



اثر تغییر توان لیزر در فرایند AM-LMD بر پروفیل رسوب پودر اینکونل ۷۱۸ بروی اینکونل ۷۳۸

رسول هدایت نژاد^۱، حامد ثابت^{۲*}، صادق رحمتی^۳، علی سالمی گلعدانی^۲

۱- دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی مواد، واحد کرج، دانشگاه آزاداسلامی، کرج، ایران
 ۲- گروه مهندسی مواد و متالورژی، واحد کرج، دانشگاه آزاداسلامی، کرج، ایران
 ۳- گروه مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاداسلامی، تهران، ایران
 * کرج، صندوق پستی ۳۱۳-۳۱۴۸۵، h-sabet@kiaiu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

این تحقیق با هدف بررسی تأثیر تغییر توان لیزر بر مشخصات فصل مشترک در فرایند ساخت افزودنی (AM) با رسوب نشانی پودر اینکونل ۷۱۸ بر روی زیرلایه از جنس اینکونل ۷۳۸ به منظور بازسازی پره های معیوب توربین با رویکرد اقتصاد چرخشی انجام شد. رسوب فلز با لیزر (LMD) یک تکنیک ساخت لایه به لایه است که برای ساخت و تعمیر قطعات حیاتی و استراتژیک استفاده می شود. برای این منظور، رسوب نشانی با توان مختلف ۱۵۰، ۲۵۰ و ۳۵۰ وات بر روی زیرلایه، انجام پذیرفت. برخی از ویژگی ها مانند ابعاد هندسی، تعداد پالس ها در هر لایه و ریزساختار نمونه ها مورد مطالعه قرار گرفت. با مقایسه نتایج، مشخص شد که با افزایش توان، یکپارچگی، ضخامت فصل مشترک و عمق ذوب زیرلایه افزایش می یابد. در مقابل، با افزایش توان، تخلخل سطحی، انحراف اندازه از ابعاد طراحی و تعداد پالس ها برای تکمیل هر لایه کاهش می یابد. هر لایه رسوب نشانی با توان ۱۵۰، ۲۵۰ و ۳۵۰ وات به ترتیب با ۱۷، ۱۱ و ۹ پالس تکمیل گردید. با افزایش توان از ۱۵۰ وات به ۳۵۰ وات، تخلخل سطحی حدود ۹۰٪ کاهش یافت.

مقاله پژوهشی کامل
 دریافت: ۱۴ تیر ۱۴۰۱
 داوری اولیه: ۱۵ مرداد ۱۴۰۱
 پذیرش: ۲۵ مرداد ۱۴۰۱
 کلیدواژگان:
 ساخت افزودنی
 رسوب نشانی فلز با لیزر
 توان، سوپرآلیاژ
 اینکونل

Effect of laser power variation in AM-LMD process on Inconel 718 powder deposition profile on Inconel 738

Rasoull Hedayatnejad¹, Hamed Sabet^{1*}, Sadegh Rahmati², Ali Salemi Golezani¹

1- Department of Materials Engineering, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran.

2- Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

* P.O.B. 313-31485 Karaj, Iran, h-sabet@kiaiu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
 Received: 5 July 2022
 First Decision: 6 August 2022
 Accepted: 16 August 2022

Keywords:

Additive Manufacturing
 Laser Metal Deposition
 Power
 Superalloy
 Inconel

Abstract

The aim of this study was to investigate the effect of laser power variation on joint connection characteristics in the additive manufacturing (AM) process by depositing Inconel 718 powder on an Inconel 738 substrate in order to reconstruct defective gas turbine blades with a circular economy approach. Laser metal deposition (LMD) is a layer-by-layer fabrication technique used to manufacture and reconstruct critical and strategic parts. For this purpose, deposition with different power of 150, 250 and 350 watts was performed on the substrate. Some features such as geometric dimensions, number of pulses per layer and microstructure of the samples were studied. Comparing the results, it was found that with increasing strength, integrity, joint connection thickness and substrate melting depth increase. In contrast, with increasing power, surface porosity, and size deviation from the design dimensions, and the number of pulses to complete each layer decrease. Each deposition layer with power of 150, 250 and 350 watts was completed with 17, 11 and 9 pulses, respectively. By increasing the power from 150 watts to 350 watts, the surface porosity decreased by about 90%.

۱- مقدمه

می تواند منجر به خزش، شکستگی یا شکستگی تسلیم شود و یکپارچگی مکانیکی قطعات را تهدید نماید [۱]. دمای ورودی توربین برای افزایش توان خروجی و راندمان ترمودینامیکی چنین موتورهایی افزایش می یابد و در نتیجه یک محیط پرتنش برای پره ها ایجاد می شود [۲]. پره های آسیب دیده در حین سرویس، باید تعویض و یا بازسازی شوند. با این حال، تعویض

پره ها اجزای حیاتی در یک توربین گاز هستند. شرایط کاری سخت اجتناب ناپذیر، از جمله دما و فشار بالا، برخورد با اجسام خارجی، سایش، خوردگی و خستگی، ممکن است به پره ها آسیب زودرس برساند. این پره ها در معرض دماهای بالا، تنش بالا، اثرات ارتعاش، و نیروهای گریز از مرکز و سیال هستند که

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

R. Hedayatnejad, H. Sabet, S. Rahmati, A. Salemi Golezani, Effect of laser power variation in AM-LMD process on Inconel 718 powder deposition profile on Inconel 738, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 4, pp. 1- 11, 2022 (in Persian). <https://www.doi.org/10.22034/IJME.2022.159957>

می‌شود تا زمانی که جزء مورد نظر تکمیل گردد. انواع مختلفی از نازل وجود دارد که پودر را یا خارج از محور از طریق یک نازل خارجی یا به صورت هم محور در جایی که پرتو لیزر تابیده می‌شود، فراهم می‌نماید [۱۰].

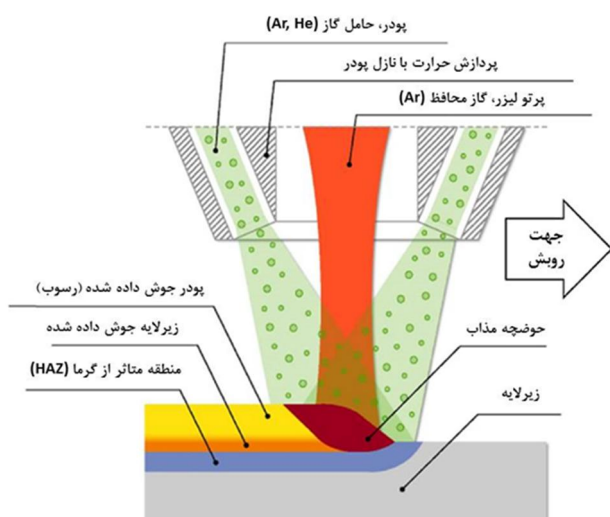


Fig. 1 LMD coaxial nozzle cross section [14]

شکل ۱ مقطع نازل هم محور LMD [۱۴]

روش LMD چندین مزیت کلی دارد، از جمله: امکان بهره‌گیری در طیف گسترده‌ای از مواد مهندسی، سرعت بالای سرد شدن در فرایند رسوب نشانی که منجر به یک ریزساختار ریزدانه می‌شود، قابلیت مخلوط نمودن چند پودر جهت رسیدن به خواص مد نظر و همچنین حرارت ورودی در این روش قابل کنترل می‌باشد. [۱۱]. در مقابل مزایا، این فرایند دارای معایبی مانند دقت ابعادی و کیفیت سطحی پایین و محدودیت در ساخت قطعات با اشکال بسیار پیچیده و با جزئیات ظریف دارد [۱۲، ۱۳].

اخیراً مطالعاتی بر روی روش LMD با استفاده از پودرهای فلزی مختلف مانند اینکونل، Stellite [۱۵]، فولادهای زنگ نزن، آلیاژهای آلومینیوم، آلیاژهای تیتانیوم [۱۶] و غیره برای ساخت قطعات انجام شده است. LMD یک فرایند پیچیده جدیدی می‌باشد که شامل پارامترهای زیادی بوده و هر یک از پارامترها می‌تواند خواص نهایی قطعه ساخته شده را تحت تأثیر قرار دهند [۱۷]. توان، سرعت روبش لیزر، استراتژی روبش، نرخ تغذیه پودر و قطر نقطه اثر لیزر به عنوان پارامترهای اصلی در این روش در نظر گرفته می‌شوند [۱۸-۲۰].

تحقیقات مختلف گزارش کرده‌اند که بسیاری از پارامترهای متغیر در فرایند LMD می‌توانند بر خواص مکانیکی و

پره‌های آسیب‌دیده ترجیح داده نمی‌شود زیرا پره‌ها از مواد گران‌قیمتی مانند سوپر آلیاژهای پایه نیکل ساخته شده‌اند که نیاز به ابزارهای ساخت ویژه دارند. بنابراین، اخیراً بسیاری از مطالعات بر روی استراتژی‌های بازسازی پره‌های معیوب با استفاده از ساخت افزودنی، مورد بحث قرار گرفته‌اند [۳].

ساخت افزودنی^۱، کارآمدتر از فرایند ساخت کاهشی و سنتی است. ساخت افزودنی به طور گسترده در کاربردهای هوافضا مورد استفاده قرار گرفته است و به سرعت به یک فناوری استراتژیک جدید برای ساخت و بازسازی قطعات با کارایی بالا در کاربردهای هوافضا، پزشکی، انرژی و خودرو تبدیل شده است [۴، ۵]. ساخت افزودنی یک اصطلاح کلی برای آن دسته از فناوری‌هایی است که بر اساس یک شکل هندسی، اجسام فیزیکی را با افزودن متوالی مواد ایجاد می‌کنند. طبق تعریف ارائه شده در استاندارد ISO / ASTM 52900، ساخت افزودنی فرایند اتصال مواد برای ساخت قطعات از داده‌های مدل سه بعدی است. بر خلاف روش‌های ساخت کاهشی و سنتی، معمولاً لایه‌های مواد روی یکدیگر لایه بندی می‌شوند. طبق استاندارد ISO / ASTM 52900، فرایند ساخت افزودنی برای مواد فلزی به سه تکنیک کلی تقسیم می‌شود: الف) فرایند رسوب مستقیم انرژی^۲، ب) فرایند ذوب در بستر پودر^۳، ج) فرایند ورقه ورقه‌ای^۴.

روش رسوب نشانی فلز با لیزر^۵ (LMD) یکی از زیر مجموعه‌های تکنیک DED است. LMD، به عنوان روشی برای ساخت افزودنی مبتنی بر لیزر، از پرتو لیزر به عنوان منبع گرما برای ذوب یک ماده فلزی به شکل سیم یا پودر که توسط یک گاز محافظ پشتیبانی می‌شود، استفاده می‌کند [۶، ۷]. پس از سرد شدن حوضچه مذاب و جامد شدن فلز مذاب، لایه دیگری از مواد در بالای لایه جامد قرار می‌گیرد. بنابراین، یک محصول سه بعدی کاملاً فشرده را می‌توان لایه به لایه از مدل طراحی به کمک رایانه (CAD) تولید نمود [۸]. در فرایند LMD، یک حوضچه مذاب روی سطح با استفاده از لیزر، پرتو الکترونی یا قوس ایجاد می‌شود. در همان زمان، پودر فلز یا سیم به حوضچه مذاب اضافه می‌شود تا یک لایه اضافی تشکیل گردد [۹]. LMD یک فرایند ساخت افزودنی است که از یک ماشین یا ربات کنترل عددی کامپیوتری چند محوره (CNC) برای هدایت پرتو لیزر و جریان پودر بر روی سطح رسوب بهره می‌برد. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، قطعه لایه به لایه ساخته

¹ Additive Manufacturing (AM)

² Direct Energy Deposition (DED)

³ Powder Bed Fusion (PBF)

⁴ Sheet Lamination (SL)

⁵ Laser Metal Deposition

۲- روش تحقیق

۲-۱- مشخصات مواد

در این تحقیق از پره توربین ساخته شده از جنس سوپرآلیاژ اینکونل ۷۳۸، که حدود ۸۰۰۰ ساعت در شرایط سرویس بوده است، به عنوان زیرلایه استفاده شد. به منظور تهیه سه نمونه زیرلایه جداگانه با مشخصات مشابه، ایرفویل پره توربین با استفاده از دستگاه وایرکات برش داده شد و سه نمونه مجاور یکدیگر انتخاب گردید. پس از آماده سازی و پلیسه گیری نمونه‌ها، این قطعات با محلولی مطابق جدول ۱ اسید شویی شدند تا برای اطمینان از عدم وجود ترک‌های سطحی، توسط آزمایش غیر مخرب بازرسی چشمی مطابق استاندارد BS EN13018:2016 و آزمایش مایعات نافذ مطابق استاندارد ASTM E 1209:2018 بازرسی شوند. با توجه به حساسیت بالا و به منظور تجزیه و تحلیل دقیق فصل مشترک بین زیرلایه و لایه‌ها، از مایع نافذ فلورسنت سطح II در آزمایش مایعات نافذ استفاده گردید تا از عدم وجود عیوب جزئی احتمالی در زیرلایه اطمینان حاصل گردد. جدول ۲ ترکیب شیمیایی زیرلایه حاصل از طیف سنج نوری^۱ با استاندارد ASTM E 1473:2016 را نشان می‌دهد. به منظور رسوب نشانی روی زیرلایه، از پودر سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ به دلیل قابلیت جوش پذیری خوب [۳۰] که مشخصات آن در جداول ۳ و ۴ و شکل ۲ آمده است، استفاده شد.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی محلول اسید شویی

Table 1 Chemical composition of acid washing solution

میزان	ترکیب
100 mL	H ₂ O
25 mL	HCl
25 gr	FeCl ₃

جدول ۲ ترکیب شیمیایی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۳۸ بر اساس درصد وزنی

Table 2 Inconel 738 superalloy chemical composition (Wt%)

درصد وزنی	عنصر
61.50	Ni
0.15	C
16.07	Cr
8.75	Co
1.59	Mo
3.48	Al
0.01	B
3.45	Ti

متالورژیکی اجزای ساخت افزودنی تأثیر بگذارند. راماکریشنان و همکاران [۲۱] بروی رسوب نشانی پودر اینکونل ۷۳۸ با لیزر تحقیق نمودند. آنها گزارش نمودند که در سرعت روبش ۶ و ۱۲ میلی‌متر بر ثانیه و بالاتر در فصل مشترک زیرلایه و رسوب ترک ایجاد می‌گردد و با کاهش سرعت روبش به ۳ میلی‌متر بر ثانیه، نمونه بدون ترک حاصل گردید. فابریا کایازو و همکاران [۲۲] در تحقیقی که جهت رسوب نشانی پودر سوپرآلیاژ پایه نیکل داشتند، جهت بررسی توان و سرعت روبش، همپوشانی عرضی ۴۰٪ را بهینه اعلام نمودند. ژانگ و همکاران [۲۳] سرعت روبش ۵، ۸، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متر بر دقیقه را آزمودند و با موفقیت از سرعت روبش نسبتاً آهسته برای به دست آوردن آلیاژ Al-Cu-Mg بی عیب و نقص استفاده نمودند.

در مطالعه دیگری، C.Y. Kong [۲۴] روش LMD را بروی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ ارزیابی نمود. آنها دریافتند که حرارت ورودی کم و رسوب با سرعت بالا تنها باعث ایجاد تخلخل جزئی و بدون ترک در نمونه‌ها می‌شود. متل و همکاران [۲۵] تحقیقات خود را بروی کنترل و بهبود توان لیزر با استفاده از یک مدولاتور پرتو لیزر اضافی در ساخت قطعه از جنس آلیاژ CoCrMo متمرکز نمودند. نصب یک مدولاتور پرتو لیزر اضافی، راندمان فرایند را تا ۱۴٪ افزایش داد. Choo و همکاران [۲۶] تأثیر توان لیزر بر خواص متالورژیکی در فرایند LMD را بررسی نمودند. مولر و همکاران [۲۷] دریافتند که وقتی توان لیزر کاهش می‌یابد، تخلخل به صورت خطی از ۰/۱۳٪ به ۰/۸۸٪ افزایش می‌یابد. آتونی و همکاران [۲۸] رسوب لیزری سوپرآلیاژهای همپایه را بررسی نمودند و گزارش نمودند که به دنبال انجماد سریع لایه مذاب، ریزساختار بسیار ظریف می‌شود. گوسوامی و همکاران [۲۹] در فرایند ساخت افزودنی 6 Stellite، به این نتیجه رسیدند که تنش‌های قابل توجهی به دلیل گرادیان‌های حرارتی بالا توسط فرایندهای حرارتی و خنک‌کنندگی می‌تواند شکل گیرند که همه این‌ها گاهی اوقات منجر به اعوجاج نامطلوب یا ایجاد ترک می‌شوند.

در تحقیق حاضر، به منظور بازسازی پره‌های معیوب توربین، قطعات ایرفویل پره توربین ساخته شده از جنس سوپرآلیاژ اینکونل ۷۳۸ با ۸۰۰۰ ساعت کارکرد به عنوان زیرلایه و پودر اینکونل ۷۱۸ به دلیل قابلیت جوش پذیری خوب [۳۰] به عنوان پودر رسوب نشانی با فرایند LMD انتخاب شدند. نمونه‌ها با توان لیزر مختلف رسوب نشانی شده و تأثیر این متغیر بر روی آن‌ها بررسی گردید.

^۱ Optical Emission Spectrometry

۲-۲- فرایند رسوب نشانی

به منظور رسوب نشانی از دستگاه DLD_C5_500W با مشخصات جدول ۵ استفاده گردید.

برای بررسی اثر تغییر توان لیزر در طی این فرایند، پارامترهای سرعت روبش، نرخ تغذیه پودر، همپوشانی عرضی و قطر نقطه اثر لیزر ثابت در نظر گرفته شدند. برای این منظور سرعت روبش لیزر ۵ میلی‌متر بر ثانیه [۳۱]، سرعت تغذیه پودر ۷rpm-g/s، همپوشانی عرضی ۴۰٪ [۲۲] و اندازه نقطه اثر پرتو که با توجه به نازل لیزر استفاده شده اندازه گیری می‌شود [۳۱] یک میلی‌متر و استراتژی روبش لیزری سه لایه یک طرفه [۲۲] مطابق جدول ۶ و سطح رسوب یک سانتی متر مربع در نظر گرفته شد. توزیع انرژی پرتو لیزر در تمامی نمونه‌ها گوسی و شکل پرتو گرد است. قبل از انجام رسوب نشانی بروی زیرلایه‌های منتخب، جهت انجام تنظیمات پارامترها چندین پالس رسوب نشانی بروی یک زیرلایه دیگر از جنس اینکونل ۷۳۸ مطابق شکل ۳ انجام پذیرفت. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، به منظور ایجاد جریان پودر متراکم برای فرایند ساخت افزودنی LMD از نازل هم محور استفاده گردید. با بکارگیری یک نازل هم‌محور، پودر از بالای سطح وارد پرتو لیزر می‌شود که بر توزیع لیزر در سطح رسوب و همچنین دمای پودر قبل از ورود به حوضچه مذاب دارد، تأثیر می‌گذارد [۳۲].

جدول ۳ مشخصات پودر رسوب نشانی از جنس اینکونل ۷۱۸

Table 3 Specifications of deposited powder of Inconel 718

مشخصات پودر	
اندازه ذرات	45-90 m
مورفولوژی	کروی
شرکت سازنده	Wisdom

جدول ۴ ترکیب شیمیایی پودر سوپراآلیاژ اینکونل 718 بر اساس درصد وزنی
Table 4 Chemical composition of Inconel 718 superalloy powder by (Wt%)

عنصر	درصد وزنی
Ni	47
Cr	21.3
Fe	15
Mo	2.2
Al	1.2
Ti	0.9
Si	5.5
Nb	6.5
Mn	0.6



Fig. 3 Adjustment of LMD process parameters

شکل ۳ تنظیم پارامترهای فرایند LMD

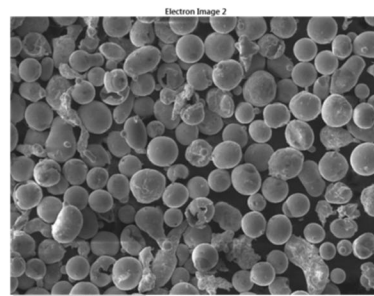


Fig. 2 Scanning Electron Microscopic image of Inconel 718 powder

شکل ۲ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی پودر اینکونل ۷۱۸

جدول ۵ مشخصات دستگاه AM-LMD

Table 5 Specifications of AM-LMD device

مشخصات دستگاه AM-LMD	
نوع لیزر	فیبری - Er:YAG
مد لیزر	پیوسته
توان لیزر	۵۰۰ وات
طول موج متوسط لیزر	۱۰۸۴ نانومتر
فرکانس	۱ تا ۱۰۰۰ هرتز
سیستم خنک کننده	چیلر

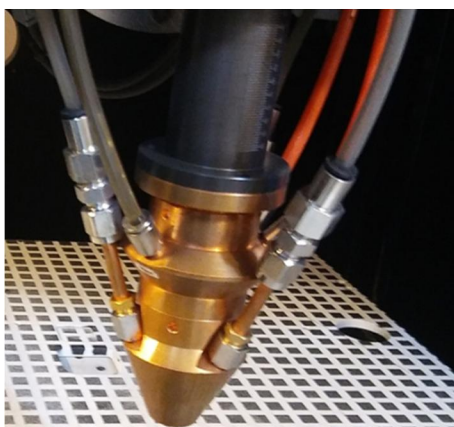


Fig. 4 LMD process coaxial nozzle

شکل ۴ نازل هم محور فرایند LMD

۲-۳- بررسی نمونه‌ها

پس از رسوب نشانی، طول و عرض و ارتفاع نمونه‌ها کنترل و اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری با کمک میکروسکوپ استریو AVEN-26700 انجام و نتایج آنها ثبت گردید.

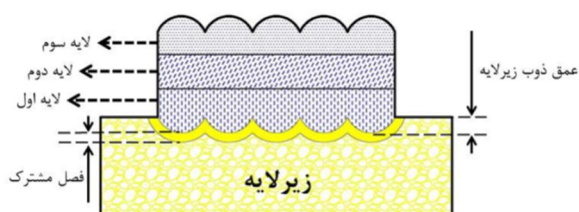


Fig. 6 Schematic of deposited layers

شکل ۶ شماتیک لایه های رسوب نشانی شده

با استفاده از نرم‌افزار Digimizer Version 5.7.2 درصد تخلخل سطحی نمونه‌ها محاسبه گردید [۳۱-۳۳]. بدین منظور تصاویر تهیه شده از سطح نمونه‌های رسوب نشانی شده با توان ۱۵۰، ۲۵۰ و ۳۵۰ وات به ترتیب در محیط نرم‌افزار بارگذاری شده و پس از انجام تنظیمات اولیه نرم‌افزار تخلخل سطحی آنها به تفکیک اندازه‌گیری گردید. سپس نمونه‌های رسوب نشانی شده توسط دستگاه وایرکات از وسط برش داده شدند و مطابق استاندارد ASTM E3-11 به منظور متالوگرافی آماده سازی شدند. جهت پرداخت اولیه به ترتیب از سنباده با زبری ۲۲۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۲۰۰ استفاده گردید. به منظور پرداخت نهایی از خمیر الماسه ۳ و ۱ میکرون استفاده شد. از محلول آدلرز^۱ [۳۴] جهت حکاکی^۲ نمودن نمونه‌ها استفاده گردید. اندازه‌گیری عمق زیرلایه و ضخامت فصل مشترک با بهره‌گیری از میکروسکوپ نوری OLYMPUS و نرم‌افزار OLYSIA، در پنج ناحیه از هر نمونه انجام پذیرفت و نتایج آنها ثبت گردید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی کلی نمونه‌های ساخت افزودنی

شکل ۷ نمای کلی و شکل ۸ تصویری از برش عرضی نمونه‌های ایجاد شده با فرایند ساخت افزودنی را با سه توان متفاوت نشان می‌دهند که از نظر شکل ظاهری با یکدیگر قابل مقایسه هستند. نمونه شماره (۱) با توان ۱۵۰ وات، نمونه شماره (۲) با توان ۲۵۰ وات و نمونه شماره (۳) با توان ۳۵۰ وات رسوب نشانی شدند. در شکل ۷-الف مشاهده می‌شود که نمونه شماره (۱) که با کمترین توان، ۱۵۰ وات، رسوب نشانی شده، سطح لایه‌های

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، برای بررسی دقیق‌تر اثر تغییر توان و کاهش اثرات سایر پارامترها، یک استراتژی یک طرفه [۲۲] مطابق شکل ۵ در نظر گرفته شد.

جدول ۶ پارامترهای رسوب‌نشانی بروی نمونه‌ها

Table 6 Deposition parameters

نمونه	شماره (۱)	شماره (۲)	شماره (۳)
توان (W)	150	250	350
اندازه نقطه اثر (mm)	1	1	1
سرعت روبش (mm/s)	5	5	5
نرخ تغذیه پودر (rpm-g/s)	7	7	7
همپوشانی عرضی	40%	40%	40%

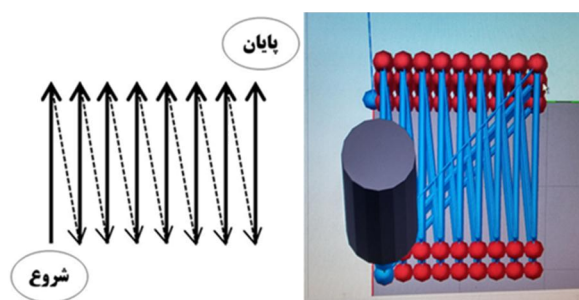


Fig. 5 Scanning strategy for deposition in three layers

شکل ۵ استراتژی روبش جهت رسوب‌نشانی در سه لایه

برای روبش مساحتی به اندازه یک سانتی‌متر مربع روی قطعات، پالسی به طول یک سانتی‌متر بروی زیرلایه اعمال شد. سپس پالس بعدی دوباره از نقطه شروع پالس قبلی شروع و همچنین پالس‌های بعدی به این ترتیب اعمال گردید. پس از روبش کل سطح، لایه دوم دقیقاً از نقطه شروع اولین پالس در لایه اول اعمال شد و مانند لایه اول، لایه دوم برای رسوب نشانی روبش گردید. پس از اتمام لایه دوم، لایه سوم نیز مانند لایه دوم از نقطه شروع پالس اول در لایه‌های قبلی روبش و با همان استراتژی رسوب نشانی انجام شد. این استراتژی برای رسوب نشانی با توان لیزر متفاوت بر روی هر سه زیرلایه به صورت یکسان در نظر گرفته شد. با در نظر گرفتن مشخصات دستگاه DLD_C5_500W، توان ۱۵۰، ۲۵۰ و ۳۵۰ وات برای رسوب بر روی زیرلایه‌های مختلف برای بررسی اثر این پارامتر موثر انتخاب شد. شکل ۶ شماتیکی از لایه‌های رسوب نشانی شده بر روی زیرلایه را نشان می‌دهد.

¹ Adlers
² Eching

به اندازه ابعاد مختلف هر نمونه، جدول ۷ به دست آمد. اگرچه در تنظیمات نرم‌افزاری دستگاه، مساحت ساخت افزودنی بر روی هر زیرلایه یک سانتی‌متر مربع تعیین شده بود، اما ابعاد به دست آمده به دلیل تغییر توان متفاوت بود.



Fig. 8 A cross-sectional views of deposited samples with different power. A) 150 watts, B) 250 watts, C) 350 watts

شکل ۸ نمایشی از برش عرضی نمونه‌های رسوب نشانی با توان متفاوت، الف) ۱۵۰ وات، ب) ۲۵۰ وات، ج) ۳۵۰ وات

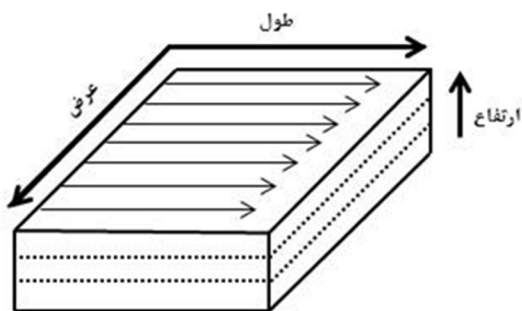


Fig. 9 Schematic introduction of geometric dimensions of width, length and height of additive manufacturing

شکل ۹ معرفی شماتیک بعدهای هندسی عرض، طول و ارتفاع ساخت افزودنی

رسوب نشانی شده بسیار ناهموار بوده و ساخت افزودنی شامل قله‌های ناپیوسته متعددی می‌باشد. در نمونه شماره (۲)، با افزایش توان به ۲۵۰ وات، همان‌طور که در شکل ۷-ب نشان داده شده است، ساخت افزودنی یکپارچه شده و هیچ قله ناپیوسته دیگری مشاهده نمی‌شود. اگرچه قسمت عمده این نمونه یکپارچگی دارد، اما با آزمایش بازرسی چشمی، بروی سطح آن تخلخل مشاهده گردید. شکل ۷-ج نمونه رسوب نشانی شده با توان ۳۵۰ وات را نشان می‌دهد. از مقایسه نمونه‌های رسوب نشانی شده با توان مختلف می‌توان دریافت که با افزایش توان لیزر، دمای حوضچه مذاب در فرایند رسوب نشانی نیز افزایش یافته [۳۵] و یکپارچگی ظاهری ساخت افزودنی بهبود می‌یابد.



Fig. 7 Deposited samples with different power, A) 150 watts, B) 250 watts, C) 350 watts

شکل ۷ نمای کلی نمونه‌های رسوب نشانی با توان متفاوت، الف) ۱۵۰ وات، ب) ۲۵۰ وات، ج) ۳۵۰ وات

۳-۲- بررسی ابعاد هندسی ساخت افزودنی

با توجه به شکل ۹، بعدهای هندسی ساخت افزودنی به صورتی که بعد موازی با پالس‌های رسوب نشانی، "بعد طول" و بعد عمود بر پالس‌های رسوب نشانی، "بعد عرض"، در نظر گرفته شد [۳۶] و مطابق شکل ۱۰ اندازه‌گیری انجام پذیرفت. با توجه

قله ها با ارتفاع متفاوت است. ارتفاع بلندترین قله ۴ میلی متر و کوتاه ترین قله ۳ میلی متر است. همان طور که در جدول ۷ ارائه شده است، اختلاف بین بیشینه و کمینه ارتفاع قله ها در این نمونه، یک میلی متر اندازه گیری شد. هر لایه رسوب بر روی نمونه شماره (۱) با ۱۷ پالس تکمیل گردید.

رسوب نشانی در نمونه شماره (۲) با توان ۲۵۰ وات، ۱۰۰ وات بیشتر از نمونه شماره (۱) اعمال شد، تفاوت بین اندازه طول و عرض ساخت افزودنی در این نمونه، ۰/۳ میلی متر است. دلیل بزرگتری اندازه عرض نسبت به اندازه طول در این نمونه با وجود اینکه هر لایه با ۱۱ پالس تکمیل شده است، این می باشد که توان بیشتر موجب افزایش دمای حوضچه مذاب شده و پالس ها نسبت به توان ۱۰۰ وات، پهن تر شده اند. پهن تر شدن پالس ها با اندازه گیری عرض هر پالس با کمک میکروسکوپ استریو و همچنین شمارش پالس ها جهت تکمیل هر لایه قابل توجیه می باشد. بیشینه و کمینه ارتفاع در این نمونه به ترتیب ۲/۷۵ و ۱/۹ میلی متر است. اختلاف بین بیشینه و کمینه ارتفاع ۰/۸۵ میلی متر اندازه گیری شد که در جدول ۷ مشاهده می شود. همان طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، نقطه شروع رسوب نشانی بیشینه ارتفاع و نقطه پایان رسوب نشانی کمینه ارتفاع را دارد.

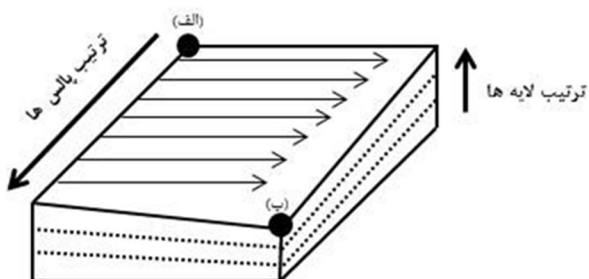


Fig. 11 Schematic of deposition sample No.2, (A) Maximum height, (B) Minimum height

شکل ۱۱ شماتیک رسوب نشانی در نمونه شماره ۲، (الف) بیشترین ارتفاع، (ب) کمترین ارتفاع

نمونه شماره (۳) که با توان ۳۵۰ وات، ۱۰۰ وات بیشتر از نمونه شماره (۲) و ۲۰۰ وات بیشتر از نمونه شماره (۱) رسوب نشانی شده است، دارای شکل ظاهری مناسب ساخت افزودنی می باشد. با توجه به جدول ۷ مشخص می شود که اختلاف اندازه طول و عرض در این نمونه ۰/۵ میلی متر است با این تفاوت که هر لایه ساخت افزودنی با ۹ پالس، دو پالس کمتر از نمونه شماره (۲)، تکمیل شده است. بیشینه و کمینه ارتفاع این نمونه به ترتیب ۲/۶۴ و ۲/۲ میلی متر است.

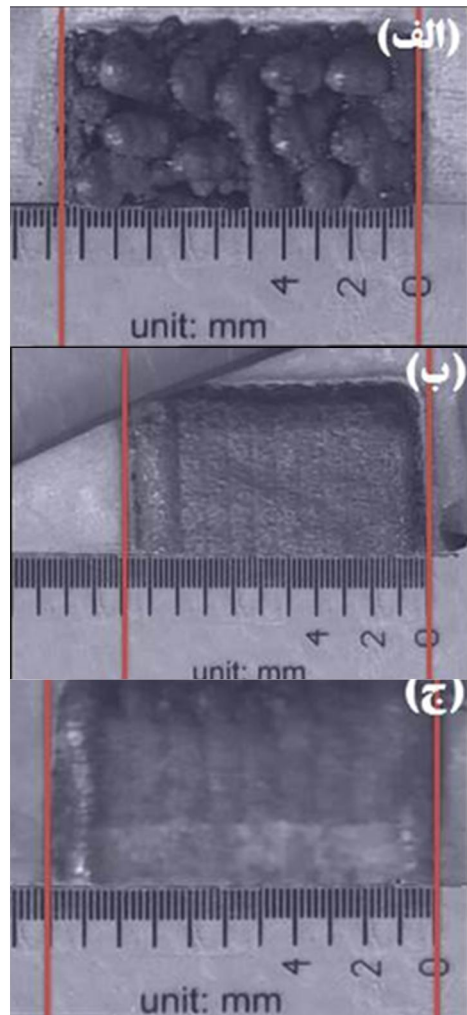


Fig. 10 Measuring the geometric dimensions of the width, length and height of the deposited samples, A) 150 watts, B) 250 watts, C) 350 watts

شکل ۱۰ اندازه گیری ابعاد هندسی عرض، طول و ارتفاع نمونه های رسوب نشانی شده، (الف) ۱۵۰ وات (ب) ۲۵۰ وات (ج) ۳۵۰ وات

جدول ۷ مقایسه ابعاد ساخت افزودنی و تعداد پالس های لایه در نمونه های رسوب نشانی شده

Table 7 Comparison of samples dimension and number of layer pulses in deposited samples

نمونه	شماره (۱)	شماره (۲)	شماره (۳)
توان (W)	150	250	350
عرض (mm)	10.7	10.9	11.3
طول (mm)	10.7	10.6	10.8
کمینه ارتفاع (mm)	3	1.9	2.2
بیشینه ارتفاع (mm)	4	2.75	2.64
$Dh \pm 0.02(\text{mm})$	1	0.85	0.44
تعداد پالس در هر لایه	17	11	9

نمونه شماره (۱) که با توان ۱۵۰ وات رسوب نشانی شده از نظر اندازه، طول و عرض یکسان بوده ولی از نظر ارتفاع دارای

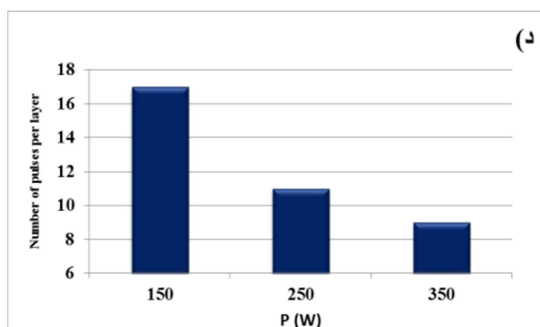


Fig. 12 Effect of power on the dimensions of samples, A) Power-width of each layer diagram, B) Power-length of each layer diagram, C) Power-height difference diagram, D) Power-number of pulses in each layer diagram

شکل ۱۲ تأثیر توان بر ابعاد ساخت افزودنی در نمونه‌ها، الف) نمودار توان-عرض هر لایه، ب) نمودار توان-طول هر لایه، ج) نمودار توان-ارتفاع، د) نمودار توان-تعداد پالس در هر لایه

۳-۳- بررسی درصد تخلخل سطحی

درصد تخلخل سطحی نمونه‌های رسوب نشانی شده با بهره‌گیری از نرم‌افزار Digimizer بررسی و مقایسه شدند. همان‌طور که در شکل ۱۳ قابل مشاهده می‌باشد و مطابق اطلاعات خروجی نرم‌افزار، درصد تخلخل نمونه شماره یک ۰.۹۸٪، درصد تخلخل نمونه شماره دو ۰.۵۷٪ و درصد تخلخل نمونه شماره سه ۰.۱۰٪ اندازه‌گیری گردید. نمونه شماره یک که با توان ۱۵۰ وات رسوب نشانی شده بود، تخلخل سطحی آن در حدود ۰.۹۰٪ بیشتر از نمونه رسوب نشانی شده با توان ۳۵۰ وات محاسبه گردید.

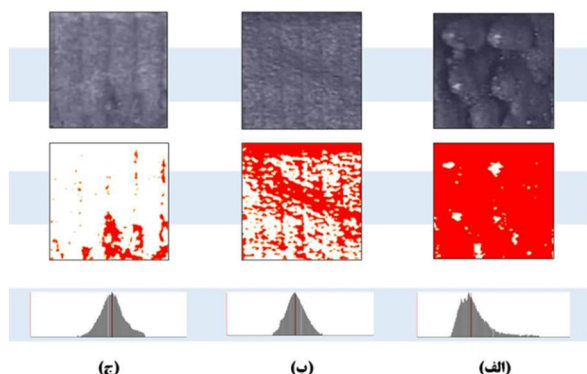


Fig. 13 Measuring the percentage of surface porosity, A) 150 watts, B) 250 watts, C) 350 watts

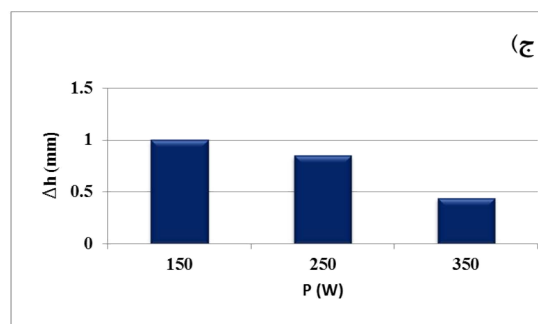
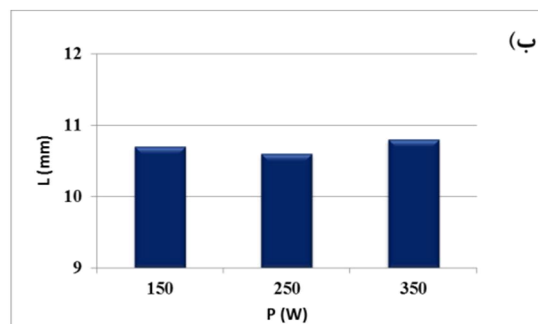
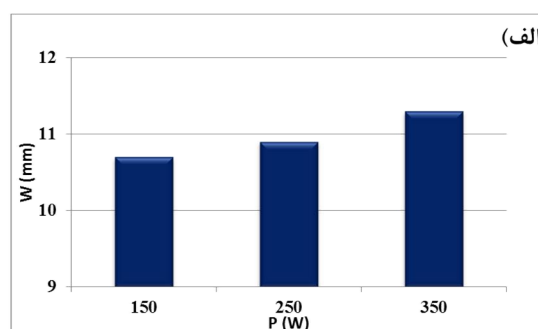
شکل ۱۳ اندازه‌گیری درصد تخلخل سطحی، الف) ۱۵۰ وات ب) ۲۵۰ وات ج) ۳۵۰ وات

۳-۴- بررسی فصل مشترک

پس از اندازه‌گیری عمق ذوب زیرلایه در پنج ناحیه از هر نمونه، میانگین مقادیر محاسبه شده و نتایج آنها در جدول ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۴ می‌توان مشاهده نمود، اطمینان حاصل گردید که با افزایش توان، عمق ذوب زیرلایه نیز

همان‌طور که در شکل ۱۲- الف به وضوح مشاهده می‌شود، با افزایش توان از ۱۵۰ به ۲۵۰ و سپس به ۳۵۰ وات، اندازه عرض ساخت افزودنی به ترتیب از ۱۰/۷ به ۱۰/۹ و ۱۱/۳ میلی‌متر افزایش یافت، که ناشی از افزایش دمای حوضچه مذاب متأثر از توان و عرض هر پالس می‌باشد. افزایش توان تأثیر قابل توجهی بر اندازه طول نمونه‌ها نداشت و مقایسه بین اندازه طول نمونه‌ها در شکل ۱۲- ب قابل مشاهده می‌باشد. با افزایش توان، اختلاف ارتفاع در هر نمونه کاهش می‌یابد. شکل ۱۲- ج مقایسه اندازه اختلاف ارتفاع بین بیشینه و کمینه هر نمونه را نشان می‌دهد.

با شمارش و مقایسه تعداد پالس‌ها در هر لایه می‌توان دریافت که با افزایش توان، هر لایه با تعداد پالس کمتری تکمیل شده است. همان‌طور که در شکل ۱۲- د نشان داده شده است، با افزایش توان از ۱۵۰ به ۲۵۰ و ۳۵۰، تعداد پالس‌های هر لایه کاهش یافت و هر لایه از نمونه‌ها به ترتیب با ۱۷، ۱۱ و ۹ پالس تکمیل گردید. این موضوع با افزایش اندازه عرض رابطه عکس داشته که موید یکدیگر می‌باشند.



جدول ۸ ذکر شده و در شکل ۱۵ قابل مقایسه است. ضخامت فصل مشترک از ۲/۸۵ میکرومتر در نمونه شماره یک تا ۶/۱۵ میکرومتر در نمونه شماره دو و در نهایت به ۱۰/۲۰ میکرومتر در نمونه شماره سه افزایش یافت. به غیر از نمونه شماره یک که رسوب نشانی به دلیل توان کم فاقد یکپارچگی می‌باشد، در فصل مشترک نمونه های شماره دو و سه هیچگونه ترک و ناپیوستگی مشاهده نگردید.

افزایش می‌یابد که این موضوع با تحقیقات صورت گرفته توسط دیگر محققان مطابقت دارد [۳۱]. عمق ذوب زیرلایه در نمونه شماره یک ۳۳/۴۲ میکرومتر است. با افزایش توان از ۱۵۰ وات به ۲۵۰ وات، عمق ذوب زیرلایه افزایش می‌یابد و به ۱۸۱/۴۷ میکرومتر می‌رسد. در نهایت با افزایش توان به ۳۵۰ وات، عمق ذوب زیرلایه به ۴۰۵/۱۲ میکرومتر رسید.

جدول ۸ مقایسه نمونه‌ها از منظر عمق ذوب زیرلایه و ضخامت فصل مشترک

Table 8 Comparison of samples in terms of substrate melting depth and joint thickness

نمونه	شماره (۱)	شماره (۲)	شماره (۳)
توان (W)	150	250	350
عمق ذوب زیرلایه (mm)	33.42	181.47	405.12
ضخامت فصل مشترک (mm)	2.85	6.15	10.20

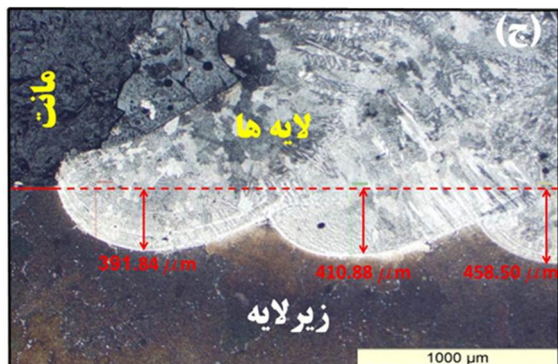
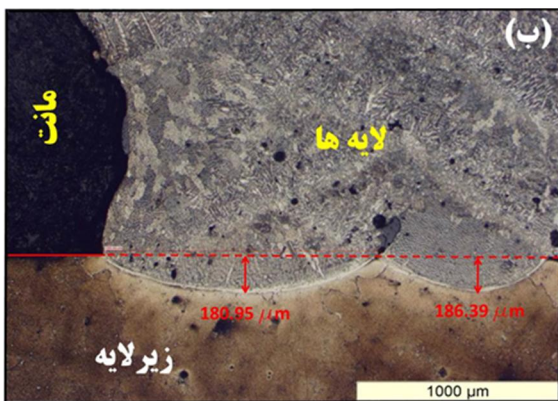
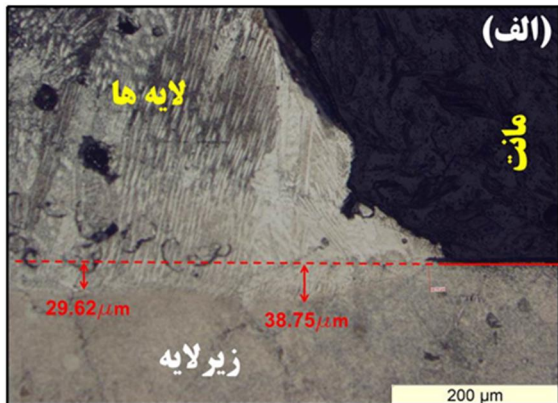


Fig. 15 Measurement of substrate melting depth and joint thickness in deposited samples with different power, A) 150 watts, B) 250 watts, C) 350 watts

شکل ۱۵ اندازه گیری عمق ذوب زیرلایه و ضخامت فصل مشترک در نمونه های رسوب نشانی شده با توان متفاوت، الف) ۱۵۰ وات ب) ۲۵۰ وات ج) ۳۵۰ وات

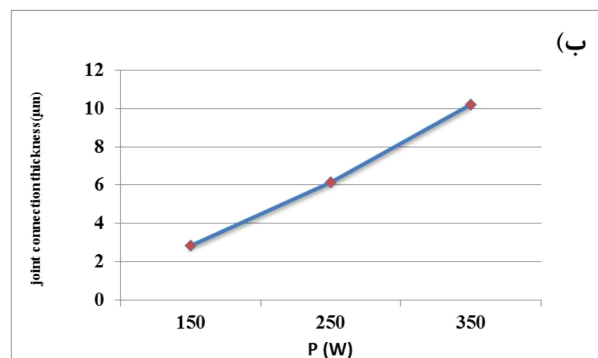
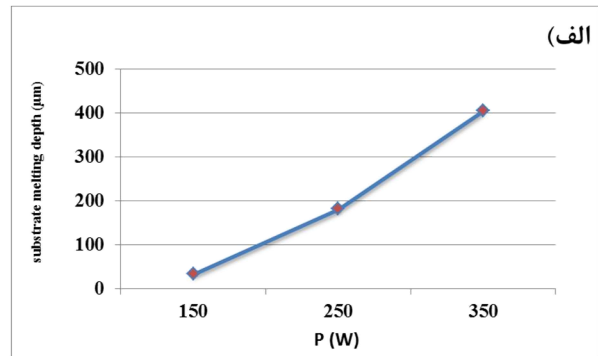


Fig. 14 Effect of power on substrate melting depth and joint thickness A) Power-depth of melting of the substrate diagram, B) Power-thickness of the joint diagram

شکل ۱۴ تأثیر توان بر عمق ذوب زیرلایه و ضخامت فصل مشترک، الف) نمودار توان-عمق ذوب زیرلایه، ب) نمودار توان-ضخامت فصل مشترک

علاوه بر این، با افزایش توان در نمونه‌ها، ضخامت فصل مشترک زیرلایه و لایه‌ها نیز افزایش یافت. ضخامت فصل مشترک در هر نمونه با اندازه گیری پنج ناحیه اتصال توسط میکروسکوپ نوری و محاسبه میانگین آنها به دست آمد که در

- of thermal behavior and multicomponent mass transfer in direct laser deposition of Co-based alloy on steel, *Int. J. Heat Mass Transf.* 104 (2017) 28–38.
- [8] H. Gu, L. Li, Computational fluid dynamic simulation of gravity and pressure effects in laser metal deposition for potential additive manufacturing in space, *Int. J. Heat Mass Transf.* 140 (2019) 51–65.
- [9] Allen J. An investigation into the comparative costs of additive manufacture vs. machine from solid for aero engine parts. *ROLLS-ROYCE PLC DERBY (UNITEDKINGDOM)*; 2006.
- [10] Kulkarni A. Additive Manufacturing of Nickel Based Superalloy. arXiv preprint arXiv:1805.11664. 2018 May 14.
- [11] P. Ghosal, M. C. Majumder, A. Chattopadhyay, (2017), study on direct laser metal deposition, *materials today: processing*, 5, 12509-12518.
- [12] Ngo TD, Kashani A, Imbalzano G, Nguyen KT, Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*. 2018 Jun 15;143:172-96.
- [13] Tofail SA, Koumoulos EP, Bandyopadhyay A, Bose S, O'Donoghue L, Charitidis C. Additive manufacturing: *scientific and technological challenges, market uptake and opportunities*. *Materials today*. 2018 Jan 1;21(1):22-37.
- [14] Kumar H. Numerical simulation of stainless steel powder feeding in a coaxial nozzle for high powder efficiency in Laser Direct Energy Deposition. *Frontiers in Mechanical Engineering*.:3.
- [15] H. Freibe, P. Khazan, M. Stroth, H. Köhler, Properties of large 3D parts made from Stellite 21 through direct powder deposition, *Lasers in Manufacturing Conference*, 2015.
- [16] G.J. Marshall, W.J. Young, S.M. Thompson, N. Shamsaei, S. Daniewicz, S. Shao, Understanding the microstructure formation of Ti-6Al-4V during direct laser deposition via in-situ thermal monitoring, *Jom* 68 (3) (2016) 778–790.
- [17] M.T. Dalae, L. Gloor, Ch. Leinenbach, K. Wegener, Experimental and numerical study of the influence of induction heating process on build rates Induction Heating-assisted laser Direct Metal Deposition (IH-DMD), *Surface and Coatings Technology* 384 (2020) 125275.
- [18] F. Caiazzo, A. Caggiano, Laser direct metal deposition of 2024 Al alloy: *trace geometry prediction via machine learning*, *Materials* 11 (2018) 444.
- [19] O. Zinovieva, A. Zinoviev, V. Ploshikhin, Three-dimensional modeling of the microstructure evolution during *metal additive manufacturing*, *Comput. Mater. Sci.* 141 (2018) 207–220.
- [20] T. Gu, B. Chen, C. Tan, J. Feng, Microstructure evolution and mechanical properties of laser additive manufacturing of high strength Al-Cu-Mg alloy, *Opt. Laser Technol.* 112 (2019) 140–150.
- [21] Ramakrishnan A, Dinda GP. Direct laser metal

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، تأثیر توان بر ابعاد هندسی، تعداد پالس‌ها در هر لایه، عمق ذوب زیرلایه و ضخامت فصل مشترک در فرایند ساخت افزودنی به روش LMD با رسوب نشانی پودر اینکونل ۷۱۸ بر روی زیرلایه از جنس اینکونل ۷۳۸ بررسی شد. به طور کلی با توجه به بررسی‌های انجام شده می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

- افزایش توان از ۱۵۰ به ۳۵۰ وات، باعث یکپارچگی ظاهری ساخت افزودنی شده و تخلخل سطحی نزدیک به ۹۰٪ کاهش می‌یابد.

- اختلاف ارتفاع در نمونه های رسوب نشانی شده با افزایش توان از ۱۵۰ وات به ۳۵۰ وات، کاهش یافته و از یک میلی‌متر به ۰/۴۴ میلی‌متر کاهش می‌یابد.

- افزایش توان موجب پهن‌تر شدن هر پالس می‌شود. همچنین ضمن افزایش توان، تعداد پالس‌ها جهت تکمیل هر لایه کاهش می‌یابد به طوری‌که تکمیل هر لایه از ۱۷ پالس با توان ۱۵۰ وات، به ۹ پالس با توان ۳۵۰ وات می‌رسد.

- ضخامت فصل مشترک و عمق ذوب زیرلایه ارتباط مستقیمی با توان لیزر دارند و با افزایش توان لیزر افزایش می‌یابند.

۵- مراجع

- [1] Boyce, M., 2006, *Gas Turbine Engineering Handbook*. Elsevier Butterworth- Heinemann, Oxford, UK.
- [2] Han, J., 2004, Recent Studies in Turbine Blade Cooling. *International Journal of Rotating Machinery*, 10/6: 443–457.
- [3] Zhang X, Li W, Cui W, Liou F. Modeling of worn surface geometry for engine blade repair using Laser-aided Direct Metal Deposition process. *Manufacturing letters*. 2018 Jan 1;15:1-4.
- [4] T. DebRoy, L. Wei, J.S. Zuback, T. Mukherjee, J.W. Elmer, J.O. Milewski, A.M. Beese, A. Wilson-Heid, A. De, W. Zhang, Additive manufacturing of metallic components – process, structure and properties, *Prog. Mater. Sci.* 92 (2018) 112–224.
- [5] A. Mostafaei, P. Rodriguez De Vecchis, M.J. Buckenmeyer, S.R. Wasule, B.N. Brown, M. Chmielus, Microstructural evolution and resulting properties of differently sintered and heat-treated binder jet 3D printed Stellite 6, *Mater. Sci. Eng., C* 102 (2019) 276–288.
- [6] E.T. Akinlabi, S.A. Akinlabi, Advanced coating: Laser Metal Deposition of Aluminium powder on Titanium Substrate, *Proceedings of the World Congress on Engineering, vol. II, 2016*.
- [7] Z. Gan, G. Yu, X. He, S. Li, Numerical simulation

- materials as an alternative of Stellite, BARC, Newsletter 249 (2003) 64.
- [30] Attallah MM, Jennings R, Wang X, Carter LN. Additive manufacturing of Ni-based superalloys: The outstanding issues. MRS bulletin. 2016 Oct;41(10):758-64
- [31] Qiyasvand, M., Shoja Razavi, R., Barakat, M. (2017) Fabrication of increasing Inconel 718 superalloy by laser direct metal deposition method. Sixth International Conference on Materials and Metallurgy Engineering. Tehran. (in Persian فارسی)
- [32] Kulkarni A. Additive Manufacturing of Nickel Based Superalloy. arXiv preprint arXiv:1805.11664. 2018 May 14.
- [33] Yetkin ME, Kahraman B, Özfırat MK, Sengün B, Simsir F. Determination of travertine samples porosity using image analysis method. Indian J. Eng. 2017;37:227-35.
- [34] Bambach M, Sizova I, Silze F, Schnick M. Comparison of laser metal deposition of Inconel 718 from powder, hot and cold wire. Procedia CIRP. 2018 Jan 1;74:206-9.
- [35] Ma C, Wei X, Yan B, Yan P. Numerical Simulation of Moving Heat Flux during Selective Laser Melting of AlSi25 Alloy Powder. Metals. 2020 Jul 1;10(7):877.
- [36] Burkhardt I, Visone R, Riekehr S, Rackel MW, Kashaev N, Enz J. Parameter development and characterization of laser metal deposited Ti alloy powders for use at elevated temperatures. Procedia CIRP. 2018 Jan 1;74:176-9
- deposition of Inconel 738. Materials Science and Engineering: A. 2019 Jan 7;740:1-3.
- [22] Caiazza F. Laser-aided Directed Metal Deposition of Ni-based superalloy powder. Optics & Laser Technology. 2018 Jul 1;103:193-8
- [23] H. Zhang, H. Zhu, T. Qi, Z. Hu, X. Zeng, Selective laser melting of high strength Al- Cu-Mg alloys: *Processing, microstructure and mechanical properties*, Mater. Sci. Eng., A 656 (2016) 47–54.
- [24] C.Y. Kong, R.J. Scudamore, J. Allen, High-rate laser metal deposition of Inconel 718 component using low heat-input approach, *Physics Procedia* 5 (2010) 379–386.
- [25] A.S. Metel, M.M. Stebulyanin, S.V. Fedorov, A.A. Okunkova, Power density distribution for laser additive manufacturing (SLM): potential, Fund. Adv. Appl. Technol. 7 (5) (2019) 7010005.
- [26] H. Choo, K. Sham, J. Bohling, A. Ngo, X. Xiao, Y. Ren, P.J. Depond, M.J. Matthews, E. Garlea, Effect of laser power on defect, texture, and microstructure of a laser powder bed fusion processed 316L stainless steel, Mater. Des. 164 (2018) 107534.
- [27] P. Muller, P. Mognol, J.Y. Hascoet, Modeling and control of a direct laser powder deposition process for functionally graded materials (FGM) parts manufacturing, Mater. Process. Technol. 213 (2013) 685–692.
- [28] K.C. Atony, A.N. Antony, K.J. Bhansali, Hardfacing, *ASM Handbook* 6 (1983) 771–773.
- [29] G.L. Goswami, R. Santosh Kumar, B.L. Mordike Galun, Laser cladding of Nickel based hardfacing