

Investigation of the effect of ultrasonic shock on corrosion behavior of stainless steel 316L

Nader Bolhassani ^a, Alireza NezamAbadi ^{b*}

^a MSc. student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Arak Branch, Arak, Iran.

^b Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Arak Branch, Arak, Iran

Original Article

Use your device to scan and read the article online



Citation: Bolhassani N, NezamAbadi A. Investigation of the effect of ultrasonic shock on corrosion behavior of stainless steel 316L. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2022;2(2): 220-235.

 <https://10.52547/masm.2.2.220>

KEYWORDS

Corrosion,
Ultrasonic waves,
Residual stress,
De- tensioning.

ABSTRACT

Refineries and petrochemical industries, due to the presence of all-metal equipment and acidic environment, have high corrosion. This study investigates the effect of ultrasonic shock on the corrosion behavior of 316 stainless steels in order to the increasing use of stainless steels in these industries. The aim of this study was to investigate the effect of ultrasonic stress relief method on increasing the strength of parts in corrosive environments. It should be noted that the residual stress in the samples is created by welding. In this study, first the considered sample is De-tensioning using ultrasonic vibration at a frequency of 20 kHz, then the obtained results are compared with the results of samples without De-tensioning operation and also thermal De-tensioning operation. XRD method used to measure the residual stress. The obtained results show that in ultrasonic method and heat treatment, the amount of residual stress is reduced by 58.7% and 54.3%, respectively. It has also been observed that the use of ultrasonic waves has increased the life of the sample in a corrosive environment.

Extended Abstract

1. Introduction

Stress corrosion was first identified in 1965 in the United States during the failure analysis of a gas transmission pipeline. SCC indicates cracking caused by the simultaneous effect of corrosion and stress. The stresses in the parts are applied or residual stresses. Cold forming and deformation, welding, heat treatment and machining are among the factors that cause residual stress. In most cases, the importance and magnitude of these tensions are ignored. This type of stress causes small cracks inside the parts. Under the structure, these cracks can have intergranular or grain boundary morphology. In terms of macro cracks, SCC has a fragile appearance and factors such as temperature, pressure, concentration, pH, viscosity, part material and fluid flow are among the environmental parameters that affect the crack growth rate [1]. This type of corrosion is one of the most common types of corrosion in the industry, in which, in addition to the corrosiveness of the environment, the mechanical stress factor is also a necessary condition for its occurrence. For many years, it has been believed that for the occurrence of stress cracking, the simultaneous presence of three factors: a corrosive environment, the presence of metal with an alloy sensitive to this type of cracking, and the presence of tensile stress on the metal is required [2]. For example, hot aqueous chloride solution can create cracks in stainless steel at a considerable speed, while they do not have such an effect on carbon steel, aluminum and other non-ferrous alloys. In other words, any corrosive environment is capable of creating cracks in a limited number of metals and alloys [3].

There are different methods for stress relief of parts, the most important of which are: natural stress relief, thermal stress relief, vibration stress relief, overloading, shot peening, and stress relief with ultrasonic blows. In this research, two methods of stress relief with ultrasonic and thermal waves are investigated.

2. Materials and methods

The validity of the results of a research is influenced by the validity of the method chosen for the research. The methods of a research are actually tools to achieve reality. Since the purpose of this research is to investigate the effect of ultrasonic

* Corresponding author. Tel.: 0913109407; Fax: 03145227135

E-mail address: alireza.nezamabadi@gmail.com

DOI: <https://10.52547/masm.2.2.220>.

Received: August 6, 2022; Received in revised form: August 20, 2022; Accepted: September 11, 2022.

2022 Published by Arak University Press. All rights reserved.



waves on the corrosion behavior of L316 stainless steel, initially welding method was used to create residual stress. Six samples of pipes welded under the same conditions have been selected. The main purpose of this research is to investigate the effectiveness of the ultrasonic stress relief method and to prevent stress corrosion in a corrosive environment. For this purpose, two samples were subjected to ultrasonic stress relief and thermal stress relief method was used for comparison. Also, a mode without any operation is considered. The residual stress of all six parts has been measured using the XRD method.

300 series stainless steels, especially 316 and L316, which are widely used in industry and environments with acidic properties, especially sulfuric acid solutions, were used to select the samples. Stainless steels have an iron base and contain at least 12 percent chromium, which can be as high as 30 percent.

The samples used in this research are 2-inch tubes with a thickness of 3.4 mm made of L316 stainless steel, prepared according to the ISO 7S39-8 standard. Welding method is used to create residual stress. Six pipe samples that were welded under the same conditions and selected. It should be noted that tungsten electrode and neutral gas method was used for welding. In this process, different electrodes are used, such as pure tungsten, tungsten with thorium, and tungsten with zirconium. Also, the choice of power source and type of shielding gas is highly effective on the depth of penetration and the shape of the weld cross-section. In the following, Figure 1 shows the preparation of samples for welding operations. given. The type of connection used to prepare the samples is chamfer type with an angle of 60 degrees, which is shown in Figure 2.



Figure 1. Preparation of samples for welding



Figure 2. The sample type with a 60 degree chamfer

3. Numerical results

In this section, the results obtained from the samples are analyzed and the results are compared with each other. In order to determine the effectiveness of ultrasonic and thermal stress relief operations, a reference was needed for comparison, and due to time and facilities limitations, it was not possible to conduct XRD tests in large numbers. Therefore, by controlling the welding conditions, two samples without stress relief are considered as reference samples. The results of the XRD test of samples without stress removal are shown in Figure 3.

According to the figure 3, it can be seen that the residual stress in both pieces was almost the same, which indicates that the preparation conditions for the samples were the same.

In order to investigate the thermal stress relief, two samples have been selected in the same conditions and the residual stress in the samples has been determined using XRD test. The results of the samples that were stressed by the heat treatment method are given in Figure 4. According to the figure, it can be seen that the amount of residual stress in the first and second samples was almost the same.

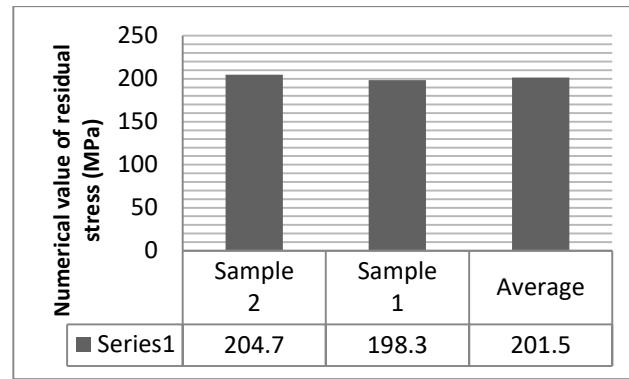


Figure 3. XRD test results of samples without residual stress

By comparing the results of residual stress in the heat treatment method and without heat treatment, it can be seen that the average residual stress has decreased by 54%. The results of the XRD test of the stressed samples using the ultrasonic method are shown in Figure 5. According to the figure, it can be seen that the amount of residual stress has decreased by 58% compared to the sample without stress relief operation. Also, the comparison of the results of stress-relieved samples with heat treatment and the use of ultrasonic waves shows that ultrasonic waves have performed better and the amount of residual stress has decreased by about 4% compared to the stress-relieved sample with heat treatment.

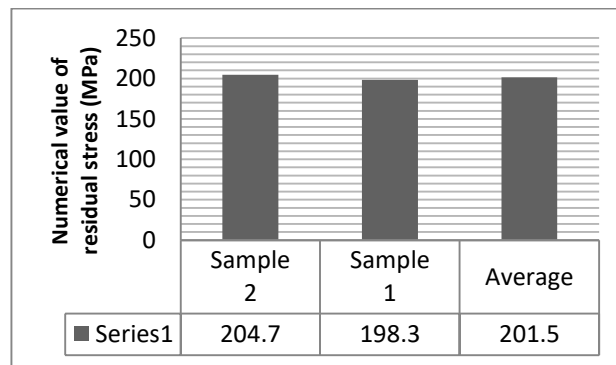


Figure 4. The results of XRD test on samples with thermal stress relief operation

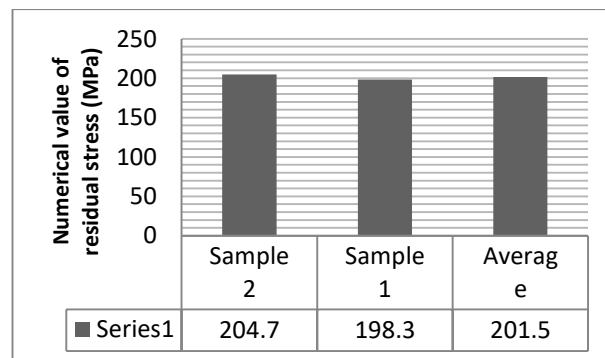


Figure 5. XRD test results of stress-relieved samples using ultrasonic waves

4. Conclusion

The aim of the study was to investigate the effect of ultrasonic waves on the corrosion behavior of L316 stainless steel. At first, welding method was used to create residual stress and six samples were prepared in the same conditions. Two samples are stressed by ultrasonic stressing method and the other two samples are de-stressed by heat treatment. The residual stress of all six pieces has been measured by XRD test. At the end, the resistance of the samples stressed by ultrasonic waves and without stress relief in corrosive environment has been compared.



بررسی اثر ضربات امواج اولتراسونیک بر رفتار خوردگی فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶

نادر بوالحسنی الف، علیرضا نظام آبادی ب*

الف دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک، ایران،
ب استادیار، گروه، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک، ایران.

چکیده	واژگان کلیدی
در صنعت پالایشگاه و پتروشیمی‌ها به دلیل وجود تجهیزات تمام فلزی و محیط اسیدی خوردگی تنش‌ی زیاد است با توجه به افزایش کاربرد فولادهای زنگ نزن در این صنایع در این پژوهش به بررسی اثر ضربات امواج اولتراسونیک بر رفتار خوردگی فولاد زنگ نزن L316(S.S316L) می‌پردازیم. هدف از این پژوهش بررسی تأثیر روش تنش‌زدایی اولتراسونیک بر افزایش مقاومت قطعات در محیط‌های خورنده است. لازم به ذکر است که، تنش پسماند در نمونه‌ها در اثر جوش کاری ایجاد شده است. در این پژوهش ابتدا نمونه مدنظر با استفاده از ارتعاش اولتراسونیک تحت فرکانس ۲۰ KHz تنش‌زدایی شده است، سپس نتایج به‌دست‌آمده با نتایج نمونه‌های بدون عملیات تنش‌زدایی و همچنین عملیات تنش‌زدایی حرارتی مقایسه شده است. شایان ذکر است که تنش پسماند با استفاده از روش ایکس آر دی اندازه‌گیری شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که، در روش اولتراسونیک و عملیات حرارتی مقدار تنش پسماند به ترتیب % ۵۸/۷ و % ۵۴/۳ کاهش یافته است. همچنین مشاهده شده است که، استفاده از روش امواج اولتراسونیک سبب افزایش طول عمر نمونه در محیط خورنده شده است.	خوردگی، امواج اولتراسونیک، تنش پسماند، تنش‌زدایی. تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۲۰

۱- مقدمه

خوردگی تنش‌ی برای اولین بار در سال ۱۹۶۵ در آمریکا به هنگام آنالیز شکست یک خط لوله انتقال گاز شناسایی شد. SCC^۱ بیانگر ترک خوردگی ناشی از تأثیر هم‌زمان خوردگی و تنش است. تنش‌ها در قطعات به دو صورت تنش‌های اعمالی و یا پسماند است. شکل‌دهی و تغییر شکل سرد، جوشکاری، عملیات حرارتی و ماشین‌کاری از جمله عوامل ایجاد تنش پسماند است. در اغلب موارد اهمیت و بزرگی این تنش‌ها نادیده انگاشته می‌شود. این نوع از تنش‌ها سبب ایجاد ترک‌های کوچک در داخل قطعات می‌شود. در زیر ساختار، این ترک‌ها می‌توانند از مورفولوژی^۲ میان دانه‌ای یا مرزدانه‌ای برخوردار باشند. در ابعاد ماکرو ترک‌های SCC ظاهری شکننده داشته و عواملی همچون دما، فشار، غلظت، PH، ویسکوزیته، جنس قطعه و جریان سیال از جمله پارامترهای محیطی هستند که بر نرخ رشد ترک‌ها تأثیر می‌گذارند [۱]. این نوع خوردگی جزو خوردگی‌های متداول در صنعت است که در آن علاوه بر قابلیت خوردگی محیط، فاکتور تنش مکانیکی نیز شرط لازم برای ایجاد است. از سال‌های دور عقیده بر آن است که برای وقوع ترک خوردگی ناشی از تنش حضور هم‌زمان سه عامل: محیط خورنده، وجود فلز با آلیاژ حساس به این نوع ترک و وجود تنش کششی بر روی فلز الزامی است [۲]. به‌عنوان مثال محلول آبی کلریدی داغ قادر است با سرعت

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۱۸۱۶۱۵۱۵۳

^۱ Stress Corrosion Cracking

^۲ Morphology

^۳ Macro

قابل توجهی در فولاد زنگ نزن ترک ایجاد نمایند، درحالی‌که بر روی فولادهای کربنی، آلومینیوم و دیگر آلیاژهای غیر آهنی چنین تأثیری ندارند. به عبارت دیگر هر محیط خورنده قادر به ایجاد ترک در تعداد محدودی از فلزات و آلیاژها را دارد [۳].

روش‌های مختلفی برای تنش‌زدایی از قطعات وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از: تنش‌زدایی طبیعی، تنش‌زدایی حرارتی، تنش‌زدایی ارتعاشی، اضافه باری، ساچمه کاری و تنش‌زدایی با ضربات اولتراسونیک^۴. در این پژوهش دو روش تنش‌زدایی با امواج اولتراسونیک و حرارتی بررسی می‌شود.

تنش‌زدایی حرارتی یکی از مهم‌ترین و شناخته‌شده‌ترین روش‌های آزادسازی تنش پسماند است. به‌طور کلی در این فرآیند قطعه حرارت داده می‌شود و دمای قطعه زیاد شده و مدت‌زمان مشخصی در دمای ثانویه نگهداری شده و سپس در زمان مشخص قطعه را به دمای اولیه خود بازمی‌گرداند [۴].

یکی دیگر از روش‌های تنش‌زدایی استفاده از امواج اولتراسونیک یا چکش کاری فراصوتی تنش‌زدایی با امواج اولتراسونیک که روش نوینی برای حذف تنش‌های کششی پسماند و ایجاد تنش فشاری در مناطق حساس به خستگی است [۵]. در این روش نوسان‌های هارمونیک تولیدی از مبدل اولتراسونیک باعث ارتعاش نوک ابزار می‌شود. برخورد مداد به قطعه سبب ایجاد گرما شده و به دلیل کوچک بودن نقطه ضربه دمای آن تا نقطه تغییر فاز بالا رفته و سپس دمای نقطه به‌سرعت کاهش یافته که این امر در صورت وجود کربن در فولاد، سبب ایجاد استتاله مارتنزیتی^۵ می‌شود و لایه مقاومی در برابر سایش ایجاد می‌کند. منطقه تغییر شکل پلاستیک به علت تنش پسماند فشاری زیاد مانع باز شدن و رشد ترک‌ها شده و حد دوام خستگی فلز را بهبود بخشیده و درنهایت لایه‌ای که تنش کششی در آن‌ها در حد مقبولی کاهش یافته است را ایجاد می‌کند. استفاده از این روش در قطعاتی که در حال تنش‌زدایی می‌باشند سبب بهبود کیفیت و افزایش قابلیت اطمینان می‌شود.

در اوایل دهه ۷۰، استانیکو روش تنش‌گیری اولتراسونیک را پیشنهاد کرد. این روش شامل سوزن لغزانی بود که در راستای محوری حرکت کرده و باعث اعمال ضربه قوی به سطح مورد عمل شده که در نتیجه آن یک تغییر شکل پلاستیک در قطعه ایجاد می‌گردید [۶]. والکر و همکارانش تنش‌های پسماند جوشی را با تنش‌گیری ارتعاشی کاهش داده و نشان دادند که در اثر تنش‌گیری ارتعاشی، تنش‌های پسماند حداکثر ۳۰ درصد کاهش می‌یابد. در این پژوهش از فرکانس رزونانس ۲۵ هرتز استفاده شده است [۷]. آوکی با استفاده از ارتعاشات اولتراسونیک در فرکانس ۱۷/۸ به بررسی تنش‌گیری قطعات پرداخت. هدف از این پژوهش اثبات کارایی ارتعاشات با فرکانس بالا برای کاهش تنش‌های پسماند در مرحله شکل‌گیری و در حین فرآیند جوشکاری بوده است [۴]. شلوندی و همکاران به بررسی تجربی فرآیند اولتراسونیک بر روی قطعات فولادی با در نظر گرفتن اثر اندازه دانه‌ها پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که، در نمونه‌های درشت‌دانه در حدود ۴۶ درصد و در تسمه‌های ریزدانه حدود ۲۷ درصد از مقدار تنش‌های پسماند کاسته می‌شود. در پژوهش مذکور از بین پارامترهای بررسی شده، اندازه دانه بیشترین تأثیر و نیروی پیش بار کمترین تأثیر را در نرخ تنش‌گیری داشته است [۸]. بی‌ان موردبوک به بررسی تغییر شکل ناشی از ضربات اولتراسونیک بر رفتار خوردگی فولاد زنگ نزن ۳۲۱ پرداخته است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که یک‌لایه نانو کریستال در سطح فولاد ۳۲۱ تشکیل شده و باعث کاهش واکنش‌پذیری قطعه می‌شود [۹]. وان کودریا ونستو و همکارانش اثر ضربات اولتراسونیک بر سختی در مقیاس ماکرو و تنش پسماند مواد و اجزای جوشکاری شده را بررسی نمودند. نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش نشان داد که استفاده از امواج اولتراسونیک سبب آزادسازی تنش پسماند کششی در قطعه می‌شود [۱۰]. جانگ هیو جانگ و همکارانش اثر میکرو ساختار و تنش پسماند بر رشد ترک ناشی از خستگی در فولاد زنگ نزن را مورد بررسی قرار دادند که مشخص شد ترک‌های ناشی از خستگی بستگی به تنش پسماند و ساختار دانه‌ها دارد [۱۱]. هانگ سنگ لی و همکارانش خوردگی ناشی از ضربات شات و اولتراسونیک را در فولاد زنگ نزن ۳۰۴ بررسی کرده و نشان دادند که، رفتار مقاومت به خوردگی در قطعات تحت ضربات ناشی از امواج اولتراسونیک نسبت به نمونه‌های دیگر بهتر است [۱۲]. در این بخش به بررسی پیشینه کارهای انجام‌شده می‌پردازیم. در سال ۲۰۱۲ بادرین و همکارانش فرآیند ضربات اولتراسونیک را شبیه‌سازی نموده که مشاهده کردند که بین نتایج تجربی و عددی تفاوت‌های کمی وجود داشته از این‌رو استفاده از روش عددی را در کارهای صنعتی توصیه کردند [۱۳]. در سال ۲۰۱۵ مسعود ملکی و همکارانش عملیات ضربه توسط امواج اولتراسونیک بر قطعه را بررسی کرده و نشان دادند که، استفاده از این روش سبب افزایش مقاومت به خستگی و همچنین

⁴ Ultrasonic

⁵ Martensitic transformation

مقاومت خوردگی می‌شود [۱۴]. هنرپیشه و همکارانش به بررسی تأثیر روش تنش‌زدایی حرارتی و اولتراسونیک در قطعات جوش کاری شده پرداختند. شلوندی به بررسی تنش‌زدایی از قطعات نازک فولاد زنگ نزن ۳۱۶ با استفاده از عملیات حرارتی و امواج اولتراسونیک پرداخته است. نتایج به دست آمده نشان داد که با استفاده از امواج اولتراسونیک و عملیات حرارتی تنش پسماند به ترتیب ۳۶ و ۴۰ درصد کاهش می‌یابد [۱۵].

در این پژوهش به بررسی تأثیر تنش‌زدایی جوش با استفاده از عملیات حرارتی و همچنین امواج اولتراسونیک پرداخته و نتایج به دست با نمونه بدون عملیات تنش‌زدایی مقایسه شده است. همچنین تأثیر استفاده از امواج اولتراسونیک بر افزایش عمر قطعه در محیط‌های خورنده بررسی شده است.

۲- مواد و روش‌ها

اعتبار دستاوردهای یک پژوهش تحت تأثیر اعتبار روشی است که برای پژوهش برگزیده شده است. روش‌های یک پژوهش در واقع ابزارهای دستیابی به واقعیت به شمار می‌روند. از آنجایی که هدف این پژوهش بررسی اثر ضربات امواج التراسونیک بر رفتار خوردگی فولاد زنگ نزن ۳۱۶L می‌باشد در ابتدا برای ایجاد تنش پسماند از روش جوشکاری استفاده شده است. شش نمونه لوله که تحت شرایط یکسان جوش کاری شده، انتخاب گردیده است. هدف اصلی از این پژوهش بررسی اثربخشی روش تنش‌گیری اولتراسونیک و جلوگیری از خوردگی تنشی در محیط خوردگی است بدین منظور دو نمونه تحت تنش‌گیری التراسونیک قرار گرفته‌اند و جهت مقایسه از روش تنش‌گیری حرارتی استفاده شده است. همچنین یک حالت نیز بدون هیچ‌گونه عملیاتی در نظر گرفته شده است. تنش پسماند هر شش قطعه با استفاده از روش XRD^۶ اندازه‌گیری شده است.

برای انتخاب جنس نمونه‌ها از فولادهای زنگ نزن سری ۳۰۰ مخصوصاً ۳۱۶ و ۳۱۶L که به‌طور گسترده‌ای در صنعت و محیط‌های با خواص اسیدی به‌خصوص محلول‌های اسید سولفوریک کاربرد دارند استفاده شده است. فولادهای زنگ نزن دارای پایه آهنی هستند و حداقل دارای ۱۲ درصد کرم می‌باشند که این مقدار می‌تواند به ۳۰ درصد نیز برسد.

۲-۱- روش پژوهش

نمونه‌های استفاده‌شده در این پژوهش لوله ۲ اینچی به ضخامت ۳/۴ میلی‌متر از جنس فولاد زنگ نزن ۳۱۶L است که طبق استاندارد ISO 7S39-8 آماده شده است. برای ایجاد تنش پسماند از روش جوشکاری استفاده شده است. شش نمونه لوله که تحت شرایط یکسان جوش کاری شده و انتخاب گردیده است. لازم به ذکر است که از روش الکترو تگستن و گاز خنثی برای جوش کاری استفاده شده است. در این فرآیند از الکترودهای متفاوتی مانند تگستن خالص، تگستن توریم دار و تگستن زیرکونیوم دار استفاده می‌شود همچنین انتخاب منبع قدرت و نوع گاز محافظ به شدت بر عمق نفوذ و شکل مقطع جوش مؤثر است. در ادامه در شکل ۱ آماده‌سازی نمونه‌ها جهت انجام عملیات جوشکاری نشان داده شده است. نوع اتصال استفاده‌شده برای تهیه نمونه‌ها از نوع پخ با زاویه ۶۰ درجه می‌باشد که در شکل ۲ به نمایش گذاشته شده است.



شکل ۱ آماده‌سازی نمونه‌ها جهت انجام عملیات جوشکاری

^۶ X-ray Powder Diffraction



شکل ۲ نوع نمونه قطعه همراه با پخ ۶۰ درجه

در شکل ۳ نمونه‌ای از قطعه جوشکاری شده قبل از تمیزکاری ارائه شده است.



شکل ۳ نمونه جوشکاری شده قبل از تمیزکاری

کمیت‌های استفاده‌شده در جوش کاری در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱ کمیت‌های جوش کاری

اندازه	کمیت
۱۵۰ آمپر	شدت جریان
۱۵ ولت	ولتاژ
فولاد زنگ‌زن L ۳۱۶	نوع الکتروود جوشکاری
۲/۴ میلی‌متر	قطر الکتروود
نیاز ندارد	پیش گرم کردن الکتروود
دستی	سرعت جوشکاری
پخ ۶۰ درجه	نوع اتصال
۲ میلی‌متر	فاصله ورق‌ها از یکدیگر
۳ پاس	تعداد پاس‌های جوشکاری

بعد از جوشکاری نمونه‌ها بایستی اسید شویی شوند که مراحل اسید شویی به صورت زیر می‌باشد:

- چربی زدایی
- رسوب‌زدایی
- خنثی‌سازی
- شست‌وشو

بعد از عملیات جوش کاری نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM-A380 اسید شویی شده است. محلول قلیایی شامل ۱ درصد کربنات سدیم و تری فسفات است و عملیات رسوب‌زدایی با محلول اسید نیتریک ۵ درصد با دمای محیط و به مدت زمان ۱۰ دقیقه انجام می‌شود. سپس با استفاده از محلول اسید نیتریک ۲۰ درصد در دمای محیط شست‌وشو به مدت زمان ۳۰ دقیقه خنثی‌سازی انجام شده است.

یکی از روش‌های مؤثر که با حذف یا کاهش تنش‌های کششی پسماند و ایجاد تنش پسماند فشاری در اتصالات جوش سبب افزایش استحکام جوش می‌شود، روش اولتراسونیک پینینگ^۷ می‌باشد. امواج اولتراسونیک امواجی با فرکانس بالا هستند که قادرند از درون مواد فیزیکی عبور کرده و انرژی را منتقل کنند. طیف امواج اولتراسونیک بالاتر از حد شنوایی انسان است و می‌توانند در همه مواد شامل جامد و مایع و گاز تولید شوند. اولتراسونیک پینینگ روش جدیدی برای استحکام خستگی سازه‌های جوشی بوده که بر اساس حذف تنش‌های کشش مضر و ایجاد تنش‌های پسماند فشاری در سطح فلزات و آلیاژها عمل می‌کند و منجر به کاهش تمرکز تنش در منطقه HAZ^۸ و پایه جوش و نیز بهبود خواص مکانیکی در سطح نمونه می‌شود. بازده اولتراسونیک پینینگ به خصوصیات مواد، نوع جوش مورد استفاده، باره‌ای وارده و ... بستگی دارد.

در شکل ۴ تصویری از تجهیزات لازم برای روش اولتراسونیک پینینگ نشان داده شده است.



شکل ۴ تجهیزات اولتراسونیک پینینگ

برای ایجاد امواج اولتراسونیک از یک ژنراتور الکتریکی استفاده می‌شود این ژنراتور تأمین کننده انرژی ترانسدایوسر^۹ است. ترانسدایوسر وسیله‌ای می‌باشد که انرژی میدان الکتریکی یا مغناطیسی را به انرژی مکانیکی همان ضربه تبدیل می‌کند. جهت انتقال ارتعاشات مکانیکی ترانسدایوسر به ابزار ضربه زننده از انتقال دهنده استفاده می‌شود که این انتقال ممکن است با کاهش یا افزایش سطح انرژی همراه باشد. و در نهایت بازار ضربه زننده ضربه حاصل را به جسم وارد می‌کند. جنس این ابزار به نوع کاربرد دستگاه اولتراسونیک بستگی دارد، ابزار مورد استفاده در این روش بایستی جنس سختی داشته باشند تا قطعه کار را تغییر شکل دهند و خود دچار تغییر شکل پلاستیک نشوند. در ادامه و در شکل‌های ۵ تا ۱۱ ابزار اولتراسونیک پینینگ نشان داده شده است.

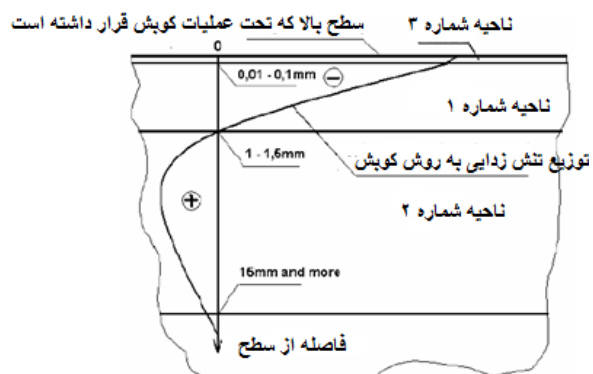


شکل ۵ کلگی دستگاه ضربه زننده و انواع ضربه زننده‌های میله‌ای

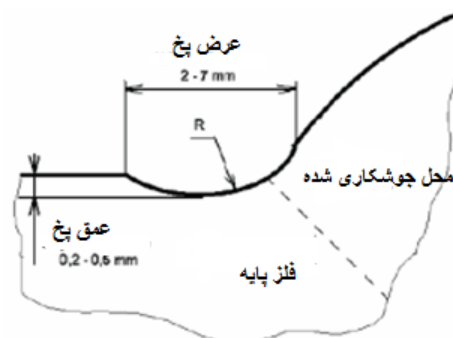
⁷ Ultrasonic peening

⁸ Heat-affected zone

⁹ Transducer



شکل ۶ مقطع ماده بهبودیافته به وسیله اولتراسونیک پینینگ



شکل ۷ پروفیل اصلاح شده پاشنه جوش به کمک فرایند اولتراسونیک



شکل ۸ تجهیزات استفاده شده در عملیات اولتراسونیک پینینگ



شکل ۹ هندسه نوک ضربه زن استفاده شده در پژوهش



شکل ۱۰ ترانسدیوسر استفاده شده در پژوهش



شکل ۱۱ عملیات نصب لوله جهت تنش گیری اولتراسونیک

برای تنش زدایی اولتراسونیک از روش پینینگ استفاده شده است. در این روش ارتعاشات اولتراسونیک ایجاد شده به ابزار ضربه زنده انتقال یافته و از طریق تماس ابزار با سطح قطعه کار تغییر شکل پلاستیک در قطعه رخ داده و تنش های پسماند مضر آزاد می شود. منبع تغذیه استفاده شده در این عملیات ۳۰۰ وات بوده و از توان ۲۰۰ وات آن در این پژوهش استفاده شده است، همچنین دستگاه در فرکانس خروجی ۲۴ کیلوهرتز تنظیم شده است. ابزار ضربه زنده در این پژوهش از جنس آلومینیوم بوده و نقطه تماس آن شکل کروی داشته است و به منظور افزایش عملیات پینینگ سطح از ضربه زنده با قطر کم استفاده شده است.

تنش زدایی حرارتی نیز با توجه به استاندارد ASM انجام شده که نرخ گرمادهی به قطعه در کوره ۵ درجه سلسیوس در دقیقه بوده و دمای قطعه تا ۹۰۰ درجه سلسیوس افزایش یافته و به مدت یک ساعت در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس نگهداری شده است. در عملیات خنک کاری، قطعه با نرخ ۱ درجه سلسیوس بر دقیقه سرد شده است. لازم به ذکر است که، محیط کوره با گاز آرگون پر شده و عاری از هرگونه گاز دیگر بوده است.

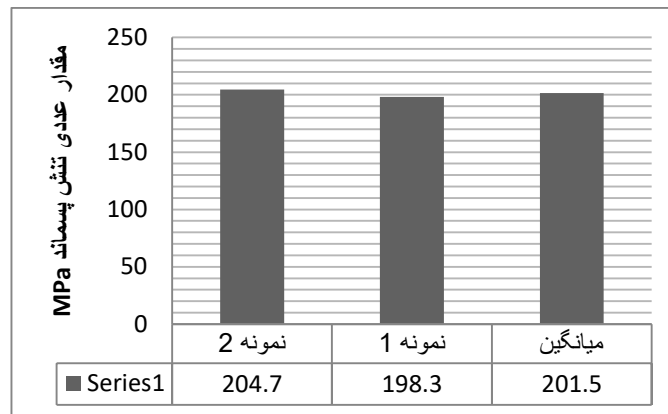
بعد از آماده سازی هر شش نمونه در آزمایشگاه تنش پسماند قطعات اندازه گیری شده است. برای اندازه گیری تنش پسماند و خوردگی از آزمون SCC و از استاندارد NACE TM0177 استفاده شده است.

جدول ۲ مشخصات دستگاه XRD

مدل	PHILIPS PW3040
طول موج	Cu Ka (1.5405 Å)
ابعاد Spot	10*10 mm ²
عمق نفوذ	از ۲ میکرومتر تا ۱۲۰ میکرومتر
حد تشخیص	فاز های با حداقل ۵ درصد وزنی، متناسب با عناصر موجود
ضخامت لایه	از ۳ تا ۳۰۰ نانومتر

۳- بررسی نتایج

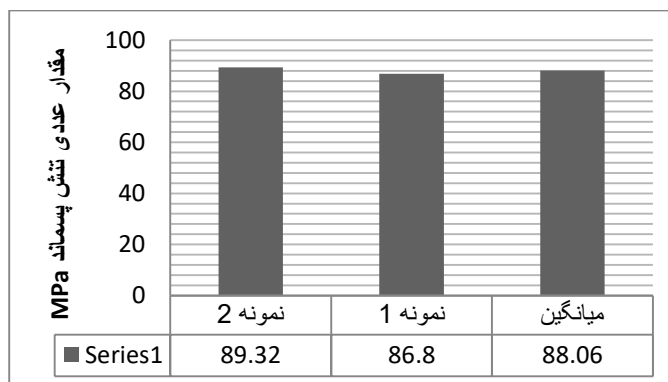
در این بخش به بررسی نتایج به دست آمده از نمونه‌ها پرداخته و نتایج با یکدیگر مقایسه شده است. برای مشخص شدن اثربخشی عملیات تنش‌زدایی اولتراسونیک و حرارتی، نیاز به مرجع برای مقایسه بوده است و به دلیل محدودیت زمانی و امکاناتی، امکان انجام آزمون یکس آر دی به تعداد زیاد فراهم نبوده است. از این رو با کنترل شرایط جوشکاری دو نمونه بدون عملیات تنش‌زدایی به عنوان نمونه مرجع در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از آزمون یکس آر دی نمونه‌های بدون عملیات تنش‌گیری در شکل ۱۲ آورده شده است.



شکل ۱۲ نتایج آزمون یکس آر دی نمونه‌های بدون تنش پسماند

با توجه به شکل مشاهده می‌شود که تنش پسماند در هر دو قطعه تقریباً یکسان بوده است که این امر نشان می‌دهد که، شرایط آماده‌سازی برای نمونه‌ها یکسان بوده است.

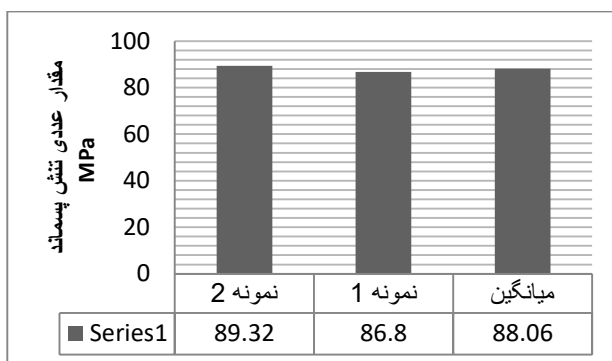
به منظور بررسی تنش‌زدایی حرارتی دو نمونه در شرایط یکسان انتخاب شده است و تنش پسماند در نمونه‌ها با استفاده از آزمایش یکس آر دی مشخص شده است. نتایج نمونه‌هایی که به روش عملیات حرارتی تنش‌گیری شده است در شکل ۱۳ آورده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که مقدار تنش پسماند در نمونه‌های اول و دوم تقریباً یکسان بوده است.



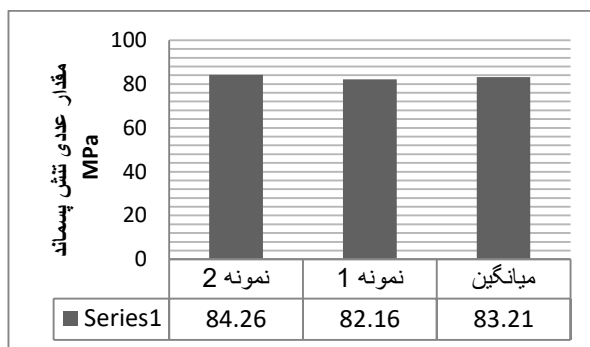
شکل ۱۳ نتایج حاصل از آزمون یکس آر دی در نمونه‌ها با عملیات تنش‌زدایی حرارتی

با مقایسه نتایج تنش پسماند در روش عملیات حرارتی و بدون عملیات حرارتی می‌توان مشاهده کرد که، میانگین تنش پسماند ۵۴ درصد کاهش یافته است.

نتایج حاصل از آزمون یکس آر دی نمونه‌های تنش‌گیری شده با استفاده از روش اولتراسونیک در شکل ۱۴ آورده شده است. با توجه به شکل می‌توان مشاهده کرد که، مقدار تنش پسماند ۵۸ درصد نسبت به نمونه بدون عملیات تنش‌گیری کاهش یافته است. همچنین مقایسه نتایج نمونه‌های تنش‌زدایی شده با عملیات حرارتی و استفاده از امواج اولتراسونیک نشان می‌دهد که امواج اولتراسونیک عملکرد بهتری داشته و مقدار تنش پسماند حدود ۴ درصد نسبت به نمونه تنش‌زدایی شده با عملیات حرارتی کاهش یافته است.

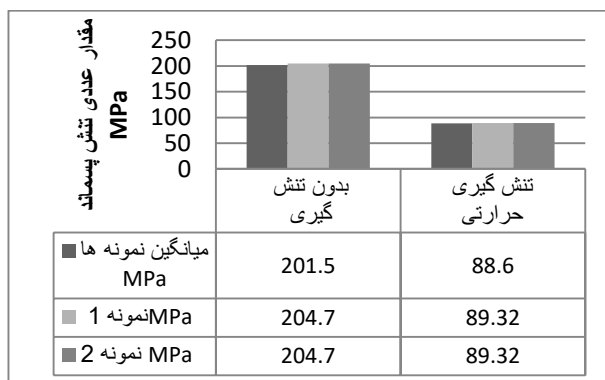


شکل ۱۳ نتایج حاصل از آزمون ایکس آر دی در نمونه‌ها با عملیات تنش‌زدایی حرارتی



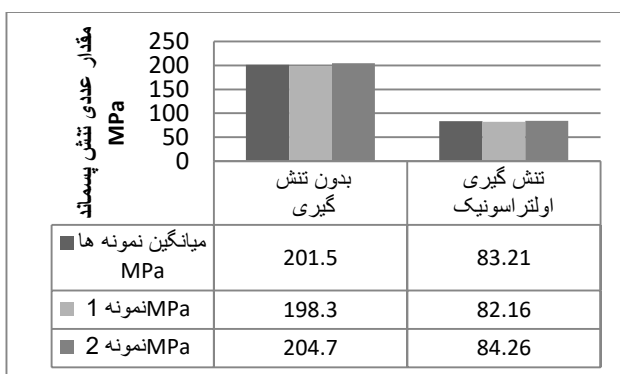
شکل ۱۴ نتایج آزمون ایکس آر دی نمونه‌های تنش‌زدایی شده با استفاده از امواج اولتراسونیک

در ادامه در شکل‌های ۱۵ الی ۱۷ به بررسی کمی تنش‌گیری‌ها پرداخته شده است. همان‌گونه که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود مقدار کاهش تنش پسماند در روش حرارتی نسبت به نمونه بدون تنش‌گیری حدود ۵۴ درصد کاهش یافته است.



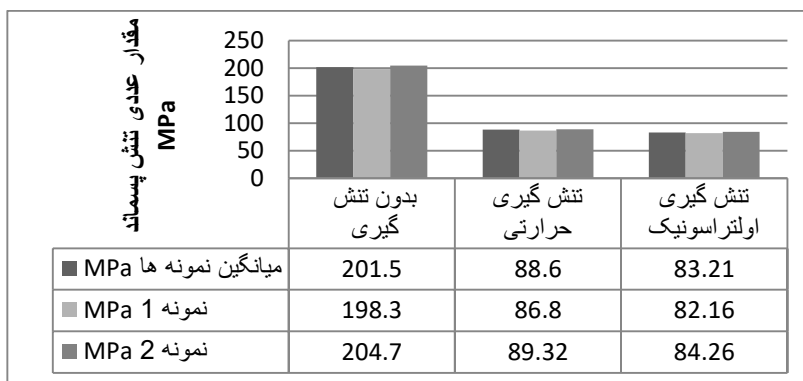
شکل ۱۵ مقایسه تنش پسماند در نمونه‌های بدون تنش‌گیری و نمونه با تنش‌گیری حرارتی

در شکل ۱۶ مقدار کاهش تنش پسماند در روش اولتراسونیک نسبت به نمونه بدون تنش‌گیری نشان داده شده است. که این مقدار در حدود ۵۹ درصد می‌باشد.



شکل ۱۶ مقایسه تنش پسماند در نمونه‌های بدون تنش‌گیری و نمونه با تنش‌گیری اولتراسونیک

در شکل ۱۷ مقدار تنش پسماند در نمونه‌های مختلف در کنار یکدیگر نشان داده شده است.



شکل ۱۷ مقایسه تنش‌های پسماند در سه حالت مختلف بدون تنش‌گیری، تنش‌گیری حرارتی و تنش‌گیری اولتراسونیک

با توجه به شکل ۱۷ مشاهده می‌شود که در تنش‌گیری اولتراسونیک تنش پسماند بیشتری نسبت به حالت حرارتی حذف گردیده است.

برای بررسی تأثیر تنش‌زدایی، بر خوردگی از آزمون SCC استفاده شده است. در این آزمون دو نمونه تنش‌گیری شده با امواج اولتراسونیک و بدون عملیات تنش‌زدایی در محیط خورنده قرار داده شده است. برای آزمون SCC از لوله نمونه‌برداری انجام شده است. نمونه‌برداری به صورت طولی از جوش انتخاب و برش داده شده و نمونه‌ها در آزمون بارگذاری ASTM G39 قرار گرفته است. نمودار تغییرات دمایی در زمان آزمون در شکل ۱۸ آورده شده است.

نتایج آزمون نشان می‌دهد که، در نمونه تنش‌گیری، قطعه پس از مدت زمان ۷۲۰ ساعت در محیط خورنده دچار ترک می‌شود. همچنین مشاهده شده است که در مدت زمان ۷۲۰ ساعت هیچ ترک ناشی از محیط خورنده در نمونه تنش‌زدایی شده با استفاده از امواج اولتراسونیک ایجاد نشده است. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از امواج اولتراسونیک سبب افزایش طول عمر نمونه در محیط خورنده شده است. در شکل ۱۹ ترک‌های ایجاد شده در نمونه تنش‌زدایی نشده پس از ۷۲۰ ساعت نمایش داده شده است.

۴- نتیجه‌گیری

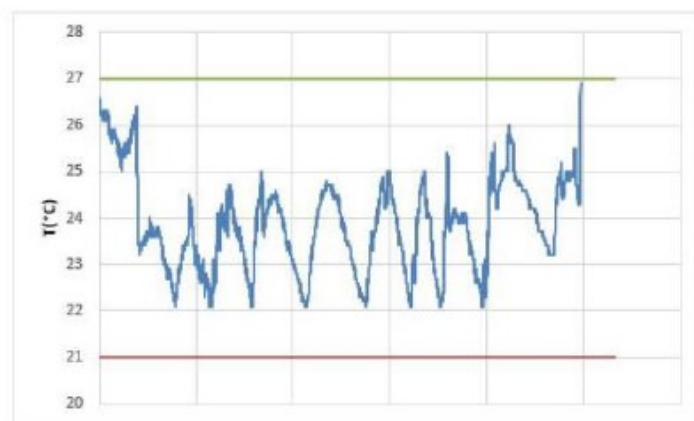
هدف پژوهش بررسی اثر ضربات امواج اولتراسونیک بر رفتار خوردگی فولاد زنگ‌زن ۳۱۶L بود. در ابتدا برای ایجاد تنش پسماند از روش جوشکاری استفاده شده است و شش نمونه در شرایط یکسان آماده شده است. دو نمونه با روش تنش‌گیری اولتراسونیک، تنش‌گیری شده و دو نمونه دیگر با استفاده از عملیات حرارتی تنش‌زدایی می‌شود. تنش پسماند هر شش قطعه با آزمون ایکس آر دی اندازه‌گیری شده است. در پایان هم به مقایسه مقاومت نمونه‌های تنش‌گیری شده با امواج اولتراسونیک و بدون عملیات تنش‌گیری در محیط خورنده پرداخته شده است.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که:

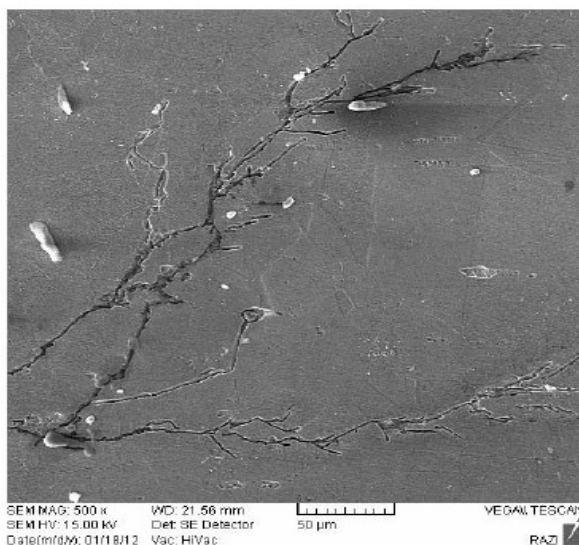
تنش‌زدایی با استفاده از عملیات حرارتی مقدار تنش پسماند در نمونه را به مقدار ۵۴ درصد کاهش داده است.

تنش‌زدایی با استفاده از امواج اولتراسونیک سبب کاهش تنش پسماند به مقدار ۵۸ درصد شده است و در مقایسه با تنش‌زدایی با عملیات حرارتی تنش پسماند را به مقدار بیشتری کاهش داده است. از این رو استفاده از امواج اولتراسونیک برای تنش‌زدایی از قطعات پیشنهاد می‌شود.

نتایج آزمون SCC نشان داد که تنش‌زدایی با استفاده از امواج اولتراسونیک سبب افزایش طول عمر نمونه در محیط خورنده شده است. از این رو پیشنهاد می‌شود که برای افزایش طول عمر قطعات در محیط‌های خورنده از روش تنش‌زدایی با استفاده از امواج اولتراسونیک استفاده شود.



شکل ۱۸ نمودار دمایی در زمان آزمون SCC



شکل ۱۹ ترک‌های ایجادشده پس از ۷۲۰ ساعت در نمونه بدون تنش‌گیری

۵- مراجع

- [1] Shahriari A, Shahrabi T, Oskuie AA. A study on stress corrosion cracking of X70 pipeline steel in carbonate solution by EIS. *Journal of materials engineering and performance*. 2013;22:1459-70.
- [2] Ige OO, Umoru LE. Effects of shear stress on the erosion-corrosion behaviour of X-65 carbon steel: A combined mass-loss and profilometry study. *Tribology International*. 2016;94:155-64.
- [3] Cao L, Frankel GS, Sridhar N. Effect of chloride on stress corrosion cracking susceptibility of carbon steel in simulated fuel grade ethanol. *Electrochimica Acta*. 2013;104:255-66.
- [4] Hirai S, Aoki S. Reduction of Residual Stress by Ultrasonic Surface Vibration. *Elektronika ir Elektrotechnika*. 2003;45:64-7.
- [5] Guide for application of ultrasonic impact treatment improving fatigue life of welded structure. Northern scientific & Technology Company.
- [6] Zandian V. Investigation of residual stresses in stress-relieved samples by heat treatment and ultrasonic methods using hole-drilling method. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;14:273-8.
- [7] Munsif A, Waddell AJ, Walker CA. The influence of vibratory treatment on the fatigue life of welds: A comparison with thermal stress relief. *Strain*. 2001;37:141-9.
- [8] Shalvandi M, Hojjat Y, Abdullah A, Asadi H. Experimental evaluation of ultrasonic stress relieving on steel specimens considering grain size effect. 2012.

- [9] Mordyuk BN, Prokopenko GI, Vasylyev MA, Iefimov MO. Effect of structure evolution induced by ultrasonic peening on the corrosion behavior of AISI-321 stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2007;458:253-61.
- [10] Kudryavtsev Y, Kleiman J, Prokopenko G, Knysh V, Gimbrede L. Effect of Ultrasonic Peening on microhardness and residual stress in materials and welded elements.
- [11] Jang C, Cho P-Y, Kim M, Oh S-J, Yang J-S. Effects of microstructure and residual stress on fatigue crack growth of stainless steel narrow gap welds. *Materials & Design*. 2010;31:1862-70.
- [12] Lee H-s, Kim D-s, Jung J-s, Pyoun Y-s, Shin K. Influence of peening on the corrosion properties of AISI 304 stainless steel. *Corrosion science*. 2009;51:2826-30.
- [13] Badreddine J, Gallitelli D, Rouhaud E, Micoulaut M, Remy S, François M, et al. Complete simulation of ultrasonic shot peening process. p. 1-11.
- [14] Malaki M, Ding H. A review of ultrasonic peening treatment. *Materials & Design*. 2015;87:1072-86.
- [15] Shalvandi M, Hojjat Y, Abdullah A, Asadi H. Influence of ultrasonic stress relief on stainless steel 316 specimens: A comparison with thermal stress relief. *Materials & Design*. 2013;46:713-23.