

## فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

### اثر فلز پرکننده بر مقاومت اکسیداسیون منطقه جوش آلیاژ مقاوم به حرارت 35Cr - 45Ni

اسماعیل احمدی زاده<sup>1</sup>، رضا درخشنده حقیقی<sup>2\*</sup>، امین ربیعی زاده<sup>3</sup>، شیوا منصور زاده<sup>4</sup>

1- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مواد، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران.

2- دانشیار، گروه مهندسی مواد، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران.

3- استادیار، گروه مهندسی مواد، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران.

4- استادیار، گروه مهندسی مواد، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران.

derakhshande@shirazu.ac.ir\*

#### مقاله پژوهشی

#### چکیده

در این پژوهش، اثر فلزات پرکننده UTP 2535 Nb و UTP 3545 Nb بر ریزساختار و مقاومت اکسیداسیون فلز جوش آلیاژ 35Cr-45Ni مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج، ریزساختار فلزات جوش شامل کاربیدهای کروم و نیوبیم است که در امتداد مرزخانه‌های دندریتی زمینه آستنیتی رسوب یافته‌اند؛ با این تفاوت که ریزساختار فلز جوش ایجاد شده توسط فلز پرکننده UTP 3545 Nb دارای کاربیدهای پیوسته‌تر و متراکم‌تر است که مربوط به درصد بالاتر کروم در این فلز پرکننده است. بر اساس نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس نمونه‌های اکسید شده در دمای 1000 °C به مدت 96 h، یک لایه اکسید خارجی (عمدتاً شامل اکسید کروم) و یک لایه اکسید داخلی (عمدتاً شامل اکسید سیلیسیم) در تمامی نمونه‌ها شناسایی شد. پس از آزمون اکسیداسیون، بیشترین افزایش وزن ( $mg/cm^2$ ) 4/3 و ضخامت لایه اکسید ( $20 \mu m$ ) مربوط به فلز جوش ایجاد شده توسط فلز پرکننده UTP 2535 Nb بود؛ در حالی که این مقادیر برای فلز جوش ایجاد شده توسط فلز پرکننده UTP 3545 Nb به ترتیب  $3/6 mg/cm^2$  و  $20 \mu m$  بود. درصد بالاتر کروم در نمونه آخر سبب ایجاد یک لایه مقاوم، پیوسته و عاری از عیوب اکسید کروم بر سطح می‌شود که مقاومت به اکسیداسیون را می‌افزاید. همچنین، درصد بالاتر سیلیسیم آن سبب ایجاد یک لایه اکسید داخلی می‌شود که مقاومت به اکسیداسیون را افزایش می‌دهد.

#### اطلاعات مقاله

دریافت: 1401/01/12

پذیرش: 1401/05/15

#### کلید واژگان:

آلیاژ مقاوم به حرارت

اکسیداسیون دمای بالا

جوشکاری قوس تنگستن

اکسید کروم

### Effect of Filler Metal on the Oxidation Resistance of 35Cr-45Ni Alloy Weld Metal

Esmael Ahmadizadeh<sup>1</sup>, Reza Derakhshandeh Haghghi<sup>2\*</sup>, Amin Rabiezadeh<sup>3</sup>, Shiva Mansourzadeh<sup>4</sup>

1- PhD student, Department of Materials Science and Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran.

2- Associate Professor, Department of Materials Science and Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran.

3- Assistant Professor, Department of Materials Science and Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran.

4- Assistant Professor, Department of Materials Science and Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran.

\* derakhshande@shirazu.ac.ir

#### Article Information

Original Research Paper

Dor:

[20.1001.1.24233226.1402.17.1.1.5](https://doi.org/10.1001.1.24233226.1402.17.1.1.5)

#### Keywords:

Heat Resistant Alloy

High Temperature Oxidation

GTAW

Chromium Oxide

#### Abstract

In this study the effect of UTP 2535 Nb and UTP 3545 Nb filler metals on the microstructure and oxidation resistance of the weld metal of GTAW welded 35Cr-45Ni alloy have been investigated. According to the results, microstructure of the weld metals includes Cr and Nb Carbides precipitating along the grain boundaries of austenitic matrix. Weld metal of the sample welded with UTP 3545 Nb filler metal showed denser and more continuous carbides which arises from higher Cr content in this filler metal. According to the XRD analysis of the oxidized weld metals at 1000 °C for 96 h, all samples represent an external oxide layer, mostly consist of Cr oxide and an internal oxide layer, mostly composed of Si oxide. Weld metal of the sample welded with UTP 2535 filler metal showed the highest weight gain (4.3 mg/cm<sup>2</sup>) and oxide thickness (20 μm). For the weld metal of the other sample, these values were 3.6 mg/cm<sup>2</sup> and 11 μm, respectively. It can be attributed to the higher Cr and Si in the UTP 3545 Nb filler metal. The first element results in a resistant, continuous, and defect free external oxide on the surface, and the latter one leads to formation of a resistant internal oxide, both strongly effective in improving the oxidation resistance of the weld zone.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Esmael Ahmadizadeh, Reza Derakhshandeh Haghghi, Amin Rabiezadeh, Shiva Mansourzadeh, Effect of Filler Metal on the Oxidation Resistance of 35Cr-45Ni Alloy Weld Metal, New Process in Material Engineering, 2023, 17(1), 1-12.

## 1- مقدمه

اتیلن به طور گسترده در تولید پلاستیک، کابل و قطعات اتومبیل کاربرد دارد و به طور عمده از شکست حرارتی هیدروکربن‌هایی مانند نفتا و اتان در دمای 700 تا 1100 °C در کوره‌های پیرولیز به دست می‌آید. به دلیل شرایط محیطی سخت از قبیل دمای بالا و فعالیت بالای کربن، لوله‌های مورد استفاده در کوره‌های پیرولیز در معرض خزش، کربوریزاسیون و اکسیداسیون هستند [1-4].

اکسیداسیون به واکنش فلز و اکسیژن که منجر به تشکیل اکسید می‌شود اطلاق می‌شود. مکانیزم اکسیداسیون شامل این مراحل است: (۱) جذب سطحی مولکول‌های گاز بر روی سطح و تجزیه آن‌ها به اکسیژن اتمی، (۲) حمله اکسیژن اتمی به الکترون‌های سطح، ایجاد یون اکسیژن و سپس ایجاد هسته اکسید و رشد آن، (۳) کنترل نفوذ یون اکسیژن و یون فلز توسط لایه اکسید. سومین مرحله تعیین‌کننده نوع لایه اکسیدی است: اگر نفوذ یون فلز و الکترون سریع‌تر از نفوذ یون اکسیژن باشد لایه اکسید به صورت خارجی رشد می‌کند و اگر سرعت نفوذ یون اکسیژن بیشتر باشد، لایه اکسید داخلی ایجاد خواهد شد [5-6].

به دلیل مقاومت بالای اکسیداسیون و کربوریزاسیون و خواص خزشی عالی، آلیاژهای نیکل-آهن-کروم ریختگی به طور گسترده در لوله‌های کوره تولید اتیلن استفاده می‌شوند. در دهه‌های گذشته آلیاژهای خانواده HP با ترکیب پایه 25Cr35Ni از جمله آلیاژهای متداول در لوله‌های کوره تولید اتیلن بوده است. این آلیاژها به روش ریخته‌گری گریز از مرکز تولید شده و به لحاظ ترکیب شیمیایی و خواص در دسته آلیاژهای غیراستاندارد قرار می‌گیرند [1-4]. آلیاژ 35Cr-45Ni (ET45 Micro Alloy) نسل جدیدی از آلیاژهای مقاوم به حرارت است که به دلیل وجود درصد کمی از عناصر نیویم، مولیبدن و تیتانیوم به عنوان عامل کاربیدزا در ترکیب، به آن آلیاژ Micro Alloy گفته می‌شود. مقاومت عالی به خزش، اکسیداسیون و کربوریزاسیون سبب شده تا این آلیاژ به طور عمده در لوله‌های شکست کوره تولید اتیلن استفاده شود [7-8].

به دلیل دمای بالای کاری، اکسیداسیون لوله‌های کوره تولید اتیلن اجتناب‌پذیر است [9]. مک لئوید و همکاران [10] ریزساختار لوله HP40 را بررسی نمودند. این لوله به مدت چهار سال تحت سرویس در دمای 705 °C قرار داشت. بررسی سطح مقطع لوله‌ها نشان داد که در درون آن‌ها یک لایه اکسید خارجی که عمدتاً متشکل از اکسید کروم بود تشکیل شده است و در زیر این لایه اکسید سیلیسیم به صورت پراکنده و زیرسطحی (اکسید داخلی) تشکیل شده بود. همچنین اکسید داخلی نیویم نیز شناسایی شد. لایه‌های اکسیدی در بیرون لوله نیز به شکلی مشابه بود و اکسید سطحی کروم و نیز اکسید داخلی سیلیسیم شناسایی شدند. مدرن و همکاران [11] خواص اکسیداسیون کوتاه‌مدت و بلندمدت دو نوع فولاد نسوز 25Cr30Ni و 30Cr40Ni را در دمای 1000 °C تحت هوا بررسی نمودند. نتایج پراش پرتوی ایکس (XRD) این پژوهش نشان داد که اکسید کروم و فازهای اسپینل فازهای غالب در دو نمونه هستند. همچنین، لایه اکسید خارجی عمدتاً متشکل از اکسید کروم بود و یک لایه اکسید سیلیسیم به صورت داخلی مشاهده شد. نتایج این پژوهش انطباق خوبی با دیاگرام الینگهام نشان داد، به این معنا که فازهای پایدارتر به لحاظ ترمودینامیکی در اعماق بیشتری از نمونه یافت شدند؛ برای مثال اکسید نیکل سیتینیک تشکیل بالا و پایداری ترمودینامیکی کمتری دارد و تنها بر روی سطح اکسید نمونه یافت شد.

جوشکاری تعمیری یکی از روش‌های کم هزینه برای تعویض قسمت‌های وامانده لوله‌های کوره تولید اتیلن است. گوان و وانگ [12] واماندگی لوله‌های جوشکاری شده مربوط به کوره‌های تولید اتیلن را بررسی نمودند. لوله‌ها با پرتو الکترونی جوشکاری شده و پس از یک تا دو سال سرویس دچار شکست در فلز جوش شده بودند. بررسی ریزساختاری نشان داد که تخلیه عنصر نیویم در فلز جوش عامل اصلی ترک خوردگی لوله‌ها بوده است. در غیاب نیویم به عنوان یک عنصر کاربیدساز مهم، کاربیدهای ثانویه  $M_7C_3$  و فاز سیگما در مرز دانه‌ها تشکیل می‌شود و نمونه دچار تردی و ترک خوردگی می‌شود. رامپت و مهارج [4]

از حرارت (HAZ) لوله‌های ET45 Micro Alloy جوشکاری شده به روش GTAW را بررسی نمودند. لوله‌ها پس از چهار سال سرویس دچار خزش شدید (50 تا 80 cm ازدیاد طول) شدند و از فلز پرکننده DIN 2535 جهت جوشکاری استفاده شده بود. نتایج این پژوهش نشان داد که جدایش عناصر آلیاژی در مرز دانه‌ها سبب ترغیب تشکیل رسوبات شده و همچنین کاربیدها و ترکیبات بین فلزی در مرز دانه ایجاد شده‌اند. این عوامل سبب افت خواص مکانیکی لوله‌ها و ترک خوردگی در آن‌ها شده بود.

با توجه به توضیحات ذکر شده، انتخاب صحیح فلز پرکننده مناسب در جوشکاری تعمیراتی لوله‌ها تولید اتیلن مهم و کلیدی است. در این تحقیق تلاش شده تا اثر دو نوع فلز پرکننده مختلف بر روی خواص اکسیداسیون آلیاژ مقاوم به حرارت 35Cr-45Ni مقایسه شود. برای این منظور ریزساختار و فازهای موجود قبل و بعد از آزمون اکسیداسیون بررسی و مقایسه شده‌اند تا بتوان اثر فلزات پرکننده را به درستی تحلیل کرد.

## 2- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از لوله ریخته‌گری گریز از مرکز آلیاژ مقاوم به حرارت 35Cr-45Ni با قطر داخلی 15/2 cm و ضخامت 0/9 cm به عنوان فلز پایه استفاده شد. جدول 1 نتیجه آزمون طیف سنجی نشر نوری کوپل القایی پلاسما (ICP) آلیاژ مورد استفاده را نشان می‌دهد. جوشکاری لب به لب لوله‌ها با طراحی شیار V شکل با نیم زاویه  $35^\circ$  انجام شد. قبل از انجام جوشکاری، شیار به وسیله برس و سپس توسط استن تمیز شد. از آن جا که ترکیب شیمیایی فلز پرکننده یکی از عوامل مهم در تعیین خواص جوش نهایی است، در این پژوهش از دو نوع فلز پرکننده مختلف UTP 2535 Nb (دارای 25٪ کروم و 35٪ نیکل) و UTP 3545 Nb (دارای 35٪ کروم و 45٪ نیکل) استفاده شد. از آزمون ICP جهت تعیین ترکیب شیمیایی فلزات پرکننده استفاده شد (جدول 2). فرآیند جوشکاری GTAW با ولتاژ 10 V و آمپراژ A 170 انجام شد. از گاز آرگون با خلوص 99/9٪ و جریان 10 تا 15 L/min به عنوان گاز محافظ و گاز پستی استفاده

[13] عوامل مؤثر بر بهبود جوشکاری آلیاژهای HP مورد استفاده در لوله‌های شکست اتیلن را بررسی نمودند. پس از جوشکاری این آلیاژها، تمایل زیادی به شکست در ناحیه HAZ وجود دارد که به علت تردی ناشی از خزش است. بر اساس نتایج به دست آمده، سه عامل دمای بین پاس، هندسه شیار و الگوی جوشکاری نقش اصلی را در کاهش پدیده ترک خوردگی آلیاژهای خانواده HP ایفا می‌کنند. طراحی شیار مناسب سبب کاهش تمرکز تنش شده و نیز الگوی جوشکاری مناسب باعث حرارت ورودی کمتر می‌شود. بهترین نتایج با هندسه U شکل، الگوی جوشکاری stringer و دمای بین پاس بالاتر به دست آمد. ژو و همکاران<sup>5</sup> [14] ریزساختار و خواص مکانیکی اتصالات نامتشابه Cr25Ni35NbM/SUS321 و Cr25Ni35NbM/15CrMo را بررسی نمودند. آن‌ها مشاهده کردند که تنش تسلیم و استحکام کششی این دو اتصال در دمای اتاق ( $25^\circ\text{C}$ ) و دمای بالا ( $900^\circ\text{C}$ ) کمتر از اتصال مشابه Cr25Ni35NbM است. در هر دو اتصال نامتشابه، محل شکست در ناحیه HAZ فلز پایه 15CrMo و SUS321 بود. ژو و همکاران [15] اثر حضور عناصر تنگستن و سریم در فلز پرکننده را بر ریزساختار و خواص خزشی اتصال جوش Cr35Ni45NbM بررسی نمودند. در این پژوهش از روش جوشکاری قوس تنگستن با گاز محافظ (GTAW) استفاده شد. بر اساس نتایج این پژوهش، حضور عناصر تنگستن و سریم سبب بهبود خواص خزشی شده ولی تأثیری بر استحکام کششی در دمای اتاق ندارد. محل شکست نمونه‌های خزشی فلز جوش بود و ترک‌ها در فصل مشترک کاربیدها و زمینه گاما جوانه‌زنی و سپس در امتداد کاربیدها اشاعه یافتند.

یکی از عوامل مهم در خواص آلیاژهای جوشکاری شده، ترکیب فلز پرکننده است و در آلیاژهای 35Cr-45Ni این امر از ضرورت ویژه‌ای برخوردار است زیرا فلز جوش باید همچون فلز پایه دارای خواص اکسیداسیون، کربوریزاسیون و خزشی ایده‌آل باشد. به‌علاوه، در صورت اختلاف خواص حرارتی، احتمال ایجاد تنش‌های حرارتی و واماندگی وجود دارد [16]. ریحانی و همکاران<sup>6</sup> [17] واماندگی ناحیه متأثر

نمونه‌ها قبل و بعد از اکسیداسیون توسط ترازوی دیجیتال با دقت  $0/01 \text{ mg} \pm$  اندازه‌گیری شد.

از میکروسکوپ نوری Olympus GX51 با قابلیت تصویربرداری تا بزرگنمایی 1000 برابر و میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی مدل MIRA3 TESCAN- XMU جهت بررسی ریزساختار فلز پایه و فلزات جوش استفاده شد. برای این منظور، پس از برش نمونه‌هایی به ابعاد  $10 \times 10 \times 4 \text{ mm}$  و مانت آن‌ها، سنباده‌زنی توسط ورق‌های سنباده کاربید سیلیسیم 400، 800، 1000 و 2000 انجام شد و در ادامه نمونه‌ها توسط ذرات آلومینا 0/3 و  $0/05 \mu\text{m}$  پولیش شدند [18]. پس از این مرحله اچ شیمیایی نمونه‌ها در محلول Kaling با ترکیبی شامل 33 ml آب مقطر، 33 ml اتانول 96٪، 33 ml اسید هیدروکلریک و  $1/5 \text{ g CuCl}_2$  انجام شد. لازم به ذکر است که قبل از بررسی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی، یک لایه نازک طلا به روش رسوب‌دهی فیزیکی فاز بخار بر روی نمونه‌ها اعمال شد. آنالیز عنصری فازهای موجود در نمونه‌ها توسط طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوایکس (EDS) تعیین شده در دستگاه FESEM انجام گرفت. از آزمون پراش پرتو ایکس جهت مطالعه فازهای تولید شده پس از آزمون اکسیداسیون استفاده شد. آنالیز توسط دستگاه XRD مدل X'Pert PRO MPD ساخت شرکت PANalytical Company و با پرتوی Cu-K $\alpha$  با طول موج  $1/54060 \text{ nm}$  انجام شد. جهت مطالعه لایه اکسیدی، نمونه‌های اکسید شده توسط ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی مقطع زده شده و به روش توضیح داده در ابتدای این قسمت آماده‌سازی شدند (مانت، سنباده‌زنی و پولیش) و سپس توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد مطالعه قرار گرفتند و ضخامت لایه اکسیدی اندازه‌گیری شد.

### 3- نتایج و بحث

تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ریزساختار فلز پایه و طیف EDS متناظر با آن در شکل 1 و جدول 3 نمایش داده شده است. زمینه آستنیتی عاری از رسوبات است و در مرز دانه‌ها می‌توان دو نوع کاربید مختلف را شناسایی کرد:

شد. جوشکاری توسط شش پاس و با حداکثر دمای بین پاس  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  انجام شد.

جدول (1): ترکیب شیمیایی آلیاژ مقاوم به حرارت 35Cr-45Ni بر

اساس آزمون طیف‌سنجی نشر نوری کوپل القایی پلاسما (انجام شده توسط نگارنده)

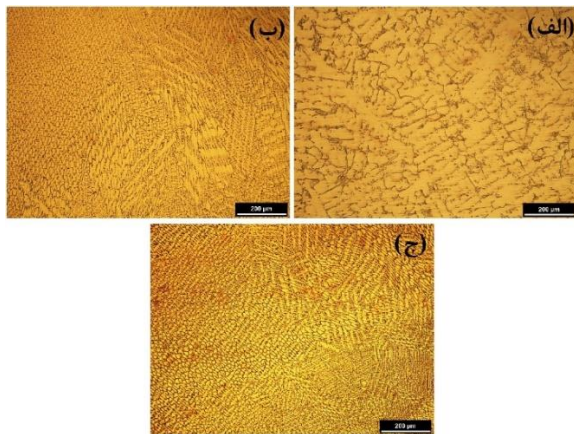
Al	Ti	Co	Fe	Cu	Cr	Mn	Si
0/089	0/09	0/04	14/6	0/04	33/5	1/04	0/2
	Ni	Zr	S	P	C	V	Nb
	باقیمانده	0/007	0/003	0/005	0/39	0/064	0/97

جدول (2): ترکیب شیمیایی دو نوع فلز پرکننده مختلف استفاده شده در این پژوهش بر اساس آزمون طیف‌سنجی نشر نوری کوپل القایی پلاسما (انجام شده توسط نگارنده)

فلز پرکننده 2		فلز پرکننده 1	
عنصر	درصد وزنی (%)	عنصر	درصد وزنی (%)
Si	1/0	Si	1/0
Mn	0/9	Mn	1/4
Cr	35/1	Cr	25/2
V	0/027	V	0/025
Ti	0/11	Ti	0/09
Al	0/02	Al	0/01
Nb	0/9	Nb	1/2
Fe	باقی‌مانده	Fe	باقی‌مانده
C	0/46	C	0/42
Ni	45/0	Ni	35/1

جهت بررسی خواص اکسیداسیون نمونه‌ها، کوپن‌هایی به ابعاد  $25 \times 15 \times 4 \text{ mm}$  از فلز جوش و فلز پایه بریده شدند. سپس سطح نمونه‌ها توسط سنباده SiC شماره 800 آماده‌سازی شده و پس از شستشو با آب و خشک کردن، آلودگی‌های سطح توسط فرآیند آلتراسونیک در استن حذف شد. نمونه‌ها در ظروف آلومینایی قرار داده شده و به داخل کوره منتقل شدند. از آنجا که لوله‌های 35Cr-45Ni در کوره تولید اتیلن در دمایی در حدود  $950 \text{ }^\circ\text{C}$  تا  $1050 \text{ }^\circ\text{C}$  حرارت می‌بینند، رفتار اکسیداسیون لوله‌ها در دمای  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  بررسی شد. آزمایش اکسیداسیون به مدت 96 h انجام شد تا بتوان رفتار لوله‌ها تحت اکسیداسیون را بررسی نمود (افزایش زمان آزمون اکسیداسیون می‌تواند منجر به مقایسه بهتر مقاومت اکسیداسیون نمونه‌ها شود اما متأسفانه محدودیت امکانات سبب شد تا به 96 h اکتفا شود). وزن

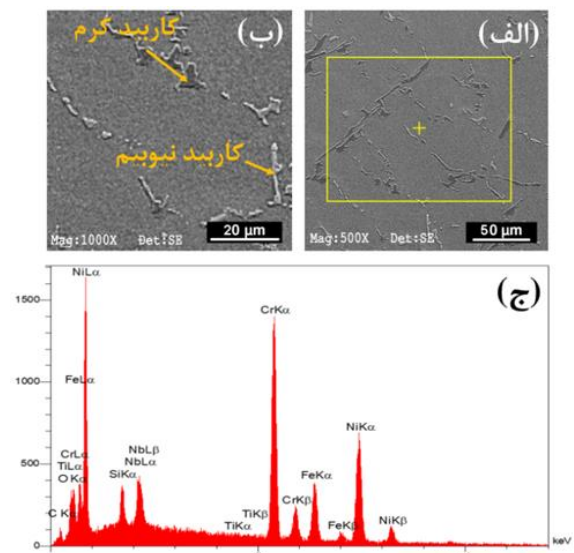
علت سرمایش سریع در فرآیند GTAW، دانه‌بندی ریزی در فلزات جوش مشاهده می‌شود (شکل 2 ب و ج) و ریزساختار آن‌ها متشکل از زمینه آستنیتی به همراه کاربیدهای دندریتی است. از جمله مواردی که تعیین‌کننده مورفولوژی ایجاد شده در فلز جوش هستند می‌توان به گرادیان دمایی (G)، نرخ انجماد (R) و فوق تبرید ترکیبی اشاره نمود. کاهش نسبت G به R و نیز افزایش در فوق تبرید ترکیبی با حرکت از فصل مشترک جوش/فلز پایه به سمت فلز جوش سبب تغییر حالت انجماد از سلولی (در فصل مشترک جامد/مایع) به دندریتی ستونی (در فلز جوش) شده است. همچنین، درصد بالای نیکل در فلز پرکننده سبب ایجاد ساختار دندریتی آستنیت معمول در فلز جوش شده است [21].



شکل (2): تصاویر میکروسکوپی نوری از ریزساختار الف) فلز پایه 35Cr-45Ni، ب) فلز جوش ایجاد شده توسط فلز پرکننده 1 و ج) فلز جوش ایجاد شده توسط فلز پرکننده 2.

تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ریزساختار فلز جوش نمونه‌های جوشکاری شده در شکل 3 نشان داده شده است. به علت وجود درصد بالای نیکل در ترکیب فلزات پرکننده، مورفولوژی دندریتی آستنیتی در فلز جوش نمونه‌ها دیده می‌شود. ترکیب شیمیایی فلز جوش ایجاد شده از فلز پرکننده 1 و 2 به ترتیب در جداول 4 و 5 گزارش شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ترکیب شیمیایی دو نمونه مطابقت خوبی با ترکیب شیمیایی فلزات پرکننده 1 و 2 (جدول 2) دارد. با دقت در شکل 3 می‌توان دید که کسر حجمی کاربیدها در فلز جوش نمونه ایجاد شده توسط فلز

یکی کاربیدهای خاکستری تیره که مربوط به کاربیدهای کروم هستند ( $Cr_7C_3$  و  $Cr_{23}C_6$ ) و یکی کاربیدهای روشن که مربوط به کاربید نیوبیم می‌شوند. کاربیدهای خاکستری تیره درصد حجمی بیشتری نسبت به کاربیدهای روشن دارند که مربوط به درصد بالاتر کروم در ترکیب است. البته پژوهش‌های دیگر به حضور کاربید سایر عناصر مانند سیلیسیم و نیکل به میزان کم در ساختار اشاره کرده‌اند [19-20]. نتیجه آنالیز EDS همخوانی مناسبی با نتیجه آزمون طیف‌سنجی نشر نوری کوپل القایی پلاسما دارد (جدول 1). بر اساس این نتایج، ریزساختار شامل زمینه محلول جامد نیکل آستنیتی همراه با کاربیدهای کروم و نیوبیم است.



شکل (1): الف) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی، ب) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی با بزرگنمایی بیشتر و ج) طیف EDS از فلز پایه متناظر با ناحیه مشخص شده در شکل الف.

جدول (3): نتایج آزمون EDS فلز پایه 35Cr-45Ni (wt %)

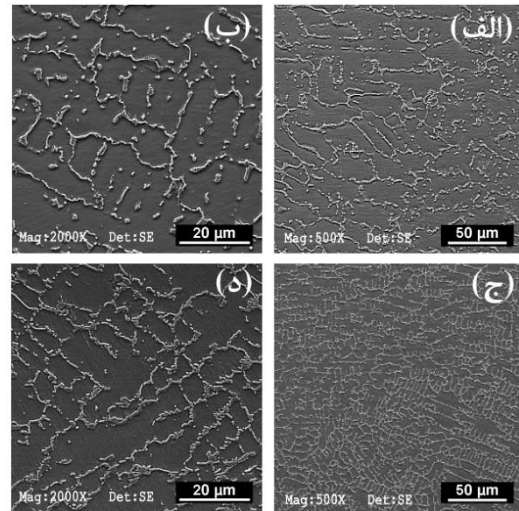
Nb	Ni	Fe	Cr	Ti	Si	O	C	B
/31	/28	/16	/43	/05	/08	/41	/35	/92
3	33	10	24	0	1	3	5	18

شکل 2 تصاویر میکروسکوپی نوری از ریزساختار فلز پایه 35Cr-45Ni و فلز جوش نمونه‌های جوشکاری شده توسط فلزات پرکننده 1 و 2 را نشان می‌دهد. ریزساختار فلز پایه شامل زمینه آستنیتی همراه با کاربیدهای دندریتی است که عمدتاً در راستای مرز دانه‌های زمینه رسوب کرده‌اند و مشابه نتایج گزارش شده در تحقیقات دیگر است [19-20]. به

## پرکننده 2

بر اساس نتایج، بیشترین افزایش وزن ( $3/4 \text{ mg/cm}^2$ ) و ضخامت لایه اکسید ( $20 \mu\text{m}$ ) مربوط به فلز جوش ایجاد شده توسط فلز پرکننده 1 است. آلیاژ مقاوم به حرارت 35Cr-45Ni و فلز جوش ایجاد شده توسط فلز پرکننده 2 خواص اکسیداسیون مشابهی را نشان می‌دهند (برای آلیاژ 35Cr-45Ni مقدار افزایش وزن  $3/2 \text{ mg/cm}^2$  و ضخامت اکسید  $9 \mu\text{m}$  است، درحالی‌که این مقادیر برای فلز جوش ایجاد شده توسط فلز پرکننده 2 به ترتیب وزن  $3/6 \text{ mg/cm}^2$  و  $11 \mu\text{m}$  است). مقاومت اکسیداسیون ضعیف‌تر فلز جوش ایجاد شده توسط فلز پرکننده 1 را می‌توان به درصد کروم و سیلیسیم این نمونه مرتبط دانست؛ درصد بالاتر کروم در دو نمونه دیگر می‌تواند منجر به ایجاد یک لایه مقاوم و پیوسته اکسید کروم بر سطح شود که مقاومت به اکسیداسیون را می‌افزاید. این لایه بیرونی اکسید کروم باعث ایزوله شدن فلز از محیط شده و در نتیجه مقاومت به اکسیداسیون را می‌افزاید. همچنین، درصد بالاتر سیلیسیم سبب ایجاد یک لایه زیر سطحی از اکسید سیلیسیم شده که با کند کردن نفوذ اکسیژن و یون فلز در دمای بالا، مقاومت به اکسیداسیون را افزایش می‌دهد [22-23]. همچنین فازهای اسپینل موجود در دو نمونه می‌توانند از تبخیر اکسید کروم در دمای بالا جلوگیری کنند و مقاومت به اکسیداسیون را بهبود بخشند [24]. همچنین، خواص اکسیداسیون مشابه آلیاژ 35Cr-45Ni و نمونه جوشکاری شده توسط فلز پرکننده 2 را می‌توان به ترکیب شیمیایی نزدیک این دو نمونه مرتبط دانست. جهت بررسی ماهیت اکسیدهای ایجاد شده، آنالیز XRD بر روی نمونه‌های اکسید شده انجام شد (شکل 4).

پرکننده 2 بیشتر از فلز جوش ایجاد شده توسط فلز پرکننده 1 است و کاربیدها متراکم‌تر هستند. این موضوع می‌تواند به علت درصد بالاتر کروم در فلز پرکننده 2 و خاصیت کاربیدزایی کروم باشد.



شکل (3): تصاویر میکروسکوپی الکترونی رویشی از ریزساختار الف و ب) فلز جوش ایجاد شده با فلز پرکننده 1 و ج و د) فلز جوش ایجاد شده با فلز پرکننده 2.

جدول (4): ترکیب شیمیایی فلز جوش ایجاد شده از فلز پرکننده 1 (% wt)

Al	Ti	Co	Fe	W	Cr	Mn	Si
0/02	0/09	0/04	30/6	0/08	26/5	1/71	1/24
		Ni			C	V	Nb
		باقیمانده			0/37	0/051	1/1

جدول (5): ترکیب شیمیایی فلز جوش ایجاد شده از فلز پرکننده 2 (% wt)

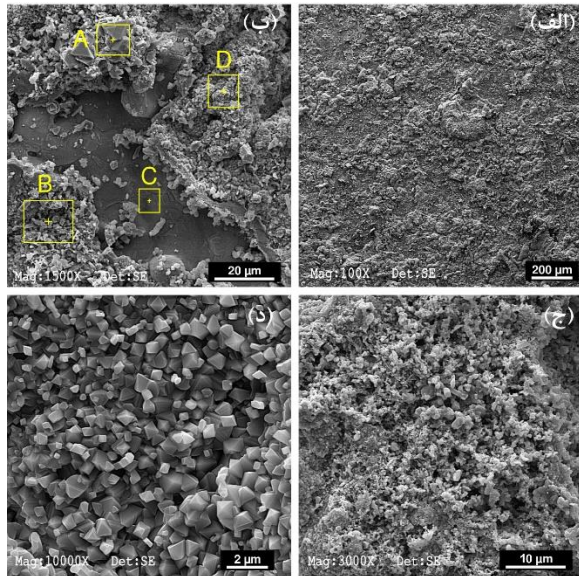
Al	Ti	Co	Fe	W	Cr	Mn	Si
0/09	0/09	0/05	13/3	0/01	33/4	1/1	2/1
		Ni			C	V	Nb
		باقیمانده			0/40	0/047	1/01

خلاصه‌ای از نتایج آزمون اکسیداسیون فلز پایه و فلز جوش نمونه‌های جوشکاری شده در جدول 6 گزارش شده است.

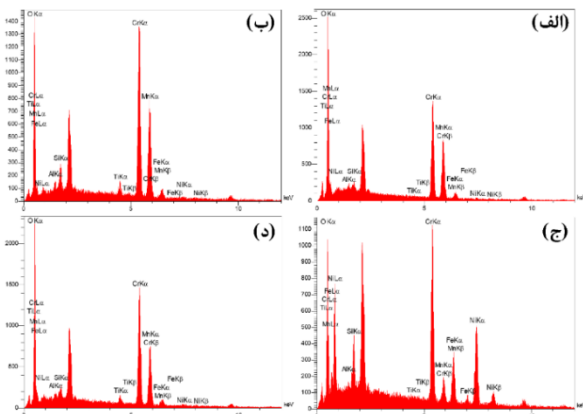
جدول (6): خلاصه‌ای از نتایج آزمون اکسیداسیون آلیاژ 35Cr-45Ni و فلزات جوش ایجاد شده توسط فلز پرکننده 1 و 2 در دمای  $1000^\circ\text{C}$  به مدت 96 h در اتمسفر هوا

نمونه	افزایش وزن ( $\text{mg/cm}^2$ )	ضخامت اکسید ( $\mu\text{m}$ )
فلز پایه	3/2	9
فلز جوش ایجاد شده توسط فلز پرکننده 1	4/3	20
فلز جوش ایجاد شده توسط فلز پرکننده 2	3/5	11

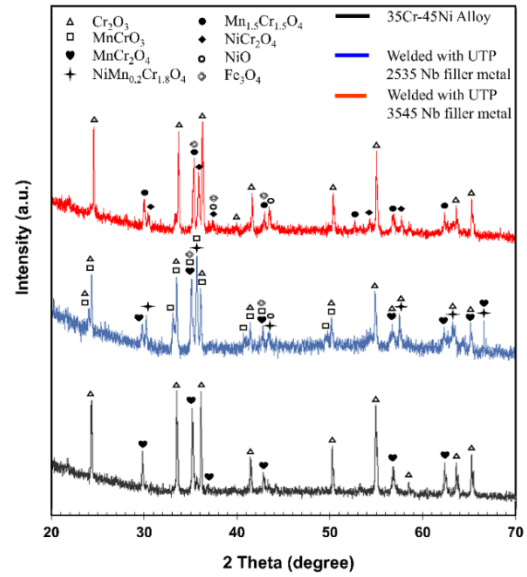
مشاهده نمود. تفاوت در مورفولوژی و اندازه کریستالیت‌های اکسیدی ایجاد شده مربوط به تفاوت و توزیع عناصر آلیاژی مختلف در نمونه‌هاست [26]. بر اساس طیف‌های EDS متناظر، اکسید کروم اصلی‌ترین جز حاضر در لایه اکسیدی تمام نمونه‌هاست و فازهای اسپینل غنی از Cr، Mn و Ni نیز بر روی سطح نمونه حضور دارند.



شکل (5): تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح آلیاژ 35Cr-45Ni پس از 96 h اکسیداسیون در دمای 1000 °C تحت اتمسفر هوا در بزرگنمایی‌های مختلف.



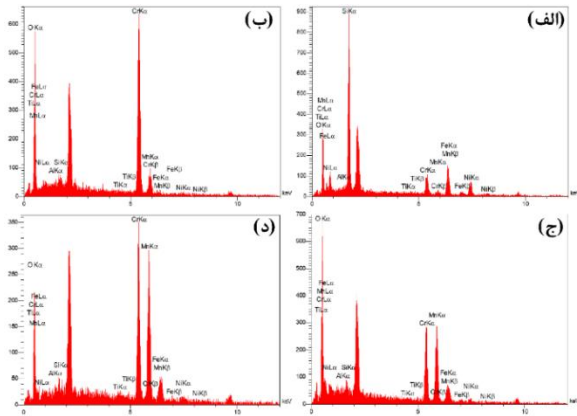
شکل (6): طیف EDS از سطح آلیاژ 35Cr-45Ni پس از 96 h اکسیداسیون در دمای 1000 °C تحت اتمسفر هوا، (الف) متناظر با نقطه A در شکل 5، (ب) متناظر با نقطه B در شکل 5، (ج) متناظر با نقطه C در شکل 5 و (د) متناظر با نقطه D در شکل 5.



شکل (4): طیف XRD آلیاژ 35Cr-45Ni و فلزات جوش ایجاد شده توسط فلزات پرکننده 1 و 2 در دمای 1000 °C به مدت 96 h در اتمسفر هوا.

همان‌طور که دیده می‌شود، اکسید کروم اصلی‌ترین جز حاضر در لایه اکسیدی تمام نمونه‌هاست. به‌علاوه، در نمونه‌های جوشکاری شده اکسید آهن و نیکل به همراه فازهای اسپینل مثل  $NiCr_2O_4$  نیز شناسایی شده‌اند [23-25]. البته باید دقت شود که به علت عمق نفوذ محدود پرتوی ایکس (چند میکرومتر) ممکن است برخی از فازها حتی با وجود میزان زیاد شناسایی نشده باشند.

تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح آلیاژ 35Cr-45Ni و فلزات جوش ایجاد شده توسط فلز پرکننده 1 و 2 پس از آزمون اکسیداسیون در بزرگنمایی‌های مختلف در شکل‌های 5، 7 و 9 نشان داده شده است. همچنین، طیف‌های EDS متناظر با نقاط مشخص شده در این شکل‌ها به ترتیب در شکل‌های 6، 8 و 10 نشان داده شده است. نتایج به دست آمده از آزمون EDS در جداول 7 تا 9 خلاصه شده است. بر اساس تصاویر با بزرگنمایی کمتر، بر روی سطح تمامی نمونه‌ها یک لایه اکسید تقریباً پیوسته و متراکم ایجاد شده است که در برخی نقاط نیز دچار پوسته شدن گشته است. با بزرگنمایی تصویر مشخص است که لایه اکسیدی متشکل از فازهای مختلف با مورفولوژی‌های متفاوت است و ساختار اسپینل اکسید را می‌توان به وضوح



شکل (8): طیف EDS مربوط به سطح فلز جوش ایجاد شده توسط فلز پرکننده 1 پس از 96 h اکسیداسیون در دمای 1000 °C تحت اتمسفر هوا، الف) متناظر با نقطه A در شکل 7، ب) متناظر با نقطه B در شکل 7، ج) متناظر با نقطه C در شکل 7 و د) متناظر با نقطه D در شکل 7.

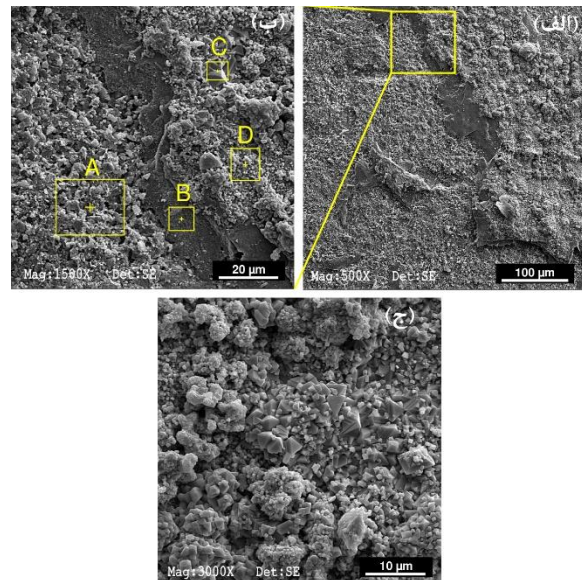
جدول (8): نتایج آزمون EDS شکل‌های 8 الف تا د به ترتیب (% wt)

شکل الف							
Ni	Fe	Mn	Cr	Ti	Si	Al	O
/66	/77	0	/73	/20	/50	/24	/89
18	24	0	10	0	22	0	22
شکل ب							
Ni	Fe	Mn	Cr	Ti	Si	Al	O
1/06	0/59	0	/31	/16	1/20	/60	/08
			70	0	0	0	26
شکل ج							
Ni	Fe	Mn	Cr	Ti	Si	Al	O
2/37	6/01	/93	/26	/14	1/30	/51	/48
		32	28	0	0	0	28
شکل د							
Ni	Fe	Mn	Cr	Ti	Si	Al	O
2/10	4/60	/70	/72	/41	0/62	/29	/57
		39	38	0	0	0	13

دیده می‌شود. در میان تمامی عناصر موجود در نمونه‌ها، سیلیسیم بیشترین تمایل به اکسیژن را دارد، اما به دلیل درصد کم و در نتیجه فعالیت ترمودینامیکی کم، این عنصر نمی‌تواند اولین لایه اکسید را تشکیل دهد. اولین لایه اکسید تشکیل شده اکسید کروم است که هرچند تمایل به اکسیژن کمتری دارد، اما درصد بالایی دارد و در نتیجه فعالیت ترمودینامیکی آن زیاد است. از آن جا که حلالیت سیلیسیم در اکسید کروم کم است، با پیشرفت اکسیداسیون این عنصر به زمینه نفوذ کرده و به تدریج درصد سیلیسیم زیر لایه اکسید کروم افزایش می‌یابد. در همین زمان، درصد کروم آلیاژ نیز در زیر لایه اکسیدی کم می‌شود و به تدریج تشکیل اکسید سیلیسیم میسر می‌شود (افزایش فعالیت ترمودینامیکی

جدول (7): نتایج آزمون EDS شکل‌های 6 الف تا د به ترتیب (% wt)

شکل الف							
Ni	Fe	Mn	Cr	Ti	Si	Al	O
0/83	0	/72	/31	/08	/28	/10	/68
		25	41	0	1	1	29
شکل ب							
Ni	Fe	Mn	Cr	Ti	Si	Al	O
/0044	0	/12	/04	/95	/79	/63	/98
0		26	47	1	1	0	21
شکل ج							
Ni	Fe	Mn	Cr	Ti	Si	Al	O
39/67	/90	0	/17	/05	/61	/23	/36
	12		29	0	2	0	15
شکل د							
Ni	Fe	Mn	Cr	Ti	Si	Al	O
1/10	0/53	/83	/73	/46	/25	/80	/31
		21	44	1	1	0	28



شکل (7): تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح فلز جوش ایجاد شده توسط فلز پرکننده 1 پس از 96 h اکسیداسیون در دمای 1000 °C تحت اتمسفر هوا در بزرگنمایی‌های مختلف.

جهت درک بهتر رفتار اکسیداسیون نمونه‌ها، تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از مقطع نمونه‌های آزمون اکسیداسیون انجام شد و تصاویر به دست آمده به همراه نقشه عنصری متناظر با آن در شکل‌های 11 تا 13 نشان داده شده است. بر روی سطح تمامی نمونه‌ها یک لایه اکسید خارجی دیده می‌شود که عمدتاً شامل اکسید کروم است. همچنین، رسوبات اکسید سیلیسیم به صورت اکسید داخلی در نمونه‌ها



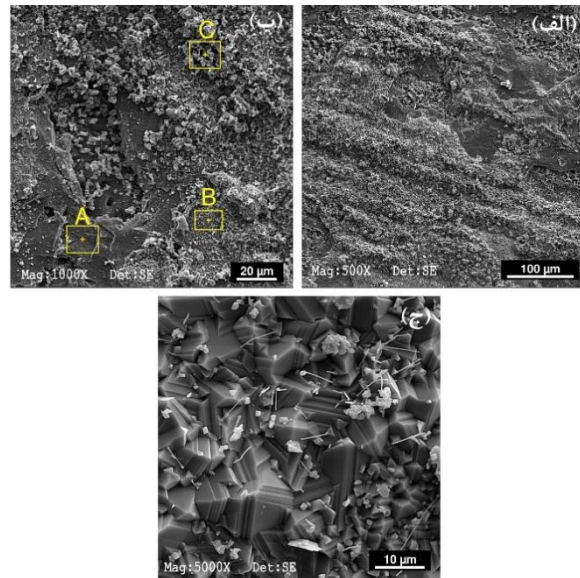
جدول (9): نتایج آزمون EDS شکل‌های 10 الف تا د به ترتیب (% wt)

شکل الف							
Ni	Fe	Mn	Cr	Ti	Si	Al	O
0/24	0	0/88	77/88	0/12	1/06	0/53	19/28
شکل ب							
Ni	Fe	Mn	Cr	Ti	Si	Al	O
0/22	0/84	29/90	44/05	2/17	0/84	0/41	21/57
شکل ج							
Ni	Fe	Mn	Cr	Ti	Si	Al	O
0/24	0	28/50	39/16	0/24	1/02	0/68	30/16

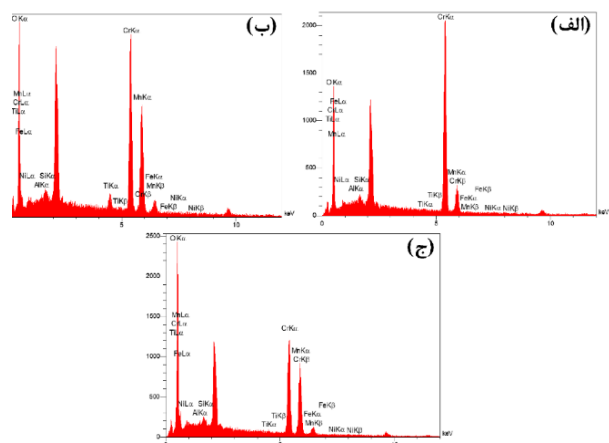
با مقایسه شکل 12 و 13 می‌توان دید که لایه اکسید خارجی در نمونه جوشکاری شده توسط فلز پرکننده 2 عیوب کمتری دارد و بنابراین مقاومت به اکسیداسیون بهتر آن دور از انتظار نیست.

تفاوت دیگر میان اکسیداسیون فلز جوش ایجاد شده توسط فلز پرکننده 1 با دو نمونه دیگر در وجود یک لایه اکسید خارجی اکسید آهن بر سطح این نمونه است. بنا بر تئوری اکسیداسیون پیشنهاد شده توسط واگنر، برای تشکیل یک لایه اکسید پیوسته خارجی، غلظت عنصر B در آلیاژ باید از یک میزان بحرانی ( $N_B^*$ ) بیشتر باشد، در غیر این صورت اکسید این عنصر به صورت داخلی تشکیل می‌شود [22]. بر اساس مشاهده اکسید خارجی  $Fe_3O_4$  بر سطح نمونه جوشکاری شده توسط فلز پرکننده 1 می‌توان نتیجه گرفت که غلظت عنصر آهن این نمونه از  $N_{Fe}^*$  بیشتر است (و با استدلالی مشابه می‌توان نتیجه گرفت که غلظت عنصر آهن در آلیاژ 35Cr-45Ni و نمونه جوشکاری شده توسط فلز پرکننده 2 کمتر از  $N_{Fe}^*$  است). ذکر این نکته ضروری است که هرچند بر اساس آنالیز EDS در مقطع نمونه‌ها، اکسید سیلیسیم شناسایی شد، اما در طیف XRD نمونه‌ها این اکسید شناسایی نشد. توجه این خطا می‌تواند عمق نفوذ محدود پرتوی ایکس (همان‌طور که توضیح داده شد) و یا ساختار آمورف اکسید سیلیسیم باشد.

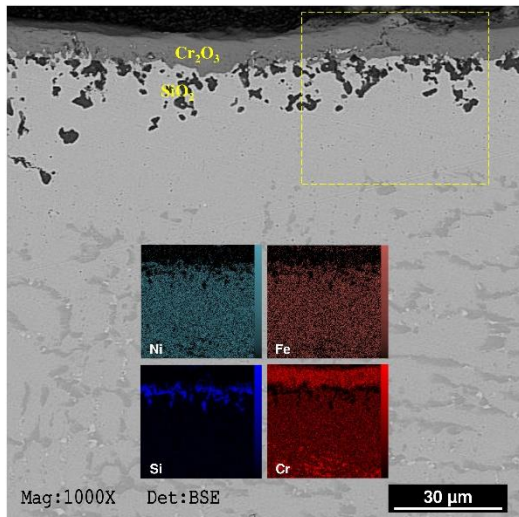
سیلیسیم نسبت به کروم؛ بنابراین، ایجاد لایه اکسید سیلیسیم در مجاورت و زیر لایه اکسید کروم اتفاق می‌افتد. یک عامل دیگر که در این پدیده نقش دارد ایجاد منطقه‌ای با پتانسیل اکسید کم در زیر لایه اکسید کروم است؛ در مقایسه با اکسید کروم، اکسید سیلیسیم می‌تواند در فشار جزئی اکسید کمتری تشکیل شود [9، 27].



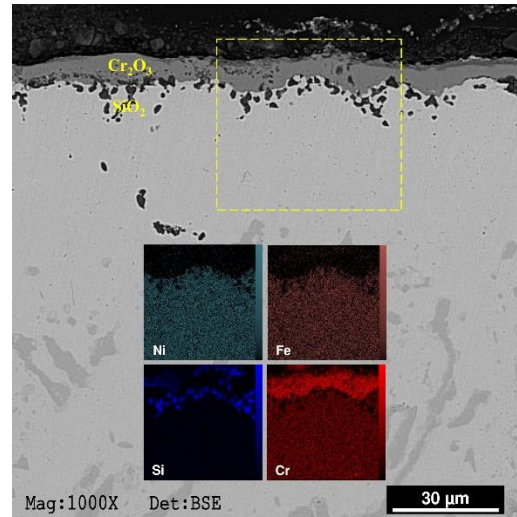
شکل (9): تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح فلز جوش ایجاد شده توسط فلز پرکننده 2 پس از 96 h اکسیداسیون در دمای 1000 °C تحت اتمسفر هوا در بزرگنمایی‌های مختلف.



شکل (10): طیف EDS مربوط به سطح فلز جوش ایجاد شده توسط فلز پرکننده 1 پس از 96 h اکسیداسیون در دمای 1000 °C تحت اتمسفر هوا، الف) متناظر با نقطه A در شکل 9، ب) متناظر با نقطه B در شکل 9، ج) متناظر با نقطه C در شکل 9.



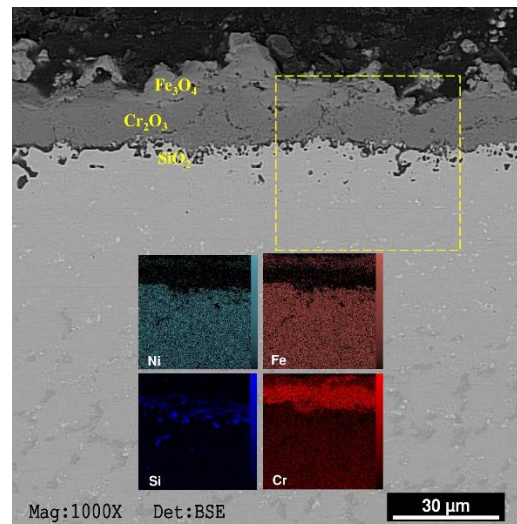
شکل (13): تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از مقطع فلز جوش ایجاد شده توسط فلز پرکننده 2 پس از 96 h اکسیداسیون در دمای 1000 °C تحت اتمسفر هوا و نقشه عنصری عناصر Ni, Fe, Cr و Si مربوط به ناحیه مشخص شده.



شکل (11): تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از مقطع آلیاژ 35Cr-45Ni پس از 96 h اکسیداسیون در دمای 1000 °C تحت اتمسفر هوا و نقشه عنصری عناصر Ni, Fe, Cr و Si مربوط به ناحیه مشخص شده.

#### 4- نتیجه گیری

در این پژوهش رفتار اکسیداسیون فلزات جوش ایجاد شده توسط دو نوع فلز پرکننده مختلف UTP 2535 Nb (دارای 25٪ کروم و 35٪ نیکل) و UTP 3545 Nb (دارای 35٪ کروم و 45٪ نیکل) بررسی شد. بر اساس نتایج، بیشترین افزایش وزن و ضخامت لایه اکسید مربوط به فلز جوش ایجاد شده توسط فلز پرکننده UTP 2535 Nb بود. آلیاژ پایه 35Cr-45Ni و فلز جوش ایجاد شده توسط فلز پرکننده UTP 3545 Nb خواص نسبتاً مشابهی را نشان دادند که به علت ترکیب شیمیایی نزدیک این نمونه‌ها است. مقاومت به اکسیداسیون بهتر فلز جوش ایجاد شده توسط فلز پرکننده UTP 3545 Nb نسبت به فلز جوش ایجاد شده توسط فلز پرکننده دیگر را می‌توان به درصد کروم و سیلیسیم بیشتر در نمونه اول مرتبط دانست؛ درصد بالاتر کروم می‌تواند منجر به ایجاد یک لایه مقاوم و پیوسته اکسید کروم بر سطح شود که مقاومت به اکسیداسیون را می‌افزاید. همچنین، درصد بالاتر سیلیسیم سبب ایجاد یک لایه اکسید داخلی شده که با کند کردن نفوذ اکسیژن و یون فلز در دمای بالا، مقاومت به اکسیداسیون را افزایش می‌دهد. در تمامی نمونه‌ها اکسید کروم اصلی‌ترین جز حاضر در لایه اکسیدی بود و در فلزات



شکل (12): تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از مقطع فلز جوش ایجاد شده توسط فلز پرکننده 1 پس از 96 h اکسیداسیون در دمای 1000 °C تحت اتمسفر هوا و نقشه عنصری عناصر Ni, Fe, Cr و Si مربوط به ناحیه مشخص شده.

Metallography, Microstructure, and Analysis, vol. 4, no. 4, pp. 273-85, 2015.

[11] N. Madern, J. Monnier, R. Baddour-Hadjean, A. Steckmeyer & J. M. Joubert, "Characterization of refractory steel oxidation at high temperature". Corrosion Science, vol. 132, pp. 223-233, 2018.

[12] K. Guan & Q. Wang, "Analysis of failed electron beam welds in ethylene cracking tubes". Engineering Failure Analysis, vol. 18, no. 5, pp. 1366-1374, 2011.

[13] K. Rampat & C. Maharaj, "Improving the Weld Procedure for Aged HP-Mod Alloy Reformer Tubes". Metallography, Microstructure, and Analysis, vol. 5, pp. 493-503, 2018.

[14] J. Guo, W. Liu, C. Li & X. Zhang, "Microstructural characterization and mechanical behavior of Cr25Ni35NbM alloy dissimilar weld joint for application in a hydrogen reformer furnace". Metallurgical Research & Technology, vol. 117, pp. 612, 2020.

[15] J. Guo, W. Liu, C. Li & X. Zhang, "Effects of W and Ce micro addition in filler metal on microstructure and creep strength of Cr35Ni45NbM alloy weld joint". Materials Today Communications, vol. 28, 102600, 2021.

[16] A. Reihani & R. D. Haghghi, "Failure analysis and weld ability improvement of 35% Cr-45% Ni heat resistant alloy". Engineering Failure Analysis, vol. 52, 2015, pp. 97-108.

[17] A. Reihani, S. A. Razavi, E. Abbasi & A. R. Etemadi, "Failure analysis of welded radiant tubes made of cast heat-resisting steel". Journal of failure Analysis and Prevention, vol. 13, no. 6, pp. 658-665, 2013.

[18] J. B. Da Costa, J. L. Ferracane, S. Amaya-Pajares & F. Pfeifferkorn, "Visually acceptable gloss threshold for resin composite and polishing systems". The Journal of the American Dental Association, vol. 152, pp. 385-392, 2021.

[19] J. Guo, C. Cheng, H. Li, J. Zhao & X. Min, "Microstructural analysis of Cr35Ni45Nb heat-resistant steel after a five-year service in pyrolysis furnace", Engineering Failure Analysis, vol. 79, pp. 625-633, 2017.

[20] C. Liu, X. Chen, T. Chen, D. Nie & L. Wang, "Carbide transformation in carburized zone of 25Cr35NiNb+ MA alloy after high-temperature service". Materials at High Temperatures, vol. 33, no. 1, pp. 98-104, 2016.

جوش، اکسید آهن و نیکل به همراه فازهای اسپینل مثل  $NiCr_2O_4$  نیز شناسایی شدند؛ بنابراین در صورتی که مقاومت به اکسیداسیون عامل تعیین کننده انتخاب فرآیند جوشکاری باشد، می توان انتظار داشت فلز پرکننده UTP 3545 Nb عملکرد بهتری ارائه دهد. نتایج این پژوهش می تواند در عملیات جوشکاری تعمیراتی لوله های کوره تولید اتیلن، به عنوان راهنما مورد استفاده قرار گیرد.

## 5- مراجع

[1] B. Li, & G. Lai, "Automatic Orbital GTAW for Repair Welding of Ethylene Furnace Tube Coils". Corrosion, 2012.

[2] E. Guglielmino, R. Pino, C. Servetto & A. Sili, "Damage investigation on welded tubes of a reforming furnace". La Metallurgia Italiana, 2015.

[3] C. Singhatam & K. Eidhed, "The study of welding repair parameters of tube 35Cr-45Ni-Nb alloy of the ethylene heating furnace". Applied Mechanics and Materials, Vol. 848, Pp. 35-38, 2016.

[4] J. Guo, T. Cao, C. Cheng, X. Meng & J. Zhao, "Evaluation of creep rupture behaviour for weld joint and base metal of the Cr35Ni45Nb alloy, Science and Technology of Welding and Joining". vol. 23, no. 6, pp. 449-53, 2018.

[5] N. Birks, G. H. Meier & F. S. Pettit, "Introduction to the high temperature oxidation of metals". Cambridge university press, 2006.

[6] P. Kofstad, "High temperature corrosion". London and New York, 1988.

[7] A. Sharma, S. Kumar & Z. Duriagina, "Engineering Steels and High Entropy-Alloys". Books on Demand, 1st edition, 2020.

[8] B. Hu, X. Chen, C. Liu, X. Lian & T. Chen, "Study on microstructure and properties of centrifugal casting 35Cr45NiNb+MA furnace tubes during service, Materials at High Temperatures". vol. 36, no. 6, pp. 489-498, 2019.

[9] A. A. Kaya, P. Krauklis & D. J. Young, "Microstructure of HK40 alloy after high temperature service in oxidizing/carburizing environment: I. Oxidation phenomena and propagation of a crack". Materials characterization, vol. 49, no. 1, pp. 11-21, 2002.

[10] A. C. McLeod, C. M. Bishop, K. J. Stevens & M. V. Kral, "Microstructure and carburization detection in HP alloy pyrolysis tubes".

[25] P. Berthod & E. Conrath, "Creep and oxidation kinetics at 1100 °C of nickel-base alloys reinforced by hafnium carbides". *Materials & Design*, vol. 104, pp. 27-36, 2016.

[26] A. Al-Meshari & J. Little, "High temperature oxidation of centrifugally cast heat-resistant alloys". *Materials at High Temperatures*. vol. 26, no. 3, pp. 233-239, 2009.

[27] A Bakhshi-Zadeh, S. Salmani, M. A. Faghihi-Sani, H. Abdoli & N. Jalili, "Oxidation and Electrical Properties of De-siliconized AISI 430 Alloy with Mn<sub>1.5</sub>Co<sub>1.5</sub>O<sub>4</sub> Coating for Fuel Cell". *oxidation of metals*, vol. 93, pp. 401-415, 2020.

[21] J. Sun, W. Ren, P. Nie, J. Huang, K. Zhang & Z. Li, "Study on the weldability, microstructure and mechanical properties of thick Inconel 617 plate using narrow gap laser welding method". *Materials & Design*, vol. 175, pp. 107823-107837, 2019.

[22] R. Song & S. Wu, "Microstructure evolution and residual life assessment of service exposed Cr35Ni45 radiant tube alloy". *Engineering Failure Analysis*, vol. 88, pp. 63-72, 2018.

[23] T. Dudziak, K. Jura, A. Polkowska, V. Deodeshmukh, M. Warmuzek, M. Witkowska & K. Chruściel, "Steam oxidation resistance of advanced steels and Ni-based alloys at 700 °C for 1000 h". *Oxidation of Metals*, vol. 89, pp. 755-779, 2018.

[24] Z. Zheng, S. Wang, J. Long, J. Wang & K. Zheng, "Effect of rare earth elements on high temperature oxidation behavior of austenitic steel". *Corrosion Science*, vol. 164, no. 1, pp. 2020. 108359-108372.

## 6- پی نوشت

- [1] McLeod et al
- [2] Madern et al
- [3] Guan & Wang
- [4] Rampat & Maharaj
- [5] Guo et al
- [6] Reihani et al