

Production of nickel-based welding filler rods by using a scrap gas turbine component

Ali Shafiei^{1*}, Aida Karimi², Saeid Khani³

1- Assistant professor, Metallurgy group, Niroo research institute, Tehran, Iran, Corresponding author,
Email: alshafiei@nri.ac.ir

2- M. Sc. student, Department of materials science and engineering, Sharif university of technology, Tehran, Iran

3- Assistant professor, Metallurgy group, Niroo research institute, Tehran, Iran

1- Introduction

Nickel-based welding filler rods are very common in TIG welding. These fillers are mostly used for the welding of nickel- or cobalt-base superalloys. Due to the increasing price of nickel, the price of nickel-based welding filler rods has noticeably increased recently which can noticeably affect the cost of final products. To overcome this problem, one could come up with the idea of using scrap components for production of welding filler rods. Therefore, an attempt has been made in this work for producing nickel-based welding filler rods by using scrap components. A scrap mixing chamber of a gas turbine which was in service for more than 100000 hours was used in this work for producing IN617 filler rods.

2. Materials and methods

A 100000-hour operated scrap mixing chamber of a Siemens V94.2 gas turbine is selected in this work for the experiments. To investigate if the mixing chamber can be used for producing welding filler rods, three aspects of the sample cut from the mixing chamber were evaluated: 1) the oxidation layer, 2) the chemical composition, and 3) the mechanical properties. From the oxidation layer point of view, it was concluded that the plate could be used for producing welding filler rods because the oxidation layer could be easily removed. The chemical composition of the plate was investigated and the results show that the chemical composition is in accordance to the chemical composition of IN617 filler rods determined in standard AWS A5.14/ A5.14M. Tensile mechanical properties of the plate were

also evaluated to investigate if the plate could be used for producing welding filler rods. The mechanical test results show that the elongation (EL) and reduction of area (RA) of the sample made from operated plate are lower in comparison with the EL and RA of the sample made from a new IN617 plate. However, it seems that the amount of the EL and RA are still enough for producing welding filler rods.

For producing welding filler rods, in the first step (after removing the oxidation layer) the plate was hot rolled to the thickness of 1.5 mm. In the next step, first the thin oxide layer of the rolled plate was removed by sand blasting and then the rolled plate was cut to rods with the width of 1.5 mm and thickness of 1.5 mm. Filler rods with any desired thickness and width could be produced by the method introduced in this work. The minimum thickness of the filler rods is determined by the capacity of the rolling machine and the maximum thickness of the filler rods is determined by the capacity of the cutter.

To evaluate the properties of the produced welding filler rods, they were used for producing weldments. In this regard, three V-shape grooves were cut on IN617 plates and they were filled with the filler rods. One of the grooves was filled with commercial IN617 filler rods, and the two others were filled by produced filler rods. Similar welding conditions were used for welding the grooves. Images from the welded grooves are shown in Figure 1.



Figure 1. Weldments and the schematic of the tensile samples cut from the weldments

3. Results and discussion

To evaluate the mechanical properties of the weldments, standard dog bone tensile samples with gage length of 16 mm and gage diameter of 4 mm were cut along the length of the weldments. The tensile tests were performed at room temperature and the results are shown in Table 1. The recommended tensile properties by specification AWS A5.14/A5.14M are also shown in Table 1. As it can be seen, the mechanical properties of the weldments made by the produced filler is comparable by the mechanical properties of the weldments made by commercial IN617 filler. Moreover, it can be seen that the mechanical properties of the weldments made from produced filler is higher

than the recommendations in specification AWS A5.14/A5.14M. These results indicate that the quality of the filler rods produced in this work is comparable with the quality of commercial filler rods. The microstructures of the weldments were also examined. The results show that the microstructures of both weldments are similar composing from carbides (TiC , MoC , Cr_{23}C_6) and nitrides (TiN) according to the EDX analysis. Therefore, it may be concluded that the produced filler rods has a quality which is comparable to commercial filler rods.

Table 1. Tensile mechanical properties of the weldments

	YS (MPa)	UTS (MPa)	EL (%)	RA (%)
Produced filler	599	787	34	27
Produced filler	623	889	42	45
Commercial filler	573	863	37	44
AWS A5.14/A5.14M	-	620	-	-

4. Conclusions

By recycling the scrap mixing chamber of a Siemens V94.2 gas turbine, IN617 welding filler rods are produced in this work. Simple and affordable rolling and cutting techniques are used for producing the filler rods. The results indicate that the properties of the produced filler rods is in accordance to the standard specifications. Moreover, the results show that the properties of the weldments made by produced filler rods are comparable to the properties of the weldments produced by commercial filler rods. The method which is used in this work for recycling the scrap gas turbine mixing chamber can be used for recycling other metallic scrap components as well.

ساخت مفتول جوشکاری پایه نیکل با استفاده از قطعات اسقاطی نیروگاهی

علی شفیعی محمدآبادی^{۱*}، آیدا کریمی خواجه غیائی^۲، سعید خانی مقانکی^۳

۱- استادیار گروه متالورژی، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران، نویسنده مسئول، *alshafiei@nri.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۳- استادیار گروه متالورژی، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران

چکیده:

در این تحقیق چگونگی تولید مفتول جوشکاری IN617 با استفاده از یک قطعه دورریز نیروگاهی به همراه خواص مکانیکی و ریزساختار جوش‌های به دست آمده بررسی شده است. برای تولید مفتول از روش‌های نورد و برش استفاده شده است. نتایج بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که استحکام شکست جوش‌های ساخته شده با مفتول تولیدی (880 MPa) قابل مقایسه با استحکام شکست جوش‌های ساخته شده با استفاده از مفتول تجاری (863 MPa) می‌باشد. همچنین بررسی‌های ریزساختاری نشان می‌دهد که ریزساختار منطقه جوش مشابه با ریزساختار منطقه جوش به دست آمده با استفاده از مفتول‌های تجاری می‌باشد و شامل ذرات $Ti(C,N)$ ، کاربیدهای M_6C (غنی از مولیبدن) و کاربیدهای $M_{23}C_6$ (غنی از کروم) می‌باشد. با توجه به آنکه مفتول‌های IN617 از خارج کشور وارد می‌شوند و در داخل کشور تولید نمی‌شوند، روش معرفی شده در این تحقیق را می‌توان به عنوان یک روش مقرون به صرفه برای تولید داخل این مفتول‌ها در نظر گرفت.

واژه های کلیدی: جوشکاری، جوشکاری با الکتروود تنگستن تحت گاز محافظ، مفتول جوشکاری، سوپرآلیاژ

Production of nickel-based welding filler rods by using a scrap gas turbine component

Ali Shafiei, Aida Karimi, Saeid Khani

Abstract In this work, the producing of IN617 welding rods using a power plant scrap component is explained. The mechanical properties and microstructure of the obtained welds has been investigated. Rolling and cutting methods have been used to produce the welding rods. The results show that the fracture strength of the welds (880 MPa) is comparable to the fracture strength of welds made using commercial welding rods (863 MPa). Also, microstructural studies show that the microstructure of the weld zone is similar to the microstructure of the weld zone obtained using commercial welding rods and includes $Ti(C, N)$ particles, M_6C carbides (rich in molybdenum), and $M_{23}C_6$ carbides (rich in chromium). Given that IN617 welding rods are imported from abroad and are not produced domestically, the method introduced in this research can be considered as a cost-effective method for producing these welding rods domestical.

Keywords: Welding; Gas tungsten arc welding; Welding rods; Superalloy; Inconel 617.

۱- مقدمه

جوشکاری با الکترو د تنگستن تحت گاز محافظ (GTAW) یکی از رایج ترین روش های جوشکاری است که در صنایع مختلفی مانند خودروسازی، هوایی، پتروشیمی و پالایشگاهی کاربرد دارد [۱]. این روش جوشکاری یکی از مرسوم ترین فرایندهای جوشکاری مورد استفاده در ساخت قطعات نیروگاهی نیز می باشد. همچنین این روش به علت سادگی و در عین حال مقرون به صرفه بودن، مرسوم ترین روش در بازسازی قطعات داغ نیروگاهی از جمله پره های توربین گاز می باشد [۲-۳].

مهمترین ماده مصرفی در روش جوشکاری GTAW فیلر یا مفتول جوشکاری می باشد. مفتول جوشکاری معمولاً زمانی استفاده می شود که اندازه درز جوش نسبت به ضخامت محل جوش زیاد باشد. مفتول های مورد استفاده در ساخت و بازسازی قطعات نیروگاهی عمدتاً از جنس سوپرآلیاژهای شکل پذیر مانند IN625 یا IN617 می باشند. محل تأمین این مفتول ها در سال های اخیر همواره از خارج کشور بوده است، اما با توجه به شرایط ویژه امروز کشور از جمله تحریم ها و کمبود ارز و همچنین مشکلات در تهیه این مواد از خارج از کشور، موضوع ساخت داخل این مفتول ها امروز می تواند بسیار با اهمیت باشد. مهمترین مسئله در تولید مفتول های سوپرآلیاژ تأمین مواد اولیه می باشد. با توجه به آنکه مقدار مصرفی این مفتول ها در کشور چندان بالا نمی باشد، صرفه اقتصادی جهت تولید شمش این مواد وجود ندارد. روشی که در این تحقیق برای ساخت این مفتول ها پیشنهاد شده است، استفاده از قطعات اسقاطی و از کار افتاده می باشد. به عنوان مثال می توان به محفظه اختلاط توربین های گازی

V94.2 اشاره نمود. این قطعات از آلیاژ IN617 ساخته می شوند و معمولاً بعد از ۱۰۰۰۰۰ ساعت کارکرد، مطابق دستورالعمل سازنده توربین، اسقاطی در نظر گرفته می شوند. با توجه به ابعاد نسبتاً بزرگ این قطعات این امکان وجود دارد که از این قطعات به عنوان مواد اولیه جهت تولید مفتول سوپرآلیاژ IN617 استفاده گردد.

مفتول های سوپرآلیاژ IN617 یکی از مفتول های مرسوم برای جوشکاری سوپرآلیاژها محسوب می شود [۴-۱۱]. حسینی و همکاران [۴] از سه فلز پرکننده IN617، IN82 و 310 برای اتصال سوپرآلیاژ IN617 به فولاد زنگ نزن 310 استفاده نمودند. نتایج آنها نشان می دهد که علی رغم آنکه هر سه فلز پرکننده می توانند برای ساخت جوش ها مورد استفاده قرار بگیرند، اما جوش های تولید شده با استفاده از فلز پرکننده IN617 خواص مکانیکی بسیار بهتری در مقایسه با دو فلز پرکننده دیگر داشتند [۴]. پلوان و همکاران [۵] از فلز پرکننده IN625 برای اتصال سوپرآلیاژ IN617 به فولاد SUS 304H استفاده نمودند. نتایج آزمون خزش نشان می دهند جوش ها دارای خواص مکانیکی مطلوبی از نظر شکل پذیری و استحکام می باشند و قابلیت استفاده در شرایط کاری بویلرهای فوق سوپرکریستیکال را دارا می باشند [۵]. جعفرزاده و همکاران [۶] از مفتول IN617 برای جوشکاری سوپرآلیاژ IN939 استفاده کرده اند. با توجه به نتایج به دست آمده، از این مفتول ها می توان برای جوشکاری سوپرآلیاژ IN939 استفاده نمود، هر چند مزیت ویژه ای برای مفتول IN617 در مقایسه با سایر مفتول های مورد استفاده در جوشکاری سوپرآلیاژها عنوان نگردید. سیند و همکاران [۸] از سه مفتول IN625، IN617 و Haynes 214 برای

جوشکاری سوپرآلیاژ IN738LC استفاده نمودند. نتایج آنها نشان می‌دهد که جوش‌های ایجاد شده با مفتول IN625 ترک‌های کمتری در مقایسه با دو مفتول دیگر داشتند. این امر به مقدار سختی کمتر حوضچه جوش ایجاد شده با مفتول IN625 نسبت داده شد [۸]. اولاً و همکاران [۹] از مفتول‌های مختلف برای جوشکاری سوپرآلیاژ IN738LC استفاده نمودند. نتایج آنها نشان می‌دهد که به صورت کلی با افزایش رسوبات γ در حوضچه جوش و افزایش سختی حوضچه جوش، امکان تشکیل ترک در منطقه جوش افزایش می‌یابد [۹]. همچنین نتایج آنها نشان می‌دهد که فلز پرکننده IN617 می‌تواند به عنوان یک گزینه مطلوب برای جوشکاری سوپرآلیاژ IN738LC در نظر گرفته شود. ین و همکاران [۷] از مفتول‌های IN617 برای جوشکاری سوپرآلیاژ IN740 H استفاده نموده اند. نتایج نشان می‌دهد جوش‌های بدون عیب را می‌توان با استفاده از مفتول IN617 تولید نمود و تغییرات ریزساختاری جوش‌ها بعد از قرار گرفتن در شرایط کاری (۱۰۰۰ ساعت در دمای 750°C) بسیار ناچیز می‌باشد. با استفاده از نتایج به دست آمده، نتیجه‌گیری گردید که فلز پرکننده IN617 می‌تواند به عنوان گزینه مناسبی برای جوشکاری سوپرآلیاژ IN740 H در نظر گرفته شود [۷].

با توجه به توضیحات بالا مشخص است که مفتول جوشکاری IN617 کاربرد نسبتاً گسترده‌ای در جوشکاری طیف وسیعی از سوپرآلیاژها دارد. در صورتی که بتوان از قطعات دورریز نیروگاهی برای تولید این مفتول جوشکاری

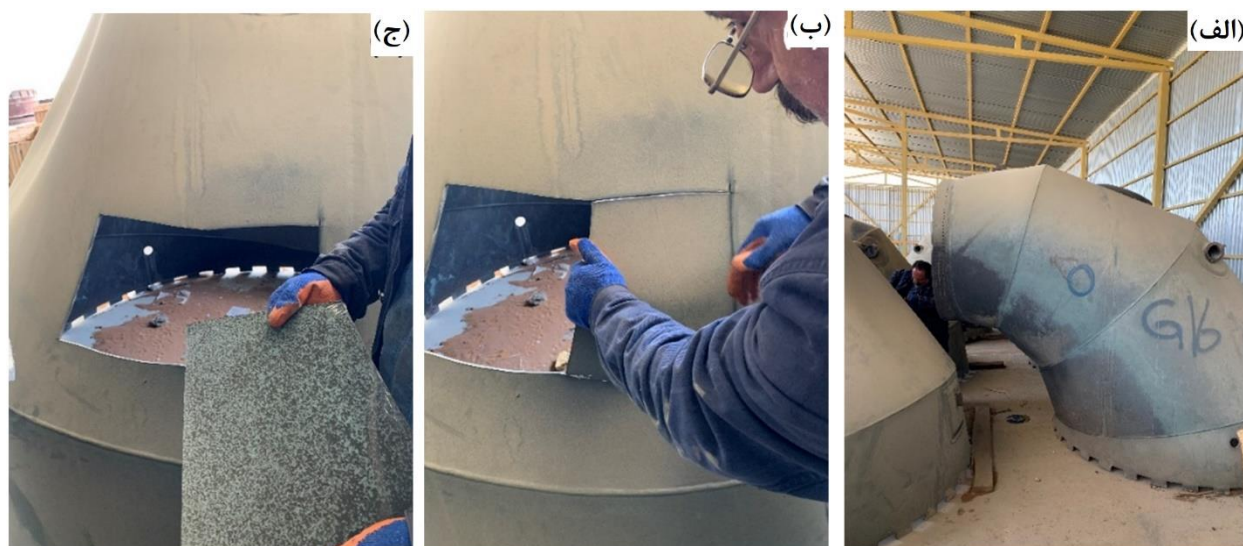
استفاده نمود، در آن صورت علاوه بر امکان بازیابی این قطعات، انتظار می‌رود تا نیاز کشور جهت مفتول‌های IN617 نیز برطرف گردد و این امر می‌توان صرفه اقتصادی قابل توجه‌ای برای کشور داشته باشد. در حال حاضر کاربرد اصلی این مفتول‌ها در صنعت نیروگاهی ایران برای ساخت و تعمیر محفظه احتراق و محفظه داخلی توربین‌های گازی MGT70 شرکت مپنا (معادل با توربین‌های Siemens V94.2) می‌باشد.

بنابراین هدف اصلی این تحقیق به اختصار استفاده از قطعات اسقاطی نیروگاهی جهت ساخت مفتول‌های سوپرآلیاژ پایه نیکل IN617 می‌باشد. روش استفاده شده در این تحقیق می‌تواند برای ساخت سایر مفتول‌های جوشکاری نیز مورد استفاده قرار بگیرد.

۲- آزمایشات تجربی

۲-۱- تهیه مواد اولیه

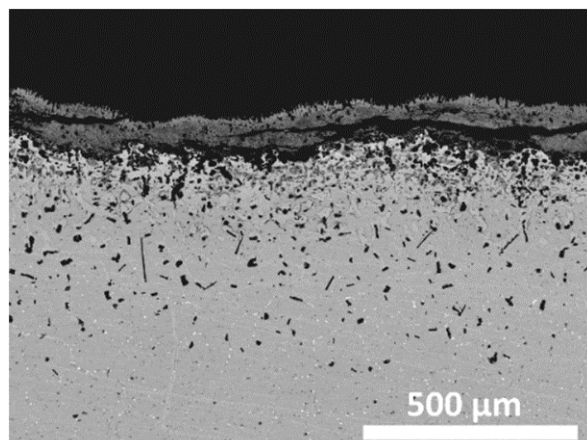
جهت تهیه مواد اولیه از یک محفظه اختلاط کارکرده توربین گازی V94.2 استفاده گردید. ورق به ابعاد تقریبی 300×300 mm از محفظه بریده شد و جهت آزمایشات بعدی مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۱). ضخامت ورق مورد استفاده در حدود ۱۰ mm بود.



شکل ۱- ورق بریده شده از محفظه اختلاط جهت انجام آزمایشات مورد نیاز

۲-۲- بررسی‌های اولیه

در اولین مرحله از بررسی‌ها جهت امکان‌سنجی استفاده از محفظه احتراق اسقاطی جهت تولید مفتول، مقدار و ضخامت لایه اکسیدی بر روی سطح ورق بریده شده مورد بررسی قرار گرفت. تصویر لایه اکسیدی تشکیل شده روی سطح ورق در مجاورت با حرارت در شکل ۲ نشان داده شده است. مطابق با این شکل مشاهده می‌شود که علی‌رغم آنکه عمر کارکرد ورق در حدود ۱۰۰۰۰۰ ساعت بوده است، لایه اکسیدی نسبتاً ضخیمی بر روی سطح آن تشکیل نشده است و ضخامت لایه اکسیدی در محدوده ۱ mm - ۰/۵ قرار دارد. لذا در صورتی که یک میلیمتر از روی سطح ورق سنگ زده شود، انتظار می‌رود که لایه اکسیدی به صورت کامل از روی سطح حذف گردد و بتوان از ورق برای تولید مفتول جوشکاری استفاده نمود.



شکل ۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح مقطع لایه اکسیدی تشکیل شده بر روی ورق بریده شده

در دومین مرحله از بررسی‌های اولیه جهت امکان‌سنجی استفاده از قطعه کارکرده جهت تولید مفتول، ترکیب شیمیایی ورق بریده شده مورد بررسی قرار گرفت تا با ترکیب شیمیایی استاندارد مقایسه گردد. به منظور تعیین ترکیب شیمیایی در ابتدا لایه اکسیدی از روی سطح حذف گردید و سپس روش کوانتومتری جهت اندازه‌گیری ترکیب

شیمیایی مورد استفاده قرار گرفت. آزمون کوانتومتری در آزمایشگاه متالورژی مرکز جهاد دانشگاهی صنعتی شریف انجام گرفت. از سنگ زنی دستی جهت حذف لایه اکسیدی استفاده گردید. عملیات سنگ زنی تا زمانی ادامه یافت که رنگ سیاه ناشی از لایه اکسیدی به صورت کامل حذف گردید و قطعه دارای یک رنگ براق گردید. در حدود mm ۱ از سطوح ورق سنگ زده شد و ضخامت ورق بعد از عملیات سنگ زنی از mm ۱۰ به mm ۸ رسانده شد. نتایج آنالیز شیمیایی بعد از انجام آزمون کوانتومتری در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین آنالیز شیمیایی

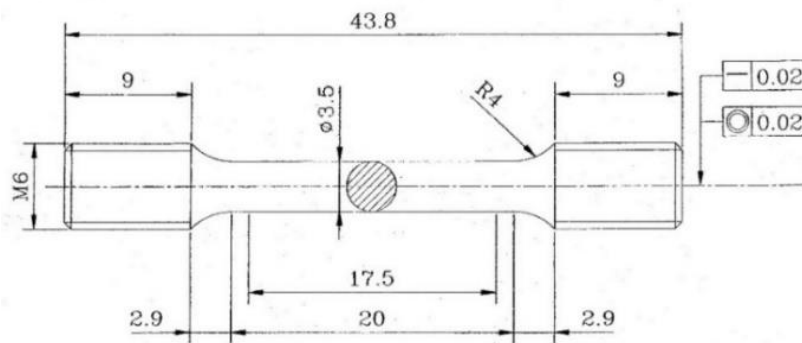
مفتول IN617 مطابق با استاندارد AWS نیز در جدول ۱ آورده شده است. با مقایسه نتایج آنالیز شیمیایی مشخص می شود که ترکیب شیمیایی ورق بریده شده با ترکیب شیمیایی استاندارد مطابقت دارد. لذا از ورق بریده شده می توان جهت تولید مفتول استفاده نمود. فیلر IN617 در استاندارد AWS تحت نام ERNiCrCoMo-1 شناخته می شود [۱۲].

جدول ۱- ترکیب شیمیایی ورق بریده شده و مقایسه با ترکیب شیمیایی مفتول IN617 مطابق با استاندارد AWS [۱۲]

	C	Si	Mn	Cr	Mo	Fe	Al	Co	Cu	Ti	B	S
قطعه کارکرده	0.05	0.08	0.017	21.29	8.63	1.06	1.14	11.84	0.023	0.333	0.0001	0.001
ترکیب شیمیایی مفتول IN617	0.05- 0.15	Max. 1	Max. 1	20-24	8-10	Max. 3	0.8-1.5	10-15	Max. 0.5	Max. 0.6	0.006	Max. 0.015

در سومین مرحله از بررسی های اولیه جهت امکان سنجی استفاده از قطعه کارکرده جهت تولید مفتول، خواص مکانیکی قطعه مورد بررسی قرار گرفت تا قابلیت شکل پذیری آن بررسی گردد. به این منظور یک نمونه آزمون کشش از ورق بریده شده تهیه گردید و آزمون کشش دمای اتاق بر روی آن انجام گرفت. برای ساخت نمونه های کشش، استاندارد ASTM E8 مورد استفاده قرار گرفت و نمونه های دمبلی شکل با ابعاد نمونه استاندارد

M6 از ورق تهیه گردید (شکل ۳) [۱۳]. به همین ترتیب، خواص کششی ورق نو نیز جهت مقایسه مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت تهیه ورق نو و کار نکرده، نمونه های ورق از شرکت مهندسی و ساخت تجهیزات سپاهان مپنا تهیه گردید.



شکل ۳- ابعاد نمونه آزمون کشش تهیه شده از ورق‌های کار کرده و نو

۳-۲- تهیه مفتول جوشکاری

برای تهیه مفتول جوشکاری عملیات نورد و برش مورد استفاده قرار گرفت. در اولین مرحله ابتدا یک نمونه به ابعاد 100×150 mm از ورق کار شده تهیه گردید. سپس لایه اکسیدی تشکیل شده بر روی ورق توسط عملیات سنگ‌زنی دستی حذف گردید. جهت کاهش ضخامت ورق، در ادامه عملیات نورد گرم بر روی ورق انجام گردید. بعد از عملیات نورد، ضخامت ورق به $1/5$ mm کاهش داده شد و ورقی به ابعاد 100×450 mm تولید گردید. تصویر ورق در شکل ۴ نشان داده شده است. بعد از انجام عملیات نورد گرم، عملیات سند بلاست بر روی سطح ورق انجام گرفت تا لایه اکسیدی حذف گردد. سپس ورق به دست آمده در راستای طولی به فاصله‌های $1/5$ mm برش داده شد (توسط گیوتین) و نمونه‌های فیلر با ابعاد $1/5 \times 1/5$ mm با طول 450 mm تولید گردیدند. نمونه‌های فیلر تولید شده در ادامه برای انجام عملیات جوشکاری مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۴- نمونه سنگ‌زده شده و ورق به دست آمده بعد از عملیات نورد گرم و نمونه‌های مفتول برش داده شده از ورق

۴-۲- جوشکاری



نمونه‌های مفتول تولیدی در ادامه برای انجام عملیات جوشکاری مورد استفاده قرار گرفتند. برای انجام عملیات جوشکاری از یک ورق IN617 با ضخامت ۱۰ mm استفاده گردید و سه شیار بر روی ورق ماشینکاری گردید. از سه شیار تهیه شده دو شیار توسط مفتول ساخته شده جوشکاری گردید و یک شیار توسط مفتول استاندارد و تجاری IN617 جوشکاری گردید. جهت ساده‌تر شدن عملیات جوشکاری، عمق شیارها برابر با ۸ mm طراحی گردید در حالی که ضخامت ورق برابر با ۱۰ mm بود. با توجه به ابعاد ورق، ابعاد شیار به ترتیبی طراحی شدند که امکان تهیه نمونه‌های آزمون کشش با قطر ۴ mm از مناطق جوشکاری شده میسر می‌گردد. عملیات جوشکاری GTAW با استفاده از پارامترهای استاندارد و با ولتاژ ۱۰ V و جریان ۶۰ A صورت گرفت. تصاویر نمونه‌های جوشکاری شده در شکل ۵ نشان داده شده است. بعد از تهیه جوش‌ها، سه نمونه جهت انجام آزمون کشش از محل جوش‌ها تهیه گردید. جهت انجام آزمون کشش نمونه‌های کشش با قطر ۴ mm از منطقه جوش استخراج گردید. چگونگی تهیه نمونه‌های کشش از منطقه جوش به صورت شماتیک در شکل ۵ نشان داده شده است.

شکل ۵- تصاویر جوش‌های ایجاد شده بر روی ورق IN617 (دو شیار با مفتول ساخته شده و یک شیار با مفتول تجاری) و چگونگی تهیه نمونه‌های آزمون کشش از محل جوش

۳- نتایج و بحث

همانگونه که اشاره گردید، به منظور امکان‌سنجی استفاده از قطعه کارکرده جهت تولید مفتول جوشکاری، خواص مکانیکی قطعه مورد بررسی قرار گرفت تا قابلیت شکل‌پذیری آن بررسی گردد. نتایج خواص کششی ورق کارکرده در مقایسه با ورق نو در جدول ۲ نشان داده شده

محدوده مناسبی می‌باشد. بنابراین انتظار می‌رود که بتوان عملیات شکل‌دهی را بر روی ورق انجام داد.

است. مقایسه نتایج آزمون کشش ورق کارکرده با ورق کار نکرده نشان می‌دهد که مقدار شکل‌پذیری (درصد تغییر طول) ورق کارکرده در مقایسه با ورق نو کاهش پیدا کرده است. اما همچنان مقدار شکل‌پذیری ورق کارکرده در

جدول ۲- نتایج آزمون کشش دمای محیط بر روی ورق کارکرده و ورق نو

نمونه	تنش تسلیم (MPa)	استحکام شکست (MPa)	ازدیاد طول (%)	کاهش سطح مقطع (%)
ورق کارکرده	۴۱۵	۷۹۶	۳۹	۳۰.۵
ورق نو	۴۳۶	۸۰۱	۵۳.۵	۶۳

غلظت را برای هر عنصر مجاز در نظر می‌گیرد و این امر می‌تواند منجر به اختلاف جزیی در خواص به دست آمده شود. به عنوان مثال برای کربن بازه ۰/۱۵ - ۰/۰۵ wt.% مجاز می‌باشد. لذا بسته به اینکه درصد کربن در مفتول چه مقدار است می‌توان انتظار اختلاف جزئی در خواص مکانیکی را داشت، اما به هر حال مطابق با جدول ۳ مشخص می‌باشد که استحکام شکست جوش‌های به دست آمده با مفتول ساخته شده از حداقل استحکام شکست در نظر گرفته شده در استاندارد (۶۲۰ MPa) [۱۲] بالاتر می‌باشد. استحکام ۶۲۰ MPa مشخص شده در استاندارد یک مقدار نوعی و بعد از جوشکاری و بدون هیچ‌گونه عملیات حرارتی است [۱۲].

نتایج آزمون کشش بر روی نمونه‌های تهیه شده از محل جوش در جدول ۳ نشان داده شده است. مطابق با نتایج آزمون کشش مشخص است که خواص مکانیکی جوش‌های به دست آمده با مفتول‌های ساخته شده کاملاً قابل قیاس با خواص جوش‌های به دست آمده با مفتول‌های تجاری می‌باشد. همچنین با مقایسه خواص با خواص اشاره شده در استاندارد AWS A5.14 کاملاً مشخص است که جوش به دست آمده از مفتول ساخته شده مقادیر اشاره شده در استاندارد را نیز پوشش می‌دهد. لذا می‌توان به این نتیجه رسید که مفتول ساخته شده دارای خواص مطلوب و قابل مقایسه با مفتول تجاری می‌باشد. تفاوت مشاهده شده در خواص مکانیکی جوش‌های مرتبط با مفتول تجاری و مفتول ساخته شده می‌تواند به علت اختلاف جزیی در ترکیب شیمیایی آنها مطابق با جدول ۱ باشد. در حقیقت استاندارد، بازه‌ای از

جدول ۳- خواص کششی نمونه‌های تهیه شده از جوش در مقایسه با خواص اشاره شده در استاندارد

نمونه	تنش تسلیم (MPa)	استحکام شکست (MPa)	ازدیاد طول (%)	کاهش سطح مقطع (%)
جوش با مفتول ساخته شده	۵۹۹	۸۷۸	۳۴	۲۷
جوش مفتول ساخته شده	۶۲۳	۸۸۹	۴۲	۴۵
جوش با مفتول تجاری (استاندارد)	۵۷۳	۸۶۳	۳۷	۴۴
استاندارد AWS A5.14 [۱۲]	–	۶۲۰	–	–

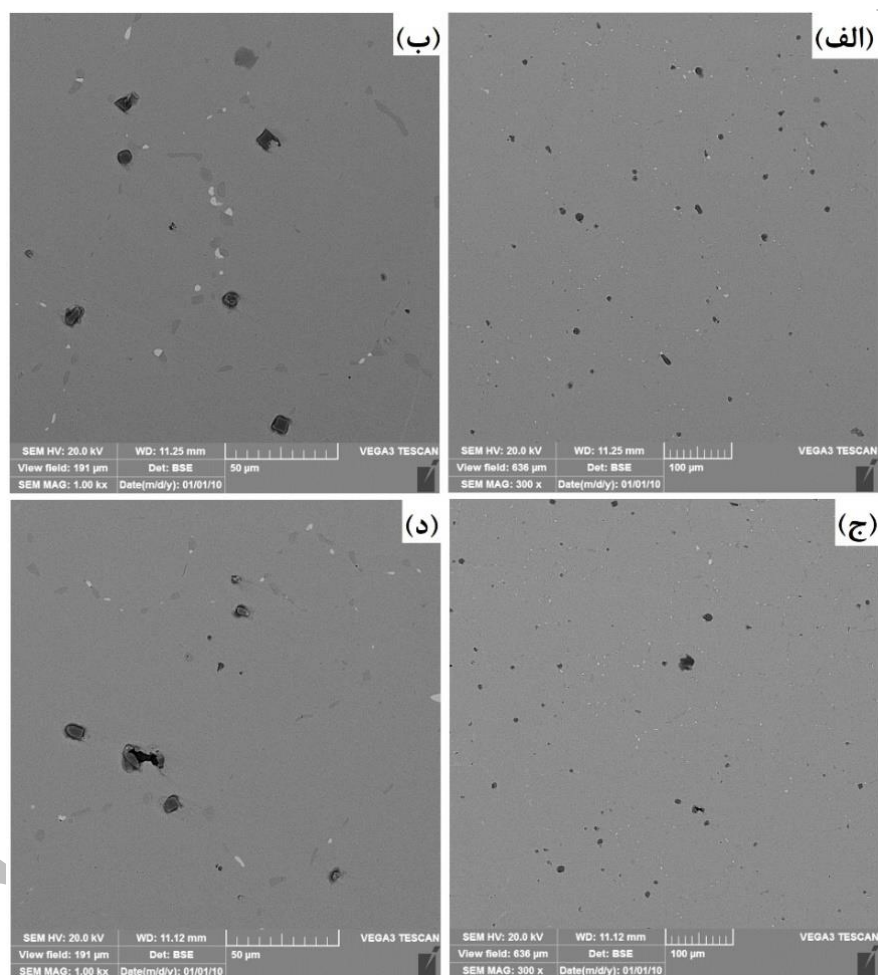
نمی‌باشد. به همین علت استانداردها معمولاً معیاری برای خواص مکانیکی جوش‌ها تعیین نمی‌کنند. خواص مکانیکی جوش‌ها در مرحله طراحی جوش و WPS مرتبط با هر جوش متناسب با کاربرد مورد نظر معین می‌شوند. مطابق با جدول ۱ ترکیب شیمیایی قطعه (یا مفتول‌های تولید شده) مطابق با ترکیب شیمیایی مشخص شده در استاندارد می‌باشد. لذا مفتول‌های تولید شده، معیار ترکیب شیمیایی مطابق با استاندارد AWS A5.14 را دارد می‌باشند و مورد تایید هستند.

بعد از عملیات جوشکاری ریزساختار مناطق جوش نیز مورد بررسی قرار گرفت. تصاویر مربوط به ریزساختار منطقه جوش مربوط به مفتول‌های ساخته شده و مفتول تجاری در شکل ۶ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود ریزساختار منطقه جوش برای هر دو مفتول شامل یه زمینه تک فاز آستنیت با ذرات ریز کاربید می‌باشد. تفاوت قابل توجه‌ای بین ریزساختار منطقه جوش به دست آمده با استفاده از مفتول ساخته شده و مفتول تجاری مشاهده نمی‌شود. هر چند به نظر می‌رسد که تفاوت جزئی در مقدار ذرات سیاه رنگ در منطقه جوش وجود دارد و جوش به دست آمده با استفاده از مفتول تجاری ذرات سیاه

در نهایت باید به این موضوع اشاره نمود که استانداردها معمولاً معیاری برای خواص مفتول‌های جوشکاری ارائه نمی‌دهند. مطابق با استاندارد AWS A5.14 [۱۲] و استاندارد AWS A5.01M [۱۴] آنچه که به عنوان معیار اصلی پذیرش برای مفتول‌های جوشکاری پایه نیکل در نظر گرفته می‌شود، صرفاً ترکیب شیمیایی می‌باشد. دلیل این موضوع این حقیقت می‌باشد که خواص جوش در نهایت علاوه بر خود مفتول به پارامترهای دیگری مانند عیوب جوش، مهارت جوشکار، پارامترهای جوشکاری، کیفیت قطعه و ... بستگی دارد. به عبارت دیگر این امکان وجود دارد که مفتول جوشکاری دارای ترکیب شیمیایی مناسب باشد اما مثلاً به علت آنکه جوشکار از مهارت کافی برخوردار نبوده است، خواص مکانیکی جوش به مقدار مورد نظر نرسد. در این شرایط ضعف خواص مکانیکی جوش به علت مهارت جوشکار می‌باشد و نه مفتول جوشکاری. یا به عنوان مثال دیگر ممکن است که مفتول جوشکاری دارای ترکیب شیمیایی مناسب باشد اما به علت انتخاب پارامترهای نامناسب جوشکاری مانند ولتاژ و یا جریان گاز خواص جوش به مقدار بهینه نرسد. تحت این شرایط نیز خواص مکانیکی نامناسب جوش به علت مفتول جوشکاری

توجه نمود که درصد کربن مفتول ساخته شده علی رغم پایین بودن، همچنان در محدوده مجاز استاندارد (wt.%) (۰/۱۵ - ۰/۰۵) قرار می گیرد.

رنگ بیشتری در مقایسه با جوش به دست آمده با مفتول ساخته شده دارد. این موضوع می تواند به این علت باشد که درصد کربن (۰/۰۵ wt.%) ورق هایی که نمونه های مفتول از آنها تهیه شده بود، نسبتاً پایین بوده است. باید



شکل ۶- (الف) و (ب) ریز ساختار منطقه جوش برای مفتول تجاری، (ج) و (د) و مفتول ساخته شده

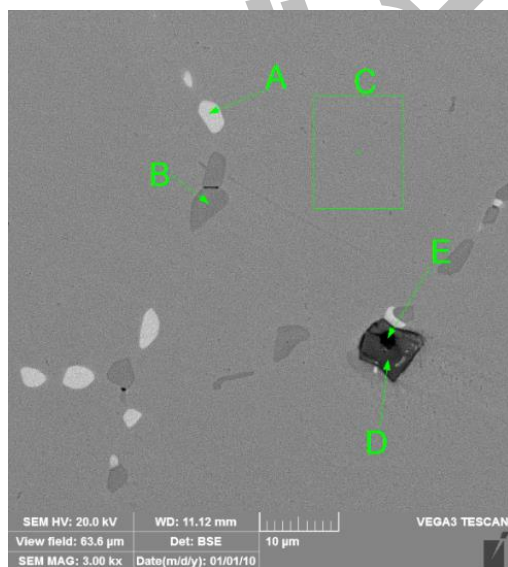
کروم ($M_{23}C_6$) می باشند. این فازها در منطقه جوش به دست آمده با استفاده از هر دو مفتول مشاهده شدند. وجود این ذرات در منطقه جوش، در تحقیقات دیگر نیز گزارش شده است [۱۵-۱۸]، هر چند که مقدار و اندازه این فازها در منطقه جوش به شدت تحت تأثیر روش جوشکاری و

آنالیز شیمیایی ذرات فاز ثانویه دیده شده در منطقه جوش در جدول ۴ نشان داده شده است. با توجه به آنالیز شیمیایی مشاهده می شود که ذرات تیره رنگ فاز نیتريد و کاربید غنی از تیتانیوم ($Ti(C, N)$)، ذرات روشن فاز کاربید غنی از مولیبدن (M_6C) و ذرات خاکستری فاز کاربید غنی از

در منطقه جوش شود [۱۸]. کاربیدهای $M_{23}C_6$ یا کاربیدهای غنی از کروم نیز عمدتاً در طی سیکل حرارتی از کربن باقی مانده در زمینه و یا از تجزیه کاربیدهای MC تشکیل می‌شوند [۱۹]. این کاربیدها تمایل به تشکیل در مرزدانه‌ها دارند و به صورت گلوله‌هایی در مرزدانه‌ها رسوب می‌کنند اما گاهی به شکل ورقه‌ای و صفحه‌ای نیز دیده می‌شوند [۱۹]. تشکیل این کاربیدها در حوضچه جوش می‌تواند در ضمن سرد شدن جوش و یا ناشی از حرارت پاش‌های مختلف جوش باشد [۱۸]. به هر صورت، موضوعی که از نقطه نظر این تحقیق اهمیت دارد این موضوع می‌باشد که ریزساختار منطقه جوش مفتول‌های تولید شده و مفتول‌های تجاری یکسان می‌باشد و این امر با توجه به ترکیب شیمیایی یکسان آنها تا حدودی قابل پیشبینی بود.

پارامترهای جوشکاری می‌باشد [۱۸]. به عنوان مثال، مقدار این رسوبات در جوش‌های ایجاد شده با روش لیزر در مقایسه با روش جوشکاری آرگون بسیار کمتر می‌باشد. این امر به علت حرارت ورودی کمتر در روش جوشکاری لیزر و همچنین سرعت سرد شدن بالاتر در این روش در مقایسه با روش جوشکاری آرگون می‌باشد [۱۸]. رسوبات $Ti(C,N)$ و اصولاً کاربیدهای MC دارای شکل بلوکی می‌باشند و در آخرین مراحل انجماد در داخل دندریت‌ها و در نواحی بین دندریتی حوضچه جوش شکل می‌گیرند [۳، ۱۹-۱۸]. کاربیدهای M_6C یا کاربیدهای غنی از مولیبدن عمدتاً در سوپرآلیاژهای با میزان Mo بالا و در ضمن عملیات حرارتی تشکیل می‌شوند. تشکیل این کاربیدها در حوضچه جوش می‌تواند در ضمن سرد شدن حوضچه جوش باشد [۱۸]. همچنین حرارت ناشی از پاش‌های مختلف جوشکاری می‌تواند منجر به تشکیل این رسوبات

جدول ۴- آنالیز شیمیایی ذرات ثانویه دیده شده در منطقه جوش مفتول ساخته شده



فاز	C	N	Cr	Ti	Co	Ni	Mo
A	9.67	0.74	12.22	0.10	11.97	53.15	20.64
B	8.55	0.74	64.80	0.07	2.10	17.5	4.54
C	3.40	0.00	9.50	0.07	9.57	75.50	1.14
D	7.89	12.42	3.42	57.17	0.94	10.08	3.18
E	11.00	0.00	2.89	48.60	1.41	17.56	2.23

۴- نتیجه گیری

۵- واژه نامه

کاربید: Carbide، سوپراآلیاژ: Superalloy، الکتروود: Electrode، توربین: Turbine، بویلر: Boiler، سوپرکریستیکال: supercritical، اکسید: Oxide، کوانتومتر: Quantometer، استاندارد: Standard، سند بلاست: Sand blast، ولتاژ: Voltage، فاز: Phase، نیتريد: Nitride

۶- منابع

- [1] S. Kou, *Welding Metallurgy*, 2nd ed. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2003.
- [2] M. A. Gonzalez *et al.*, "Effect of preweld heat treatment on the microstructure of heat-affected zone (HAZ) and weldability of Inconel 939 superalloy," *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 23, pp. 1125–1130, 2014.
- [3] J. N. DuPont, J. C. Lippold, and S. D. Kiser, *Welding Metallurgy and Weldability of Nickel-Base Alloys*. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2009.
- [4] H. Shah Hosseini, M. Shamanian, and A. Kermanpur, "Characterization of microstructures and mechanical properties of Inconel 617/310 stainless steel dissimilar welds," *Mater. Charact.*, vol. 62, no. 4, pp. 425–431, 2011.
- [5] A. H. V. Pavan, R. Ravibharath, and K. Singh, "Creep-rupture behavior of SUS 304H-IN 617 dissimilar metal welds for AUSC boiler applications," *Mater. Sci. Forum*, vols. 830–831, pp. 199–202, 2015.

در این تحقیق ساخت مفتول جوشکاری IN617 با استفاده از قطعات اسقاطی نیروگاه مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی این موضوع سه پارامتر لایه اکسیدی بر روی ورق کارکرده، ترکیب شیمیایی ورق کارکرده و خواص مکانیکی ورق کارکرده مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی این سه پارامتر در مرحله اول نتیجه گیری گردید که امکان استفاده از ورق های کارکرده IN617 جهت ساخت مفتول جوشکاری وجود دارد. در مرحله دوم با استفاد از روش نورد و برشکاری ورق کارکرده به مفتول جوشکاری تبدیل گردید و در ادامه مفتول های تولید شده جهت انجام عملیات جوشکاری مورد استفاده قرار گرفت. با بررسی خواص جوش های ساخته شده با استفاده از مفتول تولید شده و مقایسه آن با خواص جوش های ساخته شده با استفاده از مفتول استاندارد مشخص گردید که جوش های به دست آمده با استفاده از مفتول ساخته شده دارای خواص مشابه و بعضاً بهتر از خواص جوش های به دست آمده با مفتول های تجاری می باشد. همچنین مقایسه ریزساختار منطقه جوش نشان می دهد که جوش به دست آمده با استفاده از مفتول ساخته شده دارای ریزساختار کاملاً مشابه با جوش به دست آمده با مفتول تجاری می باشد. لذا در انتها نتیجه گیری گردید که فرایند پیشنهاد شده در این تحقیق جهت ساخت مفتول کاملاً عملی می باشد و با استفاده از مفتول های ساخته شده می توان جوش های با خواص کاملاً استاندارد را تولید نمود.

- [12] American Welding Society, *Specification for Nickel and Nickel-Alloy Bare Welding Electrodes and Rods*, AWS A5.14/A5.14M, Miami, FL, USA, 2009.
- [13] ASTM International, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, ASTM E8, West Conshohocken, PA, USA, 2015.
- [14] American Welding Society, *Procurement Guidelines for Consumables—Welding and Allied Processes*, AWS A5.01/A5.01M, Miami, FL, USA, 2008.
- [15] K. Mageshkumar, P. Kuppan, and N. Arivazhagan, “Investigation on microstructure and mechanical properties of pulsed current gas tungsten arc welded superalloy 617,” *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 263, Art. no. 062032, 2017.
- [16] R. A. Jeshvaghani, M. Jaberzadeh, H. Zohdi, and M. Shamanian, “Microstructural study and wear behavior of ductile iron surface alloyed by Inconel 617,” *Mater. Des.*, vol. 54, pp. 491–497, 2014.
- [17] J. Sun *et al.*, “Study on the weldability, microstructure and mechanical properties of thick Inconel 617 plate using narrow gap laser welding method,” *Mater. Des.*, vol. 175, Art. no. 107823, 2019.
- [18] M. Aqeel, J. P. Gautam, and S. M. Shariff, “Comparative study on autogenous diode laser, CO₂ laser–MIG hybrid and multi-pass TIG welding of 10-mm thick Inconel 617 superalloy,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 856, Art. no. 143967, 2022.
- [6] A. H. Jafarzadeh, M. S. Shahriari, and R. Ashiri, “Effects of GTAW process and post-welding heat treatment on the microstructure evolution, cracking behavior and hardness of Inconel 939 superalloy using Inconel 617 filler metal,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 38, pp. 1782–1791, 2025.
- [7] H. Yin, Y. Gao, and Y. Gu, “Evolution of the microstructure and microhardness of the welding joint of IN 740H alloy with IN 617 as filler metal,” *Mater. Charact.*, vol. 127, pp. 288–295, 2017.
- [8] R. Sidhu, N. Richards, and M. Chaturvedi, “Effect of aluminium concentration in filler alloys on HAZ cracking in TIG welded cast Inconel 738LC superalloy,” *Mater. Sci. Technol.*, vol. 21, no. 10, pp. 1119–1131, 2005.
- [9] O. Ola, O. Ojo, and M. Chaturvedi, “Role of filler alloy composition on laser arc hybrid weldability of nickel-base IN738 superalloy,” *Mater. Sci. Technol.*, vol. 30, no. 12, pp. 1461–1469, 2014.
- [10] K. Banerjee, N. Richards, and M. Chaturvedi, “Effect of filler alloys on heat-affected zone cracking in preweld heat-treated IN-738 LC gas-tungsten-arc welds,” *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 36, no. 7, pp. 1881–1890, 2005.
- [11] R. Sidhu, N. Richards, and M. Chaturvedi, “Effect of filler alloy composition on post-weld heat treatment cracking in GTA welded cast Inconel 738LC superalloy,” *Mater. Sci. Technol.*, vol. 24, no. 5, pp. 529–539, 2008.

[19] S. A. Sajjadi, *Nickel-Based Superalloys*,
1 st ed. Mashhad, Iran: Ferdowsi University
of Mashhad Press, 2013. (In Persian)

نسخه
پیش
انتشار