی در اثر اعمال پوشش به ترتیب به میزان ۲۲/۵٪ و ۲۲/۹٪، چسبندگی خوب پوشش و عدم ایجاد ترک در هنگام آزمون خمش و جذب انرژی مناسب نمونه‌های دارای پوشش به‌خوبی تأییدکننده بهبود خواص مکانیکی نمونه API5LX52 در اثر اعمال پوشش اینکونل ۶۲۵ است.

۴-۳- رفتار خوردگی

در جدول (۸)، تغییرات کاهش وزن به ترتیب در زمان‌های غوطه‌وری ۷۲ و ۱۲۰ ساعت نشان‌داده شده است. نتایج بیانگر سرعت خوردگی (gr/cm²) ۰/۰۰۰۱۹۳ و (mm/year) ۱/۲۷۸ برای خوردگی حفره‌ای و آزمون حساسیت به خوردگی مرزدانه‌ای است. همچنین تصویر میکروسکوپ نوری در شکل (۶) نشان‌دهنده مقاومت به خوردگی مناسب نمونه API5LX52 دارای پوشش اینکونل ۶۲۵ است. باتوجه به سیالات خورنده موجود در صنایع نفت و گاز، بهبود خواص خوردگی لوله‌های موجود در این صنعت، منجر به کاهش خطرات ناشی از خوردگی و افزایش طول عمر لوله‌ها و در نتیجه کاهش هزینه خواهد شده است.

۶- علایم، نشانه‌ها و ارقام

استحکام نهایی، (Mpa)	R_m
استحکام تسلیم، (Mpa)	R_e
سطح مقطع، (mm^2)	S_o

۷- مراجع

- [8] Guo L, Xiao F, Wang F, Wei W, He Y, Luo F. Influence of heat treatments on microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of Inconel 625 overlay clad using PTIG. *Materials Research Express*. 2020;7(9):096517.
- [9] Martí Ferré B. Corrosion resistant thermal spray coatings for protection of TES tanks. 2021.
- [10] Alvarães CP, Madalena FCA, Souza LFGd, Jorge JCF, Araújo LS, Mendes MC. Performance of the INCONEL 625 alloy weld overlay obtained by FCAW process. *Matéria (Rio de Janeiro)*. 2019;24:e-12290.
- [11] Farhad O. Microstructure and Mechanical Properties of A283 Steel Surfaced with Inconel 625 and 347 Stainless Steel Using the GTAW Process. *Metallurgical and Materials Engineering* 2022;33(1):125-44. (In Persian).
- [12] H DM, Eraghchi. Effect of Inconel 625 Content on the Mechanical and Tribological Properties of Teflon Matrix Composites: Experimental Investigations and Molecular Dynamics Simulations. *Journal of Composite Science and Technology*. 2022;8:1797-805. (In Persian).
- [13] Knerek R, Lemos GVB, Vander Voort G, de Freitas DA, Haupt W, Landell R, et al. Investigating an API X65 steel pipe clad with alloy 625. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*. 2021;18:0-.
- [14] Christine Engelbert C. Study on Heat Treatment Effect on Corrosion of API 5L X52 steel in CO2 Environment. 2011.
- [15] A. A. S. for T. and Materials StmfttomAi. for T. and Materials, Standard test methods for tension testing of metallic materials. . ASTM international 2009.
- [16] A. E1820, Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness. ASTM: West Conshohocken 2001. USA.
- [17] Yeni C, Kocak M. Fracture toughness analysis of laser-beam-welded superalloys Inconel 718 and 625. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2006;29(7):546-57.
- [1] Vargas-Arista B, Romero JS, Angeles-Chavez C, Albiter A, Hallen J. Deterioration of the corrosion resistance of welded joints in API5L X52 steel isothermally aged. *International Journal of Electrochemical Science*. 2011;6(2):367-78.
- [2] Mansour D, Demri B, Belkaid S. Corrosion behavior of API 5L X52 carbon steel coated by oxygen plasma discharge. *Univers J Mater Sci*. 2015;3:35-43.
- [3] El-Reedy MA. Reinforced concrete structural reliability: CRC Press; 2012.
- [4] Verdi D, Garrido M, Múnez C, Poza P. Mechanical properties of Inconel 625 laser clad coatings: Depth sensing indentation analysis. *Materials Science and Engineering: A*. 2014;598:15-21.
- [5] Silva CC, De Miranda HC, Motta MF, Farias JP, Afonso CRM, Ramirez AJ. New insight on the solidification path of an alloy 625 weld overlay. *Journal of Materials research and Technology*. 2013;2(3):228-37.
- [6] Abioye T, McCartney D, Clare A. Laser cladding of Inconel 625 wire for corrosion protection. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015;217:232-40.
- [7] Xu L, Li M, Jing H, Han Y. Electrochemical behavior of corrosion resistance of X65/Inconel 625 welded joints. *International Journal of electrochemical science*. 2013;8(2):2069-79.