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

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

Volume 11, Number 2, 2026



Enhancing Hastelloy X weld properties using pulsed current GTAW process

A. Adelian , Kh. Ranjbar* , M. Reihanian, R. Dehmolaei
Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

Received 25 June 2025 ; Accepted 16 August 2025

Abstract

This study investigated the effects of pulsed current and constant current on the microstructure and mechanical properties of Hastelloy X superalloy welds produced by Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), using ERNiCrMo-2 filler metal. Key microstructural parameters, such as elemental segregation, dendrite refinement, and weld metal uniformity, along with changes in weld strength and hardness, were examined and compared between the two welding modes. Microstructural evaluations were conducted using optical microscopy, Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM), Energy Dispersive Spectroscopy (EDS), and X-ray Diffraction (XRD) for phase identification. Pulsed current welding resulted in a finer microstructure with more equiaxed dendrites, reduced elemental segregation, and a more uniform distribution of M_6C carbides. Furthermore, this process led to significant improvements in hardness, impact toughness, and tensile strength of the weld metal compared to constant current welding. Fracture analysis confirmed ductile fracture behavior in all specimens, consistent with the microstructural and mechanical findings. The results of this research highlight the importance of using pulsed current in GTAW as an effective method for controlling the microstructure and enhancing the mechanical properties of Hastelloy X alloy joints.

Keywords: Hastelloy X superalloy , GTA Welding , Pulsed Current , ERNiCrMo-2 filler metal , Microstructure , Mechanical properties.

*Corresponding Author: Kh. Ranjbar, k_ranjbar@scu.ac.ir.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.03]

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

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال یازدهم، شماره2، پاییز و زمستان 1404



بهبود خصوصیات جوش Hastelloy X با استفاده از جریان پالسی در جوشکاری قوس تنگستنی با گاز محافظ

علی عادلیان، خلیل رنجبر*، محسن ریحانیان، رضا دهملایی

گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

دریافت مقاله: 1404/04/04 ؛ پذیرش مقاله: 1404/05/25

چکیده

در این پژوهش، تأثیر جریان پالسی و جریان ثابت بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصالات جوش سوپرآلیاژ Hastelloy X در فرایند جوشکاری قوسی تنگستن با گاز محافظ مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، از فلزپرکننده ERNiCrMo-2 استفاده شد. پارامترهای مهم ریزساختاری نظیر جدایش عناصر آلیاژی، ریزتر شدن دندریت‌ها، یکنواختی ساختار فلزجوش و تغییرات حاصل در سختی و استحکام جوش، در دو حالت جوشکاری بررسی و نتایج حاصل با یکدیگر مقایسه شدند. برای ارزیابی ریزساختار، از میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی، طیف‌سنجی توزیع انرژی و جهت شناسایی فازها از پراش پرتو ایکس استفاده گردید. نتایج نشان داد که جوشکاری با جریان پالسی منجر به تشکیل ساختاری ریزتر با دندریت‌های هم‌محور، کاهش جدایش عناصر آلیاژی و توزیع یکنواخت‌تر کاربیدهای M_6C در فلزجوش می‌شود. همچنین، این فرایند موجب بهبود قابل توجهی در سختی، مقاومت به ضربه و استحکام کششی فلزجوش نسبت به جوشکاری با جریان ثابت گردید. بررسی‌های شکست‌نگاری، رفتار شکست نرم را در تمامی نمونه‌ها تأیید کرد که با نتایج ریزساختاری و مکانیکی مطابقت داشت. یافته‌های این پژوهش، اهمیت کاربرد جریان پالسی در جوشکاری را به‌عنوان راهکاری مؤثر برای کنترل ریزساختار و بهبود خواص مکانیکی اتصال سوپرآلیاژ Hastelloy X برجسته می‌سازد.

کلمات کلیدی: سوپرآلیاژ Hastelloy X، جوشکاری GTAW، جریان پالسی، فلزپرکننده ERNiCrMo-2، ریزساختار، خواص مکانیکی.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: خلیل رنجبر، k_ranjbar@scu.ac.ir.

1- مقدمه

سوپرآلیاژ Hastelloy X (UNS: N06002) که به اختصار HX نیز نامیده می‌شود، یک سوپرآلیاژ پایه نیکل استحکام یافته با محلول جامد می‌باشد که عناصر اصلی آن Ni-Cr-Fe-Mo است [1]. حضور عنصر مولیبدن در این آلیاژ، با تشکیل رسوبات موضعی کاربیدهای غنی از مولیبدن، نقش مهمی در سخت شدن ثانویه ایفا می‌کند[2]. به دلیل مقادیر بسیار کم عناصر آلومینیوم و تیتانیوم، تشکیل رسوبات فازی γ' در ریزساختار این آلیاژ

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.03]

امکان‌پذیر نیست[3]. این آلیاژ دارای خواص برجسته‌ای نظیر استحکام مکانیکی در دماهای بالا، مقاومت خزشی مطلوب، پایداری در برابر اکسیداسیون و خوردگی در دماهای بالا، و مقاومت قابل‌توجه در برابر ترک‌خوردگی تنشی (SCC) است. چنین خصوصیات ممتازی، HX را به گزینه‌ای ایده‌آل برای استفاده در محفظه‌های احتراق موتور توربین‌های گازی و اجزای مرتبط در دماهای بالا و کوره‌های صنعتی صنایع شیمیایی و پتروشیمی تبدیل کرده است[4و5].

به دلیل کاربرد آلیاژ HX در ساخت تجهیزات حساس در صنایع استراتژیک، جوشکاری آن ضروری است و می‌توان آن را با فرایندهای جوشکاری ذوبی جوش داد[6]. جوشکاری قوسی تنگستن با گاز محافظ (GTAW) به دلیل مزایایی نظیر حرارت ورودی نسبتاً پایین، تمرکز حرارتی بالا، و حضور گاز محافظ خنثی که شرایط مناسبی را برای تولید اتصالات با حداقل اعوجاج و آلودگی فراهم می‌کند، کاربردهای گسترده ای به خصوص در صنعت توربین پیدا کرده است[7و8]. خواص نهایی اتصال از جمله خواص مکانیکی، مقاومت به خوردگی و حساسیت به ترک گرم، به شدت تحت تأثیر ریزساختار و رفتار انجمادی فلزجوش است که این تغییرات می‌توانند خواص خوردگی و عملکرد مکانیکی اتصال را تحت تأثیر قرار دهند [9و10].

در جوشکاری ذوبی با استفاده از فلزهای پرکننده پایه نیکل، به‌دلیل ماهیت ساختار انجمادی فلزجوش، کاهش خواص مکانیکی مورد انتظار است. ساختار انجمادی فلزجوش سوپرآلیاژ HX آستنیتی به صورت دندریتی و همراه با مقادیر بالای جدایش عنصری می‌باشد که این دو عامل باعث کاهش خواص مکانیکی فلزجوش نسبت به فلزپایه می‌شوند [11و12]. بنابراین، با توجه به کاربردهای حیاتی آلیاژ HX و ضرورت عملکرد مطمئن اتصالات در شرایط بحرانی، به‌کارگیری تکنیک‌هایی برای اصلاح ریزساختار فلزجوش همزمان با فرایند انجماد، ضروری است.

به منظور اصلاح ریزساختار و در نهایت بهبود خواص فلزجوش، می‌توان ریزدانه کردن فلزجوش را انجام داد. برای این منظور از تکنیک‌هایی مانند تلقیح، جوانه‌زنی سطحی تحریک شده و همچنین تحریک خارجی نظیر نوسان قوس، پالس قوس یا لرزش حوضچه جوش برای کنترل ریزساختار و ریزدانه‌کردن دانه‌های فلزجوش استفاده می‌شود. یکی از روش‌های اصلاح ریزساختار فلزجوش، جوشکاری قوسی تنگستن با گاز محافظ با جریان پالسی (PCGTAW) است. در فرایند جوشکاری با جریان پالسی، به دلیل کاهش ناگهانی انرژی قوس الکتریکی در طول جریان زمینه، دمای حوضچه جوش کاهش یافته و فلزمذاب در شرایط تحت تبرید قرار می‌گیرد. این شرایط باعث افزایش جوانه‌زنی سطحی می‌شود و به‌دلیل دمای پایین‌تر در جریان زمینه، جوانه‌ها قادر به پایدار ماندن خواهند بود. علاوه بر این، پالس‌های ایجاد شده توسط جریان پالسی موجب افزایش همرفت و نوسان فلز مذاب در حوضچه جوش می‌گردند که در نتیجه، توزیع یکنواخت‌تری از جوانه‌های تشکیل شده را فراهم می‌کنند. این افزایش همرفت و نوسان باعث شکستن نوک دندریت‌ها در ناحیه خمیری می‌شود و قطعات شکسته‌شده به‌عنوان جوانه‌های جدید در حوضچه جوش عمل می‌کنند[13-15]. جوشکاری با جریان پالسی نسبت به جوشکاری با جریان ثابت از نظر چرخه‌های تأمین حرارت تفاوت دارد. در جوشکاری با جریان ثابت، میزان کل حرارت ورودی در طول فرایند ثابت است. این موضوع باعث رشد دانه‌های درشت و تشکیل رسوبات در مرحله نهایی انجماد می‌شود. در حالی که در جوشکاری با جریان پالسی، اتصال در طول اعمال جریان بیشینه که کوتاه‌مدت است انجام می‌شود و حرارت ورودی کمتری ایجاد می‌کند و بلافاصله پس از آن، سرد شدن رخ می‌دهد. به دلیل استفاده از جریان پالسی، چرخه‌های حرارتی تکرارشونده باعث افزایش سرعت سرد شدن می‌شوند که این امر منجر به کاهش میزان جدایش عناصر آلیاژی می‌گردد، زیرا زمان کافی برای توزیع مجدد آن‌ها وجود ندارد. این پدیده در مرحله پایانی انجماد، ریزجدایش را کاهش داده و منجر به ایجاد ریزساختار ظریف می‌شود[16و17].

استفاده از جوشکاری با جریان پالسی در مقایسه با جوشکاری با جریان ثابت، مزایای قابل‌توجهی دارد؛ از جمله پایداری بیشتر

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.03]

قوس، ریزتر بودن اندازه دانه‌ها، کاهش تخلخل، اعوجاج کمتر، کوچک‌تر بودن ناحیه‌ی HAZ و امکان کنترل دقیق‌تر حرارت ورودی[18]. بنابراین، محققان تلاش کرده‌اند تا با بهره‌گیری از جریان پالسی در فرایند جوشکاری، ریزساختار فلزجوش را اصلاح کرده و خواص آن را بهبود بخشند. دزفولی و همکاران [19] ، تأثیر فرکانس پالس در فرایند PCGTAW بر جوش‌پذیری سوپرآلیاژ Hastelloy B2 را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که افزایش فرکانس پالس با بهبود پایداری قوس، افزایش تلاطم حوضچه مذاب و ریزتر شدن ساختار دندریتی، موجب ارتقاء خواص مکانیکی از جمله استحکام و سختی می‌گردد. تبریزی و همکاران [20] تأثیر جریان ثابت و پالسی در فرایند جوشکاری GTAW فولاد AISI 316L را بر ریزساختار و خواص مکانیکی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده از جریان پالسی با ریزتر کردن اندازه دانه‌ها، کاهش عرض ناحیه غیرمختلط، و تغییر مورفولوژی به دانه‌های هم‌محور، منجر به بهبود سختی و چقرمگی فلزجوش می‌شود. جولا و همکاران[21] ، ریزساختار و خواص مکانیکی فلزجوش غیرمشابه فولادهای AISI 316 و A387-Gr.91 را با جریان‌های ثابت و پالسی مقایسه کردند. بنا بر گزارش آن‌ها جریان پالسی، منجر به بهبود ریزساختار فلزجوش و افزایش همزمان سختی و چقرمگی می‌شود. سوبرامانی و همکار[22] اتصالات جوش سوپرآلیاژ 80A را با استفاده از جریان‌های ثابت و پالسی بررسی کردند و نتیجه گرفتند که استفاده از جریان پالسی موجب کاهش ریزجدایش، ریزشدن ساختار و بهبود خواص مکانیکی جوش‌ها می‌شود. ناتش و همکار[23] نیز نتایج مشابهی را در مورد استفاده از جریان پالسی در اتصالات جوش سوپرآلیاژ Incoloy 20 گزارش کردند. همچنین ساتیشکومار و همکاران[24] جوشکاری HX را با دو جریان ثابت و پالسی با استفاده از پر کننده پایه نایمونیک C263 انجام دادند. با توجه به ترکیب شیمیایی متفاوت این پرکننده و فلزپایه نویسندگان بیشتر به شناسایی و تأثیر انواع رسوبات در فلزجوش تمرکز داشته اند. همچنین، گزارش‌هایی در مورد کاهش جدایش، ریزشدن ساختار، حذف فازهای ثانویه ناخواسته و بهبود توزیع رسوبات با انجام جوشکاری با جریان پالسی در سوپرآلیاژهای پایه نیکل وجود دارد که خواص مکانیکی مانند استحکام، سختی، ازدیاد طول و چقرمگی ضربه را بهبود بخشیده است [28-25].

با وجود تلاش‌های گسترده در جهت بهبود خواص اتصالات جوش سوپرآلیاژهای پایه نیکل، همچنان خلأهای قابل‌توجهی در زمینه بررسی جامع و هدفمند تأثیر جریان پالسی در فرایند جوشکاری بر ریزساختار و عملکرد اتصال سوپرآلیاژ HX وجود دارد. این خلأ پژوهشی، لزوم انجام مطالعات دقیق‌تر و سیستماتیک‌تر را آشکار می‌سازد. نوآوری این پژوهش در به‌کارگیری فرایند جوشکاری پالسی به‌عنوان روشی مؤثر برای اصلاح ریزساختار و ارتقاء عملکرد جوش در یکی از آلیاژهای کلیدی و پرکاربرد صنعتی نهفته است؛ فرایندی که می‌تواند از طریق افزایش نرخ جوانه‌زنی، کاهش جدایش عناصر آلیاژی، و یکنواخت‌سازی ساختار فلزجوش، کیفیت اتصال را به‌طور معناداری بهبود بخشد.

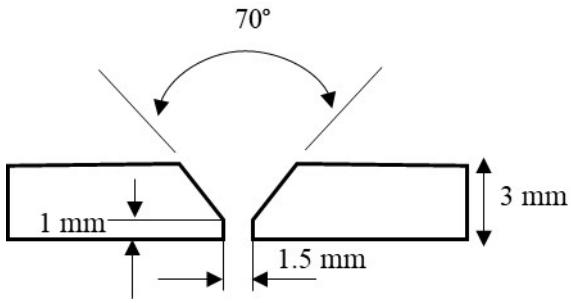
2- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش، از ورق‌هایی از جنس سوپرآلیاژ پایه نیکل HX (در شرایط آنیل انحلالی) با ضخامت 3 میلی‌متر به‌عنوان فلزپایه استفاده شد. عملیات حرارتی آنیل انحلالی این سوپرآلیاژ در دمای 1177° C به مدت 3 ساعت انجام گرفت و سپس به‌سرعت سرد شد. برای انجام فرایند جوشکاری، از فلزپرکننده ERNiCrMo-2 با قطر 2،4 میلی‌متر استفاده گردید. فلزپرکننده ERNiCrMo-2 به دلیل ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی مشابه با سوپرآلیاژ HX انتخاب شده است. بنابراین، انتظار می‌رود که در ناحیه اتصال، پدیده‌هایی همچون ناحیه ذوب جزیی، ناحیه مخلوط نشده و ... ایجاد نشود و مرز اتصال از پیوستگی مناسبی برخوردار باشد. از طرفی، با توجه به یکسان بودن ترکیب فلزپرکننده و فلز پایه، خواص مکانیکی نیز تفاوت محسوسی نخواهند داشت. از مزیت‌های دیگر این انتخاب می‌توان به جوش‌پذیری مناسب و همچنین تطابق ضریب انبساط حرارتی، که باعث کاهش تنش‌های ایجادشده در جوش

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.03]

می‌شود، اشاره کرد. ترکیب شیمیایی فلزپایه و فلزپرکننده در جدول(1) ارائه شده است. برای هر اتصال جوش، قطعاتی از فلزپایه با ابعاد 3 × 40 × 100 میلی‌متر تهیه شد. طرح اتصال V شکل در شکل(1) نشان داده شده است.

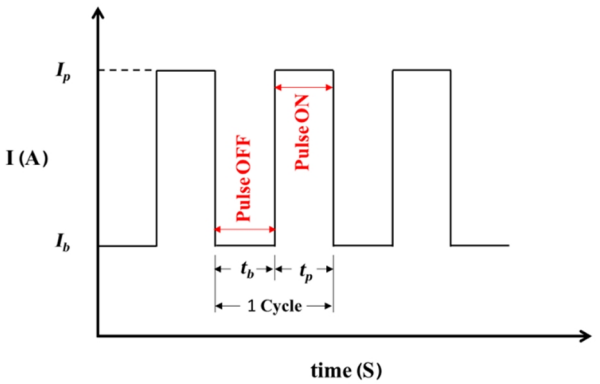


شکل 1- شماتیک طرح اتصال از نمای روبرو.

عملیات جوشکاری با دستگاه DG-TIG PSQ250 AC/DC ، در یک پاس و به دو روش جوشکاری قوسی تنگستن با گاز محافظ با جریان ثابت (CCGTAW) و جریان پالسی (PCGTAW) با قطبیت منفی (DCEN) انجام شد. گاز آرگون به منظور محافظت از حوضچه جوش و حفاظت پشتی، با خلوص99/99% و به ترتیب با نرخ جریان lit/min 18 و lit/min 10 استفاده شد. پارامترهای جوشکاری در جدول(2) آورده شده است.در این پژوهش، از جریان پالسی مربعی شکل استفاده شد که نمودار تغییرات آن برحسب زمان در شکل(2) نمایش داده شده است. برای محاسبه حرارت ورودی در فرایند جوشکاری PCGTAW ، از مقدار میانگین جریان استفاده می‌شود که با استفاده از رابطه (1) محاسبه می‌گردد [21]:

$$I_m = (I_p \times on\ time\ \%) + I_b \times (1 - on\ time\ \%) \quad (1)$$

که در آن I_m جریان میانگین؛ I_b جریان زمینه؛ I_p جریان بیشینه (پالسی) و on time یا زمان روشن بودن قوس درصد مدت زمان جوشکاری با جریان پالسی است. در این پژوهش، در جوشکاری با جریان پالسی، فرکانس پالس برابر با 4 هرتز است که منجر به مدت زمان 250 میلی‌ثانیه برای هر سیکل جوشکاری می‌شود. با تنظیم زمان روشن بودن قوس روی 60%، زمان اعمال جریان بیشینه (tp) برابر با 150 میلی‌ثانیه و زمان اعمال جریان زمینه (tb) برابر با 100 میلی‌ثانیه است.



شکل 2- نمودار جریان برحسب زمان جوشکاری با جریان پالسی مربعی شکل. I_pجریان بیشینه، I_bجریان زمینه، t_pزمان جریان بیشینه و t_bزمان جریان زمینه می‌باشد.

جدول 1- ترکیب شیمیایی فلزپایه و فلزپرکننده

ماده	عناصر: بر حسب درصد وزنی (wt. %)												
	Ni	Cr	Fe	Mo	Co	W	Si	Mn	Cu	Nb	Ti	Al	C
Hastelloy X	مانده	۲۱	۱۴/۶۰	۷/۳۰	۳/۲۳	۰/۹۷	۰/۳۶	۰/۶۴	۰/۳۲	۰/۲۱	۰/۰۲	۰/۲۵	۰/۰۵
ERNiCrMo-2	مانده	۱۹/۱۶	۱۷/۴۸	۹/۵۱	۲/۰۱	۰/۳۵	۰/۱۱	۰/۹۴	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۱۹	–	۰/۰۷

برای بررسی‌های ریزساختاری، نمونه‌هایی از سطح مقطع اتصالات جوش شامل فلزپایه، ناحیه متأثر از حرارت (HAZ) و فلزجوش با استفاده از دستگاه وایرکات جدا شد. ابتدا، نمونه‌ها با سنباده‌هایی از جنس کاربید سیلیسیم (SiC) با شماره‌های 60 تا 3000 پرداخت شده و سپس با پودر آلومینا با اندازه ذرات 0/3 میکرومتر پولیش گردیدند تا سطحی آینه‌ای به دست آید. به‌منظور بررسی و شناسایی ریزساختار ناحیه‌های مختلف اتصال (فلزپایه و فلزجوش و ناحیه HAZ)، سطوح پولیش‌شده با محلول اگزالیک اسید (حاوی 100 میلی‌لیتر آب مقطر و 10 گرم اگزالیک اسید)، به روش الکتروشیمیایی حکاکی شدند. ریزساختار نواحی مختلف با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM) مدل MIRA3-TESCAN مجهز به تجزیه و تحلیل عنصری طیف سنج توزیع انرژی (EDS) مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین برای شناسایی فازهای ساختاری، آزمایش پراش پرتو ایکس (XRD) با استفاده از تابش $Cu\text{-}K_\alpha$ به طول موج 1/54 آنگستروم انجام شد. علاوه بر این، کسر حجمی فازهای ساختاری با استفاده از نرم‌افزار آنالیز تصویری MIP به‌صورت

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.03]

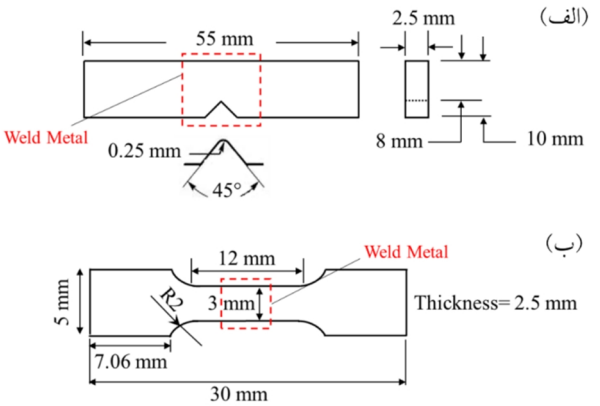
کمی تعیین شد.آزمایش ریزسختی‌سنجی ویکرز مطابق با استاندارد ASTM E384-22، به‌منظور اندازه‌گیری و بررسی روند تغییرات ریزسختی در نواحی مختلف نمونه‌ها، با نیروی اعمالی 100 گرم و زمان نگهداری 10 ثانیه انجام شد. آزمایش ضربه چارپی نیز مطابق با استاندارد ASTM E23، به‌منظور اندازه‌گیری انرژی جذب‌شده در هنگام شکست نمونه در دمای محیط انجام گرفت. از فلزپایه و فلزهای جوش ایجاد شده، دو نمونه ضربه به‌صورت عرضی طبق استاندارد ASTM E23، با ابعاد 2/5×10×55 (ابعاد به میلی‌متر)، توسط دستگاه وایرکات تهیه شد.

جدول 2- پارامترهای جوشکاری

جوشکاری	CCGTAW	PCGTAW
نوع جریان	ثابت	پالسی
جریان بیشینه (A)	–	۶۰
جریان زمینه (A)	–	۴۵
فرکانس پالس (Hz)	–	۴
زمان روشن بودن قوس (%)	–	۶۰
جریان میانگین (A)	۵۳	۵۴
ولتاژ (V)	۱۴	۱۴
سرعت جوشکاری (mm/s)	۱/۰۶۳	۱/۲۳۴
حرارت ورودی* (KJ/mm)	۰/۴۸۸	۰/۴۲۸

* مقدار حرارت ورودی طبق رابطه‌ی 0.7EI/V محاسبه شد؛ که در آن ۰/۷ بازده فرآیند جوشکاری، E ولتاژ جوشکاری، I جریان و V سرعت جوشکاری است.

این نمونه‌ها دارای یک شیار V شکل با عمق 2 میلی‌متر، زاویه 45 درجه و شعاع ریشه 0/25 میلی‌متر بودند، به‌گونه‌ای که فلزجوش دقیقاً در مرکز نمونه‌ها قرار گرفت (شکل3- الف).بررسی رفتار کششی مطابق با استاندارد ASTM E8و با استفاده از نمونه‌هایی با ابعادی معادل یک‌سوم نمونه استاندارد، در دمای محیط انجام شد. نمونه‌ها به شکل تخت، با طول سنجه 12 میلی‌متر و عرض 3 میلی‌متر تهیه شدند، همان‌طور که به‌صورت شماتیک در شکل(3- ب) نشان داده شده است. آزمایش کشش با استفاده از دستگاه مدل STM-50 ساخت شرکت Santam و با سرعت حرکت فک متحرک 1 میلی‌متر بر دقیقه انجام شد.



شکل3- تصویر شماتیک از : الف- نمونه آزمایش ضربه، ب- نمونه آزمایش کشش

3- نتایج و بحث

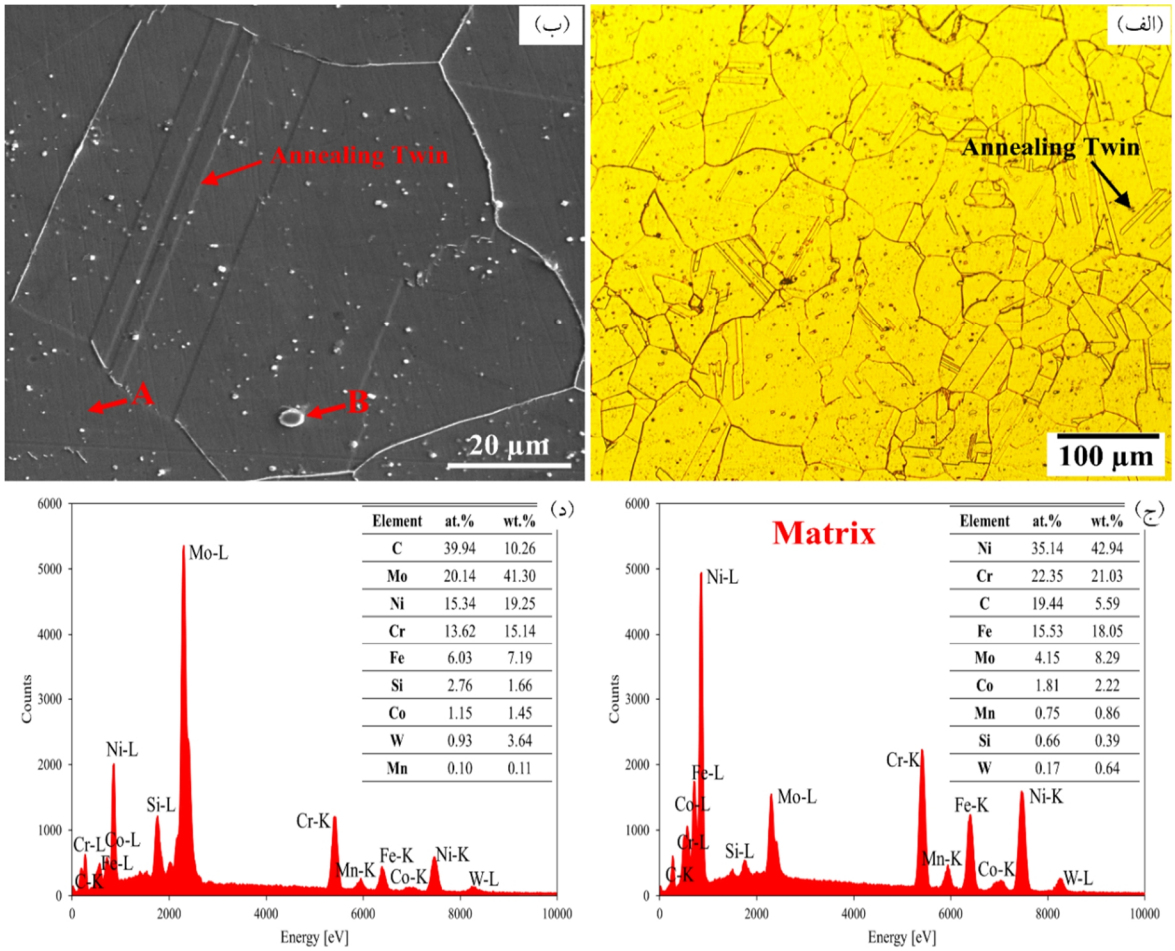
3-1- ریزساختار فلزپایه

شکل(4) ریزساختار فلزپایه HX را در شرایط آنیل انحلالی نشان می‌دهد. تصویر نوری در شکل(4- الف) ساختار آستنیتی هم محور را به‌خوبی نشان می‌دهد. در تصویر FESEM (شکل 4- ب)، حضور دوقلوهای آنیلی درون دانه‌های آستنیتی و نیز پراکندگی رسوبات در مرز دانه‌ها و داخل آن‌ها به وضوح قابل مشاهده است. نتایج آنالیز EDS از زمینه (شکل 4- ج) نشان‌دهنده غلظت بالای عناصر نیکل، کروم، آهن و مولیبدن است که معرف ترکیب اصلی سوپرآلیاژ HX هستند. همچنین، آنالیز EDS رسوبات (شکل 4- د) حاکی از غلظت بالای مولیبدن و کربن بوده و ماهیت آن‌ها را به‌عنوان کاربیدهای نوع M_6Cغنی از مولیبدن تأیید می‌کند؛ نتایجی که با پژوهش‌های پیشین نیز هم‌خوانی دارد[30و29].

3-2- ریزساختار فلزجوش

شکل(5) تصاویر میکروسکوپی جوش‌های حاصل از دو فرایند مختلف را نشان می‌دهد. فلزات جوش ساختار دندریتی دارند و سه ناحیه مجزا (I، II و III) در ریزساختار آن‌ها قابل مشاهده است. تفاوت اصلی بین دو فرایند جوشکاری CCGTAW و PCGTAW، در اندازه دندریت‌ها و وسعت نواحی مختلف

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.03]



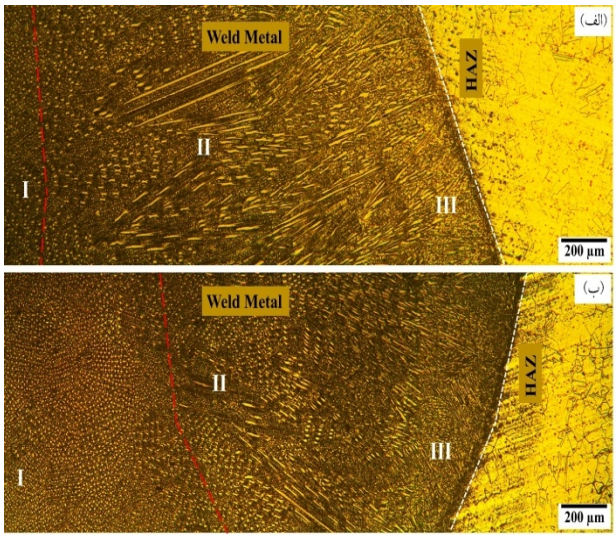
شکل 4- ریزساختار فلزپایه HX در شرایط آنیل انحلالی

الف- تصویر میکروسکوپ نوری، ب- تصویر FESEM، ج- آنالیز EDS از زمینه در نقطه A و د-آنالیز EDS از کاربیدهای غنی از مولیبدن مشخص شده با نقطه B

فلزجوش است. ناحیه I در مرکز جوش ساختار دندریتی هم‌محور ریز دارد که در فرایند پالسی (شکل 5- ب) وسعت این ناحیه به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. ناحیه II دارای ریزساختار دندریتی ستونی است و در جوشکاری با جریان پالسی وسعت این ناحیه کمتر است که نشان‌دهنده کنترل حرارتی بهتر در فرایند PCGTAW است. ناحیه III که مجاور فصل مشترک جوش قرار دارد، به دلیل سرعت سرد شدن بالا در مرز ذوب، دارای دندریت‌های صفحه‌ای کوچک‌تر است، همانطور که پیشتر نیز گزارش شده است[31]. تغییر مورفولوژی دندریتی از فصل مشترک جوش به سمت مرکز آن به‌وضوح قابل مشاهده است و این تغییر توسط دو پارامتر کلیدی نرخ رشد (R) و گرادیان حرارتی (G) کنترل می‌شود. تکامل ریزساختاری در جوشکاری به طور قابل توجهی تحت تأثیر این دو پارامتر و به ویژه نسبت G/R، قرار دارد[32و9]. دمای مرز ذوب پایین‌تر از مرکز جوش است که این اختلاف دما باعث ایجاد گرادیان حرارتی در مرز ذوب می‌شود، اما این گرادیان دمایی در خط مرکزی جوش نسبت به مرز ذوب ضعیف‌تر است. همچنین میزان تحت انجماد ترکیبی در مرز ذوب کمتر از مرکز جوش بوده و به نرخ رشد پایین‌تر در این ناحیه منجر می‌شود. بنابراین با توجه به این که $G_{CL} < G_{FL}$ و $R_{CL} >> R_{FL}$ ، می‌توان نتیجه گرفت که $(G/R)_{CL} << (G/R)_{FL}$، در نتیجه با حرکت از مرز ذوب به سمت خط مرکزی جوش، نسبت G/R کاهش یافته و حالت انجمادی از دندریتی ستونی به دندریتی هم‌محور تغییر می‌کند[34و33]. در فرایند PCGTAW، به دلیل افزایش همرفت و نوسان در حوضچه جوش، دندریت‌ها در ناحیه خمیری تکه‌تکه شده و به حوضچه جوش

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.03]

منتقل می‌شوند. این دندریت‌های شکسته به عنوان مکان‌های مؤثر برای جوانه‌زنی ناهمگن عمل می‌کنند. بنابراین فرایند PCGTAW، موجب تسهیل رشد و گسترش ناحیه دندریتی هم‌محور از مرز ذوب به سوی مرکز جوش می‌شود. تحت‌انجماد ترکیبی موجب می‌شود مذاب به دمایی پایین‌تر از انجماد تعادلی برسد و جوانه‌زنی پیش از پیشروی جبهه انجماد رخ دهد. هنگامی که میزان تحت‌انجماد ترکیبی از گرادیان حرارتی پیشی بگیرد، شرایط برای رشد دندریت‌های هم‌محور فراهم‌تر می‌شود[32و29]. مقایسه شکل‌های(5- الف و 5-ب) به وضوح تأثیر جریان پالسی بر تغییر مورفولوژی دندریت‌ها در فلزجوش و بهبود ریزساختار فلزجوش را نشان می‌دهد، که با یافته‌های گزارش شده در مطالعات پیشین سازگار است [35و21].



شکل 5- تصاویر میکروسکوپ نوری از نواحی جوش: الف- CCGTAW، ب- PCGTAW.

شکل(6) تأثیر استفاده از جریان پالسی در فرایند جوشکاری را بر مورفولوژی دندریتی در مرکز فلزجوش (ناحیه I) و شکل(7) نیز تغییرات ایجادشده در دندریت‌های ستونی (ناحیهII) را نشان می‌دهد. در هر دو ناحیه، جریان پالسی به‌وضوح منجر به ریزتر شدن ساختار دندریتی و توزیع یکنواخت‌تر عناصر آلیاژی و کاربیدها شده است. این مشاهدات نشان می‌دهند که استفاده از جریان پالسی می‌تواند به‌طور مؤثری ریزساختار فلزجوش را اصلاح کرده و ساختاری همگن‌تر و بهینه‌تر ایجاد کند. در این فرایند، جریان متناوب بین سطوح بالا و پایین، نوسانات حرارتی سریع در حوضچه جوش ایجاد می‌کند. این نوسانات همراه با سرعت سرد شدن بالاتر، جوانه‌زنی را به شدت افزایش داده و زمان لازم برای رشد جوانه‌ها را محدود می‌کنند. در نتیجه، ساختار نهایی ریزتر و ظریف‌تر خواهد بود[38-36]. شکل(8) اندازه و توزیع ذرات کاربید M_6C را در فلزجوش حاصل از دو فرایند CCGTAW و PCGTAW مقایسه می‌کند. در فرایند PCGTAW، ذرات کاربید به وضوح ریزتر بوده و با یکنواختی بیشتری در زمینه آستنیتی پراکنده شده‌اند. جدایش عناصر آلیاژی و تشکیل کاربیدهایی مانند M_6C معمولاً در طول فرایند انجماد آلیاژ HX رخ می‌دهد؛ پدیده‌ای که اساساً به زمان وابسته است. استفاده از جریان پالسی در جوشکاری منجر به افزایش جریان همرفتی و ایجاد نوسانات در حوضچه جوش می‌شود. در نتیجه، به دلیل حرارت ورودی کمتر و سرعت سرد شدن بالاتر و کاهش زمان انجماد، جدایش مولیبدن در نواحی بین‌دندریتی کاهش می‌یابد[40و39]. در نتیجه، میزان تشکیل کاربیدهای ثانویه مانند M_6C کاهش می‌یابد.

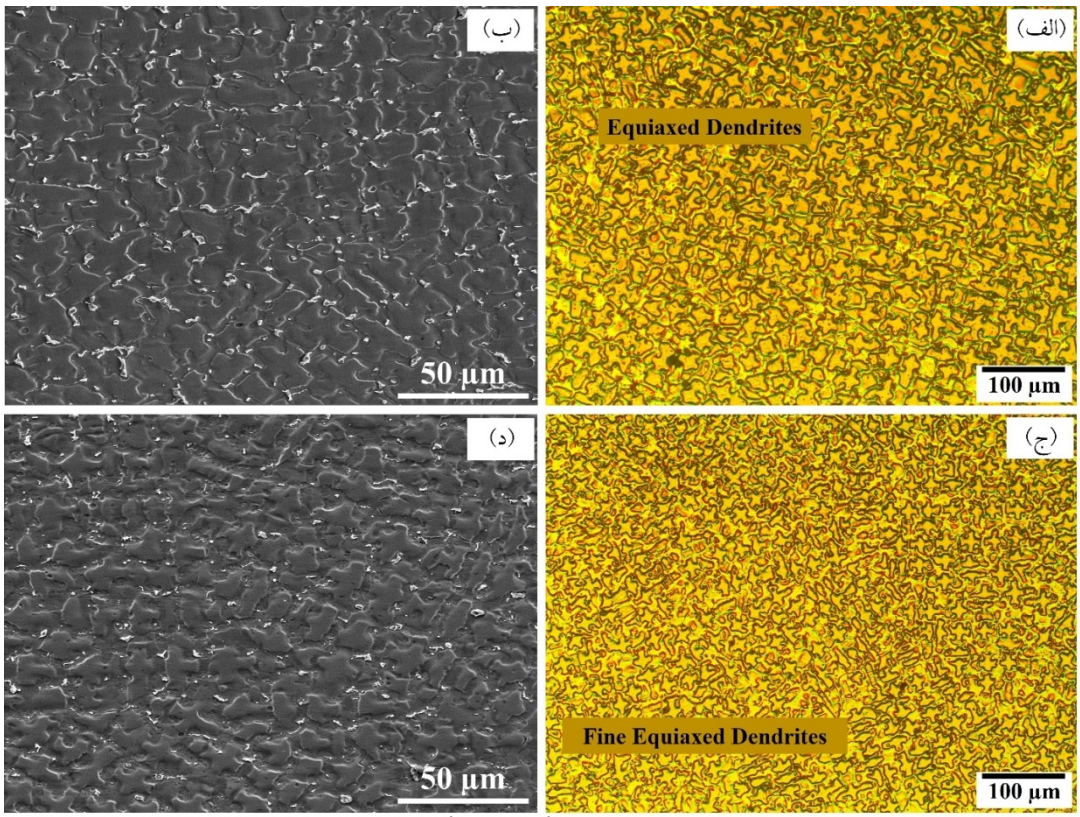
3-3- تجزیه و تحلیل XRD

شکل(9) الگوهای XRD فلزپایه HX و فلزهای جوش حاصل از دو فرایند CCGTAW و PCGTAW را نشان می‌دهد. این الگوها دارای پیک‌های مشخصی از صفحات FCC هستند که نشان‌دهنده غالب بودن فاز آستنیتی در فلزپایه و هر دو نوع فلزجوش است؛ موضوعی که برای این سوپرآلیاژ پایه نیکل قابل انتظار است[29]. نشانه‌ای از پیک‌های پراش متمایز مربوط به کاربیدهای غنی از مولیبدن یا سایر فازهای بین‌فلزی مشاهده نشد. همچنین، شدت پیک‌ها در فلزجوش PCGTAW کمتر است که به نرخ سرمایش بالاتر، گرادیان حرارتی بالاتر، حرارت ورودی کمتر و تمایل کمتر به جدایش عناصر آلیاژی در این فرایند نسبت داده می‌شود [41و35].

3-4- ریزساختار فصل مشترک و HAZ

شکل(10-الف و 10-ب) ریزساختار ناحیه HAZ و فصل مشترک فلزهای جوش را نشان می‌دهد. پیوستگی کامل در این

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.03]



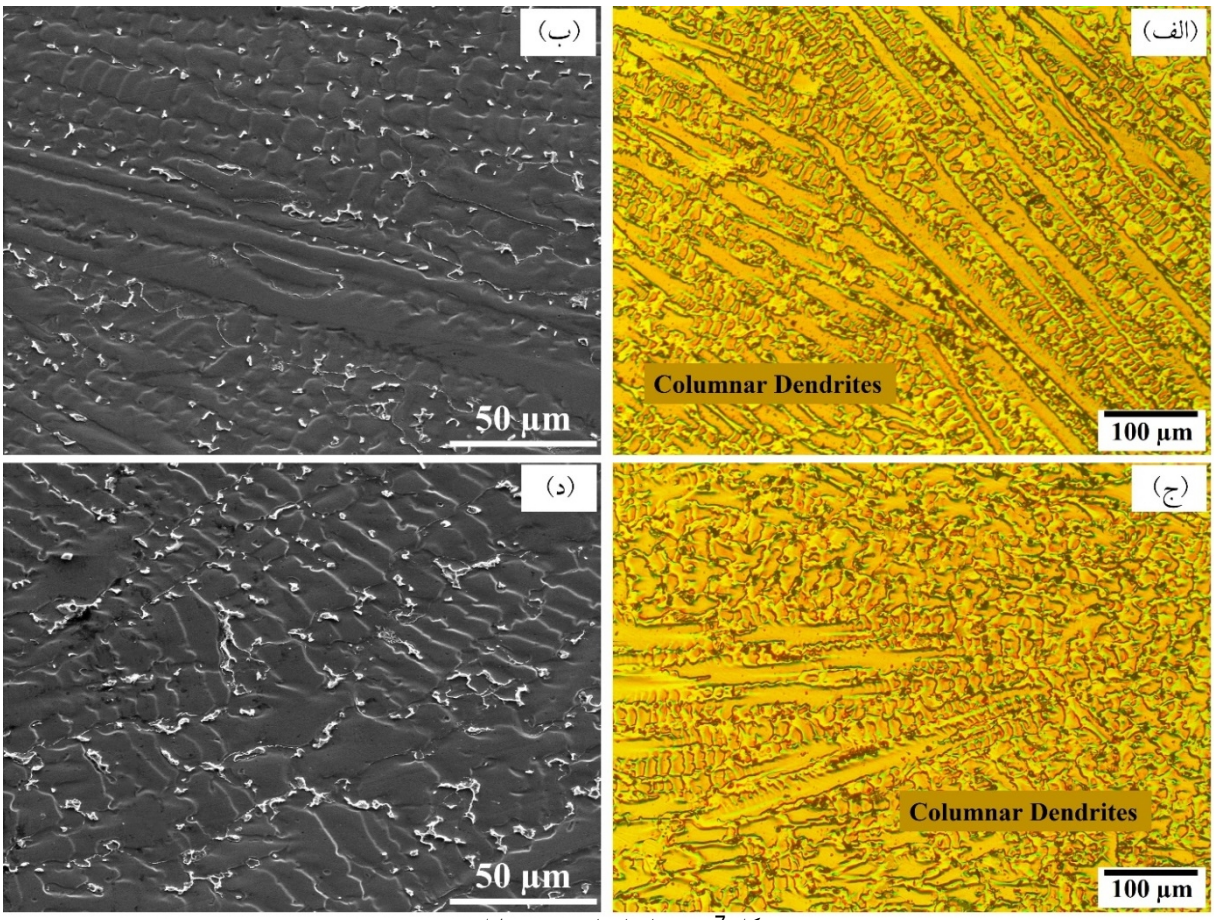
شکل 6- ریزساختار ناحیه I (مرکز جوش) در فلزات جوش

الف و ب- CCGTAW، ج و د- PCGTAW . تصاویر نوری در (الف و ج) و تصاویر FESEM در (ب و د) نشان داده شده‌اند.

نواحی مشاهده شده و هیچ‌گونه ترک یا ناپیوستگی وجود ندارد. همانند تحقیق حاضر، معمولاً رشد هم‌بافته در جوشکاری مشابه، که در آن فلزپرکننده و فلزپایه ساختار بلوری یکسان و ترکیب شیمیایی نسبتاً مشابهی دارند، مشاهده می‌شود. به‌گونه‌ای که دانه‌ها در حوضچه مذاب فلزجوش جوانه‌زنی کرده و با جهت‌گیری بلوری فلزپایه، که به‌طور جزئی ذوب شده است، هم‌راستا می‌شوند و مرز دانه‌ها در امتداد یکدیگر قرار می‌گیرد. در جوشکاری سوپرآلیاژهایی مانند HX، شباهت ساختار بلوری و ترکیب شیمیایی میان فلزپایه و فلزپرکننده، شرایط را برای وقوع این پدیده فراهم می‌کند. در جوشکاری با جریان ثابت، شکل‌گیری ستون‌های دانه‌ای که از مرز ذوب به سمت فلزجوش امتداد یافته‌اند، از نشانه‌های بارز رشد هم‌بافته است، اما در جوشکاری با جریان پالسی، تغییرات حرارتی یا ریزشدن دانه‌ها باعث می‌شود این رشد هم‌بافته کمتر آشکار باشد[29]. در مجاورت خط ذوب، یک ناحیه باریک شامل دندریت‌های صفحه‌ای (منطقه III) قابل تشخیص است که در آن نسبتG/R به بیشترین مقدار خود می‌رسد[31]. HAZ بخشی از فلزپایه در مجاورت فلزجوش است که تحت تأثیر حرارت فرایند جوشکاری قرار می‌گیرد. در این ناحیه، پدیده‌هایی مانند رشد دانه‌ها، انحلال رسوبات و کاربیدها طی چرخه حرارتی جوشکاری و به‌دنبال آن، رسوب مجدد پس از سرد شدن رخ می‌دهد[42]. شکل‌های(5 و 10) نشان می‌دهند که در هر دو نوع اتصال جوش، دو ناحیه مجزا در HAZ وجود دارد: یک HAZ ریزدانه (FGHAZ) نزدیک خط جوش، و یک HAZ درشت‌دانه (CGHAZ) که در نزدیکی فلزپایه قرار دارد. اگرچه اندازه دانه‌ها در HAZ در فلزهای جوش تفاوت قابل‌توجهی نداشت، اما عرض FGHAZ در جوش PCGTAW به‌طور قابل ملاحظه‌ای باریک‌تر بود (شکل 10- ب)، که ناشی از حرارت ورودی کمتر، سرد شدن سریع‌تر و کاهش زمان ماندن در دمای بالا در این فرایند است[35]. در نتیجه، حجم کمتری از فلزپایه به دماهای بحرانی برای رشد دانه‌ها و رسوبات می‌رسد. در نتیجه، رسوبات تازه‌تشکیل‌شده ریز باقی می‌مانند و به‌صورت

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.03]



شکل 7- ریزساختار ناحیه II در فلزات جوش

الف و ب- CCGTAW، ج و د- PCGTAW . تصاویر نوری در (الف و ج) و تصاویر FESEM در (ب و د) نشان داده شده‌اند.

یکنواخت پراکنده می‌شوند. این رسوبات، به‌عنوان موانعی برای حرکت مرز دانه عمل کرده و از رشد دانه‌ها در حین چرخه حرارتی جلوگیری می‌کنند[43].

3-5- خواص مکانیکی

3-5-1- سختی

شکل(11) پروفیل‌های ریزسختی ویکرز را در امتداد سطح مقطع جوش‌های حاصل از دو فرایند مختلف نشان می‌دهد. فلزپایه HX سختی تقریباً ثابتی در حدود 222/6 ± 2/6 HV را نشان می‌دهد. سختی فلزجوش PCGTAW به طور قابل توجهی بیشتر از فرایند CCGTAW است. میانگین سختی در نمونه CCGTAW حدود 206/8 ± 5/2 HV می‌باشد، در حالی‌که این مقدار در نمونه PCGTAW به 230/3 ± 6/5 HV افزایش یافته است. این افزایش قابل توجه سختی در نمونه جوشکاری شده با جریان پالسی به نرخ سرمایش بالاتر، حرارت ورودی کمتر، گرادیان حرارتی بالاتر و تشکیل مقدار بیشتری از دندریت‌های ریز و هم‌محور نسبت داده می‌شود [41و35]. ریزتر شدن دندریت‌ها و مورفولوژی هم‌محور آن‌ها، باعث بهبود خواص مکانیکی مطابق با معادله هال-پچ می‌شود. نتایج مشابهی نیز در سایر پژوهش‌ها درباره رابطه بین ریزساختار و سختی در مورد اتصالات جوش سوپرآلیاژها گزارش شده است [39و29و19]. همچنین در هر دو نمودار، یک ناحیه گذار (یعنی HAZ) قابل مشاهده است که در آن سختی فلزجوش به تدریج به سختی فلزپایه نزدیک می‌شود.

3-5-2- چقرمگی ضربه

انرژی ضربه فلزپایه و فلزهای جوش با استفاده از آزمایش ضربه چارپی ارزیابی شد. فلزپایه HX کمترین انرژی ضربه را

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

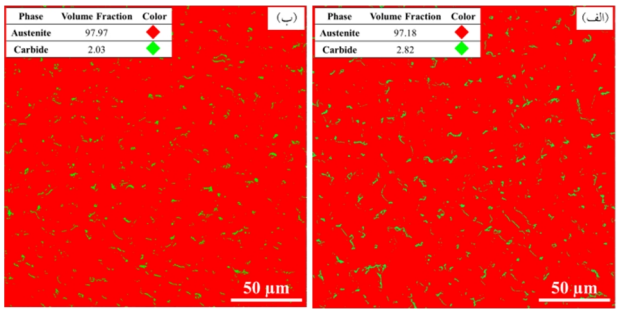
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.03]

با مقدار 2/5 ± 50/5 ژول نشان داد. در مقابل، انرژی ضربه فلزجوش حاصل از فرایندهای CCGTAW و PCGTAW به ترتیب 2 ± 62 ژول و 2/5 ± 73 ژول به دست آمد (جدول 3). استفاده از جریان پالسی منجر به افزایش قابل‌توجه انرژی ضربه فلزجوش گردید. چقرمگی شکست بالاتر فلزجوش در فرایند PCGTAW نسبت به CCGTAW ، که ناشی از ساختار ریزتر و گسترش ناحیه هم‌محور است، موجب افزایش چگالی مرزهای دانه می‌گردد. مرزهای دانه به‌عنوان موانع فیزیکی برای رشد و پیشروی ترک عمل می‌کنند و با کاهش اندازه دانه‌ها، چگالی مرزهای دانه افزایش یافته و مسیر پیشروی ترک پیچیده‌تر و انرژی ضربه افزایش می‌یابد. به‌علاوه، ساختار ریزتر با توزیع یکنواخت‌تر عناصر آلیاژی و کاهش تجمع موضعی تنش همراه است که به نوبه خود موجب بهبود چقرمگی فلزجوش می‌گردد[45و44و20]. در نتیجه، دانه‌های ریزتر ناشی از اعمال جریان پالسی، به بهبود انرژی ضربه کمک می‌کند. نتایج مشابهی نیز در پژوهش‌های پیشین گزارش شده است[46و45].

3-5-3- رفتار کششی

شکل(12)منحنی‌های تنش-کرنش فلزپایه و فلزهای جوش را نشان می‌دهد و جدول(3) نیز مقادیر عددی استحکام کششی نهایی، استحکام تسلیم و ازدیاد طول آن‌ها را ارائه می‌دهد. فلزپایه HX (منحنی آبی) به عنوان مبنا در نظر گرفته شده و شکل‌پذیری بالایی را از خود نشان می‌دهد، به‌طوری‌که دارای ازدیاد طولی برابر با % 0/9 ± 58/3 است. همچنین، این نمونه دارای استحکام کششی برابر با 8/2 ± 766/2 مگاپاسکال و استحکام تسلیم برابر با 5/9 ± 381/3 مگاپاسکال می‌باشد. در مقابل، فلزجوش CCGTAW (منحنی سبز) پایین‌ترین خواص کششی را در میان تمام نمونه‌ها دارد؛ به نحوی‌که ازدیاد طول آن % 1/1 ± 34/1 ، استحکام کششی 6/1 ± 742/8 مگاپاسکال و استحکام تسلیم 7/8 ± 344/8 مگاپاسکال است. اما بهره‌گیری از جریان پالسی در فرایند جوشکاری موجب بهبود قابل‌توجه خواص مکانیکی می‌شود. در نمونه PCGTAW (منحنی قرمز) ازدیاد طول به % 2/3 ± 47/8 ، استحکام کششی به 7/3 ± 802/4 مگاپاسکال و استحکام تسلیم به 8/6 ± 421/8 مگاپاسکال بهبود یافته است. با این حال باز هم ازدیاد طول کمتری نسبت به فلزپایه HX از خود نشان می‌دهد. نتایج مشابهی نیز در مورد بهبود خواص کششی اتصالات جوش سوپرآلیاژ 686 با استفاده از جریان پالسی گزارش گردیده است [17].

بهبود خواص مکانیکی در فلزجوش PCGTAW ، به ساختار ریزتر و دندریتی هم‌محورتر (شکل‌های 7-5) و نیز توزیع یکنواخت ذرات کاربیدی ریز شده (شکل 8) نسبت داده می‌شود. مشاهدات مشابهی نیز توسط سایر محققان گزارش شده است[22و11]. در واقع، فرایند جوشکاری می‌تواند منجر به جدایش عناصر آلیاژی، توزیع غیریکنواخت عناصر و تشکیل ریزساختارهای نامطلوب گردد، که این پدیده عمدتاً ناشی از چرخه‌های حرارتی سریع در حین جوشکاری است[47]. استفاده از جریان پالسی یکی از راهکارهای مؤثر برای کاهش این جدایش‌ها و یکنواخت‌سازی توزیع عناصر آلیاژی می‌باشد. این یکنواختی، ضمن بهبود استحکام محلول جامد از طریق توزیع یکنواخت اتم‌های حل‌شونده و ممانعت مؤثرتر از حرکت نابجایی‌ها، به ریزشدن دندریت‌ها نیز منجر می‌شود؛ امری که به‌طور مستقیم در بهبود خواص مکانیکی نقش دارد.

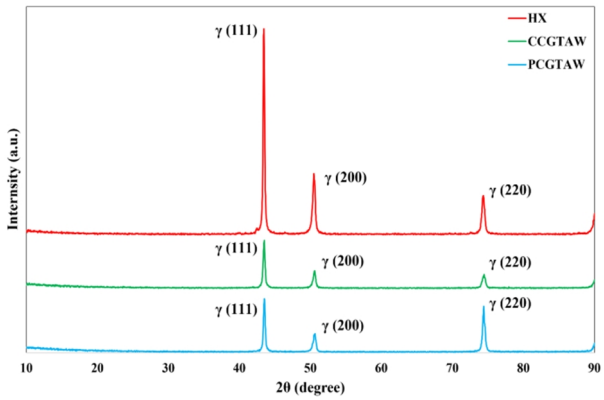


شکل 8– توزیع و پراکندگی ذرات کاربید غنی از مولیبدن در فلزجوش: الف- CCGTAW و ب- PCGTAW .

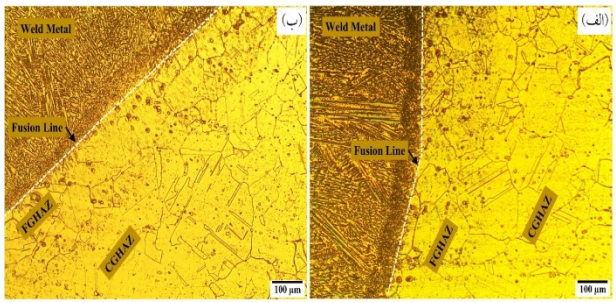
شکل(13) تصاویر FESEM از سطوح شکست نمونه‌های کششی همراه با آنالیز نقطه‌ای EDS را نشان می‌دهد. این آنالیزها ترکیب شیمیایی ذره‌ای را مشخص می‌کنند که درون گودی‌های شکست (مشخص‌شده با علامت ضربدر قرمز) قرار دارد. سطح شکست تمامی نمونه‌ها، شکست نرم را نشان

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.03]

می‌دهد که با تعداد زیادی گودی (dimple) قابل تشخیص است. گودی‌ها از طریق جوانه‌زنی، رشد و ادغام ریزحفره‌ها (micro-voids) در اطراف ذرات فاز دوم، مانند ذرات کاربیدی M_6Cدر سوپرآلیاژ HX ، ایجاد می‌شوند. سطح شکست فلزپایه HX (شکل 13-الف) دارای توزیع نسبتاً یکنواختی از گودی‌های عمیق است که نشان‌دهنده شکل‌پذیری بالای آن است.



شکل 9- الگوهای حاصل از آزمایش XRD برای فلزپایه و فلزهای جوش

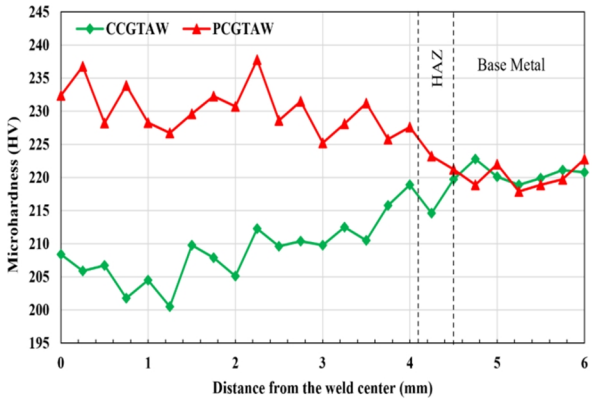


شکل 10- تصاویر میکروسکوپ نوری از فصل مشترک فلزات جوش: الف- CCGTAW، ب- PCGTAW .

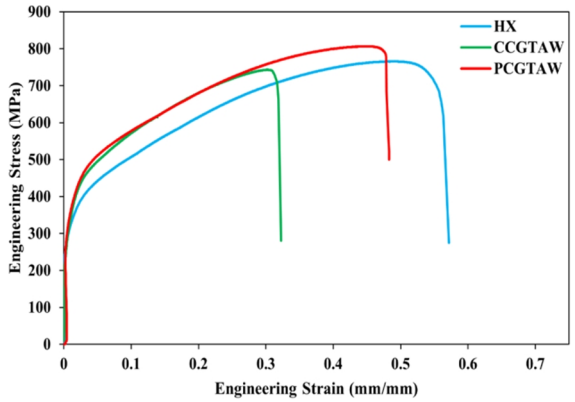
جدول 3- خواص کششی انرژی ضربه فلزپایه و فلزهای جوش حاصل از فرایندهای مختلف

نمونه	استحکام کششی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	ازدیاد طول (٪)	انرژی ضربه (J)
HX	۷۶۶/۲ ± ۸/۲	۳۸۱/۳ ± ۵/۹	۵۸/۳ ± ۰/۹	۵۰/۵ ± ۲/۵
CCGTAW	۷۴۲/۸ ± ۶/۱	۳۴۴/۸ ± ۷/۸	۳۴/۱ ± ۱/۱	۶۲ ± ۲
PCGTAW	۸۰۲/۴ ± ۷/۳	۴۲۱/۸ ± ۸/۶	۴۷/۸ ± ۲/۳	۷۳ ± ۲/۵

در شکل‌های(13-ج و 13-ه)، سطوح شکست مربوط به فلزهای جوش نشان داده شده‌اند. مقایسه این تصاویر نشان می‌دهد که سطح شکست نمونه PCGTAW نسبت به نمونه CCGTAW، دارای گودی‌های عمیق‌تر با توزیع یکنواخت‌تری است که نشان دهنده ازدیاد طول بالاتر آن است. نتایج آنالیز نقطه‌ای EDS از ذرات موجود در سطح شکست (شکل‌های 13-ب، 13-د، 13-و) حضور ذرات کاربیدی درون گودی‌ها را نشان می‌دهد که احتمالاً مربوط به کاربیدهای مولیبدن و کروم هستند. این ذرات، از جمله کاربیدهای غنی از مولیبدن و کروم مانند M_6C، به‌عنوان مکان‌های جوانه‌زنی گودی‌ها عمل می‌کنند [29]. از نتایج EDS قابل مشاهده است که استفاده از جریان پالسی در فرایند جوشکاری، منجر به کاهش جدایش عناصر و در نتیجه کاهش تشکیل رسوبات کاربیدی M_6C می‌گردد. بنابراین، توزیع مجدد عناصر ناشی از جوشکاری با جریان پالسی را می‌توان یکی از عوامل کلیدی در بهبود شکل‌پذیری و رفتار شکست فلزجوش دانست.



شکل 11- پروفیل ریزسختی ویکرز در سطح مقطع جوش‌های ایجاد شده



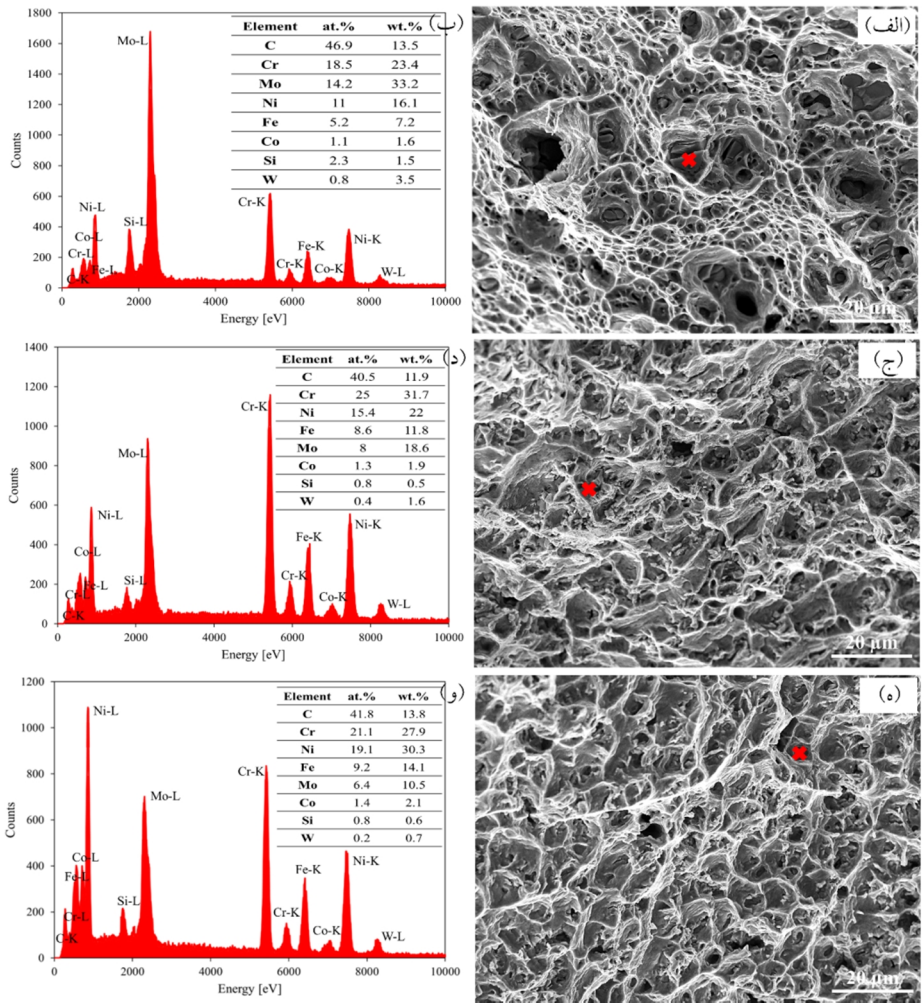
شکل 12- منحنی‌های تنش-کرنش فلزپایه و فلزهای جوش حاصل از فرایندهای مختلف

4- نتیجه گیری

در این پژوهش، تأثیر جریان پالسی بر ریزساختار و خواص

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.03]



شکل 13- تصاویر FESEM از سطوح شکست نمونه‌های کششی به‌همراه آنالیز نقطه‌ای EDS از ذرات موجود درون حفره‌ها:
الف و ب- فلز پایه HX، ج و د فلز جوش CCGTAW، ه و و- فلز جوش PCGTAW.

مکانیکی فلز جوش سوپرآلیاژ HX، که از طریق فرایند GTAW و با فلزپرکننده ERNiCrMo-2 تولید شده بود، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده به شرح زیر است:

-استفاده از جریان پالسی در فرایند GTAW، ریزساختار فلزجوش HX را به‌طور قابل‌توجهی تغییر داد. افزایش نرخ جوانه‌زنی موجب گذار ساختار از دندریتی ستونی به دندریتی هم‌محور ریز در مرکز فلزجوش شد.

-جریان پالسی به‌طور قابل‌توجهی جدایش عناصر آلیاژی، به‌ویژه مولیبدن، را کاهش داد و موجب کاهش 28 درصدی کسر حجمی ذرات کاربیدی شد. همچنین اندازه ذرات کاربیدی M_6C کاهش یافته و توزیع یکنواخت‌تری پیدا کردند که به بهبود کلی ریزساختار منجر شد.

-استفاده از جریان پالسی موجب بهبود قابل‌توجه خواص مکانیکی شد؛ به‌طوری‌که سختی 11%، انرژی ضربه 18%، استحکام کششی 7%، استحکام تسلیم 22% و ازدیاد طول 41% نسبت به جریان ثابت افزایش یافت. هرچند درصد ازدیاد طول بهبود یافت، اما مقدار آن همچنان کمتر از فلز پایه باقی ماند.

-بررسی سطح شکست در هر دو نمونه جوشکاری شده با جریان ثابت و پالسی، شکست نرم را نشان داد. اما نمونه جوشکاری‌شده با جریان پالسی با توجه به توزیع بهتر و بیشتر رسوبات کاربیدی، دارای گودی‌های بیشتر و عمیق‌تر و با توزیع یکنواخت‌تر بود.

-در مجموع، فرایند GTAW با جریان پالسی به‌عنوان روشی مؤثر برای بهبود ریزساختار، کاهش پدیده‌های ناهمگن

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.03]

انجمادی، و ارتقای خواص مکانیکی در جوش‌های آلیاژ HX شناخته شد. این روش قابلیت بالایی برای به‌کارگیری در تولید اجزای حساس با شرایط کاری دمای بالا، به‌ویژه در صنایع هوافضا و پتروشیمی، دارد.

محدودیت‌های پژوهش

نتایج این مطالعه در شرایط آزمایشگاهی کنترل‌شده و با ابعاد نمونه‌های محدود به ضخامت 3 میلی‌متر به‌دست آمد. بنابراین ممکن است در مقیاس و شرایط واقعی سرویس (مانند ضخامت بیشتر نمونه‌ها، تنش‌های پسماند، محیط‌های خورنده پیچیده یا سیکل‌های حرارتی متغیر) عملکرد جوش کاملا با نتایج این تحقیق انطباق نداشته و قدری متفاوت باشد.

پیشنهاد برای تحقیقات آینده

برای تکمیل نتایج این پژوهش، پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده به بررسی اثر پارامترهای مختلف جریان پالسی (مانند فرکانس و زمان روشن بودن قوس) بر خواص مکانیکی و رفتار خوردگی اتصال بپردازند. همچنین ارزیابی دوام خستگی، مقاومت به خزش و عملکرد در محیط‌های خورنده صنعتی در مقیاس واقعی می‌تواند ارزش کاربردی نتایج را افزایش دهد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از اهدای پژوهانه توسط دانشگاه شهید چمران اهواز به شماره SCU.EM1403.37 و حمایت مالی توسط شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب در اهواز، تشکر و قدردانی دارند.

منابع

1-M. J. Donachie and S. J. Donachie, *Superalloys: a technical guide*. ASM international, 2002.
2-B. Geddes, H. Leon, and X. Huang, *Superalloys: alloying and performance*. Asm International, 2010.
3-S. Banoth, T. N. Palleda, T. Saito, H. Murakami, and K. Kakehi, "Effects of yttrium and silicon contents in Hastelloy-X built by selective laser melting process," *J. Alloys Compd.*, vol. 896, p. 163050, 2022.
4-R. C. Reed, *The superalloys: fundamentals and applications*. Cambridge university press, 2008.
5-J. C. Zhao, M. Larsen, and V. Ravikumar, "Phase precipitation and time-temperature-transformation diagram of Hastelloy X," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 293, no. 1, pp. 112–119, 2000.
6-M. B. Henderson, D. Arrell, R. Larsson, M. Heobel, and G. Marchant, "Nickel based superalloy welding practices for industrial gas turbine applications," *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 9, no. 1, pp. 13–21, 2004.
7-A. Ghasemi, A. M. Kolagar, and M. Pouranvari, "Microstructure-performance relationships in gas tungsten arc welded Hastelloy X nickel-based superalloy," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 793, p. 139861, 2020.
8-Ł. Rakoczy, M. Grudzień, L. Tuz, K. Pańcikiewicz, and A. Zielińska-Lipiec, "Microstructure and Properties of a Repair Weld in a Nickel Based Superalloy Gas Turbine Component," *Adv. Mater. Sci.*, vol. 17, no. 2, pp. 55–63, 2017.
9-Sindo Kou, *Welding Metallurgy*, Second Edi. John Wiley & Sons, 2003.
10-A. Adelian, K. Ranjbar, and M. Tavakoli Shoushtari, "The effect of double overaging treatment on the microstructure and pitting corrosion behavior of the weld zone in 17-4PH stainless steel," *JWSTI*, vol. 10, no. 1. pp. 31-46 (in Farsi), 2024.
11-M. Sathishkumar and M. Manikandan, "Development of Pulsed Current Arc Welding to Preclude Carbide Precipitates in Hastelloy X Weldment Using ERNiCr-3," *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 29, no. 8, pp. 5395–5408, 2020.
12-J. C. Lippold, J. W. Sowards, G. M. Murray, B. T. Alexandrov, and A. J. Ramirez, "Weld solidification cracking in solid-solution strengthened ni-base filler metals," *Hot Crack. Phenom. Welds II*, pp. 147–170, 2008.
13-H. G. Fan, Y. W. Shi, and S.-J. Na, "Numerical analysis of the arc in pulsed current gas tungsten arc welding using a boundary-fitted coordinate," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 72, no. 3, pp. 437–445, 1997.
14-A. Hadadzadeh, M. M. Ghaznavi, and A. H. Kokabi, "The effect of gas tungsten arc welding and pulsed-gas tungsten arc welding processes' parameters on the heat affected zone-softening behavior of strain-hardened Al–6.7 Mg alloy," *Mater. Des.*, vol. 55, pp. 335–342, 2014.
15-T. S. Kumar, V. Balasubramanian, and M. Y. Sanavullah, "Influences of pulsed current tungsten inert gas welding parameters on the tensile properties of AA 6061 aluminium alloy," *Mater. Des.*, vol. 28, no. 7, pp. 2080–2092, 2007.
16-G. D. Janaki Ram, A. Venugopal Reddy, K. Prasad Rao, and G. Madhusudhan Reddy, "Control of Laves phase in Inconel 718 GTA welds with current pulsing," *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 9, no. 5, pp. 390–398, 2004.
17-B. Arulmurugan and M. Manikandan, "Development of welding technology for improving the metallurgical and mechanical properties of 21st century nickel based superalloy 686," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 691, pp. 126–

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.03]

arc weldments of alloy C-276 by current pulsing," *Acta Metall. Sin. (English Lett.*, vol. 28, no. 2, pp. 208–215,
29-A. Adelian, K. Ranjbar, M. Reihanian, and R. Dehmolaei, "Microstructural refinement and mechanical enhancement of Hastelloy X welds via electromagnetic vibration-assisted GTAW," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 37, pp. 2750–2763, 2025.
30-K. Ranjbar, M. A. Harb, M. Yeganeh, M. Reihanian, and J. Naseri, "Selective laser melting of Hastelloy-X alloy and cerium oxide reinforced Hastelloy-X composite : Microstructural examination and corrosion behavior," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 30, no. March, pp. 7803–7815, 2024.
31-Z. Zhu, X. Ma, P. Jiang, G. Mi, and C. Wang, "Planar-cellular-dendritic transformation in the fusion zone of a GH909 superalloy weldment," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 10, pp. 960–975, 2021.
32-J. F. Lancaster, *Metallurgy of welding*. Elsevier, 1999.
33-S. A. David, S. S. Babu, and J. M. Vitek, "Welding: Solidification and microstructure," *Jom*, vol. 55, pp. 14–20, 2003.
34-J. C. Lippold, S. D. Kiser, and J. N. DuPont, *Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys*. John Wiley & Sons, 2011.
35-M. K. Dezfuli, A. H. Moghadam, M. G. Hasab, and R. Ashiri, "Disclosing connection links between microstructure and mechanical performance in pulsating current gas tungsten arc welding of Hastelloy B-2 superalloy," *J. Adv. Join. Process.*, vol. 10, no. June, p. 100237, 2024.
36-E. Farahani, M. Shamanian, and F. Ashrafizadeh, "A comparative study on direct and pulsed current gas tungsten arc welding of alloy 617," *Int. J. Manuf. Mater. Sci.*, vol. 2, no. 1, p. 1, 2012.
37-A. Srikanth and M. Manikandan, "Development of welding technique to avoid the sensitization in the alloy 600 by conventional Gas Tungsten Arc Welding method," *J. Manuf. Process.*, vol. 30, pp. 452–466, 2017.
38-O. Yilmaz and A. A. Ugla, "Microstructure characterization of SS308LSi components manufactured by GTAW-based additive manufacturing: shaped metal deposition using pulsed current arc," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 89, no. 1, pp. 13–25, 2017.
39-M. Natesh and M. Manikandan, "Exploration of mechanical and metallurgical characterization of Incoloy 20 weldment using gas tungsten arc welding methods," *Mater. Today Proc.*, vol. 27, pp. 2930–2934, 2019.
40-D. Wu, G. Ma, Y. Guo, and D. Guo, "Study of weld morphology on thin Hastelloy C-276 sheet of Study weld morphology on thin Hastelloy C-276 sheet of pulsed laser welding pulsed laser welding," *Phys. Procedia*, vol.5, pp. 99–105, 2010.
41-M. Sathishkumar and M. Manikandan, "Preclusion of carbide precipitates in the Hastelloy X weldment using the current pulsing technique," *J. Manuf. Process.*, vol. 45, no. April, pp. 9–21, 2019.
42-D. M. Rodríguez-Olveda, V. L. Cruz-Hernández, V. 140, 2017.
18-M. Yousefieh, M. Shamanian, and A. Saatchi, "Optimization of the pulsed current gas tungsten arc welding (PCGTAW) parameters for corrosion resistance of super duplex stainless steel (UNS S32760) welds using the Taguchi method," *J. Alloys Compd.*, vol. 509, no. 3, pp. 782–788, 2011.
19-M. Khalasi, A. Heidary, M. Ghobeiti, and R. Ashiri, "Effect of pulsed current frequency on alloy chemistry , microstructure , and mechanical responses of Hastelloy B-2 superalloy in gas tungsten arc welding process," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 36, no. February, pp. 6950–6968, 2025.
20-T. R. Tabrizi, M. Sabzi, S. H. M. Anijdan, A. R. Eivani, N. Park, and H. R. Jafarian, "Comparing the effect of continuous and pulsed current in the GTAW process of AISI 316L stainless steel welded joint: microstructural evolution, phase equilibrium, mechanical properties and fracture mode," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 15, pp. 199–212, 2021.
21-M. Jula, R. Dehmolaei, and S. R. A. Zaree, "The comparative evaluation of AISI 316/A387-Gr. 91 steels dissimilar weld metal produced by CCGTAW and PCGTAW processes," *J. Manuf. Process.*, vol. 36, pp. 272–280, 2018.
22-P. Subramani and M. Manikandan, "Development of welding technique to suppress the microsegregation in the aerospace grade alloy 80A by conventional current pulsing technique," *J. Manuf. Process.*, vol. 34, pp. 579–592, 2018.
23-M. Natesh and M. Manikandan, "Influence of Filler Wires to Suppress the Microsegregation and to Improve Mechanical Properties of Conventional Arc-Welded Nickel-Based Superalloy Incoloy 20," *Trans. Indian Inst. Met.*, vol. 73, no. 5, pp. 1333–1362, 2020.
24-M. Sathishkumar, M. Manikandan, and N. Arivazhagan, "Prospects of pulsed current arc welding on aerospace grade Hastelloy X," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part E J. Process Mech. Eng.*, vol. 235, no. 4, pp. 1059–1072, 2021.
25-M. Manikandan, N. Arivazhagan, M. N. Rao, and G. M. Reddy, "Microstructure and mechanical properties of alloy C-276 weldments fabricated by continuous and pulsed current gas tungsten arc welding techniques," *J. Manuf. Process.*, vol. 16, no. 4, pp. 563–572, 2014.
26-M. Sathishkumar *et al.*, "Investigation of Double-Pulsed Gas Metal Arc Welding Technique to Preclude Carbide Precipitates in Aerospace Grade Hastelloy X," *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 30, no. 1, pp. 661–684, 2021.
27-K. Mageshkumar, P. Kuppan, and N. Arivazhagan, "Characterization of microstructure and mechanical properties of nickel based superalloy 617 by pulsed current gas tungsten arc welding technique," *Mater. Res. Express*, vol. 5, no. 6, p. 66541, 2018.
28-M. Manikandan, N. Arivazhagan, M. Nageswara Rao, and G. Madhusudhan Reddy, "Improvement of microstructure and mechanical behavior of gas tungsten

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.03]

joint of Alloy C-2000 and C-276," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part E J. Process Mech. Eng.*, vol. 235, no. 5, pp. 1408–1419, 2021.

46-M. Jula, R. Dehmolaei, and S. R. A. Zaree, "Optimization of pulesd current gas tungsten arc welding process parameters to attain maximum weld metal toughness ofAISI 316/A387 Gr.91 weld joints with Taguchi method," *JWSTI*, no. 2. pp. 71-83 (in Farsi), 2016.

47-Ş. H. Atapek, M. Tümer, A. Kısasöz, T. Mert, and M. Z. Kerimak, "Investigation of microstructure, mechanical and corrosion properties of GMAW of dissimilar P91-HP alloy V-butt groove joint," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 313, p. 128811, 2024.

H. López-Morelos, and M. A. García-Rentería, "Effect of heat input on intergranular corrosion resistance and dry sliding wear of GTA welding of Hastelloy-X superalloy," *MRS Adv.*, vol. 8, no. 21, pp. 1243–1248, 2023.

43-J. Yuan, Y. Xiao, N. Min, W. Li, and S. Zhao, "The Influence of Precipitate Morphology on the Growth of Austenite Grain in Nb-Ti-Al Microalloyed Steels," *Materials (Basel).*, vol. 15, no. 9, 2022.

44-J. Li *et al.*, "Fine-grain-embedded dislocation-cell structures for high strength and ductility in additively manufactured steels," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 790, p. 139736, 2020.

45-B. Arulmurugan *et al.*, "Development of arc welding technique to preclude microsegregation in the dissimilar

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.03]