Journal of Metallurgical and Materials Engineering, 37, 3. 2026. (101-114)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Metallurgical and Materials Engineering

https://jmme.um.ac.ir

Iron&Steel Society of Iran

Production of Nickel-Based Welding Filler Rods by using a Scrap Gas Turbine Component

Research Article

Ali Shafiei [1], Aida Karimi [2], Saeid Khani [3]

10.22067/jmme.2026.94540.1214

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, M6C carbides (rich in molybdenum), and M23C6 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.

1- Introduction

Nickel-based welding filler rods are very common in TIG welding [1-3]. These fillers are mostly used for the welding of nickel- or cobalt-base superalloys [4-6]. 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 [7]. 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

* Manuscript received July 21, 2025, Revised November 23, 2025, Accepted January 22, 2026.

[1] Corresponding Author: Assistant professor. Metallurgy group, Niroo Research Institute, Tehran, Iran. **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.

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 Fig. 1.



Fig 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. Similar results are reported in other works as well [8-10].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.

5- Reference

[1] S. Kou, *Welding Metallurgy*, 2nd ed. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2003. [Online].

[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," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 23, pp. 1125–1130, 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s11665-013-0704-y

[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. [Online].

[4] H. Shah Hosseini, M. Shamanian, and A. Kermanpur, "Characterization of microstructures and mechanical

properties of Inconel 617/310 stainless steel dissimilar welds," *Materials Characterization*, vol. 62, no. 4, pp. 425–431, 2011. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.matchar.2011.02.003

[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," *Materials Science Forum*, vols. 830–831, pp. 199–202, 2015. [Online].Available:https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.830-831.199

[6] 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," *Materials Characterization*, vol. 127, pp. 288–295, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.01.011

[7] American Welding Society, *Specification for Nickel and Nickel-Alloy Bare Welding Electrodes and Rods*, AWS A5.14/A5.14M, Miami, FL, USA, 2009. [Online].

[8] K. Mageshkumar, P. Kuppan, and N. Arivazhagan, "Investigation on microstructure and mechanical properties of pulsed current gas tungsten arc welded superalloy 617," *IOP* Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 263, Art. no. 062032, 2017. [Online].

[1] [9] J. Sun *et al*., "Study on the weldability, microstructure and mechanical properties of thick Inconel 617 plate using narrow gap laser welding method," *Materials & Design*, vol. 175, Art. no. 107823, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107823

[10] 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," *Materials Science and Engineering A*, vol. 856, Art. no. 143967, 2022. [Online].Available:https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143967

مهندسی متالورژی و مواد، ۳۷، ۳، ۱۴۰۵. (۱۱۴-۱۰۱)

مهندسی متالورژی و مواد

https://jmme.um.ac.ir/

انجمن آهن و فولاد ایران

ساخت مفتول جوشکاری پایه نیکل با استفاده از قطعات اسقاطی نیروگاهی*

مقاله پژوهشی

علی شفیعی محمدآبادی[۱] آیدا کریمی خواجه غیاثی[۲] سعید خانی مقانکی[۳]

DOI: 10.22067/jmme.2026.94540.1214

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 انجام‌شده نشان می‌دهد که استحکام شکست جوش‌های ساخته‌شده با مفتول تولیدی (۸۸۰ MPa) قابل مقایسه با استحکام شکست جوش‌های ساخته‌شده با استفاده از مفتول تجاری (۸۶۳ MPa) است. همچنین بررسی‌های ریزساختاری نشان می‌دهد که ریزساختار منطقه جوش مشابه با ریزساختار منطقه جوش به دست آمده با استفاده از مفتول‌های تجاری است و شامل ذرات Ti(C,N)، کاربیدهای M_6C (غنی از مولیبدن) و کاربیدهای $M_{23}C_6$ (غنی از کروم) است. با توجه به آنکه مفتول‌های IN617 از خارج کشور وارد می‌شوند و در داخل کشور تولید نمی‌شوند، روش معرفی‌شده در این تحقیق را می‌توان به عنوان یک روش مقرون به صرفه برای تولید داخل این مفتول‌ها در نظر گرفت.*

واژه‌های کلیدی جوشکاری، جوشکاری با الکترود 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.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۴/۴/۳۰ و تاریخ اصلاح مقاله ۱۴۰۴/۹/۲ تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۱۲/۲ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول، استادیار گروه متالورژی، پژوهشگاه نیرو، تهران.

Email: alshafiei@nri.ac.ir

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران.

(۳) استادیار، گروه متالورژی، پژوهشگاه نیرو، تهران.

مقدمه

جوشکاری با الکترود تنگستن تحت گاز محافظ (GTAW) یکی از رایج‌ترین روش‌های جوشکاری است که در صنایع مختلفی مانند خودروسازی، هوایی، پتروشیمی و پالایشگاهی کاربرد دارد [1]. این روش جوشکاری یکی از مرسوم‌ترین فرایندهای جوشکاری مورد استفاده در ساخت قطعات نیروگاهی نیز می‌باشد. همچنین این روش به علت سادگی و در عین حال مقرون به صرفه بودن، مرسوم‌ترین روش در بازسازی قطعات داغ نیروگاهی از جمله پره‌های توربین گاز است [2,3].

مهم‌ترین ماده مصرفی در روش جوشکاری GTAW فیلر یا مفتول جوشکاری است. مفتول جوشکاری معمولا زمانی استفاده می‌شود که اندازه درز جوش نسبت به ضخامت محل جوش زیاد باشد. مفتول‌های مورد استفاده در ساخت و بازسازی قطعات نیروگاهی عمدتا از جنس سوپرآلیاژهای شکل‌پذیر مانند IN625 یا IN617 می‌باشند. محل تأمین این مفتول‌ها در سال‌های اخیر همواره از خارج کشور بوده است، اما با توجه به شرایط ویژه امروز کشور از جمله تحریم‌ها و کمبود ارز و همچنین مشکلات در تهیه این مواد از خارج از کشور، موضوع ساخت داخل این مفتول‌ها امروز می‌تواند بسیار با اهمیت باشد. مهم‌ترین مسئله در تولید مفتول‌های سوپرآلیاژ تأمین مواد اولیه است. با توجه به آنکه مقدار مصرفی این مفتول‌ها در کشور چندان بالا نیست، صرفه اقتصادی برای تولید شمش این مواد وجود ندارد. روشی که در این تحقیق برای ساخت این مفتول‌ها پیشنهاد شده است، استفاده از قطعات اسقاطی و از کار افتاده است. به عنوان مثال می‌توان به محفظه اختلاط توربین‌های گازی V94.2 اشاره کرد. این قطعات از آلیاژ IN617 ساخته می‌شوند و معمولا بعد از ۱۰۰۰۰۰ ساعت کارکرد، مطابق دستورالعمل سازنده توربین، اسقاطی در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به ابعاد نسبتا بزرگ این قطعات این امکان وجود دارد که از این قطعات به عنوان مواد اولیه fvhd تولید مفتول سوپرآلیاژ IN617 استفاده گردد.

مفتول‌های سوپرآلیاژ IN617 یکی از مفتول‌های مرسوم برای جوشکاری سوپرآلیاژها محسوب می‌شود [4-11]. حسینی و همکاران [4] از سه فلز پرکننده IN617، IN82 و 310 برای اتصال سوپرآلیاژ IN617 به فولاد زنگ‌نزن 310 استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که علی‌رغم آنکه هر سه فلز پرکننده می‌توانند برای ساخت جوش‌ها مورد استفاده قرار بگیرند، اما جوش‌های تولیدشده با استفاده از فلز پرکننده IN617 خواص مکانیکی بسیار بهتری در مقایسه با دو فلز پرکننده دیگر داشتند [4]. پاوان و همکاران [5] از فلز پرکننده IN625 برای اتصال سوپرآلیاژ IN617 به فولاد SUS 304H استفاده کردند. نتایج آزمون خزش نشان می‌دهند جوش‌ها دارای خواص مکانیکی مطلوبی از نظر شکل‌پذیری و استحکام هستند و قابلیت استفاده در شرایط کاری بویلرهای فوق سوپرکریتیکال را دارند [5]. جعفرزاده و همکاران [6] از مفتول IN617 برای جوشکاری سوپرآلیاژ IN939 استفاده کرده‌اند. با توجه به نتایج به دست آمده، از این مفتول‌ها می‌توان برای جوشکاری سوپرآلیاژ IN939 استفاده کرد، هر چند مزیت ویژه‌ای برای مفتول IN617 در مقایسه با سایر مفتول‌های مورد استفاده در جوشکاری سوپرآلیاژها عنوان نگردید. سیند و همکاران [8] از سه مفتول IN625، IN617 و Haynes 214 برای جوشکاری سوپرآلیاژ IN738LC استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که جوش‌های ایجادشده با مفتول IN625 ترک‌های کمتری در مقایسه با دو مفتول دیگر داشتند. این امر به مقدار سختی کمتر حوضچه جوش ایجادشده با مفتول IN625 نسبت داده شد [8]. اولا و همکاران [9] از مفتول‌های مختلف برای جوشکاری سوپرآلیاژ IN738LC استفاده کردند. 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 [9]. 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 [7] از مفتول‌های IN617 برای جوشکاری سوپرآلیاژ IN740 H استفاده کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد جوش‌های بدون عیب را می‌توان با استفاده از مفتول IN617 تولید کرد و تغییرات ریزساختاری جوش‌ها بعد از قرار گرفتن در شرایط کاری (۱۰۰۰۰۰ ساعت در دمای ۷۵۰ oC) بسیار ناچیز است. 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 [7].

با توجه به توضیحات بالا مشخص است که مفتول جوشکاری IN617 کاربرد نسبتا گسترده‌ای در جوشکاری طیف وسیعی از سوپرآلیاژها دارد. در صورتی که بتوان از قطعات دورریز نیروگاهی برای تولید این مفتول جوشکاری استفاده کرد، در آن صورت علاوه بر امکان بازیابی این قطعات، انتظار می‌رود تا نیاز کشور برای مفتول‌های IN617 نیز برطرف گردد و این امر می‌توان صرفه اقتصادی قابل توجهی 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) است.

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

آزمایش‌های تجربی

تهیه مواد اولیه

به منظور تهیه مواد اولیه از یک محفظه اختلاط کارکرده توربین گازی V94.2 استفاده گردید. ورقی به ابعاد تقریبی mm ۳۰۰×۳۰۰ از محفظه بریده شد و برای آزمایش‌های بعدی مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۱). ضخامت ورق مورد استفاده در حدود mm ۱۰ بود.



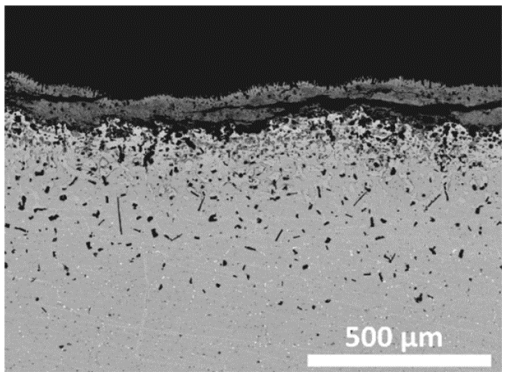




شکل ۱ ورق بریده‌شده از محفظه اختلاط برای انجام آزمایش‌های مورد نیاز

بررسی‌های اولیه

در اولین مرحله از بررسی‌ها به منظور امکان‌سنجی استفاده از محفظه احتراق اسقاطی برای تولید مفتول، مقدار و ضخامت لایه اکسیدی بر روی سطح ورق بریده‌شده مورد بررسی قرار گرفت. تصویر لایه اکسیدی تشکیل‌شده روی سطح ورق در مجاورت با حرارت در شکل (۲) نشان داده شده است. مطابق با این شکل مشاهده می‌شود که علی رغم آنکه عمر کارکرد ورق در حدود ۱۰۰۰۰۰ ساعت بوده است، لایه اکسیدی نسبتا ضخیمی بر روی سطح آن تشکیل نشده است و ضخامت لایه اکسیدی در محدوده mm ۱ - 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 کرد.



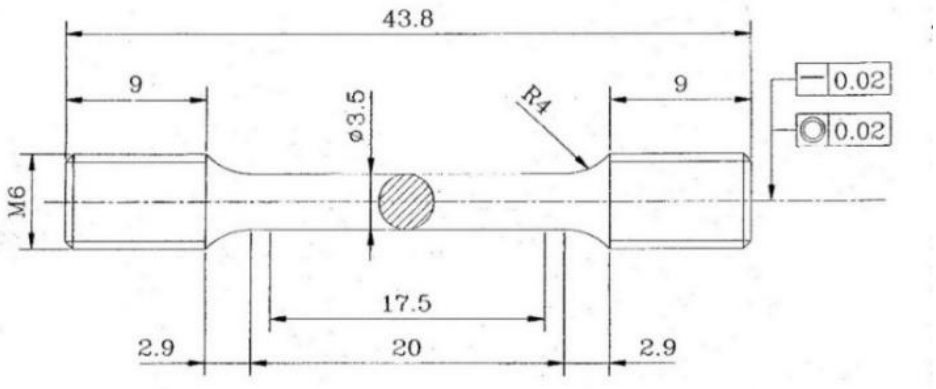
شکل ۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح مقطع لایه اکسیدی تشکیل‌شده بر روی ورق بریده‌شده

در دومین مرحله از بررسی‌های اولیه برای امکان‌سنجی استفاده از قطعه کارکرده برای تولید مفتول، ترکیب شیمیایی ورق بریده‌شده 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 برای اندازه‌گیری ترکیب شیمیایی مورد استفاده قرار گرفت. آزمون کوانتومتری در آزمایشگاه متالورژی مرکز جهاد دانشگاهی صنعتی شریف انجام گرفت. از سنگ‌زنی دستی برای حذف لایه اکسیدی استفاده گردید. عملیات سنگ‌زنی 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 ۱ mm از سطوح ورق سنگ زده شد و ضخامت ورق بعد از عملیات سنگ‌زنی از ۱۰ mm به ۸ mm 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 می‌شود که ترکیب شیمیایی ورق بریده‌شده با ترکیب شیمیایی استاندارد مطابقت دارد. لذا از ورق بریده‌شده می‌توان برای تولید مفتول استفاده کرد. فیلر IN617 در استاندارد AWS تحت نام ERNiCrCoMo-1 شناخته می‌شود [12].

در سومین مرحله از بررسی‌های اولیه برای امکان‌سنجی استفاده از قطعه کارکرده برای تولید مفتول، خواص مکانیکی قطعه مورد بررسی قرار گرفت تا قابلیت شکل‌پذیری آن بررسی گردد. به این منظور یک نمونه آزمون کشش از ورق بریده‌شده تهیه گردید و آزمون کشش دمای اتاق بر روی آن انجام گرفت. برای ساخت نمونه‌های کشش، استاندارد ASTM E8 مورد استفاده قرار گرفت و نمونه‌های دمبلی‌شکل با ابعاد نمونه استاندارد M6 از ورق تهیه گردید (شکل ۳) [13]. به همین ترتیب، خواص کششی ورق نو نیز برای مقایسه مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور تهیه ورق نو و کارنکرده، نمونه‌های ورق از شرکت مهندسی و ساخت تجهیزات سپاهان مپنا تهیه گردید.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی ورق بریده‌شده و مقایسه با ترکیب شیمیایی مفتول IN617 مطابق با استاندارد AWS [12]

	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



شکل ۳ ابعاد نمونه آزمون کشش تهیه‌شده از ورق‌های کارکرده و نو

تهیه مفتول جوشکاری

برای تهیه مفتول جوشکاری عملیات نورد و برش مورد استفاده قرار گرفت. در اولین مرحله ابتدا یک نمونه به ابعاد mm ۱۵۰×۱۰۰ از ورق کارشده تهیه گردید. سپس لایه اکسیدی تشکیل‌شده بر روی ورق توسط عملیات سنگ‌زنی دستی حذف گردید. برای کاهش ضخامت ورق، در ادامه عملیات نورد گرم بر روی ورق انجام گردید. بعد از عملیات نورد، ضخامت ورق به ۱/۵ mm کاهش داده شد و ورقی به ابعاد mm ۴۵۰×۱۰۰ 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 ۱/۵ mm برش داده شد (توسط گیوتین) و نمونه‌های فیلر با ابعاد mm ۱/۵×۱/۵ با طول ۴۵۰ mm تولید گردیدند. نمونه‌های فیلر تولیدشده 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 داده‌شده از ورق

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 تهیه‌شده دو شیار توسط مفتول ساخته‌شده جوشکاری گردید و یک شیار توسط مفتول استاندارد و تجاری IN617 جوشکاری گردید. برای 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 جوشکاری‌شده میسر می‌گردید. عملیات جوشکاری GTAW با استفاده از پارامترهای استاندارد و با ولتاژ ۱۰ V و جریان ۶۰ A صورت گرفت. تصاویر نمونه‌های جوشکاری‌شده در شکل (۵) نشان داده شده است. بعد از تهیه جوش‌ها، سه نمونه برای انجام آزمون کشش از محل جوش‌ها تهیه گردید. برای 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 ایجادشده بر روی ورق IN617 (دو شیار با مفتول ساخته‌شده و یک شیار با مفتول تجاری) و چگونگی تهیه نمونه‌های آزمون کشش از محل جوش

نتایج و بحث

همان گونه که اشاره گردید، به منظور امکان‌سنجی استفاده از قطعه کارکرده برای 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 است. مقایسه نتایج آزمون کشش ورق کارکرده با ورق کارنکرده 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 محدوده مناسبی است. بنابراین انتظار می‌رود که بتوان عملیات شکل‌دهی را بر روی ورق انجام داد.

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

نتایج آزمون کشش بر روی نمونه‌های تهیه‌شده 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 ساخته‌شده کاملا قابل قیاس با خواص جوش‌های به دست آمده با مفتول‌های تجاری است. همچنین با مقایسه خواص با خواص اشاره‌شده در استاندارد AWS A5.14 کاملا مشخص است که جوش به دست آمده از مفتول ساخته‌شده مقادیر اشاره‌شده در استاندارد را نیز پوشش می‌دهد. لذا می‌توان به این نتیجه رسید که مفتول ساخته‌شده دارای خواص مطلوب و قابل مقایسه با مفتول تجاری می‌باشد. تفاوت مشاهده‌شده در خواص مکانیکی جوش‌های مرتبط با مفتول تجاری و مفتول ساخته‌شده می‌تواند به علت اختلاف جزیی در ترکیب شیمیایی آن‌ها مطابق با جدول (۱) باشد. در حقیقت استاندارد، بازه‌ای از 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 wt.% – ۰/۰۵ مجاز است. 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 است که استحکام شکست جوش‌های به دست آمده با مفتول ساخته‌شده از حداقل استحکام شکست در نظر گرفته‌شده در استاندارد (۶۲۰ MPa) [12] بالاتر است. استحکام ۶۲۰ MPa مشخص‌شده در استاندارد یک مقدار نوعی و بعد از جوشکاری و بدون هیچ گونه عملیات حرارتی است [12].

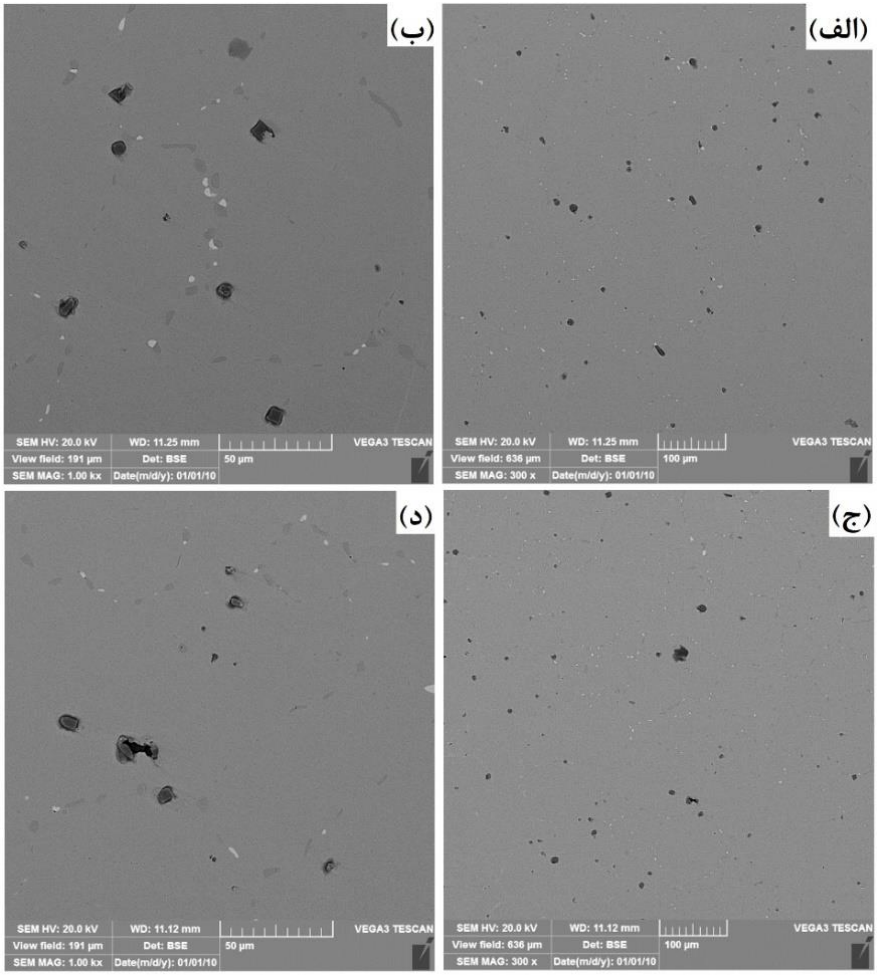
در نهایت باید به این موضوع اشاره کرد که استانداردها معمولا معیاری برای خواص مفتول‌های جوشکاری ارائه نمی‌دهند. مطابق با استاندارد AWS A5.14 [12] و استاندارد AWS A5.01M [14] آنچه که به عنوان معیار اصلی پذیرش برای مفتول‌های جوشکاری پایه نیکل در نظر گرفته می‌شود، صرفا ترکیب شیمیایی است. دلیل این موضوع این حقیقت است 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 مثلا 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 است 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 نیست. به همین علت استانداردها معمولا 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 تولیدشده) مطابق با ترکیب شیمیایی مشخص‌شده در استاندارد است. لذا مفتول‌های تولیدشده، معیار ترکیب شیمیایی مطابق با استاندارد AWS A5.14 را دارند و مورد تأیید هستند.

بعد از عملیات جوشکاری ریزساختار مناطق جوش نیز مورد بررسی قرار گرفت. تصاویر مربوط به ریزساختار منطقه جوش مربوط به مفتول‌های ساخته‌شده و مفتول تجاری در شکل (۶)

نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود ریزساختار منطقه جوش برای هر دو مفتول شامل یه زمینه تک‌فاز آستنیت با ذرات ریز کاربید است. تفاوت قابل توجهی بین ریزساختار منطقه جوش به دست آمده با استفاده از مفتول ساخته‌شده و مفتول تجاری مشاهده نمی‌شود. هر چند به نظر می‌رسد که تفاوت جزئی در مقدار ذرات سیاه‌رنگ در منطقه جوش وجود دارد و جوش به دست آمده با استفاده از مفتول تجاری ذرات سیاه‌رنگ بیشتری در مقایسه با جوش به دست آمده با مفتول ساخته‌شده دارد. این موضوع می‌تواند به این علت باشد که درصد کربن (۰/۰۵ wt.%) ورق‌هایی که نمونه‌های مفتول از آن‌ها تهیه شده بود، نسبتا پایین بوده است. باید توجه کرد که درصد کربن مفتول ساخته‌شده علی‌رغم پایین بودن، همچنان در محدوده مجاز استاندارد (۰/۱۵ wt.% - ۰/۰۵) قرار می‌گیرد.

جدول ۳ خواص کششی نمونه‌های تهیه‌شده از جوش در مقایسه با خواص اشاره‌شده در استاندارد

نمونه	تنش تسلیم (MPa)	استحکام شکست (MPa)	ازدیاد طول (٪)	کاهش سطح مقطع (٪)
جوش با مفتول ساخته‌شده	۵۹۹	۸۷۸	۳۴	۲۷
جوش مفتول ساخته‌شده	۶۲۳	۸۸۹	۴۲	۴۵
جوش با مفتول تجاری (استاندارد)	۵۷۳	۸۶۳	۳۷	۴۴
استاندارد AWS A5.14 [12]	–	۶۲۰	–	–

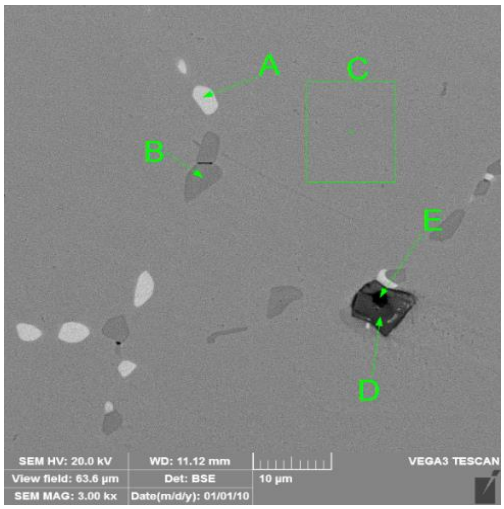


شکل ۶ (الف) و (ب) ریزساختار منطقه جوش برای مفتول تجاری و (ج) و (د) مفتول ساخته‌شده

آنالیز شیمیایی ذرات فاز ثانویه دیده‌شده در منطقه جوش در جدول (۴) نشان داده شده است. با توجه به آنالیز شیمیایی مشاهده می‌شود که ذرات تیره‌رنگ فاز نیترید و کاربید غنی از تیتانیوم (Ti(C, N))، ذرات روشن فاز کاربید غنی از مولیبدن (M_6C) و ذرات خاکستری فاز کاربید غنی از کروم ($M_{23}C_6$) هستند. 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 [15-18]، هر چند که مقدار و اندازه این فازها در منطقه جوش به شدت تحت تأثیر روش جوشکاری و پارامترهای جوشکاری است [18]. به عنوان مثال، مقدار این رسوبات در جوش‌های ایجادشده با روش لیزر در مقایسه با روش جوشکاری آرگون بسیار کمتر است. 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 است [18]. رسوبات Ti(C,N) و اصولا کاربیدهای MC دارای شکل بلوکی هستند و در آخرین مراحل انجماد در داخل دندریت‌ها و در نواحی بین دندریتی حوضچه جوش شکل می‌گیرند [3,18,19]. کاربیدهای M6C یا کاربیدهای غنی از مولیبدن عمدتا 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 [18]. همچنین حرارت ناشی از پاس‌های مختلف جوشکاری می‌تواند منجر به تشکیل این رسوبات در منطقه جوش شود [18]. کاربیدهای M23C6 یا کاربیدهای غنی از کروم نیز عمدتا در طی سیکل حرارتی از کربن باقی‌مانده در زمینه و یا از تجزیه کاربیدهای MC تشکیل می‌شوند [19]. 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 [19]. تشکیل این کاربیدها در حوضچه جوش می‌تواند در ضمن سرد شدن جوش و یا ناشی از حرارت پاس‌های مختلف جوش باشد [18]. به هر صورت، موضوعی که از نقطه نظر این تحقیق اهمیت دارد این موضوع است که ریزساختار منطقه جوش مفتول‌های تولیدشده و مفتول‌های تجاری یکسان است و این امر با توجه به ترکیب شیمیایی یکسان آن‌ها تا حدودی قابل پیش‌بینی بود.

جدول ۴ آنالیز شیمیایی ذرات ثانویه دیده‌شده در منطقه جوش مفتول ساخته‌شده

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



نتیجه‌گیری

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 نتیجه‌گیری گردید که امکان استفاده از ورق‌های کارکرده IN617 برای 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 مفتول‌های تولیدشده برای انجام عملیات جوشکاری مورد استفاده قرار گرفت. با بررسی خواص جوش‌های ساخته‌شده با استفاده از مفتول تولیدشده و مقایسه آن با خواص جوش‌های ساخته‌شده با استفاده از مفتول استاندارد مشخص گردید که جوش‌های به دست آمده با استفاده از مفتول ساخته‌شده دارای خواص مشابه و بعضا بهتر از خواص جوش‌های به دست آمده با مفتول‌های تجاری است. همچنین مقایسه ریزساختار منطقه جوش نشان می‌دهد که جوش به دست آمده با استفاده از مفتول ساخته‌شده دارای ریزساختار کاملا مشابه با جوش به دست آمده با مفتول تجاری است. لذا در انتها نتیجه‌گیری گردید که فرایند پیشنهادشده در این تحقیق برای ساخت مفتول کاملا عملی است و با استفاده از مفتول‌های ساخته‌شده می‌توان جوش‌هایی با خواص کاملا استاندارد را تولید کرد.

واژه‌نامه

Carbide	کاربید
Superalloy	سوپرآلیاژ
Electrode	الکترود
Turbine	توربین
Boiler	بویلر
Supercritical	سوپرکریتیکال
Oxide	اکسید
Quantometer	کوانتومتر
Standard	استاندارد
Sand blast	سند بلاست
Voltage	ولتاژ
Phase	فاز
Nitride	نیترید

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] S. Kou, *Welding Metallurgy*, 2nd ed. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2003. [Online].

[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," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 23, pp. 1125–1130, 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s11665-013-0704-y

[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. [Online].

[4] H. Shah Hosseini, M. Shamanian, and A. Kermanpur, "Characterization of microstructures and mechanical properties of Inconel 617/310 stainless steel dissimilar welds," *Materials Characterization*, vol. 62, no. 4, pp. 425–431, 2011. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.matchar.2011.02.003

[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," *Materials Science Forum*, vols. 830–831, pp. 199–202, 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.830-831.199

[6] 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,"

Journal of Materials Research and Technology, vol. 38, pp. 1782–1791, 2025. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.08.040

[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," *Materials Characterization*, vol. 127, pp. 288–295, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.01.011

[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," *Materials Science and Technology*, vol. 21, no. 10, pp. 1119–1131, 2005. [Online]. Available: https://doi.org/10.1179/174328405X62279

[9] O. Ola, O. Ojo, and M. Chaturvedi, "Role of filler alloy composition on laser arc hybrid weldability of nickel-base IN738 superalloy," *Materials Science and Technology*, vol. 30, no. 12, pp. 1461–1469, 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.1179/1743284713Y.0000000436

[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," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 36, no. 7, pp. 1881–1890, 2005. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s11661-005-0051-1

[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," *Materials Science and Technology*, vol. 24, no. 5, pp. 529–539, 2008. [Online]. Available: https://doi.org/10.1179/026708307X232875

[12] American Welding Society, *Specification for Nickel and Nickel-Alloy Bare Welding Electrodes and Rods*, AWS A5.14/A5.14M, Miami, FL, USA, 2009. [Online].

[13] ASTM International, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, ASTM E8, West Conshohocken, PA, USA, 2015. [Online]. Available: https://faculty.up.edu/lulay/egr270/E8-tensiletest.pdf

[14] American Welding Society, *Procurement Guidelines for Consumables—Welding and Allied Processes*, AWS A5.01/A5.01M, Miami, FL, USA, 2008. [Online].

[15] K. Mageshkumar, P. Kuppan, and N. Arivazhagan, "Investigation on microstructure and mechanical properties of pulsed current gas tungsten arc welded superalloy 617," *IOP* Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 263, Art. no. 062032, 2017. [Online].

[16] R. A. Jeshvaghani, M. Jaberzadeh, H. Zohdi, and M. Shamanian, "Microstructural study and wear behavior of ductile iron surface alloyed by Inconel 617," *Materials & Design*, vol. 54, pp. 491–497, 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.08.059

[17] J. Sun *et al*., "Study on the weldability, microstructure and mechanical properties of thick Inconel 617 plate using narrow gap laser welding method," *Materials & Design*, vol. 175, Art. no. 107823, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107823

[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," *Materials Science and Engineering A*, vol. 856, Art. no. 143967, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143967

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