



## Experimental investigation of the Annealing Effect on the Mechanical Properties of Girth Welding Using Nanoparticles on Gas Transmission Pipeline

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Sabokrouh M.<sup>1</sup> PhD,  
Farahani M.<sup>\*2</sup> PhD

#### How to cite this article

Sabokrouh M, Farahani M. Experimental investigation of the Annealing Effect on the Mechanical Properties of Girth Welding Using Nanoparticles on Gas Transmission Pipeline. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(5):1107-1113.

### ABSTRACT

Titanium is one of the most important microalloy elements used in the gas transmission industry. In this paper, titanium nano-oxide and titanium nano-carbide were added to two separate samples. Then the shielded metal arc welding (SMAW) was performed on high-strength low alloy steel according to welding procedure specification of the national Iranian gas company. The effects of annealing heat treatment on girth weld with containing titanium oxide and titanium carbide nanoparticles (X-65 grade of gas transmission pipeline) were evaluated. The Charpy test results show that in the annealed sample containing titanium oxide nanoparticles and titanium carbide nanoparticles compared to the no heat treatment sample (Containing titanium carbide nanoparticles and titanium carbide nanoparticles), energy absorbed has been respectively increased by %13 and %9. Also, the ultimate strength of the annealed sample containing titanium oxide nanoparticles and titanium carbide nanoparticles compared to the non-heat treated sample has been respectively decreased by %8 and %3. The fatigue life in both annealed nano-alloy samples has been increased. Also, the fatigue life in the annealed sample of titanium carbide nanoparticles has increased more than fatigue life in the titanium oxide nanoparticles. The fatigue life (Annealed sample containing titanium carbide nanoparticles compared to the no heat treatment sample) has been increased by %16. The hole drilling strain gage results show that in the annealed sample containing titanium oxide nanoparticles and titanium carbide nanoparticles compared to the non-heat treated sample, hoop residual stresses has been respectively decreased by %31 and %19.

**Keywords** Nano-Welding; Annealing; Fatigue; Residual Stress; Impact Strength

### CITATION LINKS

[1] Fatigue strength of HFMI-treated and stress-relief annealed high-strength steel weld Joints [2] Microstructure development and mechanical properties of medium carbon carbide-free bainite steels [3] Effect of thermal refining on mechanical properties of annealed SAE 4130 by multilayer GTAW [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 HSLA 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] Influence of welding procedure and PWHT on HSLA steel weld metals. Journal of Materials Research and Technology [14] Investigation of welding in multi-pass girth welding of thermomechanical 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 [20] Experimental determination of the normalizing effect on tensile strength, impact strength, fatigue, residual stress of girth welding on Iranian natural gas transmission pipelines

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Faculty, Engineering Faculty, Mahallat Institute of Higher Education, Mahallat, Iran

<sup>2</sup>Mechanical Engineering Department, Engineering College, University of Tehran, Tehran, Iran

#### \*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Engineering College, University of Tehran, Tehran, Iran.

Postal Code: 1439957131

Phone: -

Fax: -

mrfarahani@ut.ac.ir

#### Article History

Received: January 20, 2019

Accepted: November 11, 2019

ePublished: May 09, 2020

## بررسی تجربی اثر آنیلینگ بر خواص مکانیکی جوش لوله حاوی نانوذرات مورد استفاده در خطوط انتقال گاز

مجید سبک‌روح PhD

دانشکده مهندسی، مرکز آموزش عالی محلات، محلات، ایران

محمدرضا فراهانی\* PhD

گروه مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

### چکیده

تیتانیوم از مهم‌ترین عناصر میکروآلیاژی مورد استفاده در صنعت انتقال گاز است. در این مقاله به صورت جداگانه نانوکاربید تیتانیوم و نانوآکسید تیتانیوم اضافه شد. در ادامه روی نمونه‌های براساس دستورالعمل ویژه جوشکاری شرکت ملی گاز ایران عملیات جوشکاری قوس الکتریکی با الکتروود دستی انجام شد. عملیات حرارتی آویل کردن روی جوش حاوی نانوآکسید تیتانیوم و نانوکاربید تیتانیوم (فولاد گرید X65 خطوط انتقال گاز) انجام شد. نتایج آزمون شاپری نشان می‌دهد که در نمونه آویل شده حاوی نانوذرات اکسید تیتانیوم و نانوذرات کاربید تیتانیوم نسبت به نمونه بدون عملیات حرارتی (حاوی نانوذرات اکسید تیتانیوم و کاربید تیتانیوم) انرژی جذب شده به ترتیب ۱۳ و ۹٪ افزایش پیدا کرده است. همچنین استحکام نهایی نمونه آویل شده حاوی نانوذرات اکسید تیتانیوم و کاربید تیتانیوم نسبت به نمونه بدون عملیات حرارتی (نانوذرات اکسید تیتانیوم و کاربید تیتانیوم) به ترتیب ۸ و ۳٪ کاهش یافته است. در هر دو نمونه آویل شده نانوالیای میزبان عمر خستگی افزایش یافته است. همچنین میزان عمر خستگی در نمونه آویل شده نانوذرات کاربید تیتانیوم نسبت به اکسید تیتانیوم، افزایش بیشتری داشته است. عمر خستگی (نمونه آویل شده حاوی نانوذرات کاربید تیتانیوم نسبت به نمونه بدون عملیات حرارتی) ۱۶٪ افزایش یافته است. نتایج آزمون کرنش‌سنجی سوراخ نشان می‌دهد که در نمونه آویل شده حاوی نانوذرات اکسید تیتانیوم و کاربید تیتانیوم نسبت به نمونه بدون عملیات حرارتی، تنش پسماند محیطی به ترتیب ۳۱ و ۱۹٪ کاهش پیدا کرده است.

**کلیدواژه‌ها:** نانوجوشکاری، آویل کردن، خستگی، تنش پسماند، مقاومت به ضربه

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۰/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۲۰

\*نویسنده مسئول: mrfarahani@ut.ac.ir

### ۱- مقدمه

در عملیات حرارتی آنیلینگ، فولادهای هیپوپوتکتوئید (با توجه به مقدار درصد کربن آن) را تا دمای مخصوص (حدود ۵۰ درجه سانتیگراد بالای خط A3) خود گرم می‌کنند تا وارد فاز آستنیت شود. سپس به آرامی درون کوره سرد می‌شود. لذا دانه‌های فریت بزرگی تشکیل شده و پرلیت (تشکیل شده از آستنیت) خشن یا درشت است<sup>[1, 2]</sup>. فاصله بین لایه‌ای نسبتاً زیاد این نوع میکروساختار باعث کاهش سختی و استحکام و افزایش انعطاف‌پذیری می‌شود<sup>[3]</sup>. اتصال سر به سر خطوط انتقال گاز طبیعی ایران جوشکاری محیطی با استفاده از الکتروود دستی است<sup>[4]</sup>. 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<sup>[5-7]</sup>. این مطلب با توجه به ویژگی و حساسیت فولادهای کم‌کربن پرستحکام که در خطوط لوله انتقال گاز طبیعی استفاده می‌شود، اهمیت بیشتری یافته است. در این گونه فولادها، عناصر میکروآلیاژی (تیتانیوم، وانادیم و نیوبیوم) وجود دارند<sup>[8, 9]</sup>. حرارت ورودی و عملیات حرارتی غیر کنترل شده در جوشکاری خطوط انتقال گاز باعث حل شدن عناصر میکروآلیاژی و قرار گرفتن با توزیع غیریکنواخت می‌شود<sup>[10]</sup>. در سال‌های اخیر، در این زمینه پژوهش‌های مختلفی انجام شده است. چابک و همکاران به مطالعه رفتار خستگی نانو ذرات در فولادها پرداختند و نشان دادند که در فولاد با ذرات نانو میزان عمر خستگی به سه برابر افزایش پیدا خواهد کرد<sup>[11]</sup>. موزاکا و همکاران، رفتار مکانیکی نانو ساختارها در فولاد کم آلیاژ استحکام بالا را مدلسازی کردند<sup>[12]</sup>. جرج و همکاران تاثیر عملیات حرارتی پس از جوشکاری را بر روی فولادهای میکروآلیاژی کم‌کربن استحکام بالا مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که بین مقاومت مکانیکی و چقرمگی ضربه پس از انجام عملیات حرارتی رابطه مناسبی وجود دارد<sup>[13]</sup>. هاشمی و همکاران جوش‌پذیری فولاد خطوط انتقال گاز طبیعی ایران را به صورت جامع مورد بررسی قرار دادند<sup>[14]</sup>. در ادامه سبک روح و و تشکیل فازهای مختلف را (در پاس‌های ریشه، گرم، پر کن و سطح جوش سر به سر خطوط انتقال گاز با استفاده از کوانتومتری و میکروسکوپ الکترونی روبشی) مطالعه نمودند و تاثیر تغییر ساختارها بر خواص مکانیکی استاتیکی و دینامیکی را بررسی کردند<sup>[15]</sup>. در ادامه ایشان ابتدا به صورت تجربی تنش پسماند را با استفاده از آزمون کرنش‌سنجی سوراخ در جوش سر به سر خطوط انتقال گاز طبیعی ایران بررسی نمودند<sup>[16]</sup>. سپس مدل شبیه‌سازی مناسبی برای ارزیابی تنش پسماند جوش لوله مذکور ارائه دادند<sup>[17]</sup>. سپس با استفاده از نتایج تجربی، مدل‌های ریاضی برای ارزیابی توزیع تنش پسماند در منطقه جوش و متاثر از حرارت این لوله‌ها تقریب زدند<sup>[18]</sup>. با توجه به تاثیرگذاری عناصر میکروآلیاژی سبک روح و همکاران در ادامه نانواکسید تیتانیوم و نانوکاربید تیتانیوم را (به صورت جداگانه) به دو طرح اتصال جوش مشابه خطوط انتقال گاز طبیعی ایران اضافه کردند<sup>[19]</sup>. نتایج نشان داد، 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 شده است. در ادامه ایشان اثر عملیات حرارتی نرماله کردن بر خواص مکانیکی جوش نانوالیای تیتانیوم را ارزیابی نمودند<sup>[20]</sup>. نتایج نشان داد در هر دو نمونه نرماله شده میکرو آلیاژی میزان عمر خستگی افزایش یافته است؛ همچنین، میزان عمر خستگی در نمونه نرماله شده ذرات ریز کاربید تیتانیوم نسبت به اکسید تیتانیوم، افزایش بیشتری داشته است. نتایج آزمون کرنش سنجی سوراخ نشان داد،



شکل ۱) نمونه‌های آتیل

## ۲-۲- آزمایش‌ها

روی هر نمونه در راستای خط جوش، یک آزمون کشش (با توجه به محدودیت در طول خط جوش) انجام شد. دو نمونه آزمون 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 آتیل کردن از آزمون متالوگرافی استفاده شد. جهت آزمون متالوگرافی سنبله ۶۰۰،۸۰۰ و ۱۰۰۰ میکرون و پودر آماده‌سازی شد و با استفاده از خمیر الماسه ۹ میکرون و پودر آلومینا ۵٪ میکرون صیقل کاری شد. برای مشخص کردن نواحی مختلف، از محلول نایتال ۲٪ نمونه آشکارساز استفاده شد. شکل ۲ ساختار میکروسکوپی جوش نانوذرات اکسید تیتانیوم و کاربرد تیتانیوم (پس از عملیات آتیل کردن) را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل مشخص است فاصله لایه‌ها از نمونه نرماله بیشتر است [20].

آزمون کشش روی نمونه‌ها توسط دستگاهی با ظرفیت ۲۰ تن و با سرعت کشش ۵ میلی‌متر بر دقیقه، مطابق استاندارد (EN 895 8M ASTM E) در دو راستای جوش و عمود بر جوش انجام شد. در آزمون کشش عرضی، شکست برای هر دو نمونه آتیل شده نانوذرات اکسید تیتانیوم و نانوذرات کاربرد تیتانیوم در فلز پایه رخ داده است. نتایج حاصل از آزمون کشش در راستای جوش، برای نمونه‌های نانوذرات اکسید تیتانیوم و نانوذرات کاربرد تیتانیوم در جدول ۱ ارائه شده است.

آزمون ضربه شاریپی، بر اساس استاندارد (EN 875) در شیار V شکل با زاویه ۴۵ درجه و عمق ۲ میلی‌متر و شعاع ریشه ۲۵٪ انجام گرفت. نتایج نشان می‌دهد، انرژی شکست نمونه آتیل شده نانوذرات اکسید تیتانیوم برابر ۸۸ ژول است. در نمونه نانوذرات کاربرد تیتانیوم، کمترین میزان انرژی شکست در راستای جوش و برابر ۵۱ ژول اتفاق افتاده است.

پس از جوشکاری نمونه‌های خستگی مشابه بر اساس استاندارد (ASTM E1942) تهیه شد. به‌منظور ارزیابی نتایج با صحت و دقت مناسب، سطح کار با ابزار الماسه پرداخت شد. همچنین در

در نمونه نرماله شده حاوی ذرات ریز اکسید تیتانیوم و کاربرد تیتانیوم نسبت به نمونه بدون عملیات حرارتی (ذرات ریز اکسید تیتانیوم و کاربرد تیتانیوم)، تنش پسماند محیطی به ترتیب ۱۲٪ و ۸٪ کاهش پیدا کرده است. در این مقاله، اثر عملیات حرارتی آتیل کردن بر نانو ساختار تیتانیوم جوش سربسر انتقال گاز طبیعی در 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 (با همان ابعاد و طبق همان دستورالعمل قبلی) نانوذرات اکسید تیتانیوم و نانوذرات کاربرد 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.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- آماده‌سازی، جوشکاری و آتیل کردن

کلیه مراحل جوشکاری بر اساس دستورالعمل‌های ویژه شرکت ملی گاز ایران انجام می‌شود. میانگین اندازه دانه نانوذرات اکسید تیتانیوم بین ۱۰ تا ۲۵ نانومتر است. اندازه ذره نانوذرات کاربرد تیتانیوم برابر ۴۰-۶۰ نانومتر است. پس از پاکسازی سطح ورق، توزیع یکنواخت نانو مواد روی طرح اتصال انجام شد. تمام 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.

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

فرآیند عملیات حرارتی آتیل کردن شامل مراحل حرارت دادن فولاد در دمای آتیل کردن، نگهداری در آن دما، آرام سرد کردن درون کوره و در نهایت خنک‌کاری در معرض هوا است. دمای کوره در دمای ۸۲۰ درجه سانتیگراد قرار گرفت و تا زیر ۷۰۰ درجه به صورت آرام خنک شد. برای قرار دادن نمونه‌ها درون کوره از سیم‌کشی و آویز استفاده شد. سپس نمونه‌ها روی یک لوله فلزی توسط سیم‌گیر مطابق شکل آویزان شد. پس از بستن قطعات به سیم مفتول برای نگهداری آنها در کوره، نمونه را وارد کوره پیش‌گرم شد و ۳۰ دقیقه در کوره نگهداری شد. سپس به مدت ۳ دقیقه وارد حمام نمک شد. مذاب داخل کوره از سیانول، پتاسیوم و نمک طعام خوراکی تشکیل شده است. پس از آن قطعه را در کوره پیش‌گرم زیر خاک به مدت ۱۶ ساعت قرار گرفت. در پایان نمونه‌ها در معرض هوا قرار داده شد تا کاملاً سرد شود. شکل ۱ سیم کردن و عملیات آتیل کردن را نشان می‌دهد.

با استفاده از نمودار خستگی بیشترین مقدار ضریب تمرکز تنش  $1/9$  بدست می‌آید. سپس نمونه‌ها داخل دستگاه آزمون خستگی خمشی‌های دوار قرار گرفت. از هر کدام از نواحی جوش آنبیل شده نانو اکسید تیتانیوم و آنبیل شده نانو کاربید تیتانیوم سه نمونه یکسان آزمون خستگی تهیه شد. هر کدام از این نمونه‌ها تحت بار  $150$ ،  $170$  و  $200$  نیوتن قرار گرفتند. جدول ۲ الی ۳، نتایج آزمون خستگی در منطقه جوش نمونه آنبیل شده نانوذرات کاربید و آنبیل شده اکسید تیتانیوم را نشان می‌دهد.

جدول ۲) آزمون خستگی در نمونه جوش آنبیل شده نانو اکسید تیتانیوم

۱۵۰ N (۴۴۸ MPa)	۱۷۵ N (۵۲۲ MPa)	۲۰۰ N (۵۹۷ MPa)
۱۶۸۵۷۹	۵۸۶۰۲	۴۱۵۲

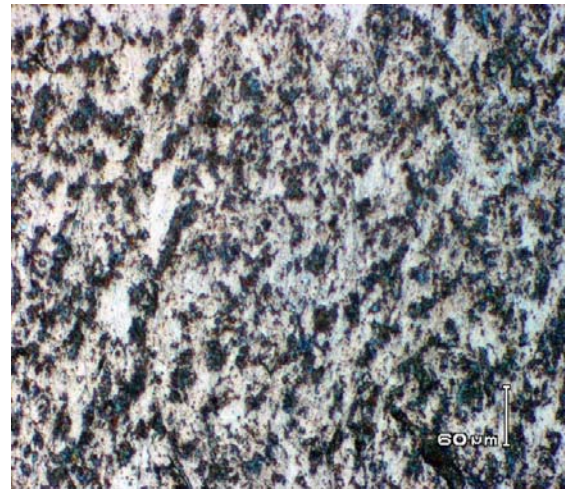
جدول ۳) آزمون خستگی در نمونه آنبیل شده نانو کاربید تیتانیوم

۱۵۰ N (۴۴۸ MPa)	۱۷۵ N (۵۲۲ MPa)	۲۰۰ N (۵۹۷ MPa)
۲۱۳۴۰۱	۱۳۳۰۷۸	۹۰۸۵۰

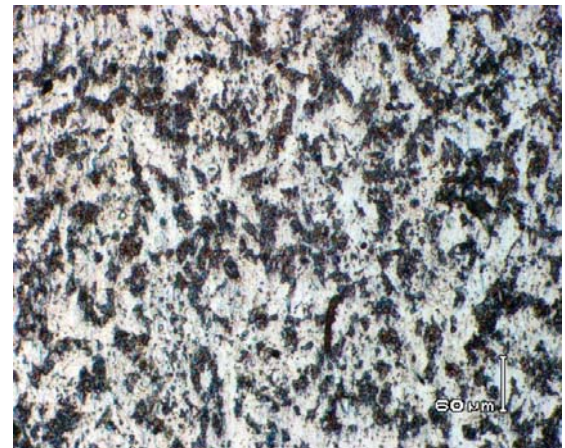
آزمایش کرنش‌سنجی سوراخ بر اساس استاندارد (ASTM E 837) در ناحیه جوش و منطقه متاثر از حرارت ( $22$  میلی‌متر از لبه جوش) انجام شد. در هر کدام از این نقاط پس از نصب کرنش‌سنج سه تایی، آماده‌سازی سامانه اندازه‌گیری کرنش‌های آزاد شده و اطمینان از هم‌مرکز بودن کرنش‌سنج سه تایی و محل آزمایش، سوراخ‌کاری آغاز شده و نتایج سه متغیر کرنش در فواصل عمق  $0/2$  میلی‌متر ثبت شد. این آزمایش تا عمق  $2$  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 به وجود آمدن تنش‌های پسماند قابل توجه ناشی از عملیات ماشین‌کاری جلوگیری شود. عدم همگرایی در نتایج می‌تواند نشانه‌ای از تغییر تنش‌های پسماند در فواصل کم و 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. شکل ۴ نحوه آزمایش کرنش‌سنجی سوراخ را نشان می‌دهد. جداول ۴ و ۵ نتایج تنش پسماند محیطی و محوری در منطقه جوش و متاثر از حرارت نمونه جوش آنبیل شده نانوذرات کاربید و اکسید تیتانیوم را نشان می‌دهند.

جداول ۴ و ۵ نتایج تنش پسماند محیطی و محوری در منطقه جوش و متاثر از حرارت نمونه جوش آنبیل شده نانوذرات کاربید و اکسید تیتانیوم را نشان می‌دهد.

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  $0/6$  و نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک برابر  $1/5$  است.



الف

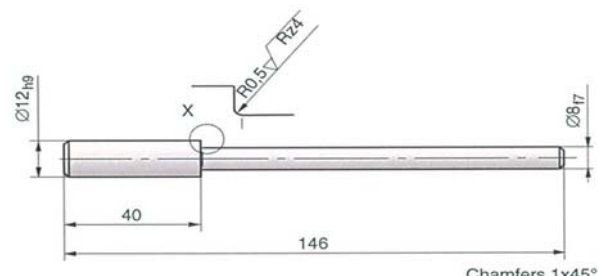


ب

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

جدول ۱) نتایج آزمون کشش

نانو ذرات تیتانیوم	استحکام تسلیم مگاپاسکال	استحکام نهایی مگاپاسکال	ازدیاد طول نسبی
اکسید	۳۹۲	۴۹۹	%۲۵
کاربید	۵۵۶	۷۳۶	%۲۸



شکل ۳) شماتیک نمونه خستگی



شکل ۴) آزمایش کرنش سنجی سوراخ

جدول ۴) تنش پسماند محیطی نمونه آئیل شده

نانو اکسید تیتانیوم		نانو کاربید تیتانیوم	
جوش	منطقه متأثر از حرارت	جوش	منطقه متأثر از حرارت
۸۵	-۴۹	۱۲۳	-۶۹

جدول ۵) تنش پسماند محوری نمونه آئیل شده

نانو اکسید تیتانیوم		نانو کاربید تیتانیوم	
جوش	منطقه متأثر از حرارت	جوش	منطقه متأثر از حرارت
-۵۵	-۴۷	-۷۲	-۴۹

#### ۴- بحث و بررسی

در نمونه‌های عمود بر جوش، استحکام نهایی نمونه آئیل شده نانوذرات کاربید تیتانیوم، نسبت به نمونه نانوذرات اکسید تیتانیوم اندکی کمتر 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 آئیل شده نانوذرات اکسید تیتانیوم، به ترتیب، ۳۹۹ و ۴۹۹ مگاپاسال است؛ همچنین، درصد ازدیاد طول نسبی ۲۵٪ به دست آمد. در راستای جوش، استحکام تسلیم و استحکام نهایی نمونه آئیل شده نانوذرات کاربید تیتانیوم، به ترتیب، ۵۵۶ و ۷۳۶ مگاپاسال است؛ همچنین ازدیاد طول نسبی ۲۹٪ حاصل شد. نتایج نشان می‌دهد، در نمونه آئیل شده نانوذرات کاربید تیتانیوم نسبت به نمونه آئیل شده نانوذرات اکسید تیتانیوم استحکام تسلیم و نهایی به ترتیب، ۴۱٪ و ۴۷٪ افزایش داشته است. این نتایج بیانگر نقش موثرتر 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 آزمون ضربه شاریپی، انرژی شکست در نمونه‌های آئیل شدن نانوذرات اکسید تیتانیوم و آئیل شدن نانوذرات کاربید تیتانیوم را به ترتیب، برابر با ۸۸ و ۵۱ ژول نشان می‌دهد. بنابراین در نمونه آئیل شده نانوذرات اکسید تیتانیوم، نسبت به آئیل شده نانو ذرات کاربید تیتانیوم انرژی شکست به میزان ۷۲٪ افزایش یافته است؛ این امر نشان‌دهنده افزایش خواص مکانیکی دینامیکی و ضربه‌پذیری در نمونه نانوذرات اکسید تیتانیوم است. در نمونه

آئیل شده نانوذرات اکسید تیتانیوم نسبت به نمونه عملیات حرارتی نشده نانوذرات اکسید تیتانیوم مقاومت به ضربه ۱۳٪ افزایش داشته است. همچنین در نمونه نمونه آئیل شده نانوذرات کاربید تیتانیوم نسبت به نمونه عملیات حرارتی نشده نانوذرات اکسید تیتانیوم مقاومت به ضربه ۹٪ افزایش داشته است. این امر نشان‌دهنده افزایش خواص مکانیکی دینامیکی و ضربه‌پذیری در نمونه نانوذرات اکسید تیتانیوم است. نتایج متالوگرافی نشان می‌دهد، ساختار میکروسکوپی نمونه آئیل شده نانوذرات اکسید تیتانیوم در ناحیه جوش بیانگر ساختار شبکه فریت به همراه فریت پرویوتکتوئید است. در جداول ۲ الی ۳ (براساس 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 در نمونه آئیل شده جوش نانو ذرات اکسید تیتانیوم تعداد ذرات در بار ۲۰۰، ۱۷۵ و ۱۰۰ نیوتن به ترتیب برابر ۴۱۵۲، ۵۸۶۰۲ و ۱۶۸۵۷۹ گزارش شده است. همچنین تعداد ذرات در نمونه آئیل شده جوش نانو ذرات کاربید تیتانیوم در بار ۲۰۰، ۱۷۵ و ۱۰۰ نیوتن به ترتیب برابر ۹۰۸۵۰، ۱۳۳۰۷۸ و ۲۱۳۴۰۱ ارزیابی شد. نتایج نشان می‌دهد میزان عمر خستگی در هر دو نمونه آئیل شده جوش نانو ذرات اکسید تیتانیوم و نانو کاربید تیتانیوم نسبت به نمونه بدون عملیات حرارتی افزایش یافته است. میزان افزایش عمر خستگی نمونه آئیل 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 ۶٪، ۱۰۴٪ و ۱۶۷٪ رشد داشته است.

میزان افزایش عمر خستگی نمونه آئیل شده جوش نانو ذرات کاربید تیتانیوم نسبت به نمونه بدون عملیات حرارتی جوش نانو ذرات کاربید تیتانیوم در بار ۲۰۰، ۱۷۵ و ۱۵۰ نیوتن به ترتیب در حدود ۲٪، ۴٪ و ۱۶٪ رشد داشته است. همچنین میزان افزایش عمر خستگی نمونه آئیل شده جوش نانو ذرات کاربید تیتانیوم نسبت به نمونه آئیل شده جوش نانو ذرات کاربید تیتانیوم در بار ۲۰۰، ۱۷۵ و ۱۲۷٪ رشد داشته است. افزایش چشمگیر عمر خستگی در نمونه آئیل شده جوش نانو ذرات کاربید تیتانیوم به نمونه آئیل شده جوش نانو ذرات اکسید تیتانیوم را می‌توان به ۴۷٪ 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 تنش پسماند محیطی در ناحیه جوش نمونه آئیل شده نانو اکسید تیتانیوم و نانو کاربید تیتانیوم به ترتیب برابر با ۸۵ و ۱۲۳ مگاپاسکال است. همچنین در منطقه متأثر از حرارت جوش نمونه آئیل شده نانو اکسید تیتانیوم و نانو کاربید تیتانیوم به ترتیب ۴۹- و ۶۹- مگاپاسکال تنش پسماند محیطی بدست آمده است. همان طور که مشاهده می‌شود در هر دو نمونه نانو اکسید و

کاربید تیتانیوم در حدود ۳۲۰۰ درجه سانتیگراد است. بنابراین در حین جوشکاری و عملیات حرارتی آنیل کردن ساختار خود را حفظ می‌کند و تنها محل قرارگیری آن در زمینه فولاد یکنواخت‌تر می‌شود.

۲- در نمونه آنیل شده نانوذرات اکسید تیتانیوم، نسبت به آنیل شده نانو ذرات کاربید تیتانیوم انرژی شکست به میزان ۷۲٪ افزایش یافته است؛ این امر نشان‌دهنده افزایش خواص مکانیکی دینامیکی و ضربه‌پذیری در نمونه نانوذرات اکسید تیتانیوم است. مورفولوژی آناتاس نانوذرات اکسید تیتانیوم نسبت به مورفولوژی کروی شکل نانوذرات کاربید تیتانیوم نسبت داد. همچنین به نظر می‌رسد با توجه به دمای پایین نانوذرات اکسید تیتانیوم، تاثیر عملیات حرارتی و قرارگیری در زمینه مناسب تر شکل گرفته است.

۳- میزان افزایش عمر خستگی نمونه آنیل 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 ۶٪، ۱۰۴٪ و ۱۶۷٪ رشد داشته است. افزایش چشمگیر عمر خستگی در نمونه آنیل شده جوش نانو ذرات کاربید تیتانیوم به نمونه آنیل شده جوش نانو ذرات اکسید تیتانیوم را می‌توان به بالاتر بودن استحکام کششی نهایی نمونه جوش نانو ذرات کاربید تیتانیوم به نانو ذرات اکسید تیتانیوم ارتباط داد.

۴- قدر مطلق تنش پسماند محیطی در نمونه آنیل شده نانو اکسید تیتانیوم نسبت به نمونه آنیل شده نانو کاربید تیتانیوم در ناحیه جوش و منطقه متاثر از حرارت به ترتیب در حدود ۳۱٪ و ۲۹٪ کاهش داشته است. اثر بیشتر کاهش قدر مطلق تنش پسماند در ناحیه جوش نمونه آنیل شده نسبت به منطقه متاثر از حرارت را می‌توان در وجود ذرات نانو در منطقه جوش دانست.

**تشکر و قدردانی:** موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

**تاییدیه اخلاقی:** موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

**تعارض منافع:** موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

**سهم نویسندگان:** موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

**منابع مالی:** موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

## منابع

- 1- Leitner M, Gerstbrein S, Ottersböck M, Stoschka M. Fatigue strength of HFMI-treated and stress-relief annealed high-strength steel weld joints. *Procedia Engineering*. 2015;133:477-484.
- 2- Soliman M, Palkowski H. Microstructure development and mechanical properties of medium carbon carbide-free bainite steels. *Procedia Engineering*. 2014;81:1306-1331.
- 3- Lee IK, Chung CL, YT Lee, Chien YT. Effect of thermal refining on mechanical properties of annealed SAE 4130 by multilayer GTAW. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2012;19:71-78.
- 4- Hashemi SH, Mohamaadyani D. Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure

کاربید 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 آنیل شده نانو اکسید تیتانیوم نسبت به نمونه آنیل شده نانو کاربید تیتانیوم در ناحیه جوش و منطقه متاثر از حرارت به ترتیب در حدود ۳۱٪ و ۲۹٪ کاهش داشته است. اثر بیشتر کاهش قدر مطلق تنش پسماند در ناحیه جوش نمونه آنیل شده نسبت به منطقه متاثر از حرارت را می‌توان در وجود ذرات نانو در منطقه جوش دانست در صورتی که کاهش قدر مطلق تنش پسماند محیطی در منطقه متاثر از حرارت به خود متعادل‌شوندگی این تنش‌ها ارتباط دارد (کاهش مقدار تنش پسماند محیطی باعث کاهش تنش پسماند فشاری خواهد شد).

براساس نتایج، تنش پسماند محوری در ناحیه جوش نمونه آنیل شده نانو اکسید تیتانیوم و نانو کاربید تیتانیوم به ترتیب برابر با ۵۵- و ۷۲- مگاپاسکال است. همچنین در منطقه متاثر از حرارت جوش نمونه آنیل شده نانو اکسید تیتانیوم و نانو کاربید تیتانیوم به ترتیب ۴۷- و ۴۹- مگاپاسکال تنش پسماند محوری بدست آمده است. همان طور که مشاهده می‌شود در هر دو نمونه نانو اکسید و کاربید تیتانیوم تنش پسماند محوری ناحیه جوش و منطقه متاثر از حرارت به صورت فشاری است. قدر مطلق تنش پسماند محوری در نمونه آنیل شده نانو اکسید تیتانیوم نسبت به نانو کاربید تیتانیوم در ناحیه جوش و منطقه متاثر از حرارت به ترتیب در حدود ۲۴٪ و ۴٪ کاهش داشته است. اثر بیشتر کاهش قدر مطلق تنش پسماند در ناحیه جوش نمونه آنیل شده نسبت به منطقه متاثر از حرارت را می‌توان در وجود ذرات نانو در منطقه جوش دانست در صورتی که کاهش قدر مطلق تنش پسماند محوری در منطقه متاثر از حرارت به خود متعادل‌شوندگی این تنش‌ها ارتباط دارد (کاهش تنش پسماند کششی سبب کاهش تنش پسماند فشاری نیز خواهد شد).

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله عملیات حرارتی آنیل کردن بر روی جوش حاوی نانو اکسید تیتانیوم و نانو کاربید تیتانیوم (فولاد گرید ایکس ۶۵ خطوط انتقال گاز) انجام شد. این عملیات حرارتی علی‌رغم کاهش اندک استحکام کششی نهایی، افزایش چشم‌گیر مقاومت به ضربه، عمر خستگی و همچنین کاهش تنش پسماند را به همراه دارد. لذا لازم است با تغییر چرخه عملیات حرارتی آنیل کردن تغییرات استحکام کششی نهایی را مورد ارزیابی و بهینه‌سازی قرار داد.

۱- در نمونه آنیل شده نانوذرات کاربید تیتانوم نسبت به نمونه آنیل شده نانوذرات اکسید تیتانیوم استحکام تسلیم و نهایی به ترتیب، ۴۱٪ و ۴۷٪ افزایش داشته است. این نتایج بیانگر نقش موثرتر 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. دمای ذوب نانوذرات

- LFG, Mendes MC, et al. Influence of welding procedure and PWHT on HSLA steel weld metals. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019;8(1):561-571.
- 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. [Persian]
- 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, Khoshshima 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]
- 20- 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(4):1033-1039. [Persian]
- 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):144-151.
- 6- Bose-Filho WW, Carvalho ALM, Strangwood M. Effect of alloying elements on the microstructure and inclusion formation in HSLA multipass welds. *Materials Characterization*. 2007;58(1):29-39.
- 7- Bouchard PJ. 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 HSLA 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*. 2015;28:295-301.
- 12- Muszka K, Majta J, Hodgson PD. Modeling of the mechanical behavior of nanostructured HSLA steels. *ISIJ International*. 2007;47(8):1221-1227.
- 13- Jorge JCF, Monteiro JLD, Gomes AJC, Bott IS, De Souza