



Experimental Determination of the Tempering Effect On Tensile Strength, Impact Strength, Fatigue, Residual Stress of Girth Welding on 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 Tempering Effect On Tensile Strength, Impact Strength, Fatigue, Residual Stress of Girth Welding on Gas Transmission Pipelines. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(4):1033-1039.

ABSTRACT

The effects of tempering heat treatment on girth weld containing titanium oxide and titanium carbide nanoparticles (X-65 grade of the gas pipeline) were evaluated. The Charpy results show that it has been respectively increased by 26% and 15% in the tempered sample containing titanium oxide and titanium carbide nanoparticles compared to the no heat treatment sample (containing titanium carbide and titanium carbide nanoparticles). Also, the ultimate strength tempered sample containing titanium oxide nanoparticles and titanium carbide nanoparticles compared to the no heat treatment sample (containing titanium oxide and titanium carbide nanoparticles) has been respectively decreased by 6% and 4%. The results show that the fatigue life in both tempered nano-alloy samples has been increased. The fatigue life in the tempered sample of titanium carbide nanoparticles has increased more than the fatigue life in titanium oxide nanoparticles. The fatigue test results show that in the tempered sample containing titanium carbide nanoparticles compared to the tempered sample containing titanium oxide nanoparticles, fatigue life (150-N force) has been increased by 30%. In this loading, the fatigue life (tempered sample containing titanium carbide nanoparticles compared to the no heat treatment sample) has been increased by 19%. The hole drilling strain gage results show that in the tempered sample containing titanium oxide nanoparticles and titanium carbide nanoparticles, hoop residual stresses have been respectively decreased by 48% and 45% compared to the no heat treatment sample (containing titanium oxide and titanium carbide nanoparticles).

Keywords Nano-Welding; Tempering; Fatigue; Residual Stress; Impact 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 18, 2018

Accepted: September 29, 2019

ePublished: April 17, 2020

CITATION LINKS

[1] Effects of tempering and PWHT on microstructures and mechanical properties of SA508 GR.4N steel [2] Effect of welding processes on mechanical and microstructural characteristics of high strength low alloy naval grade steel joints [3] Microstructure and mechanical properties of Gas tungsten arc Welded High Strength Low Alloy (15CDV6) steel joints [4] Effect of titanium addition on the microstructure and inclusion formation in submerged arc welded high strength alloy pipeline steel [5] Comparing the fatigue and corrosion behavior of nanograin and coarse-grain IF steels [6] Modeling of the mechanical behavior of nanostructured HSLA steels [7] Influence of tempering on the microstructure and mechanical properties of HSLA-100 steel plates [8] Experimental study of the weld microstructure properties in assembling of natural gas transmission pipelines [9] Experimental study of the residual stresses in girth weld of natural gas transmission pipeline [10] Simulation of the residual stresses distribution in girth weld of gas transmission pipeline [11] Mathematical modeling of residual stress distribution in girth welding of high strength low alloy steel gas pipelines [12] Experimental determination of the effect of titanium nanoalloy on mechanical properties of girth welding on Iranian natural gas transmission pipelines

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

مجید سبک‌روح* PhD

دانشکده مهندسی، مرکز آموزش عالی محلات، محلات، ایران

چکیده

عملیات حرارتی تمپرکردن روی جوش حاوی نانو اکسید تیتانیوم و نانوکاربید تیتانیوم (فولاد گرید ایکس ۶۵ خطوط انتقال گاز) انجام شد. نتایج شاپی نشان می‌دهد که در نمونه تمپر شده حاوی نانوذرات اکسید تیتانیوم و نانوذرات کاربید تیتانیوم نسبت به نمونه بدون عملیات حرارتی (حاوی نانوذرات اکسید تیتانیوم و کاربید تیتانیوم)، به ترتیب ۲۶ و ۱۵٪ افزایش پیدا کرده است. همچنین استحکام نهایی نمونه تمپر شده حاوی نانوذرات اکسید تیتانیوم و کاربید تیتانیوم نسبت به نمونه بدون عملیات حرارتی (نانوذرات اکسید تیتانیوم و کاربید تیتانیوم) به ترتیب ۶ و ۴٪ کاهش یافته است. نتایج نشان می‌دهد که در هر دو نمونه تمپر شده نانوالیای میزان عمر خستگی افزایش یافته است. همچنین میزان عمر خستگی در نمونه تمپر شده نانوذرات کاربید تیتانیوم نسبت به اکسید تیتانیوم افزایش بیشتری داشته است. نتایج آزمون خستگی نشان می‌دهد که در نمونه تمپر شده حاوی نانوذرات کاربید تیتانیوم نسبت به نمونه تمپر شده حاوی نانوذرات اکسید تیتانیوم، میزان عمر خستگی (بار ۱۵۰ نیوتن) به میزان ۳۰٪ افزایش پیدا کرده است. در این بارگذاری عمر خستگی (نمونه تمپر شده حاوی نانوذرات کاربید تیتانیوم نسبت به نمونه بدون عملیات حرارتی) ۱۹٪ افزایش یافته است. نتایج نشان می‌دهد که در هر دو نمونه تمپر شده نانوالیای میزان عمر خستگی افزایش یافته است. نتایج آزمون کرنش سنجی سوراخ نشان می‌دهد که در نمونه تمپر شده حاوی نانوذرات اکسید تیتانیوم و کاربید تیتانیوم نسبت به نمونه بدون عملیات حرارتی (نانوذرات اکسید تیتانیوم و کاربید تیتانیوم) تنش پسماند محیطی به ترتیب ۴۸ و ۴۵٪ کاهش پیدا کرده است.

کلیدواژه‌ها: نانوجوشکاری، تمپرکردن، خستگی، تنش پسماند، مقاومت به ضربه

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۰۷

*نویسنده مسئول: msabokrouh@mahallat.ac.ir

۱- مقدمه

عملیات حرارتی تمپرکردن به گرم کردن مجدد فولاد (غیرتعادلی سرد شده) تا پایین‌تر از دمای استحاله یوتکتوئید، نگهداری در این دما به مدت مشخص و سپس آهسته سرد کردن تا دمای محیط اطلاق می‌شود [1]. سرد شدن سریع و غیرتعادلی منطقه جوشکاری باعث ایجاد تنش‌های داخلی و احتمالاً تردی و شکنندگی در سازه می‌شود. به همین علت پس از جوشکاری (در سازه‌های حساس) عملیات حرارتی تمپرکردن انجام می‌شود. با انجام این عملیات حرارتی خواص مکانیکی آلیاژ تعدیل می‌شود [2]. عملیات حرارتی تمپرکردن پس از جوشکاری شامل مراحل تغییر میکروساختار مارتنزیت مانند تشکیل کاربیدهای انتقالی (کاربید اپسیلین و کاربید اتا) و در نتیجه کاهش درصد کربن زمینه مارتنزیتی، تبدیل

آستنیت باقی‌مانده به فریت و سمانتیت و جایگزین شدن کاربیدهای انتقالی و مارتنزیت کم کربن توسط فریت و سمانتیت است [3]. اتصال سر به سر خطوط انتقال گاز طبیعی ایران جوشکاری محیطی با استفاده از الکترو دستی است. ممکن است، جوش بدون عیب باشد، ولی بسیاری از عناصر شیمیایی آن سوخته باشد. بنابراین جوش علاوه بر کیفیت ظاهری، باید سالم نیز باشد. به این علت تایید سلامت به وسیله آزمون‌های مخرب نیز ضروری است. این مطلب با توجه به ویژگی و حساسیت فولادهای کم کربن پر استحکام که در خطوط لوله انتقال گاز طبیعی استفاده می‌شود، اهمیت بیشتری می‌یابد. در اینگونه فولادها، عناصر میکروآلیاژی (تیتانیوم، وانادیوم و نیوبیوم) وجود دارند. حرارت ورودی و عملیات حرارتی غیرکنترل شده در جوشکاری خطوط انتقال گاز باعث حل شدن عناصر میکروآلیاژی و قرار گرفتن با توزیع غیریکنواخت می‌شود [4].

در سال‌های اخیر، در این زمینه پژوهش‌های مختلفی انجام شده است. چایک و همکاران به مطالعه رفتار خستگی نانوذرات در فولادها پرداختند و نشان دادند، در فولاد با ذرات نانو، میزان عمر خستگی به سه برابر افزایش پیدا خواهد کرد [5]. موزاکا و همکاران، رفتار مکانیکی نانو ساختارها در فولاد کم آلیاژ استحکام بالا را مدل سازی کردند [6]. دهو و همکاران اثر عملیات حرارتی تمپرکردن بر خواص مکانیکی و میکروساختار فولاد میکروآلیاژ فولاد کم کربن را مورد بررسی قرار دادند. نتایج ایشان نشان می‌دهد که بهترین ترکیب استحکام کششی و چقرمگی در دمای تمپرکردن ۶۰۰ درجه به مدت یک ساعت اتفاق افتاده است [7]. 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 [8]. در ادامه ایشان ابتدا به صورت تجربی تنش پسماند را با استفاده از آزمون کرنش سنجی سوراخ در جوش سر به سر خطوط انتقال گاز طبیعی ایران بررسی نمود [9]. سپس مدل شبیه سازی مناسبی برای ارزیابی تنش پسماند جوش لوله مذکور ارائه دادند [10]. سپس با استفاده از نتایج تجربی، مدل‌های ریاضی برای ارزیابی توزیع تنش پسماند در منطقه جوش و متاثر از حرارت این لوله‌ها تقریب زد [11]. با توجه به تاثیرگذاری عناصر میکروآلیاژی، سبک‌روح و همکاران، در ادامه نانو اکسید تیتانیوم و نانوکاربید تیتانیوم را (به صورت جداگانه) به دو طرح اتصال جوش مشابه خطوط انتقال گاز طبیعی ایران اضافه کردند [12]. نتایج نشان می‌دهد، میزان درصد تیتانیوم در هر دو نمونه نانوالیای نسبت به میکروآلیاژی افزایش یافته است. افزایش میزان تیتانیوم و کاهش اندازه آن، باعث افزایش چشمگیر خواص مکانیکی می‌شود. نتایج آزمون شاپی نشان می‌دهد، در نمونه حاوی نانوذرات اکسید تیتانیوم نسبت به نمونه حاوی نانوذرات کاربید تیتانیوم، به میزان ۷۰٪ افزایش پیدا کرده است؛ همچنین،

نمونه‌های فولادی ایکس ۶۵، طول خط جوش ۳۵۰ میلی‌متر، زاویه پخ ۷ شکل ۳۵ درجه، میزان روت ۱/۶ میلی‌متر، اندازه گپ بین هر نمونه ۱/۶ میلی‌متر و دمای پیش‌گرم و بین هر پاس ۱۰۰ در نظر گرفته شد.

برای این منظور پس از پاکسازی طرح اتصال، توزیع یکنواخت نانومواد روی طرح اتصال انجام شد. کلیه مراحل برشکاری با استفاده از دستگاه واتر جت و وایرکات انجام شد. برشکاری‌های همراه با حرارت مانند لیزر، بر خواص مکانیکی و متالورژیکی نمونه‌های آزمون اثرگذار است. پس از جوشکاری آزمون چشمی، نفوذ مایع، رادیوگرافی و التراسونیک انجام شد. مجموع آزمایش‌های غیرمخرب انجام‌شده، کیفیت فرآیند جوشکاری را تایید می‌نماید. فرآیند عملیات حرارتی تمپر کردن شامل سه مرحله حرارت‌دادن فولاد در دمای زیر یوتکتوئید، نگهداری در آن دما برای یک ساعت و خنک‌کاری در معرض هوا روی نمونه‌ها انجام شد. برای قراردادن نمونه‌ها در کوره، از سیم‌کشی و آویز (جهت برقراری حرارت یکنواخت) استفاده شد. با توجه به تجربیات دهوا و همکاران بر فولادهای کم‌کربن استحکام بالا دمای تمپر کردن ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت در نظر گرفته شد. سپس نمونه‌ها برای خنک‌کاری در معرض هوا قرار داده شد. تمپر کردن دمای بالا در متعادل‌سازی تنش‌های پسماند بسیار موثر است. با توجه به اینکه در عملیات واقعی جوشکاری، خنک‌شدن در معرض هوا اتفاق می‌افتد، از خنک‌کاری در آب و روغن صرف‌نظر شد. شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب سیم‌کردن و کوره عملیات حرارتی تمپر کردن نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

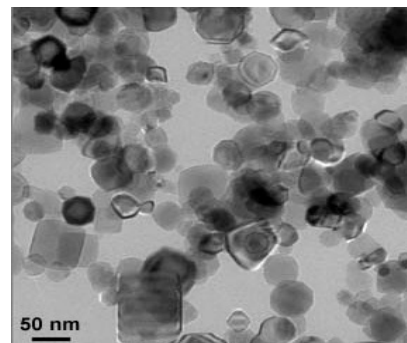


شکل ۲) تصویری از نمونه‌های تمپر کردن

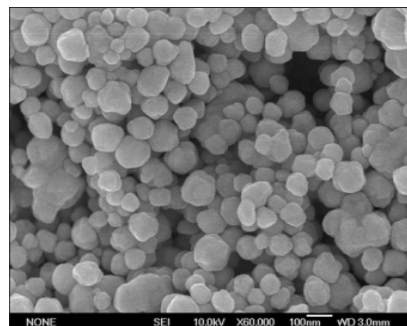


شکل ۳) تصویری از کوره عملیات حرارتی

استحکام نهایی (نمونه حاوی نانوذرات کاربید تیتانیوم نسبت به نمونه حاوی نانوذرات اکسید تیتانیوم و نمونه میکروآلیاژی)، ۴۰٪ افزایش یافته است. در ادامه ایشان اثر عملیات حرارتی نرماله کردن بر تنش پسماند و عمر خستگی جوش نانوالیازهای تیتانیوم را ارزیابی نمودند. شکل ۱، تصاویر نانوذرات اکسید تیتانیوم و کاربید تیتانیوم را نشان می‌دهد. میانگین اندازه نانوذرات اکسید تیتانیوم بین ۱۰ تا ۲۵ نانومتر است. اندازه نانوذرات کاربید تیتانیوم برابر ۴۰ تا ۶۰ نانومتر است و از لحاظ مورفولوژی نزدیک به کروی و فاز کریستالی مکعبی است.



الف



ب

شکل ۱) تصویر میکروسکوپ الکترونی رویشی، الف) نانوذرات اکسید تیتانیوم، ب) نانوذرات کاربید تیتانیوم

۲- آماده‌سازی، جوشکاری و تمپر کردن

در این مقاله، اثر عملیات حرارتی تمپر کردن بر نانو ساختار تیتانیوم جوش سر به سر انتقال گاز طبیعی حین جوشکاری بر خواص مکانیکی مختلف، مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج موفقیت‌آمیز حاصل از عملیات حرارتی تمپر 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، نانوذرات اکسید تیتانیوم و نانوذرات کاربید تیتانیوم اضافه شده و بر اساس دستورالعمل مشخصی به هم جوش داده می‌شوند. پس از انجام عملیات حرارتی تمپر 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. در

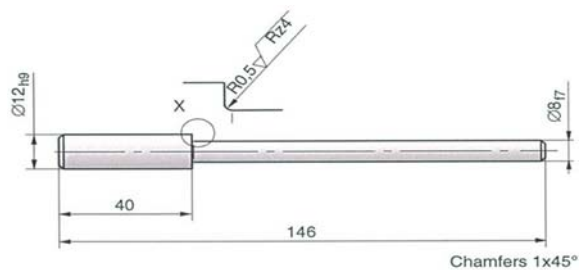
آزمون کشش روی نمونه‌ها توسط دستگاهی با ظرفیت ۲۰ تن و با سرعت کشش ۵ میلی‌متر بر دقیقه، مطابق استاندارد در دو راستای جوش و عمود بر جوش انجام شد. در آزمون کشش عرضی، شکست برای هر دو نمونه تمپر شده نانوذرات اکسید تیتانیوم و نانوذرات کاربید تیتانیوم در فلز پایه رخ داده است. نتایج حاصل از آزمون کشش در راستای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

جدول ۱) نتایج آزمون کشش

نانوذرات تیتانیوم	استحکام تسلیم (مگاپاسکال)	استحکام نهایی (مگاپاسکال)	ازدیاد طول (درصد)
اکسید	۳۹۶	۵۱۰	۱۷
کاربید	۵۵۲	۷۲۹	۲۲

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 تمپر شده نانوذرات اکسید تیتانیوم برابر ۹۸ ژول است. در نمونه نانوذرات کاربید تیتانیوم، کمترین میزان انرژی شکست در راستای جوش و برابر ۵۳ ژول اتفاق افتاده است.

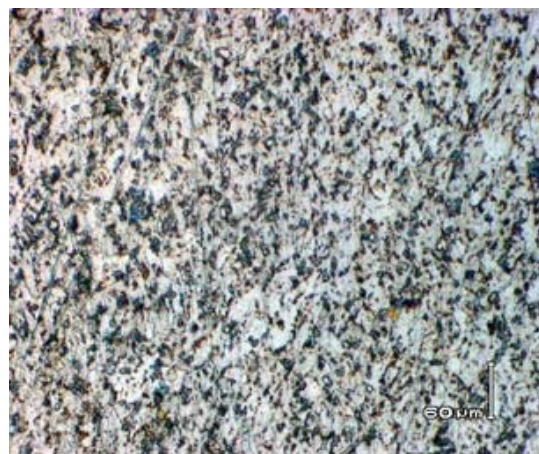
پس از جوشکاری نمونه‌های خستگی مشابه تهیه شد. به منظور ارزیابی نتایج با صحت و دقت مناسب، سطح کار با ابزار الماسه پرداخت شد. همچنین حین فرایند ساخت، نمونه‌ها ساعت شدند تا از بالانس بودن آنها اطمینان حاصل شود. شکل ۵، هندسه نمونه خستگی را نشان می‌دهد. در این شکل نسبت شعاع به قطر کوچک برابر ۰/۶ و نسبت قطر 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 تمپر شده نانواکسید تیتانیوم و تمپر شده نانوکاربید تیتانیوم سه نمونه یکسان آزمون خستگی تهیه شد. هر کدام از این نمونه‌ها تحت بار ۱۵۰، ۱۷۵ و ۲۰۰ نیوتن قرار گرفتند.



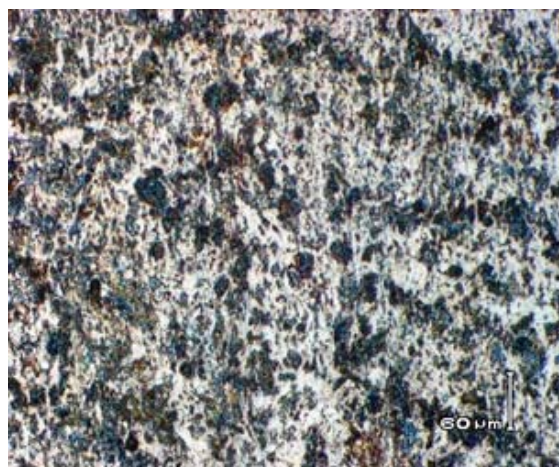
شکل ۵) شماتیک نمونه خستگی

شکل ۶، دستگاه آزمون خمشی دوار حین فرایند آزمون خستگی، نمونه پس از شکست و شماتیک نحوه قرار گرفتن نمونه در دستگاه آزمون خمشی دوار و نحوه بارگذاری را نشان می‌دهد. جدول ۲،

روی هر نمونه در راستای خط جوش، یک تست کشش (با توجه به 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 تمپر 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 ۴ ساختار میکروسکوپی جوش نانوذرات اکسید تیتانیوم و کاربید تیتانیوم (پس از عملیات تمپر کردن) را نشان می‌دهد. تغییر اندازه نانوذرات تیتانیوم پس از عملیات تمپر کردن در شکل مذکور مشهود است؛ همچنین تغییر میزان درصد این عناصر در نقش جوانه‌زا (به‌ویژه در مجاورت مرز دانه) در تغییر خواص مکانیکی کاملاً موثر است. عملیات حرارتی تمپر کردن بر نحوه قرارگیری این ذرات در زمینه و مرز دانه موثر است.



الف



ب

شکل ۴) تصاویر ناحیه جوش: الف) اکسید تیتانیوم، ب) کاربید تیتانیوم

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. جدول ۳، نتایج تنش پسماند محیطی و محوری در منطقه جوش و متاثر از حرارت نمونه جوش تمپر شده نانوذرات کاربید و اکسید تیتانیوم را نشان می‌دهد.

جدول (۳) تنش‌های پسماند محیطی و محوری نمونه تمپر شده

تنش پسماند	نانواکسید تیتانیوم		نانوکاربید تیتانیوم	
	جوش	منطقه متاثر از حرارت	جوش	منطقه متاثر از حرارت
محیطی	۶۴	-۴۰	۸۴	-۵۱
محوری	-۴۱	-۳۲	-۶۱	-۴۴

۴- بحث و بررسی

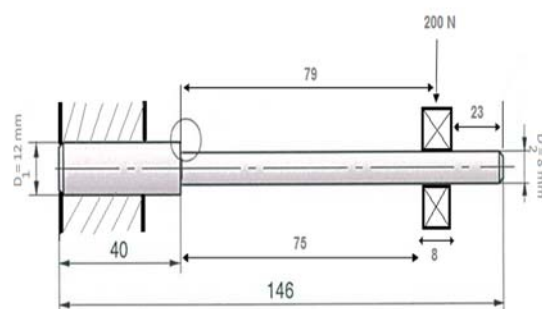
در نمونه‌های عمود بر جوش، استحکام نهایی نمونه تمپر شده نانوذرات کاربید تیتانیوم نسبت به نمونه نانوذرات اکسید تیتانیوم بیشتر است. شایان ذکر است، هر دو نمونه از ناحیه فلز پایه گسیخته شده‌اند. نتایج مذکور کیفیت فرآیند جوشکاری را تایید می‌نماید. در راستای جوش، استحکام تسلیم و استحکام نهایی نمونه تمپر شده نانوذرات اکسید تیتانیوم، به ترتیب، ۳۹۶ و ۵۱۰ مگاپاسال است؛ همچنین، درصد ازدیاد طول نسبی ۱۷٪ به دست آمد. در راستای جوش، استحکام تسلیم و استحکام نهایی نمونه تمپر شده نانوذرات کاربید تیتانیوم، به ترتیب، ۵۵۲ و ۷۲۹ مگاپاسال است؛ همچنین ازدیاد طول نسبی ۲۲٪ حاصل شد. نتایج نشان می‌دهد، در نمونه تمپر شده نانوذرات کاربید تیتانیوم نسبت به نمونه تمپر شده نانوذرات اکسید تیتانیوم استحکام تسلیم و نهایی به ترتیب، ۳۹ و ۴۳٪ افزایش داشته است. این نتایج بیانگر نقش موثر نانوذرات کاربید تیتانیوم نسبت به نانوذرات اکسید تیتانیوم در افزایش خواص استاتیکی مکانیکی است. نتایج نشان می‌دهد، نانوذرات کاربید تیتانیوم نقش قابل توجهی در افزایش خواص مکانیکی فلز جوش داشته است.

نتایج تست ضربه شاری، انرژی شکست در نمونه‌های تمپر شدن نانوذرات اکسید تیتانیوم و تمپر شدن نانوذرات کاربید تیتانیوم را به ترتیب، برابر با ۹۸ و ۵۳ ژول نشان می‌دهد. بنابراین در نمونه تمپر شده نانوذرات اکسید تیتانیوم، نسبت به تمپر شده نانوذرات کاربید تیتانیوم انرژی شکست به میزان ۸۵٪ افزایش یافته است؛ این امر نشان‌دهنده افزایش خواص مکانیکی دینامیکی و ضربه‌پذیری در نمونه نانوذرات اکسید تیتانیوم است. در نمونه تمپر شده نانوذرات اکسید تیتانیوم نسبت به نمونه عملیات حرارتی نشده نانوذرات اکسید تیتانیوم مقاومت به ضربه ۲۶٪ افزایش داشته است. همچنین در نمونه تمپر شده نانوذرات کاربید تیتانیوم نسبت به نمونه عملیات حرارتی نشده نانوذرات اکسید تیتانیوم مقاومت به ضربه ۱۵٪ افزایش داشته است. این امر نشان‌دهنده افزایش خواص مکانیکی-دینامیکی و ضربه‌پذیری در

نتایج آزمون خستگی در منطقه جوش نمونه تمپر شده نانوذرات کاربید و تمپر شده اکسید تیتانیوم را نشان می‌دهد.



الف



ب

شکل (۱) دستگاه آزمون خستگی (الف)، شماتیک دستگاه آزمون خستگی (ب)

جدول (۲) آزمون خستگی در نمونه جوش تمپر شده نانواکسید تیتانیوم و نانوکاربید تیتانیوم

نمونه	پارامتر	۱۵۰ نیوتن	۱۷۵ نیوتن	۲۰۰ نیوتن
نانواکسید تیتانیوم	۵۹۷ مگاپاسکال	۴۲۰۷	۵۹۸۳۹	۱۶۸۳۱۱
نانوکاربید تیتانیوم	۵۲۲ مگاپاسکال	۹۳۶۵۷	۱۳۸۹۰۲	۲۱۸۸۰۹

آزمایش کرنش سنجی 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 آزاد شده 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 کرنش سنجی سوراخ به دلایلی همچون شکستن فرز سر تخت باشد. در آزمایش کرنش سنجی سوراخ با توجه به

خودمتعادالشوندگی این تنش‌ها ارتباط دارد (هنگامی که مقدار تنش پسماند کششی کم شود باعث کاهش تنش پسماند فشاری نیز خواهد شد).

نتایج نشان می‌دهد که تنش پسماند محوری در ناحیه جوش نمونه تمپر شده نانو اکسید تیتانیوم و نانو کاربید تیتانیوم به ترتیب برابر با ۴۱- و ۶۰- مگاپاسکال است. همچنین در منطقه متأثر از حرارت جوش نمونه تمپر شده نانو اکسید تیتانیوم و نانو کاربید تیتانیوم به ترتیب ۳۲- و ۴۴- مگاپاسکال تنش پسماند محوری به دست آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر دو نمونه نانو اکسید و نانو کاربید تیتانیوم، تنش پسماند محوری ناحیه جوش و منطقه متأثر از حرارت به صورت فشاری است. قدر مطلق تنش پسماند محوری در نمونه تمپر شده نانو اکسید تیتانیوم نسبت به نانو کاربید تیتانیوم در ناحیه جوش و منطقه متأثر از حرارت به ترتیب در حدود ۳۲ و ۲۸٪ کاهش داشته است. اثر بیشتر کاهش قدر مطلق تنش پسماند در ناحیه جوش نمونه تمپر شده نسبت به منطقه متأثر از حرارت را می‌توان در وجود ذرات نانو در منطقه جوش دانست؛ در صورتی که کاهش قدر مطلق تنش پسماند محوری در منطقه متأثر از حرارت ناشی به خودمتعادالشوندگی این تنش‌ها ارتباط دارد (هنگامی که مقدار تنش پسماند کششی کم شود باعث کاهش تنش پسماند فشاری نیز خواهد شد). در عملیات حرارتی تمپر کردن (در مقایسه با عملیات حرارتی نرماله کردن) قدر مطلق تنش پسماند به صورت قابل توجهی کاهش پیدا کرده است. با این وجود استحکام تسلیم و نهایی مقداری کاهش داشته و خستگی و مقاومت به ضربه تقریباً بدون تغییر مانده است.

۵- نتیجه‌گیری

۱- در نمونه تمپر شده نانو ذرات کاربید تیتانیوم نسبت به اکسید تیتانیوم، استحکام تسلیم و نهایی به ترتیب، ۳۹ و ۴۳٪ افزایش داشته است.

۲- انرژی شکست در نمونه‌های تمپر شده نانو ذرات اکسید تیتانیوم و کاربید تیتانیوم را به ترتیب، برابر با ۹۸ و ۵۳ ژول نشان می‌دهد

۳- تعداد دوران در نمونه تمپر شده جوش نانو ذرات کاربید تیتانیوم در بار ۲۰۰، ۱۷۵ و ۱۰۰ نیوتن به ترتیب برابر ۹۳۶۵۷، ۱۳۸۹۰۲ و ۲۱۸۸۰۹ ارزیابی شد.

۴- میزان افزایش عمر خستگی نمونه تمپر شده جوش نانو ذرات اکسید تیتانیوم نسبت به نمونه بدون عملیات حرارتی جوش نانو ذرات اکسید تیتانیوم در بار ۲۰۰، ۱۷۵ و ۱۰۰ نیوتن به ترتیب حدود ۷، ۱۰۸ و ۱۶۶٪ رشد داشته است.

۵- تنش پسماند محیطی در ناحیه جوش نمونه تمپر شده نانو اکسید تیتانیوم و نانو کاربید تیتانیوم به ترتیب برابر با ۶۴ و ۸۴ مگاپاسکال است.

۶- تنش پسماند محوری در ناحیه جوش نمونه تمپر شده نانو اکسید تیتانیوم و نانو کاربید تیتانیوم به ترتیب برابر با ۴۱- و ۶۰- مگاپاسکال

نمونه نانو ذرات اکسید تیتانیوم است. نتایج متالوگرافی نشان می‌دهد که ساختار میکروسکوپی نمونه تمپر شده نانو ذرات اکسید و کاربید تیتانیوم در ناحیه جوش بیانگر شبکه پیچیده و ناهمگن ساختار شبکه فریت با رشد صفحات جانبی همراه فریت پروبوتکتوئید و پرلیت است. پیچیدگی و ناهمگن بودن در ساختار نانو ذرات کاربید تیتانیوم مشهودتر 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 مگاپاسکال ارزیابی شد. نتایج نشان می‌دهد که میزان عمر خستگی در هر دو نمونه تمپر شده جوش نانو ذرات اکسید تیتانیوم و نانو کاربید تیتانیوم نسبت به نمونه بدون عملیات حرارتی افزایش یافته است. میزان افزایش عمر خستگی نمونه تمپر شده جوش نانو ذرات اکسید تیتانیوم نسبت به نمونه بدون عملیات حرارتی جوش، نانو ذرات اکسید تیتانیوم در بار ۲۰۰، ۱۷۵ و ۱۵۰ نیوتن به ترتیب در حدود ۷، ۱۰۸ و ۱۶۶٪ رشد داشته است. میزان افزایش عمر خستگی نمونه تمپر شده جوش نانو ذرات کاربید تیتانیوم نسبت به نمونه بدون عملیات حرارتی جوش نانو کاربید ذرات اکسید تیتانیوم در بار ۲۰۰، ۱۷۵ و ۱۵۰ نیوتن به ترتیب در حدود ۵، ۸ و ۱۹٪ رشد داشته است. همچنین میزان افزایش عمر خستگی نمونه تمپر شده جوش نانو ذرات کاربید تیتانیوم نسبت به نمونه تمپر شده جوش نانو ذرات اکسید تیتانیوم در بار ۲۰۰، ۱۷۵ و ۱۵۰ نیوتن به ترتیب حدود ۲۱۲۶، ۱۳۲ و ۳۰٪ رشد داشته است. افزایش چشمگیر عمر خستگی در نمونه تمپر شده جوش نانو ذرات کاربید تیتانیوم به نمونه تمپر شده جوش نانو ذرات اکسید تیتانیوم را می‌توان به ۴۳٪ بالاتر بودن استحکام کششی نهایی نمونه جوش نانو ذرات کاربید تیتانیوم به نانو ذرات اکسید تیتانیوم ارتباط داد. نتایج نشان می‌دهد با کاهش میزان بارگذاری فاصله عمر دورانی خستگی افزایش پیدا کرده است؛ هر چند درصد تغییرات کاهش پیدا کرده است.

نتایج نشان می‌دهد که تنش پسماند محیطی در ناحیه جوش نمونه تمپر شده نانو اکسید تیتانیوم و نانو کاربید تیتانیوم به ترتیب برابر با ۶۴ و ۸۴ مگاپاسکال است. همچنین در منطقه متأثر از حرارت جوش، نمونه تمپر شده نانو اکسید تیتانیوم و نانو کاربید تیتانیوم به ترتیب ۴۰- و ۵۱- مگاپاسکال تنش پسماند محیطی به دست آمده است. در هر دو نمونه نانو اکسید و نانو کاربید تیتانیوم، تنش پسماند محیطی ناحیه جوش به صورت کششی و منطقه متأثر از حرارت به صورت فشاری است. قدر مطلق تنش پسماند محیطی در نمونه تمپر شده نانو اکسید تیتانیوم نسبت به نمونه تمپر شده نانو کاربید تیتانیوم در ناحیه جوش و منطقه متأثر از حرارت به ترتیب در حدود ۲۴ و ۲۲٪ کاهش داشته است. اثر بیشتر کاهش قدر مطلق تنش پسماند در ناحیه جوش نمونه تمپر شده نسبت به منطقه متأثر از حرارت را می‌توان در وجود ذرات نانو در منطقه جوش دانست، در صورتی که کاهش قدر مطلق تنش پسماند محیطی در منطقه متأثر از حرارت ناشی به

5- 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.

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

7- Dhua SK, Mukerjee D, Sarma DS. Influence of tempering on the microstructure and mechanical properties of HSLA-100 steel plates. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2001;32:2259-2270.

8- 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.

9- 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.

10- 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]

11- 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]

12- Sabokrouh M, khoshima 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]

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسنده گزارش نشده است.

تاییدیه 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- Lee HK, Jo Jhung M, Kim MC, Lee BS. Effects of tempering and PWHT on microstructures and mechanical properties of SA508 GR.4N steel. *Nuclear Engineering and Technology*. 2014;46(3):413-422.

2- Nathan SR, Balasubramanian V, Malarvizhi S, Rao AG. Effect of welding processes on mechanical and microstructural characteristics of high strength low alloy naval grade steel joints. *Defence Technology*. 2015;11(3):308-317.

3- Srinivasan L, Jakka SJ, Sathiya P. Microstructure and mechanical properties of Gas tungsten arc Welded High Strength Low Alloy (15CDV6) steel joints. *MaterialsToday: Proceedings*. 2017;4(8):8874-8882.

4- 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.