

## بررسی اثر خمیر جوشکاری حاوی نانوصفحات گرافن روی خواص اتصال فولاد AISI ۳۰۴ جوشکاری شده به روش توپودری

محمد خسروی<sup>۱\*</sup>، محمد منصوری<sup>۱</sup>، علی غلامی<sup>۱</sup> و یدالله یعقوبی نژاد<sup>۲</sup>

- ۱- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک و مواد، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند  
۲- گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی مکانیک و مواد، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند

(دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۲۶ - دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۰/۱/۱۷)

**چکیده**- در جوشکاری توپودری، ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال آلیاژ فولاد AISI ۳۰۴ توسط نانوصفحات اکسید گرافن (GO) و اکسید گرافن احیا شده (RGO) بررسی شد. در این پژوهش ریزساختار خط جوش توسط روش‌های متالوگرافی و میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی، فازهای تشکیل شده توسط روش پراش پرتوی ایکس و تغییرات آلتروپیی کربن توسط آزمون طیف‌سنجی رامان ارزیابی شده است. اکسید گرافن با استفاده از روش هامر اصلاح شده سنتز شده و با استفاده از هیدرازین احیا شد. بر این اساس، خمیر اکسید گرافن و اکسید گرافن احیا شده در غلظت‌های مختلف ۱، ۳ و ۱۰ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر برای پرکردن شکاف جوش استفاده شده است. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت اکسید گرافن احیا شده تا ۱۰ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر، استحکام کششی و سختی جوشکاری به ترتیب تا ۲۳ و ۴۳ درصد بهبود می‌یابد. مکانیزم افزایش خواص مکانیکی را می‌توان احتمالاً به ایجاد ممانعت نانوصفحات اکسید گرافن احیا شده در برابر رشد دانه و در نتیجه ریز شدن اندازه دانه آلیاژ خط جوش در حین فرایند انجماد حوضچه جوش متناسب دانست.

واژه‌های کلیدی: جوشکاری توپودری، گرافن، فولاد AISI ۳۰۴، ریزساختار.

### ۱- مقدمه

برخوردار است. در میان روش‌های جوشکاری، روش جوشکاری قوسی توپودری<sup>۱</sup> به دلیل نرخ بالای رسوب، مقاومت فولاد AISI ۳۰۴ به دلیل خواص متالورژی مطلوب از جمله مقاومت در برابر خوردگی، چقرمگی و مقاومت حرارتی بالا، به‌طور گسترده‌ای در صنایع همچون صنایع شیمیایی، اتومبیل‌سازی، تجهیزات دریایی و خطوط انتقال در صنایع نفت و گاز استفاده می‌شود [۱]. بی‌تردید، جوشکاری و کیفیت اتصال

فولاد AISI ۳۰۴ به دلیل خواص متالورژی مطلوب از جمله مقاومت در برابر خوردگی، چقرمگی و مقاومت حرارتی بالا، به‌طور گسترده‌ای در صنایع همچون صنایع شیمیایی، اتومبیل‌سازی، تجهیزات دریایی و خطوط انتقال در صنایع نفت و گاز استفاده می‌شود [۱]. بی‌تردید، جوشکاری و کیفیت اتصال فولاد AISI ۳۰۴ و خواص مکانیکی از جایگاه ویژه‌ای

\*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mkhosravi@birjandut.ac.ir

عالی (مدول یانگ حدود یک تسلا پاسکال و مقاومت شکست ۱۲۵ گیگاپاسکال) شناخته شده است [۹]. جعفرلو و همکاران [۱۰] نشان دادند که در هنگام جوشکاری قوس الکتریکی با الکتروود پوشش دار<sup>۴</sup> برای فولاد کم کربن با استفاده از گرافن خواص مکانیکی اتصالات جوش بهبود یافته است. بنابراین، تأثیر گرافن روی خواص مکانیکی روش جوشکاری قوسی توپودری اهمیت فزاینده‌ای پیدا می‌کند. لازم به ذکر است که در بسیاری از مطالعات به دلیل کاهش هزینه از اکسید گرافن و اکسید گرافن احیا شده به جای گرافن استفاده کرده‌اند.

در این مطالعه، تأثیر اکسید گرافن (GO) و اکسید گرافن احیا شده (RGO) روی خصوصیات متالورژی فلز جوش بررسی شده است. در این راستا، از اکسید گرافن به‌عنوان پیش‌ماده استفاده شده که با روش هامر اصلاح شده تولید و با استفاده از روش شیمیایی و ماده هیدرازین احیا شده است. از نانوصفحات اکسید گرافن (GO) و اکسید گرافن احیا شده (RGO) برای تولید خمیر جوشکاری استفاده شده است. پس از تهیه خمیرهای جوشکاری با غلظت‌های متفاوت، جوشکاری توپودری انجام شده و خواص ریزساختاری و مکانیکی قطعات جوشکاری شده با استفاده از روش متالوگرافی، میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی<sup>۵</sup>، پراش پرتوی ایکس<sup>۶</sup> و طیف‌سنجی رامان<sup>۷</sup> در کنار آزمون کشش و سختی‌سنجی بررسی شد.

## ۲- مواد و روش تحقیق

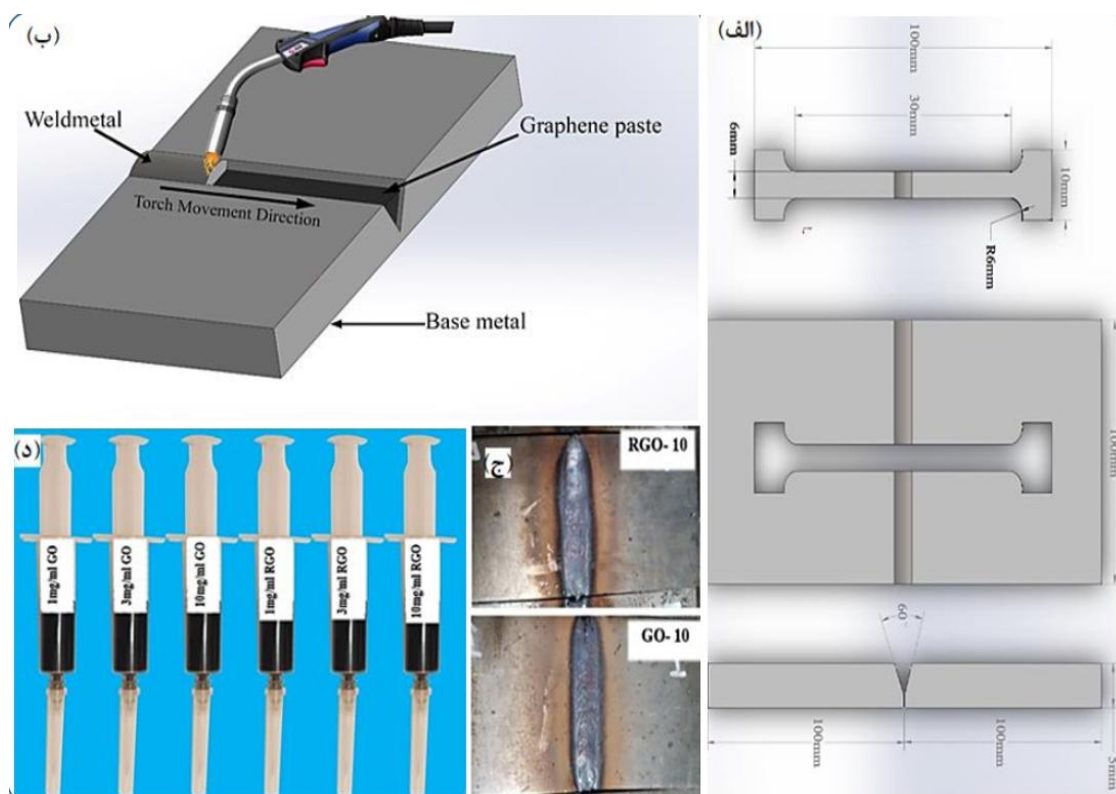
### ۲-۱- آماده‌سازی

از فولاد AISI ۳۰۴ با ابعاد ۵×۱۰×۲۰۰ میلی‌متر که ترکیب شیمیایی آن در جدول (۱) مشخص شده، به‌عنوان فلز پایه استفاده شده است. پس از برش نمونه‌ها، شیار به‌صورت V شکل با زاویه ۶۰ درجه مطابق شکل (۱)، برای جوشکاری آماده شد. شکل نمادین نمونه‌های آزمون کشش در شکل (۱-الف) نشان داده شده است. نمونه‌های آزمون کشش سائز کوچک بر اساس استاندارد ASTM E8/E8M تهیه شده‌اند. شکل (۱-ب) نمادین محل جوشکاری و پرکننده را نشان می‌دهد.

فولاد AISI ۳۰۴ و خواص مکانیکی از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. در میان روش‌های جوشکاری، روش جوشکاری قوسی توپودری به دلیل نرخ بالای رسوب، مقاومت بالا در برابر خوردگی و سایش، سازگار و از کیفیت قابل قبولی برخوردار است [۲]. به تازگی ساختارهای نانومتری متنوعی از کربن، برای بهبود خواص جوشکاری همانند نانولوله‌های کربنی (CNT) و گرافن شناخته شده‌اند [۳]. برای این نویسندگان این مقاله [۴] در جوشکاری قوسی با گاز محافظ برای فولاد کم کربن، نانوصفحات گرافن را به میزان ۲/۵ تا ۶ درصد وزنی به منطقه جوشکاری اضافه کردند. میکروساختار نمونه‌ها با درصدهای مختلف گرافن و نمونه بدون گرافن بررسی و مقایسه شد. نتایج نشان داد با افزایش گرافن به حوضچه جوش، مدول الاستیک و میکروسختی افزایش و خواص مکانیکی بهبود می‌یابد. لی و همکاران [۵]، ساخت ماده مرکب AI/CNT با استفاده از جوشکاری اصطکاکی - اغتشاشی<sup>۲</sup> را ارائه داده‌اند که در آن استحکام و شکل‌پذیری بهتری نسبت به فلز پایه در حالت استفاده از سه درصد تقویت کننده از نانولوله‌های کربنی مشاهده شده است. علاوه بر این ژائو و همکاران [۶]، اثر افزودن نانولوله‌های کربنی به‌عنوان تقویت کننده تا ۳ درصد را روی آلیاژ آلومینیوم سری ۲۰۰۰ توسط روش جوشکاری اصطکاکی - اغتشاشی ارزیابی کردند و دریافتند که مقاومت کششی می‌تواند تا ۸۷ درصد بهبود یابد. فتاحی و همکاران [۷] خواص مکانیکی خط جوش جوشکاری قوسی تنگستن با گاز محافظ<sup>۳</sup> را روی آلومینیوم با استفاده از سیم جوش‌های ساخته شده از پودر آلومینیوم و گرافن و سیم جوش‌های عادی بررسی کردند و نشان دادند که خواص مکانیکی بهبود یافته است. خسروی و همکاران [۸] اثر نانوصفحات اکسید گرافن احیا شده بر جوشکاری قوس الکتریکی توپودری و بهبود خواص فولاد ساختمانی را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد، اکسیدگرافن احیا شده باعث بهبود خواص مکانیکی اتصالات جوشکاری شده، می‌شود. گرافن از نظر خصوصیات برتر از جمله سطح ویژه بالا (۲۶۲۰ مترمربع بر گرم)، هدایت حرارتی بالا ( $WmK^{-1} > 3000$ ) خواص مکانیکی

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ فولاد AISI ۳۰۴ استفاده شده به همراه الکتروود پرکننده

عنصر (درصد وزنی)	کربن	سیلیسیوم	منگنز	مس	فسفر	گوگرد	کروم	نیکل	مولیبدن	آهن
فولاد AISI ۳۰۴	۰/۰۶	۰/۵۵	۱/۴	-	۰/۰۳	۰/۰۱	۱۸/۵	۹/۵	-	تعدادل
فولاد AISI ۳۰۸	۰/۰۴	۰/۹	۰/۵	۰/۷۵	۰/۰۴	۰/۰۳	۱۸/۵	۱۱	۰/۷۵	تعدادل



شکل ۱- الف) هندسه جوشکاری زاویه برش و جهت استفاده شده نمونه‌های کششی،

ب) تصویر نمادین از محل خمیر و روش جوشکاری قوسی توپودری،

ج) تصاویر واقعی فلز جوش داده شده با ۱۰ میلی‌گرم در میلی‌لیتر اکسید گرافن و اکسید گرافن احیا شده و د) سرنگ‌های خمیر

## ۲-۲- تولید خمیرهای GO و RGO

نانوصفحات اکسید گرافن با استفاده از روش هامر اصلاح شده، تولید و با استفاده از روش شیمیایی و ماده شیمیایی هیدرازین احیا شد. سوسپانسیون‌های اکسید گرافن و اکسید گرافن احیا شده هر یک با غلظت‌های ۱، ۳ و ۱۰ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر به صورت جداگانه با مقداری پودر کتیرا در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد مخلوط شدند. سپس سوسپانسیون تهیه شده با دستگاه امواج مافوق صوت به مدت زمان ۱۵ دقیقه پراکنده‌سازی شده و به آرامی تا دمای محیط سرد شد. مقدار ۱۵ میلی‌لیتر از

خمیر تهیه شده در شیار V شکل اتصالات قرار گرفت و در دمای اتاق تا خشک شدن کامل خمیر (۲۴ ساعت) زمان داده شد.

## ۲-۳- فرایند جوشکاری و آزمایش‌های انجام شده

فرایند جوشکاری توسط روش جوشکاری قوسی توپودری با دستگاه Maxi Mig 520 H و جنس سیم الکتروود فولاد AISI ۳۰۸ انجام شد. ترکیب شیمیایی آلیاژ فولاد AISI ۳۰۴ و الکتروود پرکننده فلز پایه مطابق جدول (۱) و متغیرهای جوشکاری فرایند قوس الکتریکی توپودری در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲- متغیرهای جوشکاری استفاده شده در فرایند جوشکاری قوس الکتریکی توپودری

فاصله نازل تا قطعه (میلی متر)	سرعت تزریق گاز (لیتر بر دقیقه)	سرعت جوشکاری (میلی متر بر دقیقه)	سرعت تغذیه سیم (میلی متر بر دقیقه)	ولتاژ (ولت)	جریان (آمپر)	قطر الکترو (میلی متر)
۱۲	۱۲	۱۰۰	۵۰۰۰	۳۰	۱۵۰	۱/۶

نمونه‌های جوش داده شده با خمیرهای نانوصفحات اکسید گرافن و اکسید گرافن احیا شده هر یک با غلظت‌های ۱، ۳ و ۱۰ میلی گرم بر میلی لیتر به ترتیب با کدگذاری GO-1، GO-3، GO-10، RGO-1، RGO-3 و RGO-10 مشخص شده است. تصاویر خطوط جوشکاری GO-10، RGO-10 و خمیرهای اکسید گرافن و اکسید گرافن احیا شده به ترتیب در شکل‌های (۱-ج) و (۱-د) نشان داده شده است. پس از جوشکاری، اتصالات خط جوش با روش متداول متالوگرافی، از جمله سنگ‌زنی، سنباده‌زنی از شماره ۸۰ تا ۲۰۰۰ و سپس پولیش با ذرات آلومینا با اندازه ۰/۰۳ میکرومتر (سوسپانسیون) و حکاکی با استفاده از محلول (دو میلی لیتر اسید نیتریک و ۹۸ میلی لیتر اتانول) آماده‌سازی شدند. ریزساختار اتصالات جوش داده شده توسط میکروسکوپ نوری معکوس با مدل Dewinter Victory Microscopy مشاهده و تصویربرداری شد. برای تشخیص فازهای تشکیل شده در خط جوش از دستگاه پراش پرتوی ایکس با مدل D8-ADVANCE- Bruker و گستره روبش از زاویه پنج تا ۸۰ درجه و از کاتد مسی استفاده شده است.

میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی با مدل MIRA3TESCAN-XMU برای بررسی نانوصفحات گرافن و از طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوی ایکس (EDS)<sup>۸</sup> برای بررسی نیمه‌کمی عنصری در اتصال جوش استفاده شد. مطابق با شکل (۱)، نمونه‌های آزمون کشش مطابق استاندارد ASTM E8/E8M sub-size توسط دستگاه فرز کنترل عددی<sup>۹</sup> مدل VMC1020-SIEMENS 828D برای ارزیابی استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی و کرنش نمونه‌ها آماده‌سازی شده است. آزمون کشش توسط دستگاه Zwick Z250 در دمای اتاق و در جهت عمود بر خط جوش انجام شد. آزمون سختی با

استفاده از دستگاه Vickers Hardness Testing Universal UV1 با بار ۱۵۰ کیلوگرم و زمان بارگذاری سه ثانیه، انجام شد. مقدار سختی ناحیه ذوب<sup>۱۰</sup> (FZ) از هفت نقطه به‌طور متوسط اندازه‌گیری شد.

### ۳- نتایج و بحث

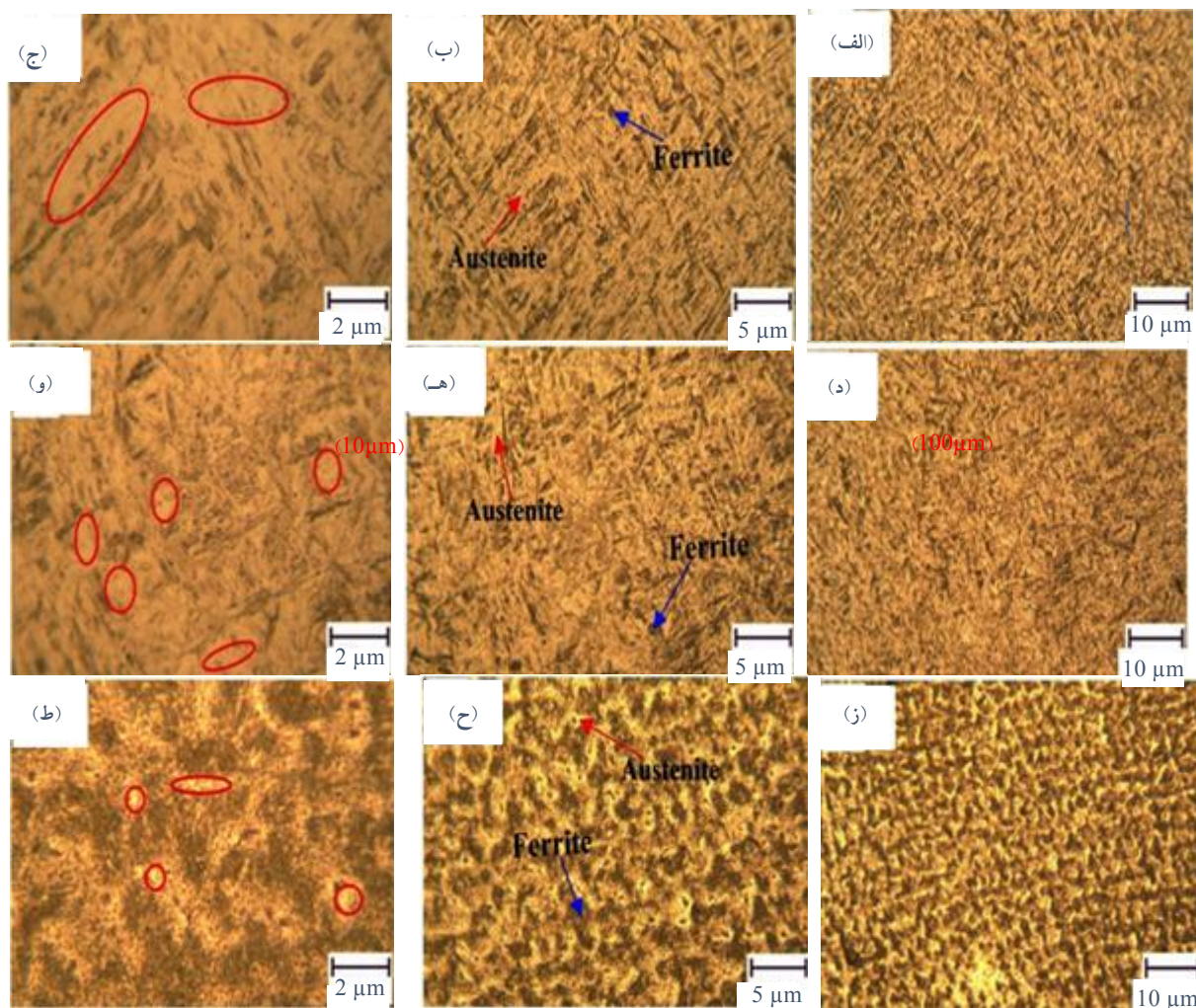
#### ۳-۱- خواص مکانیکی اتصال جوش اصلاح شده با خمیر

##### GO/RGO

#### ۳-۱-۱- مشخصه‌یابی خط جوش با استفاده از میکروسکوپ

##### نوری

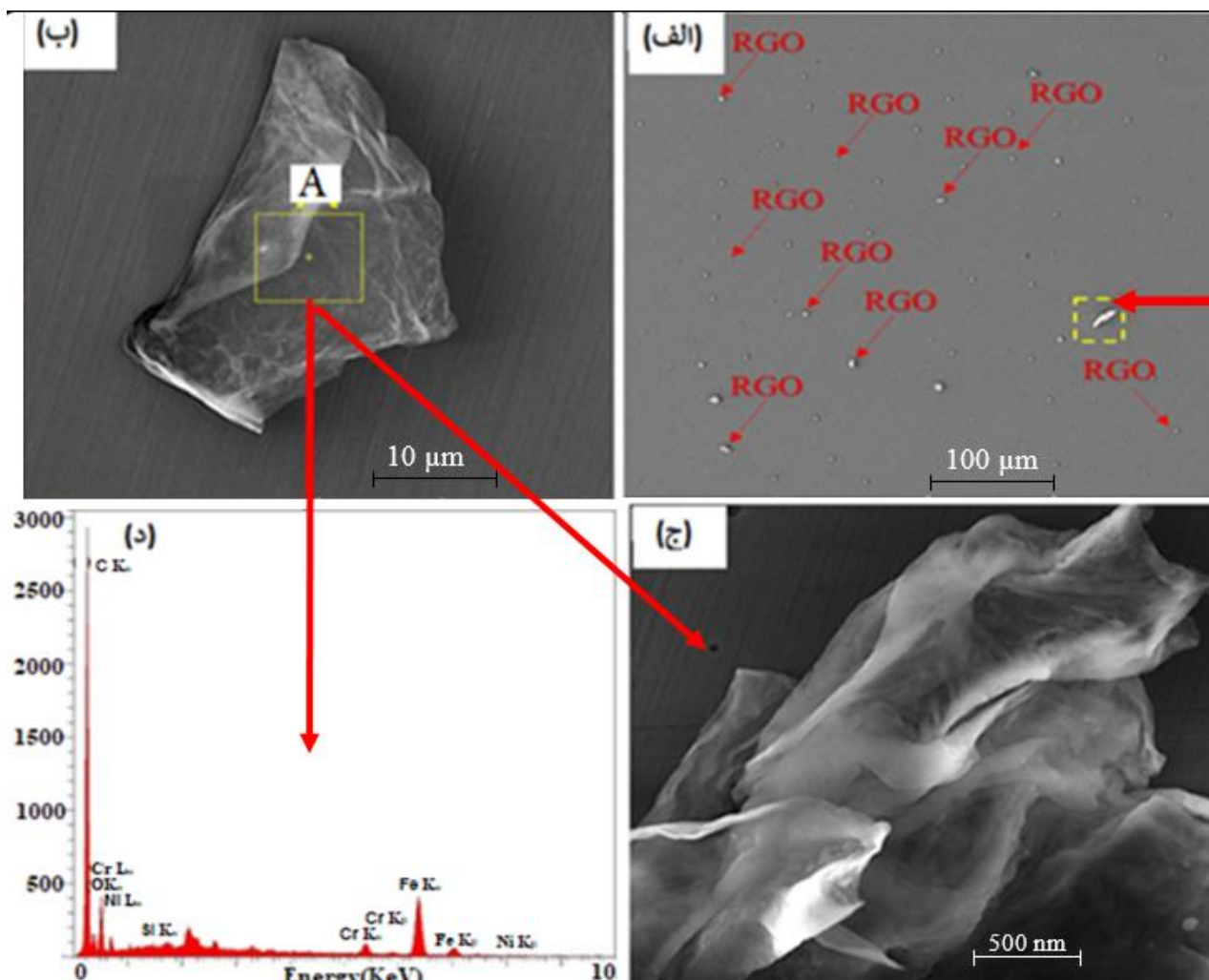
شکل (۲-الف) تا (۲-ط)، تصاویر میکروسکوپی نوری<sup>۱۱</sup> از بهترین نمونه‌ها (GO-10 و RGO-10) را در مقایسه با فلز پایه در بزرگنمایی‌های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۵۰۰ برابر نشان می‌دهد؛ در این تصاویر ناحیه‌های فریتی و آستنیتی نشان داده شده است. در آزمون‌های مکانیکی که در ادامه بررسی خواهند شد از نمونه‌های GO-10 و RGO-10 بهترین نتیجه حاصل شده است. ریزساختار فلز جوش از دو ناحیه تشکیل شده؛ ناحیه آستنیتی که فاز  $\gamma$ -Fe و ناحیه فریتی که فاز  $\alpha$ -Fe را نشان می‌دهد. با مقایسه شکل (۲-ج، ۲-و و ۲-ط) در بزرگنمایی بالاتر، مشاهده می‌شود که فاز فریت افزایش و فاز آستنیت کاهش یافته است. در فولاد ۳۰۴ AISI، فاز آستنیت در دماهای بالاتر تشکیل می‌شود و حضور گرافن احتمالاً به دلیل ایجاد مقاومت در رشد دانه‌های آستنیت باعث کاهش اندازه دانه این فاز و تأثیر مثبت آن روی خواص مکانیکی آلیاژ جوشکاری شده، می‌شود. در این خصوص میانگین اندازه دانه محاسبه شده است. میانگین اندازه دانه‌ها برای فلز جوش نمونه‌های کنترل، GO-10، RGO-10 به ترتیب ۲۲/۱، ۱۱/۴ و ۱۰/۶ میکرومتر اندازه‌گیری شده است.



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپی نوری از تغییرات ریزساختار در: الف، ب و ج) فلز جوش مربوط به فولاد ۳۰۴ AISI بدون نانوصفحات گرافن، د، ه و و) خط جوش با استفاده حاوی GO-10 و ز، ح و ط) مربوط به خط جوش حاوی RGO-10 به ترتیب در بزرگنمایی‌های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۵۰۰ برابر

ریزساختارهایی که مانع حرکت نابه‌جایی می‌شوند، می‌توانند منجر به افزایش قابل توجهی در استحکام فلز و یا آلیاژ شوند، زیرا تغییر شکل پلاستیک بیشتر از طریق حرکت نابه‌جایی رخ می‌دهد [۱۱]. در شکل (۲)، با اضافه کردن اکسید گرافن و اکسید گرافن احیا شده به اتصالات جوش داده شده کاهش اندازه دانه مشاهده می‌شود. بنابراین، نمونه‌های GO-10 و RGO-10 دارای ساختار ریزدانه در مقایسه با نمونه کنترل هستند. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که با افزودن نانوصفحات گرافن (اکسید گرافن یا اکسید گرافن احیا شده)، ریزساختار جوش داده

شده از ساختار درشت دانه به ریزدانه تبدیل شده است. همان‌گونه که بیان شد، ریزدانه شدن فلز جوش می‌تواند به دلیل جوانه‌زنی ناهمگن توسط نانوصفحات گرافنی و نیروی بازگشتی ایجاد شده ناشی از قفل شدن نابه‌جایی در برخورد به موانعی از نانوصفحات کربنی ایجاد شود. بنابراین پس از استفاده از خمیر گرافنی در خط جوش، نانوصفحات اکسید گرافن احیا شده و اکسید گرافن می‌توانند در حوضچه مذاب در حال سرد شدن به‌عنوان مکان‌های جوانه‌زنی ناهمگن برای تشکیل فازهای  $\delta$ -Fe عمل کنند و سرعت جوانه‌زنی فاز فریت دلتا افزایش یابد.



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی از فلز جوش:

(الف) و (ب) جهت نمایش حضور نانوصفحات اکسید گرافن احیا شده RGO-10 و

(ج) و (د) جهت مشخصه‌یابی نیمه‌کمی عناصر تشکیل شده روی نانوصفحات با استفاده از طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوی ایکس

۳-۱-۲- مشخصه‌یابی خط جوش با استفاده از میکروسکوپ

الکترونی روبشی گسیل میدانی

شکل (۳) تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی از RGO-10 را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود نانوصفحات اکسید گرافن احیا شده بدون تجمع و در فلز جوش به‌طور کامل و همگن توزیع شده‌اند. چنین توزیعی از نانوصفحات در خط جوش برای دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب ضروری است.

نتایج سایر پژوهش‌ها نشان می‌دهد که نانومواد کربنی تا حد زیادی در ریزش اندازه دانه‌ها مؤثر و منجر به افزایش استحکام خط جوش می‌شوند. کارایی این بهبود استحکام به اندازه و حجم این نانومواد بستگی خواهد داشت. از این رو در تأیید این پژوهش با افزایش نانوصفحات تا حدی که خواص مکانیکی دچار کاهش نشود (اثر آگلومره شدن نانوصفحات)، ریزدانه شدن مشاهده و مؤثر بوده است. [۱۲].

جدول ۳- عناصر موجود در خط جوش با استفاده از روش طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوی ایکس

عناصر	درصد وزنی (W%)	درصد اتمی (A%)
کربن	۶۱/۲۹	۷۹/۱۸
اکسیژن	۱۴/۴۸	۱۴/۰۴
سیلیسیوم	۰/۰۳	۰/۰۲
کروم	۱/۹۴	۰/۵۸
آهن	۲۱/۷۸	۶/۰۵
نیکل	۰/۴۸	۰/۱۳
	۱۰۰	۱۰۰

که اگرچه مقدار اکسید گرافن احیا شده دارای شدت پایینی است اما تأثیر قابل توجهی در خصوصیات جوشکاری دارد. در زوایای تعریف شده، مقادیر بسیار کمی از کاربید آهن نیز مشاهده شده که تشکیل کاربید آهن بر استحکام فلز جوش تأثیر مثبت دارد [۱۳].

### ۳-۱-۴- طیف‌سنجی رامان

طیف‌سنجی رامان از GO-10 و RGO-10 در شکل (۴-ب) نشان داده شده است. با این حال، GO-10 به ترتیب پیوندهای G و D را در موج حدود ۱۶۰۲ و ۱۳۴۲/۵ بر سانتی‌متر نمایش می‌دهد. نسبت شدت D / G مشابه مقدار شدت باند D است که برای توصیف نقص ساختاری استفاده می‌شود [۱۴]. گفتنی است، GO-10 و RGO-10 تعداد لایه‌های کمی دارند. به منظور تعیین اندازه بلورین ( $L_a$ ) اکسید گرافن احیا شده بر اساس داده‌های رامان، از رابطه (۱) استفاده شده است [۱۵]:

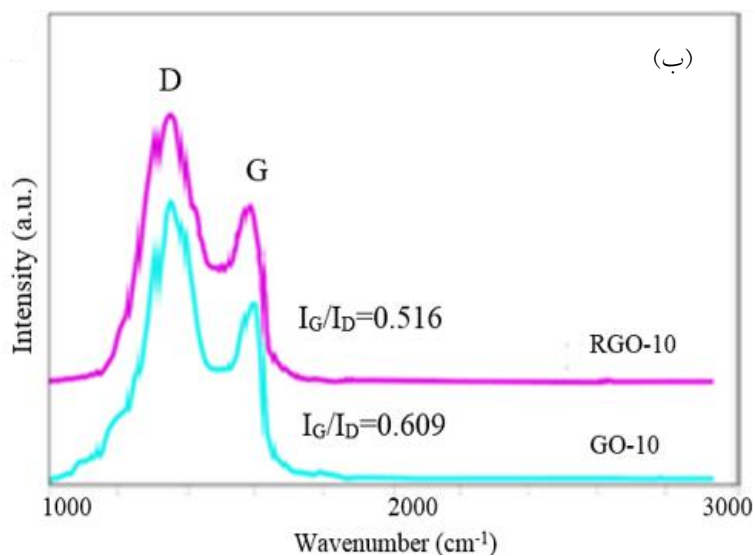
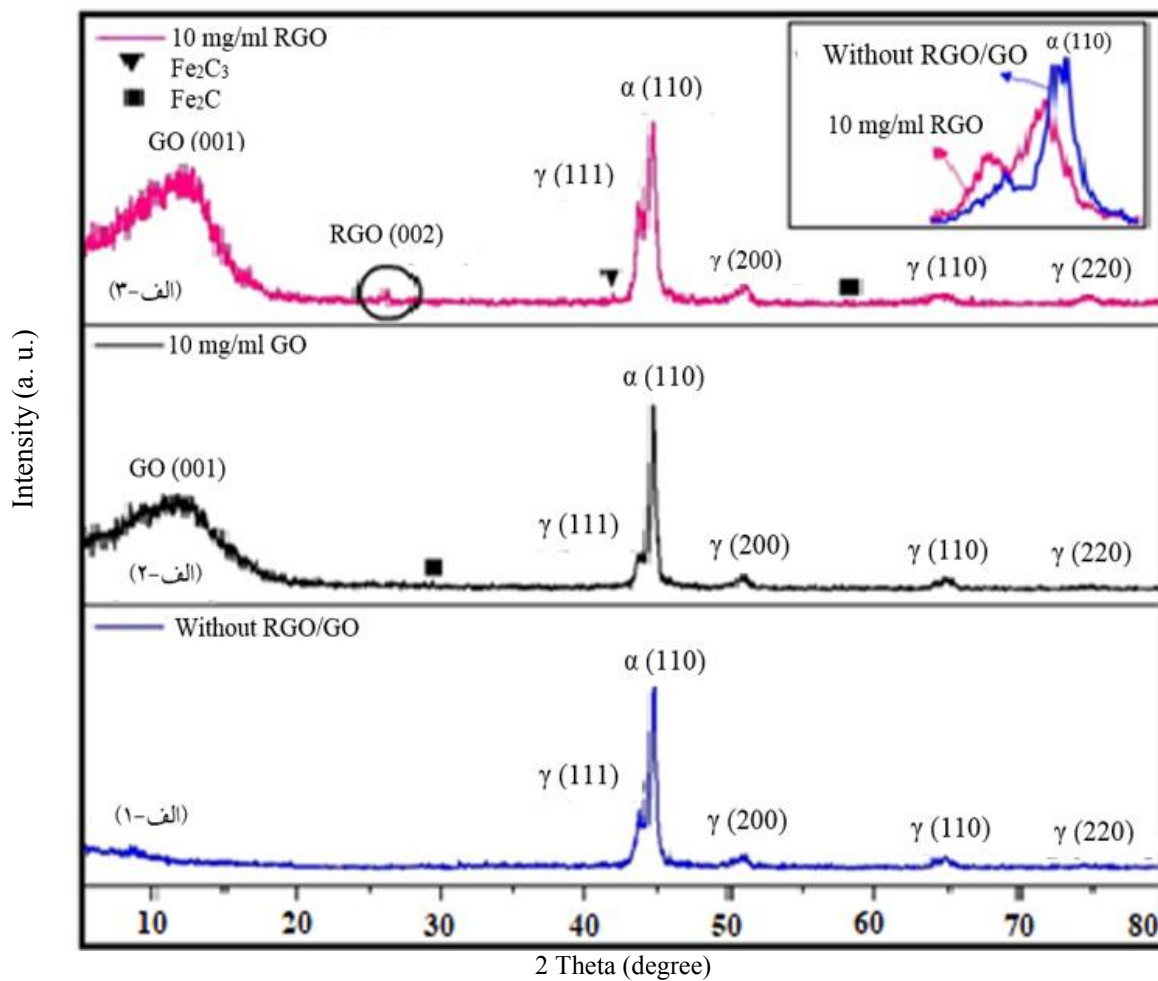
$$L_a (\text{nm}) = (2.4 \times 10^{-10}) \lambda^4 \left( \frac{I_D}{I_G} \right)^{-1} \quad (1)$$

در این معادله  $\lambda$  طول موج لیزر تحریک مورد استفاده در آزمایش رامان برابر ۵۳۲ نانومتر است، درحالی که  $I_D$  و  $I_G$  به ترتیب شدت قله‌های D و G را نشان می‌دهند و مقادیر  $(I_D/I_G)^{-1}$  از RGO-10 برابر با ۰/۵۸ است. اندازه‌های متوسط بلورها محاسبه شده در حدود ۳۳/۱۴ نانومتر است.

برای تهیه تصویر میکروسکوپی الکترونی ابتدا روی سطح مقطع فلز جوش تقویت شده با نانوصفحات اکسید گرافن احیا شده عملیات صیقل کاری انجام و با لایه نازک طلا پوشش داده شد. افزودن اکسید گرافن احیا شده به فلز جوش، احتمالاً رشد دانه‌ها را محدود و متناسب با آن دانه‌های ریزتر و پالایش یافته ایجاد شده است. از آزمون نیمه کمی طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوی ایکس (شکل ۳-د، جدول ۳) برای شناسایی عناصر موجود در نانوصفحات (البته با توجه به عمق نفوذ پرتوی الکترونی) استفاده شده است. نتایج به خوبی حضور کربن در نانوصفحات نشان داده شده را تأیید می‌کند (حدود ۸۰ درصد کربن).

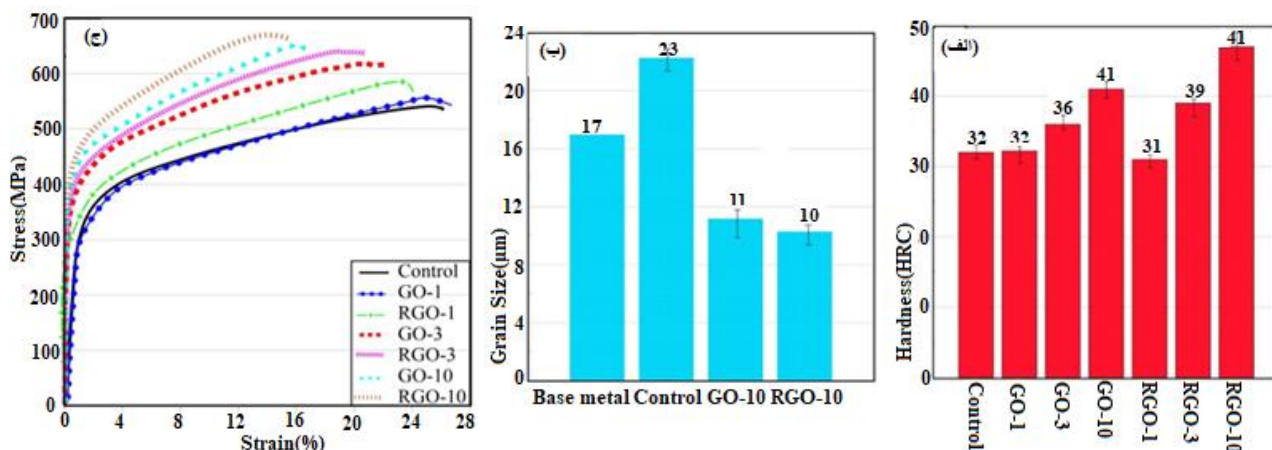
### ۳-۱-۳- بررسی خط جوش توسط پراش پرتوی ایکس

در شکل (۴-الف-۱ تا ۴-الف-۳) الگوهای پراش پرتوی ایکس از نمونه‌های GO-10 و RGO-10 در مقایسه با فلز پایه تجزیه و تحلیل شد. همان‌طور که در شکل (۴-الف-۱) نشان داده شده است، قله‌های مربوط به فریت و آستنیت به وضوح مشاهده می‌شود. پس از افزودن اکسید گرافن، قله ۲θ حدود ۱۳/۵ درجه ظاهر شد که می‌تواند به دلیل وجود نانوصفحات اکسید گرافن در فلز جوش باشد. در RGO-10 همان‌طور که مشاهده می‌شود، قله حدود ۲۶/۵ درجه مشاهده شده که نشان‌دهنده احیای جزئی اکسید گرافن در شرایط هیدرازین و تبدیل آن به اکسید گرافن احیا شده است. نتایج نشان می‌دهد



شکل ۴- الف) مقایسه فازهای تشکیل شده در خط جوش با استفاده از پراش پرتوی ایکس در خط جوش پایه در مقایسه با GO-10 و RGO-10. ب) طیف سنجی رامان از فلز جوش نمونه RGO-10





شکل ۵- الف) متوسط سختی، ب) متوسط اندازه دانه و ج) منحنی‌های تنش و کرنش مربوط به منطقه جوشکاری شده تقویت شده با اکسید گرافن و اکسید گرافن احیا شده در نمونه‌های GO-1, GO-3, GO-10, RGO-1, RGO-3 و RGO-10 نسبت به نمونه کنترل

اکسید گرافن در فلز جوش احتمالاً تراکم نابه‌جایی‌ها در فلز جوش افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه سختی هم در فلز جوش افزایش می‌یابد [۱۷].

### ۳-۱-۶- آزمون کشش و بررسی استحکام جوش

نتایج آزمایش کشش در شکل (۵-ج) نشان داده شده است. نتایج بالاترین مقدار را برای نمونه‌های تقویت شده با غلظت ۱۰ میلی‌گرم در میلی‌لیتر نشان می‌دهد و غلظت یک میلی‌گرم در میلی‌لیتر تأثیر مهمی بر خصوصیات مکانیکی ندارد. جدول (۴) نتایج آزمایش کشش را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌هایی دارای اکسید گرافن احیا شده در جوشکاری در مقایسه با نمونه‌های حاوی نانوصفحات اکسید گرافن در آزمایش کشش استحکام بالاتری دارند. شواهد نشان می‌دهد که استحکام کششی نهایی و استحکام تسلیم در نمونه‌های گرافن به ترتیب تا ۲۳ و ۳۴ درصد افزایش یافته است.

نانوصفحات گرافن احتمالاً به‌عنوان مانع در حرکت نابه‌جایی عمل کرده و در نتیجه تجمع نابه‌جایی در پشت گرافن، باعث بهبود خواص مکانیکی شده است [۱۸]. استفاده از درصد‌های بالاتر GO و RGO تأثیر معناداری در بهبود خواص خط جوش نسبت به RGO-10 نشان ندادند، از این رو در تحلیل نتایج بررسی نشد. دلیل این موضوع را می‌توان به آگلومره شدن

### ۳-۱-۵- سختی سنجی

نتایج آزمایش سختی در شکل (۵-الف) نشان داده شده است که از منطقه جوش گرفته شده است. سختی با افزایش غلظت اکسید گرافن احیا شده و اکسید گرافن در منطقه جوش افزایش می‌یابد. علاوه بر این، در RGO-10 و GO-10، سختی بهبود یافته است. افزایش سختی فلز در نمونه‌های تقویت شده با نانوصفحات می‌تواند به ریزش دانه‌ها نسبت داده شود. همچنین با افزایش کسر حجمی مرز دانه‌ها، تمایل به تغییر شکل پلاستیک کاهش و بر اساس معادله هال-پیچ<sup>۱۲</sup> این کاهش اندازه دانه‌ها، باعث افزایش میکروسختی می‌شوند [۱۶]. به عبارتی، نانوصفحات اکسید گرافن احیا شده باعث افزایش تراکم نابه‌جایی‌ها در فلز جوش شده است. تشکیل کاربیدهای آهن به علت واکنش بین نانوصفحات RGO/GO با فلز پایه می‌تواند یکی از دلایل افزایش سختی فلز جوش به‌شمار آید [۱۳]. بنابراین، بیشترین افت اندازه دانه در فلز جوش RGO-10 میلی‌گرم بر میلی‌لیتر در شکل (۵-ب) مشاهده شده است. نانوصفحات اکسید گرافن احیا شده در فلز جوش تأثیر بسزایی در افزایش سختی آن ناحیه دارند. تفاوت در ضریب انبساط حرارتی بین نانوصفحات اکسید گرافن احیا شده و فلز پایه می‌تواند موجب افزایش غلظت نابه‌جایی در این ناحیه شود. با افزایش میزان کسر وزنی نانوصفحات اکسید گرافن احیا شده و

جدول ۴- نتایج آزمون کشش خط جوش تقویت شده با نانوصفحات اکسید گرافن و اکسید گرافن احیا شده

مشخصات نمونه خط جوش	استحکام تسلیم (مگاپاسکال)	استحکام کششی نهایی (مگاپاسکال)	افزایش طول (درصد)
نمونه کنترل	۳۱۷/۷	۵۴۱/۵	۲۳/۲۵
GO-1	۳۴۰/۱	۵۶۰/۲	۲۲/۹۱
RGO-1	۳۷۲/۲	۵۸۸/۵	۲۱/۵۲
GO-3	۳۸۶/۸	۶۱۵/۹	۱۸/۸۷
RGO-3	۴۰۵/۷	۶۳۹/۷	۱۷/۰۳
GO-10	۴۱۹/۹	۶۵۱/۹	۱۴/۹۸
RGO-10	۴۲۸/۷	۶۶۸/۵	۱۳/۰۲

نانوصفحات گرافن و یا عدم پراکنندسازی مطلوب در غلظت‌های بالاتر متناسب دانست.

دلایل اصلی در این زمینه مربوط به: (۱) تقویت مرز دانه  $(\sigma_{gb})$ ، (۲) حلقه اوراوان  $(\sigma_{orowan})$ ، (۳) تقویت  $\sigma_{CTE}$  و (۴) انتقال بار  $(\sigma_{LT})$  هستند. اگر اثرات آنها خطی در نظر گرفته شود، می‌توان مجموع آنها را برحسب رابطه (۲) بیان کرد:

$$\Delta\sigma_{th} = \sigma_{CTE} + \sigma_{orowan} + \sigma_{L,T} + \sigma_{Hall-Petch} + \sigma_{ym} \quad (2)$$

سهام هر بخش در بهبود مقاومت تنشی به‌طور دقیق برای مقایسه، در جدول (۵) برای RGO-10 ارائه شده است.

#### ۱) تقویت مرز دانه $(\sigma_{gb})$ :

$\sigma_{gb}$  رابطه‌ای بین مقاومت و اندازه دانه وجود دارد، که با رابطه (۳) نشان داده می‌شود [۱۹]:

$$\sigma_{gb} = \frac{k}{\sqrt{d}} \quad (3)$$

انتظار می‌رود اندازه دانه‌های آن کوچک‌تر از نمونه‌های دیگر باشد. اگر فرض کنیم  $k$  یک پارامتر ثابت باشد و  $\sigma_{gb}$  با اندازه دانه ( $d$ ) رابطه معکوس داشته باشد، می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت مرز دانه در نمونه‌های RGO-10 و GO-10 بالاتر از بقیه است.

#### ۲) حلقه اوراوان $(\sigma_{orowan})$

همچنین از آنجایی که نانوصفحات گرافنی (اکسید گرافن یا اکسید گرافن احیا شده) در مقیاس نانو به‌عنوان موانعی در

جهت حرکت نابه‌جایی‌ها عمل کرده‌اند، حرکت نابه‌جایی‌ها محدود و نابه‌جایی‌ها در طول حرکت خود با موانع بیشتری مواجه هستند که این امر منجر به تجمع نابه‌جایی‌ها می‌شود. که در آن  $k$  ضریب تقویت نسبی مرز دانه‌ها که عددی ثابت و مقدار آن  $k = 0.257 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$  [۲۰] و  $d$  اندازه دانه فلز جوش است. از آنجایی که نمونه‌های RGO-10 و GO-10 بهترین نتیجه را در آزمایش استحکام کششی بین نمونه‌های دیگر دارند، کاهش اندازه دانه به دلیل افزایش تراکم و پراکنندگی یکنواخت اکسید گرافن و اکسید گرافن احیا شده مقاومت فلز جوش را بهبود می‌بخشد و دلیل آن افزایش مقدار مرز دانه است. پیش‌بینی می‌شود که در خط جوش تقویت شده با RGO / GO، به دلیل اینکه ریزساختار به دانه ریز تبدیل شده است، از کشش دانه در طول آزمایش جلوگیری می‌کند و بنابراین تجمع عیوب در پشت مرز دانه را افزایش می‌دهد. تأثیر افزایش مقاومت در اثر حلقه اوراوان را می‌توان با معادله (۴) نیز نشان داد [۲۱]:

$$\sigma_{orowan} = \frac{0.4GbM}{\pi\sqrt{1-\nu}} \cdot \frac{\ln\left(\frac{2\bar{r}}{b}\right)}{\lambda} \quad (4)$$

که  $G$  مدول برشی،  $b$  مقدار بردار برگر،  $\nu$  نسبت پواسون (۰/۲۹)  $(\nu = 0.29)$  و  $M$  ضریب تیلور است  $(M = 3.06)$  [۲۳]،  $\bar{r}$  میانگین شعاع سطح مقطع دایره‌ای در یک صفحه تصادفی برای یک رسوب کروی است که توسط معادله (۵) توصیف شده است [۲۱]:

جدول ۵- سهم هر مکانیزم در بهبود مقاومت تسلیم برای نمونه‌های کنترل و RGO-10 در مقاومت نظری

نمونه	کنترل (مگاپاسکال)	RGO-10 (مگاپاسکال)
$\sigma_{gb}$	۵۱/۰	۷۸/۹
$\sigma_{Orowan}$	۰	۲۹/۴
$\sigma_{CTE}$	۰	۳۵۴/۰
$\sigma_{LT}$	۰	۱۰/۹
$\sigma_{ym}$	۴۰۴/۹	۴۳۶/۶
$\Delta\sigma_{th}$	۴۵۵/۹	۹۰۹/۸

#### ۴) انتقال بار ( $\sigma_{LT}$ )

مقاومت مواد مرکب را می‌توان با مکانیزم انتقال بار، که به شدت به کسر حجمی ذرات بستگی دارد، افزایش داد. تقویت سهم ذرات تقویت کننده از طریق انتقال بار را می‌توان با معادله (۸) تخمین زد [۳۰]:

$$\sigma_{L,T} = 0.5f_r\sigma_{ym} \quad (۸)$$

درحالی که  $\sigma_{ym}$  نمونه تنش تسلیم است.

در اثر مکانیزم‌های فعال استحکام‌بخشی در نمونه کنترل، بخش مربوط به مرزهای دانه مطابق جدول (۵)، ۵۱ مگاپاسکال و تأثیر تنش تسلیم ۴۰۴/۹ مگاپاسکال است. درحالی که در صورت استفاده از نانوصفحات گرافن (RGO) در مقدار ۱۰ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر در خمیر اولیه، مهم‌ترین مکانیزم استحکام‌بخشی در اثر عدم تطابق ضریب انقباض حرارتی فلز جوش هنگام سرد شدن بین زمینه و فاز تقویت کننده (گرافن) ایجاد شده است که مقدار آن ۳۵۴ مگاپاسکال است. با بررسی مجموع عوامل تأثیرگذار در افزایش استحکام و مقایسه آن در بخش محاسبات نظری (جدول ۵) انتظار می‌رود، مکانیزم‌های استحکام‌بخشی باعث افزایش حدود دو برابری (۹۰۹/۸) تقسیم بر ۴۵۵/۹) حد تحمل ماده در برابر تنش در خط جوش حاوی گرافن شود. این درحالی است که نتایج جدول (۴) که از آزمون کشش و نمونه‌های حقیقی گرفته شده است افزایش نسبت ۱/۲۳ استحکام کششی نهایی (۶۶۸/۵) تقسیم بر (۵۴۱/۵) بین نمونه RGO-10 و نمونه کنترل را نشان می‌دهد. این اختلاف احتمالاً به دلیل عدم توزیع یکنواخت نانوصفحات گرافن در خط جوش و آلوده شدن آنها ایجاد شده است.

$$\bar{r} = \sqrt{\frac{2}{3r}} \quad (۵)$$

$\lambda$  فاصله بین لبه به لبه دانه‌ها در حین تشکیل است که با معادله (۶) بیان می‌شود [۲۴]:

$$\lambda = 2\bar{r} \left( \sqrt{\frac{\pi}{4f_r}} - 1 \right) \quad (۶)$$

مقایسه اولیه نشان می‌دهد که  $\sigma_{orawan}$  برای RGO-10 و GO-10 بزرگ‌تر از GO/RGO ۱ و ۳ است.

#### ۳) تقویت $\sigma_{CTE}$

نابه‌جایی‌ها به دلیل عدم تطابق ضریب انقباض حرارتی فلز جوش هنگام سرد شدن در واقع بین زمینه و فاز تقویت کننده (گرافن) تکثیر می‌شوند [۲۵]. از این‌رو، اثر انبساط و یا انقباض حرارتی را می‌توان توسط معادله (۷) بیان کرد [۲۶]:

$$\Delta\sigma_{CTE} = \alpha Gb \sqrt{\frac{12\Delta T \Delta C f_r}{bd_r}} \quad (۷)$$

$\alpha$  عددی ثابت ( $\alpha = 1.25$ )،  $G$  مدول برشی ( $G = 75\text{GPa}$ ) [۲۰]،  $b$  اندازه بردار برگر ( $b = 0.254\text{nm}$ ) [۲۷]،  $\Delta T$  اختلاف بین دمای فرایند و دمای محیط ( $\Delta T = 1800\text{k}$ )،  $d_r$  اندازه دانه ( $d_r = 500\text{nm}$ ) و  $\Delta C$  تفاوت CTE نانوصفحات گرافن معادل  $8 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$  [۲۸] و زمینه برابر  $18 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$  [۲۹]،  $f_r$  کسر حجمی نانوصفحات است ( $\Delta C = 26 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ) ( $f_r = \%$ ).

## ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش تأثیر افزودن نانوصفحات اکسید گرافن و اکسید گرافن احیا شده روی خواص مکانیکی خط جوش آلیاژ فولاد AISI ۳۰۴ در فرایند جوشکاری قوس الکتریکی توپودری بررسی شده است. برای ارزیابی این خواص از درصدهای مختلف ۱، ۳ و ۱۰ درصد وزنی گرافن (اکسید گرافن و اکسید گرافن احیا شده) استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد:

- ۱- استفاده از ترکیبات اکسید گرافن احیا شده در نمونه RGO-10 منجر به افزایش استحکام کششی نهایی مقطع جوشکاری شده تا ۶۶۸/۵ مگاپاسکال شده است. خواص مکانیکی خط جوش نشان داد که افزایش استحکام به دلیل ریزدانه شدن، افزایش استحکام مرزهای دانه و انتقال بار از زمینه به تقویت کننده تشکیل شده از نانوصفحات کربنی مرتبط است.
- ۲- سختی در نمونه RGO-10 نسبت به نمونه کنترل از ۳۲ به

## واژه‌نامه

7. Raman spectroscopy
8. energy dispersive x-ray spectroscopy (EDS)
9. computer numerical control (CNC)
10. Fusion zone
11. Optical microscopy
12. Hall-Petch

## مراجع

1. flux cored arc welding (FCAW)
2. friction stir welding (FSW)
3. gas tungsten arc welding (GTAW)
4. shielded metal arc welding (SMAW)
5. field emission scanning electron microscopes (FE-SEM)
6. X-ray diffraction (XRD)
7. Wang, X., Yang, Z., Wang, Z., Shi, Q., Xu, B., Zhou, Ch., and Zhang, L., "The Influence of Copper on the Stress Corrosion Cracking of 304 Stainless Steel", *Applied Surface Science*, Vol. 478, pp. 492-498, 2019.
8. Juffus, L., *Welding Principles and Applications*, 8th ed., New York, Delmar, 2017.
9. Moghadam, A. D., Schultz, B. F., Ferguson, J. B., Omrani, E., Rohatagi, P. K., and Gupta, N., "Functional Metal Matrix Composites: Self-Lubricating, Self-Healing, and Nanocomposites-An Outlook", *Journal of the Minerals Metals Materials Society*, Vol. 66, No. 6, pp. 872-881, 2014.
10. Ma, G., Wu, C., Ye, J., He, Y., and Yu, X., "Effect of Graphene on Microstructure and Mechanical properties of U-MIG-Welded Galvanized Steel", *Journal of Materials in Electronics*, Vol. 31, No. 22, pp. 20332-20344, 2020.
11. Lee, S. J., Shin, S. E., Sun, Y., Fujii, H., and Park, Y., "Friction Stir Welding of Multi-Walled Carbon Nanotubes Reinforced Al Matrix Composites", *Materials Characterization*, Vol. 145, pp. 653-663, 2018.
12. Zhao, K., Liu, Z., Xiao, B., and Ma, Z., "Friction Stir Welding of Carbon Nanotubes Reinforced Al-Cu-Mg Alloy Composite Plates", *Journal of Materials Science Technology*, Vol. 33, No. 9, pp. 1004-1008, 2017.
13. Fattahi, M., Nabhani, N., Rashidkhani, E., Fattahi, Y., Akhavan, S., and Arabian, N. A., "New Technique for the Strengthening of Aluminum Tungsten Inert Gas Weld Metals: Using Carbon Nanotube/Aluminum Composite as a Filler Metal", *Micron*, Vol. 54-55, pp. 28-35, 2013.
14. Khosravi, M., Mansouri, M., Gholami, A., and Yaghoobinezhad, Y., "Effect of Graphen Oxide and

- Reduced Graphene Oxide Nanosheets on the Microstructure and Mechanical Properties of Mild Steel Jointing by Flux-Cored Arc Welding”, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, Vol. 27, No. 4, pp. 505-514, 2019.
9. Abdolhosseinzadeh, S., Asgharzadeh, H., and Kim, H., “Fast and Fully-Scalable Synthesis of Reduced Graphene Oxide”, *Scientific Reports*, Vol. 5, pp. 1-7, 2015.
  10. Nosrati, H., Mamooriya, R. S., Dabir, F., Le, D. Q. S., Bünger, C. E., Perez, M. C., and Rodriguez, M. A., “Effects of Hydrothermal Pressure on in Situ Synthesis of 3D Graphene-Hydroxyapatite Nano Structured Powders”, *Ceramics. International*, Vol. 45, No. 2, pp. 1761-1769, 2019.
  11. Lin, D., Ye, C. H., Liao, Y., Suslov, S., Liu, R., and Cheng, G. J., “Mechanism of Fatigue Performance Enhancement in a Laser Sintered Superhard Nanoparticles Reinforced Nanocomposite Followed by Laser Shock Peening”, *Journal of Applied Physics*, Vol. 113, No. 13, pp. 133509-133519, 2013.
  12. Tjong, S. C., “Recent Progress in the Development and Properties of Novel Metal Matrix Nanocomposites Reinforced with Carbon Nanotubes and Graphene Nanosheets”, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, Vol. 74, No. 10, pp. 281-350, 2013.
  13. Lin, D., Liu, C. R., and Cheng, G. J., “Single-Layer Graphene Oxide Reinforced Metal Matrix Composites by Laser Sintering: Microstructure and Mechanical Property Enhancement”, *Acta Materialia*, Vol. 80, pp. 183-193, 2014.
  14. Yaghoubinezhad, Y., and Afshar, A., “Experimental Design for Optimizing the Corrosion Resistance of Pulse Reverse Electrodeposited Graphene Oxide Thin Film”, *Journal of Solid State Electrochemistry*, Vol. 19, pp. 1367-1380, 2015.
  15. Cançado, L. G., Takai, K., and Enoki, T., “General Equation for the Determination of the Crystallite Size  $L_a$  of Nanographite by Raman Spectroscopy”, *Applied Physics Letters*, Vol. 88, No. 163106, 2006.
  16. Bohlen, J., Dobron, P., and Swiostek, J., “On the Influence of the Grain Size and Solute Content on the AE Response of Magnesium Alloys Tested in Tension and Compression”, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 462, No. 1-2, pp. 302-306, 2007.
  17. Kumar, H. G. P., and Xavier, A., “Graphene Reinforced Metal Matrix Composite (GRMMC): A Review”, *Procedia Engineering*, Vol. 97, pp. 1033-1040, 2014.
  18. Szabó, B. A., and Babuška, I., *Beams, Plates and Shells*, London, Wiley Online Library, 2011.
  19. Bohlen, J., Dobron, P., and Swiostek, J., “On the Influence of the Grain Size and Solute Content on the AE Response of Magnesium Alloys Tested in Tension and Compression”, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 462, No. 1-2, pp. 302-306, 2007.
  20. Mao, K., Wang, H., and Wu, Y., “Microstructure-Property Relationship for AISI 304/308L Stainless Steel Laser Weldment”, *Materials Science and Engineering*, Vol. 721, pp. 234-243, 2018.
  21. Argon, A. S., and Orowan, E., *Physics of Strength and Plasticity*, M.I.T. Press, 1969.
  22. Bringas, J. E., and Lamb, S., *Casting Handbook of Stainless Steels & Nickel Alloys*, CASTI Pub, 2002.
  23. Courtney, T. H., *Mechanical Behavior of Materials*, Waveland Press, 2005.
  24. Kelly, A., *Strengthening Methods in Crystals*, Elsevier Publishing Company, 1971.
  25. Saba, F., Zhang, F., and Liu, S., “Reinforcement Size Dependence of Mechanical Properties and Strengthening Mechanisms in Diamond Reinforced Titanium Metal Matrix Composites”, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 167, pp. 7-19, 2019.
  26. Jr, R., and Christodoulou, L., “The Role of Equiaxed Particles on the Yield Stress of Composites”, *Scripta Metallurgica et Materialia*, Vol. 25, No. 1, pp. 9-14, 1991.
  27. Nascimento, F., Foerster, C., and Silva, S., “A Comparative Study of Mechanical and Tribological Properties of AISI-304 and AISI-316 Submitted to Glow Discharge Nitriding”, *Materials Research*, Vol. 12, No. 2, pp. 173-180, 2009.
  28. Yoon, D., Son, Y., and Cheong, H., “Negative Thermal Expansion Coefficient of Graphene Measured by Raman Spectroscopy”, *Nano Letters*, Vol. 11, pp. 3227-3231, 2011.
  29. Riffard, F., Buscail, H., and Caudron, F., “Yttrium, Sol-Gel Coating Effects on the Cyclic Oxidation Behaviour of 304 Stainless Steel”, *Corrosion Science*, Vol. 45, No. 12, pp. 2867-2880, 2003.
  30. Hansen, N., “Boundary Strengthening in Undeformed and Deformed Polycrystals”, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 409, No. 1-2, pp. 39-45, 2005.

# INVESTIGATING THE EFFECT OF WELDING PASTE CONTAINING GRAPHENE NANOSHEETS ON BONDING PROPERTIES OF WELDED AISI 304 STAINLESS STEEL PRODUCED BY FLUX-CORED ARC WELDING

M. Khosravi<sup>1\*</sup>, M. Mansouri<sup>1</sup>, A. Gholami<sup>1</sup> and Y. Yaghoobinezhad<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Department of Mechanical Engineering, Birjand University of Technology Birjand, Iran

<sup>2</sup> Department of Materials Engineering, Birjand University of Technology Birjand, Iran

(Received: 15 January 2021; Accepted: 6 April 2021)

## ABSTRACT

In this research, the effect of graphene oxide (GO) and reduced graphene oxide (RGO) nanosheets on the mechanical and microstructural properties of AISI 304 stainless steel welded joints produced by the flux-cored arc welding (FCAW) method was investigated. Light microscope, field emission scanning electron microscope (FE-SEM) equipped with energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), X-ray diffraction analysis (XRD), Raman spectroscopy, and tensile strength test were used to characterize the samples. GO was synthesized by modified Hummers' method and reduced by hydrazine. Accordingly, the pastes of GO and RGO in different concentrations of 1, 3, and 10 mg/ml were applied in the groove. The results demonstrated that increasing the RGO concentration up to 10 mg/ml improves the tensile strength and hardness values of welded joints up to 23% and 43%, respectively. It seems that RGO nanosheets have a significant effect on the mechanical properties of the welded joints by pinning of dislocations.

**Keywords:** Flux-cored Arc Welding; Graphene; AISI 304 Stainless Steel; Microstructure.

## 1. INTRODUCTION

The welding and joint quality of AISI 304 stainless steel and its mechanical properties are significant in a large number of industries [1]. Recently, a variety of carbon nanostructures such as carbon nanotubes (CNT) and graphene have been known to improve welding properties [2]. This study attempts to find the effect of GO and RGO nanosheets on the mechanical and microstructural properties of AISI 304 stainless steel welded joints produced by the FCAM method.

## 2. MATERIALS AND METHODS

AISI 304 stainless steel with dimensions of 200×100×5 mm<sup>3</sup> was used as the base metal. After cutting the samples, the groove was prepared in a V-shaped with an angle of 60°.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

### 3.1. Optical Microscopy

Figure 1 shows the optical microscope images of

---

[mkhosravi@birjandut.ac.ir](mailto:mkhosravi@birjandut.ac.ir)

the best samples (RGO-10 and GO-10) according to the results of the mechanical tests compared to the based metal. In this regard, the average grain size was calculated. The average grain sizes for welded metal of control, GO-10, and RGO-10 samples were 22.1, 11.4 and 10.6 μm, respectively.

### 3.2. SEM

Figure 2 shows SEM images of RGO-10. As can be seen, nanosheets are distributed completely and homogeneously in the weld metal.

### 3.3. Hardness

The result of hardness measurement of the welding zone is presented in Figure 3(a). Accordingly, hardness value is increased with an increase in the concentration of RGO and GO in the welding area. Moreover, the maximum hardness value was found in RGO-10 and GO-10 samples. The improvement of hardness is attributed to the reduced grain size due to the presence of graphene nanosheets as demonstrated in Figure 3(b).

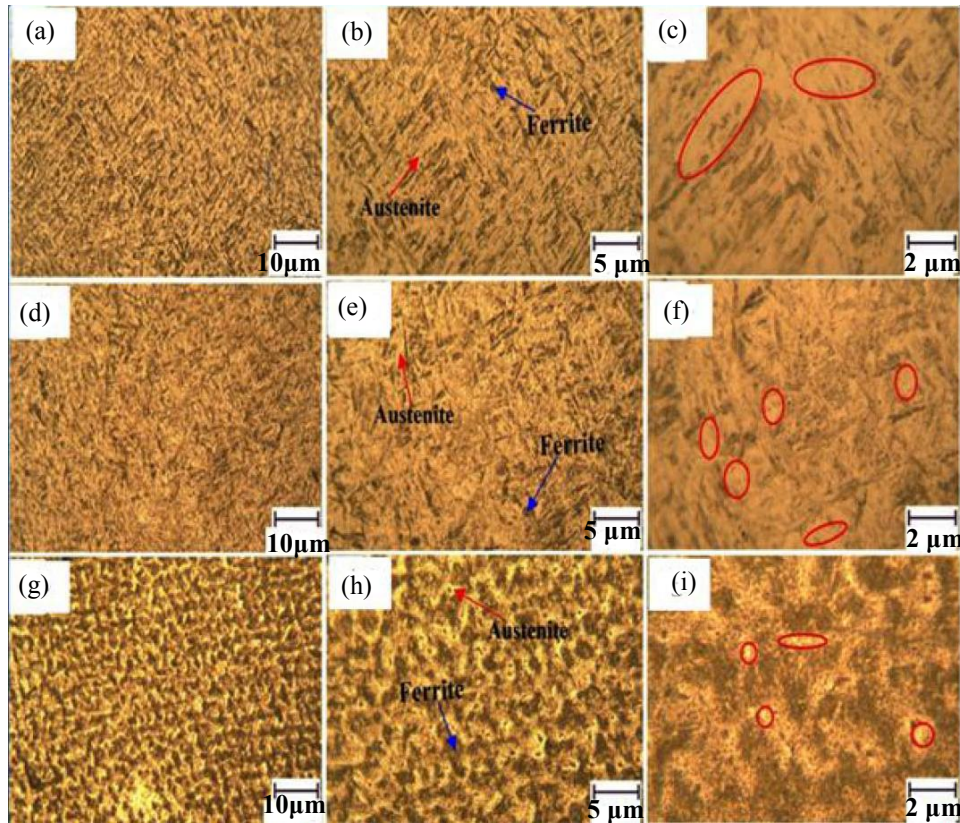


Figure 1. Optical microscope images of a,b,c) AISI 304 stainless steel, d,e,f) GO-10 pastes, g,h,i) RGO-10 pastes in the welding zone

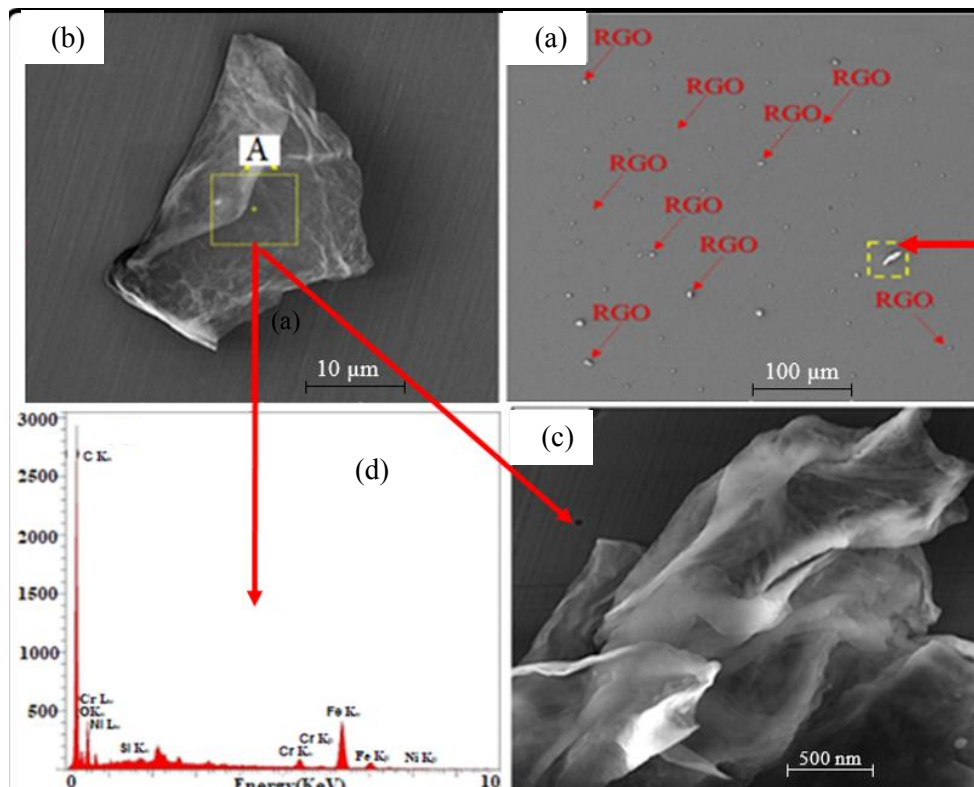


Figure 2. SEM of a) distribution, b,c, and d) RGO morphology and composition in the welding zone

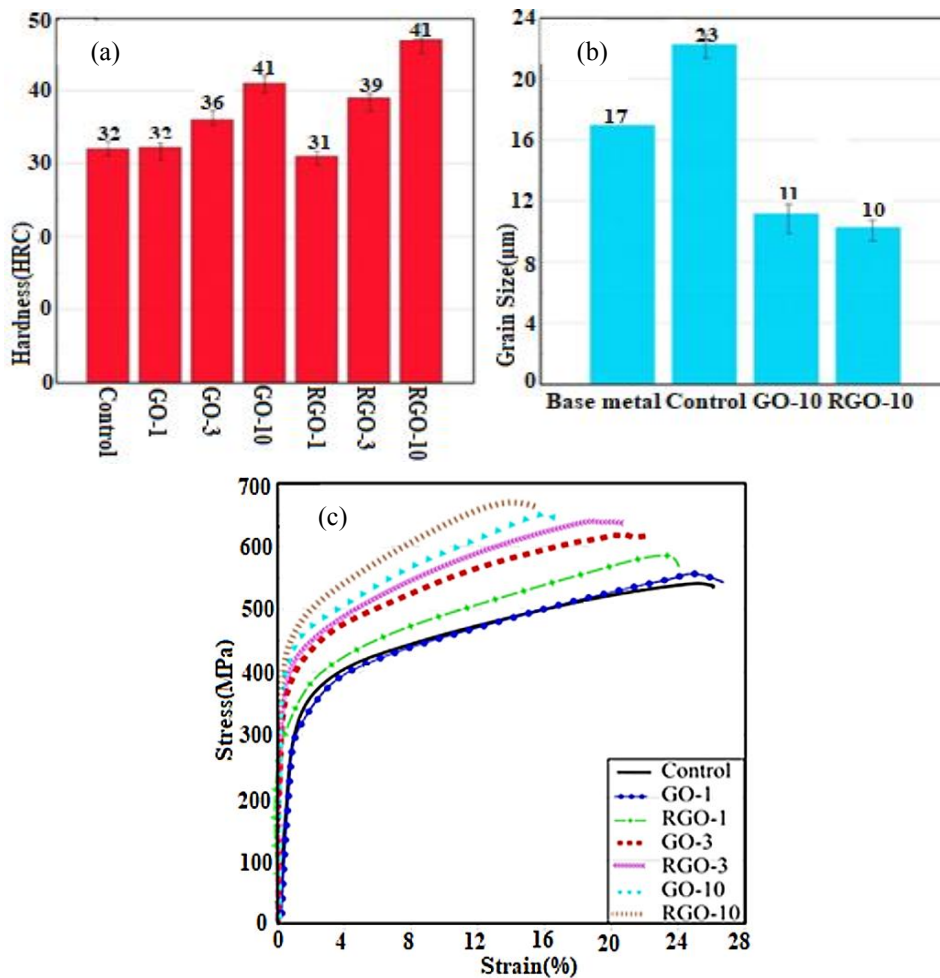


Figure 3. a) Hardness, b) Grain size and c) Stress-strain curves related to welding area reinforced with GO and RGO in various concentrations as GO-1, GO-3, GO-10, RGO-1, RGO-3, and RGO-10 compared to the welding zone of the control sample

### 3.4. Tensile Strength

Tensile strength results are presented in Figure 3(c).

## 4. CONCLUSION

- 1- A considerable value of ultimate tensile strength up to 668.5 MPa was obtained in the welding zone of the sample RGO-10.
- 2- Hardness value in the RGO-10 sample increased from 32 to 41 RC compared to that of the control specimen. Besides, grain size was reduced from 17 µm to around 10 µm due to the probable effect of GO and RGO nanosheets in dislocations' pinning and refinement of grains.

### Acknowledgment

The authors of this study consider it necessary to thank

Sustainable Nano-surfaces of the East (payanano.com) company for supporting this research.

## REFERENCES

1. Juffus, L., *Welding Principles and Applications*, 8th ed., New York, Delmar, 2017.
2. Moghadam, A. D., Schultz, B. F., Ferguson, J. B., Omrani, E., Rohatagi, P. K., Gupta, N., "Functional Metal Matrix Composites: Self-Lubricating, Self-Healing, and Nanocomposites-An Outlook", *Journal of the Minerals Metals Materials Society*, Vol. 66, No. 6, pp. 872-881, 2014.