E-ISSN: 2676-6787 | P-ISSN: 2476-583X

Journal of
Welding Science and Technology of Iran
jwsti.iut.ac.ir

Volume 9, Number 2, 2024



# Investigation of weld bead geometry and microstructures of 316L stainless steel in activating flux TIG welding using ultrasonic vibrations

**M. N. Sadraee Far, F. Kolahan***
Ferdowsi University of Mashhad, Department of Mechanical Engineering, Mashhad, Iran.

Received 12 May 2023 ; Accepted 22 June 2023

## Abstract

In this study, we employed the active TIG method with ultrasonic vibration (UV) for welding 316L steel. Throughout the active tungsten inert gas (A-TIG) welding process, a high-frequency ultrasonic generator produced high-intensity acoustic waves at an optimal frequency of 20.3 kHz and a vibration amplitude of 8 micrometers. These waves were directed into the molten weld pool, covered by $SiO_2$ nanoparticles serving as an activating flux. The effect of UV and nanoparticles on weld geometry and weld microstructure was analyzed and compared with conventional TIG welding proces. The results indicated that the use of nanopowder not only increased weld penetration by approximately 17.5% but also reduced the Weld Bead Width (WBW) by 28% compared to Conventional TIG. These values increased by 25% and decreased by 35%, respectively, in the presence of ultrasonic waves. Additionally, the introduction of nanomaterials into the molten pool led to finer grains. The ultrasonic waves played a crucial role in ensuring the uniform distribution of these nanomaterials in the melt, ultimately resulting in an enhanced microstructure of the weld.

**Keywords**: Activating flux tungsten inert gas welding (A-TIG), ultrasonic vibrations, Nanoparticles, 316L stainless steel, microstructure refinement.

Corresponding Author: kolahan@um.ac.ir

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20 ]

[ DOI: 10.47176/JWSTI.2024.12 ]

شاپا: 2476-583X | شاپا الکترونیکی: 2676-6787

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال نهم، شماره2، پاییز و زمستان 1402



# بررسی ریزساختار و هندسه جوش فولاد زنگ نزن 316 L در جوشکاری تیگ فعال با استفاده از ارتعاشات فراصوت

**محمدناصر صدرایی‌فر، فرهاد کلاهان***

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

دریافت مقاله: 1402/07/09 ؛ پذیرش مقاله: 1402/10/07

**چکیده**

در این مقاله ما از روش تیگ فعال با استفاده از ارتعاش فراصوت (UV) برای جوشکاری فولادL 316 استفاده کردیم. در طی فرایند جوشکاری الکترود تنگستن و گاز بی‌اثر فعال (A-TIG) امواج صوتی با شدت بالا توسط یک ژنراتور اولتراسونیک فرکانس بالا با فرکانس کاری بهینه 20/3 کیلوهرتز و دامنه ارتعاش 8 میکرومتر، تولید شده و به حوضچه جوش مذاب که با نانوذرات $SiO_2$ به عنوان یک شار فعال کننده پوشش دهی شده است، وارد شد. اثر UV و نانوذرات بر هندسه جوش و ریزساختار جوش مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و با فرایند جوشکاری تیگ معمولی مقایسه شد. نتایج نشان داد که استفاده از نانوپودر در جوشکاری تیگ نه تنها می‌تواند عمق نفوذ جوش را حدود 17/5 درصد افزایش دهد، بلکه باعث کاهش 28 درصدی عرض مهره جوش (WBW) در مقایسه با جوشکاری تیگ معمولی می‌شود. این مقادیر در حضور امواج فراصوت به ترتیب به 25 درصد افزایش و 35 درصد کاهش می‌رسد. علاوه بر این، با افزودن نانومواد به حوضچه مذاب دانه‌ها ریزتر شد و امواج فراصوت به توزیع یکنواخت این نانوموادها در مذاب کمک کرده و درنهایت منجر به اصلاح ریزساختار جوش شده است.

**کلمات کلیدی**: جوشکاری تنگستن با گاز خنثی شار فعال(اکتیوتیگ)، ارتعاشات فراصوت، نانو ذرات، فولاد زنگ نزن L 316، اصلاح ریزساختار.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: kolahan@um.ac.ir

## 1- مقدمه

جوش در صنایع مختلف از جمله خودروسازی، نفت و گاز، مخازن تحت فشار و ساخت سازه‌های فلزی کاربرد گسترده دارد. در بین روش‌های جوشکاری ذوبی جوشکاری با الکترود غیرمصرفی تنگستن و گاز محافظ به دلیل کیفیت بالای اتصال یکی از فرایندهای پرکاربرد جوشکاری ورق‌های نازک و نسبتا ضخیم محسوب می‌شود و برای اتصال دسته وسیعی از مواد استفاده می‌شود.[1]

جوش حاصل شده در این جوشکاری بدلیل کنترل پذیری میزان حرارت اعمالی به ناحیه اتصال، نسبت به سایر جوش‌های ذوبی از کیفیت بالاتری برخوردار است. کوچک بودن منطقه متاثر از حرارت، ناصافی کمتر در خط‌جوش و سرعت بالای جوشکاری از دیگر مزایای این روش می‌باشند. این ویژگی‌ها باعث ترجیح این روش برای جوشکاری اتصالات مختلفی شده است. از دیگر مزایای این فرایند می‌توان به جوشکاری قطعات تا عمق 3 میلی‌متر در یک پاس بدون استفاده از فلزپرکننده اشاره کرد [2].

درجوشکاری‌های قوس الکتریکی، دستیابی به عمق نفوذ بیشتر،

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20 ]

[ DOI: 10.47176/JWSTI.2024.12 ]

مستلزم افزایش جریان، کاهش سرعت جوشکاری یا افزایش تعداد پاس‌های جوشکاری است که می‌تواند مشکلاتی همچون، افزایش پهنای جوش و یا سوراخ شدن ورق‌های نازک به دلیل بالا بودن حرارت اعمالی به قطعه‌کار را به همراه داشته باشد. بنابراین لازم است تدابیری اتخاذ شود که به موجب آن افزایش عمق نفوذ و استحکام جوش در عین حال کاهش پهنای جوش و ناحیه متاثر از حرارت شود. در این فرایند کنترل حرارت ورودی برای تولید اتصالی سالم از اهمیت کلیدی برخوردار می‌باشد [1].

در حال حاضر مطالعه و تحقیق در زمینه افزایش عمق نفوذ و بهبود خواص اتصال در جوشکاری تیگ، یکی از زمینه‌های رایج تحقیقات است. در سال‌های اخیر، محققین بر روی روش‌هایی که با اضافه کردن مواد نانو به حوضچه مذاب باعث بهبود خواص مکانیکی و افزایش عمق نفوذ می‌شوند، تمرکز نموده‌اند. همچنین استفاده از امواج فراصوت در حین جوشکاری اخیرا توجه زیادی از محققین را به خود جلب نموده است. در برخی مطالعات، فقط اثر یک نوع ماده نانوی خاص و دربرخی از آن‌ها، ترکیب چند ماده نانوی مختلف بر یک یا چند مشخصه کیفی و در برخی دیگر تنها اثر اعمال امواج فراصوت، مورد بررسی قرار گرفته است. در تحقیقات انجام شده، در اکثر مواقع فقط به‌صورت موردی و با تعداد محدودی از آزمایش‌ها، تاثیر یک یا چند نوع ماده نانو[3] و در برخی دیگر هم فقط اثر امواج فراصوت با فرکانس و دامنه مشخص مورد بررسی قرار گرفته است [4].

بهره‌گیری از انرژی امواج فراصوت و مواد نانو در جوشکاری یکی از مباحث تحقیقاتی نسبتاً جدید به‌خصوص در حوزه جوشکاری‌های ذوبی می‌باشد. تحقیقات انجام شده در این زمینه، شامل مباحث متعددی می‌باشد. که در ذیل به آن‌ها می‌پردازیم.

فتاحی و همکارانش [5] به بررسی تاثیر استفاده از ارتعاش فراصوت در جوشکاری تیگ آلومینیوم پرداختند. آن‌ها فیلری که قرار بود در عملیات جوشکاری استفاده شود را با نانو ذرات تقویت کردند. در نتیجه با افزودن نانوذرات $ZrO_2$ و $TiO_2$ از طریق فیلر به حوضچه مذاب در جوشکاری تیگ تحت ارتعاش فراصوت نتایج را با میکروسکوپ الکترونی ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که افزودن نانو ذرات به همراه استفاده از امواج فراصوت می‌تواند اصلاح دانه را بهبود بخشد و در نتیجه خواص مکانیکی را نسبت به جوشکاری تیگ معمولی افزایش دهد.

کامال و همکارانش [6] به بررسی تاثیر شارهای اکسیدی در جوشکاری اکتیوتیگ ورق‌های فولادی P91 پرداختند. نتایج آزمایش‌ها تجربی، نشان داد که با اضافه کردن ذرات نانوی اکسیدی مختلف عمق نفوذ در این نوع جوشکاری افزایش می‌یابد. همچنین، نفوذ کامل با به‌کارگیری اکسید روی، اکسید آهن، اکسید کرم و اکسید منگنز حاصل شد. همچنین شکل ظاهری مورد قبولی با استفاده از مواد نانو در جوشکاری اکتیوتیگ حاصل شد. نتایج نشان داد که بیشترین نسبت عمق نفوذ به پهنای جوش با به‌کارگیری اکسید روی، اکسید منگنز و اکسید کرم که به ترتیب مقدار 0/95، 0/85 و 0/83 بود حاصل شد و این در حالی بود که این مقدار برای جوشکاری تیگ مرسوم 0/29 گزارش شده بود. بنابراین، با به‌کارگیری اکسید منگنز نسبت عمق به پهنا در جوشکاری اکتیوتیگ به نسبت جوشکاری معمولی 3/2 برابر شد.

ژانگ و همکارانش [7] تاثیر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به کمک امواج فراصوت بررفتار جریان ریزساختار و خواص مکانیکی اتصالات آلیاژ آلومینیوم 7N01-T4 را مورد بررسی قراردادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که ارتعاش فراصوت می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای سرعت جوشکاری اتصال جوش بدون نقص را افزایش دهد. همچنین دریافتند که ارتعاش فراصوت می‌تواند کیفیت سطح اتصالات را بهبود بخشد و نیروهای محوری را تا 9 درصد کاهش دهد.

رام‌کومار و همکارانش [8]، قطعاتی از جنس فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 904 را که توسط روش اکتیوتیگ و تیگ جوش داده شده بودند را مورد بررسی قرار دادند. در روش جوشکاری اکتیوتیگ 85 درصد $SiO_2$ و 15 درصد $TiO_2$ مورد استفاده قرار گرفت. در روش جوشکاری اکتیوتیگ عمق نفوذ بهتری نسبت

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20 ]

[ DOI: 10.47176/JWSTI.2024.12 ]

به روش جوشکاری تیگ حاصل شد. استحکام کششی در قطعات جوشکاری شده به روش جوشکاری تیگ اندکی بیشتر از قطعات جوشکاری شده به روش جوشکاری اکتیوتیگ گزارش شد. بنابراین، ترکیب این مواد نانو تاثیری با توجه به افزایش عمق نفوذ در افزایش استحکام کششی ورق‌ها نداشت.

احمدی و ابراهیمی [9] نیز تاثیر دانسیته 4 شار فعال کننده سطحی اکسید سیلیسیم، اکسید تیتانیوم، اکسید کرم و اکسید کلسیم را در جوشکاری فولاد زنگ‌نزن 316 مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تحقیقات نشان داد که این شارها باعث افزایش عمق نفوذ می‌شوند. همچنین، اکسید سیلیسیم تاثیر بیشتری در افزایش عمق نفوذ، نسبت به مواد نانوی دیگر داشت.

احمدی و ابراهیمی [10] در تحقیقی دیگر، اثر شارهای $TiO_2$ و $SiO_2$ را در جوشکاری اکتیوتیگ فولاد زنگ‌نزن 316 مورد ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق، اثر تغییرات شدت جریان، زاویه الکترود، سرعت جوشکاری بر عمق نفوذ و پهنای جوش در حضور مواد نانو مورد ارزیابی قرار گرفت. جمع‌آوری داده‌های آزمایشگاهی براساس طراحی آزمایش‌ها و روش تاگوچی انجام شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که شدت جریان و سرعت جوشکاری پارامترهای تاثیرگذار بر نسبت عمق به پهنای جوش می‌باشد. بطوری‌که، با افزایش شدت جریان و کاهش سرعت جوشکاری نسبت عمق به پهنای جوش افزایش پیدا خواهد کرد. افزایش عمق نفوذ به پهنای جوش کاهش اعوجاج را نیز در پی خواهد داشت. همچنین، خواص مکانیکی جوش، با کاهش اندازه دانه‌ها در ناحیه متاثر از حرارت باعث بهبود خواص مکانیکی خواهد شد.

در تحقیقی دیگر، احمدی و همکارانش [11] اثر شارهای $TiO_2$ و $SiO_2$ را بر هندسه جوش فولاد زنگ‌نزن 304 در جوشکاری اکتیوتیگ مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که، استفاده از مواد نانو با تغییر جریان مارانگونی باعث افزایش عمق نفوذ و کاهش پهنای جوش می‌شود.

چن و همکارانش[12] به بررسی شکل دانه‌ها در جوشکاری تیگ به کمک ارتعاش فراصوت آلومینیوم خالص پرداختند. آن‌ها تایید کردند که در جوشکاری تیگ تحت امواج فراصوت ریزساختار از کریستال صفحه‌ای-ستونی و هم محور یکنواخت به کریستال صفحه‌ای ستونی غیریکنواخت هم محور تغییر شکل یافته است و به این نتیجه رسیدند که این امواج می‌تواند دانه‌ها را بشکند و سپس اصلاح کند.

برتییر و همکارانش [13] در تحقیقی به بررسی و شبیه‌سازی جوشکاری فولاد زنگ‌نزن آستنیتی304L در روش اکتیو تیگ و مقایسه نتایج آن با روش تیگ پرداختند. در این تحقیق، ترکیبی از شارهای $TiO_2$، $Cr_2O_3$، $V_2O_5$، $MgF_2$ و $MgCl_2$ مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، $TiO_2$، $Cr_2O_3$، $MgF_2$ و$K_2Cr_2O_7$ به‌صورت مجزا نیز مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج تحقیق نشان داد که حتی افزودن مقدار اندکی شار اکسیدی باعث تغییر جهت جریان مارانگونی می‌شود و این در حالی است که، فلورایدها تغییری در جهت جریان مارانگونی ایجاد نمی‌کنند. علاوه‌براین، تاثیر مواد نانو بر هندسه گرده جوش، نیروی مارانگونی و نیروهای لورنتز با استفاده از نتایج عددی مورد بررسی قرار گرفت. مشخص شد که، نیروهای لورنتز تاثیر زیادی بر هندسه گرده جوش در حالت ضریب حرارتی کشش سطحی منفی دارند ولی در حالت ضریب حرارتی کشش سطحی مثبت بی‌تاثیراند.

دی و همکارانش [14] در تحقیقی، تاثیر مواد نانو بر مشخصات متالورژیکی فلز تیتانیوم را مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق، عمق نفوذ کامل در ورق‌هایی به ضخامت 6 میلی‌متر تنها در یک پاس جوشکاری حاصل شد. نتایج تست کشش نیز نشان داد که استحکام کششی فلزجوش در حضور مواد نانو افزایش می‌یابد و این مقدار برای فلزجوش 398 مگا پاسکال بود که به استحکام کششی فلزپایه که 420 مگاپاسکال است بسیار نزدیک بود.

آریواژانگ و همکارانش [15] مشخصات مکانیکی و ریزساختار فولاد P22 را در جوشکاری اکتیوتیگ مورد مطالعه قرار دادند. همچنین در این تحقیق، تاثیر پس‌گرم کردن قطعات نیز مورد بررسی قرار گرفت. چقرمگی 133 ژول بر متر مربع برای فولاد جوشکاری شده بدون عملیات پس‌گرم کردن گزارش شد در حالی‌که چقرمگی برای فولاد پس‌گرم شده به 177 ژول بر متر

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20 ]

[ DOI: 10.47176/JWSTI.2024.12 ]

مربع افزایش پیدا کرد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که سختی و چقرمگی فولاد جوشکاری شده با این روش بالاتر از روش جوشکاری تیگ مرسوم می‌باشد.

زو و یان [16] به مطالعه ریزساختار، مقاومت به خوردگی و خواص مکانیکی، جوشکاری و لحیم‌کاری Ti-Mg پرداختند. آن‌ها دریافتند که با کمک امواج فراصوت دانه‌های درشت در ناحیه جوش به طور موثری به دلیل جریان ارتعاشی و اثرات حفره‌ای ناشی از جریان فراصوت تصفیه شدند و نرخ خوردگی ناحیه جوش به طور موثری کاهش یافته است. همچنین خواص مکانیکی جوش نیز بهبود یافته است. بررسی تحقیقات پیشین نشانگر این است که تاکنون تحقیقی که در آن افزودنی نانومواد توأمان با امواج پرفشار فراصوت به قطعه کار 316L در حین جوشکاری تیگ اعمال شود مورد بررسی قرار نگرفته است. هدف از انجام این پژوهش بررسی تاثیر دو عامل استفاده از نانومواد $SiO_2$ و مطالعه تاثیر امواج پرفشار فراصوت در جوشکاری اکتیوتیگ برروی خواص و ریزساختار جوش است. در این تحقیق، سه تا از مهمترین مشخصه‌های کیفی اتصال جوش شامل: عمق نفوذ، پهنای جوش و نسبت عمق به پهنای جوش بررسی می‌شود. همچنین ریزساختار درز جوش نیز جهت اطمینان از حضور نانومواد و تاثیرات آن و همچنین تاثیرات امواج فراصوت بررسی می‌شود.

## 2-مواد و روش‌ها

جهت انجام آزمایش‌ها از دستگاه تیگ DIGITIG 250 AC/DC, GAAM-Co, Iran برای جوشکاری استفاده شد. بکارگیری از الکترود تنگستن با 2% توریم و گاز آرگون با 99/7 درصد خلوص به عنوان گاز محافظ از جمله مشخصه‌هایی جانبی این دستگاه می‌باشد. به این دلیل که هدف اصلی این تحقیق بررسی ارتعاشات فراصوت در جوشکاری تیگ فعال بود پارامترهای جوشکاری ثابت و مقدار 110 آمپر برای جریان، 90 میلی‌متر بردقیقه سرعت میز اتومات و فاصله الکترود با قطعه کار 3 میلی‌متر در نظر گرفته شد. همانطور که گفته شد جهت انجام آزمایش‌ها از فولاد زنگ نزن 316L استفاده شد.

### 2-1-مواد نانو مورد استفاده

با توجه به مطالب ارایه شده در پیشینه تحقیق در ارتباط با شارهای فعال کننده سطحی مورد استفاده برای فولاد AISI316L، در این پژوهش از اکسید سیلیسیوم ($SiO_2$, 99%, 20-30 nm) به دلیل تاثیر آن برافزایش عمق نفوذ و کاهش پهنای جوش استفاده شد. شارحاصل از ترکیب ماده نانو و حامل حلال الکلی متانول با درصد خاص هستند.

جدول(1) نشان‌دهنده مشخصات اصلی این نانو پودر می‌باشد. پس از ترکیب نانو ماده و حلال واسط، از یک هم‌زن مکانیکی به‌منظور ترکیب یکنواخت آن‌ها استفاده شد. به‌منظور اعمال این مواد به سطح قطعه‌کار از یک قلم‌مو استفاده و ضخامت لایه اعمال شده کنترل شد. بعد از اعمال شارها به سطح قطعه‌کار و اطمینان از آغشته شدن یکنواخت آن، اقدام به جوشکاری شد. قبل از ساخت محلول، به منظور اطمینان از اندازه شارهای فعال کننده سطحی از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی برای اندازه‌گیری استفاده شد.

با توجه به نتایج مربوط به این آزمون، اندازه ذرات گزارش شده تایید شد. در ادامه، به منظور اطمینان از عدم کلوخه‌شدن ذرات نانو در حین ساخت محلول، آزمون اندازه ذرات برای محلول نیز صورت پذیرفت. با توجه به نتایج مربوط به اندازه ذرات، مقدار کلوخه‌شدن ذرات در محلول در بازه قابل قبول می‌باشد (کمتر از ده درصد).

در این راستا به منظور ایجاد ترکیب مورد نیاز از ترازوی دیجیتال با دقت هزارم گرم، هم‌زن‌های مکانیکی و مغناطیسی استفاده شد. مدت زمان لازم برای استفاده از هم‌زن‌های مکانیکی و مغناطیسی 30 دقیقه تعیین شد.

جدول1- خواص فیزیکی و مشخصات نانو سیلیکون اکساید[17]

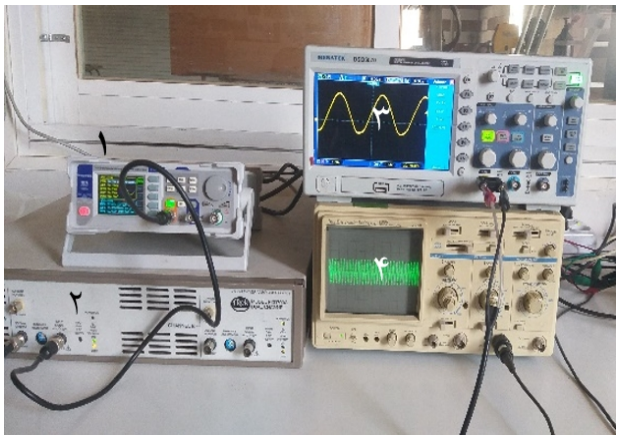
| $SiO_2$ | Ti | Ca | Na | Fe |
|---|---|---|---|---|
| 99.5% | 120ppm | 70ppm | 30ppm | 20ppm |
| Nanoparticles $SiO_2$ Purity | | | 99.5% | |
| Nanoparticles $SiO_2$ APS | | | 20-30nm | |
| Nanoparticles $SiO_2$ SSA | | | 180-600m2/g (Particles Size: 100% <40nm) | |
| Nanoparticles $SiO_2$ Color | | | white | |
| Nanoparticles $SiO_2$ Bulk Density | | | <0.10 g/cm3 | |
| Nanoparticles $SiO_2$ True Density | | | 2.4 g/cm3 | |

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20 ]

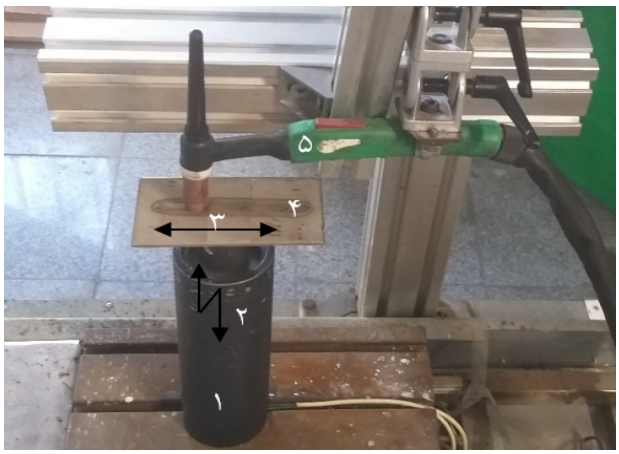
[ DOI: 10.47176/JWSTI.2024.12 ]

### 2-2-امواج فراصوت

به جهت ایجاد سیگنال الکتریکی تقویت شده AC با فرکانس فراصوت و دامنه 8 میکرون، از دستگاه ژنراتور موج فراصوت TREK مدل PZD700A و یک فانکشن ژنراتور دو کانال مطابق شکل (1) استفاده شد. جهت انتقال امواج فراصوت به قطعه کار از مجموعه ترنسدیوسر پیزوالکتریک با فرکانس کاری 20/3 کیلوهرتز استفاده شد. امواج فراصوت از طریق این ترنسدیوسر به قطعه کار مطابق شکل (2) منتقل می‌شود و جوشکاری برروی سطح بالای قطعه کار انجام می‌شود. بنابراین جهت امواج عمود بر راستای جوش می باشد.

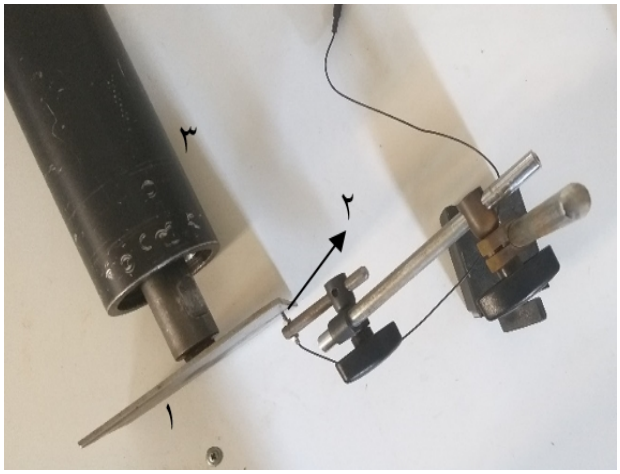



شکل1- تجهیزات تولید و اندازه‌گیری امواج فراصوت 1- فانکشن ژنراتور 2- ژنراتور فراصوت 3- دامنه و فرکانس خروجی از ژنراتور4- دامنه خروجی از سنسور




شکل2- ستاپ آماده شده جهت انجام آزمایش.1- مجموعه ترنسدیوسر 2- جهت ارتعاش 3- جهت حرکت میز4-قطعه کار 5-تورچ تیگ

با شماره مدل PU-02A با رزولوشن 1میکرومتر، و از مبدل، AEC-5502A-01 برای تبدیل ارتعاشات و میزان جابجایی سر ابزار به سیگنال الکتریکی استفاده شد (شکل 3).




شکل3- اندازه‌گیری دامنه ارتعاشات قطعه کار 1-قطعه‌کار 2-سنسور مجاورتی PU-02A 3- مجموعه ترنسدیوسر

اندازه‌گیری دامنه ارتعاشات به این ترتیب است که مطابق شکل (3) مجموعه ترنسدیوسر و قطعه کار متصل به آن به نحوی استقرار یافت که سنسور در فاصله 0/2 میلی‌متری سطح قطعه کار واقع گردد. مجموعه ترنسدیوسر به ژنراتور فراصوت متصل شد و در مود فرکانسی طولی ارتعاش یافت. با توجه به اینکه ولتاژ القایی توسط سنسور مذکور بسیار کوچک است، به منظور تقویت ولتاژ القایی، از ترنسدیوسر الکتریکی و برای نشان دادن این سیگنال تقویت شده از اسیلوسکوپ استفاده شد. لازم به ذکر است، با توجه به نوع کالیبراسیون، هر 5 میلی ولت القاشده در اسیلوسکوپ بیانگر یک میکرومتر جابجایی قطعه کار است.

در نهایت مجموعه ترنسدیوسر و قطعه کار برروی میز اتومات با سرعت پیشروی قابل تنظیم قرار گرفت وهمانطور که گفتیم، با توجه به موقعیت تورچ جوشکاری نشان داده شده در شکل(2) عملیات جوشکاری به صورت عمود بر سطح انجام شد.

پس از پایان آزمایش، از روی قطعه‌کار جوشکاری شده، 3 برش از ناحیه جوش تیگ معمولی، جوش تیگ با شار و جوش تیگ با شار فعال کننده و امواج فراصوت، با استفاده از فرایند وایرکات برش داده شده و با الکل کاملاً تمیز شد. سپس به منظور تعیین مقادیر عمق نفوذ، پهنای جوش و نسبت پهنای به عمق نفوذ جوش، نمونه مانت شد.

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20 ]

[ DOI: 10.47176/JWSTI.2024.12 ]

در ادامه برای صاف شدن سطح و حذف کامل اثرات برش، نمونه‌ها با سنباده‌زنی‌های مختلف از مش 600 تا 2000، به‌صورت دستی پرداخت شدند. سپس الکتروپولیش و الکترو اچ شدند. پس از انجام عمل پولیش و اچ، نمونه‌ها شسته و خشک و برای تصویربرداری آماده شدند.

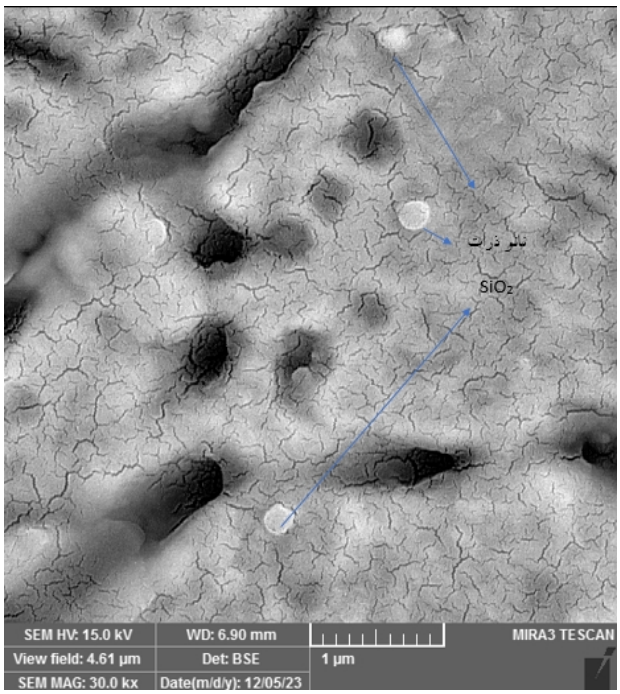
برای تصویربرداری از میکروسکوپ نوری مدل-OLYMPUS 530 استفاده شد. عکاسی با بزرگنمایی 10 برابر توسط دوربین مربوطه صورت پذیرفت. بعد از اتمام عکاسی، تصاویر در نرم‌افزار تحلیل تصاویر MIP وارد شده و اندازه‌گیری عمق نفوذ جوشکاری، پهنای جوش و محاسبه نسبت پهنا به عمق نفوذ جوشکاری صورت پذیرفت.

## 3- نتایج و بحث

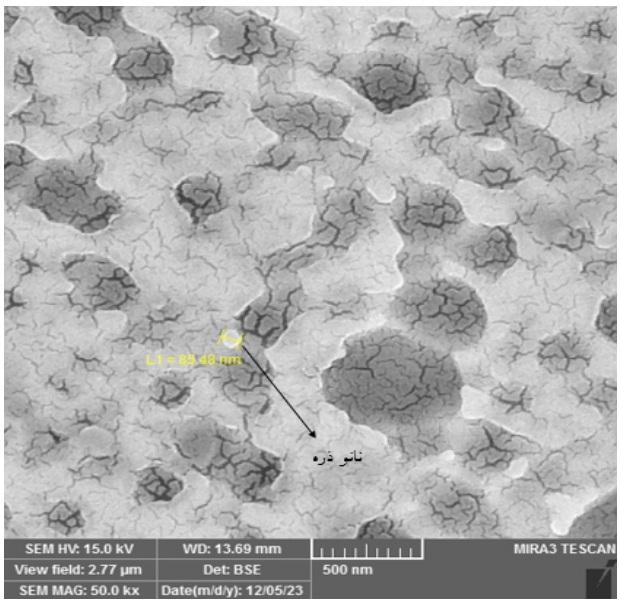
پس از مانت واچ نمونه‌های آزمایش شده، در ابتدا به جهت اطمینان از حضور ذرات نانو در حوضچه مذاب و عدم کلوخه شدن آن‌ها، تصویربرداری میکروسکوب الکترونی روبشی انتشار میدانی (FE-SEM) انجام شد. مشخص است که در صورت وقوع پدیده کلوخه‌شدن و یا عدم نفوذ ذرات نانو به حوضچه مذاب، تأثیر افزودن ذرات نانو در فرایند تیگ فعال کاهش‌یافته و اتصال حاصله دارای خواص مکانیکی مناسب نخواهد بود.

شکل (4) که از ناحیه نفوذ جوش نمونه حاوی ذرات نانو و فراصوت، عکسبرداری شد نشان‌دهنده حضور ذرات نانو سیلیکون اکساید در حوضچه مذاب می‌باشد. با توجه به این شکل مشهود است که ذرات نانو به صورت پراکنده در حوضچه مذاب قرار دارند و هیچگونه کلوخه‌شدن آن‌ها مشاهده نمی‌شود.

در شکل (5) جهت محاسبه اندازه نانو ذرات از نمونه با بزرگنمایی50 هزار برابر تصویر برداری شد. با توجه به این شکل اندازه نانو ذره سیلیکون اکساید حدود 85 نانومتر اندازه‌گیری شد. بیشتر شدن اندازه نانو ذرات از مقدار درج شده در استاندارد آن(20-30 نانومتر) می‌تواند به دلیل ترکیب آن‌ها با متانول باشد.




شکل4 - نمایش نانوذرات سیلیکون اکساید در حوضچه مذاب تصویر برداری با FE-SEM



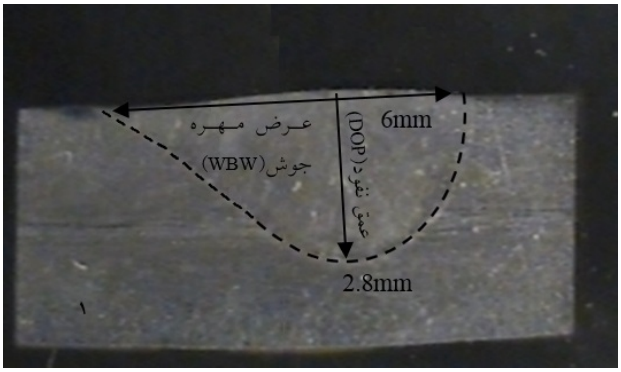

شکل5 - نمایش اندازه قطر یک نانو ذره سیلیکون اکساید برابر با 85/48 نانومتر در حوضچه مذاب تصویر برداری با FE-SEM

با توجه به شکل‌های (6 و7) مشاهده می‌شود که نه تنها با افزودن مواد نانو به حوضچه مذاب عمق نفوذ جوش به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد، بلکه عرض جوش هم به طرز چشمگیری کاهش می‌یابد. با توجه به شکل (8) مشهود است که با افزودن امواج پرفشار فراصوت به حوضچه مذاب پهنای

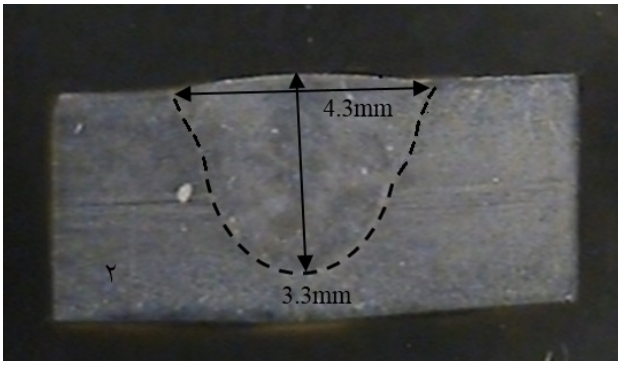
[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20 ]

[ DOI: 10.47176/JWSTI.2024.12 ]

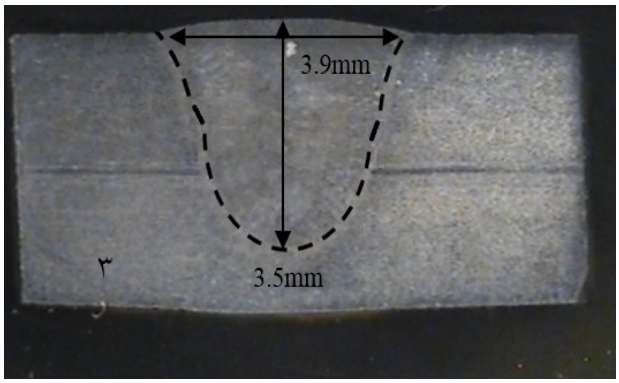
جوش کاهش می‌یابد و همچنین عمق نفوذ هم تاحدی افزایش داشته است که این افزایش نسبت به تاثیر نانو مواد، کمتر است.




شکل6- نمایش مقدار عمق نفوذ و عرض جوش فولاد 316L در جوشکاری تیگ معمولی

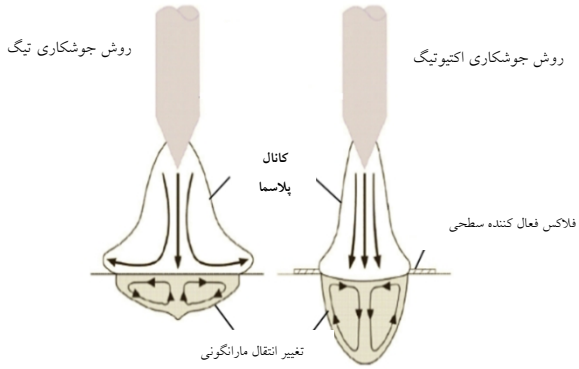



شکل7- نمایش مقدار عمق نفوذ و عرض جوش فولاد 316L در جوشکاری تیگ فعال شده با شار نانو




شکل8- نمایش مقدار عمق نفوذ و عرض جوش فولاد 316L در جوشکاری تیگ فعال با اعمال امواج فراصوت

دلیل اصلی افزایش عمق نفوذ وکاهش پهنای جوش در اثر اضافه کردن نانو مواد به حوضچه مذاب را می‌توان به خاطر تغییر در انتقال مارانگونی و تمرکز جریان دانست. همانطور که هیپل و رُپر[18]، نشان دادند که شارهای فعال کننده سطحی می‌توانند باعث تغییر انتقال مارانگونی از حالت برون‌گرا به حالت مرکزگرا و افزایش عمق نفوذ و کاهش پهنای اتصال شوند. همچنین باتوجه به این‌که شارهای اکسیدی، معمولاً اکسیدهای فلزی و نارسانای جریان الکتریسیته هستند لذا باعث افزایش مقاومت الکتریکی و کاهش سطح مقطع تخلیه قوس، تمرکز جریان و افزایش عمق نفوذ می شوند (شکل10).




شکل 9- نمایش تغییر انتقال مارانگونی و تمرکز جریان در جوشکاری تیگ فعال در مقایسه با روش تیگ مرسوم [18]

از طرف دیگر با توجه به‌این‌که وجود شار به‌عنوان یک لایه عایق روی سطح قطعه‌کار عمل می‌کند در نتیجه در فرایند جوشکاری، کاهش سطح مقطع تخلیه قوس و تمرکز کانال پلاسما را شاهد خواهیم بود. با تمرکز کانال پلاسما، شدت جریان و ولتاژ افزایش پیدا خواهند کرد. با افزایش ولتاژ و شدت جریان، حرارت اعمالی به قطعه‌کار نیز افزایش می‌یابد. بنابراین، متمرکز شدن کانال پلاسما و افزایش حرارت اعمالی به قطعه‌کار، اتصالی با عمق نفوذ بیشتر و پهنای جوش کمتر را در پی خواهد داشت [21-19].

علیرغم تاثیرات مثبت شار فعال کننده در حوضچه مذاب، اضافه کردن نانو مواد به بستر جوش می‌تواند نواقصی از جمله عدم توزیع یکنواخت این مواد در حوضچه مذاب و در نتیجه آن کلوخه‌شدن آن‌ها (با توجه به تمایل نانو مواد به تشکیل خوشه‌های بزرگ) و در نهایت ایجاد تمرکز تنش و کاهش استحکام نهایی جوش، داشته باشد.

براین اساس امواج پرفشار فراصوت می‌توانند جهت غلبه بر نواقص ذکر شده استفاده گردد که علاوه بر بالابردن کیفیت

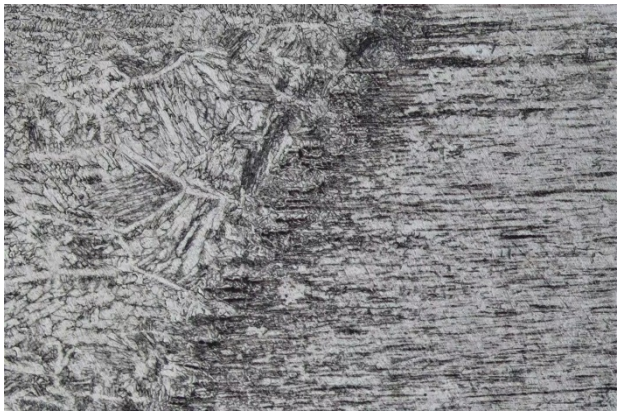
[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20 ]
[ DOI: 10.47176/JWSTI.2024.12 ]

جوش به تنهایی، به توزیع یکنواخت شار فعال کننده نیز کمک می‌کند.

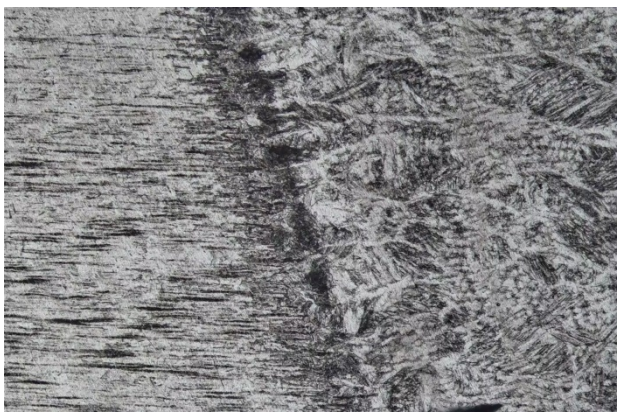
در مورد دلیل اصلی کیفیت بهتر جوش و به طبع آن، نفوذ بهتر و منظم‌تر و همچنین پهنای جوش کمتر بر اثر اضافه کردن ارتعاش فراصوت می‌توان گفت این امواج اثرات غیرخطی از قبیل اثر تشکیل حفره‌های کوچک در مایع بدلیل تنش کششی ایجاد شده از امواج صوتی و جریان صوت در فلز مذاب ایجاد می‌کند. اثر تشکیل حفره‌های کوچک، باعث تشکیل نقاط موقت موضعی فشار بالا در فلز مذاب می‌شود. چنین افزایشی در نقاط با فشارهای موضعی باعث افزایش نقطه ذوب می‌شود. در صورت بکارگیری امواج با شدت و قدرت کافی می‌توان انتظار سردسازی موضعی زیادی در هسته داشت که این خود به تشدید هسته‌زایی کمک می‌کند. فشرده‌سازی و در نهایت فروپاشی حباب‌های تولید شده پالس‌های فشاری از 100 تا 1000 مگاپاسکال تولید می‌کنند که این پالس‌ها از یکطرف منجر به اصلاح دانه‌های درشت و دندریت‌ها می‌شوند و از طرف دیگر پدیده کلوخه‌شدن را کاهش می‌دهد.

جریان صوتی را نیز می‌توان نوعی جریان متلاطم که در نزدیک یه حد فاصل میان جامد و مایع به علت اتلاف انرژی موج صوتی ایجاد می‌شود نامید.

این اثرات غیرخطی به طور موثری باعث مخلوط شدن بهتر مواد مذاب[21] و همچنین نانو موادها با فلز مذاب [5] و در نهایت حذف ناحیه مخلوط نشده در کل جوش شود. در حالت کلی می‌توان گفت در اثر اعمال انرژی فراصوت به قطعه کار، اصلاح دانه در ناحیه جوش رخ می‌دهد که این امر اصلی‌ترین دلیل بهبود خواص فیزیکی جوشکاری اکتیو تیگ می‌باشد. شکل‌های (10 و11) ریز سارختار فلز جوش درتیگ معمولی و تیگ همراه با نانو مواد و امواج فراصوت را نشان می‌دهد. با مقایسه دو شکل می‌توان افزایش تعداد دانه و ریزتر شدن آن‌ها را مشاهده کرد که در حقیقت اصلاح دانه صورت پذیرفته است. هنگامی‌که امواج فرکانس بالا به طور پیوسته در حوضچه مذاب منتشر می‌شوند، دامنه امواج تحت تاثیرنیروی ویسکوزیته مذاب کاهش می‌یابد که این امر منجر به تشکیل گرادیان صوت در محیط شده و در نهایت جریان مذاب را هدایت می‌کند. جریان فلزمذاب می‌تواند توزیع یکنواخت دمای مذاب را افزایش دهد در نتیجه این امر محیط هسته بهبود می‌یابد و باعث می‌شود دانه‌ها در همه جهات به طور یکنواخت رشد کنند. درنتیجه می‌توان گفت سرعت هسته‌زایی بهبود می‌یابد، موروفولوژی دندریت‌ها اصلاح می‌شود و محیط رشد دانه بهینه می‌شود. بنابراین به طور موثر ریزساختار درز جوش نیز اصلاح می‌شود [22].



شکل10 – ریزساختار فلزجوش و ناحیه متاثر از حرارت در جوشکاری تیگ معمولی



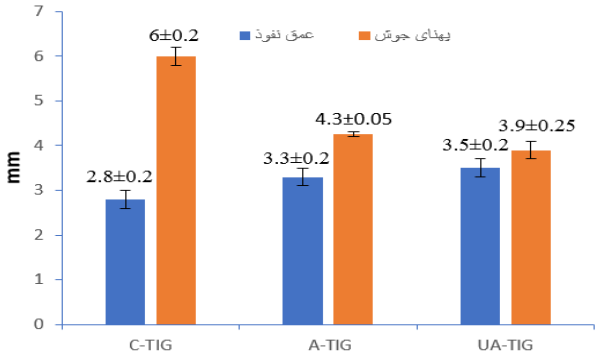
شکل11 – ریزساختار فلزجوش و ناحیه متاثر از حرارت در جوشکاری تیگ فعال با اعمال امواج فراصوت

شکل (12)، نتایج افزایش عمق نفوذ و کاهش پهنای جوش را در اثر استفاده از نانو مواد و امواج فراصوت نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که به جهت افزایش دقت نتایج، آزمایش‌های تجربی 3 بار تکرار شده و میانگین آن‌ها مبنای تحلیل این تحقیق قرار گرفته است. با توجه به شکل (12)، درصد افزایش عمق نفود در حالت اضافه کردن شار فعال کننده به حوضچه

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20 ]

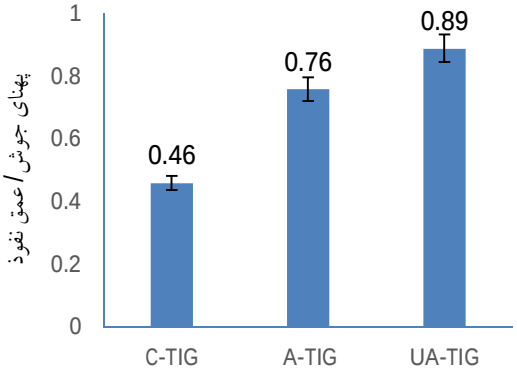
[ DOI: 10.47176/JWSTI.2024.12 ]

مذاب نسبت به تیگ معمولی (بدون استفاده از پودر نانو و امواج فراصوت) حدود 17/5 درصد محاسبه می‌شود که این درصد با اعمال امواج فراصوت به 25 درصد می‌رسد. همچنین میزان کاهش عرض جوش در تیگ فعال حدود 28 درصد محاسبه می‌شود که این میزان در اثر اعمال امواج فراصوت به حدود 35 درصد می‌رسد. در نتیجه می‌توان گفت اثر امواج فراصوت در پهنای جوش تاثیر بیشتری نسبت به عمق نفوذ دارد.




شکل12- مقایسه عمق نفوذ و پهنای جوش در روش‌های مختلف جوشکاری تیگ برروی فولادL 316 اندازه گیری شده با استفاده از نرم افزار MIP

شکل (13) نشان‌دهنده نسبت عمق نفوذ به عرض جوش می‌باشد. با توجه به شکل مشخص است که این نسبت در صورت اضافه شدن نانو مواد به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش داشته است و همچنین با اعمال امواج فراصوت نیز روند افزایشی ادامه داشته است. گفتنی است هرچه این عدد به مقدار یک نزدیکتر باشد می‌توان جوشی با کیفیت بهتر و مطلوب‌تر را انتظار داشت.




شکل13- مقایسه نسبت عمق نفوذ به پهنای جوش فولاد جوشکاری شده 316L در روش‌های مختلف جوشکاری تیگ

## 4- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر جوشکاری تیگ تحت شرایط اعمال شار فعال کننده و امواج پرفشار فراصوت، برروی فولاد 316L انجام شد. پس از جوشکاری نمونه‌هایی از سطح مقطع جوش برش داده شده و جهت مقایسه دو پارامتر مهم در جوشکاری قوس الکتریکی که عبارتند از عمق نفوذ و عرض مهره‌جوش، متالوگرافی انجام شد. نتایج نشان‌دهنده تاثیر قابل توجهی در این دوپارامتر در اثر اعمال شار نانو و امواج صوتی نسبت به تیگ معمولی بود. بطوری‌که عمق نفوذ در اثر استفاده از نانو مواد به میزان 17/5 درصد افزایش یافت. همچنین عرض مهره‌جوش نیز 28 درصد نسبت به تیگ معمولی کاهش پیدا کرد. این مقادیر در حضور امواج پر فشار فراصوت به ترتیب به 25 درصد افزایش و 35 درصد کاهش رسید. نسبت طول به عرض در اثر استفاده از نانومواد به حدود 65 درصد افزایش و در حضور امواج فراصوت به حدود 93 درصد افزایش رسید که این مقدار در تعیین کیفیت نهایی جوش عدد بسیار خوبی می‌باشد. با افزودن نانومواد $SiO_2$ به حوضچه مذاب دانه‌ها ریزتر شد و با اعمال امواج پرفشار فراصوت ریزساختار جوش نیز اصلاح شد.

## منابع

1-Taheri Moghaddam N., Rabiezadeh A., Khosravifard A., Ghalandari L.. 2023. Microstructure and mechanical properties assessment of dissimilar AA5083/AA6061 joint welded by GTAW. *Journal of Welding Science and Technology of Iran* 8(2): 23-35 (in Farsi).

2-Golestanehzadeh S., Mousavi Anijdan S.H., Najafi Dezdeh Monfared H.R.. 2022. Effect of oxide flux powders of $SiO_2$, MoO3 and CuO on the diffusion depth, microstructure and microhardness of GTAWed precipitation hardening martensitic 17-4PH steel. *Journal of Welding Science and Technology of Iran*. 8(1): 83-92 (in Farsi).

3-Kamlesh Kumara, Sushanta Chandra Deheria, Manoj Masanta. 2019. Effect of Activated Flux on TIG Welding of 304 Austenitic Stainless Steel. *Materials Today: Proceedings*. 18: 4792–4798.

4-Qihao Chen, Hongliang Ge, Chunli Yang, Sanbao Lin and Chenglei Fan. 2017. Study on Pores in Ultrasonic-Assisted TIG Weld of Aluminum Alloy, *Metals* 53, doi:10.3390/met7020053.

5-Fattahi M., Ghaheri A., Arabian N., Amirkhanlu F., Moayedi H.. 2020. Applying the ultrasonic vibration during TIG welding as a promising approach for the development of nanoparticle dispersion strengthened

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20 ]

[ DOI: 10.47176/JWSTI.2024.12 ]

13-Berthier A., Paillard P., Carin M., Valensi F., Pellerin S. 2012. TIG and A-TIG welding experimental investigations and comparison to simulation Part 1: Identification of Marangoni effect. *Science and Technology of Welding and Joining* 17(8): 609-615.
14-Dey H. C., Albert S. K., Bhaduri A. K., Kamachi Mudali U.. 2013. Activated flux TIG welding of titanium. *Weld World* 94(12): 84-89.
15-Arivazhagan B., Vasudevan M.. 2015. Studies on A-TIG welding of 2.25Cr-1Mo (P22) steel. *Journal of Manufacturing Processes* 18(3): 55-59.
16-Xu Chuan, Yuan Xinjian. 2022. The study of microstructure corrosion resistance and mechanical properties of ultrasonic assisted welding-brazing of Ti-Mg. *Journal of materials research and technology* 17(3): 467-477.
17-https://www.usnano.com/inc/sdetail/408.
18-Heiple C.R., Roper J.R.. 1982. Mechanism for minor element effect on GTA fusion zone geometry. *Weld Journal* 61: 97-102.
19-Dong W., Lu S., Li D., Li Y. G.. 2011. GTAW liquid pool convections and the weld shape variations under helium gas shielding. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 54: 1420-1431.
20-Knee B.J.. 1993. Review of data for the surface tension of pure metals. *International Materials Reviewes* 38: 157-192.
21-Cui Y., Xu C.L. Han Q.. 2006. Effect of ultrasonic vibration on unmixed zone formation. *Scripta Materialia* 55: 975–978.
22-Khosro Aghayani M., Niroumand B.. 2011. Effects of ultrasonic treatment on microstructure and tensile strength of AZ91 magnesium alloy. *Journal of Alloys and Compounds* 509: 114–122.
aluminum weldments. *Journal of Materials Processing Technology* 282.11672.
6-H. Dhandha Kamal, Badheka Vishvesh J.. 2015. Effect of activating fluxes on weld bead morphology of P91 steel bead-on-plate welds by flux assisted tungsten inert gas welding process. *Journal of Manufacturing Processes* 17: 48-57.
7-Zhang Z, He C, Li Y, Yu L, Zhao S, Zhao X. 2019. Effects of ultrasonic assisted friction stir welding on flow behavior, microstructure and mechanical properties of 7N01-T4 aluminum alloy joints. *Journal of Materials Science and Technology* 43: 1-13.
8-D. J Ramkumar, V. N. L. Elli, C. Gangineni, Ayush C., N. Arivazhagan, S. Narayanan. 2015. Effect of autogeneous GTA welding with and without flux addition on the microstructure and mechanical properties of AISI 904L joints. *Material Science Engineering A* 636: 1-9.
9-Ahmadi, E. and Ebrahimi, A.R. 2014. Welding of 316L austenitic stainless steel with activated tungsten inert gas process. *Journal of Materials Engineering and Performance* 24: 1065-1071.
10-Ahmadi, E. and Ebrahimi, A.R. 2013. The Effect of Activating Fluxes on 316L Stainless Steel Weld Joint Characteristic in TIG Welding Using the Taguchi Method. *Journal of Advanced Materials and Processing* 1: 55-62.
11-Ahmadi, E., Ebrahimi, A.R. and Azari Khosroshahi, R. 2013. Welding of 304L Stainless Steel with Activated Tungsten Inert Gas Process. *International Journal of ISSI* 10: 27-33.
12-Chen Q., Lin S., Yang C., Fan C., Ge H.. 2017. Grain fragmentation in ultrasonic-assisted TIG weld of pure aluminum. *Ultrasonics Sonochemistry* 39: 403-413.

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20 ]

[ DOI: 10.47176/JWSTI.2024.12 ]