

## Research Paper

### Study on A-TIG Welding of D2 Tool Steel Alloy with SiO<sub>2</sub> and ZnO Fluxes

Soleiman Mohammad Bidhandi<sup>1</sup>, \*Ayoub Halvae<sup>2</sup>

1- M.Sc of Material Engineering , Department of Metallurgy Engineering , South Tehran Branch , Islamic Azad University , Tehran , Iran .

2- Associate Professor , School of Metallurgy and Materials Engineering , Tehran University, Tehran , Iran .

**Citation:** Mohammad Bidhandi S, Halvae A. Study on A-TIG Welding of D2 Tool Steel Alloy with SiO<sub>2</sub> and ZnO Fluxes. Metallurgical Engineering 2017; 20(3): 172-185 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2017.55588.1116>.

**doi :** <http://dx.doi.org/10.22076/me.2017.55588.1116>

## ABSTRACT

In this research, Welding of D2 Cold Work Tool Alloy steel have been evaluated. A-TIG technique has been utilized to find an appropriate solution in order to increase the depth of penetration and welding width compared to TIG. Active oxide flux and current intensity have considered as a main variables and their effects on penetration depth, welds width and welding surface appearance were investigated. The fluxes used in this study were ZrO<sub>2</sub> and SiO<sub>2</sub> and welding process was carried out at 85, 100, 115, 130 and 145A current intensities.

The results showed that arc deviation and spattering due to electrical resistance of ZrO<sub>2</sub> flux creates improper appearance on weld surface. Welding by SiO<sub>2</sub> flux make welds with good surface appearance and increase the depth of penetration and also decrease weld width. SiO<sub>2</sub> flux shows the best performance by increasing of penetration depth up to 5.4 mm at 145A current intensity.

**Keywords:** Steel D2, Oxide Active Flux, A-TIG, Welding Depth Penetration.

■ ..... ■

\* **Corresponding Author:**

**Ayoub Halvae, PhD**

**Address:** School of Metallurgy and Materials Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

**Tel:** +98(21) 82084104

**E-mail:** halvae@ut.ac.ir

## جوشکاری به روش A-TIG بر روی فولاد ابزار D2 با فلاکس های اکسیدی $\text{SiO}_2$ و $\text{ZnO}$

سلیمان محمدبیدهدنی<sup>۱</sup>، \* ایوب حلوانی<sup>۲</sup>

۱- کارشناسی ارشد مهندسی مواد، گروه مهندسی مواد، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

### چکیده

در این پژوهش، جوشکاری فولاد ابزار سردکار آلیاژی D2 مورد بررسی قرار گرفته است. سعی گردیده است به کمک روش A-TIG راه حل مناسبی برای افزایش عمق نفوذ و نسبت عمق به عرض جوش در مقایسه با روش TIG جست و جو شود. متغیرهای این پژوهش نوع فلاکس فعال اکسیدی و شدت جریان در نظر گرفته شده اند که تاثیر هر یک بر عمق نفوذ و عرض جوش و ظاهر آن مورد بررسی قرار گرفته است. فلاکسهای مورد استفاده در این پژوهش  $\text{ZnO}$  و  $\text{SiO}_2$  بودند و جوشکاری در پنج شدت جریان ۸۵، ۱۰۰، ۱۱۵، ۱۳۰ و ۱۴۵ آمپر انجام شد.

نتایج حاصل نشان دادند که در فلاکس  $\text{ZnO}$  انحراف قوس و پاشش به دلیل مقاومت الکتریکی فلاکس ظاهر نامناسبی را در جوش بوجود آورده است. جوش های حاصل از فلاکس  $\text{SiO}_2$  دارای ظاهری مطلوب بوده و افزایش عمق نفوذ و کاهش عرض جوش را در بر داشته است. فلاکس  $\text{SiO}_2$  در این پژوهش بهترین عملکرد را با افزایش عمق نفوذ تا ۵/۴ میلی متر در شدت جریان ۱۴۵ آمپر از خود به جای گذاشته است.

واژه‌های کلیدی: فولاد D2، فلاکس های فعال اکسیدی، A-TIG، عمق نفوذ جوشکاری.

### ۱. مقدمه

فولاد (D2 AISI 1.2379) از فولادهای مقاوم به سایش و حرارت با چقرمگی مناسب است که عمدتاً به شکل نرماله یا کوئنچ و تمپر شده مورد استفاده قرار می‌گیرد و از گروه فولادهای ابزار سرد کار می‌باشد.

جوشکاری<sup>۱</sup> TIG یک روش مناسب جوشکاری با مزایای ویژه است که محدودیت‌هایی نیز دارد، یکی از مهم ترین محدودیت‌های این روش عمق نفوذ کم آن است که برای جبران آن نیاز به جوشکاری در پاس‌های متعدد است. برای افزایش عمق نفوذ روش<sup>۲</sup> A-TIG ابداع شد [۱-۴].

در روش A-TIG با استفاده از یک سری فلاکس‌های فعال کننده سطحی، شرایطی در ستون قوس و منطق هجوش حاصل می‌شود، که می‌توان قطعاً ضخیم‌تری را با سرعت بالاتر جوشکاری نمود. فلاکس‌های فعال کننده سطحی، عمدتاً مخلوطی از مواد غیرآلی سوسپانسیون شده در یک حلال فرار می‌باشند. با استفاده از روش A-TIG هزینه‌های

1. Tungsten Inert Gas
2. Active Tungsten Inert Gas

\* نویسنده مسئول:  
دکتر ایوب حلوانی

نشانی: تهران، دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد.  
تلفن: ۸۲۰۸۴۱۶۳ (۲۱) ۹۸+

پست الکترونیکی: nili@ut.ac.ir

جوشکاری می‌تواند تا حد ۵۰٪ کاهش یابد که دلایل آن کاهش تجهیزات موردنیاز برای پخ‌زنی و آماده‌سازی نمونه جوش، کاهش در تعداد پاس‌های جوش، کوتاه شدن زمان جوشکاری، صرفه‌جویی در میزان مصرف فلز پرکننده در مواقعی که نیاز به پرکننده است، حذف شیارزنی و سنگ‌زنی و کاهش اعوجاج می‌باشد [۵-۹].

مزیت فرایند A-TIG ظرفیت اجرای جوش در یک پاس با استفاده از آماده‌سازی نمونه‌ها با درزهای مربعی می‌باشد. در مقایسه وقتی ضخامت قطعات جوش بیشتر از ۳ میلی متر باشد با استفاده از فرایند TIG معمولی پخ زدن لبه قطعات با ماشین کاری، امری عادی می‌باشد، فرایند A-TIG قادر به جوش تا ۱۲ میلی‌متر در یک پاس بدون ماده پرکننده است در صورتی که با استفاده از فرایند TIG معمولی شش پاس یا بیشتر مورد نیاز می‌باشد [۱۰ و ۱۱].

در این پژوهش به بررسی افزایش عمق نفوذ جوشکاری به کمک روش A-TIG بر روی فولاد D2 در مقایسه با روش TIG و مقایسه فلاکس‌های فعال اکسیدی با یک دیگر در شدت جریان‌های مختلف پرداخته شده است. برای ضخامت بیشتر یک قطعه پیشنهاد شده است که یک تکنیک جوش دو پاسی

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد D2 AISI 1.2379 بر اساس درصد وزنی [۱۴]

C%	Mn%	Si%	Cr%	Ni%	Mo%	V%
۱/۴۰-۱/۶۰	۰/۶۰ Max	۰/۶۰ Max	۱۱/۰۰-۱۳/۰۰	۰/۳۰ Max	۰/۷۰-۱/۲۰	۰/۹۰-۱/۱۰

جدول ۲. درصد خلوص فلاکس ها

نوع فلاکس	SiO <sub>2</sub>	ZnO
درصد خلوص (درصد وزنی)	۹۸/۰	۹۸/۰



شکل ۱. تصویر نمونه با فلاکس اعمال شده.

به کاربرده شود، یک پاس از هر طرف باعث می شود قطعه مورد جوش بتواند ضخامت تا ۲۰ میلی متر داشته باشد.

## ۲. مواد و روش تحقیق

در این تحقیق فولاد آلیاژی D2 و فلاکس های SiO<sub>2</sub> و ZnO مورد استفاده قرار گرفت که ترکیب شیمیایی آن ها در جداول ۱ و ۲ آمده است [۱۲ و ۱۳].

برای انجام آزمایش قطعاتی با ابعاد ۵۰×۶۰ میلی متر و با ضخامت ۱۰ میلی متر برش داده شد. سپس برای یکسان سازی زبری سطح نمونه ها از سنگ مغناطیس استفاده گردید و برای چربی زدایی و رفع آلودگی جهت آماده سازی برای جوشکاری و اعمال فلاکس ها قطعات با استون با غلظت ۳۰٪ شست و شو داده شد و با استفاده از چسب کاغذی ناحیه ای به طول ۵ سانتی متر و عرض ۱/۵ سانتی متر در نمونه ایجاد شد تا با اعمال فلاکس در این ناحیه قطعات مورد جوشکاری قرار گیرد.

فلاکس های مورد استفاده در این پروژه از نوع اکسیدی می باشند که برای یکسان شدن اندازه دانه ها و بهتر شدن نتایج آزمایش با استفاده از سرنده با مش ۴۰۰ فلاکس ها الک گردیدند. وزن فلاکس مورد استفاده برای هر نمونه با توجه به ضخامت ۲۵۰ میکرومتر و مساحت سطح، حجم فلاکس مورد نیاز به کمک چگالی آن محاسبه شد. این مقدار مشخص با استون با غلظت ۳۰٪ محلول گردید و با کمک قلم مویی بر روی سطح نمونه از قبل آماده سازی شده در عرض ۱/۵ و طول ۵ سانتی متر اعمال گردید. شکل ۱ نمونه با فلاکس اعمال شده را نشان می دهد.

ثوابت این آزمایش در جدول ۳ ارائه گردیده است.

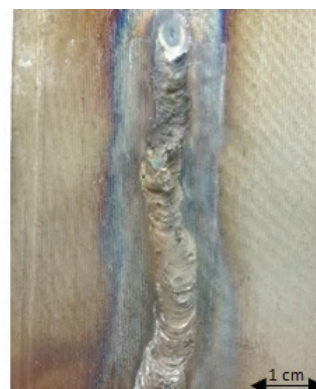
در این آزمایش اندازه ذرات فلاکس ثابت و زیر ۲۴ میکرومتر بوده است. ضخامت فلاکس نیز ثابت در نظر گرفته

جدول ۳. ثوابت آزمایش

ضخامت فلاکس	نوع الکترود	قطر الکترود	زاویه نوک الکترود	نوع گاز محافظ	دبی گاز محافظ	نوع جریان	طول قوس	سرعت جوشکاری
۲۵۰ میکرو متر	EWTh-2	۳/۲ میلی متر	۶۰ درجه	آرگون ۹۹/۹۹٪	۱۰ لیتر بر دقیقه	DCEN	۳ میلی متر	۱/۲ متر بر ثانیه

جدول ۴. حالات جوشکاری این تحقیق

شدت . جریان A	نوع فلاکس	ZnO	SiO <sub>2</sub>	بدون فلاکس
۸۵		نمونه ۱۱	نمونه ۶	نمونه ۱
۱۰۰		نمونه ۱۲	نمونه ۷	نمونه ۲
۱۱۵		نمونه ۱۳	نمونه ۸	نمونه ۳
۱۳۰		نمونه ۱۴	نمونه ۹	نمونه ۴
۱۴۵		نمونه ۱۵	نمونه ۱۰	نمونه ۵



شکل ۲. الف) سطح نمونه جوشکاری شده با فلاکس فعال ZnO (ب) پشت نمونه جوشکاری شده با فلاکس فعال ZnO.

در زمان محلول کردن فلاکس ZnO با استون و اعمال آن روی سطح نمونه مشاهده شده است که فلاکس دارای مک‌های هوا شده و در ضخامت فلاکس تاثیر گذاشته است و در حین جوشکاری قوس الکتریکی برای آزاد شدن از مقاومت الکتریکی فلاکس شروع به تغییر جهت و انحراف به سمت فلاکس با ضخامت نازک تر یا حتی مناطق بدون فلاکس کرده است و همین امر موجب انحراف قوس در فلاکس ZnO گردیده است.

### بررسی هندسه جوش

هدف اصلی این پژوهش بررسی تاثیر فلاکس‌های مختلف در افزایش عمق به عرض جوش در جوشکاری فولاد آلیاژی D2 به روش A-TIG بوده است. در ادامه نمونه‌ها را زیر میکروسکوپ نوری قرار داده و به کمک نرم افزار مخصوص آن عمق و عرض نمونه‌ها اندازه گیری شد. برای اندازه گیری عمق و عرض نمونه‌ها مطابق شکل ۳ رفتار شده است و جدول ۵ عمق و عرض و نسبت عمق به عرض را در نمونه‌های جوشکاری شده به روش A-TIG نشان می‌دهد.

مطابق جدول ۶ جوشکاری در سرعت ثابت ۱/۲ میلی متر بر ثانیه در پنج شدت جریان ۸۵، ۱۰۰، ۱۳۰، ۱۱۵ و ۱۴۵ آمپر انجام شده است. افزایش شدت جریان GTAW در سرعت ثابت نیز منجر به افزایش گرمای ورودی می‌شود و همچنین با

مدل DP26 و با بزرگنمایی کم اندازه گیری عمق نفوذ و عرض جوش برای تمامی نمونه‌ها انجام شد؛ سپس با میکروسکوپ نوری الیمپوس مدل BX51M ریز ساختار تمامی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. همچنین توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM<sup>۵</sup>VEGA\TESCAN-LMU ساخت کشور جمهوری چک سال ۲۰۰۵ میلادی با آنالیزور مدل رونتک<sup>۶</sup> ساخت کشور آلمان جهت بررسی‌های بیشتر از برخی نمونه‌ها تصویر برداری شد.

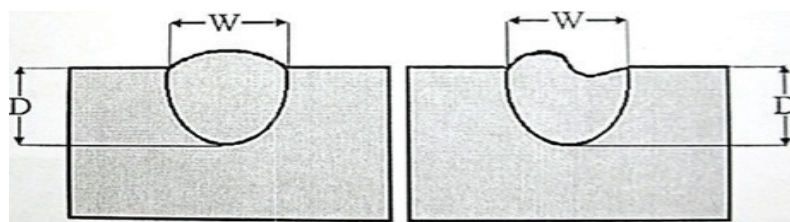
به منظور سختی سنجی دستگاه ریز سختی کوپا<sup>۷</sup> مدل MH3 با دوربین مدل MD130 ویکرز با بار ۱ کیلوگرم و زمان نشست ۱۰ ثانیه در هر ۳ منطقه فلز پایه، HAZ و جوش در سه نقطه در هر منطقه مورد استفاده قرار گرفت و سختی میانگین برای هر منطقه در تمامی نمونه‌ها محاسبه شد.

### ۳. نتایج و بحث

#### شکل قوس الکتریکی

نکته قابل توجه فلاکس فعال ZnO بود که به هنگام جوشکاری با این فلاکس در شدت جریان‌های مختلف مانند شکل ۲ انحراف قوس رویت گردید.

5. Scanning Electron Microscopic
6. RONTEC
7. KOOPA



شکل ۳. شماتیک نحوه اندازه گیری عمق و عرض جوش.

جدول ۵. نتایج اندازه گیری شده برای عمق، عرض و نسبت عمق به عرض برای تمامی نمونه ها

بدون فلاکس	SiO <sub>2</sub>	ZnO	هندسه جوش	شدت جریان
۲	۳/۳	۱/۹	D (mm)	۸۵ (A)
۴/۹	۲/۸	۴/۸	W (mm)	
۰/۴	۱/۲	۰/۴	D/W	
۲/۲	۳/۳	۲/۴	D (mm)	۱۰۰ (A)
۶/۶	۵/۴	۵/۴	W (mm)	
۰/۳	۰/۶	۰/۴	D/W	
۲	۴/۸	۳	D (mm)	۱۱۵ (A)
۷/۱	۳/۹	۶	W (mm)	
۰/۳	۱/۲	۰/۵	D/W	
۳/۵	۵/۱	۲/۸	D (mm)	۱۳۰ (A)
۸/۵	۴/۸	۸/۹	W (mm)	
۰/۴	۱/۱	۰/۳	D/W	
۴/۲	۵/۴	۳/۳	D (mm)	۱۴۵ (A)
۹/۳	۷/۷	۹	W (mm)	
۰/۴	۰/۷	۰/۴	D/W	

### بررسی روند کلی تاثیر شدت جریان جوشکاری بر نسبت عمق به عرض جوش در سرعت ثابت

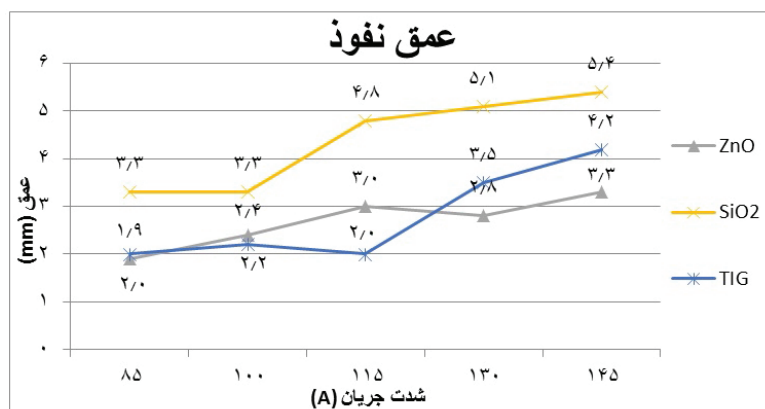
در پژوهش‌های مختلفی مانند [۱۵-۱۷] بیان شده است که افزایش شدت جریان جوشکاری برای افزایش عمق نفوذ حد بهینه دارد و افزایش بیشتر از آن تاثیر کمی بر افزایش عمق نفوذ داشته و بیشتر صرف افزایش عرض جوش خواهد شد. همین طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود این روند نیز در این پژوهش برای فلاکس ZnO رخ داده است البته در پژوهش‌های مختلف انجام شده برای دیگر فلاکس‌ها این اتفاق در شدت جریان‌های بالای ۲۰۰ آمپر رخ داده است. در حالی که بالاترین شدت جریان این پژوهش ۱۴۵ آمپر انتخاب شده است که این امر خود پاسخی برای نمونه‌هایی است که این اتفاق در آن‌ها رخ نداده است. اما برای نمونه‌هایی که با فلاکس فعال ZnO جوشکاری شده اند این امر قابل رویت است که تاثیر شدت جریان بر عرض جوش بیشتر از عمق نفوذ است یعنی همان

افزایش گرمای ورودی تا حدودی منجر به افزایش عمق نفوذ خواهد شد. در جوشکاری A-TIG علاوه بر این رویداد افزایش شدت جریان منجر به تامین انرژی بیشتر برای تجزیه فلاکس می‌شود و تجزیه فلاکس بیشتر منجر به تمرکز قوس و در نتیجه افزایش عمق نفوذ می‌گردد.

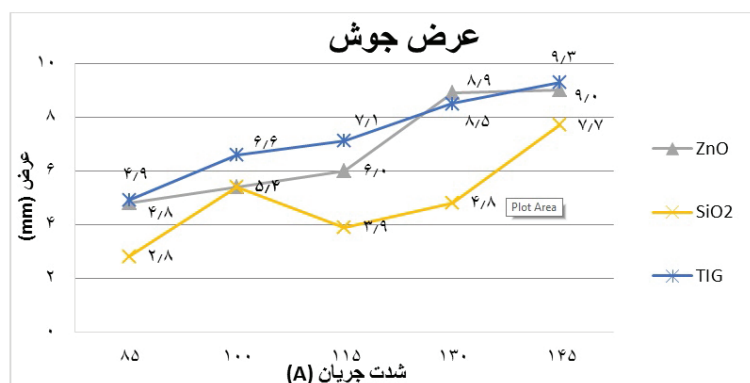
شکل ۴ روند کلی عمق نفوذ را در شدت جریان‌های متفاوت برای فلاکس‌های مختلف به نمایش گذاشته است. عمق نفوذ برای نمونه بدون فلاکس با یک روند ثابت افزایش می‌یابد. اما در شدت جریان ۱۱۵ آمپر یک مرتبه نمودار با شیب بیشتری رو به افزایش گذاشته است که دلیل آن افزایش حرارت ورودی و افزایش عرض جوش در این شدت جریان است که با افزایش عرض جوش منطقه مذاب بیشتر شده و حرارت ورودی افزایش یافته است که در نهایت منجر به افزایش نمودار در شکل ۴ با شیب بیشتری برای نمونه جوشکاری شده بدون فلاکس گردیده است.

جدول ۶. عمق نفوذ نمونه‌های جوشکاری شده در شدت جریان‌های متفاوت (mm)

بدون فلاکس	SiO <sub>2</sub>	ZnO	شدت جریان
۲	۳/۳	۱/۹	۸۵(A)
۲/۲	۳/۳	۲/۴	۱۰۰(A)
۲	۴/۸	۳	۱۱۵(A)
۳/۵	۵/۱	۲/۸	۱۳۰(A)
۴/۲	۵/۴	۳/۳	۱۴۵(A)



شکل ۴. نمودار عمق نفوذ در سرعت ثابت برای تمامی حالات در تمامی شدت جریان‌ها.



شکل ۵. نمودار عرض جوش در سرعت ثابت برای تمامی حالات در تمامی شدت جریان‌ها.

### تاثیر فلاکس ZnO

فلاکس اکسید روی ZnO ماده‌ای سرامیکی با ماهیت پلی کریستالین است. در این نوع سرامیک‌ها با افزایش دما هدایت حرارتی کاهش می‌یابد [۱۸]. مطابق با شکل ۶ ظاهر جوش فلاکس ZnO در دو شدت جریان نمایش داده شده است که در کل می‌توان گفت ظاهر مناسبی را دارا نیست.

این نکته نیز شایان ذکر است که در این پژوهش هنگام جوشکاری مشاهده شده است که در فلاکس اکسیدی ZnO انحراف قوس وجود دارد که در شکل ۶ از این نمونه در شدت جریان‌های مختلف قابل مشاهده است. دلیل این انحراف را

طور که در شکل ۴ و شکل ۵ قابل رویت است با افزایش شدت جریان عمق نفوذ برای نمونه‌های ZnO در شدت جریان‌های ۱۳۰ و ۱۴۵ شروع به کاهش کرده است و این در حالی است که در شکل ۵ کاملاً مشهود است که این نمونه‌ها در شدت جریان‌های مذکور با افزایش عرض جوش روبه رو هستند.

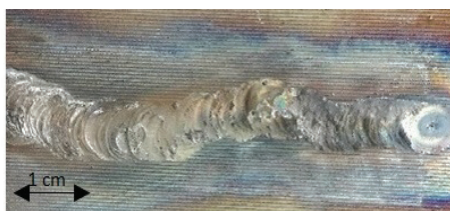
### تاثیر فلاکس‌های فعال نسبت به نمونه جوشکاری شده بدون فلاکس

در این جا به بررسی تاثیر هر یک از فلاکس‌های ZnO و SiO<sub>2</sub> و مقایسه آن با حالات بدون فلاکس (TIG) پرداخته شده است.



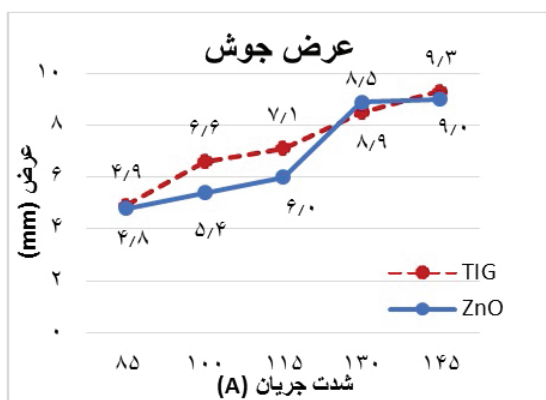


۸۵

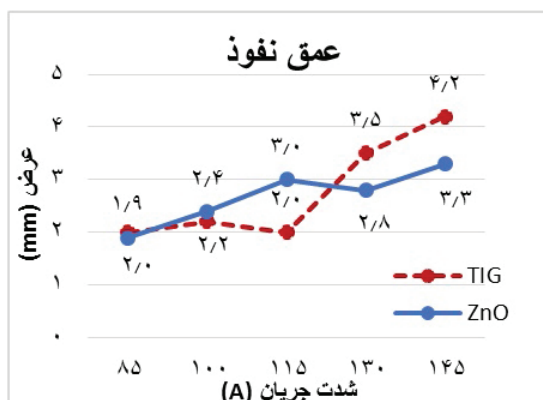


۱۰۰

شکل ۶. ظاهر جوش فلاکس فعال ZnO برای شدت جریان ۸۵ و ۱۰۰ (آمپر).



شکل ۸. نمودار عرض جوش در سرعت ثابت برای فلاکس ZnO و نمونه بدون فلاکس در تمامی شدت جریان ها.



شکل ۷. نمودار عمق نفوذ در سرعت ثابت برای فلاکس ZnO و نمونه بدون فلاکس در تمامی شدت جریان ها.

جریان در نقطه قوسی با کاهش روبه رو شده است و در نتیجه همان طور که در شکل ۷ مشاهده می شود عمق نفوذ شروع به کاهش کرده و با توجه به شکل ۸ عرض جوش افزایش می یابد [۲۰].

همان طور که مشاهده می شود در شدت جریان ۸۵ آمپر میزان عمق نفوذ با حالت بدون فلاکس برابری کند که این موضوع بیان گر این امر است که فلاکس اکسید روی در شدت جریان های پایین تاثیر چندانی ندارد و با افزایش شدت جریان در کل روند افزایش عمق نفوذ مشاهده می گردد. ولی نسبت به حالت بدون فلاکس بعد از شدت جریان ۱۱۰ آمپر عمق نفوذ افزایش چندانی ندارد زیرا با توجه به شکل ۸ عرض جوش افزایش زیادی پیدا کرده است و همین امر باعث کاهش عمق نفوذ گشته است.

### تاثیر فلاکس SiO<sub>2</sub>

SiO<sub>2</sub> یکی از مهم ترین فلاکس های استفاده شده در جوشکاری A-TIG انواع فولادها می باشد و عملکرد این فلاکس در اغلب آن ها مثبت ارزیابی شده است. شکل ۹ تاثیر فلاکس SiO<sub>2</sub> را در مقایسه با حالت بدون فلاکس در جریان های مختلف در سرعت ثابت برای عمق نفوذ نشان می دهد.

همان طور که مشاهده می شود در تمامی جریان ها تاثیر فلاکس بر عمق نفوذ جوش مثبت ارزیابی شده است و با

می توان به انحراف قوس از سطح فلاکس دانست که به علت ایجاد مک های هوا در این فلاکس در هنگام مخلوط سازی و اعمال روی سطح است. قوس الکتریکی برای رهایی از مقاومت الکتریکی این فلاکس به ناحیه ای که فلاکس نازک تر است و یا به منطقه بیرون از فلاکس منحرف شده است و همان طور که اشاره گردید قوس به راحتی نمی تواند سطح فلاکس اکسیدی را بشکند و در نتیجه انحراف رخ داده است. خاصیت رسانش الکتریکی اکسید روی ZnO با دما طبق روابط ۱-۲ تغییر می کند [۱۹].

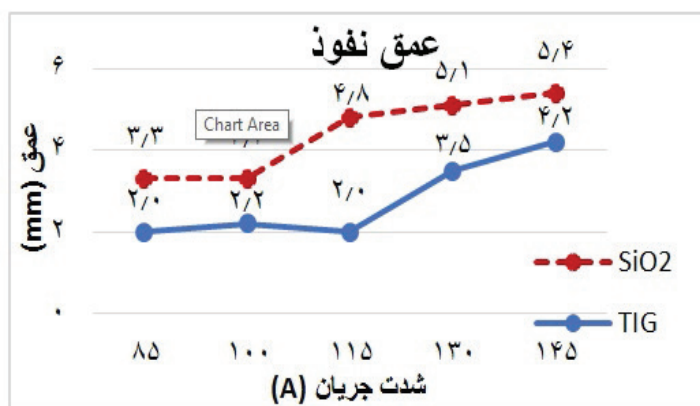
$$\text{رابطه ۱-۲-۱.}$$

$$\delta = 10^{-2} \exp \left( 2 \frac{10^{-2}}{KT} \right) \text{ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} T < 298K$$

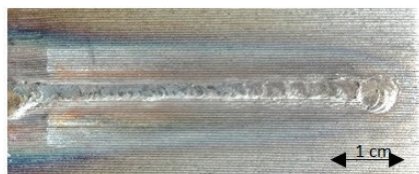
$$\text{رابطه ۱-۲-۲.}$$

$$\delta = 10^2 \exp \left( -7 \times \frac{10^{-2}}{KT} \right) \text{ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} 673K < T < 973K$$

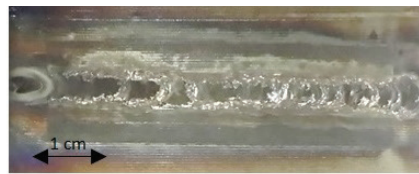
با دقت در روابط فوق می توان این نکته را دریافت که با افزایش دما میزان رسانش الکتریکی به صورت نمایی افزایش یافته است و با توجه به نظریه لووک و تاناکا و اوشیو قوس نمی تواند به راحتی سطح و فلاکس روی سطح را بشکند. این بدان معنی است که تمرکز قوس کاهش می یابد و دانسیته



شکل ۹. نمودار عمق نفوذ در سرعت ثابت برای فلاکس SiO<sub>2</sub> و نمونه بدون فلاکس در تمامی شدت جریان ها.



۸۵



۱۰۰

شکل ۱۰. ظاهر جوش فلاکس فعال SiO<sub>2</sub> برای شدت جریان ۸۵ و ۱۰۰ (آمپر).

بررسی تاثیر میزان اکسیژن موجود در ناحیه جوش پرداخته شده است [۱۷ و ۲۱ و ۲۶]، در ادامه به توضیح مختصری از خصوصیات متالورژیکی فلز پایه و HAZ و ناحیه جوش نمونه‌هایی که در شدت جریان ۱۴۵ آمپر همراه با فلاکس اکسیدی ZnO و SiO<sub>2</sub> و همچنین نمونه ی بدون حضور فلاکس جوشکاری شده اند پرداخته می‌شود.

#### ترکیب شیمیایی

ترکیب شیمیایی فلز پایه فولاد D2 تهیه شده به کمک دستگاه کوانتومتری به شرح جدول ۷ بوده است.

#### ریزساختار فلز پایه

همان طور که در قبل اشاره شده است فولاد D2 از دسته فولادهای ابزار سردکار و عملیات حرارتی پذیر با ۱/۵۹ درصد کربن است. این فولاد در ۱۰۴۰ درجه سانتی گراد آستنیت گشته و در ۲۰۰ درجه سانتی گراد تمپر و در هوا خنک شده است. فولاد D2 دارای ریز ساختاری شامل آستنیت باقی مانده و کاربید کروم به رنگ روشن تر و مارتنزیت تمپر شده در نواحی تیره تر می‌باشد [۲۵]. در شکل ۱۱ تصویر میکروسکوپی ریزساختار فلز پایه فولاد D2 نمایش داده شده است.

همچنین نتایج آزمون سختی سنجی این فولاد، سختی ۲۳۶ ویکرز را نشان داده است.

افزایش جریان عمق نفوذ نیز افزایش می‌یابد. مهم ترین عامل افزایش عمق نفوذ را می‌توان تغییر جهت جریان مارانگونی دانست که ارتباط مستقیم با میزان اکسیژن موجود در حوضچه جوش دارد [۲۱ و ۲۲].

دو نیروی عمده بویانسی و نیروی ناشی از اختلاف در کشش سطحی و گرادیان دمایی باعث ایجاد اختلاف چگالی و کشش سطحی نقاط مختلف مذاب می‌شوند که جابجایی مارانگونی را ایجاد کرده و موجب انتقال گرما از نواحی بالایی حوضچه مذاب به نواحی داخلی و افزایش عمق نفوذ گشته است. همچنین این نکته نیز ناگفته نماند که تجزیه فلاکس SiO<sub>2</sub> موجب تمرکز بیشتر قوس نسبت به سایر فلاکس‌ها گشته است و همین امر به افزایش عمق نفوذ به موجب تمرکز قوس و افزایش حرارت ورودی منجر شده است و به دلیل گردش مذاب در اثر جریان مارانگونی عیوب ظاهری جوش کاهش یافته است [۲۳ و ۲۴].

همان طور که در شکل ۱۰ مشهود است جوش‌های انجام شده با این فلاکس اکسیدی دارای ظاهری مطلوب و بدون عیوب ظاهری است.

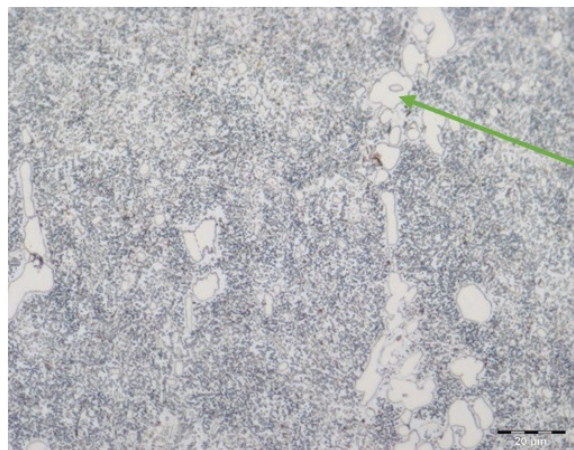
#### ساختار متالورژیکی

یکی از تاثیرات فلاکس تاثیر بر ریز ساختار متالورژیکی ناحیه جوش بعد از انجماد می‌باشد. با توجه به این امر که ورود اکسیژن ناشی از تجزیه شدن فلاکس به حوضچه جوش منجر به افزایش عمق نفوذ می‌گردد، در پژوهش‌های مختلفی به



جدول ۷. ترکیب شیمیایی فولاد D2 خریداری شده بر اساس درصد وزنی

C	Si	Mn	S	Cr	Mo	Ni	Al
۱/۵۹	۰/۵۰۷	۰/۳۱۵	۰/۰۰۵	۱۱/۱	۰/۷۶۲	۰/۱۷۶	۰/۰۶۰۴
Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Fe	
۰/۰۲۳۷	۰/۰۷۲۳	۰/۰۳۴۶	۰/۰۰۶۵	۰/۷۲۸	۰/۱۵۸	Base	



کاربید های  
کروم

شکل ۱۱. ریزساختار فلز پایه فولاد D2.

تکسیال از آستنیت باقی مانده و کاربیدهای ذوب نشده در مرز ذوب، رشد کرده و سپس فریت دلتا در جبهه انجماد بین بازوهای دندردیتی جوانه زده است و همچنین ورود اکسیژن به حوضچه مذاب موجب تشکیل فریت سوزنی نیز گشته است. تمامی دندردیت‌هایی که از یک دانه رشد کرده است در یک جهت قرار گرفته که این جهت گیری از یک دانه تا دانه مجاورش متفاوت بوده است. در شکل ۱۴ رشد اپی تکسیال در خط ذوب به خوبی قابل مشاهده است.

در کل می‌توان گفت ریزساختار فلز جوش در این پژوهش شامل بازوهای دندردیتی و انواعی از فریت‌ها مثل فریت مرز دانه ای، فریت دلتا، فریت سوزنی و فریت ویدمن اشتاتن می‌باشد. این تصاویر از منطقه جوش برای تمامی حالات جوشکاری شده در این پژوهش با یا بدون فلاکس همانند هم و یکسان بوده است و می‌توان گفت فلاکس‌های اکسیدی تاثیری بر ریزساختار جوش نداشته‌اند.

#### سختی سنجی

نمونه‌های جوشکاری شده در تمامی شدت جریان‌ها و تمامی حالات مطابق با استاندارد ASTM E384 مورد سختی سنجی با ایندنتور ویکرز قرار گرفتند که نتایج آن در جدول ۸ ارائه شده است.

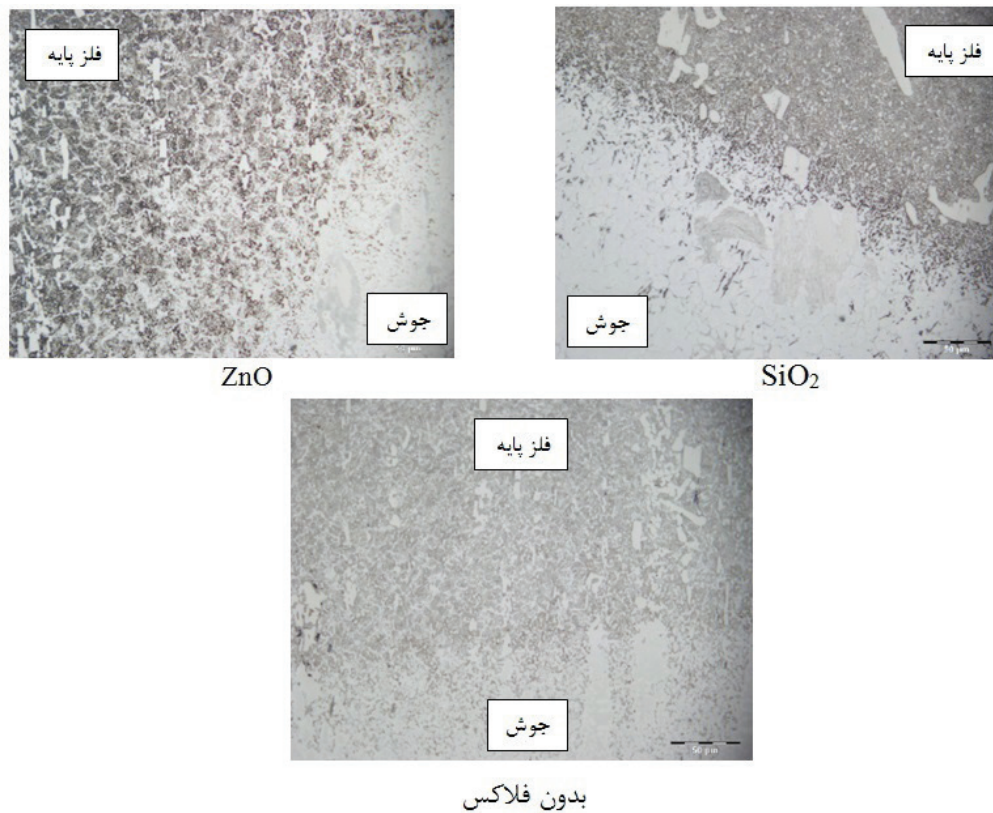
همان گونه که در قبل اشاره شده فلز پایه فولاد D2 در تمامی حالات در منطقه فلز پایه مورد بررسی قرار گرفته است و سختی میانگین ۲۲۲ ویکرز بدست آمده است.

ریز ساختار منطقه متأثر از حرارت (HAZ) با یا بدون فلاکس با توجه به شکل ۱۲ قابل مشاهده است که در حالت بدون فلاکس کاربیدهای کروم تجزیه نشده و در برخی از نمونه‌های جوشکاری شده با فلاکس در شدت جریان‌های بالا نیز مشاهده شده است. همانند نمونه‌های بدون فلاکس، کاربید در HAZ کمتر تجزیه شده و دلیل این اتفاق رامی توان این مورد دانست که در شدت جریان‌های بالاتر زمان کم تری برای تجزیه در کاربیدها به دلیل افزایش سرعت سرد شدن وجود دارد. در نمونه‌های جوشکاری شده با فلاکس‌های فعال اکسیدی کاربیدهای کروم به نسبت حالت بدون فلاکس بیشتر تجزیه شده و HAZ سختی کم تری دارد.

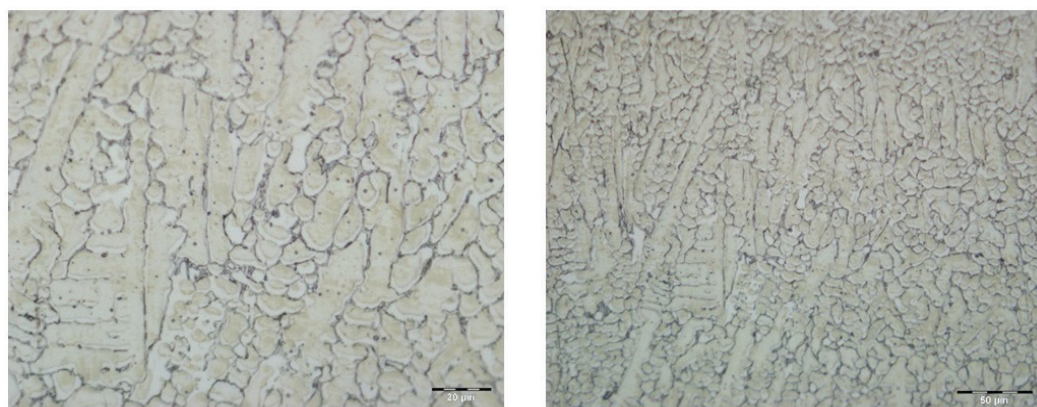
#### ریزساختار ناحیه جوش با یا بدون فلاکس

در فرایندهای جوشکاری ذوبی هنگام عبور منبع حرارت، فلز در ناحیه جوش ذوب شده و پس از عبور منبع دوباره منجمد می‌گردد. سرعت سرمایش و ریزساختار حاصل از انجماد به عوامل مختلفی مانند گرمای ورودی، ظرفیت گرمایی منطقه، ضریب انتقال حرارت و... وابسته است.

همان طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود ریزساختار منطقه جوش در حین انجماد متشکل از بازوهای دندردیتی بوده که مناطق روشن تر می‌باشد. ذرات تیره رنگ بین بازوهای دندردیت اولیه فریت دلتا است که در مرحله نهایی انجماد شکل گرفته است که به این نوع فریت، فریت بین دندردیتی گفته می‌شود در شروع انجماد آستنیت به صورت‌تاپی



شکل ۱۲. ریزساختار HAZ.



شکل ۱۳. ریزساختار ناحیه جوش.

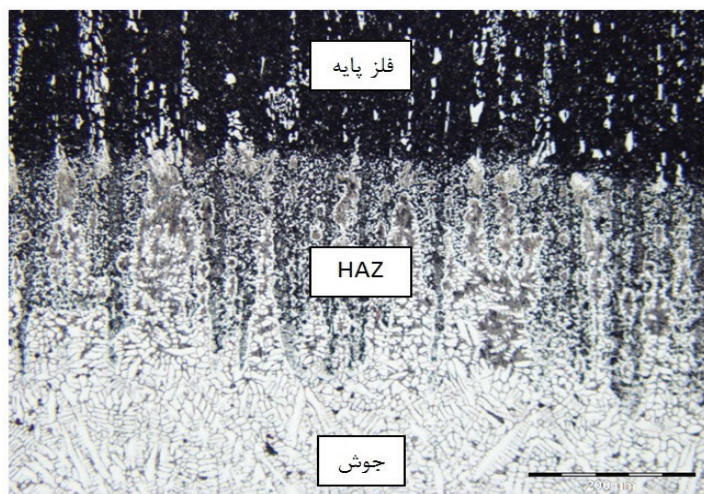
دندریتی و فریت دلتا و فریت بین دندریتی و فریت سوزنی و فریت ویدمن اشتاتن است.

در HAZ به این صورت که در شکل ۱۶ مشخص است کاربیدهای کروم موجود در ساختار شروع به خرد شدن و ریز شدن کرده است.

**شناسایی مناطق مبهم به کمک آنالیز فازی EDS**  
در منطقه جوش و HAZ برای شناخت بهتر فازهای موجود از آنالیز فازی EDS کمک گرفته شد. همان طور که در شکل ۱۷

### بررسی ریزساختار به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM در نواحی مختلف

برای بررسی‌های بیشتر HAZ و ناحیه جوش از میکروسکوپ الکترونی روبشی کمک گرفته شده است. کروم یک عنصر فریت زا بوده و در ترکیب فولاد D2 مورد استفاده در این پژوهش کروم به عنوان یک عنصر آلیاژی مهم با میزان ۱۱/۱ درصد است. شکل ۱۵ از منطقه جوش چهار نمونه به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه گردیده است. این شکل نشان می‌دهد که ساختار منطقه جوش متشکل از بازوهای



شکل ۱۴ رشد اپی تکسیال در ریزساختار منطقه جوش از مرز جوش و HAZ.

## جدول ۸. سختی برای تمامی حالت های جوشکاری

نمونه	میانگین سختی (HV) (HAZ)	میانگین سختی جوش (HV)	نوع فلاکس	شدت جریان (A)
۱۱	۴۲۰/۹	۳۶۵/۲	ZnO	۸۵
۶	۳۶۷/۳	۳۹۱/۶	SiO <sub>2</sub>	۸۵
۱	۵۰۶/۴	۳۶۲/۸	None	۸۵
۱۲	۴۴۰/۲	۴۱۵/۲	ZnO	۱۰۰
۷	۵۲۱/۰	۴۱۵/۷	SiO <sub>2</sub>	۱۰۰
۲	۴۲۹/۰	۳۶۲/۸	None	۱۰۰
۱۳	۴۶۳/۵	۴۰۴/۶	ZnO	۱۱۵
۸	۳۸۳/۹	۴۰۴/۱	SiO <sub>2</sub>	۱۱۵
۳	۴۳۰/۲	۴۸۳/۹	None	۱۱۵
۱۴	۴۹۳/۵	۳۹۹/۸	ZnO	۱۳۰
۹	۵۲۳/۰	۳۹۵/۷	SiO <sub>2</sub>	۱۳۰
۴	۵۰۲/۳	۴۰۶/۵	None	۱۳۰
۱۵	۴۳۷/۷	۴۰۲/۵	ZnO	۱۴۵
۱۰	۵۸۰/۴	۴۱۲/۶	SiO <sub>2</sub>	۱۴۵
۵	۵۱۶/۲	۳۹۷/۷	None	۱۴۵

منفی داشته است و بدترین عملکرد مربوط به نمونه های جوشکاری شده با فلاکس ZnO بوده که مهره های جوش نا منظم و پاشش مذاب زیاد بوده است.

۲. در هنگام عبور قوس الکتریکی از روی فلاکس فعال ZnO در تمامی شدت جریان های مورد آزمایش در این پژوهش انحراف قوس رویت شده است که به عنوان یک پارامتر منفی برای این فلاکس در نظر گرفته شده است.

۳. افزایش شدت جریان جوشکاری در تمامی نمونه ها مثبت

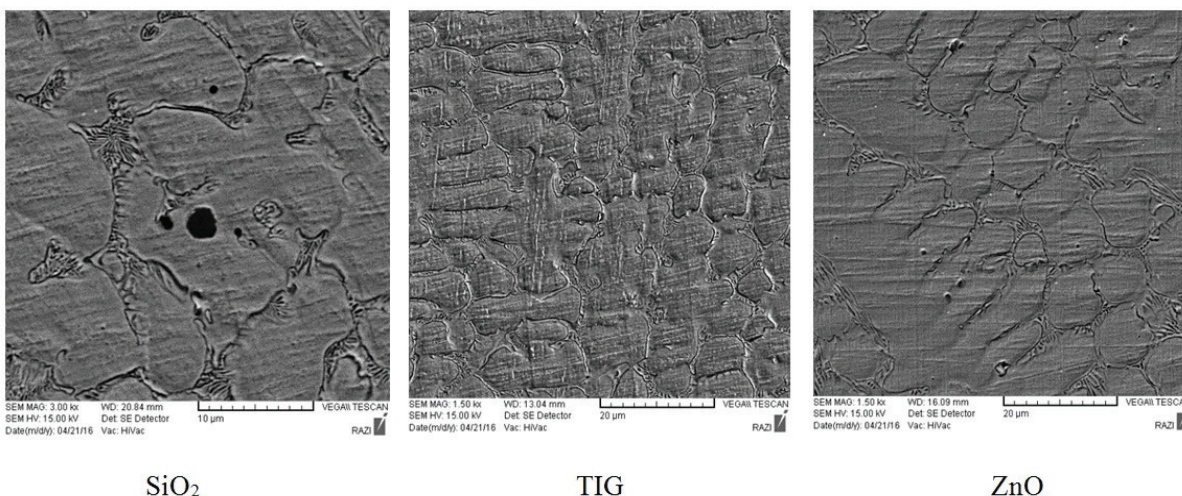
مشاهده می شود. کاربیدهای کروم شروع به شکسته و ریز دانه شدن کرده است و به کمک EDS کاربیدهای کروم مشخص شده است.

## ۴. نتیجه گیری

در این پژوهش تاثیر حضور فلاکس بر هندسه جوش فولاد D2 بررسی شد. نتایج اصلی به شرح زیر بدست آمد:

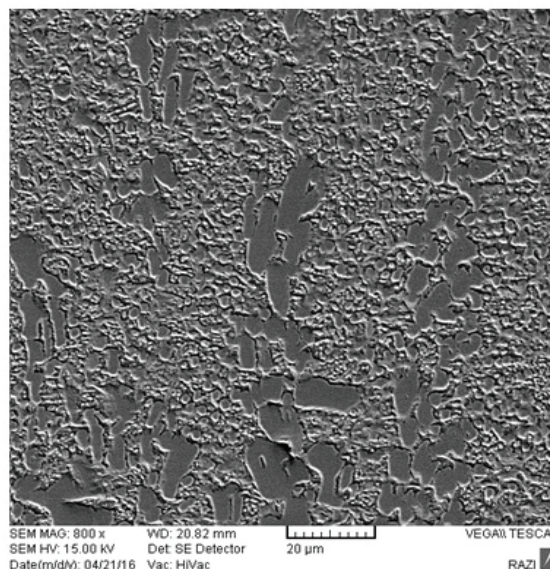
۱. استفاده از فلاکس های اکسیدی بر ظاهر جوش تاثیر





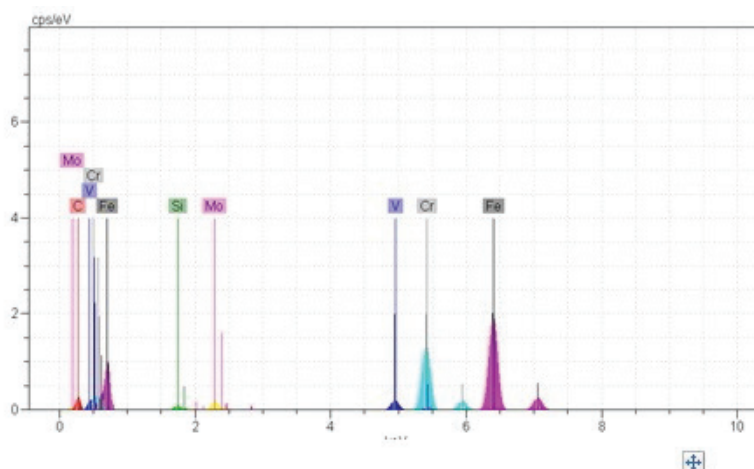
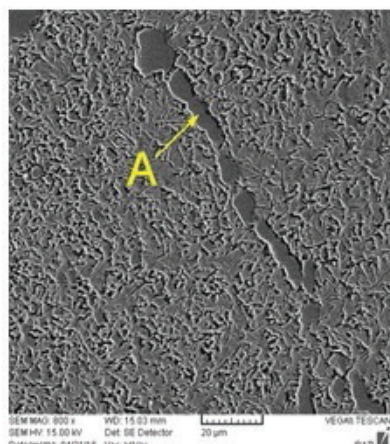
شکل ۱۵. تصویر SEM از سه نمونه در منطقه جوش.

۵. حضور فلاکس‌های مختلف در سختی ناحیه جوش نمونه‌ها تاثیر گذار نبوده و نمونه‌های جوشکاری شده در شرایط یکسان سختی مشابهی را از خود نشان می‌دهند.
۶. در نمونه‌های جوشکاری شده با فلاکس‌های فعال مختلف در منطقه جوش و HAZ ریزساختار مشابه دیده می‌شود و عنصر ثانویه آزاد شده تاثیری بر ریزساختار نداشته است.
۷. در سختی HAZ فقط گرمای ورودی تاثیر گذار نیست و می‌توان عوامل دیگری همچون ولتاژ خروجی دستگاه و ضخامت فلاکس و سرعت جوشکاری را نیز مورد بررسی قرار داد.



شکل ۱۶. تصویر HAZ به کمک میکروسکوپ SEM.

- ارزیابی شده و عملکرد فلاکس‌های SiO<sub>2</sub> و ZnO به ترتیب با اثر گذاری مثبت ارزیابی شده است.
۴. در مقایسه با جوشکاری بدون فلاکس (TIG) بهترین عملکرد و نسبت عمق به عرض و ظاهر جوش را فلاکس SiO<sub>2</sub> داشته است و بیشترین تاثیر بر عمق نفوذ برای این فلاکس برابر با ۲/۴ برابر نسبت به حالت بدون فلاکس در شدت جریان ۱۱۵ آمپر بوده است و در شدت جریان ۱۴۵ آمپر فلاکس SiO<sub>2</sub> با ۵/۴ میلی متر عمق نفوذ دارای بیشترین عمق نفوذ بوده است.



Spectrum

□ Spectra: A

Element Series unkn. C.nam. C Atom. C

[wt.-%] [wt.-%] [at.-%]

Carbon K series 2.38 2.40 10.08

Silicon K series 0.59 0.60 1.07

Vanadium K series 3.01 3.03 3.00

Chromium K series 25.25 25.39 24.66

Iron K series 65.94 66.31 59.97

Molybdenum L series 2.27 2.28 1.20

Total: 99.4 %

شکل ۱۷. تصویر منطقه EDS شده در HAZ.

References

[1] R. W. Meseler, "Joining of Materials and Structure," Vol.3, 2004, pp.310-313.

[2] R.S.parmar, Welding processes and technology, in: Weld. Process. Technol., 1992, : pp. 224-226.

[3] S.Jobez, J.M.Pelleetier, and A.B.V. "Surface engineering of aluminum base alloys with high power laser beam," Key Engineering Material. Vol.46-47, 1990, pp.317-329.

[4] بررسی مقایسه ای روش مرسوم در جوشکاری فولاد زنگ نزن، TIG و A-TIG احسان احمدی، علیرضا ابراهیمی، یازدهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران، ۲۹ مهر ماه سال ۱۳۸۹، صفحات ۱ و ۲.

[5] P.W Muncaster , A Practical Guide to TIG (GTA) Welding ,A volume in Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies , 1991 . Ch 15 , pp124-125.

[6] C. Dong , S. Katayama , Basic Understanding of A-TIG Welding Process , Joining and Welding Research Institute , Osaka University , Japan , 2004.

[7] D. Howse,Exploiting Advances in Arc Welding Technology ,Developments in A-TIG Welding ,A volume in Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies , 1999 , pp 3-9.

[8] LO.Vilarinho, V.Kumar, B.Lucas, S.Raghunathan, Successful High-Productivity Welding With A-TIG Process, 20th International Congress of Mechanical Engineering, Brazil, 2009.

[9] D.Howse, Developments in A-TIG welding, Exploiting Advances in Arc Welding Technology,1998, Woodhead, England, pp 3-9.

[10] Y.Morisada, H. Fujii, N. Xukun , Development of simplified active flux tungsten inert gas welding for deep penetration , Joining and Welding Research Institute , Osaka University, Japan , 2014.

[11] D S Howse , W Lucas , Activating flux - Increasing the performance and productivity of the TIG and plasma processes . Welding and Metal Fabrication , 1996 , pp 11-17.

[12] C. W. Wegst, Key To Steel.StahlschlüsselWegst GMBH, 2013.



- [13] K.A. Esaklul , Handbook of Case Histories in Failure Analysis , V1 , 1992, pp 413-416.
- [14] S.R. Lampman, ASM Handbook, V1 , 1990 , pp 758,772.
- [15] P. J. Modenesi, E. R. Apolinario and I. M. Pereira, "TIG Welding with Single-Component Fluxes", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 99, 2000, pp 260-265.
- [16] H Huang, S Shengwen, K Tseng, and G Changpin, "Effects of the Process Parameters on Austenitic Stainless Steel by TIG-Flux Welding", Journal of Materials Processing Technology, 2006, Vol.22, pp. 367-373.
- [17] Lu, Shanping, H.Fujii, H.Sugiyama, and K. Nogi. "Mechanism and Optimization of Oxide Fluxes for Deep Penetration in Gas Tungsten arc Welding," Metallurgical and Materials Transactions A, 2003, Vol. 34, No. 9, pp 1901-1907.
- [18] M. Caglar, S. Ilican, Y. Caglar, F. Yakuphanoglu, "Electrical conductivity and optical properties of ZnO nanostructured thin film," Applied Surface Science. Vol.255, 2009, pp 4491-4496.
- [19] P.H.Miller "The Electrical Conductivity Of Zinc Oxide ", 1941 ,<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRev.60.890>.
- [20] T. Chern, K. Tseng, H. Tsai, "Study of the characteristics of duplex stainless steel activated tungsten inert gas welds," Materials and Design. Vol.32, 2011, pp.255-263.
- [21] LU Shanping , F Hidetoshi , A Hiroyuki , T Manabu , N kiyoshi . Marangoni Convection and Welding Penetration in A-TIG Welding , Trans Of JWRI , Vol.32 , 2003.
- [22] H. Fujii , T. Sato , S. Lu,, K. Nogi , Development of an advanced A-TIG (AA-TIG) welding method by control of Marangoni convection , Joining and Welding Research Institute , Osaka Univercity , Japan , 2008.
- [23] Y.L. Xu , Z.B. Dong, Y.H. Wei, C.L. Yang , Marangoni convection and weld shape variation in A-TIG welding process , Theoretical and Applied Fracture Mechanics , 2007 , pp 178-186.
- [24] D.R.Gaskell, Introduction to the thermodynamics of materials, 4th ed, 1995.
- [25] S.R. Lampman, ASM Handbook, V9 , 1990 , pp 265.
- [26] K.H. Tseng and P.Y. Lin , UNS S31603 Stainless Steel Tungsten Inert Gas Welds Made with Microparticle and Nanoparticle Oxides , Institute of Materials Engineering, National Pingtung University of Science998, Woodhead, England, pp 3-9.