

تأثیر نانو ذرات آلومینای روکش شده با اکسید منگنز بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد کم کربن در فرآیند جوشکاری GMAW

فرزاد پهنانه^۱، مسعود آقاخانی^{۲*}، فرید نعیمی^۳، معین منصوبی^۴

۱- گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی مهندسی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۳- مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجفآباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجفآباد، ایران

۴- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

* m.aghakhani@razi.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
در این تحقیق از نانو ذرات سنتز شده کامپوزیتی اکسید فلزی بر پایه آلومینا همراه با پوشش منگنز به منظور بهبود ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال لب به لب جوش یک پاسه ورق فولاد کم کربن با استفاده از فرآیند GMAW استفاده شده است. پس از انتخاب پارامترهای مناسب جوشکاری و اضافه نمودن مقادیر ۰/۲۵ و ۰/۵ گرم از نانو پودر به دست آمده به درز جوش و انجام فرآیند جوشکاری، نمونه‌های مورد نیاز جهت آزمون ریز سختی سنجی و کشش آماده شدند. سپس، نمونه بهینه با توجه به عدم وجود عیوب ظاهری و متالورژیکی در ریزساختار و با توجه به بیشترین استحکام کششی نهایی انتخاب شد. ریزساختارهای حاصل با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و سطح شکست نمونه ورق بدون مواد نانو نمونه بهینه با حضور مواد نانو مورد مطالعه قرار گرفت. نانو ذرات به منطقه جوش نفوذ کرده و باعث ایجاد ساختار سوزنی شکل (فریت سوزنی) و در هم بافته گردیده است. علت تشکیل این ساختار را می‌توان حضور نانو ذرات در حین فرآیند جوشکاری و تشکیل مراکز جوانه زا جهت ایجاد جوانه‌های مناسب در مکان‌های مناسب دانست. با توجه به نتایج، استحکام کششی نهایی و درصد ازدیاد طول به ترتیب از ۳۸۷ مگاپاسکال و ۶/۸ درصد به ۴۰۸ مگاپاسکال و ۱۳/۶ درصد افزایش یافت. مقدار میانگین سختی در ناحیه فلز جوش در نمونه جوشکاری شده با ۰/۵ گرم پودر نسبت به نمونه بدون پودر از ۱۵۸ VHN به ۱۷۲ VHN افزایش یافت.	دریافت: ۱۷ فروردین ۱۳۹۸ پذیرش: ۱۸ خرداد ۱۳۹۸ کلید واژگان: نانو ذرات $MnO-Al_2O_3$ فرآیند جوشکاری GMAW ریزساختار استحکام کششی نهایی ریز سختی

The effect of Al_2O_3 Nano-particles coated with manganese oxide on the microstructure and mechanical properties of low carbon steel using GMAW process

Farzad Pahnaneh¹, Masood Aghakhani^{2*}, Farid Naeimi³, Moeen Mansoubi⁴

1. Department of Metallurgy and Materials Engineering, Faculty of Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

3. Advanced Materials Research Center, Materials Engineering Department, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

4. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

* m.aghakhani@razi.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Doi:

10.30495/apme.2021.681628

Keywords:

$MnO-Al_2O_3$ Nano-particles

GMAW process

Microstructure

Ultimate tensile strength

Micro-hardness

Abstract

This paper reports an investigation carried out to determine the effect of aluminum oxide Nano-particles coated with manganese on the microstructure and mechanical properties of single-pass butt joint of low carbon steel plates of 6.0 mm thicknesses using gas metal arc welding process. After selecting appropriate welding parameters and adding 0.25 gr and 0.5 gr of Nano-particles into the joint line and carrying out the welding, the samples were prepared for micro hardness and tensile tests. Furthermore, the sample with optimum Nano-particles having the highest ultimate tensile strength and without having any visible and metallurgical defects in the microstructure was selected for further investigation. Subsequently, microstructures of the weld without and with optimum Nano-particles were studied using optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM) and the fractured surface of the weld obtained from tensile testing was investigated for the samples without Nano particles and the optimum sample with Nano materials were studied. The results show that Nano-particles added to the weld pool penetrated into the weld zone and helped in formation of acicular ferrite in the microstructure. Based on the results obtained, ultimate tensile strength and percentage of elongation of samples without Nano-particles and with optimum Nano-particles were increased from 387 MPa and 6.8% to 408 MPa and 13.6%, respectively. In addition, the average hardness of the weld metal without Nano-particles and with optimum Nano-particles were increased from 158 VHN to 172 VHN respectively.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Farzad Pahnaneh, Masood Aghakhani, Farid Naeimi, Moeen Mansoubi, The effect of Al_2O_3 nano-particles coated with manganese oxide on the microstructure and mechanical properties of low carbon steel using GMAW process, New Process in Material Engineering, 2021, 15(1), 35-48.

۱- مقدمه

جوشکاری یکی از مهم‌ترین فرآیندهای ساخت و تولید در صنعت و امروزه جوشکاری یک تکنیک مهم و حساس در زمینه اتصال دائم قطعات در جامعه صنعتی می‌باشد [۱]. کشور ما در حال توسعه مسیر صنعتی بوده و از این رو صنعت جوش برای کشور از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در سال‌های اخیر، با پیشرفت روزافزون صنایع تولیدی شاهد ارتقای کیفیت محصولات و بالا رفتن راندمان این صنایع هستیم [۲]. در این میان جوشکاری قوس الکتریکی تحت گاز محافظ و الکترودمرفی (GMAW)، جزء فرآیندهای پرکاربرد برای ایجاد اتصالات با کیفیت بالا، محسوب می‌گردد. قابلیت جوشکاری اکثر آلیاژها، سرعت بالا، کاهش اعوجاج و تنش پسماند در قطعات، نرخ رسوب بالا، قابلیت جوشکاری پیوسته و بدون توقف، قابلیت اتوماسیون بسیار خوب این روش و جوشکاری در تمام وضعیت‌ها باعث افزایش روزافزون و کاربرد وسیع آن در صنایع به خصوص صنعت نفت و گاز که مهم‌ترین صنعت در کشور ما محسوب می‌شود، شده است [۳]. با توجه به اینکه جوشکاری به عنوان فرآیند ویژه در تولید نقش دارد و در سال‌های اخیر پیشرفت‌های محسوسی در راستای پیشرفت دیگر صنایع داشته است. کیفیت جوش نقش مهمی به عنوان بهبود دهنده استحکام، سختی و چقرمگی محصولات را بازی می‌کند. کیفیت محصولات جوش به وسیله پارامترهای مختلفی همانند؛ هندسه جوش، نرخ رسوب و خواص مکانیکی ارزیابی می‌شود [۲].

استفاده از پوشش فعال سطحی که با رخ دادن این مکانیزم تمرکز قوس افزایش یافته و منجر به افزایش چگالی جریان در رأس قوس می‌شود و به طور کلی با کاهش حرارت ورودی می‌توان به میزان رقت بالا، هندسه و ریزساختار مناسب و در نتیجه خواص مکانیکی مطلوب در جوش دست‌یافت. در جوشکاری با تغییر پارامترها، ریزساختار جوش تغییر می‌کند و هدف به دست آوردن ریزساختار مناسب‌تر از فلز پایه می‌باشد. با توجه به تشکیل فریت سوزنی، فریت ویدمن

اشتاتن، فریت مرزدانه‌ای در فلز جوش، سعی بر ایجاد فریت سوزنی در فلز جوش بوده است. از آنجا که این نوع فریت یعنی فریت سوزنی بر روی آخال‌های ریز و حفرات گازی جوانه‌زنی و رشد می‌کند با اضافه نمودن نانو ذرات به حوضچه جوش مراکز جوانه‌زا را برای تشکیل فریت سوزنی ایجاد شد [۴]. فاکتورهای متعددی بر گسترش میکرو ساختار و خواص مکانیکی جوش وجود دارد؛ ترکیب شیمیایی فلز جوش، زمان سرد شدن، مقدار اکسیژن فلز جوش و اندازه دانه آستنیت از جمله عوامل اثرگذار بر ریزساختار و سختی جوش می‌باشد [۴]. در فولاد مورد استفاده به خاطر پایین بودن مقدار عناصر آلیاژی و مقدار کربن، این فولادها ابتدا به صورت فریت دلتا منجمد می‌شوند. سپس در حین سرد شدن، فریت دلتا به آستنیت تبدیل می‌شود. دانه‌های آستنیت نیز مانند فریت دلتا ستونی بوده اما دقیقاً بر روی دانه‌های فریت دلتا منطبق نمی‌باشند با کاهش دما، آستنیت به انواع شکل‌های فریت تبدیل می‌شود. این فریت‌ها را می‌توان به سه ساختار کلی تقسیم کرد. اولین ساختار فریتی که در حین سرد شدن به وجود می‌آید، فریت بی‌شکل یا فریت اولیه و یا همان فریت مرزدانه‌ای است. این فریت معمولاً در مرز دانه‌های آستنیت جوانه‌زنی کرده و رشد می‌کند. رشد این فاز مستلزم نفوذ با برد زیاد کربن در آستنیت است. در دمای پایین‌تر فریت ویدمن اشتاتن با مکانیزم جابجایی گروهی اتم‌ها (Displacive) از روی فریت مرزدانه‌ای یا مرز دانه‌های آستنیت جوانه‌زنی و رشد می‌کند. این نوع فریت شامل ورقه‌های موازی فریت است که با مرزهای زاویه کوچک از هم جدا می‌شود. در حین رشد آن کربن از اطراف ورقه به درون آستنیت پس زده شده و منجر به تولید فازهای ثانویه کشیده بین ورق‌ها می‌گردد. پس از اشغال شدن تمامی مرز دانه‌های آستنیت، جوانه‌زنی فریت سوزنی درون دانه‌های آستنیت و از روی آخال‌های غیرفلزی شروع می‌شود. این فریت با جهت‌گیری تصادفی از روی آخال‌ها جوانه می‌زنند. اندازه مؤثر این فریت‌ها بسیار کوچک بوده و با مرزهای زاویه بزرگ از هم جدا می‌شوند،

جایابی مارانگونی^۱، باعث تغییر در هندسه جوش می‌شود [۹]. آقاخانی و همکاران گزارش کردند که در فرآیند جوشکاری زیرپودری فولاد ساده کربنی (St37) با افزایش ضخامت لایه نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم تا ۰/۲ mm نفوذ جوش ثابت ماند، اما با افزایش لایه نانو ذرات تا ۰/۳ mm نفوذ جوش کاهش یافت که تا ضخامت ۰/۷۵mm در همین مقدار ثابت ماند. افزایش ضخامت نانو ذرات از ۰/۷۵ mm تا ۰/۸ mm افزایش چشم‌گیری در نفوذ جوش داد [۱۰]. از سوی دیگر ثابت شد که حضور اکسید فلزی برخی عناصر نظیر زیرکونیوم، نیکل، مولیبدن و تیتانیوم می‌تواند باعث تشکیل هسته فریت شوند [۶]. مطالعات سیریل ویمالراج و همکاران در سال ۲۰۱۶ نشان می‌دهد که نانو ذرات در جوشکاری GMAW و TIG باعث بهبود ریزساختار خواص مکانیکی و فیزیکی جوشکاری در فولاد ساده کربنی (St37) شده است [۱۱]. سریقید ماهان و همکاران اثر نانو ذرات TiO_2 را بر بخار ناشی از جوشکاری، ریزساختار و هندسه جوش در فولاد ساده کربنی را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که؛ حدود ۸۰ درصد بخار ناشی از جوشکاری کمتر و ریزساختار جوش مناسب‌تر و همچنین باعث افزایش سختی و نفوذ جوش شده است [۱۲]. محمد مازامیرا و همکاران اثر نانو ذرات TiO_2 را بر ریزساختار و هندسه جوش بررسی نمودند، نتایج نشان می‌دهد که نانو ذرات در جوشکاری باعث تمرکز قوس، بهبود هندسه و نفوذ جوش و کاهش اندازه دانه و افزایش خواص مکانیکی می‌شود [۱۳]. مطالعات تانویر و همکاران نشان داد، اثر نانو ذرات Al_2O_3 در جوشکاری FSW باعث کاهش اندازه دانه و بهبود ریزساختار و افزایش خواص مکانیکی ناحیه جوشکاری شده است [۱۴]. خواص مطلوب نانو ذرات و ایجاد ساختار درهمبافته و دندرتی، باعث افزایش خواص مکانیکی آلیاژ می‌شود. هدف از این تحقیق، تأثیر نانو ذرات آلومکسان روکش شده با منگنز بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ St37 که بیشترین استفاده در سازه‌های فلزی را به خود اختصاص داده، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند.

همچنین ساختار آشفته و درهمبافته آن‌ها از جمله مکانیزم‌های افزایش استحکام و چقرمگی توسط این ساختار می‌باشد [۴-۵]. یکی دیگر از مواردی که منجر به افزایش کیفیت جوش می‌شود، مقدار آخال‌های حوضچه جوش است. هرچه میزان آخال‌های موجود در حوضچه جوش بیشتر و ریزتر باشند احتمال تشکیل فریت سوزنی بیشتر می‌شود [۴]. البته افزایش بیش از حد آخال‌ها در حوضچه جوش منجر به کاهش خواص مکانیکی می‌شود، در نتیجه باید مقدار و اندازه آخال‌ها بهینه باشند. مواد نانو دارای سطح منحصر به فرد (نسبت سطح به اندازه) می‌باشد. مطالعه در زمینه نانو ذرات و کاربرد آن‌ها در زمینه‌های مختلف، همواره به عنوان یک ایده جدید توسط محققان عرصه‌های مختلف علمی بررسی و دنبال شده است. در فرآیندهای مختلف جوشکاری نیز مطالعاتی گسترده‌ای جهت افزودن و بررسی تأثیر نانو ذرات‌های مختلف بر ریزساختار، خواص مکانیکی، خواص خوردگی، هندسه جوش صورت گرفته است. استفاده از نانو تکنولوژی در جوشکاری از اواخر قرن بیستم معرفی شد. با این حال مطالعات اندکی درباره نقش نانو ذرات در جوشکاری انجام شده است. برخی عناصر مانند اکسیژن، سلنیوم و گوگرد به عنوان اجزای فعال سطح شناخته می‌شوند. موادی نظیر Fe_2O_3 ، SiO_2 ، TiO_2 ، $MgCO_3$ ، NiO و Cr_2O_3 در تحقیقات انجام شده به عنوان پوشش فعال روی سطح فلز به کار گرفته شده‌اند. پوشش فعال بر روی سطح فلز می‌تواند با تغییر جهت جریان سیال در حوضچه مذاب و تغییر در اندازه‌ی دانه‌بندی بر خواص مکانیکی جوش تأثیر بگذارد [۶-۷]. پال و مایتی اثر نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم را بروی خواص مکانیکی الکتروود AWS E 11018M بررسی کردند و نتیجه گرفتند انرژی ضربه شاری بهتر شده است [۸]. آقاخانی و همکاران به مدل‌سازی اثر نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر ارتفاع جوش فولاد ساده کربنی (St37) توسط شبکه عصبی مصنوعی پرداختند و نتیجه گرفتند که در اثر حرارت ناشی از قوس، گاز اکسیژن موجود در نانو ذرات تجزیه شده که با تأثیر بر

۲- مواد و روش انجام آزمایش‌ها

۲-۱- تهیه نانو ذرات

برای تهیه نانو ذرات موردنیاز، از امواج آلتراسونیک به همراه حرارت دهی در کوره استفاده شد. در ابتدا بوهیمیت موردنیاز را به روش رسوب‌دهی تهیه کرده و برای انجام این کار طی ۱۰ مرحله مقدار ۴۹ گرم سدیم هیدروکسید (NaOH) با ۵۰ میلی‌لیتر آب مخلوط و سپس ۲۰ گرم آلومینیوم نترات ۹ آب به $(Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O)$ را در ۳۰ میلی‌لیتر آب حل کرده و به‌طور آهسته و قطره قطره، محلول سدیم هیدروکسید به محلول آلومینیوم نترات اضافه شد. رسوب شیری رنگ به‌دست‌آمده به مدت ۳ ساعت در حمام آلتراسونیک^۲ گذاشته و بعد از یک دست شدن رسوب، آن را به مدت ۴ ساعت داخل کوره با دمای ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد [۸].

۲-۲- فرآیند جوشکاری

پس از تهیه نانوذرات موردنیاز، مقادیر ولتاژ جوشکاری، آمپر و سرعت حرکت به ترتیب ۲۸ ولت، ۱۱۰ آمپر و ۸ سانتی‌متر بر دقیقه انتخاب شد. در این تحقیق از ورق‌های فولاد St37 گرید ۲ با اندازه‌های $۲۰۰ \times ۱۰۰ \times ۶$ میلی‌متر استفاده شد. قبل از شروع جوشکاری و قرار دادن پودر نانو ذرات داخل درز جوش، برای جلوگیری از ورود چربی و آلودگی‌های دیگر، سطح ورق‌ها با استون تمیز شد. ترکیب شیمیایی فلز پایه با استفاده از آنالیز شیمیایی ورق به دست آمد و در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین ترکیب شیمیایی سیم جوش مورد استفاده توسط آزمایش اسپکتومتری نشری مشخص شد (جدول ۲).

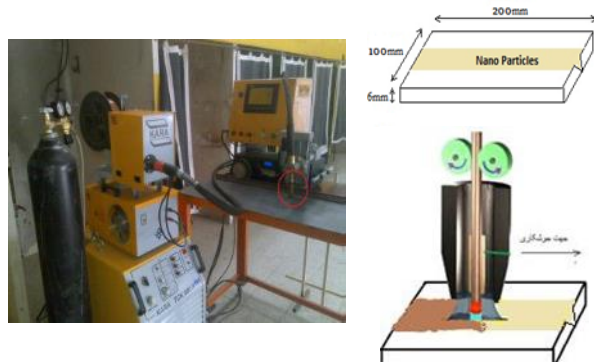
جدول (۱): ترکیب شیمیایی فلز پایه

عنصر	درصد وزنی
C	۰,۱۳۶
Mn	۰,۳۶۶
Si	۰,۲۲۵
S	۰,۰۰۸
Ni	۰,۰۳۴
P	۰,۰۱۹

جدول (۲): ترکیب شیمیایی فلز پرکننده

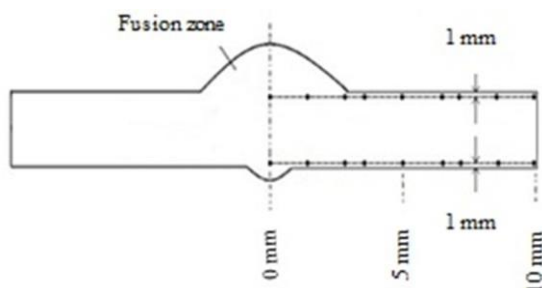
عنصر	درصد وزنی
C	۰,۱۶
Mn	۱,۴
Si	۰,۰۸۳
S	۰,۰۱۹
Ni	۰,۰۳
P	۰,۰۲۴

گاز محافظ مورد استفاده، ۹۹/۹۸ درصد گاز دی‌اکسید کربن با جریان ۲۰ لیتر بر دقیقه تنظیم شد. جوشکاری با استفاده از دستگاه میگ اتوماتیک شرکت KARA TCK 60 P (شکل ۱) با جریان مستقیم و قطبیت معکوس (DCRP) طبق استاندارد AWS (WHB) انجام شد [۱].



شکل (۱): دستگاه GMAW و نحوه انجام فرآیند جوشکاری

مقادیر ۰/۲۵ و ۰/۵ گرم از پودر تهیه‌شده را داخل درز جوش ریخته و جوشکاری انجام شد. به‌منظور مشاهده تغییرات ریزساختاری پس از اتمام جوشکاری، قطعات به‌وسیله کاتر در راستای عمود بر خط جوش به فاصله ۱۰ میلی‌متر از لبه جهت مطالعه و بررسی ریزساختار نواحی مختلف جوش بریده شدند. سطح مقطع برش خورده ابتدا سنباده‌زنی به‌وسیله سنباده‌های، ۱۰۰ تا ۳۰۰۰ و سپس توسط خمیر الماسه ۱ میکرون پولیش داده شدند و بعد سطح مقطع قطعات به‌وسیله محلول ۲ درصد نایتال به مدت ۱۵ ثانیه اچ گردید. پس از آماده شدن قطعات، ریزساختار نواحی مختلف جوش و فلز پایه به‌وسیله میکروسکوپ نوری مدل 1450 VP BEL در



شکل (۴): نقاط نمونه مورد بررسی برای میکروسختی

۳- نتایج و بررسی

۳-۱- نانو ذرات تهیه شده

شکل ۵، نانو ساختارهای منگنز-آلوموکسان را بعد از کلسینه شدن در کوره نشان می‌دهد که نانو میله‌های سوزنی شکل اکسید فلزی $MnO-Al_2O_3$ هستند. نانو ساختارها، دارای ۲۰ نانومتر قطر و طول ۵۰-۱۰۰ نانومتر هستند. این ساختارهای سوزنی شکل از به هم پیوستن نانو ذرات ریزتری تشکیل شده و سطحی کاملاً زبر و متخلخل دارند.

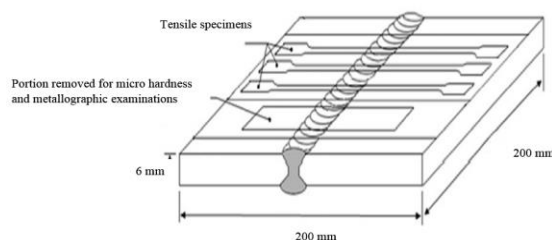
شکل ۶ آنالیز تفکیک انرژی^۳ مربوط به نانو ذرات سنتز شده را نشان می‌دهد؛ همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است ۱/۶ درصد عنصر Mn در نمونه وجود دارد در مقابل ۳۸/۳۵ درصد Al که به خوبی نشان می‌دهد عمده نانو ذرات مربوط به آلومینا است که در سطح خود مقادیر اندکی Mn جذب کرده است در نتیجه می‌توان گفت که نانو ذرات آلومینا به خوبی توسط اکسید Mn احاطه شده‌اند؛ البته تمامی این عناصر در فاز اکسیدی خود می‌باشند.

جدول (۳): نتایج آنالیز EDS

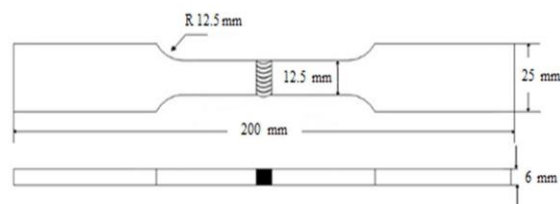
عنصر	O	Al	Mn	کل
درصد وزنی	۶۰,۰۵	۳۸,۳۵	۱,۶	۱۰۰
درصد اتمی	۷۱,۸۶	۲۷,۵۸	۰,۵۶	۱۰۰

بزرگنمایی‌های مختلف مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. همچنین برای مشخصه یابی بهتر ریزساختار از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل AIS 2300C استفاده شد. برای تعیین تقریبی ترکیب شیمیایی و شناسایی فازها در مناطق مختلف اتصال از آنالیز نقطه‌ای (EDS 550 i) استفاده شد [۱۵].

بعد از انجام جوشکاری، مطابق شکل ۲ از هر ورق سه نمونه جهت انجام آزمایش کشش و یک نمونه جهت سختی سنجی و متالوگرافی بریده شد. نمونه‌ها مانند شکل ۳ طبق استاندارد ASTM E8 با استفاده از دستگاه CNC تهیه شد. آزمایش کشش توسط دستگاه SANTAM STM - 600 با ظرفیت ۶۰ تن و بارگذاری با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. برای انجام آزمایش ریزسختی، مطابق شکل ۴، در فاصله ۱ میلی‌متری از بالا و پایین ورق، سختی مربوط به نقاط را اندازه‌گیری کرده و سپس میانگین مقادیر در نظر گرفته شد. با توجه به تقارن نمونه، اندازه‌گیری فقط از یک طرف انجام شد. بار اعمال شده برابر ۳۰۰ گرم و مدت زمان اعمال بار ۱۰ ثانیه بود. دستگاه مورد استفاده در این آزمایش AMSLER OTTO WOLPERT بوده و سختی سنجی طبق استاندارد ASTM E384 [۱۶] انجام شد.

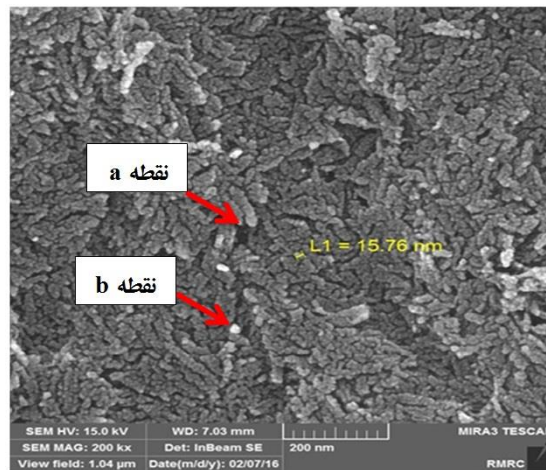


شکل (۲): شماتیک نحوه نمونه‌گیری از صفحات جوش شده [۱۰]

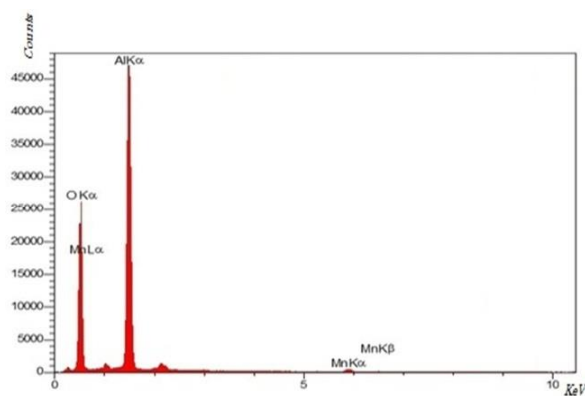


شکل (۳): هندسه و اندازه نمونه‌های آزمایش کشش بعد از جوشکاری

در طیف a مربوط به نانو ذرات بوهمیت پیک‌های شاخصی وجود دارد که به خوبی فاز بوهمیت را تأیید می‌نمایند. پیک‌های ۴۸۲، ۶۳۱ و ۷۴۴ مربوط به موده‌های ارتعاشی پیوندهای Al-O-Al در ساختار بوهمیت است. همچنین دو پیک ۳۰۹۰ و ۳۳۳۱ مربوط به ارتعاشات کششی پیوندهای Al-OH در سطح کریستال‌های بوهمیت هستند. دو پیک شاخص ۱۰۷۱ و ۱۱۷۵، نیز مربوط به ارتعاشات خمشی پیوندهای هیدروژنی HO-Al، Al-OH می‌باشند. پیک ۱۳۸۴ مربوط به ناخالصی نیترات درون نمونه پودری است. در حالی که پیک ۱۶۳۷ مربوط به آب درون کریستالی است. در طیف b مربوط به نمونه منگنز - آلوموکسان سنتزی، اتصال گروه‌های شیف - باز به سطح نانو ذرات بوهمیت به خوبی قابل تأیید است. پیک شاخص ۱۶۵۹ مربوط به ارتعاشات کششی پیوندهای C=N در مولکول شیف - باز است. در حالی که دو پیک ۱۴۱۶ و ۱۶۰۴ مربوط به ارتعاشات کششی ارتعاشات کششی گروه‌های کربوکسیلات تشکیل شده در سطح بوهمیت است. این تأیید می‌کند که مولکول‌های شیف - باز به سطح نانو ذرات بوهمیت اتصال یافته و آلوموکسان را به وجود آورده‌اند. البته حضور پیک‌های شاخص بوهمیت نشان می‌دهد که برخی از گروه‌های OH بوهمیت نتوانسته‌اند با شیف باز پیوند دهند همچنین طیف C طیف منگنز - آلوموکسان را بعد از کلسینه شدن نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است در اثر کلسینه شدن ساختار بوهمیت به اکسید آلومینیوم تبدیل شده است و گروه‌های عاملی شیف - باز آلوموکسان دچار سوختن شده و به جز مقادیری کربن کاملاً از بین رفته که در این میان کاتیون‌های Mn^{2+} به نانو ذرات اکسید منگنز تبدیل شده‌اند که بر روی نانو ذرات آلومینا قرار گرفته‌اند. پهن‌شدگی طیف در ناحیه ۴۰۰-۱۰۰۰ نشان‌دهنده‌ی به وجود آمدن فاز آلومینا است که پیک ۸۸۰ می‌تواند مربوط به ارتعاشات کششی پیوندهای Mn-O باشد. پیک‌های ۱۵۷۵ و



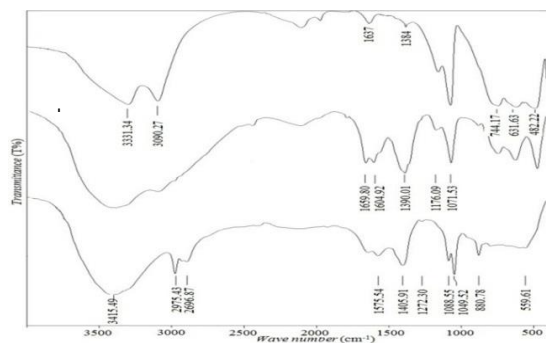
شکل (۵): تصاویر FESEM نانو ذرات MnO-Al₂O₃



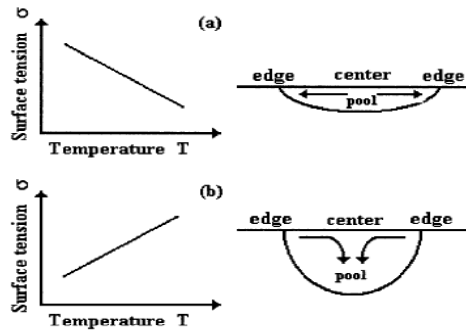
شکل (۶): آنالیز تفکیک انرژی نانو ذرات MnO-Al₂O₃

در نقطه a شکل ۵

جهت بررسی نانو ذرات تهیه شده از آزمایش طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز^۴ استفاده شد. شکل ۷ طیف‌های مربوط به نمونه‌های بوهمیت، منگنز - آلوموکسان و منگنز - آلوموکسان کلسینه شده در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد.



شکل (۷): نتایج طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز مواد سنتز شده



$$(a) \frac{\partial \sigma}{\partial T} < 0; \quad (b) \frac{\partial \sigma}{\partial T} > 0$$

شکل (۸): تغییر جهت همرفت مارانگونی در ارتباط با کشش سطحی در حوضچه جوش، (a) قبل از اضافه کردن مواد نانو (b) بعد از اضافه کردن مواد نانو [۴-۱۰-۱۷-۱۸]

۳-۳- اثر نانو ذرات بر ریزساختار

ساختار فلز جوش مربوط به نمونه با نانو ذرات و بدون نانو ذرات شکل ۹ نشان داده شده است.

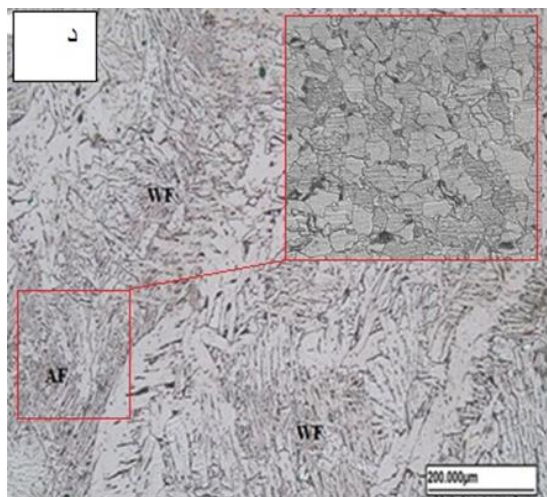
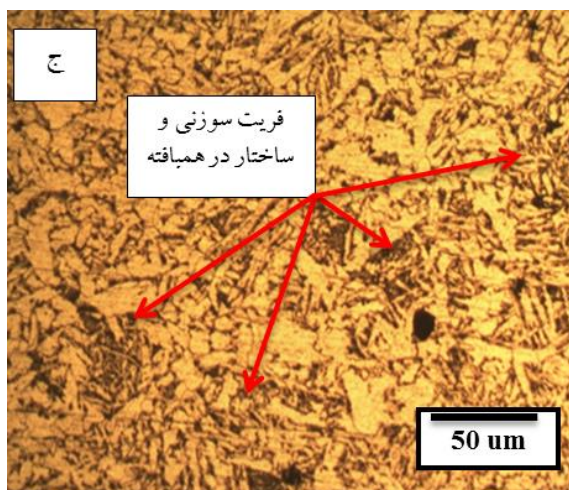
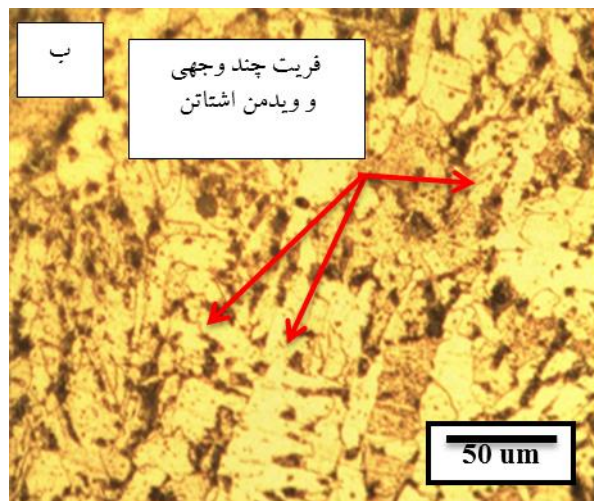
با توجه به شکل ۹ فولاد St37 با ۰/۱۳ درصد کربن، دانه‌های آستنیت بالاتر از ۷۲۳ درجه سانتی‌گراد در فلز پایه وجود دارد. استحاله آستنیت به فریت در فلز جوش که نانو ذرات وجود ندارد به گونه‌ای است که هنگامی که آستنیت از درجه حرارت بالا سرد می‌شود، فریت در مرز دانه‌ها (فریت مرزدانه‌ای) جوانه و به سمت داخل رشد می‌کند و همچنین با کاهش دما فریت ویدمن اشتاتن به جای آن تشکیل می‌شود و به صورت تیغه‌های که در یک جهت رشد سریع دارند از مرز دانه به سمت مرکز دانه رشد کرده است. در نمونه‌ای که حداکثر ذرات نانو وجود دارد ریزساختار غالب فریت سوزنی است که دلیل این امر وجود نانو ذرات می‌باشد که افزودن نانو ذرات منحنی^۵ CCT را به سمت زمان‌های کوتاه‌تر و درجه حرارت‌های پایین‌تر انتقال می‌دهد و به همین دلیل با نرخ سرد کردن ثابت، بجای تشکیل فریت مرزدانه‌ای ویدمن اشتاتن، فریت سوزنی به وجود آمده است [۴-۱۹] همچنین ذرات نانو در منطقه متأثر حرارت باعث ریزتر شدن دانه‌ها شده است که دلیل این امر می‌تواند، کاهش زمان باقی ماندن در دمای بالا و کاهش حرارت در

۲۹۷۵ نیز نشان‌دهنده‌ی حضور مقادیری ساختار کربنی ناشی از سوختن گروه‌های آلی در ساختار اکسید فلزی است.

۳-۲- اثر نانو ذرات بر هندسه جوش

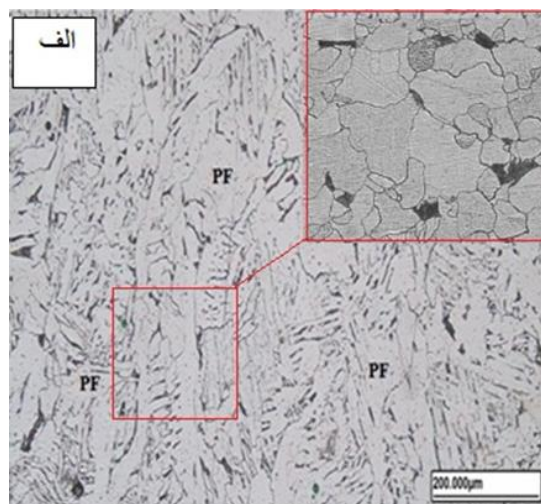
در اثر عملیات جوشکاری با ثابت در نظر گرفتن پارامترهای جوشکاری، با افزایش میزان نانو ذرات عمق نفوذ افزایش یافته و پهنای جوش کاهش یافته است.

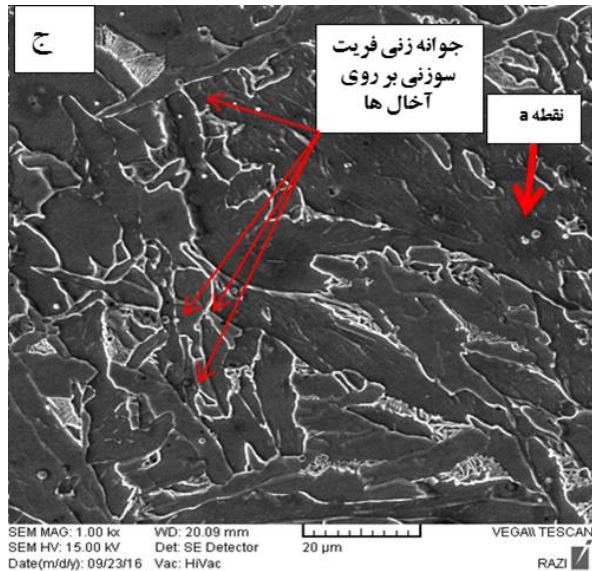
یکی از عوامل تأثیرگذار بر روی هندسه جوش، جریان سیال در حوضچه جوش می‌باشد که از نیروی ایجاد شده در اثر اختلاف در کشش سطحی مذاب تأثیر می‌پذیرد. برای فلزات در حالت کلی با افزایش دما کشش سطحی کاهش پیدا می‌کند. در حوضچه مذاب این فلز، کشش سطحی منفی است ($\partial \sigma / \partial T < 0$). در نقاط سردتر که مربوط به گوشه‌های حوضچه می‌باشد، کشش سطحی بیشتر از مرکز حوضچه است. در نتیجه فلز مذاب گرم‌تر با کشش سطحی کمتر در مرکز، به وسیله فلز مذاب سردتر با کشش سطحی بیشتر در گوشه‌ها، به طرف بیرون کشیده می‌شود. این مسئله سبب کاهش عمق نفوذ می‌شود [۱۰]. انتقال حرارت با محرک کشش سطحی، کنوکسیون حرارتی نامیده می‌شود [۴]. یکی از اهداف این کار تحقیقاتی، افزودن نانو ذرات به عنوان اکسید فعال به حوضچه جوش بوده که باعث افزایش کشش سطحی شده است و کنوکسیون مارانگونی را از منفی به مثبت تغییر داد و باعث تمرکز قوس شده و حوضچه جوش را عمیق‌تر نموده است (شکل ۷). [۴-۱۰ و ۱۹-۱۷]



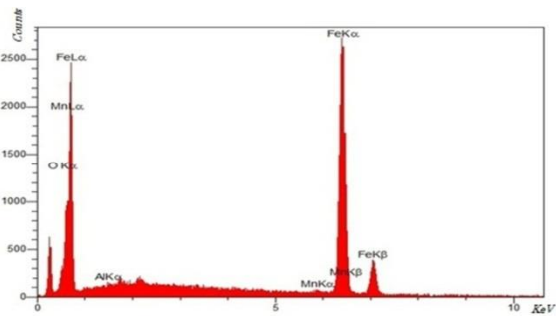
شکل (۹): مقایسه ساختار فلز جوش با بزرگنمایی مختلف: الف، ب، نمونه بدون ذرات نانو ذرات. ج، د، نمونه با ذرات نانو. AF: فريت سوزنی، PF: فريت چند وجهی و WF: فريت ويدمن اشتاتن

این ناحیه دانست که ذرات نانو مقداری از حرارت ورودی را صرف ذوب شدن خود کرده و حرارت در این ناحیه کمتر شده است. برای کاهش مقدار فريت اولیه با افزایش عناصر آلیاژی جانشینی در استحاله‌های هم‌دما چندین مکانیزم ارائه شده است. از بین این مکانیزم‌ها، پیشنهاد شده است که مکانیزم‌های رسوب گذاری بین فازی (Interphas boundary precipitation) و اثر شبه کششی در جوشکاری سرد شدن پیوسته رخ می‌دهند. نانو ذرات با کششی که به مرز آستنیت- فريت اعمال می‌کند رشد فريت مرزدانه‌ای و در نتیجه مقدار آن را کاهش می‌دهد. به علاوه از آنجا که استحاله آستنیت به فريت اولیه با نفوذ با برد زیاد کربن در آستنیت کنترل می‌شود، حضور عناصر آلیاژی جانشینی، منجر به کاهش ضریب نفوذ کربن در آستنیت شده و در نتیجه سینتیک رشد فريت اولیه را کاهش می‌یابد [۴-۸]. کاهش اندازه دانه آستنیت منجر به افزایش سطح دانه‌ها در واحد حجم شده و در واقع مناطق مناسب برای جوانه‌زنی محصولات مرزدانه‌ای، مثل فريت اولیه مرزدانه‌ای یا انواع فريت با فاز ثانویه، افزایش می‌یابد. کاهش اندازه دانه آستنیت همچنین منجر به افزایش دمای استحاله آستنیت به فريت شده و انتظار می‌رود که مقدار محصولات دمای بالا که عمدتاً در مرز دانه‌ها جوانه‌زنی می‌کنند، افزایش یابد. نسبت به ناحیه ستونی کمتر است [۱۷-۱۸].



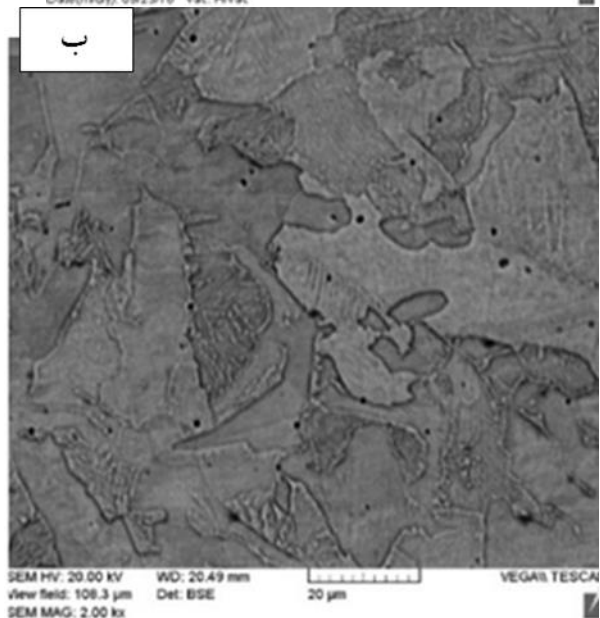
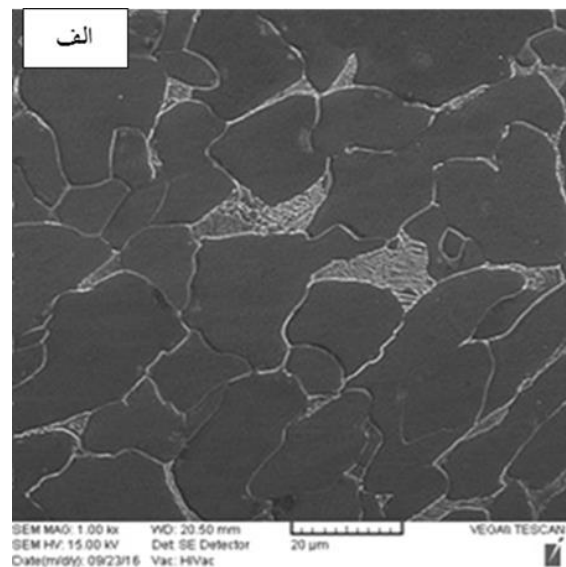


شکل (۱۰): تصاویر SEM: الف) دانه بندی فلز پایه، ب) ساختار فلز جوش بدون نانو ذرات و ج) ساختار فلز جوش با نانو ذرات وجود آخال‌های ریز به عنوان مراکز جوانه زا برای فریت سوزنی



شکل (۱۱): آنالیز تفکیک انرژی سطح شکست نمونه دارای ذرات نانو (نقطه a شکل ۱۰)

شکل ۹ مقایسه آخال‌ها را در دو حالت نشان می‌دهد. این شکل به خوبی نشان‌دهنده این موضوع است که ذرات نانو اضافه شده باعث افزایش تعداد آخال‌های ریز شده که این خود احتمال تشکیل فریت‌های سوزنی را افزایش می‌دهد [۷]. نتیجه‌ی به دست آمده از میکروسکوپ SEM در شکل ۱۰ و آنالیز تفکیک انرژی از سطح شکست نمونه دارای ذرات نانو در شکل ۱۱ نشان داده شده است که ثابت می‌کند ذرات $MnO-Al_2O_3$ به حوضچه جوش وارد شده‌اند.



۳-۴- خواص کششی

برای آزمایش کشش از هر کدام از صفحات بدون نانو ذرات و صفحات حاوی نانو ذرات ۰/۲۵ و ۰/۵ گرم، سه نمونه جهت انجام آزمون کشش استخراج شد و نتایج حاصل مورد مقایسه قرار گرفت. میزان استحکام کششی به دست آمده به فاکتورهای متعددی از جمله اندازه دانه، ریزساختار و توزیع ذرات تقویت کننده در ساختار بستگی دارد. افزایش استحکام برای نمونه‌های حاوی نانو ذرات را می‌تواند ناشی از اختلاط یکنواخت اکسیژن خارج شده از ترکیبات نانو ذرات در

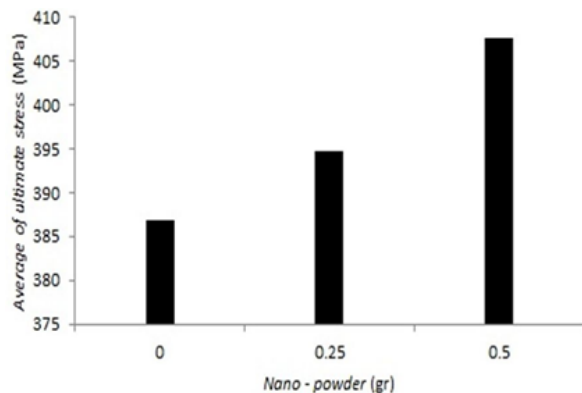
که باعث بهبود خواص مکانیکی اتصال گشته‌اند. ناحیه جوشکاری دارای ساختار در همبافته و سوزنی دارد که این، به علت وجود نانو ذرات به عنوان مراکز جوانه زا و همچنین به عنوان آخال‌های ریز جهت جلوگیری از رشد نابه‌جایی‌ها و ترک‌های ریز در ساختار است. در شکل ۱۰-الف مشاهده می‌شود، دانه بندی فلز پایه درشت دانه می‌باشد و در شکل ۱۰-ب مشاهده می‌شود که ساختار فلز جوش بدون نانو ذرات درشت دانه و جهت‌گیری تصادفی می‌باشد؛ اما در شکل ۱۰-ج مشاهده می‌شود که ساختار ریز دانه و در همبافته است که ذرات نانو به صورت آخال‌های ریز به منظور مراکز جوانه زا، باعث کاهش اندازه دانه و ساختار ریز دانه شده است. لازم به ذکر است که درصد وزنی نانو ذرات (مقدار نانو ذرات) باید به صورت بهینه تعیین شود، چرا که افزایش بیش از حد نانو ذرات باعث کلوخه شدن آن و کاهش خواص مکانیکی خواهد شد [۲۱-۲۲].

جدول (۴): مشخصات نمونه‌های جوشکاری شده

شماره نمونه	مقدار ماده نانو اضافه شده (gr)	استحکام نهایی کشش (MPa)	درصد ازدیاد طول (%)
۱	۰	۳۸۷	۶٫۸
۲	۰٫۲۵	۳۹۵	۸٫۷
۳	۰٫۵	۴۰۸	۱۳٫۶



شکل (۱۲): نمونه تست کشش پس از شکست



شکل (۱۳): میانگین استحکام نهایی نمونه‌ها

حوضچه جوش، کاهش اندازه دانه و ایجاد یک ساختار در همبافته دانست. به گونه‌ای که توزیع این ذرات در زمینه فلز جوش باعث تقسیم بار وارده و جلوگیری از ایجاد تمرکز تنش ناشی از تجمع آن‌ها شده و سبب می‌شود که نمونه‌های حاوی نانو ذرات دارای استحکام و درصد ازدیاد طول نسبی بیشتری نسبت به نمونه‌های جوشکاری شده بدون حضور نانو ذرات باشند. اضافه شدن ذرات نانو به ساختار جوش در صورت اختلاط و امتزاج ناقص در زمینه می‌تواند عاملی برای شکست زود هنگام و ترد باشد.

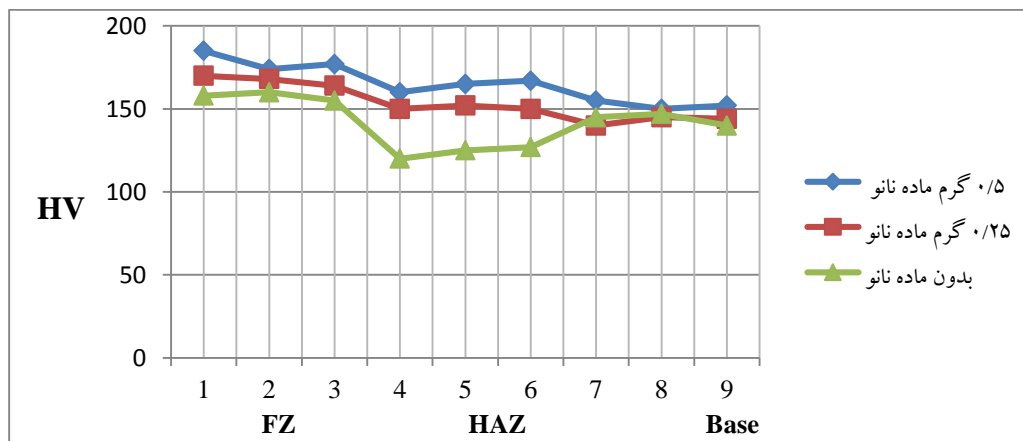
بیشترین میزان چقرمگی (چکش خواری) مربوط به نمونه‌های حاوی نانو ذرات و کمترین آن مربوط به نمونه‌های جوشکاری شده بدون نانو ذرات است. بیشترین میزان درصد ازدیاد طولی مربوط به نمونه حاوی نانو ذرات ۰/۵ گرم و کمترین مقدار آن مربوط به نمونه‌های جوشکاری شده بدون نانو ذرات می‌باشد. با توجه به مقادیر به دست آمده کاملاً مشخص است که درصد افزایش طول نسبی نمونه‌های جوشکاری شده در حضور نانو ذرات افزایش یافته است که می‌تواند به دلیل کاهش قابل ملاحظه اندازه دانه‌ها، هم محور شدن ساختار و با وجود ساختار در همبافته فریت سوزنی که این ساختار منجر به جلوگیری از رشد ترک و در ابعای نانو باعث تجمع نابه‌جایی‌ها و کند شدن حرکت آن‌ها دانست. کاهش اندازه دانه باعث استحکام مرزدانه‌ای شده و همین امر به افزایش تنش تسلیم، تنش نهایی و درصد افزایش طول خواهد انجامید که این امر به رابطه هال-پیچ معروف است. نتایج حاصل از آزمایش کشش در جدول ۴ نشان داده شده است. این جدول، میانگین استحکام نهایی کشش و درصد ازدیاد طول را به ازای مقادیر مختلف نانو ذرات اضافه شده به درز جوش نشان می‌دهد. شکل ۱۲ یکی از نمونه‌ها را پس از انجام آزمایش کشش نشان می‌دهد. همچنین، نتایج به دست آمده از این آزمایش در شکل ۱۳ نشان داده شده است؛ اما همانگونه که در نتایج EDS و تصاویر SEM مشاهده شد نانو ذرات به صورت تقریباً یکنواختی در زمینه توزیع شده

۳-۵- سختی سنجی

میکرو سختی سنجی از ناحیه جوش و فلز اصلی با نیروی ۹/۸ نیوتن و زمان بارگذاری ۲۰ ثانیه انجام شد. در هر یک از نواحی مختلف سه آزمون گرفته شده و میانگین آن به عنوان عدد سختی به دست آمده است. یکی از عواملی که بر سختی منطقه جوش تأثیر می گذارد، مقدار گرمای ورودی و نرخ سرمایش است. سختی منطقه ذوب شده به طور مستقیم با ریزساختار و اندازه دانه‌ها ارتباط دارد. از این رو با افزایش و کاهش گرمای ورودی و اثری که این تغییرات بر ریزساختار و اندازه دانه‌ها دارد، سختی تغییر می کند [۴]. حضور نانو ذرات در منطقه جوش، سبب تغییر سختی منطقه جوش گردیده است. از یک سو دمای ذوب اکسید فلزات به طور معمول بالاتر از دمای ذوب آن‌ها در حالت خالص است، بنابراین مقداری از گرمای ورودی به جای ذوب کردن فلز پایه،

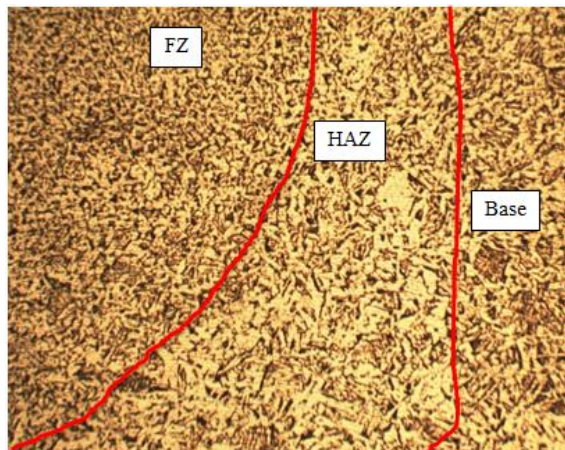
صرف ذوب کردن اکسید های فلزی شده و از سوی دیگر، حضور این ترکیبات در فلز ضریب هدایت حرارتی و الکتریکی فلز را تغییر داده و موجب تغییر نرخ سرمایش می گردد. علاوه بر این موارد باتوجه به اینکه اکسید فلزات یک نوع سرامیک هستند، وارد شدن آن به منطقه ذوب موجب تغییر خواص مکانیکی از جمله سختی شده است. همچنین حضور این مواد در منطقه جوش تعداد نقاط شروع جوانه زنی را افزایش داده و سبب ریز دانه شدن منطقه جوش شده است.

شکل ۱۴ سختی نقاط مختلف نمونه های جوشکاری شده با حضور نانو ذرات و بدون ذرات را نشان می دهد.



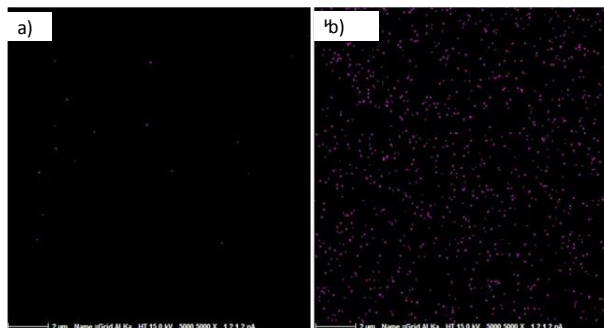
شکل (۱۴): سختی نمونه های جوشکاری شده بدون افزودن نانو ذرات و با افزودن لایه نانو ذرات به دو ضخامت مختلف روی سطح

همچنین در شکل ۱۵ نواحی مختلف جوش با مقدار ۰/۵ گرم نانو ذرات مشاهده می‌شود که ریزساختار فلز جوش ریز دانه تراز فلز پایه شده است.

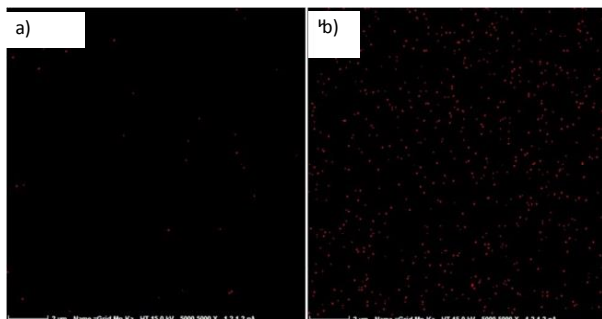


شکل (۱۵): ریز ساختار ناحیه جوش کاری شده با حضور ۰/۵ گرم نانو ذرات

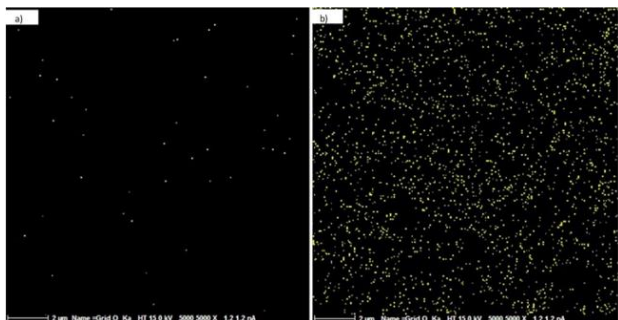
برای بررسی اثر نانو ذرات $MnO-Al_2O_3$ به حوضچه جوش کافی است در سطح شکست نمونه پراکندگی عناصر آلومینیوم، منگنز و اکسیژن را به دست آورده و با حالت بدون ذرات نانو مقایسه گردد. پراکندگی این عناصر در شکل‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده از آنالیز تفکیک انرژی نمونه ثابت می‌کند که نانو ذرات $MnO-Al_2O_3$ وارد حوضچه جوش شده است.



شکل (۱۶): پراکندگی عنصر آلومینیوم: الف) نمونه بدون ذرات نانو و ب) نمونه با ذرات نانو



شکل (۱۷): پراکندگی عنصر منگنز: الف) نمونه بدون ذرات نانو و ب) نمونه با ذرات نانو



شکل (۱۸): پراکندگی عنصر اکسیژن: الف) نمونه بدون ذرات نانو و ب) نمونه با ذرات نانو

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق اثر نانو ذرات $MnO-Al_2O_3$ اضافه شده به درز جوش را بر روی خواص مکانیکی و ریزساختار جوشکاری GMAW لب به لب ورق فولاد St37 بررسی شد و نتایج زیر به دست آمد.

۱- با افزایش مقدار ماده نانو اضافه شده به درز جوش، مقدار استحکام نهایی و درصد افزایش طول نمونه افزایش یافت که این افزایش به ترتیب از ۳۸۷ مگاپاسکال و ۶/۸ درصد در حالت بدون ماده نانو به ۴۰۸ مگاپاسکال و ۱۳/۶ درصد در حالت ۰/۵ گرم ماده نانو است.

۲- حضور ذرات $MnO-Al_2O_3$ باعث افزایش مناسب تعداد آخال‌های ریز می‌شود که این آخال‌ها مراکز مناسب جهت جوانه زنی و تشکیل فریت سوزنی با ساختار درهمبافته (بافت سبدی) می‌باشد. فریت سوزنی بر روی آخال‌های ریز جوانه زنی و رشد می‌کند.

- Welding & Joining, vol. 6, no. 1, pp. 17-22, 2001.
- [8] T. K. Pal & U. K. Maity, "Effect of nano size TiO₂ particles on mechanical properties of AWS E 11018M type electrode", Materials Sciences and Applications, vol. 2, no. 9, pp. 1285-1292, 2011.
- [9] M. Aghakhani & A. Nikzad, "Modeling of welding height in gas metal arc welding process in the presence of TiO₂ nano-particles using artificial neural network", Modares Mechanical Engineering, (in Persian), vol. 15, no. 7, pp. 149-159, 2015.
- [10] M. Aghakhani, M. Ghaderi, A. Karami & A. Derakhshan, "Combined effect of TiO₂ nanoparticles and input welding parameters on the weld bead penetration in submerged arc welding process using fuzzy logic", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 70, no. 1-4, pp. 63-72, 2014.
- [11] C. Vimalraj, P. Kah, B. Mvola & M. Jukka, "Effect of nanomaterial addition using gmaw and GTAW processes", Rev. Adv. Mater. Sci, pp. 370-382, 2016.
- [12] S. Mohan, S. P. Sivapirakasama, M. C. Kumarb & M. Surianarayana, "Welding fumes reduction by coating of nano-TiO₂ on electrodes", Journal of Materials Processing Technology, vol. 219, pp. 237-247, 2015.
- [13] M. Muzamila, C. Jianjun, A. Maaz, V. Patelb, A. Majeeda & J. Yanga, "Multicomponent enabled MWCNTs-TiO₂ nano-activating flux for controlling the geometrical behavior of modified TIG welding joint process" Diamond & Related Materials, vol. 97, pp. 107442, 2019.
- [14] S. Tanvir, S. K. Tiwari & D. K. Shukla, "Friction-stir welding of AA6061-T6: The effects of Al₂O₃ nano-particles addition", Results in Materials, vol. 1, 2019.
- [15] ASM. Handbook, "Metallography and Microstructures", The Materials Information Company, vol. 9, 1992.
- [16] ASTM. Handbook, "Metals Mechanical Testing Elevated and Low Temperature Tests", Metallography, vol. 1, 2013.
- ۳- در نمونه حاوی ذرات نانو، بیشتر ساختار این قسمت شامل شبکه فریت و مقادیر کم پرلیت است و بر اساس ریزساختار های مشاهده شده توسط میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی می توان گفت، وجود مقادیر نانو ذرات در فلز جوش باعث تشکیل فریت سوزنی و از تشکیل فریت چند وجهی ویدمن اشتاتن جلوگیری شده است؛ که در نتیجه با مقایسه میکروسختی، سختی فلز جوش نیز از ۱۵۸ VHN به ۱۷۲ افزایش یافت.
- ۴- بررسی اثر نانو ذرات بر هندسه جوش به خوبی نشان داد که این نانو ذرات جهت جریان مارنگونی را تغییر داده و همچنین باعث تمرکز قوس شده است که این دو مکانیزم باعث افزایش نفوذ، کاهش پهنای حوضچه مذاب و ارتفاع بیشتر گرده جوش شده است. همچنین در نمونه های جوشکاری شده حاوی نانو ذرات پاششی مشاهده نگردید و سطح نسبتاً صافی به دست آمد، در حالی که برای نمونه های بدون حضور نانو ذرات این گونه نبود.

۵- مراجع

- [1] AWS Handbook, "Gas Metal Arc Welding", vol. 20, 1997.
- [2] W. Klas, "Welding processes handbook", New York: CRC Press, 2003.
- [3] K. Shinagawa & K. Tokyo, "Essential Factors in Gas Metal Arc Welding", 141-8688, Japon. Fourth Edition, 5-912, 2011.
- [4] S. Kou, "Welding metallurgy", 3rd ed, New York: John Wiley & Sons Inc, pp. 19-22, 68-82, 103-114, 2003.
- [5] ASM. Handbook, "Welding Brazing and Soldering", Publication Information Contributors, vol. 6, 1993.
- [6] W. Lucas & D. Howse, "Activating flux-increasing the performance and productivity of the TIG and plasma processes", Welding & Metal Fabrication, vol. 64, no. 1, pp. 11-15, 1996.
- [7] M. Kuo, Z. Sun & D. Pan, "Laser welding with activating flux", Science and Technology of

- [17] K. Hung Tseng, "Performance of activated TIG process in austenitic stainless steel welds", Journal of Materials Processing Technology, 2011.
- [18] A. Kumar Singh, V. Dey & R. Naresh Rai, "Techniques to improve weld penetration in TIG welding (A review) ", Materials Today: Proceedings, vol. 4, pp. 1252–1259, 2017.
- [19] A. Dabiri, R. Yousefi & Fattahi, "Effect of ZrO₂ nanoparticles on the impact properties of shielded metal arc welds", Materials Letters, vol. 158, pp. 325–328, 2015.
- [20] T. Pan, et al, "Kinetics and mechanisms of intragranular ferrite nucleation on nano- metallic inclusions in low carbon steel", Materials Science and Engineering. A, vol. 438-440, pp. 1128-1132. 2006.
- [21] J. H. Shim, Y. W. Cho, S. H. Chung & etc, "Nucleation of Intragranular Ferrite at Ti₂O₃ Particle in Low Carbon Steel", South Korea. Division of Materials Science and Engineering, Seoul National University, Seoul, pp. 151-742. 1999.
- [22] M. Aghakhani, M. R. Ghaderi, M. Mahdipour Jalilian & A. Derakhshan, "Predicting the combined effect of TiO₂ nano-particles and welding input parameters on the hardness of melted zone in submerged arc welding by fuzzy logic", Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 27, no. 7, pp. 2107-2113, 2013.

۶- پی نوشت

- [1] Marangoni
[2] Ultrasonic Bath
[3] Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS)
[4] Fourier Transform Infra-Red (FTIR)
[5] Continue Cooling Transformation