



بررسی تجربی اثر انرژی ورودی بر استحکام اتصال جوشی غیر همجنس اینکول 713LC و فولاد ۴۱۴۰ به روش جوشکاری پرتو الکترونی

حمیدرضا بانویی^۱، محمدرضا فراهانی^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکدگان فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکدگان فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران

* تهران، صندوق پستی ۱۴۳۹۹۵۷۱۳۱، mrfarahani@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: ۳۰ آذر ۱۴۰۱
داوری اولیه: ۱۰ بهمن ۱۴۰۱
پذیرش: ۱۹ فروردین ۱۴۰۲

کلیدواژگان:

جوشکاری پرتو الکترونی
نیروی کششی
جوش غیرهمجنس
فولاد Inc-713LC
فولاد 4140

چکیده

موتورهای توربینی عمده دارای اتصال جوشی غیر همجنس به روش‌های گوناگون جوشکاری ذوبی هستند. در این تحقیق انرژی ورودی به‌عنوان پارامتر اصلی با تغییر در ولتاژ و جریان پرتو با ثابت گرفتن سرعت جوشکاری ۶mm/s و شعاع پرتو الکترونی یک میلی‌متری بروی فرایند جوشکاری پرتو الکترونی مورد بررسی قرار گرفتند. کیفیت اتصال نمونه‌ها پس از جوشکاری، با سه مشخصه تست کشش و هندسه جوش (عمق نفوذ) همراه با بررسی سطح شکست تعیین گردید. مشاهده گردید که با افزایش انرژی ورودی عمق نفوذ و نیروی کششی اتصال افزایش می‌یابد. در تست کشش نمونه‌ها نیروی کششی سه نمونه، بیش از ۸۰ درصد فلز پایه را نشان دادند. همچنین نشان داده شد که شکست در تمامی نمونه‌ها از ناحیه فصل مشترک فولاد ۴۱۴۰ با منطقه جوش رخ داده است؛ به‌طوری‌که با افزایش انرژی ورودی منطقه متأثر از حرارت در فصل مشترک فولاد ۴۱۴۰ افزایش می‌یابد. در مقایسه دو نمونه با ولتاژ یکسان و آمپر متفاوت و همچنین آمپر یکسان و ولتاژ متفاوت نشان داده شد که اثر آمپر بر استحکام جوش به‌مراتب بیشتر از ولتاژ است. در بررسی سطوح شکست نیز مشاهده گردید که در مقادیر انرژی بالاتر از ۲۳۰ J/mm انعطاف‌پذیری جوش کاهش می‌یابد؛ علت آن درجه حرارت بالا بر اثر افزایش انرژی ورودی و نرخ سرد شدن سریع منطقه جوش است. با توجه به نتایج این تحقیق شرایط بهینه استحکام و عمق نفوذ جوش مناسب در نمونه V40140 با انرژی جوش ۲۶۷ J/mm مشاهده گردید.

Experimental investigating the effect of heat input on the strength of dissimilar welded joints of IN 713LC and AISI 4140 by electron beam welding method

Hamidreza Banooei, Mohammadreza Farahani*

School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

* P.O.B. 1439957131 Tehran, Iran, mrfarahani@ut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 21 December 2022
First Decision: 30 January 2023
Accepted: 08 April 2023

Keywords:

Electron beam welding EBW
Tensile load
Inconel-713LC
AISI-4140

Abstract

Turbine engines mainly have non-homogeneous welded joints with various fusion-welding methods. In this research, the input energy was investigated as the main parameter with different in the voltage and beam current with welding speed of 6mm/s and focal radius of 1mm of the electron beam welding process. The connection quality of the samples after welding was determined with three characteristics of tension test and welding geometry along with examination of the fracture surface. It was observed that with the increase of input energy, the depth of penetration and the tensile strength of the connection increased. In this tensile test, three samples showed a tensile load of more than 80% of the base metal. It was also shown that failure in all the samples occurred from the interface area of 4140 steel with the fusion zone. With the increase of input energy, the heat affected zone increases. Comparing two samples with the same voltage and different beam current, and two samples with the same beam current and different voltage, shown that the influence of the beam current on the joint strength is significantly higher than the effects of beam voltage. Fractography shown that for the beam energy higher than 230 J / mm, the weld flexibility decreases. It can be explained by the high temperature and fast cooling rate in fusion zone for this sample. It was also shown that the acceptable tensile strength and suitable depth of penetration obtained in V40140 sample with the beam energy of 267 J / mm.

Please cite this article using:

H. R. Banooei, M. R. Farahani, Experimental investigating the effect of heat input on the strength of dissimilar welded joints of IN 713LC and AISI 4140 by electron beam welding method, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 9, pp. 45-54, 2022 (in Persian). <https://www.doi.org/10.22034/ijme.2023.377707.1730>

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

فرایند جوشکاری پرتو الکترونی^۱ یک فرایند اتصال ذوبی است که در آن پیوند بین مواد در اثر حرارت ناشی از بمباران جریان متراکمی از الکترون‌های پرانرژی با سرعت بالا به منطقه اتصال، حاصل می‌گردد [۱]. در این روش کل سیستم تولید پرتو به‌عنوان تفنگ پرتو الکترونی یا ستون پرتو الکترون نامیده می‌شود. حداکثر ولتاژهای شتاب‌دهنده پرتو و جریان‌هایی که به‌طور معمول در تفنگ پرتو الکترونی به کار می‌رود به ترتیب در محدوده 25-200 KV و 50-250 mA تغییر می‌کند و پرتوهای الکترونی که توسط این دستگاه‌ها تولید می‌شوند، می‌توانند در محدوده قطرهای ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ میلی‌متر متمرکز و با سرعتی در حدود ۳۰-۷۰٪ سرعت نور به قطعه کار برخورد کنند [۲].

در جوشکاری پرتو الکترونی، پارامترهای اصلی جوش عبارت‌اند از ولتاژ پرتو، جریان پرتو و سرعت جوشکاری. متغیرهای ثانویه نیز عبارت‌اند از سطح خلأ، فاصله تفنگ تا کار و نوسان موقعیت پرتو. متغیرهایی که معمولاً ثابت نگهداری می‌شوند عبارت‌اند از ترکیب مواد شیمیایی، روش تمیز کردن، شرایط سطح، اتصال مناسب، هم‌ترازی پرتو و اتصال و قیدوبند مناسب. مشابه تمام فرایندهای جوشکاری، تغییرات کوچک در هر یک از این پارامترها ممکن است تغییرات بزرگی در جوش ایجاد کند؛ بنابراین، کنترل دقیق برای اطمینان از عملکرد دقیق فرایند برای این پارامترها ضروری است [۳].

انرژی ورودی^۲ در روش پرتو الکترونی توسط چهار متغیر اساسی کنترل می‌شود: ولتاژ شتاب‌دهنده پرتو (سرعت الکترون‌ها)، جریان پرتو (تعداد الکترون‌هایی که در ثانیه قطعه را بمباران می‌کنند) اندازه نقطه پرتو (قطر باریکه) و سرعت حرکتی که قطعه کار یا پرتو الکترونی دارد (سرعت جوشکاری) [۴].

جوشکاری پرتوی الکترونی سال‌هاست که توسعه یافته است و به‌طور فزاینده‌ای در صنایع کاربردی مختلفی اجرا می‌شود. اتصال فلزات غیرهم‌جنس با استفاده از روش فوق نیز در سال‌های اخیر مورد توجه بوده است [۵، ۶]. با توجه به ویژگی‌های خاص این روش نظیر چگالی انرژی بالا، انجام عملیات ذوب در خلأ، اندازه و موقعیت دقیق پرتوی قابل کنترل، در بسیاری از موارد ثابت شده است که راهی کارآمد برای اتصال فلزات غیرهم‌جنس است. در اتصالات غیرهم‌جنس تغییرات زیادی در خصوصیات شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی در اتصال

منطقه جوش ایجاد می‌شود که باعث تخریب در استحکام جوش می‌گردد؛ بنابراین جوشکاری اتصال فلزات غیرهم‌جنس به‌مراتب پیچیده‌تر از اتصال فلزات هم‌جنس است [۷]. در فرایند جوشکاری پرتو الکترونی پدیده‌های متالورژیکی مرتبط با منطقه ذوب^۳ هنوز وجود دارد و سبب بروز مشکلاتی می‌گردد؛ با این حال، این موارد در مقایسه با جوش‌های قوس رایج معمولاً جزئی هستند.

اکثر توربوشارژرها با ابعاد و کاربردهای مختلف در صنایع خودروسازی و کشتی‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند و بخش توربین این موتورها عمدتاً دارای اتصال جوشی غیرهم‌جنس سوپر آلیاژ و فولادهای آلیاژی پر استحکام می‌باشند [۸]. بررسی پارامترهای ورودی فرایندهای جوشکاری ذوبی همچون انرژی حرارتی، سرعت جوشکاری و عملیات حرارتی پیش گرم و پس گرم بر روی خواص مکانیکی اتصال و رسیدن به نتایج بهینه با کیفیت جوش مناسب می‌تواند به حل بعضی از معضلات متداول جوشکاری مواد غیرهم‌جنس در صنایع از جمله صنایع خودروسازی و هوافضا منتج شود [۹]. نیازمندی به استحکام بالا و ریزساختار مناسب (قابلیت جوش‌پذیری) اتصال شفت با مواد غیرهم‌جنس اینکونل ۷۱۳ و فولاد آلیاژی پر استحکام ۴۱۴۰ به روش پرتو الکترونی و همچنین بهبود دقت ابعادی در تolerانس‌های حدی و هندسی به‌منظور بالانس دینامیکی یک طرح اتصال صنعتی از اهداف اصلی این تحقیق می‌باشد.

طبق تحقیق صورت گرفته جهت اتصال توربین به شفت کمپرسور یک موتور توربوشارژ می‌توان از روش‌های جوشکاری اصطکاکی^۴ و جوشکاری پرتو الکترونی استفاده نمود اما از جهت کیفیت اتصال، میزان ماشین‌کاری و اعوجاج بعد از عملیات جوشکاری، روش پرتو الکترونی برتری قابل توجهی نسبت به اصطکاکی دارد [۱۰].

طبق تحقیق دیگری جهت اتصال شفت توربین با مواد سوپرآلیاژ به شفت کمپرسور با مواد فولاد کم آلیاژ از روش پرتو الکترونی استفاده می‌شود؛ اما یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در مسیر استفاده از این روش ایجاد ترک حرارتی یا ترک مرزی به دلیل وجود اختلاف در دمای ذوب دو آلیاژ است که یکی از راه‌های پیشنهادی برای کاهش این اثر مضر پیش‌گرم کردن دو آلیاژ قبل از جوشکاری است [۱۱، ۱۲].

پاتل و سالی تحقیقی بروی جوشکاری سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به روش پرتو الکترونی انجام دادند. در این تحقیق انرژی

³ Fusion zone
⁴ Friction Welding

¹ Electron Beam Welding
² Heat Input

جوش به عنوان تغییر ورودی با حرارت‌های مختلف و تغییر در سه پارامتر مؤثر در این فرایند شامل سرعت، تمرکز پرتو و جریان جوشکاری، نمونه‌های با طرح اتصال یکسان مورد آزمایش قرار گرفت. در این آزمایش کیفیت جوش حاصل شده با سه مشخصه هندسه جوش، سختی و خواص مکانیکی اتصال تعیین گردید. نتیجه تحقیق این بود که گرمای ورودی مستقیماً هم بر عمق نفوذ جوش و هم در منطقه متأثر از حرارت^۱ تأثیر می‌گذارد. در اکثر نمونه‌های تست شده استحکام کششی فلز جوش از استحکام کششی فلز پایه ۸۳۷ مگاپاسکال تجاوز نمود. وقتی از حرارت ورودی پایین‌تر از ۲۵۵ J/mm استفاده شد، استحکام استحکام کششی به میزان ۸۶۰ مگاپاسکال افزایش و به استحکام کششی فلز پایه نزدیک‌تر گردید ولی در حرارت‌های ورودی بیشتر از ۲۵۵ J/mm وجود ترک در منطقه جوش و در نهایت پراکندگی بیشتری در استحکام کششی منطقه جوش اتفاق افتاد [۱۳].

پاتی و همکاران روش تحلیلی توزیع دما در فرایند پرتو الکترون، با فرض منبع حرارتی متحرک را انجام دادند. مقدار انرژی لازم برای جوشکاری به جنس قطعه کار بستگی دارد که هرچه ظرفیت گرمایی (c)، گرمای نهان ذوب (Tm)، ضریب انتقال حرارت رسانش (k) و چگالی فلز کمتر باشد انرژی لازم برای جوشکاری کاهش می‌یابد؛ به عبارتی با یک توان ثابت می‌توان در این‌گونه مواد به عمق نفوذ بیشتری رسید. برای فرایند جوشکاری پرتو الکترونی که تمرکز انرژی در آن بسیار بالا است، اتلاف حرارت و در نتیجه ضریب رسانش حرارتی تأثیر چندانی ندارد. در این تحقیق مشخص گردید که میزان نفوذ پرتو با عمق حوضچه مذاب رابطه مستقیم دارد؛ همچنین عمق نفوذ پرتو به ولتاژ شتاب‌دهنده نیز بستگی دارد [۱۴].

هاگان و همکاران تحقیقی در زمینه اتصال غیرهم‌جنس فولاد آستنیتی زنگ نزن سری ۴۰۳ با فولاد کم آلیاژ ۴۱۴۰ به روش جوشکاری پرتو الکترونی و جوشکاری تیگ^۲ TIG و جوشکاری اصطکاکی با طرح اتصال یکسان انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که اتصال در فرایند پرتو الکترونی دارای استحکام کششی بالاتری نسبت به فرایند تیگ و اصطکاکی است؛ همچنین افزایش نرمی در روش پرتو الکترونی نسبت به دو روش دیگر به میزان ۳۲ درصد نسبت به ۲۵ درصد و ۱۹ درصد مشاهده گردید. در مورد سختی اتصال مشخص گردید که توزیع

مناسب‌تر سختی در فلز پایه و فلز جوش برای فرایند پرتو الکترونی نسبت به دو روش دیگر استخراج گردید [۱۵]. تینگ و همکاران تحقیقی در خصوص تأثیر فلزات مختلف پرکننده در جوشکاری پرتو الکترونی آلیاژ تیتانیوم به فولاد زنگ نزن انجام دادند. آزمایش‌ها از آلیاژ تیتانیوم به فولاد زنگ نزن با فلزات مختلف پرکننده، مانند نیکل، وانادیوم و مس انجام شد. نتایج نشان داد که تمام فلزات پرکننده برای کاهش ترکیبات بین فلزی Ti Fe مفید هستند. استحکام کششی اتصالات بستگی به سختی ترکیب بین فلزی داشته که اتصالات جوش با فلز پرکننده نقره با عدد اتمی ۴۷ دارای بالاترین مقاومت کششی در حدود ۳۱۰ مگاپاسکال است [۱۶].

مطالعات دیگری در خصوص اتصال فلزات غیرهم‌جنس آلیاژ ۴۱۴۰ به فولاد ضدزنگ ۳۰۴ به روش جوشکاری پرتو الکترونی انجام شده است. بر اساس تحقیقات صورت گرفته خواص مکانیکی اتصال ارتباط مستقیمی با ریزساختار منطقه اتصال دارد. در اتصال فلزات غیرهم‌جنس باید به خواص فیزیکی قطعات از جمله دمای ذوب، ضریب جذب حرارت و گرمای ویژه توجه نمود. جوش‌پذیری فلزات غیرهم‌جنس را تا حدودی به صورت کیفی می‌توان از روی دیاگرام فازی تعیین نمود. اگر فاز شکننده بین فلزی تشکیل شود، ناحیه جوش ترد شده و خواص مکانیکی جوش کاهش خواهد یافت. از طرفی بررسی‌های اخیر نشان می‌دهد که آلیاژ ۴۱۴۰ برای بهبود سفتی پیش از جوشکاری نیاز به پیش‌گرم دارد [۱۷].

دبروی و همکاران یک مدل سه‌بعدی پایدار برای انتقال گرما و جریان سیال در جوشکاری پرتو الکترونی که شکل‌گیری سوراخ کلید و تغییر درجه حرارت دیواره سوراخ کلید را به عنوان یک عملکرد در عمق جوش است پیشنهاد دادند که توزیع چگالی توان در این فرایند یک پارامتر مهم است. توزیع چگالی توان توسط تغییر فاصله کار و سپس تمرکز مجدد پرتو الکترون (قطر باریکه پرتو) روی سطح قطعه کار انجام می‌گیرد. افزایش در شعاع نقطه کانونی با افزایش فاصله کاری نیز بر هندسه جوش تأثیر می‌گذارد. با فرض توان ورودی و سرعت جوشکاری ثابت اما توزیع‌های مختلف چگالی توان با تغییر فاصله کار و سپس تمرکز مجدد پرتو الکترون به روی سطح قطعه کار با کاهش قطر باریکه پرتو الکترونی عمق جوش افزایش و پهنای جوش کمتر می‌شود [۱۸].

¹ Heat Effected Zone

² Tungsten Inert Gas

انجام شد. عملیات سخت کاری (سختی بین ۳۹۰ تا ۴۱۰ ویکرز) با گرمایش در ۸۶۰ درجه سانتی گراد طی یک ساعت و خنک کاری در روغن و سپس تمپر در ۴۵۰ درجه سانتی گراد طی دو ساعت و خنک کاری در هوا انجام شد. سپس با اجرای فرایندهای ماشین کاری دقیق تمامی نمونه‌ها مطابق با شکل ۱ و ۲ آماده جوشکاری شدند؛ در ادامه توسط دستگاه جوشکاری پرتو الکترونی با مشخصات مندرج در جدول ۳ جوشکاری انجام شد.

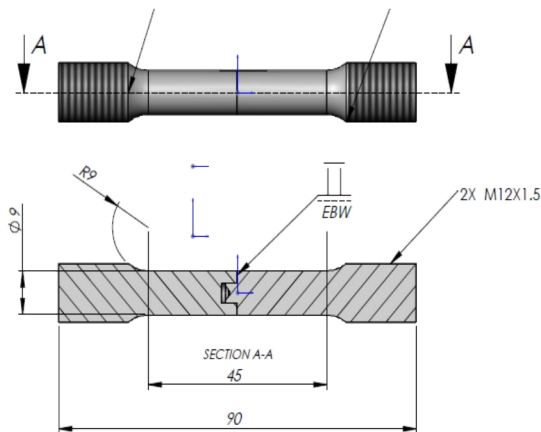


Fig. 1 Manufacturing Drawing of samples

شکل ۱ نقشه ساخت نمونه‌ها



Fig. 2 Prepared samples for welding.

شکل ۲ نمونه آماده شده جهت انجام فرایند جوشکاری

جدول ۳ پارامترهای مورد استفاده در فرایند جوشکاری

Table 3 The parameters used of welding processes

مشخصات	پارامترها
مدل دستگاه	20-60 Kv: ولتاژ پایین
بیشینه توان	30 KW
کمینه تمرکز پرتو	1 mm
سرعت جوشکاری	6 mm/s
میزان خلأ	2×10^{-5} mbar

نتایج حاصل از آزمون تست کشش برای طراحان و مهندسان حائز اهمیت است. در بسیاری از مواد لازم نیست یک قطعه فلزی بشکند تا از کار افتاده تلقی شود؛ چراکه هرگونه تغییر شکل پلاستیک و ایجاد ترک در قطعه هم نوعی از کار افتاده تلقی می‌شود؛ در نتیجه اطلاع از سطح تنش که تسلیم آغاز می‌شود و یا تحمل نیروی کششی اتصال بسیار مهم است [۱۹].

در این تحقیق با فرض سرعت جوشکاری ثابت، اثر انرژی ورودی فرایند جوشکاری پرتو الکترونی ناشی از تغییرات ولتاژ و جریان پرتو بر روی تحمل نیروی کششی اتصال غیرهم جنس فولاد 4140 و سوپر آلیاژ اینکونل 713LC بررسی شده است. لازم به ذکر است در این تحقیق، عملیات حرارتی پیش گرمی برای اتصال جوش انجام نگردید؛ البته انجام عملیات حرارتی پیش گرم برای اتصال غیرهم جنس اینکونل به فولادها توصیه شده است.

۲- مواد و روش انجام کار

۲-۱- آماده سازی نمونه‌ها

در این تحقیق نمونه‌ها از دو ماده غیرهم جنس و فرایند تولید متفاوت آماده شدند. میله‌ای با جنس اینکونل 713LC با فرایند ریخته‌گری دقیق بدون عملیات حرارتی با ترکیب شیمیایی مطابق با جدول ۱ و با استحکام کششی ۸۵۰ مگا پاسکال و میله‌ای دیگر با جنس فولاد کم آلیاژ 4140 با عملیات حرارتی سختی، با ترکیب شیمیایی مطابق جدول ۲ و استحکام کششی ۱۰۵۰ مگا پاسکال ساخته شدند [۲۰، ۲۱].

جدول ۱ مقادیر ترکیب شیمیایی فولاد 4140

Table 1 Chemical composition of 4140 steel

عناصر	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Cu	Fe
Wt%	0.4	0.2	0.7	0.8	0.1	0.01	0.22	پایه

جدول ۲ مقادیر ترکیب شیمیایی اینکونل 713LC

Table 2 Chemical composition of IN 713 LC

عناصر	Nb	Si+Al	Ti	Cr	Mo	Fe	Cu	Ni
Wt%	2.36	6.49	0.73	11.73	4.51	0.43	0.96	پایه

اتصال جوش طبق طرح صنعتی مورد نظر بر اساس شرایط عملکردی توربین با شفت، انطباق جذب و روان H7/g6 انتخاب گردید؛ سپس طبق دستورالعمل مهندسی با انجام فرایند عملیات حرارتی بروی فولاد 4140، سخت کاری

در این تحقیق از روش تحلیلی فاکتوریال کامل^۱ با تغییر در دو پارامتر ولتاژ و جریان به عنوان ورودی‌ها و استحکام، عمق نفوذ به همراه سطح شکست به عنوان خروجی‌ها استفاده شده است [۲۲]. جهت بررسی پارامترهای خروجی، تعداد ۱۸ نمونه مطابق با جدول ۴ جهت ارزیابی آزمون کشش، عمق نفوذ جوش و سطح شکست، به هم جوش داده شدند (شکل ۳).

نام‌گذاری نمونه‌ها بر اساس مقدار ولتاژ و جریان پرتو الکترونی مشخص شده است. کدگذاری نمونه مثلاً V30I20 شامل ولتاژ ۳۰ کیلوولت و جریان ۲۰ میلی‌آمپر است.



Fig. 4 Tension test sample in Santam Machine

شکل ۴ نمونه تست کشش در دستگاه سنتام



Fig. 3 Prepared welded sample

شکل ۳ نمونه جوشکاری شده

۳- نتایج و بحث

هدف از انجام این آزمون‌ها بررسی خواص مکانیکی جوش، استحکام جوش و هندسه جوش (عمق، پهنا و عیوب جوش) می‌باشد. در این تحقیق به بررسی آزمون‌های تست کشش، میزان عمق نفوذ جوش به همراه بررسی سطوح شکست با تغییر در پارامترهای آمپر و ولتاژ با ثابت بودن چگالی پرتو پرداخته شده است.

جدول ۴ طراحی آزمایش برای متغیرهای جوشکاری پرتو الکترونی

Table 4 Design of experiment for EBW parameters

انرژی (J/mm)	جریان پرتو (mA)	ولتاژ ورودی (Kev)	کد نمونه
100	20	30	V30I20
150	30	30	V30I30
200	40	30	V30I40
117	20	35	V35I20
175	30	35	V35I30
233	40	35	V35I40
133	20	40	V40I20
200	30	40	V40I30
267	40	40	V40I40

۳-۱- اثر انرژی پرتو بر هندسه جوش

تصاویر سطح مقطع جوش نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری استخراج و ابعاد جوش شامل عمق نفوذ و پهنای منطقه متأثر از حرارت مشخص گردید. شکل ۵ نشان می‌دهد که با افزایش انرژی ورودی میزان عمق نفوذ جوش افزایش می‌یابد و یک رابطه خطی بر این تغییرات حاکم است. این نتایج با تحقیقات صورت گرفته در جوشکاری فلزات غیرهم‌جنس به روش‌های ذوبی خصوصاً روش لیزر و پرتو الکترونی مطابقت دارد [۱۳].

۲-۲- آزمون متالوگرافی

نمونه‌های جوشکاری شده طبق استاندارد مرجع ASTM E3، E407 و E883 پس از مانیت و پولیش توسط محلول ماربل، اچ و تصاویری از سطح اتصال توسط میکروسکوپ نوری^۲ (OM) مدل LEICA با نرم‌افزار آنالیز تصویربرداری کلمکس (MZ 75) و میکروسکوپ روبشی^۳ (SEM) مدل (JEOL JSM-5800) تهیه گردید [۲۳].

۳-۲- آزمون کشش

در شکل ۶ نشان داده شده است که پهنای منطقه متأثر از حرارت در قسمت فلز پایه فولاد ۴۱۴۰ از فلز پایه اینکونل ۷۱۳ در تمامی نمونه‌ها بیشتر است و با افزایش انرژی ورودی، پهنای منطقه فوق افزایش می‌یابد. همچنین با مقایسه سه نمونه مشخص شد که نمونه V40I40 تصویر ۶-ج به دلیل بالاتر بودن

نمونه‌های آزمون کشش بر طبق استاندارد ASTM E8/E8M-09، به صورت دمبلی شکل با طول مقیاس ۹۰ میلی‌متر و قطر نمونه در ناحیه کاهش یافته برابر ۹ میلی‌متر و طول گیج با چهار برابر قطر آماده شدند [۲۳، ۲۴].

⁴ Santam Machine

¹ Full Factorial

² Optical Microscopy

³ Scanning Electron Microscopy

در جدول ۵ با توجه به افزایش انرژی ناشی از تغییر در پارامترهای آمپر و ولتاژ پرتو و ثابت ماندن چگالی حرارت ناشی از ثابت بودن سرعت جوشکاری و اندازه شعاع پرتو الکترونی، عمق نفوذ افزایش می‌یابد. در این تحقیق اثر ترکیبی ولتاژ و آمپر بر روی عمق نفوذ بررسی و نتیجه بر این شد که هر چه آمپر افزایش پیدا می‌کند منطقه متأثر از حرارت نیز افزایش می‌یابد و تأثیر افزایش آمپر در این منطقه از ولتاژ بیشتر است. در شکل ۷ نشان داده شده است که افزایش عمق نفوذ در آمپر بالا (با افزایش ولتاژ) به مراتب از آمپرهای پایین بیشتر است؛ پس مشخص گردید که برای رسیدن به یک عمق نفوذ مناسب ابتدا بایستی به یک آمپر بهینه و سپس با ولتاژ بالا اقدام نمود.

جدول ۵ نتایج اثر انرژی بر عمق نفوذ جوش

Table 5 Effects of heat input on weld penetration depth

عمق نفوذ (mm)	انرژی (J/mm)	کد نمونه
0.9	100	V30I20
1.35	150	V30I30
1.4	200	V30I40
1.1	117	V35I20
2.4	175	V35I30
3.6	233	V35I40
1.2	133	V40I20
1.45	200	V40I30
3.8	267	V40I40

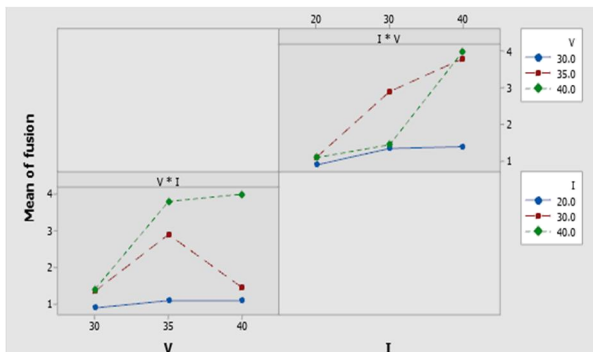


Fig. 7 interaction effects of voltage and amperage on weld penetration depth
شکل ۷ اثرات ترکیبی ولتاژ و آمپر پرتو الکترونی بر عمق نفوذ

۳-۲- اثر انرژی پرتو بر نیروی کششی

نیروی کششی برای جنس پایه فولاد ۴۱۴۰ که در دمای ۵۴۰ درجه سانتی‌گراد عملیات حرارتی و تمپیر شده است ۴۸۵۰۰ نیوتن و برای جنس پایه اینکونل ۷۱۳ بدون عملیات حرارتی ۴۳۰۰۰ نیوتن گزارش گردید؛ در ادامه برای ۹ نمونه نتایج تست کشش طبق جدول ۶ مشخص شده است. حداقل نیروی کششی مفصل ۱۹۵۳۹ نیوتن و حداکثر نیروی کششی ۴۱۰۵۶ نیوتن اندازه‌گیری شده است. شکل ۸ نشان می‌دهد که تمامی نمونه‌ها از منطقه فصل مشترک بین جوش و فولاد ۴۱۴۰ دچار شکست

آمپر نسبت به دو نمونه V35I30 در تصویر ۶-الف و V35I30 در تصویر ۶-ب منطقه متأثر از حرارت بزرگ‌تری داشته است [۱].

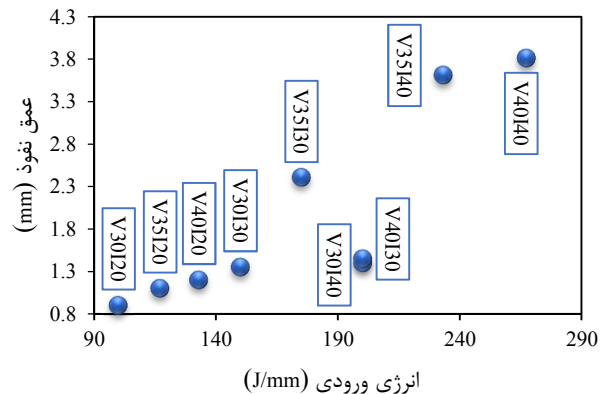


Fig. 5 Effects of heat input on weld penetration depth

شکل ۵ نتایج اثر انرژی بر عمق نفوذ جوش

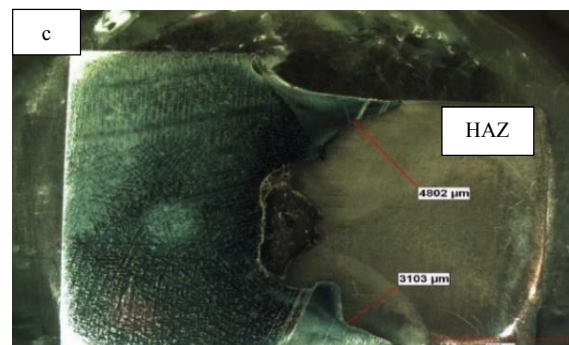
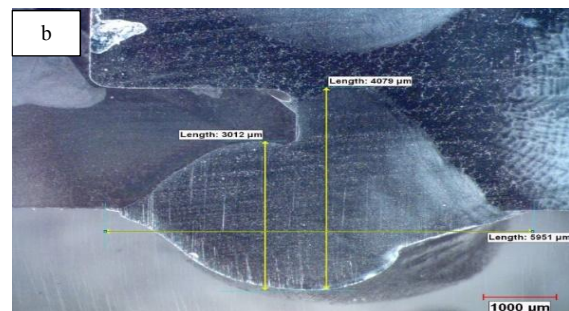
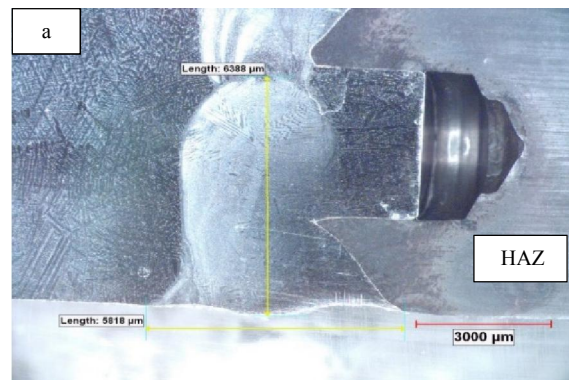


Fig. 6 Weld Stereoscope; a) V35I30, b) V35I40, c) V40I35

شکل ۶ استریوسکوپی ناحیه جوش؛ الف) V35I30، ب) V35I40، ج) V40I35

در شکل ۱۰ اثر ترکیبی ولتاژ و آمپر بر روی استحکام بررسی شد؛ به طوری که در آمپرهای پایین اثر ولتاژ بر استحکام کمتر است ولی در آمپرهای بالا اثر افزایش ولتاژ بر استحکام بیشتر است؛ همچنین در ولتاژهای بالا اثر افزایش آمپر بر استحکام بیشتر است. پس می توان دریافت که برای رسیدن به یک استحکام بالا نیاز به آمپر و ولتاژ بهینه است (آمپر بهینه به همراه ولتاژ بالا)؛ به همین خاطر است که استفاده از دستگاه های ولتاژ بالا جهت افزایش عمق نفوذ و استحکام بالا استفاده می شود.

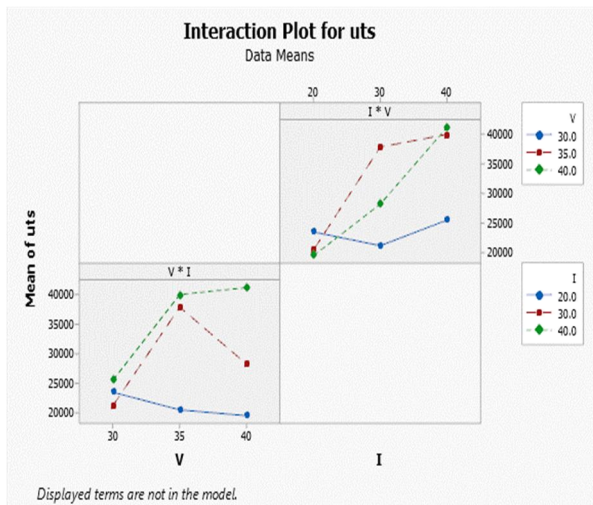


Fig. 10 interaction effects of voltage and amperage on the weld strength
شکل ۱۰ اثرات ترکیبی ولتاژ و آمپر پرتو الکترونی بر استحکام جوش

۳-۳- مطالعه سطوح شکست

با توجه به اینکه نمونه های V35I30، V35I40 و V40I40 دارای مقاومت کششی بالاتر از حد مجاز می باشند، در این مطالعه دو نمونه ای که دارای ولتاژ ثابت و آمپر متفاوت هستند جهت بررسی سطوح شکست در نظر گرفته شده اند. در شکل ۱۱ مشاهده شد که سطح شکست نمونه V35I30 عمدتاً شامل حفرات عمیق به همراه صفحات کلیواژ ناشی از شکست ذرات رسوب (احتمالاً ذرات کارباید) و جای خالی ناشی از فرایند ذوب و انجماد در حین جوشکاری است. وجود حفرات دایروی در سطح شکست، عمق زیاد آنها و درشت بودن نسبی آنها بیانگر شکست عمدتاً نرم در سطح این نمونه است. در شکل ۱۲ مشاهده گردید که سطح شکست نمونه V35I40 در مقایسه با نمونه V35I30 تا حدودی متفاوت است. اگرچه در سطح شکست نمونه V35I40 نیز وجود حفرات دایروی (به عنوان نشانه بارز شکست نرم) مشاهده می شود اما سطوح کلیواژ (تورق) ناشی از شکست

شده اند زیرا ضریب جذب حرارتی بالاتر فولاد ۴۱۴۰ نسبت به اینکونل ۷۱۳ این منطقه بیشتر تحت تأثیر حرارت و تضعیف استحکامی قرار می گیرد. این نتایج با تحقیقات انجام شده مطابقت دارد [۱۵]؛ همچنین شکل ۹ نشان می دهد که با افزایش انرژی ورودی تحمل نیروی کششی نمونه ها افزایش می یابد. نمونه های V35I30 با انرژی جوش ۱۷۵J/mm و V35I40 با انرژی جوش ۲۳۳J/mm و V40I40 با انرژی جوش ۲۶۷J/mm مقاومت کششی بیش از ۸۰ درصد فلز پایه فولاد ۴۱۴۰ را نشان دادند.

آدامکو و همکاران در تحقیقی نشان دادند حداکثر مقاومت کششی مفصل جوشکاری شده غیرهم جنس اینکونل ۷۱۸ به فولاد ۳۰۴ حدود ۳۹۰ مگاپاسکال اندازه گیری شده است (تقریباً ۵۵٪ فلز پایه) [۱۶].

جدول ۶ نتایج تست شکست نمونه های جوشی

Table 6 Tension test results for the welded samples

کد نمونه	قطر نمونه mm	نیروی کششی (N)	ناحیه شکست
V30I20	8.7	23513	منطقه جوش
V30I30	8.3	21205	منطقه جوش
V30I40	8.5	25528	منطقه جوش
V35I20	8	20520	منطقه جوش
V35I30	8.5	37895	منطقه جوش
V35I40	8	40021	منطقه جوش
V40I20	8.5	19535	منطقه جوش
V40I30	8	28234	منطقه جوش
V40I40	9	41205	منطقه جوش



Fig. 8 Failure of the samples from the weld

شکل ۸ شکست تمامی نمونه ها از محل جوش

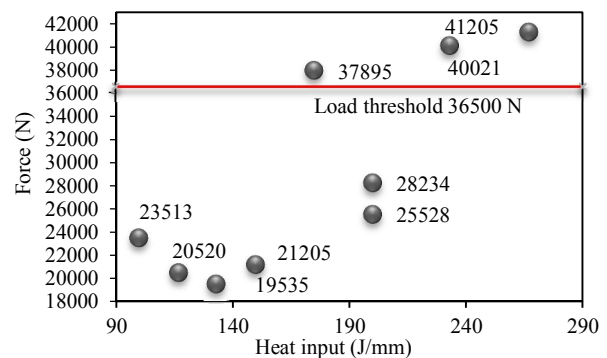


Fig. 9 Effects of heat input on weld strength

شکل ۹ تأثیر حرارت ورودی بر استحکام جوش

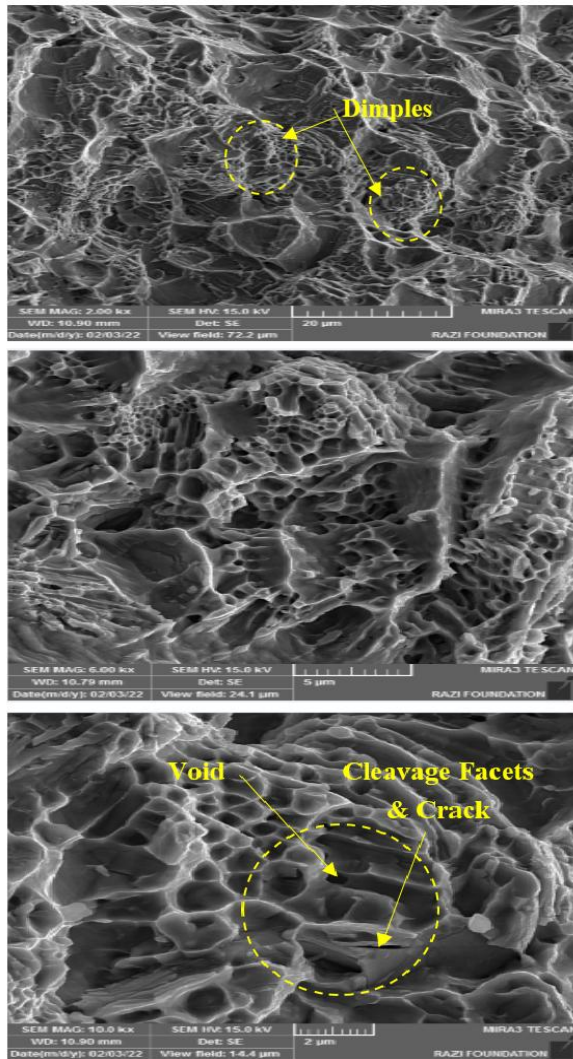


Fig. 12 Fractography of the V35I30 test sample

شکل ۱۲ آنالیز سطح شکست نمونه V35I30

پته و همکارش در تحقیقی نشان دادند، گرمای ورودی در فرایند جوشکاری پرتو الکترونی بیش از ۲۲۵J/mm انعطاف پذیری نمونه‌ها را کاهش می‌دهد؛ علت آن دم‌ی بالا و سرعت خنک‌سازی سریع و ایجاد ذرات شکننده کاربایدی بوده است. در انتها نوآوری‌های این تحقیق نسبت به مطالعات مشابه را می‌توان در سه مورد زیر خلاصه نمود:

- جوشکاری EBW، اتصال غیرهم‌جنس شفت اینکونل 713LC و فولاد ۴۱۴۰ کم‌آلیاژ.
- دستیابی به مقاومت کششی ۸۰ درصدی فلز پایه فولاد ۴۱۴۰ نمونه V40I40.
- دستیابی به اتصال مناسب بدون عیب و نقص با عمق نفوذ ۴ میلی‌متری نمونه V40I40.

ذرات رسوب (احتمالاً ذرات کارباید) نیز در سطح وسیع‌تری مشهود است. از طرفی با توجه به تصاویر شکست نگاری، عمق حفرات دایروی در سطح شکست این نمونه در مقایسه با نمونه V35I30 کمتر بوده و این نشان از انعطاف‌پذیری کمتر است. پس با افزایش انرژی ورودی ناشی از افزایش آمپر انعطاف‌پذیری منطقه جوش کاهش می‌یابد [۱۳].

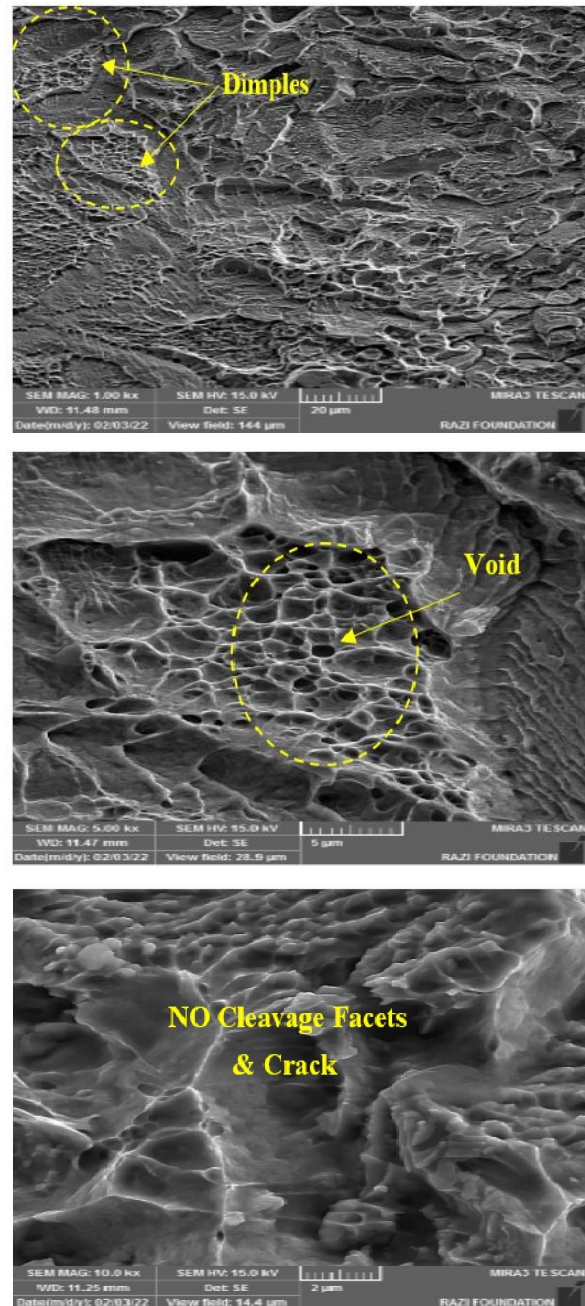


Fig. 11 Fractography of the V35I40 test sample

شکل ۱۱ آنالیز سطح شکست نمونه V35I40

۴- جمع بندی

در این تحقیق مقامت کششی اتصال غیرهم جنس اینکونل 713LC و فولاد ۴۱۴۰ کم آلیاژ با استفاده از فرایند جوشکاری پرتو الکترونی، با تغییر در انرژی ورودی (پارامترهای ولتاژ و آمپر با ثابت بودن چگالی پرتو) و انجام آزمون‌های تست کشش و متالوگرافی به همراه بررسی سطوح شکست مورد ارزیابی قرار گرفت. خلاصه نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

۱- در این تحقیق نمونه‌های V35130، V35140 و V40140 مقاومت کششی بیش از ۸۰ درصد فلز پایه فولاد ۴۱۴۰ را از خود نشان دادند.

۲- تمامی نمونه‌ها در آزمون کشش از منطقه جوش در ناحیه فصل مشترک فولاد ۴۱۴۰ شکسته شده‌اند.

۳- منطقه فصل مشترک بین جوش و فولاد ۴۱۴۰ به دلیل ضریب جذب حرارتی بالاتر نسبت به اینکونل ۷۱۳ بیشتر تحت تأثیر حرارت قرار گرفته و باعث تضعیف استحکامی این منطقه شده است.

۴- افزایش و تأثیر آمپر در گسترش منطقه متأثر از حرارت بیشتر از ولتاژ است.

۵- نشان داده شد که با افزایش انرژی ورودی، استحکام جوش افزایش و از انرژی جوش 233J/m به بالا، انعطاف پذیری منطقه جوش کاهش می‌یابد؛ علت آن دمای بالا و سرعت خنک‌سازی سریع است که باعث ایجاد ذرات شکننده کاربیدی می‌شود.

۶- افزایش آمپر به مراتب اثرات بالاتری نسبت به ولتاژ بر استحکام جوش داشته است که با افزایش آمپر استحکام جوش افزایش و درصد تغییر شکل منطقه جوش کاهش می‌یابد.

۷- در بررسی سطوح شکست مشاهده گردید که اندازه حفره رابطه‌ای معکوس با استحکام داشته است و وجود حفره درشت در سطح شکست، با عمق زیاد بیانگر شکست عمدتاً نرم و حفره ریز در سطح شکست، با عمق کم بیانگر شکست ترد بوده که باعث افزایش استحکام شده است (نمونه V40140).

۸- شرایط بهینه استحکام مناسب و عمق نفوذ جوش در نمونه V40140 و در انرژی جوش 233J/mm مشاهده گردید.

۵- منابع

- [1] M. Sabokrouh, S. H. Hashemi, M. R. Farahani, Experimental study of the weld microstructure properties in assembling of natural gas transmission pipelines, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 231, No. 6, 2017. <https://doi.org/10.1177/0954405415579581>
- [2] M. St. Weglowski, *Electron Beam Welding Techniques and trends Review*, Vacuum, Elsevier, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2016.05.004>
- [3] S. H. Zargar, M. Farahani, M. K. B. Givi, Numerical and experimental investigation on the effects of submerged arc welding sequence on the residual distortion of the fillet welded plates, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 230, No. 4, pp. 654-661, 2016. <https://doi.org/10.1177/095440541456003838>
- [4] AWS C7. 1M/C7. 1, Recommended practices for electron beam welded and Allied processes, 2013.
- [5] M. Tabasi, M. Farahani, M. K. Givi, M. Farzami, A. Moharami, Dissimilar friction stir welding of 7075 aluminum alloy to AZ31 magnesium alloy using SiC nanoparticles, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 86, No. 1, pp. 705-715, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8211-y>
- [6] D. Akbari, M. Farahani, N. Soltani, Effects of the weld groove shape and geometry on residual stresses in dissimilar butt-welded pipes, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 47, No. 2, pp. 73-82, 2012. <https://doi.org/10.1177/0309324711434681>
- [7] H. Mohammadzadeh Jamalian, M. Farahani, M. K. Besharati Givi, M. Aghaei Vafaei, Study on the effects of friction stir welding process parameters on the microstructure and mechanical properties of 5086-H34 aluminum welded joints, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 83, No. 1, pp. 611-621, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7581-5>
- [8] H. Tavakoli Hoseini, M. Farahani, M. Sohrabian, A process analysis of resistance spot welding on the inconel alloy 625 using artificial neural networks, *International Journal of Manufacturing Research*, Vol.12, No. 4, pp. 444-460, 2017. <https://doi.org/10.1504/IJMR.2017.088398>
- [9] S. M. Ebrahimi, M. Farahani, D. Akbari, The influences of the cyclic force magnitude and frequency on the effectiveness of the vibratory stress relief process on a butt welded connection, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 102, No. 5, pp. 2147-2158, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03288-y>
- [10] Turbine wheel and shaft joining processes, US20100154214A1, United States Patent.
- [11] M. Farhang, M. Farahani, M. Nazari, O. Sam-Daliri, Experimental Correlation Between Microstructure, Residual Stresses and Mechanical Properties of Friction Stir Welded 2024-T6 Aluminum Alloys, *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*, 2022. <https://doi.org/10.30486/ADMT.2022.1943845.1322>
- [12] ASM Metals Hand Book, Volume 1 - Properties and Selection Irons Steels and High Performance Alloys.
- [13] V. Patel, A. Sali, Electron Beam Welding of Inconel 718, science Direct, *Procedia Manufacturing*, Vol. 48, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.065>

- new friction stir spot weld joint reinforcement technique on 5754 aluminum alloy, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 232, No.17, pp.2976-2986, 2018. <https://doi.org/10.1177/0954406217729419>
- [20] AMS 2759, Aerospace Material Specification, Heat treatment of Carbon and Low Alloy Steel.
- [21] AMS 5377E, Aerospace Material Specification, Heat Treatment of Carbon and Low Alloy Steel.
- [22] M. Sabokrouh, M. Farahani, Experimental study of the residual stresses in girth weld of natural gas transmission pipeline, *Journal of Applied and Computational Mechanics*, Vol.5, No.2, pp. 199-206, 2019. <https://doi.org/10.22055/JACM.2018.25756.1294>
- [23] ASTM Standard E8, Standard Test Methods of Tension Testing of Metallic Materials.
- [24] A. Shahmirzalo, M. Farahani, M. Farhang, Evaluation of local constitutive properties of Al2024 friction stir-welded joints using digital image correlation method, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 56, No. 7, pp. 419-429, 2021. <https://doi.org/10.1177/0309324720981201>
- [14] S. Gagapathi, analytical Method to study the temperature distribution in case of moving Heat Source in Electron beam welding, *7th International Conference on Heat Transfer Fluid Mechanics and Thermodynamics*, 2010.
- [15] N. Arivazhagan, Investigation on AISI 304 austenitic stainless steel to AISI4140 low alloy steel dissimilar joints by gas tungsten arc, electron beam and friction welding, *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 3036-3050, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.01.037>
- [16] N. K. Adomako, H. J. Park, Microstructure evolution and mechanical properties of the dissimilar joint between Inconel 718 and stainless steel 304, Elsevier, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140262>
- [17] N. Arivazhagan, Microstructure evolution and mechanical properties of the dissimilar joint between AISI 4140 and stainless steel 304, *Materials Science & Engineering A*, Elsevier, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140262>
- [18] B. R. Rai, Heat Transfer and Flow during Electron Beam Welding of stainless steel 304L, *Welding Journal*- March, 2009.
- [19] H. Andalib, M. Farahani, M. Enami, Study on the