



اثر دفعات ترمیم به روش SMAW روی ویژگی فولاد API5LX52

محمد کریم خردمند وجدان¹، سید ابراهیم وحدت²

¹دانشکده مهندسی، واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران

²دانشکده مهندسی، واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران

²e.vahdat@iauamol.ac.ir

چکیده

در این تحقیق، اثر تعدد تعمیرات به روش جوشکاری با الکترودهستی روی ریزساختار و نهایتاً استحکام و مقاومت خوردگی فولاد API 5LX52 بررسی شده است. به همین منظور، 4 سری نمونه شامل نمونه شاهد، نمونه یکبار تعمیر، نمونه دوبار تعمیر و نمونه 3 مرتبه تعمیر برای انجام آزمون کشش و خوردگی استفاده شده است. نتیجه آنکه که با تکرار عمل ترمیم، استحکام کاهش داشته است. همچنین، مقاومت خوردگی نمونه با دو بار تعمیر بیشتر از سایر نمونه های تعمیری است. بنابراین با لحاظ نمودن مقاومت کششی و مقاومت خوردگی برای دستیابی به مناسبترین نتیجه، استفاده از الکترودهای میکروآلیاژی به همراه 2 مرتبه تعمیر توصیه میشود.

کلمات کلیدی: استحکام کششی، تعمیر، جوشکاری الکترودهستی، میکرو آلیاژ، مقاومت خوردگی

1. مقدمه

لوله فولادی API 5LX52 یکی از پرکاربردترین لوله ها در صنعت نفت و گاز و پتروشیمی است که برای انتقال فرآورده های نفتی مورد استفاده قرار می گیرد. این فولاد، میکرو آلیاژ و کم کربن است که ریزساختار آن با استفاده از عملیات ترمومکانیکی بهینه سازی می شود. فرایند مذکور موجب تشکیل رسوبات مستحکم با اندازه و مورفولوژی های متفاوت می شود که نهایتاً سبب بهبود استحکام و مقاومت خوردگی می گردد [1].

در مهندسی انتقال فرآورده های نفتی، فرسودگی خطوط لوله نفت و گاز، چالشی مهم تلقی می شود که نهایتاً منجر به کاهش استحکام و افزایش نرخ خوردگی در قسمتهایی از لوله می شود. فرسودگی لوله بایستی از طریق تعمیر یا تعویض لوله مرتفع شود. تعویض لوله بسیار زمان بر و پر هزینه است بطوریکه عموماً برای تعمیر آن اقدام می شود [2].

عملیات پیرسختی در دمای 250 درجه سانتیگراد روی لوله فولاد کربنی X52 موجب تغییر نوع شکست از شکست ترد به شکست نرم در فلز جوش و منطقه متاثر از جوش شده است. بعلاوه، بر اثر این عملیات، دانه بندی درشت تر شده است. اثر این عملیات تا 500 ساعت موجب افزایش استحکام شده اما بیشتر از 500 ساعت موجب شده تا استحکام کاهش یابد. افزایش استحکام به پدیده رسوب سختی نسبت داده شده و کاهش استحکام به بزرگ شدن ذرات رسوب سخت اشاره دارد [3-4].

در فولاد کم کربن A 36 تعمیر شده با استفاده از جوشکاری TIG لب به لب، تنش تسلیم و سختی کاهش یافته است. این تغییر خواص به بزرگ شدن اندازه دانه و افزایش وسعت منطقه متاثر از جوش نسبت داده شده است [5].

نتایج جوشکاری چند پاسه روی لوله فولادی API 5L X-70 نشان میدهد که تنش پسماند کششی در مرکز فلز جوش و در راستای محیطی سطح خارجی لوله وجود می آید که مقدار آن حداکثر برابر با 60 درصد استحکام تسلیم جوش است. به این ترتیب، استحکام کششی و مقاومت به ضربه کاهش می یابد. این کاهش به تغییرات ریزساختار نسبت داده شده است [6].



برای لوله های کربنی X52 بدون درز که چندین بار به روش جوشکاری با الکتروود دستی تعمیر شده اند کاهش مقاومت به خوردگی (بویژه در ناحیه بین فلز پایه و منطقه متأثر از حرارت)، کاهش استحکام تسلیم، کاهش استحکام کششی و کاهش چکش خواری گزارش شده است. این کاهش به تغییرات در ریزساختار نسبت داده شده است [7].

در تحقیقات فوق [1,3,4,7] به کاهش خواص پس از تعمیر لوله از جنس API X52 اشاره شده است که در تمام موارد به تغییرات ریزساختار نسبت داده شده است. اگرچه تعمیر لوله کم هزینه تر بوده و در مدت زمان کوتاه تری انجام می شود اما ارزیابی دقیقی از تغییر خواص بعد از تکرار عملیات تعمیر فولاد API 5L X52 وجود ندارد زیرا ارتباط آن با ریزساختار مشخص نشده است. در این تحقیق، هدف اصلی، تعیین ارتباط ریزساختار با استحکام کششی و مقاومت خوردگی پس از انجام تعمیر مکرر لوله مورد تحقیق و سپس ارزیابی آن است.

2. مواد و روش تحقیق

مواد اولیه، لوله درزدار به قطر 16 اینچ از جنس فولاد API5LX52 تولید شده به روش جوشکاری زیر پودری از انبار منطقه 6 عملیات انتقال گاز تهیه شده است. این لوله هم اکنون در خطوط لوله فشار قوی انتقال گاز به کار می رود. فولاد مربوطه از خانواده فولاد با کربن جزئی و میکروآلیاژ اما با استحکام زیاد می باشد. ترکیب شیمیایی با روش طیف سنجی نشر نوری با کمک دستگاه Applied Research Laboratories ساخت کشور سوئیس مطابق با استاندارد ASTM E415- [8] 14 انجام و نتایج در جدول 1 فهرست شده است.

جدول 1 ترکیب شیمیایی لوله API5LX52

عنصر	وانادیم	مولیبدن	کروم	نیکل	منگنز	فسفر	گوگرد	سیلیسیم	کربن	آهن
درصد وزنی	0/002	0/003	0/03	0/02	1/09	0/013	0/001	0/30	0/16	بقیه
عنصر	روی	نیوبیم	آلومینیم	کبالت	قلع	آرسنیک	تیتانیم	تنگستن	مس	
درصد وزنی	0/001	0/01	0/03	0/004	0/001	0/004	0/01	0/005	0/02	

تعمیر لوله با استفاده از روش جوشکاری الکتروود دستی با دستگاه جوشکاری ساخت داخل مدل پارس 630 با ظرفیت حداکثر 400 آمپر طبق استاندارد [9] API 1104 انجام شده است. الکتروودهای مورد استفاده در این تحقیق برای پاس ریشه از نوع E6010 با قطر 3/25 میلیمتر و برای پاسهای بعدی از نوع E7010 با قطر 4 میلیمتر بوده است. ترکیب شیمیایی عناصر تشکیل دهنده آنها براساس استاندارد [10] ASME SEC II در جدول 2 و جدول 3 فهرست شده است. آزمون کشش طبق استاندارد [11] AWS D1.1 روی چهار سری نمونه شامل نمونه شاهد، نمونه یکبار تعمیر، نمونه دو مرتبه تعمیر و نمونه سه مرتبه تعمیر انجام شده است. نمونه شاهد، نمونه تعمیر نشده است. نمونه یکبار تعمیر، یک مرتبه جوشکاری شده است. نمونه دو مرتبه تعمیر، دو مرتبه جوشکاری شده است و به تبع آن، نمونه سه مرتبه تعمیر، سه مرتبه جوشکاری شده است. هر سری نمونه شامل چهار نمونه آزمون کشش و یک نمونه متالوگرافی و یک نمونه آزمون خوردگی است. آزمون خوردگی مطابق استاندارد [12-13] ASTM G3 & ASTM G1 انجام شد. استحکام تسلیم و استحکام کششی نمونه تحت آزمون کشش تک محوری در دمای محیط توسط دستگاه کشش GOTECH اندازه گیری شده است. میانگین استحکام تسلیم و استحکام کششی نمونه شاهد به ترتیب برابر با 465/5 و 558/25 مگاپاسکال اندازه گیری شده است.



جدول 2: ترکیب شیمیایی الکتروود E6010 و E7010 براساس استاندارد [10] ASME SEC II

الکتروود	عنصر	وانادیم	مولیبدن	کروم	نیکل	گوگرد	فسفر	سیلیسیم	منگنز	کربن
E6010	درصد وزنی	0/08	0/30	0/20	0/30	---	---	1/00	1/20	0/20
E7010	درصد وزنی	----	0/65-0/4	-	-	-	حداکثر 0/03	حداکثر 0/4	حداکثر 0/6	حداکثر 0/12

3. نتایج و بحث روی نتایج

نمونه های متالوگرافی مطابق استاندارد [14] ASTM E3 – 11 آماده شده اند. اندازه دانه مطابق با استاندارد ASTM [15] E112-2013 و مقدار حجمی فازهای فریت و پرلیت مطابق استاندارد [16] ASTM E 883-11 اندازه گیری و در جدول 3 فهرست شده است.

جدول 3: اندازه دانه و مقدار حجمی فازهای پرلیت و فریت

نمونه ها	درصد حجمی فاز پرلیت	درصد حجمی فاز فریت	اندازه دانه به میکرومتر
نمونه شاهد	٪30	٪70	11/4
نمونه تعمیری یک	٪37	٪63	11/8
نمونه تعمیری دو	٪32	٪68	11/2
نمونه تعمیری سه	٪25	٪75	11/9

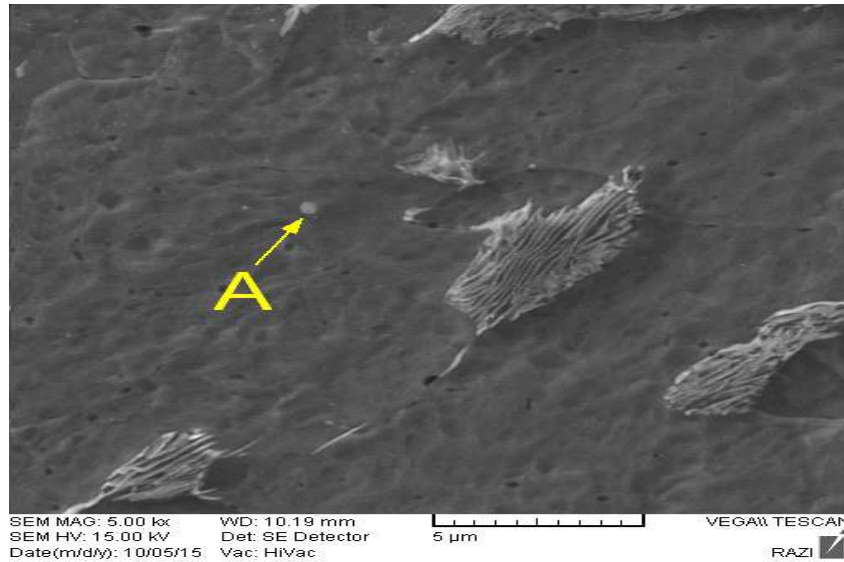
مطابق جدول 3، افزایش مقدار حجمی پرلیت پس از انجام اولین تعمیر (از 30 درصد حجمی به 37 درصد حجمی) به سرعت خنک کاری زیاد در فلز جوش نسبت داده می شود. در حالیکه از نمونه یکبار تعمیر تا سه مرتبه تعمیر، درصد حجمی پرلیت در زمینه فریت به ترتیب از 37 درصد حجمی به 25 درصد حجمی کاهش یافته است. زیرا حرارت ورودی در طی پاسهای مختلف جوشکاری از نمونه یکبار تعمیر تا نمونه سه مرتبه تعمیر باعث افزایش زمان نگهداری قطعه در دمای رشد دانه می شود. به این ترتیب، فرصت گسترش دانه ها و کاهش عدد اندازه دانه را فراهم می کند. جوانه زنی فاز جدید در مذاب از فصل مشترک (مرزدانه) انجام می شود و از طرفی مجموع طول مرزدانه کاهش یافته است بنابراین مقدار حجمی پرلیت با افزایش تعداد تعمیر، روند کاهشی دارد. مهمتر آنکه با تکرار عمل تعمیر، مطابق جدول 4، مقدار عناصر آلیاژی کاربیدساز مانند مولیبدن، کروم، وانادیم و نیوبیم افزایش یافته و در نتیجه تشکیل پرلیت مشکل تر می شود.

جدول 4: عناصر آلیاژی موجود در فلز جوش برای تمام نمونه

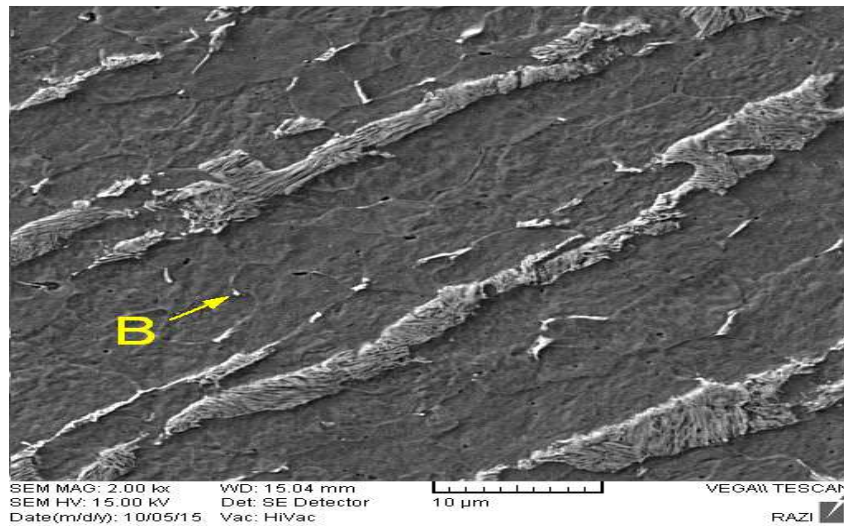
مجموع عناصر آلیاژی	نیوبیم	کروم	وانادیم	مس	نیکل	مولیبدن	
0/399	0/002	0/02	0/004	0/02	0/35	0/003	شاهد
0/682	--	0/02	0/002	0/03	0/36	0/27	تعمیری یک
0/794	0/004	0/04	0/01	0/04	0/38	0/32	تعمیری دو
0/767	0/003	0/02	0/004	0/04	0/38	0/32	تعمیری سه



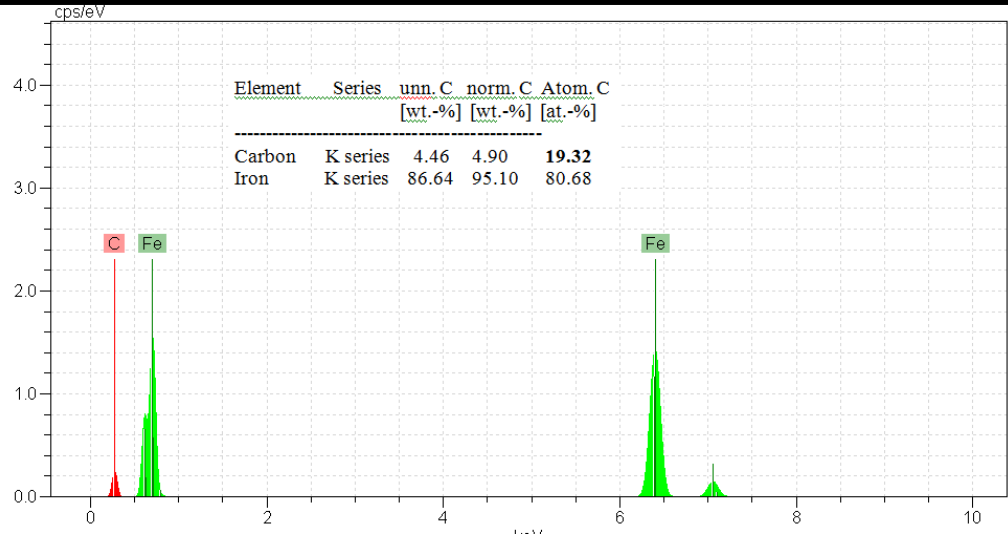
در شکل 1 و شکل 2، فاز روشن، پرلیت و فاز تیره، زمینه (فریت) می باشد. مطابق طیف تفکیک انرژی در شکل‌های 3 تا 6 ذرات A و B کاربرد انتقالی می باشد زیرا حاوی 10/94 تا 19/32 درصد اتمی کربن هستند.



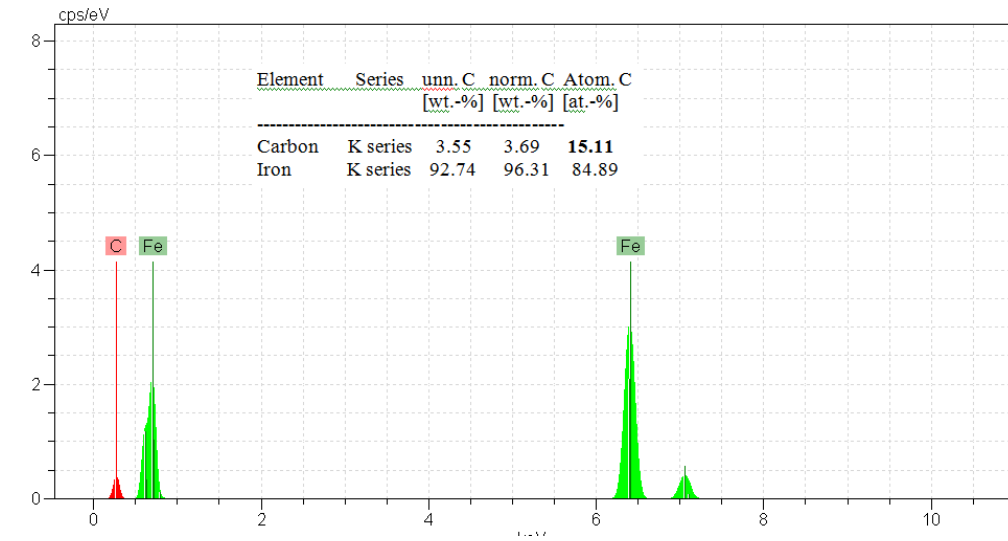
شکل 1: تصویر SEM از ذره A



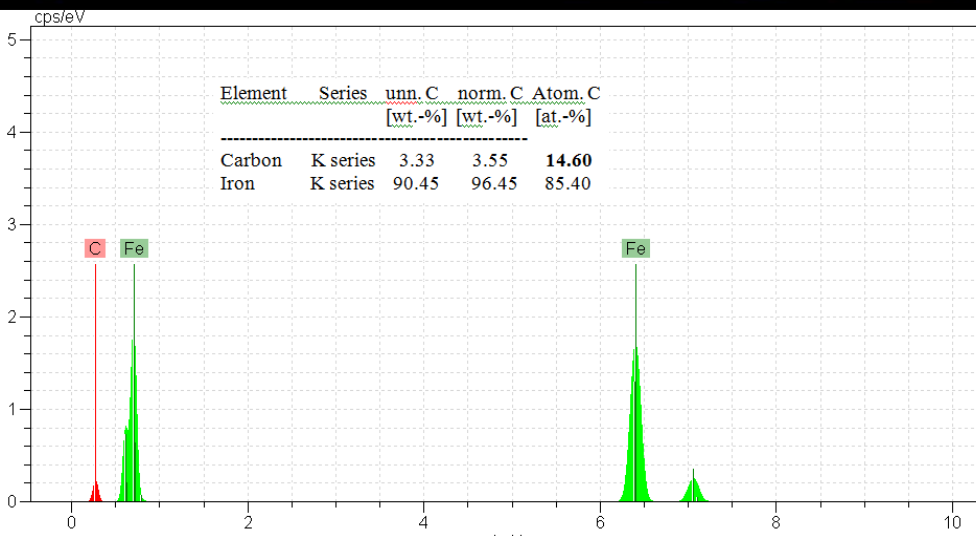
شکل 2: تصویر SEM از ذره B



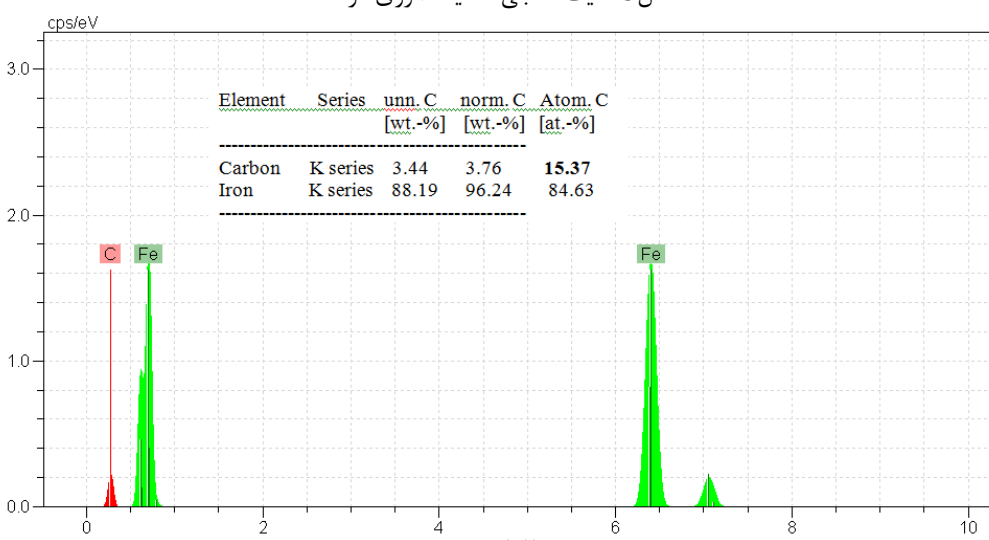
شکل 3: طیف سنجی تفکیک انرژی ذره A



شکل 4: طیف سنجی تفکیک انرژی ذره A



شکل 5: طیف سنجی تفکیک انرژی ذره B

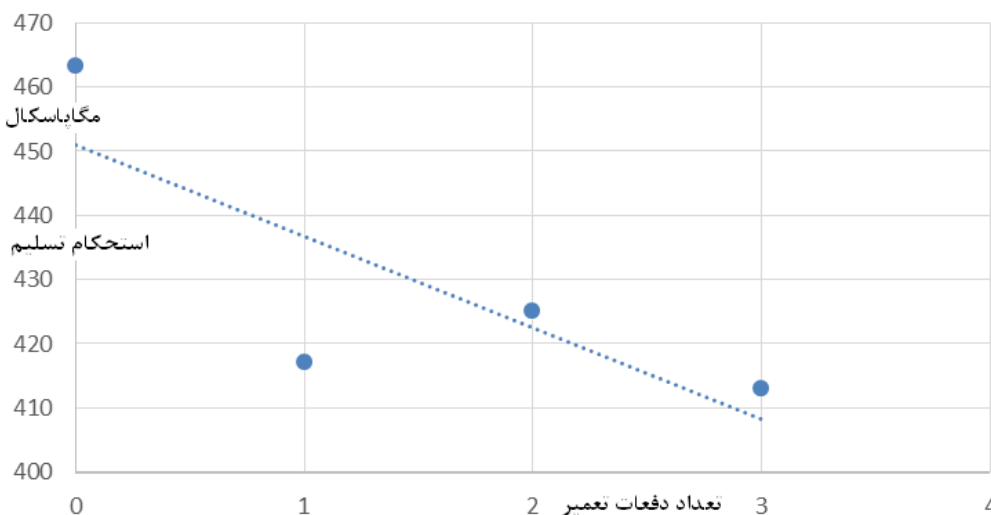


شکل 6: طیف سنجی تفکیک انرژی ذره B

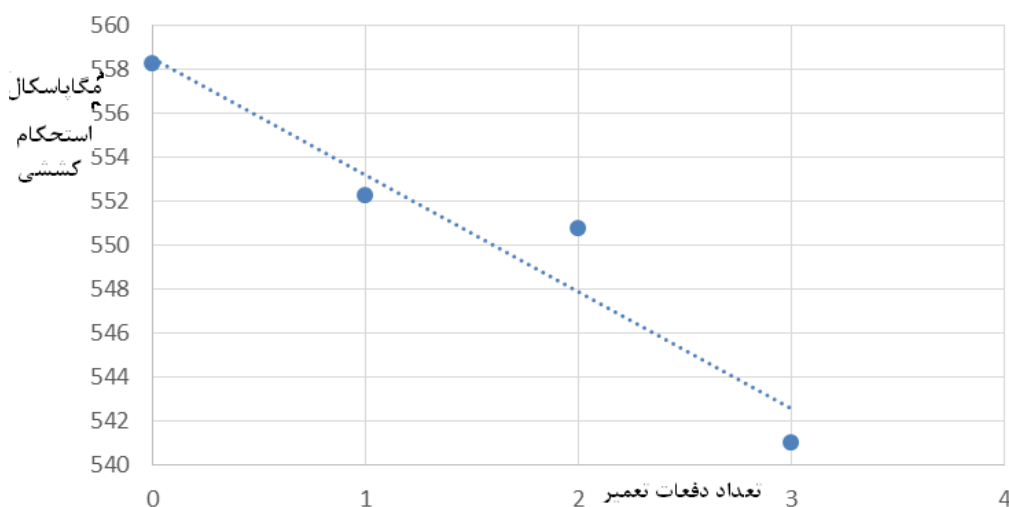
نتایج آزمون کشش و آزمون خوردگی نمونه های تعمیر شده در جدول 5 فهرست شده و برای مقایسه در شکل 7 و شکل 8 آورده شده است.

جدول 5: میانگین استحکام تسلیم، استحکام کششی و نرخ خوردگی نمونه های تعمیر شده و نمونه شاهد

معرفی نمونه	استحکام تسلیم به مگاپاسکال	استحکام نهایی به مگاپاسکال	نرخ خوردگی به میلی اینچ در سال
شاهد	465/5	558/25	13/15
یکبار تعمیر	417	552/25	14/28
دو بار تعمیر	425	550/75	4/256
سه مرتبه تعمیر	413	541	28/52



شکل 7: نمودار مقایسه ای تغییرات میانگین استحکام تسلیم نمونه ها



شکل 8: نمودار مقایسه ای میانگین استحکام نهایی نمونه ها

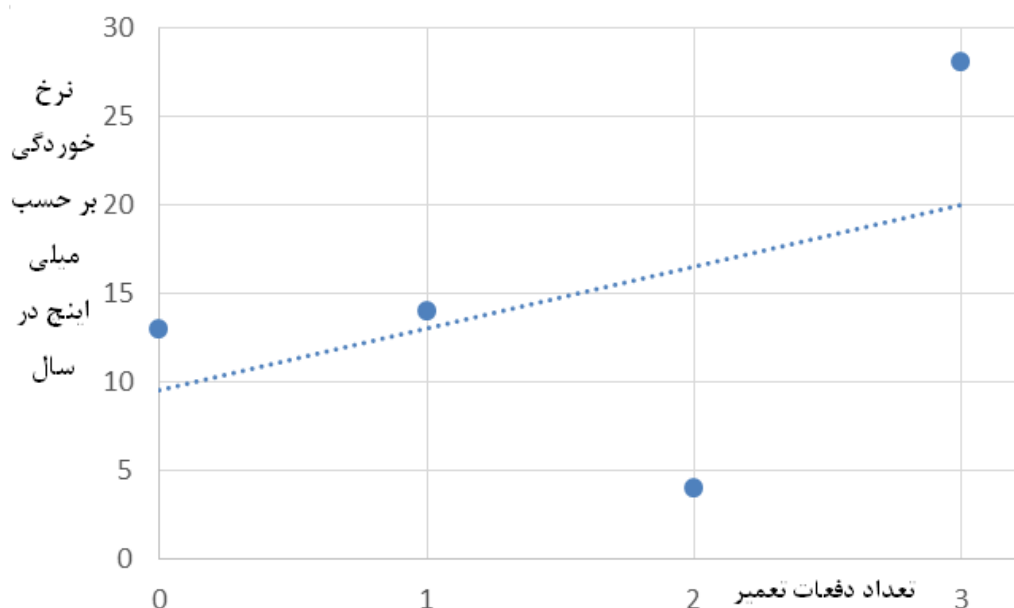
با مقایسه شکل 7 و شکل 8 مشاهده می شود که روند کاهش در استحکام نهایی نمونه ها مشابه با روند کاهش در استحکام تسلیم نمونه ها است .

اگر چه انتظار می رفت با تکرار عمل تعمیر، روند استحکام کاهشده باشد اما استحکام تسلیم نمونه دو مرتبه تعمیر به طور جزئی (کمتر از 2 درصد) از استحکام تسلیم نمونه یک مرحله تعمیر بیشتر است . دلیل این مسئله به خطای دستگاه آزمون کشش (که تا 3 درصد مجاز است) بر می گردد.

در شکل 9 نرخ خوردگی نمونه ها مقایسه شده است. با یک و سه مرتبه تعمیر، نرخ خوردگی نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته در حالیکه برای نمونه با دو مرتبه تعمیر، نرخ خوردگی (حداقل سه برابر) نسبت به تمام نمونه ها کاهش داشته است.

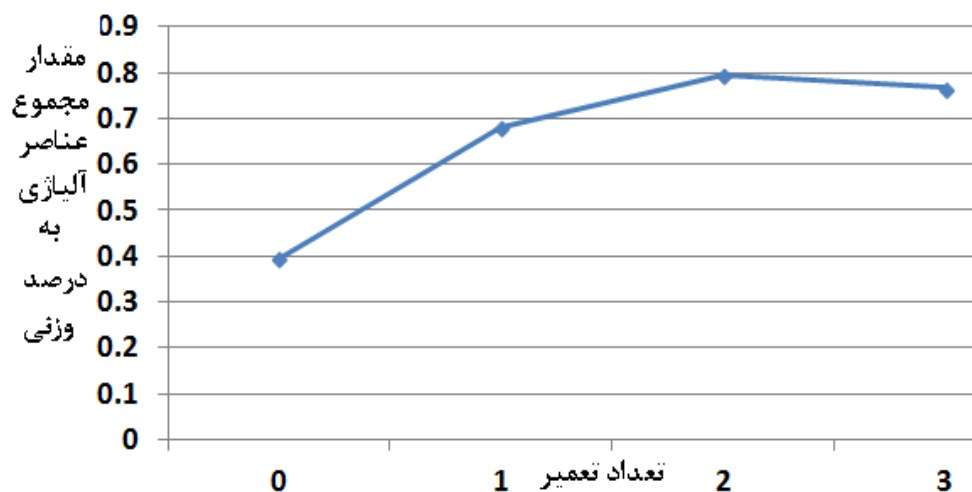


عملیات جوشکاری قوسی با الکتروود دستی در دمای محیط در شرایط کارگاهی باعث ایجاد تنش پسماند حرارتی در قطعه جوشکاری شده می شود. به همین دلیل نقاط با انرژی بالا منجر به افزایش نرخ خوردگی می شود. اما در مورد قطعه دوبار تعمیر شده، ممکن است تنش پسماند حرارتی تعدیل شده باشد که اثبات آن به مطالعات بیشتری نیاز دارد.



شکل 9: مقایسه نرخ خوردگی نمونه های تعمیر شده و شاهد

مطابق شکل 10، مجموع عناصر آلیاژی مس، نیکل، مولیبدن، کروم، وانادیم و نیوبیم که سبب افزایش مقاومت خوردگی می شوند در نمونه تعمیری دو نسبت به سایر نمونه ها بیشتر است. مطابق جدول 2 این عناصر از الکتروودها ناشی شده اند. عناصری مانند مس و نیکل پرلیت زا نیز هستند.



شکل 10: مقدار مجموع عناصر آلیاژی در چهار سری نمونه



4. نتیجه گیری

در این تحقیق، هدف مطالعه تاثیر تکرار عمل جوشکاری با الکتروود دستی بر روی استحکام کششی و مقاومت به خوردگی لوله فولادی API 5LX 52 به منظور تعمیر خطوط لوله نفت و گاز بوده است. به همین منظور، از چهار سری نمونه و هر سری نمونه شامل چهار نمونه، استفاده شده است. نتایج حاکی از این است که با تکرار عمل تعمیر، کاهش استحکام تسلیم (حداکثر تا 11 درصد نسبت به نمونه شاهد) بیشتر از کاهش استحکام کششی (حداکثر تا 3 درصد نسبت به نمونه شاهد) بوده است. زیرا کاهش اندازه دانه روی کاهش استحکام تسلیم اثرگذارتر است. از طرف دیگر، در این شرایط، مقاومت خوردگی نمونه با دو مرتبه تعمیر (حداقل 3 برابر) بیشتر از سایر نمونه های تعمیری است. زیرا در دومین مرتبه تعمیر، مقدار عناصر آلیاژی حداکثر شده است. به همین دلایل، با لحاظ نمودن مقاومت کششی و مقاومت خوردگی برای دستیابی به مناسبترین نتیجه، استفاده از الکتروودهای میکرو آلیاژی به همراه دو مرتبه تعمیر توصیه می شود.

مراجع

- [1] Y. F. Al-Obaid, Fracture Toughness Parameter in a Pipeline, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 43, No. 3, (1992) 461-469.
- [2] Nakamura H, Jiang W, Suzuki H, Maeda K, Irube T., Experimental study on repair of fatigue cracks at welded web gusset joint using CFRP strips, Thin-Walled Structures, Vol. 47 (2009) 1059-1068.
- [3] B. Vargas-Arista, J.M. Hallen, A. Albitzer, Effect of artificial aging on the microstructure of weldment on API 5L X-52 steel pipe, Materials Characterization, Vol. 58 (2007) 721-729
- [4] B. Vargas-Arista, C. Angeles-Chavez, A. Albitzer, J.M. Hallen, Metallurgical investigation of the aging process on tensile fracture welded joints in pipeline steel, Materials Characterization, Vol. 60 (2009) 1561-1568.
- [5] A. Fadaei and M. H. Jokar, Experimental Study on Mechanical Properties and Microstructure in A 36 Repair Butt Weld, Transactions of Mechanical Engineering, Vol. 38, No. M2, (2014) 431-438
- [6] مجید سبک روح , سید حجت هاشمی, محمد رضا فراهانی ارتباط ریزساختار و خواص مکانیکی با تنشهای پسماند ناحیه جوش چند پاسه محیطی خطوط لوله 56 اینچ فولادی API 5L X-70 پژوهش نفت شماره 76 سال 1392 .
- [7] O.E. Vega, J.M. Hallen, A. Villagomez, and A. Contreras, Slow strain rate corrosion of multiple repairs of girth welds in line pipes, REVISTA MEXICANA DE FÍSICAS, Vol. 55 (2009) 14-19.
- [8] ASTM E415 – 14, Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry, (2014) 2.
- [9] API Standard 1104, Welding of pipelines and related facilities, twentieth edition, American Petroleum Institute, (2005) 3-15.
- [10] CASTI Guidebook series, ASME section II 2000 materials index, 2th sediton, Vol. 1 (2000) 11.
- [11] AWS D1.1 Standard, Methods for Mechanical Testing of Welds, (2010) 123-124.
- [12] ASTM G1-90 Standard, Preparing, Cleaning and Evaluating Corrosion Test Specimens, (1999) 3.
- [13] ASTM G3-89 Standard, Convention Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing, (1999) 4.
- [14] ASTM E3-11, Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens, (2011) 2.
- [15] ASTM E112 Standard, Test Method for Determining Average Grain Size, (2013) 4-6.
- [16] ASTM E883 Standard, Guide for Reflected-Light Photomicrography, (1999) 6-8.



Effect of SMAW Repairing Repeatability on API5LX52 Specification

Mohammad Karim Kheradmand Vojdan

Department of Engineering, Bandar Abbas Branch, Islamic Azad University,
Bandar Abbas, Iran.

Seyed Ebrahim Vahdat

Department of Engineering, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University,
Amol, Iran. Email: e.vahdat@iauamol.ac.ir

Abstract. The effects of maintenance on the tensile strength and corrosion resistance of API5LX52 are investigated in this research. For this purpose, four series of samples including control samples, 1, 2 and 3 times repaired samples were prepared for tensile and corrosion tests. The results showed that in these circumstances one repeat of repair, reducing the yield strength and result in further reduction of tensile strength. In the case of twice repair samples; the corrosion resistance was higher than other repairs samples. For this reason, with regard to the tensile strength and corrosion resistance, to achieve the best result, 2 times repair is recommended.

Keywords: Tensile strength, Repair, Manual metal arc welding, Micro-alloy, Corrosion resistance