بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۵-۱۶ بهمن ۱۳۹۸

بررسی بیناب نشری ابر لیزر- بخار در پوشش‌دهی لیزری با پودر St 410 روی صفحه St 304 بوسیله لیزر فیبری پیوسته ۳ کیلووات

نرگس عجم‌گرد[۱]، علی چهرقانی[۲]، محمدجواد ترکمنی[۲]، عطاملک قربان‌زاده[۱]، محمدجواد سبحانی[۲]، عطاالله کوهیان[۱]، سید حسن نبوی[۲]

[۱] دانشکده فیزیک دانشگاه تهران، تهران، خیابان کارگر شمال،۱۴۳۹۹۵۵۹۶۱ ؛ [۲] مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران

چکیده – در این مقاله تأثیر توان لیزر بر ویژگی‌های پو شش ایجاد شده در فرآیند پو شش‌دهی لیزری با رویکرد بیناب نمایی مورد بررسی قرار گرفته است. در این آزمایش از یک لیزر فیبری پیوسته با توان بیشینه ۳ کیلووات (۱۰۸۰ نانومتر) برای ایجاد پوششی از پودر St 410 بر روی صفحه St 304 مورد استفاده قرار گرفته است. دمای الکترونِ ابر لیزر- بخار، با استفاده از توزیع بولتزمن خطوط نشری انتخابی آهن خنثی در طول‌موج‌های 382.782, 386.552, 393.029, 438.354 و 526.953 نانومتر محا سبه شده است. بر رسی نتایج ن شان می‌دهد که با افزایش توان لیزر دمای الکترون کاهش و عامل رقیق سازی افزایش می‌یابد. چنین نتیجه‌ای می‌تواند برای ایجاد یک سیستم کنترل برخطِ عامل رقیق‌سازی در فرآیند پوشش‌دهی لیزری مفید باشد.

کلید واژه- بیناب نمایی نشری، ابر لیزر- بخار، پوشش‌دهی لیزری، دمای الکترون، لیزر پیوسته ۳کیلووات.

Emission spectroscopy of plasma plume induced in CW fiber laser cladding of St 410 powder on St 304 substrate

Narges Ajamgard[1], Ali Chehrghani[2], Mohammadjavad Torkamany[2], Atamalek Ghorbanzade[1], Mohammad Javad Sobhani[2], Ataallah Koohian[1], Seyed Hasan Nabavi[2]

[1] Physics Department, University of Tehran, North Kargar

[2] Iranian National Center for Laser Science and Technology (INLC)

Abstract- **spectroscopic approach was used to study the effects of laser power on quality of clad layer produced with laser cladding. A CW fiber laser with a 3 KW maximum power (1080 nm) was used to produce clad with St 410 powder on St 304 substrate. The plasma plume electron temperature T_e is computed from the Boltzman plot for five discrete Fe I lines at** 382.782, 386.552, 393.029, 438.354 and 526.953 nm wavelength. We have found that the electron temperature decreases and dilution increases as the laser power is enhanced. Such a result could be useful to develop an online monitoring system of the dilution.

Keywords: CW fiber laser 3 KW, Electron temperature, Emission Spectroscopy, Laser cladding, Plasma Plume.

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]

مقدمه

امروزه پوشش‌دهی لیزری به‌عنوان یکی از فن‌آوری های ساخت - افزایشی[۱]، در صنایع مختلفی نظیر هوافضا، خودرو و کشتی سازی و نفت وگاز مورد توجه قرار گرفته است. از این روش می‌توان برای افزایش مقاومت سطوح در برابر سایش و خوردگی، تولید و تعمیر سازه‌های داخلی، نمونه سازی[۲] سریع و تولید قطعات پیچیده در حجم کم استفاده کرد. در روش پوشش‌دهی لیزریِ پودری (یک مرحله‌ای)، پودر آلیاژ یا سرامیک روی بستر موردنظر پاشیده و همزمان توسط یک پرتوی لیزری ذوب می‌شود و سپس روی بستر رسوب می‌کند. برای ذوب شدنِ پودر به لیزری با توانی از مرتبهٔ کیلووات نیاز است. طی این فرآیند نقص هایی در نتیجه افت و خیز در پارامترهای آزمایش (مانند توان لیزر، جریان پودردهی، فاصله کانونی، سرعت پوشش‌دهی) به‌وجود می‌آید؛ بنابراین توانایی کنترل و نظارت برخط طی فرآیند، در صنعت بسیار مهم می‌باشد. بدین منظور تاکنون روش‌های مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است که مهمترین آن‌ها عبارت‌اند از: عکسبرداری فوق سریع در ناحیه مرئی یا فروسرخ، گرماسنجی نوری و فروسرخ، استفاده از بیناب سنجی شکست القایی لیزر[۳] و بیناب نمایی ابر لیزر- بخارِ[۴] تولید شده در فرآیند [۱و۲]. با توجه به ساده‌تر بودن چیدمان در روش آخر که موجب افزایش بهره‌وری می‌شود، این روش در صنعت بیشتر مورد توجه می‌باشد. در عین حال به‌دلیل پایین بودن چگالی تابشی در پوشش‌دهی لیزری ($10^3 - 10^5$ W/cm^2)، چگالی و دمای پلاسمای تولید شده پایین و درنتیجه آشکارسازی آن دشوار خواهد بود و تا کنون مطالعات معدودی در این زمینه منتشر شده است [۳-۵].در این مقاله با استفاده از بیناب نمایی نشری ابر لیزر- بخار، ارتباط بین دمای الکترونِ ابر لیزر- بخار و ویژگی های پوشش ایجاد شده، جهت کنترل برخط فرآیند، مورد بررسی قرار گرفته است.

مبانی نظری

برای اندازه‌گیری دمای الکترونِ ابر لیزر- بخارِ تولیدی در فرآیند پوشش‌دهی لیزری می‌توان از توزیع بولتزمن خطوط بیناب نشری استفاده کرد. با توجه به برقراری شرط تعادل ترمودینامیک موضعی[۵]، چگالی جمعیت تراز برانگیخته با توزیع بولتزمن به‌صورت رابطه زیر بیان می‌شود[۶]:

$$n_m = \frac{g_m}{Z(T)} \exp(-E_m/KT) \qquad (۱)$$

که g_m، Z، E_m، K و T به ترتیب عبارت‌اند از تبهگنی تراز mام، تابع پارش اتم، انرژی حالت برانگیخته (ev)، ثابت بولتزمن ($ev.K^{-1}$) و دمای الکترون (K) .

از طرفی شدت یک خط نشری مربوط به گذار m به n به‌صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$I_{mn} = n_m A_{mn} h\mathcal{V}_{mn} \qquad (۲)$$

که $h\mathcal{V}_{mn}$ انرژی فوتون نشر شده و A_{mn} احتمال گذار را نشان می‌دهند. با جایگذاری رابطه ۱ در ۲ و انجام محاسبات ساده ریاضی خواهیم داشت:

$$Ln\left(\frac{I_{mn}\lambda_{mn}}{g_m A_{mn}}\right) = Ln\ \frac{Nhc}{Z(T)} - \frac{1}{KT}E_m \qquad (۳)$$

که λ_{mn} طول‌موج مربوط به خط بیناب نشری، C سرعت نور و N تعداد کل اتم‌ها یا یون‌ها است. با رسم منحنی تغییرات $Ln\left(\frac{I\lambda}{gA}\right)$ برحسب E برای خطوط بیناب یک عنصر مشخص، خط مستقیمی با شیب $1/KT$ به‌دست می‌آید که از آن می‌توان دمای الکترونِ ابر لیزر- بخار را به‌دست آورد.

---

[۱] Laser Additive Manufactoring
[۲] Prototyping
[۳] Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS)
[۴] Plasma Plume
[۵] Local Thermodynamic equilibrium (LTE)

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]

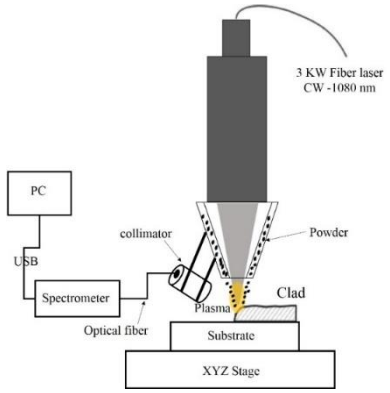
مواد، چیدمان و روش آزمایش

در این آزمایش از یک لیزر فیبری با توان بیشینه ۳ کیلووات با طول‌موج ۱۰۸۰ نانومتر به عنوان منبع گرمایی استفاده شد. آلیاژهای مورد استفاده در این آزمایش به عنوان بستر و پودر به ترتیب، صفحه St 304 (به ضخامت ۶ میلیمتر) و پودر St 410 (سایز ذرات ۱۰۰-۲۰ میکرومتر) بودند. همچنین از گاز آرگون به‌عنوان گاز محافظ استفاده شد. شکل ۱ تصویری از چیدمان آزمایش را نشان می‌دهد. اندازه‌گیری‌های بیناب نمایی توسط یک دستگاه بیناب‌سنج "stellarnet Inc." مدل "EPP200-UV" با قابلیت تفکیک‌پذیری ۰٫۴ نانومتر در بازه طول‌موجی ۶۰۰-۲۰۰ نانومتر انجام گرفت. علاوه بر این به منظور حرکت بستر در هنگام پوشش‌دهی از یک میز قابلِ کنترل بوسیله کامپیوتر در هر سه جهت XYZ استفاده شد.

در این آزمایش نرخ پودردهی و جریان گاز آرگون ثابت و به‌ترتیب مقدار gr/mm ۴۰ و L/min ۷ تنظیم گردیدند. همچنین ارتفاع لیزر تا سطح بستر نیز مقدار ثابت mm ۱۵ انتخاب شد. ارتفاع لیزر، تعیین کنندهٔ سایز لکه‌ی لیزری روی بستر می‌باشد. در ارتفاع انتخاب شده، سایز لکهٔ لیزری ۴ میلیمتر است و پوششی به عرض حدوداً ۴ میلیمتر نیز ایجاد می‌کند. آزمایش در ۳ مرحله با ۳ توان ۲، ۲٫۵ و ۳ کیلووات و سرعت ثابت ۸ میلیمتر بر ثانیه انجام شد.

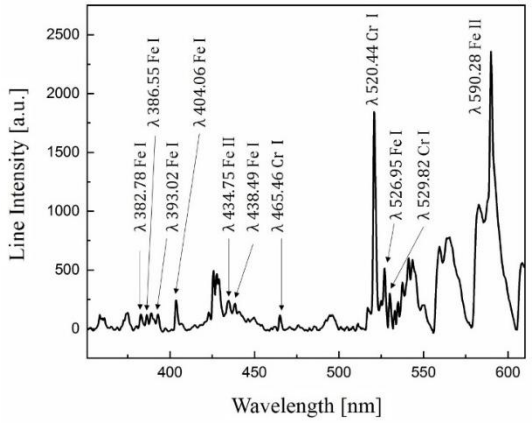
نتایج

خطوط تابشی مشاهده شده بر روی یک پس‌زمینه پیوسته ناشی از تابش حرارتیِ ابر لیزر- بخار، قرار دارند. برای اندازه‌گیری دقیق شدت خطوط تابشی می‌بایست پس‌زمینه پیوسته حذف شود که برای این کار از امکان Curve Fitting Tool در نرم‌افزار متلب استفاده شد. شکل ۲ نمونه ای از بیناب نشری بدست آمده پس از حذف پس‌زمینه را



شکل۱: تصویری از چیدمان مورد استفاده در آزمایش‌های پوشش-دهی لیزری.

نشان می‌دهد. با توجه به پایین بودن چگالی تابشی، ابرِ ایجاد شده بیشتر شامل اتم‌های خنثی می‌باشد. همچنین با توجه به درصد وزنی عناصر موجود در بستر و پودر استفاده شده در آزمایش، تعداد زیادی از خطوط تابشی آهن خنثی در بیناب نشری مشاهده می‌شود. دمای الکترون با استفاده از توزیع بولتزمن خطوط نشری انتخابی آهن خنثی (FeI) محاسبه شده است. اطلاعات خطوط به‌کار رفته (A_{mn}, g, E_m) برای محاسبه‌ی دمای الکترونِ پلاسما از پایگاه داده‌ی موسسه ملی استاندار و فناوری آمریکا [۶] استخراج شده است. دمای الکترون از پنج خط طیفی آهن خنثی با طول‌موج های 382.782, 386.552, 393.029, 438.354 و 526.953 نانومتر به‌دست آمده‌است.



شکل۲: نمونه‌ای از بیناب نشری ابر لیزر-بخار پوشش‌دهی لیزری.

[۶] National Institute of Standard and Technology (NIST)

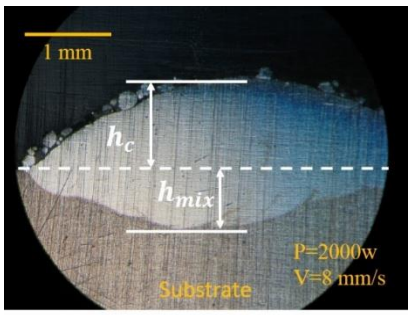
این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]

شکل۳ تصویری از سطح مقطع عرضی پوشش ایجاد شده، زیر میکروسکوپ با بزرگنمایی ۵ را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل نمایان است با نفوذ پودر در بستر مقداری از آن تغییر ماهیت داده است. بدین ترتیب عامل رقیق سازی[۷] به صورت زیر بیان می‌شود:

$$d \approx \frac{h_{mix}}{h_{mix}+h_c} \times 100\% \qquad (۴)$$

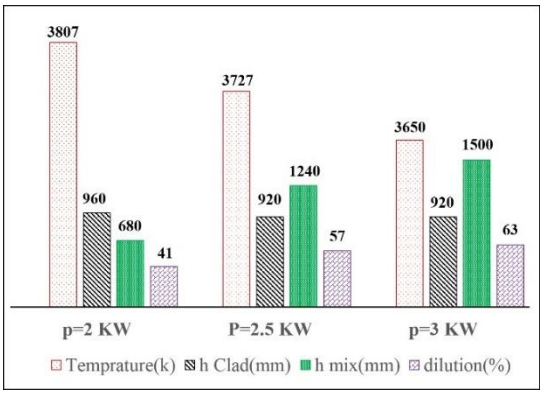
که در آن h_{mix} عمق نفوذ پودر در بستر و h_c ارتفاع پوشش است. با توجه به مخرب بودن تغییر ماهیت بستر، هرچه این مقدار کمتر باشد، مطلوب‌تر است.



شکل۳: تصویر سطح مقطع عرضی پوشش ایجاد شده با بزرگنمایی۵.

در این آزمایش ضمن ثابت نگه‌داشتن سرعت و سایر پارامترها، اثر تغییر توان لیزر مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به محاسبات انجام شده، با افزایش توان لیزر، دمای ابر لیزر- بخار کاهش و عامل رقیق‌سازی افزایش می‌یابد (در نتیجه افزایش مقدار h_{mix} را خواهیم داشت) (شکل ۴).

باتوجه به پیچیده بودن سینماتیک ابر لیزر- بخار (پلاسما)، رسیدن به رابطه‌ای ریاضی بین دمای پلاسما و توان لیزر بسیار مشکل است. اما با جمع‌بندی نتایج به‌دست آمده می‌توان اینگونه استدلال کرد که دمای الکترونِ ابر لیزر- بخار با توان لیزر و عامل رقیق‌سازی رابطه‌ای عکس دارد. بدین ترتیب که با افزایش توان لیزر عامل رقیق‌سازی و یا به عبارتی h_{mix} که عاملی نامطلوب است افزایش می‌یابد که موجب می‌شود، هسته داغ مرکزیِ ابر در عمق بیشتری تشکیل شده در نتیجه دمای ثبت شده برای پلاسما کاهش می‌یابد. این روند به خوبی در شکل۴ قابل مشاهده است. بنابراین با ایجاد یک رابطه بین دمای پلاسما و عامل رقیق‌سازی می‌توان از بیناب نمایی برای کنترل کیفیت پوشش ایجاد شده به‌صورتِ برخط، استفاده کرد.



شکل۴: دمای الکترونِ ابر لیزر- بخار و ویژگی‌های فیزیکی پوشش ایجاد شده برای سه توان ۲، ۲٫۵ و ۳ کیلووات.

مرجع‌ها

[1] G.Tapia and A. Elwany. "A review on process monitoring and control in metal-based additive manufacturing." Manufacturing Science and Engineering 136.6, 2014.

[2] V. N. Lednev, et al. "In situ multi-elemental analysis by laser induced breakdown spectroscopy in additive manufacturing." Additive Manufacturing 25, 64-70, 2019.

[3] B. Chen, et al. "A study on spectral characterization and quality detection of direct metal deposition process based on spectral diagnosis." The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 96.9-12, 2018.

[4] J. Shin, and J. Mazumder. "Composition monitoring using plasma diagnostics during direct metal deposition (DMD) process." Optics & Laser Technology 106, 40-46, 2018.

[5] W. Ya, et al. "Spectroscopic monitoring of metallic bonding in laser metal deposition." Journal of materials processing technology 220, 276-284, 2015.

[6] Griem, H. R. "Principles of Plasma Spectroscopy, Cambridge Uni." Press, Cambridge (1997).

[۷] Dilution

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]