بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

استفاده از آنالیز LIBS به منظور بررسی تغییرات غلظت نسبی منیزیم، در فلز جوش آلیاژ Al-5754 در فرآیند جوشکاری لیزری

مریم جندقی [۲] ، پرویز پروین[۱] و محمد جواد ترکمنی[۲]
[۱]دانشکدهٔ مهندسی هسته ای وفیزیک، دانشگاه صنعتی امیر کبیر
[۲] مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران

چکیده–اثر انرژیو پهنای تپ لیزر بر تغییر درصد ترکیبات آلیاژی فلز جوش نسبت به فلز اصلی، در جوشکاری آلیاژ *Al-5754* ، با لیزر *Nd:YAG*تپی در فاز چالهٔ کلیدی بطور تجربی مورد بررسی قرار گرفت. اندازه‌گیری درصد عناصرآلیاژی در فلز جوش در شرایط مختلف جوشکاری توسط طیف سنجی *LIBS* انجام شده و نتایج بدست آمده حاکی از آن است که:در تمام شرایط مختلف جوشکاری، درصد منیزیم در فلز جوش کاهش، و در مقابل درصد آلومینیم افزایش می یابد. همچنین غلظت نسبی آلومینیم به منیزیم درفلز جوش نسبت به تغییرات چگالی توان لیزر، در بازهٔ وسیعی از توانهای تابشی بدون تغییر مانده اما با افزایش پهنای پالس لیزر، به صورت خطی، افزایش یافته است.

کلید واژه- آلیاژ *Al-5754* ، تغییرات درصد عناصر آلیاژی، جوشکاری لیزری، طیف سنجی *LIBS*، لیزر*Nd:YAG* پالسی

Using LIBS analysis to get themagnesiumrelative concentration changes in the weld metal of Al-5754 alloy during laser welding

M. Jandaghi[1], P. Parvin[1], M. J. Torkamany[2]
[1]Physics Department, Amirkabir University of Technology, P.O.Box15875-4413,Tehran, Iran
[2]Iranian National Center for Laser Science and Technology, P.O. Box 14665-576, Tehran, Iran

Abstract- The effectof pulse duration and power densityon the weld metal composition change in aluminum alloy 5754 in keyhole mode welding, using a long pulsed Nd:YAG laser was investigatedexperimentally. The concentrations of aluminum and magnesium elements, in the weld metal were determined by laser induced breakdown spectroscopy (LIBS) for different conditions. The results show that, the concentration of magnesium in the weld metal decreases, while the aluminum concentration increases. Moreover, the variation of Al to Mg concentration ratio is negligible while varying the laser power density and it linearly increases with increasing the pulse duration.

Keywords:Alloying element losses, Aluminum alloy 5754, LIBS, Laser welding, pulsed Nd:YAG laser.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

۱-مقدمه

در جوشکاری آلیاژهای مهمی چون آلیاژهای آلومینیم و فولاد با باریکهٔ لیزر، تبخیر سریع عناصر فراری چون منیزیم و منگنز از سطح حوضچهٔ مذاب، باعث تغییر درصد عناصر آلیاژی در فلز جوش نسبت به فلز اصلی می‌شود. این مسأله سبب تغییر خواص فیزیکی ومتالوژیکی فلز جوش نسبت به فلز اصلی شده، که این خود مسبب تولید معایبی چون ایجاد ترک وکاهش خواص کششی و استقامتی فلز در ناحیهٔ جوش می‌گردد. بنابراین به حداقل رساندن این تغییرات در جوشکاری صنعتی آلیاژها، بسیار مورد توجه است. به این منظور دستیابی به یک روش تشخیصی و یک تئوری جامع که بتواند در توانهای لیزری بالا یعنی در جوشکاری در فاز چالهٔ کلیدی، وابستگی تغییر درصد عناصر آلیاژی را به پارامترهای مهم لیزری پیشگویی کند، بسیار حائز اهمیت است[1,2]. در سال ۱۹۹۲ دبروی با ارائهٔ یک تئوری جامع مبتنی بر نظریهٔجنبشی گازها توانست مدلی را برای محاسبهٔ تغییر درصد عناصر آلیاژی در فاز رسانشی یعنی در توانهای پایین لیزری، ارائه دهد[3]. اما در توانهای بالای تابشی که فرآیند جوشکاری در فاز چالهٔ کلیدی و تشکیل پلاسما، اتفاق می‌افتد، بررسی تغییر درصدعناصر آلیاژی از اهمیت بیشتری در صنعت برخوردار است. در این مقاله، یک مدل تئوری منطبق بر نظریهٔ جنبشی گازها و قوانین هیدرودینامیک، برای تخمین میزان تبخیر عناصر، طی فرآیند جوشکاری ارائه گردیده است که با استفاده از آن ونتایج بدست آمده از شبیه‌سازی شکل چالهٔکلیدی، تغییر درصد عناصر آلیاژی، وابسته به پارامترهای لیزری را می‌توان محاسبه کرد. همچنین با استفاده از طیف سنجی LIBS پس از جوشکاری آلیاژ آلومینیم، تغییردرصد عناصر آلیاژی در فلز جوش در فاز چالهٔکلیدی، به شکل تجربی اندازه گیری شد و با نتایج حاصل از شبیه سازی مقایسه گردید.

۲-روش تجربی

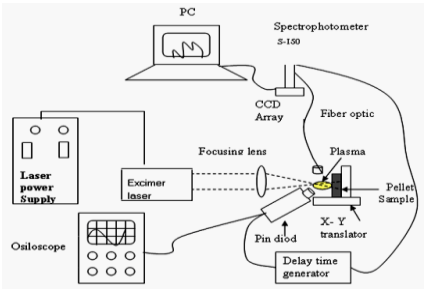
یک لیزر Nd:YAG، مدل IQL-10 با طول تپ msec، و توان میانگین W ۴۰۰ به عنوان چشمهٔ لیزر برای جوشکاری ورقهای آلومینیم Al-5754 به ضخامت mm ۲.۵ وابعاد cm ۲*۲به‌کار گرفته شد.در صد غلظتهای عناصر آلیاژی Al-5754 در جدول ۱ آورده شده است.

جدول۱. درصد ترکیبات آلیاژ Al-5754

Element	Si	Mn	Cr	Ni	Fe	Mg	Sn	Bi	B	Co	Cu	Ga	Ti	V	Al
Wt%	0.12	0.25	0.08	0.006	0.37	3.009	0.002	0.004	0.0018	0.004	0.04	0.01	0.014	0.009	balance

تمرکز باریکهٔ لیزر با فاصله کانونی ۷۵mm و قطر لکهμm ۲۰۰ همراه با شارش گاز محافظ آرگون Arlit/min ۱۵انجام گرفت. برای بررسی اثر پهنای پالس و چگالی توان لیزر بر تغییرات عناصر آلیاژی، در یک پهنای تپ ثابت ،انرژی تپ لیزر از ۴.۵ تا ۱۰.۵ ژول تغییر داده شد وسپس در یک چگالی توان ثابت، پهنای پالس لیزر از ۳ تاms۷جاروب گردید.

برای طیف سنجی LIBS مطابق شکل۱ از یک لیزر اگزایمر با انرژی بر پالس mJ/pulse ۴۰، پهنای پالسns۲۰، نرخ تکرارHz۱۰ و در طول موج nm۱۹۳برای تولید میکرو پلاسمای آلیاژ آلومینیوم استفاده شد. یک جفت لنز کوارتز با فاصلهٔ کانونیmm ۷۵ برای افزایش توان تابشی به نمونه، جلوی باریکهٔ لیزر تعبیه گردید. بیناب سنج مورد استفاده در این آزمایش‌ها دستگاه اسپکترومتر مدل S150 با بازهٔ طیفیnm۱۱۰۰-۲۰۰ می‌باشد. تجهیزات دیگر مورد استفاده در این بیناب سنج، عبارت است از : آشکارساز CCD مدل Toshiba TCD 130 AP با ۳۶۴۸ عدد پیکسل برای دریافت و ثبت اطلاعات و همچنین فیبر نوری برای ارتباط با منبع نور. با کمک این توری می توان محدوده وسیعی از بیناب را با کیفیت بینابی بالا شناسایی کرد.



شکل۱. طرحواره‌ای از سیستم LIBS مورد استفاده در آزمایش

۳-تئوری

برای محاسبهٔ چگالی و دمای الکترونی پلاسما در طیف سنجی LIBS می‌توان از روابط زیر استفاده کرد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

$$T_e = \frac{5040\,(E_S - E_P)}{\log\left[\frac{g_s\,A_s\,q}{g_p\,A_{pq}}\right] - \log\left[\frac{\lambda_s}{\lambda_p}\right] - \log\left[\frac{I_{sq}}{I_{pq}}\right]} \quad (1)$$

که در آن S و P نشان دهندهٔ خطوط مجزای اتمی، E انرژی تراز اتمی، λ طول موج تراز مربوطه، I شدت خط اندازه‌گیری شده در آزمایش، A احتمال گذار اتمی و g تبهگنی تراز است. در نتیجه می‌توان با اندازه‌گیری شدت خطوط اتمها نسبت به یکدیگر، دما را مطابق فرمول۱ بدست آورد. برای محاسبهٔ چگالی الکترونی پلاسما می‌توان از روش پهن شدگی استارک استفاده کرد. پهن شدگی استارک در اثر برخورد ذرات باردار الکترون‌ها و یون‌ها با گسیلنده به‌وجود می‌آید. فرمول پهن شدگی به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\omega_{total} = [1+1.75\,b(1-0075r)]\left(\frac{n_e}{10^{16}}\right)\omega \quad (2)$$

که در آن ω پارامتر برخورد الکترون، r نسبت فاصله میانگین یونها بطول دبای و b پارامتر تأثیر یونها می‌باشد. اگر پهن شدگی را فقط ناشی از برخورد الکترونها فرض کنیم(A=0). با استفاده از فرمول ۲و اندازه گیری ω_{total} از طریق طیف سنجی می توان n_e را مشخص کرد.

اگر بخواهیم با استفاده از این آنالیز نسبت غلظت دو عنصر A و B موجود در نمونه را محاسبه کنیم از رابطهٔ زیر استفاده می‌شود.

$$\frac{n^A}{n^B} = \frac{I_{ij}A_{mn}U^A(T)g_m}{I_{mn}A_{ij}U^B(T)g_i}\ \exp^{\left(\frac{-(E_m-E_{i)}}{kT}\right)} \quad (3)$$

که در آن k ثابت بولتزمن، E انرژی ترازها وU تابع پارش استکه از فرمول زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$U^{s(T)} = \sum_i g_i\ \exp^{\left(\frac{-E_{i)}}{kT}\right)} \quad (4)$$

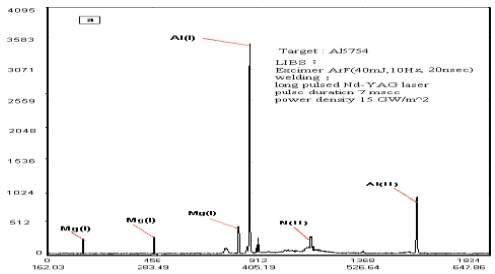
کمیتهای مورد استفاده در فرمولهای بالا را می‌توان از سایت (NIST) بدست آورد[4-7]. در کار قبلی به طور مبسوط، با استفاده از یک تئوری جامع مبتنی بر قوانین جنبشی گازها، روش محاسبهٔ تغییرات عناصر آلیاژی نسبت به پارامترهای لیزری شرح داده شده است و از آوردن روابط مربوط به آن در این کار صرفنظر شده است[4,5,6].

۴-نتایج و بحث

در فرمول ۳ اگر اندیس A را برای آلومینیم واندیس B را برای منیزیم استفاده کنیم، می‌توانیم غلظت نسبی آلومینیم به منیزیم را با استفاده از اندازه‌گیری شدت بدست آمده از آنها در طیف سنجیLIBS محاسبه کنیم. در شکل ۲ نمونه‌ای از طیف بدست آمده از آنالیز LIBS آورده شده است. در این جا از خط تابشی منیزیم (MgI) در طول موج ۲۸۵.۲ nm و خط تابشی آلومینیمAlI)(در طولموج ۳۹۶.۱ nm برای محاسبهٔ چگالی نسبی استفاده شده است. برای هر نمونه ۱۰ عدد طیف گرفته شده که از این اعداد برای محاسبهٔ نسبت شدتها، میانگین‌گیری به‌عمل آمده است. در جدول 1میزان خطای بدست آمده از هر اندازه‌گیری و میانگین اندازه‌ها ثبت شده است.

جدول ۲. شدتهای میانگین و خطای بدست آمده از خطوط تابشی آلومینیم و منیزیم

پهنای پالس لیزر جوشکاری	3m sec	4ms ec	5ms ec	6ms ec	7m sec
شدت میانگین (285.2 nm, MgI)	211	202	197	193	190
%RSD (285.2 nm, MgI)	2	1.3	1.5	2.2	1.9
شدت میانگین (396.1 nm, AlI)	2956	3328	3458	3689	3805
%RSD (396.1 nm, AlI)	1.7	2	1.9	2.1	1.6

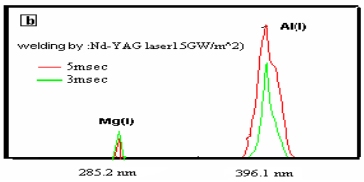


شکل۲. نمونه‌ای از طیف بدست آمده از آنالیز LIBS بر روی نمونهٔ فلز جوش در شرایط جوشکاری با پهنای پالس۷msecو چگالی توان تابشی۱۵GW/m^2

در شکل۳ دو خط مشخصهٔ تابشی، برای دو فلز جوش در شرایط جوشکاری مختلف با هم مقایسه شده است. هر دو نمونه در چگالی توان تابشی۱۵GW/m^2 و در دو پهنای پالسی متفاوت ۵msecو۳ تابش دهی شده است. همانطور که از شکل نتیجه می‌شود، نسبت شدت آلومینیم به منیزیم در طیف سنجی از فلز جوش، جوشکاری شده در پهنای پالسی ۳msec ، کوچکتر از این نسبت، در طیف

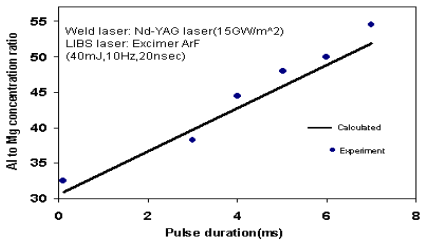
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

سنجی از فلز جوش، جوشکاری شده در پهنای پالسی5msecمی‌باشد



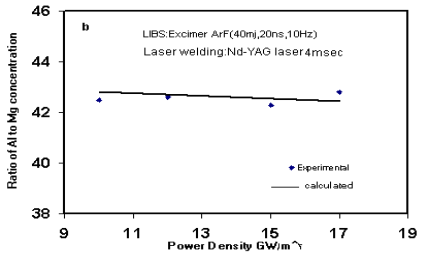
شکل۳. دو خط مشخصهٔ تابشی، برای دو فلز جوش در پهنای پالسی متفاوت ۳ و۵msec و چگالی توان تابشی۱۵GW/m^2

این مطلب نشان دهندهٔ کاهش منیزیم و افزایش آلومینیم در فلز جوش، بعد از جوشکاری لیزری می‌باشد، که با پیش بینی ما از فرار عناصر فرار، همخوانی دارد. شکل۴ اثر پهنای پالس لیزر بر تغییرات غلظت نسبی آلومینیم به منیزیم را نشان می‌دهد. برای تهیهٔ نمونه‌ها، چگالی توان لیزر ثابت نگه داشته شده است. در این آزمایشها دما و چگالی الکترونی پلاسمای ایجاد شده در طیف سنجی LIBS مطابق با آنچه در بخش قبل به آن اشاره شد محاسبه گردید. دمای پلاسمابه طور نوعیK $۱۰^{۴}$ و چگالی الکترونی با استفاده از پهن شدگی استارک خط نیتروژن (NII) در طول موج۵۰۱nm، مقدار $۱۰۱۸cm^{-3}$ بدست آمد.



شکل۴. تغییرات غلظت نسبی آلومینیم به منیزیم با پهنای پالس لیزر

غلظت نسبی آلومینیم به منیزیم در فلز مبنا ۳۲ می‌باشد، و همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده، با افزایش پهنای پالس لیزری، این غلظت نسبی نیز افزایش یافته است که این خود حاکی از، کاهش درصد منیزیم و افزایش درصد آلومینیم در فلز جوش با افزایش زمان پرتودهی است. شکل۵ تغییرات غلظت نسبی آلومینیم به منیزیم در یک پهنای پالس ثابت را، با چگالی توان تابشی لیزر نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، غلظت نسبی آلومینیم به منیزیم در بازهٔ وسیعی از چگالی‌های توان لیزر بدون تغییر می‌ماند.



شکل۵.تغییرات غلظت نسبی آلومینیم به منیزیم با چگالی توان تابشی لیزر. در یک پهنای پالس ثابت 4msec

یا به عبارتی دیگر، غلظت نسبی آلومینیم به منیزیم، نسبت به چگالی توان لیزر حساس نیست. بنابراین برای رسیدن به یک عمق بالاتر جوش، به جای بالا بردن پهنای پالس لیزر، می‌توان چگالی توان لیزر را افزایش داد تا آثار مخرب تغییرات عناصر آلیاژی را به حداقل رساند.

۵-نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده از این پژوهش به شرح زیر می‌باشد:

۱- می‌توان از آنالیز عنصری LIBS به عنوان یک تکنیک مطمئن و مناسب جهت بررسی تغییرات عنصری فلز جوش استفاده کرد.

۲- با افزایش پهنای پالس لیزر، نسبت چگالی آلومینیم به منیزیم در فلز جوش نسبت به فلز اصلی به صورت خطی افزایش پیدا می‌کند. در نتیجه با کاهش پهنای پالس، می‌توان تغییرات عناصر آلیاژی را کاهش داد. اما باید در نظر داشته باشیم که پهنای پالس لیزر باید به اندازه‌ای باشد که اتصال مناسب دو قطعه انجام پذیرد. بنابراین انتخاب پهنای پالس بهینهٔ لیزر و چگالی توان آن، با توجه به ضخامت قطعهٔ کار و نمودارهای بدست آمده می تواند انجام شود.

۳- غلظت نسبی آلومینیم به منیزیم در فلز جوش، در بازهٔ وسیعی از چگالی توان لیزر بدون تغییرمی‌ماند.

مراجع

[1] M. Jandaghi, P. Parvin, M. J. Torkamany, J. Sabbaghzadeh, J. Phys. D: Applied Physics, 2008, vol. 41, pp 235503.

[2] H. Zhao and T.Debroy, Metall.Trans.B, 2001, vol.32B, PP.163

[3] k. Mundra and T.Debroy, Metall. Trans.B, 1993, vol.24B, pp.145

[4] M. Jandaghi, P. Parvin, M. J. Torkamany, J. Sabbaghzadeh, J. Phys. D: Applied Physics, 2009, vol. 42, pp 235503.

[5] J. Hoffman Z. Symanski, J.phys D: Appl .phys. 37 (2004) 1792-1799.

[6] Z. Symanski, G. Kurzyna, W. Kalita, J.phys D: Appl .phys. 30(1997) 3153-3162.

[7] NIST Elctronic Database and http://physics. Nist.gov/ physRefData/ASD/line_form.html

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]