



Experimental Determination of the Normalizing Effect on Tensile Strength, Impact Strength, Fatigue, Residual Stress of Girth Welding on Iranian Natural Gas Transmission Pipelines

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Sabokrouh M.*¹ PhD

How to cite this article

Sabokrouh M. Experimental Determination of the Normalizing Effect on Tensile Strength, Impact Strength, Fatigue, Residual Stress of Girth Welding on Iranian Natural Gas Transmission Pipelines. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(5):1099-1105.

ABSTRACT

In this article, the effects of normalization heat treatment on girth weld with containing titanium oxide and titanium carbide microparticles (X-65 grade of the gas pipeline) were evaluated. The Charpy test results show that in the normalized sample containing titanium oxide microparticles and titanium carbide microparticles compared to the no heat treatment sample (containing titanium carbide microparticles and titanium carbide microparticles), has been respectively increased by 33% and 18%. Also, the ultimate strength of normalized samples containing titanium oxide microparticles and titanium carbide microparticles compared to the no heat treatment sample (containing titanium oxide microparticles and titanium carbide microparticles) has been increased by 9% and 11%, respectively. The results show that the fatigue life in both normalized micro-alloy samples has been increased. The fatigue life in the normalized sample of titanium carbide microparticles has increased more than the titanium oxide microparticles. The fatigue test results show that the fatigue life (150-N force) has been increased by 36% in the normalized sample containing titanium carbide microparticles compared to the normalized sample containing titanium oxide microparticles. In this loading, the fatigue life (normalized sample containing titanium carbide microparticles compared to the no heat treatment sample) has been increased by 27%. The hole-drilling strain-gage results show that in the normalized sample containing titanium oxide and titanium carbide microparticles, hoop residual stresses have been respectively decreased by 12% and 8% compared to the no heat treatment sample (containing titanium oxide microparticles and titanium carbide microparticles).

Keywords Welding; Fatigue; Residual Stress; Impact Strength; Tensile Strength

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

*Correspondence

Address: Engineering Faculty, Mahallat Institute of Higher Education, Mahallat, Iran. Postal Code: 3781151958

Phone: -

Fax: -

msabokrouh@mahallat.ac.ir

Article History

Received: November 10, 2018

Accepted: September 15, 2019

ePublished: May 09, 2020

CITATION LINKS

[1] Microstructura consideration on quantitative analysis of thermal treatment: Application to decarburization of steel [2] Mechanical properties and microstructure of SMAW welded and thermally treated HSLA-80 steel [3] Effects of multiple normalizing processes on the microstructure and mechanical properties of low carbon steel weld metal with and without Nb [4] Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel [5] Residual stresses in welded structures [6] Effect of alloying elements on the microstructure and inclusion formation in HSLA multipass welds [7] Validated residual stress profiles for fracture assessments of stainless steel pipe girth welds [8] On the relation of microstructure and impact toughness characteristics of DSAW steel of grade API X70 [9] Influences of titanium and manganese on high strength low alloy SAW weld metal properties [10] Effect of titanium addition on the microstructure and inclusion formation in submerged arc welded high strength alloy pipeline steel [11] Comparing the fatigue and corrosion behavior of nanograin and coarse-grain IF steels [12] Modeling of the mechanical behavior of nanostructured HSLA steels [13] Effect of normalizing temperature on microstructure and mechanical properties of a Nb-V microalloyed large forging steel [14] Investigation of welding in multi-pass girth welding of thermomechanica steel pipe [15] Experimental study of the weld microstructure properties in assembling of natural gas transmission pipelines [16] Experimental study of the residual stresses in girth weld of natural gas transmission pipeline [17] Simulation of the residual stresses distribution in girth weld of gas transmission pipeline [18] Mathematical modeling of residual stress distribution in girth welding of high strength low alloy steel gas pipelines [19] Experimental determination of the effect of titanium nanoalloy on mechanical properties of girth welding on Iranian natural gas transmission pipelines

تعیین تجربی اثر نرماله‌کردن بر استحکام کششی، مقاومت به ضربه، خستگی و تنش پسماند جوش سر به سر خطوط انتقال گاز طبیعی ایران

مجید سبک‌روح* PhD

دانشکده مهندسی، مرکز آموزش عالی محلات، محلات، ایران

چکیده

در این مقاله، عملیات حرارتی نرماله‌کردن روی جوش حاوی ذرات ریزاکسید تیتانیوم و ذرات ریزکاریبید تیتانیوم (فولاد گرید ایکس ۶۵ خطوط انتقال گاز) انجام شد. نتایج آزمون شارپی نشان می‌دهد که در نمونه نرماله‌شده حاوی ذرات ریزاکسید تیتانیوم و ذرات ریزکاریبید تیتانیوم نسبت به نمونه بدون عملیات حرارتی (حاوی ذرات ریزاکسید تیتانیوم و کاریبید تیتانیوم)، به ترتیب ۳۳ و ۱۸٪ افزایش پیدا کرده است. همچنین استحکام نهایی نمونه نرماله‌شده حاوی ذرات ریزاکسید تیتانیوم و کاریبید تیتانیوم نسبت به نمونه بدون عملیات حرارتی (ذرات ریزاکسید تیتانیوم و کاریبید تیتانیوم) به ترتیب ۹ و ۱۱٪ افزایش یافته است. نتایج نشان می‌دهد که در هر دو نمونه نرماله‌شده میکرو آلیاژی میزان عمر خستگی افزایش یافته است. همچنین میزان عمر خستگی در نمونه نرماله‌شده ذرات ریزکاریبید تیتانیوم نسبت به اکسید تیتانیوم افزایش بیشتری داشته است. نتایج آزمون خستگی نشان می‌دهد که در نمونه نرماله‌شده حاوی ذرات ریزکاریبید تیتانیوم نسبت به نمونه نرماله‌شده حاوی ذرات ریزاکسید تیتانیوم، میزان عمر خستگی (بار ۱۵۰ نیوتن) به میزان ۳۶٪ افزایش پیدا کرده است. در این بارگذاری عمر خستگی (نمونه نرماله‌شده حاوی ذرات ریزکاریبید تیتانیوم نسبت به نمونه بدون عملیات حرارتی) ۲۷٪ افزایش یافته است. نتایج آزمون کرنش‌سنجی سوراخ نشان می‌دهد که در نمونه نرماله‌شده حاوی ذرات ریزاکسید تیتانیوم و کاریبید تیتانیوم نسبت به نمونه بدون عملیات حرارتی (ذرات ریزاکسید تیتانیوم و کاریبید تیتانیوم) تنش پسماند محیطی به ترتیب ۱۲ و ۸٪ کاهش پیدا کرده است.

کلیدواژه‌ها: جوشکاری، خستگی، تنش پسماند، مقاومت به ضربه، استحکام کششی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۲۴

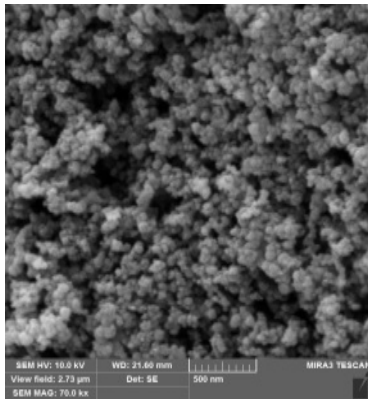
*نویسنده مسئول: msabokrouh@mahallat.ac.ir

۱- مقدمه

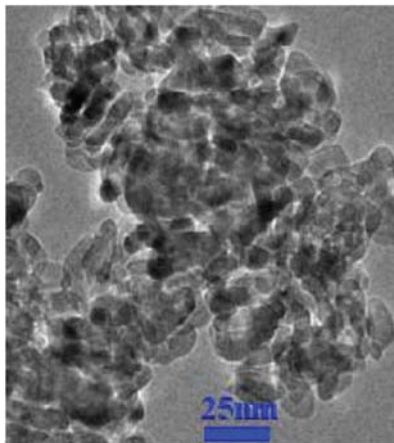
نرماله‌کردن فولادهای هیپویوتکتوئید در گستره دمایی بالا باعث ایجاد ساختار آستنیت و همچنین توزیع عناصر آلیاژی یکنواخت می‌شود [1]. عملیات حرارتی نرماله‌کردن باعث ریزش دانه‌های درشتی می‌شود که اغلب، هنگام جوشکاری و انجماد پس از آن به وجود آمده‌اند [2]. هنگامی که قطعه جوشکاری‌شده با دانه‌های درشت در دمایی بین دمای Ac_1 و Ac_3 قرار بگیرد، دانه‌های جدید آستنیت جوانه زده و رشد می‌کنند [3]؛ در این حالت ساختاری همگن با دانه‌های ریز به وجود می‌آید. اتصال سر به سر خطوط انتقال گاز طبیعی ایران جوشکاری محیطی با استفاده از الکتروود دستی است [4]. ممکن است، جوش بدون عیب باشد، ولی بسیاری از عناصر شیمیایی آن سوخته باشد [5]؛ بنابراین، جوش، علاوه بر کیفیت ظاهری باید سالم نیز باشد [6]. به این علت تایید سلامت

به‌وسیله آزمون‌های مخرب نیز ضروری است [7]. این مطلب با توجه به ویژگی و حساسیت فولادهای کم‌کربن پر استحکام که در خطوط لوله انتقال گاز طبیعی استفاده می‌شود، اهمیت بیشتری می‌یابد [8]. در اینگونه فولادها، عناصر میکروآلیاژی (تیتانیوم، وانادیم و نیوبیوم) وجود دارند [9]. حرارت ورودی و عملیات حرارتی غیرکنترل‌شده در جوشکاری خطوط انتقال گاز باعث حل‌شدن عناصر میکروآلیاژی و قرارگرفتن با توزیع غیریکنواخت می‌شود [10]. در سال‌های اخیر، در این زمینه پژوهش‌های مختلفی انجام شده است. چاپک و همکاران، به مطالعه رفتار خستگی ریزذرات در فولادها پرداختند و نشان دادند، در فولاد با ذرات ریز، میزان عمر خستگی به سه برابر افزایش پیدا خواهد کرد [11]. موزاکا و همکاران، رفتار مکانیکی ریزساختارها در فولاد کم‌آلیاژ استحکام بالا را مدل‌سازی کردند [12]. ون و همکاران، خواص مکانیکی فلز جوش میکروآلیاژ فولاد کم‌کربن با عملیات حرارتی نرماله‌کردن در زمان‌های متفاوت را مورد بررسی قرار دادند؛ فولاد مربوطه تحت اثر عملیات حرارتی نرماله‌کردن به ریزساختار ستونی تبدیل شد [13]. هاشمی و همکاران، جوش‌پذیری فولاد خطوط انتقال گاز طبیعی ایران را به‌صورت جامع مورد بررسی قرار دادند [14]. در ادامه سبک‌روح و همکاران، ساختار میکروسکوپی و تشکیل فازهای مختلف را (در پاس‌های ریشه، گرم، پرکن و سطح جوش سر به سر خطوط انتقال گاز با استفاده از کوانتومتری و میکروسکپ الکترونی روبشی) مطالعه نمودند و تاثیر تغییر ساختارها بر خواص مکانیکی استاتیکی و دینامیکی را بررسی کردند [15]. در ادامه، ایشان ابتدا به‌صورت تجربی تنش پسماند را با استفاده از آزمون کرنش‌سنجی سوراخ در جوش سر به سر خطوط انتقال گاز طبیعی ایران بررسی نمودند [16]، سپس مدل شبیه‌سازی مناسبی برای ارزیابی تنش پسماند جوش لوله مذکور ارائه دادند [17] و با استفاده از نتایج تجربی، مدل‌های ریاضی برای ارزیابی توزیع تنش پسماند در منطقه جوش و متاثر از حرارت این لوله‌ها تقریب زدند [18]. سبک‌روح و همکاران، با توجه به تاثیرگذاری عناصر میکروآلیاژی، ریزاکسید تیتانیوم و ریزکاریبید تیتانیوم را (به‌صورت جداگانه) به دو طرح اتصال جوش مشابه خطوط انتقال گاز طبیعی ایران اضافه کردند [19]. نتایج نشان داد، میزان درصد تیتانیوم در هر دو نمونه ریزآلیاژی نسبت به میکروآلیاژی افزایش یافته است. افزایش میزان تیتانیوم و کاهش اندازه آن، باعث افزایش چشمگیر خواص مکانیکی می‌شود. نتایج آزمون شارپی نشان می‌دهد، در نمونه حاوی ریزذرات اکسید تیتانیوم نسبت به نمونه حاوی ریزذرات کاریبید تیتانیوم، به میزان ۷۰٪ افزایش پیدا کرده است؛ همچنین، استحکام نهایی (نمونه حاوی ریزذرات کاریبید تیتانیوم نسبت به نمونه حاوی ریزذرات اکسید تیتانیوم و نمونه میکروآلیاژی) ۴۰٪ افزایش یافته است. در ادامه، ایشان تنش پسماند و عمر خستگی جوش ریزآلیاژهای تیتانیوم را ارزیابی نمودند. نتایج آزمون تنش پسماند نشان داد، در هر دو نمونه ریزآلیاژی (نسبت به میکروآلیاژی) میزان تنش پسماند کاهش

خنک کاری در معرض هوا است. مذاب داخل کوره از سیانول، پتاسیوم و نمک طعام خوراکی تشکیل شده است. برای قراردادن نمونه‌ها درون کوره از سیم‌کشی و آویز استفاده شد. سپس نمونه‌ها روی یک لوله فلزی توسط سیم‌گیر مطابق شکل آویزان شد و درون کوره تمام ابعاد نمونه درون مذاب (که شامل سیانول، پتاسیوم و نمک طعام خوراکی است) و دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت قرار گرفت. سپس نمونه‌ها برای خنک کاری در معرض هوا به مدت یک و نیم ساعت قرار داده شد.



الف



ب

شکل ۱) تصاویر میکروسکوپ الکترونی رویشی؛ الف) ریزذرات اکسید تیتانیوم و ب) ریزذرات کاربید تیتانیوم

۳- آزمایش‌ها

روی هر نمونه در راستای خط جوش، یک تست کشش (با توجه محدودیت در طول خط جوش) انجام شد. دو نمونه تست کشش عمود بر خط جوش، برای اطمینان از سلامت جوش ارزیابی شد. برای مشاهده ساختار فلز پایه، ناحیه جوش و ناحیه تحت تاثیر حرارت، پس از عملیات نرماله کردن از آزمون متالوگرافی استفاده شد. جهت آزمون متالوگرافی از سنباده ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ آماده‌سازی شد و با استفاده از خمیر الماسه ۹ میکرون و پودر آلومینا ۰/۵ میکرون پولیش شد. برای مشخص کردن نواحی مختلف، از محلول نایتال ۲٪ نمونه اچ استفاده شد. شکل ۲ ساختار میکروسکوپی جوش ریزذرات اکسید تیتانیوم و کاربید تیتانیوم

یافته است؛ همچنین، میزان تنش پسماند در نمونه ریزذرات اکسید تیتانیوم نسبت به کاربید تیتانیوم، کاهش بیشتری داشته است. نتایج آزمون کرنش‌سنجی سوراخ نشان می‌دهد که در نمونه حاوی ریزذرات اکسید تیتانیوم نسبت به نمونه حاوی ریزذرات کاربید تیتانیوم، تنش پسماند محیطی به میزان ۲۰٪ کاهش پیدا کرده است؛ همچنین، تنش پسماند محوری (نمونه حاوی ریزذرات اکسید تیتانیوم نسبت به نمونه حاوی ریزذرات کاربید تیتانیوم و نمونه میکروآلیاژی) ۲۹٪ کاهش یافته است. نتایج آزمون خستگی نشان می‌دهد، در هر دو نمونه ریزآلیاژی (نسبت به میکروآلیاژی) میزان عمر خستگی افزایش یافته است؛ همچنین، میزان عمر خستگی در نمونه ریزذرات کاربید تیتانیوم نسبت به اکسید تیتانیوم، افزایش بیشتری داشته است. نتایج آزمون خستگی نشان می‌دهد، در نمونه حاوی ریزذرات کاربید تیتانیوم نسبت به نمونه حاوی ریزذرات اکسید تیتانیوم، میزان عمر خستگی (بار ۱۵۰ نیوتن) به میزان ۲۹۱٪ افزایش پیدا کرده است. در این بارگذاری عمر خستگی (نمونه حاوی ریزذرات کاربید تیتانیوم نسبت به میکروآلیاژی) ۵۴۸٪ افزایش یافته است.

در این مقاله، اثر عملیات حرارتی نرماله کردن بر ریزساختار تیتانیوم جوش سر به سر انتقال گاز طبیعی حین جوشکاری بر خواص مکانیکی مختلف، مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج موفقیت‌آمیز حاصل از عملیات حرارتی نرماله کردن، باعث افزایش زمان سرویس‌دهی خطوط لوله انتقال گاز طبیعی ایران می‌شود. روش تحقیق در مقیاس آزمایشگاهی بوده و کلیه مراحل تجربی و برای اولین بار انجام شده است. در ابتدا روی ناحیه اتصال ورق‌های فولادی، ریزذرات اکسید تیتانیوم و ریزذرات کاربید تیتانیوم اضافه شده و بر اساس دستورالعمل مشخصی به هم جوش داده می‌شوند. پس از انجام عملیات حرارتی نرماله کردن، آزمون‌های کشش، ضربه، خستگی و تنش پسماند ارزیابی و با نتایج قبلی مقایسه می‌شوند. کلیه مراحل جوشکاری بر اساس دستورالعمل‌های ویژه شرکت ملی گاز ایران انجام می‌شود. شکل ۱، تصاویر ریزذرات اکسید تیتانیوم و کاربید تیتانیوم را نشان می‌دهد.

۲- آماده‌سازی، جوشکاری و نرماله کردن

پس از پاکسازی سطح ورق، توزیع یکنواخت ریزذرات روی طرح اتصال انجام شد. کلیه مراحل برشکاری با استفاده از دستگاه واترجت و وایرکات انجام شد. برشکاری‌های همراه با حرارت مانند لیزر، بر خواص مکانیکی و متالورژیکی نمونه‌های آزمون اثرگذار است. مرحله دمای بین هر پاس جوشکاری با استفاده از حرارت‌سنج لیزری کنترل شد.

پس از جوشکاری آزمون چشمی، نفوذ مایع، رادیوگرافی و التراسونیک انجام شد. مجموع آزمایش‌های غیرمخرب انجام شده کیفیت فرآیند جوشکاری را تایید می‌نماید.

فرآیند عملیات حرارتی نرماله، شامل سه مرحله حرارت دادن فولاد در دمای نرمالیزاسیون، نگهداری در آن دما برای یک ساعت و

آزمون ضربه شاریپی، بر اساس استاندارد در شیار V شکل با زاویه ۴۵ درجه و عمق ۲ میلی‌متر و شعاع ریشه ۰/۲۵ انجام گرفت. نتایج نشان می‌دهد، انرژی شکست نمونه نرماله‌شده ریزذرات اکسید تیتانیوم برابر ۱۰۷ ژول است. در نمونه ریزذرات کاربید تیتانیوم، کمترین میزان انرژی شکست در راستای جوش و برابر ۵۲ ژول اتفاق افتاده است.

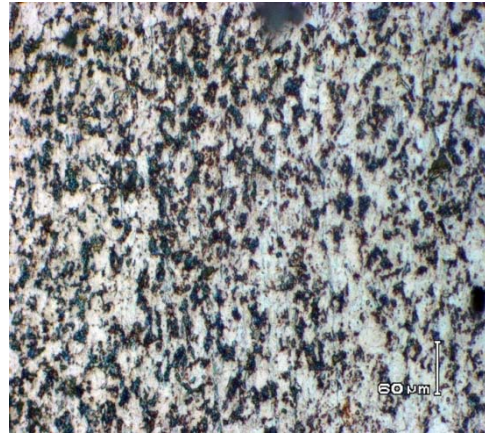
پس از جوشکاری نمونه‌های خستگی مشابه تهیه شد. به منظور ارزیابی نتایج با صحت و دقت مناسب، سطح کار با ابزار الماسه پرداخت شد. همچنین حین فرآیند ساخت، نمونه‌ها ساعت شدند تا از بالانس بودن آنها اطمینان حاصل شود. شکل ۳، هندسه نمونه خستگی را نشان می‌دهد. در این شکل نسبت شعاع به قطر کوچک برابر ۱/۶ و نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک برابر ۱/۵ است. با استفاده از نمودار خستگی، بیشترین مقدار ضریب تمرکز تنش ۱/۹ به دست می‌آید. سپس نمونه‌ها داخل دستگاه آزمون خستگی خمشی‌های دوار قرار گرفت. از هر کدام از نواحی جوش نرماله‌شده ریزاکسید تیتانیوم و نرماله‌شده ریزکاربید تیتانیوم، سه نمونه یکسان آزمون خستگی تهیه شد. هر کدام از این نمونه‌ها تحت بار ۱۵۰، ۱۷۵ و ۲۰۰ نیوتن قرار گرفتند.

شکل ۴، دستگاه آزمون خمشی دوار حین فرآیند آزمون خستگی، نمونه پس از شکست و شماتیک نحوه قرارگرفتن نمونه در دستگاه آزمون خمشی دوار و نحوه بارگذاری را نشان می‌دهد.

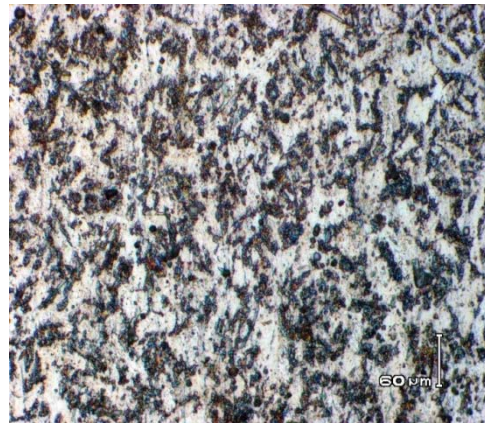
جدول ۲، نتایج آزمون خستگی در منطقه جوش نمونه نرماله‌شده ریزذرات کاربید و نرماله‌شده اکسید تیتانیوم را نشان می‌دهد.

آزمایش کرنش‌سنجی سوراخ در ناحیه جوش و منطقه متاثر از حرارت (۲۲ میلی‌متر از لبه جوش) انجام شد. در هر کدام از این نقاط پس از نصب رزت، آماده‌سازی سامانه اندازه‌گیری کرنش‌های آزادشده و اطمینان از هم‌مرکز بودن رزت و محل آزمایش، سوراخکاری آغاز شده و نتایج سه متغیر کرنش در فواصل عمق ۰/۲ میلی‌متر ثبت شد. این آزمایش تا عمق ۲ میلی‌متر ادامه پیدا کرد. افزایش بار پله‌ای به علت آگاهی از کرنش‌های اولیه و اطمینان از همگرایی نتایج است. با استفاده از این روش سعی می‌شود، از به‌وجود آمدن تنش‌های پسماند قابل توجه ناشی از عملیات ماشینکاری جلوگیری شود. عدم همگرایی در نتایج می‌تواند نشانه‌ای از تغییر تنش‌های پسماند در فواصل کم یا نادرستی آزمایش کرنش‌سنجی سوراخ به دلایلی همچون شکستن فرز سر تخت باشد. در آزمایش کرنش‌سنجی سوراخ با توجه به سرعت بالای فرزکاری از ابزار کاربیدی استفاده می‌شود. با اندازه‌گیری سه کرنش شعاعی مستقل و حل دستگاه معادلات مربوطه می‌توان تنش‌های پسماند را ارزیابی کرد. شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب آرایش کرنش‌سنج‌ها و نحوه آزمایش کرنش‌سنجی سوراخ را نشان می‌دهند. جدول ۳ نیز نتایج تنش پسماند محیطی و محوری در منطقه جوش و متاثر از حرارت نمونه جوش نرماله‌شده ریزذرات کاربید و اکسید تیتانیوم را نشان می‌دهد.

پس از عملیات نرماله‌کردن) را نشان می‌دهد. تغییر اندازه ریزذرات تیتانیوم پس از عملیات نرماله‌کردن در شکل ۲ مشهود است؛ همچنین تغییر میزان درصد این عناصر در نقش جواره‌زا (به‌ویژه در مجاورت مرزدانه) در تغییر خواص مکانیکی کاملاً موثر است. عملیات حرارتی نرماله‌کردن بر نحوه فرارگیری این ذرات در زمینه و مرزدانه موثر است.



الف



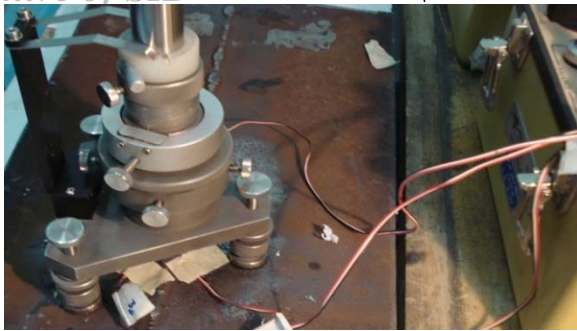
ب

شکل ۲) تصاویر ناحیه جوش: الف) اکسید تیتانیوم، ب) کاربید تیتانیوم

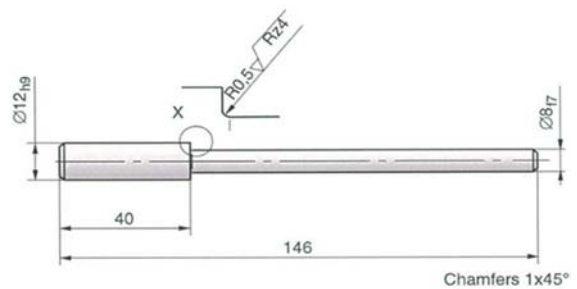
آزمون کشش روی نمونه‌ها توسط دستگاهی با ظرفیت ۲۰ تن و با سرعت کشش ۵ میلی‌متر بر دقیقه، مطابق استاندارد در دو راستای جوش و عمود بر جوش انجام شد. در آزمون کشش عرضی، شکست برای هر دو نمونه نرماله‌شده ریزذرات اکسید تیتانیوم و ریزذرات کاربید تیتانیوم در فلز پایه رخ داده است. نتایج حاصل از آزمون کشش در راستای جوش، برای نمونه‌های ریزذرات اکسید تیتانیوم و ریزذرات کاربید تیتانیوم در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱) نتایج آزمون کشش

ریزذرات تیتانیوم	استحکام تسلیم (مگا پاسکال)	استحکام نهایی (مگا پاسکال)	ازدیاد طول (درصد)
اکسید	۴۴۹	۵۹۳	۱۸
کاربید	۶۲۴	۸۴۲	۲۳



شکل ۶) نحوه انجام آزمایش کرنش سنجی سوراخ



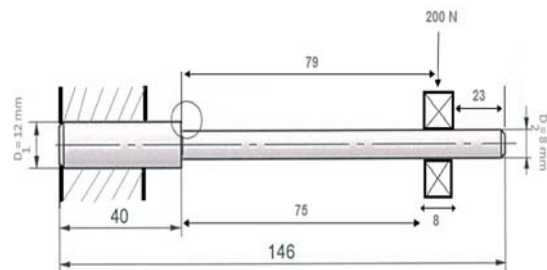
شکل ۳) شماتیک نمونه خستگی

جدول ۳) تنش‌های پسماند محیطی و محوری نمونه نرماله شده

تنش پسماند	ریزاکسید تیتانیوم		ریزکاریبید تیتانیوم	
	جوش	منطقه متأثر از جوش	جوش	منطقه متأثر از جوش
محیطی	۱۰۷	-۶۲	۱۳۹	-۷۸
محوری	-۶۳	-۵۰	-۸۹	-۵۸



الف



ب

شکل ۴) دستگاه آزمون خستگی (الف)، شماتیک دستگاه آزمون خستگی (ب)

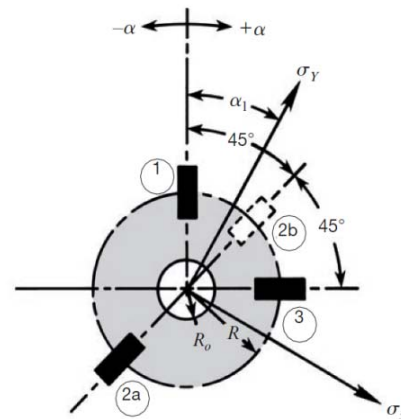
۴- بحث و بررسی

در نمونه‌های عمود بر جوش، استحکام نهایی نمونه نرماله شده ریزذرات کاربید تیتانیوم، نسبت به نمونه ریزذرات اکسید تیتانیوم بیشتر است. شایان ذکر است، هر دو نمونه از ناحیه فلز پایه گسیخته شده‌اند. نتایج مذکور، کیفیت فرآیند جوشکاری را تایید می‌نماید. در راستای جوش، استحکام تسلیم و استحکام نهایی نمونه نرماله شده ریزذرات اکسید تیتانیوم، به ترتیب، ۴۴۹ و ۵۹۳ مگاپاسال است؛ همچنین، درصد ازدیاد طول نسبی ۱۸٪ به دست آمد. در راستای جوش، استحکام تسلیم و استحکام نهایی نمونه نرماله شده ریزذرات کاربید تیتانیوم، به ترتیب، ۶۲۴ و ۸۴۲ مگاپاسال است؛ همچنین ازدیاد طول نسبی ۲۳٪ حاصل شد. نتایج نشان می‌دهد، در نمونه نرماله شده ریزذرات کاربید تیتانوم نسبت به نمونه نرماله شده ریزذرات اکسید تیتانیوم استحکام تسلیم و نهایی به ترتیب، ۳۸ و ۴۲٪ افزایش داشته است. در نمونه نرماله شده ریزذرات اکسید تیتانوم نسبت به نمونه عملیات حرارتی نشده ریزذرات اکسید تیتانوم استحکام تسلیم و نهایی به ترتیب، ۷ و ۹٪ افزایش داشته است. در نمونه نرماله شده ریزذرات کاربید تیتانوم نسبت به نمونه عملیات حرارتی نشده ریزذرات اکسید تیتانیوم استحکام تسلیم و نهایی به ترتیب، ۱۰ و ۱۱٪ افزایش داشته است. این نتایج بیانگر نقش موثر ریزذرات کاربید تیتانیوم نسبت به ریزذرات اکسید تیتانیوم در افزایش خواص استاتیکی مکانیکی است. نتایج نشان می‌دهد، ریزذرات کاربید تیتانیوم نقش قابل توجهی در افزایش خواص مکانیکی فلز جوش داشته است.

نتایج تست ضربه شارپی، انرژی شکست در نمونه‌های نرماله شده ریزذرات اکسید تیتانیوم و نرماله شده ریزذرات کاربید تیتانیوم را به ترتیب، برابر با ۱۰۷ و ۵۲ ژول نشان می‌دهد. بنابراین نمونه نرماله شده ریزذرات اکسید تیتانیوم، نسبت به نرماله شده ریزذرات

جدول ۲) آزمون خستگی در نمونه جوش نرماله شده ریزاکسید تیتانیوم و ریزکاریبید تیتانیوم

نمونه	پارامتر		
	۱۵۰ نیوتن	۱۷۵ نیوتن	۲۰۰ نیوتن
ریزاکسید تیتانیوم	۱۶۹۷۶۴	۶۰۲۳۵	۴۴۵۹
ریزکاریبید تیتانیوم	۲۳۳۱۰۸	۱۴۵۸۹۳	۹۶۱۰۸



شکل ۵) آرایش کرنش سنج‌ها

برابر با ۱۰۷ و ۱۳۹ مگا پاسکال است. همچنین در منطقه متاثر از حرارت جوش نمونه نرماله شده ریزاکسید تیتانیوم و ریزکاربید تیتانیوم به ترتیب ۶۲- و ۷۸- مگا پاسکال تنش پسماند محیطی به دست آمده است. در هر دو نمونه ریزاکسید و ریزکاربید تیتانیوم تنش پسماند محیطی ناحیه جوش به صورت کششی و منطقه متاثر از حرارت به صورت فشاری است. قدر مطلق تنش پسماند محیطی در نمونه نرماله شده ریزاکسید تیتانیوم نسبت به نمونه نرماله شده ریزکاربید تیتانیوم در ناحیه جوش و منطقه متاثر از حرارت به ترتیب حدود ۲۳ و ۲۰٪ کاهش داشته است. اثر بیشتر کاهش قدر مطلق تنش پسماند در ناحیه جوش نمونه نرماله شده نسبت به منطقه متاثر از حرارت را می توان در وجود ذرات ریز در منطقه جوش دانست در صورتی که کاهش قدر مطلق تنش پسماند محیطی در منطقه متاثر از حرارت ناشی به خود متعادل شونده گی این تنش ها ارتباط دارد (هنگامی که مقدار تنش پسماند کششی کم شود باعث کاهش تنش پسماند فشاری نیز خواهد شد).

نتایج نشان می دهد که تنش پسماند محوری در ناحیه جوش نمونه نرماله شده ریزاکسید تیتانیوم و ریزکاربید تیتانیوم به ترتیب برابر با ۶۳- و ۸۹- مگا پاسکال است. همچنین در منطقه متاثر از حرارت جوش نمونه نرماله شده ریزاکسید تیتانیوم و ریزکاربید تیتانیوم به ترتیب ۵۰- و ۵۸- مگا پاسکال تنش پسماند محوری به دست آمده است. در هر دو نمونه ریزاکسید و ریزکاربید تیتانیوم تنش پسماند محوری ناحیه جوش و منطقه متاثر از حرارت به صورت فشاری است. قدر مطلق تنش پسماند محوری در نمونه نرماله شده ریزاکسید تیتانیوم نسبت به ریزکاربید تیتانیوم در ناحیه جوش و منطقه متاثر از حرارت به ترتیب حدود ۳۰ و ۱۴٪ کاهش داشته است. اثر بیشتر کاهش قدر مطلق تنش پسماند در ناحیه جوش نمونه نرماله شده نسبت به منطقه متاثر از حرارت را می توان در وجود ذرات ریز در منطقه جوش دانست در صورتی که کاهش قدر مطلق تنش پسماند محوری در منطقه متاثر از حرارت ناشی به خود متعادل شونده گی این تنش ها ارتباط دارد (هنگامی که مقدار تنش پسماند کششی کم شود باعث کاهش تنش پسماند فشاری نیز خواهد شد).

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، اثر عملیات حرارتی نرماله کردن بر استحکام کششی، مقاومت به ضربه، خستگی و تنش پسماند جوش سر به سر خطوط انتقال گاز طبیعی ایران بررسی شد. نتایج نشان می دهد در نمونه های نرماله شده (نسبت به نمونه های بدون عملیات حرارتی) استحکام کششی، مقاومت به ضربه و عمر خستگی افزایش و قدر مطلق تنش های پسماند محیطی و محوری کاهش داشته است. بهبود خواص مکانیکی در اثر این نوع عملیات حرارتی را می توان در موارد زیر خلاصه کرد.

۱- در نمونه نرماله شده ریزذرات کاربید تیتانیوم نسبت به نمونه

کاربید تیتانیوم انرژی شکست به میزان ۱۰۵٪ افزایش یافته است؛ این امر نشان دهنده افزایش خواص مکانیکی دینامیکی و ضربه پذیری در نمونه ریزذرات اکسید تیتانیوم است. در نمونه نرماله شده ریزذرات اکسید تیتانیوم نسبت به نمونه عملیات حرارتی نشده ریزذرات اکسید تیتانیوم، مقاومت به ضربه ۳۷٪ افزایش داشته است. همچنین در نمونه نرماله شده ریزذرات کاربید تیتانیوم نسبت به نمونه عملیات حرارتی نشده ریزذرات اکسید تیتانیوم، مقاومت به ضربه ۱۳٪ افزایش داشته است؛ این امر نشان دهنده افزایش خواص مکانیکی دینامیکی و ضربه پذیری در نمونه ریزذرات اکسید تیتانیوم است. نتایج متالوگرافی نشان می دهد، ساختار میکروسکوپی نمونه نرماله شده ریزذرات اکسید تیتانیوم در ناحیه جوش بیانگر ساختار شبکه فریت در مرز دانه های آستنیت اولیه با رشد صفحات جانبی همراه فریت پرویوتکتوئید و پرلیت ساختار ریزدانه شامل دانه های فریت همراه نواحی پرلیت است. ساختار میکروسکوپی نمونه نرماله شده ریزذرات کاربید تیتانیوم در ناحیه جوش، نشان دهنده ساختار شبکه فریت در مرز دانه های آستنیت اولیه با رشد صفحات جانبی همراه فریت پرویوتکتوئید و پرلیت ساختار ریزدانه شامل دانه های فریت به همراه نواحی پرلیت است.

در جدول ۲ (بر اساس روابط پایه تنش خمشی و ضریب تمرکز تنش)، حداکثر تنش نوسانی در بار ۲۰۰، ۱۷۵ و ۱۵۰ نیوتن به ترتیب برابر ۵۹۷، ۵۲۲ و ۴۴۸ مگا پاسکال ارزیابی شد. نتایج نشان می دهد که میزان عمر خستگی در هر دو نمونه نرماله شده جوش ریزذرات اکسید تیتانیوم و ریزکاربید تیتانیوم نسبت به نمونه بدون عملیات حرارتی، افزایش یافته است. میزان افزایش عمر خستگی نمونه نرماله شده جوش ریزذرات اکسید تیتانیوم نسبت به نمونه بدون عملیات حرارتی جوش ریزذرات اکسید تیتانیوم در بار ۲۰۰، ۱۷۵ و ۱۵۰ نیوتن به ترتیب در حدود ۱۴، ۱۱ و ۱۶۹٪ رشد داشته است. میزان افزایش عمر خستگی نمونه نرماله شده جوش ریزذرات کاربید تیتانیوم نسبت به نمونه بدون عملیات حرارتی جوش ریزذرات اکسید تیتانیوم در بار ۲۰۰، ۱۷۵ و ۱۵۰ نیوتن به ترتیب در حدود ۸، ۱۴ و ۲۷٪ رشد داشته است. افزایش چشمگیر عمر خستگی در نمونه نرماله شده جوش ریزذرات کاربید تیتانیوم به نمونه نرماله شده ریزذرات اکسید تیتانیوم را می توان به ۴۰٪ بالاتر بودن استحکام کششی نهایی نمونه جوش ریزذرات کاربید تیتانیوم به ریزذرات اکسید تیتانیوم ارتباط داد. همچنین میزان افزایش عمر خستگی نمونه نرماله شده جوش ریزذرات کاربید تیتانیوم نسبت به نمونه نرماله شده جوش ریزذرات اکسید تیتانیوم در بار ۲۰۰، ۱۷۵ و ۱۵۰ نیوتن به ترتیب حدود ۲۰۵، ۱۴۲ و ۳۶٪ رشد داشته است. نتایج نشان می دهد با کاهش میزان بارگذاری فاصله عمر دورانی خستگی افزایش پیدا کرده است؛ هر چند درصد تغییرات کاهش پیدا کرده است.

نتایج نشان می دهد که تنش پسماند محیطی در ناحیه جوش نمونه نرماله شده ریزاکسید تیتانیوم و ریزکاربید تیتانیوم به ترتیب

of alloying elements on the microstructure and inclusion formation in HSLA multipass welds. *Materials Characterization*. 2007;58(1):29-39.

7- Bouchard PG. Validated residual stress profiles for fracture assessments of stainless steel pipe girth welds. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2007;84(4):195-222.

8- Hashemi SH, Mohamaadyani D, Pouranvari M, Mousavizadeh SM. On the relation of microstructure and impact toughness characteristics of DSAW steel of grade API X70. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2009;32(1):33-40.

9- Beidokhti B, Koukabi AH, Dolati A. Influences of titanium and manganese on high strength low alloy SAW weld metal properties. *Materials Characterization*. 2009;60(3):225-233.

10- Beidokhti B, Koukabi AH, Dolati A. Effect of titanium addition on the microstructure and inclusion formation in submerged arc welded high strength alloy pipeline steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009;209(8):4027-4035.

11- Chabok A, Dehghani K, Ahmadi Jazani M. Comparing the fatigue and corrosion behavior of nanograin and coarse-grain IF steels. *Acta Metallurgica Sinica*. 2014;28:295-301.

12- Muszka K, Majta J, Damian Hodgson P. Modeling of the mechanical behavior of nanostructured HSLA steels. *The Iron and Steel Institute of Japan*. 2007;47(8):1221-1227.

13- Wen XI, Mei Z, Li B, Zhang LC, Liu YZ. Effect of normalizing temperature on microstructure and mechanical properties of a Nb-V microalloyed large forging steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2016;671:233-243.

14- Hashemi SH, Sabokrouh M, Farahani MR. Investigation of welding in multi-pass girth welding of thermomechanical steel pipe. *Modares Mechanical Engineering*. 2013;13(4):60-73. [Persian]

15- Sabokrouh M, Hashemi SH, Farahani MR. Experimental study of the weld microstructure properties in assembling of natural gas transmission pipelines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2017;231(6):1039-1047.

16- Sabokrouh M, Farahani MR. Experimental study of the residual stresses in girth weld of natural gas transmission pipeline. *Journal of Applied and Computational Mechanics*. 2019;5(2):199-206.

17- Sabokrouh M, Farahani MR. Simulation of the residual stresses distribution in girth weld of gas transmission pipeline. *Modares Mechanical Engineering*. 2019;19(1):223-228. [Persian]

18- Sabokrouh M, Farahani MR. Mathematical modeling of residual stress distribution in girth welding of high strength low alloy steel gas pipelines. *Modares Mechanical Engineering*. 2018;18(7):226-232. [Persian]

19- Sabokrouh M, khoshsima B. Experimental determination of the effect of titanium nanoalloy on mechanical properties of girth welding on Iranian natural gas transmission pipelines. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*. 2018;8(3):213-219. [Persian]

نرماله شده ریزذرات اکسید تیتانیوم استحکام تسلیم و نهایی به ترتیب، ۳۸ و ۴۲٪ افزایش داشته است.

۲- در نمونه نرماله شده ریزذرات کاربید تیتانوم نسبت به نمونه عملیات حرارتی نشده ریزذرات اکسید تیتانیوم استحکام تسلیم و نهایی به ترتیب، ۱۰ و ۱۱٪ افزایش داشته است.

۳- در نمونه نرماله شده ریزذرات اکسید تیتانیوم، نسبت به نرماله شده ریزذرات کاربید تیتانیوم انرژی شکست به میزان ۱۰۵٪ افزایش یافته است.

۴- میزان افزایش عمر خستگی نمونه نرماله شده جوش ریزذرات اکسید تیتانیوم نسبت به نمونه بدون عملیات حرارتی جوش ریزذرات اکسید تیتانیوم در بار ۲۰۰، ۱۷۵ و ۱۵۰ نیوتن به ترتیب حدود ۱۴، ۱۱۰ و ۱۶۹٪ رشد داشته است.

۵- قدر مطلق تنش پسماند محیطی در نمونه نرماله شده ریزاکسید تیتانیوم نسبت به نمونه نرماله شده ریزکاربید تیتانیوم در ناحیه جوش و منطقه متاثر از حرارت به ترتیب در حدود ۲۳ و ۲۰٪ کاهش داشته است.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسنده گزارش نشده است.

تأییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسنده گزارش نشده است.

تعارض منافع: موردی توسط نویسنده گزارش نشده است.

سهم نویسندگان: نگارنده مقدمه/روش شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۱۰۰٪)

منابع مالی: موردی توسط نویسنده گزارش نشده است.

منابع

- 1- Prawoto Y, Mat Yajid MA, Lee KJ. Microstructure consideration on quantitative analysis of thermal treatment: Application to decarburization of steel. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*. 2013;25:141-147.
- 2- de Jesus Jorge L, Scarpini Cândid V, Clay Rios da Silva A, da Costa Garcia Filho F, Camposo Pereira A, Santos da Luz F, et al. Mechanical properties and microstructure of SMAW welded and thermally treated HSLA-80 steel. *Journal of Materials Research and Technology*. 2018;7(4):598-605.
- 3- Wei S, Lu S. Effects of multiple normalizing processes on the microstructure and mechanical properties of low carbon steel weld metal with and without Nb. *Materials & Design*. 2012;35:43-54.
- 4- Hashemi SH, Mohamaadyani D. Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2012;98:8-15.
- 5- Leggatt RH. Residual stresses in welded structures. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2008;85(3):141-151.
- 6- Bose-Filho WW, Carvalho ALM, Strangwood M. Effect