



Experimental Investigation of the Effect of Underwater Ultrasonic Peening on the Fatigue Life of X52-5L Carbon Steel

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Shalvandi M.^{1*} PhD
Amirmiran M.¹ BSc

How to cite this article

Shalvandi M, Amirmiran M. Experimental Investigation of the Effect of Underwater Ultrasonic Peening on the Fatigue Life of X52-5L Carbon Steel. Modares Mechanical Engineering. 2021;21(6):379-388.

¹ Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Phone: -

Fax: -

mshalvandi@tabrizu.ac.ir

Article History

Received: December 28, 2020

Accepted: March 09, 2021

ePublished: May 12, 2021

ABSTRACT

Offshore structures are widely used in the oil and gas industry. Since construction and maintenance costs in these structures are very expensive, therefore, it seems necessary to find cost-effective methods to repair and strengthen these structures, especially in the offshore industry. Ultrasonic peening is one of the mechanical stress relief methods used to increase fatigue strength and corrosion resistance in welded joints. In this paper, this method was implemented in both air and underwater atmosphere, and the treatment effect on fatigue strength was investigated, also surface hardness and surface cracks in X52-5L welded steel were investigated. The effect of peening on this type of steel has been compared in both underwater and outdoor conditions. The results of the fatigue test showed that the fatigue life of underwater peened specimens was improved by approximately %25.2 and it changes from 42383 cycle up to 50083 cycle while in welded specimens with the same condition and peened in air condition, there is about %10.5 increase in fatigue life. Surface hardness also increases by %14 in underwater peened samples and by %12 in air-peened samples. SEM microscopy and observation of surface micro cracks also showed a reduction of surface cracks after peening. Subsequently and loss of stress concentration was shown. It can be concluded that underwater peening increases the fatigue strength and hardness of X52-5L steel compared to air peening.

Keywords Ultrasonic Peening, X52-5L, Fatigue Life, Carbon Steel, Mechanical Properties, Microstructure

CITATION LINKS

[1] Construction of marine and offshore structures. [2] Distribution of weld toe stress concentration factors on the central brace... [3] API 1104, in Standard for Welding Pipeline and Related Facilities. [4] A review of ultrasonic peening treatment. [5] Strength enhancement of the welded structures by ultrasonic peening. [6] A new method for prediction of nodular cast iron fatigue limit. [7] Comparison between Shot Peening, Cavitation Peening, and Laser Peening by Observation of Crack Initiation and Crack Growth in Stainless Steel. [8] Physics and mechanism of ultrasonic impact treatment. [9] The influence of ultrasonic impact treatment on fatigue behaviour of welded joints in high-strength steel. [10] Study of the surface nanocrystallization induced by theesonix ultrasonic impact treatment on the near-surface of 2024-T351 aluminum alloy. [11] Discussion on fatigue design of welded joints enhanced by ultrasonic peening treatment (UPT). [12] Fatigue strength improvement for ship structures by Ultrasonic Peening. [13] Research on fatigue behavior of the flash welded joint enhanced by ultrasonic peening treatment. [14] Effect of ultrasonic peening on Microstructure and properties of laser rapid forming GH4169. [15] Influence of severe plastic deformation on fatigue life applied by ultrasonic peening in welded pipe 316 Stainless Steel joints in corrosive environment. [16] Fatigue properties of welded Strenx 700 MC HSLA steel after ultrasonic impact treatment application. [17] Redistribution of residual stresses in girth weld of a pipe of strength class... [18] Influence of ultrasonic peening on microstructure and surface performance... [19] Effect of cutting process on the residual stress and fatigue life of the welded joint treated by ultrasonic impact treatment. [20] The influence of microstructure and heat treatment of API X52 carbon steel on hydrogen diffusion. [21] ISO 3183, in Petroleum and natural gas industries Steel pipe for pipeline transportation systems. [22] Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding. [23] Predicting strain-induced martensite in austenitic steels by combining physical modelling and machine learning.

بررسی تجربی اثرات چکش کاری فراصوتی زیر آب بر عمر خستگی فولاد کربنی X52-5L

مقصود شلودنی* PhD

استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

مصطفی امیرمیران BSc

دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

سازه‌های فراساحلی امروزه کاربرد بسیار گسترده‌ای در صنایع نفت و گاز دارند. هزینه‌های مربوط به ساخت و نگهداری در این سازه‌ها بسیار بالا است. از این رو یافتن روش‌های مقرون به صرفه برای انجام تعمیرات و تقویت این سازه‌ها به خصوص در صنایع زیر آب بسیار ضروری به نظر می‌رسد. چکش کاری فراصوتی یکی از روش‌های تنش‌زدایی مکانیکی است که از آن برای بالا بردن استحکام خستگی و مقاومت به خوردگی در اتصالات جوشکاری شده استفاده می‌شود. در این مقاله سعی شده است که از این روش در زیر آب استفاده شود و تأثیر آن بر روی استحکام خستگی، سختی سطح و ترک‌های سطحی در فولاد X52-5L جوشکاری شده به روش قوس الکتریکی بررسی شد. همچنین میزان اثر اعمال چکش کاری بر این فولاد در دو حالت زیر آب و در هوای آزاد مقایسه شده است. نتایج حاصل از آزمون خستگی نشان داد عمر خستگی در نمونه‌های چکش کاری شده در زیر آب به اندازه حدوداً ۲۵/۲ درصد بهبود یافته و از ۴۲۳۸۳ سیکل به ۵۰۰۸۳ سیکل رسیده است در حالی که در نمونه‌های جوشکاری شده و چکش کاری شده در هوا حدود ۱۰/۵ درصد افزایش عمر خستگی وجود دارد. سختی سطح نیز در نمونه‌هایی که در زیر آب چکش کاری شده بودند به اندازه ۱۴٪ و در نمونه‌هایی که در هوا چکش کاری شده بود به اندازه ۱۲٪ افزایش یافت. عکس‌برداری با میکروسکوپ الکترون روبشی و مشاهده ریز ترک‌های سطحی نیز نشان داد که با کاهش قابل توجه ترک‌های سطحی، تمرکز تنش نیز از بین می‌رود. می‌توان نتیجه گرفت عملیات چکش کاری در زیر آب استحکام خستگی و سختی فولاد X52-5L را نسبت به عملیات چکش کاری در هوا افزایش می‌دهد. **کلیدواژه‌ها:** چکش کاری فراصوتی، فولاد X52-5L، عمر خستگی، خواص مکانیکی، ریزساختار

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۹

*نویسنده مسئول: mshalvandi@tabrizu.ac.ir

۱- مقدمه

سازه‌های فراساحلی سازه‌هایی هستند که در صنایع نفت و گاز و همچنین صنایع مربوط به دریا به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سازه‌ها معمولاً سازه‌های بسیار عظیم، سنگین و پیچیده‌ای می‌باشند که هزینه‌های مربوط به ساخت، نگهداری و تعمیرات در آن‌ها بسیار بالا است [1]. اتصالات جوشی در این سازه‌ها کاربرد فراوانی دارند. سازه‌های فراساحلی دائماً تحت بارگذاری‌های متناوب و با تنش‌های بالا می‌باشند که این موضوع موجب می‌شود اتصالات جوشکاری در معرض شکست خستگی قرار بگیرند [2]. از این رو یافتن یک روش مطمئن و انعطاف‌پذیر به منظور افزایش استحکام خستگی که بتوان آن را در محل استقرار

این سازه‌ها و حتی زیر آب نیز به کاربرد بسیار حائز اهمیت می‌باشد. آلیاژ فولاد API 5L-X52، که در این مقاله استفاده شده است، یکی از آلیاژهای پرکاربرد است که در صنایع نفت و گاز و لوله‌های نفتی استفاده می‌شود و استانداردهای مختلفی نیز برای این کاربرد تدوین شده است [3].

چکش کاری فراصوتی یک روش مکانیکی تنش‌زدایی برای اتصالات جوشکاری شده می‌باشد که به وسیله آن می‌توان تنش‌های پسماند کششی را به تنش‌های پسماند فشاری تبدیل کرد. ارزان بودن، سبکی تجهیزات و قابلیت انعطاف‌پذیری بسیار بالا در حین کار، از مهم‌ترین مزایای چکش کاری فراصوتی به شمار می‌رود. چکش کاری فراصوتی چکش کاری با ضربات فشاری با فرکانس حدود ۲۰۰۰۰ هرتز در محل مرز جوش موجب ایجاد تغییر شکل پلاستیک شده و لایه‌های سطحی قطعه را روی هم می‌فشارد. در این صورت تنش‌های کششی پسماند جوشکاری حذف شده و جای خود را به تنش‌های فشاری می‌دهند. همچنین با اعمال چکش کاری فراصوتی، هندسه جوش در محل ریشه تغییر شکل داده و اصلاح می‌شود و به تبع آن تمرکز تنش در سطح پایین آمده و به افزایش عمر خستگی کمک می‌کند [4]. از دیگر تأثیرات چکش کاری فراصوتی بر روی سطح، بالا رفتن سختی سطح در محل چکش کاری است که این نیز موجب بالا رفتن عمر خستگی می‌شود [5]. تأثیر عوامل اشاره‌شده بر روی استحکام خستگی که چکش کاری فراصوتی بر روی آن‌ها اثر می‌گذارد، در معادله ۱ با عنوان حد دوام نیز قابل مشاهده است [5].

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e \quad (1)$$

همان طور که مشاهده می‌شود حد دوام قطعات تحت بارگذاری متناوب به پارامترهای مختلفی اعم از عامل شرایط سطح (k_a)، عامل اندازه (k_b)، عامل بارگذاری (k_c)، عامل دما (k_d)، عامل قابلیت اعتماد (k_e)، عوامل متفرقه (k_f)، حد دوام در آزمون مور (S'_e) (R.R. Moore test) و (S_e) حد دوام تصحیح‌شده‌ای که می‌تواند در آزمون خستگی برای پیش‌بینی مورد استفاده قرار گیرد، و چکش کاری فراصوتی هم‌زمان بر روی این پارامترها تأثیر مثبت می‌گذارد [6]. چکش کاری فراصوتی بر روی ترک‌ها و ریز ترک‌های سطحی نیز تأثیر گذاشته و موجب بسته شدن دهانه ترک‌ها و همچنین مانع رشد ترک‌های خستگی و به تبع آن شکست ترد و شکست خستگی قطعه می‌شود [7].

استانتینکوف و همکاران (۲۰۰۷) پژوهش‌های خود را بر روی روش‌های جدید و ابزارآلات جدیدی برای چکش کاری فراصوتی متمرکز کردند. آن‌ها توانستند هورن‌های جدید و کارآمدتر و نیدل-هایی برای اجناس و کاربردهای مختلف ابداع کنند. قابل ذکر است که ابداع روش چکش کاری فراصوتی نیز برای اولین بار توسط خود استانتینکوف و در سال ۱۹۶۰ انجام شد. همچنین روش قابل اجرایی را نیز برای تنش‌زدایی خط جوش ارائه دادند. عمر خستگی و استحکام خستگی با انجام چکش کاری تا حدود ۳۰ درصد

فولاد کم کربن با استحکام بالای Strenx 700 MC انجام دادند و سه پارامتر دامنه، فرکانس و توان ارتعاشات اعمالی را مورد بررسی قرار دادند تا اثر این عملیات را بر روی عمر خستگی اتصالات جوشی از این جنس بررسی کنند. نتایج این تحقیق نشان داد که در عمر ۱۰۷ سیکل، عمر خستگی اتصالات جوشی از این جنس به مقدار ۱۲ درصد افزایش می‌یابد^[16]. میخاییل و همکاران (۲۰۲۰)، لوله‌هایی به قطر ۵۳۰ میلی‌متر را با روش قوس الکتریکی جوشکاری کرده و چکش کاری فراصوتی را به منظور تغییر توزیع تنش‌های پسماند استفاده کردند. در این تحقیق از روش XRD (X-Ray Diffraction) برای ارزیابی مقدار تنش‌های پسماند استفاده شد و نتایج ارائه شده نشان داد که این عملیات از مقدار تنش‌های پسماند کششی کاسته و به مقدار تنش‌های پسماند فشاری در زیر سطح حداکثر به مقدار ۲۰۰ مگاپاسکال افزوده است^[17]. یانگ (۲۰۲۰) در تحقیقی، تأثیر چکش کاری فراصوتی را بر روی ریزساختار اتصالات هیبرید جوشی- لیزری از جنس آلایژ آلومینیوم 5A06 بررسی کردند. در این تحقیق از عکس‌های EBSD برای تحلیل عکس‌برداری متالوگرافی استفاده شد و نتایج این تحلیل نشان داد که مقاومت به سایش به مقدار قابل‌توجهی افزوده شده و سازوکار سایش از چسبندگی به سازوکار سایش سایند تغییر یافته و همین امر در افزایش مقاومت به سایش نقش داشته و همچنین سختی سطحی به مقدار ۳۸/۹ درصد افزایش پیدا کرده است^[18]. در سال (۲۰۲۱)، هانگ و همکاران، در نمونه‌های فولادی جوشکاری شده، عملیات چکش کاری فراصوتی انجام دادند و اثر عرض نمونه را در توزیع و آزاد شدن تنش‌های پسماند کششی و همچنین عمر خستگی نشان دادند، نتایج این تحقیق که به‌تازگی چاپ شده نشان می‌دهد با کاهش عرض نمونه‌های آزمون خستگی تنش‌های پسماند کششی، با اعمال چکش کاری فراصوتی به راحتی می‌توانند آزاد شوند و عمر خستگی نمونه‌ها، بیشتر افزایش می‌یابد^[19]. همان‌طور که اشاره شد در تمامی این روش‌ها از روش چکش کاری فراصوتی به‌منظور تنش‌زدایی و افزایش عمر خستگی استفاده شده است و اثرات آن بر روی خواص مورد بررسی قرار گرفته است. اما با توجه به اینکه در سازه‌های زیرآبی از قبیل سکوها نفتی از آلایژهای خاصی مانند X52-5L استفاده می‌شود و با توجه به ماهیت اتمسفر آب اطراف این سازه‌ها، سازوکارهای شناخته شده برای چکش کاری فراصوتی از قبیل گرمایش موضعی و تغییر شکل پلاستیکی سطحی با توجه به نرخ کاهش دمای سریع در این محیط آب کاملاً متفاوت و مجهول بوده و نیاز به بررسی دارد، لذا هدف از این تحقیق مقایسه بازدهی چکش کاری در هوا و آب نبوده بلکه هدف این است که به این سؤال مهم پاسخ داده شود که آیا انجام عملیات چکش کاری فراصوتی بر روی جوش قطعاتی که داخل آب واقع شده‌اند می‌تواند اثرگذار باشد و عمر خستگی این سازه‌ها را بهبود دهد یا خیر، بنابراین عملیات چکش کاری فراصوتی بر روی آلایژی استفاده شد که در سکوها نفتی و در

افزایش می‌یابند. همین‌طور در آزمون‌های سختی سنجی نیز نتایج نشان‌دهنده افزایش سختی سطح چکش کاری شده تا عمق ۱۰ میلی‌متر تا ۵۰ درصد بیشتر از سطح معمولی و بدون چکش کاری است. نتایج حاصله نشان داد که چکش کاری فراصوتی به عنوان یک روش قابل‌دسترسی آسان و ارزان قیمت نتایجی بسیار قابل قبولی را از خود نشان می‌دهد و به راحتی با استفاده از آن می‌توان خواص مکانیکی بسیار مطلوبی را در پایه جوش یا هر سطح دیگری که چکش کاری می‌شود به دست آورد^[8-10]. وانگ (۲۰۰۹) در تحقیقی تحت عنوان اثر تنش‌زدایی با ضربات فراصوتی بر روی قطعات جوشکاری شده با پیش بارگذاری خستگی به بررسی این روش با ترکیب بارگذاری قبل از چکش کاری پرداختند و در این تحقیق دریافتند که اصلی‌ترین اثر چکش کاری فراصوتی بر روی ترک‌های سطحی، ناشی از جوشکاری است و چکش کاری در اصل بر جهت رشد این ترک‌ها اثر می‌گذارد. همچنین نشان دادند به‌صورت میانگین می‌توان عمر خستگی نمونه‌های پیش بارگذاری شده تا ۲/۶ برابر افزایش یافته است^[11]. دگوچی (۲۰۱۲) و همکاران بر روی قطعات جوشکاری مورد استفاده در کشتی‌ها چکش کاری فراصوتی انجام دادند و تأثیر آن را بر روی استحکام خستگی در بارهای معمول وارد بر قطعات کشتی مشاهده کردند. نتایج حاصل نشان‌دهنده تأثیر مثبت چکش کاری فراصوتی بر روی استحکام خستگی این قطعات بود. نویسندگان با توجه به نتایج به دست آمده دریافتند چکش کاری فراصوتی بازدهی خود را در قطعات با ضخامت ۳ سانتی‌متر به خوبی حفظ می‌کند^[12]. یانجون (۲۰۱۶) و همکاران فرآیند چکش کاری فراصوتی را بر روی آلایژ فولاد U75V که در ریل‌های ماشین‌های ابزار با سرعت بالا کاربرد دارند، انجام دادند و نتایج ارائه شده از این تحقیق، بهبود در عمر خستگی و مقاومت و سایش و همچنین سختی سطحی را نشان داد همچنین شکلی از نانو کریستال از سطح آلایژ پس از انجام عملیات مشاهده شد^[13]. لئو (۲۰۱۸) و همکاران در پژوهش دیگری در مورد چکش کاری برای اتصالات جوشی از جنس فولاد S690QL و اثر آن بر روی رفتار خستگی نشان دادند که انجام چکش کاری دوباره بر روی محل قبلی چکش کاری در مواردی دارای نتایج خوب و در مواردی نیز با افت کیفیت عوامل همراه است. علت این مسئله ریسک بالای انجام چکش کاری دوباره در محل برخورد پین با مناطق مختلف سطح است که در مواردی دچار خرابی آثار چکش کاری قبلی شده و در مواردی محل‌های آسیب قبلی را بهبود می‌بخشد^[14]. فریدونی و همکاران (۲۰۱۸) عملیات چکش کاری فراصوتی را بر روی فولاد ضد زنگ ۳۱۶ مورد استفاده در صنایع تصفیه استفاده کردند تا اثربخشی این عملیات را در محیط‌های خورنده نیز بررسی کنند، نتایج این تحقیق نشان داد در ورق‌هایی از این فولاد با ضخامت ۴ میلی‌متر و در محیط خورنده H₂S بیشترین کارایی این عملیات در افزایش عمر این فلز دیده می‌شود^[15]. نووی و همکاران (۲۰۲۰) این عملیات را بر روی آلایژ

قوانین و استانداردهای مربوط به طراحی و ساخت سازه‌های فراساحلی پیشنهاد شده است زاویه درز جوش به صورت ۶۰ درجه و با ریشه جوش ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

طراحی جوش به نحوی انجام گرفت که انقباض فلز جوش در یک جهت سبب اعوجاج در طول کلی نمونه نشود؛ بنابراین، فرآیند جوشکاری با روش نشان داده شده در شکل ۱-الف و از وسط نمونه‌ها به سمت لبه قطعه و برعکس انجام گرفت.

۲-۴- انجام عملیات چکش‌کاری فراصوتی بر روی نمونه‌ها

در این مرحله بر روی دو سری از نمونه‌ها عملیات چکش‌کاری فراصوتی با فرکانس 19750 Hz و توان حدوداً ۸۰۰ وات انجام شد. دامنه ارتعاش‌های اعمالی به نمونه‌ها ۴۰ میکرون بوده و هر کدام در نمونه‌ها به مدت ۲ دقیقه (بصورت ۴ پاس) با ضربه زننده فراصوتی با قطر ۵ میلی‌متر مورد عملیات قرار گرفتند. بین ضربه زننده که در شکل ۱-ب، ارائه شده، یکی از اجزاء دستگاه چکش‌کاری فراصوتی است که جنس آن از فولاد 100Cr6 انتخاب شد و عملیات حرارتی سخت‌کاری تا ۵۵ راکول سی روی آن انجام گرفت. یک سری از نمونه‌ها در محیط هوا چکش‌کاری شدند و یک سری دیگر از نمونه‌ها در داخل محیط آب چکش‌کاری شدند و زمان چکش‌کاری همه نمونه‌ها یکسان اعمال شد. چیدمان و تجهیزات عملیات چکش‌کاری فراصوتی در شکل ۱-ب، ارائه شده است.

۲-۵- آماده‌سازی نمونه‌ها و آزمون‌ها

نمونه‌های آزمون خستگی بر اساس استاندارد ASTM-E466 و با احتساب اندازه گیره دستگاه آزمون خستگی به ابعاد نشان داده شده در شکل ۲ توسط واترجت برای جلوگیری از ایجاد اعوجاج متأثر از دمای برش، برش‌کاری شدند. قابل ذکر است که انتخاب روش واترجت باهدف تولید کمترین تنش‌های پسماند صورت گرفت.



شکل ۱ (الف) روش و ترتیب جوشکاری روی ورق فولادی انتخاب شده. (ب) - چیدمان و تجهیزات عملیات چکش‌کاری فراصوتی

زیرآب استفاده می‌شوند و کل عملیات چکش‌کاری نیز در زیرآب انجام شد تا کارایی این روش در این سازه‌ها و در محیط زیرآب که نرخ کاهش دمای بالایی دارد، مورد بررسی قرار گرفت و تأثیر آن بر روی استحکام خستگی، سختی سطح و ترک‌های سطحی در فولاد X52-5L جوشکاری شده به روش قوس الکتریکی بررسی شده است.

۲- آزمایش‌های تجربی

۲-۱- انتخاب مواد و نمونه‌ها

به‌طورکلی هدف از انجام این پژوهش به‌کارگیری چکش‌کاری فراصوتی در زیر آب و بررسی تأثیر آن بر روی قطعه و مقایسه این اثر با چکش‌کاری در هوای آزاد است تا میزان تأثیر محیط آب بر روی قابلیت اثرگذاری عملیات چکش‌کاری در زیر آب مشخص شود.

از این رو طبق پیشنهاد استاندارد API، فولاد X52-5L که یکی از پرکاربردترین آلیاژها در صنایع دریایی و سازه‌های فراساحلی است به دو صورت، جوشکاری مرطوب و جوشکاری در هوا، تولید می‌شود. از آن در خطوط لوله‌های زیرآبی فراوان استفاده می‌شود، به‌عنوان ماده اولیه نمونه‌ها با ضخامت ۹/۵ میلی‌متر انتخاب شد. ترکیب اجزا سازنده این فولاد در جدول ۱ آورده شده است [20].

جدول ۱) ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی فولاد X52-5L بر اساس استاندارد ISO3183 [21]

۲-۲- طراحی آزمون‌ها

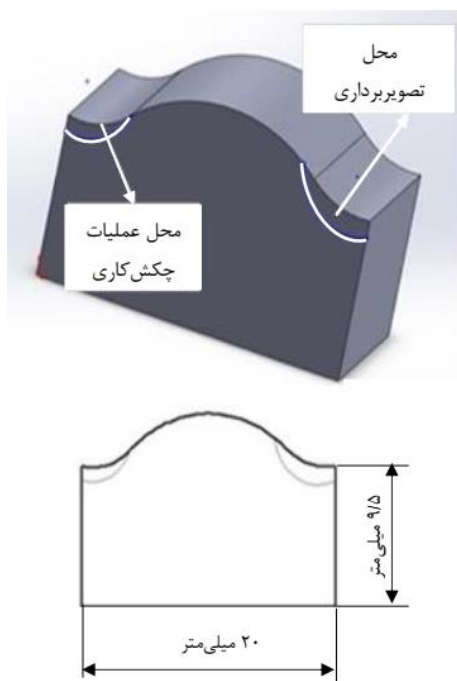
طراحی آزمایش‌ها به گونه‌ای انجام شد که ۴ دسته از نمونه‌ها تهیه شد و یک دسته برای به دست آوردن خواص مکانیکی ماده مورد استفاده قرار گرفت. یک دسته جوشکاری شده و سپس آزمون خستگی روی آن‌ها انجام گرفت. دسته سوم بعد از جوشکاری در هوا چکش‌کاری شد و سپس آزمون خستگی روی آن‌ها انجام گرفت و دسته چهارم پس از جوشکاری، در زیر آب چکش‌کاری شد و سپس آزمون خستگی روی آن‌ها انجام پذیرفت. از بین نمونه‌های اشاره شده، ۳ نمونه برای آزمون ریزسختی و ۳ نمونه برای تصویربرداری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نیز در نظر گرفته شد. و همچنین برای آزمون‌های جوشکاری بدون چکش‌کاری و جوشکاری همراه با چکش‌کاری در هوا و جوشکاری همراه با چکش‌کاری زیرآبی، هر کدام ۳ نمونه تهیه شد.

۲-۳- جوشکاری نمونه‌ها

برای آماده‌سازی نمونه‌ها برای چکش‌کاری باید ابتدا فرآیند جوشکاری روی آن‌ها انجام می‌گرفت. بر اساس استاندارد API 1104 [3]، الکتروود مورد استفاده برای این فولاد از استاندارد AWS E-7018 [22] 5-1، انتخاب شد که بر اساس توصیه استاندارد باید قبل از جوشکاری عملیات پیش‌گرم بر روی آن انجام می‌گرفت؛ لذا الکتروودها به مدت ۲ ساعت در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد پیش‌گرم شدند. طبق استاندارد AWS - D1.1 که در

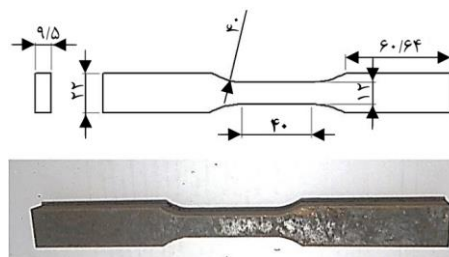


شکل ۳ الف- نمونه‌های برش کاری توسط وایبرکات برای متالوگرافی ب- نمونه‌های برش کاری شده توسط وایبرکات برای آزمون ریزسختی سنجی



شکل ۴ ابعاد و شماتیک محل انجام عملیات چکش کاری بر روی نمونه‌ها و محل دقیق تصویربرداری SEM روی سطح

آزمون ریزسختی نمونه‌های جوشکاری شده همراه با چکش کاری فراصوتی و بدون چکش کاری طبق استاندارد ASTM-E384 انجام پذیرفت و در هر نمونه در ۵ نقطه، سختی سنجی به عمل آمد که در اعماق مختلف از سطح نمونه‌ها قرار داشتند. برای انجام این آزمون از دستگاه HV-1000Z ساخت شرکت PACE Technologies استفاده گردید. در این آزمون نیروی اعمالی ۱۰ گرم نیرو بوده است و زمان اعمال این نیرو ۱۵ ثانیه در نظر گرفته شد. به منظور به دست آوردن مقدار ریزسختی با توجه به عمق محل فرو رفتگی و از جدول استاندارد تبدیل سختی یعنی ASTM E140 مقدار ریزسختی بر



شکل ۵ ابعاد نمونه‌های آزمون خستگی و نمونه آزمون خستگی برش داده شده توسط واترجت

به منظور برش نمونه‌های مورد آزمایش نیز از دستگاه واترجت CNC ساخت شرکت RADOX دارای ذرات ساینده (AWJ) استفاده شد. در دستگاه مذکور از ذرات اکسید سیلیس استفاده گردید. برای آزمون‌های خستگی سه بازه تنش اعمالی در نظر گرفته شده است و بازه‌های انتخاب شده دارای تنش بالایی بوده و نزدیک به تنش تسلیم هستند تا بتوان در مقادیر سیکل کمتر به بررسی عمر خستگی و تفاوت عمر خستگی نمونه‌ها در حالت‌های قبل و بعد از عملیات چکش کاری پرداخت. آزمون خستگی توسط دستگاه سرو هیدرولیک سری ۸۵۰۲ از شرکت INSTRON ساخت کشور آمریکا انجام پذیرفت. نیروهای اعمال شده برای آزمون خستگی بر اساس استحکام کششی به دست آمده که برابر با ۴۸۲ مگاپاسکال می‌باشد و بازه‌های تنش اعمالی به نمونه‌ها بر اساس جدول ۲ انتخاب شدند.

به منظور تهیه نمونه‌های تصویربرداری متالوگرافی و همچنین نمونه‌های ریزسختی سنجی نشان داده شده در شکل ۳، از روش وایبرکات مصرفی و رفت و برگشتی استفاده شد. برای برش از دستگاه وایبرکات Charmlles سیم مصرفی، ساخت کشور سوئیس استفاده شد.

نمونه‌های برش کاری شده به وسیله وایبرکات جهت تصویربرداری متالوگرافی که در شکل ۴ ابعاد و همچنین محل تصویربرداری از آن‌ها نشان داده شده است، آماده شده و سپس با استفاده از ورق‌های سنباده سیلیکون کاربیدی از مش ۲۰۰ دانه تا مش ۳۰۰۰ دانه کاملاً سنباده زنی شد و توسط دستگاه و محلول پودر AL203، عملیات پولیش زنی انجام گرفت. محلول مناسب اچ برای فولاد API - X52 - 5L بر اساس استاندارد ASTM - E407 محلول نایتال ۲٪ انتخاب شد و روش اچ انتخابی برای این نمونه‌ها روش میکرو اچ شیمیایی و غوطه‌وری در نظر گرفته شد. میکروسکوپ الکترونی مورد استفاده در این تحقیق از مدل VEGA// - TESCAN - LMU است.

جدول ۲ بازه تنش انتخاب شده برای آزمون‌های خستگی

سری آزمون‌های خستگی	بازه تنش خستگی	مقدار تنش (MPa)
اول	$0.9 \sigma_y$	۴۳۸/۸
دوم	$0.95 \sigma_y$	۴۵۷/۹
سوم	$1 \sigma_y$	۴۸۲

اساس معیار ویکرز نیز استخراج شد. نمونه‌های مورد استفاده برای این آزمون بر اساس استاندارد ASTM-E384 توسط وایرکات برش داده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج آزمون کشش نمونه‌ها

نمونه‌های جوشکاری شده از فولاد X52-5L به تعداد یک عدد برای هر کدام از شرایط محیطی جهت آزمون کشش و به دست آوردن خواص مکانیکی مورد نیاز نمونه‌ها استفاده شد. آزمون کشش با استفاده از استاندارد ASTM E08 انجام گرفت و بر روی نمونه‌های جوشکاری شده در حالت‌های قبل و بعد از عملیات چکش‌کاری فراصوتی انجام گرفت که نتایج حاصل از آن در شکل ۵ ارائه شده است.

همان طور که نتایج شکل ۵ نشان می‌دهد، در نمونه‌های چکش‌کاری شده در آب، افزایش طول قبل از شکست، کاهش یافته و نسبت به نمونه‌های جوشکاری شده بدون عملیات از ۳۹٪ به ۳۴٪ کاهش یافته است که این امر به پدیده کار سختی انجام شده بر روی این فلز مرتبط است و در حقیقت چکش‌کاری فراصوتی نوعی کار سختی ایجاد می‌کند که افزایش طول تا نقطه شکست را کاهش می‌دهد و مقایسه این مقدار با کرنش تا نقطه شکست نمونه‌های چکش‌کاری شده در هوا نشان می‌دهد در این نمونه‌ها نیز تا مقدار ۳۳٪ کاهش یافته است. مقایسه فوق نشان می‌دهد که انجام عملیات چکش‌کاری در آب، چکش‌کاری را تا حدودی مشکل کرده و کرنش سختی کمتری نسبت به چکش‌کاری در هوا به وجود می‌آید.

معیار دیگر برای مقایسه در نمودار شکل ۵، استحکام تسلیم و استحکام نهایی است که به مقایسه ۳ نمودار کاهش جزئی حدوداً به اندازه ۱۰ مگاپاسکال در استحکام نهایی و کاهش ۳۰ مگاپاسکال در استحکام تسلیم مشاهده می‌شود، در تبیین و توجیه این کاهش لازم است به سه سازوکار شناخته شده در این فرآیند اشاره کرد که انرژی اعمال شده به فلز از طریق ضربه زننده فراصوتی به

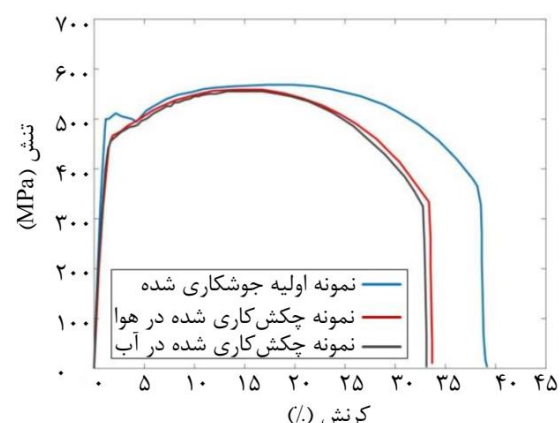
سه صورت (۱) تغییر شکل پلاستیکی موضعی (۲) حرکت نابجایی‌ها (۳) گرمایش موضعی، مصرف می‌شود و این سه سازوکار بیان شده سبب می‌شود که اگر به نمونه در حال کشش نیز ارتعاش‌های فراصوتی اعمال شود، استحکام نهایی و تسلیم کاهش شدیدی از خود نشان دهند اما در این عملیات که در حقیقت شبیه به انجام چکش‌کاری بعد از آزمون کشش نمونه‌ها است، سازوکار تغییرشکل پلاستیکی موضعی بیشتر از بقیه سازوکارهای بیان شده موثر است. در این مورد نیز مقایسه چکش‌کاری فراصوتی در محیط آب و هوا، نشان می‌دهد چکش‌کاری در هوا با بازدهی بیشتری عمل کرده و هر دو سازوکار بیان شده یعنی سازوکار نابجایی نابجایی‌ها و تغییر شکل پلاستیکی موضعی، سبب کاهش بیشتر مقادیر استحکام نهایی و تسلیم نسبت به نمونه چکش‌کاری شده در آب شده است.

۳-۲- نتایج آزمون خستگی

به منظور بررسی دقیق مقطع شکست و تشخیص نوع شکست سه نمونه از سه نوع ۱- بدون چکش‌کاری ۲- چکش‌کاری شده در هوا ۳- چکش‌کاری شده در زیر آب تحت بارگذاری $433/8$ مگاپاسکال معادل $0.9S_y$ قرار گرفته و تصاویر گرفته شده بعد از شکست باهم مقایسه شده‌اند. شکل ۶، مقطع شکست در مقاطع نمونه‌ها را برای حالت‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۶-الف نشان داده شده است نوع شکست در قطعه بدون چکش‌کاری از نوع شکست ترد و شکست خستگی است که به خوبی در آن محل اشاعه ترک و همچنین محل گسیختگی ناگهانی قابل مشاهده است و در فلز پایه اتفاق نیفتاده است. شکل ۶-ب قطعه چکش‌کاری شده در هوا و شکل ۶-ج قطعه چکش‌کاری شده در زیر آب را نشان می‌دهند که در آن‌ها شکست بافاصله یک سانتی‌متری از خط جوش و بر اثر نازک شدن سطح مقطع به علت نیروهای کششی به وجود آمده است و انتقال محل شکست نمونه از درز جوش به فلز پایه بیانگر تقویت محل درز جوش است.



شکل ۶ الف- مقطع شکست در قطعه بدون چکش‌کاری ب- مقطع شکست در قطعه با چکش‌کاری در هوا ج- مقطع شکست در قطعه با چکش‌کاری در زیر آب



شکل ۵ نمودار تنش - کرنش فولاد X52-5L در شرایط مختلف آزمایش

جدول ۴) جدول بهبود عمر خستگی در نمونه‌های چکش کاری شده در هوا و زیرآب نسبت به نمونه‌های چکش کاری نشده

تنش اعمالی (MPa)	بهبود عمر خستگی نمونه‌های چکش کاری در هوا (درصد)	بهبود عمر خستگی نمونه‌های چکش کاری زیرآبی (درصد)
۴۳۸/۸	۱۱	۷/۳۶
۴۵۷/۹	۸/۳	۱۲
۴۸۲	۱۲	۵۶
-	متوسط افزایش عمر	متوسط افزایش عمر
-	۱۰/۵	۲۵/۲

۳-۳- نتایج متالوگرافی

همچنین به منظور مشاهده ترک‌ها و نحوه تأثیر چکش کاری فراصوتی بر روی نمونه‌های چکش کاری شده در آب، هوا و چکش کاری نشده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی تصویربرداری متالوگرافی انجام گرفت. تصاویر ترک‌های حاصل شده در تصاویر ۸ تا ۱۰ نشان داده شده است. قابل ذکر است که چون تهیه نمونه و عکس‌برداری SEM جزء آزمون‌های مخرب است لذا امکان چکش کاری همان موضع عکس‌برداری بعد از تهیه عکس‌های SEM وجود نداشت اما نمونه‌های آزمون از انتهای قطعه کار مشخص در حالت‌های قبل و بعد از چکش کاری تهیه شد تا کمترین تغییر در تکرارپذیری ایجاد شود و در عکس‌های تهیه شده نیز در تمامی موضع‌های انتخاب شده نتایج یکسانی مشاهده شد که مواردی انتخاب و در شکل‌ها آورده شده است. تصاویر ارائه شده از ترک‌های قابل مشاهده در نمونه‌های انتخابی حاکی از آن است که چکش کاری فراصوتی باعث ایجاد تغییر شکل در ترک‌های سطحی موجود در قطعه شده و موجب بسته شدن دهانه بعضی از ترک‌ها و یا فشردن دهانه‌های ترک بر روی هم و هم‌سطحی آن‌ها می‌شود. همچنین، تأثیر چکش کاری فراصوتی بر فشرده شدن لایه‌های دارای تخلخل هوایی در سطح که در حین جوشکاری به وجود آمده‌اند و همگن شدن سطح در تصاویر ارائه شده، قابل مشاهده است. شکل ۸ ترک‌های مشاهده شده در قطعه بدون چکش کاری را نشان می‌دهد همچنین در شکل ۸-الف لایه‌های دارای تخلخل هوا که موجب ایجاد تمرکز تنش ناهم‌واری سطح می‌شوند دیده می‌شود؛ درحالی‌که در شکل ۹ که مربوط به قطعه چکش کاری شده در هوا است و همچنین در شکل ۱۰ که مربوط به قطعه چکش کاری شده در زیرآب است، این لایه‌ها دیده نمی‌شوند و روی هم فشرده شده‌اند. در شکل ۱۰ تأثیر چکش کاری فراصوتی بر تغییر شکل ترک‌های سطحی و بسته شدن دهانه ترک‌ها به وضوح دیده می‌شود.

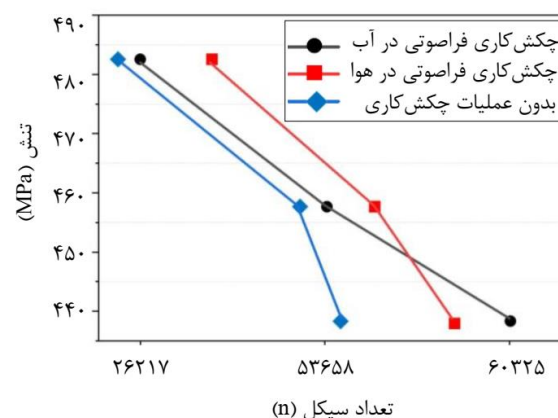
۳-۴- نتایج آزمون ریزسختی سنجی

در جدول ۵ مقدار ریزسختی اندازه‌گیری شده در سطح قطعه نشان داده شده و همچنین در شکل ۱۱ نیز ریزسختی اندازه‌گیری شده در فواصل مختلف از درز جوش (محل اتصال فلز پایه به فلز جوش)، ارائه شده است. نتایج حاصل از ریزسختی سنجی نشان می‌دهند که با اعمال چکش کاری فراصوتی، سطح قطعه تا چه

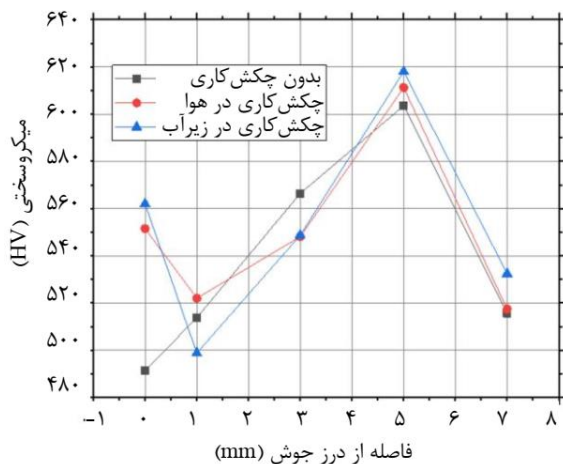
نتایج حاصل از آزمون خستگی در جدول ۳ بر اساس تعداد چرخه‌های کاری نشان داده شده است. آن‌گونه که در جدول قابل مشاهده است، متوسط عمر نمونه‌های جوشکاری شده بدون عملیات چکش کاری، ۴۲۳۸۳ دور بوده و متوسط عمر خستگی در نمونه‌های چکش کاری شده در زیرآب به ۶۰۰۸۶ دور افزایش یافته که معادل با ۲۵/۲ درصد افزایش است و در نمونه‌های چکش کاری شده در هوا متوسط عمر خستگی نمونه‌ها به ۴۶۷۳۳ دور افزایش یافته است که معادل با افزایش ۱۰/۵ درصد افزایش عمر خستگی است. در توجیه نتایج به دست آمده یکی از دلایل می‌تواند نقش دما در ریزدانه شدن باشد که تحقیق‌های زیادی این فرضیه را مطرح کرده‌اند و درستی این فرضیه در این ماده نیاز به بررسی دقیق‌تر دارد و پدیده دیگری که نتایج عکس‌برداری SEM نیز بر آن صحنه می‌گذارد این است که در چکش کاری زیرآبی نسبت به چکش کاری در هوا، ریزترک‌ها بیشتر ترمیم و بسته می‌شوند و این عامل نقش مهمی در افزایش عمر خستگی فلز ایفا می‌کند و همچنین نمودارهای S-N برای هر کدام از نمونه‌های چکش کاری در هوا، چکش کاری زیرآب و بدون چکش کاری بر اساس داده‌های جدول قابل رسم است که در شکل ۷ مشاهده می‌شود. همچنین جدول ۴، درصد بهبود و افزایش عمر خستگی را برای تنش‌های مختلف اعمالی نشان می‌دهد.

جدول ۳) نتایج حاصل از آزمون خستگی برای نمونه‌های با چکش کاری زیرآب، هوا و بدون چکش کاری

تنش اعمالی (MPa)	عمر خستگی نمونه‌های چکش کاری شده در هوا	عمر خستگی نمونه‌های چکش کاری شده در زیرآب	عمر خستگی نمونه‌های چکش کاری نشده
۴۳۸/۸	۶۰۳۲۵	۵۸۲۵۱	۵۴۲۵۴
۴۵۷/۹	۵۳۶۵۸	۵۵۴۲۵	۴۹۵۳۸
۴۸۲	۲۶۲۱۷	۳۶۵۸۲	۲۳۳۵۸
متوسط عمر	۴۶۷۳۳	۵۰۰۸۳	۴۲۳۸۳



شکل ۷) نمودارهای خستگی تنش - عمر برای نمونه‌های چکش کاری نشده و چکش کاری شده در زیرآب و هوا

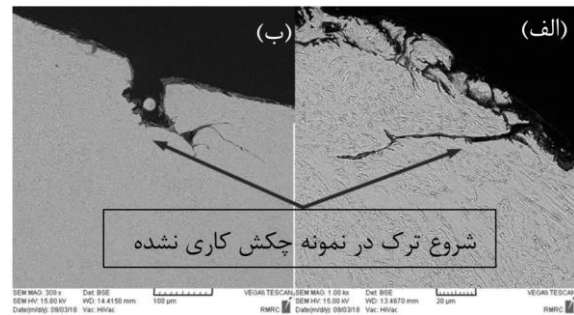


شکل ۱۱) منحنی‌های ریزسختی برای نمونه‌های چکش کاری نشده، چکش کاری شده در هوا و چکش کاری شده زیر آب

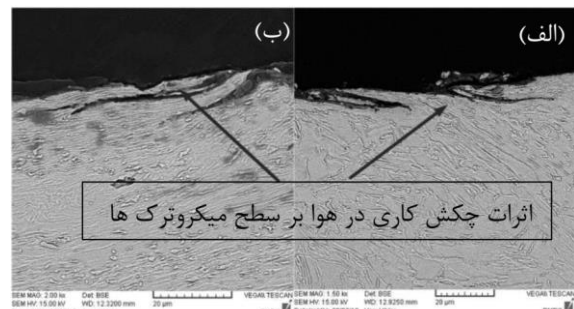
فوق یکی از دلایل این افزایش سختی، ضربات پی‌درپی فراصوتی و القای تنش‌های پسماند فشاری به سطح نمونه‌هاست و همچنین یک نظریه دیگر نیز که اخیراً در پژوهش‌ها به آن اشاره شده است ممکن است این باشد که با کاهش دما و با رفتن به دماهای پایین‌تر از دمای محیط، ضربه‌های مکانیکی می‌تواند مقداری جزئی مارتنزیت ناشی از کرنش نیز در سطح نمونه‌ها ایجاد کند [23] که برای تصدیق این امر باید از آزمون‌های XRD کمک گرفته شود.

در شکل ۱۱، بافاصله گرفتن از محل درز جوش و در فاصله ۵ میلی‌متری به منطقه HAZ (Heat Affected Zone) می‌رسیم که ذاتاً دارای سختی بالا و چقرمگی پایینی است و در طرفین ناحیه متأثر از حرارت، سختی کمتر از این ناحیه است که در این نمودار نیز مشهود است و تنها نقطه‌ای که سختی به دلیل اعمال چکش کاری فراصوتی، سختی آن افزایش یافته است روی درز جوش است و تفاوت سختی بین سه نمودار در فواصل یکسان از محل درز جوش معنادار نبوده و نمی‌تواند ارتباطی به نوع عملیات استفاده شده داشته باشد.

در توجیه نتایج به دست آمده و افزایش سختی اندازه‌گیری شده نسبت به نمونه‌های بدون چکش کاری، می‌توان به این مورد استناد کرد که از بین دو سازوکار مطرح درباره اثرگذاری فرآیند چکش کاری یعنی گرمایش موضعی و تغییر شکل پلاستیک سطحی، سازوکار تغییر شکل پلاستیک سطحی بیشتر اثرگذار بوده و در عکس‌های متالوگرافی نیز این اثر با بسته شدن ترک‌های ریز سطحی خود را نشان داد اما سازوکار گرمایش موضعی به دلیل پایین بودن دمای آب نسبت به هوا و بالا بودن نرخ کاهش دما، از اثرگذاری کمتری برخوردار است. با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل ۱۱، افزایش سختی در نمونه‌های چکش کاری شده در هوا نسبت به نمونه‌های چکش کاری شده در آب بیشتر است و دلیل این امر نیز این است که در نمونه‌های چکش کاری شده در هوا، هر دو سازوکار گرمایش



شکل ۸) تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی نشان‌دهنده ترک در نمونه چکش کاری نشده با بزرگنمایی (الف) ۳۰۰ و (ب) ۱۰۰۰ برابر



شکل ۹) (الف) - ترک در نمونه چکش کاری نشده (ب) - تأثیر چکش کاری فراصوتی در هوا بر روی ترک سطحی



شکل ۱۰) (الف) تصاویر تأثیر چکش کاری در زیر آب بر روی ترک سطحی

میزان بر اثر ضربات چکش کاری سخت‌تر شده است. همان طور که مشاهده می‌شود تأثیر چکش کاری فراصوتی در هوا و در آب در مورد سختی سطح نیز مانند خستگی تأثیر مشابهی دارند.

آن گونه که در شکل ۱۱، دیده می‌شود در فاصله صفر از درز جوش، یعنی دقیقاً در محل اتصال فلز پایه به فلز جوش که محل دقیق عملیات چکش کاری نیز است، عملیات چکش کاری در هوا، سختی را نسبت به نمونه‌های بدون چکش کاری به مقدار ۱۲ درصد افزایش داده و در نمونه‌های چکش کاری شده در زیر آب سختی به مراتب بیشتر افزایش یافته است و به ۱۴ درصد رسیده است. در مورد اثر

جدول ۵) مقدار ریزسختی متوسط به دست آمده از نمونه‌ها در سطح قطعه

نوع نمونه	چکش کاری شده زیر آب	چکش کاری شده در هوا	چکش کاری نشده
ریزسختی سطح (HV)	۵۶۲	۵۵۱/۵	۴۹۳/۱

تشکر و قدردانی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.
تأییدیه اخلاقی: ما نویسندگان مقاله با اعلام موافقت خود مبنی بر ارسال این مقاله به نشریه مهندسی مکانیک مدرس تعهد می‌نماییم که این مقاله در زمان ارسال برای این نشریه، در هیچ نشریه ایرانی یا غیر ایرانی در حال بررسی نبوده و تا تعیین تکلیف در این نشریه برای هیچ نشریه ایرانی یا غیر ایرانی دیگری ارسال نخواهد شد و آقای مقصود شلودنی به عنوان نویسنده رابط معرفی نموده و وکالت تام ایشان در کلیه امور مرتبط با این مقاله (بویژه انجام اصلاحات احتمالی) نزد نشریه مهندسی مکانیک را می‌پذیریم.

تعارض منافع: این مقاله از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای مصطفی امیرمیران استخراج شده است و استاد راهنمای پایان نامه آقای مقصود شلودنی می باشد.

سهم نویسندگان: مقصود شلودنی ۵۰ درصد، مصطفی امیرمیران ۵۰ درصد.

منابع مالی: منابع مادی این پژوهش از محل گرنت‌های پژوهشی دانشگاه تبریز تامین شده است.

منابع

- 1- Gerwick C. Construction of marine and offshore structures. CRC press; 2002.
- 2- Ahmadi H, Lotfollahi-Yaghin MA, Aminfar MH. Distribution of weld toe stress concentration factors on the central brace in two-planar CHS DKT-connections of steel offshore structures. Thin-Walled Structures. 2011;49(10):1225-36.
- 3- American Petroleum Institute, API 1104, in Standard for Welding Pipeline and Related Facilities. American Petroleum Institute. 2001:1-79.
- 4- Malaki M, Ding H. A review of ultrasonic peening treatment. Materials & Design. 2015;87:1072-86.
- 5- Abdullah A, Malaki M, Eskandari A. Strength enhancement of the welded structures by ultrasonic peening. Materials & Design. 2012;38:7-18.
- 6- Costa N, Machado N, Silva FS. A new method for prediction of nodular cast iron fatigue limit. International Journal of Fatigue. 2010;32(7):988-95.
- 7- Soyama H. Comparison between Shot Peening, Cavitation Peening, and Laser Peening by Observation of Crack Initiation and Crack Growth in Stainless Steel. Metals. 2020;10(1):63.
- 8- Statnikov E. Physics and mechanism of ultrasonic impact treatment. IIW Document. 2004;13:2004-04.
- 9- Galtier A, Statnikov ES. The influence of ultrasonic impact treatment on fatigue behaviour of welded joints in high-strength steel. Welding in the World. 2004;48(5):61-6.
- 10- An X, Rodopoulos CA, Statnikov ES, Vitazev VN, Korolkov OV. Study of the surface nanocrystallization induced by the esonix ultrasonic impact treatment on the near-surface of 2024-T351 aluminum alloy. Journal of materials Engineering and performance. 2006;15(3):355-64.

موضعی و تغییر شکل پلاستیک سطحی اثرگذار بوده و بنابراین تغییر شکل پلاستیکی سطحی بیشتر روی می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله که از روش چکش کاری فراصوتی برای افزایش عمر خستگی اتصالات جوشی در محیط زیر آب استفاده شد نتیجه‌گیری‌های زیر به دست آمد که حاکی از اثرگذاری این عملیات در سازه‌های مستقر در زیر آب است.

چکش کاری فراصوتی مقاومت به خستگی فلز جوش را افزایش داد و درز جوش را تقویت کرد به طوری که در نمونه‌های چکش کاری شده، محل شکست نمونه در آزمون کشش از فلز پایه بوده است درحالی‌که بدون عملیات چکش کاری از محل فلز جوش و یا درز جوش شکست رخ داده است.

متوسط عمر خستگی در نمونه‌های چکش کاری شده در زیر آب حدوداً معادل با ۲۵/۲ درصد افزایش داشته است درحالی‌که در نمونه‌های چکش کاری شده در هوا متوسط عمر خستگی نمونه‌ها حدوداً برابر با ۱۰/۵ درصد افزایش داشته است که این مورد نشان‌دهنده قابلیت استفاده از چکش کاری فراصوتی در زیر آب و برای سازه‌های زیرآبی به منظور افزایش عمر خستگی است.

با تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی تأثیر چکش کاری فراصوتی بر روی بسته شدن و هموار شدن ترک‌های سطحی و همچنین پایین آمدن تمرکز تنش مشخص شد و تصاویر به دست آمده نشان داد ترک‌های ریز سطحی در چکش کاری زیرآبی به مراتب بیشتر از چکش کاری در هوا بسته‌تر و هموارتر شده‌اند که این امر می‌تواند دلیلی برای افزایش بیشتر عمر خستگی این نمونه‌ها باشد

در نمونه‌های چکش کاری شده در آب، افزایش طول نمونه‌ها قبل از شکست، کاهش یافته و نسبت به نمونه‌های جوشکاری شده از ۳۹٪ به ۳۴٪ کاهش یافته است که این امر به پدید کار سختی ناشی از عملیات چکش کاری مربوط می‌شود درحالی‌که افزایش طول نمونه در آزمون شکست برای نمونه‌های چکش کاری شده در هوا تا مقدار ۳۳٪ کاهش یافته است و این نتایج بیانگر آن است که در چکش کاری در هوا تغییر شکل پلاستیکی بیشتری رخ داده و کار سختی بیشتر است.

آزمون ریزسختی سنجی برای مقایسه سختی سطح چکش کاری شده در نمونه‌ها و مقایسه آن با نمونه‌های چکش کاری نشده انجام گرفت که مشخص شد در نمونه‌های چکش کاری شده در زیر آب ۱۴٪ و در نمونه‌های چکش کاری شده در هوا نیز ۱۲٪ سختی سطح قطعه در محل درز جوش افزایش داشته است.

عملیات چکش کاری در سازه‌های مستقر در زیر آب نیز اثرگذار بوده و سختی و عمر خستگی را افزایش داد اما مقدار این افزایش از بازدهی عملیات در چکش کاری در هوا کمتر است که دلیل این امر به سازوکار عمل این عملیات در هوا و زیر آب مربوط می‌شود.

- 11- Wang T, Wang D, Huo L, Zhang Y. Discussion on fatigue design of welded joints enhanced by ultrasonic peening treatment (UPT). *International Journal of Fatigue*. 2009;31(4):644-50.
- 12- Deguchi T, Mouri M, Hara J, Kano D, Shimoda T, Inamura F, Fukuoka T, Koshio K. Fatigue strength improvement for ship structures by Ultrasonic Peening. *Journal of marine science and technology*. 2012;17(3):360-9.
- 13- Fan Y, Zhao X, Liu Y. Research on fatigue behavior of the flash welded joint enhanced by ultrasonic peening treatment. *Materials & Design*. 2016;94:515-22.
- 14- Liu S, Tian ZJ, Gao XS, Lv F. Effect of ultrasonic peening on Microstructure and properties of laser rapid forming GH4169. *Optik*. 2018;172:443-8.
- 15- Fereidooni B, Morovvati MR, Sadough-Vanini SA. Influence of severe plastic deformation on fatigue life applied by ultrasonic peening in welded pipe 316 Stainless Steel joints in corrosive environment. *Ultrasonics*. 2018;88:137-47.
- 16- Nový F, Petrů M, Trško L, Jambor M, Bokůvka O, Lago J. Fatigue properties of welded Strenx 700 MC HSLA steel after ultrasonic impact treatment application. *Materials Today: Proceedings*. 2020;32:174-8.
- 17- Sidorov MM, Golikov NI, Saraev YN. Redistribution of residual stresses in girth weld of a pipe of strength class K60 after ultrasonic impact treatment. *Procedia Structural Integrity*. 2020;30:149-53.
- 18- Yang B, Tan C, Zhao Y, Wu L, Chen B, Song X, Zhao H, Feng J. Influence of ultrasonic peening on microstructure and surface performance of laser-arc hybrid welded 5A06 aluminum alloy joint. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(5):9576-87.
- 19- Liang H, Kan Y, Chen H, Zhan R, Liu X, Wang D. Effect of cutting process on the residual stress and fatigue life of the welded joint treated by ultrasonic impact treatment. *International Journal of Fatigue*. 2021;143:105998.
- 20- Souza RC, Pereira LR, Starling LM, Ponciano JA, HS A. The influence of microstructure and heat treatment of API X52 carbon steel on hydrogen diffusion. 2016.
- 21- International Standard Organaization, ISO 3183, in Petroleum and natural gas industries Steel pipe for pipeline transportation systems, F. edition, Editor. 2019;10:1-30.
- 22- American Welding Society Committee on Filler Metal. Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding. American Welding Society; 1991.
- 23- Mu W, Rahaman M, Rios FL, Odqvist J, Hedström P. Predicting strain-induced martensite in austenitic steels by combining physical modelling and machine learning. *Materials & Design*. 2021;197:109199.