نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال پنجم، شماره2، پاییز و زمستان1398، صفحه 146-135

جوشکاری لیزر غیرهمجنس سیم‌های ارتودنسی آلیاژ حافظه دار NiTi به فولاد زنگ نزن آستنیتی

سعید اسدی[1]، توحید سعید[1*]، علیرضا والانژاد[2]، جعفر خلیل علافی[3]

1-دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

2-دانشکده علوم دندانپزشکی، دانشگاه دانشگاه ناکاساکی، ناکاساکی، ژاپن

3-مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

(دریافت مقاله: 1398/04/12 ؛ پذیرش مقاله: 1398/05/30)

چکیده

در این پژوهش اتصال غیرهمجنس سیمهای ارتودنسی آلیاژ حافظه دارNiTi به فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 304 بررسی شده است. به این منظور، سیم‌های ارتودنسی رایج با سطح مقطع مستطیلی و ابعاد (0/635 × 0/432 میلی متر) انتخاب و از تکنیک جوشکاری لیزر برای اتصال سیمها استفاده شد. ریزساختار اتصالهای بدست آمده با استفاده از میکروسکوپ نوری(OM)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به آنالیز EDS و آنالیز پراش پرتو ایکس در مقیاس میکرو (Micro-XRD) بررسی شد. همچنین از تکنیک میکرو سختی سنجی ویکرز برای ارزیابی خواص مکانیکی منطقه جوش استفاده شد. بررسی‌های ریزساختاری نشان داد، ریزساختار حاصل از جوش لیزر این دو آلیاژ دارای ساختار دندریتی و غیرهمگن می‌باشد.تشکیل ترکیبات بین فلزی ترد Fe_2Ti، Cr_2Ti، $TiNi_3$ و Ti_2Ni در حین جوشکاری باعث افزایش سختی منطقه جوش تا حدود 800 ویکرز شد. مشاهده شد تشکیل ترکیبات بین فلزی Fe_2Ti عمدتا در منطقه جوش مجاور فصل مشترک ذوب فلز پایه NiTi علت اصلی افزایش شدید سختی این منطقه و درنتیجه تمرکز تنش، تشکیل میکروترک و افت خواص مکانیکی می‌باشد. بنابرین یک فرآیند اصلاحی مناسب برای کنترل ترکیب شیمیایی منطقه جوش و بهبود خواص اتصال غیر همجنس این دو آلیاژ نیاز می‌باشد.

کلمات کلیدی: آلیاژ NiTi، فولاد زنگ نزن آستنیتی، سیم ارتودنسی، اتصال لیزر، ترکیبات بین فلزی.

Dissimilar laser welding of NiTi shape memory alloy to AISI 304 austenitic stainless steel archwires

S. Asadi[1], T. Saeid*[1], A.Valanezhad[2], J. Khalil Allafi[3]

1-Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

2-Department of Dental and Biomedical Materials Science, Nagasaki University, Nagasaki, Japan

3-Research Center for Advanced Materials, Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

(Received 3 July 2019 ; Accepted 21 August 2019)

Abstract

In this research, dissimilar welding of NiTi shape memory alloy to AISI 304 austenitic stainless steel Archwires was investigated. For this purpose, common straight orthodontic archwire with rectangular cross-section and dimensions of

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: saeid@sut.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

(0.635 × 0.432 mm) were selected and the laser welding technique was used to connect the wires. The microstructure, chemical composition and phasesin the weld zone of the joints werestudied with optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM) equipped with EDS analysis system, focused X-ray diffraction (Micro-XRD).Also, the mechanical properties of the weld zone were investigated by using Vickers microhardness test. Microstructure investigation showed that the obtained microstructure from the laser weld of these alloys has a dendritic and non-homogeneous structure. According to XRD analysis, brittle intermetallic compounds such as Fe_2Ti, Cr_2Ti, $TiNi_3$, and Ti_2Ni were formed during laser welding in the weld zone. Formation of these brittle intermetallics caused increasing the hardness of the weld zone about 800 HV, and decreasing the mechanical properties. Also, Fe_2Ti intermetallic particles mainly formed in the weld region near the NiTi fusion zone which results in stress concentration, micro-cracks formation and so dropping the joints mechanical properties. Therefore, a suitable modification process is required to control the chemical composition of the weld zone and improving the joint properties of dissimilar laser welded archwires of these alloys.

Keywords: NiTi alloy, Austenitic stainless steel, Orthodontic archwire, Laser welding, Intermetallic compounds.

1- مقدمه

دربین مواد مختلفی که در مهندسی زیست پزشکی استفاده می‌شود، آلیاژهای NiTi بدلیل داشتن خواص حافظه داری، سوپرالاستیسیته، مقاومت بخوردگی و زیست سازگاری نقش مهمتری دارند [1-3]. خواص منحصر به فرد این آلیاژها ناشی از استحاله فاز جامد بین فاز دما بالا (آستنیت) و فاز دما پایین (مارتنزیت) می‌باشد که این استحاله‌های فازی می‌توانند با تغییرات دما یا تنش فعال گردند [4و 5].

همان‌طوری‌که رایج است برای گسترش کاربرد هر ماده جدید، علاوه بر توسعه خواص ذاتی آن، نیاز به توسعه فرآیندهای اتصال آن ماده به خود و یا سایر مواد می‌باشد. در سالهای اخیر چندین فرآیند جوشکاری مختلف برای اتصال آلیاژهای NiTi مورد استفاده قرار گرفته و اتصال موفقیت آمیز این آلیاژ گزارش شده است. جوشکاری اصطکاکی [6و7]، جوشکاری با الکترود تنگستنی و گاز خنثی(TIG) [8]، جوشکاری پلاسما [9] و جوشکاری لیزر [10-15] نمونه هایی از این اقدامات می‌باشند.

در بین فرآیندهای مختلف جوشکاری، جوشکاری لیزر مهمترین فرآیند اتصال برای این گروه از مواد شناخته شده است و به طور خاص، جوشکاری لیزر با منبع Nd:YAG بخاطر گرمای ورودی و چگالی انرژی پایین، مناطق ذوب و تحت تاثیر حرارت (HAZ) پایین برای اتصال قطعات کوچکتر با اشکال پیچیده مناسب تر می‌باشد.

اتصال NiTi به دلیل حساسیت بالای این آلیاژ به عملیات ترمومکانیکی که باعث از بین بردن اثر حافظه داری و سوپرالاستیک در منطقه جوش و مناطق اطراف آن می‌شود، یک فرآیند دشوار می‌باشد. فالوو و همکارانش [16] اتصال آلیاژهای NiTi را بررسی کردند و افت بارز در خواص مکانیکی و عملکرد حافظه داری این اتصالات را گزارش کردند. نتایج مشابهی در مطالعات بعدی توسط چان و همکارانش [17] گزارش شد که نشان دادند دمای شروع استحاله فازی آستنیت به مارتنزیت در منطقه جوش بسیار کاهش یافت و همچنین خواص الاستیک بشدت افت نشان داد. یکی از کاربردهای آلیاژهای حافظه دار NiTi برای تولید سیم‌های ارتودنسی می‌باشد. این سیمها به گونه ای طراحی می‌شوند که حین معالجه برای دندانهایی که در محل خود قرار نگرفته‌اند و دارای آرایش نامنظم می‌باشند، یک نیروی الاستیک پیوسته اعمال کنند. این نیروی الاستیک با گذشت زمان باعث حرکت دندانها به موقعیتهای اصلی و اصلاح آرایش دندانها می‌شود. از این رو، این سیمها باید طوری طراحی شوند که در طول هفته ها و یا ماه ها رفتار الاستیک خود را حفظ کنند. برای رسیدن به این هدف، سیمها در سطح مقاطع، مواد و ابعاد مختلف ساخته می‌شوند. امروزه چهار گروه آلیاژ اصلی برای این منظور وجود دارد:

فولاد زنگ نزن، NiTi، کبالت-کروم و بتاتیتانیوم. براساس خواص ذکر شده برای آلیاژهای NiTi، سیم های تولید شده از

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

این آلیاژها ترکیب بهینه‌ای از مدول الاستیسیته پایین و خواص برگشت فنری عالی در مقایسه با سایر آلیاژها را دارند. همچنین اثر سوپرالاستیک این آلیاژها باعث حفظ نیروی الاستیک ضمن حرکت دندان می‌شود و از سفت کردن چندباره سیمها ضمن عملیات جلوگیری می‌کند [11و18]. سیم‌های NiTi در مراحل اولیه معالجه که نیاز به خمش‌های بالا هست مورد استفاده قرار می‌گیرند، ولی درحقیقت هیچ سیمی نمی‌تواند برای تمام مراحل عملیات عملکرد مطلوب داشته باشد. هر سیستم آلیاژی، خواص منحصربفردی دارد و در مراحل مختلف معالجه براساس خواص الاستیک، سیم مطلوب انتخاب می‌شود. دربعضی مواقع (بعنوان مثال برای اعمال نیروهای الاستیک مختلف به دندانهای قسمت قدامی و خلفی) نیاز است که سیمهای NiTi به سیم از جنس فولاد زنگ نزن اتصال داده شود. موفقیت در این امر باعث خواهد شد که این سیم ارتودنسی مرکب به سادگی در کلینیک‌های دندان پزشکی قابل تولید می‌شود و این عملیات باعث افزایش گزینه های درمان برای پزشک خواهد شد. بنابرین بررسی خواص اتصال سیم ارتودنسی NiTi به فولاد زنگ نزن از این حیث حائز اهمیت می باشد. از طرف دیگر اتصال موفقیت آمیز این دو آلیاژ غیرهمجنس علاوه بر کاربرد در عملیات ارتدونسی، باعث افزایش کابرد این آلیاژها خواهد شد. اتصال غیرهمجنس آلیاژ NiTi به فولاد زنگ نزن آستنیتی بخاطر تفاوت عمده در خواص فیزیکی و شیمیایی این دو آلیاژ، یک فرآیند بسیار پیچیده و دشوار می‌باشد. کارهای انجام شده در این زمینه و مشکلات مربوط به اتصال غیر همجنس این دو آلیاژ، اخیرا توسط الیویرا و همکارانش [19] جمع بندی و ارائه شده است. وانود و همکارانش [20] با مدلسازی مکانیک شکست نشان دادند که تغییرات شدید خواص مکانیکی (سختی) در منطقه جوش نزدیک فلز پایه و آلیاژ NiTi باعث محدودیت کرنش، تمرکز تنش و درنتیجه افت خواص مکانیکی می گردد. لذا در این پژوهش دلیل تغییرات شدید سختی بین منطقه جوش و فلز پایه بررسی شده است و به این منظور با توجه به نیاز اشاره شده درخصوص تولید سیم‌های ارتودنسی مرکب، اتصال سیمهای ارتودنسی پرکاربرد مستقیم با سطح مقطع مستطیلی (0/635×0/432 میلی‌متر NiTi) به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 304 در حالت جوشکاری لب به لب بررسی شده است. به این منظور، دستگاه جوش لیزر با منبع Nd:YAG مورد استفاده قرار گرفت و در مرحله اول پارامترهای دستگاه بهینه شد. نمونه‌ها با توجه به پارامتهای بدست آمده جوشکاری شدند و در نهایت ریزساختار، ترکیب فازی و خواص مکانیکی اتصالات غیرهمجنس این دو آلیاژ بررسی شده است.

2-مواد و روش تحقیق

2-1-مواد

در این پژوهش از دو نوع سیم مستقیم رایج در عملیات ارتودنسی با جنس آلیاژهای NiTi و فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 304 استفاده شده است. مشخصات این دو نوع سیم در جدول (1) آورده شده است. سیم آلیاژ NiTi(Ni-45%Wt Ti) مورد استفاده در دمای اتاق دارای ساختار با فاز B2 و فولاد زنگ نزن مورد استفاده، آلیاژ AISI 304 با ساختاری فازی آستنیت و مقدار جزئی آهن آلفا (α-Fe) می‌باشد.

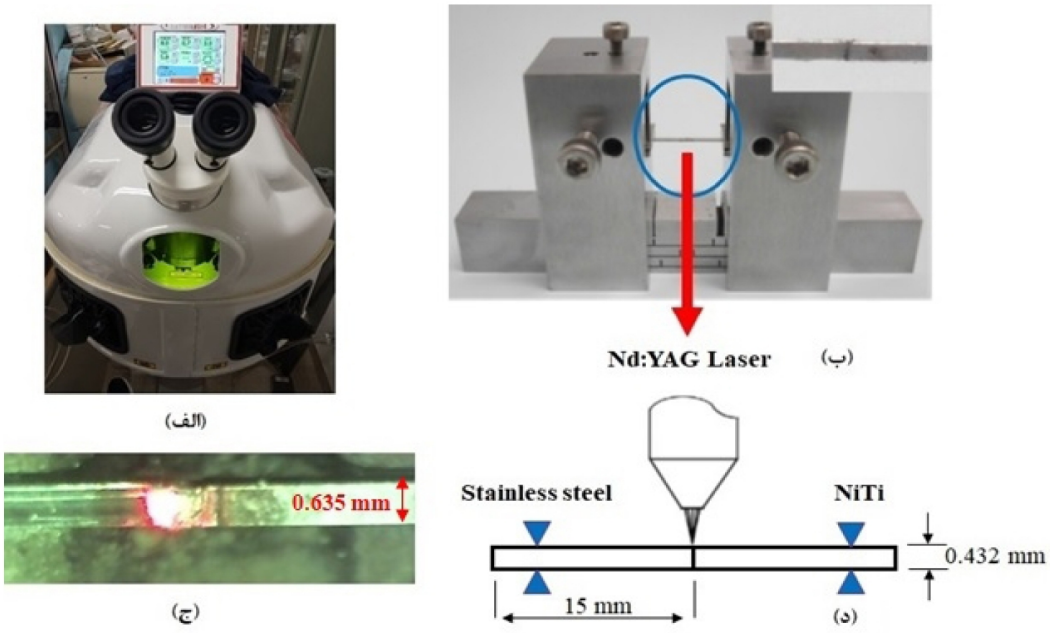
2-2-آماده سازی سیم‌ها برای جوشکاری

سیم‌های مستقیم با استفاده از قیچی مخصوص با لبه صاف، محصول شرکت تسک کشور ژاپن به طول 15 میلی متر برش داده شد. برای اطمینان از صاف بودن سطوح تماس و جلوگیری از بوجود آمدن شکاف بین سیم‌ها در حین اتصال لب به لب در حین جوشکاری، سیم‌های برش داده شده با استفاده از کاغذ سنباده سیلیکون کارباید شماره 400 سنباده‌زنی شد. سپس برای تمیزکاری، سیمها در حمام‌های استن و آب مقطر هرکدام به مدت 5 دقیقه بصورت آلتراسونیک شستشو شدند .

2-3- تجهیزات و پارامترهای جوشکاری

برای اتصال سیمها دستگاه جوش لیرز با منبع Nd:YAG با طول موج 1064 نانومتر ساخت شرکت ایتالیا (شکل1– الف) استفـاده شـد. همچنـین برای ثـابت نگـهداشتن سیم‌ها در حین

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]



شکل1- الف) دستگاه جوشکاری لیزر، ب) فیکسچر ساخته شده برای نگهداری سیمها حین جوشکاری،

جوشکاری لب به لب و اطمینان از عدم وجود شکاف بین سطوح تماس سیمها از فیکسچر نشان داده شده در شکل(1-ب) استفاده شد. این رده از محصولات شرکت الکترولیزر برای کنترل دقیق محل پرتو لیزر و عکسبرداری حین جوشکاری مجهز به دوربین مخصوص داخل محفظه جوش می‌باشد (نمونه ای از عکس گرفته شده از سیمها در حین جوشکاری در شکل(1-ج) نشان داده شده است).

برای جلوگیری از اکسیداسیون و نفوذ گازهای N_2 ، O_2 و H_2 به منطقه جوش و درنتیجه برای جلوگیری از کاهش خواص اتصالات از دمش گاز خنثی آرگون با نرخ 22 لیتر بر دقیقه و به مدت 5 ثانیه قبل و 5 ثانیه پس از جوشکاری در محفظه بسته جوش استفاده شد. شماتیک کلی فرآیند در شکل (1- د) نشان داده شده است. پارامترهای جوشکاری در جدول (2) ارائه شده است.

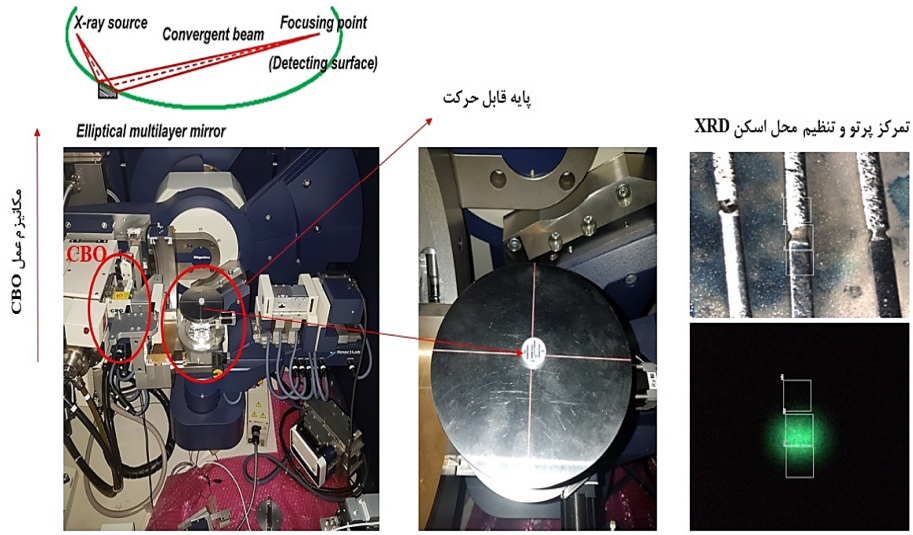
2-4-بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی

برای بررسیهای ریزساختاری سیمهای جوشکاری شده، نیاز به مانت نمونه ها بود، لذا اتصالات جوشکاری شده با استفاده از اکریلیک رزین خودگیرنده مانت سرد شدند. آماده سازی متالوگرافی نمونه ها براساس استاندارد ASTM E3-11 انجام شد. بر این اساس نمونه ها به ترتیب با سنباده های شماره 1000و 1200 و سپس با استفاده از پودر آلومینا پولیش آینه‌ای شدند. برای بررسیهای متالوگرافی اتصالات، قسمت فولاد زنگ نزن با استفاده از محلول $HCl:HNO_3$ با نسبت (3:1) و سمت NiTi با استفاده از محلول $HF:HNO_3:CH_3COOH$ با نسبت ترکیب (1:5:5) اچ شیمیایی شدند. بررسیهای ریزساختاری و ترکیب شیمیایی منطقه جوش با استفاده میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجز به سیستم آنالیز شیمیایی (EDS) (FESEM, JSM-7500FAM, JEOL) انجام شد. برای بررسیهای فازی منطقه جوش از تکنیک آنالیز پراش اشعه ایکس در حالت متمرکز و مقیاس میکرو (micro-XRD) و با استفاده از دستگاه اسمارت لبت شرکت ریگاکو دانشکده مواد دانشگاه ناکاساکی کشور ژاپن انجام شد. دستگاه مذکور دارای سیستم متمرکزکننده پرتو، پایه نگهدارنده با قابلیت جابجائی در سه جهت، دوربین مادون قرمز برای مشخص کردن محل دقیق پرتو می باشد. در این دستگاه مونوکروماتور و لنزهای مخصوص (CBO-F) برای تبدیل پرتو خطی به نقطه‌ای استفاده می شود. این فرآیند در شکل(2) نشان داده شده است. می توان ترکیبی از CBO ها را بگونه ای در این دستگاه استفاده نمود که بتوان پرتو را در نقطه زیر میلی‌متر

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

جدول1- مشخصات سیم‌های مورد استفاده.

سیم	برند	مدل	سطح مقطع	ابعاد
NiTi	G & H wire company	مستقیم	مستطیلی	۰/۶۳۵ × ۰/۴۳۲
Stainless steel AISI 304	American Orthodontics	مستقیم	مستطیلی	۰/۶۳۵ × ۰/۴۳۲



شکل 2- آزمون پراش پرتو ایکس در حالت متمرکز و مقیاس میکرو، دستگاه اسمارت لب شرکت ریگاکو[21].

متمرکز کرد [21]. برای بررسی خواص مکانیکی از آزمون میکرو سختی ویکرز استفاده شد. به این منظور از دستگاه میکرو سختی سنجی برند آکاشی ساخت کشور ژاپن با اعمال نیروی 200 گرم و مدت زمان 15 ثانیه (ASTM E 384) استفاده و پروفیل سختی در طول منطقه جوش (WZ) ، منطقه تحت تاثیر حرارت (HAZ) و فلز پایه (BM) اندازه گیری شد. تمام تستها در دمای اتاق انجام شد.

3-نتایج و بحث

اولین مرحله برای اتصال موفقیت آمیز سیم‌ها، بدست آوردن پارامترهای بهینه جوشکاری لیزر بود. با توجه به سطح مقطع سیم، قطر تمرکز 0/6 میلی متر ثابت درنظر گرفته شد و با توجه به پارامترهای ذکر شده در جدول (2) و با درنظر گرفتن دو پارامتر بیشینه توان (با متغیرهای 0/6، 0/8، 1 و 1/2 کیلووات) و زمان اعمال پالس (با متغیرهای 3، 5 و 8 میلی ثانیه) سیمها در شرایط مختلف جوشکاری شدند. نتایج حاصل از این فرآیند در شکل(4) و جدول (3) ارائه شده است.

با توجه نتایج ارائه شده در شکل (3) و مطابق جدول (3)، در بیشینه توانهای یک کمتر از 1 کیلووات و زمان اعمال پالس کمتر از 5 ثانیه مقدار انرژی برای ذوب و نفوذ کامل مذاب به اندازه کافی نمی‌باشد، لذا اتصال‌های ناموفق بدست آمده است.

جدول2-پارامترهای جوشکاری.

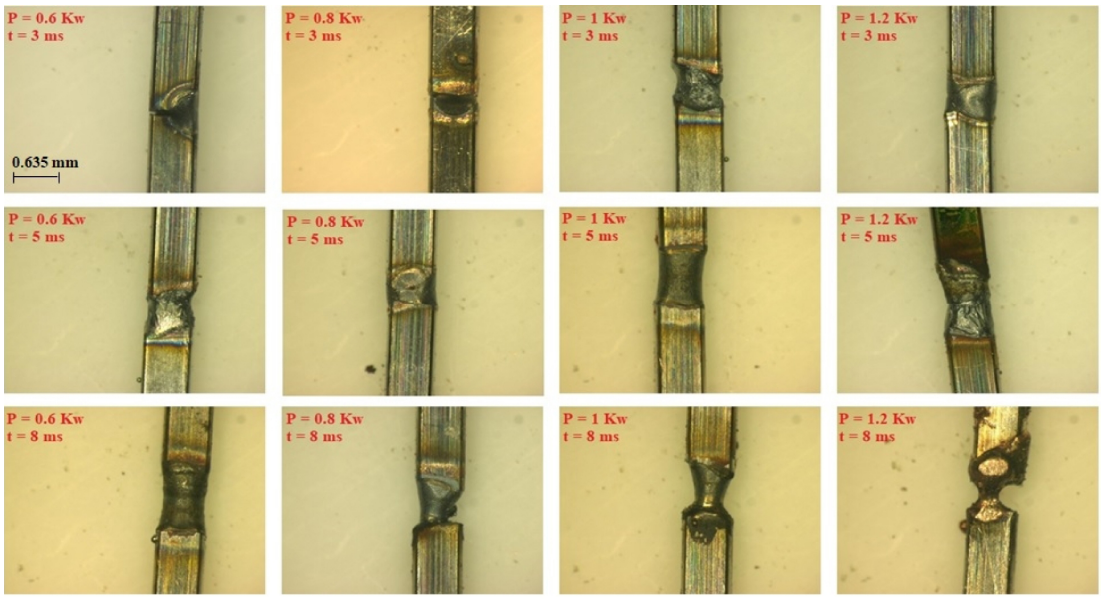
پارامتر	مقدار
انرژی	۶۰ J
طول موج	۱۰۶۴ nm
بیشینه توان پیک[1]	۰/۶-۰/۸-۱-۱/۲ Kw
زمان اعمال پالس	۳-۵-۸ ms
قطر تمرکز	۰/۶ mm

همچنین در توان بالای 1 کیلووات و زمان 8 ثانیه به دلیل اعمال انرژی بالا پاشش، تبخیر و از دست رفتن مذاب رخ داده است لذا توان 1 کیلووات و زمان اعمال پالس 5 میلی ثانیه به‌عنوان بهینه ترین حالت برای جوشکاری سیمها انتخاب شد. همچنین ملاحظه شد که زمان اعمال پالس نه تنها عمق نفوذ را تحت تاثیر قرار می‌دهد، بلکه مهم‌تر از آن بـاعث همگـن شدن

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

جدول3- خلاصه وضعیت جوشکاری سیم‌ها در بیشینه توان پیک و زمانهای اعمال پالس مختلف.

زمان اعمال پالس	بیشینه توان پیک			
	۰/۶	۰/۸	۱	۱/۲
۳	عدم ذوب کافی	عدم ذوب کافی	عدم نفوذ کافی	عدم نفوذ کافی
۵	عدم ذوب کافی	عدم نفوذ کافی	نفوذ کامل	پاشش مذاب و تبخیر
۸	عدم نفوذ کافی	پاشش مذاب و تبخیر	پاشش مذاب و تبخیر	پاشش مذاب و تبخیر



شکل3- جوش لیزر سیم‌های NiTi و AISI 304 در بیشینه توان پیک و زمان اعمال پالس‌های مختلف.

بستر ذوب نیز می گردد. این موضوع در تصویر SEM برای زمانهای اعمال پالس الف) 3 و ب) 5 ثانیه در بیشینه توان ثابت یک کیلووات در شکل(4) نشان داده شده است.

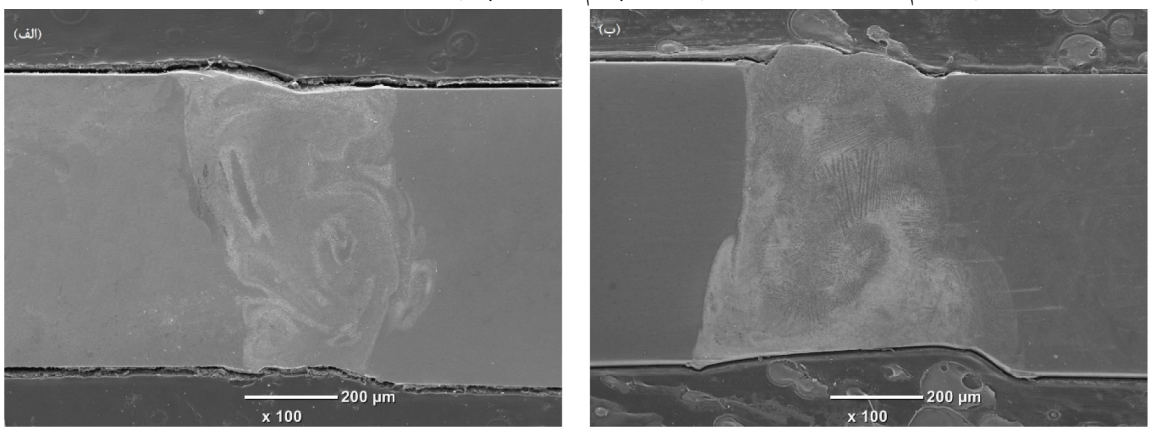
چنانچه در شکل(4) مشاهده می گردد، زمان اعمال پالس 5 ثانیه باعث همگن شدن بیشتر مذاب منطقه ذوب شده است همچنین مطابق این شکل منطقه جوش دارای شکل گردابی می‌باشد که نشان از مسیر جریان مذاب ضمن اعمال پالس جوشکاری دارد. ریزساختار منطقه جوش اتصالات در تصاویر SEM شکل(5) نشان داده شده است. همان‌طوری‌که در شکل مشاهده می گردد، ریزساختار منطقه جوش در هردو سمت از مرز مشترک بین فلز پایه تا مرکز جوش از حالت صفحه ای به سلولی و سپس از سلولی به دندریتی تغییر کرده است. این تغییرات ساختار به دلیل افزایش نرخ سرمایش از سمت مرکز جوش به سمت فلز پایه می باشد. از سمت مرز ذوب به سمت مرکز جوش، نرخ انجماد افزایش و شیب دمایی کاهش می یابد بنابرین انجماد با حالت صفحه از مرز ذوب شروع شده و به حالت سلولی و سپس دندریتی تبدیل می‌گردد [22].

جدول4- نتایج آنالیز EDS برای نقاط مشخص شده در شکل 7-ب.

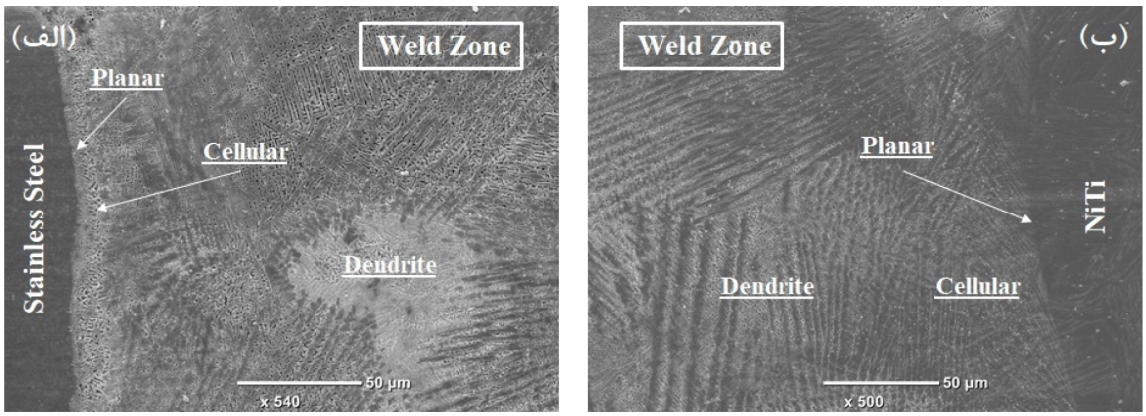
محل	درصد اتمی (atm %)			
	Ni	Ti	Fe	Cr
A	۵۰	۵۰		
B	۳۲.۸	۲۶.۷	۳۴.۶	۴.۳
C	۲۴.۸	۱۸.۱	۴۹.۸	۷.۸

ریزساختار مناطق فلز پایه و HAZ برای هردو سمت آلیاژ NiTi و فولاد زنگ نزن به ترتیب در شکل‌های (6-الف الی 6-د) نشان داده شده است. مطابق تصاویر (6-الف و 6-ب)، مارتنزیتهای حاصل از کارمکانیکی حین عملیات سنباده‌زنی و پولیش متالوگرافی در سطح آلیاژ NiTi بوضوح مشاهده می‌گردد. همچنین مشاهده شد که حرارت ناشی از جوش لیزر باعث رشد دانه در مناطق HAZ شده است (تصاویر 6-ب و

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]



شکل4-تصویر SEM سیمهای جوشکاری شده در زمان اعمال پالس الف) 3 و ب) 5 میلی ثانیه و بیشینه توان یک کیلووات.

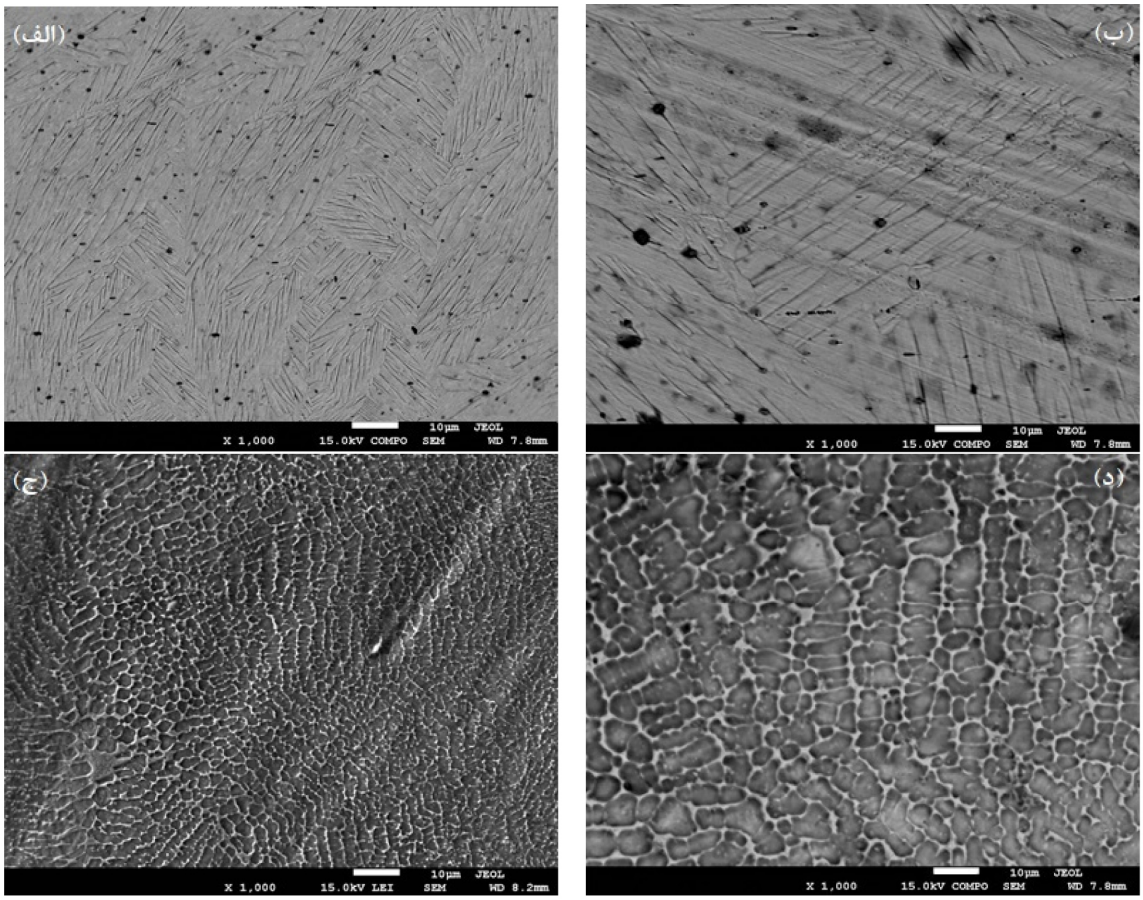


شکل5- تصویر SEM ریزساختار منطقه جوش در مرز مشترک: الف) فولاد زنگ نزن و ب) NiTi.

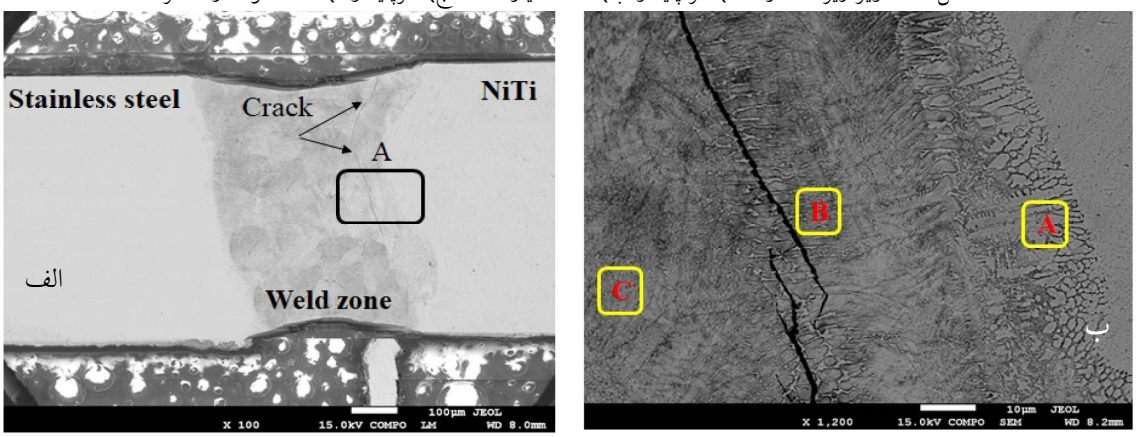
6-د). بررسی‌های ریزساختاری نشان داد بعضی از اتصالات در منطقه جوش نزدیک به فصل مشترک ذوب و فلز پایه NiTi دارای ترک می باشند. این پدیده را در شکل(7) نشان داده شده است. برای بررسی علت بوجود آمدن ترک در این ناحیه از جوش از آنالیز شیمیایی EDS استفاده شد. در این مرحله قابل ذکر است که میتوان با استفاده از آنالیز شیمیایی بدست آمده از EDS نقاط مختلف و دیاگرام سه تاییFe-Ni-Ti، فازهای محتمل موجود در ریزساختار نهایی را شناسایی و تحلیل نمود [6]. مطابق دیاگرام سه تایی آهن-نیکل-تیتانیوم (شکل8) وجود آهن از فولاد زنگ نزن، می تواند باعث تشکیل فازهای بین فلزی ترد در منطقه جوش اتصال غیرهمجنس این دو آلیاژ گردد. این دیاگرام نشان می‌دهد که آلیاژهایی که دارای ترکیب غنی از آهن و تیتانیوم می باشند در ساختار نهایی دارای فازهای γ و Fe_2Ti خواهند بود. از آنجایی که مذاب منطقه جوش به سرعت از دمای بالا سرد می‌شود، ساختار نهایی جوش جوش عمدتا شامل ترکیبات بین فلزی Fe_2Ti خواهد بود و از این رو ساختار نهایی ترد و مستعد ترک خواهد بود. با افزایش مقدار نیکل یا تیتانیوم، آلیاژ از مناطق فازی اولیه Ni_3Ti وγ منجمد خواهد شد که بسیار شکل‌پذیرتر از فاز Fe_2Ti می‌باشند [23و 24].

لذا برای بررسی ترکیبات شیمیایی منطقه ترک خورده، مطابق شکل(7-ب) سه منطقه به ترتیب نقطهA، درست در فصل مشترک فلز پایه NiTi و خط ذوب، منطقهB ، در منطقه ترک (منطقه مجاور خط ذوب) و منطقهC، دو از خط ذوب و نزدیک مرکز منطقه جوش انتخاب شد. نتایج حاصل از آنالیز شیمیایی EDSنقاط مذکور در جدول (4) ارائه شده است. برای تحلیل و درک بهتر فازهای نهایی موجود در ریزساختار، محل ترکیبات شیمیایی بدست آمده برروی دیاگرام سه تایی آهن-نیکل-تیتانیوم قرار داده شد (شکل 8). در این مرحله باید ذکر شود به دلیل شرایط جوشکاری لیزر پالسی، دمش گاز خنثی و

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]



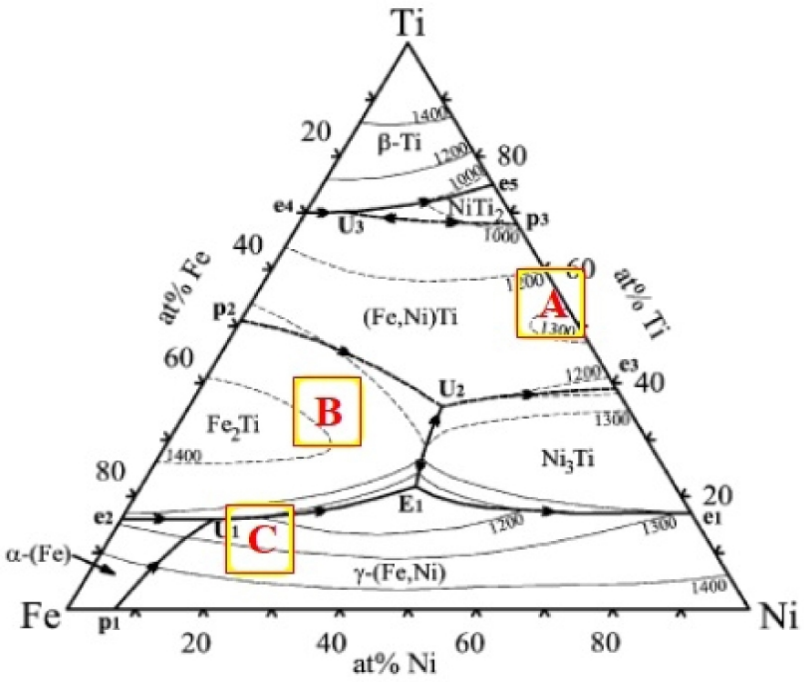
شکل6-تصاویر ریزساختار الف) فلز پایه و ب) HAZ آلیاژ NiTi، ج) فلزپایه و د) HAZ فولاد زنگ نزن.



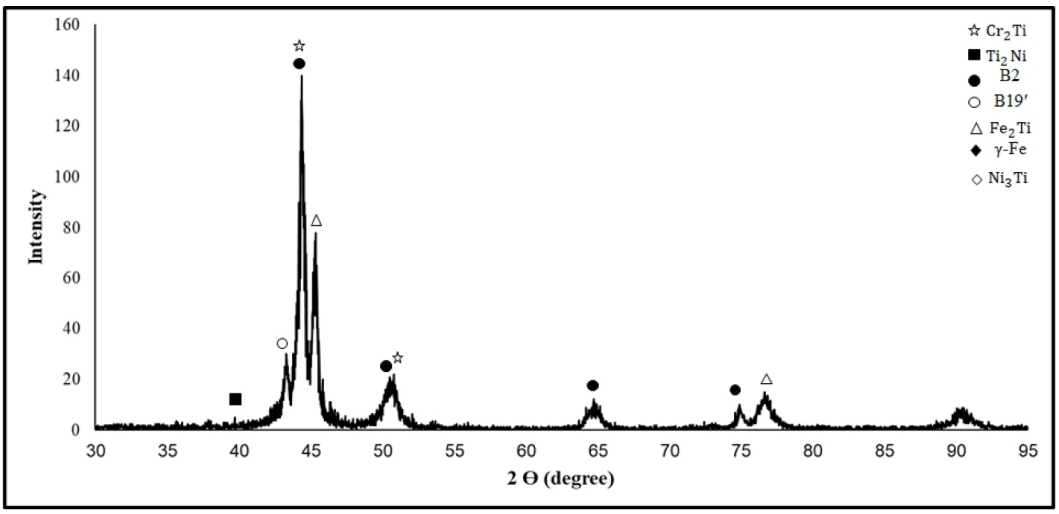
شکل7- تصاویر SEM الف) ترک‌های بوجود آمده در مرز مشترک ذوب و فلز پایه NiTi و ب) منطقه مشخص شده در تصویر (الف) و نقاط آنالیز EDS.

ابعاد خیلی کوچک سیم‌ها، نرخ سرمایش مذاب جوش شدیدا بالا بوده است و می‌توان فاز نهایی موجود در ساختا را همان فاز زیر خط سالیدوس (مطابق دیاگرام شکل 8) فرض نمود. آنالیز نواحی مختلف نشان داده شده در شکل (7-ب) با استفاده از EDS انجام شد. نتایج بدست آمده نشان داد که عناصر آهن، تیتانیوم، نیکل و کروم در هرسه منطقه جوش وجود دارند. برای تحلیل ساختارهای فازی مناطق مختلف، محل دقیق ترکیبات بدست آمده در روی دیاگرام سه تایی آهن-نیکل-تیتانیوم مشخص شد. مطابق با نتایج بدست آمده و ارائه شده در جدول (4) و شکل (8)، مشاهده می‌گردد، منطقه مشخص شده A دارای ترکیب 50 درصد اتمی نیکل و 50 درصد اتمی تیتانیوم و در منطقه فازی اولیه (Fe,Ni)Ti و

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]



شکل8- دیاگرام سه تایی Fe-Ni-Ti [27] و محل آنالیز شیمیایی نقاط مشخص شده در تصویر 7-ب.

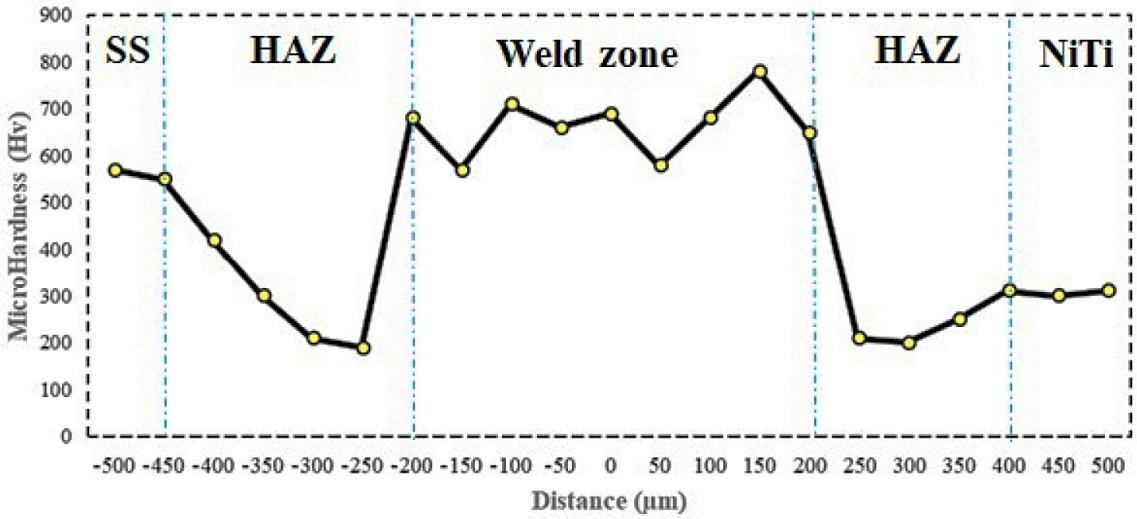


شکل9- الگوی پراش پرتو ایکس منطقه جوش اتصال غیرهمجنس آلیاژ NiTi به فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 304.

نزدیک به خط دوتایی Ni-Ti است. لذا ساختار نهایی انجماد و فازها نهایی موجود در ساختار عمدتا NiTi است که به دلیل نرخ سرمایش بالا بصوت دندریتی ظاهر شده است. منطقه مشخص شده B، دارای ترکیب شیمیایی 32/8 درصد نیکل، 34/6 درصد آهن و 26/7 درصد تیتانیوم می باشد. این ترکیب مطابق شکل(8) در منطقه فازی اولیه Fe_2Ti می باشد

همان طور که می‌دانید این فاز، یک ترکیب بین فلزی ترد می‌باشد و لذا محل تمرکز تنش است و اتصال را مستعد ترک انجمادی می‌نماید [20]. با توجه به نرخ سرمایش بالای فرآیند جوشکاری لیزرپالسی میتوان فرض نمود که تمام ساختار بصورت ترکیب فازی دقیقا زیر طرح مذاب دیاگرام سه تایی آهن-نیکل-تیتانیوم منجمد خواهد شد [20و 25]. در نهایت منطقه C ، دارای ترکیب مشخص شده در جدول (4) می‌باشد. قرار دادن این ترکیب در نمودار سه تایی آهن-نیکل-تیتانیوم نشان داد که این ترکیب در منطقه فازی اولیه γ می‌باشد. این فاز بسیار نرم تر از فاز Fe_2Ti می‌باشد. لذا ترک بوجود آمده

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]



شکل10- پروفیل میکروسختی ویکرز در طول منطقه جوش، HAZ و فلزات پایه.

در ناحیه ذوب نزدیک فصل مشترکNiTi ناشی از تشکیل ترکیبات بین فلزی ترد در این منطقه و تمرکز تنش است.

طبق آنالیزی که ونود و همکارانش [20] درخصوص مکانیزم شکست در اتصال غیرهمجنس این دو آلیاژ ارائه کردند، تغییرات شدید خواص مکانیکی در منطقه مجاور خط ذوب فلز پایه NiTi باعث محدودیت کرنش بوجود آمده درنتیجه تمرکز تنش و بوجود آمدن میکروترکها در این منطقه می‌شود. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان استنباط نمود برای جلوگیری از تشکیل ترکیبات بین فلزی Fe_2Ti باید منطقه جوش دارای ترکیب نیکل بالای 40 درصد و تیتانیوم کمتر از 45 درصد باشد [25].

برای بررسی بهتر ترکیبات فازی موجود در منطقه جوش از آنالیز Micro-XRD استفاده شد. به این منظور با استفاده از تکنیک اشاره شده در بخش 2-4 پرتو XRD در منطقه جوش متمرکز شد و این از منطقه آنالیز صورت گرفت. نتایج حاصل از پراش پرتو ایکس و ترکیبات مشخص شده در شکل(9) ارائه شده است. مطابق با الگوی پراش بدست آمده از منطقه جوش (شکل 9) مشاهده می‌گردد که این منطقه دارای ساختارهای پیچیده و ترکیبات متنوع می‌باشد. تشکیل ترکیبات بین فلزی تردFe_2Ti ، Cr_2Ti، Ti_2Niو$TiNi_3$ باعث تمرکز تنش و افت شدید خواص مکانیکی اتصال می‌گردد [20]. همراه با ترکیبات ذکر شده، فازهای مادرB2 ، γ-Fe و B19 نیز مشاهده شدند. شکل(10) پروفیل میکروسختی اتصالات در طول منطقه جوش، منطقه تحت تاثیر حرارت (HAZ) و فلزات پایه را نشان می‌دهد. همان‌طوری‌که در این شکل مشاهده می‌شود، توزیع سختی در منطقه جوش کاملا غیریکنواخت است. براساس نتایج بدست آمده از الگوی پراش پرتو ایکس، افزایش سختی در این منطقه ناشی از تشکیل ترکیبات بین فلزی ترد Fe_2Ti، Cr_2Ti، Ti_2Ni و $TiNi_3$ می‌باشد. بشترین مقدار سختی (تقریبا برابر با 800 ویکرز) در منطقه مجاور فصل مشترک ذوبNiTi مشاهده شد. این موضوع با شواهد ارائه شده در قسمت‌های قبل درخصوص تشکیل ترکیبات ترد Fe_2Ti و تمرکز تنش در منطقه ذوب نزدیک فصل مشترک NiTi کاملاً همراستا است.

مطابق پروفیل ارائه شده، میکروسختی سنجی در منطقهHAZ کاهش یافته است. این افت سختی در این منطقه ناشی از آنیل و یا رشد دانه است که در شکل(6) نشان داده شد.

همان طور که می‌دانید سیمها در مرحله تولید تحت عملیات کشش بوده است و دارای ساختار کارشده هستند. لذا اعمال حرارت باعث افت سختی منطقه HAZ خواهد شد. سختی فلز پایه برای NiTi تقریبا برابر 310 ویکرز و برای فولاد زنگ نزن برابر با 570 ویکرز می‌باشد. تحقیقاتی که وانود و همکارانش [20] درخصوص مدلسازی مکانیک شکست اتصالات آلیاژ NiTi به فولاد زنگ نزن انجام دادند، نشان داد که تغییرات

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

شدید سختی در منطقه فلز پایه و منطقه جوش NiTi باعث محدودیت کرنش درحین تغییرشکل و در نتیجه تمرکز تنش، شروع ترک و شکست می‌شود. لذا افت خواص مکانیکی (استحکام کششی و شکل پذیری) این اتصالات که توسط محققین دیگر گزارش شده است [12،20و 26] به دلیل تشکیل ترکیبات بین‌فلزی ترد با سختی بالا در منطقه جوش درحین اتصال غیرهمجنس این دو آلیاژ می‌باشد.

در سالهای اخیر چندین گزارش درخصوص بهبود خواص مکانیکی اتصال غیرهمجنس آلیاژهای NiTi و فولاد زنگ نزن با استفاده از ورق نیکل [6و26]، کبالت [13] گزارش شده است. برخلاف موفقیتهای بدست آمده، استفاده از ورق برای اتصال سیمهای ارتودنسی همراه با مشکلات متعددی است. ازجمله این مشکلات عبارتند از: با توجه به سطح مقطع بسیار کوچک سیمها و تهیه ورق در این ابعاد، قراردادن در محل دقیق جوش و حفظ آن در حین جوشکار، از لحاظ عملیاتی یک فرآیند بسیارمشکل می‌باشد.

از طرف دیگر زائده های اضافی باقی مانده ورق در سطح سیمها پس از جوشکاری باعث می‌شود که نیاز به عملیات تکمیلی و تمیزکاری باشد، این امر باعث افزایش هزینه عملیات می‌شود و در نهایت به دلیل ابعاد خیلی کوچک منطقه جوش و زمان بسیار پایین ذوب و انجماد در حین جوشکاری، اختلاط کامل و بدست آوردن ترکیب شیمیایی همگن ناممکن است. لذا نیاز به راه حلی عملیاتی تر و اقتصادی تر است. در این راستا یک راه حل می‌تواند استفاده از فلزات پرکننده بصورت پودر باشد. امروزه دستگاههای مجهز به پاشش پودر گسترش است و پودرهای مختلف برای پوشش‌دهی سطح و یا به‌عنوان فلز پرکننده جوش لیزر استفاده می‌شوند. استفاده از پودر مشکلات گفته شده درخصوص ورق را ندارد و به‌سادگی می‌توان این فرآیند را عملیاتی و در کلینیک‌های دندان پزشکی استفاده کرد .

4-نتیجه گیری

در این پژوهش اتصال غیرهمجنس سیمهای ارتودنسی آلیاژحافظه دار سوپرالاستیک NiTi به فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 304 با استفاده از فرآیند جوش لیزر تحت دمش گاز خنثی آرگون انجام شد. نتایج به دست آمده از این پژوهش را می توان بصورت زیر خلاصه کرد:

-بررسی‌ها نشان داد که به دلیل نرخ گرمایش و سرمایش بالای جوش لیزر پالسی، ریزساختار و ترکیب شیمیایی منطقه جوش اتصال غیرهمجنس این دو آلیاژ شدیداً ناهمگن است. ریزساختار منطقه جوش از سمت خط ذوب تا مرکز جوش از حالت صفحه ای به سلولی و سپس از سلولی به دندریتی تبدیل می‌شود.

-بررسی‌ها با تکنیک پراش ایکس نشان داد که ریزساختار منطقه جوش دارای ترکیبات بین فلزی Fe_2Ti ، Cr_2Ti، $TiNi_3$ و Ti_2Ni است. تشکیل این ترکیبات بین فلزی ترد باعث افزایش سختی منطقه جوش بصورت غیرهمگن می‌شود.

-منطقه جوش مجاور خط ذوب فلز پایه NiTi دارای بیشترین مقدار سختی (حدود 800 ویکرز) می باشد. تحلیل نتایج EDS با استفاده از دیاگرام سه تایی آهن-نیکل-تیتانیوم نشان داد که این منطقه عمدتاً از ترکیبات بین فلزی ترد Fe_2Ti تشکیل شده است، لذا محل تمرکز تنش و مستعد ترک خواهد بود. برای جلوگیری از تشکیل ترکیبات بین فلزی Fe_2Ti، باید منطقه جوش دارای ترکیب نیکل بالای 40 درصد و تیتانیوم کمتر از 45 درصد باشد.

-برای بهبود خواص مکانیکی اتصال غیر همجنس این دو آلیاژ نیاز به یک فرآیند اصلاحی عملیاتی و مقرون به صرفه می‌باشد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از دانشگاههای صنعتی سهند و ناکاساکی ژاپن و همچنین موسسه تحقیق و توسعه دانشمند برای حمایت مالی و فراهم آوردن تجهیزات پژوهش کمال تشکر و سپاسگزاری را دارند.

منابع

[1] Hall PC. Method of welding titanium and titanium based alloys to ferrous metals. Google Patents; 2005.
[2] Otsuka K. Wayman Shape Memory Materials. Cambridge University Press; 1998.
[3] Predki W, Knopik A, Bauer B. Engineering applications of NiTi shape memory alloys. Materials

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

Sadrnezhaad S. Effect of post weld heat treatment on mechanical and corrosion behaviors of NiTi and stainless steel laser-welded wires. Journal of Materials Engineering and Performance. 2016;25:2395-402.
[16] Falvo A, Furgiuele F, Maletta C. Laser welding of a NiTi alloy: Mechanical and shape memory behaviour. Materials Science and Engineering: A. 2005;412:235-40.
[17] Chan C, Man H, Yue T. Effects of process parameters upon the shape memory and pseudo-elastic behaviors of laser-welded NiTi thin foil. Metallurgical and Materials Transactions A. 2011;42:2264-70.
[18] Stoeckel D, Yu W. Superelastic Ni--Ti Wire. Wire journal international. 1991;24:45-50.
[19] Oliveira J, Miranda R, Fernandes FB. Welding and joining of NiTi shape memory alloys: Areview. Progress in Materials Science. 2017;88:412-66.
[20] Vannod J, Bornert M, Bidaux J-E, Bataillard L, Karimi A, Drezet J-M, et al. Mechanical and microstructural integrity of nickel–titanium and stainless steel laser joined wires. Acta Materialia. 2011;59:6538-46.
[21] Osakabe T. Principles and applications of multilayer mirror optics for X-ray diffraction measurements—CBO series for SmartLab.
[22] Kou S. Welding metallurgy. New Jersey, USA. 2003:431-46.
[23] Chatterjee S, Abinandanan T, Chattopadhyay K. Phase formation in Ti/Ni dissimilar welds. Materials Science and Engineering: A. 2008;490:7-15.
[24] Wang G. Welding of Nitinol to stainless steel. Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Super Elastic Technologies1997. p. 131-6.
[25] Pouquet J, Miranda R, Quintino L, Williams S. Dissimilar laser welding of NiTi to stainless steel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2012;61:205-12.
[26] Li H, Sun D, Cai X, Dong P, Wang W. Laser welding of TiNi shape memory alloy and stainless steel using Ni interlayer. Materials & Design. 2012;39:285-93.
[27] Cacciamani G, De Keyzer J, Ferro R, Klotz UE, Lacaze J, Wollants P. Critical evaluation of the Fe–Ni, Fe–Ti and Fe–Ni–Ti alloy systems. Intermetallics. 2006;14:1312-25.
Science and Engineering: A. 2008;481:598-601.
[4] Otsuka K, Ren X. Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys. Progress in materials science. 2005;50:511-678.
[5] Jani JM, Leary M, Subic A, Gibson MA. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. Materials & Design (1980-2015). 2014;56:1078-113.
[6] Fukumoto S, Inoue T, Mizuno S, Okita K, Tomita T, Yamamoto A. Friction welding of TiNi alloy to stainless steel using Ni interlayer. Science and Technology of Welding and Joining. 2010;15:124-30.
[7] Shinoda T. Functional Characteristics of Friction Welded Near-equiatomic TiNi Alloy. Transactions of the Japan Welding Society. 1991;22:30-6.
[8] Ikai A, Kimura K, Tobushi H. TIG welding and shapememory effect of TiNi shape memory alloy. Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 1996;7:646-55.
[9] van der Eijk C, Fostervoll H, Sallom ZK, Akselsen OM. Plasma welding of NiTi to NiTi, stainless steel and hastelloy C276. of the ASM Materials Solutions Conference2003. p. 125-9.
[10] Ng C, Mok ES, Man H. Effect of Ta interlayer on laser welding of NiTi to AISI 316L stainless steel. Journal of materials processing technology. 2015;226:69-77.
[11] Matsunaga J, Watanabe I, Nakao N, WatanabeE, Elshahawy W, Yoshida N. Joining characteristics of titanium-based orthodontic wires connected by laser and electrical welding methods. Journal of Materials Science: Materials in Medicine. 2015;26:50.
[12] Mirshekari G, Saatchi A, Kermanpur A, Sadrnezhaad S. Laser welding of NiTi shape memory alloy: Comparison of the similar and dissimilar joints to AISI 304 stainless steel. Optics & Laser Technology. 2013;54:151-8.
[13] Li H, Sun D, Cai X, Dong P, Gu X. Laser welding of TiNi shape memory alloy and stainless steel using Co filler metal. Optics & Laser Technology. 2013; 45:453-60.
[14] Oliveira J, Fernandes FB, Schell N, Miranda R. Shape memory effect of laser welded NiTi plates. Functional materials letters. 2015;8:1550069.
[15] Mirshekari G, Saatchi A, Kermanpur A,

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]