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

ذوب سطحی آلیاژ منیزیم AZ91 پیش اسپری شده با پودر WC-Co توسط لیزر Nd:YAG پالسی

بابک مهرجو[۱]، رضا سلطانی[۱]، محمود حیدرزاده سهی[۱] و محمد جواد ترکمنی[۲]

[۱] دانشکده متالورژی و مهندسی مواد، دانشگاه تهران، تهران، ایران، صندوق پستی ۴۵۶۳-۱۱۱۵۵

[۲] آزمایشگاه فراوری مواد با لیزر، مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران، صندوق پستی ۵۷۶-۱۴۶۶۵

چکیده - در این تحقیق امکان ایجاد لایه‌های سطحی حاوی ترکیبات کاربید تنگستن روی آلیاژ منیزیم *AZ91* با استفاده از ذوب سطحی توسط لیزر مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا پوشش *WC-Co* توسط فرایند پاشش پلاسمایی *Air Plasma Spray (APS)* روی زیرلایه منیزیمی نشانده شد و سپس عملیات ذوب سطحی توسط لیزر پالسی *Nd:YAG* در سرعت‌های مختلف انجام شد. مطالعه مقاطع نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری حاکی از ایجاد لایه هایی با ساختاری کاملا ظریف بود. پراش سنجی پرتو *X* حضور ذرات کاربید تنگستن را در ناحیه ذوب شده تایید نمود. آزمایش میکروسختی افزایش بیش از ۲ برابری سختی ناحیه ذوب شده در مقایسه با زبر لایه منیزیمی را نشان داد.

کلید واژه- آلیاژ منیزیم AZ91، پودر WC-Co، ذوب سطحی، لیزر پالسی Nd:YAG .

Pulsed Nd:YAG laser surface melting of AZ91 pre-sprayed with WC- Co

Babak Mehrjou[1], Reza Soltani[1], Mahmoud Heydarzadeh Sohi[1] and Mohammad Javad Torkamany[2]
[1] School of Metallurgy and Materials Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, P.O Box 11155-4563
[2] Laser Material Processing Lab, Iranian National Center for Laser Science and Technology (INLC), Tehran, Iran, P.O Box 14665-576

Abstract- In the present work, formation possibility of surface layer containing tungsten carbide on AZ91 substrate by pulsed laser during surface melting was investigated. AZ91 magnesium substrate was initially sprayed with WC-Co powder by Air Plasma Spray (APS) process and then surface melted by pulsed Nd:YAG laser in different scan speeds. Optical cross sectional optical microscopy of the treated specimens confirmed formation of very fine structured layers. X ray diffraction analysis confirmed presence of tungsten carbides in the melted zones. Micro hardness results also showed that the hardness of the fabricated surface layer was almost twice of that of the base material.

Keywords: AZ91 magnesium alloy, Pulsed Nd:YAG laser, Surface melting, WC-Co powder.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

۱- مقدمه

آلیاژهای منیزیم به خاطر چگالی پایین و استحکام مخصوص بالایی که دارند امروزه در صنایع مختلف از جمله هوافضا و اتومبیل سازی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۲،۱]. منیزیم بر خلاف ویژگی‌های خوبی که ذکر شد دارای خواص نامطلوبی مثل مقاومت به سایش و خوردگی ضعیف است. روش‌های مهندسی سطح برای غلبه بر این ویژگی‌های نامطلوب به کار گرفته شده‌اند. در سال‌های اخیر روش‌های مهندسی سطح در فاز مایع مثل ذوب سطحی، آلیاژسازی سطحی و ایجاد لایه‌های کامپوزیتی برای بهبود مقاومت در برابر سایش و خوردگی منیزیم استفاده شده‌اند. به عنوان مثال برای بهبود مقاومت به سایش آلیاژهای منیزیم، ذرات سختی همچون WC, Al_2O_3, ... به سطح افزوده شده، توسط منابع متمرکز انرژی همچون لیزر، پرتوی الکترونی و ... ذوب سطحی می‌شوند [۷-۳].

آلیاژ AZ91 یکی از پرکاربردترین آلیاژهای منیزیم در صنایع اتومبیل سازی، هوافضا و نظامی است. در یک پژوهش آلیاژ AZ91 را برای بهبود مقاومت به سایش با پودر Al+SiC توسط لیزر Nd:YAG پالسی ذوب سطحی نمودند [۳]. در تحقیقی دیگر برای بهبود مقاومت به سایش با استفاده از لیزر Nd:YAG پالسی، لایه کامپوزیتی حاوی ذرات Al_2O_3 را روی زیرلایه منیزیمی بوجود آوردند [۴و۸]. با استفاده از لیزر دیودی توان بالا HPDL و توسط سیستم پاشش از کنار توانستند لایه کامپوزیتی حاوی ذرات کاربید تنگستن را بر روی زیرلایه منیزیمی AZ61 ایجاد کنند [۵]. در ایران استفاده از لیزر به منظور ایجاد لایه های کامپوزیتی درسطح آلیاژهای منیزیم تا کنون سابقه نداشته است و این تحقیق برای اولین بار در این عرصه انجام شده است.

در این تحقیق، عملیات سطحی توسط لیزر روی زیرلایه منیزیمی AZ91 که قبلا با پودر WC-Co به روش APS (Air Plasma Spray) پوشش شده است، بررسی می شود.

۲- وسایل و روشهای آزمایش

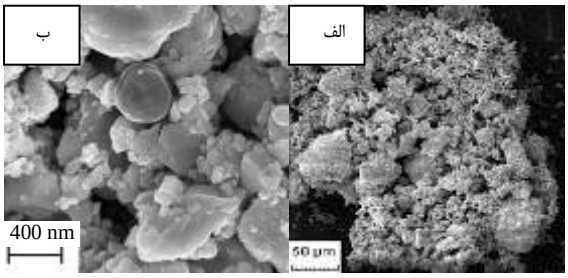
زیرلایه استفاده شده در این آزمایش آلیاژ AZ91 با ترکیب شیمیایی داده شده در جدول ۱ است. نمونه‌ها با پودر WC-Co زیرمیکرون آگلومره (μm ۶۰-۳۰) پوشش شدند (شکل ۱).

از روش APS برای پوشش دهی با پودر WC-Co و به ضخامت تقریبی ۳۰ الی ۵۰ میکرون استفاده شد. قبل از فرایند APS سطح زیرلایه با اسنفاده از ذرات اکسید آلومینیم آماده سازی شد.

نمونه پوشش داده شده، توسط لیزر پالسی Nd:YAG (مدل IQL-10) و در سرعت‌های مختلفی که در جدول ۲ آورده شده‌اند، ذوب سطحی شد. ریزساختار توسط میکروسکوپ نوری (Gippon, GDCE-30, Japan) مطالعه شد و پراش سنجی پرتو X توسط Xpert pro, Phillips انجام شد. آزمایش میکروسختی نیز توسط دستگاه Buehler ITD (Illinois, USA) تحت بار ۵۰g و مدت زمان ۱۵ ثانیه انجام شد.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ AZ91 (% wt)

Al	Zn	Mn	Si	Fe	Ni	Mg
8.8	0.7	0.2	0.03	0.002	0.0002	Bal



شکل ۱- مورفولوژی پودر WC-Co در دو بزرگنمایی متفاوت

جدول ۲- شرایط مختلف فرایند لیزر برای ذوب سطحی

نمونه	میانگین انرژی در واحد سطح (J/mm^2)	سرعت روبش (mm/s)	عمق ناحیه ذوب شده (μm)	عرض ناحیه ذوب شده (μm)
A-1	۲۶/۰۴	۵/۷۶	۲۶۰	۲۱۶۰
A-2	۲۱/۴۳	۷	۲۵۷	۲۱۴۰
A-3	۱۶/۶۶	۹	۲۴۸	۲۱۲۸
A-4	۱۳/۰۴	۱۱/۵	۲۴۰	۲۰۵۳
A-5	۹/۳۷	۱۶	۲۳۱	۲۰۱۲

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

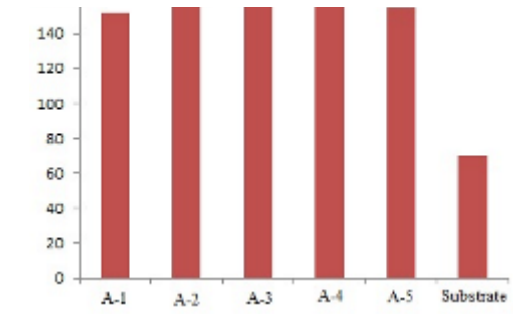
۳- نتایج و بحث

وقتی زیرلایه و پوشش آن تحت تابش لیزر قرار می‌گیرد انرژی باریکه جذب لایه شده و پس از ذوب لایه به زیرلایه منتقل می‌گردد. از آنجا که دمای ذوب کبالت ($^{\circ}C$ ۱۴۹۵) پایین‌تر از کاربید تنگستن ($^{\circ}C$ ۲۸۷۰) است ممکن است برخی ذرات WC ذوب نشده باقی بمانند. به هر حال انرژی باریکه لیزر به زیرلایه می‌رسد و چون دمای ذوب این آلیاژ منیزیم بسیار پایین و برابر با $^{\circ}C$ ۶۵۰ است به سرعت حجم بزرگی از زیرلایه ذوب شده با لایه رویین، حوضچه مذاب مشترک تشکیل می‌دهند. به علت اختلاف دما بین نقاط مرکزی و کناری حوضچه، مواد مذاب ضمن حرکت‌هایی موسوم به مارانگونی باعث هم خوردن و اختلاط بیشتر در هم می‌شوند [۹]. لازم به ذکر است که پس از ذوب به علت دمای بالای حوضچه احتمال واکنش شیمیایی بین عناصر موجود در مذاب و تشکیل فازهای جدید وجود دارد.

در جدول ۲ برخی از پارامترهای فرایند مربوط به آزمایش‌ها و نیز نتایج مربوطه ارائه شده‌اند. در تمام آزمایش‌ها شرایط باریکه لیزر شامل بسامد پالس لیزر ۲۰Hz، عرض پالس ۶ ms و انرژی در هر پالس ۹ J ثابت نگه داشته شد. قطر پرتوی لیزر روی سطح برابر ۱/۲ mm است.

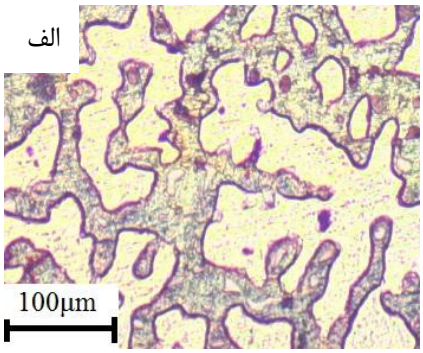
جدول ۳- میزان هم‌پوشانی نمونه‌ها در سرعت‌های مختلف

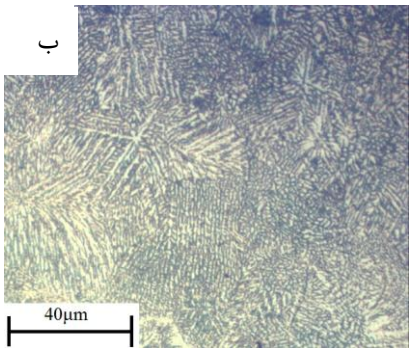
نمونه / فاکتور همپوشانی	A-5	A-4	A-3	A-2	A-1
O_f (%)	۳۸/۳	۵۴/۷	۶۴/۲	۷۱/۹	۷۶/۷



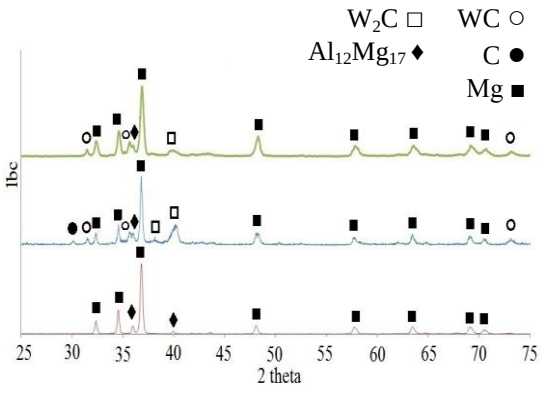
شکل ۲- مقایسه ریزسختی لایه های ایجاد شده در اثر ذوب سطحی در سرعت‌های متفاوت

با توجه به نتایج جدول ۲ می‌توان نتیجه گرفت با افزایش سرعت روبش میزان ذوب آلیاژ پایه کمتر شده و در نتیجه میزان رقت پایین می‌آید. به عبارت دیگر اگر حجم کمتری از آلیاژ منیزیم در حوضچه وارد شود نسبت فاز سخت که از طریق پوشش WC-Co وارد مذاب شده به حجم مذاب بیشتر می‌شود و این به معنی سختی بالاتر بعد از انجماد است.





شکل ۳- تصویر میکروسکوپی نوری از الف) زیرلایه ب) ناحیه ذوب شده تحت سرعت روبش ۱۱/۵ mm/s، انرژی پالس ۹ J، عرض پالس ۶ ms و بسامد پالس لیزر ۲۰ Hz.



شکل ۴- الگوی پراش پرتو X الف) زیرلایه ب) پوشش حاصل از فرایند APS ج) ناحیه ذوب شده تحت سرعت روبش ۱۱/۵ mm/s، انرژی پالس ۹ J، عرض پالس ۶ ms و بسامد پالس لیزر ۲۰ Hz.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

از طرفی با افزایش سرعت روبش سطح، میزان انرژی در واحد سطح کاهش می‌یابد و در نتیجه ممکن است که میزان کمتری از پوشش به داخل مذاب وارد شود.

یکی از عوامل مهم در فرایند ذوب سطحی توسط لیزرهای پالسی، پارامتر هم‌پوشانی است. رابطه این کمیت با پارامترهای فرایند عبارتست از [۱۰]:

$$O_f = \left(1 - \frac{V/f}{D+VT}\right) \times 100 \qquad (۱)$$

V سرعت روبش سطح، f بسامد پالس لیزر، D قطر پرتوی لیزر روی سطح و T عرض پالس لیزر هستند.

جدول ۳ میزان هم‌پوشانی نمونه‌های A-1 تا A-5 را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است با کاهش سرعت روبش لیزر میزان همپوشانی پالس‌ها افزایش می‌یابد.

نتایج سختی این نمونه‌ها در شکل ۲ آورده شده است. نتایج سختی سنجی نشان می‌دهد که با افزایش سرعت روبش، ابتدا سختی زیاد می شود سپس روندی کاهشی دارد. شرایط بهینه این تحقیق در نمونه A-4 با بیشترین سختی معادل ۱۶۸ HV در سرعت ۱۱/۵ mm/s بدست آمد. لازم به ذکر است که سختی آلیاژ AZ91 حدود ۷۰HV است

افزایش سختی نسبت به حالت پایه را می‌توان به دو عامل ربط داد. در اثر انجماد سریع که ماهیت فرایند ذوب سطحی با لیزر پالسی است ساختار ماده از حالت ریختگی(شکل ۳- الف) به ساختاری ظریف تبدیل می-شود (شکل ۳- ب). نتیجه حاصل از آزمون XRD (شکل ۴) از نمونه A-4 حضور ذرات فاز کاربید تنگستن را تایید می‌کند. این دو عامل باعث افزایش سختی نمونه‌های لیزر شده می‌شوند.

۴- نتیجه‌گیری

با استفاده از لیزر پالسی، لایه حاوی ذرات کاربید تنگستن روی آلیاژ منیزیم (AZ91) که قبل از لیزر، توسط فرایند APS پوشش داده شده بود، ایجاد شد. در این آزمایش شرایط بهینه لیزر شامل انرژی پالس برابر با J ۹، عرض پالس برابر با ms ۶، سرعت روبش برابر با mm/s ۱۱/۵، بسامد پالس لیزر ۲۰Hz و ارتفاع از سطح قطعه برابر با mm ۷ بود. در مقدار همپوشانی ۵۴/۷٪ بیشترین سختی (۱۶۸HV) بدست آمد. سختی حاصله به خاطر حضور ذرات کاربید تنگستن و ریزدانه شدن آلیاژ پایه است.

مراجع

[1] *ASM Handbook*, Properties and selection: Nonferrous alloys and special-purpose materials, Volume 2, 3rd edition, ASM international, USA, 1993, pp. 455-517.

[2] M. Gupta, N. M. L. Sharon, *Magnesium, magnesium alloy and magnesium composites*, Wiley, New Jersy, USA, 2011, pp. 1-11.

[3] B. J. Zheng, X. M. Chen, J. S. Lian, '' *Microstructure and wear property of laser cladding Al+SiC powders on AZ91D magnesium alloy*'' , **Optics and Lasers in Engineering** 48 (2010) 526-532.

[4] Y. H. Liu, Z. X. Guo, Y. Yang, H. Y. Wang, J. D. Hu, , Y. X. Li, et al, '' *Laser (a pulsed Nd:YAG) cladding of AZ91D magnesium alloy with Al and Al2O3 powders*'' , **Applied Surface Science** 253 (2006) 1722-1728.

[5] L. A. Dobrzański , J. Domagała, T. Tański, A. Klimpel, D. Janicki, '' *Laser surface treatment of magnesium alloy with WC and TiC powders using HPDL*'' **, journal of achievements in materials and manufacturing engineering** 28 (2008) 179-186.

[6] J. E. Gray, B. Luan, *'' Protective coatings on magnesium and its alloys — a critical review*'' , **Journal of Alloys and Compounds** 336 (2002) 88-113.

[7] A. Singh, S.P. Harimkar, '' *Laser Surface Engineering of Magnesium Alloys: A Review*'' , **JOM** 64 (2012) 716-733.

[8] G. Y. lia, W. C. shana, Y. Manb, L. H. bin, '' *The resistance to wear and corrosion of laser-cladding Al2O3 ceramic coating on Mg alloy*'' , **Applied Surface Science** 253 (2007) 5306-5311.

[9] A. Chehreghani, M.J. Torkamany, M. J. Hamedi, J. Sabbaghzadeh, *Numerical modeling and experimental investigation of TiC formation on titanium surface pre-coated by graphite under pulsed laser irradiation*, **Applied Surface Science, Vol. 258(6)** P.2068-76 (2012).

[10] F. Malek Ghaini, M. J. Hamidi, M. J. Torkamany, '' *Weld Metal Microstructural Characteristics in Pulsed Nd:YAG Laser Welding* '' **Scripta Materialia** 56 (2007) 955-958.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]