



## تعیین تجربی اثر موقعیت بر خواص مکانیکی و متالورژیکی جوش سر به سر چند پاسه لوله فولاد کم آلیاژ استحکام بالا در خطوط انتقال گاز طبیعی

مجید سبک روح<sup>1\*</sup> و علیرضا آجرلو<sup>2</sup>

1 - استادیار، دانشکده مهندسی، مرکز آموزش عالی محلات، محلات

2 - کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی اراک، اراک

\* محلات، صندوق پستی 3781151958، msabokrouh@mahallat.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
مقاله پژوهشی کامل دریافت: 3 اردیبهشت 1397 پذیرش: 1 شهریور 1397 ارائه در سایت: دی 1397	جوشکاری قوس فلزی الکترو پودش دار بر روی فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا در خطوط لوله انتقال گاز طبیعی ایران اهمیت ویژه‌ای دارد. در این مقاله خواص مکانیکی و متالورژیکی موقعیت‌های مختلف لوله (با قطر خارجی 36 اینچ و در ساعت‌های 1:30 - 12، 3 - 1:30، 4:30 - 3 و 6 - 4:30) برای تعیین منطقه بحرانی جوش سر به سر چند پاسه، ناحیه متأثر از حرارت و فلز پایه به وسیله آزمایش‌های کوانتومتری، متالوگرافی، کشش، ضربه و سختی‌سنجی بررسی شد. نتایج آزمون کشش، کمترین میزان استحکام نهایی را (در راستای عمود بر جوش و در موقعیت 3 - 4:30) برابر 463 مگاپاسکال و کمترین انرژی شکست را (در راستای عمود بر جوش و در موقعیت 3 - 1:30) برابر 96 ژول ارزیابی می‌کند که 61 درصد کاهش نسبت به فلز پایه را نشان می‌دهد. میزان تغییرات سختی در نواحی و موقعیت‌های گوناگون ناچیز (کمتر از 5 درصد) است. تصاویر حاصل از آزمون متالوگرافی با میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی نشان می‌دهد که مقدار پرلیت ناحیه پاس سطح جوش و منطقه تحت تأثیر حرارت نزدیک فلز پایه نسبت به فلز اصلی به ترتیب 12/5 و 25 درصد کاهش داشته است. مقدار کاهش نیویوم در موقعیت 6 - 4:30 نسبت به فلز 0/025 می‌باشد.

## Experimental determination of position effect on mechanical and metallurgical properties of HSLA multi-pass girth weld at natural gas pipelines

Majid Sabokrouh<sup>1\*</sup>, Ali Reza Ajarlo<sup>2</sup>

1- Faculty of Engineering, Mahallat Institute of Higher Education, Mahallat, Iran

2- Faculty of Engineering, Islamic Azad University of Arak, Arak, Iran

\* P.O.B. 3781151958, Mahallat, Iran, msabokrouh@mahallat.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received 23 April 2018  
Accepted 23 August 2018  
Available Online January 2019

### Keywords:

High strength low alloy steel  
Gas pipeline  
Girth weld

### Abstract

Shield metal arc welding on the high strength low alloy steels in pipelines to transport natural gas from Iran is of great importance. In this paper, mechanical and metallurgical properties of multi-pass weld in weld zone, heat affected zone (HAZ), and base metal (with 36 inch outside diameter) for determination of critical area is investigated. Also Chemical analysis, metallography, tensile, impact and hardness testes in different positions of pipe (hours 12-1:30, 1:30-3, 3-4:30 and 4:30-6) were carried out. Tensile test results showed the lowest ultimate strength (Vertical to weld and in position 3-4:30) equal to 463mpa, and the lowest energy impact (Vertical to weld and in position 1:30-3) equal to 96J that determine 61 percent reduction compared to the base metal. The amount of hardness variation in different areas and positions is negligible (less than 5 percent). Images of metallographic test made by light and electron microscopes demonstrated that the amount of perlite cap pass weld and heat affected zone near the base metal were decreased compared to main metal to respectively 12.5 and 25 percent. The amount of Nb reduction in position (4:30-6) relative to the base metal is 0.025.

### 1- مقدمه

افزایش مصرف انرژی در بخش‌های مختلف و رشد جایگزینی گاز طبیعی به جای سوخت‌های مایع بخصوص طی دهه اخیر و وجود منابع بیکران گاز طبیعی در کشور، ایران با دارا بودن 17 درصد از کل ذخایر گاز طبیعی جهان و 47 درصد از ذخایر منطقه خاور میانه از نظر ذخایر گاز طبیعی اولین کشور جهان محسوب می‌گردد از طرف دیگر باعث گردید توسعه در بخش‌های تولید،

با توجه به اهمیت گاز طبیعی به‌عنوان یکی از منابع مهم انرژی و روند رو به رشد مصرف آن در ایران و جهان موجب شده تا صنعت گاز به‌گونه‌ای چشم‌گیر مورد توجه قرار گیرد لذا از مهم‌ترین و آسان‌ترین راه‌های صدور گاز طبیعی، انتقال گاز از طریق خط لوله می‌باشد [1]. با توجه به رشد و توسعه کشور و

Please cite this article using:

M. Sabokrouh, A.R. Ajarlo, Experimental determination of position effect on mechanical and metallurgical properties of HSLA multi-pass girth weld at natural gas pipelines, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 5, No. 4, pp. 13-25, 2019 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

2002 پرداختند [8]. هاشمی و همکارانش در سال 2012 بررسی جوش پذیری اتصال چند پاسه محیطی در لوله فولادی ترمومکانیکال 56 اینچ ایکس 70 را بررسی کردند [9]. سبک روح و همکارانش در سال 2012 ارتباط ریزساختار و خواص مکانیکی ناحیه جوش چند پاسه محیطی خطوط لوله 56 اینچ فولادی ایکس 70 را بررسی کردند [10]. در این مقاله خصوصیات جوش محیطی و ناحیه متأثر از حرارت همراه با فلز پایه لوله فولادی ایکس 65 (با قطر خارجی 36 و ضخامت 0/406 اینچ مورد استفاده در خطوط انتقال گاز طبیعی ایران) به منظور مشخصه‌سازی خواص مکانیکی و متالورژیکی آن و تعیین ارتباط این خواص با یکدیگر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## 2- معرفی لوله فولادی آزمایش شده

لوله فولادی مورد آزمایش از نوع درز جوش مستقیم، گرید ایکس 65، قطر 36 اینچ و ضخامت 0/406 اینچ می‌باشد. در حال حاضر نمونه لوله در خطوط لوله انتقال گاز طبیعی ایران استفاده می‌شود. فولاد مربوطه از خانواده کم کربن پراستحکام و دارای مقادیر قابل توجهی عناصر میکروآلیاژ شامل تیتانیوم، وانادیم و نیوبیوم می‌باشد. جدول‌های 1 و 2 به ترتیب آنالیز شیمیایی عناصر موجود در فولاد و خواص مکانیکی لوله آزمایش شده را نشان می‌دهد.

## 3- برش کاری، پخ زنی و آماده سازی

برش کاری و پخ زنی لوله ایکس 65 به قطر 36 اینچ براساس استاندارد و توسط ماشین مخصوص برش کاری لوله انجام گرفت. شکل 1 برشکاری لوله را نشان می‌دهد. پس از پخ‌زنی لوله‌ها توسط ماشین مخصوص برای داشتن جوش سالم و با کیفیت، تمام سطح پخ لوله سنگ زده شد تا عاری از هر گونه اکسید و عیوب دیگر باشد، ضمن این‌که پاشنه جوش نیز بازدید و اصلاح شد. شکل 2 آماده سازی لوله‌ها جهت اتصال را نشان می‌دهد.

جدول 1 آنالیز شیمیایی عناصر موجود در لوله فولادی ایکس 65

نام عنصر	C	V	Nb	Sn	Si	Cu	Ni
درصد وزنی	0/10	0/003	0/027	0/004	0/30	0/04	0/02

جدول 2 خواص مکانیکی لوله

استحکام تسلیم (مگاپاسکال)	استحکام نهایی (مگاپاسکال)	درصد ازدیاد طول	سختی ویکرز
473	570	41	186

پالایش، انتقال و توزیع گاز طبیعی مورد توجه ویژه قرارگیرد و در این راستا بخش انتقال گاز نیز طی این مدت به‌ویژه در سال‌های اخیر با توسعه قابل توجه و روزافزون مواجه گردید [2]. افزایش رقابت در زمینه‌های کیفیت و قیمت محصول تمام شده باعث افزایش توجه و استفاده روزافزون از فولادهای میکروآلیاژ شده است [3]. خواص مطلوب فولادهای میکروآلیاژ را می‌توان به صورت کلی در کاهش قیمت تمام شده، قابلیت فرم‌دهی، قابلیت جوش‌پذیری در حد بسیار خوب به‌واسطه استفاده کم از عناصر آلیاژی خلاصه کرد. مکانیزم رسوب سختی از روش‌های اصلی استحکام بخشی در فولادهای میکروآلیاژها می‌باشد [4]. طولانی‌ترین شبکه خطوط لوله نفت و گاز در منطقه خاورمیانه را ایران دارد. در حال حاضر بیش از 80 درصد اتصالات در مونتاز، به‌وسیله جوش انجام می‌شود. در صنایع بزرگ به‌ویژه در خطوط انتقال گاز طبیعی، برای احداث خطوط جدید فولادی لزوماً از اتصال جوش (در محل) استفاده می‌شود. بزرگترین صنعت بومی در اتصال خطوط لوله حین تولید، مونتاز و تعمیر جوشکاری است. جوشکاری سر به سر حدود 25 درصد زمان لازم (بیشترین زمان کل ایجاد یک خط جدید لوله انتقال) را تشکیل می‌دهد و برای انجام آن نیاز به جوشکار ماهر با بالاترین درجه مهارت می‌باشد [5].

ممکن است جوش بدون عیب باشد، ولی بسیاری از عناصر شیمیایی آن سوخته باشد. جوش علاوه بر کیفیت ظاهری، باید سالم نیز باشد. به همین دلیل علاوه بر آزمون‌های غیرمخرب، نیاز به تایید سلامت به وسیله آزمون‌های مخرب مکانیکی (کشش، ضربه و سختی سنجی) و بررسی ریزساختارهای متالورژیکی (کوانتومتری و متالوگرافی) نیز ضروری است [6]. این مطلب با توجه به ویژگی و حساسیت فولادهای کم آلیاژ پر استحکام که در خطوط لوله انتقال گاز طبیعی استفاده می‌شود، اهمیت بیشتری دارد. در این گونه فولادها، عناصر میکروآلیاژی مانند تیتانیوم، وانادیم و نیوبیوم تمایل بسیار زیادی به ترکیب با کربن و نیتروژن موجود زمینه دارند. فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا اغلب حاوی مقادیر بسیار کمی نیوبیوم، وانادیم و تیتانیوم می‌باشد. این عناصر علاوه بر ریز دانه کردن ساختار، امکان سختی رسوب را نیز فراهم می‌آورند، حداکثر میزان کربن این فولادها کمتر از 0/2 درصد و مجموع عناصر آلیاژی آن‌ها کمتر از 2 درصد است [7].

هاموند و همکارانش با توجه به گستردگی شرایط تأثیرگذار در جوش سر به سر لوله در مطالعه‌ای جامع به بحث و بررسی خصوصیات و شرایط جوش سر به سر خطوط انتقال گاز در سال

سرجوش گرفته شد. هیچ‌گونه شیار جانبی و سطحی مشاهده نشد و میزان عیوب زیر حد استاندارد ارزیابی شد. جدول 3 مشخصات فرایند جوشکاری در هر پاس را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول مشخص است نوع الکتروود در پاس ریشه متفاوت بوده و شدت جریان در هر پاس نسبت به پاس قبل افزایش یافته است. برای مهار لوله‌ها از قید و بند خارجی استفاده شد. طرح پخ و آماده‌سازی لوله‌ها مطابق استاندارد با زاویه پخ 35 درجه و پیشانی پخ 1/6 میلی‌متر انجام گردید. شکل‌های 3 و 4 به ترتیب قید و بند طرح اتصال جوش و نحوه شرایط فرایند جوشکاری را نشان می‌دهد.

جدول 3 مشخصات فرایند جوشکاری در هر پاس

Table 3 Specifications of the welding process per pass

پاس	کلاس الکتروود	قطر الکتروود	مقدار جریان
ریشه	E6010	3/2	100
گرم	E7010	3/2	125
پرکن	E7010	4	130
سطح	E7010	4	135



شکل 3 آماده سازی قید و بند

Fig. 3 Preparation of the jig and fixture



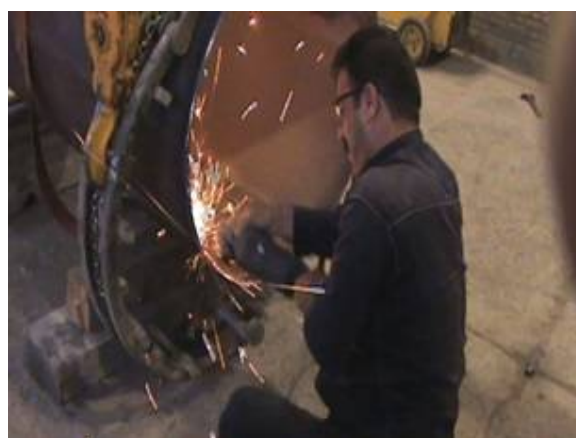
شکل 4 جوشکاری لوله

Fig. 4 Girth welding



شکل 1 برش کاری لوله

Fig. 1 Cutting pipe



شکل 2 آماده سازی لوله

Fig. 2 Preparation of the connection

#### 4- معرفی لوله فولادی آزمایش شده

جوشکاری بر روی دو قطعه لوله فولادی میکرو آلیاژ 50 سانتی‌متری از نوع درز جوش مسقیم ایکس 65 با قطر 36 اینچ و ضخامت 0/406 اینچ بر اساس استانداردهای ویژه در 4 پاس، شامل پاس ریشه، گرم، پرکن و سطح و به ترتیب با دو الکتروود 3/2 و 4 از ریشه تا سطح، توسط فرایند جوشکاری قوس فلزی الکتروود پوشش‌دار انجام گردید. پخ‌زنی بر اساس استاندارد به وسیله ماشین مخصوص انجام گرفت و درز جوش برای عاری از هرگونه براده و آلودگی توسط سنگ جت و برس برقی تمیز شد. به علت قطر بالای لوله‌ها، از دو جوشکار با کیفیت مطابق دستورالعمل ویژه جوشکاری تایید شده توسط نتایج تعیین کیفیت فرایند و دمای پیش‌گرم 100 درجه سانتی‌گراد و دمای بین پاسی بین 100 تا 250 درجه سانتی‌گراد استفاده شد. بازرسی چشمی برای هر پاس جداگانه انجام گردید و پس از اتمام جوشکاری آزمون‌های رادیوگرافی و آلتراسونیک از قسمت

## 5- تشریح آزمون‌های مخرب

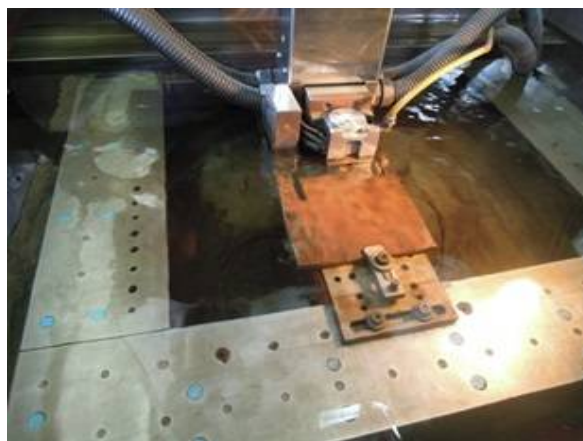
## 1-5- نمونه‌سازی

نمونه‌سازی بر روی جوش لوله با دقت بالا و با کمترین حرارت برش‌کاری توسط دستگاه‌های واترجت و وایرکات انجام گردید. برای برش‌کاری لوله توسط واترجت ابتدا محیط لوله به 8 قسمت مساوی تقسیم گردید و سپس در ساعت‌های مشخص شده (1:40، 3:10، 4:40، 6:10، 7:40، 9:10، 10:40 و 12:10) برش‌های طولی توسط دستگاه واترجت و با پودر ساینده گرانیت انجام گردید و سپس روی قطعات جدا شده برش‌های عرضی داده شد. به این ترتیب قطعاتی به طول 30 سانتی‌متری جدا گردید. شکل 5 برش دستگاه واترجت را نشان می‌دهد. نمونه‌سازی توسط دستگاه وایرکات به‌طور اتوماتیک و در داخل آب مقطر انجام گردید. شکل 6 برش پلیت اصلی توسط وایرکات را نشان می‌دهد.



شکل 5 برشکاری لوله توسط واترجت

Fig. 5 Cutting Pipe by Water jet



شکل 6 برشکاری پلیت اصلی توسط وایرکات

Fig. 6 Cutting main plate by wirecut

## 5-2- آزمون کوانتومتری

برای تعیین خواص متالورژیکی، آنالیز شیمیایی جوش در موقعیت‌های مختلف با دستگاه کوانتومتر و به روش اسپکترومتری نشری توسط دستگاه ویژه بر اساس استاندارد<sup>1</sup> در مرکز پژوهش متالورژی رازی انجام گردید. شکل 7 آزمون کوانتومتری بر روی نمونه‌های جوش را نشان می‌دهد. جدول 4 تا 7 نتایج آزمایش کوانتومتری را در نواحی مختلف جوش را نشان می‌دهد.



شکل 7 نمونه‌های آزمون کوانتومتری

Fig. 6 Quantometer samples

## جدول 4 ترکیب شیمیایی نمونه در موقعیت 12-1:30

Table 4 Chemical composition of the sample at position 12 - 1:30

نام عنصر	C	V	Nb	Ti	Si	Cu	Ni
درصد وزنی	0/12	0/005	0/003	0/008	0/11	0/03	0/54

## جدول 5 ترکیب شیمیایی نمونه در موقعیت 3-1:30

Table 5 Chemical composition of the sample at position 1:30-3

نام عنصر	C	V	Nb	Ti	Si	Cu	Ni
درصد وزنی	0/13	0/005	0/002	0/008	0/10	0/03	0/60

## جدول 6 ترکیب شیمیایی نمونه در موقعیت 3-4:30

Table 6 Chemical composition of the sample at position 3-4:30

نام عنصر	C	V	Nb	Ti	Si	Cu	Ni
درصد وزنی	0/13	0/005	0/003	0/007	0/09	0/03	0/57

## جدول 7 ترکیب شیمیایی نمونه در موقعیت 6-4:30

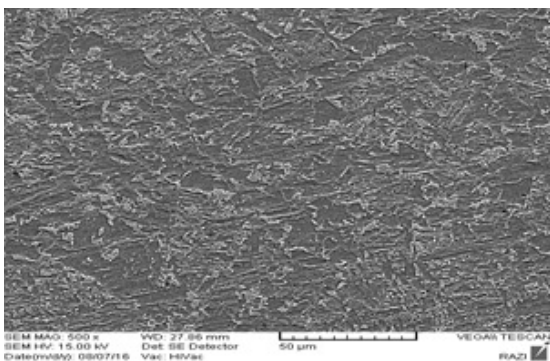
Table 7 Chemical composition of the sample at position 4:30-6

نام عنصر	C	V	Nb	Ti	Si	Cu	Ni
درصد وزنی	0/12	0/004	0/002	0/007	0/08	0/03	0/61

<sup>1</sup> ASTM A415-08

**3-5- مشاهده ریز ساختار با میکروسکوپ الکترونی روبشی**

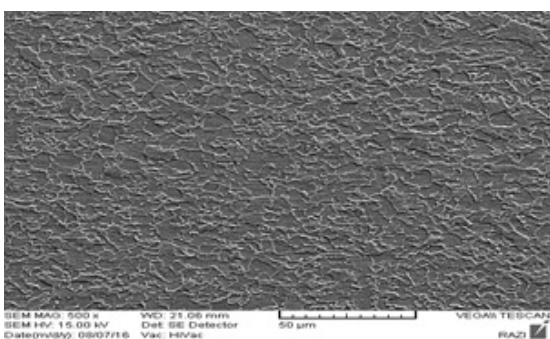
بررسی ریز ساختار فلز پایه و نمونه‌هایی در راستای عمود بر جوش و در موقعیت‌های (12-1:30)، (3-1:30) و (6-4:30) و در مناطق مختلف (ریشه جوش، ناحیه تحت تأثیر حرارت و منطقه جوش) با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>1</sup> انجام گردید. شکل 8 ریزساختار فلز پایه را با بزرگ‌نمایی 500 نشان می‌دهد. شکل‌های 9 تا 11 به ترتیب تصاویر میکروسکوپی را در موقعیت‌های 12-1:30، 3-1:30 و 6-4:30 (ناحیه تحت تأثیر حرارت، ریشه جوش و منطقه جوش) با بزرگ‌نمایی 500 نشان می‌دهد.



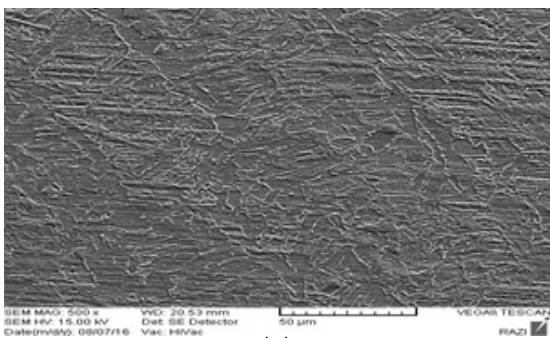
(ج)

شکل 9 تصاویر میکروسکوپی (الف) ناحیه تحت تأثیر حرارت، (ب) ریشه جوش و (ج) منطقه جوش در موقعیت 12-1:30

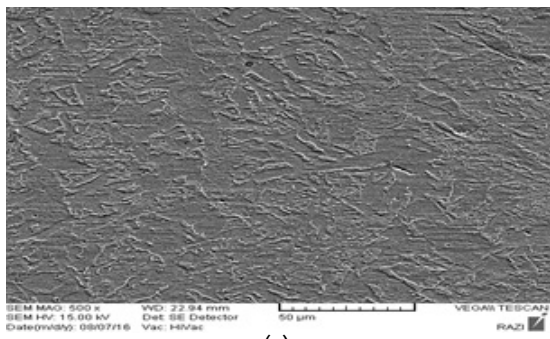
**Fig. 9** Microscopic images (a) heat affected zone, (b) weld root and (c) weld zone at position 12 - 1:30



(الف)



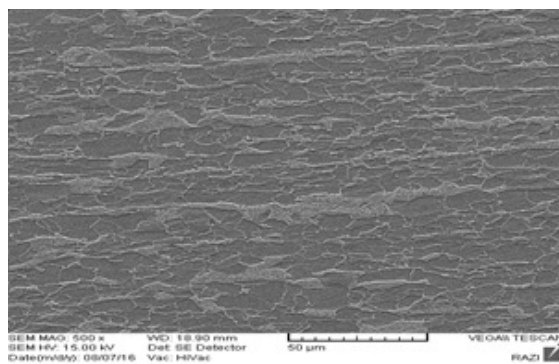
(ب)



(ج)

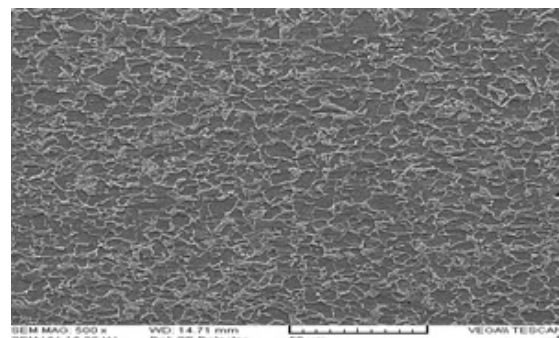
شکل 10 تصاویر میکروسکوپی (الف) ناحیه تحت تأثیر حرارت، (ب) ریشه جوش و (ج) منطقه جوش در موقعیت 1:30-3

**Fig. 10** Microscopic images (a) heat affected zone, (b) weld root and (c) weld zone at position 1:30-3

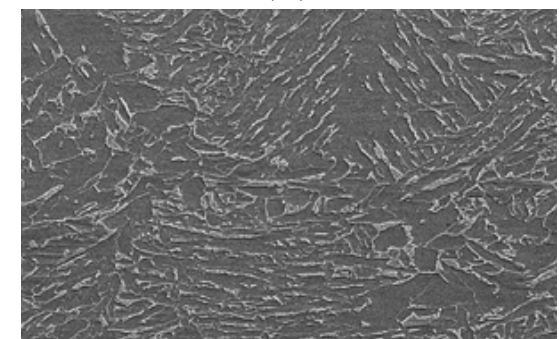


شکل 8 ریزساختار فلز پایه

**Fig. 8** Base metal microstructure



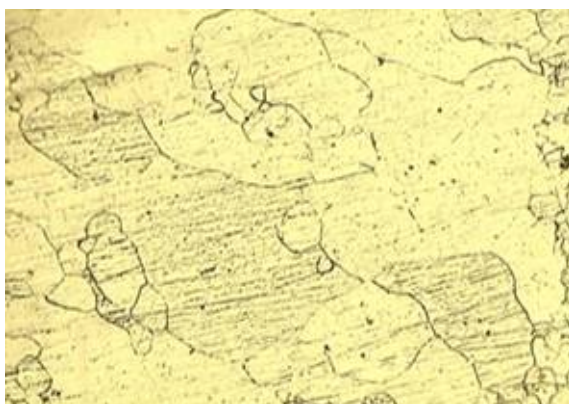
(الف)



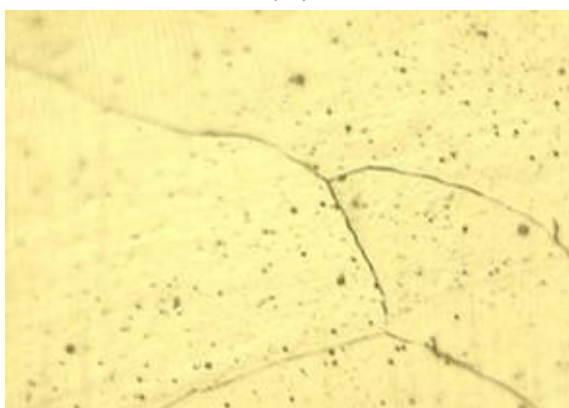
(ب)

<sup>1</sup> SEM, VEGA \ TESCAN

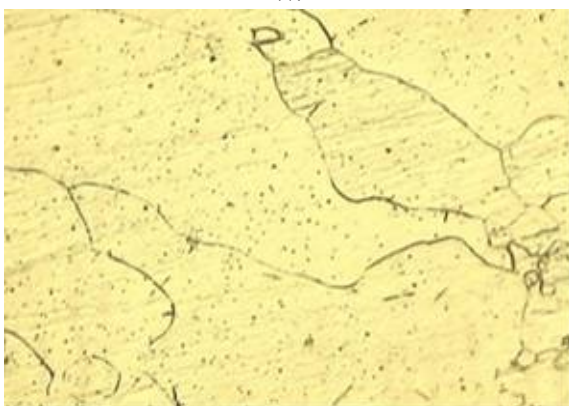
شکل 12 تصاویر میکروسکوپی فلز پایه را با بزرگ‌نمایی 100، 200 و 500 نشان می‌دهد. شکل‌های 13 تا 18 به ترتیب تصاویر میکروسکوپی ناحیه متأثر از حرارت مجاور فلز پایه، مجاور فلز جوش، پاس ریشه، گرم، سطح و پرکن را در بزرگ‌نمایی 100، 200 و 500 نشان می‌دهند.



(الف)



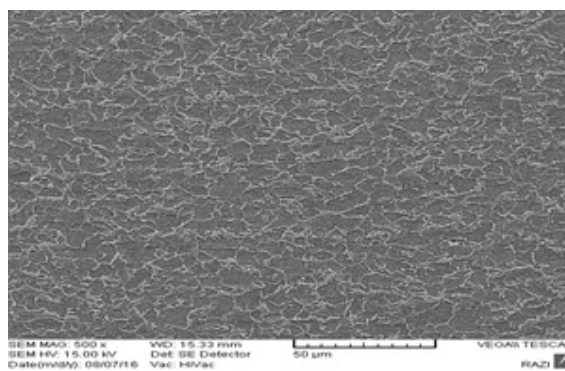
(ب)



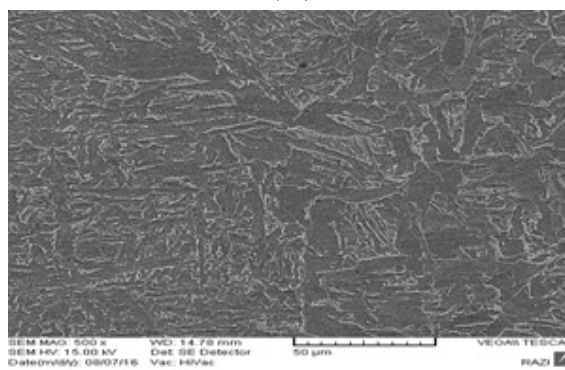
(ج)

شکل 12 تصاویر میکروسکوپی فلز پایه با بزرگ‌نمایی (الف) 100، (ب) 200 و (ج) 500

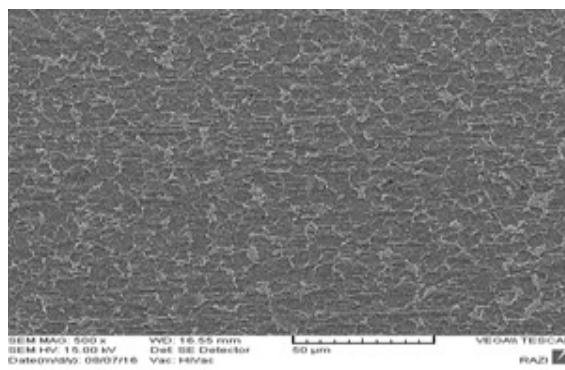
Fig. 12 Microscopic images of base metal with magnification (A) 100, (B) 200, and (C) 500



(الف)



(ب)



(ج)

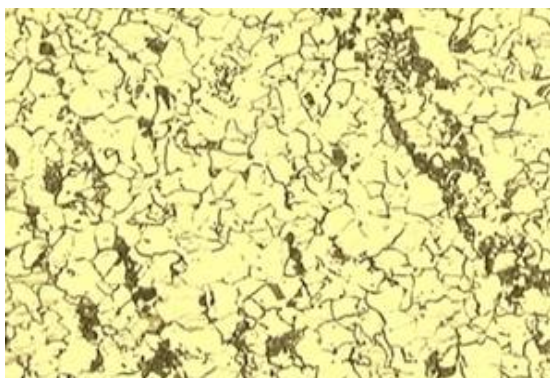
شکل 11 تصاویر میکروسکوپی (الف) ناحیه تحت تأثیر حرارت، (ب) ریشه جوش و (ج) منطقه جوش در موقعیت 3-4:30

Fig. 11 Microscopic images (a) heat affected zone, (b) weld root and (c) weld zone at position 3-4:30

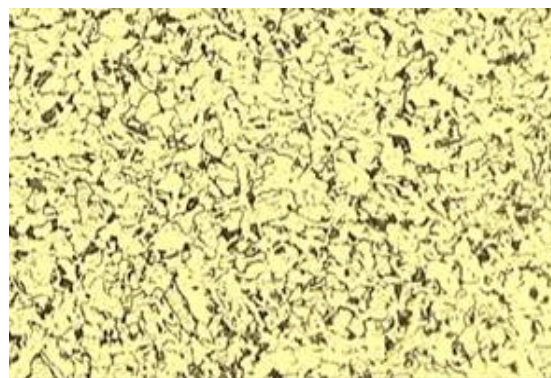
#### 4-5- متالوگرافی

برای مشاهده ساختار فلز پایه، ناحیه جوش و ناحیه تحت تأثیر حرارت از آزمون متالوگرافی استفاده گردید. جهت آزمون متالوگرافی نواحی فوق نمونه طبق استاندارد<sup>1</sup> از روی لوله مورد آزمایش تهیه گردید، به منظور بررسی روند تغییر ریزساختار (از منطقه جوش، مناطق اطراف آن و فلز پایه) تعیین اندازه از میکروسکوپ نوری در موقعیت بحرانی 6-4:30 استفاده گردید.

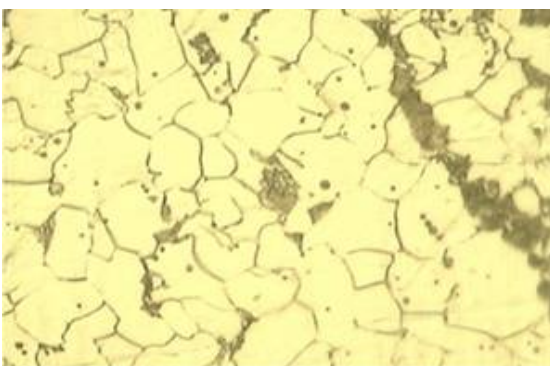
<sup>1</sup> ASTM E 3



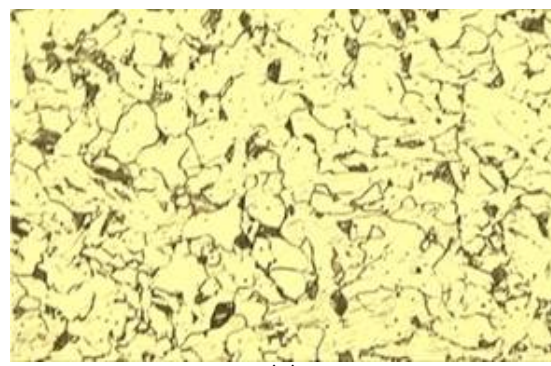
(ب)



(الف)



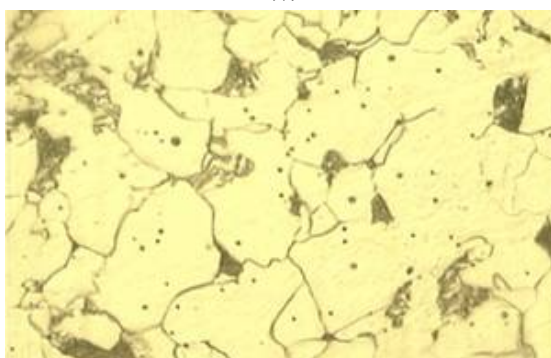
(ج)



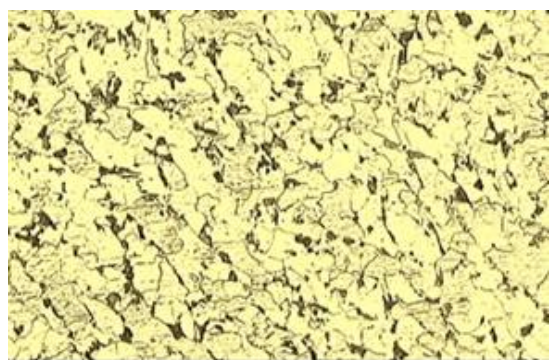
(ب)

شکل 14 تصاویر میکروسکوپی ناحیه متأثر از حرارت مجاور جوش با بزرگ نمایی (الف) 100، (ب) 200 و (ج) 500

Fig.14 Microscopic images of the heat affected zone adjacent to weld zone by magnification (a) 100, (b) 200 and (c) 500



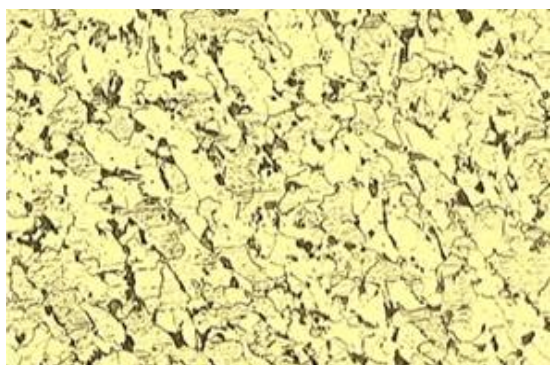
(ج)



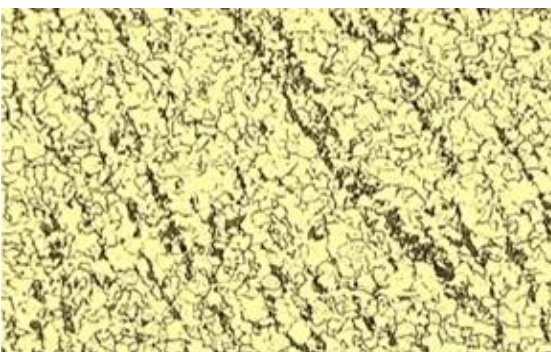
(الف)

شکل 13 تصاویر میکروسکوپی ناحیه متأثر از حرارت مجاور فلز پایه با بزرگنمایی (الف) 100، (ب) 200 و (ج) 500

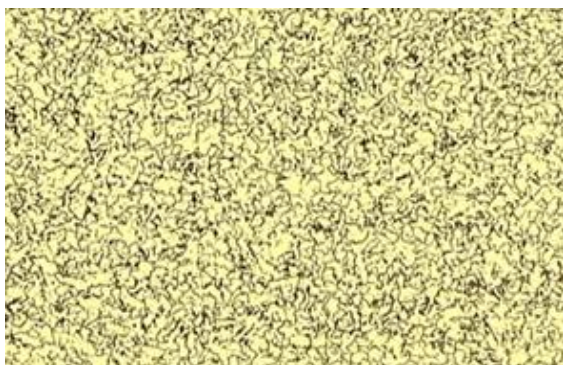
Fig. 13 Microscopic images of the heat affected zone adjacent to base metal by magnification (a) 100, (b) 200 and (c) 500



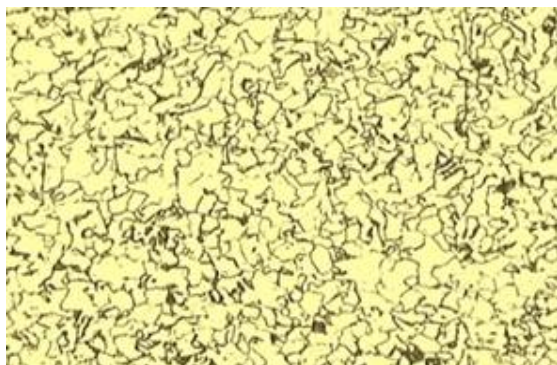
(ب)



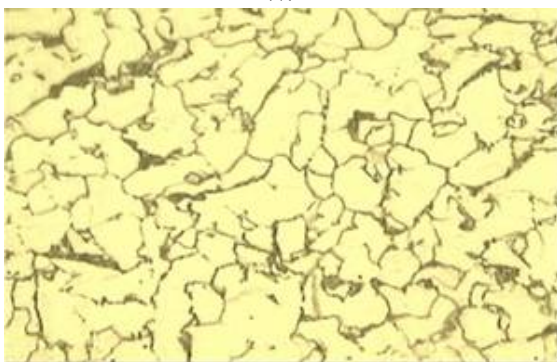
(الف)



(الف)



(ب)



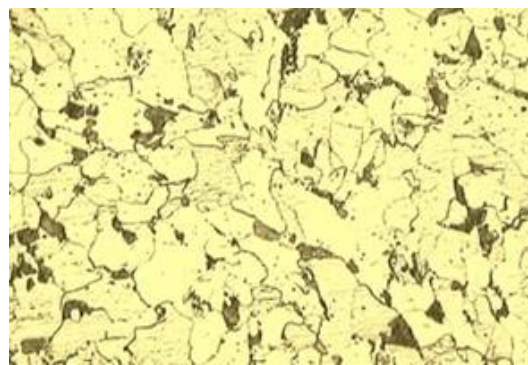
(ج)

شکل 17 تصاویر میکروسکوپی پاس پرکن با بزرگنمایی (الف) 100، (ب) 200 و (ج) 500

Fig. 17 Microscopic images of the filler pass with magnification (A) 100, (B) 200, and (C) 500



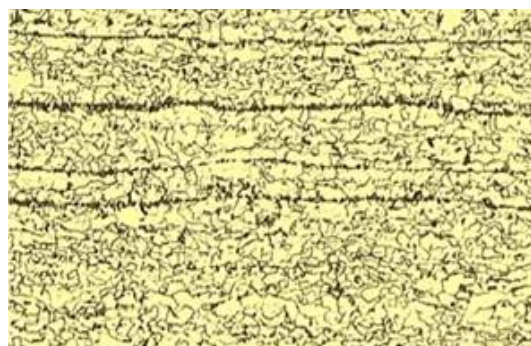
(الف)



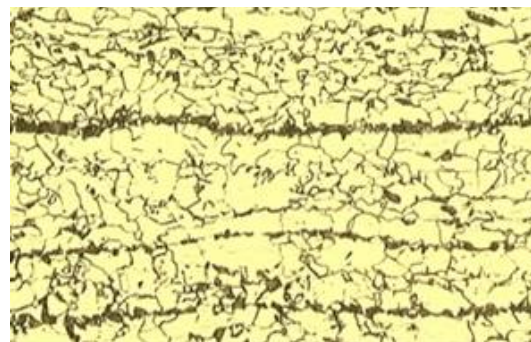
(ج)

شکل 15 تصاویر میکروسکوپی پاس ریشه با بزرگنمایی (الف) 100، (ب) 200 و (ج) 500

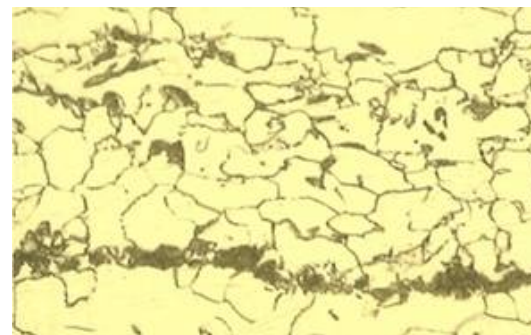
Fig. 15 Microscopic images of the root pass with magnification (A) 100, (B) 200, and (C) 500



(الف)



(ب)



(ج)

شکل 16 تصاویر میکروسکوپی پاس گرم با بزرگنمایی (الف) 100، (ب) 200 و (ج) 500

Fig. 16 Microscopic images of the hot pass with magnification (A) 100, (B) 200, and (C) 500



4:30-6) و در راستای عمود بر (در موقعیت‌های 3- 1:30 و 4:30-6) توسط ماشین آزمایشگاهی بر اساس استاندارد انجام شد. نتایج بدست آمده انرژی شاری را بیش از 90 ژول نمایش می‌دهد. شکل 20 نمونه شکست آزمون ضربه را نشان می‌دهد. نتایج آزمون‌های ضربه در جدول 9 آورده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که انرژی شاری نمونه در موقعیت 3- 1:30 عمود بر جوش کاهش یافته است.



شکل 19 سطح مقطع شکست نمونه‌ها

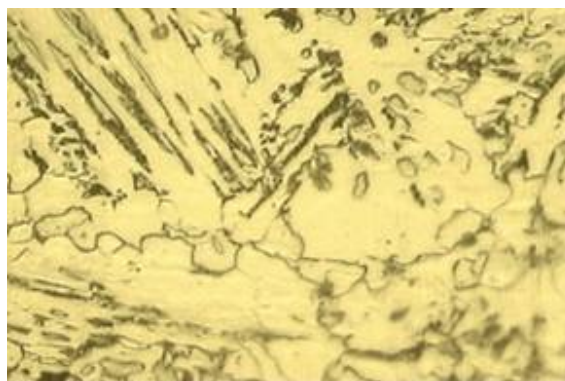
Fig. 19 The cross-sectional area of samples rupture

#### جدول 8 نتایج آزمون کشش

Table 5 Tensile test results		نمونه	موقعیت
استحکام تسلیم	استحکام نهایی		
473	570	فلز پایه	راستای طولی لوله
472	572	فلز پایه	راستای محیطی لوله
403	526	عمود بر جوش	12- 1:30
424	538	عمود بر جوش	1:30- 3
391	463	عمود بر جوش	3- 4:30
423	544	در راستای جوش	3- 4:30
401	541	عمود بر جوش	4:30- 6
نسبت استحکام تسلیم به کششی	درصد ازدیاد طول	نمونه	موقعیت
0/83	41	فلز پایه	راستای طولی لوله
0/83	34	فلز پایه	راستای محیطی لوله
0/77	34	عمود بر جوش	12- 1:30
0/79	29	عمود بر جوش	1:30- 3
0/84	11	عمود بر جوش	3- 4:30
0/78	26	در راستای جوش	3- 4:30
0/74	24	عمود بر جوش	4:30- 6



(ب)



(ج)

شکل 18 تصاویر میکروسکوپی پاس سطح با بزرگنمایی (الف) 100، (ب) 200 و (ج) 500

Fig. 18 Microscopic images of the filler pass with magnification (A) 100, (B) 200, and (C) 500

#### 5-5- آزمون کشش

آزمون کشش بر روی 7 نمونه (2 نمونه در راستاهای محوری و محیطی فولاد پایه، 4 نمونه در راستای عمود بر جوش محیطی و در موقعیت‌های 12- 1:30، 3- 4:30، 3- 1:30 و 4:30- 6 و 1 نمونه در راستای جوش در موقعیت 3- 4:30) توسط دستگاه آزمون کشش با ظرفیت 20 تن و با سرعت کشش 5 میلی‌متر بر دقیقه مطابق استاندارد<sup>1</sup> انجام شد. بر روی نمونه‌های عمود بر جوش، شکست در خارج از منطقه‌ی درز جوش رخ داده بود. مطابق استاندارد نسبت استحکام تسلیم به کششی کمتر از 0/85 است. شکل 19 در موقعیت 12- 1:30 و 3- 4:30 دهد. نتایج آزمون کشش در جدول 8 آمده است.

#### 5-6- آزمون ضربه شاری

برای تعیین مقاومت در راستای (طولی و محیطی) فلز پایه و در راستای جوش (در موقعیت‌های ساعت 12- 1:30، 3- 1:30 و

<sup>1</sup> EN 895, ASTM E 8M

جوشکاری باشد.

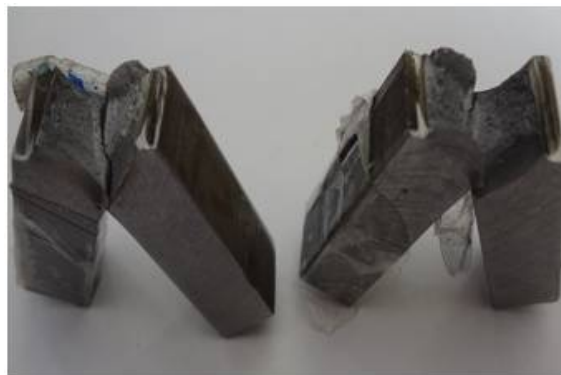
جدول 10 عدد سختی فلز اصلی، ناحیه تحت تأثیر حرارت و ناحیه جوش در موقعیت‌های مختلف

**Table 10** The hardness of the original metal, the heat affected zone and the weld zone at different positions

موقعیت	ناحیه تحت تأثیر حرارت						فلز اصلی		
	9	8	7	6	5	4	3	2	1
12-1:30	191	188	160	177	181	183	189	187	186
3-1:30	170	172	181	189	184	182	187	183	185
3-4:30	186	181	170	182	181	183	192	190	191
6-4:30	171	180	182	186	183	185	182	181	180

درصد عناصر میکروآلیاژی (تیتانیوم، وانادیم و نیوبیوم) در موقعیت‌های گوناگون تفاوت دارد و این امر سبب تغییر استحکام نهایی و استحکام تسلیم جوش می‌شود، عناصر سیلیسیم، منگنز و نیوبیوم فلز جوش در موقعیت‌های مختلف نسبت به فلز پایه کاهش داشته است. عنصر وانادیم در تمام موقعیت‌ها نسبت به فلز پایه افزایش (10 تا 20 درصد) داشته است و مقدار آن در موقعیت‌های 12-1:30، 3-1:30 و 3-4:30 ثابت و در موقعیت 6-4:30 نسبت به موقعیت‌های دیگر کاهش داشته است. میزان افزایش کربن در موقعیت ساعت‌های 12-1:30 و 6-4:30 بیشتر از موقعیت‌های 3-1:30 و 3-4:30 می‌باشد. میزان تیتانیوم در موقعیت‌های 12-1:30 و 3-4:30 جوش بیشتر از نواحی دیگر است. مقدار کاهش عنصر نیوبیوم در موقعیت‌های 3-1:30 و 6-4:30 نسبت به دیگر نواحی جوش بیشتر است.

بررسی‌های ریزساختاری نمونه‌ها نشان می‌دهد که ساختار میکروسکوپی در فلز پایه شامل پرلیت و فریت، ناحیه تحت تأثیر حرارت شامل ریزساختار درشت و خشنی از فریت سوزنی و فریت بینیتی و ناحیه جوش شامل فریت سوزنی (ویت من اشتاتن)، فریت مرز دانه‌ای (پروپوتکتوئید) و مقدار کمی بینیت است. بررسی ریزساختار با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی انجام شده است. روش محاسبه درصد فازهای روش نقطه شماری است. ساختار میکروسکوپی در فلز پایه شامل دانه‌های فریت به همراه نواحی و ردیف‌های پرلیت (24 درصد پرلیت و 76 درصد فریت) می‌باشد. تصاویر میکروسکوپی ناحیه تحت تأثیر حرارت مجاور به فلز پایه شامل ساختار ریز دانه فریت به همراه نواحی کوچک پرلیت (18 درصد پرلیت و 82 درصد فریت) می‌باشد. تصاویر میکروسکوپی ناحیه تحت تأثیر حرارت مجاور به جوش شامل



شکل 20 سطح مقطع شکست نمونه‌های آزمون ضربه

**Fig. 20** The cross-sectional breakdown of impact test samples

جدول 9 انرژی شکست نمونه‌های آزمون ضربه جوش سر به سر لوله‌ی ایکس 65 در موقعیت‌های مختلف

**Table 9** Impact Energy of test samples of X-65 pipe girth weld in different situations

موقعیت	نمونه	انرژی شکست (ژول)
در راستای طولی لوله	فلز پایه	246
در راستای محیطی لوله	فلز پایه	163
12-1:30	در راستای جوش	130
3-1:30	در راستای جوش	128
3-1:30	عمود برجوش	96
6-4:30	عمود برجوش	106
6-4:30	در راستای جوش	122

## 5-7- سختی سنجی

برای تعیین میزان سختی فلز پایه، ناحیه تحت تأثیر حرارت و منطقه جوش روی نمونه‌های آزمون (در ساعت‌های 12-1:30، 3-1:30، 3-4:30 و 6-4:30) از روش سختی‌سنجی ویکرز طبق استاندارد انجام شد. جدول 10 عدد سختی فلز اصلی، ناحیه متأثر از حرارت و ناحیه جوش را در موقعیت‌های مختلف نمونه نشان می‌دهد. شماره‌گذاری از فلز پایه به سمت جوش انجام شده است. نقاط 7، 8 و 9 به ترتیب در پاس‌های ریشه، پر کن و سطح می‌باشد.

## 6- بحث و بررسی

اختلاف آنالیز شیمیایی در فلز پایه و موقعیت‌های مختلف جوش محیطی به ترتیب در جدول‌های 1 و 4 تا 7 قابل مشاهده است. آنالیز شیمیایی در موقعیت‌های مختلف جوش محیطی نیز متفاوت می‌باشد. این تفاوت می‌تواند ناشی از تغییر میزان درصد عناصر فلز پایه در موقعیت‌های مختلف بر اساس حرارت ورودی ناشی از شدت جریان الکتریکی، سرعت و نحوه حرکت الکتروود

در استاندارد بیشتر است و این موضوع سلامت جوش را تایید می‌کند. کاهش مقاومت به ضربه در موقعیت‌های مختلف جوش محیطی نسبت به فلز پایه رفتار غیرخطی دارد. انرژی شکست نمونه‌ها در راستای جوش و در راستای عمود بر جوش نسبت به فلز پایه به ترتیب (22 و 59 درصد) کاهش داشته است. مقاومت به ضربه در راستای جوش از موقعیت 1:30-12 به سمت موقعیت 6-4:30 کاهش داشته است و کاهش مقاومت به ضربه در راستای عمود بر جوش تقریباً سه برابر در راستای جوش می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد کمترین مقاومت به ضربه نمونه‌ها در راستای جوش و عمود بر جوش در موقعیت ساعت 3-1:30 می‌باشد. در اثر درجه حرارت‌های مختلف و غیرکنترلی ناشی از حالت‌های مختلف جوشکاری، تغییر حرکت مچ دست در حین جوشکاری، تغییر زوایای الکتروود در حین جوشکاری محیطی، اندازه عناصر میکروآلیاژی و پیوندشان با زمینه تغییر می‌کند [12]. این تغییرات حرارتی می‌تواند مورفولوژی عناصر محلول در فازها را عوض کند. بنابراین کاهش انرژی شاری نسبت به فلز پایه در موقعیت‌های مختلف جوش منطقی به نظر می‌رسد. شکل 20 نشان‌دهنده مکانیزم شکست نمونه‌های آزمون ضربه را به صورت ترد است.

جدول 10 نشان دهنده کاهش میزان سختی مناطق تحت تأثیر حرارت (در موقعیت‌های مختلف) نسبت به فلز پایه است. کمترین میانگین مقدار سختی جوش در موقعیت 3-1:30 برابر 174 ویکرز می‌باشد. این منطقه کمترین انرژی شکست را نیز داشته است. میزان سختی به عواملی مانند تغییر نوع الکتروود در پاس ریشه و پاس‌های بعدی، افزایش قطر الکتروود، شدت جریان الکتریکی، سرعت جوشکاری، دمای پیش‌گرم، دمای بین پاسی و در مجموع حرارت ورودی بستگی دارد. هر یک از این عوامل تأثیر در حرارت پاس‌های قبلی و بعدی دارد. با افزایش تعداد پاس‌ها، گرادیان درجه حرارت، تعداد جهات و نرخ سرد شدن تغییر می‌کند.

#### 7- نتیجه‌گیری

- درصد عناصر شیمیایی در فلز جوش نسبت به فلز پایه دارای تغییراتی می‌باشد. کربن و وانادیم موجود در فلز جوش نسبت به فلز پایه دارای درصد وزنی بیشتر است. افزایش مقدار درصد کربن و وانادیم بر روند استحکام تسلیم و نهایی تأثیر مثبت دارد. افزایش مقدار کربن بر روی درصد ازدیاد طول اثر منفی دارد. در نتیجه می‌تواند باعث کاهش مقاومت به ضربه شود. مقدار درصد تیتانیوم در موقعیت‌های بالای جوش (ساعت

ساختار درشت دانه ویدمن‌اشتان و فریت سوزنی به همراه نواحی کوچک پرلیت (21 درصد پرلیت و 79 درصد فریت) می‌باشد. تصاویر میکروسکوپی ریشه جوش شامل ساختار درشت دانه فریت به همراه نواحی کوچک پرلیت (25 درصد پرلیت و 75 درصد فریت) می‌باشد. تصاویر میکروسکوپی پاس گرم‌کن شامل ساختار ریز دانه فریت به همراه نواحی کوچک پرلیت (25 درصد پرلیت و 75 درصد فریت) می‌باشد. تصاویر میکروسکوپی پاس پرکن شامل ساختار ریز دانه فریت به همراه نواحی کوچک و ردیف‌های پرلیت (26 درصد پرلیت و 74 درصد فریت) می‌باشد. تصاویر میکروسکوپی پاس سطح شامل ساختار شبکه فریت در مرز دانه‌های آستنیت اولیه با رشد صفحات جانبی به همراه فریت پرویونکتوئید و پرلیت (21 درصد پرلیت و 79 درصد فریت) می‌باشد.

با توجه به نتایج به دست آمده در جدول 8 نسبت استحکام تسلیم به استحکام کششی در موقعیت‌های مختلف متفاوت است [11]. میانگین نسبت استحکام تسلیم به استحکام نهایی در نمونه‌های عمود بر جوش و در راستای جوش به ترتیب برابر 79 و 78 درصد می‌باشد. میزان تغییر طول نمونه عمود بر جوش در موقعیت 4:30-3 نسبت به فلز پایه 73 درصد کاهش داشته است. میزان استحکام تسلیم نمونه‌ها در راستای جوش و در راستای عمود بر جوش به طور میانگین به ترتیب 10/4 و 14/3 درصد نسبت به فلز پایه کاهش داشته است. میزان استحکام نهایی نمونه‌ها در راستای جوش و در راستای عمود بر جوش به طور میانگین به ترتیب 5 و 9/5 درصد نسبت به فلز پایه کاهش داشته است. میزان تغییر طول نمونه‌ها در راستای جوش و در راستای عمود بر جوش به طور میانگین به ترتیب 24 و 40 درصد نسبت به فلز پایه کاهش داشته است و میزان استحکام تسلیم به استحکام کششی نمونه‌ها در راستای جوش و در راستای عمود بر جوش نسبت به فلز پایه به ترتیب 6 و 5/5 درصد کاهش داشته است. مقدار استحکام تسلیم، استحکام نهایی و تغییر طول نمونه عمود بر جوش در موقعیت 4:30-3 نسبت به فلز پایه به ترتیب برابر 17، 19 و 73 درصد کاهش داشته است. مقدار درصد کاهش استحکام تسلیم، استحکام نهایی، تغییر طول و نسبت استحکام تسلیم به استحکام کششی نمونه در راستای جوش محیطی در موقعیت 4:30-3 نسبت به فلز پایه به ترتیب برابر 11، 5، 24 و 9 می‌باشد.

با توجه به نتایج به دست آمده در جدول 9 کمترین مقدار انرژی شاری در نمونه راستای عمود بر جوش و در موقعیت 3-1:30 برابر 96 ژول می‌باشد که از میانگین حداقل داده شده

(21 درصد پرلیت می‌باشد. ساختار میکروسکوپی پاس سطح نسبت به سایر پاس‌ها متفاوت است و دارای 21 درصد پرلیت می‌باشد. کمترین مقدار پرلیت در ناحیه تحت تأثیر حرارت نزدیک به فلز جوش 18 درصد می‌باشد.

### 8- مرجع

- [1] S. H. Hashemi, D. Mohamaadyani, Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 98, pp. 8-15, 2012.
- [2] S. H. Hashemi, D. Mohamaadyani, M. Pouranvari, S. M. Mousavizadeh, On the relation of microstructure and impact toughness characteristics of DSAW steel of grade API X70, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 32, pp. 33-40, 2009.
- [3] A. Fragiél, R. Schouwenaarf, R. Guardiola, R. Perez, Microstructural characteristics of different commercially available API 5L X65 steels, *Journal of New Materials for Electrochemical Systems*, Vol. 8, pp. 115-119, 2005.
- [4] F. B. Pickering, The spectrum of microalloyed high strength low alloy steels in HSLA steels technology and applications, *International Conference on Technology and Applications of HSLA Steels*, Philadelphia, 1983.
- [5] T. Goldman, *New joining technology for metal pipe in the construction industry*, Construction Industry Institute & Break-through Strategy Committee, Texas, pp. 1-25, 2003.
- [6] M. C. Zhao, K. Yang, Y. Shan, The effects of thermo-mechanical control process on microstructures and mechanical properties of a commercial pipeline steel, *Materials Science and Engineering*, Vol. 335, pp. 14-20, 2002.
- [7] W. W. Bose-Filho, A. L. M. Carvalho, M. Strangwood, Effect of alloying elements on the microstructure and inclusion formation in HSLA multipass welds, *Materials Characterization*, Vol. 58, pp. 29-39, 2007.
- [8] J. Hammond, S. Blackman, M. Hudson, Challenges of girth welding X100 linepipe for gas pipelines, *Application and Evaluation of High-Grade Linepipes in Hostile Environments*, Yokohama, 2002
- [9] S. H. Hashemi, M. Sabokrouh, M. R. Farahani, Investigation of welding in multi-pass girth welding of thermomechanical steel pipe, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 4, pp. 60-73, 2013. (in Persian)
- [10] M. Sabokrouh, S. H. Hashemi, M. R. Farahani, Experimental study of the weld microstructure properties in assembling of natural gas transmission

(12-3) بیشتر از موقعیت‌های پایینی جوش (3-6) می‌باشد. در آزمون کشش، گسست در خارج از ناحیه جوش اتفاق افتاده است. نتایج موید افزایش مقدار تیتانیوم و کربن در منطقه جوش است. مقدار استحکام نهایی نمونه‌ها در راستای عمود بر جوش به‌طور میانگین برابر 528 مگاپاسکال است. نتایج آزمون کشش نشان می‌دهد میزان تغییر طول نسبی، استحکام تسلیم و استحکام کششی فلز جوش در نواحی مختلف نسبت به فلز پایه کاهش یافته و در نهایت موجب کاهش داکتیلیتی و ضربه پذیری شده است. مقدار استحکام تسلیم، استحکام نهایی و تغییر طول نمونه عمود بر جوش در موقعیت 4:30-3 نسبت به سایر نواحی جوش کمتر است. این مقادیر نسبت به فلز پایه به ترتیب برابر 17، 19 و 73 درصد کاهش داشته است. این نتیجه موید کاهش عنصر میکروآلیاژی تیتانیوم در موقعیت ساعت‌های پایین نسبت به ساعت‌های بالای جوش است. نتایج نشان می‌دهد موقعیت پایینی جوش در منطقه بحرانی استاتیکی قرار دارد.

- مقاومت به ضربه فلز جوش در راستای عمود بر جوش در مقایسه با راستای جوش کاهش بیشتری نموده است که نشان دهنده کاهش چقرمگی در این راستا می‌باشد. آزمون ضربه روند کاهش انرژی شکست نمونه‌ها در موقعیت‌های مختلف فلز جوش نسبت به فلز پایه را نشان می‌دهد. این نتیجه مؤید افزایش کربن و سختی پذیری در منطقه جوش است. میانگین انرژی شکست در راستای جوش و فولاد پایه به ترتیب برابر 127 و 163 ژول و میانگین انرژی شکست در راستای عمود بر جوش و فلز پایه به ترتیب 101 و 246 می‌باشد. کمترین مقدار انرژی شکست در ساعت 3-1:30 اتفاق افتاده است. نتایج نشان می‌دهد موقعیت بالایی جوش در منطقه بحرانی دینامیکی قرار دارد.

- نتایج آزمون سختی نشان می‌دهد بیشترین مقدار سختی در فلز پایه و در موقعیت 4:30-3 میانگین برابر 191 ویکرز و کمترین آن در فلز جوش و در موقعیت 3-1:30 برابر 174 ویکرز می‌باشد. کمترین مقدار انرژی شکست و سختی جوش به ترتیب برابر 96 ژول و 170 ویکرز در موقعیت 3-1:30 ارزیابی گردیده است.

- در نواحی مختلف جوش و متأثر از حرارت ساختارهای متنوع متالورژیکی مشاهده گردید. ساختار میکروسکوپی فلز پایه، ناحیه تحت تأثیر حرارت نزدیک به فلز پایه، ناحیه تحت تأثیر حرارت نزدیک به فلز جوش، پاس ریشه، پاس گرم کن، پاس پرکن و پاس سطح به ترتیب شامل (24، 18، 21، 25، 25، 26 و

- Characterization, Vol. 60, pp. 225–233, 2009.
- [12] Beidokhti, B., Koukabi, A.H., Dolati A., "Effect of titanium addition on the microstructure and inclusion formation in submerged arc welded HSLA pipeline steel", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp. 4027-4035, 2009.
- pipelines, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 231, No. 6, pp. 1039-1047, 2017.
- [11] Beidokhti, B., Koukabi, A.H., Dolati, A., Influences of titanium and manganese on high strength low alloy SAW weld metal properties, *Materials*