

## بررسی تاثیر نانوفلاکس های $MgO$ ، $SiO_2$ و $ZnO$ بر خواص جوشکاری با گاز محافظ آلومینیوم ۷۰۷۵

مسلم پایدار<sup>۱\*</sup>، مجتبی جعفریان<sup>۲</sup>، صاحبعلی منافی<sup>۲</sup> و سید شهاب‌الدین طباطبایی نائینی<sup>۱</sup>

۱- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، گروه مهندسی مواد، تهران، ایران

۲- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شاهرود، گروه مهندسی مواد، شاهرود، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۲/۱۰/۱۱، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۲/۱۱/۲۴، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۲/۱۲/۲۰

### چکیده

در این پژوهش تاثیر انواع نانوفلاکس‌های فعال بر روی عمق نفوذ، عرض و ریزساختار جوش توسط فرآیند جوشکاری با گاز محافظ تیگ بر روی آلومینیوم ۷۰۷۵ با ضخامت ۵ mm مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج بیشترین و کمترین میزان عمق نفوذ به ترتیب مربوط به نانوفلاکس  $SiO_2$  و حالت بدون فلاکس می‌باشد. نانوفلاکس‌های  $SiO_2$ ،  $MgO$  و  $ZnO$  به ترتیب میزان عمق نفوذ جوش را نسبت به جوشکاری بدون استفاده از نانوفلاکس به ترتیب ۲۵۵٪، ۹۷٪ و ۸۴٪ افزایش دادند. سطح ظاهری جوش‌ها با افزودن نانوفلاکس تغییر کرده و ریزدانه‌ترین ساختار در ناحیه متأثر از حرارت مربوط به نانوفلاکس  $SiO_2$  بود. همچنین بررسی میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از سطح مقطع جوش نشان داد که در اثر وزش قوس و جابجایی مذاب، نانوفلاکس به سمت کناره‌های جوش جابجا می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** فرآیند جوشکاری با گاز محافظ، نانوفلاکس اکسیدی، آلومینیوم ۷۰۷۵.

### ۱- مقدمه

کم می‌باشد. این محدودیت اقتصادی زمانیکه با فرآیند جوشکاری قوس با الکتروود مصرفی در مقاطع با ضخامت بیش از ۱۰ mm مقایسه شود، توجیه اقتصادی دارد. از سوی دیگر تمایل به تولیدات با کیفیت بالاتر و بهره‌وری بیشتر در سال‌های اخیر منجر به توسعه گوناگون در فرآیند تیگ شده است [۴-۶]. در سال‌های اخیر، فرآیند جوشکاری تیگ فعال شده (Activated-TIG: A-TIG) نام دارد [۷] توجه بیشتری به آن شده است که بطور قابل توجهی باعث بهبود نفوذ جوش توسط اعمال لایه نازکی از نانوفلاکس فعال روی سطح جوش قبل از شروع جوشکاری تیگ می‌شود [۸]. استفاده از نانوفلاکس‌های فعال در فرآیند جوشکاری تیگ در سال ۱۹۶۰ تحت عنوان روش

آلیاژهای آلومینیوم بطور وسیعی در صنایع پیشرفته به واسطه ویژگی‌های خاصی که دارا می‌باشند از جمله چگالی کم و مقاومت به خوردگی بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند. جریان تناوبی (AC) و جوشکاری تنگستن با گاز محافظ (Tungsten Inert Gas: TIG) مرسوم‌ترین فرآیند برای جوشکاری آلیاژهای آلومینیوم است [۳-۱]. مزیت‌های جوشکاری تیگ (TIG) از جمله کیفیت متالورژیکی بالای جوش و خواص مکانیکی خوب می‌باشند با وجود این مزیت‌ها، محدودیت‌هایی در این فرآیند وجود دارد که بواسطه نفوذ کم جوش، رسوب جوشکاری و بازدهی تولید

\*عهده‌دار مکاتبات: مسلم پایدار

نشانی: تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، دانشکده مهندسی مواد

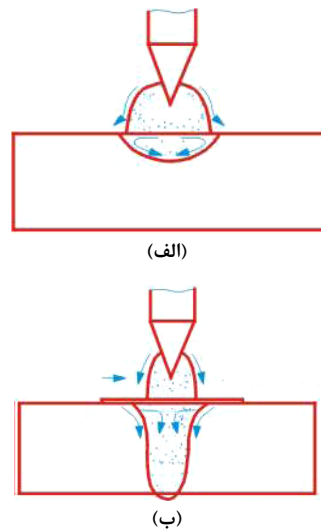
تلفن: ۰۲۱-۴۴۸۶۵۱۵۴، دورنگار: ۰۲۱-۴۴۸۰۴۱۸۱، پست الکترونیکی: [moslem\\_paidar@yahoo.com](mailto:moslem_paidar@yahoo.com)

جوش پوشش داده شده با مخلوطی از کلرید منگنز و اکسید روی با روش تیگ به ایجاد جوشی بین آلیاژهای AZ31B منیزیم پرداخته و مشاهده نمودند که در حضور فلز پرکننده (هر گونه مواد مورد استفاده جهت اتصال دو قطعه فلز در حین جوشکاری یا لحیم کاری، که در حین جوشکاری ذوب شده و منجر به اتصال بین دو قطعه می شود) پوشش داده شده، نه تنها عمق نفوذ افزایش می یابد بلکه بدلیل مخلوط شدن مناسب قطرات مذاب با حوضچه مذاب در اثر مخلوط شدن آنها بوسیله قوس درز جوش مناسبی تشکیل می شود. از طرفی احمدی و همکاران [۱۳] بر روی جوشکاری تیگ فولادهای زنگ نزن آستنیتی 316L با استفاده از فلاکس های  $\text{TiO}_2$  و  $\text{SiO}_2$  تحقیقاتی را صورت داده و به این نتیجه رسیدند که علاوه بر ایجاد عمق بیشتر نفوذ توسط فلاکس  $\text{SiO}_2$ ، سختی و استحکام اتصال حاصل با این فلاکس نیز بیشتر از فلاکس  $\text{TiO}_2$  خواهد بود. شیو و همکاران [۱۴] جوشکاری تیگ فعال شده بر روی آلومینیوم ۳۰۰۳ را مورد بررسی قرار داده و طبق گزارشات در صورت استفاده از فلاکس نه تنها انقباض قوس بلکه سرباره تشکیل شده بر روی جوش پس از فرآیند نیز در افزایش هر چه بیشتر عمق نفوذ تاثیر گذار می باشد. آنها همچنین به این نتیجه رسیدند که تاثیر نانوفلاکس بر روی افزایش ولتاژ حدود ۱ تا ۲ ولت است که این افزایش ولتاژ نیز دلیلی بر افزایش نفوذ خواهد بود. سان و پن گزارش کرده اند [۱۵] که در جوشکاری تیگ فعال شده می توان انتظار افزایش بیش از ۳۰٪ در عمق نفوذ را نسبت به فرآیند جوشکاری تیگ معمولی داشت. در تمامی تحقیقات صورت گرفت در زمینه استفاده از فلاکس جهت افزایش عمق نفوذ از فلاکس هایی با اندازه ذرات در مقیاس میکرون استفاده شده، به همین منظور در این پژوهش سعی شد تا به بررسی تاثیر انواع نانوفلاکس های فعال روی عمق نفوذ، عرض و ریزساختار جوش توسط فرآیند جوشکاری با گاز محافظ (تیگ) بر روی آلومینیوم ۷۰۷۵ با ضخامت ۵ mm پرداخته شود.

## ۲- فعالیت های تجربی

ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی آلومینیوم ۷۰۷۵ مورد استفاده به ترتیب در جدول های ۱ و ۲ آورده شده است.

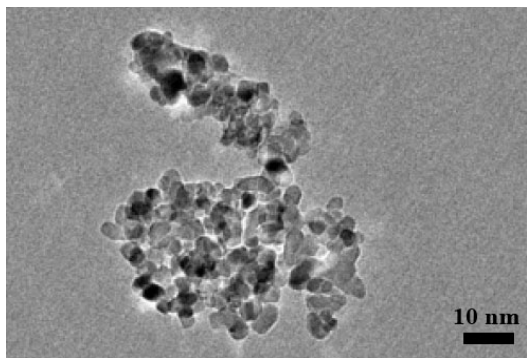
تیگ فعال (Activated-TIG) شناخته شده است. در این روش، لایه نازکی از نانوفلاکس فعال روی سطح فلز پایه اعمال می شود. در طی جوشکاری، شرایط معین در قوس و ناحیه جوش منجر به افزایش عمق نفوذ جوش و افزایش بهره وری در اتصال قطعات ضخیم خواهد شد، که در شکل ۱ شماتیک فرآیند و تاثیر آن بر روی هندسه جوش نشان داده شده است.



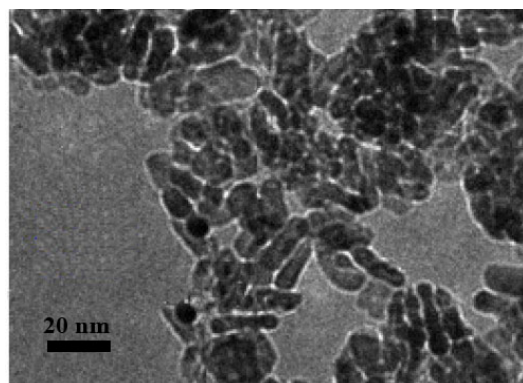
شکل ۱: شماتیکی از فرآیند الف) TIG و ب) A-TIG

فرآیند جوشکاری تیگ فعال شده شامل دو مکانیزم می باشد: ۱- اثر جابجایی مارانگونی و ۲- رفتار قوس جوشکاری. هپیل و روپر گزارش کرده اند [۹] که سطح عناصر فعال در حوضچه مذاب باعث تغییر دمایی ضریب کشش سطحی از منفی به مثبت خواهد شد، لذا باعث معکوس شدن جابجایی مارانگونی و در نتیجه باعث حرکت مذاب از بیرون به داخل خواهد شد. معکوس شدن حرکت مارانگونی باعث افزایش عمق نفوذ اتصال خواهد شد. لوکاس و همکارانش [۱۰] عمق نفوذ بیشتر در جوشکاری تیگ فعال شده را به انقباض قوس جوش نسبت داده اند.

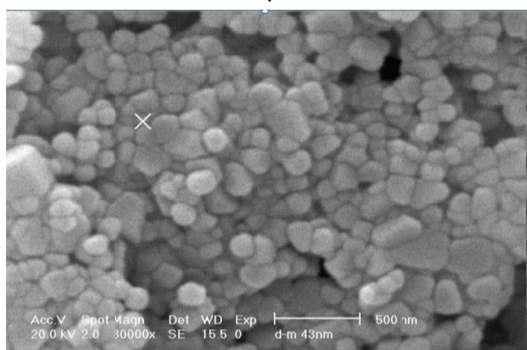
در این رابطه لیو و همکاران [۱۱] بر روی تاثیر فلاکس کادمیم کلرید در جوشکاری تیگ فعال آلیاژهای منیزیم تحقیقاتی را صورت دادند و به این نتیجه رسیدند که در حضور فلاکس کادمیم کلرید عمق نفوذ به دو برابر حالت بدون استفاده از فلاکس افزایش می یابد. همچنین در پژوهش دیگری لیو و همکاران [۱۲] با استفاده از سیم



(الف)

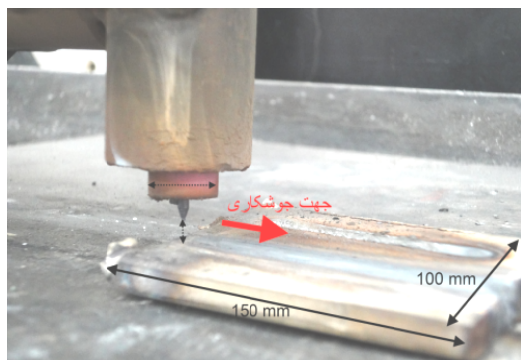


(ب)



(ج)

شکل ۲: تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نانوذرات،  
الف)  $\text{SiO}_2$ ، ب)  $\text{MgO}$  و ج)  $\text{ZnO}$



شکل ۳: وضعیت قرارگیری دستگاه و ابعاد ورقه‌ها.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی فلز پایه (wt.%).

Alloy	Al	Cr	Mg	Mn	Zn
۷۰۷۵	base	۰/۲	۲/۶	۰/۱۵	۵/۶
	Cu	Fe	Si	Ti	-
	۱/۵	۰/۴۵	۰/۱۲	۰/۰۳	-

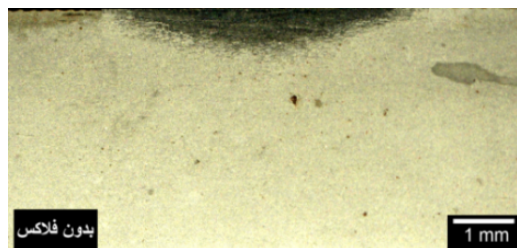
جدول ۲: خواص مکانیکی فلز پایه.

Alloy	استحکام کششی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)
۷۰۷۵	۶۱۱	~ ۵۸۱
	ازدیاد طول (%)	سختی ویکرز (HV)
	۱۱	۱۹۰

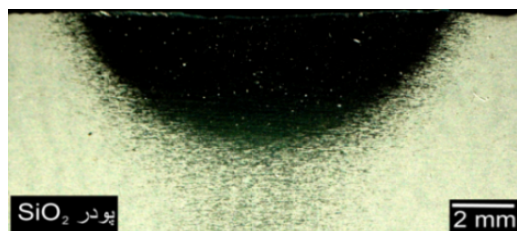
ورقه‌هایی با ابعاد  $5 \times 10 \times 150$  mm جهت جوشکاری آماده شد. در این تحقیق تاثیر نوع نانوفلاکس در شرایط ثابت، جریان متناوب، سرعت جوشکاری  $2$  mm/s، فاصله نوک الکتروود تا ورق  $2$  mm، الکتروود تنگستنی با قطر  $3/2$  mm مورد بررسی قرار گرفت. به منظور اطمینان از نتایج بدست آمده، هر آزمایش سه بار تکرار شد و میانگین نتایج به عنوان نتیجه کلی گزارش شد. در آزمایشات صورت گرفته از فلز پرکننده استفاده نشد و جوشکاری در یک پاس به صورت ایجاد یک خط جوش بر روی صفحه آلومینیومی انجام شد. شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ الکترونی از پودرهای مورد استفاده شامل  $\text{SiO}_2$ ،  $\text{MgO}$  و  $\text{ZnO}$  می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود پودرهای  $\text{ZnO}$  و  $\text{MgO}$  دارای اندازه دانه‌ای به ترتیب در حدود  $30$ ،  $40$  و  $50$  nm می‌باشند. به منظور اعمال پودر بر روی نمونه‌ها، پودر توسط استون به صورت خمیر در آورده شد و با قلمو بر روی ورق آلومینیومی حرکت داده شد. سپس نمونه‌ها تحت شرایط ذکر شده جوشکاری شدند (شکل ۳). پس از جوشکاری سطح مقطع نمونه‌های جوشکاری شده آماده‌سازی، سمباده و پولیش زده شد و توسط محلول Keller ( $\text{H}_2\text{O}$  ۹۵ ml،  $\text{HCl}$  ۱/۵ ml،  $\text{HNO}_3$  ۲/۵ ml و  $\text{HF}$  ۱ ml) اچ شدند. سپس میزان عمق، عرض جوش و ریزساختار فلز جوش توسط میکروسکوپ نوری مدل Olympus CK40M، میکروسکوپ استریو و میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Leo 440i مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌های ریزسختی بوسیله دستگاه ریزسختی سنج ویکرز، با بار اعمالی  $50$  g و مدت زمان اعمال بار  $20$  ثانیه صورت گرفت.

## ۳- نتایج و بحث

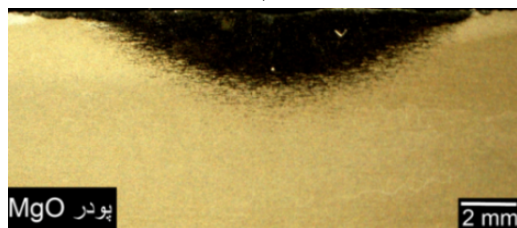
شکل ۵ تصاویر درشت ساختار از سطح مقطع جوش‌های ایجاد شده توسط نانوفلاکس‌های مختلف و بدون نانوفلاکس را نشان می‌دهد. نانوفلاکس‌های مختلف باعث تغییر عمق نفوذ جوش و عرض جوش می‌شوند.



(الف)



(ب)



(ج)

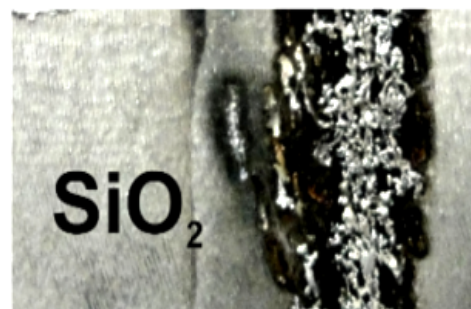


(د)

شکل ۵: تصاویر درشت ساختار از سطح مقطع جوش‌های ایجاد شده با استفاده از، (الف) بدون نانوفلاکس، (ب)  $\text{SiO}_2$ ، (ج)  $\text{MgO}$  و (د)  $\text{ZnO}$ .

همانطوریکه ملاحظه می‌شود نانوفلاکس  $\text{SiO}_2$  باعث بیشترین مقدار عمق نفوذ شده است بطوریکه مقدار عمق نفوذ جوش نسبت به جوشکاری بدون نانوفلاکس حدود ۳۵۵٪ افزایش یافته است. در رابطه با مکانیزمی که منجر به افزایش عمق نفوذ می‌شود، می‌توان به تجزیه نانوفلاکس اشاره نمود [۲۱-۱۶]. دمای بالا در ناحیه زیر قوس (حدود

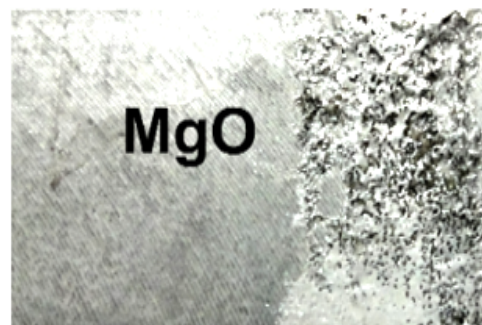
شکل ۴ تاثیر نانوفلاکس بر روی سطح ظاهری جوش را نشان می‌دهد. نانوفلاکس‌های مختلف، سطوح ظاهری متفاوتی، خواهند داشت. سطح ظاهری جوش‌های ایجاد شده با استفاده از نانوفلاکس  $\text{SiO}_2$ ، کمی سیاه رنگ و باریکتر از سطح جوش‌های ایجاد شده با پودرهای  $\text{MgO}$  و  $\text{ZnO}$  می‌باشد. این مسأله نشان دهنده انقباض بیشتر قوس در حین استفاده از نانوفلاکس  $\text{SiO}_2$  بوده که در نتیجه آن افزایش جریان و ولتاژ قوس منجر به سیاه‌تر شدن خط جوش ایجاد می‌شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴: تاثیر نانوفلاکس بر روی سطح ظاهری جوش در شرایط ثابت، (الف)  $\text{SiO}_2$ ، (ب)  $\text{ZnO}$  و (ج)  $\text{MgO}$ .

در جدول ۳ مقادیر درصد افزایش عمق نفوذ آورده شده است.

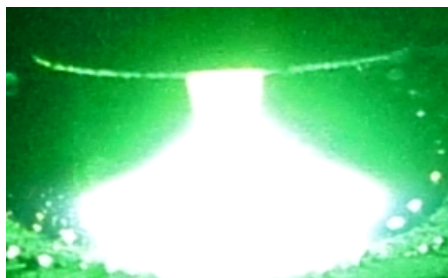
جدول ۳: تاثیر نانوفلاکس اکسیدی بر روی هندسه جوش.

نوع پودر	نفوذ جوش (mm)	پهنای جوش (mm)	افزایش عمق نفوذ (%)
بدون پودر	۰/۸۶	۱۰/۵	---
MgO	۱/۷	۹/۷	۹۷
SiO <sub>2</sub>	۳/۰۶	۷/۶۹	۲۵۵
ZnO	۱/۵۹	۹/۳۹	۸۴

همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، بیشترین عمق نفوذ به ترتیب مربوط به SiO<sub>2</sub>، MgO، ZnO و بدون نانوفلاکس است که مطابق با جدول ۳ عمق نفوذ به ترتیب ۲۵۵٪، ۹۷٪ و ۸۴٪ نسبت به حالتی که از نانوفلاکس استفاده نشده است افزایش یافته است. نکته قابل توجه کاهش پهنای جوش با استفاده از نانوفلاکس SiO<sub>2</sub> نسبت به نانوفلاکس‌های MgO و ZnO است. عاملی که باعث تغییر در عمق نفوذ و پهنای جوش می‌شود، انقباض قوس است که در شکل ۷ این رفتار قوس با استفاده از نانوفلاکس SiO<sub>2</sub> و بدون استفاده از نانوفلاکس نشان داده شده است.



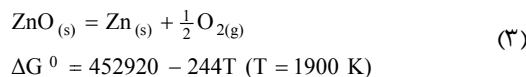
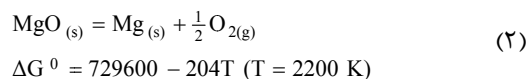
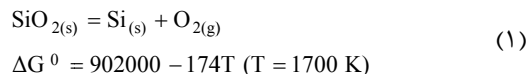
(الف)



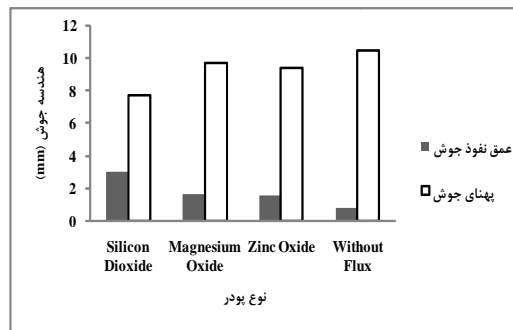
(ب)

شکل ۷: نمای روبرویی از ستون پلاسمای قوس، (الف) بدون حضور نانوفلاکس و (ب) با حضور نانوفلاکس SiO<sub>2</sub>.

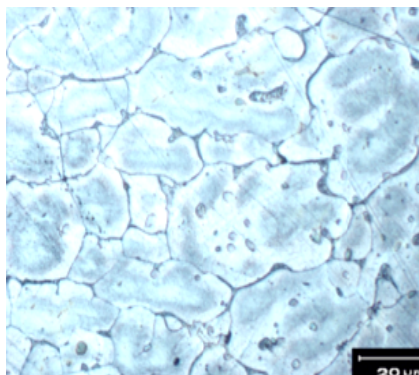
که منجر به تجزیه و تبخیر نانوفلاکس از سطح جوش می‌شود. معادلات ترمودینامیکی مربوط به SiO<sub>2</sub>، ZnO و MgO در ادامه آورده شده است.



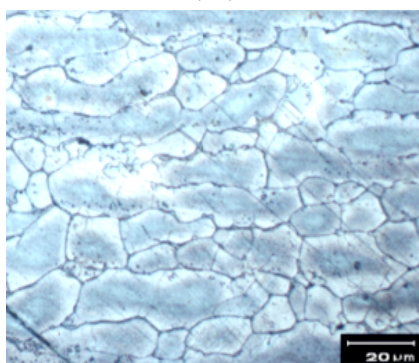
همانطوریکه ملاحظه می‌شود نانوفلاکس SiO<sub>2</sub> نسبت به دو نانوفلاکس دیگر در دمای پایین‌تری تجزیه می‌شود و همین مسأله عامل اصلی در تراکم هر چه بیشتر قوس خواهد بود. چرا که مولکول‌های اکسیدی بدست آمده از تجزیه نانوفلاکس، تمایل به اتصال به الکترون‌های آزاد اطراف پلاسمای قوس را دارند. در نتیجه جذب الکترون توسط این مولکول‌های اکسیدی باعث تولید یون‌های منفی ( $2e + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2^{2-}$ ) با تحرک پذیری کم در اطراف قوس خواهند شد. در نهایت حضور این لایه اکسیدی در اطراف قوس، منجر به انقباض و جمع شدگی قوس و جلوگیری از اتلاف گرما بوسیله الکترون‌ها می‌شود. تاثیر SiO<sub>2</sub> روی افزایش ولتاژ بیشتر از نانوفلاکس‌های دیگر است که این افزایش ولتاژ باعث افزایش عمق نفوذ جوش خواهد شد. شکل ۶ نشان دهنده مقدار کمی عمق و عرض جوش در شرایط استفاده از نانوفلاکس‌های مختلف می‌باشد.



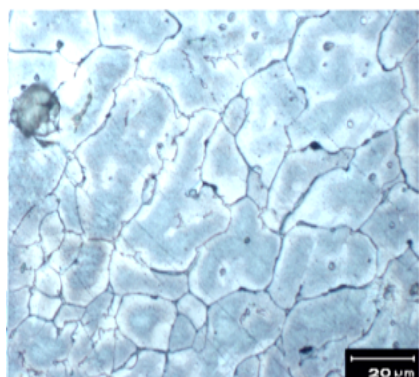
شکل ۶: تاثیر نانوفلاکس‌های فعال بر روی هندسه جوش.



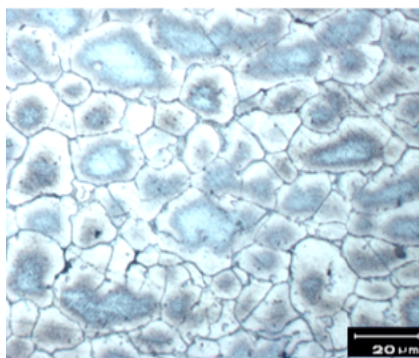
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۸: تصاویر ریزساختار متاثر از حرارت و ناحیه جوش با استفاده از، الف و ب) بدون نانوفلاکس، ج و د) نانوفلاکس  $\text{SiO}_2$ .

همراه با انقباض قوس، دانسیته جریان ورودی در مرکز آند (نقطه آند) افزایش یافته که باعث افزایش عمق نفوذ جوش می‌شود. این رخداد توسط Xing-hong و Qing-ming [۲۲] نشان داده شده است که تجزیه نانوفلاکس فعال باعث افزایش ولتاژ قوس خواهد شد. لذا می‌توان گفت که یکی از دلایل افزایش عمق نفوذ توسط نانوفلاکس  $\text{SiO}_2$  بدلیل افزایش ولتاژ قوس است. این موضوع به این خاطر است که اکسید سیلیسیم یک سرامیک اکسیدی است و یک کانال رسانا بین الکتروود تنگستن و قطعه کار تشکیل می‌دهد. در این تحقیق همچنین تاثیر نانوفلاکس بر روی ولتاژ بررسی شد و همانطور که انتظار می‌رفت، استفاده از نانوفلاکس باعث افزایش ولتاژ شد که این افزایش ولتاژ باعث افزایش حرارت ورودی و در نتیجه افزایش عمق و پهنای جوش شد (جدول ۴).

جدول ۴: تاثیر نانوفلاکس بر روی ولتاژ جوشکاری.

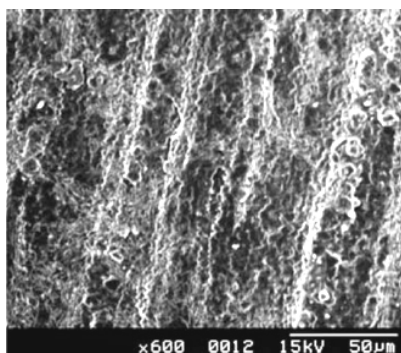
نوع فلاکس	ولتاژ قوس (V)	سختی فلز جوش (HV)
بدون نانوفلاکس	۱۳	۱۴۲
MgO	۱۴	۱۲۱
$\text{SiO}_2$	۱۶	۹۷
ZnO	۱۴	۱۱۷

افزایش عمق نفوذ جوش با استفاده از نانوفلاکس‌ها، نشان دهنده تمرکز بالای انرژی در طی فرآیند جوشکاری و همچنین تمایل به کاهش اعوجاج زاویه‌ای قطعات جوشکاری را دارد. علاوه بر این حساسیت به تشکیل عیوب با استفاده از نانوفلاکس‌ها کاهش خواهد یافت، علاوه بر این تاثیر دیگری که نانوفلاکس‌ها دارا می‌باشند، کاهش سختی ناحیه جوش است، یعنی افزایش نانوفلاکس، باعث افزایش حرارت ورودی خواهد شد که به دنبال آن افزایش تبلور مجدد دانه‌ها، رشد دانه‌ها و در نتیجه کاهش سختی فلز جوش را منجر خواهد شد. میزان تغییرات سختی در جدول ۴ آورده شده است. شکل ۸ نشان دهنده تاثیر نانوفلاکس  $\text{SiO}_2$  بر روی اندازه دانه می‌باشد. افزایش حرارت ورودی در اثر افزایش ولتاژ و در نتیجه افزایش رشد دانه در ناحیه جوش و کاهش اندازه دانه در ناحیه متاثر از حرارت رخ خواهد داد.

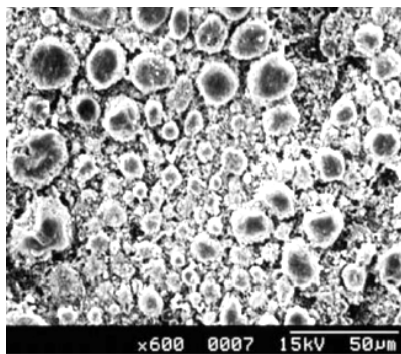
سطح تماس ذرات با قوس و انجام سریعتر واکنش تبخیر جمع شدگی قوس نسبت به حالت استفاده از فلاکس در مقیاس میکرون بیشتر خواهد بود. کشش سطحی در مرکز حوضچه بالاتر از کناره‌ها خواهد بود که باعث خواهد شد حرکت معکوس جابجایی مارانگونی رخ دهد و مواد از کناره‌ها به سمت داخل سیلان کنند (شکل ۹-ب). شکل ۱۰ نشان دهنده تصاویر SEM از سطح مقطع جوش در حضور نانوفلاکس  $SiO_2$  از مرکز و کناره‌های سطح جوش می‌باشد.



(الف)



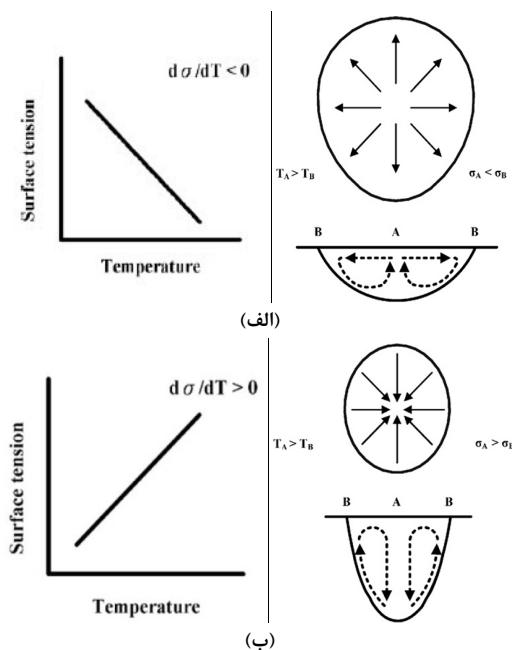
(ب)



(ج)

شکل ۱۰: تصاویر SEM از، الف) سطح مقطع جوش در حضور نانوفلاکس  $SiO_2$ ، ب) ناحیه A و ج) ناحیه B.

لازم به ذکر است از آنجائیکه ناحیه اصلی شکست در جوش‌ها، ناحیه متأثر از حرارت است، لذا تمرکز یا همان انقباض قوس به وضوح بر روی ناحیه متأثر از حرارت تاثیر خواهد گذاشت (باعث حرارت ورودی کمتری به این ناحیه خواهد شد) که باعث ریز دانه‌تر بودن این ناحیه و در نتیجه بهبود استحکام کشش اتصال خواهد داشت. دلیل دیگری که فلاکس‌های اکسیدی باعث افزایش نفوذ جوش می‌شوند را می‌توان به تغییر کشش سطحی نسبت داد. شکل ۹ شماتیکی از حالت‌های جریان گریز از مرکز مارانگونی و جریان مرکزگرای مارانگونی می‌باشد. در جوشکاری تیگ معمولی شرایط سیلان مواد از مرکز حوضچه جوش به کناره‌های حوضچه خواهد بود که باعث می‌شود پهنای جوش زیاد شود که در شکل ۹-الف نشان داده شده است.



شکل ۹: شماتیکی از حالت‌های جریان مارانگونی، الف) جریان گریز از مرکز مارانگونی و ب) جریان مرکزگرای مارانگونی [۲۳].

ولی وقتی از فلاکس استفاده می‌شود، بدلیل حضور اکسیژن دمای کشش سطحی ( $\sigma$ ) در مذاب تغییر خواهد کرد و باعث مثبت شدن شیب تغییرات کشش سطحی با دما ( $d\sigma/dT$ ) خواهد شد. از طرفی زمانیکه فلاکس مورد استفاده در مقیاس نانو باشد در این صورت بواسطه افزایش

## مراجع

- [1] J.H. Zhang, X.S. Lu, W. Yu, *Development and Application of Materials*, **15**, 2000, 1.
- [2] A. Vaziri, M. Heydarzadeh Sohi, A. Safaei, *Surface and Coatings Technology*, **206**, 2012, 3788.
- [3] S.P. Lu, M.P. Qin, W.C. Dong, *Journal of Materials Processing Technology*, **213**, 2013, 229.
- [4] P. Vasantharaja, M. Vasudevan, *Journal of Nuclear Materials*, **421**, 2012, 117.
- [5] L. Dongjie, L. Shanping Lu, D. Wenchao, L. Dianzhong, L. Yiyi, *Journal of Materials Processing Technology*, **212**, 2012, 128.
- [6] K.H. Tseng, K.J. Chuang, *Powder Technology*, **228**, 2012, 36.
- [7] K.H. Tseng, C.Y. Hsu, *Journal of Materials Processing Technology*, **211**, 2011, 503.
- [8] G.I. Qin, G. Wang, Z. Zou, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **22**, 2012, 23.
- [9] C.R. Heiple, J.R. Ropper, *Weld. J.*, **61**, 1982, 97.
- [10] W. Lucas, D. Howse, *Weld. Met. Fab.*, **64**, 1996, 11.
- [11] L. Liu, Z. Zhang, G. Song, Y. Shen, *Materials Transactions*, **47**, 2006, 446.
- [12] L.M. Liu, D.H. Cai, Z.D. Zhang, *Scripta Materialia*, **57**, 2007, 695.
- [13] E. Ahmadi, A.R. Ebrahimi, *Journal of Advanced Materials and Processing*, **1**, 2012, 55.
- [14] S.W. Shyu, H.Y. Huang, K.H. Tseng, C.P. Chou, *J. Mater. Eng. Perfor.*, **17**, 2008, 193.
- [15] Z. Sun, D. Pan, *Sci. Technol. Weld. Join.*, **9**, 2004, 337.
- [16] K.H. Tseng, C.Y. Hsu, *Journal of Materials Processing Technology*, **210**, 2010, 1.
- [17] S. Lu, H. Fujii, K. Nogi, *Journal of Materials Processing Technology*, **209**, 2009, 1231.
- [18] M. Fattahia, N. Nabhani, E. Rashidkhani, Y. Fattahi, S. Akhavan, N. Arabian, *Micron*, **54**, 2013, 28.
- [19] S. Tashiro, M. Miyata, M. Tanaka, *Thin Solid Films*, **519**, 2011, 7025.
- [20] Y. Dongxia, L. Xiaoyan, N. Zuoren, H. Dingyong, H. Hui, Z. Guanzhen, *Rare Metal Materials and Engineering*, **41**, 2012, 1713.
- [21] A.V. Birdeanu, C. Ciuca, A. Puicea, *Journal of Materials Processing Technology*, **212**, 2012, 890.
- [22] L. Qing-Ming, W. Xin-Hong, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **17**, 2007, 486.
- [23] S. Lv, Q. Cui, Y. Huang, X. Jing, *Materials Science and Engineering: A*, **568**, 2013, 150.

همانطوریکه ملاحظه می‌شود تصاویر نشان دهنده سرباره باقیمانده اضافی در کناره‌های سطح جوشکاری شده است و در مرکز جوش آثاری از نانوفلاکس مشاهده نمی‌شود. در تصویر ۱۰-الف نقاط A و B به ترتیب مربوط به مرکز و کناره‌های جوش می‌باشند. در اثر ایجاد حرکت مارانگونی که در اثر اضافه کردن نانوفلاکس ایجاد می‌شود، ذرات فلاکس به کناره‌های سطح جوش رانده خواهند شد.

## ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تاثیر انواع نانوفلاکس‌های فعال روی عمق نفوذ، عرض و ریزساختار جوش توسط فرآیند جوشکاری با گاز محافظ (تیگ) آلومینیوم ۷۰۷۵ با ضخامت ۵ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. پودرهای  $\text{SiO}_2$ ،  $\text{MgO}$  و  $\text{ZnO}$  جهت بررسی ساختاری استفاده شد. طبق نتایج حاصل شده بیشترین میزان عمق نفوذ مربوط به نانوپودر  $\text{SiO}_2$  و کمترین عمق نفوذ مربوط به جوشکاری بدون نانوفلاکس می‌باشد. نانوفلاکس  $\text{SiO}_2$ ،  $\text{MgO}$  و  $\text{ZnO}$  به ترتیب میزان عمق نفوذ جوش را نسبت به جوشکاری بدون استفاده از نانوفلاکس به ترتیب ۲۵۵٪، ۹۷٪ و ۸۴٪ افزایش دادند. از طرفی ریزدانه‌ترین ساختار در ناحیه متأثر از حرارت مربوط به  $\text{SiO}_2$  بود. لذا سختی کمتر و استحکام کششی بیشتری را در پی داشت. استفاده از نانوفلاکس باعث افزایش ولتاژ جوشکاری خواهد شد که این افزایش ولتاژ باعث افزایش عمق نفوذ می‌شود.