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

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

Volume 8, Number 2, 2023



The effect of filler metal on the mechanical and tribological properties of AISI 1.6959 steel joint using TIG welding process

M. M. Jafari[1], A. Afsari[1], A. Behgozin[2*], Sh. Heidari[3]

1- Department of Mechanical Engineering, Shiraz Branch - Islamic Azad University - Shiraz, Iran.
2-Department of Mechanical Engineering, Shiraz Bahonar Engineering College, Technical and Vocational University (TVU), Shiraz, Iran.
3-Bone and Joint Diseases Research Center, Shiraz University of Medical Sciences, Shiraz, Iran.

Received 12 December 2022 ; Accepted 28 January 2023

Abstract

In this study, the mechanical and tribological properties of 4 different types of welding filler metals were examined on a AISI 1.6959 steel (DIN35NiCrMoV12-5) by the Gas Tungsten Arc Welding process. The fillers used in this study include ER70S-6, ER80S-G, ER80S-Ni1, ER80S-B2. The main reasons for choosing these fillers in this study are their availability and close chemical composition to the base metal. To evaluate the weld and quality of weld joints, tensile, impact, hardness and abrasion tests performed on the samples and related microstructures was investigated by optical microscope. The results indicated that the presence of molybdenum and chromium alloying elements in ER80S-B2 filler and related microstructure at HAZ has led to an increase in weld strength up to 38 percent. The best and worst wear resistance obtained from the filler ER 80S-Ni1 and ER 70S-6 respectively. The best weld quality and mechanical properties were acquired in welding using ER 80S-B2 welding filler metal.

Keywords: Steel Weldability, Mechanical Properties, Tribology, Filler Metal, Gas Tungsten Arc Welding.

Corresponding Author: behgozin@yahoo.com

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

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

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال هشتم، شماره2، پاییز و زمستان 1401



اثر فلز پرکننده بر خواص مکانیکی و تریبولوژیکی اتصال فولاد AISI 1/6959 با استفاده از فرایند جوشکاری تیگ

محمدمهدی جعفری[1]، احمد افسری[1]، سیداحمد به گزین[2*]، شاهین حیدری[3]

1- گروه مهندسی مکانیک، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

2-گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی ومهندسی باهنر شیراز، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، شیراز، ایران.

3- مرکز تحقیقات بیماری‌های پیوند و استخوان، دانشگاه علوم پزشکی شیراز، شیراز، ایران.

دریافت مقاله: 1401/09/21 ؛ پذیرش مقاله: 1401/11/08

چکیده

در این پژوهش خواص مکانیکی و تریبولوژی جوش حاصل از چهار نوع فلز پرکننده مختلف برروی فولاد AISI 1/6959 از طریق جوش تیگ مورد بررسی قرار گرفت. فلزهای پرکننده مورد استفاده در این تحقیق شامل ER80S-B2 , ER80S-Ni1, ER80S-G, ER70S-6 بوده و ترکیبات شیمیایی نزدیک به فلزپایه دارند. به منظور بررسی خواص جوش و کیفیت اتصال، آزمون‌های کشش، ضربه، سختی و سایش با استفاده از دستگاه‌های کشش و ضربه و سایش انجام شده و ساختار میکروسکوپی نیز توسط میکروسکوپ نوری مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل حاکی از آن است که تغییرات فازی و حضور عناصر آلیاژی مولیبدن و کروم، منجر تغییر در خواص اتصال جوش شده است. بیشترین وکمترین مقاومت به سایش به ترتیب در جوش حاصل از فلزپرکننده ER 80S-Ni1 و ER 70S-6 و بهترین کیفیت جوش و خواص مکانیکی با استفاده از فلزپرکننده ER 80S-B2 حاصل گردید و استحکام کششی نیز تا حدود 38 درصد نسبت به فلزپایه بهبود یافت.

کلمات کلیدی: قابلیت جوشکاری فولاد، خواص‌مکانیکی، تریبولوژی، فلزپرکننده، جوش تیگ.

* پست الکترونیکی: behgozin@yahoo.com

1- مقدمه

جوشکاری یکی از مهم‌ترین فرایندهای ساخت و تولید در صنعت می‌باشد و در صنایع مختلف نظیر خودروسازی، نفت و گاز، پتروشیمی، تاسیسات، ساختمان و پل‌ها، حمل و نقل، کشتی سازی، صنایع ریلی، نیروگاه‌ها، صنایع دفاعی و هوافضا، محصولات پزشکی، الکترونیکی و تجهیزات دقیق و غیره کاربردهای فراوانی دارد. اتصال فلزات با ترکیب شیمیایی، خواص فیزیکی و مکانیکی متفاوت باعث پیدایش مشکلات زیادی در طول فرایند جوشکاری یا بعد از آن می‌گردد. این

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

اختلاف ترکیب شیمیایی می‌تواند بین دو فلزپایه یا بین فلزات پایه با فلزپرکننده باشد که در نتیجه ترکیب فلزجوش متاثر از تمامی اجزا تشکیل‌دهنده آن خواهد بود. این ترکیب شیمیایی با توجه به طراحی اتصال، نوع فرایند جوشکاری و فلزپرکننده و میزان اختلاط و دستورالعمل جوشکاری تغییر می‌کند. در نتیجه این عوامل و همچنین هرگونه عملیات حرارتی فلزجوش باید از قبل مشخص گشته و قبل از تولید به طور صحیحی ارزیابی واجرا شود. هدف اصلی از جوشکاری فلزات غیرهم‌جنس نیز ایجاد اتصالی است که الزامات شرایط کاری را برآورده می‌کند. اثر نوع فلاکس فعال کننده سطحی بر عرض گرده وعمق جوش و پیچیدگی زاویه‌ای در روش تیگ توسط امینی وهمکاران مورد بررسی قرار گرفت و دونوع فلاکس ZrO_2 و TiO_2 مورد بررسی قرار گرفته و بیشترین سختی در حالت استفاده از 90 درصد اکسید تیتانیوم وکمترین سختی در حالت استفاده از 90 درصد ZrO_2 بدست آمد. مشخص شد که فلاکس می‌تواند بر عمق وعرض جوش و اندازه دانه و سختی اثر بگذارد.[1]. یکی از روش‌های رسوب جوش بر روی یک فلز دیگر از طریق عملیات روکش کاری بر روی قطعات انجام می‌گیرد تا ضمن بهبود خواص سطح سائیده شده، ابعاد آن نیز بزرگتر شده و به مقدار اولیه خود رسیده و مقاومت سطح در مقابل سائیدگی، ضربه، حرارت و محیط‌های خورنده بهبود یابد. روش‌های گوناگونی از قبیل پرکردن یا بازسازی، لایه دادن توسط جوشکاری و فلزپاشی برای عملیات پوشش سطح وجود دارد که غالباً یکی از اقتصادی‌ترین روش‌ها برای بازسازی قطعات مستهلک و افزایش عمر قطعات تازه به کار گرفته شده می‌باشد. عواملی از قبیل میزان رقت، ناخالصی‌ها و آلودگی‌ها، عملیات حرارتی، ظاهر سطح و تنش‌های حرارتی باید در عملیات سطحی کنترل شوند [2].

در پژوهشی توسط دهملایی وهمکاران در جوشکاری قوسی تنگستن-گاز با جریان پالسی، [3]، اثر فلزات پرکننده مختلف بر خواص اتصال غیرمشابه فولاد APISl-X80 به فولاد DSS-2205 بررسی شد. بدین منظور از فلزات پرکننده ER2209، ER309L و KJS-124 استفاده شده است. نتایج نشان داده که ریزساختار در نمونه‌های جوشکاری شده تابع نوع الکترود بوده و انرژی ضربه ای و مقدار فریت با تغییر الکترود تغییر کرده و بالاترین انرژی ضربه ای مربوط به الکترود ER-2209 و ER-309 می‌باشد.

نصیری و همکاران [4] تأثیر حالت جوش و فلزپرکننده بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصالات غیر مشابه فولاد ترمومکانیکی S900MC به فولاد کربنی St52 با روش جوشکاری تیگ را مورد بررسی قرار داده اند. جوشکاری در دو طرح مختلف آماده سازی نمونه‌ها با شیار V و مربعی شکل به ترتیب با و بدون استفاده از فلزپرکننده ER70S انجام شد. یک ریزساختار بینیتی در فلزجوش نمونه‌های متصل شده در حالت جریان پیوسته مشاهده گردید. در حالی‌که ریزساختار فلزجوش در حالت جریان پالسی و استفاده از فلزپرکننده از فریتی به مارتنزیتی تمپر شده در طراحی شیار V تغییر یافت. در نرخ کرنش‌های عادی، هیچ تمایز قابل توجهی بین استحکام تسلیم و استحکام کششی اتصالات مختلف با تغییر نوع جریان و نوع آماده سازی نمونه‌ها وجود نداشت، با این حال، میزان تغییر طول نسبی اتصالات با جریان پیوسته بهتر از اتصالات با جریان پالسی بود. افزایش نرخ کرنش منجر به بهبود شدید استحکام تسلیم و کششی اتصالات جوش داده شده در حالت پیوسته و بدون استفاده از فلزپرکننده شد.

در تحقیقی دیگر رفتار سایشی جوش حاصل از فرایندهای مختلف جوشکاری SMAW، GMAW و FCAW مورد بررسی قرار گرفت و فرایند تیگ یا GMAW کمترین میزان مقاومت به سایش و سختی 200 ویکرز را از خود نشان داد. در نهایت، پوشش کاری مجدد با استفاده از فرایند FCAW بهترین نتیجه را برای قطعه‌ای به شکل محور و از جنس فولاد AISI 4140 ایجاد کرد که این گزینه در طول عمر محور نیز بسیار تاثیر گذار بود [5].

تاثیر فلزپرکننده بر ریزساختار و عملکرد مکانیکی با روش جوشکاری با الکترود تنگستن با گاز محافظ (تیگ) روی نمونه اینکونل 625 در دمای اتاق و دمای بالا توسط عباسی و درخشنده حقیقی [6] مورد بررسی قرار گرفتند. هدف آن‌ها

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

ارزیابی تأثیر فلزات پرکننده ER321 و ERNiCr-3 بر عملکرد مکانیکی اتصالات جوش داده شده بود. نشان داده شده که فلزپرکننده ER321 در مقایسه با ERNiCr-3 از خواص کششی و ضربه‌ای قابل توجهی برخوردار نیست. ازدیاد طول در اثر کشش برای جوش‌های ERNiCr-3 (13,1 درصد) بیشتر از اتصالات ER321 (10,2 درصد) بود و میانگین چقرمگی ضربه جوش‌های ERNiCr-3 حدود دو برابر بیشتر از ER321 گزارش شد.

تاثیر سایش ضربه‌ای و مکانیزم تخریب اتصالات ایجاد شده در ریل راه آهن با روش جوشکاری جرقه‌ای لب به لب مورد بررسی قرار گرفته و نتایج نشان می‌دهد که مقاومت به سایش ضربه‌ای جوش ریل بالاتر از مواد خود ریل می‌باشد. میزان حجم مواد حاصله در این نوع تست سایش تابع تعداد سیکل ونیروی ضربه‌ای بوده و بدلیل ساختار متفاوت جوش با ساختار خود ریل، مسیر رشد ترک نیز متفاوت خواهد [7].

تأثیر پارامترهای جوشکاری بر خواص مکانیکی و متالورژیکی جوشکاری فولاد زرهی با استفاده از جوشکاری تیگ با دو فلز پرکننده AWS A5.18 ER70S-6 و AWS A5.9 ER307 توسط مورسی و همکاران [8]، مورد مطالعه قرار گرفته است. در حالی که شیارهای اعمال شده به شکل V و مخروطی بودند. مشاهدات نشان می‌دهد که فلزپایه ساختار مارتنزیتی دارد، اما ریزساختارهای فلزجوش به فلزپرکننده فولاد کربنی یا فولاد آستنیتی بستگی دارد. فلزجوش با شیار مخروطی با فلزپرکننده فولاد آستنیتی، یک ریزساختار مارتنزیتی/آستنیتی را نشان می‌دهد، و این با نمودار شفلر مطابقت دارد و درصد رقت بالابوده و حدود 35 درصد را نشان می‌دهد. بنابراین منجر به افزایش قابل توجهی در استحکام اتصال و مقاومت بالاتر در برابر ضربه خواهد شد.

اثر ترکیب فلزپرکننده بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد API 5L X65 جوش داده شده با قوس زیرپودری با چهار الکترود توسط بیدختی و پورمنش [9]، مورد بررسی قرار گرفته است. مشاهدات ریزساختاری نشان داده که هر چه فریت سوزنی شکل بیشتری در ریزساختار تشکیل شود، خواص مکانیکی بهتری حاصل می‌گردد. نمونه‌های حاوی مقادیر بیشتری از تیتانیم و بور دارای انرژی ضربه و استحکام بالاتری بودند و دمای انتقال نرم به ترد نیز با افزایش مقدار فریت سوزنی کاهش می‌یابد. افزودن تیتانیم، باعث ایجاد اجزای اکسیدی ریز شده و جوانه‌زایی فریت سوزنی را در ریزساختار تسهیل می‌نماید.

اسداللهی و همکارن [10] به بررسی اثرات فلزات پرکننده 25Cr-35Ni و 35Cr-45Ni بر جوش‌پذیری، ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد مقاوم در برابر حرارت 25Cr-35Ni پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که ریزساختار در ناحیه تحت تأثیر حرارت در هر دو مورد تا حد زیادی تحت تأثیر گرمای ورودی بر طول فرایند جوشکاری قرار می‌گیرد. انحلال کاربید به طور قابل توجهی در هر دو مورد مشاهده شد و در هیچ یک از فلزهای پرکننده نشانه‌ای از تشکیل فاز سیگما در جوش وجود نداشت که بدلیل نیکل بالای فلزات پرکننده است. همچنین نتایج نشان داد که خواص مکانیکی در هر دو مورد توسط ناحیه تحت تاثیر حرارت کنترل می‌شود.

تأثیر فلزات پرکننده بر خواص مکانیکی جوش‌های غیرمشابه بین سوپر آلیاژ اینکونل 625 و فولاد زنگ نزن سوپر آستنیتی AISI 904L با استفاده از جوش قوسی تیگ با جریان پیوسته با استفاده از فلزهای پرکننده ERNiCrMo-4 و ERNiCrCoMo-1 توسط پارابو و همکاران [11] انجام شده است. خواص مکانیکی و قابلیت جوشکاری نتایج آزمایش کشش تایید کرد که شکستگی در فلزپایه AISI904L صرف نظر از فلزپرکننده مورد استفاده برای همه آزمایش‌ها رخ داده است. مقادیر سختی در سمت جوش اینکونل 625 برای پرکننده ERNiCrMo-4 به دلیل وجود عناصر تقویت کننده مانند W، Mo، Ni و Cr بیشتر مشاهده شد.

آزمایش ضربه تأکید کرد که جوش‌هایی که از فلزپرکننده ERNiCrMo-4 استفاده می‌کنند، چقرمگی ضربه‌ای بهتری را در دمای اتاق ارائه می‌دهند. نتایج آزمایش خمش نشان داد که جوش‌هایی که از این پرکننده‌ها استفاده می‌کنند، شکل‌پذیری خوبی را بدون ترک از خود نشان می‌دهند.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

هدف از این مقاله، بررسی جوش‌پذیری فولاد کم آلیاژ AISI 1/6959 می‌باشد. در این راستا لازم است آزمون‌های متالورژیکی و مکانیکی متعددی از جمله آزمون کشش، آزمون ضربه، سختی‌سنجی و آنالیز شیمیایی به کار گرفته شود تا صحت پارامترهای انتخاب شده، مورد ارزیابی قرار گیرند. در بسیاری از موارد در حین فرایند تولید و یا سرویس‌دهی قطعات، آسیب‌های سطحی به قطعات وارد می‌شود که تعمیر آن‌ها با استفاده از فرایند جوشکاری و حصول خواص مکانیکی نزدیک به قطعه اصلی، منجر به جلوگیری از صرف هزینه و زمان مازاد می‌شود که در این مقاله بررسی می‌شود.

2- مواد و روش تحقیق

برای انجام عملیات جوشکاری، قطعه‌ای از جنس فولاد 1/6959 که به DIN 35NiCrMoV12-5، نیز معروف است، انتخاب گردید که در دسته فولادهای کم آلیاژ قرار دارد. این فولاد کاربرد زیادی در محور ژنراتورها و روتور توربین‌ها دارد. عمده ساختار این فولاد بعد از عملیات آهنگری، مارتنزیت و بینیت پایینی بوده و دارای استحکام تسلیم حدود 1500 مگاپاسکال می‌باشد و این ناشی از میکروساختار مارتنزیت و بینیت و ریزدانگی ناشی از عملیات فورج است. در این فولاد انواع کاربیدهای مختلف از نوع M_6C, M_3C, $M_{23}C_6$, M_7C_3, M_2C از عناصر Mo، Ni، V، Fe و Cr تشکیل می‌شود. همین طور نیتریدهای تیتانیوم، وانادیم و آلومینیم نیز تشکیل می‌گردد. این کاربیدها و نیتریدها باعث متوقف شدن مرزها در حین تبلور مجدد و رشد دانه‌های آستنیت می‌شوند. این فولادها به طور معمول در حالت کونچ و تمپر با ساختار مارتنزیتی و بینیتی در مصارفی نظیر مخازن تحت فشار، مته‌های حفاری، لوله‌های توپ و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند و درکاربردهای نظامی و تولید اجزاء سلاح کاربرد ویژه‌ای دارند [12].

در این تحقیق از 8 ورق با ابعاد 10×50×100 میلی‌متر از جنس فولاد 1/6959 و همچنین از 4 دیسک با قطر 55 میلی‌متر و ضخامت 10 میلی‌متر از همین جنس استفاده گردید. ورق‌ها جهت تهیه نمونه‌های تست کشش، ضربه و سختی سنجی و نمونه‌های دیسکی شکل جهت تهیه نمونه‌های تست سایش مورد استفاده قرار گرفتند. برای انجام تست کشش و ضربه بر روی نمونه‌ها و استفاده از هر فلزپرکننده جوشکاری، 2 ورق با ابعاد مذکور با استفاده از فرایند تیگ به صورت لب به لب جوش داده شدند، با توجه به اینکه به طور معمول فولاد DIN 35NiCrMoV12-5 در حالت فورج تولید می‌شود و این غیریکنواختی ساختار آثار منفی بر کیفیت جوش خواهد داشت، پیش از انجام مراحل جوشکاری، ورق‌ها تحت عملیات حرارتی نرمالیزه کردن قرار گرفتند تا ساختاری کاملا یکنواخت در آن‌ها حاصل شود. عملیات حرارتی نرمال کردن این فولاد در دمای 850 درجه سانتی‌گراد و به مدت 2 ساعت انجام شد.

برای انجام تست سایش بر روی نمونه‌ها، ورق‌های یک سمت دیسک‌ها با استفاده از فرایند تیگ و فلزهای پرکننده ER70S-6، ER80S-G، ER80S-B2 و ER80S-Ni1 جوشکاری به صورت پوششی انجام شدند. برای سادگی و اختصار از این پس از این فلزهای پرکننده به عنوان S6 و S-G و B2 و Ni1 در متن یاد می‌شود. در این پژوهش، به منظور مقایسه جوش‌پذیری، خواص مکانیکی و مقاومت به سایش جوش، از فلزهای پرکننده با جنس مختلفی استفاده گردید. فلزهای‌پرکننده مورد استفاده در این پژوهش با توجه به نزدیک بودن ترکیبات شیمیایی و خواص مکانیکی آن‌ها به فلزپایه و همچنین در دسترس بودن در بازار و صنعت ایران انتخاب شدند. هر چهار نوع فلزپرکننده مورد استفاده در دسته کم آلیاژی قرار می‌گیرند اما درصد عناصر آلیاژی آن‌ها محدود بوده و در عملیات جوشکاری با فرایندهای حفاظت شده با گاز (تیگ و میگ) یکی از پرکاربردترین فلزهای پرکننده محسوب می‌گردند. قابلیت جوشکاری این فلزهای پرکننده با توجه به درصد کربن پائین و عدم وجود عناصر آلیاژی، مطلوب است البته همین عدم وجود عناصر آلیاژی در این فیلرها باعث می‌شود که قابلیت جوشکاری این فلزهای پرکننده به فولادهای آلیاژی چندان مطلوب نباشد اما استفاده از آن‌ها جهت جوشکاری فولادهای کربنی بسیار توصیه می‌شود. حضور عناصر منگنز و سیلیسیم در فلزهای پرکننده باعث می‌شود تا از

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

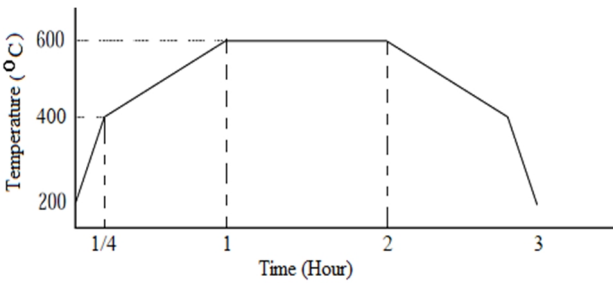
به وجود آمدن تخلخل در حین جوشکاری جلوگیری بـه عمـل آید. خواص مکانیکی و ترکیبات شیمیایی فلزهای پرکننـده بـه ترتیب در جداول (1 و 2) ارائه شده است.

جدول1- خواص مکانیکی فلزهای پر کننده.

فلز پرکننده	پارامترها		
	استحکام کششی MPa (PSi) -	تنش تسلیم - MPa (PSi)	درصد تغییرطول
ER70S-6	480 (70000)	400(58000)	22
ER80S-G	550 (80000)	470(68000)	a
ER80S-Ni1	550 (80000)	470(68000)	24
ER80S-B2	550 (80000)	470(68000)	19

a: این مقدار در استاندارد دقیق مشخص نشده است و توافق بین خریدار و سازنده می‌باشد.

متغیرهای مورد استفاده در این تحقیق اعم از نوع فلزپرکننده و ولتاژ و جریان و سرعت جوشکاری در جدول(3) ارائه شده است. پیش‌گرم نمودن قطعه در دمای 200 درجه سانتی‌گراد با توجه به ترکیب شیمیایی فلزپایه در نظر گرفته شد، پس از اتمام عملیات جوشکاری، عملیات حرارتی برای تنش زدایی مطابق چرخه شکل(1) انجام گردید و جهت اطمینان از وجود هرگونه عیوب ناشی از فرایند جوشکاری، بر روی آن تست غیرمخرب بازرسی چشمی انجام گردید.



شکل1- شماتیک عملیات حرارتی پس از جوشکاری.

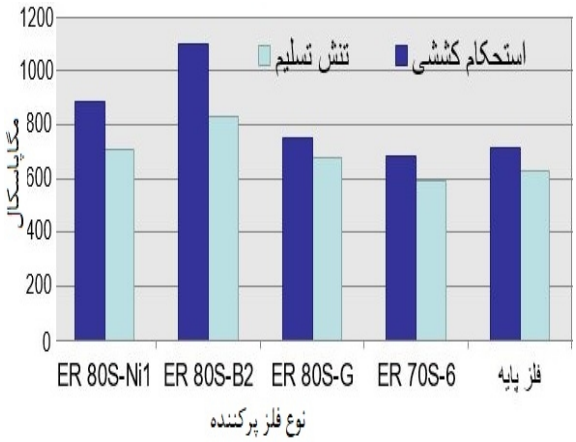
آزمون‌های کشش، ضربه، سختی، سایش و متالوگرافی به منظور بررسی مقاومت به سایش و خواص مکانیکی جوش انجام شده برروی نمونه‌هایی از جـنس فـولاد 1/6959 انجـام گرفـت. در خصوص سختی با توجه نیاز به بدست آوردن نمودار سـختی و همچنین سختی سنجی در نقـاط بـا فاصـله کـم، روش سـختی سنجی ویکرز انتخاب گردید. در مورد تست کشش، تهیه نمونه استاندارد مطـابق اسـتاندارد ASTM A370 صـورت پـذیرفت. متالوگرافی ساختار به کمک میکروسـکوپ نـوری و اچ کـردن سطح توسط محلول نایتال 2 درصد صورت پذیرفت. بـا توجـه به سختی پیش بینی شده و شکل نمونـه‌هـا بهتـرین روش و در دسترس‌ترین روش، تست سایش پین برروی دیسک مـی‌باشـد که در این پژوهش به کار گرفته شده است.

3- بررسی و تحلیل نتایج

در این پژوهش، خواص مکانیکی و مقاومت به سـایش جـوش فولاد DIN 35NiCrMoV12-5 با اسـتفاده از فلزهـای پرکننـده S6، S-G، B2 و Ni1 مورد ارزیابی قرار گرفته است.

3-1- تست کشش

به منظور بررسی خواص مکانیکی اتصال جوش حاصل از فلزهای پرکننده ذکر شده آزمون کشش انجام شد. از هرکدام از جوش های حاصل شده 2 نمونه تست کشش مطابق استاندارد ASTM A370 تهیه گردید. ابعاد نمونه‌های تهیه شده با توجه به محدودیت ابعادی نمونه‌های اولیه، از نوع اندازه کوچک انتخاب شده است. نتایج آزمون کشش برای فلزهای پرکننده جوشکاری مختلف در جدول(4) ارائه شده است. همان طور که در جدول(4) و شکل(2) نشان داده شده است، بیشترین استحکام در جوشکاری با فلزپرکننده B2 حاصل شده است.



شکل2-نمودار نتایج تست کشش با فلزهای پرکننده مختلف.

این فیلر استحکام تسلیم وکششی را نسبت به فلزپایه به ترتیب به اندازه 32 و 48 درصد افزایش داده است. علت این استحکام

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

جدول 2- ترکیب شیمیایی قطعه و فلزهای پرکننده.

جنس قطعه و فلز پرکننده	درصد وزنی عناصر										
	C	Mo	Cr	Ni	S	P	Si	Mn	V	Cu	Fe
فولاد کم آلیاژ- ۱،۶۹۵۹	0.38	0.40	1.36	2.39	0.002	0.005	0.27	0.64	0.07	--	Balance
ER70S-6	0.06-0.15	مجموع عناصر کمتر از ۰/۵ درصد می‌باشد.			0.035	0.025	0.8-1.15	1.4-1.85	-	0.5	Balance
ER80S-G	0.08-0.18	--	-	-	0.035	0.025	0.8-1.15	1.4-1.85	-	0.25-0.45	Balance
ER80S-Ni1	0.12	0.35	0.15	0.8-1.1	0.025	0.025	0.4-0.8	1.25	0.05	0.35	Balance
ER80S-B2	0.07-0.12	0.4-0.65	1.2-1.5	0.2	0.025	0.025	0.4-0.7	0.4-0.7	-	0.35	Balance

جدول 3- متغیرهای جوشکاری استفاده شده.

شماره نمونه	نوع جوش	نوع فلز پرکننده	جریان (A)	ولتاژ (V)	سرعت جوشکاری (mm/sec)	زاویه الکترود (درجه)	قطر فلز پر کننده (mm)
1	لب به لب	ER70S-6	150	35	1.8	60	2.4
2	لب به لب	ER80S-G	150	35	1.8	60	2.4
3	لب به لب	ER80S-Ni1	160	40	2.0	60	2.4
4	لب به لب	ER80S-B2	160	40	2.0	60	2.4

حضور عناصر آلیاژی کروم و مولیبدن موجود در این فلزپرکننده و در آلیاژ فلزپایه است، زیرا این دو عنصر جزء عناصر استحکام بخش در فولاد هستند که حضور آن‌ها استحکام جوش را افزایش می‌دهد.

جوش حاصل از فلزپرکننده Ni1 نیز استحکام خوبی دارد که می‌توان این استحکام مطلوب را ناشی از حضور عنصر استحکام بخش نیکل دانست. در نمونه‌های جوش شده با این الکترود استحکام تسلیم وکششی به ترتیب 12 و 25 درصد نسبت به فلزپایه بیشتر شده‌اند. در سه نمونه‌ای که حداقل استحکام کششی فلزپرکننده به صورت اسمی 80Ksi است، شکست در ناحیه تحت تاثیر حرارت رخ داده است. در صورتی‌که فلزپرکننده جوشکاری مناسب انتخاب شده و قابلیت جوشکاری مطلوب باشد، باید شکست در فلزجوش رخ ندهد. چنانچه ملاحظه می‌شود نتایج تست کشش فلزپایه بدون جوشکاری نیز در جدول(4) ارائه شده است. [13]. به منظور انطباق این نتایج با ترکیب شیمیایی و صحه‌گذاری نتایج فوق، ترکیب شیمیایی فلزجوش در دو نمونه جوشکاری شده با فلزهای پرکننده B2 و Ni1 در جدول(5) ارائه شده است.

علت تفاوت ترکیب شیمیایی فلزجوش با فلزپایه، مربوط به ترکیب شیمیایی فلزهای پرکننده، تعداد پاس جوشکاری و درجه رقت بالای مربوط به روش جوشکاری است. درجه رقت به مفهوم درصد فلزپایه در جوش تقسیم بر درصد فیلر در جوش در روش جوشکاری تیگ بزرگ بوده و در نتیجه حوضچه جوش از نظر ترکیب شیمیایی کمتر تحت تاثیر فلزپرکننده قرار می‌گیرد. کمترین استحکام کششی و تسلیم هم مربوط به حالت جوشکاری با فیلر S6 بود که در حد فلزپایه است. از نظر میزان تغییر طول نسبی نیز نمونه‌های فلزپایه و S6 بیشترین قابلیت انعطاف را داشتند. نمونه مرتبط با B2 تغییر طول نسبی متوسطی داشته ولی نمونه S-G که استحکام متوسطی داشت حداقل تغییر طول نسبی را از خود نشان داده است. می‌توان یک ارزیابی تقریبی با استفاده از دیتاهای جدول(4) برای مقایسه انرژی شکست بین 4 نمونه انجام داد.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

جدول 4- نتایج تست کشش فلزهای پرکننده مختلف جوشکاری.

جنس نمونه و نوع فلزهای پرکننده	تنش تسلیم – MPa		استحکام کششی – MPa		درصد تغییر شکل نسبی		ناحیه شکست
	1	2	1	2	1	2	
فلز پایه	630	635	710	720	15.4	15.35	---
ER70S-6	595	590	680	670	15.1	15.2	جوش
ER80S-G	685	670	735	767	12.5	12.3	ناحیه متاثر از حرارت
ER80S-Ni1	710	700	895	878	13.3	14	ناحیه متاثر از حرارت
ER80S-B2	820	840	1050	1157	14.7	14.6	ناحیه متاثر از حرارت

جدول 5- ترکیب شیمیایی فلزجوش حاصل از بکارگیری دو نوع فلزپرکننده.

فلز پرکننده	درصد وزنی عناصر								
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V
ER80S-B2	0.056	0.63	0.41	0.003	0.003	0.40	1.4	0.43	0.02
ER80S-Ni1	0.15	0.92	0.35	0.005	0.005	0.85	0.42	0.29	0.01

انرژی شکست در واقع سطح زیر منحنی تنش-کرنش است ولی اگر با تقریب آن را معادل استحکام کششی متوسط ضربدر تغییر طول نسبی متوسط از جدول(4) درنظر بگیریم انتظار داریم که در 4 الکترود بیشترین انرژی مربوط به B2 و سپس Ni1 و S6 و S-G باشد.

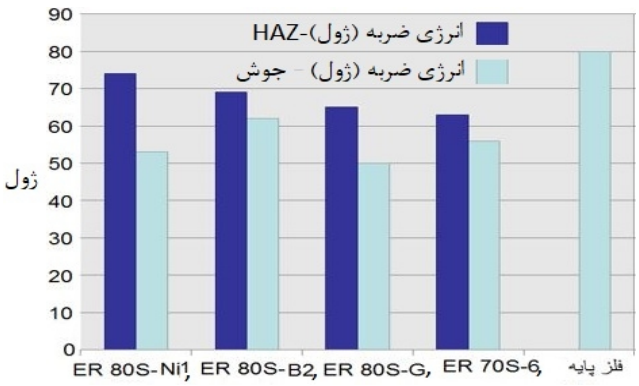
3-2- تست ضربه

به منظور بررسی مقاومت به ضربه و چقرمگی یا انرژی شکست فلزهای پرکننده مختلف، آزمون ضربه برروی نمونه‌های جوش انجام شده با ابعاد 55 و مقطع 10×10 انجام گرفت. برای بدست آوردن انرژی شکست در منطقه تحت تاثیر حرارت شکاف در نمونه ضربه در این ناحیه ایجاد شد. برای این منظور از هر نمونه جوشکاری شده، 2 نمونه تست ضربه با شکاف در مرکز جوش و 2 نمونه با شکاف در ناحیه مجاور جوش تهیه شد. نتایج تست ضربه در جدول(6) و نمودارهای مربوطه در شکل(3) ارائه شده است.

اگر متوسط نتایج 4 آزمایش ضربه مربوط به هر نمونه را به عنوان انرژی متوسط شکست محاسبه کنیم خواهیم دید که اولاً بیشترین انرژی جذب شده مرتبط با ضربه مربوط به نمونه فلزپایه است. بعداز فلزپایه بیشترین انرژی ضربه‌ای یا چقرمگی مربوط به نمونه جوش‌شده با فیلر B2 و سپس Ni1 و در نهایت S6 و S-G می باشد که در تطابق دقیق با پیش بینی مربوط به تست کشش می‌باشد. یادآوری می‌شود که تست‌های کششی عمود بر خط جوش تهیه شده و در بر دارنده خواص منطقه تحت تاثیر حرارت و منطقه جوش بصورت توام بوده و خواص کلی جوش انجام شده را نشان می‌دهد.

جدول6- نتایج آزمون ضربه مربوط به فیلرهای مختلف.

انرژی ضربه فلزپایه-ژول	78		81	
انرژی ضربه پس از جوشکاری	ناحیه HAZ		ناحیه جوش	
	1	2	1	2
ER70S-6	65	61	58	55
ER80S-G	61	70	49	51
ER80S-Ni1	72	76	52	54
ER80S-B2	68	71	60	63



شکل3- نمودار انرژی شکست در آزمون ضربه مربوط به فلزهای پرکننده مختلف.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

بطور کلی اگر متوسط نتایج 4 آزمایش ضربه مربوط به هر نمونه را به عنوان انرژی متوسط شکست محاسبه کنیم خواهیم دید که اولاً بیشترین انرژی جذب شده مرتبط با ضربه مربوط به نمونه فلزپایه است. بعداز فلزپایه بیشترین انرژی ضربه‌ای یا چقرمگی مربوط به نمونه جوش‌شده با فیلر B2 و سپس Ni1 و در نهایت S6 و S-G می‌باشد که در تطابق دقیق با پیش بینی مربوط به تست کشش می باشد.

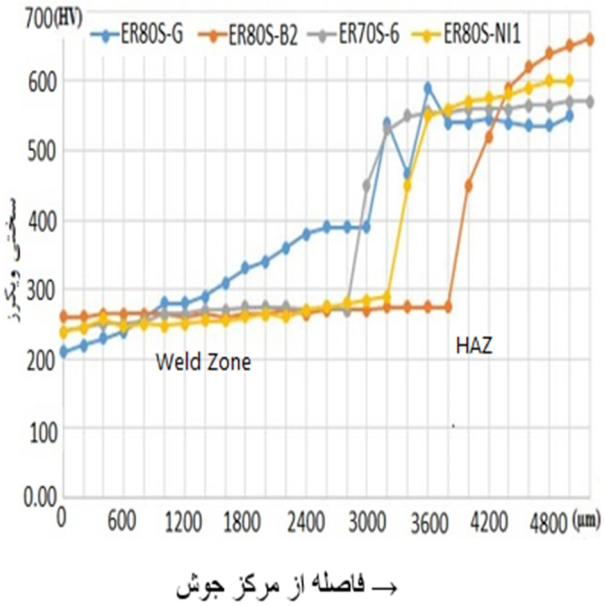
یادآوری می‌شود که تست‌های کششی عمود بر خط جوش تهیه شده و در بر دارنده خواص منطقه تحت تاثیر حرارت و منطقه جوش بصورت توام بوده و خواص کلی جوش انجام شده را نشان می دهد. بطور کلی انرژی شکست در تمامی نمونه‌ها در منطقه HAZ بالاتر از منطقه جوش است. در منطقه تحت تاثیر حرارت کمترین انرژی شکست مربوط به نمونه S-G می‌باشد. زیادتر بودن انرژی شکست در نمونه‌های ضربه با شیار ایجاد شده در منطقه تحت تاثیر حرارت نشان دهنده تغییرات فازی مطلوب در اثر جوشکاری و عملیات حرارتی بعدی در این منطقه و ساختار ضعیف موجود در منطقه جوش می‌باشد.

وجود کمترین انرژی ضربه‌ای و تغییر طول نسبی در نمونه جوشکاری شده با فیلر S-G نشانه وجود فاز سخت و احتمالاً غیریکنواخت و استعداد زیاد ساختار به توسعه ترک می‌باشد. بالاترین انرژی ضربه‌ای و استحکام کششی و تغییر طول متوسط در نمونه B2 نشانه فاز سخت و در عین حال توزیع یکنواخت فازی می‌باشد.

تغییرات زیاد در اعداد انرژی ضربه‌ای در نمونه S-G (9 واحد اختلاف) در دونمونه تهیه شده از ناحیه متاثر از حرارت نشانه عدم یکنواختی ساختار در مناطق مختلف در طول جوش در این نمونه می‌باشد. نتایج تقریبی حاصل از تست کشش نیز در تطابق با نتایج تست ضربه است. در خصوص نمونه‌های جوشکاری شده، بیشترین انرژی ضربه مربوط به نمونه جوشکاری شده با فلزپرکننده B2 است که بدلیل تلفیق اثر سازنده تنش تسلیم، استحکام کششی و میزان تغییر شکل شکست بالا در این نمونه نسبت به نمونه‌های جوشکاری دیگر می‌باشد [13].

3-3- سختی سنجی

یکی از متغیرهای تعیین کننده در خواص مکانیکی اتصالات حاصل از جوش، سختی نواحی مختلف جوش از جمله سختی فلزپایه، ناحیه تحت تاثیر حرارت و فلزجوش است که باید یک ارتباط منطقی بین سختی، استحکام و ساختار این نواحی به دست آورد. میزان و نحوه تغییرات سختی در مناطق مرتبط با جوش می‌تواند در ارائه یک مدل از تغییرات فازی هم کمک کند با همین هدف سختی نواحی مختلف جوش در نمونه‌های جوشکاری شده با فلزهای پرکننده مختلف مورد بررسی و اندازه‌گیری قرار گرفت که نتایج آن در نمودارهای شکل(4) ارائه شده است، کلیه فاصله‌ها برحسب میکرومتر و سختی‌ها بر واحد ویکرز می باشد.



شکل4- سختی ویکرز برحسب فاصله از مرکز جوش برای نمونه‌های جوشکاری شده با فلزهای پرکننده مختلف.

نمودار سختی ویکرز برحسب فاصله از مرکز جوش برای نمونه‌های جوشکاری شده تا فاصله خاصی بدون تغییر بوده و بعد از آن رشد ناگهانی کرده ودر نهایت به منطقه سوم با تغییرات سختی کم با سختی میانگین حدود 550 تا 650 ویکرز می‌رسد. در نمونه جوش شده با S-G منطقه پایدار اولیه از نظر سختی وجود ندارد بنابراین انتظار داریم که در منطقه جوش نمونه S-G ساختار میکروسکوپی متفاوت بابقیه نمونه‌ها بوده و

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

در سه نمونه دیگر ساختار مشابهی را در منطقه ذوب داشته باشیم. افزایش سختی ناشی از تغییرات ساختار نمونه در ناحیه تحت تاثیر حرارت و فلزجوش می‌باشد. ایجاد ساختارهای سخت نظیر مارتنزیت و بینیت و ویدمن اشتاتن در فلزجوش، افزایش سختی را در پی خواهد داشت [5].

نمونه جوشکاری شده با فیلر B2 بیشترین سختی در ناحیه تحت تاثیر حرارت را نشان می‌دهد. یاد آوری می‌شود که بیشترین استحکام کششی وتسلیم و بیشترین انرژی ضربه‌ای هم مربوط به همین نمونه بود. سختی زیاد در کنار انرژی ضربه‌ای زیاد نشانه وجود یک فاز قوی با توزیع یکنواخت و مقاوم در برابر توسعه ترک است. افزایش سختی در نمونه‌ها همچنین ناشی از تغییرات ساختار نمونه در ناحیه تحت تاثیر حرارت و فلزجوش می‌باشد. ترتیب حداکثر سختی در 4 نمونه الکترود به ترتیب B2 و Ni1 و S6 و S-G است که دقیقاً همان ترتیب ذکر شده برای انرژی ضربه‌ای جذب شده و مطابق با افزایش استحکام کششی و تسلیم است هر چند در ترتیب S6 و S-G معکوس می شود که بدلیل تاثیرگذاری توام استحکام ومیزان تغییر شکل بر چقرمگی است. سختی حداقل در فیلر S6 می‌تواند به دلیل عدم حضور عناصر آلیاژی در این فیلر باشد، لیکن تغییرات سختی با فیلر S-G می‌تواند ناشی از تغییرات فازی باشد.

تنها در این نمونه در منطقه جوش سختی ثابت نداشته و سختی با دور شدن از مرکز جوش در حال افزایش است. سختی یکسان در مرکز جوش 3 نمونه دیگر ناشی از ساختار یکسان جوش در این نمونه‌ها است. کمتر بودن سختی جوش نسبت به مناطق خارج از جوش نیز بدلیل تغییر فازها به فاز نرم‌تر در اثر جوشکاری می باشد که در جوشکاری‌های ذوبی امری متداول است. در یک جمع‌بندی کلی، چنانچه در نمودارها مشخص شده است، سختی فلزجوش در 3 نمونه تقریبا نزدیک به هم است و به محض ورود به ناحیه تحت تاثیر حرارت، سختی به شدت افزایش می‌یابد در اکثر تحقیقات مشابه نیز سختی ناحیه تحت تاثیر حرارت بالاتر از فلزپایه و فلزجوش بوده است [5].

3-4- تست سایش

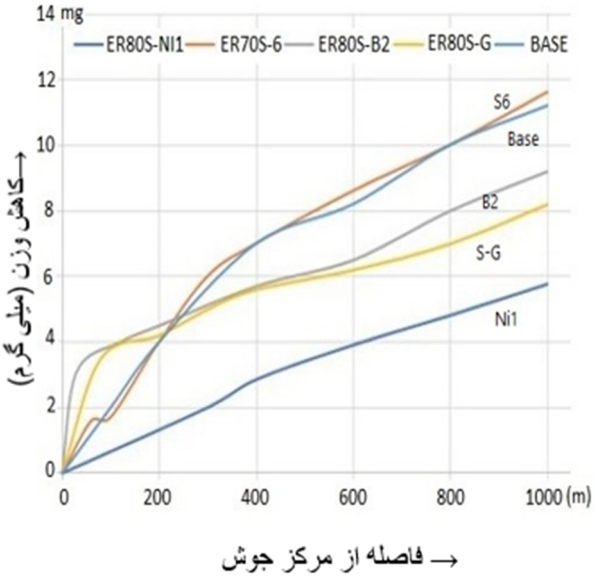
یکی از اهداف اصلی این پژوهش تعیین مقاومت به سایش جوش با استفاده از فلزهای پرکننده مختلف می‌باشد که در واقع در انتخاب فلزپرکننده بهینه جهت کاربردهای صنعتی مختلف حائز اهمیت است. تست سایش با استفاده از دستگاه پین برروی دیسک با نیروهای 2 و 4 کیلوگرم برای تمامی نمونه‌ها انجام شد. یکی از خروجی‌های اصلی تست سایش، تعیین کاهش وزن نمونه‌ها و ضریب اصطکاک می‌باشد که در واقع تعیین کننده مقاومت به سایش نمونه‌ها است. نمودارهای شکل (5 و 6) به صورت تجمعی کاهش وزن فلزهای پرکننده مختلف در مسافت‌های تا 1000 متر را به ترتیب برای نیروهای 2 و 4 کیلوگرم ارائه می‌نماید. تست سایش نشان دهنده مقاومت سایشی منطقه جوش می‌باشد و نمونه‌های تهیه شده دیسک شکل بوده و قطر 50 و ضخامت 5 میلی‌متر داشتند که از روی یک میله جوش شده با فیلر مربوطه خارج شده و سپس ماشین‌کاری و سنگ زده شد تا حدی که 2 میلی‌متر از جوش باقی‌مانده و صافی سطح 0/8 ایجاد شود.

همانگونه که مشاهده می‌گردد افزایش نیرو به 4 کیلوگرم بشدت بر میزان کاهش وزن اثر می‌گذارد. بیشترین کاهش وزن با بار اعمال شده 2 و 4 کیلوگرم، مربوط به فلزپایه و نمونه جوشکاری شده با فلزپرکننده S6 می باشد و بیانگر این است که کمترین مقاومت به سایش را دارا می‌باشد. همچنین کمترین کاهش وزن و بیشترین مقاومت به سایش در استفاده از فلزپرکنندهNi1 حاصل شده است. در مرحله دوم و سوم از نظر مقاومت سایشی فیلر S-G و سپس B2 قرار دارد. در حالت کلی می‌توان گفت جوش اعمالی برروی فولاد کم آلیاژ 1/6959 با استفاده از فلز پرکننده Ni1 دارای بیشترین مقاومت به سایش در منطقه جوش است و در طراحی اتصالات جوشی و در تعمیر قطعات با هدف مقاومت به سایش و با کمک فرایند جوشکاری، بهترین گزینه این فلزپرکننده خواهد بود.

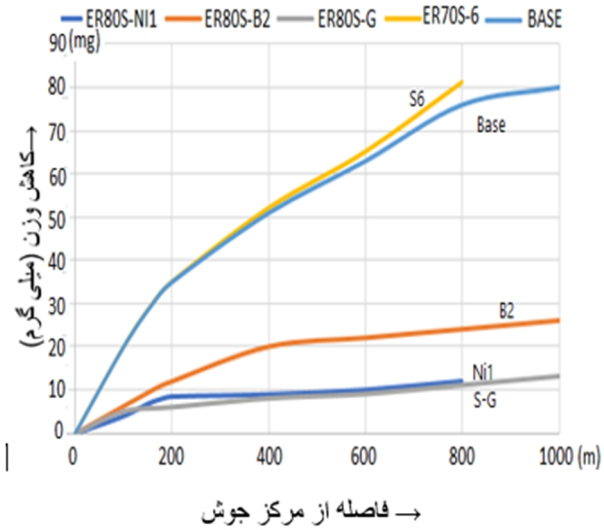
نتایج نمودارهای شکل(6) به طور کامل تایید کننده نمودارهای شکل(5) می‌باشد تنها با افزایش نیروی اعمالی فاصله بین منحنی‌های مربوط به Ni1 و S-G بشدت کم می‌شود ولی

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

ترتیب و توالی منحنی‌ها بهم نمی‌خورد. با نیروی 4 کیلوگرم نیز کمترین کاهش وزن و بیشترین مقاومت به سایش مربوط به فلزپرکننده Ni1 است و در طراحی‌های مهندسی باید به اثر نیرو بر میزان سایش نمونه‌ها و ترتیب وتوالی آن‌ها توجه کرده و در استفاده از فلزهای پرکننده مختلف، این نتایج مد نظر قرار گیرد. [14].



شکل5- نمودار کاهش وزن برحسب فاصله با نیروی2 کیلوگرم در نمونه‌های جوش شده با فیلرهای مختلف



شکل6- نمودار کاهش وزن برحسب فاصله با نیروی 4 کیلوگرم

دیده شد که ترتیب نمونه‌ها از نظر سختی و مقاومت ضربه‌ای مشابه بودند ولی ترتیب مقاومت سایشی کاملاً متفاوت است. تغییرات سختی و ضربه مربوط به کل نمونه است ولی مقاومت سایشی تنها منعکس کننده منطقه جوش می‌باشد بعلاوه مقاومت سایشی نه تنها به سختی بلکه به عوامل متعدد دیگری از جمله اندازه و نحوه توزیع رسوبات و اندازه دانه و اندازه ومقدار فازها نیز بستگی دارد به همین دلیل ارتباط دقیقی بین سختی و مقاومت سایشی برقرار نمی‌باشد.

مقادیر میانگین ضریب اصطکاک با توجه به مسافت، براساس کاهش وزن مربوط به نمونه‌های جوشکاری شده با فلزهای پرکننده مختلف و با دو نیروی 2 و 4 کیلوگرم نیز در جدول(7) ارائه شده است.

جدول7- مقادیر میانگین ضریب اصطکاک در نمودار مسافت- کاهش وزن

فلزهای پرکننده	میانگین ضریب اصطکاک	
نیروی اعمالی	2 Kg	4Kg
ER 70S-6	0.68	0.71
ER80S-G	0.61	0.69
ER-80S-Ni1	0.58	0.65
ER 80S-B2	0.62	0.68

نتایج ضریب اصطکاک در تایید کامل نتایج کاهش وزن در اثر سایش است. کمترین ضریب متوسط اصطکاک مربوط به نمونه Ni1 با بیشترین مقاومت سایشی و بیشترین ضریب متوسط اصطکاک مربوط به نمونه S6 با کمترین مقاومت سایشی است . مقادیر میانگین ضریب اصطکاک برای فلزپرکننده Ni1 در دونیروی 2 و 4 کیلوگرم حدود 0/615 است که در مقایسه با سایر فلزهای پرکننده، ضریب اصطکاک پائینی محسوب می‌گردد و در واقع مقاومت به سایش عالی این فلزپرکننده را نشان می‌دهد. میانگین ضریب اصطکاک فلز پرکننده B2 و S-G حدود 0,65 است که مقاومت به سایش متوسطی را نشان می‌دهد. میانگین ضریب اصطکاک فلزپرکننده S6 حدود0,695 است که نسبت به سایر فلزهای پرکننده مقدار بالایی است و در واقع این فلز پرکننده کمترین مقاومت به سایش را از خود نشان داده است. [15 و 16]. [17]. ترتیب و توالی فیلرها از نظر مقاومت سایشی از زیاد به کم به ترتیب Ni1، S-G، B2 و S6 می‌باشد که در تطابق دقیق با میزان سایش این نمونه‌ها است. تفاوت در مقاومت سایشی نمونه‌های مختلف در منطقه جوش،

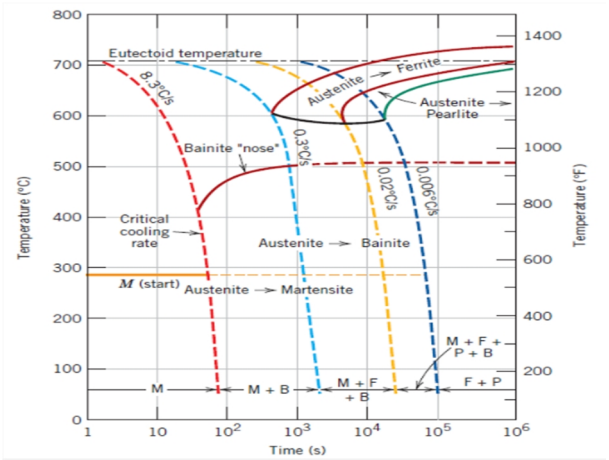
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

بدلیل اثر عناصر آلیاژی و تغییرات فازی در اثر جوشکاری و استفاده از فیلرهای با ترکیب شیمیایی متفاوت می باشد.

4- ساختار میکروسکوپی

فولاد AISI 1/6959 معادل فولاد 4340 می‌باشد. فولاد 4340 با توجه با دیاگرام فازی CCT نشان داده شده در شکل(7) و سرعت سرد کردن می‌تواند ساختارهای متفاوتی را پس از جوشکاری و سرد شدن منطقه جوش داشته باشد این ساختار می‌تواند از مخلوط فریتی-پرلیتی تا ساختارهای حاوی فاز بینیت و مارتنزیتی کامل تغییر کند.

فریت کمترین سختی را داشته ولی به ترتیب از پرلیت به بینیت و سپس مارتنزیت سختی افزایش پیدا می‌کند. البته تاثیر حرارت می تواند بشدت این سختی‌ها را تعدیل کند به نحوی‌که مثلاً سختی مارتنزیت تمپر شده در دماهای بالا بشدت کم شود.



شکل 7- دیاگرام TTT فولاد 4340-[18]

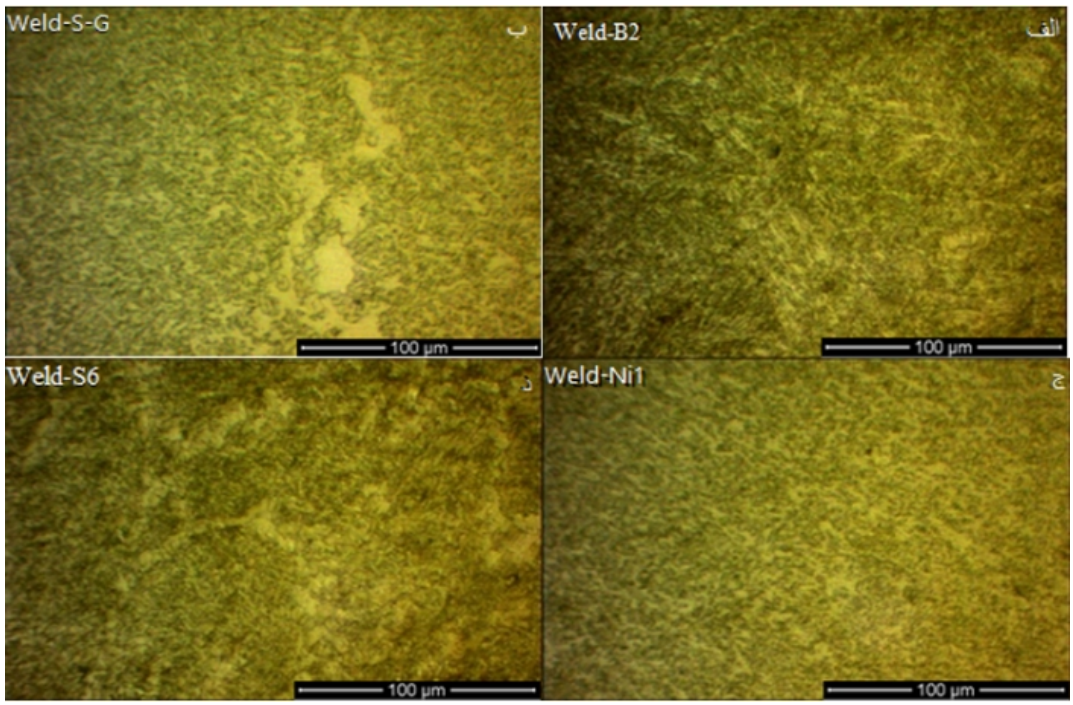
در سرعت‌های بینابین برای سرد شدن جوش تا دمای محیط فاز بینیت نیز می‌تواند در کنار یک یا چند تا از فازهای پرلیت، فریت ومارتنزیت ظاهر شود. هرچند فولاد کاربردی توسط ما معادل 4340 است منتها فلزجوش با توجه به ترکیب متفاوت فیلرها ومیزان اختلاط آن‌ها با فلزپایه می‌تواند ترکیب شیمیایی را تا حدی تغییر داده ومحدوده ظهور فازها وهمچنین مقدار و حتی نوع و تعداد فازها را عوض کند. عناصر آلیاژی مهم در فیلرها نیکل، منگنز، مولیبدن و کرم هستند. نیکل و منگنز آستنیت‌زا بوده ومحدوده این فاز را بزرگ می‌کنند. این دوعنصر باعث افزایش چقرمگی و انرژی ضربه‌ای می‌شوند در مقابل کرم ومولیبدن فریت زا بوده ومنطقه آستنیتی را کوچک کرده و باعث افزایش تمایل به مارتنزیتی شدن فولاد و ایجاد رسوبات کاربیدی می‌شوند.

همانگونه که ذکر شد سختی منطقه جوش در همه نمونه‌ها تقریباً ثابت ودر حدود 250 ویکرز بود که سختی کمی است بنابراین انتظار داشتن فازهای فریتی و پرلیتی را در منطقه جوش داریم. شکل(8) فازهای دیده شده در منطقه جوش ایجاد شده در اثر جوشکاری با 4 نوع فلزپرکننده را نشان می‌دهد. ساختار بوضوح دوفازی بوده و در تمام نمونه‌ها حالت فازی مشابهی را با تفاوت‌های اندک داریم. فاز تیره پرلیت و فاز روشن فریت می‌باشند.

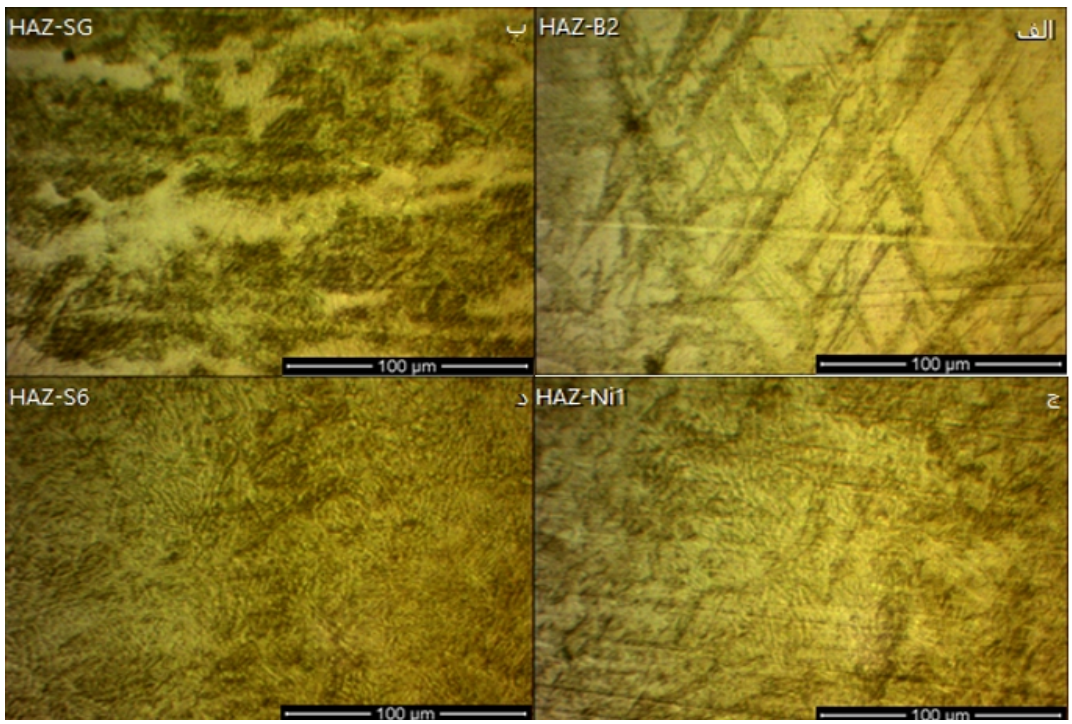
سختی همه نمونه‌ها بجز S-G ثابت بوده و در حد سختی ساختار فریتی-پرلیتی است در حالت اخیر سختی از مقادیر کمتر از سایر نمونه‌ها شروع شده و با دور شدن از مرکز جوش زیاد شده و بالاتر از سختی متوسط 250 ویکرز قرار می‌گیرد. با توجه به ساختار میکروسکوپی نمونه S-G نیز بنظر می‌رسد مقدار پرلیت کمی کاهش یافته و فریت بیشتر شده باشد بنظر می‌آید عدم یکنواختی توزیع فازهای پرلیت و فریت در این نمونه و ایجاد موضعی فاز بینیت مسئول توزیع غیریکنواخت و افزایش سختی در منطقه جوش باشد. نمونه‌های سایشی از منطقه ذوب تهیه شده و بنابراین باید تابع سختی این منطقه باشند. بدلیل سختی بیشتر این نمونه، مقاومت سایشی این نمونه نیز بالا می‌باشد. غیریکنواختی در ساختار و وجود بینیت همچنین باعث ایجاد مناطقی با استعداد ایجاد ترک و کاهش شدید چقرمگی این آلیاژ شده است.

شکل(9) نیز ساختار منطقه تحت تاثیر حرارت را درآلیاژهایی که با فیلرهای مختلف جوش شده اند نشان می‌دهد. با مشاهده شکل(4) وعرض منطقه با سختی ثابت که حدود 3 تا 3/5 میلی‌متر است مشخص است که عرض منطقه جوش با تقریب حدود 6 تا 7 میلی‌متر بوده است. بعد از منطقه جوش سختی بسرعت افزایش یافته و به سختی فلزپایه میل می‌کند.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



شکل8- ساختار میکروسکوپی منطقه جوش ایجاد شده با فلزهای پرکننده مختلف با بزرگنمایی x500..



شکل9- ساختار میکروسکوپی منطقه تحت تاثیر حرارت برای فلزات پرکننده مختلف با بزرگنمایی x500.

ورود به منطقه آستنیته در اثر حرارت ورودی جوشکاری و افزایش دما می‌تواند باعث حل شدن کاربیدها و ایجاد فاز و دانه‌های آستیت گردد. این فاز آستیت در مراحل بعدی با توجه به سرعت سرد شدن می‌تواند به فازهای مارتنزیت-بینیت یا پرلیت تبدیل شود. با توجه به نوع ومقدار فازها سختی نمونه‌ها متغیر خواهد بود. سختی متوسط در منطقه تحت تاثیر حرارت

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

به حدود 550 ویکرز می‌رسد که معادل سختی ساختارهای مارتنزیتی و بینیتی است. بطور کلی فلزپایه دارای کمترین استحکام کششی وتسلیم و بیشترین قابلیت انعطاف و بیشترین چقرمگی بود که نشان‌دهنده فاز بسیار نرم در این آلیاژ اولیه می‌باشد. بنابراین این فاز می‌تواند با توجه به سرعت سرد کردن و عملیات حرارتی آلیاژ اولیه عمدتاً فریتی و پرلیتی بوده و یا ساختار مارتنزیتی به شدت تمپر شده باشد.

ساختار مربوط به نمونه S6 فاز مارتنزیتی کاملاً تمپر شده بوده و بنابراین انتظار داریم که آلیاژ مربوطه دارای مقاومت سایشی کمی باشد. کمترین مقاومت سایشی مربوط به این آلیاژ است. ساختار نمونه B2 نیز بوضوح تیغه‌های مارتنزیت را همراه با بینیت بالایی نشان می‌دهد. ساختار نمونه Ni1 مارتنزیت تا حدی تمپر شده را کنار تعداد محدودی تیغه مارتنزیتی نشان می‌دهد. بنابراین ساختار در سه نمونه ذکر شده مارتنزیتی است منتها از B2 و سپس Ni1 و در نهایت S6 میزان تمپر شدن بیشتر شده است. سختی نیز به همین ترتیب کاهش پیدا خواهد کرد. در مورد نمونه S-G فازها کاملاً متفاوت هستند. در این مورد مارتنزیت تمپر شده در کنار مقدار زیادی از فریت دیده می‌شود. با توجه به عرض منطقه ذوب یا همان منطقه با سختی ثابت دیده می‌شود که با افزایش عرض ذوب، سختی نهایی در منطقه تحت تاثیر حرارت افزایش می‌یابد. افزایش عرض ذوب به معنی حرارت ورودی بیشتر و دمای بالاتر و زمان بیشتر توقف در منطقه آستنیتی و در نتیجه احتمال بیشتر دستیابی به فازهای سخت مارتنزیت و بینیت می‌باشد.

در آلیاژ B2 در مقایسه با دیگر نمونه‌ها بیشترین حرارت ورودی در جوش وجود دارد بنابراین آستنیت بیشتری در منطقه تحت تاثیر حرارت ایجاد شده و بدلیل دمای بالاتر ودر نتیجه سرعت سرد شدن بیشتر انتظار سخت‌ترین فاز را در این حالت در منطقه تحت تاثیر حرارت داریم. ساختار در نمونه Ni1 بدلیل حرارت ورودی و سرعت سرد شدن کمتر نتوانسته است مارتنزیت با جهت گیری مشخص زیادی تولید کند اما ساختار ظریف مارتنزیت تمپر شده را ایجاد کرده است. بدلیل این ساختار بسیار ریز و یکنواخت بیشترین مقاومت سایشی در این آلیاژ ایجاد شده است. تاثیر حرارت ورودی در جوشکاری قوس دستی نیز توسط تقی پور و همکاران [19] بر روی میزان فریت و بینیت و سختی و انرژی ضربه‌ای فولاد HSLA-100 نشان داده شده است. آلیاژ مرتبط با فیلر S-G دارای ساختار فریتی-مارتنزیتی است منتها در این مورد ساختار دارای توزیع یکدست و یکنواخت نیست. بنابراین دیده می‌شود که جوشکاری در منطقه جوش باعث ایجاد ساختار فریتی پرلیتی درشت با سختی کم شده است. کمی دورتر در منطقه تحت تاثیر حرارت در اثر حرارت ناشی از جوشکاری فازهای مارتنزیت و بینیت توسعه پیدا کرده است. تغییر در نوع فازها و مقدار و اندازه و نحوه توزیع آن‌ها در اثر تغییر دمای بیشینه جوشکاری و سرعت سرد شدن ومیزان حرارت ورودی باعث تغییر خواص در منطقه تحت تاثیر حرارت می‌گردد. وجود فازهای سخت و مستعد ترک در منطقه تحت تاثیر حرارت موجب شکست نمونه‌ها در تست کشش در این منطقه شده است. خواص کلی حاصل از جوشکاری نیز توسط منطقه تحت تاثیر حرارت کنترل می شود.

5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش خواص مکانیکی و تریبولوژی جوش حاصل از 4 نوع فلز پرکننده مختلف برروی فولاد AISI 1/6959 مورد بررسی قرار گرفت و بدین منظور آزمون‌های کشش، ضربه، سختی، سایش و متالوگرافی برروی نمونه‌ها انجام شد. بهترین قابلیت جوشکاری و خواص مکانیکی، در جوشکاری با استفاده از فلز پرکننده جوشکاری B2 حاصل شد. تنش تسلیم و استحکام کششی جوش انجام شده با کمک این فلزپرکننده به ترتیب 830 و 1100 مگاپاسکال می‌باشد که 32 و 48 درصد بیش از فلزپایه می‌باشد. میزان تغییر شکل متوسط تا نقطه شکست نیز 14/65 درصد است که بسیار نزدیک به فلزپایه است. حضور عناصر آلیاژی مولیبدن و کروم در این فلزپرکننده منجر به افزایش استحکام اتصال جوش شده است. در هنگام طراحی اتصال جوشکاری فولاد 1/6959، در شرایطی که استحکام و سختی مد نظر باشد، فلزپرکننده B2 گزینه مناسبی

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

خواهد بود.

با توجه به نتایج آزمون ضربه، بهترین چقرمگی و مقاومت به ضربه نیز در اتصال جوش حاصل از فلزپرکننده B2 بدست آمده است.

سختی منطقه جوش در تمامی نمونه‌ها تقریباً ثابت و در حدود 250 ویکرز می‌باشد و سختی منطقه تحت تاثیر حرارت در نمونه‌ها بین 580 تا 620 ویکرز است.

بهترین مقاومت به سایش و کمترین میزان کاهش وزن در جوش با فلزپرکننده Ni1 و کمترین مقاومت به سایش و بیشترین کاهش وزن در جوش با فلزپرکننده S6 به دست آمد. نمونهB2 نیز دارای مقاومت به سایش مناسبی می‌باشد.

با توجه به نتایج حاصل شده می‌توان نتیجه گرفت که در صورتی‌که نمونه جوشی تحت سایش نبوده و یا شرایط سایشی بسیار سبک باشد می توان از فلز پرکننده S6 و در شرایطی که نمونه جوش شده تحت سایش شدید باشد از فلزپرکننده Ni1 جهت جوشکاری استفاده کرد.

به عنوان یک نتیجه گیری اساسی می‌توان گفت در شرایط کلی جهت جوشکاری فولاد کم آلیاژ 1/6959- و به منظور دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب بخصوص در شرایط وجود ضربه، استفاده از فلزپرکننده جوشکاری B2 توصیه می‌شود. در شرایطی که صرفا مقاومت به سایش مد نظر باشد، با توجه به نوع و میزان سایش، فلز پرکننده Ni1 و B2 توصیه می‌گردد در حالتی که بیشترین قابلیت انعطاف و کمترین استحکام و سختی مد نظر باشد نیز کاربرد فیلر S6 برای جوشکاری توصیه می‌شود. فلزپرکننده S-G در بسیاری از حالات نظیر استحکام کششی و تسلیم و انرژی ضربه‌ای و سختی شبیه به پر کننده S6 عمل می‌کند و تنها در شرایط سایشی بر S6 ارجحیت دارد بنابراین با توجه به موارد ذکر شده و بدلیل غیریکنواختی در ساختار و استعداد به ایجاد ترک برای جوشکاری آلیاژ 1/6959 توصیه نمی‌شود.

دیده شد که تغییر در ساختار میکروسکوپی نمونه‌ها در منطقه جوش و منطقه تحت تاثیر حرارت در اثر تغییر فلزپرکننده می‌تواند باعث تغییرات در خواص کلی وخواص منطقه جوش شود.

منابع

1-لری امینی امیر، ثابت حامد، قنبری حقیقی محسن، اثر نوع فلاکس فعال کننده سطحی بر پروفیل جوش، پیچیدگی زاویه‌ای ناشی از جوشکاری A-Tig فولاد زنگ‌نزن دو فازی AISI2205، نشریه علوم و فنون جوشکاری ایران، سال ششم، شماره 2، صفحه 41-51، 1399

2-Rizvi, S. A., & Tewari, S. P.. Effect of different welding parameters on the mechanical and microstructural properties of stainless steel 304h welded joints. International Journal of Engineering, 2017, 30(10), 1592-1598.

3- دهملایی رضا، رییسی سارانی محمد سعید، رنجبر خلیل، ارزیابی ریزساختار و خواص مکانیکی فلزجوش اتصال غیرمشابه فولادهای API 5L X80/DSS 2205 شده تولید به روش PCGTAW، نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال ششم، شماره2، صفحه 91-102، 1399

4-Nassiri, N., Abbasi, A., Ardestani, M., & Farnia, A., Effect of welding mode and filler metal on microstructure and mechanical properties of dissimilar joints of S900MC thermomechanical steel to St52 carbon steel welded by gas tungsten arc welding. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 2022, 09544089221108575.

5-Sitthipong, S., Towatana, P., Sitticharoenchai, A., & Meengam, C., Abrasive wear behavior of surface hardfacing on propeller shafts AISI 4140 Alloy steel. Materials Today: Proceedings, 2017, 4(2), 1492-1499.

6-Abbasi, H., & Derakhshandeh Haghighi, R., The effect of filler metal on microstructure and mechanical performance of GTAW inconel 625 at room and elevated temperature. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2022, 199, 104760.

7-Jiang, W. J., Liu, C., He, C. G., Guo, J., Wang, W. J., & Liu, Q. Y., Investigation on impact wear and damage mechanism of railway rail weld joint and rail materials. Wear, 2017, 376, 1938-1946.

8-Morsy, M. A., Abdel Aziz, S. M., Abdelwahed, K., & Abdelwahab, S. A., Effect of welding parameters on the mechanical and metallurgical properties of armor steel weldment. Journal of Engineering and Applied Science, 2022, 69(1), 1-33.

9-Beidokhti, B., & Pouriamanesh, R., Effect of filler

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

metal on mechanical properties of HSLA welds. Welding Journal, 2015, 94(10) 334-341

10- اسداللهی، ایوب، شمعانیان مرتضی، بهرامی عباس، "جوشکاری قوس تنگستن گاز فولاد مقاوم به حرارت HP با فلزات پرکننده Ni۳۵Cr-۲۵ و ۳۵-Cr۴۵-Ni."، *مجله بین‌المللی انجمن آهن و فولاد ایران*، *جلد*18، شماره 2، صفحه 37-30 ، 1401

11-Prabu, S. S., Ramkumar, K. D., & Arivazhagan, N., November). Effect of filler metals on the mechanical properties of Inconel 625 and AISI 904L dissimilar weldments using gas tungsten arc welding. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering , 2017, Vol. 263, No. 6, p. 062072). IOP Publishing.

12- طاهریان رضا، نجفی زاده عباس، شمعانیان مرتضی، شاطری رضا، "رسم نمودارهای CCCT و بررسی اثر تغییرشکل روی استحاله مارتنزیت و بینایت در فولاد NiCrMoV "، *نشریه علمی پژوهشی مواد پیشرفته در مهندسی*، *جلد* ، شماره 1، صفحه 149-165، 2006

13-Roshanghias, A., Barzegari, M., Kokabi, A. H., & Mirazizi, M., The effects of functionally graded material structure on wear resistance and toughness of repaired weldments. Materials & Design, 2011, 32(2), 892-899.

14-Eremin, E. N., & Losev, A. S., Wear resistance increase of pipeline valves by overlaying welding flux-cored wire. Procedia Engineering, 2015, 113, 435-440.

15-Guoqing, C., Xuesong, F., Yanhui, W., Shan, L., & Wenlong, Z., Microstructure and wear properties of nickel-based surfacing deposited by plasma transferred arc welding. Surface and Coatings Technology, 2013, 228, 276-282.

16-Federici, M., Alemani, M., Menapace, C., Gialanella, S., Perricone, G., & Straffelini, G., A critical comparison of dynamometer data with pin-on-disc data for the same two friction material pairs–A case study. Wear, 2019, 424, 40-47.

17-Lyu, Y., Bergseth, E., Wahlström, J., & Olofsson, U., A pin-on-disc study on the tribology of cast iron, sinter and composite railway brake blocks at low temperatures. Wear, 2019, 424, 48-52.

18-Callister, W.D., Rethwisch, D.G., Material Science and Engineering, An Introduction, Wiley Publication, 9th edition, 2018, p331.

19- مهدی اصل پور تقی، دهملایی رضا، علوی زارع، سید رضا، توکلی شوشتری محمد رضا، بررسی تاثیر حرارت ورودی بر خواص اتصالات جوش فولاد HSLA-100 ایجاد شده با فرایند SMAW، نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال هفتم، شماره1، صفحه 80-71، 1400

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]