E-ISSN: 2676-6787 | P-ISSN: 2476-583X

Journal of
Welding Science and Technology of Iran
jwsti.iut.ac.ir

Volume 9, Number 2, 2024



Investigating the microstructure and mechanical properties of pulsed Nd:YAG laser welding of Monel 400 to Nimonic 75

R. Mahdizade, S. A.Asghar Akbari Musavi*, S. Mehdipour
School of Metallurgy and Materials Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Received 10 April 2023 ; Accepted 23 August 2023

Abstract

In this study, non-homogenous welding of nimonic 75 superalloy to Monel 400 with 1 mm thickness was investigated with pulsed Nd:YAG laser welding. The mechanical properties of the joint were analyzed with optical and scanning electron microscope, X-ray diffraction, micro-hardness test and tensile test. In the case of non-homogeneous welding of Nimoinc 75 superalloy to Monel 400, defects such as liquation cracks and porosity in the welded samples were observed. these defects were removed with increasing the preheating temperature and decreasing the heat input. The results showed the voltage, pulse width, pulse frequency and welding speed should be selected as 500 volts, 9 milliseconds, 3 Hz and 0.9 mm/s respectively to reach the proper penetration depth. Also, the investigations show that the welding structure is composed of austenitic matrix containing columnar dendrites and some cellular areas. The mechanical properties of the weld metal were reduced after joining and segregation causes a change in the amount of elements and the appearance of intermetallic compounds in the spaces between dendrites and cells. All non-homogeneous samples broke during the tensile test from the weld metal area.

Keywords: Non-homogeneous pulsed laser welding, Nimonic 75 superalloy, Monel 400, columnar and coaxial dendrites.

Corresponding Author: akbarimusavi@ut.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.06]

شاپا: 2476-583X | شاپا الکترونیکی: 2676-6787

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال نهم، شماره2، پاییز و زمستان 1402



بررسی ریزساختاری و خواص مکانیکی اتصال غیرهمجنس لیزر ضربانی Nd:YAG مونل 400 به نایمونیک 75

رامین مهدی زاده، سید علی اصغر اکبری موسوی *، سعید مهدی پور

دانشکده فنی، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه تهران، تهران، ایران

دریافت مقاله: 1402/01/21 ؛ پذیرش مقاله: 1402/06/01

چکیده

در این پژوهش، اتصال غیرهمجنس ابرآلیاژ نایمونیک 75 به مونل 400 با ضخامت 1 میلی‌متر به روش جوشکاری لیزر ضربانی Nd:YAG مورد پژوهش قرار گرفت. با آزمون‌های میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی، پراش پرتو ایکس، میکرو سختی سنجی و آزمون کشش خواص مکانیکی اتصال بررسی شد. در مورد جوشکاری غیرهمجنس ابر آلیاژ نایمونیک 75 به مونل400 عیوبی مانند ترک ذوبی و تخلخل در نمونه‌های جوشکاری شده مشاهده شد که با افزایش دمای پیشگرم و کاهش حرارت ورودی این عیوب رفع شدند. نتایج نشان داد، برای رسیدن به عمق نفوذ مناسب، ولتاژ، پهنای زمانی ضربان، بسامد ضربان و سرعت جوشکاری به ترتیب 500 ولت، 9میلی‌ثانیه، 3 هرتز و 0,9 میلیمتر بر ثانیه انتخاب شود. همچنین بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که ساختار حاصل از جوشکاری، از زمینه آستنیتی حاوی دندریت‌های ستونی و در برخی مناطق سلولی تشکیل‌شده است. خصوصیات مکانیکی فلزجوش، پس از اتصال کاهش یافته و جدایش موجب تغییر در مقدار عناصر و پیدایش ترکیبات بین فلزی در فواصل بین دندریت‌ها و سلول‌ها می‌گردد. همه نمونه‌های غیرهمجنس در آزمون کشش از ناحیه فلز جوش دچار شکست گردیدند.

کلمات کلیدی: جوشکاری غیرهمجنس لیزر ضربانی، ابرآلیاژ نایمونیک 75، مونل400، دندریت‌های ستونی و هم‌محور.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: akbarimusavi@ut.ac.ir

1- مقدمه

ابر آلیاژهای پایه نیکل بدلیل کاربردهای بسیار زیاد، یکی از مهّمترین خانواده‌های فلزات در طبقه بندی مواد مهندسی دمای بالا هستند. ابر آلیاژهای پایه نیکل بطور کلی به 3 دسته تقسیم‌بندی می شوند: آلیاژهای محلول جامد، آلیاژهای رسوب سخت شده و آلیاژهای خاص مانند بین فلزی Ni-Al و استحکام یافته با ذرات اکسید. آلیاژهای محلول جامد دارای دامنه وسیعی از عناصر آلیاژی محلول در نیکل مانند Co، Mo، Fe، Cr هستند. این آلیاژها برحسب میزان و نوع عناصر آلیاژی محلول دارای کاربردهای مختلفی مانند مقاومت به خوردگی در آب دریا و یا کاربردهای الکتریکی هستند. در کاربردهای نیازمند استحکام بالاتر، از آلیاژهای استحکام یافته رسوبی استفاده می‌شود. این آلیاژها شامل افزودنی‌های آلیاژی مانند تیتانیوم، آلومینیوم و نایوبیوم جهت تشکیل رسوب‌های استحکام دهنده با نیکل بعد از انجام عملیات حرارتی هستند. قابلیت آلیاژهای استحکام یافته با رسوب‌ها، برای حفظ استحکام در دماهای بالا می‌تواند با تغییرات در ساختار بوسیله عملیات حرارتی همراه با تغییر در ترکیب شیمیایی تأمین شود. در بیشتر

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.06]

موارد، رسوب‌های مورد نظر، با زمینه هم‌سیما هستند و سبب افزایش استحکام زمینه می‌شوند.

مهمترین رسوب‌های موجود درساختار آلیاژهای رسوب سخت شده،رسوب‌های(Ni_3Al,Ni_3Ti)γ' و(Ni_3Nb)γ'' هستند. با بهینه‌سازی ترکیب شیمیایی و عملیات حرارتی، این آلیاژها می‌توانند دارای استحکامی تا میزان 1380 مگاپاسکال و استحکام تسلیم بیش از 1035 مگاپاسکال باشند [2-1]. استین و همکاران در پژوهشی به بررسی متغیرهای جوشکاری لیزر ضربانی Nd:YAG و لیزر پیوسته پرداختند. متغیرهای لیزر ضربانی شامل انرژی ضربان (Ep)، مدت ضربان (tp)، اندازه نقطه لیزر (b) و سرعت جوش (v) می‌باشند. چگالی توان پرتو لیزر ضربانی باعث می‌شود ذوب و انجماد به صورت متوالی اتفاق افتد و زمان انجماد کوتاه‌تر از لیزر پیوسته باشد [2]. کیم و همکاران جوشکاری موفق لوله‌ای از جنس Inconel 600 را گزارش کرده‌اند [3]. جوشکاری فولاد زنگ نزن آستنیتی 304 و فولاد زنگ نزن مارتنزیتی 420 با استفاده از لیزر ضربانی Nd:YAG توسط برتا و همکاران مورد مطالعه قرار دادند [4]. پینگ و مولیان از سامانه لیزری Nd:YAG ضربانی برای جوشکاری فولاد زنگ نزن AISI 304 استفاده کردند. نتایج بدست آمده از این مطالعه نشان می‌دهد که امکان جوشکاری موفق این آلیاژ از نظر ریزساختاری و مکانیکی، با کنترل دقیق انرژی ضربان لیزر امکان‌پذیر است [5]. ریزساختار و خواص مکانیکی جوشکاری مونل400 با لیزر ضربانی Nd:YAG در انرژی ضربان‌های متفاوت توسط کومار و همکاران مطالعه شد و نتایج پژوهش نشان داد که عرض و مورفولوژی جوش ایجاد شده با شبیه‌سازی عددی به خوبی مطابقت دارد و دمای بیشینه و ابعاد HAZ با افزایش انرژی ضربان افزایش می‌یابد و دانه‌های درشت‌تر در انرژی ضربان پایین و بالاتر بوجود آمده‌اند [6].

در تحقیقی توسط ونترلا و همکاران از لیزر ضربانی Nd:YAG برای اتصال فویل نازک 400 میکرومتری Monel 400 استفاده شد. با افزایش انرژی ضربان، عرض منطقه جوش افزایش می‌یابد. نتایج این تحقیق نشان داد که گسیختگی همه نمونه‌ها در ناحیه فلزپایه، در کنار خط همجوشی رخ می‌دهد. استحکام کششی نهایی (UTS) ابتدا افزایش یافته و سپس با افزایش انرژی ضربان (Ep) کاهش می‌یابد. حداکثر مقدار UTS، با انرژی ضربان 1/5 ژول به دست آمده است و برابر 94 درصد فلزپایه می‌باشد [7].

راماکریشنان و همکاران تعامل قطر لیزر و توان در جوشکاری لیزر Nd:YAG ضربانی مونل 400 و فولاد زنگ نزن 316 را بررسی نمودند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که سهم توان در مقایسه با قطر لیزر بسیار کم است. افزایش قطر لیزر منجر به کاهش سختی می‌گردد. ضمناً، توان و بسامد، کم و بیش دارای سهم مساوی در افزایش سختی منطقه جوش دارند [8].

در تحقیق دیگر، یک رابطه تجربی برای پیش‌بینی مقاومت کششی جوشکاری لیزر Nd:YAG ضربانی ورق‌های آلیاژی Hastelloy C-276 –Monel 400 توسط کومار و همکاران به دست آمده است. متغیرهای سرعت جوشکاری، ضربان، انرژی و مدت زمان ضربان در سه سطح انتخاب شده‌اند و حالت بهینه مورد تحقیق قرار گرفته است. نتایج تجزیه واریانس (ANOVA) نشان می‌دهد که سرعت جوشکاری بیشترین تأثیر را بر استحکام کششی دارد و پس از آن انرژی ضربان و مدت زمان ضربان قرار دارد [9].

تا به امروز، چند تحقیق بر روی روش‌های جوشکاری ابرآلیاژهای نیکل تمرکز کرده‌اند. می و همکاران جوشکاری ابر آلیاژ 718 با پرتو الکترونی را بررسی نمودند و ترک خوردگی در ناحیه جوش را گزارش داده‌اند. آن‌ها بیان نموده‌اند که استحکام جوش بستگی به اندازه دانه و سرعت جوشکاری دارد [10]. اونو و همکاران به بررسی خستگی چرخه بالا قطعه جوشکاری ابرآلیاژ 718 با پرتو الکترونی پرداخته‌اند [11]. شکیل و همکاران در پژوهشی جوشکاری پرتو الکترونی غیرهم‌جنس آلیاژهای Inconel 625 و آلیاژ SS 304L را از منظر ریزساختاری و ریزسختی سنجی مطالعه نموده‌اند [11]. ریزساختار، خواص مکانیکی و ریزسختی جوشکاری ورق از جنس نایمونیک با پرتو الکترونی مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش، بررسی ریزساختار اتصال نشان می‌دهد که منطقه جوش عمدتاً از دندریت ستونی تشکیل شده است و حالت‌های

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.06]

انجماد را می‌توان با توجه به میزان سرمایش تغییر داد. علاوه بر این، رسوبات کمی وجود دارد و کاربیدهای MC در ناحیه جوش مشاهده می‌شوند. نتایج پراش پرتو ایکس نشان می‌دهد که ساختار فلزجوش پس از جوشکاری پرتو الکترونی تغییر نکرده است. علاوه بر این، نشان می‌دهد که منطقه جوش و فلزپایه تفاوت آشکاری در خصوصیات مرزدانه‌ها و جهت‌گیری نادرست هسته دارند. بنابراین سختی، استحکام و مقاومت به خستگی اتصال جوش داده شده کمتر از فلزپایه است [12].

در ارتباط با کاهش تنش‌های حرارتی در مقاله‌ای که در سال 2009 میلادی توسط چیانگ ارائه شده است، جوشکاری لیزر همراه با پیش‌گرم موضعی جلو جوش تا دمای 800 درجه سانتی‌گراد با روش پیش‌گرم القایی و استفاده از پودر NI-284-10 که دارای ترکیب شیمیایی مشابه آلیاژ نایمونیک90 است، بطور پاشش هم‌محور با لیزر پیوسته CO_2 انجام شد. پس از جوشکاری عملیات پیرسازی دوباره بر روی آلیاژ نایمونیک 90 انجام شده است. در این تحقیق ترک ذوبی در منطقه متأثر از حرارت مشاهده نشده است.

طول جوش به این روش محدود به 7 سانتی‌متر بوده و حفرات و آخال از جمله عیوب این روش است و همچنین ممکن است با افزایش طول جوشکاری ترک در منطقه جوش و HAZ پدید بیاید. نتایج بیانگر این امر است که اگر چه میزان ذوب شدگی مرزدانه زیاد است، ولی به علّت کاهش تنش وارده در جوشکاری، ترک ذوبی در HAZ مشاهده نشد [13].

با توجه به اینکه ماشین‌کاری آلیاژ مونل دشوار بوده، جوشکاری یکی از بهترین روش‌های اتصال این فلز می‌باشد و جوشکاری به کمک لیزر می‌تواند گزینه مناسبی برای اتصال ورق‌های مونل به سایر فلزات نظیر نایمونیک باشد. اگرچه در زمینه جوشکاری مونل با لیزر پژوهش‌هایی شده است ولی تاکنون محققان در زمینه اتصال فلز مونل به نایمونیک پژوهشی انجام نداده‌اند.

یکی از نیازهای صنعت خصوصا صنایع دریایی و مواد شیمیایی اتصال فلزات غیرهمجنس مقاوم به خوردگی می‌باشد. با توجه به اینکه محققان عموما بر تاثیر روش‌های جوشکاری با قدمت بالا قوسی، اصطکاکی و... بر اتصال فلزات غیرهمجنس پرداخته‌اند، نیاز به مطالعه استفاده از جوشکاری لیزر برای اتصال فلزات مونل و نایمونیک وجود دارد. در صنایع دریایی به کرات از فلزات مونل و نایمونیک بخاطر مقاوم خوب در مقابل خوردگی استفاده می‌شود و عموما این فلزات با یکدیگر با فرایند جوشکاری متصل می‌شوند. بنابراین مطالعه تاثیر روش‌های جدید جوشکاری مانند جوش لیزر بر تغییر خصوصیات مکانیکی و فیزیکی این اتصالات می‌تواند برای مهندسان مفید واقع شود.

2- مواد و روش پژوهش

با توجه به کوچک بودن قطعات مورد جوشکاری و ظریف بودن اتصال، روش جوشکاری پرتو لیزر مناسب است. برای جوشکاری لیزر از دستگاه Nd:YAG میکرو لیزر ضربانی مدل SW 1 با توان متوسط 90 وات استفاده شده است. ترکیب شیمیایی آلیاژهای نایمونیک 75 و مونل 400 که با آزمون طیف سنجی نشر نوری تعیین شده در جدول(1) آورده شده است.

برای انجام آزمایش‌های جوشکاری، نمونه‌های آنیل انحلالی ورق به ضخامت 1 میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. قبل از جوشکاری، آماده‌سازی‌های سطحی برای افزایش جذب پرتو لیزر روی نمونه‌ها انجام نشد.

بعد از برشکاری، سمباده زنی سطحی جهت رفع آلودگی‌های اکسیدی و شستشوی نمونه‌ها با استون در حمام التراسونیک، انجام شده و سپس نمونه‌ها جوشکاری شدند. پیش از انجام جوشکاری هر یک از نمونه‌ها بصورت یکنواخت با استفاده از المنت حرارتی در دماهای مختلف طبق جدول(2) پیش‌گرم شده‌اند. دمای پیش‌گرم بوسیله ترموکوپل با دقت ℃ 5± اندازه‌گیری شده است.

2-1-جوشکاری نمونه‌ها

با توجه به تعداد بسیار زیاد متغیرهای جوشکاری لیزر، در ابتدا مجموعه‌ای از آزمون‌ها جهت دستیابی به نمایه جوش قابل قبول و حاوی حداقل عیوب انجام شد و محدوده بهینه متغیرهای جوشکاری لیزر تعیین گردید که مقادیر آن در جدول آورده

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.06]

جدول 1- ترکیب شیمیایی آلیاژهای مورد استفاده در پژوهش

آلیاژ	Ni	Cr	Cu	Mn	C	Ti	Al	Fe	Si	S
نایمونیک ۷۵	بقیه	۲۰/۵۴	۰/۵	۱	۰/۱۲	۰/۵	-	۵	۰/۹	-
مونل۴۰۰	بقیه	–	۳۱	۱/۸۴	۰/۳	–	–	۲/۵	۰/۵	۰/۰۲۴

جدول 2- متغیرهای جوشکاری لیزر انجام گرفته در این پژوهش

شماره نمونه	ولتاژ (V)	بسامد (Hz)	پهنای زمانی ضربان (ms)	قطر لیزر (mm)	سرعت (mm/s)	دبی گاز محافظ (Lit/min)	دمای پیش‌گرم ( )	توان متوسط (W)	حرارت ورودی (J/mm)
۱	۴۵۰	۳،۵	۶	۰،۲	۱	۱۵	۱۵۰	۷۰	۷۰
۲	۴۶۵	۴،۵	۶	۰،۲	۱	۱۵	۱۵۰	۸۲	۸۲
۳	۴۲۰	۶	۶	۰،۲	۱	۱۵	۱۵۰	۴۵	۴۵
۴	۴۳۰	۷	۶	۰،۲	۱	۱۵	۱۵۰	۵۶	۵۶
۵	۵۰۰	۵	۶	۰،۲	۱	۱۵	۱۵۰	۱۱۵	۱۱۵
۶	۴۸۵	۵،۵	۶	۰،۲	۱	۱۵	۱۵۰	۹۱	۹۱
۷	۴۹۵	۳،۵	۶،۵	۰،۲	۰،۹	۱۵	۱۶۰	۱۰۲	۱۱۳
۸	۵۰۰	۳	۷	۰،۲	۰،۸	۱۵	۱۸۰	۱۱۲	۱۴۰
۹	۵۰۰	۳	۸	۰،۲	۱،۲	۱۵	۱۹۰	۱۱۴	۹۵
۱۰	۵۰۰	۳	۸،۵	۰،۲	۱،۴	۱۵	۲۰۵	۱۱۵	۸۲
۱۱	**۵۰۰**	**۳**	**۹**	**۰،۲**	**۰،۹**	**۱۵**	**۲۲۰**	**۱۱۵**	**۱۲۷**
۱۲	۵۰۰	۳	۱۰	۰،۲	۱،۸	۱۵	۱۷۰	۱۱۶	۶۴

شده است. انتخاب صحیح مقدار متغیرهای جوشکاری لیزر از جمله عواملی است که بر رفتار جوش لیزر تأثیر مستقیم دارد. در این پژوهش تلاش شده است، بررسی‌های دقیقی بر تأثیر متغیرهای پهنای زمانی ضربانی و بسامد جوشکاری لیزر بر ریزساختار و عیوب جوش انجام شود. هدف از مطالعه دست‌یابی به جوش عاری از هرگونه عیوب در ساختار است. در جدول(2) متغیر بهینه به رنگ قرمز نشان داده شده است.

2-2- مشخصه‌یابی نمونه‌های جوش

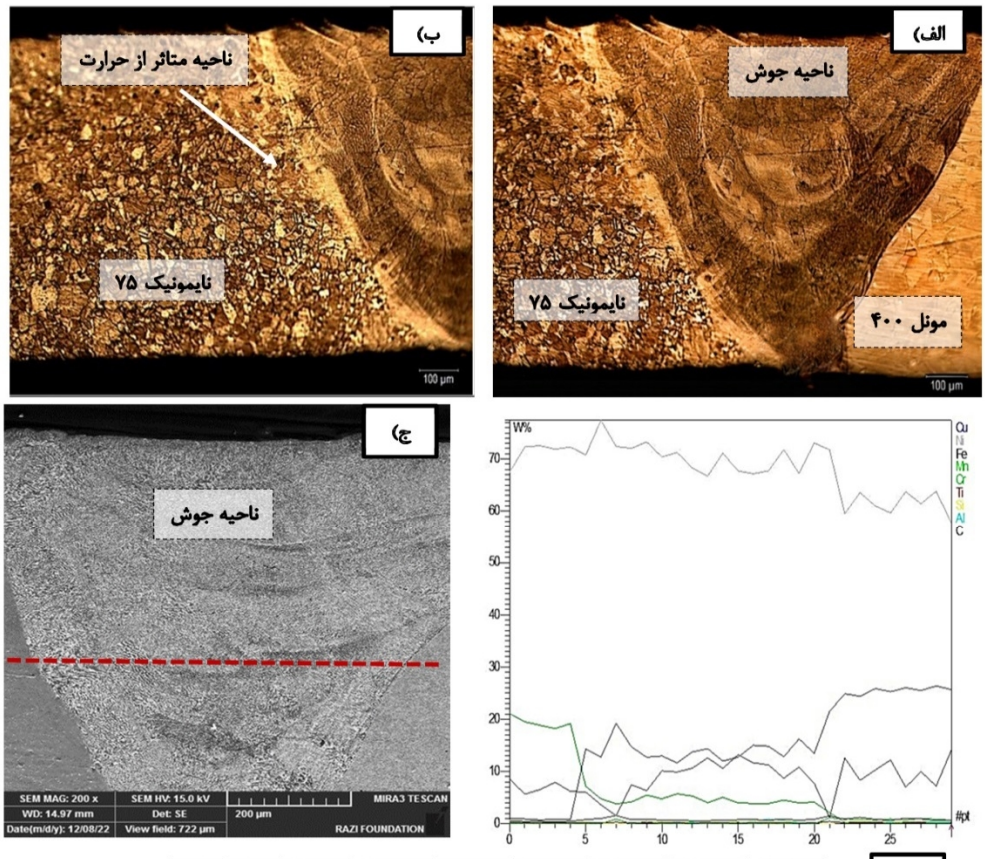
نمونه‌ها پس از انجام جوشکاری در راستای مقطع عرضی جوش، برش داده شده و در مانت جهت سنباده‌زنی قرار داده شد. جهت سمباده زنی از برگه‌های شماره 60 تا 3000 استفاده گردید. بعد از سنباده‌زنی، برای صیقل‌کاری نمونه‌ها از پودر آلومینای 0/05 میکرون استفاده شد. برای حکاکی نمونه‌ها از محلول سوپرکالینگ (supper Kaling) استفاده گردید. میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی به کار گرفته شد. همچنین برای بررسی ترکیب شیمیایی حوضچه جوش و ناحیه متأثر از حرارت و عناصر و فازهای موجود در این دو ناحیه از آنالیز شیمیایی EDS استفاده شد. جهت آگاهی از سختی جوش نمونه‌ها و بررسی خواص جوشکاری با متغیرهای مختلف و با توجه به کوچک بودن منطقه جوش مورد مطالعه از ریز سختی سنجی استفاده شد. ریزسختی موضع جوش و ناحیه متأثر از حرارت توسط دستگاه ریزسختی ویکرز با بار 100 گرم به انجام رسید. ریزسختی سنجی در جهت عمود بر سطح مقطع عرضی جوش نیز انجام شد و در نهایت میانگین نتایج به دست آمده گزارش شد. پس از انجام جوشکاری آماده‌سازی نمونه کشش شامل برش توسط ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتریکی انجام گرفت، زیرا به دلیل ضخامت بسیار کم، ماشین‌کاری و یا پانچ نمونه می‌تواند منجر به خم‌شدن آن و یا ایجاد تمرکز تنش در نمونه شود. ابعاد نمونه کشش نیز بر اساس استاندارد ASTM-E8 انجام شد.

3- نتایج و بحث

از جمله مهم‌ترین اقدام در مطالعه جوش‌پذیری یک ماده،

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.06]



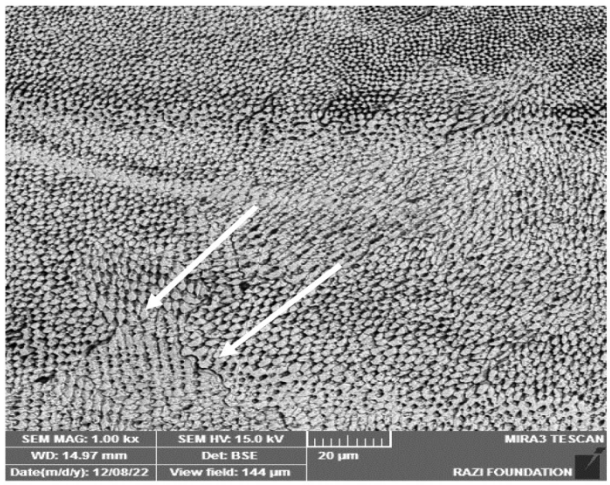
Elt	Line	Int	Error	K	Kr	W%	A%	ZAF
C	Ka	15.4	55.8214	0.0177	0.0164	7.30	27.59	0.2245
Ti	Ka	3.9	10.5177	0.0018	0.0017	0.17	0.16	0.9961
Cr	Ka	105.1	10.7926	0.0670	0.0621	5.86	5.12	1.0601
Mn	Ka	10.8	10.9301	0.0082	0.0076	0.69	0.57	1.1007
Fe	Ka	21.4	11.0676	0.0197	0.0182	1.53	1.25	1.1893
Ni	Ka	618.2	11.3426	0.8856	0.8211	84.45	65.31	0.9723
				1.0000	0.9271	100.00	100.00	

شکل 1- الف و ب- تصویر میکروسکوپ نوری از ناحیه جوش نمونه شماره 11
ج- آزمون EDSخطی از ناحیه جوش د-آزمون EDS نقطه‌ای از ناحیه جوش.

مطالعه خواص مکانیکی، فیزیکی و ریزساختار فلز پایه است، به دلیل اینکه این موضوع اثر بسزایی در خواص و ساختار جوش به دست آمده خواهد داشت. حضور عناصر کاربیدزای قوی مانند تیتانیوم، وجود کاربیدها مخصوصاً کاربید تیتانیوم (TiC) و کاربید کروم ($Cr_{23}C_6$) در ناحیه جوش امری بدیهی است. شمایل میکروسکوپ گسیل میدانی و نوری و همچنین آزمون EDS خطی و نقطه‌ای از خط جوش به ترتیب در شکل(1) آورده شده است. توزیع عناصر شیمیایی در سراسر جوش به خوبی توسط آزمون EDS خطی نشان داده شده است همچنین با استفاده مقدار درصد عناصر فلزات نامونیک و مونل تعیین شده طبق جدول(1) و مقدار درصد عناصر بدست آمده از آنالیز نقطه ای از مرکز جوش، درصد رقت فلز نایمونیک و مونل در جوش به ترتیب 38 و 62 درصد خواهد بود و ترکب شیمیایی فلزجوش بیشتر به فلز مونل نزدیک‌تر است. ساختار درون دانه-ها در مرز ناحیه جوش از دندریت‌های ستونی تشکیل شده است که به طرف درون ناحیه جوش کشیده شده‌اند. امّا این ریزساختار درون دانه‌های با حرکت به طرف مرکز خط جوش تغییر می‌کند. در مرکز خط جوش داخل هر دانه مجموعه‌ای از دندریت‌های هم‌جهت مشاهده می‌شود. دندریت‌های تشکیل شده بسته به جهت مرجح در جهات مختلف جوانه زده و رشد می‌کنند. با توجه به خصوصیات ریزساختاری و تجزیه و تحلیل تصاویر توسط SEM حضور فازهای ثانویه در ریزساختار داخل

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.06]

فلزجوش مشاهده گردید. این فازها معمولاً در امتداد مرزهای انجمادی قرار گرفته‌اند. همانطور که در شکل(2) مشاهده می‌شود، این رسوب نشانگر یک ساختار پیوسته است که به صورت شکل کشیده در مرزها دیده می‌شود.



شکل 2- رسوبات مختلف تشکیل شده در نواحی مختلف ریزساختار جوش نمونه

مورفولوژی فاز تشکیل شده در این نواحی به میزان حرارت ورودی و نرخ سرمایش حوضچه جوش بستگی دارد. تجزیه شیمیایی عنصری خطی از این فازهای نشانگر غلظت بالا عنصر تیتانیوم است. همچنین عناصر کروم و نیکل در داخل رسوب کاهش یافته و به اطراف پس زده شده است. از نظر شکل ظاهری، این رسوبات به صورت پیوسته که در امتداد مرز انجمادی بین دانه‌ها گسترش یافته است منجمد شده‌اند. کربن به دلیل اینکه یک اتم محلول بین نشین است دارای انرژی فعال‌سازی نفوذ بسیار کمتری در مقایسه با آهن و کروم است. علاوه بر این مشاهده شده است که ضریب جدایش کربن در آلیاژهای نیکل بسیار کمتر از آهن و کروم و در حدود 0/2 است. در نتیجه انتظار می‌رود که حتی با وجود نفوذ اتم بین نشین کربن به درون دندریت‌ها پس از انجماد (نفوذ بازگشتی)، در مقایسه با دیگر عناصر با شدّت بیشتری دچار جدایش شود. در حقیقت مشاهده شده است که کربن در آلیاژهای نیکل دارای بیشترین حد جدایش است. لذا مشاهده ترکیبات کاربیدی در مرز دندریت‌ها پس از انجماد آلیاژ جوش داده شده امری عادی است.

3-1- عیوب جوشکاری

انبساط حرارتی ابرآلیاژها همانند فولاد کربنی است ولی هدایت حرارتی ابرآلیاژها بسیار کمتر از فولاد کربنی است و حرارت جوشکاری در فلز اطراف جوش حین جوشکاری ابرآلیاژها، سریع پخش نمی‌شود. آلیاژهای نیکل- آهن- کروم به صورت تک فاز و آستنیتی منجمد می‌شوند و در نتیجه به جدایش عناصر آلیاژی و ناخالصی‌ها مستعد هستند. اینگونه جدایش‌ها سبب می شود تا این آلیاژها به ترک‌های ذوبی در حین انجماد حساس باشند. در تشکیل ترک‌های ذوبی عوامل مکانیکی و متالورژیکی به طور همزمان دخیل هستند. در اثر ذوب و انجماد غیرتعادلی حوضچه جوش، عناصر آلیاژی با دمای ذوب بالا مانند کروم و تیتانیوم به مرزها پس‌زده می‌شوند و جدایش رخ می‌دهد. در اثر این جدایش در مرزها، ترکیب یوتکتیکی و یا نزدیک به یوتکتیک پدید می‌آید که دمای ذوب پایینی دارد. همچنین در مراحل‌نهایی انجماد، هنگامی‌که فیلم مذاب باقیمانده در نواحی بین دندریتی به صورت یک فیلم پیوسته پخش می‌شود. در اثر این پدیده کرنش‌های انقباضی در این نواحی ایجاد می‌شوند که فلز زمینه نمی‌تواند نیروهای ناشی از آن‌ها را تحمل کرده و این امر منجر به ایجاد ترک ذوبی می‌گردد. شکل(3) ترک ذوبی ایجاد شده را در نمونه شماره 9 نشان می‌دهد.



شکل 3 - ریزساختار فلزپایه، منطقه متأثر از حرارت و ترک ذوبی نمونه شماره 5.

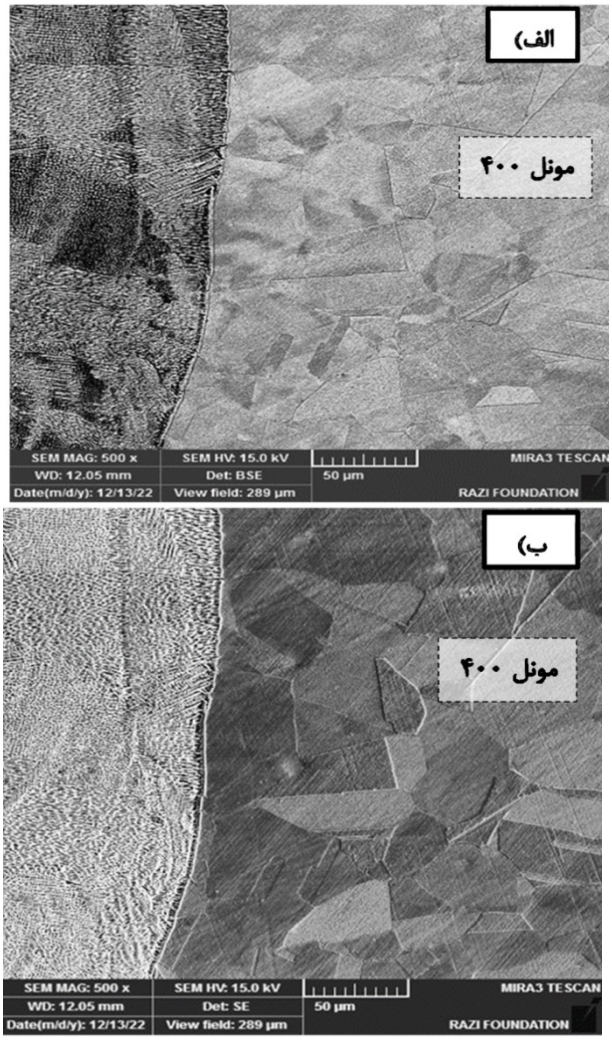
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.06]

3-2- راهکارهای حذف ترک‌های ذوبی

همانطور که اشاره شد، عواملی مانند جدایش عناصر آلیاژی و تشکیل رسوبات غنی از تیتانیوم و کروم در ریزساختار جوش نایمونیک به مونل به دلیل رسوب ترکیبات ثانویه، به همراه تنش‌های پسماند حاصل از انجام جوشکاری، ترک ذوبی ایجاد می‌شود. در نتیجه برای حذف ترک لازم است که متغیرها و شرایط جوشکاری به گونه‌ای انتخاب شوند که با کاهش تنش‌های پسماند و جدایش از تشکیل پیوسته این رسوبات در مرزها جلوگیری شود. استفاده از پیشگرم به میزان زیادی سبب کاهش تنش‌های حرارتی ناشی از شیب دمایی، توزیع یکنواخت حرارت در دو سمت اتصال و کاهش عامل مکانیکی ایجاد ترک ذوبی می‌گردد. همچنین تأثیر مطلوب آن در کاهش شیب حرارتی طول ترک ذوبی کاهش و رفع شد (شکل4).

مزیّت اصلی پیش‌گرم سرعت سرمایش پایین در ناحیه جوش می‌باشد که این امر منجر به انعطاف‌پذیری بالاتر و مقاومت بیشتر به ترک انجمادی می‌شود. با افزایش دما قفل نابجایی‌ها آزاد شده و نابجایی‌ها راحت‌تر می‌توانند حرکت کنند و در نتیجه چقرمگی ماده افزایش می‌یابد. با افزایش دمای پیش‌گرم، نسبت میزان ناحیه هم محور به کل حوضچه جوش افزایش می‌یابد. این پدیده اینگونه توجیه می‌شود که با پیش‌گرم کردن قطعه، گرادیان دمایی (G)، کاهش می‌یابد چون با افزایش دمای پیش‌گرم شیب حرارتی بین دو نقطه کمتر می‌شود و با کاهش گرادیان دمایی، تمایل به تشکیل ناحیه هم محور، افزایش می‌یابد. افزایش ناحیه هم محور جوش را می توان با نسبت G/R بیان کرد به گونه‌ای که با افزایش دمای پیش‌گرم نسبت G/R کاهش می‌یابد و تمایل به تشکیل دانه‌های هم محور افزایش می‌یابد و از طرفی با کاهش G×R، نرخ سرمایش کاهش می‌یابد و تمایل به تشکیل دانه‌های درشت افزایش پیدا می‌کند. گرادیان دمایی (G) و سرعت رشد (R) هر دو بر ریزساختار حاصل از انجماد آلیاژها تأثیر می‌گذارند. به طوری که نسبت G/R نوع ریزساختار انجمادی و حاصل G×R اندازه دانه را تعیین می‌کند. نتایج نشان داده است ساختار دندریتی ستونی که در جهت گرادیان دمایی رشد می‌کند نسبت به ساختار دندریتی هم‌محور، به تشکیل ترک حساس‌تر است چون تغذیه مذاب، بین دانه‌های هم محور، حتی در انتهای انجماد آسان‌تر می‌باشد و از ایجاد ترک جلوگیری می‌کند.



شکل 4- ریزساختار فلز پایه، منطقه متأثر از حرارت و حذف ترک ذوبی، نمونه شماره 11

همچنین ایجاد ترک از دانه‌های ستونی راحت‌تر آغاز می‌شود، زیرا در این ناحیه تنش کششی باعث ایجاد ترک در میان دانه‌های ستونی می‌شود. تمایل به ترک انجمادی زمانی‌که دانه‌های ستونی بزرگ، کوچک می‌شوند و یا دانه‌های هم محور کوچک‌تر شوند، به میزان زیادی کاهش خواهد یافت. گفته می‌شود که این کاهش تمایل به تشکیل ترک، ناشی از کاهش کرنش در هر مرزدانه می‌باشد. افزایش دمای پیش‌گرم کردن منجر به افزایش سهم مناطق هم محور ریز و درشت به قیمت از

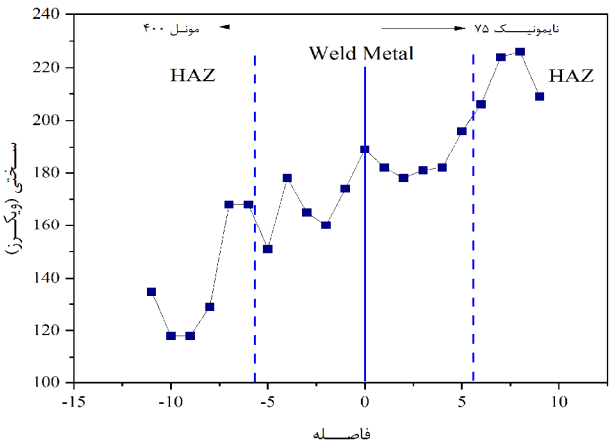
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.06]

بین رفتن منطقه ستونی، خواهد شد. به عبارت دیگر پیش‌گرم کردن اثر بسزایی بر بهبود چقرمگی ناحیه متأثر از حرارت از طریق اصلاح دانه‌ای آن می‌گذارد.

3-3- خواص مکانیکی اتصال غیرهمجنس

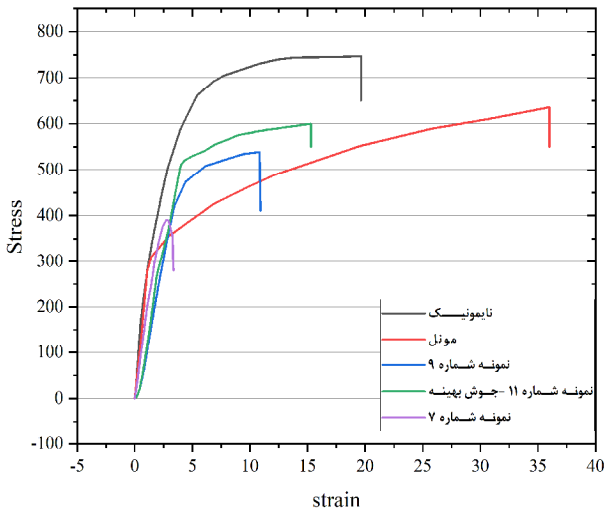
تغییر ریزساختار بر خصوصیات مکانیکی آلیاژ، نظیر سختی، استحکام کششی و استحکام شکست آن تأثیر می‌گذارد. مشخص شده است که در آلیاژهای جوش داده شده، پدیده‌هایی مانند رشد دانه و ایجاد فازهای ترد بین فلزی در مرزدانه‌ها موجب کاهش استحکام و چقرمگی آن‌ها می گردد.

با توجه به نمایه ریز سختی در مقطع جوش مطابق شکل(5)، برای نمونه شماره 11 می‌توان دید که در این نمونه سختی فلزجوش کمتر از سختی فلزات پایه نایمونیک و بیشتر از سختی فلزپایه مونل است. همچنین سختی نایمونیک به دلیل داشتن عناصر کاربید زا بیشتر از مونل است. در ناحیه متأثر از حرارت مونل 400، افزایش سختی مشاهده می‌گردد. دلیل این امر، رسوب کاربیدهای MC در این ناحیه است. در ناحیه متأثر از حرارت فلزپایه نایمونیک نیز مطابق جوشکاری همجنس به دلیل انحلال رسوبات و فازهای استحکام‌بخش، مقدار سختی کمی افت پیدا کرده و سپس با دور شدن از منطقه متأثر از حرارت افزایش یافته است.



شکل 5- نمایه ریز سختی در مقطع جوش نمونه شماره xzs.11

نمونه‌هایی که مورد آزمون کشش قرار گرفتند شامل نمونه جوش بهینه با متغیرهای نمونه شماره 11، یک نمونه جوش ترک‌دار (نمونه شماره 7)، نمونه جوش شماره 9 و همچنین نمونه‌های فلز پایه دو آلیاژ است (شکل6). پایین بودن استحکام شکست در نمونه بهینه شماره 11 به علت تشکیل حفره‌های ریز در ریزساختار آن است، که با توجه به شکل 7 قابل مشاهده است. استحکام شکست نمونه‌های جوش داده شده در اثر درشت شدن دانه‌های ناشی از افزایش حرارت ورودی جوشکاری کاهش یافته است. علاوه بر این همانطور که پیش‌تر اشاره گردید، در اثر ریز جدایش، ترکیبات کاربیدی و ترکیبات یوتکتیک در امتداد مرزهای دندریتی جوانه زده و رشد می‌کنند. این ذرات با وجود داشتن حالت منفصل و پراکنده در ریزساختار، حین اعمال تنش سبب گسسته شدن دندریت‌ها از همین نقاط می‌گردند. (بررسی‌های انجام شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان می‌دهند که سطح شکست در برخی نقاط مشخصه‌های شکست نرم را داشته ولی قسمت بیشتر شکست نمونه به‌صورت ترد از میان نواحی بین دندریتی اتفاق افتاده است). دانه‌ها و دندریت‌های درون دانه‌های ناحیه جوش به‌خصوص با نزدیک شدن به سطح شکست در راستای محور کشش کشیده شده‌اند. تجزیه شیمیایی عنصری نقطه A در شکل(6) نشان داده شده است.



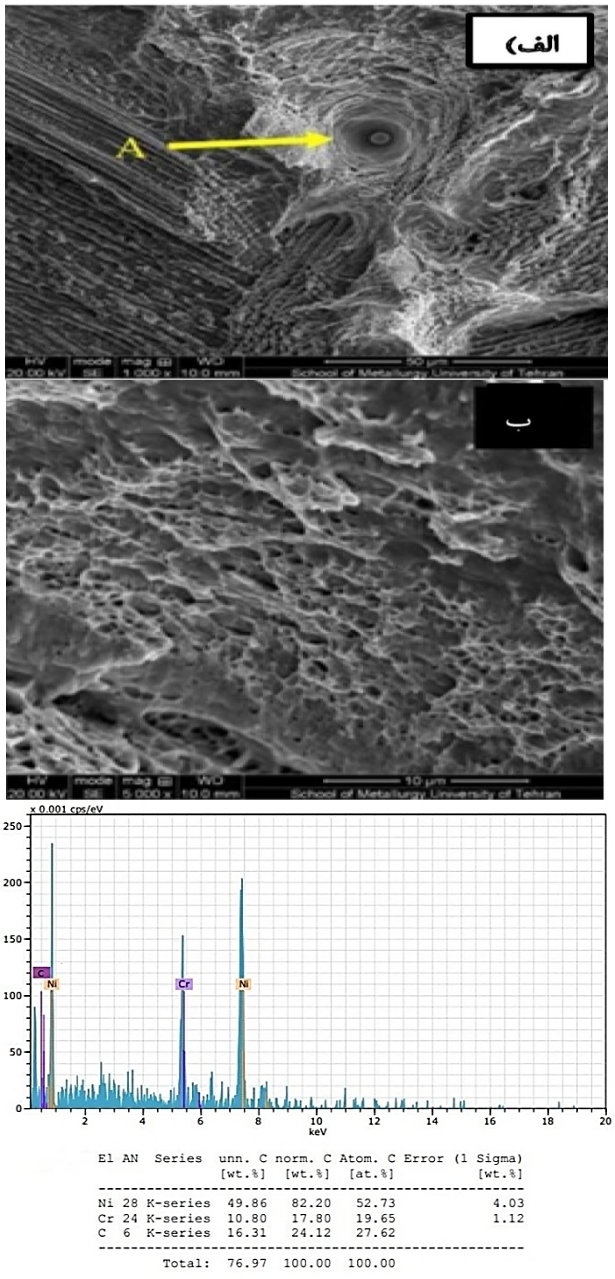
شکل 6- نتایج آزمون کشش نمونه‌های شماره7،9،11 و فلزپایه مونل400، نایمونیک 75.

همانطور که انتظار می‌رفت در این نقطه A کاربید غنی از تیتانیوم و کروم مشاهده شد که حین انجماد در داخل حفره به

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.06]

دام افتاده است. همچنین در شکل(7) نتایج آنالیز شیمیایی طیف‌سنجی پراش پرتوی ایکس از سطح شکست نمونه شماره 11 آورده شده است.



El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Ni	28	K-series	49.86	82.20	52.73	4.03
Cr	24	K-series	10.80	17.80	19.65	1.12
C	6	K-series	16.31	24.12	27.62	
Total:			76.97	100.00	100.00	

شکل 7- الف و ب- تصویر میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی حاصل از شکست نگاری نمونه آزمون کشش ج- آزمون EDS نقطه‌ای از نقطه A.

4- نتیجه‌گیری

-ساختار درون دانه‌ها به‌صورت دندریتی است، مگر در نقاط نزدیک به فلزپایه مونل که ساختار به‌صورت سلولی تشکیل شده است. رسوبات متعددی در نواحی بین دندریتی و مرزدانه‌ها در اثر جدایش تشکیل یافته‌اند.

- برای رفع تخلخل جوش باید متغیرهای جوشکاری به نحوی انتخاب شوند که شیب دمایی کم شده و در نتیجه نیروهای مارانگونی و شناوری در حوضچه جوش کاهش یابند.

- جدایش در همه نمونه‌های جوش داده شده مشاهده شد، همچنین رسوبات تشکیل شده در فرایند جوشکاری از نوع کاربیدهای غنی از تیتانیوم و کروم بود.

-در اعمال حرارت ورودی کم به ناحیه جوش، به تدریج طول و ضخامت ترک‌های ذوبی کاهش بسیار یافته و حذف شد.

-خصوصیات مکانیکی آلیاژها پس از اتصال کاهش یافته و در همه نمونه‌های جوش داده شده دارای استحکام شکست تقریباً حدود 95 درصد فلزپایه مونل 400 و 80 درصد فلزپایه نایمونیک 75 بودند. نمونه‌های جوش داده شده دارای درصد ازدیاد طول کمی بودند و سطح شکست در همه نمونه‌ها به‌صورت دندریتی است.

- سختی فلزجوش غیرهمجنس از فلزپایه نایمونیک کمتر و از فلزپایه مونل بیشتر است. همچنین سختی در ناحیه متأثر از حرارت نایمونیک افزایش و سپس کاهش یافته است.

منابع

1-Knock NO. Characterization of Inconel 718: Using Gleeble and Varestraint testing methods to determine the weldability of Inconel 718. MSc thesis. Nathaniel Oscar Knock, California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 2010.

2-John N. DuPont, John C. Lippold SDK. Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys. John Wiley & Sons, Inc. 2009.

3-Steen, W.M. and Mazumder, J. Laser material processing. 4th Edition, 2010: Springer-Verlag London Limited 2010.

4-Kim, J.-D., Kim, C.-J. and Chung, C.-M. Repair welding of etched tubular components of nuclear power plant by Nd: YAG laser. Journal of Materials Processing Technology, 2001. 114(1): p .51-56.

5-Berretta, J.R., Rossi, W.D., Neves, M.D.M.D. Almeida, I.A.D., Junior, N.D.V., Pulsed Nd: YAG laser welding of AISI 304 to AISI 420 stainless steels. Optics and Lasers in Engineering,2007.45(9): pp. 960-966.

6-Pang, D., P. Molian, Q-Switch Nd:YAG laser welding of AISI 304 stainless steel foils. Materials Science and Engineering: A., 2008. 486(1-2): p. 680-685.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.06]

7-Kumar, G.S., Saravanan, S., Vetriselvan, R., Raghukandan, k., Numerical and experimental studies on the effect of varied pulse energy in Nd: YAG laser welding of Monel 400 sheets. Infrared Physics & Technology, 2018. 93: p. 184-191.977.
8-Ramakrishnan, H. Veluchamy, B., Rajaram, S., Ravichandran, M. Experimental investigation on properties of dissimilar laser welding of AISI 316L to monel 400. Materials Today: Proceedings, 2020. 33: p. 4059-4064.
9-Kumar, G.S., Raghukandan, k., Saravanan, S., Sivagurumanikandan, N., Optimization of parameters to attain higher tensile strength in pulsed Nd: YAG laser welded Hastelloy C-276 – Monel 400 sheets. Infrared Physics & Technology, 2019. 100: p. 1-10.
10-Mei, Y., Liu, Y., Liu, C., Li, C.,Yu, L., Guo, Q., Li, H., Effect of metal and welding speed on fusion zone microstructure and HAZ hot-cracking of electron-beam welded Inconel 718. Materials & Design, 2016. 89: p. 964-977.
11-Ono, Y., Yuri, T. Nagashima, N., Sumiyoshi, H., Ogata, O., Nagao, N., High-cycle fatigue properties of Alloy 718 base metal and electron beam welded joint. Physics Procedia, 2015. 67: p. 1028-1035.
12- Shakil, M., Microstructure and hardness studies of electron beam welded stainless steel 304L and Inconel 625. Vacuum, 2014. 110: p. 121-126.
13-Chiang MF, Chen C. Induction-assisted laser welding of IN-738 nickel – base superalloy. Material Chemistry & Physics. 2009;114:415 – 419 .

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.06]