

Investigation of Microstructural and Mechanical Properties Dissimilar Joint Between IN738 Superalloy and 17-4 PH Steel Using Pulsed Nd:YAG Laser Welding

Masoud Mehrpourian, Ehsan Shakouri, Payam Saraeian* 

Department of Mechanical Engineering, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Article History

Received: August 07, 2025

Revised: September 01, 2025

Accepted: September 13, 2025

ePublished: October 24, 2025

ABSTRACT

This study investigates pulsed Nd:YAG laser welding for dissimilar joining of nickel-based superalloy IN738 and precipitation-hardened stainless steel 17-4 PH. The main objective of this study is to investigate the effect of welding process parameters on the mechanical and microstructural properties of the joint. Scanning electron microscopy (SEM) revealed that in IN738 superalloy due to its higher heat capacity and lower thermal conductivity cellular growth transitioned into columnar coaxial dendrites. In contrast, the steep thermal gradient in 17-4 PH stainless steel promoted planar growth, forming fine grains with a columnar structure. Increasing pulse frequency and duration enlarged the weld pool dimensions while reducing Length of solidification cracks and heat-affected zone (HAZ) cracking. Higher welding speeds decreased weld pool size; at 8.3 mm/s, solidification and HAZ crack lengths were reduced by 92% and 83%, respectively. However, further increases in welding speed (up to 13 mm/s) significantly intensified HAZ cracking. The results showed that, unlike the welding speed, increasing the frequency and pulse duration resulted in an increase in the microhardness of the samples. Small punch test (SPT) results demonstrated that samples with fine, coaxial grains and uniform precipitation phases (γ' and MC carbides) exhibited the highest strength and toughness. These findings provide a foundation for designing effective repair and joining processes in energy and aerospace applications.

Keywords: Pulsed Laser Welding, Dissimilar Joint, IN738 superalloy, 17-4PH stainless steel, Microstructural Characterization.

How to cite this article

Mehrpourian M, Shakouri E, Saraeian P, Investigation of Microstructural and Mechanical Properties Dissimilar Joint Between IN738 Superalloy and 17-4 PH Steel Using Pulsed Nd:YAG Laser Welding. Modares Mechanical Engineering; 2025;25(08):515-528.

*Corresponding author's email: P_saraeian@iau-tnb.ac.ir

*Corresponding ORCID ID: 0000 0001 7035 112X



Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.



بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیرهمجنس میان سوپرآلیاژ IN738 و فولاد PH 4-17 به روش لیزر Nd:YAG پالسی

مسعود مهرپوریان، احسان شکوری، پیام سرائیان* 

گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

این پژوهش به بررسی جوشکاری لیزر پالسی Nd:YAG برای اتصال ناهمجنس سوپرآلیاژ پایه نیکل IN738 به فولاد زنگ‌زن رسوب‌سخت‌شونده PH 4-17 می‌پردازد. هدف اصلی این مطالعه، بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند جوشکاری بر خواص مکانیکی و ریزساختاری اتصال می‌باشد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM)، نشان داد که در سوپرآلیاژ IN738، به دلیل ظرفیت گرمایی بالاتر و هدایت حرارتی کمتر، رشد سلولی به دندریته‌های ستونی هم‌محور تبدیل گردید. در مقابل، در فولاد زنگ‌زن PH 4-17، شیب دمایی بالا سبب رشد صفحه‌ای و تشکیل دانه‌های ریز با ساختار ستونی شد. افزایش فرکانس و مدت زمان پالس، افزایش ابعاد حوضچه جوش و کاهش طول ترک‌های انجمادی و ترک در ناحیه متأثر از حرارت (HAZ)، را در پی داشت. افزایش سرعت جوش کاری، ابعاد حوضچه جوش را کاهش داد. با افزایش سرعت جوشکاری تا ۸/۳ میلی‌متر بر ثانیه، طول ترک‌های انجمادی و ترک در ناحیه (HAZ)، به ترتیب در حدود ۹۲٪ و ۸۳٪ کاهش یافت و با ادامه روند افزایش سرعت جوشکاری تا ۱۳ میلی‌متر بر ثانیه، طول ترک در ناحیه (HAZ)، افزایش چشمگیری نشان داد. نتایج نشان داد، بر خلاف سرعت جوشکاری، افزایش فرکانس و مدت زمان پالس، افزایش میکروسختی نمونه‌ها را به دنبال داشته است. نتایج آزمون پانچ کوچک (SPT) نشان داد، نمونه‌های حاوی دانه‌های ریز هم‌محور با توزیع یکنواخت فازهای رسوبی (۷' و کاربیدهای MC)، بالاترین استحکام و چقرمگی را دارند. این یافته‌ها می‌توانند مبنای طراحی فرآیندهای تعمیر و اتصال مؤثر در بخش انرژی و صنایع هوافضا قرار گیرند.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۶

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۱۰

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۲

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۸/۰۲

کلیدواژه‌ها: جوشکاری لیزری پالسی، اتصال غیرهمجنس، سوپرآلیاژ IN738، فولاد زنگ‌زن PH 4-17، ریز ساختار.

نحوه ارجاع به این مقاله

مهرپوریان مسعود، شکوری احسان، سرائیان پیام، بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیرهمجنس میان سوپرآلیاژ IN738 و فولاد PH 4 به روش لیزر Nd:YAG پالسی، مهندسی مکانیک مدرس. ۵۲۸-۵۱۵:۰۸(۲۵):۱۴۰۴

*پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: P_saraeian@iautn.ac.ir

*شناسه اراکید نویسنده عهده‌دار مکاتبات: 0000 0001 7035 112X



۱- مقدمه

پره توربین‌های گازی در نیروگاه‌های برق، معمولاً در معرض دمای بالا و تنش‌های مکانیکی ناشی از خزش و خستگی حرارتی قرار دارند [1-3]. پره‌های ردیف اول این توربین‌ها عمدتاً از سوپرآلیاژهای پایه نیکل ساخته می‌شوند که در میان آن‌ها، اینکونل IN738 به دلیل درصد بالای فاز رسوبی γ' از کاربرد گسترده‌تری برخوردار است [4]. حضور ذرات γ' با ساختار L_{12} ، موجب محدودیت حرکت نابجایی‌ها شده و در نتیجه، مقاومت خزشی و حرارتی این آلیاژ را در دماهای بالا به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد [5-7].

با توجه به هزینه بالای تولید قطعات جدید از این آلیاژ، استفاده از اتصالات غیرهمجنس با آلیاژهای مقرون به‌صرفه‌تر مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا، فولاد زنگ‌زن رسوب‌سخت‌شونده PH 17-4 به‌عنوان گزینه‌ای مناسب مطرح است، این آلیاژ به دلیل استحکام بالا، قابلیت عملیات حرارتی، چقرمگی و مقاومت به خوردگی، کاربرد گسترده‌ای در صنایع دریایی، نفت و گاز، هوافضا، نظامی و نیروگاهی دارد [8, 9].

با وجود اینکه جوشکاری یکی از روش‌های رایج اتصال و ترمیم قطعات محسوب می‌شود، این روش در ایجاد اتصال در سوپرآلیاژها و فولادهای زنگ‌زن با چالش‌هایی نظیر حساسیت به ترک گرم در ناحیه متأثر از حرارت (HAZ) مواجه است [10-12]. یکی از راهکارهای مؤثر برای کاهش این مشکلات، بهره‌گیری از فناوری‌های جوشکاری با چگالی توان بالا مانند جوشکاری با پرتو لیزر است. این روش، در مقایسه با جوشکاری قوسی متداول، دارای مزایای متعددی نظیر، امکان جوشکاری بدون فلز پرکننده، سهولت اتوماسیون، سرعت جوشکاری بالا، کاهش چشمگیر گرمای ورودی، نرخ تولید بالا، عمق نفوذ و دقت بالاتر می‌باشد [13].

استفاده از فناوری‌های جوشکاری با چگالی انرژی بالا، به دلیل اعمال حرارت موضعی، تنش‌های پسماند و مناطق متأثر از حرارت را کاهش می‌دهند. در مقایسه با سایر روش‌های جوشکاری، استفاده از لیزر پالسی Nd:YAG به دلیل کاهش حرارت ورودی و به تبع آن ناحیه متأثر از حرارت باریک‌تر و عدم ایجاد ترک، خواص مکانیکی بهتری ارائه می‌دهد [14-17].

در فرآیند جوشکاری لیزر پالسی، تشکیل سوراخ کلید مهمترین نقش را در افزایش نرخ ذوب و عمق نفوذ ایفا می‌کند [18] و تنظیم و کنترل پارامترهای توان و چگالی انرژی لیزر، سرعت جوشکاری، زمان و فرکانس پالس، قطر و زاویه پرتو لیزر و نرخ جریان گاز محافظ در جوشکاری لیزری نقش کلیدی در خواص مکانیکی اتصال ایفا می‌نمایند [19-25].

نتایج پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند که افزایش مدت زمان پالس و فرکانس لیزر، سبب بهبود استحکام کششی در فولاد ۳۱۶ می‌شود [26] و افزایش سرعت جوشکاری در فولادهای دوفازی،

جدول ۱ ترکیب شیمیایی و درصد وزنی عناصر سوپرآلیاژ IN738

Table 1 Chemical composition and weight percentage of elements of IN738 superalloy

Elements	Co	C	Mo	Nb	W	Ta	Ti	Al	Cr	Ni
IN738	9.6	0.1	1.5	0.08	4	2.5	4.7	3.1	14.1	Bal.

جدول ۲ ترکیب شیمیایی و درصد وزنی عناصر فولاد 17-4PH

Table 1 Chemical composition and weight percentage of elements of 17-4PH Steel

Elements	C	Si	Mn	P	Cu	Cr	Ni	Mo	Fe
17-4PH	0.07	0.7	1.5	0.04	3.8	16.2	4.2	0.6	Bal.

موجب ریزدانه شدن ساختار و افزایش استحکام و چقرمگی اتصال شده است [27]. همچنین، انجام عملیات حرارتی، نقش مؤثری در بهبود ریزساختار و افزایش کیفیت نهایی اتصالات ایجاد شده طی جوشکاری با پرتو لیزر ایفا می‌نماید [28-30].

در جوشکاری لیزری آلیاژ AZ31B نیز، استفاده از لیزر پالسی منجر به گسترش ناحیه مذاب، بهبود توزیع تنش و ایجاد ترکیبی از شکست نرم و ترد در ناحیه گسیختگی شده است. همچنین پیش‌گرمایش و همپوشانی مناسب پالس‌ها، موجب اصلاح ساختار دانه‌ای گردیده است [31].

این مطالعه با هدف امکان‌سنجی جوشکاری غیرهمجنس میان سوپرآلیاژ اینکونل ۷۳۸ و فولاد PH 17-4 با استفاده از جوشکاری خودزای لیزر پالسی Nd:YAG کم‌توان انجام شده است. هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر پارامترهای فرکانس و مدت زمان پالس و سرعت جوشکاری بر خواص مکانیکی، عیوب متالورژیکی و ریزساختار در ناحیه اتصال است. رویکرد حاضر با کنترل حرارت ورودی و بهبود یکنواختی ریزساختار، خواص مکانیکی اتصال را با وجود تفاوت‌های ترمومکانیکی و ریزساختاری سوپرآلیاژ اینکونل ۷۳۸ و فولاد PH 17-4 ارتقاء می‌دهد که تا کنون در ادبیات علمی پیشین گزارش نشده است.

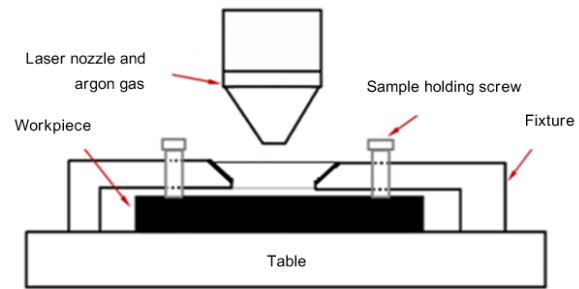
۲- روش تجربی

در این تحقیق، جهت بررسی و تحلیل نحوه تأثیر پارامترهای فرآیند جوشکاری لیزر پالسی بر کیفیت اتصال، به بررسی تأثیر پارامترهای فرکانس پالس، مدت زمان پالس و سرعت جوش بر کیفیت نهایی اتصال ایجاد شده میان سوپرآلیاژ IN738 و فولاد زنگ‌زن رسوب‌سخت‌شونده PH 17-4 پرداخته شده است. ترکیب شیمیایی مواد پس از شناسایی طی آزمون اسپکتروسکوپی نشر نوری در جدول ۱ و ۲ ارائه گردیده است. سپس، نمونه‌ها با استفاده از گیوتین و وایرکات در ابعاد (۳×۵×۳۰ میلی‌متر) برش داده شدند. پیش از جوشکاری، سطح نمونه‌ها با سنباده شماره ۸۰ پرداخت شد و پس از آن با استون تمیز و سپس خشک گردید. عملیات جوشکاری خودزا با لیزر Nd:YAG پالسی (مدل IQL-10 ساخت شرکت پرتو پردازش مواد تهران) با حداکثر توان ۴۰۰ وات

جدول ۳ طراحی آزمایش

Table 3 Experimental design

No.	Series	Sample	PF (HZ)	PD (ms)	S (mm/s)	P _{AVG} (w)
1	A	A1	11	7	8.3	148
2		A2	14	7	8.3	173
3		A3	17	7	8.3	195
4		A4	20	7	8.3	209
5		A5	23	7	8.3	253
6	B	B1	20	4	8.3	153
7		B2	20	5	8.3	171
8		B3	20	6	8.3	190
9		B4	20	8	8.3	238
10		C1	20	7	5.6	209
11	C	C2	20	7	6.7	209
12		C3	20	7	9.3	209
13		C4	20	7	13	209



شکل ۱ الف) شماتیک فرآیند جوشکاری لیزری

Fig. 1 Laser welding setup schematic.

انجام شد. در شکل ۱، شماتیک نحوه استقرار نمونه و فیکسچر در فرآیند جوشکاری لیزری ارائه شده است. به منظور کنترل دقیق توان و انرژی پالس، از پاورمتر مدل 5000W-LP و ژول سنج LA300W-Lp ساخت شرکت Ophir استفاده شد. همچنین جهت حفاظت از حوضچه مذاب و جلوگیری از اثرات مخرب اتمسفر در حین فرآیند، از دمش گاز آرگون با دبی ۱۰ لیتر بر دقیقه در محل جوش استفاده شد. فرآیند جوشکاری با تغییر در پارامترهای فرکانس پالس (PF)، مدت زمان پالس (PD) و سرعت جوشکاری (S)، انجام گردید. انتخاب این پارامترها بر اساس انجام پیش‌آزمایش و بررسی پژوهش‌های پیشین انجام گرفته است. همچنین به منظور کاهش خطاهای تجربی، برای هر حالت، آزمایشات با ۳ بار تکرار شد و میانگین مقادیر درج گردید. پارامترها و سطوح آزمایش، طی جدول ۳ ارائه شده است. جهت ارزیابی خواص مکانیکی اتصالات، مجموعه‌ای از آزمون‌های مکانیکی شامل ریزسختی سنجی، کشش و پانچ کوچک، انجام گردید. آزمون سختی سنجی مطابق با استاندارد ASTM E384-17 [32]، تحت بارگذاری ۵۰ گرم و طی زمان ۱۵ ثانیه روی حداقل ۱۰ نقطه با فاصله ۱ میلی‌متر در مقاطع طولی صیقل کاری شده اتصالات توسط دستگاه کالاسنت آزما انجام شد. آزمون کشش مطابق استاندارد ASTM E8 [33]، با استفاده از دستگاه Zwick/Roell Z100، با نرخ کشش ۲ میلی‌متر بر دقیقه با ۳ بار تکرار انجام گرفت و میانگین مقادیر جهت تحلیل نتایج ثبت گردید.

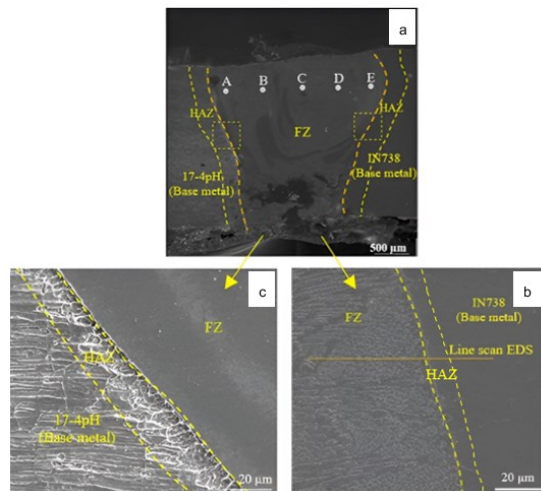
۳- تحلیل نتایج

در این مقاله ابتدا ریزساختار فلزات پایه پیش از جوشکاری لیزری بررسی شده تا مبنایی برای تحلیل تغییرات پس از جوش فراهم گردد. سپس ریزساختار پروفیل جوش و تأثیر پارامترهای جوشکاری لیزری بر آن مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین به منظور ارزیابی جوش‌پذیری، از روش‌های عددی برای پیش‌بینی نواحی حرارتی و احتمال ترک‌خوردگی به کار استفاده شده است. در نهایت، نتایج سختی و آزمون پانچ کوچک (SPT) برای بررسی خواص مکانیکی موضعی جوش تحلیل شده است.

۳-۱- بررسی فازی و ریز ساختاری فلزات پایه پیش از عملیات جوشکاری لیزری

جهت شناسایی فازهای موجود در مواد پایه، آزمون پراش پرتو ایکس (XRD) و بررسی ریز ساختار با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روی سوپرآلیاژ IN738 و فولاد زنگ‌زن PH 4-17 انجام شد. الگوی XRD مربوط به IN738 نشان‌دهنده حضور فاز زمینه

جهت بررسی مقاومت و تنش برشی در نمونه‌های جوشکاری شده، آزمون پانچ کوچک مطابق استاندارد ASTM E3205-20 [34]، با استفاده از دستگاه سنتام انجام گرفت. آزمایش با پانچ کروی با قطر ۳ میلی‌متر و نرخ بارگذاری ۰/۰۰۴ میلی‌متر بر ثانیه انجام گردید. به منظور بررسی ریزساختار ناحیه جوش و نواحی مجاور، مقاطع عرضی نمونه‌ها به شکل دیسک با قطر ۱۰ میلی‌متر و ضخامت ۰/۵ میلی‌متر با استفاده از وایرکات از ناحیه جوش برش داده شدند و پس از آماده‌سازی نمونه‌ها طی مراحل مانت گرم،



شکل ۳ الف) پروفیل جوش در اتصال غیرهمجنس سوپرآلیاژ IN738 و 17-4 PH، ب و ج) تصاویر بزرگنمایی شده.

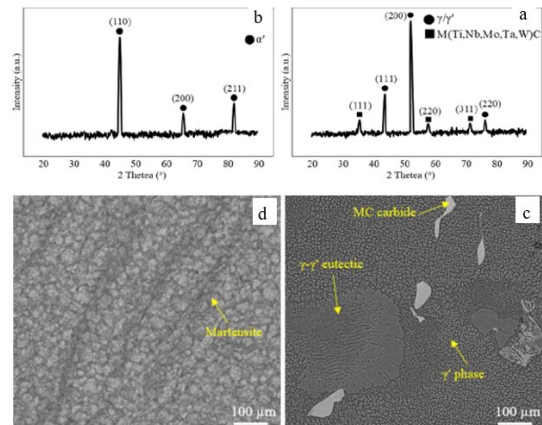
Fig. 3 a) Weld profile in the dissimilar joint of IN738 and 17-4 PH superalloys, b and c) magnified images.

جدول ۴ نتایج آنالیز طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS)

Table 4 Results of X-ray energy dispersive spectroscopy (EDS) analysis

Point	Fe	Ni	Cr	Co	Cu	Mo	W	Ta	Ti
A	64.2	8.4	20.4	1.7	4.2	0.9	0.2	-	-
B	49	18.7	23.5	2.6	4.1	1.1	0.7	0.1	0.2
C	27.6	33.8	26.7	4.1	3.8	1.6	1.0	0.6	0.8
D	20.7	40.5	24.2	7.1	1.9	1.6	1.7	1.1	1.2
E	17.3	49.1	17.9	7.9	0.5	1.8	2.4	1.5	1.6

سوپرآلیاژ IN738 به دلیل ظرفیت گرمایی بالاتر و هدایت حرارتی پایین‌تر، کندتر سرد شده و نرخ انجماد پایین‌تری دارد. این تفاوت‌ها تأثیر مستقیمی بر ریزساختار جوش و در پی آن خواص نهایی اتصال دارند [35]. مورفولوژی دانه‌ها در جوش به نسبت شیب دمایی جلوی جبهه انجماد (G) و نرخ پیشروی مرز انجماد (R) وابسته است. نسبت بالای G/R رشد صفحه‌ای و نسبت پایین‌تر آن رشد دندردیتی را ایجاد می‌کند. همچنین حاصل ضرب $G \times R$ نرخ کلی انجماد را تعیین کرده و دانه‌های ریزتر یا درشت‌تر را شکل می‌دهد [36]. در سمت IN738 به دلیل ظرفیت گرمایی بالاتر و هدایت حرارتی کمتر، رشد سلولی آغاز شده و به دندردیتی ستونی و هم‌محور تبدیل می‌شود. در مقابل، در 17-4 PH، با شیب دمایی بالا، رشد صفحه‌ای و دانه‌های ریزتر با ساختار ستونی غالب است [37]. از منظر ریزساختار پروفیل جوش، نمونه‌های A₃، A₄ و C₃ به‌عنوان نمونه‌هایی شاخص شناخته شدند که در آن‌ها تقریباً هیچ عیبی در ساختار جوش مشاهده نشد. همچنین، دانه‌های هم‌محور به‌ویژه در مرکز ناحیه جوش به خوبی شکل گرفته بودند که این امر بیانگر بهبود شرایط انجماد و کنترل مناسب پارامترهای جوشکاری است. در شکل ۴، تصویر میکروسکوپی ناحیه جوش نمونه A₄ ارائه گردیده است.



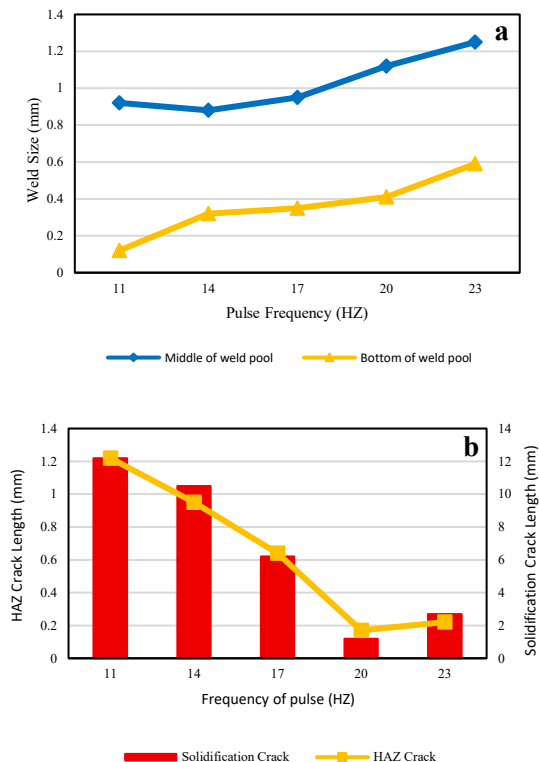
شکل ۲ تصاویر مربوط به آنالیز فازی و میکروسکوپ الکترونی سوپرآلیاژ IN738 (الف و ج)، تصاویر مربوط به آنالیز فازی و میکروسکوپ الکترونی 17-4 PH (ب و د).

Fig. 2 Phase analysis and electron microscopy images of IN738 superalloy (a, c), phase analysis and electron microscopy images of 17-4 PH (b, d).

(FCC) γ ، رسوبات سخت‌کننده γ' با ساختار $L1_2$ و همچنین کاربیدهای MC بین دانه‌ای است. در مقابل، فولاد 17-4 PH عمدتاً دارای فاز مارتنزیت (BCC) α' به‌همراه مقادیر کمی فاز آستنیت باقیمانده و رسوبات ریز مسی (ϵ -Cu) می‌باشد. این تفاوت در ساختارهای بلوری و نوع رسوبات، بر رفتار حرارتی، مکانیکی و قابلیت جوش‌پذیری در اتصال این دو آلیاژ تأثیرگذار بوده و باید در تحلیل‌های ریزساختاری جوش مدنظر قرار گیرد. در شکل ۲، تصاویر مربوط به آنالیز فازی و ریزساختار میکروسکوپی فلزات پایه ارائه گردیده است.

۳-۲- ریزساختار پروفیل جوش

تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM)، نشان دهنده ریزساختار یکپارچه‌تر با دانه‌های ریزتر در ناحیه ذوب نسبت به منطقه متأثر از حرارت می‌باشد (شکل ۳). جدول ارائه شده طی آنالیز طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS)، بر اساس استانداردهای ASTM E 1508 و ISO 22309 تنظیم گردیده است. بر اساس گزارش‌های مرجع و دستورالعمل‌های استاندارد، خطای نسبی این آنالیز برای عناصر سنگین‌تر معمولاً کمتر از ۵٪ و برای عناصر سبک‌تر در محدوده ۵-۲۰٪ متغیر است. آنالیز طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS)، نشان داد که در نواحی مجاور به IN738، عناصر Ni، Co، Mo، W و Ta غالب‌اند، در حالی که در مجاورت 17-4 PH، تجمع عناصر Fe، Cr و Cu بیشتر می‌باشد (جدول ۴). این توزیع غیریکپارچه عناصر در ناحیه جوش، بر خواص مکانیکی و میکروسکوپی ناحیه جوش تأثیرگذار است. در جوش غیرهمجنس بین سوپرآلیاژ IN738 و فولاد زنگ‌نزن 17-4 PH، تفاوت در خواص حرارتی دو فلز پایه، منجر به رفتارهای انجمادی متفاوتی می‌شود. بر خلاف فولاد زنگ‌نزن 17-4 PH،



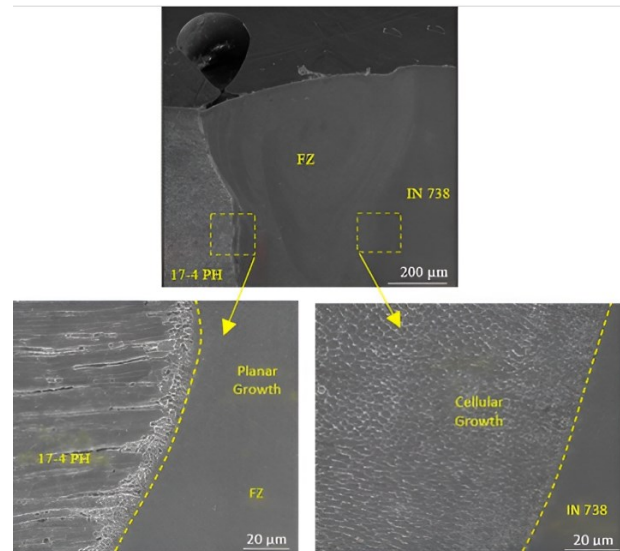
شکل ۵ الف تأثیر فرکانس پالس بر ابعاد جوش، **ب** تأثیر فرکانس پالس بر طول ترک انجمادی و طول ترک HAZ

Fig. 5 a) The effect of pulse frequency on weld size, **b)** The effect of pulse frequency on solidification crack length and HAZ crack length

افزایش فرکانس پالس سبب افزایش حرارت ورودی و کاهش نرخ سرد شدن در حوضچه جوش می‌شود. این کاهش نرخ سرمایش، گردادیان حرارتی و تنش‌های پسماند را کاهش داده و در نتیجه احتمال ترک‌های انجمادی کاهش می‌یابد. علاوه بر آن، با افزایش فرکانس، فاصله زمانی بین پالس‌ها کاهش یافته و هر پالس نقش پیش‌گرم برای پالس بعدی دارد. این پیش‌گرمایش تدریجی علاوه بر بهبود جذب انرژی لیزر توسط ماده، موجب یکنواختی توزیع دما، کاهش گردادیان و کرنش‌های حرارتی و در نتیجه کاهش احتمال ترک و تخلخل در ناحیه جوش به‌ویژه در ناحیه متأثر از حرارت می‌شود [41]. کاهش کرنش بر اساس معادله ۳ تبیین می‌شود.

$$\varepsilon_x = \Delta l / l_0 = \alpha_0 \cdot \Delta T \quad (3)$$

در معادله فوق α ضریب انبساط حرارتی و ΔT تغییرات دما در ناحیه جوش است [42]. همچنین، افزایش حرارت ورودی موجب افزایش حجم و سیالیت مذاب، به‌ویژه در شبکه‌های بین‌دندریتی می‌شود. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، این افزایش سیالیت در مرحله نهایی انجماد، پدیده بازپرکنندگی را تقویت کرده و به‌ویژه در نزدیکی مرز IN738 با تنش‌های انجمادی بالا، می‌تواند مانع تشکیل ترک شده و یا حتی سبب ترمیم ترک شود [37, 41].



شکل ۴ تصویر SEM از مورفولوژی دانه‌ها در نمونه A4، در دو سمت الف) سوپرآلیاژ IN738 و ب) فولاد 17-4 PH

Fig. 4 SEM image of grain morphology in sample A4, on two sides of a) IN738 superalloy and b) 17-4 PH steel

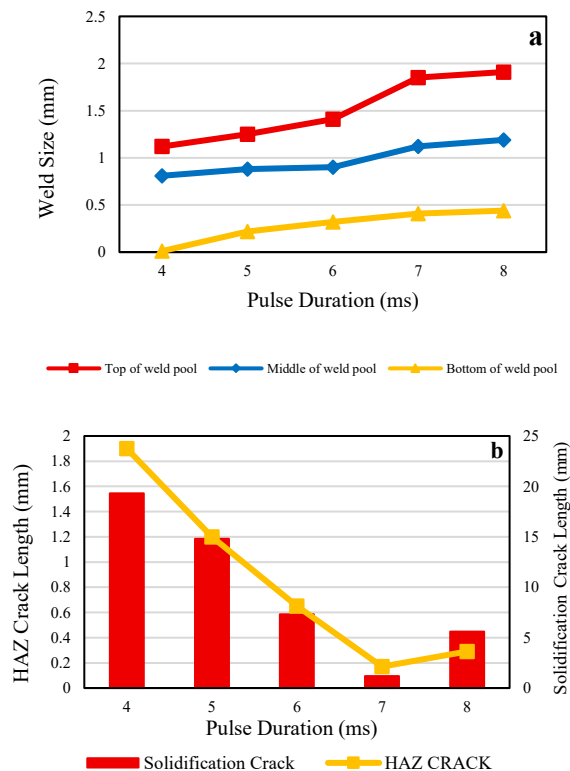
۳-۳-۳- تأثیر پارامترهای جوشکاری لیزری ۱-۳-۳-۳ تأثیر فرکانس پالس

فرکانس پالس با تأثیر مستقیم بر توان متوسط لیزر، و در نتیجه بر میزان حرارت ورودی، نقش مؤثری در کنترل هندسه حوضچه جوش، گستره ناحیه متأثر از حرارت (HAZ) و کاهش عیوبی همچون ترک‌های انجمادی و ذوبی ایفا می‌کند. طبق معادله (۱) و (۲)، افزایش فرکانس پالس، منجر به افزایش توان متوسط و در نتیجه افزایش حرارت ورودی به حوضچه جوش می‌شود [38, 39].

$$P_{AVG} = \text{Peak power} \times D \times f \quad (1)$$

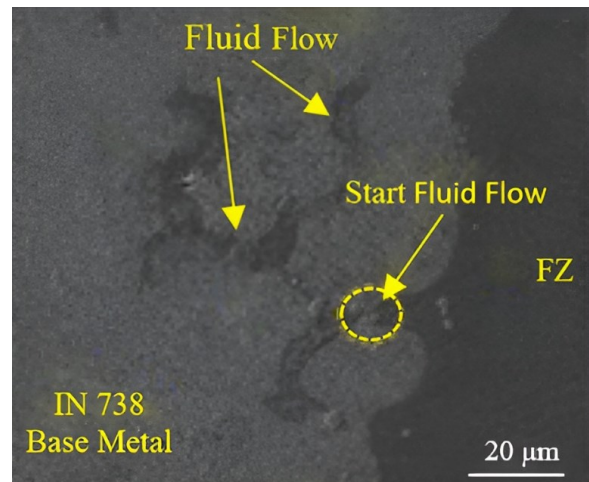
$$A = \text{Heat input} = P_{AVG} / V \quad (2)$$

که در آن P_{AVG} توان متوسط، Peak Power توان پیک، D مدت زمان پالس، f فرکانس پالس و V سرعت جوشکاری است. همان‌طور که در شکل ۵ الف) مشاهده می‌شود، با افزایش فرکانس پالس، ابعاد حوضچه جوش افزایش یافته است و مطابق شکل ۵ ب)، افزایش فرکانس پالس سبب کاهش طول ترک‌های انجمادی و ترک در ناحیه متأثر از حرارت شده است. به‌طوری‌که با افزایش فرکانس تا ۲۰ هرتز، طول ترک انجمادی و ترک HAZ، به‌ترتیب در حدود ۹۰٪ و ۸۶٪ کاهش یافته است. ایجاد ترک‌های انجمادی در آلیاژهای پایه نیکل، ناشی از همزمانی تنش‌های کششی بالا و فیلم مذاب ناپایدار است و افزایش فرکانس می‌تواند با افزایش پایداری مذاب، احتمال تشکیل این ترک‌ها را کاهش دهد [40, 41].



شکل ۷ الف) تأثیر مدت زمان پالس بر ابعاد جوش، ب) تأثیر مدت زمان پالس بر طول ترک انجمادی و طول ترک HAZ
Fig. 7 a) The effect of pulse duration on weld size, b) The effect of pulse duration on solidification crack length and HAZ crack length

پرتو لیزر با ماده، منجر به کاهش انتقال حرارت به نواحی اطراف جوش و در نتیجه کاهش ابعاد حوضچه مذاب می‌شود [44,45]. در شکل ۸ ب)، تأثیر سرعت جوشکاری بر ترک‌های ذوبی و انجمادی نشان داده شده است. در این نمودار، با افزایش سرعت تا ۸/۳ میلی‌متر بر ثانیه، طول ترک انجمادی و ترک HAZ، ابتدا به ترتیب در حدود ۹۱٪ و ۸۶٪ کاهش یافته و ادامه افزایش سرعت تا ۱۳ میلی‌متر بر ثانیه سبب افزایش طول ترک HAZ به مقدار ۸۳٪ شده است. در سرعت‌های بالا، کاهش جذب انرژی لیزر موجب افت دمای بین پالسی شده و در نتیجه گرادیان‌های دمایی شدیدتر و تنش‌های حرارتی بیشتری در فلز جوش ایجاد می‌شود که به افزایش ترک‌خوردگی در ناحیه HAZ، منجر می‌گردد. در حالی که، با افزایش سرعت جوشکاری و در نتیجه کاهش همپوشانی پالس‌ها، از میزان تنش‌های پسماند و انقباضات انجمادی کاسته می‌شود [41,46]. در شکل ۹، تصاویر میکروسکوپی نمونه C₃ و گزارش EDS ارائه شده نشان داد، که ترک‌های ایجاد شده در مجاورت IN738، از ناحیه ذوب شروع و با رشد دندریتی به ناحیه HAZ وارد می‌شوند. مسیر ترک در مجاورت مرزهای یوتکتیک و کاربید MC ادامه یافته است.



شکل ۶ تصویر SEM از پدیده بازپرکنندگی مذاب طی جوشکاری لیزری با فرکانس ۲۰ هرتز

Fig. 6 SEM image of the melt backfilling phenomenon during laser welding at a frequency of 20 Hz

۳-۳-۲- تأثیر مدت زمان پالس

افزایش مدت زمان پالس نیز مطابق معادله (۱)، افزایش انرژی هر پالس و در نتیجه افزایش حرارت ورودی به حوضچه جوش و تغییر در ریزساختار را در پی دارد [38]. همان‌طور که در شکل ۷ الف) مشاهده می‌شود، افزایش مدت زمان پالس، افزایش ابعاد جوش را در پی دارد. مطابق شکل ۷ ب)، افزایش مدت زمان پالس، کاهش طول ترک انجمادی و ترک در ناحیه HAZ را در پی داشته است. به‌طوریکه با افزایش مدت زمان پالس تا ۷ میلی ثانیه، طول ترک انجمادی و ترک HAZ، به ترتیب در حدود ۹۳٪ و ۹۱٪ کاهش یافته است. بر پایه مطالعات پیشین، افزایش مدت زمان پالس موجب افزایش نسبت پهنا به عمق جوش شده و در نتیجه تعداد و طول ترک‌های انجمادی کاهش می‌یابد. این کاهش ناشی از کاهش تمرکز تنش‌های موضعی به‌ویژه در نواحی با ناهمسانی حرارتی مانند مرز IN738 و فولاد PH 17-4 می‌باشد. افزایش مدت زمان پالس سبب بهبود نفوذ و یکنواختی ساختار جوش و همچنین تغییر مکانیزم جوش از حالت سوراخ‌کلیدی به حالت هدایت‌شونده شده و کیفیت جوش را بهبود می‌بخشد [43].

۳-۳-۳- تأثیر سرعت جوشکاری

سرعت جوشکاری یکی از پارامترهای کلیدی در جوشکاری لیزری است که به‌طور مستقیم بر حرارت ورودی، ابعاد حوضچه مذاب، توزیع تنش‌های حرارتی و در نهایت تشکیل ترک‌های ذوبی و انجمادی مؤثر است. همان‌طور که در شکل ۸ الف) مشاهده می‌شود، افزایش سرعت جوشکاری، کاهش ابعاد حوضچه جوش را به دنبال داشته است. مطابق $Q=P/V$ ، افزایش سرعت، منجر به کاهش حرارت ورودی می‌شود. زیرا، افزایش سرعت جوشکاری، با کاهش همپوشانی پالس‌ها و همچنین کاهش مدت زمان تعامل

جدول ۵ نتایج حاصل از اندازه‌گیری طول نواحی MZ، PMZ و HAZ توسط رابطه رزنتال

Table 5 Results of measuring the length of the MZ, PMZ and HAZ regions using the Rosenthal equation

No.	Measurement type	MZ	PMZ	HAZ	MZ Error (%)	PMZ Error (%)	HAZ Error (%)
A ₁	Predicted	12	8.1	53.1	12.1	14.7	10.6
	Empirical	10.7	7.3	48			
A ₂	Predicted	14.1	10.3	68.6	16.5	18.3	20.7
	Empirical	12.1	8.7	56.8			
A ₃	Predicted	16.3	11.9	78.2	-10.9	-9.1	-12.9
	Empirical	18.3	13.1	89.8			
A ₄	Predicted	18.7	14.3	85.1	5.0	8.3	9.1
	Empirical	17.8	13.2	78			
A ₅	Predicted	21.5	15.9	97	-7.7	-13.1	-8.1
	Empirical	23.3	18.3	105.6			

در این معادله، T_0 دمای نمونه قبل از جوشکاری، T دمای نقطه مورد نظر، Q حرارت ورودی، K هدایت حرارتی، α نفوذپذیری حرارتی، R فاصله شعاعی از منبع و V سرعت جوشکاری می‌باشد. جهت تسهیل در حل، معادله رزنتال بصورت یک بعدی خلاصه-سازی شده است (معادله ۵).

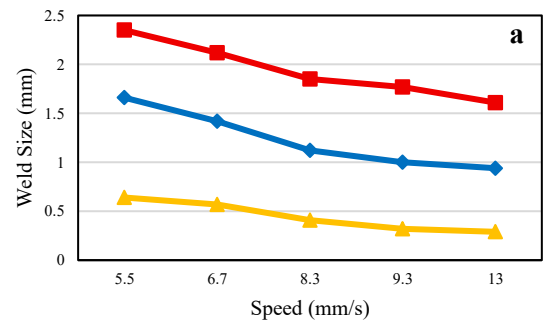
$$X = \frac{P_{AVG} \times \eta}{2\pi K(T - T_0)} = \frac{Q}{2\pi K(T - T_0)} \quad (5)$$

که در آن P_{AVG} توان میانگین منبع حرارتی، η راندمان حرارتی فرآیند است. همچنین $Q = P_{AVG} \cdot \eta$ ، حرارت مؤثر ورودی به قطعه کار را نشان می‌دهد. تعریف حرارت ورودی در مدل گلداک و همکاران نیز با استفاده از توان و راندمان صورت گرفته است [14,47]. در جدول ۵، با هدف بررسی تأثیر حرارت ورودی بر نواحی مختلف جوش، از نمونه‌های A₁ تا A₅ استفاده شده است.

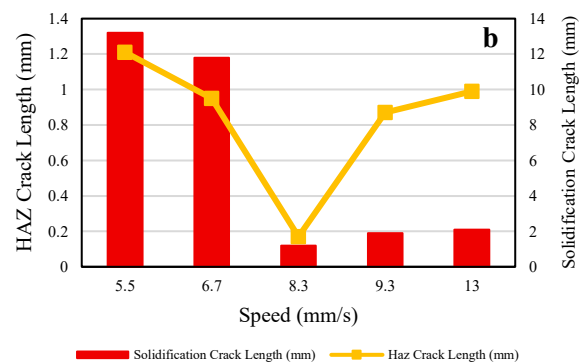
جدول ۵ نشان داد، مقادیر پیش‌بینی‌شده رزنتال با مقادیر تجربی HAZ، PMZ و MZ تطابق خوبی دارند. درصد خطاهای پیش‌بینی (۲۱-۵۰٪)، نشان‌دهنده دقت قابل قبول مدل در بازتاب ویژگی‌های واقعی نواحی جوش است. مطابق جدول ارائه شده، با کاهش حرارت ورودی، طول ناحیه HAZ کاهش یافته است. این تغییر می‌تواند به بهبود جوش‌پذیری و کاهش حساسیت به ترک‌خوردگی در شرایط خاص و بسته به نوع آلیاژ منجر شود [48].

۳-۵- بررسی نتایج میکروسختی

نتایج سختی سنجی نشان داد که سوپرآلیاژ IN738 سختی بالاتری نسبت به فولاد PH 4-17 دارد که از دلایل آن می‌توان به ساختار پیچیده‌تر سوپر آلیاژ و حضور فازهای رسوبی سخت‌شونده مانند γ' و کاربیدهای MC، اشاره نمود. مطابق شکل ۱۰ در بیشتر نمونه‌ها، سختی در ناحیه جوش بیشتر از نواحی HAZ است. با افزایش فرکانس پالس، سختی نمونه‌ها نسبت به فلز پایه افزایش نشان



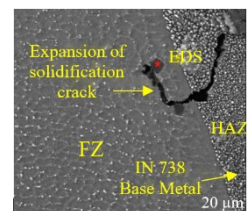
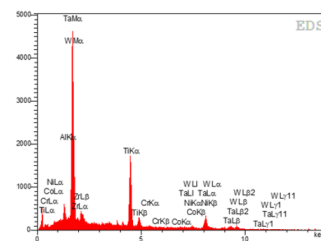
— Top of weld pool — Middle of weld pool — Bottom of weld pool



— Solidification Crack Length (mm) — HAZ Crack Length (mm)

شکل ۸ الف) تأثیر سرعت جوشکاری بر ابعاد جوش، ب) تأثیر سرعت جوشکاری بر طول ترک انجمادی و طول ترک HAZ

Fig. 8 a) The effect of welding speed on weld size, b) The effect of welding speed on solidification crack length and HAZ crack length



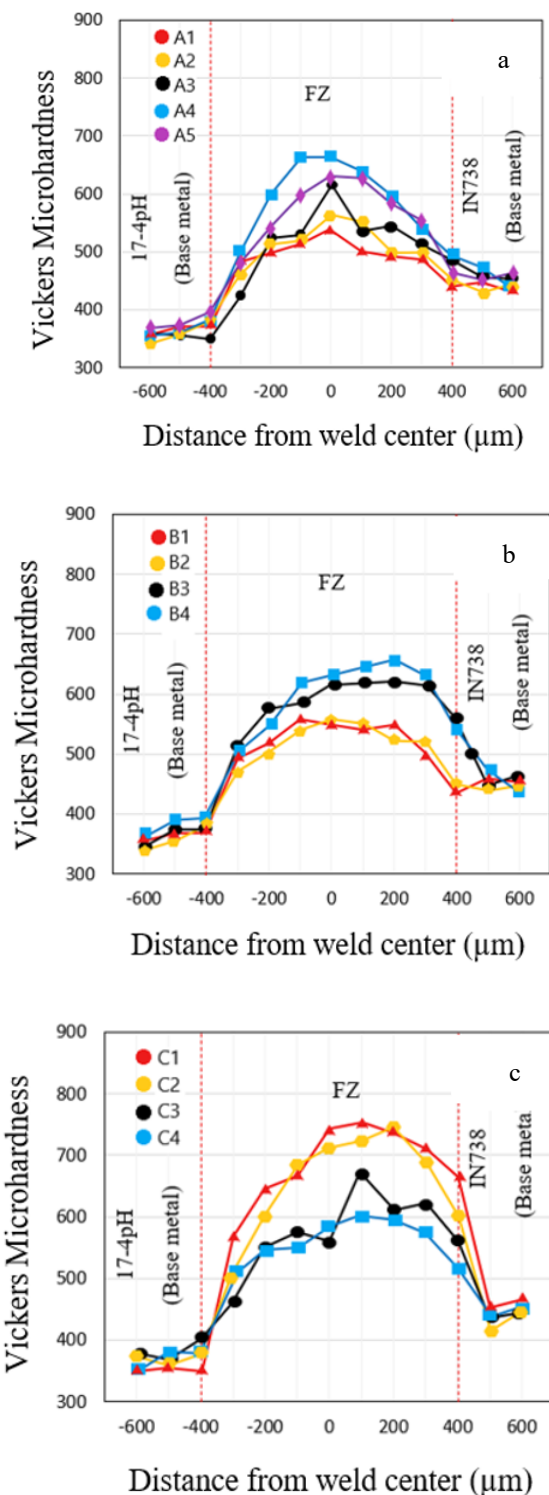
شکل ۹ الف) گسترش ترک از FZ به HAZ در نمونه C₃، ب) آنالیز EDS

Fig. 9 a) Crack propagation from FZ to HAZ in sample C₃, b) EDS analysis

۳-۴- بررسی جوش‌پذیری با استفاده از روش‌های عددی

از آنجا که طول مناطق مختلف جوش از جمله (HAZ)، بر جوش‌پذیری آلیاژ تأثیر گذار است، اندازه‌گیری آنها می‌تواند به درک بهتر فرآیند کمک کند. یکی از روش‌های عددی برای ارزیابی جوش‌پذیری، استفاده از معادله رزنتال (معادله ۴) است که اگرچه طول نواحی حرارتی را محاسبه می‌کند، اما به جنبه‌های ریزساختاری نمی‌پردازد [47]. در این بخش، اثر حرارت ورودی بر جوش‌پذیری IN738 از جنبه عددی مورد بررسی قرار گرفته است.

$$\frac{2\pi(T - T_0)KR}{Q} = \exp \left[\frac{-V(R - X)}{2\alpha} \right] \quad (4)$$



شکل ۱۰ تأثیر پارامترهای فرآیند جوشکاری لیزری بر سختی نمونه‌ها، الف) تأثیر فرکانس پالس، ب) تأثیر مدت زمان پالس و ج) تأثیر سرعت جوشکاری

Fig. 10 The effect of laser welding process parameters on the hardness of samples, a) the effect of pulse frequency, b) the effect of pulse duration and c) the effect of welding speed

داد که این مقدار برای نمونه A₄، در حدود ۴۲٪ گزارش گردید. همچنین، افزایش مدت زمان پالس نیز افزایش میکروسختی نمونه‌ها را دربر داشت، به‌طوری‌که در نمونه B₄ با افزایش مدت زمان پالس تا ۸ میلی‌ثانیه، مقدار سختی در حدود ۴۰٪ نسبت به فلز پایه افزایش نشان داد. افزایش فرکانس و مدت زمان پالس، با افزایش حرارت ورودی، موجب کاهش اندازه دانه‌ها، توزیع مناسب فازهای رسوبی و در نتیجه افزایش سختی می‌شوند [49]. در مقابل، افزایش سرعت جوشکاری، کاهش مقدار سختی نمونه‌ها را در پی داشت. بالاترین مقدار سختی به ازای سرعت ۵/۶ میلی‌متر بر ثانیه گزارش گردید که طی آن مقدار سختی نسبت به فلز پایه در حدود ۵۸٪ افزایش نشان داد. سرعت جوشکاری بالا، با کاهش حرارت ورودی، منجر به تغییر در ساختار دانه‌ها و توزیع نامناسب فازهای رسوبی و در نتیجه کاهش سختی نمونه‌ها گردیده است [50, 51]. بنابراین، افزایش سختی در ناحیه جوش نسبت به فلز پایه عمدتاً ناشی از ریزدانه شدن ساختار در اثر انجماد سریع، توزیع یکنواخت فازهای رسوبی سخت‌کننده نظیر کاربیدها و γ' و تشکیل فرکانس و مدت زمان پالس، سبب افزایش انرژی ورودی و اصلاح ریزساختار گردید که از دلایل اصلی افزایش سختی می‌باشد. مطابق شکل، نمونه‌های A₄، B₄ و C₁ بالاترین سختی را نشان دادند که اهمیت کنترل ساختار میکروسکوپی و پارامترهای حرارتی را در بهبود خواص مکانیکی اتصال غیرهمجنس تأیید می‌کند.

۳-۶- بررسی نتایج آزمون پانچ کوچک (SPT)

آزمون پانچ کوچک به‌عنوان یک تکنیک آزمایش مینیاتوری، در ارزیابی خواص مکانیکی موضعی نواحی جوشکاری شده با ابعاد محدود مورد توجه قرار گرفته است [52, 53]. منحنی‌های نیرو-جابجایی حاصل از این آزمون، پس از تبدیل به تنش‌های اسمی با در نظر گرفتن سطح مقطع برش خورده نمونه، امکان تعیین استحکام تسلیم (σ_y) و استحکام کششی نهایی (σ_u) را فراهم می‌سازند. این تبدیل‌ها مطابق معادله‌های ۶ و ۷، انجام می‌گیرند، که ضرایب $\alpha = 0.277$ و $\beta = 0.346$ بر اساس مطالعات پیشین تعیین شده‌اند [54, 55].

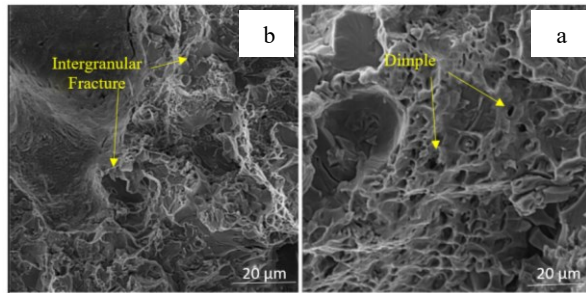
$$\sigma_y [MPa] = \alpha \cdot \frac{P_{y-t/10}}{t^2} \quad (6)$$

$$\sigma_u [MPa] = \beta \cdot \frac{P_m}{d_m \cdot t} \quad (7)$$

کرش شکست دو محوره (ϵ_{qf}) با استفاده از ضخامت مقطع شکست (t_f) و معادله ۸ محاسبه گردید. همچنین، طی معادله ۹، رابطه تجربی بین ϵ_{qf} و چقرمگی شکست (J_{Ic}) برای $0.18 < \epsilon_{qf}$ معتبر گزارش شد [54].

$$\epsilon_{qf} = \ln\left(\frac{t}{t_f}\right) \quad (8)$$

$$J_{Ic} = 1659 \epsilon_{qf} - 1320 \left[\frac{kJ}{m^2}\right] \quad (9)$$



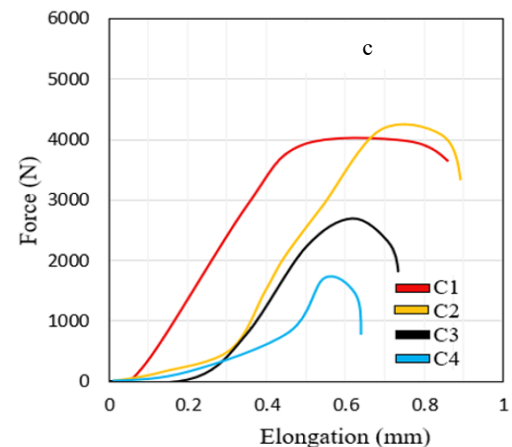
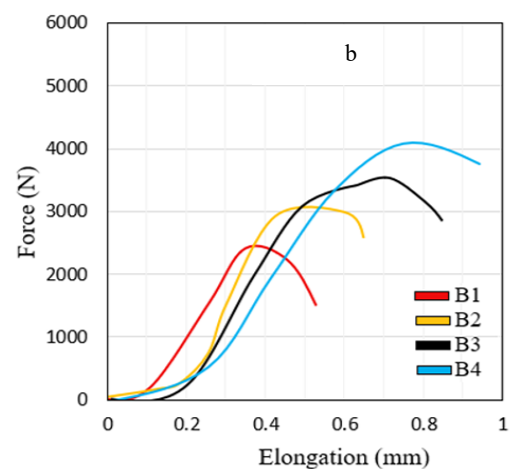
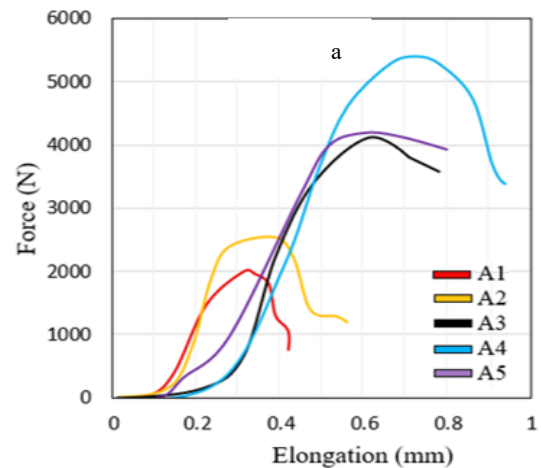
شکل ۱۲ سطح مقطع شکست نمونه‌ها پس از آزمون SPT، الف) A5، ب) B1

Fig. 12 Fracture cross-section of samples after SPT test, a) A5, b) B1

مشاهده شده در منحنی‌ها عمدتاً ناشی از تغییرات جزئی در ریزساختار و عیوب موجود در نمونه‌ها است [56].

مطابق نمودارهای ارائه شده، نمونه‌های A₅، B₃، B₄، C₁ و C₂ که با توان لیزر بالا و سرعت پایین جوشکاری شدند، با انحنای ملایم‌تر در قله نمودار شکست، رفتار شکل‌پذیر از خود نشان دادند. این موضوع با حضور دیمپل‌های فراوان در سطح شکست، قابل توجیه است [57]. در مقابل، نمونه‌هایی مانند A₁، A₂ و B₁ که با حرارت ورودی کمتر جوشکاری شده‌اند، رفتار تردتری نشان دادند. این نمونه‌ها، با انحنای بیشتر در نمودار شکست ظاهر شدند که بیانگر رخداد گسیختگی زود هنگام در اثر تمرکز تنش می‌باشند [58]. در شکل ۱۲، سطح مقطع شکست نمونه‌های A₅ و B₁ پس از آزمون SPT، نشان داده شده است.

با مقایسه داده‌های جدول ۶، می‌توان دریافت که نمونه‌هایی با حرارت ورودی متوسط تا نسبتاً بالا مانند A₄، B₄ و C₁، بالاترین تنش پانچ (P_y/t^2) و مقاومت مکانیکی در برابر بارگذاری را نشان داده‌اند. این موضوع به تشکیل ساختار هم‌محور با دانه‌های ریز، کاهش نسبت شیب دمای جلوی جبهه انجماد به نرخ پیش روی مرز انجماد (G/R) و نیز کاهش عیوب جوش نظیر ترک‌ها و حفرات انقباضی نسبت داده می‌شود [59]. به‌طور خاص، نمونه A₄ با داشتن بیشترین مقدار ϵ_{qf} (0.83) و مقدار بالای J_{IC} (54 kJ/m²)، نشان‌دهنده رفتار کاملاً نرم با ساختار دانه‌های هم‌محور است. این در حالی است که، نمونه A₅ که از نظر تنش پانچ و سایر شاخص‌ها عملکرد ضعیف‌تری نسبت به A₄ دارد، علی‌رغم حرارت ورودی نسبتاً بالا، به دلیل ایجاد حفرات انقباضی ناشی از حرارت بیش‌ازحد، رفتار مکانیکی ضعیف‌تری نشان داده است. این حفرات به عنوان نواحی تمرکز تنش عمل کرده و باعث کاهش استحکام شده‌اند [60]. با افزایش سرعت جوشکاری از ۵/۶ به ۱۳ میلی‌متر بر ثانیه، به دلیل کاهش حرارت ورودی و افزایش نرخ انجماد، ساختارهایی با دانه‌های ستونی و سلولی درشت‌تر شکل گرفته‌اند. این نوع ریزساختار شکننده‌تر است و مستعد گسیختگی زود هنگام می‌باشد. به همین دلیل، کاهش ϵ_{qf} در نمونه‌هایی مانند C₃ و C₄ به وضوح در نمودارهای نیرو-جابجایی و شاخص‌های چقرمگی شکست



شکل ۱۱ نمودار حاصل از نتایج آزمون SPT، الف) تأثیر فرکانس پالس، ب) تأثیر مدت زمان پالس و ج) تأثیر سرعت جوشکاری

Fig. 11 Graph of SPT test results, a) the effect of pulse frequency, b) the effect of pulse duration and c) the effect of welding speed

مطابق شکل ۱۱، نمونه‌هایی با حرارت ورودی متوسط و ساختار هم‌محور (مانند نمونه A₄) بالاترین مقاومت مکانیکی و تنش پانچ را داشتند. این رفتار به دلیل وجود دانه‌های ریز، هم‌محور و فازهای رسوبی یکنواخت در ناحیه جوش است. تفاوت‌های

جدول ۶ نتایج SPT بدست آمده از نمودارهای نیرو-جابجایی با استفاده از روابط ۶-۹.

Table 6 SPT results obtained from force-displacement diagrams using equations 6-9.

Failure mechanism	J_{ic} (kJ/m ²)	ϵ_{qf}	σ_u (MPa)	σ_{ys} (MPa)	$P_m/(t \cdot d_m)$ (MPa)	P_y/t^2 (MPa)	Samples
Brittle	-	0.62	880	720	890	749	A ₁
Composite	-	0.67	900	730	910	760	A ₂
(Local defects)	-	0.71	920	750	940	780	A ₃
Ductile (coaxial grains)	54	0.83	940	770	990	805	A ₄
Ductile with porosity	49	0.76	930	765	960	790	A ₅
Combined brittle		0.65	990	730	900	750	B ₁
Combined		0.7	915	745	930	770	B ₂
Ductile		0.76	935	765	970	790	B ₃
Very ductile	50	0.81	955	785	1005	810	B ₄
Relatively brittle	46	0.79	945	775	980	805	C ₁
Semi-brittle	42	0.73	920	760	950	790	C ₂
Brittle		0.66	890	740	920	765	C ₃
Very brittle		0.59	860	720	880	740	C ₄

۶- آزمون پانچ کوچک (SPT) نشان داد نمونه‌های حاوی دانه‌های هم‌محور و عاری از حفره یا ترک از بیشترین میزان استحکام و چقرمگی شکست برخوردار بودند.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیرایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ گونه منافع مالی رقابتی یا روابط شخصی شناخته شده‌ای ندارند که بتواند بر کار گزارش شده در این مقاله تأثیر بگذارد.

۵- منابع

- [1] S. Zhu, Y. Li, J. Yan, and C. Zhang, "Recent Advances in Cooling Technology for the Leading Edge of Gas Turbine Blades," *Energies*, vol. 18, no. 3, p. 540, 2025. DOI: <http://doi.org/10.3390/en18030540>.
- [2] J. Błachnio, J. Sychała, and D. Zasada, "Analysis of structural changes in a gas turbine blade as a result of high temperature and stress," *Engineering Failure Analysis*, vol. 127, p. 105554, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105554>.
- [3] T. S. Chowdhury, F. T. Mohsin, M. M. Tonni, M. N. H. Mita, and M. M. Ehsan, "A critical review on gas turbine cooling performance and failure analysis of turbine blades," *International journal of thermofluids*, vol. 18, p. 100329, 2023. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100329>.
- [4] S. Rani, A. K. Agrawal, and V. Rastogi, "Failure analysis of a first stage IN738 gas turbine blade tip cracking in a thermal power plant," *Case studies in*

مشاهده می‌شود. مطالعات پیشین نیز مؤید آن هستند که میکروساختارهای ستونی یا درشت، به‌ویژه در جوشکاری با سرعت بالا، باعث تضعیف رفتار مکانیکی شده و احتمال بروز شکست زودرس را افزایش می‌دهند [17].

آزمون SPT برای هر شرایط آزمایشی حداقل سه بار تکرار شد. بررسی اولیه نتایج نشان داد که میزان پراکندگی داده‌ها و اختلاف بین تکرارها بسیار اندک بوده و در اغلب موارد کمتر از ۵٪ باقی مانده است، از این رو در جدول ۶ صرفاً مقادیر میانگین گزارش شده است. علاوه بر این، دقت بالای دستگاه اندازه‌گیری (با خطایی کمتر از ۲٪) اعتبار نتایج را تضمین می‌نماید. همچنین، شرایط محل پانچ تأثیر مهمی در نتایج دارد، در برخی نمونه‌ها مانند A₃ که ممکن است فاقد حفرات موضعی در محل پانچ باشند، نتایج به‌طور مصنوعی بالاتر گزارش می‌شود. این موضوع بر اهمیت محل پانچ در تکرارپذیری نتایج SPT تأکید دارد. در مقابل، نمونه‌هایی مانند A₄ با دانه‌های هم‌محور ریز و توزیع یکنواخت فازهای رسوبی (مانند ۷' و کاربیدهای MC)، که فاقد ترک و حفره هستند، بیشترین استحکام و چقرمگی را نشان دادند. این موارد بر اهمیت کنترل دقیق پارامترهای جوشکاری برای دستیابی به ساختارهای پایدار و مقاوم تأکید دارد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ویژگی‌های اتصال میان دو آلیاژ غیرهمجنس (سوپرآلیاژ پایه نیکل IN738 و فولاد زنگ‌زن رسوب‌سخت‌شونده PH 17-4) طی فرآیند جوشکاری لیزری پالسی Nd:YAG مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌های به‌دست‌آمده عبارتند از:

۱- در جوش غیرهمجنس بین سوپرآلیاژ IN738 و فولاد زنگ‌زن PH 17-4، حضور دانه‌های هم‌محور در مرکز جوش موجب بهبود خواص مکانیکی اتصال شد.

۲- افزایش فرکانس و مدت زمان پالس، افزایش ابعاد حوضچه جوش و افزایش سرعت جوشکاری، کاهش ابعاد حوضچه جوش را در پی داشت.

۳- افزایش فرکانس و مدت زمان پالس، کاهش طول ترک انجمادی و ترک در ناحیه HAZ را به دنبال داشت، در حالی‌که، افزایش سرعت جوشکاری تا ۸/۳ میلی‌متر بر ثانیه، ابتدا کاهش و سپس افزایش طول ترک HAZ را نتیجه داد.

۴- بکارگیری فرکانس ۲۰ هرتز، زمان پالس ۷ میلی‌ثانیه و سرعت ۸/۳ میلی‌متر بر ثانیه، با فراهم سازی پایداری مذاب و کاهش ترک، موجب حصول اتصال با کیفیت و خواص مکانیکی مناسب گردید.

۵- نتایج آزمون میکروسختی نشان داد، بر خلاف سرعت جوشکاری، افزایش فرکانس و مدت زمان پالس، افزایش میکروسختی نمونه‌ها را در بر داشته است.

- vol. 15, no. 21, p. 7741, 2022. DOI: <http://doi.org/10.3390/ma15217741>.
- [17] R. Donnini, A. Varone, A. Palombi, S. Spiller, P. Ferro, and G. Angella, "High Energy Density Welding of Ni-Based Superalloys: An Overview," *Metals* (2075-4701), vol. 15, no. 1, 2025. DOI: <http://doi.org/10.3390/met15010030>.
- [18] M. Taheri, S. F. Kashani-Bozorg, V. V. Ramalingam, B. Babaei, and A. Halvaei, "Effect of Nd: YAG pulsed-laser welding parameters on melting rate of GTD-111 superalloy joint," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 30, no. 12, pp. 9108-9117, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11665-021-06099-z>.
- [19] A. Faye, Y. Balcaen, L. Lacroix, and J. Alexis, "Effects of welding parameters on the microstructure and mechanical properties of the AA6061 aluminium alloy joined by a Yb: YAG laser beam," *Journal of Advanced Joining Processes*, vol. 3, p. 100047, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jajp.2021.100047>.
- [20] N. Ahmadi, H. Naffakh-Moosavy, S. M. M. Hadavi, and F. Bagheri, "The effect of Nd: YAG laser parameters on the microstructure, hot cracking susceptibility and elemental evaporation of surface melted AZ80 magnesium-based alloy," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 27, pp. 2459-2474, 2023. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.028>.
- [21] X. Xin, W. Xinyong, and L. Juan, "Hot-cracking susceptibility and shear fracture behavior of dissimilar Ti6Al4V/AA6060 alloys in pulsed Nd: YAG laser welding," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 34, no. 4, pp. 375-386, 2021. DOI: <http://doi.org/pii/S1000936120305604>.
- [22] M. Torkamany, S. Tahamtan, and J. Sabbaghzadeh, "Dissimilar welding of carbon steel to 5754 aluminum alloy by Nd: YAG pulsed laser," *Materials & Design*, vol. 31, no. 1, pp. 458-465, 2010. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.05.046>.
- [23] Z. Zhao, S. Janasekaran, G. T. Fong, W. Tayier, and N. Zhang, "Direct spot-welding of zirconia ceramic to Ti-6Al-4V alloy for ultrahigh strength joint using pulsed Nd: YAG laser," *Ceramics International*, 2025.
- [24] P. Thejasree and P. Krishnamachary, "Effect of weld speed on joint quality of Nd: YAG laser welded inconel 718 alloy weldments," SAE Technical Paper, 0148-7191, 2021. DOI: <http://doi.org/10.4271/2021-28-0263>.
- [25] R. Palanivel, "Effect of laser power on microstructure and mechanical properties of Nd: YAG laser welding of titanium tubes," *Journal of Central South University*, vol. 30, no. 4, pp. 1064-1074, 2023. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11771-023-5292-x>.
- [26] M. Hadavi, H. Rostami, S. Nickabadi, E. Rostami, and H. Moradalian, "Investigation of laser factors influence on strength of laser spot welding of 316 stainless steel using the designing experiments method," *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1, p. 21979, 2025. DOI: <http://doi.org/s41598-025-08382-8>.
- [27] Y. Jiang, "The Influence of Welding Speed on the Properties of Dual-Phase Steel Welded Joints," *International Core Journal of Engineering*, vol. 11, no. 4, *engineering failure analysis*, vol. 8, pp. 1-10, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.csefa.2017.01.001>.
- [5] Y. Hu *et al.*, "High temperature oxidation behavior of IN738LC alloy formed by selective laser melting," *Journal of Materials Science*, vol. 57, no. 25, pp. 11983-11996, 2022. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10853-022-07245-y>.
- [6] J. Jia, Y. Zhang, Y. Tao, T. Yan, and H. Ji, "Effects of Solution Temperature on Tensile Properties of a High γ' Volume Fraction P/M Superalloy," *Materials*, vol. 15, no. 16, p. 5528, 2022. DOI: <http://doi.org/10.3390/ma15165528>.
- [7] B.-H. Kim, B.-O. Kong, Y.-K. Joo, I.-S. Son, H.-U. Hong, and J.-H. Lee, "The influence of γ' morphology and size on stress rupture properties in Ni-base superalloy IN738LC," *Available at SSRN 4689489*, 2024.
- [8] L. Huang, Y. Cao, H. Zhao, Y. Li, Y. Wang, and L. Wei, "Effect of process parameters on density and mechanical behaviour of a selective laser melted 17-4PH stainless steel alloy," *Open Physics*, vol. 20, no. 1, pp. 66-77, 2022. DOI: <http://doi.org/10.1515/phys-2022-0008>.
- [9] N. Yurioka and Y. Horii, "Recent developments in repair welding technologies in Japan," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 11, no. 3, pp. 255-264, 2006. DOI: <http://doi.org/10.1179/174328406X102105>.
- [10] M. Taheri, A. Davar, M. H. Beni, J. E. Jam, M. R. Zamani, and A. Alizadeh, "The impact toughness of Nd: YAG laser-welded GTD-111 superalloy joints," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 32, no. 1, pp. 232-242, 2023. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11665-022-07090-y>.
- [11] T. Boellinghaus, J. C. Lippold, and C. E. Cross, *Cracking phenomena in welds IV*. Springer, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1007/978-3-319-28434-7>.
- [12] J. Andersson, "Review of weldability of precipitation hardening Ni-and Fe-Ni-based superalloys," in *Proceedings of the 9th International Symposium on Superalloy 718 & Derivatives: Energy, Aerospace, and Industrial Applications*, 2018: Springer, pp. 899-916. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-319-89480-5_60.
- [13] S. Katayama, *Fundamentals and details of laser welding*. Springer, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1007/978-981-15-7933-2>.
- [14] N. Taheri, H. Naffakh-Moosavy, and F. M. Ghaini, "A new procedure for refurbishment of power plant Superalloy 617 by pulsed Nd: YAG laser process," *Optics & Laser Technology*, vol. 91, pp. 71-79, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.optlastech.2017.01.002>.
- [15] M. Chludzinski, R. E. Dos Santos, C. Churiaque, M. Ortega-Iguña, and J. M. Sánchez-Amaya, "Pulsed laser welding applied to metallic materials—A material approach," *Metals*, vol. 11, no. 4, p. 640, 2021. DOI: <http://doi.org/10.3390/met11040640>.
- [16] M. Chludzinski, R. E. Dos Santos, M. Ortega-Iguña, C. Churiaque, M. Porrúa-Lara, and J. M. Sánchez-Amaya, "Low-energy pulsed-laser welding as a root pass in a GMAW joint: an investigation on the microstructure and mechanical properties," *Materials*,

- Optics & Laser Technology*, vol. 103, pp. 22-32, 2018. DOI: <http://doi.org/S0030399217313117>.
- [41] T. Azimzadegan and S. A. A. A. Mousavi, "Investigation of the occurrence of hot cracking in pulsed Nd-YAG laser welding of Hastelloy-X by numerical and microstructure studies," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 44, pp. 226-240, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.06.005>.
- [42] W. D. Callister Jr and D. G. Rethwisch, *Materials science and engineering: an introduction*. John Wiley & sons, 2020.
- [43] M. Montazeri, F. M. Ghaini, and O. Ojo, "Heat input and the liquation cracking of laser welded IN738LC superalloy," *Weld. J.*, vol. 92, no. 9, pp. 258s-264s, 2013.
- [44] B. N. Coelho, M. S. F. d. Lima, S. M. d. Carvalho, and A. R. d. Costa, "A comparative study of the heat input during laser welding of aeronautical aluminum alloy AA6013-T4," *Journal of Aerospace Technology and Management*, vol. 10, p. e2918, 2018. DOI: <http://doi.org/10.5028/jatm.v10.925>.
- [45] A. T. Egbewande, R. Buckson, and O. A. Ojo, "Analysis of laser beam weldability of Inconel 738 superalloy," *Materials characterization*, vol. 61, no. 5, pp. 569-574, 2010. DOI: <http://doi.org/S1044580310000616>.
- [46] M. B. Balajaddeh and H. Naffakh-Moosavy, "Pulsed Nd: YAG laser welding of 17-4 PH stainless steel: Microstructure, mechanical properties, and weldability investigation," *Optics & Laser Technology*, vol. 119, p. 105651, 2019. DOI: <http://doi.org/S0030399219306759>.
- [47] J. Goldak, A. Chakravarti, and M. Bibby, "A new finite element model for welding heat sources," *Metallurgical transactions B*, vol. 15, no. 2, pp. 299-305, 1984. DOI: <http://doi.org/10.1007/BF02667333>.
- [48] A. H. Jafarzadeh, M. S. Shahriari, and R. Ashiri, "Heat-induced effects and cracking susceptibility in gas tungsten arc welding of Inconel 939 superalloy using Inconel 625 filler metal," *Journal of Materials Research and Technology*, 2025. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.12.123>.
- [49] M. Chennaiah, P. Kumar, and K. Rao, "Effect of pulsed TIG welding parameters on the microstructure and micro-hardness of AA6061 joints," *J Mater Sci Eng*, vol. 4, pp. 4-7, 2015. DOI: <http://doi.org/10.4172/2169-0022.1000182>.
- [50] L. Cao *et al.*, "Effects of welding speed on microstructure and mechanical property of fiber laser welded dissimilar butt joints between AISI316L and EH36," *Metals*, vol. 7, no. 7, p. 270, 2017. DOI: <http://doi.org/10.3390/met7070270>.
- [51] J. Liu *et al.*, "Influence of Welding Speed on the Microstructure and Mechanical Properties of Laser-Welded Joints in 316L Stainless Steel Sheets," *Metals*, vol. 15, no. 6, p. 624, 2025. DOI: <http://doi.org/10.3390/met15060624>.
- [52] H. Ding, J. Peng, D. Lu, X. Zhu, and Q. Zhang, "Comparison study of small punch test, hydraulic bulge test and uniaxial tensile test for typical pressure vessel CrMo steel," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, p. 105563, 2025.
- pp. 405-412, 2025. DOI: <http://doi.org/P20190813001-N202504030004-00048>.
- [28] M. Taheri, A. Halvae, S. Kashani-Bozorg, and M. Paidar, "Analysis of cracks in the pulsed Nd: YAG laser welded joint of nickel-based superalloy," *Iranian Journal of Materials Forming*, vol. 7, no. 1, pp. 54-69, 2020. DOI: http://doi.org/5741_76e47d867256aeae12760fd2a3fb6a.pdf.
- [29] M. Taheri, A. Halvae, and S. F. Kashani-Bozorg, "Hot cracking of GTD-111 nickel-based superalloy welded by pulsed Nd: YAG laser," *Metallography, Microstructure, and Analysis*, vol. 9, pp. 16-32, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1007/s13632-019-00602-8>.
- [30] G. Zhang, C. Xiao, and M. Taheri, "Effect of Nd: YAG pulsed laser welding process on the liquation and strain-age cracking in GTD-111 superalloy," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 52, pp. 66-78, 2020. DOI: <http://doi.org/pii/S152661252030058X>.
- [31] X. Zhang *et al.*, "Effect of Welding Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of AZ31B Magnesium Alloy in Pulsed Laser Helical Welding," *Materials Today Communications*, p. 113077, 2025. DOI: <http://doi.org/S2352492825015892>.
- [32] "ASTM E384-17, "Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials," 2022.
- [33] "ASTM E8/E8M-21, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International," 2021.
- [34] "ASTM E3205-20, "Standard Test Method for Small Punch Testing of Metallic Materials," ASTM International, " 2020, doi: <http://doi.org/10.1520/E3205-20>.
- [35] P. S. Ghosh *et al.*, "Prediction of transient temperature distributions for laser welding of dissimilar metals," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 13, p. 5829, 2021. DOI: <http://doi.org/10.3390/app11135829>.
- [36] Z. Jin, X. Kong, L. Ma, J. Dong, and X. Li, "Prediction of primary dendrite arm spacing of the inconel 718 deposition layer by laser cladding based on a multi-scale simulation," *Materials*, vol. 16, no. 9, p. 3479, 2023. DOI: <http://doi.org/10.3390/ma16093479>.
- [37] B. Fotovvati, S. F. Wayne, G. Lewis, and E. Asadi, "A Review on Melt-Pool Characteristics in Laser Welding of Metals," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2018, no. 1, p. 4920718, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1155/2018/4920718>.
- [38] D. Chai, D. Wu, G. Ma, S. Zhou, Z. Jin, and D. Wu, "The effects of pulse parameters on weld geometry and microstructure of a pulsed laser welding Ni-base alloy thin sheet with filler wire," *Metals*, vol. 6, no. 10, p. 237, 2016. DOI: <http://doi.org/10.3390/met6100237>.
- [39] M. Rezayat *et al.*, "Effect of lateral laser-cladding process on the corrosion performance of Inconel 625," *Metals*, vol. 13, no. 2, p. 367, 2023. DOI: <http://doi.org/10.3390/met13020367>.
- [40] H. Hekmatjou and H. Naffakh-Moosavy, "Hot cracking in pulsed Nd: YAG laser welding of AA5456,"

- [53] C. Rodríguez, J. García Cabezas, E. Cárdenas, F. Belzunce, and C. Betegón, "Mechanical Properties Characterization of Heat-Affected Zone Using the Small Punch Test: Use of the small punch test for the mechanical characterization of small areas such as the different zones that characterize the HAZ showed promise," *Welding journal*, vol. 88, no. 9, 2009. DOI: <http://doi.org/10.1007/s40194-009-0023-5>.
- [54] T. García, C. Rodríguez, F. Belzunce, and C. Suárez, "Estimation of the mechanical properties of metallic materials by means of the small punch test," *Journal of alloys and compounds*, vol. 582, pp. 708-717, 2014. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.08.030>.
- [55] K. B. Yoon, H. S. Yun, H. Kwon, K.-O. Bae, and S. H. Nahm, "Impact of hydrogen-assisted cracking on the mechanical properties of 316L stainless steel produced by selective laser melting using an in-situ small punch test," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 940, p. 148557, 2025. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.msea.2024.147557>.
- [56] A. Egbewande, H. Zhang, R. Sidhu, and O. Ojo, "Improvement in laser weldability of INCONEL 738 superalloy through microstructural modification," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 40, no. 11, pp. 2694-2704, 2009. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11661-009-0001-z>.
- [57] I. Konovalenko, P. Maruschak, J. Brezinová, and J. Brezina, "Morphological characteristics of dimples of ductile fracture of VT23M titanium alloy and identification of dimples on fractograms of different scale," *Materials*, vol. 12, no. 13, p. 2051, 2019. DOI: <http://doi.org/10.3390/ma12132051>.
- [58] M. G. Talei and M. Ghoreishi, "Microstructure and mechanical properties of laser weld of selective laser melted IN625 superalloy," *Journal of Materials Research and Technology*, 2025.
- [59] J. Xu, Y. Ding, Y. Gao, H. Wang, Y. Hu, and D. Zhang, "Grain refinement and crack inhibition of hard-to-weld Inconel 738 alloy by altering the scanning strategy during selective laser melting," *Materials & Design*, vol. 209, p. 109940, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109940>.
- [60] Z. Wan, "Effect of porosity on the Tensile and Fatigue Behaviour of Inconel 738 Manufactured Through Laser Powder Bed Fusion," University of Sheffield, 2025.