

بررسی اثر افزودن گاز دی اکسید کربن به گاز محافظ بر خواص جوش در جوشکاری لیزر پالسی Nd:YAG

مصطفی جوکار^{۱*}، فرشید مالک قاینی^۲، محمد جواد ترکمنی^۳

۱- کارشناس ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، گروه مهندسی مواد، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشگاه تربیت مدرس، گروه مهندسی مواد، تهران، ایران

۳- دانشجوی دکتری، مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران، تهران، ایران

*m.jokar55@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۹۲/۰۷/۲۹، تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۹/۲۰)

چکیده

استفاده از جوشکاری لیزری در صنایع بسیار وسیع است. نقش گاز محافظ در جوشکاری لیزر پالسی Nd:YAG با توجه به کوتاه بودن زمان ماندگاری مذاب در دماهای بالا متفاوت از نقش آن در سایر روش‌های جوشکاری ذوبی معمول است. در این پژوهش اثر افزودن گاز دی‌اکسید کربن به گاز محافظ آرگون بر خواص جوش لیزری فولاد کم کربن ST14 در راستای بهبود شکل جوش و کاهش هزینه‌های گاز محافظ بررسی شد. مشاهده شد افزایش درصد دی اکسید کربن در گاز محافظ موجب افزایش عمق نفوذ جوش و تشکیل فریت سوزنی در ساختار جوش می‌گردد. همچنین با افزایش درصد گاز دی اکسید کربن سطح شکست جوش از شکست ترد به مخلوطی از شکست نرم و ترد تغییر می‌کند. نتایج به دست آمده حاکی از پتانسیل استفاده از گاز ارزان قیمت دی اکسید کربن در ترکیب گاز محافظ در جوشکاری لیزر پالسی Nd:YAG است.

واژه‌های کلیدی:

جوشکاری لیزری، لیزر Nd:YAG پالسی، گاز محافظ آرگون، دی اکسید کربن.

۱- مقدمه

طول موج کم آن ($106\ \mu\text{m}$) و کاهش بازتابش از سطح مواد فلزی، می‌تواند استفاده بیشتری نسبت به جوشکاری با لیزر CO_2 با طول موج $106\ \mu\text{m}$ داشته باشد [۳]. از طرفی جوشکاری با لیزر پالسی به عنوان فناوری جدید و مقرون به صرفه، می‌تواند به صورت مؤثری برای جوشکاری سریع، تمیز و با کیفیت قطعات بدنه اتومبیل مورد استفاده قرار گیرد [۴]. در جوشکاری لیزری خواص فیزیکی و متالورژیکی جوش می‌تواند توسط متغیرهای

جوشکاری لیزری به دلیل سرعت بالا، کنترل پذیری آسان، حرارت ورودی پایین و منطقه متأثر از حرارت کوچک، بسیار مورد توجه صنعت و تکنولوژی مدرن است [۱]. امروزه در بسیاری از شرکت‌های خودروسازی از سیستم‌های لیزری برای جوشکاری استفاده می‌شود [۲]. قابلیت اتوماسیون و سرعت بالا دو عامل اصلی استفاده از جوشکاری لیزری در صنایع خودروسازی است [۲]. جوشکاری با لیزر Nd:YAG به علت

روی مشخصات پلاسما، و برهم کنش با فلز جوش بر مشخصات جوش تولید شده تأثیر بگذارد [۱۰ - ۱۱]. گازهای با انرژی پتانسیل یونش بالاتر موجب کاهش چگالی الکترونی، کاهش ضریب جذب پلاسما و تمرکز بهتر پرتو لیزر می‌شوند [۱۲]. در جوشکاری مس و آلیاژ مس-نیکل، افزودن اکسیژن به ترکیب گاز محافظ از طریق ایجاد یک لایه اکسیدی در سطح فلز موجب جذب بهتر پرتو لیزر و افزایش عمق نفوذ می‌شود [۵ و ۹]. اثر افزودن گاز CO₂ بر مشخصات جوش فولاد در جوشکاری به روش قوس الکتریکی (SMAW) بررسی و مشخص شده است، با افزایش درصد CO₂ عمق نفوذ جوش افزایش می‌یابد [۱۱]. همچنین تحقیقاتی در زمینه استفاده از گازهای نیتروژن و دی اکسید کربن در جوشکاری با لیزر پیوسته CO₂ انجام شده است [۱۰ و ۱۳]. استفاده از گاز دی اکسید کربن در ترکیب گاز محافظ، به دلیل قیمت نسبتاً ارزان آن توجیه اقتصادی دارد. لذا در این تحقیق اثر درصدهای مختلف گاز CO₂ در گاز محافظ اصلی آرگون بر روی خواص مکانیکی و شکل جوش لیزر پالسی Nd:YAG مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مواد و روش تحقیق

از ورق فولاد کم کربن با ابعاد ۲ × ۵۰ × ۱۰۰ mm با ترکیب مندرج که با روش اسپکترومتری نشری تعیین شده در جدول (۲) به عنوان قطعه کار جوشکاری استفاده شد.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده (درصد وزنی)

عنصر	S	P	Mn	C	Fe
درصد وزنی	۰/۰۰۶	۰/۰۰۶	۰/۲۲	۰/۰۵	پایه

از دستگاه لیزر Nd:YAG پالسی، مدل IQL-10 با حداکثر توان متوسط ۴۰۰ وات و پالس‌های خروجی مربعی شکل به منظور جوشکاری و از یک سامانه متمرکز کننده با فاصله کانونی mm ۷۵ جهت متمرکز نمودن پرتو لیزر استفاده شده است. حداقل

لیزر مانند انرژی پالس، توان حداکثر، موقعیت نقطه کانونی و همچنین متغیرهای مربوط به گاز محافظ از جمله نرخ جریان و ترکیب گاز محافظ و مشخصات هندسی سامانه دمش گاز محافظ تعیین شود [۳].

در حین جوشکاری لیزری برهم کنش بین پرتو لیزر با فلز پایه منجر به گرم شدن و ذوب سریع فلز پایه می‌گردد. دمای فلز مذاب در مرکز ناحیه برهم کنش به دماهای بالاتر از نقطه جوش فلز پایه می‌رسد. در نتیجه فشار تعادلی در سطح حوضچه مذاب بسیار بالاتر از فشار اتمسفر است و به موجب آن عناصر موجود در فلز پایه با نرخ نسبتاً بالایی تبخیر می‌شوند [۵]. اتم‌های گازی قرار گرفته در مسیر پرتو لیزر در اثر برخورد با پرتو لیزر، برانگیخته یا یونی شده و پلاسمای جوش تشکیل می‌شود. پلاسمای جوش متشکل از اتم‌های خنثی، برانگیخته و یونی شده فلز پایه و گاز محافظ است [۶]. ابر پلاسما بخشی از انرژی پرتو لیزر را جذب می‌کند و موجب واگرایی و کاهش تمرکز پرتو لیزر می‌گردد [۶]. در جوشکاری لیزری معمولاً گاز محافظ به منظور حفاظت از حوضچه مذاب در برابر اتمسفر و جلوگیری از اکسید شدن فلز جوش، حفاظت از لتهای لیزر در برابر پراکنش مذاب و پراکندن پلاسمای تشکیل شده در بالای حوضچه مذاب مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷]. در حین جوشکاری به علت دمای بالای سطح حوضچه مذاب و فشار بالای اتمسفر جوش (پلاسمای جوش)، امکان حلالیت و واکنش اجزاء موجود در پلاسما با فلز مذاب بالا است [۶]. میزان جذب پرتو لیزر در سطح فلز پایه وابسته به شرایط سطح، دما و چگالی انرژی پرتو لیزر است [۳]. با ایجاد یک لایه اکسیدی در سطح میزان جذب پرتو لیزر به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد [۸ - ۹]. از این رو گاز محافظ از طریق اثرگذاری بر پلاسما و سطح حوضچه مذاب می‌تواند میزان جذب پرتو لیزر توسط سطح فلز جوش را تحت تأثیر قرار دهد. همچنین خواص متالورژیکی و مکانیکی فلز جوش تا حدودی متأثر از واکنش بین حوضچه مذاب و گاز محافظ است.

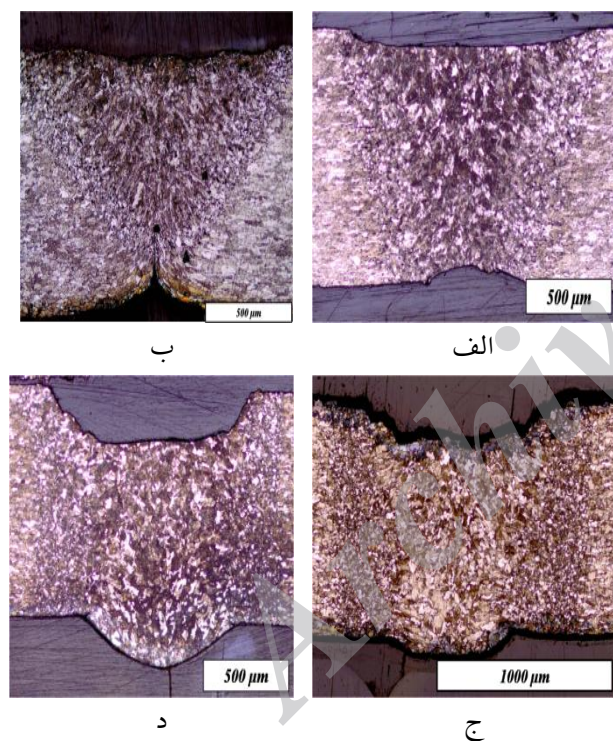
استفاده از گاز محافظ با ترکیب مناسب می‌تواند از طریق تأثیر بر

جدول (۲): ترکیب گاز محافظ

شناسه نمونه	ترکیب گاز محافظ
A	Ar
B	95% Ar+5% CO ₂
C	90% Ar+10% CO ₂
D	85% Ar+15% CO ₂
E	80% Ar+20% CO ₂
F	75% Ar+25% CO ₂
G	70% Ar+30% CO ₂
H	60% Ar+40% CO ₂
I	50% Ar+50% CO ₂

۳- نتایج و بحث

در شکل ۱ مقطع عرضی جوش نمونه‌های A, D, F و I نشان داده شده است.



شکل (۱): تصاویر میکروسکوپ نوری مقطع عرضی جوش نمونه‌های:

(الف): A (100% Ar)، (ب): D (85% Ar+15% CO₂)، (ج):

F (75% Ar+25% CO₂) و (د) I (50% Ar+50% CO₂)

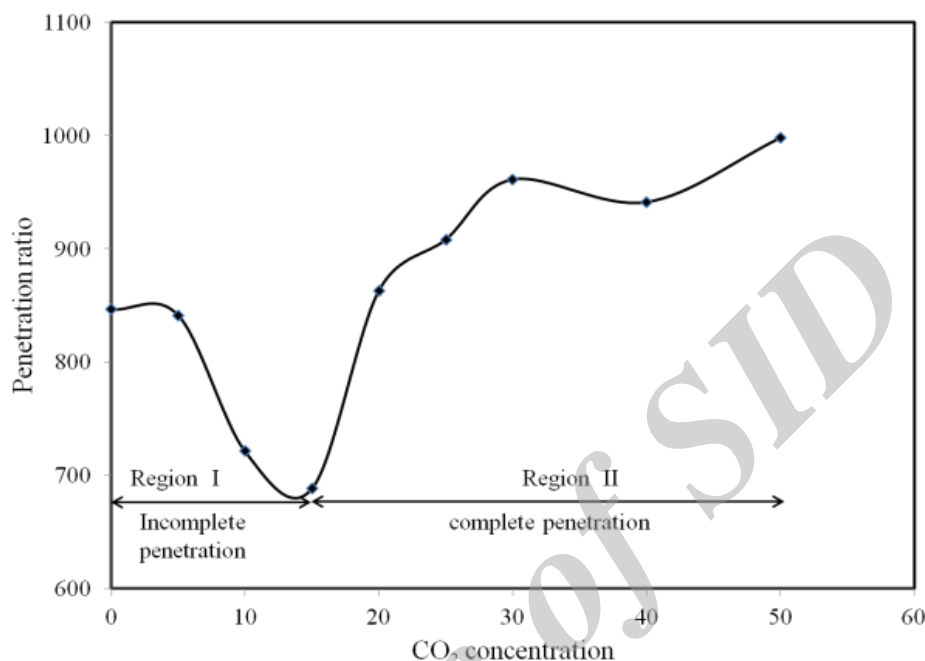
شکل ۲ تغییرات نسبت عمق نفوذ جوش (نسبت عمق جوش به ضخامت فلز پایه) بر حسب درصد دی اکسید کربن موجود در گاز محافظ را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود با افزایش گاز دی اکسید کربن تا ۱۵ درصد حجمی،

قطر لکه لیزر قابل دستیابی در این دستگاه لیزر ۲۵۰ میکرومتر است. از توان سنج مدل 5000W-LP و ژول سنج مدل LA300W-LP ساخت شرکت OPHIR برای اندازه‌گیری توان و انرژی پالس لیزر استفاده شد. همچنین یک نگه‌دارنده مخصوص جهت نگه‌داری نمونه‌ها در حین جوشکاری و جلوگیری از جابجایی احتمالی نمونه‌ها در طول فرآیند و یک میز با امکان جابجایی در سه جهت X, Y و Z با دقت ۰/۰۵ mm به منظور حرکت قطعه کار با سرعت مورد نظر در زیر نقطه تمرکز باریکه لیزر که ثابت است، مورد استفاده قرار گرفت. برای اندازه‌گیری نرخ جریان گاز از جریان سنج‌های معروف به Rotameter ساخت شرکت Office Orobiche و برای مخلوط کردن گازها از سه راهی مخلوط‌کننده استفاده شد.

در این آزمایش‌ها نرخ جریان گاز محافظ، سرعت جوشکاری، توان متوسط، عرض پالس و فرکانس لیزر به ترتیب برابر Lit/min، ۶۰، ۴ mm/s، ۲۲۰ W، ۷ ms و ۲۰ Hz تنظیم شد. جدول ۲ ترکیب گاز محافظ مورد استفاده در آزمایش‌ها را نمایش می‌دهد. قبل از انجام فرآیند جوشکاری ابتدا نمونه‌ها با سنباده شماره ۱۸۰ تمیز و سپس با استون شستشو شدند. به منظور بررسی تغییرات ابعادی فلز جوش، ۳ نمونه متالوگرافی از سطح مقطع عرضی جوش انتخاب گردید و از وسط خط جوش برش داده شدند. نمونه‌های انتخاب شده پس از پولیش کاری و حکاکی در محلول نایتال ۳٪ با استفاده از میکروسکوپ نوری ساخت شرکت (Zeiss) مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتند. به منظور اندازه‌گیری دقیق ابعاد و مساحت ناحیه جوش از نرم افزار Image Tool استفاده گردید. به منظور بررسی استحکام کششی و شکل پذیری جوش، آزمون کشش یک بعدی و خمش بر روی دو نمونه جوش داده شده بررسی شد. آزمون کشش یک بعدی و شکل‌پذیری جوش‌ها به ترتیب مطابق با استانداردهای ASTM:E8 و AWS:B4.0-85 انجام شد [۱۴ و ۱۵]. شکست جوش با استفاده از میکروسکوپ الکترونی ساخت شرکت فیلیپس (Philips) مدل XL30 بررسی شد.

تأثیر گاز CO_2 بر ضریب جذب، دمای پلاسما و اکسیداسیون سطح حوضچه مذاب و اثر رقابتی پدیده‌های مذکور جستجو کرد.

عمق نفوذ حوضچه مذاب ۱۸ درصد کاهش (ناحیه ۱) یافت. در حالی که با افزایش ۱۵ تا ۵۰ درصد حجمی، عمق نفوذ جوش ۵۰ درصد افزایش می‌یابد (ناحیه ۲). دلیل این امر را می‌توان در



شکل (۲): تغییرات نسبت عمق نفوذ (نسبت عمق نفوذ جوش به ضخامت فلز پایه) بر حسب درصد دی اکسید کربن موجود در گاز محافظ

کاهش عمق نفوذ در ناحیه یک را می‌توان به اثر غالب افزایش ضریب جذب پلاسما نسبت داد.

در ناحیه ۲، احتمالاً دی اکسید کربن در محیط پلاسما تجزیه شده و اکسیژن تولید شده است، اکسیژن تولید شده با آهن واکنش داده و اکسید آهن تولید کرده است. در این آزمایش‌ها مشاهده شد که در ناحیه یک تغییری در سطح ظاهری جوش ایجاد نمی‌گردد، اما در ناحیه دو یک لایه سیاه و کدر بر روی جوش تشکیل می‌شود. حضور لایه اکسیدی در سطح می‌تواند موجب افزایش جذب پرتو لیزر شود [۸-۹]. عامل دیگری که می‌تواند بر شکل جوش تأثیر گذارد، جریان گردابی مذاب است. در غیاب عناصر فعال در سطح (نظیر اکسیژن، گوگرد و فسفر)، جریان گردابی مذاب به سمت کناره‌های جوش است و جوش حاصله کم عمق و پهن خواهد بود. اما حضور مقدار ناچیزی از این عناصر موجب تغییر جهت جریان گردابی به سمت مرکز

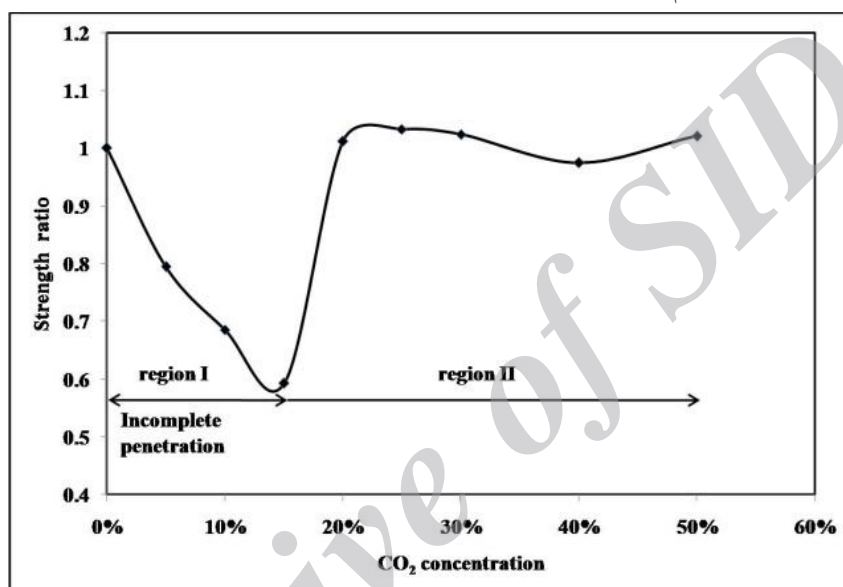
انرژی مورد نیاز برای تجزیه مولکول CO_2 ، ۵/۵ eV است، که از انرژی پتانسیل یونش آرگون (۱۵/۱۵ eV) کمتر است [۱۶]. استفاده از گازهای با انرژی پتانسیل یونش پایین‌تر موجب افزایش چگالی الکترونی و ضریب جذب پلاسما پرتو لیزر می‌شوند [۱۲]. انرژی منتقل شده از پلاسما با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۳]:

$$I = I_0 \exp(-\alpha h) \quad (1)$$

که در آن $I(j)$ انرژی پرتو لیزر عبوری از پلاسما، $I_0(j)$ انرژی پرتو لیزر هنگام برخورد به پلاسما، α (۱/م) ضریب جذب پلاسما و h (م) ارتفاع پلاسما است. بنابراین بر اساس رابطه (۱) با افزایش درصد دی اکسید کربن در گاز محافظ ضریب جذب پلاسما افزایش یافته و به موجب آن انرژی کمتری به سطح قطعه می‌رسد. لذا انتظار می‌رود ابعاد جوش کاهش یابد. بنابراین

درصد دی اکسید کربن در شکل ۳ نشان داده شده است. مشاهده می شود که با افزایش درصد دی اکسید کربن تا ۱۵ درصد (ناحیه یک)، استحکام کششی جوش کاهش و شکست در فلز جوش رخ می دهد (شکل ۴ ب)، اما در ادامه استحکام جوش افزایش یافته و به یک مقدار تقریباً ثابت می رسد و شکست در ناحیه فلز پایه رخ می دهد (شکل ۴ ج).

جوش و عمیق تر و باریک تر شدن جوش می شود [۱۷]. از این رو افزایش عمق نفوذ در ناحیه دو را می توان به ایجاد لایه اکسیدی در سطح و به موجب آن افزایش جذب پرتو لیزر توسط قطعه کار و تغییر جهت جریان گردابی به سمت داخل نسبت داد. به منظور بررسی استحکام کششی، از هر ورق جوش داده شده دو نمونه کششی آماده شد. نسبت استحکام جوش (نسبت استحکام ورق جوش داده شده به استحکام فلز پایه) بر حسب



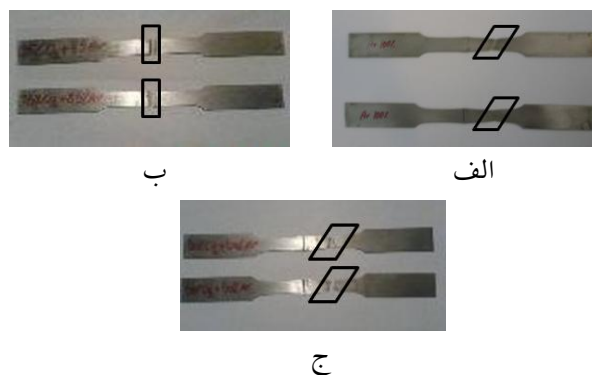
شکل (۳): نسبت استحکام جوش (نسبت استحکام جوش به فلز پایه) بر حسب درصد دی اکسید کربن موجود در گاز آرگون

(50% Ar+50% CO₂)I

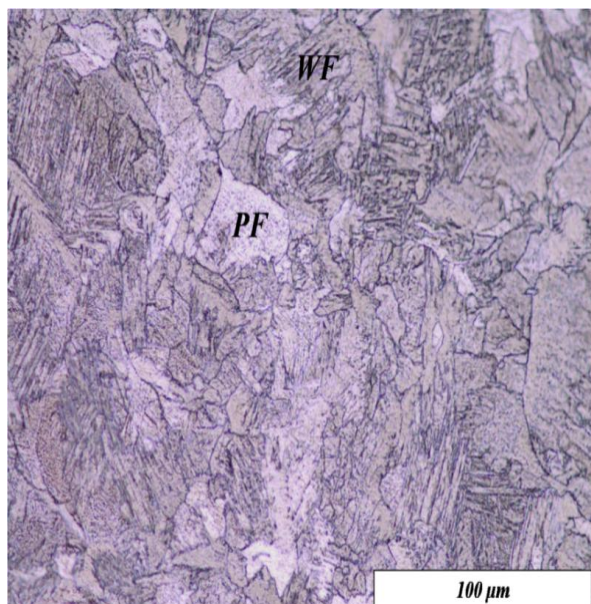
به منظور بررسی اثر گاز محافظ بر روی شکل پذیری جوش، نمونه های جوش داده شده به صورت لب به لب تحت آزمون خمش قرار گرفتند. در این آزمایش مشاهده شد که در جوش های حاصل از ناحیه دو (دی اکسید کربن بیش از ۱۵ درصد)، نمونه آماده شده به صورت کامل خم شد اما نمونه هایی که در آن ها نفوذ به صورت کامل نبود (نمونه های B، C و D) از ناحیه جوش شکسته شدند.

تصویر خمش نمونه های (100% Ar)A، (85% Ar+15% CO₂)D و (50% Ar+50% CO₂)I در شکل ۵ نشان داده شده است.

در شکل ۴ تصاویر نمونه های استحکام کششی (100% Ar)A، (85% Ar+15% CO₂)D و (50% Ar+50% CO₂)I نشان داده شده است.



شکل (۴): تصاویر شکست در نمونه های آزمون کشش: (الف): (100% Ar)A، (ب): (85% Ar+15% CO₂)D و (ج):



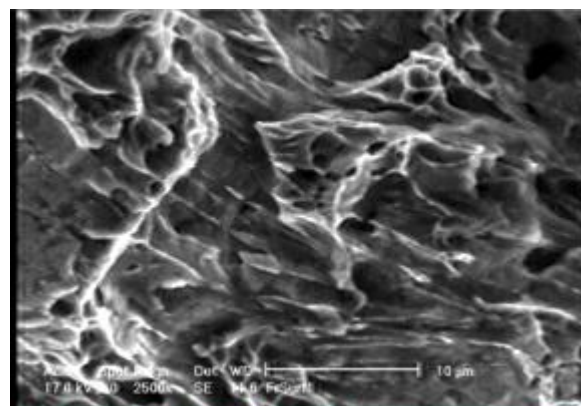
شکل (۷): ریز ساختار جوش نمونه A (100% Ar)، فریت چند وجهی (PF)، فریت ویدمن‌اشتن (WF)

در شکل ۸ سطح شکست نمونه I (50% Ar+50% CO₂) نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود سطح شکست این نمونه به صورت مخلوطی از شکست نرم و ترد است. شکل ۹ ریز ساختار جوش این نمونه را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که ریز ساختار این نمونه شامل فریت سوزنی (حدود ۶۳ درصد) و فریت چند وجهی درشت (حدود ۳۷ درصد) است. از آنجا که فریت سوزنی مقاومت بالایی در برابر رشد ترک دارد، بنابراین می‌توان شکست نرم را به حضور فریت سوزنی نسبت داد. مشاهده می‌شود که ساختار جوش این نمونه متشکل از فریت چند وجهی و فریت سوزنی است. عموماً رسوبات اکسیدی مکان‌های مناسبی برای جوانه زنی فریت سوزنی است [۱۱]. فریت‌های سوزنی به‌خاطر اندازه ریز و ساختار تودرتو مانع رشد ترک می‌شوند، اما امکان رشد ترک در فریت‌های ویدمن‌اشتن و مرزدانه‌ای به‌علت اندازه بزرگتر و مورفولوژی صفحه‌ای بیشتر است [۱۱]. از این رو می‌توان گفت استفاده از دی اکسید کربن در فلز جوش از طریق افزایش فاز فریت سوزنی در ساختار جوش موجب بهبود استحکام کششی و شکل‌پذیری جوش شده است.



شکل (۵): تصویر سطح خمش جوش نمونه‌های: (الف): A (100% Ar)، (ب): D (85% Ar+15% CO₂) و (ج): I (50% Ar+50% CO₂)

از جمله عوامل موثر بر خواص مکانیکی و کارایی جوش، ریز ساختار فلز جوش و منطقه متأثر از حرارت است. تصویر سطح شکست و ریز ساختار جوش نمونه A (100% Ar) به ترتیب در اشکال ۶ و ۷ نمایش داده شده است. تصویر ۶ نشان دهنده شکست ترد در این نمونه است. همچنین در شکل ۷ مشاهده می‌شود که ساختار جوش این نمونه متشکل از فریت سوزنی (حدود ۴۲ درصد) و فریت ویدمن‌اشتن (حدود ۵۸ درصد) است. از آنجا که فریت ویدمن‌اشتن فاز نسبتاً تردی است، بنابراین شکست ترد در این نمونه‌ها را می‌توان به حضور فاز فریت ویدمن‌اشتن نسبت داد.



شکل (۶): تصویر الکترونی روبشی از سطح شکست جوش نمونه A (100% Ar)

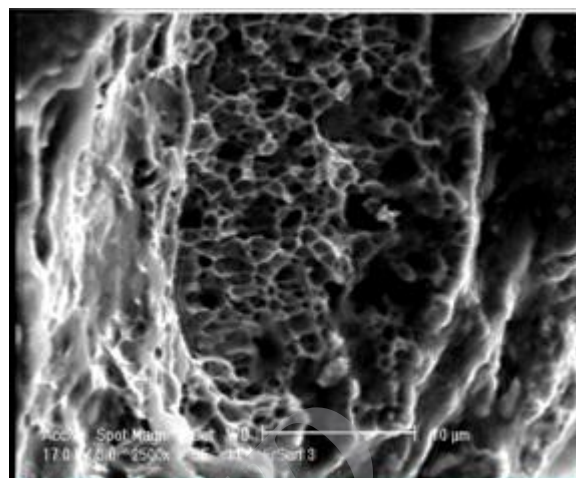
مخلوطی از فریت سوزنی و فریت چند وجهی تغییر می کند.
 ۳- استحکام کششی و شکل پذیری با افزایش دی اکسید کربن در ترکیب گاز محافظ بهبود می یابد.
 ۴- افزایش درصد دی اکسید کربن در جوش موجب تبدیل شکست ترد به مخلوطی از شکست نرم و ترد در جوش می شود.

۵- تشکر و قدردانی

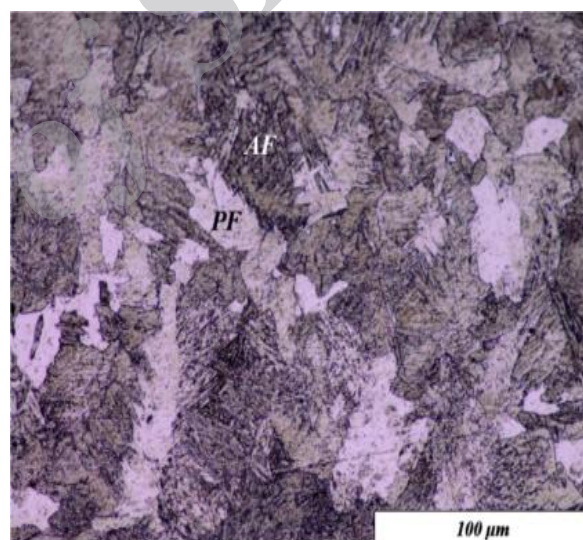
نویسندگان این مقاله بر خود لازم می دانند از از تمامی مسئولین و دست اندرکاران مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران بویژه جناب آقای علی چهرقانی بخاطر کمک ها و هم فکری هایشان قدردانی نمایند.

۶- مراجع

- [1] M. Yasunobu, H. Koji, K. Yukihsa & K. Junichi, "Welding Methods and Forming Characteristics of Tailored Blanks (TBs)". NIPPON STEEL TECHNICAL REPORT, No. 88, pp. 39-43. 2003.
- [2] D. Ashish & V. Jyoti, "A Novel Method for Lap Welding of Automotive Sheet Steel Using High Power CW CO₂ Laser", Proceedings of the 4th International Congress on Laser Advanced Materials Processing, 2006.
- [3] K. A. Elijah, "Principles of laser materials processing", John Wiley & Sons, New Jersey, 2009.
- [4] F. Malek Ghaini, M. J. Hamedi. M. J. Torkamany & J. Sabbaghzadeh, "Weld metal microstructural characteristics in pulsed Nd: YAG laser welding". Scripta Materialia, Vol. 56, pp. 955-958, 2007.
- [5] M. C. Collur, "Alloying element vaporization and emission spectroscopy of plasma during laser welding of stainless steels". PhD Thesis, Pensilvania State University, 1988.
- [6] M. Beck, P. Berger & H. Hugel, "The effect of plasma formation on beam focusing in deep penetration welding with CO₂ lasers". J. Phys. D: Appl. Phys, Vol. 28, pp. 2430- 2449, 1995.
- [7] D. Grevey, P. Sallamand, E. Cicala & S. Ignat, "Gas protection optimization during Nd: YAG



شکل (۸): تصویر الکترونی روبشی از سطح شکست جوش نمونه I (50% Ar + 50% CO₂)



شکل (۹): ریز ساختار جوش نمونه I (50% Ar + 50% CO₂)، فریت چند وجهی (PF)، فریت سوزنی (AF)

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش اثر افزودن گاز دی اکسید کربن به گاز محافظ آرگون بر روی شکل، استحکام کششی و شکل پذیری جوش بررسی و مشاهده گردید.

- ۱- با افزایش دی اکسید کربن تا ۱۵ درصد حجمی، عمق نفوذ جوش ۱۸ درصد کاهش اما در ادامه ۵۰ درصد افزایش می یابد.
- ۲- با افزایش درصد دی اکسید کربن در جوش، ریز ساختار جوش از مخلوطی از فریت چند وجهی و فریت ویدمن شدن به

- [12] M. Glowacki, "The effects of the use of different shielding gas mixtures in laser welding of metals". J. Phys. D- Appl. Phys, Vol. 28, pp. 2051-2059, 1995.
- [13] U. Reisgen, M. Schleser, O. Mokrov & E. Ahmed, "Shielding gas influences on laser weldability of tailored blanks of advanced automotive steels". Applied Surface Science, Vol. 257, pp. 1401-1406, 2010.
- [14] Standard Methods of Tension Testing of Metallic Materials, Philadelphia: Annual Book of ASTM Standards, E. 8, Vol. 03.01, 1983.
- [15] Standard Methods for Mechanical Testing of Welds, B4.0-85. International Standard Book Number: 87171-393-4, AWS Standard, 1992.
- [16] National institute of standard and technology, http://physics.nist.gov/cgi-bin/atdata/lines_form
- [17] L.U. Shanping, F. Hidetoshi and N. Kiyoshi, "Effects of CO₂ shielding gas additions and welding speed on GTA weld shape". Journal of Materials Science, Vol. 40, pp. 2481-2485, 2005.
- laser welding". Optics & Laser Technology, Vol. 37, pp. 647-651, 2005.
- [8] S. Dadras, M. J. Torkamany & J. Sabbaghzadeh, "Spectroscopic characterization of low-nickel copper welding with pulsed Nd: YAG laser". Optics and Lasers in Engineering, Vol. 46, pp. 769-776, 2008.
- [9] E. Biro, D. C. Weckman & Y. Zhou, "Pulsed Nd: YAG Laser Welding of Copper Using Oxygenated Assist Gases", Metall Mater Trans A, Vol. 33, pp. 2019-2030, 2002.
- [10] B. G. Chung, S. Rhee & C. H. Lee, "The effect of shielding gas types on CO₂ laser tailored blank weldability of low carbon automotive galvanized steel", Materials Science and Engineering, Vol. 272A, pp. 357-362, 1999.
- [11] M. Ebrahimnia, M. Goodarzi, M. Nouri & M. Sheikhi, "Study of the effect of shielding gas composition on the mechanical weld properties of steel ST 37-2 in gas metal arc welding". Materials and Design, Vol.30, pp.3891-3895, 2009.

Archive