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

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

Volume 11, Number 2, 2026



Effect of degree of dilution on the adhesion and continuity of the ER2209 clad layer on AISI 1030 cast steel

M. Lotfi[1], H. Sabet[1*], B. Karbakhsh Ravari[1], Gh. Faghani[2]
1-Department of Materials Engineering, Ka.C., Islamic Azad University, Karaj, Iran.
2-Materials Department, Mechanical Faculty, Khatam-Ol-Anbia (PBU) University, Tehran, Iran.

Received 4 October 2025 ; Accepted 14 December 2025

Abstract

In the present study, AISI 1030 cast-steel samples were cladded using duplex stainless-steel wire ER2209 by the Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) process under different preheating temperatures and varying numbers of passes. The degrre of dilution of the clad layers,affected by both of the preheating temperature and the number of passes—was calculated, and was evaluated its influence on the adhesion and bonding integrity of the ER2209 clad layer on the cast-steel substrate. The results showed that by increasing the number of clad layers led to a lower dilution in the samples. Furthermore, a rise in preheating temperature also contributed to an increase in dilution. Among all conditions, the three-pass cladded sample with a preheating temperature of 100 °C exhibited the highest dilution degree. Bending test results demonstrated that the bending angle increased by the number of clad passes. Macroscopic examination confirmed that complete interfacial continuity between the clad layer and the base metal. Phase analysis and microstructural observations revealed that the base metal consisted of approximately 80% ferrite and 20% pearlite; the heat-affected zone (HAZ) exhibited a ferrite–transformed pearlite structure with similar volume fractions; and the cladded samples in the final pass presented a duplex austenitic–ferritic structure with 10–20 Wt.% ferrite content. Microhardness test indicated that the two-pass cladded sample that preheated at 200 °C had the highest hardness value, up to 355 HV.

Keywords: AISI 1030 Cast Steel, Number of Passes, ER2209 Clad layer, Adhesion, Continuity.

*Corresponding Author : H. Sabet, hamed.sabet@iau.ac.ir.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.11]

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

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال یازدهم، شماره2، پاییز و زمستان 1404



اثر درجه رقت بر چسبندگی و پیوستگی اتصال لایه روکش ER2209 بر روی فولاد ریختگی AISI 1030

مرتضی لطفی[1]، حامد ثابت[1*]، بنفشه کاربخش راوری[1]، غلامرضا فغانی[2]

1-گروه مهندسی مواد و متالورژی، واحد کرج ، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران.

2-گروه مهندسی مواد ، دانشکده مهندسی مکانیک ، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء (ص) آجا، تهران، ایران.

دریافت مقاله: 1404/07/12 ؛ پذیرش مقاله: 1404/09/22

چکیده

در تحقیق حاضر نمونه های تهیه شده از جنس فولاد ریختگی AISI 1030، با دماهای پیشگرم متفاوت با استفاده از مفتول فولاد زنگ نزن دو فازی ER2209 توسط روش جوشکاری قوسی گاز تنگستن (GTAW) با تعداد پاس‌های مختلف، روکش کاری شدند. درجه رقت نمونه های روکش‌کاری شده با تعداد پاس‌های مختلف و دماهای پیشگرم متفاوت محاسبه شد و سپس تاثیر آن بر چسبندگی و پیوستگی اتصال جوش لایه روکشER2209 بر روی فولاد ریختگی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش تعداد پاس‌های روکش درجه رقت در نمونه‌ها کاهش می‌یابد. همچنین افزایش دمای پیشگرم نیز منجر به افزایش درجه رقت می‌شود. همچنین نمونه سه پاس روکش‌کاری شده با دمای پیشگرم 100 درجه سانتی‌گراد بیشترین درجه رقت را دارا می‌باشد. نتایج آزمایش خمش نشان داد که با افزایش تعداد پاس‌های روکش، زاویه خمش افزایش می‌یابد. نتایج بررسی ماکروسکوپی ساختار، پیوستگی را بطور کامل در فصل مشترک لایه روکش با فلز پایه تایید نمود. بررسی فازی و تغییرات ساختاری نیز نشان داد که فلز پایه دارای ساختار 80 درصد حجمی فریت 20- درصد حجمی پرلیت، منطقه HAZ دارای ساختار فریتی- پرلیتی دگرگون شده با همان درصد حجمی و نمونه‌های روکش‌کاری شده در پاس نهایی، ساختار آستنیتی– فریتی با درصد حجمی فریت بین 10 تا 20 درصد را از خود نشان دادند. نتایج ریزسختی مشخص نمود که نمونه دو پاس جوشکاری شده (با دمای پیشگرم 200 درجه سانتی‌گراد) بیشترین میزان سختی را به مقدار 355 ویکرز دارد.

کلمات کلیدی: فولاد ریختگی AISI 1030، تعداد پاس‌ها، لایه روکش ER2209، چسبندگی، پیوستگی.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: حامد ثابت، hamed.sabet@iau.ac.ir.

1- مقدمه

روکش‌کاری سخت یک نوع عملیات سطحی است که در آن آلیاژی با یک ترکیب قابل اطمینان بر روی یک زیر لایه با قیمت پایین اعمال می‌شود تا مقاومت به فرسایش، سایش و سختی را با هدف افزایش طول عمر بهینه قطعه بهبود ببخشد. خواص لایه‌های روکش، تابعی از ترکیب شیمیایی، درصد رقت،

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.11]

شرایط انجماد، سرعت سرد شدن (بعد از انجماد)، ریز ساختار، نوع، شکل و نحوه توزیع فازها است [1و2]. در روکش کاری، ضخامت لایه روکش‌کاری شده ممکن است به منظور ایجاد مقاومت فلز پایه به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد. یکی از فرایندهایی که در عملیات روکش‌کاری استفاده می‌شود جوشکاری قوسی گاز تنگستن می‌باشد [3]. این تکنیک به دلیل ارزان بودن و بازده بالا، کاربردهای صنعتی فراوانی دارد. در این روش، به دلیل سرعت جوشکاری بالا و سرعت سرد شدن بالای فلز جوش و ایجاد فاز غیرتعادلی مارتنزیت، استحکام و سختی بالایی به دست می‌آید که به عملیات حرارتی پس از جوشکاری جهت استحکام نیاز نمی‌باشد و با اعمال شرایط پیش گرم و دمای بین پاسی مقاومت به ترک را می‌توان افزایش داد [4] . ثابت و همکارانش[5] اثر تعداد پاس و لایه واسط جوشکاریSMAW را بر ریزساختار و مقاومت به سایش فولاد زنگ نزن مارتنزیتی410 AISI بر روی فولاد ساده کربنی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که یکی از اساسی‌ترین نکاتی که در بحث روکش‌کاری باید کنترل شود، مساله رقت می‌باشد بطوری‌که با افزایش تعداد پاس‌های جوشکاری می‌توان امتزاج فلز پایه با لایه‌های روکش را کاهش داد. همچنین آن‌ها گزارش دادند که با افزایش تعداد پاس‌ها مقدار کروم معادل و نیکل معادل تغییر چشمگیری نکرده است. اما با افزایش قطر الکترود، درصد نیکل معادل و کروم معادل کاهش پیدا کرده است. ورما و همکارانش [6] فولاد زنگ‌نزن آستنیتی را به روش GMAW بر روی فولاد کم آلیاژ روکش کاری نمودند، نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که که آلیاژ روکش‌کاری شده بیشترین مقاومت به خوردگی را در شرایط 145 A ،26 V و سرعت پیشرونده 535/8 mm/min از خود نشان داد. ساها و همکارانش [7] نشان دادند که مواد روکش‌کاری مختلفی جهت افزایش مقاومت به خوردگی فلز پایه قابل استفاده می‌باشد. در این میان، الکترودهای فولاد زنگ‌نزن دوفازی و فولادهای زنگ‌نزن سوپر دوفازی مورد توجه بسیاری قرار گرفته اند. فولاد زنگ‌نزن دوفازی شامل دو فاز فریت و آستنیت توام با هم می‌باشد. این طبقه از آلیاژها شامل عناصر آلیاژی مهم مانند کروم، نیکل، مولیبدن و نیتروژن می‌باشند. بعضی از فولادهای دوفازی همچنین شامل منگنز، مس و تنگستن می‌باشند. فاز آستنیت در این فولادها سبب ایجاد انعطاف پذیری در دمای پایین می‌شود و فاز فریت مقاومت به ترک خوردگی را افزایش می‌دهد. فولادهای زنگ‌نزن دوفازی علاوه بر مقاومت خوب در برابر انواع خوردگی، سبب ایجاد خواص مکانیکی بهتر مانند استحکام بالاتر و چقرمگی بیشتر نسبت به سایر فولادهای زنگ‌نزن می‌شوند. هایدر و همکارانش [8] مقاومت به خوردگی و ریزساختار لایه‌های سطحی فولاد زنگ‌نزن دوفازی را بر روی چدن خاکستری به دو روش جوشکاری قوس فلزی در حضور گاز محافظ بی اثر (GMAW) و جوشکاری قوس پلاسما (PAW) روکش دادند. آن‌ها دریافتند که هدایت حرارتی گاز محافظ استفاده شده و دمای پیشگرم، رقت لایه های سطحی را تحت تاثیر قرار می‌دهد که این امر تاثیر مهمی بر رفتار خوردگی و ریزساختارلایه روکش می‌گذارد. الی جورج و همکارانش[9] اثر حرارت ورودی را بر روی روکش‌کاری فولاد زنگ‌نزن سوپر آستنیتی ASTM A516 Grade 70 با فرایند GTAW بررسی نمودند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که با استفاده از فرایند GTAW می‌توان روکش با کیفیتی بر روی فولاد کم کربن ایجاد نمود. آن‌ها همچنین دریافتند که حرارت ورودی بر روی رقت لایه‌های روکش‌کاری شده تاثیرگذار است و نتایج تحقیقاتشان نشان داد که با افزایش حرارت ورودی درجه رقت کاهش می‌یابد. موضوع تحقیق حاضر در راستای حل مشکل صنعتی در داخل کشور تعریف شده است. در اکثر پمپ‌های عمودی مورد استفاده در محیط‌های صنعتی، صفحه‌ای نگهدارنده از جنس فولاد ریختگی کم کربن AISI 1030 استفاده می‌شود که تمامی اجزای پمپ در بالا و پایین این صفحه نصب می‌شوند. این صفحه در حین عملکرد پمپ در محیط‌های صنعتی، دچار فرسایش شده و لذا برای از بین بردن مشکل مذکور پیشنهاد می‌شود که بر روی این صفحه نگهدارنده روکش‌کاری از جنس فولاد زنگ‌نزن دوفازی انجام شود که توجیه اقتصادی نیز دارد. در این راستا، در تحقیق حاضر اثر درجه رقت بر چسبندگی و پیوستگی اتصال جوش لایه روکش

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.11]

ER2209 بر روی فولاد ریختگیAISI 1030 مورد بررسی قرار گرفته است. برای اعمال روکش از روش GTAW استفاده شد و جهت دستیابی به یک روکش با خواص بهینه، تعداد پاس‌ها و دمای پیشگرم بعنوان متغیرهای تحقیق درنظر گرفته شدند.

2-مواد و روش تحقیق

به منظور بررسی اثر تعداد پاس‌ها و دمای پیش گرم بر روی چسبندگی و پیوستگی روکش ، ابتدا فولاد AISI 1030 در بلوک‌هایی به ابعاد اولیه 100 mm ×140×140 ریخته گری شد و پس از برشکاری، نه نمونه به ابعاد نهاییmm 10 ×70×140 تهیه گردید . پس از آن تمامی نمونه‌ها در دمای 1100 درجه سانتی گراد به مدت یک ساعت تحت عملیات همگن کردن قرارگرفتند[10]. از فولاد زنگ نزن دوفازی ER2209 به صورت مفتول با قطر 1/6 میلی متر جهت روکش‌کاری استفاده شد . قبل از اعمال روکش جهت حصول اطمینان از ترکیب شیمیایی فولاد ریختگی و مفتول مورد استفاده، آنالیز شیمیایی با استفاده از روش اسپکتروسکوپی نشر نوری (OES) با دستگاه مدل Foundry Master طبق استاندارد ASTM E1068 بر روی نمونه‌ها و مفتول انجام شدکه ترکیب شیمیایی بدست آمده از این آنالیز به ترتیب در جداول(1 و2) ارائه شده است. پس از آن نمونه‌های همگن شده بر اساس متغیرهای تعریف‌شده در تحقیق یعنی تعداد پاس‌های روکش کاری (یک پاس، دو پاس و سه پاس) و دمای پیشگرم (بدون دمای پیشگرم، دمای پیشگرم100^oC و 200^oC) با استفاده از روش GTAW روکش کاری و سپس کدگذاری شدند. از آنجایی‌که پیشگرم کردن سبب کاهش نرخ سردشدن و کاهش تشکیل مارتنزیت در منطقه HAZ می‌شود [11] و همچنین احتمال ترک سرد را کاهش می‌دهد [12]، لذا دماهای فوق به عنوان دماهای پیشگرم در این تحقیق درنظر گرفته شدند [13]. جداول(3 و 4) به ترتیب نحوه کدگذاری نمونه‌های تهیه شده و پارامترهای درنظر گرفته حین روکش‌کاری را نشان می‌دهد.

پس از آماده شدن نمونه‌ها ابتدا آزمایش PT وUT بر اساس استاندارد ASME Sec.V بر روی نمونه‌ها انجام شد. سپس به منظور بررسی چسبندگی لایه روکش اعمالی و اثر تعداد پاس‌ها، نمونه‌ها تحت آزمایش خمش ریشه مطابق استاندارد AWS B4 قرار گرفتند و بعد از آن زاویه خم شده در نمونه‌ها اندازه‌گیری شد و کلیه نمونه‌ها از مقطع خم شده تحت آزمایش مایع نافذ قرار گرفتند. همچنین به منظور بررسی‌های ریزساختاری ، مقاطعی از نمونه ها در جهت عرضی تهیه شدند تا بتوان ساختار فلز پایه ، منطقه فصل مشترک و لایه روکش را مورد بررسی قرار داد. علاوه بر این جهت بررسی پیوستگی لایه روکش اعمال شده، مقطعی از همه نمونه‌ها در جهت طولی تهیه شدند و ماکروگرافی برروی روکش انجام شد. در این راستا آماده‌سازی همه نمونه‌های متالوگرافی بر اساس استاندارد ASTM E3-2017 انجام شد. به منظور مشاهده فازهای موجود ، فلز پایه و فصل مشترک با محلول نایتال 4% و لایه روکش با محلول اچ کالینگ (5 گرم $CuCl_2$ ، 100 میلی لیترHCl و 100 میلی‌لیتر اتانول) حکاکی شدند. برای بررسی ساختار نمونه‌ها از میکروسکوپ نوری (OM) مدل Meiji استفاده شد. به منظور بررسی نحوه توزیع عناصر در لایه روکش، آنالیز پروفیل خطی (Line Scan) نمونه ها توسط میکروسکوپ الکترونی مدل FEIESEM QUANTA 200 با ولتاژ کاری 25 KVو حالت تصویربرداری الکترون ثانویه و الکترون برگشتی انجام گرفت. همچنین به منظور بررسی تغییرات درصد وزنی عناصر کربن، مولیبدن،کروم و نیکل در نمونه‌های روکش‌کاری شده بررسیLine Scan توسط میکروسکوپ الکترونی در کل عرض نمونه (منطقه فلز پایه، فصل مشترک و لایه روکش) انجام پذیرفت . جهت بررسی تغییرات سختی در نمونه های روکش کاری شده، آزمایش میکرو سختی سنجی با بار 200 گرم نیرو و مطابق با استاندارد ASTM E384 به وسیله دستگاه سختی سنجی میکرو ویکرز با نام تجاری Johoyd مدل HVS-1000 از ناحیه سطح روکش انجام شد. برای این منظور از هر نمونه حداقل 3 نقطه تحت آزمایش سختی‌سنجی قرار گرفته شد و متوسط نتایج آنها بعنوان معیارسختی لایه روکش در نظر گرفته شد. به منظور بررسی درجه رقت هر کدام از نمونه‌ها ، ابتدا ترکیب شیمیایی لایه روکش سخت به روش

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.11]

اسپکتروسکوپی نشر نوری (OES) در فاصله یک میلی‌متر از سطح بعد از سنگ زنی سطح گرده ها مطابق استاندارد ASTM E1999 بدست آمد. برای این منظور از دستگاه مدل Foundry Master استفاده شد و ترکیب شیمیایی هر نمونه در سه نقطه از سطح با دقت 0/001 درصد تعیین گردید و متوسط ترکیب شیمیایی سه نقطه بعنوان ترکیب شیمیایی لایه روکش سخت در نظر گرفته شد. سپس درجه رقت نمونه‌های روکش سخت شده بعد از تعیین آنالیز شیمیایی لایه روکش سخت در هر نمونه و با داشتن ترکیب شیمیایی فلزپایه و مفتول روکش مورد استفاده از رابطه(1) تعیین گردید[14]:

$$PW=PE+D(PB-PE) \quad (1)$$

بطوری‌کهD: درجه رقت ، PW: درصد عنصر مورد نظر در فلز جوش، PE : درصد عنصر مورد نظر در فیلر مصرفی و PB : درصد عنصر مورد نظر در فلز پایه می باشد.

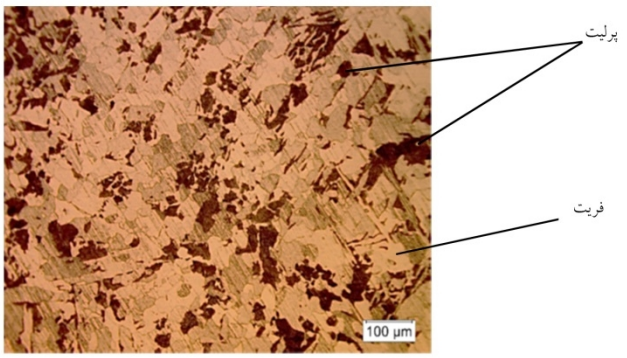
لازم به ذکر است که در فرمول مذکور، میانگین درصد وزنی عناصر کروم ، مولیبدن و نیکل به عنوان درصد عنصر مورد نظر درنظر گرفته شد. جهت بررسی اولیه ریزساختار فلز روکش از نمودار شفلر استفاده شد. مقدار کروم معادل و نیکل معادل از روابط 2 و 3 محاسبه گردیدند[15]:

$$\text{درصد کروم معادل} = \%Cr + \%Mo + 1.5\,\%Si + 0.5\%Nb \quad (2)$$

$$\text{درصد نیکل معادل} = \%Ni + 0.5\,\%Mn + 30\,\%C \quad (3)$$

3-نتایج و بحث

شکل(1) ساختار فلز پایه فولاد ریختگی AISI 1030 از نوع فولاد ساده کربنی بعد از همگن شدن و قبل از روکش کاری را نشان می دهد. ریزساختار این فولاد شامل 80 درصد حجمی فریت و 20 درصد حجمی پرلیت می‌باشد. جداول(5 ، 6 و 7) به ترتیب ترکیب شیمیایی و درصد رقت لایه‌های روکش کاری شده در نمونه های فولادی را که طبق جدول(3) کدگذاری شده‌اند، در شرایط بدون پیش گرم و پیش گرم در دمای 100و 200 درجه سانتی‌گراد و در تعداد پاس‌های متفاوت نشان می‌دهند. همانگونه که از جداول(5، 6و 7) مشخص است با افزایش تعداد لایه‌های روکش‌کاری شده از یک لایه به دو و سپس سه لایه، مقدار درصد رقت (امتزاج) فلز روکش‌کاری شده با زیر لایه (فولاد ساده کربنی) کاهش یافته است. برای مثال نتایج بدست آمده در جدول(6) نشان می‌دهد که درصد رقت در نمونه پیش گرم شده در دمای100°C از 52/47 در حالت تک پاس به 23/49 درصد در حالت دو پاس و سپس به 10/44 درصد در حالت سه پاس کاهش می‌یابد. نتایج تحقیقات بزمن و همکارانش [16] نیز نشان داد که در حین روکش کاری چندلایه ، میزان رقت لایه اول نسبتاً بالا می‌باشد ولی بطور قابل ملاحظه‌ای در لایه دوم کاهش می‌یابد و روند کاهشی در لایه‌های بعدی نیز مشاهده می‌شود که با نتایج بدست آمده در این تحقیق مطابقت دارد. ثابت [17] نیز در یکی از مطالعاتی که بر روی آلیاژ روکش سخت شده پایه Fe-Cr-C انجام داده بود، به نتایج مشابهی در خصوص چگونگی تغییرات رقت با افزایش تعدادلایه‌های روکش دست یافت.



شکل1-تصویر میکروسکوپی نوری فلز پایه.

همانطور که نتایج جداول نشان می‌دهد، ترکیب شیمیایی لایه‌های روکش‌کاری شده در حالت تک لایه، دو لایه و سه لایه با یکدیگر متفاوت بوده و در حالت سه لایه ترکیب شیمیایی فلز روکش به ترکیب شیمیایی مفتول نزدیک شده است.

همچنین با توجه به مقدار محاسبه شده کروم معادل و نیکل معادل جداول فوق، می‌توان مشاهده کرد که با افزایش تعداد پاس‌ها در دماهای پیشگرم متفاوت، مقدار کروم معادل و نیکل معادل تغییریافته که این امر به دلیل تغییرات درصد رقت این عناصر با افزایش تعداد پاس‌ها می‌باشد. شکل(2) موقعیت تمام نمونه‌های روکش‌کاری شده را در نمودار شفلر نشان می‌دهد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.11]

جدول1 - ترکیب شیمیایی(درصد وزنی) فولاد ریختگی مورد استفاده در تحقیق

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu
۰/۱۷۰	۰/۴۴۰	۰/۴۸۰	۰/۰۱۵	۰/۰۰۷	۰/۲۶۰	۰/۰۲۰	۰/۰۸۰	۰/۰۳۲	۰/۰۲۰	۰/۰۱۰
Nb	Ti	V	W	Sn	As	Fe				
<۰/۰۰۵	<۰/۰۰۲	<۰/۰۰۵	<۰/۰۲	<۰/۰۰۵	<۰/۰۰۲	Base				

جدول2-ترکیب شیمیایی(درصد وزنی) مفتول مورد استفاده جهت روکش کاری در این تحقیق.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu
۰/۰۶۴	۰/۶۰۰	۰/۶۵۰	۰/۰۱۴	۰/۰۱۳	۱۵/۷۷۰	۳/۱۷۰	۶/۲۶۰	Trace	۰/۰۲۰	۰/۰۷۰
Nb	Ti	V	W	N	Fe					
۰/۰۰۶	۰/۰۱۴	۰/۰۴۹	۰/۰۳۰	۰/۰۱	Base					

جدول 3- کدگذاری نمونه های مورد تحقیق.

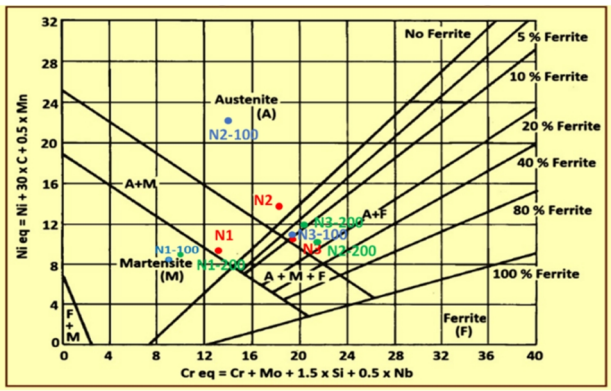
تعداد پاس های روکش کاری	یک پاس	دو پاس	سه پاس
نمونه روکش کاری شده بدون دمای پیشگرم	N1	N2	N3
نمونه روکش کاری شده با دمای پیشگرم 100 C	N1-100	N2-100	N3-100
نمونه روکش کاری شده با دمای پیشگرم 200 C	N1-200	N2-200	N3-200

جدول 4- پارامترهای روکش کاری..

نام دستگاه	مدل	روش روکش کاری	متوسط سرعت روکش کاری (سانتی متر / دقیقه)	متوسط اختلاف پتانسیل (ولت)	متوسط شدت جریان (آمپر)	متوسط حرارت ورودی Kj/Cm	قطبیت
دستگاه جوش گام الکتریک	TIG FEEDER 501 AIR	GTAW	8	11	90	0/6	DCEP

نتایج در این نمودار نشان می‌دهد که نمونه یک پاس روکش‌کاری شده بدون دمای پیشگرم در منطقه دوفازی آستنیت -مارتنزیت قرار دارد. اما با اعمال دمای پیشگرم 100 یا 200°C جایگاه این نمونه بر روی نمودار شفلر به منطقه تک فازی مارتنزیت تغییر یافته است که این امر به دلیل تاثیر دمای پیشگرم برتغییر ترکیب شیمیایی لایه روکش است [14 و 15]. همچنین با توجه به موقعیت قرارگیری نمونه‌ها در این نمودار، مشخص است که تمام نمونه‌های سه‌پاس روکش کاری شده با دماهای پیشگرم متفاوت و نمونه دو پاس روکش‌کاری شده با دمای پیشگرم 200 °C، در منطقه دو فازی آستنیت -فریت قرارگرفته اند و ریزساختار این نمونه‌ها به دلیل کاهش رقت و نزدیک شدن ترکیب شیمیایی آن‌ها به ترکیب شیمیایی مفتول، همانند ریزساختار مفتول که فولاد دوفازی آستنیتی- فریتی می باشد، شده است.

شکل(3) تغییرات درصد رقت تمامی نمونه‌ها را بر حسب تعداد پاس‌های روکش کاری شده در شرایط دمای پیشگرم متفاوت نشان می‌دهد. از نتایج موجود در شکل می‌توان دریافت که با افزایش تعداد پاس‌های جوشکاری در یک دمای پیشگرم ثابت، رقت کاهش می‌یابد . همچنین می‌توان اثر دمای پیشگرم را نیز بر روی رقت نمونه‌ها بررسی کرد.



شکل 2- محل قرارگیری ریزساختار لایه روکش نمونه‌ها در نمودار شفلر.

همانطور که نتایج بدست آمده در شکل نشان می‌دهد، بیشترین درصد رقت مربوط به حالت تک پاس در دمای 100°C است. دلیل این امر، آن است که چون بیشترین اختلاط فلز پایه (AISI1030) با مفتول ER2202 به دلیل تفاوت ترکیب شیمیایی در حالت تک پاس رخ می‌دهد لذا بیشترین میزان رقت

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.11]

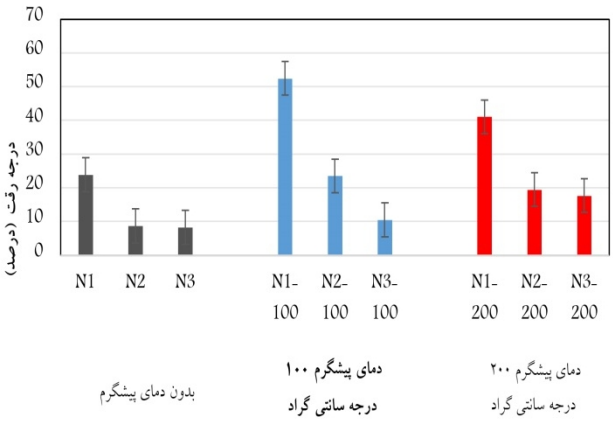
جدول 5- ترکیب شیمیایی و درصد رقت لایه های روکش کاری شده در نمونه های فولادی بدون پیش گرم.

نمونه های کد گذاری شده	درصد وزنی										درصد رقت	کروم معادل	نیکل معادل
	Fe	Cr	Mo	Ni	C	Si	Mn	P	S	Al			
N1	۷۹/۶۰	۱۱/۳۰	۱/۶۸	۵/۵۴	۰/۱۲	۰/۵۶	۰/۹۳	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۲۳/۸۲	۱۳/۸۲	۹/۶۰
N2	۷۱/۶۰	۱۵/۸۰	۲/۲۷	۸/۲۰	۰/۱۶	۰/۵۴	۱/۲۳	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۸/۶۸	۱۸/۸۸	۱۳/۶۱
N3	۷۱/۴۰	۱۶/۰۰	۲/۲۶	۷/۹۰	۰/۰۵	۰/۵۱	۱/۲۷	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۴	۸/۲۲	۱۹/۰۲	۱۰/۰۳

جدول 6- ترکیب شیمیایی و درصد رقت لایه های روکش کاری شده در نمونه های فولادی با دمای پیش گرم.$100^{o}C$

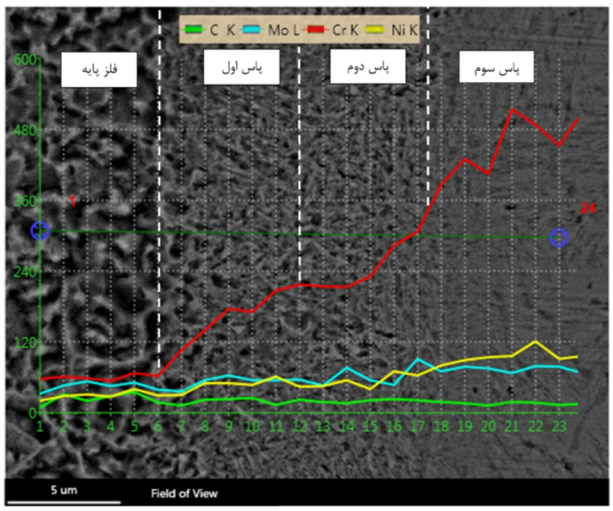
نمونه های کد گذاری شده	درصد وزنی										درصد رقت	کروم معادل	نیکل معادل
	Fe	Cr	Mo	Ni	C	Si	Mn	P	S	Al			
N1-100	۸۶/۷۰	۷/۰۲	۱/۱۰	۳/۵۷	۰/۱۴	۰/۴۹	۰/۷۹	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۵۲/۴۷	۸/۸۵	۸/۱۶
N2-100	۷۹/۷۰	۱۱/۴۰	۱/۷۱	۵/۴۵	۰/۵۴	۰/۵۵	۱/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۷	۲۳/۴۹	۱۳/۹۳	۲۲/۱۵
N3-100	۷۱/۷۰	۱۶/۱۰	۲/۳۵	۸/۲۷	۰/۰۶	۰/۵۴	۱/۲۷	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۱۱	۱۰/۴۴	۱۹/۲۶	۱۰/۷۰

مربوط به حالت تک پاس است و با توجه به محل قرارگیری نمونه‌ها در نمودار شفلر و مقایسه نمونه‌ها در حالت تک پاس با دماهای پیشگرم متفاوت، می‌توان ملاحظه نمود که بااعمال دمای پیشگرم، جایگاه نمونه در نمودار شفلر از حالت دو فازی آستنیت – مارتنزیت برای نمونه N1 به منطقه تک فاز مارتنزیت برای نمونه های N1-100 و N1-200 تغییر پیدا کرده است و چون این تغییر جایگاه مربوط به تغییر درصد کروم معادل در نمونه‌های مذکور می‌باشد، پس واضح است که با اعمال دمای پیشگرم، رقت تغییر پیدا کرده است و چون بیشترین تغییر و جابجایی در نمودار شفلر در حالت تک پاس، در نمونه 100 N1- اتفاق افتاده است که در سمت چپ نمونه200 N1- قرار گرفته است، لذا این نمونه بیشترین میزان رقت (52/47 درصد) را از خود نشان می‌دهد.



شکل3- اثر تعداد پاس‌ها و دمای پیشگرم بر روی تغییرات درجه رقت نمونه‌های مختلف.

جهت بررسی تغییرات غلظت عناصر در نمونه‌های روکش‌کاری شده، آنالیز اسکن خطی EDS بر روی تمامی نمونه‌ها انجام شد. تغییرات غلظت عناصر C، Mo، Cr و Ni در تمامی نمونه‌ها روند مشابهی را نشان دادند. شکل(4) آنالیز اسکن خطی EDS انجام شده از سطح نمونه سه پاس روکش‌کاری شده (N3) را نشان می‌دهد. این شکل به وضوح تغییرات ترکیب شیمیایی عناصر C، Mo، Cr و Ni را در لایه‌های روکش کاری شده نمونه N3 نشان می‌دهد.



شکل 4- آنالیز اسکن خطی EDS انجام شده از سطح نمونه سه پاس جوشکاری شده N3.

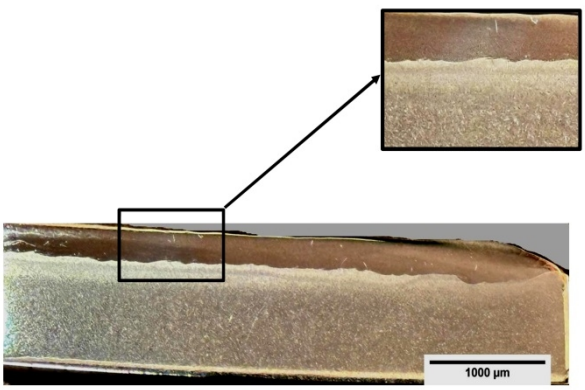
مطابق آنالیز خطی انجام شده، غلظت Cr بطور قابل ملاحظه‌ای از اولین لایه روکش به سمت سومین لایه افزایش می‌یابد. در حالی‌که غلظت Ni افزایش متوسطی را در همین راستا نشان می‌دهد. بر خلاف این دو عنصر ، غلظت C و Mo در امتداد

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.11]

خط اسکن نسبتاً ثابت می‌ماند و این عناصرکمترین مقدار نفوذ را نشان می دهند. این شیب غلظتی نشانگر یک پیوند متالورژیکی بین لایه‌های روکش‌کاری با فصل مشترک مشخص نسبت به زیرلایه است [18].

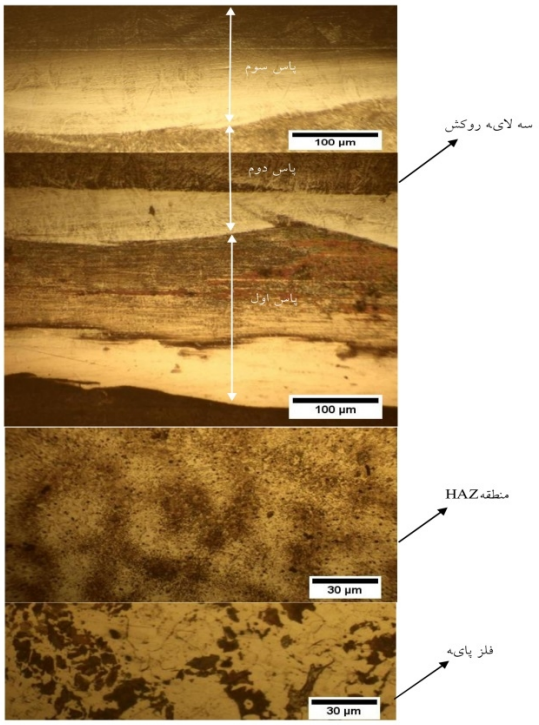
به منظور بررسی پیوستگی اتصال در نمونه‌های روکش‌کاری شده، تمامی نمونه‌ها در مقطع طولی ماکرواچ شدند و فصل مشترک بین لایه‌های روکش و فلز زمینه مورد بررسی قرار گرفته شدند. نتایج بررسی‌ها مشخص نمود که تمامی نمونه‌ها پیوستگی کاملی را در فصل مشترک لایه روکش و فلز از خود نشان دادند. شکل(5) تصویر ماکرواچ نمونه سه پاس روکش کاری شده (N3) را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل ملاحظه می‌شود پیوستگی لایه‌های روکش در فصل مشترکشان با زمینه کاملاً مشخص می‌باشد.

در همین راستا به منظور بررسی فازهای ایجاد شده و تغییرات ریزساختاری پس از اعمال روکش، بررسی ساختاری همه نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری انجام شد. شکل‌های(8-6) تغییرات ساختاری را در نمونه سه پاس روکش کاری شده (N_3) در لایه‌های روکش و در فلز پایه در بزرگنمایی‌های متفاوت نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در پاس سوم روکش طبق نمودار شفلر ساختار آستنیتی و فریتی، در منطقه HAZ ساختار پرلیت دگرگون شده و در منطقه فلز پایه ساختار فریتی پرلیتی بطور کامل مشهود است. لازم به ذکر است که تمامی نمونه‌های روکش کاری شده روند تغییرات ساختاری مشابهی را از خود نشان دادند. پیوستگی در منطقه اتصال لایه روکش با فلز پایه در کلیه تصاویر میکروسکوپی مشاهده شد.



شکل 5- تصویر اچ ماکرو در نمونه سه پاس روکش کاری شده (N3).

تغییرات سختی در لایه روکش ایجاد شده در تمامی نمونه‌ها با روش ریز سختی‌سنجی ویکرز بررسی شد و نتایج آن همراه با سختی اندازه‌گیری شده فلز پایه در شکل(9) ارایه شده است. همانطور که نتایج شکل(9) نشان می دهد با اعمال روکش بر روی نمونه‌ها ، نمونه‌های روکش کاری شده سختی بالاتری را نسبت به فلز پایه از خود نشان دادند و با افزایش تعداد لایه‌های روکش، سختی نیز افزایش می یابد. دلیل تغییرات سختی را می توان به تغییرات ریزساختار مرتبط دانست [1]. زیرا با اعمال روکش بر روی فلز پایه با ساختار فریتی- پرلیتی و افزایش تعداد لایه‌های روکش ریز ساختار تغییر یافته و با توجه به نتایج بدست آمده در نمودار شفلر، ریزساختار در آخرین لایه روکش به ریزساختار مفتول که فولاد دوفازی آستنیتی-فریتی است نزدیک می‌شود و به دنبال آن سختی نیز افزایش می‌یابد. همچنین نتایج ریز سختی نشان داد که در تعداد پاس‌های روکش یکسان، در تمام نمونه‌ها با افزایش دمای پیشگرم و تغییرات ریز ساختار بر اساس نمودار شفلر و تصاویر میکروسکوپی نوری و نزدیک شدن ساختار به فولاد دوفازی، سختی نمونه‌ها نیز افزایش یافته است.

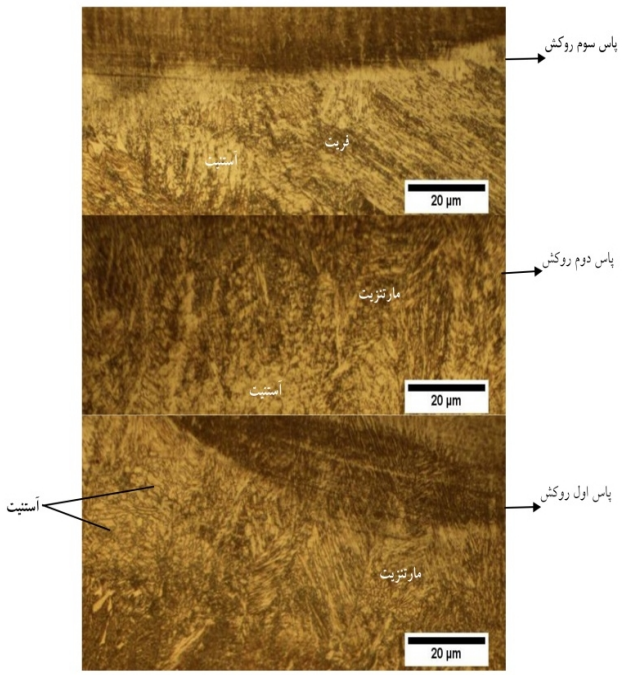


شکل 6- تصویر میکروسکوپی نوری از فلز پایه تا آخرین لایه روکش در نمونه سه پاس روکش کاری شده بدون دمای پیشگرم (N3).

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.11]

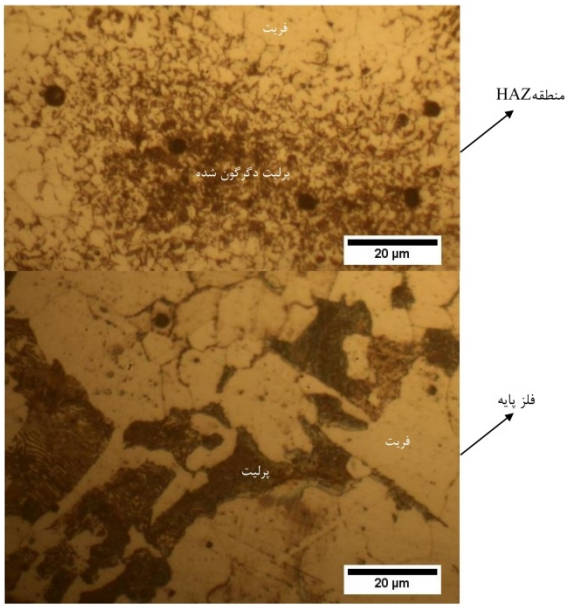
بیشترین سختی اندازه‌گیری شده مربوط به نمونه دو پاس روکش کاری شده در دمای پیشگرم 200°C و به مقدار 355 ویکرز می‌باشد. این نمونه یکی از نمونه هایی است که رقت در آن کاهش یافته است. با توجه به محل قرارگیری نمونه ها در نمودار شفلر، تنها نمونه‌ای که با دوپاس روکش کاری در منطقه دوفازی فریت- آستنیت قرار گرفته است، نمونه N2-200 می‌باشد که بیشترین مقدار تغییر در کروم و نیکل معادل را از خود نشان می‌دهد و با دارابودن مقدار فریت بیشتر (حدود 20 درصد حجمی) نسبت به سایر نمونه‌های سه پاس روکش کاری شده، ترکیب شیمیایی نزدیکتری به فولاد دوفازی ER2209 را دارا می‌باشد. لذا این نمونه بیشترین مقدار سختی را از خود نشان داده است.



شکل7 - تصویر میکروسکوپی نوری مناطق مختلف لایه‌های روکش کاری شده در نمونه سه پاس روکش کاری شده بدون دمای پیشگرم (N3).

به منظور بررسی چسبندگی اتصال لایه روکش بر زیرلایه فولاد ریختگی آزمایش خمش از نوع خمش ریشه بر روی همه نمونه‌ها انجام شد. شکل(10) مقایسه نمونه‌های یک (N1-100)، دو (N2-100) و سه پاس (N3-100)روکش کاری شده با دمای پیشگرم 100 °C را پس از انجام آزمایش خمش بر اساس استاندارد AWS B4 نشان می دهد. شکل(11) منحنی تغییرات زاویه خمش نمونه ها بر حسب تعداد پاسها را در شرایط دمایی پیشگرم متفاوت نشان می‌دهد.

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تعداد لایه‌های روکش مقدار خمش نمونه‌ها کاهش یافته و زاویه خمش (زاویه بین دو یال خم شده نمونه) در نمونه ها افزایش می‌یابد. براین اساس، بیشترین زاویه خمش در نمونه سه پاس روکش کاری شده مشاهده شد. در مطالعات تجربی و عددی متعدد، افزایش تعداد لایه‌های روکش یا تعداد پاس‌ها معمولاً باعث افزایش زاویه خمش قابل تحمل قبل از شکست شده است. از دلایل این امر می‌توان به بازتوزیع و کاهش تنش پسماند سطحی، تغییر و یکنواخت‌شدن ریزساختار فلز روکش و افزایش ضخامت ناحیه روکش که بار خمش را بهتر توزیع می‌کند، اشاره کرد [19].

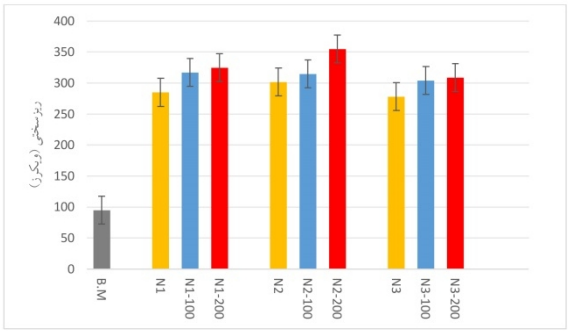


شکل 8- تصویر میکروسکوپی نوری از قسمت HAZ و فلز پایه در نمونه سه پاس روکش کاری شده بدون دمای پیشگرم (N3) .

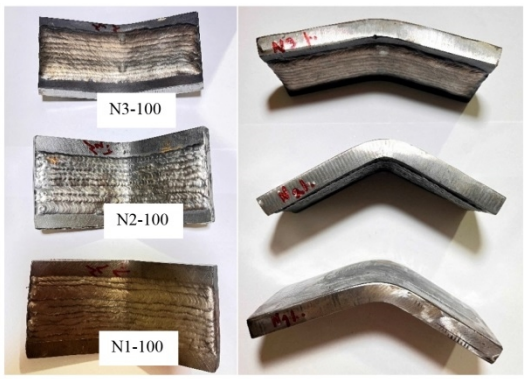
انتظار می‌رفت که پس از انجام آزمایش خمش، روند تغییرات زاویه خمش با افزایش تعداد پاسها یک روند صعودی باشد اما نتایج شکل(11) در نمونه‌های N2-100 و N3-200 یک روند کاهشی را نشان داد. برای بررسی دقیق تر، بر روی تمام نمونه‌ها قبل و پس از آزمایش خمش، آزمایش مایعات نافذ (PT) انجام شد. بر اساس آزمایش PT انجام گرفته قبل از انجام آزمایش خمش، هیچ گونه ترکی در نمونه‌های روکش‌کاری شده مشاهده

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.11]

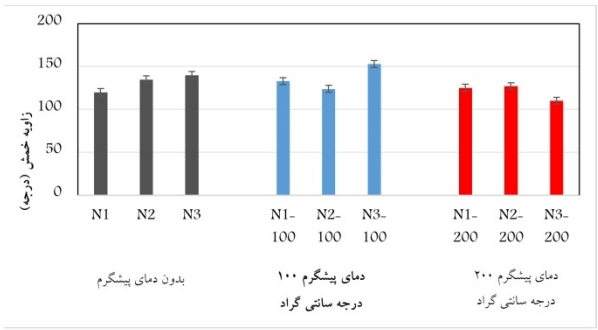
نشد، ولی بعد از انجام آزمایش خمش، ترک‌هایی بر روی نمونه‌های N2-100 و N3-200 ملاحظه شد که در شکل(12) قابل ملاحظه است.



شکل 9- مقادیر سختی بر روی نمو نه های روکش کاری شده در تعدادپاسها و دماهای پیشگرم متفاوت.

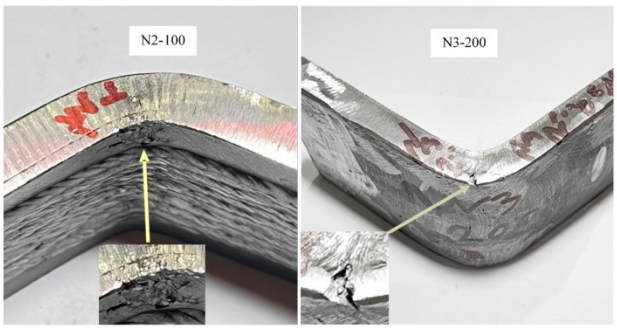


شکل 10- نمونه‌های یک پاس، دو پاس و سه پاس روکش‌کاری شده با دمای پیشگرم 100°C پس از انجام آزمایش خمش.



شکل 11- تغییرات زاویه خمش نمونه ها بر حسب تعداد پاس‌ها در شرایط دمایی پیشگرم متفاوت.

کاهش زاویه خمش این دو نمونه مذکور هم به دلیل همین ترک‌های ایجاد شده بر روی فلز پایه بوده است. ذکر این نکته حائز اهمیت است که ترک های ایجاد شده در نمونه‌های N3-200,N2-100 جزء عیوب موجود در لایه روکش اعمال شده، نمی‌باشد و چون این ترک‌ها در فلز پایه ایجاد شده‌اند مربوط به حفرات و عیوب موجود در قطعه ریختگی می‌باشند که در اثر اعمال بار در آزمایش خمش، ترک‌ها از محل‌های مربوط رشد کرده و باعث کاهش زاویه خمش در نمونه‌های مذکور شده‌اند.



شکل 12- ترکهای ایجاد شده برروی نمونه های N2-100 و N3-200 پس از انجام آزمایش خمش.

4-نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی اثر درجه رقت بر چسبندگی و پیوستگی اتصال لایه روکش ER2209 بر روی فولاد ریختگی AISI 1030 پرداخته شد. تعداد پاسها و دمای پیشگرم بعنوان متغییر در نظر گرفته شدند. در این راستا نتایج ذیل ، با تحلیل نتایج به دست آمده در مراحل مختلف تحقیق حاصل گردید:

- در تمامی نمونه‌ها، ساختار فولاد ریختگی بعنوان فلز پایه 80 درصد حجمی فریت -20 درصد حجمی پرلیت و با اعمال روکش از جنس فولاد زنگ‌نزن دوفازی آستنیتی-فریتی، ساختار ناحیه HAZ به فریت و پرلیت دگرگون شده تغییر کرده و در لایه‌های روکش‌کاری شده ساختار آستنیت و (10-20) درصد حجمی فریت می‌باشد.

-با افزایش تعداد پاس‌های جوشکاری در یک دمای پیشگرم ثابت، رقت کاهش می‌یابد . بیشترین درصد رقت را نمونه تک پاس در دمای پیشگرم C 100 یعنی نمونه (N1-100) به میزان 52/47 درصد از خود نشان داد نتایج بررسی تغییرات غلظت عناصر در نمونه‌های روکش‌کاری شده، توسط آنالیز اسکن خطی EDS انجام شده بر روی مقطع عرضی لایه‌های روکش کاری شده نشان داد که غلظت Cr بطور قابل ملاحظه‌ای از اولین لایه روکش به سمت سومین لایه افزایش می‌یابد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.11]

-نتایج ماکرواچ تمامی نمونه‌ها، پیوستگی کامل لایه‌های روکش را در فصل مشترکشان با زمینه نشان داد. با افزایش تعداد لایه‌های روکش، مقدار خمش نمونه‌ها کاهش یافته و زاویه خمش در نمونه‌ها افزایش یافت. براین اساس نمونه سه پاس روکش‌کاری شده بیشترین زاویه خمش را پس از انجام آزمایش خمش به مقدار 140 درجه به خود اختصاص داد. دو نمونه روکش کاری شده N2-100 و N3-200 به دلیل وجود ترک‌ها در منطقه فلز پایه روند تغییر زاویه خمش متفاوتی داشتند.

-با افزایش دمای پیشگرم در تعداد لایه‌های روکش یکسان، سختی افزایش یافت. بیشترین میزان سختی مربوط به نمونه N1-200 و به مقدار 325 ویکرز بود. همچنین در نمونه‌های دو و سه پاس روکش‌کاری بیشترین میزان سختی مربوط به نمونه‌های N2-200 و N3-200 و به ترتیب به مقدار 355 و 309 ویکرز بود.همچنین با افزایش تعداد لایه‌های روکش به دلیل کاهش رقت، سختی روند افزایشی از خود نشان داد.

منابع

1- Altafhussain G. Momim, Bharatlal C. Khatri, Mrunal K. Chaudhari, 2022, "Examination of weld cladding method for C.S. and S.S and their impacts-Review", SAMRIDDHI ,Vol. 14, Issue 3, 363-369, Online ISSN: pp.2454-5767.

2- H. Sabet, 1392, " Reconstruction of parts under wear by welding", Amir Technical Publication (in Farsi).

3- J. H. Chen, P.N. Chen, C.M. Chang, Y.Y. Chang, 2009,"Microstructure and wear properties of multicomponent alloy cladding formed by gas tungsten arc welding) GTAW (", Surface & Coating Technology, Vol.203, pp.3231-3234.

4- N. Murugan, R. Parmar, 1997," Stainless steel cladding deposited by automatic gas metal arc welding", Welding Journal-Including Welding Research Supplment, Vol.76, No. 10, pp.391.

5- H. Sabet, F.Abdi, A. KhoramPour, 2020, "Investigating the effect of dilution degree and interface layer on the wear resistance of Fe-Cr-C base hard coating layer welded by SMAW method on plain carbon steel", Scientific-Research Quarterly of Modern materials,11 (40), pp.133-139.

6- A.K. Verma, B.C. Biswas, P.Roy, De. S. Soren, S. Das, 2017,"An investigation on the anti-corrosion characteristics of stainless steel cladding", Indian Welding Journal, Vol.50, No. 3, pp. 52-63.

7- M.k. Saha, S. Das, 2018, "Gas Metal Arc Weld Cladding and its Anti-Corrosive Performance- A Brief Review", Athens Journal of Technology and Engineering , Vol. 5, No. 2, pp. 155-174.

8- B. Hider, M. Oechsner, U. Reisgen, J. Ellermeier, T. Engler, 2020, "Corrosion resistance and microstructure of weld duplex stainless steel surface layers on gray cast iron", Journal of thermal spray technology, Vol. 29, pp. 825-842.

9- C. J. Eli Jorge, M. F. A. Francisco, M. V. Romito, A. V. Vicente, C. G. Aparecido, 2024," Impact of Heat Input on the Cladding of Super Austenitic Stainless Steel Through the Gas Tungsten Arc Welding Process on ASTM A516 Grade 70 Steel", Coatings, 14, 1356. https://doi.org/10.3390/coatings14111356.

10-G. Ah-lung, A. Barchid, B. Boubeker, Y. samih, 2024,"Effects of Melting/Casting and Thermal Treatment Surrounding Gas Phase Composition on the Properties of a Low-Alloyed Steel",Metals , 14, 1317. https://doi.org/10.3390/met14121317.

11-L. Wang, H. Li, Y. Huang, K. Wang , M. Zhou, 2022,"Effect of Preheating on Martensitic Transformation in the Laser Beam Welded AH36 Steel Joint: A Numerical Study", Metals, 12, 127. https://doi.org/10.3390/met12010127.

12-Duplex Stainless Steels Welding Guidelines, Industeel ArcelorMittal, 2019.

13-D. Wicaksono, M. N. Ilman, N. A. Triwibowo, 2023, "Effect of preheating on mechanical properties and corrosion behavior of dissimilar GMAW joints between austenitic stainless steel and low carbon steel",AIP Conf. Proc. 2592, 030013 (https://doi.org/10.1063/5.0115111).

14-H. Sabet, 1393" Technology and metallurgy of welding", Amir Technical Publication (in Farsi).

15-Kang Amardeep Singh, Cheema Gurmeet Singh, Singla Shivali, 2014, Wear Behavior of Hardfacings on Rotary Tiller Blades, Bhai Gurdas Institute of Engineering & Technology, Sangrur148, Punjab, India.

16-Bozeman, S.C.; Isgor, O.B.; Tucker, J.D, 2022, 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 Coating Technology, 444, 128698.

17-H. Sabet, 1395, "The effect Cr/C ratio on microstructure and thermal fatigue life of Fe-Cr-C hard coating alloy ", Scientific-Research Quarterly of Modern Process in Material Enginering,10 (2).

18-Lippold, John C., and Damian J. Kotecki, 2005, "Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels", Wiley.

19-M.M. Shahzamanian, D.J. Lloyd , P.D. Wu, 2020, "Enhanced bendability in sheet metal produced by cladding a ductile layer", Materials today Communications, Vol23, 100952.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.11]