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

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

Volume 7, Number 2, 2022



Similar joining of NiTi shape memory alloy using pulsed Nd:YAG laser welding

A. Rasouli, H. Naffakh Moosavy*

Division of Characterization and Selection of Engineering Materials, Department of Materials Engineering, Tarbiat Modares University.

Received 29 October 2021 ; Accepted 11 January 2022

Abstract

In this research similar joining of NiTi shape memory alloy was studied. For this purpose, NiTi alloy in the form of wires with circular cross section possessing martensitic phase structure at room temperature was used. By utilizing Nd:YAG pulsed laser welding method followed by optimizing its technical parameters, a defectless joint in terms of appearance and metallurgical properties was obtained. In the next step, the effect of various pulsed laser duration time on properties of the obtained similar joint of NiTi was investigated. Moreover, the resultant microstructures were studied using Optical microscope (OP) and Scanning Electron Microscope (SEM) equipped with chemical analysis of EDS. Furthermore, the samples prepared under different pulsed laser duration time conditions were characterized by using tensile and micro-hardness tests. Investigating the results of the performed evaluations revealed that higher levels of heat input has resulted in grain growth, dissolution of precipitations as well as reduction in hardness and ultimate tensile strength of the samples in the joint zone.

Keywords: Pulsed Nd:YAG laser welding, Shape memory alloy, NiTi, Microstructure.

* Corresponding Author: h.naffakh-moosavy@modares.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.11.4]

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

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال هفتم، شماره2، پاییز و زمستان 1400



اتصال هم‌جنس آلیاژ حافظه‌دار NiTi با استفاده از جوشکاری لیزر Nd:YAG ضربانی

علی‌رسولی، همام نفاخ‌موسوی*

گروه شناسایی و انتخاب مواد مهندسی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

دریافت مقاله: 1400/08/07؛ پذیرش مقاله: 1400/10/21

چکیده

در این پژوهش اتصال هم‌جنس سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار NiTi مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور از سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار NiTi با سطح مقطع دایره‌ای شکل و با ساختار مارتنزیتی در دمای محیط استفاده گردید. با استفاده از جوشکاری لیزر Nd:YAG ضربانی و بهینه سازی پارامترهای آن، یک اتصال سالم از نظر ظاهری و متالورژیکی به دست آمد و سپس اثر مدت زمان‌های مختلف اعمال پالس لیزر، بر خواص اتصال هم‌جنس این آلیاژ بررسی شد. ریزساختار حاصل، با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به آنالیز شیمیایی(EDS) مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین نمونه‌های با زمان‌های مختلف اعمال پالس لیزر، تحت آزمون‌های مکانیکی کشش و میکروسختی سنجی ارزیابی شدند. با بررسی نتایج آزمون‌ها مشخص شد که گرمای ورودی بالاتر، سبب بزرگ‌تر شدن دانه‌ها، انحلال رسوبات، کاهش سختی و استحکام شکست در منطقه اتصال می‌گردد.

کلمات کلیدی: جوشکاری لیزر Nd:YAG ضربانی، آلیاژ حافظه‌دار، نیکل‌تیتانیم، ریزساختار.

نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: h.naffakh-moosavy@modares.ac.ir

1- مقدمه

آلیاژهای حافظه‌دار دسته‌ای از مواد پیشرفته هستند که می‌توانند در دماهای معینی دو ویژگی بی‌همتای ابرکشسانی و حافظه‌داری را از خود نشان دهند. این آلیاژها دارای یک فاز دمای بالا که اصطلاحاً آستنیت و یک فاز دمای پایین که اصطلاحاً مارتنزیت نامیده می‌شوند، هستند. هنگامی‌که آلیاژ در فاز دمای بالای خود قرار دارد، خاصیت ابرکشسانی از خود نشان می‌دهد به این صورت که اگر آلیاژ تحت بارگذاری قرار گیرد و تا حد معینی تغییر شکل یابد، پس از بار برداری تمام کرنش ذخیره شده در ماده آزاد می‌شود و آلیاژ به شکل اولیه خود باز می‌گردد. هنگامی‌که در فاز دمای پایین خود قرار دارد از خود خاصیت حافظه‌داری نشان می‌دهد، به این صورت که اگر در این حالت آلیاژ تحت بارگذاری قرارگیرد و در محدوده مشخصی تغییر شکل یابد، پس از باربرداری کرنش الاستیک اولیه در ماده آزاد می‌شود و یک کرنش در ماده باقی می‌ماند. حال اگر دمای آلیاژ را تا حد معینی(پایداری فاز آستنیت) افزایش دهیم، کرنش ذخیره شده در ماده آزاد می‌شود و آلیاژ شکل اولیه خود را بازیابی می‌کند[1].

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.11.4]

یکی از مهم‌ترین آلیاژهای حافظه‌دار آلیاژ نیکل‌تیتانیم می‌باشد که در محدوده خاصی از ترکیب شیمیایی(حدود50%-50) از خود خاصیت حافظه‌داری نشان می‌دهد[2].

این آلیاژ به دلیل مقاومت در برابر خوردگی و زیست‌سازگاری خوبی‌که از خود نشان می‌دهد در ساخت ایمپلنت‌های پزشکی، استنت‌های قلبی و دیگر ابزارآلات پزشکی کاربرد دارد[3]. همچنین در سال‌های اخیر کاربردهای جدیدی در صنایع پیشرفته مانند هوافضا و سنسور و عملگرها برای این آلیاژ تعریف شده است. ساخت اشکال پیچیده و سازه‌های مهندسی از این آلیاژ با روش‌های متداول، به دلیل کارسختی و داکتیلیتی بالا بسیار سخت است[4].

بنابراین جهت ساخت اشکال پیچیده و مهندسی لازم است از یک روش اتصال مناسب استفاده شود. جوشکاری لیزر متداول‌ترین روشی است که جهت اتصال آلیاژهای نیکل‌تیتانیم به دلیل منطقه ذوب کوچک، تنش‌های حرارتی پایین، حرارت ورودی کم، چگالی انرژی بالا، منطقه متاثر از حرارت کوچک(HAZ) در مقایسه با سایر روش‌های جوشکاری و نرخ جوشکاری بالا استفاده می‌شود.

از بین لیزرهای مختلف، لیزر Nd:YAG به دلیل طول موج کمتری که دارد، باعث می‌شود در سطح ثابت، ماده انرژی بیشتری جذب کند که در نتیجه باعث می‌شود منطقه کوچک‌تری از ماده، تحت تاثیر حرارت قرار بگیرد که برای جوشکاری مقاطع کوچک مناسب‌تر است[5]. آلیاژ نیکل‌تیتانیم به دماهای بالا و اکسیداسیون بسیار حساس است، بنابراین جوشکاری با لیزر روشی مناسب جهت کم‌کردن آثاری که حرارت زیاد بر روی دو خواص مهم این آلیاژ یعنی ابرکشسانی و حافظه‌داری می‌گذارد است.

در پژوهش حاضر اتصال هم‌جنس آلیاژ نیکل‌تیتانیم به یکدیگر با استفاده از روش جوشکاری لیزر با منبع Nd:YAG بررسی شده است. همچنین ریزساختار سطح مقطع اتصال با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد و آزمون‌های مکانیکی کشش و سختی سنجی بر روی منطقه اتصال انجام گرفت.

2- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از یک سیم آلیاژ حافظه‌دار NiTi با سطح مقطع دایره‌ای شکل و به قطر 1 میلی‌متر استفاده شد. ترکیب شیمیایی این آلیاژ با استفاده از تکنیک پراش پرتو ایکس(XRF) تعیین گردید که نتایج این آزمون در جدول(1) آورده شده است. آلیاژ استفاده شده در این تحقیق در دمای اتاق (25 درجه سانتی‌گراد) در فاز دمای پایین خود یعنی مارتنزیت قرار دارد و از خود خاصیت حافظه‌داری نشان می‌دهد.

جهت آماده سازی سیم‌ها برای اتصال لب‌به‌لب، در ابتدا سیم‌ها به دمای بالای پایان استحاله آستنیت به مارتنزیت(100 درجه سانتی‌گراد) رسانده شد تا سیم‌ها به فاز دمای بالای خود یعنی آستنیت برسند و حالت صاف و مستقیم که شکل اولیه آن‌ها بوده است، را بازیابی کنند. سپس سیم‌ها به دمای محیط رسانده شدند تا دوباره به فاز مارتنزیتی خود برگردند. با استفاده از کاغذ سمباده 120 و 400 سطح مقطع اتصال سمباده‌زنی و صیقلی شد تا در سطح تماس دو سمت اتصال هیچ‌گونه خلل و فرجی نباشد و دو سطح اتصال در تماس کامل با یکدیگر قرار داشته باشند. سپس نمونه‌ها جهت شستشو و چربی زدایی سطحی در حمام اولتراسونیک حاوی مخلوط استون، اتانول و آب با نسبت 1:1:1 به مدت زمان 5 دقیقه قرار داده شدند.

برای فرایند جوشکاری در این پژوهش، از یک دستگاه لیزر پالسی با منبع Nd:YAG با طول موج 1064 نانومتر و با توان اسمی 100 وات استفاده شد. برای ثابت نگه داشتن سیم‌های دو سمت اتصال در زمان جوشکاری و اطمینان از تماس کامل و عدم وجود شکاف در میان آن‌ها از یک فیکسچر استفاده شد. جهت حفاظت منطقه مذاب از اکسیداسیون و همچنین جلوگیری از نفوذ گازهای اکسیژن، نیتروژن و هیدروژن به منطقه اتصال و جلوگیری از کاهش خواص مکانیکی و متالورژیکی منطقه اتصال، گاز خنثی آرگون با خلوص 99,999% به عنوان گاز محافظ استفاده شد. گاز آرگون به مدت زمان 10 ثانیه قبل از شروع فرایند و 10 ثانیه پس از پایان فرایند جوشکاری با نرخ 5 لیتر بر دقیقه به منطقه اتصال دمیده شد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.11.4]

جدول 1- ترکیب شیمیایی آلیاژ نیکل‌تیتانیم.

عنصر	Ni	Ti	Si	Al	S	Na	Mg	Ce
درصد اتمی	۵۴,۶۶	۴۴,۵۱	۰,۰۸	۰,۰۹	۰,۰۴	۰,۴۰	۰,۰۳	۰,۱۷

جهت بررسی‌های ریزساختاری در ابتدا نمونه‌های جوشکاری شده با استفاده از رزین 3 جزیی، مانت سرد شدند و سپس برای متالوگرافی سطح مقطع اتصال، نمونه‌ها در راستای طول آن‌ها با سمباده‌های شماره 400، 800، 1500 و براساس استاندارد ASTM E3-11 سمباده‌زنی شدند و سپس پولیش مکانیکی روی نمونه‌ها انجام گرفت. جهت حکاکی شیمیایی نمونه‌ها از محلول اچانت حاوی $H_2O:HNO_3:HF$ استفاده شد. سپس با استفاده از میکروسکوپ نوری مدل OLYMPUS UMSSPG و میکروسکوپ الکترونی مدل FE-SEM MIRA3 TESCAN مجهز به سیستم آنالیز ترکیب شیمیایی(EDS) تصاویر متالوگرافی از سطح نمونه‌ها گرفته شد. جهت انجام آزمون مکانیکی کشش از دستگاه مدل INSTRON 5500R با سرعت حرکت 0,2 میلی‌متر بر دقیقه و نرخ کرنش 0,0003 بر ثانیه استفاده شد. همچنین آزمون میکروسختی سنجی به روش ویکرز با استفاده از دستگاه MICROMET BUEHLER و با نیروی 200 گرم و مدت زمان اعمال نیروی 15 ثانیه انجام شد. تمامی آزمون‌ها در دمای اتاق انجام شدند.

3-نتایج و بحث

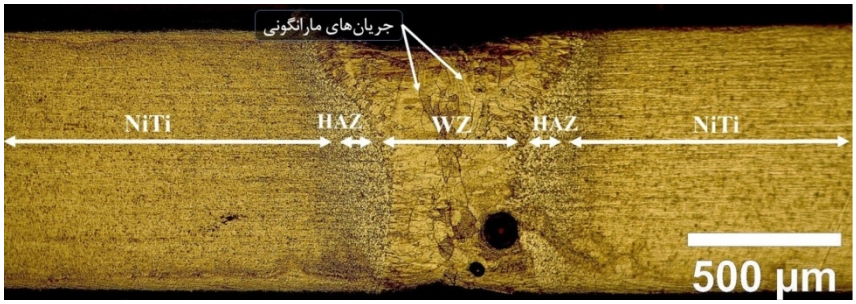
3-1- یافتن پارامتر بهینه جوشکاری

در ابتدا سه پارامتر قطر لکه اثر لیزر با توجه به قطر سیم‌ها، 1 میلی‌متر و زمان اعمال پالس‌های لیزر روی منطقه اتصال 1 ثانیه و مدت زمان اعمال هر پالس 5 میلی‌ثانیه، ثابت در نظر گرفته شد. سپس با تغییر متغیرهای ولتاژ، فرکانس، نرخ دمش گاز خنثی و سرعت حرکت لیزر، بهینه‌ترین پارامتر جهت جوشکاری لیزر انتخاب گردید. این پارامترها و تصاویر ظاهری و متالوگرافی آن‌ها در جدول(2) آورده شده است. با بررسی ظاهری منطقه اتصال پارامترهای مختلفی که بر روی اتصال هم‌جنس این آلیاژ انجام شد، پارامتر شماره 2 در جدول (2) به عنوان پارامتر نهایی جهت اتصال هم‌جنس انتخاب گردید. سپس با ثابت نگه داشتن دیگر پارامترها، پالس لیزر در مدت زمان‌های 5، 8 و 11 میلی‌ثانیه، جهت ایجاد 3 گرمای ورودی مختلف و بررسی اثر این متغیر بر خواص متالورژیکی و مکانیکی منطقه اتصال، بر روی این اتصال اعمال شد.

3-2- ریزساختار اتصال

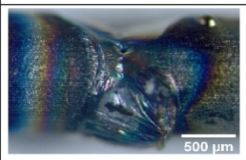
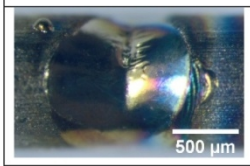
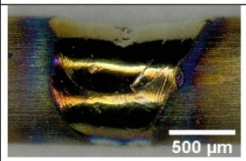
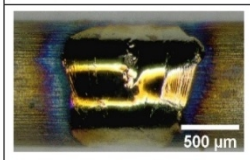
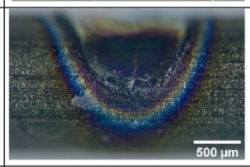
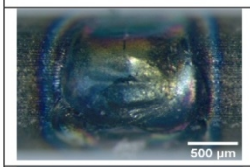
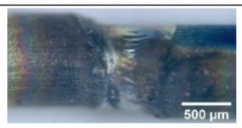
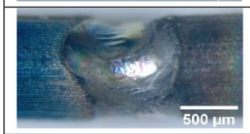
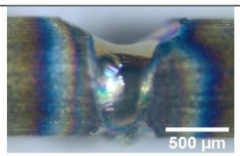
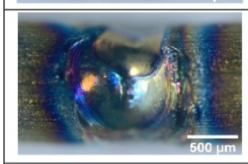
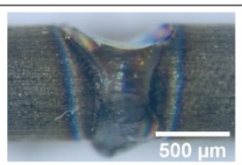
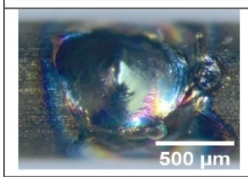
شکل‌های (1،2و3) ریزساختار منطقه اتصال هم‌جنس آلیاژ نیکل تیتانیم را در مدت زمان‌های اعمال پالس 5، 8 و 11 میلی‌ثانیه نشان می‌دهد و سه منطقه شامل آلیاژ پایه، منطقه متاثر از حرارت(HAZ) و فلزجوش در تصاویر مشخص شده‌اند. با توجه به تصاویر، آلیاژ پایه دارای دانه‌هایی بسیار کوچک، کاملاً کشیده در راستای طول سیم هستند که نشان دهنده کارسرد شدید ناشی از کشش احتمالی سیم احتمالی در فرایند تولید سیم این آلیاژ می‌تواند باشد. در مجاورت منطقه انجماد ناشی از جوشکاری لیزر و آلیاژ پایه، منطقه متاثر از حرارت(HAZ) قرار گرفته است. با توجه به شکل(4) و قرارگیری آلیاژ مورد بررسی در محدوده تک فاز NiTi [2]، رشد فصل مشترک در منطقه ذوب به صورت صفحه‌ای بوده و تا لحظات پایانی انجماد آخرین محدوده مذاب، این روند ادامه داشته است. در حوضچه مذاب(Fusion Zone) فرایند ذوب و انجماد اتفاق افتاده و دانه‌هایی بزرگ‌تر از دانه‌های آلیاژ پایه، دوباره تشکیل شده‌اند. این دانه‌ها به صورت کشیده و خلاف جهت انتقال حرارت رشد کرده‌اند. در آلیاژ پایه به دلیل فرایندهای تکمیلی احتمالی مانند کشش سیم، ساختار دانه‌ها کاملاً ریز و کشیده هستند اما در حوضچه مذاب دانه‌هایی بزرگ‌تر و کشیده شده تا قسمت میانی منطقه FZ ناشی از انجماد مشاهده می‌شود. در شکل‌های (1،2 و3) جریان‌های مارانگونی ناشی از تابش لیزر و تلاطم‌های مذاب، قابل‌مشاهده است. هرچه از آلیاژ پایه به سمت منطقه متاثر

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.11.4]



شکل 1- تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار اتصال با مدت زمان اعمال پالس 5 میلی‌ثانیه.

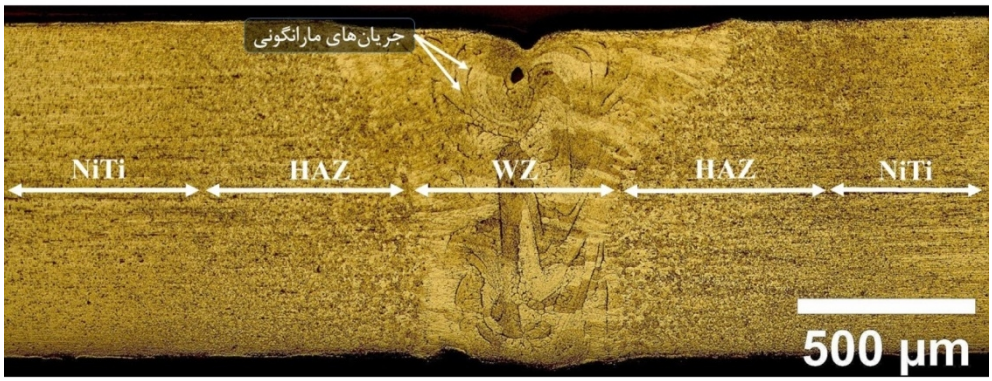
جدول 2- پارامترهای جوشکاری اعمال شده.

	ولتاژ (ولت)	فرکانس (هرتز)	سرعت جوشکاری (میلی‌متر بر ثانیه)	نرخ دمش گاز (لیتربردقیقه)	تصویر از مقطع اتصال	تصویر از بالای سطح اتصال
۱	۳۹۰	۳	۰,۵	۵		
۲	۳۴۰	۳	۰,۵	۵		
۳	۲۹۰	۳	۰,۵	۵		
۴	۳۴۰	۹	۰,۵	۵		
۵	۳۴۰	۳	۰,۲۵	۵		
۶	۳۴۰	۳	۰,۵	۱۰		

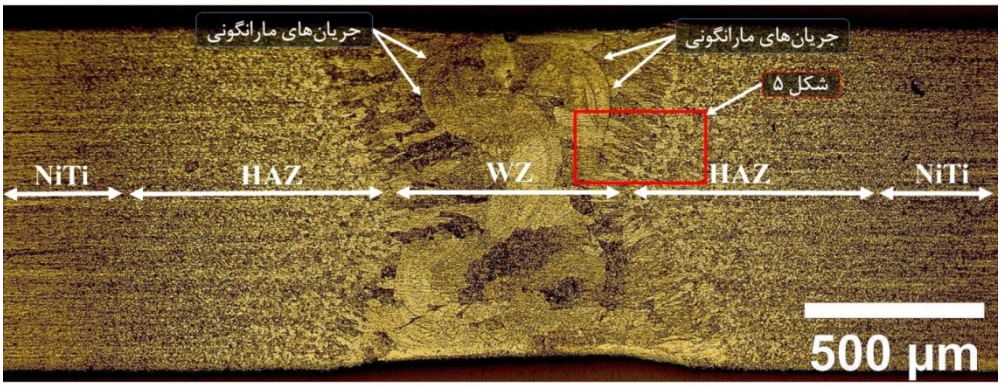
متاثر از حرارت(HAZ) پیش می‌رویم، دانه‌ها از حالت کشیده و باریک خارج شده و به صورت دانه‌های بزرگ‌تر و تبلور مجدد یافته، کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند که این رشد تحت تاثیر حرارت ناشی از جوشکاری لیزر بوده است. در منطقه اتصال هرچه از سمت فلز پایه به سمت مرز ذوب حرکت می‌کنیم ابتدا پدیده بازیابی، سپس تبلور مجدد و رشد دانه‌ها رخ داده که در شکل(5) قابل مشاهده است. در جدول(3) طول منطقه مذاب و منطقه HAZ برای مدت زمان‌های مختلف اعمال پالس لیزر برروی سطح‌اتصال این آلیاژ آورده شده‌است. به دلیل نرخ ذوب و انجماد بالا در جوشکاری لیزر منطقه HAZ کوچکی داریم.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.11.4]



شکل 2- تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار اتصال با مدت زمان اعمال پالس 8 میلی‌ثانیه.



شکل 3- تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار اتصال با مدت زمان اعمال پالس 11 میلی‌ثانیه.

همان‌گونه که در شکل(2،1 و3) هم مشاهده می‌شود، با افزایش مدت زمان اعمال هر پالس لیزر که نشان دهنده میزان انرژی و گرمای ورودی وارده به سطح قطعه کار هم هست، طول منطقه مذاب و منطقه HAZ افزایش می‌یابد که به این دلیل است که در تعداد پالس اعمالی ثابت، گرمای ورودی بیشتری به یک سطح معین از قطعه کار وارد شده است و به دلیل رسانایی حرارتی پایین آلیاژ نیکل تیتانیم (0,086 وات بر سانتی‌متر در درجه سانتی‌گراد) [6] حرارت سریعاً در آلیاژ پخش نمی‌شود و توسط همان منطقه از آلیاژ جذب شده و صرف ذوب شدن حجم بیشتری از آلیاژ می‌شود. کمترین میزان منطقه متاثر از حرارت، مربوط به کوتاه‌ترین مدت زمان اعمال پالس لیزر (5 میلی‌ثانیه) بوده است.

در شکل(1)، دو حفره گازی مشاهده می‌شود که احتمالاً ناشی از دمش گاز آرگون به منطقه مذاب بوده است که به دلیل سرعت بالای فرایند ذوب و انجماد در جوشکاری لیزر، فرصت خروج گاز از حوضچه مذاب فراهم نشده است.

در شکل (2) که مربوط به جوشکاری با مدت زمان 8 میلی‌ثانیه است، به دلیل فراهم شدن فرصت زمانی بیشتر جهت خروج گاز از حوضچه مذاب، حفره گازی کوچکی درون ساختار انجمادی پس از جوشکاری مشاهده می‌شود و در شکل(3) که مربوط به 11میلی‌ثانیه است، حفره گازی مشاهده نمی‌شود.

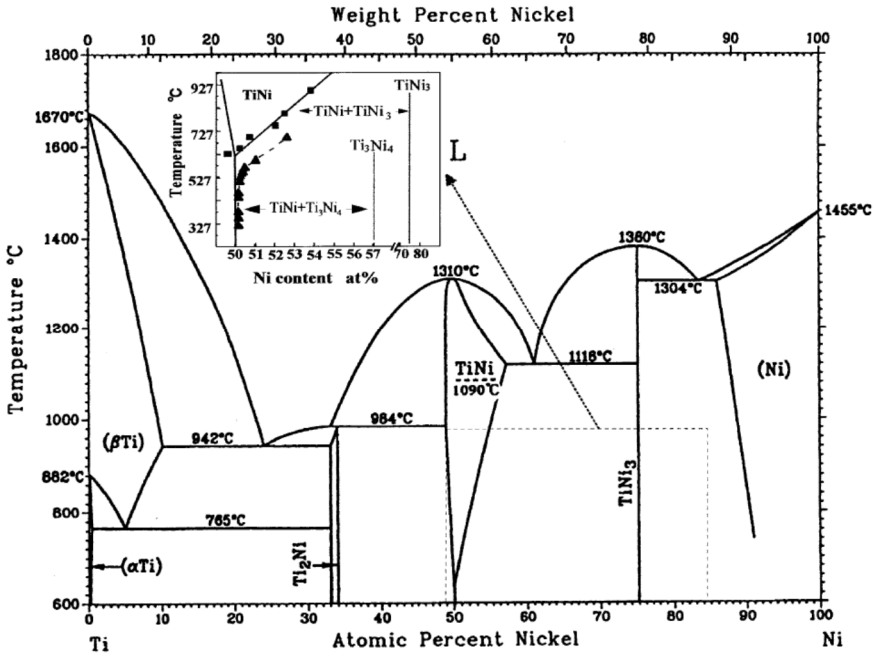
شکل(5) ریزساختار اتصال در مرز ذوب را نشان می‌دهد. در سمت راست تصویر، منطقه HAZ مشاهده می‌شود که دانه‌ها تحت تاثیر حرارت ناشی از جوشکاری لیزر بزرگ شده‌اند. در مرز ذوب پس از ذوب، دانه‌ها دوباره تشکیل شده‌اند و به سمت مرکز اتصال(سمت چپ) کشیده شده‌اند. آلیاژی که در تحقیق حاضر مورد بررسی قرار گرفته است، دارای ترکیب شیمیایی حدود 50% نیکل و 50% تیتانیم است. با توجه به شکل(4) که دیاگرام فازی نیکل و تیتانیم را نشان می‌دهد، این آلیاژ در میانه این دیاگرام فازی قرار گرفته و در هنگام سردشدن از حالت مذاب به حالت جامد، مستقیماً به تک فاز NiTi تبدیل می‌شود و تا دماهای پایین این فاز پایدار است.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.11.4]

جدول 3- مشخصات اندازه مناطق مختلف اتصال جوش لیزر در مدت زمان‌های مختلف اعمال پالس.

	مدت زمان اعمال پالس(ms)	طول منطقه مذاب جوش (µm)	طول منطقه HAZ (µm)
۱	۵	۴۴۰	۲۳۰
۲	۸	۶۰۰	۵۸۰
۳	۱۱	۶۸۰	۸۸۰



شکل 4- دیاگرام فازی نیکل و تیتانیم [2].

چون در این محدوده ترکیب شیمیایی تحت انجماد ترکیبی نداریم، رشد آلیاژ در فصل مشترک مذاب و جامد به صورت صفحه‌ای خواهد بود. همچنین به دلیل اینکه در هنگام جوشکاری این آلیاژ از فلز یا آلیاژی به صورت لایه واسط استفاده نشده، رشد به صورت اپیتکسیال اتفاق افتاده است. از اتصال به سمت مرکز مرز ذوب، کشیدگی دانه‌ها بیشتر شده و این جهت‌گیری دانه‌ها و کشیدگی آن‌ها به دلیل گرادیان حرارتی و انتقال حرارت از جبهه انجمادی به سمت آلیاژ پایه است [7].

شکل(6) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع اتصال هم‌جنس آلیاژ نیکل‌تیتانیم با مدت زمان اعمال پالس 5 میلی‌ثانیه را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در تصویر مشاهده می‌شود، سطح اتصال و مرکز انجماد عاری از هرگونه ترک است اما یک حفره نسبتاً بزرگ ناشی از حبس شدن گاز در هنگام انجماد، در تصویر مشاهده می‌شود.

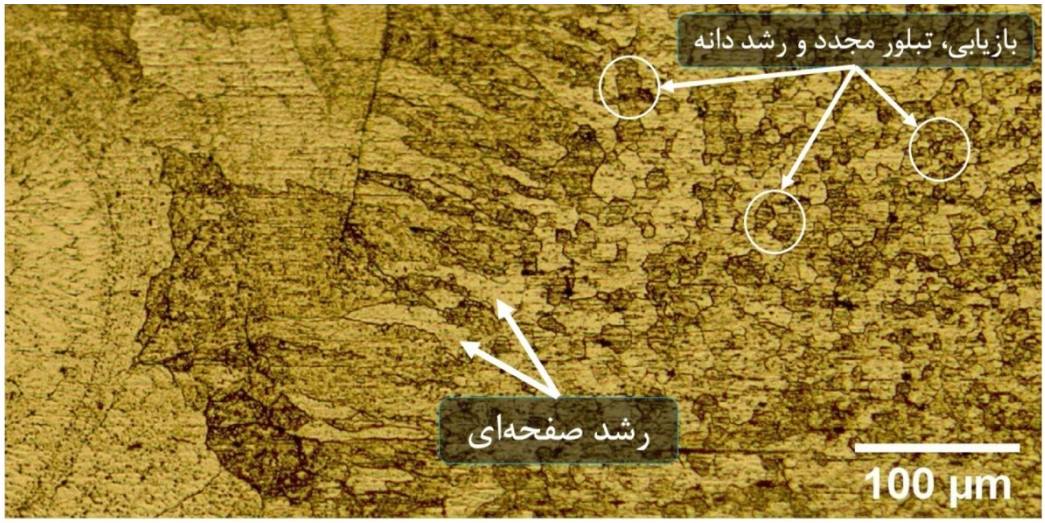
شکل(6) نشان می‌دهد که در مرکز اتصال برخی از رسوبات مکعبی شکل با ترکیب‌شیمیایی غنی از تیتانیم که در شکل(7) با نماد C نشان‌دهده شده است، در منطقه FZ تشکیل نشده اند و انحلال یافته اند.

شکل (7) ریز ساختار آلیاژ پایه را نشان می‌دهد. ریزساختار آلیاژ پایه شامل زمینه است که در این شکل(4) با نماد A مشخص شده است و همچنین رسوبات دیسکی شکل Ti_2Ni با نماد B [2, 8] و رسوبات مکعبی شکل با ترکیب غنی از تیتانیم با نماد C در ساختار پراکنده شده‌اند. ترکیب شیمیایی مناطق A، B و C در جدول(4) نشان داده شده است.

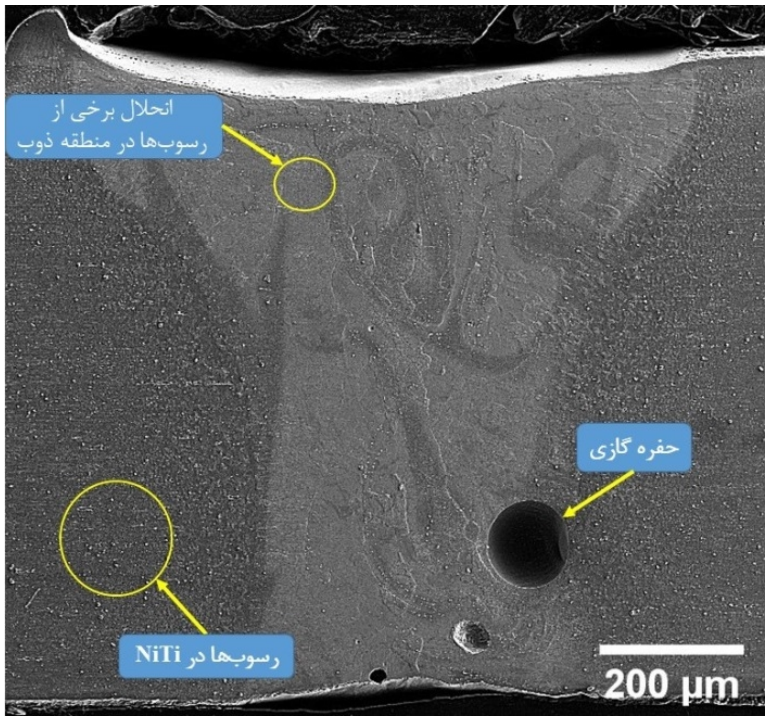
شکل(8) تصویر ریزساختار در مرکز اتصال هم‌جنس آلیاژ نیکل‌تیتانیم را نشان می‌دهد. تصویر نشان می‌دهد که رسوبات موجود در آلیاژ پایه تقریباً در ساختار حل شده‌اند و یک ساختار یکنواخت و بدون جهت‌گیری را به وجود آورده‌اند.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.11.4]



شکل 5- تصویر ریزساختار اتصال در مرز ذوب آلیاژ نیکل‌تیتانیم با مدت زمان اعمال پالس 11 میلی‌ثانیه.



شکل 6- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع اتصال هم‌جنس آلیاژ Ni-Ti، با مدت زمان اعمال پالس 5 میلی‌ثانیه.

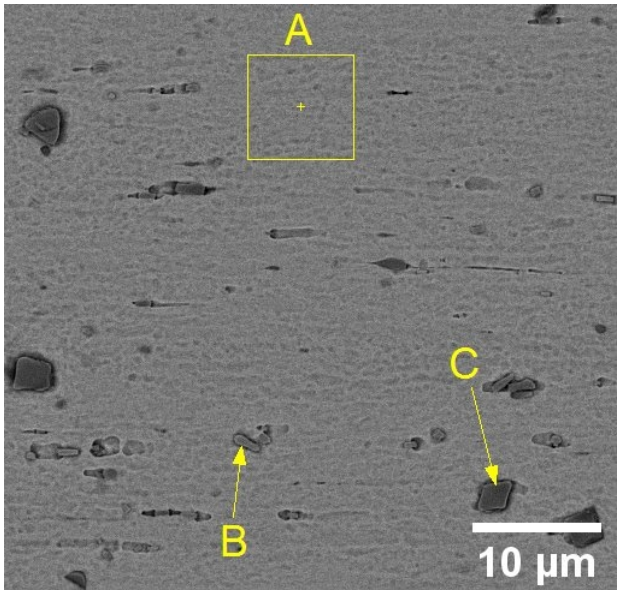
رسوبات‌بسیار ظریفی در ریزساختار مشاهده می‌شود که احتمالاً در حین انجماد فلز جوش تشکیل شده‌اند.

3-3- آزمون کشش

شکل (9) مقایسه نتایج آزمون کشش تک محوری را برای اتصال جوش لیزر با مدت زمان‌های مختلف اعمال پالس لیزر 5، 8 و 11 میلی‌ثانیه را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل(9) مشاهده می‌شود، در ناحیه‌ای که با شماره 1 مشخص شده است، آلیاژ دچار تغییر فرم الاستیک می‌شود. در ناحیه 2 دوقلویی‌های مارتنزیتی موجود در ساختار به دوقلویی‌های مارتنزیتی تغییر فرم‌یافته تبدیل می‌شوند[9]. این تغییر شکل صفحات مارتنزیتی، در یک تنش تقریباً ثابت اتفاق می‌افتد و هر صفحه که تغییر فرم

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.11.4]

پیدا می‌کند یک کرنش در ماده ذخیره می‌شود. در آلیاژ مورد استفاده در این پژوهش این تغییر فرم تا کرنش حدود 7 درصد ادامه داشته است.

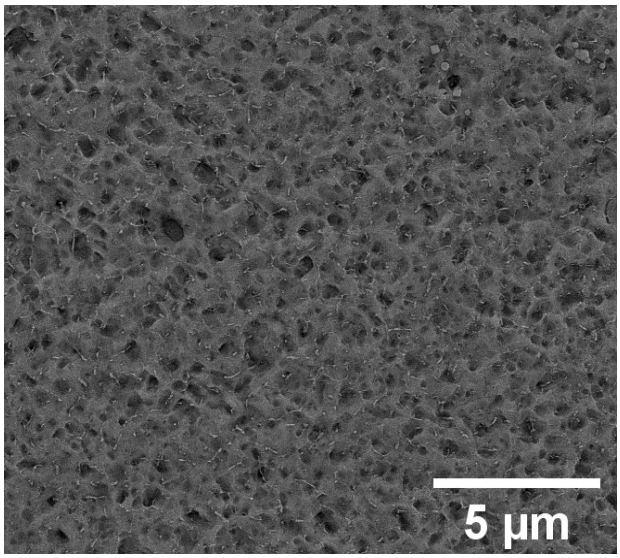


شکل 7- ریزساختار آلیاژ Ni-Ti.

جدول 4- آنالیز ترکیب شیمیایی نقطه‌های مشخص شده در شکل 7.

نقطه	درصد اتمی		درصد وزنی	
	Ni	Ti	Ni	Ti
A	۴۹,۵۶	۵۰,۴۴	۵۴,۶۴	۴۵,۳۶
B	۳۳,۶۰	۶۶,۴۰	۳۸,۲۷	۶۱,۷۳
C	۱۰,۷۴	۸۹,۲۶	۱۲,۸۸	۸۷,۱۲

در ناحیه 3 آلیاژ دچار تغییر فرم پلاستیک برگشت ناپذیر می‌شود. برای اینکه آلیاژ نیکل‌تیتانیم رفتار حافظه‌داری از خود نشان دهد، باید درحالت مارتنزیتی خود قرار داشته باشد[10]. تمامی این نمودارها رفتار آلیاژ حافظه‌دار در حالت مارتنزیتی را نشان می‌دهد. حداکثر استحکام کششی نهایی آلیاژ پایه حدود 1030 مگاپاسکال بوده است در حالی که در اتصال هم‌جنس این آلیاژ که با مدت زمان اعمال پالس لیزر 5 میلی‌ثانیه جوشکاری شده، حداکثر استحکام تا زمان شکست در حدود 590 مگاپاسکال (57% استحکام آلیاژ پایه) به دست آمده و این اتصال تا زمان شکست کرنش 15% را داشته است. با افزایش مدت زمان اعمال پالس لیزر به 8 میلی ثانیه، که به معنای افزایش حرارت ورودی به قطعه کار نیز هست، استحکام شکست آلیاژ کاهش یافته و به حدود 460 مگاپاسکال(44% استحکام آلیاژ پایه) رسیده است. همچنین کرنش تا زمان شکست این اتصال نیز به 13% کاهش یافته است. در بیشترین مدت زمان اعمال پالس لیزر که 11 میلی‌ثانیه بوده، حداکثر استحکام شکست به حدود 380 مگاپاسکال(36% استحکام آلیاژ پایه) رسیده است و کرنش تا زمان شکست نیز کاهش قابل‌توجهی یافته و به 9/4% رسیده است.

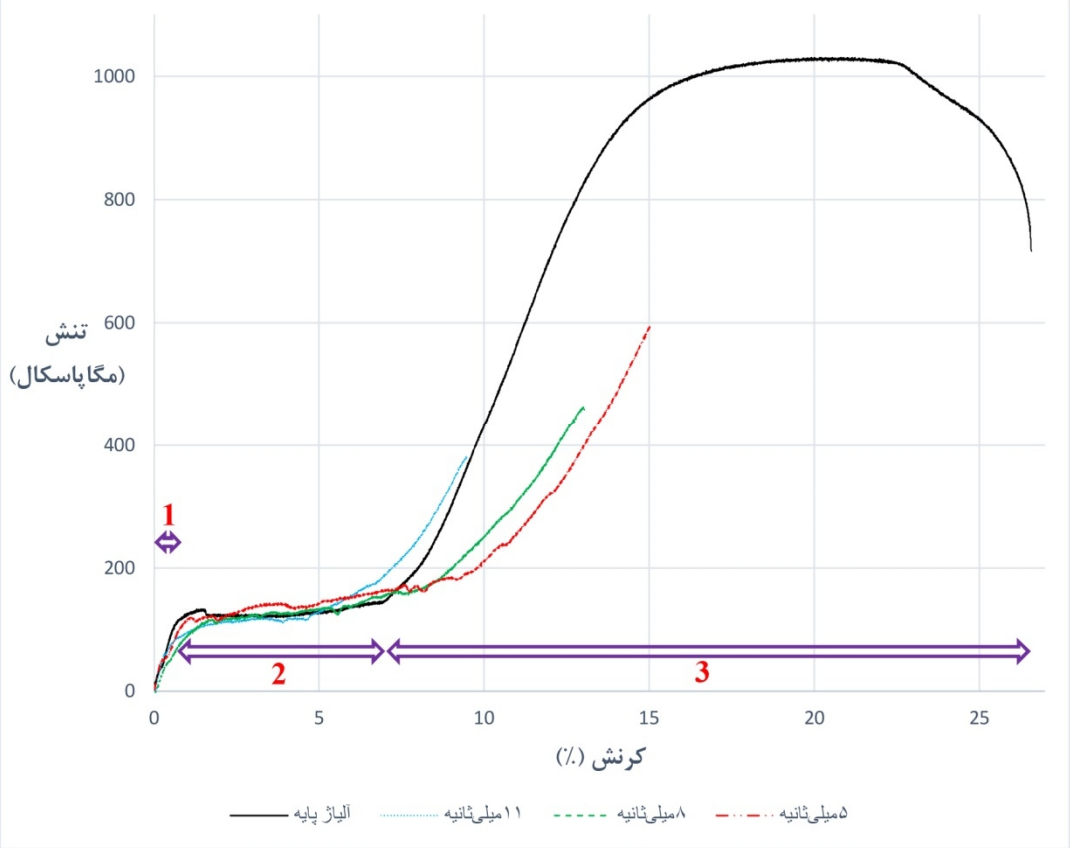


شکل 8- تصویر ریزساختار آلیاژ در مرکز اتصال.

در پژوهشی که فلاوو و همکاران[8] انجام داده‌اند نیز این کاهش طول منطقه در پلاتو نسبت به آلیاژ پایه مشاهده شد. آن‌ها این کاهش طول را به لغزش نابجایی‌ها در منطقه HAZ نسبت دادند. در پژوهش حاضر نیز با افزایش عرض منطقه HAZ، طول منطقه پلاتو کاهش یافته است. همانگونه که شکل‌های(1،2،3،5و7) نشان می‌دهد، آلیاژ پایه دارای ساختاری با دانه‌بندی ریز است که در جهت طول نمونه که جهت بارگذاری نیز هست، کشیده شده‌اند. در حالی‌که در منطقه متاثر از حرارت(HAZ) با نزدیک شدن به مرز ذوب، دانه‌های کشیده به دانه‌های هم محور درشت بدون جهت‌گیری خاص(اتفاقی) تبدیل شده‌اند. در ناحیه جوش(FZ)، دانه‌های قبلی آلیاژ که ساختاری کار شده داشتند ذوب شده و انجماد مجدد یافته‌اند.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.11.4]



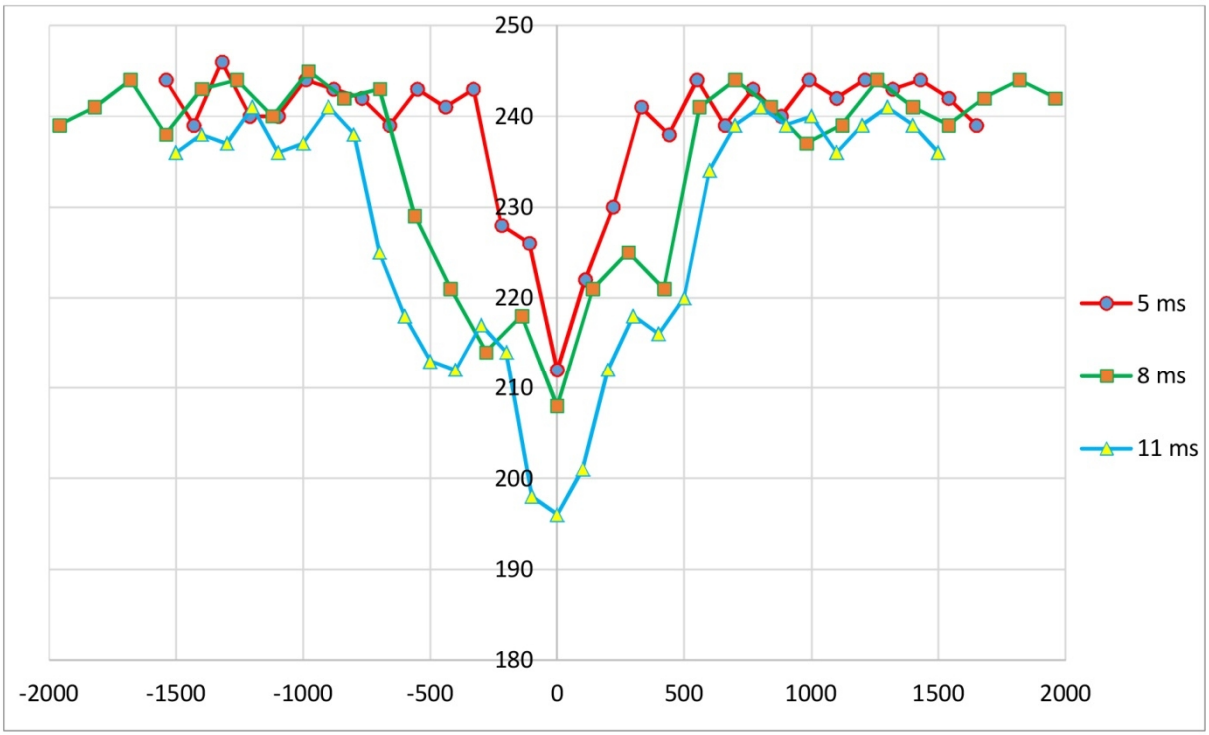
شکل 9- نتایج آزمون کشش محوری آلیاژ پایه و اتصال‌های جوش با مدت زمان مختلف اعمال پالس لیزر.

در این ناحیه دانه‌هایی کاملاً درشت نسبت به آلیاژ پایه به وجود آمده است که به دلیل گرادیان حرارتی‌که حین انجماد وجود داشته، دارای جهت‌گیری خاصی هستند که از مرز ذوب به سمت مرکز اتصال کشیده شده‌اند. لازم به ذکر است که تمامی نمونه‌های جوشکاری شده از مرکز اتصال دچار شکست شده‌اند.

در مرکز اتصال برخلاف آلیاژ پایه و منطقه متاثر از حرارت (HAZ) و اطراف WZ دانه‌ها جهت‌گیری خاصی ندارند. شکل‌های (1،2،3 و5) نشان می‌دهد که در فلزجوش جهت‌گیری و بافت ترجیحی وجود دارد. بنابراین خواص مکانیکی در جهت طول سیم بهینه نیست. در فلز پایه دانه‌ها گرد و هم محور هستند و خواص مکانیکی همسانگرد است. این تفاوت در جهت‌گیری دانه‌ها در مرکز و اطراف منطقه انجماد می‌تواند علت شکست در مرکز اتصال باشد. آلیاژ نیکل تیتانیم استفاده شده در این پژوهش در دمای اتاق ساختار کاملاً مارتنزیتی دارد.

در نمودار مربوط به آزمون کشش محوری این آلیاژ ناحیه پلاتو مشاهده می‌شود و تا کرنش 7% و تنش 160 مگاپاسکال ادامه یافته است که نشان‌دهنده تبدیل مارتنزیت‌های درون ساختار، به مارتنزیت‌های دوقلویی است[11]. در اتصال‌هایی که با مدت زمان‌های مختلف پالس لیزر انجام شده نیز، این ناحیه پلاتو مشاهده می‌شود اما رفتار نمودارها به مانند آلیاژ پایه نبوده است. رفتار تنش-کرنش برای نمونه‌های جوشکاری شده با نمونه اولیه متفاوت بوده است که احتمالاً آن را می‌توان به ذوب و انجماد مجدد و حرارت وارده به آلیاژ، تغییرات ریزساختاری مانند جهت‌گیری مجدد دانه‌ها و بزرگ‌شدن دانه‌ها در HAZ و WZ و همچنین از بین رفتن اثر کارسختی ناشی از فرایند تولید نسبت داد. طول ناحیه پلاتو در مدت زمان پالس 5 میلی‌ثانیه به 9% و در 8 میلی‌ثانیه به 8% و در 11 میلی‌ثانیه به 5% کاهش یافته است. بررسی و مقایسه نمودارهای آزمون کشش نشان می‌دهد که انتخاب پارامترهای جوشکاری لیزر تاثیر زیادی بر خواص مکانیکی منطقه اتصال دارند و افزایش مدت زمان

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.11.4]



شکل 10- پروفیل سختی از مرکز جوش اتصال‌ها با مدت زمان اعمال پالس 5، 8و 11 میلی‌ثانیه.

اعمال پالس لیزر و در نتیجه افزایش گرمای ورودی به منطقه اتصال هم‌جنس این آلیاژ، باعث کاهش استحکام شکست اتصال این آلیاژ می‌شود.

3-4- آزمون سختی سنجی

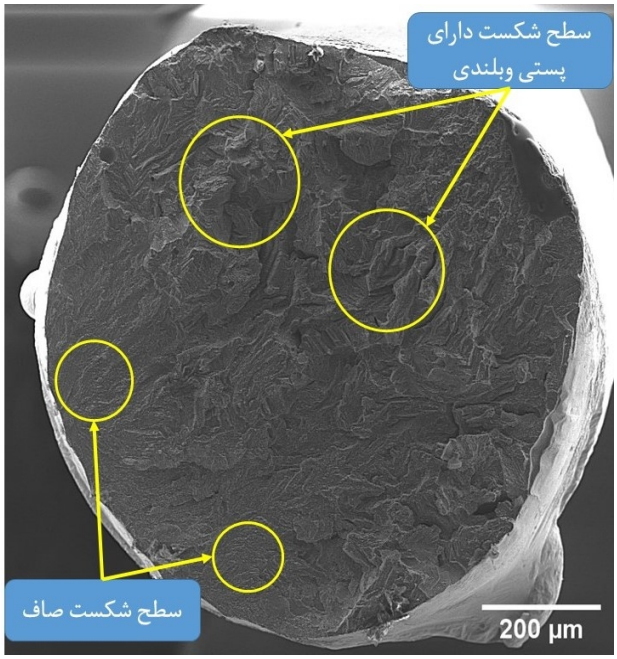
شکل (10) پروفیل سختی ویکرز سطح مقطع اتصال جوشکاری شده را بر حسب فاصله از مرکز جوش نشان می‌دهد. سختی سنجی، داده های 236 تا 246 ویکرز را برای آلیاژ پایه نشان می‌دهد. اختلاف جزئی در میزان سختی آلیاژ پایه را می‌توان به توزیع رسوبات و فازهای ثانویه غنی از تیتانیم نسبت داد[12].

با توجه به شکل(10)، در نمونه جوشکاری شده با مدت زمان اعمال پالس 5 میلی‌ثانیه، در فاصله تا حدود 300 میکرومتر از مرکز جوش از هر دو سمت اتصال، نمودار روند یکنواختی را طی می‌کند اما به ناگهان سختی با شیب زیادی تا حدود 230 ویکرز کاهش می‌یابد. مشاهده تصویر میکروسکوپ نوری اتصال جوش با این پارامتر نشان می‌دهد که نقطه سختی گرفته شده مربوط به منطقه متاثر از حرارت(HAZ) می‌باشد. با نزدیک شدن به مرکز اتصال، روند کاهش سختی ادامه می‌یابد تا سرانجام در مرکز اتصال سختی به حداقل مقدار خودش (212ویکرز) در این نمونه جوشکاری شده می‌رسد. در پژوهشی که چان و همکاران[13] و میرشکاری [14] انجام داده‌اند نیز این روند کاهش سختی در منطقه جوش اتفاق افتاده اما در FZ سختی نسبت به منطقه HAZ بر خلاف پژوهش حاضر اندکی افزایش یافته بود که احتمالاً این افزایش روند سختی به این دلیل بوده که آلیاژ نیکل‌تیتانیم در پژوهش آن‌ها، در فاز دمای بالای خود(آستنیت) قرار داشته است.

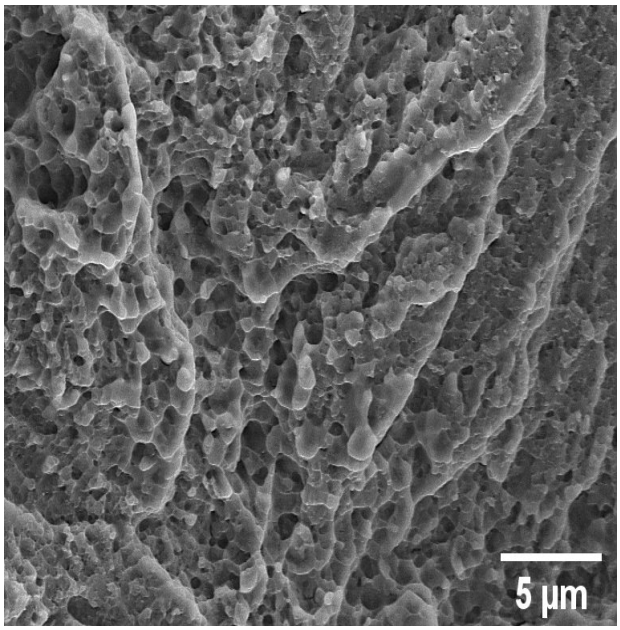
در دو نمونه دیگر که با مدت زمان‌های اعمال پالس لیزر بیشتر انجام شده (8 و 11 میلی‌ثانیه) به دلیل گرمای ورودی بیشتر به منطقه اتصال و در نتیجه منطقه ذوب وسیع‌تر و منطقه متاثر از حرارت بزرگ‌تر، روند کاهش سختی نسبت به اتصال با مدت زمان اعمال پالس 5 میلی‌ثانیه سریع‌تر آغاز شده است که نتیجه میزان حرارت جذب شده بیشتر است. همچنین در نمونه با مدت زمان اعمال پالس 8 میلی‌ثانیه نسبت به 5 میلی‌ثانیه و همچنین 11 میلی‌ثانیه نسبت به 8 میلی‌ثانیه، میزان کاهش سختی نیز بیشتر بوده است. در این دوحالت نیز سختی در منطقه ذوب و در مرکز اتصال به حداقل مقدار خود یعنی 196 ویکرز رسیده

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.11.4]

است،



شکل 11- تصویر سطح شکست آلیاژ جوشکاری شده.



شکل 12- تصویر مورفولوژی سطح شکست آلیاژ جوشکاری شده.

در این دو حالت نیز سختی در منطقه ذوب و در مرکز اتصال به حداقل مقدار خود یعنی 196 ویکرز رسیده است. با بررسی تصاویر میکروسکوپ نوری مربوط به این سه پارامتر مختلف، می‌توان نتیجه گرفت که کاهش سختی در منطقه متاثر از حرارت(HAZ) به دلیل حرارت وارده به آلیاژ پایه و در نتیجه از بین رفتن کارسختی ناشی از فرایند تولید، انحلال رسوبات غنی از تیتانیم، رشد دانه‌ها و تغییر ریزساختار بوده است. با افزایش میزان مدت زمان اعمال پالس لیزر، میزان گرمای بیشتری توسط قطعه کار جذب شده و در نتیجه این تحولات متالورژیکی با شدت بیشتری رخ داده و افت سختی بیشتری مشاهده می‌شود.

3-5- شکست نگاری

شکل(11و12) تصاویر گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست نمونه جوشکاری شده اتصال هم‌جنس این آلیاژ را نشان می‌دهد. این تصاویر نشان می‌دهد که شکست از نوع ترکیبی نرم و ترد بوده و در مرکز جوش اتفاق افتاده است. مناطق شکست صاف نشان دهنده شکست ترد و ورقه‌ای است، در حالی‌که پستی و بلندی‌ها می‌تواند نشانه‌ای از شکست نرم باشد. شکست در این اتصال در تمامی مدت زمان‌های مختلف اعمال پالس لیزر، در مرکز اتصال اتفاق افتاده است. همان‌گونه که شکل‌های (2، 3و 4) نشان می‌دهد، در مرکز منطقه مذاب دانه‌ها در بزرگ‌ترین اندازه خود نسبت به آلیاژ پایه و منطقه متاثر از حرارت (HAZ) هستند و به سمت سطح جوش کشیده‌شده‌اند. هیچ‌گونه حفره انقباضی‌و ترکی در سطح شکست نمونه جوشکاری شده مشاهده نمی‌شود.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اتصال هم‌جنس آلیاژ حافظه‌دار NiTi به استفاده از جوشکاری لیزر Nd:YAG ضربانی با مدت زمان‌های اعمال پالس‌های مختلف 5، 8 و 11 میلی ثانیه بررسی شد و نتایج زیر به دست آمد:

- با استفاده از پارامترهای ذکر شده در این پژوهش یک اتصال سالم و عاری از عیوب ظاهری جوش به دست آمد.
- با افزایش مدت زمان اعمال پالس لیزر از 5 میلی‌ثانیه به 11 میلی‌ثانیه، استحکام شکست آلیاژ جوشکاری شده کاهش یافت. این موضوع به دلیل افزایش میزان حرارت ورودی به قطعه کار و در نتیجه از بین رفتن اثر کارسختی، انحلال رسوبات، بزرگ‌تر شدن اندازه دانه‌ها، کاهش مرزدانه‌ها و تغییر جهت‌گیری دانه‌ها در مرکز اتصال بوده است.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.11.4]

- سختی در منطقه متاثر از حرارت به دلیل جذب گرمای ورودی و بزرگ‌تر شدن اندازه دانه‌ها نسبت به آلیاژ پایه، و حل شدن رسوبات کاهش یافت. در منطقهWZ نیز به دلیل ذوب و انجماد، دانه‌هایی بزرگ‌تر از HAZ و آلیاژ پایه به وجود آمدند و میزان سختی به کمترین میزان خود رسید. با افزایش مدت زمان اعمال پالس لیزر از 5 به 11 میلی‌ثانیه و در نتیجه بیشتر شدن میزان حرارت ورودی به قطعه کار، مساحت منطقه متاثر از حرارت HAZ افزایش یافت و در مرکز اتصال سختی به کمترین میزان خود رسید.

با توجه به تصاویر میکروسکوپ الکترونی و آنالیز ترکیب شیمیایی با تکنیک EDS نشان داد که بیشتر ترکیبات بین فلزی که در آلیاژ پایه وجود داشته اند، در منطقه اتصال آلیاژ حل شده و تعداد کمی از آن‌ها در ساختار جوش باقی‌مانده‌اند.

منابع

1- K. Otsuka and C. M. Wayman, "Shape memory materials . 1999: Cambridge university press.

2- K. Otsuka and X. Ren, "Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys" Progress in Materials Science, 2005. 50(5): p. 511-678.

3- W. Predki, A. Knopik, and B. Bauer, "Engineering applications of NiTi shape memory alloys" Materials Science and Engineering: A, 2008. 481-482: p. 598-601.

4- M. R. Hassan, M. Mehrpouya, and S. Al-Wasiti, "Review of the Machining Difficulties of Nickel-Titanium Based Shape Memory Alloys" Applied Mechanics and Materials, 2014. 564: p. 533-537.

5- A. Schuessler. "Laser processing of Nitinol materials". in Proceed. of the Intern. Conf. on Shape Memory and Superelastic Techn. 2001.

6- M. K. Stanford, "Thermophysical properties of 60-nitinol for mechanical component applications". 2012: National Aeronautics and Space Administration, Glenn Research Center.

7- S. Kou, "Welding metallurgy" 2003.

8- X. Yan, D. Yang, and X. Liu, "Influence of heat treatment on the fatigue life of a laser-welded NiTi alloy wire" Materials characterization, 2007. 58(3): p. 262-266.

9- J. Seo, Y. C. Kim, and J. W. Hu, "Pilot study for investigating the cyclic behavior of slit damper systems with recentering shape memory alloy (SMA) bending bars used for seismic restrainers" Applied Sciences, 2015. 5(3): p. 187-208.

10- J. K. Allafi, X. Ren, and G. Eggeler, "The mechanism of multistage martensitic transformations in aged Ni-rich NiTi shape memory alloys" Acta Materialia, 2002. 50(4): p. 793-803.

11- A. Falvo, F. Furgiuele, and C. Maletta, "Laser welding of a NiTi alloy: Mechanical and shape memory behaviour" Materials Science and Engineering: A, 2005. 412(1-2): p. 235-240.

12- A. Tuissi, S. Besseghini, "Effect of Nd-YAG laser welding on the functional properties of the Ni–49.6 at.% Ti" Materials Science and Engineering: A, 1999. 273: p. 813-817.

13- C. Chan, H. C. Man, and T. M. Yue, "Effects of process parameters upon the shape memory and pseudo-elastic behaviors of laser-welded NiTi thin foil" Metallurgical and Materials Transactions A, 2011. 42(8): p. 2264-2270.

14- G. Mirshekari, A. Saatchi, "Laser welding of NiTi shape memory alloy: Comparison of the similar and dissimilar joints to AISI 304 stainless steel" Optics & Laser Technology, 2013. 54: p. 151-158.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.11.4]