



Study on microstructure and mechanical properties of laser welded joints of 1.7225 steel



H. Gorji, S. M. Barakat^{ID}, S.R. Shoja Razavi^{ID}, S.S. Babaie Sangetabi, M. Erfanmanesh^{ID}

Faculty of Materials & Manufacturing technology, Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

Received 18 April 2022 ; Accepted 21 June 2022

Abstract

The aim of the present study is to investigate the mechanical and microstructural properties of 1.7225 steel in laser welding process using Nd:YAG pulsed laser device and then to determine the optimal focal length relative to the part in the welding area. After welding, microstructural characterization, microhardness and tensile tests were performed. Evaluations showed that the optimal focal length for welding of steel sheet 1.7225 with a thickness of 1 mm, it was about 9 mm and the focus was 1 mm below the surface of the part. Due to the high thermal concentration and cooling rate in laser welding, a completely martensitic microstructure has been observed in the molten and heat-affected regions of all specimens. In this alloy, the hardness of the base metal is 310 ± 10 HV. After welding, the hardness of the sample with the optimal focal length has reached 625 ± 10 HV in the heat affected zone and 730 ± 10 HV in the melting zone. Also, the results of tensile test showed that the tensile properties of the sample with the optimal focal length were almost similar to the base steel and fracture was observed in the base steel region.

Keywords: Laser Welding, 1.7225 steel, Focal Length, Microstructure, Hardness..

✉ Corresponding Author: m.barekat@mut-es.ac.ir



مطالعه روی ریزساختار و خواص مکانیکی ناحیه جوش لیزری فولاد 1/7225

حمیدرضا گرجی، سیدمسعود برکت^{ID}، سیدرضا شجاع رضوی^{ID}، سیدسجاد بابایی سنگتابی، محمد عرفان منش^{ID}

مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

دریافت مقاله: 1401/01/29؛ پذیرش مقاله: 1401/03/31

چکیده

هدف از پژوهش حاضر، بررسی خواص مکانیکی و ریزساختاری فولاد 1/7225 در فرایند جوشکاری لیزری با استفاده از دستگاه لیزر پالسی Nd:YAG و سپس تعیین فاصله کانونی بهینه نسبت به قطعه، در ناحیه جوش است. پس از جوشکاری، مشخصه‌یابی ریزساختاری، ریزسختی‌سنجی و آزمون کشش انجام شد. ارزیابی‌های انجام گرفته نشان داد، فاصله کانونی بهینه برای جوشکاری ورق فولاد 1/7225 با ضخامت یک میلی‌متر، حدود 9 میلی‌متر بوده به طوری که کانون در یک میلی‌متر زیر سطح قطعه قرار دارد. با توجه به تمرکز حرارتی و نرخ سرمایش بالا در جوشکاری لیزری، ریزساختار مارتنزیتی، در نواحی ذوبی و متأثر از حرارت نمونه‌ها مشاهده شد. در این آلیاژ، میزان سختی فلز پایه 10 ± 310 HV بود که پس از جوشکاری سختی نمونه با فاصله کانونی بهینه در ناحیه متأثر از حرارت به 10 ± 625 HV و در ناحیه ذوبی به 5 ± 730 HV رسیده است. همچنین، نتایج آزمون کشش نشان داد که خواص کششی نمونه با فاصله کانونی بهینه، تقریباً مشابه با فولاد پایه بوده و شکست در ناحیه فولاد پایه مشاهده شده است.

کلمات کلیدی: اتصال جوشکاری لیزری، فولاد 1/7225، فاصله کانونی، ریزساختار، سختی.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: m.barekat@mut-es.ac.ir

1- مقدمه

آلیاژی مختلف اضافه شده دارای خواص متفاوتی هستند. از این رو بررسی خواص این فولادها پس از انجام عملیات‌های مختلف همانند جوشکاری، به دلیل اطمینان از عدم افت خواص مکانیکی از اهمیت بالایی برخوردار است [2]. از میان تمامی فرایندهای جوشکاری، جوشکاری لیزری مزایای متعددی از جمله کاهش یا حذف اصلاحات بعد از جوشکاری، ایجاد جوش باریک با کیفیت بالا، اتصال قطعاتی با جنس و

فولاد 1,7225 جزو فولادهای مخصوص آلیاژی در دسته بندی استاندارد DIN محسوب می‌شوند. در برخی از مراجع [1]، این فولاد را بدلیل نزدیکی بودن محدوده ترکیب شیمیایی آن به فولادهای HSLA، جزو فولادهای HSLA دسته‌بندی می‌کنند. از طرفی دیگر، فولادهای HSLA در هفت گروه دسته‌بندی شده‌اند، که هر کدام از این گروه‌ها با توجه به عناصر

محافظة، محل قرارگیری فاصله کانونی و قطر پرتو به عنوان پارامترهای ثابت و توان، سرعت جوشکاری، فاصله کانونی و ضخامت نمونه به عنوان پارامترهای متغیر در نظر گرفته شده است. از طرفی دیگر، مطالعاتی در مورد تاثیر تغییر محل قرارگیری فاصله کانونی لیزر بر خواص ناحیه جوش فولاد HSLA در فرایند جوشکاری لیزری انجام نگرفته است. بررسی مطالعات انجام شده حاکی از آن است که، در داخل و خارج از کشور تحقیقی در رابطه با ارزیابی خواص جوش لیزر Nd:YAG فولاد 1/7225 انجام نگرفته است. با توجه به خواص مهم فولادهای HSLA، از جمله استحکام خستگی و مقاومت به سایش مناسب، استحکام و انعطاف پذیری بالا، کاربرد فراوانی در تولید مته‌های حفاری، قالب‌های مورد استفاده در صنایع، قطعات و ادوات نظامی دارد. از این رو بررسی خواص جوش این فولاد از اهمیت بالایی برخوردار است. این فولاد با توجه به نوع عملیات حرارتی می‌تواند دارای ریزساختارهای مختلفی از جمله مارتزیت، فریت، پرلیت، بینیت و یا تلفیقی از آنها باشد که هر کدام از این ریزساختارها دارای خواص ویژه خود هستند. با توجه به سختی پذیری این فولاد در صورت افزایش سرعت سرد شدن، امکان ایجاد ریزساختار کاملاً مارتزیتی در این فولاد وجود دارد [10]. با توجه به مطالعات انجام شده در رابطه با جوشکاری لیزری فولادهای HSLA پارامترهای متغیر در این تحقیقات غالباً توان، سرعت جوشکاری و قطر پرتو بوده و پارامترهای ثابت نیز نرخ گاز محافظ و فاصله کانونی بوده است. هدف از این پژوهش بررسی خواص مکانیکی و ریزساختاری فولاد 1/7225 در فرایند جوشکاری لیزری با استفاده از دستگاه لیزر پالسی Nd:YAG و سپس تعیین پارامترهای بهینه به منظور جوشکاری لیزری این فولاد و همچنین تعیین محل قرارگیری فاصله کانونی نسبت به قطعه، جهت حصول خواص مناسب در ناحیه جوش لیزری است.

2- روش تحقیق

2-1- مواد اولیه

در این تحقیق از فولاد 1/7225 با ترکیب شیمیایی مشخص شده در جدول (1) که توسط دستگاه طیف نگاری نشر جرقه‌ای

ضخامت‌های مختلف، محدود کردن ناحیه متأثر از حرارت و تنش‌های حرارتی کم، سرعت جوشکاری بالا و اثرات ناچیز پاشش مذاب و امکان جوشکاری اتوماتیک را نسبت به سایر روش‌های جوشکاری دارد [3]. با توجه به بررسی‌های انجام شده در مورد خواص ناحیه جوش فرایندهای مختلف جوشکاری، دستگاه لیزر فیبری و Nd:YAG منجر به ایجاد خواص جوش بسیار بهتری نسبت به سایر دستگاه‌های لیزر خواهند شد [4]. از این رو تحقیقات زیادی در رابطه با بررسی ریزساختاری و خواص مکانیکی این فولادها در عملیات جوشکاری انجام گرفته است. در اکثر تحقیقات انجام گرفته در زمینه جوشکاری لیزری میزان سختی و استحکام ناحیه جوش به دلیل سرعت سرد شدن بالا در روش جوشکاری لیزری افزایش یافته است. افزایش سرعت سرد شدن باعث ایجاد تنش‌های پسماند در قطعه شده است. سرعت سرد شدن در لیزر CO₂ کمتر از لیزر Nd:YAG است [5,6]. در ناحیه متأثر از حرارت در صورتی که ریزساختار فلز پایه مارتزیت باشد، به دلیل تمپر شدن مارتزیت، نرمی ناحیه متأثر از حرارت رخ داده و سختی کاهش خواهد یافت. ولی در صورتی که ریزساختار فلز پایه غیر از مارتزیت باشد، به دلیل تشکیل مارتزیت در ناحیه متأثر از حرارت میزان سختی در این ناحیه افزایش خواهد داشت و میزان نرمی ناحیه متأثر از حرارت به حجم مارتزیت فلز پایه و حرارت ورودی وابسته است [7]. همچنین، افزایش سرعت جوشکاری موجب افزایش نرخ سرد شدن و در نتیجه ریزتر شدن دانه‌ها، کاهش ضخامت ناحیه متأثر از حرارت و کاهش انعطاف پذیری می‌شود. سرعت جوشکاری و استحکام کششی با هم رابطه عکس و توان با استحکام کششی رابطه مستقیم دارند. در جوشکاری لیزری پالسی به دلیل روشن و خاموش شدن دستگاه جهت تولید پالس، میزان گرادیان دما افزایش و نرخ رشد دانه کاهش می‌یابد [8]. تحقیقات نشان داد که دستگاه جوش لیزری فیبری و Nd:YAG با توجه به تمرکز حرارتی بیشتر، باعث ایجاد ریزساختار مناسب‌تر و در نتیجه حصول جوش با کیفیت‌تر نسبت به سایر دستگاه‌های جوشکاری لیزری خواهند شد [9]. در مطالعات قبلی انجام گرفته روی جوشکاری لیزری فولادها پارامترهایی نظیر نرخ سیلان گاز

جدول 1- نتایج آنالیز طیف نگاری نشر جرقه‌ای (درصد وزنی).

C	P	S	Si	Mn	Cr	Mo	Fe
۰/۴۳۲	۰/۰۲۲	۰/۰۳۴	۰/۲۷۵	۰/۸۵۰	۰/۹۳۰	۰/۱۸۶	مابقی

جدول 2- پارامترهای مورد استفاده در جوشکاری لیزری ورق‌های فولاد 1/7225.

محل قرارگیری فاصله کانونی	سرعت جوشکاری (mm/min)	کد نمونه‌ها
روی سطح بالایی	۱۲۰	LW10
۱ mm بالاتر از سطح	۱۲۰	LW11
۱ mm زیر سطح	۱۲۰	LW12

جدول 3- نتایج آزمون کشش نمونه‌های پایه و جوشکاری شده.

نمونه	استحکام کششی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	ازدیاد طول (%)
فلز پایه	۷۱۰	۴۹۰	۱۳
LW10	۶۴۰	۴۱۰	۹
LW11	۴۶۰	۲۸۰	۵
LW12	۶۸۰	۴۶۰	۱۲

2-3- بررسی‌های ریزساختاری

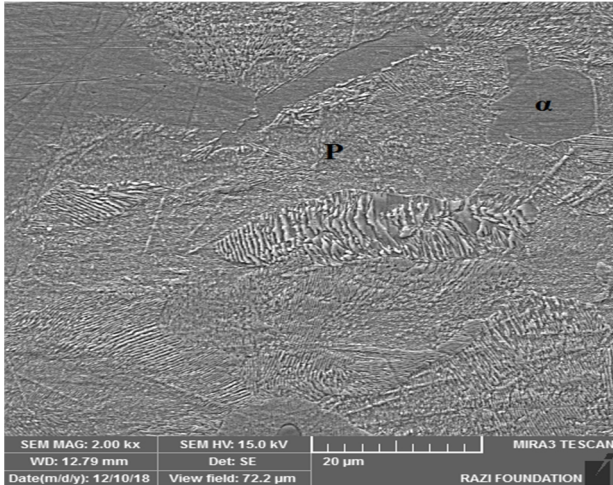
برای بررسی مقاطع عرضی نمونه‌های جوشکاری شده ابتدا نمونه‌ها توسط وایرکات، برش داده شده و سپس نمونه‌ها مانع سرد شدند. سطح مقطع نمونه‌ها سنباده‌زنی و سپس با محلول آلومینا و آب پولیش شدند. از محلول نیتال 2% برای اچ کردن نمونه‌های جوشکاری شده، استفاده شد. ریزساختار نمونه‌ها با میکروسکپ نوری مدل OLYMPUS-PME3 و میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی بنیاد علوم کاربردی رازی مدل TESCAN ونحوه توزیع عناصر در ناحیه جوش توسط طیف‌سنج اشعه ایکس مورد بررسی قرار گرفت. همچنین به منظور بررسی سطوح شکست نمونه‌ها در آزمون کشش از میکروسکپ الکترونی روبشی گسیل میدانی مدل FEI-Quanta مجهز به دستگاه آنالیز طیف‌سنج اشعه ایکس مدل EDS Silicon Drift 2017 واقع در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی اصفهان استفاده شد. به منظور تعیین فازهای موجود در فولاد پایه، از دستگاه پراش پرتو ایکس مدل AW-XDM300 ساخت شرکت مبین پرتو مستقر در شهرک

بدست آمده، استفاده شد. جهت تهیه ورق‌هایی به ضخامت 1 میلی‌متر در ابعاد 100×100 میلی‌متر، قطعه‌ای به ابعاد 400×100×100 میلی‌متر با استفاده از دستگاه وایرکات، برش داده شد. پس از برشکاری به منظور چربی‌زدایی و حذف آلودگی‌ها از سطح نمونه‌ها، نمونه‌ها توسط استون و برس نرم شستشو داده شد.

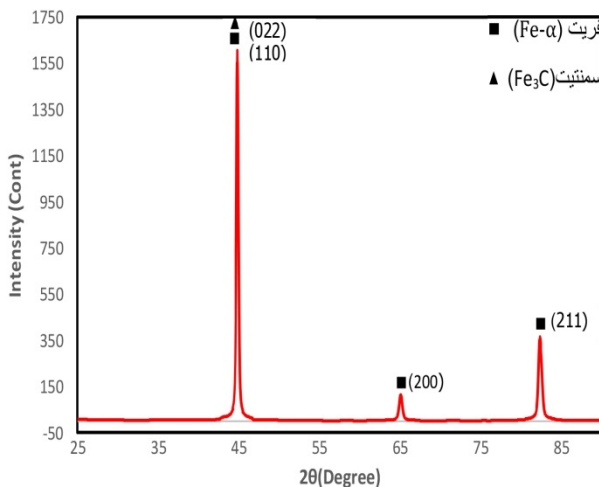
2-2- عملیات جوشکاری

جهت جوشکاری لیزری ورق‌های فولاد 1/7225، از دستگاه جوشکاری لیزری ND:YAG پالسی مدل IQL20 مستقر در دانشگاه صنعتی مالک اشتر با توان خروجی 400 وات، فاصله کانونی 9 میلی‌متر نرخ گاز محافظ 20 لیتر بر دقیقه و قطر پرتو 0/9 میلی‌متر استفاده شده است. بدین منظور ابتدا ورق‌های فولادی در فیکسچر بصورت لب به لب قرار گرفته و محکم شدند. نمونه‌ها تحت سرعت جوشکاری ثابت 120 میلی‌متر بر دقیقه و محل قرارگیری فاصله کانونی متغییر در جدول (2) به صورت تک پاس جوشکاری لیزری شدند.

پرتو ایکس انجام گرفت.



شکل 1- تصویر میکروسکوپی الکترونی روشی از ریزساختار فولاد پایه 1/7225.



شکل 2- الگوی پراش پرتو ایکس فولاد پایه 1/7225.

مطابق شکل (2) که الگوی پراش پرتو ایکس از فولاد پایه را نشان می‌دهد، فقط پیک‌های مربوط به فازهای فریت و سمنتیت مشاهده می‌شود. حضور پیک‌های سمنتیت و فریت حاکی از آن است که یکی از فازهای تشکیل شده در فولاد پایه، فاز پرلیت بوده است. با توجه به تعداد بیشتر پیک‌های فریت در الگوی پراش پرتو ایکس نسبت به پیک سمنتیت و ریزساختار قابل مشاهده در شکل (1)، با قطعیت می‌توان بیان کرد که ریزساختار غالب فولاد 1/7225 در حالت آنیل شده، فریتی- پرلیتی است. از طرفی دیگر، در آنالیز پراش پرتو ایکس فازهای زیر 5 درصد قابل شناسایی نیستند، که احتمال حضور جزیی فازهای دیگری

علوم تحقیقاتی اصفهان استفاده شده است. برای این آزمایش، از آند مسی با $\lambda=1/54 \alpha$ استفاده شده، که در آن برای شناسایی فازهای فریت (Fe- α) و سمنتیت (Fe_3C) به ترتیب از کارت‌های مرجع ICOD با کدهای: 0722-087-01 و 1113-023-00 در نرم افزار Xpert Highscore Plus بهره برده شده است.

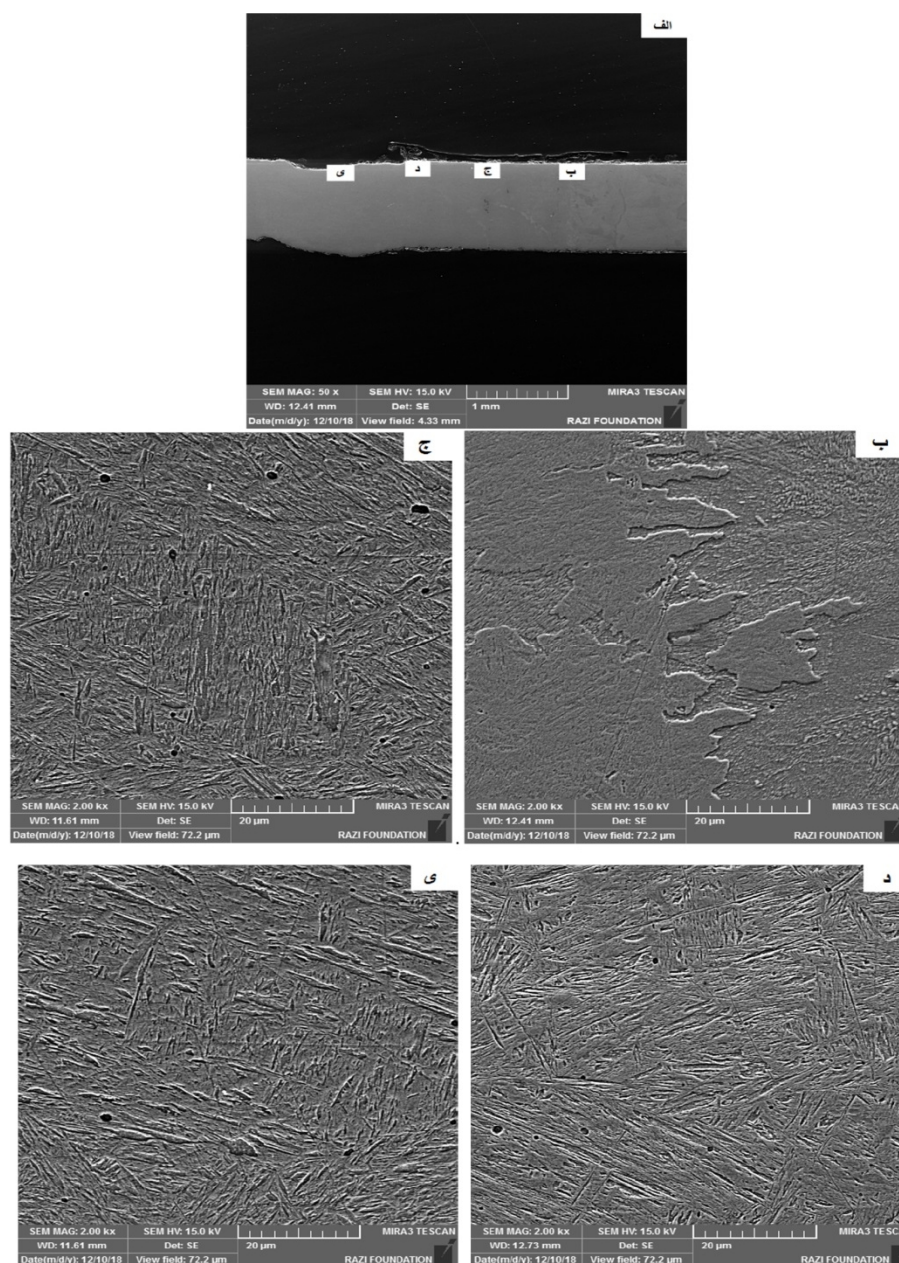
4-2- ارزیابی خواص مکانیکی

آزمون ریزسختی سنجی با استفاده از دستگاه Zwick با بار اعمالی 100 گرم و زمان 15 ثانیه به صورت پروفیل در عرض ناحیه جوش در 19 نقطه انجام گرفت. فاصله بین هر دو نقطه 200 میکرومتر تنظیم شد. به منظور اطمینان از نتایج آزمون، سه پروفیل سختی با فاصله مشخص از لبه نمونه‌ها انجام گرفته شد. در ابتدا نمونه‌های منتخب توسط وایرکات مطابق با استاندارد ASTM E8 به نحوی که خط جوش در وسط نمونه کشش قرار گیرد، بریده شدند. آزمون کشش در دمای محیط توسط دستگاه کشش مدل HOUNSFEEILD H50KS انجام شد. این آزمون در دمای محیط و با سرعت حرکت فک 1 میلی‌متر بر دقیقه انجام شده است.

3- نتایج و بحث

3-1- ریزساختار فلز پایه

ریزساختار فلز پایه در شکل (1) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ریزساختار فولاد 1/7225 شامل فازهای فریت (α) و پرلیت (P) است. این فولاد با توجه به عملیات حرارتی متفاوت، می‌تواند ریزساختار فریت و پرلیت، مارتنزیت و بینیت یا تلفیقی از این فازها را داشته باشد. حضور ریزساختار تعادلی فریت و پرلیت در فولاد 1/7225 نشان از انجام عملیات آنیل و نرخ سرمایش آهسته دارد [11]. معمولاً از فولاد آنیل شده با ریزساختار فریت و پرلیت به‌منظور جلوگیری از ایجاد منطقه افت سختی و کاهش خواص جوش استفاده می‌شود. به‌منظور مشخصه‌یابی فولاد 1/7225 و اطمینان از عدم حضور ریزساختارهای دیگری به غیر از فریت و پرلیت، آنالیز پراش



شکل 3- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نواحی مختلف نمونه LW10

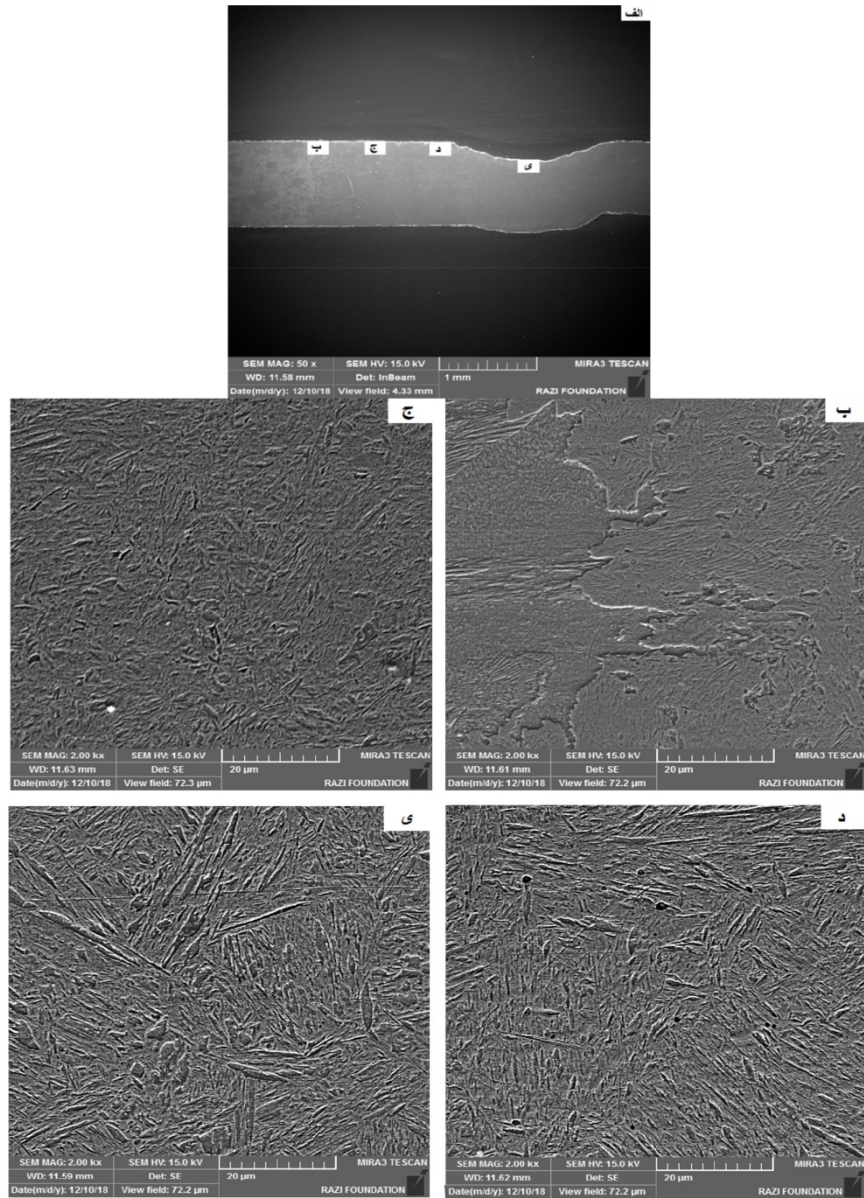
الف- ناحیه جوش، ب- فصل مشترک ناحیه جوش و فلز پایه، ج و د- ناحیه متأثر از حرارت، ی- ناحیه ذوبی.

ناحیه جوش مطابق شکل (3-ب)، ریزساختار از فریت-پرلیت به مارتنزیت به صورت پیوسته تغییر می کند و اثری از ریزترک ناشی از خواص متفاوت ریزساختارهای فریت-پرلیت و مارتنزیت در این ناحیه مشاهده نمی شود. همچنین، در ناحیه متأثر از حرارت دو منطقه با ریزساختار کاملاً مارتنزیتی تشکیل شده است. در منطقه نزدیک به ناحیه ذوبی، تیغه های ظریف مارتنزیت تشکیل می شود (شکل 3-د)، این در حالی

نیز در ریزساختار وجود دارد. اما با بررسی تصاویر میکروسکپ الکترونی روبشی فاز جدیدی مشاهده نشده است.

2-3- ارزیابی ریزساختار ناحیه جوش

شکل (3) تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی در نواحی مختلف جوش لیزری نمونه LW10 را نشان می دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می شود، در فصل مشترک فولاد پایه و



شکل 4- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نواحی مختلف نمونه LW11

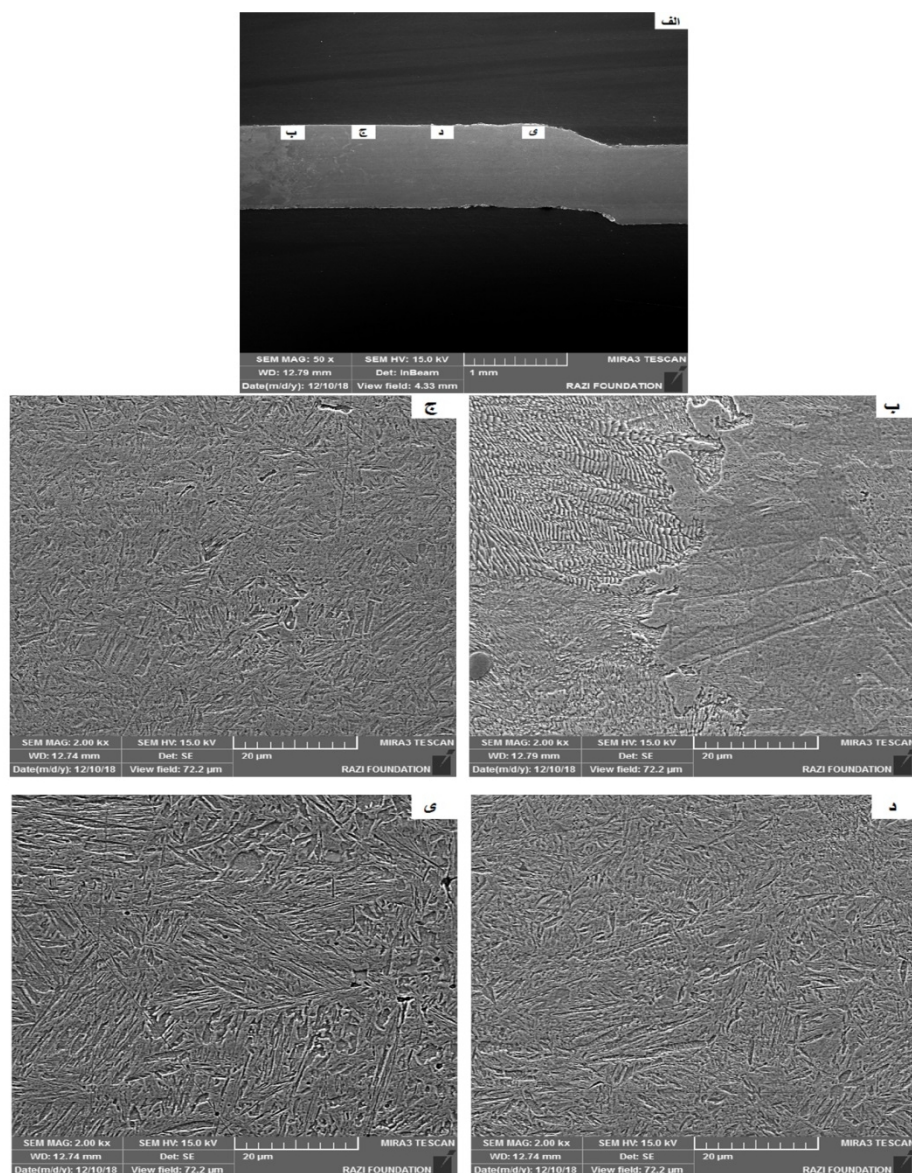
الف- ناحیه جوش، ب- فصل مشترک ناحیه جوش و فلز پایه، ج و د- ناحیه متأثر از حرارت، ی- ناحیه ذوبی.

تمامی نواحی اعم از ناحیه متأثر از حرارت و ناحیه ذوبی ریزساختار مارتنزیتی با جهت گیری متفاوت تیغه ها دیده می شود.

در فصل مشترک ناحیه جوش و فولادپایه ریزساختار فریت و پرلیت به طور آهسته به مارتنزیت استحاله می یابند، بطوری که ریزترک حاصل از تغییر فاز در این ناحیه دیده نمی شود. همچنین، در ناحیه متأثر از حرارت نمونه LW11، دو منطقه با ریزساختار مارتنزیتی دارای تیغه های ظریف مشاهده می گردد. بطوری که، در منطقه نزدیک به ناحیه ذوبی (شکل 4-د)، طول و ضخامت تیغه های مارتنزیت به میزان کمی نسبت به منطقه دیگر

است که در منطقه دوم که فاصله بیشتری از ناحیه ذوبی دارد، تیغه های ظریف مارتنزیت امکان رشد پیدا کرده (افزایش ضخامت و طول تیغه ها) و دسته تیغه های بسیار خشن مارتنزیتی را در این منطقه تشکیل می دهد (شکل 3-ج). میزان رشد تیغه های مارتنزیتی به میزان تمرکز حرارتی که تعیین کننده سرعت سرد شدن است، بستگی دارد [12].

در ناحیه ذوبی (شکل 4-ی) نیز ریزساختار مارتنزیتی با تیغه های ظریف قابل رویت است. شکل (4) تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی در نواحی مختلف جوش لیزری نمونه LW11 را نشان می دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می شود، در



شکل 5- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نواحی مختلف نمونه LW12

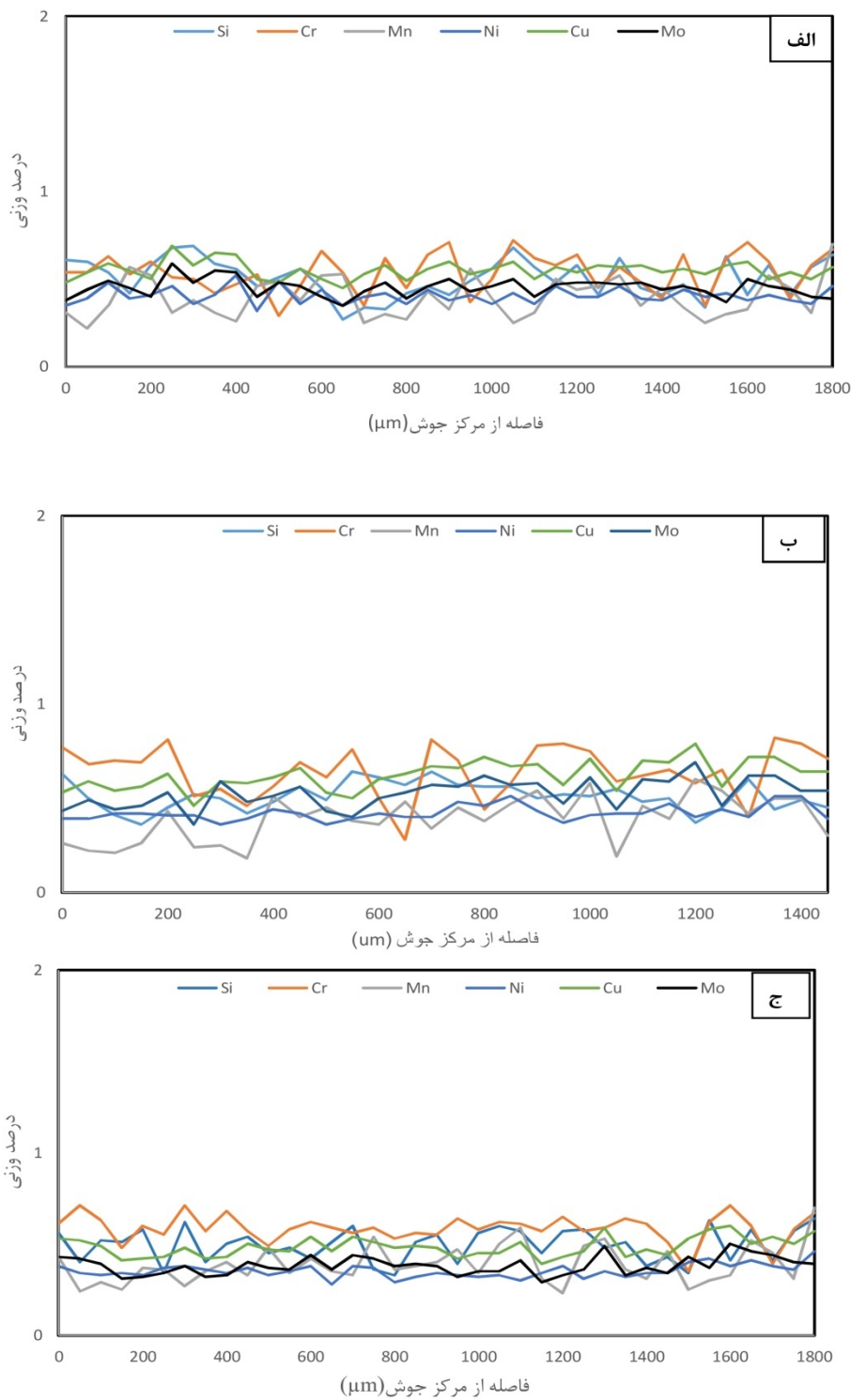
الف- ناحیه جوش، ب- فصل مشترک ناحیه جوش و فلز پایه، ج و د- ناحیه متأثر از حرارت، ی- ناحیه ذوبی.

وجود تغییر ناگهانی ریزساختار در این ناحیه باعث امکان ایجاد ترک به دلیل خواص متفاوت ساختارها می‌شود [12]. ناحیه متأثر از حرارت از دو منطقه تشکیل شده و در هر دو منطقه ریزساختار مارتنزیتی با تیغه‌های ظریف مشاهده می‌گردد.

با توجه به تصاویر شکل (6-پ، 6-ت)، تیغه‌های مارتنزیت دو منطقه تقریباً از لحاظ طول و ضخامت شبیه به هم می‌باشند. در ناحیه ذوبی طول تیغه‌های مارتنزیت نسبت به ناحیه متأثر از حرارت، افزایش یافته است. تیغه‌های مشاهده شده در تمامی نواحی از ضخامت کمی برخوردار هستند.

(شکل 4-ج) افزایش یافته است. در ناحیه ذوبی نیز (شکل 4-ی) ریزساختار مارتنزیتی با دسته تیغه‌های بسیار خشن (دارای طول و ضخامت بیش‌تر نسبت به سایر نواحی) دیده می‌شود.

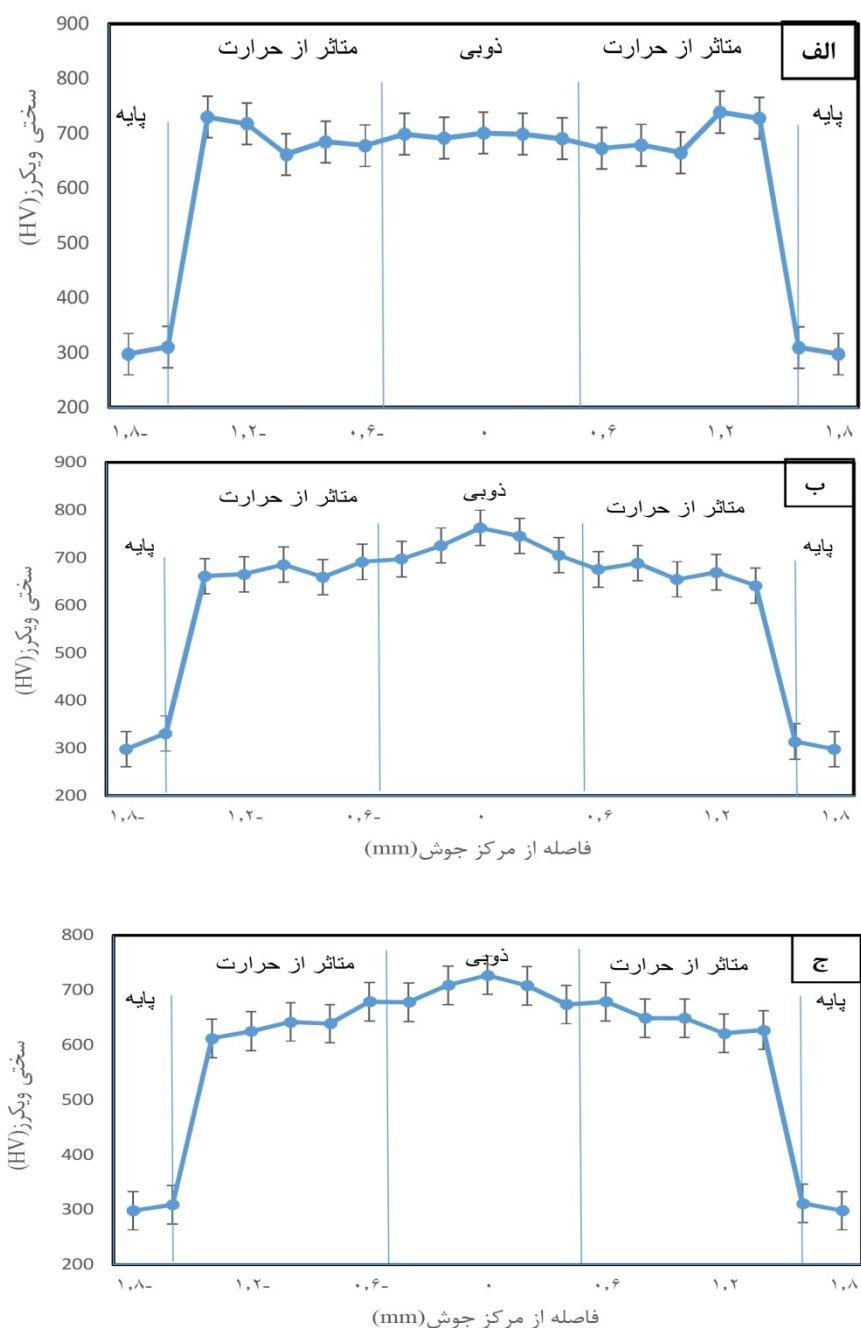
با بررسی شکل (5) مشخص شد، در ناحیه جوش نمونه LW12 ریزساختار فقط شامل فاز مارتنزیتی است. بطوری‌که، در فصل مشترک فولاد پایه و ناحیه جوش ریزساختار به صورت پیوسته به مارتنزیت تبدیل شده و تغییر ناگهانی ساختار در این ناحیه دیده نمی‌شود.



شکل 6- نتایج آنالیز EDS الف - نمونه LW10 ب - نمونه LW11 ج - نمونه LW12.

امکان ایجاد تخلخل در ناحیه جوش خواهد شد [14]. با مقایسه ناحیه متأثر از حرارت نمونه‌های LW11 و LW10 مشاهده می‌شود که نمونه LW10 تمرکز حرارتی بیشتر و سرعت سرد شدن بیشتر نسبت به نمونه LW11 دارد.

با قرارگیری کانون بر روی سطح نمونه در مقایسه با قرارگیری آن در فاصله دورتر از سطح، میزان تمرکز حرارتی و دنبال آن سرعت سرد شدن افزایش پیدا خواهد کرد. با این وجود قرارگیری کانونی بر روی سطح نمونه باعث ایجاد ناپایداری و



شکل 7- پروفیل سختی در عرض ناحیه جوش الف- نمونه LW10، ب- نمونه LW11، ج- نمونه LW12.

کاهش سرعت سرد شدن باعث انتقال حرارت بیشتر به سایر نواحی و امکان رشد تیغه‌های مارتنزیت می‌گردد. در حالت قرارگیری نقطه کانونی در سطح پایینی قطعه (1 میلی‌متر زیر سطح)، بیشترین نفوذ و تمرکز حرارتی رخ داده است. قرارگیری کانون در 1 میلی‌متر زیر سطح باعث بالاترین تمرکز حرارتی می‌شود [14].

حضور تیغه‌های خشن مارتنزیت در ناحیه ذوبی و تیغه‌های ظریف در ناحیه متأثر از حرارت به دلیل عدم تمرکز حرارتی رخ می‌دهد [15]، که این امر در ریزساختار نمونه LW11 مشاهده می‌شود. همچنین، قرارگیری کانون در 1 میلی‌متر بالای سطح منجر به کاهش تمرکز حرارتی و در نتیجه کاهش سرعت سرد شدن نسبت به نمونه LW10 شده است.

LW11 و LW12 را نشان می‌دهد. برای نمونه LW10 (شکل 7-الف)، سختی فلز پایه در حدود 310 ± 10 HV می‌باشد. در ناحیه متأثر از حرارت این نمونه سختی تا 730 ± 10 HV افزایش و سپس عدد سختی به صورت ناگهانی به 665 ± 10 HV کاهش می‌یابد. سپس روند سختی به صورت یکنواخت تغییر یافته و عدد سختی در ناحیه ذوبی به 5 ± 720 HV می‌رسد. مطابق نتایج ارائه شده در شکل (7-ب) از آزمون ریزسختی سنجی در سطح مقطع نمونه LW11 سختی فولاد پایه 310 ± 10 HV بوده و این عدد در ناحیه متأثر از حرارت به 5 ± 680 HV می‌رسد و حدوداً یکنواخت به صورت صعودی تغییر پیدا کرده و در ناحیه ذوبی عدد سختی به صورت ناگهانی و با شیب تند به 5 ± 760 HV تغییر می‌یابد. بررسی نتایج ریزسختی سنجی در سطح مقطع نمونه LW12 در شکل (7-ج) حاکی از آن است که سختی در فولاد پایه 310 ± 10 HV می‌باشد. با ورود به ناحیه متأثر از حرارت عدد سختی به 10 ± 625 HV می‌رسد و روند افزایش سختی به صورت یکنواخت و بدون تغییرات ناگهانی طی شده، عدد سختی در ناحیه ذوبی 5 ± 730 HV می‌باشد. بررسی پژوهش‌ها حاکی از آن است که سختی فولاد $1/7225$ در صورت حضور ریزساختار فریت پرلیت 8 ± 316 HV خواهد بود [19] و سختی بدست آمده برای فولاد پایه حاضر نیز در این محدوده قرار می‌گیرد. با توجه به تمرکز حرارتی بالا در فرایند جوشکاری لیزری و سرعت سرد شدن بالا، در ناحیه جوش ریزساختار مارتنزیتی به وجود آمده که باعث مشاهده سختی بالا در ناحیه جوش تمامی نمونه‌ها نسبت به فولاد پایه شده است [15، 18، 20]، این امر در پروفیل سختی تمامی نمونه‌های جوشکاری لیزری شده مشاهده می‌شود. میزان تمرکز حرارتی و سرعت سرد شدن در صورت قرارگیری کانون پرتو لیزر روی سطح نمونه در مقایسه با قرارگیری آن در 1 میلی‌متر زیر سطح (نمونه LW12) افزایش و در مقایسه با نمونه LW11 کاهش می‌یابد. تمرکز پرتو لیزر در روی سطح منجر به ایجاد حفره کلید ناپایدار خواهد شد.

حرارت متمرکز وارده به قطعه باعث افزایش سرعت سرد شدن و جلوگیری از انتقال حرارت به سایر نقاط قطعه کار شده، از تشکیل فازهای مضر نظیر تیغه‌های خشن مارتنزیت جلوگیری می‌کند. با حرکت از سمت فلز پایه به سمت ناحیه ذوبی ریزساختار کاملاً مارتنزیتی تشکیل شده، که با نزدیک شدن به ناحیه ذوبی تیغه‌های مارتنزیت از ریز به درشت تغییر پیدا می‌کند. به دلیل تمرکز حرارتی بالا عرض مناطق مختلف ناحیه جوش نسبت به سایر نمونه‌های جوشکاری لیزری شده، کاهش یافته است. با توجه به تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ریزساختار نمونه‌ها، مشاهده می‌شود، که در ناحیه جوش تمامی نمونه‌های جوشکاری لیزری شده، ریزساختار کاملاً مارتنزیتی حضور دارد. سرعت سرد شدن بالا در جوشکاری لیزری با استفاده از دستگاه لیزر Nd:YAG و سختی‌پذیری مناسب فولاد $1/7225$ به دلیل حضور عناصر کربن، کرم و منگنز در ترکیب شیمیایی، باعث تشکیل فاز مارتنزیت در ناحیه جوش خواهد شد. بطوری‌که، در اکثر مطالعاتی که توسط دستگاه‌های لیزر Nd:YAG و فیبری انجام شده، چنین ریزساختاری گزارش شده است [16، 17، 18].

با بررسی نتایج طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس که به صورت خطی در عرض ناحیه جوش نمونه‌های جوشکاری لیزری شده انجام گرفته است، مطابق شکل (6) مشخص شد که با توجه به تغییرات یکنواخت خطوط مربوط به درصد وزنی هر عنصر و عدم تغییر چشمگیر در روند این خطوط، در حین جوشکاری لیزری هیچ‌گونه تغییراتی در توزیع عناصر آلیاژی در نمونه‌ها رخ نداده، جدایش عناصر آلیاژی مشاهده نمی‌شود. تمرکز حرارتی بالای پرتو لیزر و سرعت انجماد بالا در جوشکاری لیزری، منجر به ایجاد ریزساختار مارتنزیتی و در نتیجه آن عدم زمان کافی برای نفوذ عناصر آلیاژی و عدم تغییر موضعی ترکیب شیمیایی شده و با توجه به دلایل ذکر شده جدایش عناصر آلیاژی مشاهده نشده است.

3-3- بررسی خواص مکانیکی

3-3-1- ریزسختی

شکل (7) نتایج آزمون ریزسختی مربوط به نمونه‌های LW10،

ذوبی نمونه‌های LW10 و LW11، منجر به افزایش غیرمتعارف سختی و تردی در این نواحی شده، که در طی انجام آزمون کشش تمرکز تنش در این نواحی ایجاد شده و شکست نمونه‌ها در این نواحی اتفاق افتاده است، که این امر نشان از کیفیت پایین جوش لیزری در این نمونه‌ها دارد. شکست نمونه کشش در ناحیه فولاد پایه نشان از کیفیت بالای جوش دارد [15]. تشکیل مارتنزیت خشن در ریزساختار منجر به ایجاد مناطق تمرکز تنش شده و در آزمون کشش شکست در این ناحیه رخ می‌دهد [13]. کاهش انعطاف‌پذیری پس از جوشکاری به دلیل تشکیل حجم بالای فاز مارتنزیت در ناحیه جوش می‌باشد [21,22]. عدم تغییر محسوس نتایج آزمایش کشش نمونه جوشکاری شده با نمونه پایه، نشان از خواص مناسب نمونه جوشکاری شده دارد [23]. در این تحقیق نمونه LW12 خواص کششی تقریباً مشابه با فولاد پایه داشته و نسبت به سایر نمونه‌ها از کیفیت جوش بالایی برخوردار می‌باشد.

3-3-3- شکست نگاری

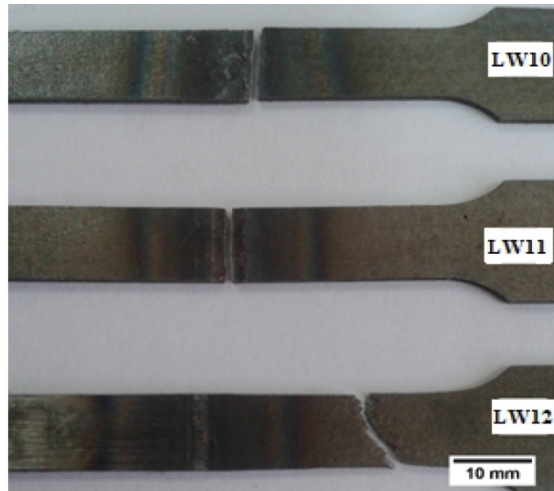
مطابق شکل (8) شکست نمونه‌ها LW10، LW11 و LW12 در آزمون کشش به ترتیب در ناحیه متأثر از حرارت، ناحیه ذوبی و فلز پایه رخ داده است. به منظور تعیین محل شکست نمونه‌ها از تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی در سطح مقطع نمونه‌ها استفاده شد. شکست نمونه‌های LW10 و LW11 در ناحیه متأثر از حرارت و ناحیه ذوبی، نشان از کیفیت پایین جوش دارد و با توجه به نتایج ارائه شده در ارزیابی ریزساختار و سختی، محل شکست نمونه‌ها در آزمون کشش دقیقاً در محل‌هایی بوده که تیغه‌های بسیار خشن مارتنزیتی تشکیل شده و سختی در این نواحی به صورت ناگهانی افزایش یافته است. شکست نمونه در ناحیه فلز پایه نشان از کیفیت بالای جوش دارد [15,22].

به منظور بررسی سطح شکست نمونه‌های در آزمون کشش و تعیین نوع شکست، سطح شکست نمونه با میکروسکپ الکترونی روبشی در شکل (9) مورد بررسی قرار گرفت. مطابق شکل (9-ب) که مربوط به سطح شکست نمونه LW11 بوده، به دلیل عدم مشاهده دیمپل‌ها شکست از نوع ترد بوده است.

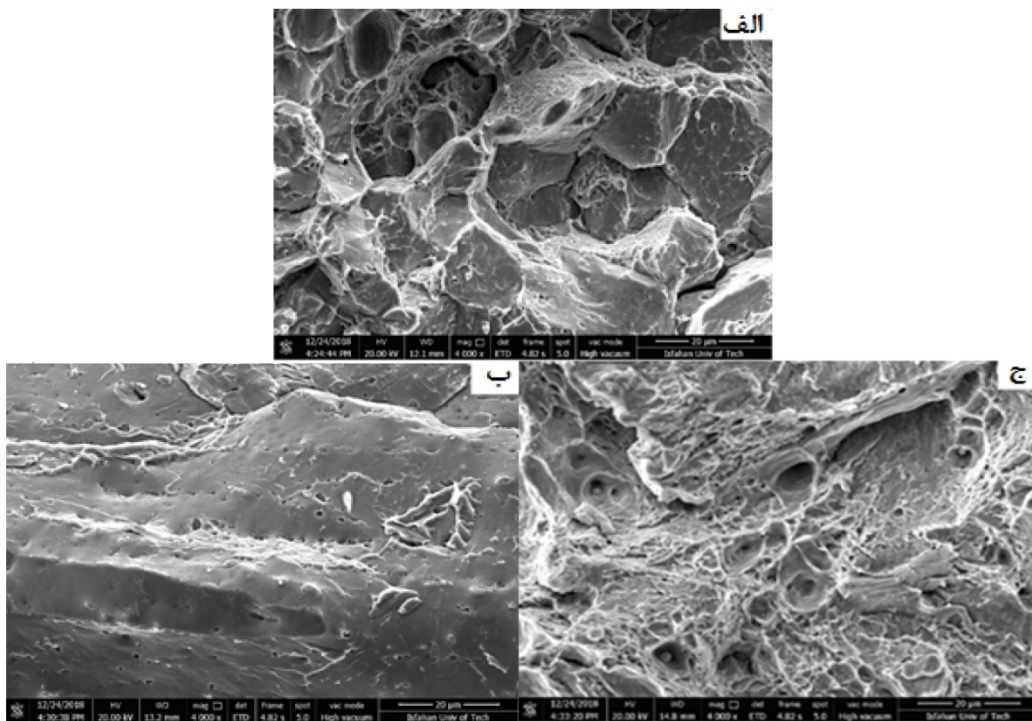
تیغه‌های ظریف مارتنزیت که در ناحیه متأثر از حرارت تشکیل شده‌اند، به دلیل حرارت منتقل شده، رشد کرده و باعث ایجاد تیغه‌های خشن و طویل شده است. میزان عرض مناطق مختلف ناحیه جوش به دلیل افزایش تمرکز حرارتی نسبت به نمونه LW12 افزایش یافته است. میزان حرارت منتقل شده به سایر نواحی با میزان تمرکز حرارتی رابطه عکس دارد. قرارگیری فاصله کانونی بالای نمونه، باعث کاهش بیشتر تمرکز حرارتی نسبت به سایر نمونه‌ها گردیده، این امر منجر به انتقال بیشتر حرارت به سایر نواحی جوش نسبت به نمونه‌های دیگر شده و عرض نواحی ذوبی و متأثر از حرارت در مقایسه با سایر نمونه‌ها بیشتر بوده است. کاهش سرعت سرد شدن منجر به تشکیل تیغه‌های مارتنزیتی بسیار خشن در ناحیه ذوبی (با طول زیاد) می‌شود [14,15]. قرارگیری کانون به میزان 1 میلی‌متر زیر سطح، منجر به تمرکز حرارتی بالاتر در هنگام جوشکاری نمونه LW12 نسبت به سایر نمونه‌های دیگر گردیده است. این امر باعث سرعت سرد شدن بیشتر و کاهش میزان انتقال حرارت به سایر نواحی شده که در نتیجه کاهش عرض نواحی در سطح مقطع این نمونه نسبت به سایر نمونه‌ها مشاهده شده است.

3-3-2- خواص کششی

در جدول (3) نتایج آزمون کشش نمونه‌های جوشکاری لیزری شده و پایه ارائه شده است. استحکام کششی، استحکام تسلیم و میزان ازدیاد طول نمونه فولاد پایه به ترتیب 710MPa، 490MPa و 13% می‌باشد که این اعداد پس از جوشکاری لیزری در نمونه LW10 به ترتیب به 640MPa، 410MPa و 9%، در نمونه LW11 به ترتیب به 460MPa، 280MPa و 5% و در نمونه LW12 نیز به ترتیب به 680MPa، 460MPa و 12% تغییر یافته است. نمونه LW12 از لحاظ استحکام کششی، استحکام تسلیم، کاهش سطح مقطع پس از شکست و میزان تغییر طول و انعطاف‌پذیری تقریباً نزدیک به نمونه پایه می‌باشد و این نمونه بهترین رفتار و کیفیت جوش را نسبت به سایر نمونه‌های جوشکاری لیزری شده داشته است. حضور دسته تیغه‌های بسیار خشن مارتنزیت در ریزساختار ناحیه متأثر از حرارت و ناحیه



شکل 8- تصویر ناحیه شکست نمونه‌های جوشکاری لیزری شده پس از آزمون کشش.



شکل 9- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح شکست نمونه‌های جوشکاری شده پس از آزمون کشش
الف- LW10، ب- LW11، ج- LW12.

قطر دیمپل با استحکام تسلیم و کششی رابطه عکس دارد، بدین معنای که با کاهش استحکام تسلیم و کششی قطر دیمپل‌ها در سطح شکست افزایش می‌یابد [26].

4- نتیجه‌گیری

- مشاهدات ریزساختاری حاکی از آن است که با توجه به تمرکز حرارتی و سرعت سرد شدن بالا در فرایند جوشکاری

با بررسی تصاویر شکست مربوط به نمونه LW10 و LW12 مشخص گردید که، با توجه به تعداد کم دیمپل‌ها در سطح شکست نمونه LW10 نسبت به سطح شکست نمونه LW12، شکست نمونه LW12 نرم‌تر از نمونه LW10 می‌باشد. همچنین قطر دیمپل‌ها در نمونه LW10 نسبت به نمونه LW12 بزرگتر است. حضور فرورفتگی‌های فنجان‌ی شکل در نواحی سطح شکست نمونه‌ها، نشان از شکست نرم دارد [15,24,25].

Steels and High Performance alloys, ASM Handbook, ASM International (1990) 389-423.

5-Xu, W., et al., "Microstructure and fatigue performance of single and multiple linear fiber laser welded DP980 dual-phase steel", Materials Science and Engineering A, 2012, 553:p. 51–58.

6-Xia, M., et al., "Effects of Heat Input and Martensite on HAZ Softening in Laser Welding of Dual Phase Steels", ISIJ International, 2008, 48:p.809-814.

7-Pang, Q., et al., "Microstructure and properties of hot-rolled high strength bainitic steel by laser welding", Materials and Design, 2015, 87:p. 363–369.

8-Sowards. J., et al., "Low-cycle fatigue behavior of fiber-laser welded, corrosion resistant, high-strength low alloy sheet steel", Materials & Design, 2017,121: p. 393–405.

9-Kim, C., et al., "A study on the CO₂ laser welding characteristics of high strength steel up to 1500 MPa for automotive application", Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2010, 39:p. 79-86.

10- علی سالمی گلعدانی، امیر عبدالله زاده و مجید میرزایی، مقایسه خواص مکانیکی ریز ساختار مارتنزیت بازگشت داده شده و ریزساختار فریت-بینیت-مارتنزیت در فولاد 42CrMo4، ماهنامه مهندسی مکانیک مدرس 1 (1389) 63-76.

11-Arivazhagan, N., et al., "Investigation on AISI 304 Austenitic Stainless Steel to AISI 4140 Low Alloy Steel Dissimilar Joints by Gas Tungsten Arc, Electron Beam and Friction Welding", Materials and Design, 2011, 32:p. 3036-3050.

12-Parkes, D., et al., "Microstructure and fatigue properties of fiber laser welded dissimilar joints between high strength low alloy and dual-phase steels", Materials and Design, 2013, 51: p. 665–675.

13- Saha, D., et al., "Microstructure properties correlation in fiber laser welding of dual-phase and HSLA steels", Materials Science and Engineering A, 2014, 607:p. 445–453.

14-رضا شجاع رضوی و محمد عرفان منش، فراوری مواد با لیزر، انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، 1394.

لیزری و میزان سختی پذیری مناسب فولاد در ناحیه جوش تمامی نمونه‌ها ریزساختار کاملاً مارتنزیتی تشکیل شده است.

- با افزایش فاصله کانون از سطح نمونه، میزان تمرکز حرارتی کاهش و میزان حرارت منتقل شده به نواحی افزایش یافته که این امر منجر به رشد تیغه‌های مارتنزیت و تشکیل تیغه‌های خشن مارتنزیت در منطقه ذوبی و منطقه متأثر از حرارت شده است. تشکیل این تیغه‌ها در هر کدام از مناطق به محل قرارگیری کانون بستگی دارد.

- نتایج آزمون ریزسختی سنجی حاکی از آن است که در نمونه LW12 افزایش سختی با روند مشخص از فلزپایه (310 ± 10 HV) به سمت ناحیه متأثر از حرارت (625 ± 10) و ناحیه ذوبی (730 ± 5 HV) بوده و در نمونه‌های LW10 و LW11 به ترتیب افزایش سختی در ناحیه متأثر از حرارت (730 ± 10 HV) و ذوبی (760 ± 5 HV) مشاهده شد.

- نتایج آزمون کشش حاکی از آن است استحکام کششی و تسلیم و میزان ازدیاد طول نمونه LW12 به ترتیب 680 MPa و 460 MPa و 12% بوده و این نمونه رفتار بسیار مشابه نسبت به سایر نمونه با فولاد پایه داشته (710 MPa و 490 MPa و 13%) و شکست این نمونه در آزمون کشش در ناحیه فولاد پایه و نمونه LW10 در ناحیه متأثر از حرارت و نمونه LW11 در ناحیه ذوبی رخ داده است.

منابع

1-Kashefi, M., et al., "Comparison of Microstructure and Mechanical Properties of Mo40 Steel in Ferrite-Martensite dual phase and quenched tempered condition", Journal of New Materials, 2018, 77-88.

2-Verlinden, B., et al., "Thermo- mechanical processing of metallic materials", Elsevier LTD, First Edition, Amsterdam, (2007).

3-جان ویلسون و ج.ف.ب. هاوکز، لیزر اصول و کاربردها، ترجمه دکتر عباس بهجت، انتشارات دانشگاه یزد، اصفهان (1381).

4-High- Strength structural and high strength low alloy steels, Properties and selection: Iron,

- 21-Ramesh, M., "Structure – properties evaluation in laser beam welds of high strength low alloy steel", *Materials Today: Proceedings*, 2, 2015:p. 2532–2537.
- 22-Oyyaravelu, R., " Metallurgical and Mechanical properties of Laser welded High Strength Low Alloy Steel", *Journal of Advanced Research* , 2016, 7:p. 463-472.
- 23-Xu, WD, "Tensile and fatigue properties of fiber laser welded high strength low alloy and DP980 dual-phase steel joints", *Materials and Design*, 2013, 43:p. 373–383.
- 24-Guo, WL., "Comparison of microstructure and mechanical properties of ultra-narrow gap laser and gas-metal-arc welded S960 high strength steel", *Optics and Lasers in Engineering*, 2017,91:p. 1–15.
- 25-Liu, Y., "Strain rate dependent deformation and failure behavior of laser welded DP780 steel joint under dynamic tensile loading", *Materials Science & Engineering A*, 2015, 627:p. 296–305.
- 26-Xian. K., " A Review of Fracture Toughness Testing and Evaluation Using SENT Specimens", *International Pipeline Conference*, Canada ,2014.
- 15-Guo, W., et al., " Microstructure and mechanical properties of laser welded S960 high strength steel", *Materials and Design*, 2015, 85:p. 534–548.
- 16- Kou, S., "Welding metallurgy", 2nd edition. Hoboken(NJ): John Wiley & Sons Inc, 2003.
- 17-Porter, D., " Phase transformations in metals and alloys". 2nd edition, Boca Raton (FL): Taylor & Francis Group ,1992.
- 18-Parkes, D., "Tensile properties of fiber laser welded joints of high strength low alloy and dual-phase steels at warm and low temperatures", *Materials and Design*, 2014, 56:p.193–199.
- 19- Subhash Chander, G., "Influence of Process Parameters on Impact Toughness and Hardness of Dissimilar AISI 4140 and AISI 304 Continuous Drive Friction Welds", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 64: p.1445-1457.
- 20-Coelho, R., "Induction-assisted laser beam welding of a thermomechanically rolled HSLA S500MC steel: a microstructure and residual stress assessment", *Materials Science and Engineering A*, 2013, 578:p. 125–133.