



بررسی تاثیر پارامترهای فرآیند پوشش‌دهی با لیزر روی مشخصه‌های هندسی و سختی فولاد ۱۷-۴

علی خرم*

استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، تهران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۰۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۱/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۷

چکیده

پوشش‌دهی با لیزر یکی از روش‌های اصلاح سطح پیشرفته است. در این فرآیند، لایه نازکی از یک ماده روی سطح قطعات رسوب داده می‌شود. در این پژوهش، پوشش‌دهی فولاد ۱۷-۴ با استفاده از لیزر پالسی Nd:YAG با توان ۴۰۰ وات و پودر 316L انجام پذیرفت. فرکانس لیزر، عرض پالس و سرعت اسکن به عنوان متغیرهای ورودی فرآیند و پارامترهای ارتفاع پوشش، عرض پوشش، میزان ترشوندگی، نرخ انحلال و میکروسختی به عنوان پارامترهای خروجی فرآیند در نظر گرفته شدند. اثر تغییر متغیرهای ورودی روی پارامترهای خروجی فرآیند بررسی شد و متغیرهای ورودی مناسب برای پوشش‌دهی استخراج گردید. نتایج نشان داد، با افزایش فرکانس و عرض پالس، ارتفاع پوشش و میکروسختی کاهش یافت، اما عرض پوشش، نرخ انحلال و زاویه ترشوندگی افزایش یافت. با افزایش سرعت اسکن، ارتفاع پوشش و میکروسختی افزایش یافت، اما عرض پوشش، نرخ انحلال و زاویه ترشوندگی کاهش یافت. سرعت اسکن ۵ میلی‌متر بر ثانیه، عرض پالس ۱۰ میلی‌ثانیه و فرکانس ۱۰ هرتز پارامترهای مناسب برای ایجاد یک پوشش با دوام مناسب بود. میانگین میکروسختی پوشش برای نمونه بهینه ۵۹۰ ویکرز بود که تقریباً ۱/۳ برابر فلز پایه به دست آمد. مقدار میکروسختی با افزایش فاصله از فلز پایه به سمت پوشش افزایش یافت. سختی در نزدیکی سطح مشترک کاهش یافت. این می‌تواند به میزان بیشتر دانه‌های ستونی نسبت داده شود که نزدیک سطح مشترک پوشش تشکیل شدند.

کلمات کلیدی: پوشش‌دهی با لیزر؛ فولاد ۱۷-۴؛ پودر 316L؛ مشخصات هندسی پوشش؛ میکروسختی.

Investigation on the Effect of Laser Cladding Parameters on the Geometrical Characteristics and Micro Hardness of 17-4 Steel

A. Khorram¹

Assis. Prof., Faculty of Materials & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar Univ. of Technology, Tehran, Iran.

Abstract

Laser cladding is one of the advanced surface modification techniques. In this process, a narrow layer of the material was deposited on the surface of the parts. In this research, laser cladding of 17-4 steel was performed by using 316L powder and 400 W pulsed Nd:YAG laser. Laser frequency, pulse width, and scanning speed were considered as the input variables. The geometry of the deposited beads (width, height, and clad angle), dilution ratio, and hardness were considered as the output responses. The effect of input variables on the output responses was investigated and the suitable parameters were selected for laser cladding. The results showed that by increasing the laser frequency and pulse width, the bead height and hardness decreased while the bead width, clad angle, and dilution ratio increased. By increasing the laser scanning speed, the bead height and hardness increased while the bead width, clad angle, and dilution ratio decreased. The laser frequency of 10 Hz, pulse width of 10 ms, and laser scanning speed of 5 mm/s were found to be the suitable parameters over the ranges investigated in this work. The average hardness value of the suitable sample was approximately 590 Hv, about 1.3 times the value of the substrate. The hardness value increased by increasing the distance from the substrate to the clad zone. The hardness value decreased near the clad-substrate interface. This can be attributed to a higher proportion of columnar grains formed near the clad-substrate interface.

Keywords: Laser Cladding; 17-4 Steel; 316L Powder; Geometrical Characteristics; Micro Hardness.

۱- مقدمه

خسارات حاصل از خوردگی فلزات در صنعت، سبب تحمیل هزینه‌های فراوانی می‌شود، به طوری که حدود نیمی از تولید سالانه فولاد برای تعویض قطعات مکانیکی خورده شده به کار می‌رود [۱]. در کاربردهای صنعتی، اغلب قطعات مکانیکی باید تحت شرایط سخت مانند تنش و بار زیاد، سرعت و دمای بالا، تماس با محیط شیمیایی خورنده و... کار کنند؛ بنابراین برای حفاظت آنها در برابر انواع مختلف تخریب، بهبود کیفیت قطعات لازم است. یک راه حل منطقی و کم هزینه، ایجاد خواص مورد نظر بر روی سطوح مورد نیاز قطعه است [۲].

به منظور بهبود خواص سطحی قطعات، فرآیندهای بهبود سطح توسط لیزر به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این نوع فرآیندها، مواد پوشش به همراه لایه نازکی از فلز پایه ذوب می‌شود. سپس فلز پایه ذوب شده با ماده پوشش مذاب مخلوط می‌شود و یک پیوند متالورژیکی تشکیل می‌دهد. منطقه مذاب در یک زمان بسیار کوتاهی منجمد می‌شود و منجر به تشکیل یک ریزساختار اصلاح شده و خواص سطحی بهبود یافته می‌شود [۳].

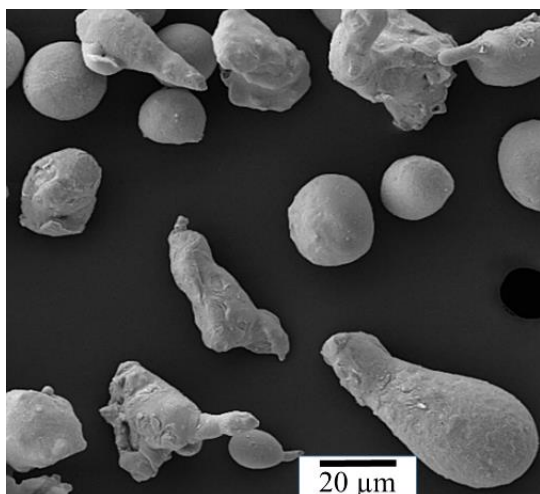
پوشش‌دهی با استفاده از لیزر یک روش مناسب جهت محافظت و افزایش عمر قطعات است. پوشش‌دهی به دو روش انجام می‌گیرد: (۱) با استفاده از سیم (۲) با استفاده از پودر [۴]. پوشش‌دهی سطح توسط پودر یک فلز، خود می‌تواند به دو صورت انجام پذیرد: (۱) اعمال پودر در حین تابش پرتو لیزر به سطح زیر لایه (۲) از پیش قرار دادن پودر روی سطح مورد نظر و سپس تابیدن پرتو لیزر. در پوشش‌دهی با استفاده از لیزر به روش پیش‌نشانی، تنظیم دقیق پارامترهای لیزر جهت دستیابی به یک لایه نازک پوشش با کمترین مقدار رقیق‌شدگی و مقاومت کافی اتصال مورد نیاز است.

برای دست یافتن به پارامترهای مناسب فرآیند، تاکنون مطالعات گوناگونی انجام شده است. خرم و همکاران [۵] از لیزر پالسی Nd:YAG برای پوشش‌دهی اینکونل ۷۱۸ با پودر $75Cr_3C_2+25(80Ni20Cr)$ استفاده کردند. آنها تأثیر پارامترهای فرآیند را روی هندسه پوشش، نرخ انحلال و سختی بررسی نمودند. آنها دریافتند که فرکانس لیزر و عرض پالس تأثیر مثبتی روی عرض پوشش، زاویه پوشش و نرخ انحلال و تأثیر منفی روی ارتفاع پوشش و سختی دارند. سرعت اسکن لیزر تأثیر معکوس روی پاسخ‌های فرآیند دارد.

مینگ و همکاران [۶] پوشش‌دهی با لیزر AISI 1020 را با استفاده از پودر پایه نیکل بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سرعت لیزر، نرخ انحلال کاهش می‌یابد، اما نسبت عرض به ارتفاع پوشش افزایش می‌یابد. بوراهیمما و همکاران [۷] تأثیر پارامترهای پوشش‌دهی با لیزر را روی هندسه و کیفیت پوشش Cu-Ni-Al بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که با افزایش سرعت لیزر، ارتفاع و عرض پوشش کاهش می‌یابد؛ همچنین افزایش سرعت لیزر و کاهش نرخ تغذیه پودر، کیفیت پوشش را بهبود می‌دهد. الکانمیا و همکاران [۸]، از پودر اینکونل ۶۲۵ برای پوشش‌دهی فولاد زنگ نزن AISI 304L استفاده کردند. نتایج به دست آمده از روش رویه پاسخ برای بهینه‌سازی مشخصات پوشش نشان می‌دهد که پارامترهای بهینه فرآیند شامل میزان پودر نیکل ۶۷/۶ درصد وزنی، چگالی انرژی ۱۸/۶۰ ژول بر میلی‌متر مربع و نرخ جریان ۸/۸۶ لیتر بر دقیقه می‌باشند. کیم و همکاران [۹]، به بررسی شکل حوضچه مذاب و چگونگی رقیق شدن لایه پوشش پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که با افزایش زمان پوشش‌دهی و یا افزایش انرژی ورودی نسبت ارتفاع پوشش کاهش می‌یابد. سان و همکاران [۱۰]، به تحلیل آماری و بهینه‌سازی پارامترهای پوشش‌دهی لیزر Ti6Al4V پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش توان لیزر سبب افزایش عرض پوشش می‌شود و افزایش سرعت منجر به کاهش عرض و عمق لایه پوشش می‌شود. نادال و همکاران [۱۱]، به پیش‌بینی هندسه پوشش ایجاد شده پرداختند و نشان دادند که می‌توان هندسه پوشش را براساس ورودی‌های فرآیند (سرعت، توان لیزر، سرعت تغذیه پودر و فاصله بین مسیرهای متوالی) پیش‌بینی کرد. شی و همکاران [۱۲]، به بهینه‌سازی پارامترهای پوشش‌دهی فولاد کم کربن 20CrMnTi با استفاده از مخلوط پودر Co50 و Ni/WC پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که مهم‌ترین پارامترهای فرآیند، سرعت پوشش‌دهی و نرخ تغذیه پودر می‌باشند که میزان رقیق شدن را تحت تأثیر قرار می‌دهند. گودرزی و همکاران [۱۳]، به مطالعه تأثیر پارامترهای فرآیند روی هندسه پوشش پرداختند. فلز پایه مورد استفاده فولاد S355 و پودر پوشش‌دهی فولاد زنگ نزن AISI 316L بود. آنها نتیجه گرفتند که افزایش توان لیزر منجر به افزایش ارتفاع پوشش و زاویه ترشوندگی می‌شود. لیو و همکاران

ترکیب شیمیایی فلز پایه و پودر استفاده گردید. در جدول ۱ ترکیب شیمیایی این فولاد بر حسب درصد وزنی عناصر سازنده ارائه شده است. از فولاد 316L به صورت پودر به عنوان ماده پوشش استفاده شد. اندازه ذرات پودر با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی اندازه‌گیری شد. میانگین اندازه ذرات ۳۰ میکرومتر بود. مشخصات مورفولوژی و ترکیب شیمیایی پودر بر حسب درصد وزنی عناصر سازنده در شکل ۱ و جدول ۲ ارائه شده است.

در این پژوهش از روش پیش‌نشانی برای پوشش‌دهی استفاده شد. در این روش ابتدا پودر با چسب پلی وینیل الکل مخلوط شده و به حالت خمیری در می‌آید. سپس با ضخامت تقریبی ۱ میلیمتر روی فلز پایه اعمال می‌شود. فلز پایه به همراه پوشش به مدت ۱۲ ساعت در جریان هوا قرار می‌گیرد تا چسب خشک شود. در این روش چسب به عنوان اتصال



شکل ۱- مشخصات مورفولوژی پودر 316L

[۱۴]، بهینه‌سازی پارامترهای پوشش‌دهی را برای تعمیر یک چرخ دنده مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که میزان افزودن پودر روی میزان ارتفاع پوشش تاثیر می‌گذارد. مرادی و همکاران [۱۵]، پودر استلایت ۶ را با استفاده از لیزر رسوب دادند. آنها تاثیر توان لیزر و موقعیت صفحه کانونی را روی ابعاد هندسی، پروفیل میکروسختی و ریزساختار بررسی نمودند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش توان لیزر یک تاثیر منفی روی ارتفاع پوشش دارد؛ همچنین هنگامیکه موقعیت صفحه کانونی بالای زیرلایه باشد، ارتفاع پوشش افزایش می‌یابد. در پژوهشی دیگر، مرادی و همکاران [۱۶]، تاثیر الگوی اسکن لیزر و کاهش توان لیزر در لایه‌های متفاوت را مطالعه نمودند. نتایج نشان می‌دهد که الگوی اسکن لیزر یک تاثیر مهمی روی مشخصات هندسی دارد. کاهش توان لیزر از زیرلایه به سمت بالا سبب کاهش عرض نمونه‌ها می‌شود.

مرور مقالات پیشین نشان می‌دهد، تاکنون مطالعات قابل توجهی روی پوشش‌دهی با لیزر فولاد ۴-۱۷ با پودر 316L انجام نشده است؛ بنابراین تحقیقات بیشتری در این زمینه با هدف بهبود خواص سطحی فولاد ۴-۱۷ باید انجام پذیرد. در این پژوهش فولاد ۴-۱۷ با استفاده از لیزر پالسی Nd:YAG با حداکثر توان ۴۰۰ وات و پودر 316L پوشش داده شد و تاثیر پارامترهای لیزر (فرکانس لیزر، عرض پالس و سرعت اسکن) روی هندسه پوشش (ارتفاع پوشش، عرض پوشش، میزان ترشوندگی، نرخ انحلال) و میکروسختی مورد مطالعه قرار گرفت.

۲- انجام آزمایشات

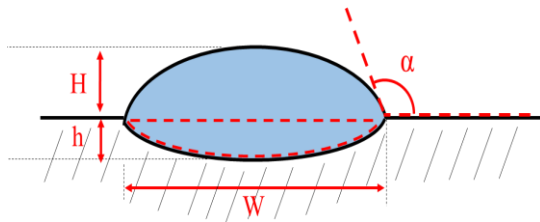
ورق‌های فولاد ۴-۱۷ با ضخامت ۳ میلیمتر به عنوان فلز پایه استفاده شد. از روش طیف سنجی جذب اتمی برای تعیین

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد ۴-۱۷

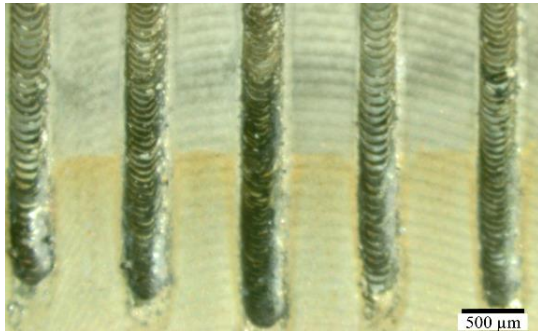
Fe	Cr	Ni	P	Mn	Si	C	S	Cu	Nb	Mo
Balanced	۱۵/۷۳	۳/۹۵	۰/۰۳	۰/۹۱	۰/۳۵	۰/۰۴	۰/۰۳	۳/۰۱	۰/۲۰	۰/۱۸

جدول ۲- ترکیب شیمیایی پودر 316L

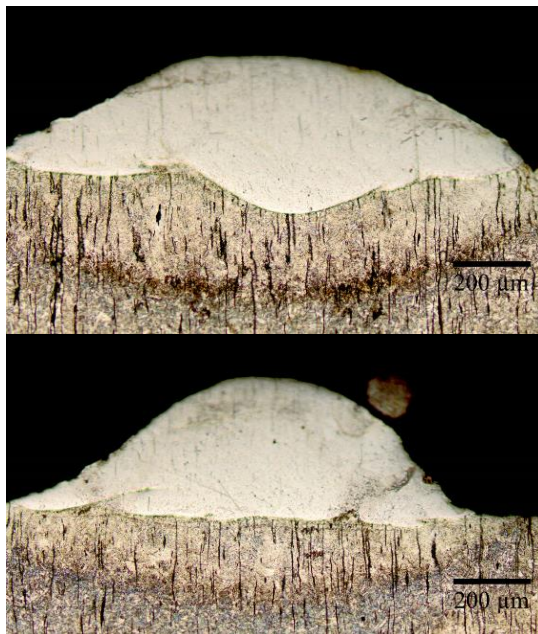
Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Sn	Nb	Pb	Ru	Zn	C	V	Cu	Zr
Balanced	۱۵/۶	۸/۵۸	۳/۳	۰/۱	۰/۰۱	۰/۱	۰/۰۱۶	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۱۹	۰/۰۱۶



شکل ۲- ابعاد هندسی پوشش



شکل ۳- تصویر ماکروسکوپی از سطح پوشش



شکل ۴- سطح مقطع دو نمونه پوشش داده شده

۳- بحث و نتایج

ابعاد هندسی پوشش و مقدار سختی فاکتورهایی هستند که باید در فرآیند پوشش‌دهی با لیزر کنترل شوند. ابعاد هندسی

دهنده ذرات پودر به یکدیگر و به فلز پایه عمل می‌کند. این چسب باید هنگام تاباندن پرتو لیزر و ذوب شدن پودر تبخیر شده و از حوضچه خارج شود تا حفره و ناخالصی در پوشش ایجاد نشود. به منظور ایجاد پوشش، لیزر پالسی Nd:YAG با حداکثر توان ۴۰۰ وات استفاده شد. محدوده پارامترهای قابل دستیابی لیزر عبارتند از: فرکانس ۱ تا ۱۰۰ هرتز، عرض پالس ۰/۲ تا ۲۰ میلی ثانیه و انرژی پالس صفر تا ۴۰۰ ژول. بدیهی است به علت آنکه توان متوسط نمی‌تواند از ۴۰۰ وات تجاوز کند، هر ترکیبی از پارامترهای دستگاه قابل حصول نیست. سیستم متمرکز کننده نوری از سه لنز با فاصله کانونی ۷۵ میلی‌متر و قطر پرتو با حداقل اندازه ۲۵۰ میکرومتر تشکیل شده است. قطر پرتو لیزر در فاصله کانونی تقریباً ۱/۸ میلی‌متر بود. دستگاه لیزر استفاده شده به صورت ترکیب شده با ماشین کنترل عددی کامپیوتری سه محوره است. از توان سنج مدل 5000W-Lp Ophir و ژول سنج مدل LA300W-Lp، جهت اندازه‌گیری توان متوسط و انرژی پالس استفاده گردید. درآزمایش‌ها از گاز آرگون با نرخ ۳۰ لیتر بر دقیقه به عنوان گاز کمکی برای جلوگیری از اکسیداسیون استفاده شد. در جدول ۳ پارامترهای فرآیند استفاده شده، ابعاد هندسی و مقدار میکروسختی اندازه‌گیری شده ارائه شده است. برای تایید قابلیت نتایج، آزمایشات سه مرتبه تکرار شد و میانگین نتایج گزارش گردید.

بعد از روش‌های استاندارد سنگزنی و پولیش، نمونه‌ها با محلول نایتال (2 ml HNO₃+ 96 ml Ethanol) اچ شدند. جهت بررسی ابعاد هندسی پوشش از میکروسکوپ نوری Olympus BH-2 و جهت اندازه‌گیری ابعاد دقیق هندسی از نرم‌افزار ImagJ استفاده شد. در شکل ۲ ابعاد هندسی پوشش اندازه‌گیری شده نشان داده شده است. میکروسختی نمونه‌ها با دستگاه میکروسختی سنج Buehler با نیروی ۱۰۰۰ گرم و زمان نگهداری ۱۰ ثانیه طبق استاندارد ASTM E384 اندازه‌گیری شد. در شکل ۳ تصویر ماکروسکوپی از سطح پوشش برای نمونه‌های ۱ تا ۵ نشان داده شده است. سطح مقطع تعدادی از نمونه‌های پوشش داده شده با لیزر در شرایط مختلف فرآیند در شکل ۴ ارائه شده است.

جدول ۳- پارامترهای فرآیند، ابعاد هندسی و مقدار میکروسختی اندازه گیری شده

شماره	سرعت (mm/s)	عرض پالس (ms)	فرکانس (Hz)	عمق مذاب زیر لایه (μm)	ارتفاع پوشش (μm)	نرخ انحلال (%)	عرض پوشش (μm)	زاویه ترشوندگی (degree)	مقدار سختی (Hv)
۱	۲	۱۲	۱۲	۳۴	۲۸۵	۱۰/۷	۱۴۷۸	۱۴۴	۳۲۸
۲	۳	۱۲	۱۲	۳۱	۳۵۴	۸/۱	۱۳۴۵	۱۳۲	۳۸۶
۳	۴	۱۲	۱۲	۲۸	۴۷۷	۵/۵	۱۳۰۸	۱۲۵	۴۵۲
۴	۵	۱۲	۱۲	۲۵	۵۳۳	۴/۵	۱۲۵۲	۱۲۱	۵۷۰
۵	۵	۱۰	۱۲	۲۱	۵۶۱	۳/۶	۱۲۰۲	۱۲۰	۵۸۰
۶	۵	۱۴	۱۲	۲۷	۴۸۷	۵/۳	۱۲۸۴	۱۲۸	۵۵۰
۷	۵	۱۶	۱۲	۳۸	۴۲۷	۸/۲	۱۳۸۹	۱۴۳	۵۴۰
۸	۵	۱۰	۱۰	۱۹	۵۸۱	۳/۲	۱۱۷۶	۱۱۶	۵۹۰
۹	۵	۱۰	۱۴	۲۶	۴۹۷	۵	۱۲۷۴	۱۲۸	۵۴۵
۱۰	۵	۱۰	۱۶	۳۱	۴۷۰	۶/۲	۱۳۳۶	۱۳۴	۵۲۰

جدول ۴- حرارت ورودی، زمان تعامل و چگالی توان لیزر محاسبه شده

شماره	سرعت (mm/s)	عرض پالس (ms)	فرکانس (Hz)	توان متوسط (W)	حرارت ورودی (J/mm)	زمان تعامل (s)	چگالی توان (W/mm^2)	چگالی توان * زمان تعامل (J/mm^2)
۱	۲	۱۲	۱۲	۱۴۰	۷۰	۰/۹	۵۵/۱۱	۴۹/۶۰
۲	۳	۱۲	۱۲	۱۴۰	۴۶/۶۷	۰/۶	۵۵/۱۱	۳۳/۰۷
۳	۴	۱۲	۱۲	۱۴۰	۳۵	۰/۴۵	۵۵/۱۱	۲۴/۸۰
۴	۵	۱۲	۱۲	۱۴۰	۲۸	۰/۳۶	۵۵/۱۱	۱۹/۸۴
۵	۵	۱۰	۱۲	۱۳۰	۲۶	۰/۳۶	۵۱/۱۸	۱۸/۴۲
۶	۵	۱۴	۱۲	۱۵۰	۳۰	۰/۳۶	۵۹/۰۵	۲۱/۲۵
۷	۵	۱۶	۱۲	۱۶۵	۳۳	۰/۳۶	۶۴/۹۶	۲۳/۳۸
۸	۵	۱۰	۱۰	۱۲۰	۲۴	۰/۳۶	۴۷/۲۴	۱۷/۰۰
۹	۵	۱۰	۱۴	۱۴۵	۲۹	۰/۳۶	۵۷/۰۸	۲۰/۲۲
۱۰	۵	۱۰	۱۶	۱۶۰	۳۲	۰/۳۶	۶۲/۹۹	۲۲/۶۷

و سختی پوشش عمدتاً به پارامترهای لیزر مانند فرکانس، عرض پالس و سرعت اسکن وابسته هستند.

نرخ انحلال تاثیر قابل توجهی بر مقدار سختی منطقه پوشش دارد. نرخ انحلال به منطقه زیرلایه ذوب شده و منطقه پوشش رسوب داده شده مرتبط است. یک تعادل بین نرخ انحلال و ابعاد پوشش برای دستیابی به پارامترهای بهینه لازم است. نرخ انحلال با استفاده از ابعاد پوشش به صورت رابطه (۱) قابل محاسبه است [۸].

$$\text{Dilution ratio} = \frac{h}{h + H} \times 100 \quad (1)$$

در اینجا h عمق مذاب زیر لایه و H ارتفاع پوشش است.

حرارت ورودی، زمان تعامل پرتوی لیزر با ماده و چگالی توان لیزر برای درک بهتر تاثیر پارامترهای ورودی لیزر روی پارامترهای خروجی فرآیند استفاده می‌شوند. جدول ۴ مقادیر محاسبه شده برای حرارت ورودی، زمان تعامل و چگالی توان لیزر را نشان می‌دهد. حرارت ورودی می‌تواند به صورت رابطه (۲) محاسبه شود [۱۷].

$$HI = \frac{P_{ave}}{S} \quad (2)$$

HI ، P_{ave} و S به ترتیب حرارت ورودی، توان متوسط لیزر و سرعت اسکن می‌باشند.

$$t = \frac{D_{beam}}{S} \quad (3)$$

در اینجا t زمان تعامل پرتو لیزر و D_{beam} قطر پرتوی لیزر است.

$$P_{density} = \frac{P_{ave}}{A_{beam}} \quad (4)$$

$P_{density}$ چگالی توان لیزر، P_{ave} توان متوسط لیزر و A_{beam} مساحت پرتوی لیزر می‌باشند.

۳-۱- تاثیر پارامترهای لیزر روی ارتفاع پوشش

عرض پالس و فرکانس لیزر یک تاثیر منفی روی ارتفاع پوشش دارند؛ در حالیکه سرعت اسکن یک تاثیر مثبت روی ارتفاع پوشش دارد (شکل ۵). افزایش فرکانس لیزر و عرض پالس سبب کاهش در ارتفاع پوشش می‌شود؛ زیرا حرارت ورودی و چگالی توان لیزر افزایش می‌یابد (جدول ۴). در حرارت ورودی بالاتر، یک حوضچه مذاب بزرگتر با دمای بالاتر تشکیل می‌شود. ماده مذاب می‌تواند روی زیرلایه پخش شود و منجر به کاهش ارتفاع پوشش شود.

با کاهش سرعت اسکن، حرارت ورودی و زمان تعامل لیزر افزایش می‌یابد (جدول ۴). در این حالت

انرژی بیشتری برای ذوب پودر و زیرلایه استفاده می‌شود. ماده مذاب روی زیرلایه در اثر جاذبه پخش می‌شود. در نتیجه ارتفاع پوشش با افزایش سرعت اسکن افزایش می‌یابد.

۳-۲- تاثیر پارامترهای لیزر بر روی عرض پوشش

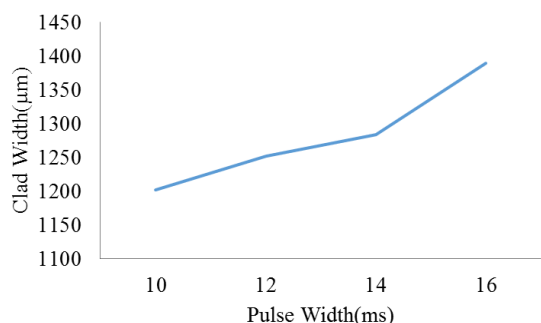
نتایج نشان می‌دهد که عرض پالس و فرکانس لیزر یک تاثیر مثبتی بر روی عرض پوشش دارند؛ در حالیکه سرعت لیزر یک تاثیر منفی روی عرض پوشش دارد (شکل ۶).

هنگامیکه فرکانس و عرض پالس افزایش می‌یابد، حرارت ورودی و چگالی توان افزایش می‌یابد (جدول ۴). در توان ورودی بالاتر، یک حوضچه مذاب بزرگتر با دمای بالاتر تشکیل می‌شود. این امر منجر به افزایش عرض پوشش می‌شود. با کاهش سرعت لیزر، حرارت ورودی و زمان تعامل پرتوی لیزر افزایش می‌یابد و منجر به تشکیل یک عرض پوشش بزرگتر می‌شود (جدول ۴).

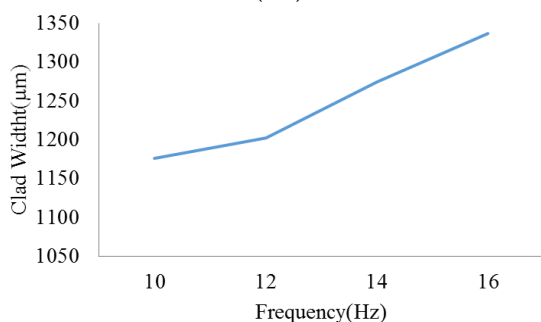
۳-۳- تاثیر پارامترهای لیزر روی زاویه پوشش

نتایج نشان می‌دهد که زاویه پوشش با افزایش فرکانس لیزر و عرض پالس افزایش می‌یابد (شکل ۷). زمان تابش لیزر با افزایش فرکانس لیزر و عرض پالس افزایش می‌یابد. در این حالت حرارت ورودی افزایش و یک عرض پوشش بزرگتر با حرارت بالاتر تشکیل می‌شود (جدول ۴). در نتیجه پخش شونده‌گی ماده مذاب روی زیرلایه افزایش می‌یابد و منجر به افزایش زاویه پوشش می‌شود. افزایش سرعت لیزر سبب کاهش زاویه پوشش می‌شود. با افزایش سرعت لیزر، حرارت ورودی و زمان تعامل پرتو لیزر کاهش می‌یابد؛ در نتیجه انرژی کمتری برای ذوب پودر و زیرلایه استفاده می‌شود. این امر منجر به کاهش زاویه پوشش می‌شود (جدول ۴). همچنین زاویه پوشش با افزایش سرعت لیزر به سبب نرخ سرد شدن سریع کاهش می‌یابد.

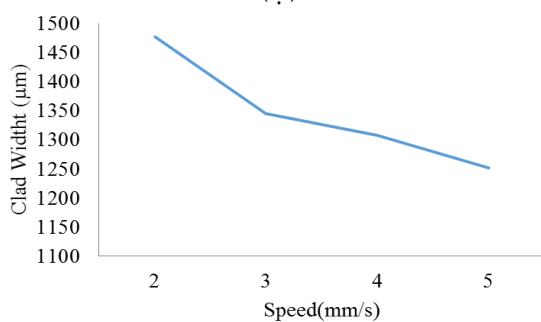
زاویه پوشش نشانه‌ای از میزان ترشوندگی است. زاویه پوشش به ارتفاع پوشش و عرض پوشش وابسته است. مقدار زاویه بزرگتر در یک عرض پوشش وسیع‌تر به دست می‌آید. به عبارت دیگر مقدار زاویه بزرگتر هنگامی به دست می‌آید که پودر مذاب به طور کامل روی زیرلایه پخش شود و منطقه پوشش یک شکل بیضوی داشته باشد.



(الف)

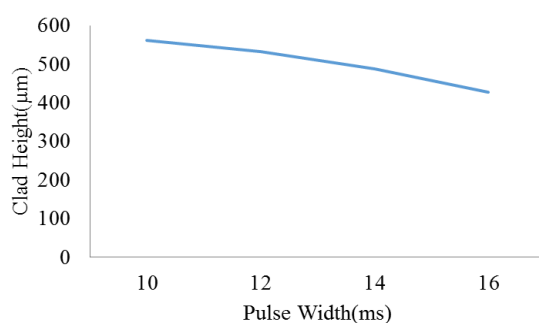


(ب)

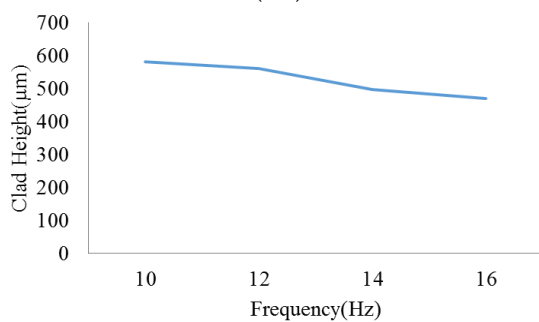


(ج)

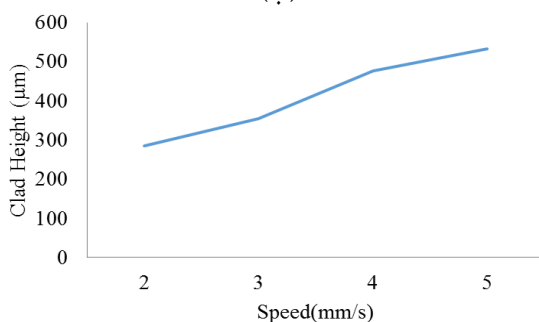
شکل ۶- تأثیر پارامترهای لیزر بر روی عرض پوشش (الف عرض پالس، ب فرکانس و ج سرعت اسکن



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵- تأثیر پارامترهای لیزر بر روی ارتفاع پوشش (الف عرض پالس، ب فرکانس و ج سرعت اسکن

انحلال می‌شود. هنگامیکه فرکانس لیزر و عرض پالس در مقادیر پایین و سرعت اسکن در بالاترین مقدار نگه داشته شود، می‌توان حداقل نرخ انحلال را به سبب کمترین حرارت ورودی به دست آورد.

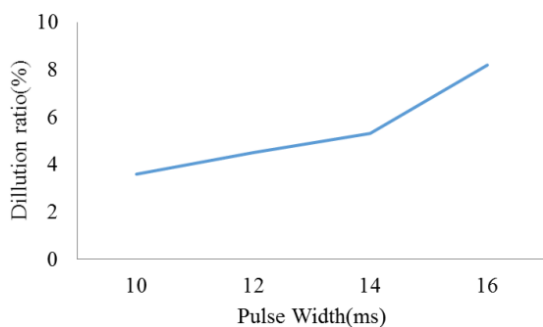
۳-۵ تأثیر پارامترهای لیزر بر روی سختی

نتایج نشان می‌دهد که عرض پالس و فرکانس لیزر یک تاثیر منفی روی سختی دارند، درحالیکه سرعت لیزر یک تاثیر مثبت بر سختی دارد (شکل ۹).

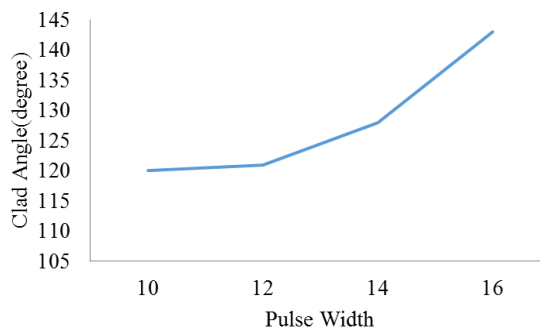
۳-۴ تأثیر پارامترهای لیزر بر روی نرخ انحلال

عرض پالس و فرکانس لیزر یک تاثیر مثبتی روی نرخ انحلال دارند؛ درحالیکه سرعت لیزر یک تاثیر منفی روی نرخ انحلال دارد (شکل ۸).

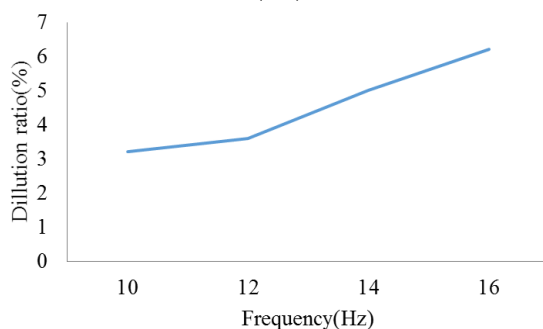
کاهش عرض پالس و فرکانس لیزر منجر به حرارت ورودی کمتر می‌شود (جدول ۴)؛ بنابراین حجم کمتری از زیرلایه ذوب شده و منجر به کاهش نرخ انحلال می‌شود. افزایش سرعت لیزر منجر به کاهش زمان تعامل پرتوی لیزر می‌شود؛ بنابراین حرارت ورودی و مساحت زیرلایه ذوب شده کاهش می‌یابد (جدول ۴). این امر منجر به کاهش نرخ



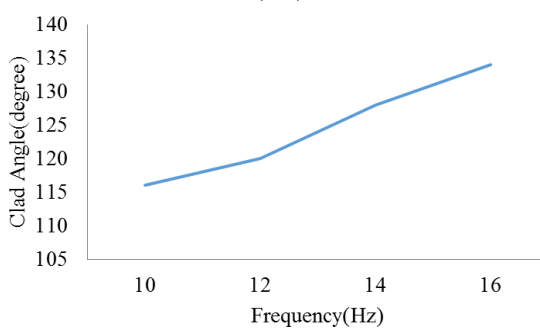
(الف)



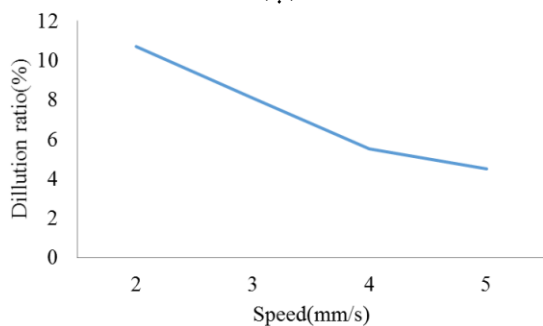
(الف)



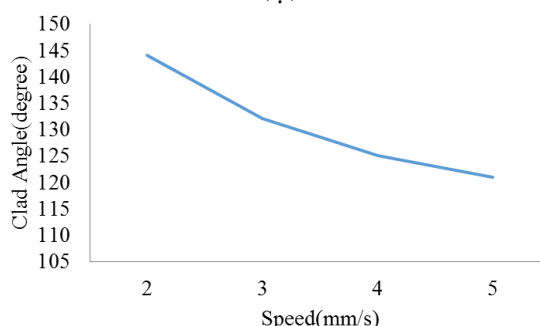
(ب)



(ب)



(ج)



(ج)

شکل ۸- تاثیر پارامترهای لیزر روی نرخ انحلال الف) عرض پالس ب) فرکانس ج) سرعت اسکن

شکل ۷- تاثیر پارامترهای لیزر روی زاویه پوشش الف) عرض پالس ب) فرکانس ج) سرعت اسکن

یا دانه‌های ستونی با طول بلند (نمونه ۱) تشکیل شده است. سختی در نزدیکی سطح مشترک کاهش می‌یابد؛ زیرا دانه‌های ستونی بیشتری نزدیک سطح مشترک پوشش تشکیل می‌شوند. شکل ۱۱ پروفیل توزیع میکروسختی را در راستای عرض پوشش نشان می‌دهد. نمونه ۱ دارای فرکانس ۱۲ هرتز، عرض پالس ۱۲ میلی ثانیه و سرعت ۲ میلی‌متر بر ثانیه بود، در حالیکه نمونه ۸ دارای فرکانس ۱۰ هرتز، عرض پالس ۱۰ میلی ثانیه و سرعت ۵ میلی‌متر بر ثانیه بود. زمان تعامل و چگالی توان لیزر برای نمونه ۱ به ترتیب ۰/۹ میلی ثانیه

حداکثر مقدار سختی در سرعت‌های لیزر بالا و فرکانس و عرض پالس پایین به دست می‌آید؛ زیرا در این حالت نرخ سرد شدن افزایش یافته و منجر به تشکیل دانه‌های هم محور بسیار ریز در ساختار ماده می‌شود.

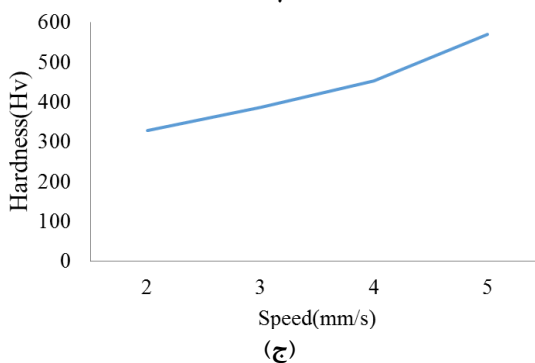
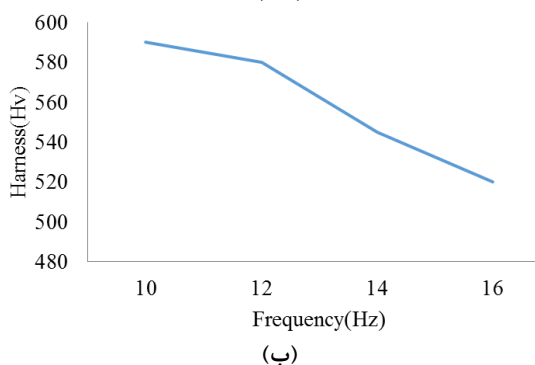
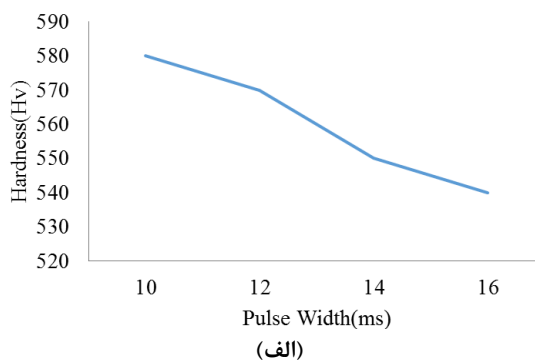
شکل ۱۰ پروفیل توزیع میکروسختی را در راستای عمق پوشش نشان می‌دهد. حداکثر مقدار سختی در نزدیکی سطح بالایی پوشش دیده می‌شود و سختی به تدریج با افزایش فاصله از سطح پوشش به سمت زیرلایه کاهش می‌یابد. مناطق بالای پوشش از دانه‌های هم محور بسیار ریز (نمونه ۸)

می‌یابد؛ بنابراین منطقه کوچکتری از زیرلایه ذوب می‌شود. زیرلایه ذوب نشده به عنوان چاه حرارتی^۱ عمل می‌کند؛ بنابراین رشد دانه های هم محور را افزایش می‌دهد. همانطوریکه انتظار می‌رود، مناطق بالای پوشش نمونه ۸ از دانه‌های هم محور بسیار ریز تشکیل شده است؛ در حالیکه یک ساختار دانه‌های ستونی با طول بلند در منطقه پوشش نمونه ۱ مشاهده می‌شود. این امر منجر به مقادیر سختی بالاتر برای نمونه ۸ در مقایسه با نمونه ۱ می‌شود. این موضوع با ریزساختارهای نشان داده شده در شکل ۱۲ تایید می‌شود.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، پوشش‌دهی با لیزر فولاد ۴-۱۷ با استفاده از پودر 316L انجام پذیرفت. تاثیر پارامترهای فرآیند لیزر (فرکانس لیزر، عرض پالس و سرعت اسکن لیزر) روی هندسه پوشش (ارتفاع، عرض و زاویه پوشش)، نرخ انحلال و سختی بررسی شد. نتایج به دست آمده به شرح ذیل است:

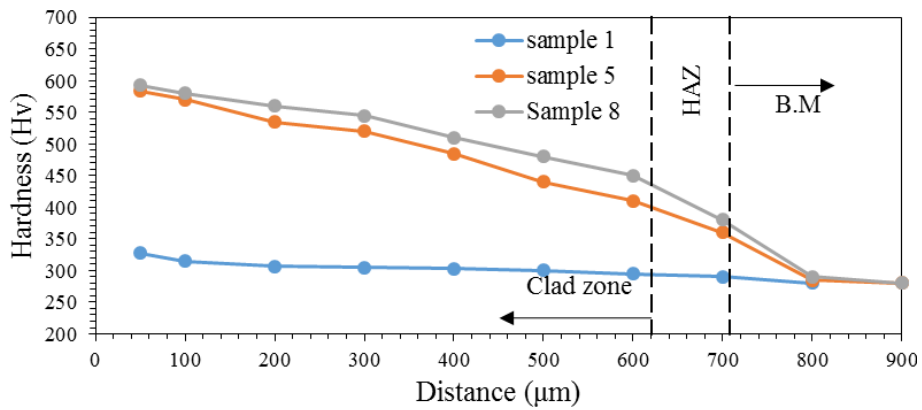
- (۱) با افزایش فرکانس لیزر و عرض پالس، ارتفاع پوشش و سختی کاهش می‌یابد. حال آنکه افزایش سرعت اسکن منجر به افزایش ارتفاع پوشش و سختی می‌گردد.
- (۲) با افزایش فرکانس لیزر و عرض پالس، عرض پوشش، زاویه پوشش و نرخ انحلال افزایش می‌یابد، اما افزایش سرعت اسکن منجر به کاهش عرض پوشش، زاویه پوشش و نرخ انحلال می‌شود.
- (۳) حداکثر مقدار سختی در سرعت های لیزر بالا و فرکانس و عرض پالس پایین به دست می‌آید؛ زیرا در این حالت نرخ سرد شدن افزایش یافته و منجر به تشکیل دانه‌های هم محور بسیار ریز در ساختار ماده می‌شود.
- (۴) پارامترهای مناسب برای پوشش‌دهی عبارتند از: فرکانس ۱۰ هرتز، عرض پالس ۱۰ میلی ثانیه و سرعت اسکن ۵ میلی‌متر بر ثانیه. میانگین میکروسختی پوشش برای نمونه بهینه ۵۹۰ ویکرز است که تقریباً ۱/۳ برابر فلز پایه است.



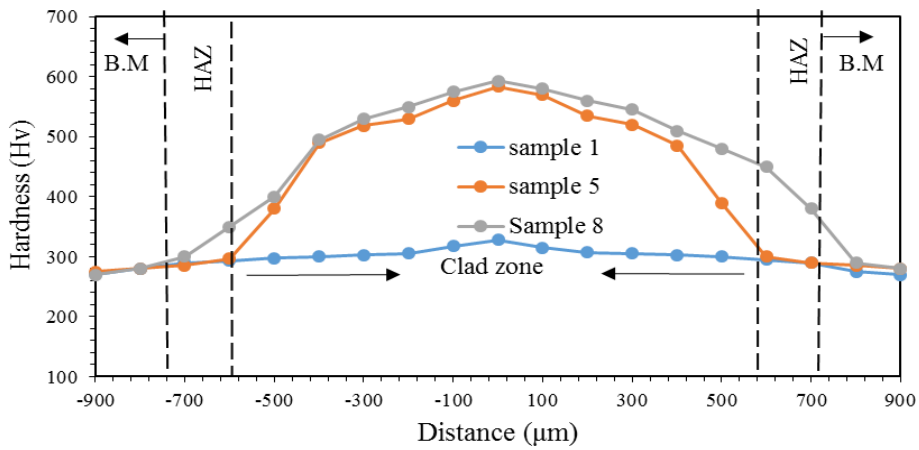
شکل ۹- تاثیر پارامترهای لیزر روی سختی الف) عرض پالس، ب) فرکانس و ج) سرعت اسکن

و ۵۵/۱۱ وات بر میلی‌متر مربع و برای نمونه ۸ به ترتیب ۰/۳۶ میلی ثانیه و ۴۷/۲۴ وات بر میلی‌متر مربع هستند. با ضرب زمان تعامل در چگالی توان، انرژی بر مساحت به دست می‌آید. این مقدار برای نمونه ۱ به میزان ۴۹/۶۰ ژول بر میلی‌متر مربع و برای نمونه ۸ به میزان ۱۷/۰۰ ژول بر میلی‌متر مربع است. به عبارت دیگر انرژی کمتری بر مساحت در زمان مشخص به نمونه ۸ در مقایسه با نمونه ۱ انتقال

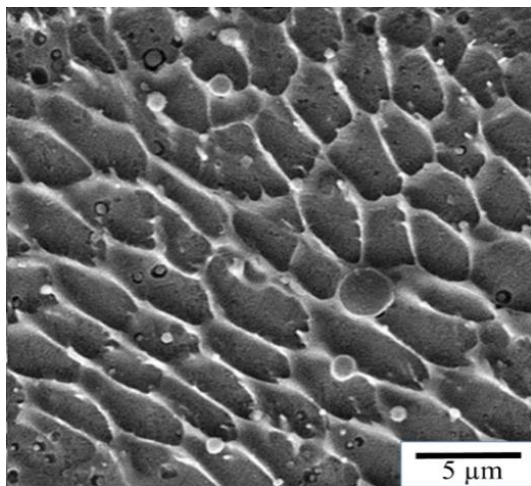
^۱ Heat sink



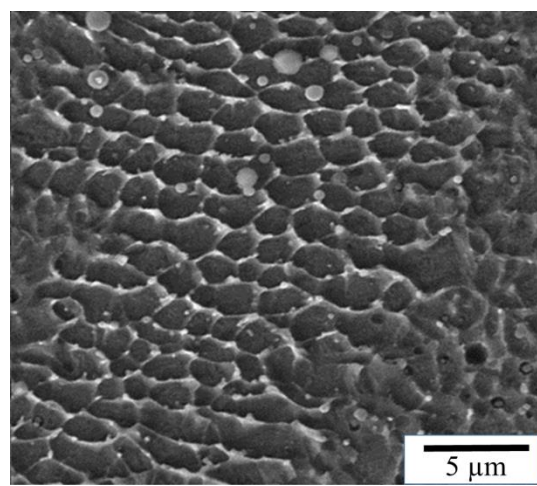
شکل ۱۰- پروفیل توزیع میکروسختی در راستای عمق پوشش



شکل ۱۱- پروفیل توزیع میکروسختی در راستای عرض پوشش



(ب)



(الف)

شکل ۱۲- ریزساختار پوشش 316L: (الف) نمونه ۸ (توزیع یکنواخت دانه‌های آستنیتی هم محور) و (ب) نمونه ۱ (دانه‌های ستونی با طول بلند)

- ۵- مراجع
- [10] Sun Y, Hao M (2012) Statistical analysis and optimization of process parameters in Ti6Al4V laser cladding using Nd:YAG laser. *Opt Lasers Eng* 50(7): 985-995.
- [11] Nenadl O, Ocelík V, Palavra A, Hosson JD (2014) The Prediction of Coating Geometry from Main Processing Parameters in Laser Cladding. *Phys Procedia* 56: 220-227.
- [12] Shi Y, Li Y, Liu J, Yuan Z (2018) Investigation on the parameter optimization and performance of laser cladding a gradient composite coating by a mixed powder of Co50 and Ni/WC on 20CrMnTi low carbon alloy steel. *Opt Lasers Tech* 99: 256-270.
- [13] Moazami Goodarzi D, Pekkarinen J, Salminen A (2017) Analysis of laser cladding process parameter influence on the clad bead geometry. *Weld World* 61: 883-891.
- [14] Liu H, Hu Z, Qin X, Wang Y, Zhang J, Huang S (2017) Parameter optimization and experimental study of the sprocket repairing using laser cladding. *Int J Adv Manuf Tech* 91: 3967-3975.
- [15] Moradi M, Ashoori A, Hasanib A (2020) Additive manufacturing of stellite 6 superalloy by direct laser metal deposition – Part 1: Effects of laser power and focal plane position. *Opt Lasers Tech* 131: 106328
- [16] Moradi M, Hasani A, Malekshahi Beiranvand Z, Ashoori A, Additive manufacturing of stellite 6 superalloy by direct laser metal deposition – Part 2: Effects of scanning pattern and laser power reduction in differrent layers. *Opt Lasers Tech* 131: 106455
- [17] Khorram A, Davoodi jamaloei A, jafari A (2019) Surface transformation hardening of Ti-5Al-2.5Sn alloy by pulsed nd:yag laser: an experimental study. *Int J Adv Manuf Tech* 100: 3085-3099.
- [1] Overton G, Annderson SG, Belforte DA, Hausken T (2010) Laser marketplace: How wide is the chashm. *Laser Focus World* 46: 32-49.
- [2]. D'Oliveira AS, Silva PS, Vilar R (2002) Microstructural Features of Consecutive Layers of Satellite 6 Deposited By Laser Cladding. *Surf Coat Technol* 153: 203-209.
- [3] Jendrzejewski R, Conde A, Damborenea J, Sliwinski G (2002) Characterisation of the Laser-Clad Stellite Layers for Protective Coatings. *Mater Des* 23: 83-88.
- [4] Vollertsen F, Partes K, Meijer J (2005) State of the art of the laser hardening and cladding. *Proc. 3rd int. WLT. Munich*, 281-298.
- [5] Khorram A, Davoodi Jamaloei A, Paidar M, Cao X (2019) Laser cladding of Inconel 718 with 75Cr3C2+25(80Ni20Cr) powder: Statistical modeling and optimization. *Surf Coat Technol* 378: 124933.
- [6] Ming Q, Lim LC, Chen ZD (1998) Laser cladding of nickel-based hardfacing alloys. *Surf Coat Technol* 106: 174-182.
- [7] Bourahima F, Helbert AL, Rege M, Ji V, Solas D, Baudin T (2018) Laser cladding of Ni based powder on a Cu-Ni-Al glassmold: influence of the process parameters on bonding quality and coating geometry. *J Alloy Compd* 771: 1018-1028
- [8] Olakanmia EO, Nyadongo ST, Malikongwa K, Lawal SA, Botes A, Pityana SL (2019) Multi-variable optimisation of the quality characteristics of fiber-laser clad Inconel-625 composite coatings. *Surf Coat Technol* 357: 289-303
- [9] Kim J, Peng Y (2000) Melt pool shape and dilution of laser cladding with wire feeding. *J Mater Process Technol* 104(3): 284-293.