

## بررسی خواص مکانیکی و فیزیکی جوشکاری لیزر و قوس الکتریکی تیتانیوم خالص تجاری

سید غلامرضا رضوی<sup>۱\*</sup>، محسن سبکتکین ریزی<sup>۲</sup> و مرتضی طاهری<sup>۳</sup>

### چکیده

با توجه به کاربرد وسیع تیتانیوم و آلیاژهای آن در صنایع گوناگون از جمله صنایع خوردوسازی، هوا فضا و پتروشیمی جوشکاری آن از راه روش‌های جوشکاری گوناگون اجتناب ناپذیر است. هدف از این پژوهش، مقایسه ساختار و خواص مکانیکی تیتانیوم خالص تجاری با استفاده از دو روش GTAW و لیزر می‌باشد. بدین منظور در این پژوهش صفحات تیتانیوم خالص تجاری با استفاده از روش‌های فوق جوشکاری گردید. ریز ساختار نمونه‌های تولیدی با استفاده از میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. سختی فلزات پایه و نقاط نزدیک به فصل مشترک جوش از راه میکرو سختی محاسبه شد. هم‌چنین آزمون کشش و خمش بر روی نمونه‌ها اعمال گردید. نتایج نشان دهنده استحکام کششی و خمشی بیش‌تر، مقدار سختی کمتر و پهنای جوش کمتر نمونه‌های جوشکاری شده به روش لیزر نسبت به روش GTAW می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تیتانیوم، جوشکاری لیزر، خواص مکانیکی، جوشکاری GTAW

<sup>۱</sup>- مدرس، دانشگاه جامع علمی کاربردی استان چهارمحال و بختیاری، ایران

<sup>۲</sup>- دانشجوی دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، دانشکده مهندسی مواد، اصفهان، ایران

<sup>۳</sup>- مدرس، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، دانشکده مکانیک، قزوین، ایران

\*- نویسنده مسئول مقاله: reza.Razavi64@gmail.com

## پیشگفتار

تیتانیوم و آلیاژهای آن به دلیل داشتن خواص استحکامی مناسب، انعطاف‌پذیری و مقاومت به خوردگی بالا کاربرد وسیعی در صنایع خودروسازی، پتروشیمی و صنایع فضایی دارند. تیتانیوم به اندازه فولاد محکم ولی ۴۵ درصد از آن سبک‌تر می‌باشد و با اینکه در حدود ۶۰ درصد از آلومینیوم سنگین‌تر است با این حال استحکام دو برابری آن نسبت به آلومینیوم منجر به کاربرد وسیع تیتانیوم در صنایع هوایی گردیده است به‌گونه‌ای که مصرف ۶۵ درصد کل تیتانیوم تولیدی دنیا را به خود اختصاص داده است [۱].

اگرچه تیتانیوم مقاومت در برابر خوردگی زیادی در دماهای پایین دارد، اما مقاومت به اکسایش آن در درجه حرارت‌های بالاتر از  $500^{\circ}\text{C}$  به شدت افت کرده و میل ترکیبی شدیدی با عناصری مانند اکسیژن، نیتروژن و کربن خواهند داشت که محصولات این واکنش‌ها منجر به تولید ناخالصی‌هایی می‌گردد که باعث افت شدید انعطاف‌پذیری و چقرمگی فلز جوش خواهند شد [۲]. چوئی و همکارانش خواص مکانیکی جوشکاری تیتانیوم خالص را بررسی و گزارش کرده‌اند که نفوذ اکسیژن یا نیتروژن هوا به منطقه جوش باعث افزایش سختی در این منطقه خواهند شد از این رو، جوشکاری تیتانیوم نیازمند استفاده از گاز محافظ می‌باشد [۳]. خواص مکانیکی ساختارهای جوشکاری شده در تیتانیوم و آلیاژهای آن به خواص ساختاری هر ناحیه از جوش وابسته است و خواص ساختاری نواحی جوش نیز به عملیات حرارتی در حین جوشکاری و بعد از آن بستگی دارند. به‌گونه‌ای که این ساختار ممکن است حاوی دانه  $\beta$  اولیه در ناحیه جوش باشد یا اینکه فاز  $\beta$  در حین سرد کردن تغییر فاز دهد، لذا جوش‌پذیری آلیاژهای تیتانیوم محدود به آلیاژهای  $\alpha$  و آلیاژهای  $\alpha/\beta$  حاوی کمتر از ۲۰ درصد فاز  $\beta$  است. البته انبساط حرارتی و هم‌چنین هدایت حرارتی اندک تیتانیوم منجر به جوش‌پذیری خوب آن خواهند شد [۴].

برای جوشکاری تیتانیوم انواع روش‌های ذوبی<sup>۱</sup> اعم از جوشکاری ذوبی با الکتروود مصرفی و غیر مصرفی

(TIG/MIG) و نیز جوشکاری نفوذی<sup>۲</sup>، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی<sup>۳</sup>، پرتو الکترونی<sup>۴</sup>، قوس پلاسما<sup>۵</sup> و جوشکاری لیزر<sup>۶</sup> قابل استفاده هستند، اما عموماً برای اتصال تیتانیوم به‌خصوص لوله‌های تیتانیومی استفاده از روش GTAW<sup>۷</sup> و لیزر سودمند خواهد بود. [۵ و ۶]. تحقیقات اکمن و همکاران در جوشکاری لیزری پالسی صفحات آلیاژ Ti6Al4V نشان می‌دهد که نسبت بین انرژی پالس و طول مدت پالس مهمترین پارامتر در تعیین عمق نفوذ است [۵]. بررسی‌های لی و سایر همکاران در خصوص جوشکاری لیزری و ذوبی آلیاژ Ti-Al-Zr-Fe نشان دهنده وجود شکست در اجزای اتصال می‌باشد درحالی که نمونه‌های جوشکاری شده به روش ذوبی استحکام خمشی بیش‌تری دارند [۷]. زانگ گزارش داد که در جوشکاری لیزری تیتانیوم توزیع تنش باقیمانده مشابه سایر روش‌های سنتی جوشکاری می‌باشد اما با این حال منطقه توزیع تنش در جوشکاری لیزر بسیار باریک‌تر می‌باشد [۸]. در این پژوهش، تیتانیوم خالص تجاری به ضخامت ۴ mm با استفاده از دو روش گوناگون جوشکاری لیزر و جوشکاری GTAW جوشکاری گردید و تاثیر هر یک از پارامترهای گوناگون جوشکاری بر خواص مکانیکی و ریز ساختار اتصال مورد بررسی قرار گرفت.

## مواد و روش پژوهش

در این پژوهش، از تیتانیوم خالص تجاری گرید ۲ به ابعاد  $4 \times 110 \times 260 \text{ mm}$  با ترکیب شیمیایی نشان داده شده در جدول ۱ استفاده شد. بمنظور تمیزکاری سطوح جوشکاری از محلول حاوی ۳۰ درصد اسید نیتریک (۹۹ درصد) همراه ۵ درصد اسید هیپوفلوریک (۹۹ درصد) در آب استفاده، سپس نمونه‌ها با استفاده از آب و الکل شستشو داده شدند.

برای جوشکاری نمونه‌های تیتانیومی با استفاده از روش GTAW از دستگاه جوشکاری با پارامترهای نشان

<sup>۲</sup>- Diffusion welding

<sup>۳</sup>- Friction stir welding

<sup>۴</sup>- Electron Beam Welding

<sup>۵</sup>- Plasma welding

<sup>۶</sup>- Laser welding

<sup>۷</sup>- Gas tungsten arc welding

<sup>۱</sup>- Fusion welding

نشان می‌دهد از آنجائی که ساختار انجمادی یا ماکروسکوپی فلز جوش تابعی از مکانیزم جوانه زنی و رشد می‌باشد، اندازه و شکل دانه‌های تشکیل شده و به تبع آن ویژگی‌های مکانیکی ساختار انجماد را دیکته می‌کند. استفاده از حرارت ورودی و هم‌چنین سرعت جوشکاری پائین، باعث وسعت ناحیه ستونی شده در حالیکه اعمال حرارت ورودی بالا و سرعت جوشکاری نسبتاً زیاد باعث کاهش وسعت ناحیه ستونی و در عوض افزایش قابل توجه وسعت ناحیه هم محور مرکزی در منطقه جوش می‌گردد. انتخاب حرارت ورودی پائین نه تنها وسعت منطقه متأثر از حرارت را کاهش می‌دهد، بلکه خواص جوش را نیز از راه ایجاد ساختار دندریتی ریز بهبود می‌بخشد [۲]، بر اساس این تصاویر محل اتصال عاری از هرگونه جدایش و یا ترک می‌باشد. ریز ساختار حاصل از میکروسکپ نوری ناحیه اتصال نمونه‌های جوش داده شده به روش لیزر و GTAW در شکل ۳ و ۲ نشان داده شده است. این تصاویر نشان دهنده وجود یک ساختار دندریتی در مرکز درز جوش می‌باشد، هم‌چنین اندازه دانه‌ها در روش GTAW بزرگتر از روش لیزر می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که ناحیه جوش در آلیاژهای تیتانیوم به وسیله دانه‌های ستونی و درشت  $\beta$  اولیه که در حین انجماد جوش تولید می‌شوند، مشخص می‌شود. اندازه و شکل این دانه‌ها به نوع شار حرارتی که در حین انجماد جوش برقرار می‌شود، وابسته هستند. اندازه دانه‌های  $\beta$  به انرژی ورودی به منطقه جوش وابسته است و انرژی ورودی بیش‌تر سبب درشت‌تر شدن اندازه دانه‌ها می‌شود. هنگامی که پیک دما در حدود دمای سالیدوس تا ناحیه تبدیل فازی  $\beta$  در این آلیاژ قرار می‌گیرد، دانه‌های فاز  $\beta$  در ناحیه متأثر از حرارت تا حدی که مستقیماً به مجاورت ناحیه جوش برسند، رشد می‌کنند. همانند ناحیه جوش، مقدار رشد دانه‌ها در ناحیه متأثر از حرارت نیز با افزایش انرژی ورودی افزایش می‌یابد. در نتیجه این ناحیه، رشد مشخصی در عرض خواهد داشت [۱۰ و ۹].

در سیکل‌های حرارتی با دمای بالای جوشکاری، حتی وجود مقادیر کمی فاز  $\alpha$  مانع از رشد فاز  $\beta$

داده شده در جدول ۲ استفاده گردید بمنظور جلوگیری از تماس الکتروود با مذاب و ورود ناخالصی‌ها به داخل جوش جریان با فرکانس بالا مورد استفاده قرار گرفت. نوع الکتروود مصرفی، الکتروود تنگستنی و یک سیم جوش به نام ETRI-2 مطابق استاندارد<sup>۱</sup> AWS A5.12 به عنوان فلز فلز پرکننده انتخاب گردید و نمونه‌ها مطابق استاندارد AWS A5.16-70 تحت گاز محافظ آرگون در یک پاس جوش داده شدند. پارامترهای نشان داده شده در جدول ۳ برای جوشکاری لیزری پالسی Nd:YAG مورد استفاده قرار گرفت. جهت بررسی استحکام نمونه‌های مورد اتصال، آزمایش کشش<sup>۲</sup> طبق استاندارد ASTM E8M-04 در دستگاه Instron4486 در دمای محیط و با نرخ کرنش یک میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. نمونه‌های خمشی<sup>۳</sup> طبق استاندارد BS EN 910 به صورت صورت عرضی تهیه گردید طبق این استاندارد قطر فرو رونده بایستی چهار برابر ضخامت و زاویه خمش ۱۸۰ درجه باشد. بررسی‌ها در این آزمون با دستگاه Shimadzu 25TA و سرعت خمش یک میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت. برای تعیین مقدار سختی<sup>۴</sup> نمونه‌ها در فواصل دور و نزدیک به فصل مشترک اتصال آزمون میکروسختی با نیروی ۳۰۰ گرم در فواصل گوناگون انجام شد. خواص و ریزساختار نمونه‌ها به وسیله میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی (SEM<sup>۵</sup>) مجهز به آنالیز نقطه‌ای (EDX<sup>۶</sup>) مورد بررسی قرار گرفت. برای حکاکی تیتانیوم از محلول کرول<sup>۷</sup> با ترکیب شیمیایی ( 92ml H<sub>2</sub>O, 2ml HF, 6ml HCl) استفاده گردید. (به منظور حکاکی نمونه‌ها، از اسیدهای ساخت شرکت مرک آلمان با درصد خلوص ۹۹ درصد استفاده شد).

## نتایج و بحث

شکل ۱ تصویر ماکروسکوپی از نمونه‌های اتصال به دور روش جوشکاری مورد استفاده در این آزمایش را

<sup>1</sup>- American welding of society

<sup>2</sup>- Tensile test

<sup>3</sup>- Bending

<sup>4</sup>- Hardness

<sup>5</sup>- Scanning Electron Microscope

<sup>6</sup>- Energy Dispersive X-ray fluorescence

<sup>7</sup>- Kroll's Solution

انجام تست کشش در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در تمامی نمونه‌های جوشکاری شده شکست در محل فلز پایه رخ داده است که خود بیانگر جوش‌پذیری خوب تیتانیوم با استفاده از دو روش مورد آزمایش می‌باشد، با این‌حال استحکام جوش در روش جوشکاری با لیزر بیش‌تر از جوشکاری GTAW می‌باشد. نتایج حاصل از سختی سنجی نمونه‌ها که در شکل ۸ نشان داده شده است، بیانگر این است که مقدار سختی جوش و مناطق اطراف آن در جوشکاری به روش GTAW از جوشکاری به روش لیزر و فلز پایه بیش‌تر است. نتایج حاصل از آزمون خمشی در جدول ۴ گزارش شده است، هم‌چنین تصاویر میکروسکوپی از نمونه‌های خمشی در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد استحکام خمشی نمونه‌های جوشکاری شده به روش لیزری بالاتر از روش GTAW مورد آزمایش می‌باشد که علت این امر به باریک‌تر بودن منطقه متاثر از حرارت در این نوع روش جوشکاری بر می‌گردد [۱۲ و ۱۳]. نتایج نشان می‌دهد که در طول جوشکاری بخش کوچکی از تیتانیوم ذوب شده و سریعاً خنک می‌شود، ساختار نهایی متاثر از ناخالصی‌های جذب شده از محیط شامل اکسیژن و نیتروژن می‌باشد. در مقادیر کم این عناصر ساختار کریستالی HCP تیتانیوم را تغییر نمی‌دهد، از طرفی به دلیل کوچک بودن این عناصر، به صورت بین‌نشین در ساختار قرار گرفته و سختی به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد و باعث شکست جوش خواهند شد. در حالت سرد شدن تعادلی ساختار تیتانیوم خالص در دمای محیط به صورت فاز آلفا خواهد بود، اما حالت سرد شدن سریع، اکسیژن به پایداری فاز بتا در دمای محیط کمک می‌کند [۱۴ و ۱۵].

خواهد شد. هم‌چنین خواص مکانیکی ناحیه جوش تا حد زیادی تحت تاثیر استحاله (BCC)  $\beta$  به (HCP)  $\beta$  در حین سرد کردن است. خواص این ریزساختار تغییر فرم یافته، به سرعت سرد کردن از دماهای بالاتر از دمای تغییر فاز  $\beta$  وابسته است، که سرعت سرد کردن نیز خود تابع نوع فرایند جوشکاری می‌باشد [۱۱].

تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌های جوش داده شده با دو روش گوناگون مورد آزمایش در شکل ۴ و ۵ نشان داده شده است. این تصاویر نشان می‌دهد که منطقه متاثر از حرارت در جوشکاری لیزری بسیار کمتر از جوشکاری GTAW می‌باشد، هم‌چنین تغییرات ریزساختاری در جوشکاری لیزری کمتر از جوشکاری GTAW می‌باشد، لذا کیفیت سطح جوش در جوشکاری لیزر بسیار بالاتر است. در بررسی‌های انجام شده بر روی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی حاصل از نمونه‌های جوشکاری شده به وسیله فرایند GTAW چندین ترک ناشی از تنش حرارتی اعمال شده به وسیله فرایند مشاهده می‌گردد. انجام آنالیز شیمیایی EDS بر روی نواحی سفید رنگ اطراف این ترک‌ها که در شکل ۶ گزارش شده است نشان دهنده وجود مقادیر زیادی اکسیژن، نیتروژن و ناخالصی‌های اکسیدی می‌باشد که ممکن است به دلیل وجود جریان ناآرام گاز خروجی و یا عدم حفاظت مناسب محل جوش به وسیله گاز محافظ تشکیل شده باشند. نتایج نشان می‌دهد که دبی زیاد گاز خروجی از تفنگ جوشکاری منجر به جریان اغتشاشی گاز شده و می‌تواند هوا را به داخل حوضچه مذاب وارد کند، این امر در نهایت منجر به اکسید شدن فلز جوش و تشکیل حباب‌های گازی می‌شود [۱۱ و ۲].

تصویر میکروسکوپی و هم‌چنین نمودار حاصل از

جدول ۱- ترکیب شیمیایی تیتانیوم خالص تجاری گرید ۲

عنصر	Fe	C	N	O	H	Ti
درصد وزنی	0.15	0.02	0.02	0.13	0.02	Bal.

جدول ۲- پارامترهای مورد استفاده در جوشکاری تیتانیوم GTAW

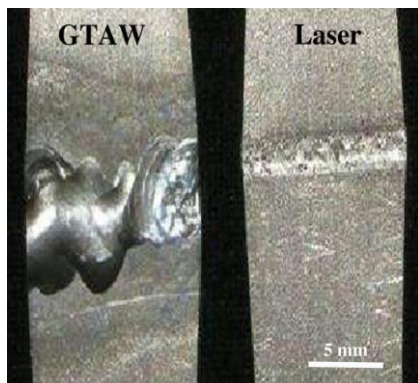
Polarization (قطب)	DC (+)
Voltage (ولتاژ)	220 V
Current (جریان)	80 A
Filler rod (فیلر)	ERTi-2
Shielding gas (گاز محافظ)	Argon

جدول ۳- پارامترهای مورد استفاده در جوشکاری لیزری تیتانیوم

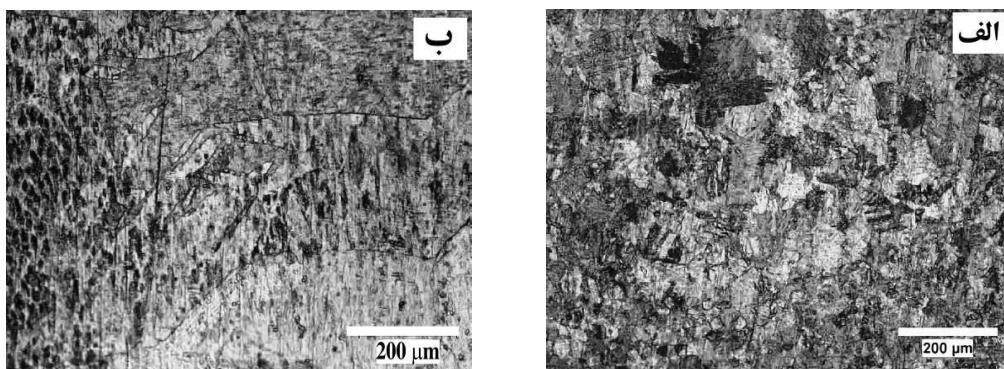
Pulse Duration (مدت پالس)	5 ms
Pulse Repetition Rate (میزان تکرار پالس)	30 Hz
Pulse Energy (انرژی پالس)	9 Joule
Peak Power (قدرت پیک)	1,8 kW
Focal Location (فاصله از کانون)	1mm
Speed (سرعت)	4 mm/sec
Shielding Gas (گاز محافظ)	Argon

جدول ۴- نتایج حاصل از تست خمش

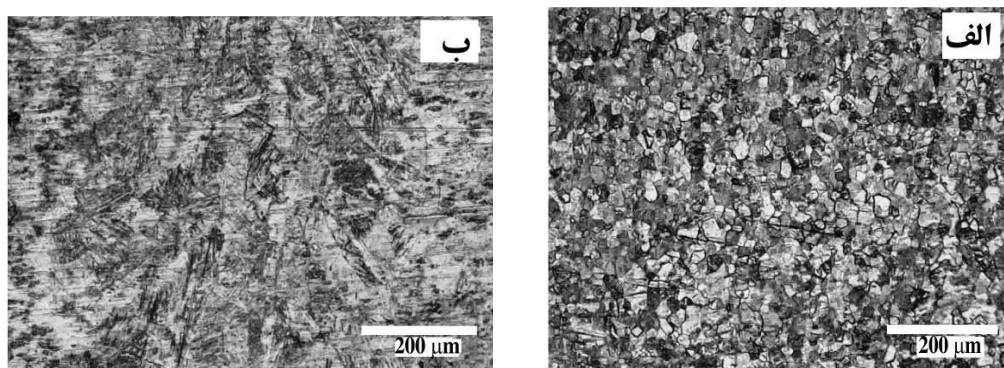
	استحکام خمشی (N/mm <sup>2</sup> )
Base Material (فلز پایه)	759±16.3
Laser Welded (جوشکاری لیزر)	747±22.5
GTAW Welded (جوشکاری با گاز محافظ)	636±94.3



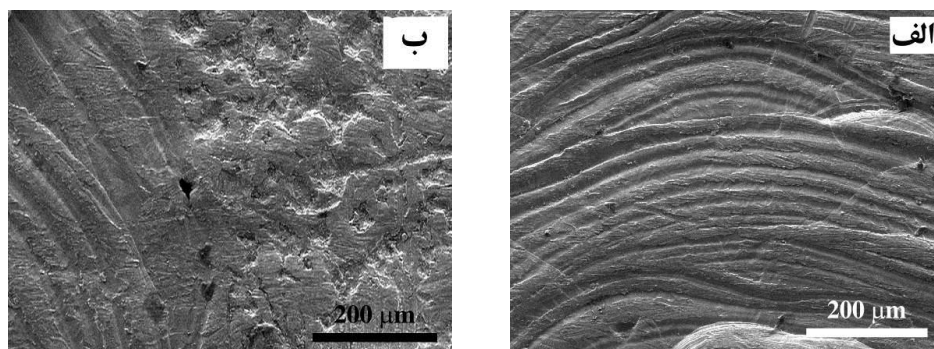
شکل ۱- تصویر ماکروسکوپی از نمونه‌های جوشکاری شده به دو روش مورد آزمایش



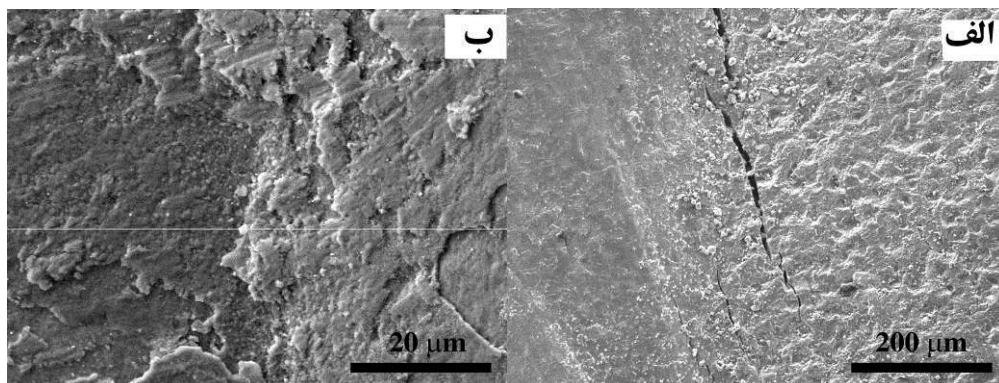
شکل ۲- ریز ساختار تیتانیوم جوشکاری شده به روش GTAW (الف) ناحیه فلز پایه (ب) ناحیه جوش



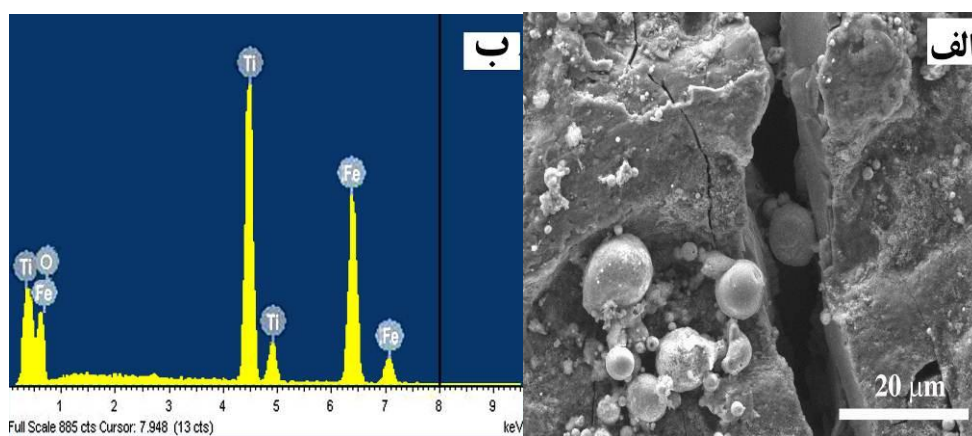
شکل ۳- ریز ساختار تیتانیوم جوشکاری شده به روش لیزر (الف) ناحیه فلز پایه (ب) ناحیه جوش



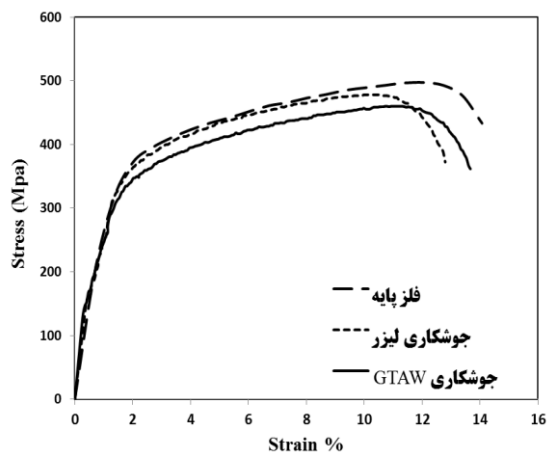
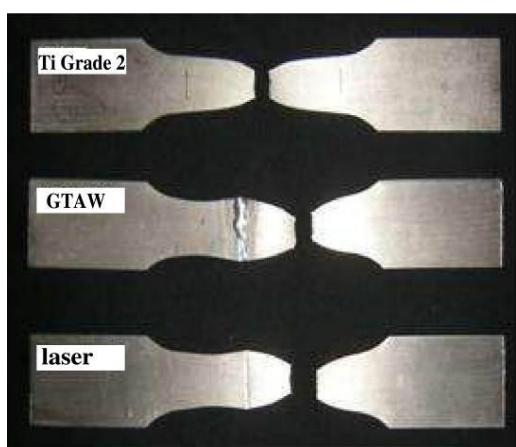
شکل ۴- تصویر میکروسکپ الکترونی روبشی از محل جوش لیزری تیتانیوم (الف) خط جوش (ب) منطقه متاثر از حرارت



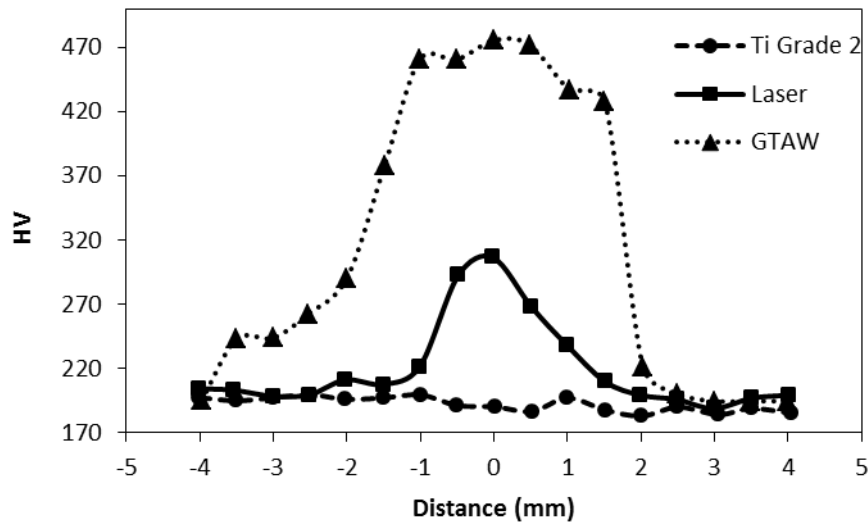
شکل ۵- تصویر میکروسکپ الکترونی روبشی از محل جوش GTAW تیتانیوم (الف) منطقه متأثر از حرارت (ب) خط جوش



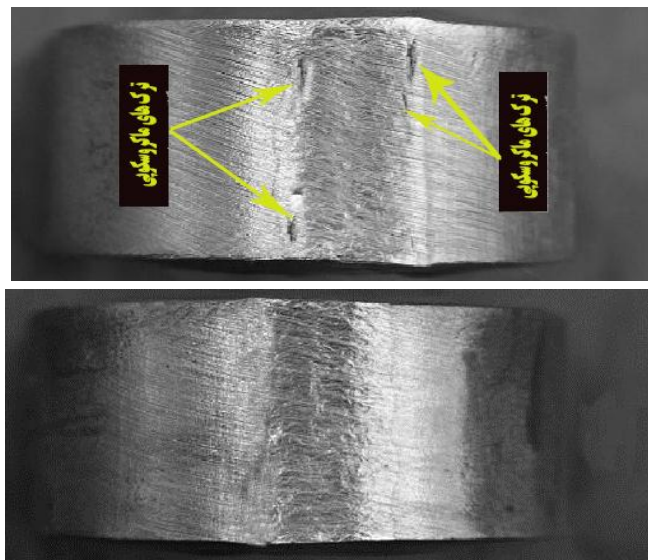
شکل ۶- الف) تصویر میکروویکپ الکترونی روبشی ناخالصی‌ها و لایه‌های اکسیدی ناشی از نفوذ اکسیژن به محل جوش در روش GTAW (ب) آنالیز عنصری لایه‌های اکسیدی



شکل ۷- الف) تصویر ماکروسکوپی از نمونه‌های کششی (ب) نتایج حاصل از انجام تست کشش



شکل ۸- نتایج حاصل از سختی سنجی نمونه‌های جوشکاری شده



شکل ۹- تصاویر ماکروسکوپی از نمونه‌های تست خمش الف) جوشکاری GTAW ب) جوشکاری لیزر

می‌باشد، در حالی که ریزساختار منطقه جوش خالص از روش لیزری به دلیل سرعت سرد شدن زیاد تماماً ساختاری سوزنی شکل می‌باشد.

۳- نتایج نشان می‌دهد که ورق‌های جوشکاری شده با استفاده از روش لیزری دارای داکتیلیته بهتری نسبت به روش GTAW می‌باشد، لذا جهت جوشکاری ورق‌های تیتانیوم جوشکاری لیزر پیشنهاد می‌گردد.

## نتیجه گیری

در این پژوهش، جوشکاری تیتانیوم خالص تجاری به دو روش لیزری و GTAW انجام شد، داده‌های بدست آمده با یکدیگر مقایسه و نتایج زیر حاصل گردید:

۱- پهنای جوش و منطقه متأثر از حرارت، در جوشکاری ورق‌های تیتانیوم به روش GTAW بیش‌تر از روش جوشکاری لیزر است.

۲- ریزساختار منطقه جوش حاصل از روش GTAW شامل ساختار سوزنی شکل همراه با مقدار فاز  $\alpha$



- techniques for titanium alloy sheet", *Materials Processing Technology*, Vol. 65, No. 1-3, pp. 203-208, 1997.
9. E. Akman, A. Demir, T. Canel, T. Sınmazçelik, "Laser welding of Ti6Al4V titanium alloys", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 8, pp. 3705-3713, 2009.
  10. T. Chai, C. Kai Chou, "Mechanical properties of laser-welded cast titanium joints under different conditions", *Prosthetic Dentistry*, Vol. 79, No. 4, pp. 477-483, 1998.
  11. J.A. Orłowski de Garcia, "Characterization of titanium welded joints by the orbital gas tungsten arc welding process for aerospace application", *Aerospace Technology and Management*, Vol. 2, No. 2, pp. 211-218, 2010.
  12. V. Balasubramanian, V. Jayabalan, and M. Balasubramanian, "Effect of current pulsing on tensile properties of titanium alloy", *Materials & Design*, Vol. 29, No. 7, pp. 1459-1466, 2008.
  13. M. J. Torkamany, F. Malek Ghaini, E. Papan, and S. Dadras, "Process Optimization in Titanium Welding with Pulsed Nd:YAG Laser", *Science of Advanced Materials*, Vol. 4, pp. 489-496, 2012.
  14. N. Ahraman, M. Taskin, B. Gulenc, and A. Durgutlu, "An investigation into the effect of welding current on the plasma arc welding of pure titanium", *Metallic Materials*, vol. 48, No. 3, pp. 179, 2010.
  15. M. Balasubramanian, "Effect of process parameters of pulsed current tungsten inert gas welding on weld pool geometry of titanium welds", *Acta metallurgica sinica*, Vol. 23 No. 4, pp. 312-320, 2010.
- ### References
۱. م. عطاپور، م. ح. فتحی، م. شمعانیان، "ارزیابی‌های ریزساختاری جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و جوشکاری قوس تنگستن"، یازدهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران، تبریز، ۱۳۸۹.
  ۲. م. حسین‌یون، س. ناطق، "بررسی جوش‌پذیری تیتانیوم خالص تجاری به روش GTAW برای سیستم‌های لوله-کشی"، هشتمین کنفرانس جوش و بازرسی ایران، تهران، ۱۳۸۶.
  3. B.H. Choi, and B.K. Choi, "The effect of welding conditions according to mechanical properties of pure titanium", *Materials Processing Technology*, Vol. 201, No. 1-3, pp. 526-530, 2008.
  4. T.S. Balasubramanian, V. Balasubramanian, and M.A. Muthu Manickam, "Fatigue crack growth behavior of gas tungsten arc, electron beam and laser beam welded Ti-6Al-4V alloy", *Materials & Design*, Vol. 32, No. 8-9, pp. 4509-4520, 2011.
  ۵. م. سبکتکین ریزی، ر. رضوی، ح. مناجاتی، "اتصال نوردی تیتانیوم به فولاد با استفاده از لایه میانی نیکل"، مجله علمی پژوهشی مواد نوین، جلد ۳، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۱.
  6. Q. Yunlian, D. Ju, H. Quan, Z. Liying, "Electron beam welding, laser beam welding and gas tungsten arc welding of titanium sheet", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 280, No. 1, pp. 177-181, 2000.
  7. C. Li, K. Muneharua, and S. Takao, H. Kouji, "Fiber laser-GMA hybrid welding of commercially pure titanium", *Materials & Design*, Vol. 30, No. 1, pp. 109-114, 2009.
  8. Z. Li, S.L. Gobbi, I. Norris, S. Zolotovskiy, and K.H. Richter, "Laser welding

