

# آلیاژسازی سطحی آلومینیم ۶۰۶۱ با لایه پیش نشست کروم

## به کمک لیزر Nd:YAG پالسی

محمد انصاری، رضا سلطانی و محمود حیدرزاده سهی

دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

( دریافت مقاله : ۹۲/۰۷/۲۷ - پذیرش مقاله : ۹۲/۱۲/۲۰ )

### چکیده

در این تحقیق امکان ایجاد لایه‌های سطحی نازک حاوی ترکیبات بین فلزی پایه کروم روی آلایژ آلومینیم ۶۰۶۱ با استفاده از آلیاژسازی سطحی توسط لیزر مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا پوشش کروم به همراه لایه‌های اولیه مس و نیکل در جمع به ضخامت ۱۵ میکرومتر از طریق آبکاری الکتریکی روی زیرلایه آلومینیم ۶۰۶۱ پیش نشست شد و سپس تحت عملیات آلیاژسازی سطحی توسط لیزر Nd:YAG پالسی با توان‌ها و سرعت‌های روبش مختلف قرار گرفت. نتایج حاصل از بررسی نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری، الکترونی روبشی و پراش سنجی پرتو ایکس (XRD) نشان داد که اضافه کردن عناصر نیکل و کروم برای کاهش حساسیت به ترک خوردگی و بهبود سختی لایه آلیاژ شده روی سطح آلومینیم مناسب است و منجر به تشکیل ترکیبات بین فلزی  $Al_{11}Cr_2$ ،  $Al_2Cu$ ،  $Al_3Ni_2$  می‌شود و همچنین آزمون میکروسختی روی مقاطع عرضی نمونه‌ها انجام گرفت که افزایش سختی حدود ۶ برابر زیرلایه اولیه را در نمونه‌های آلیاژسازی شده نشان داد.

واژه‌های کلیدی: آلیاژسازی سطحی؛ لیزر Nd:YAG؛ کروم؛ آلومینیم.

## Liquid phase surface engineering of aluminum (AA6061) with Cr . predeposited layer by pulsed Nd-YAG laser

M. Ansari, R. Soltani and M. Heydarzadeh Sohi

School of Metallurgy and Materials Engineering, University College of Engineering,  
University of Tehran

(Received 19 October 2013, accepted 11 March 2014)

### Abstract

In this study the feasibility of obtaining thin surface layer of chromium based intermetallic compounds on Al-6061 substrate was studied by using laser surface alloying (LSA). The initial layers of copper, nickel and chromium with a total thickness of 15 micrometers was electroplated on Al substrates and subsequently laser alloyed by using pulsed Nd:YAG at various output power and scanning rates with argon gas shielding. Analyses of samples using optical and scanning electron microscopy and X-ray diffraction (XRD) showed that adding nickel and chromium are suitable to reduce susceptibility of cracking and improving surface hardness of alloyed layer on aluminum due to the formation of intermetallic compounds such as  $Al_{11}Cr_2$ ,  $Al_2Cu$ ,  $Al_3Ni_2$ . Microhardness test was performed on cross-sections of specimens and it showed a significant increase (6 times) in hardness of alloyed-layer compared to the Al substrate.

**Key words** Surface alloying, Pulsed Nd:YAG laser, Chromium, Aluminum.

**E-mail of corresponding author:** Mohammad.ansari@ut.ac.ir

## مقدمه

توان پرتو، قطر پرتو، سرعت رویش و مقدار عناصر آلیاژی دارد.

پوشش‌های آّبکاری الکتریکی شده با حداقل ترک و تخلخل، پوشش اولیه مناسبی برای ذوب با لیزر است زیرا پوشش‌های دیگر از جمله اسپری حرارتی و یا چسب پلی‌وینیل‌الکل به دلیل تخلخل، مشکلات بیشتری در حین فرآیند لیزر ایجاد می‌کنند. المیدا<sup>۳</sup> و همکارانش با استفاده از تزریق پودر کروم، آلیاژسازی سطحی آلومینیم ۷۰۷۵ را توسط لیزر انجام داده که تشکیل فاز سخت  $Al_7Cr$  و حضور مقدار قابل‌توجهی تخلخل را گزارش کردند [۵]. همچنین فو<sup>۴</sup> و همکارانش با استفاده از پوشش پلاسما اسپری<sup>۵</sup> شده نیکل و کروم و لیزر ۴۰۰ وات  $Nd:YAG$  پالسی آلیاژسازی را روی آلومینیم انجام دادند اما مشکل تخلخل و ترک همچنان وجود داشت که با تغییر پارامترهای لیزر توانستند پوششی صاف با حداقل تخلخل و ترک و سختی حدود ۵ برابر زیرلایه بدست آورند [۶]. حیدرزاده سهی در تحقیقی برای افزایش سختی و مقاومت به سایش از پوشش نیکل آّبکاری الکتریکی شده روی زیرلایه آلومینیمی استفاده نمود. پس از آلیاژسازی سطحی توسط پرتو الکترونی، در اثر ایجاد بین فلزی  $NiAl_3$  سختی لایه به حدود ۳۴۰ ویکرز افزایش یافت [۷]. همچنین در تلاشی دیگر وزیری و همکارانش تاثیر پارامترهای لیزر بر روی خواص لایه آلیاژسطحی شده آلومینیم با پوشش نیکل آّبکاری الکتریکی شده را مورد بررسی قرار دادند [۸].

در این تحقیق، به منظور بهبود خواص سطحی آلومینیم ۶۰۶۱، ایجاد یک لایه سخت فاقد ترک و تخلخل با استفاده از اضافه کردن عناصر نیکل، مس و کروم از طریق پیش نشست توسط آّبکاری الکتریکی و ذوب و آلیاژسازی سطحی توسط لیزر بررسی شده است.

آلیاژهای آلومینیم از جمله سری ۶۰۰۰، از گروه‌های مهم مواد در صنایع مختلف به شمار می‌آیند، اما سختی و مقاومت به سایش کم، کاربرد آن‌ها را در صنایع پیشرفت‌های نظیر هوافضا و کاربردهای نظامی محدود می‌کند. اصلاح سطح به همراه حفظ خواص حجمی، به عنوان یک روش مقرون به صرفه و انعطاف‌پذیر برای گسترش طیف وسیعی از کاربردهای این آلیاژها، قادر به بهبود خواص سطحی قطعات است [۱].

روش‌های اصلاح سطح مختلفی برای آلیاژهای آلومینیم استفاده می‌شود، فرآیند آلیاژسازی سطحی با لیزر<sup>۱</sup> یکی از روش‌هایی است که می‌تواند به منظور بهبود سختی، مقاومت به سایش و خوردگی، توسط تغییر ترکیب آلیاژ و ایجاد ساختاری ریز و همگن، استفاده شود. از مزیت‌های این فرآیند توانایی تولید لایه آلیاژی با عمق مورد نیاز (محدوده میکرومتر تا میلیمتر) در یک زمان کوتاه با منطقه تحت تاثیر حرارت کوچک است. مواد آلیاژساز می‌توانند به صورت پیش‌نشست و یا در حین ذوب سطحی به صورت هم نشست اضافه شوند [۲ و ۳].

نگرانی عمده در عملیات آلیاژسازی توسط لیزر ایجاد عیوبی مانند ترک‌ها، حفرات و سطوح زبر غیر قابل قبول است. معمولاً برای جلوگیری از تشکیل ترک از پیش‌گرمایش زیرلایه استفاده می‌شود. اما این روش برای آلیاژهای آلومینیم به دلیل نقطه ذوب پایین آن‌ها مناسب نیست. گرزو<sup>۲</sup> و همکارانش برای کاهش حساسیت به ایجاد ترک، اضافه کردن برخی از عناصر شیمیایی مانند کروم و نیکل را مورد مطالعه قرار دادند و ادعا نمودند که ایجاد ترکیبات بین فلزی توسط این عناصر موجب کاهش تنش‌های کششی باقی‌مانده می‌شوند و در نتیجه از تشکیل ترک جلوگیری می‌نمایند [۴]. همچنین حذف عیوب وابستگی زیادی به بهینه‌سازی پارامترهای لیزر از جمله

<sup>3</sup>. Almeida

<sup>4</sup>. Fu

<sup>5</sup>. Plasma spray

<sup>6</sup>. Neodymium-doped yttrium aluminum garnet

<sup>1</sup>. Laser surface alloying

<sup>2</sup>. Grezev

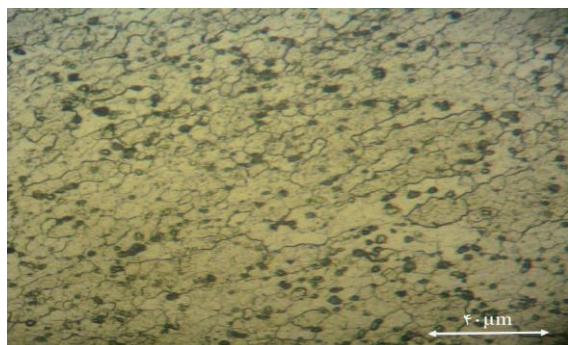
### مواد و روش تحقیق

در این تحقیق ورق آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱ با عملیات حرارتی T6 با ضخامت ۵ میلیمتر و ابعاد ۵ سانتیمتر در ۲ سانتیمتر به عنوان زیرلایه مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌ها پس از سنباده زنی به منظور ازبین بردن لایه اکسیدی در چند مرحله به کمک استن تمیزکاری سطحی شدند. در ابتدا عملیات ذوب سطحی توسط لیزر<sup>۱</sup> بدون اضافه کردن عناصر آلیاژی انجام شد، تا بدین ترتیب متغیرهای فرآیند منجر به هندسه مناسب برای لایه‌های ذوب شده شناسایی شوند. سپس عملیات آلیاژسازی سطحی در محدوده‌ای نزدیک به متغیرهای بهینه شناسایی شده انجام شدند. به منظور اضافه کردن عناصر آلیاژی ابتدا پوشش کروم سخت با ضخامت ۱۵ میکرومتر به روش آبکاری الکتریکی شامل سه لایه مس، نیکل و کروم روی نمونه‌ها رسوب داده شد. به منظور ایجاد لایه آبکاری پس از آماده‌سازی، نمونه‌ها ابتدا زینکاته شده و به ترتیب در حمام مس، نیکل و کروم قرار گرفتند. آبکاری مس در حمامی حاوی ۲۰۰ گرم بر لیتر سولفات مس و ۶۰ گرم بر لیتر اسید سولفوریک با pH=9 در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد، چگالی جریان ۲ A/dm<sup>2</sup> و مدت ۳۰ دقیقه انجام گرفت سپس آبکاری نیکل در حمامی حاوی ۲۵۰ گرم بر لیتر سولفات نیکل، ۴۰ گرم بر لیتر اسید بوریک با pH=5 و دمای ۵۰ درجه سانتیگراد در چگالی جریان ۳ A/dm<sup>2</sup> انجام شد و در نهایت آبکاری کروم در حمامی حاوی ۳۰۰ گرم بر لیتر اسید کرومیک و ۳ گرم بر لیتر اسید سولفوریک در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد و چگالی جریان ۳۰ A/dm<sup>2</sup> انجام گرفت. پس از آبکاری نمونه‌ها توسط لیزر Nd:YAG یک صد وات<sup>۲</sup> با فرکانس ۱۵ هرتز و پهنای زمانی پالس ۴ میلی ثانیه در شرایط مختلف (جدول ۲) تحت تابش قرار گرفتند. به منظور نگهداری نمونه‌ها در ناحیه تابش لیزر از یک میز CNC با قابلیت حرکت با سرعت‌های ثابت (۰/۲ تا ۵ میلیمتر بر

ثانیه) استفاده شد و برای جلوگیری از اکسیداسیون در حین فرآیند لیزر، نمونه توسط افشانه گاز آرگون جانبی با دبی ۵ لیتر بر دقیقه تحت دمش قرار گرفت. برای بررسی مقاطع عرضی، نمونه‌ها برش خورده، متالوگرافی شدند و با استفاده از میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی<sup>۳</sup>، سطوح و مقاطع نمونه‌ها در نواحی ذوب شده با لیزر بررسی شدند. به منظور آزمون پراش اشعه ایکس<sup>۴</sup> (XRD) نمونه با پارامتر بهینه با همپوشانی ۵۰٪ بصورت کنارهم تحت عملیات لیزر قرار گرفت. سپس توسط میکروسختی سنج تحت بار ۲۵ گرم و زمان ۱۰ ثانیه، سختی نواحی مختلف مقطع عرضی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد.

جدول ۱. شرایط مختلف فرآیند لیزر برای ذوب و آلیاژسازی سطحی

نمونه	انرژی پالس لیزر (ژول)	سرعت روبش (میلیمتر بر ثانیه)	قطر پرتو روی سطح (میلیمتر)	قله توان (وات)
۱	۵	۲/۵	۰/۶	۱۲۵۰
۲	۶	۲/۵	۰/۶	۱۵۰۰
۳	۵	۳	۰/۶	۱۲۵۰
۴	۶	۳	۰/۶	۱۵۰۰
۵	۵	۳/۵	۰/۶	۱۲۵۰
۶	۶	۳/۵	۰/۶	۱۵۰۰
۷	۵	۴	۰/۶	۱۲۵۰
۸	۶	۴	۰/۶	۱۵۰۰



شکل ۱. میکروساختار آلیاژ آلومینیم 6061-T6 قبل از عملیات لیزر.

<sup>3</sup>. Cam Scan MV2300

<sup>4</sup>. Philips X'Pert PW 3040/60

<sup>1</sup>. Laser surface melting

<sup>2</sup>. Micro Welding Laser SW1

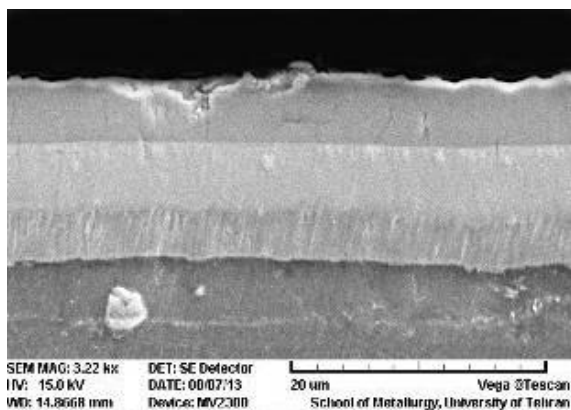
## نتایج و بحث

### تاثیر پارامترهای لیزر بر تشکیل حفرات و ترکها در

#### پوشش

شکل ۱ میکروساختار آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱ با عملیات حرارتی T6 را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است نقاط سیاه رنگ رسوبات  $Mg_2Si$  هستند. شکل ۲ سطح مقطع عرضی نمونه ذوب سطحی شده بدون اضافه کردن عناصر آلیاژی را نشان می‌دهد و شکل ۳ سطح ظاهری نمونه ذوب سطحی شده با همپوشانی خطوط لیزر در کنار هم را نشان می‌دهد. همانطور که در این دو شکل دیده می‌شود ترک‌های سراسری و عمیقی در نمونه مشاهده می‌شود، که علت آن می‌تواند تبخیر منیزیم موجود در آلیاژ و همچنین سرعت بالای سرد شدن فرآیند ذوب سطحی توسط لیزر و ضریب هدایت حرارتی بالای آلومینیم و در نتیجه ایجاد تنش‌های حرارتی در ناحیه ذوب شده توسط لیزر باشد [۱۰].

از آنجایی که آلیاژ سازی توسط لیزر نیاز به یک حداقل دانسیته توان برای ذوب لایه پیش نشست دارد، در استفاده از لیزرهای کم توان باید لایه پیش نشست با ضخامت کم مورد استفاده قرار گیرد. در این تحقیق ابتدا سعی بر آلیاژ سازی با استفاده از لایه پیش نشست پودر کروم با استفاده از چسب پلی وینیل الکل و ضخامت لایه ۱۰۰ میکرومتر شد ولیکن با توجه به محدودیت توان لیزر مورد استفاده، نتیجه مطلوبی بدست نیامد. در ادامه تحقیق از پوشش پیش نشست حاصل از آبکاری کروم با ضخامت کم استفاده شد. همانطور که در شکل ۴ دیده می‌شود پوشش کروم سخت شامل سه لایه مختلف مس، نیکل و کروم است.



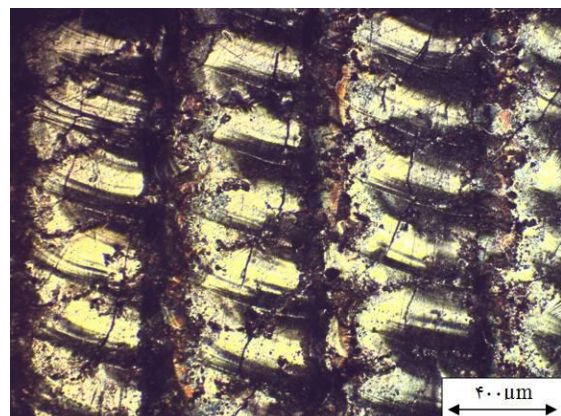
شکل ۴. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح مقطع

پوشش اولیه کروم سخت که نشان دهنده سه لایه مجزا مس، نیکل و کروم است.

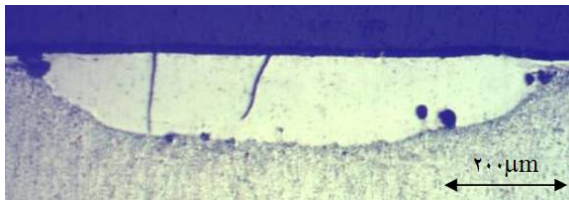
از آنجایی که امکان رسوب مستقیم کروم روی آلومینیم به دلیل ممانعت لایه اکسیدی وجود ندارد از پوشش‌های واسطه مانند زینکاته و یا مس نیکل استفاده می‌شود [۹]. با توجه به اینکه در آلیاژسازی سطحی با سرعت‌های روبش پایین زمان برهم‌کنش بین پرتو لیزر و سطح افزایش یافته، حفرات و ترک‌های زیادی در نمونه ایجاد می‌شود (شکل ۵). حفرات معمولاً ناشی از دمش گاز آرگون یا حتی آزادسازی هیدروژن حل شده در آلومینیم مذاب حین انجماد است و ترک‌ها ناشی از تنش‌های حرارتی هستند [۵]. تشکیل این حفرات و به هم پیوستن آن‌ها در حوضچه مطابق شکل ۵ باعث برآمده شدن سطح



شکل ۲. تصویر میکروسکوپی نوری از سطح مقطع عرضی لایه ذوب سطحی شده توسط لیزر با انرژی ۵ ژول و سرعت روبش ۳/۵ میلیمتر بر ثانیه.

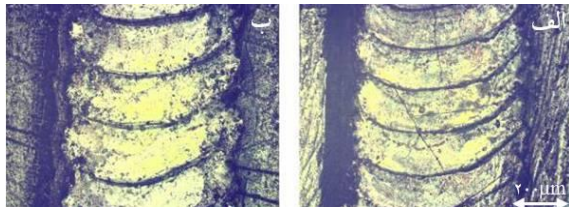


شکل ۳. تصویر میکروسکوپی نوری از سطح ظاهری لایه ذوب سطحی شده با همپوشانی ۵۰٪ توسط لیزر با انرژی ۵ ژول و سرعت روبش ۳/۵ میلیمتر بر ثانیه.



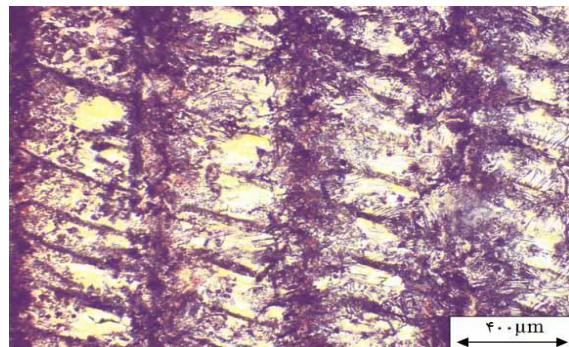
شکل ۸. تصویر میکروسکوپی نوری از مقطع عرضی لایه ایجاد شده توسط لیزر با انرژی لیزر ۶ ژول و سرعت روبش ۴ میلیمتر بر ثانیه.

شکل ۹ الف سطح یک نمونه آلیاژ شده را نشان می‌دهد که همپوشانی پالس‌ها و نیز برخی عیوب قابل تشخیص هستند. با تغییر پارامترهای فرآیند این عیوب به حداقل رسیده، لایه مناسب بدست آمد (شکل ۹ ب).



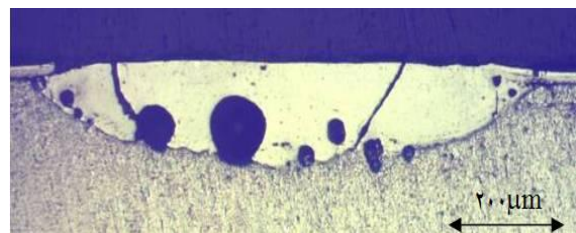
شکل ۹. الف) تصویر میکروسکوپی نوری از سطح نمونه آلیاژ شده توسط لیزر با انرژی ۶ ژول و سرعت روبش ۲/۵ میلیمتر بر ثانیه. ب) تصویر میکروسکوپی نوری از سطح نمونه آلیاژ شده توسط لیزر با انرژی ۵ ژول و سرعت روبش ۳/۵ میلیمتر بر ثانیه.

شکل ۱۰ همپوشانی خطوط لیزر را بعد از آلیاژسازی سطحی با پارامتر بهینه لیزر نشان می‌دهد که در مقایسه با شکل ۲ که ذوب سطحی بدون عناصر آلیاژی است، هیچ ترکی در سطح مشاهده نمی‌شود.

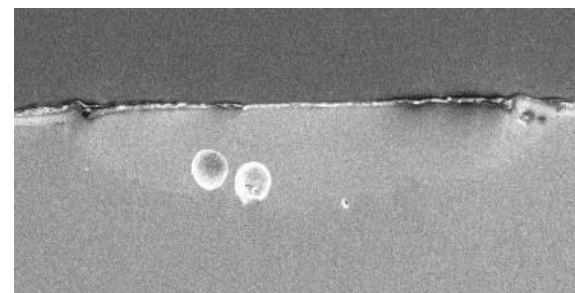


شکل ۱۰. تصویر میکروسکوپی نوری از سطح ظاهری لایه آلیاژسازی سطحی شده با همپوشانی ۵۰٪ توسط لیزر با انرژی ۵ ژول و سرعت روبش ۳/۵ میلیمتر بر ثانیه.

می‌شوند. با افزایش سرعت روبش، حفرات و ترک‌ها بطور قابل توجهی کاهش یافته بطوری‌که در شکل ۶ نمونه آلیاژ شده با انرژی ۶ ژول و سرعت ۳ میلیمتر بر ثانیه حفرات کمی و در شکل ۷ نمونه آلیاژ شده با انرژی ۵ ژول و سرعت ۳/۵ میلیمتر بر ثانیه هیچ ترک و حفره‌ای مشاهده نمی‌شود. با افزایش مجدد سرعت روبش ترک‌ها دوباره ظاهر می‌شوند اما حفرات به ندرت دیده می‌شوند (شکل ۸).

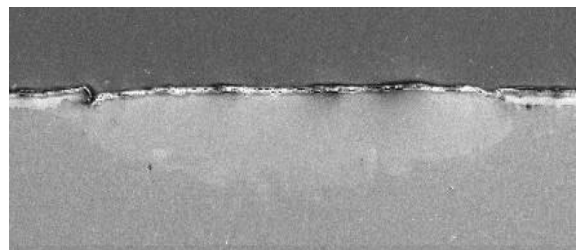


شکل ۵. تصویر میکروسکوپی نوری از سطح مقطع عرضی لایه ایجاد شده توسط لیزر با انرژی ۶ ژول و سرعت روبش ۲/۵ میلیمتر بر ثانیه.



شکل ۶. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح مقطع لایه ایجاد شده توسط لیزر با انرژی ۶ ژول و سرعت روبش ۳ میلیمتر بر ثانیه.

شکل ۷. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح مقطع لایه ایجاد شده توسط لیزر با انرژی ۵ ژول و سرعت روبش ۳/۵ میلیمتر بر ثانیه.

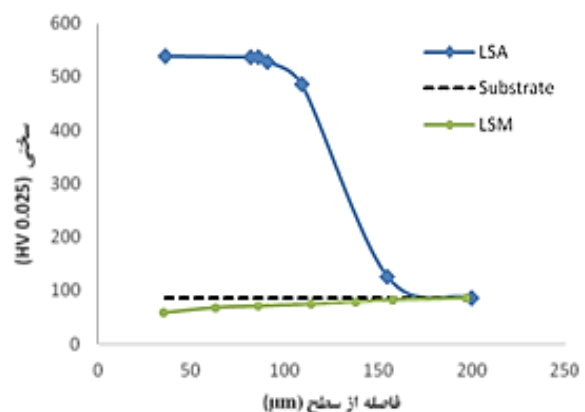


شکل ۷. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح مقطع لایه ایجاد شده توسط لیزر با انرژی ۵ ژول و سرعت روبش ۳/۵ میلیمتر بر ثانیه.

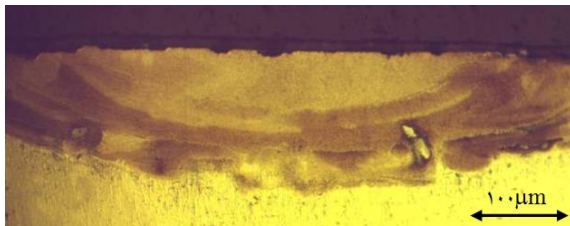
شکل ۸. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح مقطع لایه ایجاد شده توسط لیزر با انرژی ۶ ژول و سرعت روبش ۴ میلیمتر بر ثانیه.

### توزیع سختی در پوشش آلیاژ شده

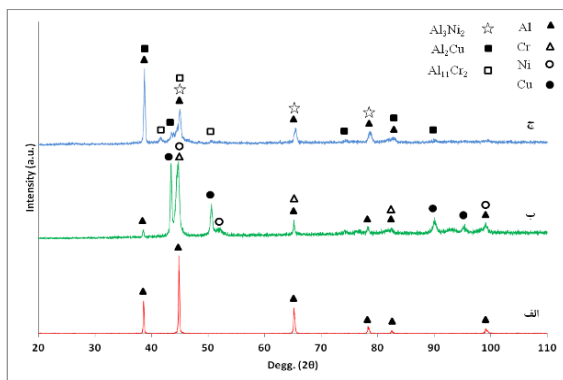
شکل ۱۱ توزیع میکروسختی نمونه‌های ذوب سطحی شده و آلیاژسازی شده در شرایط بهینه را نشان می‌دهد. در نمونه‌های ذوب سطحی شده سختی لایه ذوب شده کاهش یافت. این کاهش سختی می‌تواند به دلایلی که در ادامه اشاره می‌شود، رخ دهد. اول اینکه زیرلایه آلومینیم نورد و عملیات حرارتی شده و ذوب مجدد با لیزر می‌تواند اثر کارسختی و عملیات حرارتی را از بین برده و باعث کاهش سختی شود. دوم اینکه آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱ دارای یک درصد منیزیم است که منیزیم با وجود نقطه جوش پایین ( $1105^{\circ}\text{C}$ ) ممکن است حین عملیات لیزر تبخیر شده و فازهای رسوب سخت شونده  $\text{Mg}_2\text{Si}$  دیگر تشکیل نشوند [۱۰]. از طرفی دیگر آلیاژسازی سطحی با نیکل، مس و کروم توسط پرتو لیزر به ایجاد لایه‌ای با سختی ۵۴۰ ویکرز منجر شد، درحالی‌که سختی زیرلایه تنها ۸۶ ویکرز است [۸]. پراکندگی زیاد مقادیر سختی می‌تواند به ناهمگنی ساختار ناشی از عملیات لیزر مربوط باشد. همانطور که در شکل ۱۲ دیده می‌شود در اثر تکرار پالسهای لیزر نواحی مختلفی با ساختار و ترکیب متفاوت ایجاد شده است. با حرکت از سطح به عمق نمونه سختی کاهش می‌یابد زیرا مقادیر عناصر آلیاژی که در سطح قرار گرفته بودند کاهش می‌یابد [۱۱].



شکل ۱۱. نیم رخ سختی مقاطع نمونه‌های آلومینیمی ذوب سطحی شده و آلیاژ سطحی شده با انرژی ۵ ژول و سرعت روبش ۳/۵ میلی‌متر بر ثانیه.



شکل ۱۲. تصویر میکروسکوپی نوری از مقطع عرضی لایه آلیاژی ایجاد شده توسط لیزر با انرژی ۵ ژول و سرعت روبش ۳/۵ میلی‌متر بر ثانیه.



شکل ۱۳. الگوهای پراش پرتو ایکس الف) زیرلایه آلومینیم ب) پوشش آبکاری الکتریکی ج) آلیاژسازی توسط لیزر

شکل ۱۳ الگوهای پراش پرتو ایکس را نشان می‌دهد، قسمت الف الگوی پراش زیرلایه است که تنها پیک‌های آلومینیم دیده می‌شوند، قسمت ب الگوی پراش لایه آبکاری شده را نشان می‌دهد که پیک‌های مس، نیکل و کروم در آن مشاهده می‌شوند و قسمت ج الگوهای پراش لایه آلیاژ شده را نشان می‌دهد که سختی این لایه را می‌توان به تشکیل ترکیبات بین فلزی  $\text{Al}_3\text{Ni}_2$ ،  $\text{Al}_{11}\text{Cr}_2$  و  $\text{Al}_2\text{Cu}$  نسبت داد [۱۲].

### نتیجه‌گیری

- ۱) پس از فرآیند ذوب سطحی توسط لیزر، سختی لایه ایجاد شده نسبت به زیر لایه اندکی کاهش یافت.
- ۲) ترکیبی بهینه از توان لیزر، سرعت روبش و نرخ همپوشانی بدست آمد که در آن لایه‌ای با کمترین عیوب شامل تخلخل و ترک ایجاد شد.
- ۳) آلیاژسازی سطحی توسط لیزر با استفاده از لایه پیش نشست مس، نیکل و کروم منجر به تشکیل ترکیبات بین

aluminum substrate, *Surface and Coatings Technology*, 191, 2005, 324–329.

10. M.J. Cieslak and P. W. Fuerschbach, *On the Weldability, Composition, and Hardness of Pulsed and Continuous Nd:YAG Laser Welds in Aluminum Alloys 6061, 5456, and 5086*, *Metallurgical Transactions B*, 19B, 1988, 319-329.
11. J.M. Pelletier, S. Jobez, Q. Saif, P. Kirat, and A.B. Vannes, *Laser Surface Alloying: Mechanism of Formation and Improvement of Surface Properties*, *Journal of Materials Engineering*, 13, 1991, 281-290.
12. L. Dubourg, H. Pelletier, D. Vaissiere, F. Hlawka and A. Cornet, *Mechanical characterisation of laser surface alloyed aluminium-copper systems*, *Wear*, 253, 2002, 1077–1085

فلزی سختی از جمله  $Al_3Ni_2$  و  $Al_2Cu$ ،  $Al_{11}Cr_2$  می‌شود.

۴) آلیاژسازی آلومینیم با نیکل و کروم توسط لیزر منجر به افزایش سختی لایه‌ی آلیاژسازی شده (۵۴۰ ویکرز) به حدود ۶ برابر بالاتر از سختی زیرلایه (۸۶ ویکرز) گردید.

#### منابع

1. *Surface Engineering*, ASM Handbook, vol. 5, ASM International, 1990.
2. Madhav Rao Govindaraju, P. A. Molian, *Enhancement of wear and corrosion resistance of metal-matrix composites by laser coatings*, *Journal of Materials Science*, Volume 29, 1994, pp 3274-3280.
3. M. Pierantoni, E. Blank, *Effect of Laser Surface Remelting and Alloying on the Wear Behaviour of Al-Si Alloys*, *Key Engineering Materials*, Volumes 46 - 47, 1991, 355-368.
4. A.N. Grezev and A.N. Safonov, *Cracking and microstructure of laser-deposited chromium-boron-nickel alloys*, *Welding International*, 1987, 50-52.
5. A. Almeida, M. Anjos, R. Vilar, R. Li, M. G. S. Ferreira, W. M. Steen and K. G. Watkins, *Laser alloying of aluminium alloys with chromium*, *Surface and Coatings Technology*, 70, 1995, 221-229.
6. Y. Fu, A.W. Batchelor, Y. Gu, K.A. Khor and H. Xing, *Laser alloying of aluminum alloy AA 6061 with Ni and Cr. Part 1. Optimization of processing parameters by X-ray imaging*, *Surface and Coatings Technology*, 99, 1998, 287-294.
7. M. Heydarzadeh Sohi, *Characterisation and tribological evaluation of a nickel surface alloyed aluminium-based material*, *Journal of Materials Processing Technology*, 118, 2001, 187-192.
8. S.A. Vaziri, H.R. Shahverdi, M.J. Torkamany, S.G. Shabestari, *Effect of laser parameters on properties of surface-alloyed Al substrate with Ni*, *Optics and Lasers in Engineering*, 47, 2009, 971–975.
9. W. Deqing, S. Ziyuan and K. Tangshan, *Composite plating of hard chromium on*