

تأثیر پارامترهای فرآیند بر ضخامت لایه‌ها در تف‌جوشی

لیزری پودر استیل

سید علی فاطمی^۱ و جمال زمانی^۲

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۵/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۵/۲۹)

چکیده

زینترینگ یا تف‌جوشی لیزری پودر به‌منظور تولید سریع قطعات فلزی یکی از روش‌های متداول برای تولید سریع قطعات می‌باشد. برای رسیدن به قطعه با بالاترین کیفیت لازم است تا پارامترهای تولید به‌دقت بررسی شود و تأثیر آن مورد ارزیابی قرار گیرد. بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند به‌منظور نزدیک کردن خواص قطعه تولیدی به مواد خام اصلی، یکی از اهداف اصلی محققان در تف‌جوشی لیزری پودرهای فلزی است. پارامترهایی از قبیل: چگالی، سختی سنجی در ابعاد ماکرو، سختی سنجی در ابعاد میکرو، استحکام، صافی سطح، ظاهر، تنش پسماند و غیره در موارد مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این مقاله، تأثیر پارامترهای ورودی مانند توان لیزر، سرعت اسکن، جنس پودر و غیره بر روی پارامترهای خروجی از قبیل عمق نفوذ، استحکام، اثر گوی‌شدگی و غیره بررسی شده است. به‌منظور تولید قطعات چندلایه کاملاً چگال توسط فرآیندهای لیزری پالسی، در ابتدا لازم است تا عملکرد لیزر و مواد و همچنین بهینه‌سازی پارامترها، برای تک‌لایه بررسی شود. آزمایش‌ها بر روی بستر پودر آزاد به عمق ۵ میلی‌متر انجام شده است. هر قطعه به‌صورت تک‌لایه و تنها با یک بار اسکن لیزر بر روی بستر پودر تولید شده است. حرکت پرتو لیزر بر روی سطح، مربع‌هایی به ابعاد ۱۰×۱۰ میلی‌متر تولید می‌کند. در طراحی آزمایشات ابتدا تابعی برای چگالی انرژی اعمالی به سطح تعریف شد. سپس بر مبنای این تابع، تأثیر توان، سرعت اسکن، فرکانس و فاصله اسکن بر نمونه‌های تولیدشده بررسی و با تابع تعریف‌شده ارزیابی شد.

واژه‌های کلیدی: تف‌جوشی لیزری پودر فلز، پدیده گوی‌شدگی، نمونه‌سازی سریع

Influence of Process Parameters on Layers Thickness in Steel

Powder Laser Sintering

S. Ali Fatemi and J. Zamani

Mechanical Engineering Department

K.N. Toosi University

(Received:3/August/2014; Accepted:20/August/2015)

ABSTRACT

One of the main goals of researchers in metal powders laser sintering, is optimization of process parameters in order to close out the main properties of the raw materials have been produced to the piece. For this purpose, many experiments have been carried and parameters such as density, hardness, micro hardness, strength, surface finish, appearance, and residual stress have been studied. In this paper the influence of parameters such as laser power, scanning speed, and powder material and etc. on output parameters such as penetration depth, strength, balling phenomenon is investigated. In order to produce a multi-layer fully dense parts by the process of pulsed laser, to optimize the performance of the laser and material parameters at first, it is necessary to single layers is investigated. Experiments carry out on free powder bed depth is 5 mm. Each piece of a single layer on the substrate with once laser scanning powder is produced. Movement of the laser beam on the surface produce a washer with 20mm diameter.

Keywords: Powder Metal Laser Sintering, Balling Phenomenon, Rapid Prototyping

۱- کارشناسی ارشد: ali.s.fatemi@gmail.com

۲- استاد (نویسنده پاسخگو): zamani@kntu.ac.ir

فهرست علائم و اختصارات

A	توان لیزر، Ampere
d	اندازه قطر پرتو لیزر، mm
E	توان حرارتی لیزر، watt
f	فرکانس Q-Switch (فرکانس شلیک لیزر، Hz)
H	روش اسکن
L _d	فاصله بین خطوط اسکن شده، mm
P	توان لیزر، Watt
P _d	چگالی انرژی دریافتی در واحد سطح
PPD	چگالی انرژی هر پالس
P _w	توان لیزر در یک ثانیه
R	مقاومت لیزر، Ω
V	ولتاژ لیزر، Volt
v	سرعت اسکن، mm/s
X	مسافت اسکن، mm
	علائم یونانی
θ	راندمان

۱- مقدمه

کوتاه شدن زمان تولید یکی از تمایلات بزرگ کمپانی‌ها به منظور کاهش زمان بین طراحی تا ارسال محصولاتشان به بازار است. روش‌های نمونه‌سازی سریع در دهه هشتاد برای فائق آمدن بر این مسئله ایجاد شدند [۱]. نمونه‌سازی سریع (RP) روشی برای تولید نمونه‌های مهندسی بدون نیاز به شکل‌دهی سنتی می‌باشد [۲].

پیشرفت‌های اخیر در RP منجر به ایجاد روش‌های ساخت و تولید سریع شده است. برای مثال: SLS، LENS و EBM برای تولید قطعات فلزی به صورت سریع مورد استفاده قرار می‌گیرند. از بین این روش‌ها، فن‌آوری‌های پایه پودری (SLS) متداول تر است. فرآیند SLS تولیدی لایه‌به‌لایه است که اجازه تولید قطعات پیچیده سه‌بعدی را از طریق جامدسازی لایه‌های پودری بر روی یک‌دیگر می‌دهند. ضخامت لایه در این آزمایش‌ها بین ۲۰ μm تا ۱۵۰ μm است و توسط سیستم لایه نشانی ایجاد می‌شود [۳].

در خلال فرآیند تفجوشی لیزری، واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی پیچیده‌ای رخ می‌دهد. بنابراین مطالعه و فرموله کردن این فرآیند بسیار پیچیده و مشکل است.

پارامترهای موثر بر تفجوشی لیزری را می‌توان به سه گروه عمده پارامترهای فرآیند، پارامترهای مواد و پارامترهای محیطی تقسیم نمود [۴]. پارامترهای فرآیند اغلب بر روی فرآیندهای

لیزری موثرند و چگالی انرژی لیزر را کنترل می‌کنند. این پارامترها شامل توان لیزر (P)، اندازه قطر پرتو لیزر (d)، سرعت اسکن (v)، فاصله خطوط اسکن (h)، ضخامت لایه (w) و هندسه و استراتژی اسکن می‌باشد.

آزمایش‌های صورت گرفته در این مطالعه به بررسی تاثیرات پارامترهای فرآیند در تفجوشی لیزری پرداخته است.

۲- چیدمان آزمایش‌ها

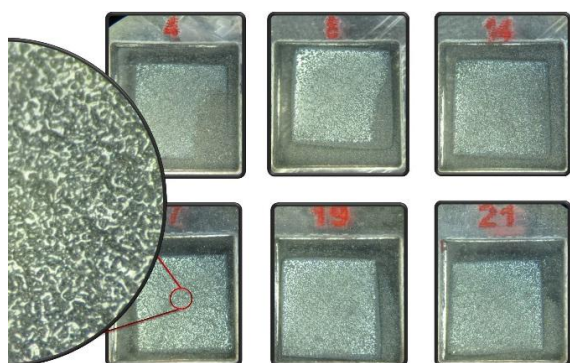
لیزری که جهت انجام آزمایش‌ها در اختیار گذاشته شده بود، یک لیزر حکاکی Nd:YAG با حداکثر توان ۷۵ وات استفاده شد (مشخصات کامل لیزر در ضمایم آمده است). تجهیزات تست شامل یک لیزر حکاکی، از نوع Nd:YAG-75DP با منبع دیود پمپ، طول موج 1.064nm، دارای Q-Switch و ساخت شرکت Hanse Yuming می‌باشد. پارامترهای قابل تغییر در این لیزر شامل جریان I (۵ - ۱۰ A)، سرعت اسکن (۰ - ۱۰۰۰ mm/s) و فرکانس موج خروجی f (۰ - ۲۰ KHz) و فاصله کانونی ۱۸۵ میلی‌متر می‌باشد. جریان بیانگر توان، پالس نشان‌دهنده زمان روشن بودن لیزر در هر شلیک و فرکانس مشخص کننده تعداد شلیک در هر ثانیه می‌باشد. این لیزر دارای سیستم اسکنی است که در جهت‌های X و Y حرکت دارد. شکل ۱ نمایی از این لیزر را نشان می‌دهد.

۳- روش آزمایش‌ها

پارامترهای قابل تغییر در لیزر موجود شامل جریان برحسب آمپر (A)، سرعت اسکن لیزر برحسب میلی‌متر بر ثانیه (S)، فرکانس موج خروجی برحسب هرتز (f)، فاصله بین خطوط اسکن شده برحسب میلی‌متر (L_d) و روش اسکن (H) می‌باشد [۵]. جریان تنظیم کننده توان لیزر، فرکانس تعداد شلیک آن در هر ثانیه، و فاصله خطوط بیان کننده هم‌پوشانی مسیرهای اسکن می‌باشد. نرم‌افزار این لیزر قادر به انجام چهار روش متفاوت اسکن بوده که شامل هاشور عنکبوتی، زیگزاگ، پیوسته و ناپیوسته می‌باشد هر کدام از این روش‌ها می‌تواند با زاویه داده شده نسبت به افق اسکن شود.

به منظور تولید قطعات چندلایه کاملاً چگال توسط فرآیندهای لیزری پالسی، در ابتدا لازم است تا عملکرد لیزر و مواد و همچنین، بهینه‌سازی پارامترها، برای تک‌لایه بررسی شود. آزمایش‌ها بر روی بستر پودر آزاد به عمق ۵ میلی‌متر انجام شده است. هر قطعه به صورت تک‌لایه و تنها با یکبار اسکن لیزر بر روی بستر پودر تولید شده است. حرکت پرتو لیزر

تاثیر پارامترهای فرآیند بر ضخامت لایه‌ها در تفجوشی لیزری پودر استیل بر روی سطح، مربع‌هایی به مساحت $10 \times 10 \text{ mm}^2$ تولید می‌کند. شکل ۲ تصویر اپتیکی از چند نمونه تولیدی را نشان می‌دهد. سه عامل مساحت موج لیزر، مساحت متأثر از لیزر و تعداد شلیک‌ها، عوامل موثر بر انرژی لیزر در واحد زمان می‌باشد [۶]. مساحت موج لیزر مستقیماً وابسته به پالس، ولتاژ و مساحت متأثر قطر پرتو خواهد بود. تعداد شلیک‌ها نیز در واقع همان فرکانس لیزر است.



شکل (۱): تصاویر اپتیکی از نمونه‌های تولیدی با بزرگ‌نمایی ۱۰ و ۴۰ برابر.

توان حرارتی لیزر برابر با حاصل ضرب توان الکتریکی در راندمان دستگاه می‌باشد. اگر قطر پرتو لیزر d ، ولتاژ دستگاه V ، جریان آن I ، مقاومت R و راندمانش θ باشد، انرژی حرارتی هر پالس برابر است با:

$$E = VI\theta = \frac{V^2}{R}\theta = RI^2\theta$$

بنابراین چگالی انرژی هر پالس برابر است با:

$$PPD = \frac{4RI^2}{\pi d^2}\theta = \frac{4V^2}{R\pi d^2}\theta$$

اگر لیزر به صورت پالسی باشد و با فرکانس f شلیک‌ها انجام شود، توان لیزر در یک ثانیه برابر خواهد بود با:

$$P_w = PPD \times f = \frac{4RI^2 f}{\pi d^2}\theta = \frac{4V^2 f}{R\pi d^2}\theta$$

اگر لیزر با سرعت v بر روی سطح حرکت کند (میزان چگالی انرژی دریافتی در واحد سطح x/v ، $x=v.t \rightarrow t=x/v$) برابر است با:

$$P_d = \theta \frac{4RI^2 f}{\pi d^2} \times \frac{x}{v} = \theta \frac{4V^2 f}{R\pi d^2} \times \frac{x}{v}$$

باتوجه به چیدمان آزمایشات و نوع لیزر، بسیاری از متغیرهای رابطه فوق در تمام آزمایشات از مقادیر ثابتی برخوردارند. این متغیرها شامل قطر پرتو لیزر d ، عدد π ، مقاومت R و راندمانش θ می‌باشد. علاوه بر این باتوجه به ثابت بودن مساحت ناحیه اسکن‌شده، میزان x در طول ثابت و در عرض رابطه معکوس با فاصله اسکن L_s ، خواهد داشت. بنابراین:

$$P_{density} = cte. \frac{I^2 \cdot f}{v \cdot L_d}$$

شکل (۱): نمایی از چیدمان سخت‌افزار آزمایش‌ها.



شکل (۱): نمایی از چیدمان سخت‌افزار آزمایش‌ها.

* ۱- لیزر ۲- کامپیوتر فرمان ۳- پنجره اپتیکی ۴- محفظه حفاظت شده توسط گاز خنثی ۵- برد کنترلی دستگاه ۶- مخزن تولید ۷- منبع تغذیه ۸- پمپ خلاء.

طراحی آزمایش‌ها جهت بهینه‌سازی، پارامترهای ذوب لیزری پودر استیل را مشخص نمود. بدین منظور جریان در بازه ۸ تا ۱۰ آمپر، سرعت در محدوده ۱۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر بر ثانیه، فرکانس بین ۱۰ تا ۲۰ کیلوهرتز، همچنین فرکانس پیوسته و همپوشانی خطوط اسکن بین ۰ تا ۵۰٪ تعیین شد. علاوه بر این هاشور مناسب نوع ۱ با زاویه ۴۵ درجه در تمام نمونه‌ها انتخاب شد. باتوجه به این که بین اتمسفرهای مختلف تفاوتی دیده نمی‌شود، به دلیل راحتی کار و کاهش هزینه، کلیه آزمایش‌ها در شرایط خلاء انجام شده است.

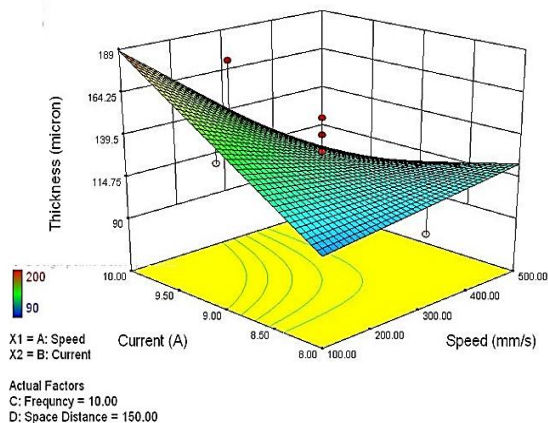
۴- نتایج و بحث

چگالی انرژی: در فرآیندهای لیزری اغلب لازم است تا به منظور تخمین انرژی اعمالی و برآورد صحیح از عملیات، در ابتدا چگالی انرژی لیزر بررسی شود [۷]. با این تعریف، چگالی توان، توان بر واحد سطح است که اغلب در واحد W/cm^2 و یا

سطوحی با چگالی کامل می‌شوند. توان‌های بالاتر و سرعت‌های بالای اسکن، نمونه‌هایی با ساختارهای با شاخه‌های ضخیم مذاب و افزایش در میزان گوی‌شدگی ایجاد می‌کند. به محض این‌که سرعت اسکن کاهش می‌یابد الگوهای سطح نامنظم می‌شود. با کاهش سرعت اسکن، کم‌ترین میزان گوی‌شدگی مشاهده می‌شود و سطح کاملاً جامد است.

در حین اسکن لیزری، مذاب در حقیقت مانند نخی (زنجیره‌ای) از گوی‌های متصل شده به صورت ضعیف به یکدیگر می‌باشد. در اسکن دوم، گلوله‌های زنجیره اول ذوب مجدد می‌شوند و زنجیره دومی از مهره‌های مذاب تولید می‌شود. زنجیره دوم از مهره‌های مذاب به دلیل کشش سطحی در گلوله‌های تولید شده از قبل ادغام می‌شود. اندازه حجم مذاب هر گلوله به انرژی دریافتی آن بستگی دارد. این روند باعث تولید ساختارهای مرجانی شکل می‌شود. بنابراین با کاهش سرعت اسکن و یا افزایش توان، پهنای ساختارهای مرجانی افزایش می‌یابد.

در شکل ۴ ضخامت نمونه‌های تولید شده با دو فاکتور سرعت و جریان نشان داده شده است.



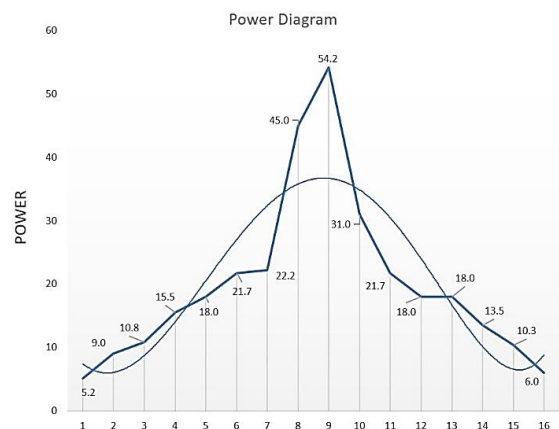
شکل (۴): تاثیرات سرعت و جریان بر روی ضخامت در فرکانس ۱۰ کیلوهرتز و فاصله خطوط ۱۵۰ میکرون.

در این نمودار فاکتور فرکانس برابر با ۱۰ کیلوهرتز و فاصله خطوط ۱۵۰ میکرون در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در نمودار دیده می‌شود با افزایش سرعت و جریان ضخامت نمونه‌ها افزایش می‌یابد. این دو فاکتور بر روی یکدیگر نیز تاثیرگذارند. در دو گوشه مقابل و پشت به دلیل کم بودن انرژی لیزر ضخامت کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است زیرا در سرعت ۵۰۰ و جریان ۱۰ با وجود این‌که جریان بیشینه شده ولی سرعت نیز بسیار زیاد است و انرژی لیزر منتقل شده به سطح کم بوده و ذوب لیزری کمی به وجود می‌آید.

دستگاه لیزری استفاده شده در آزمایشات، سقف آمپر پایینی داشت و در واقع از توان کمی برخوردار بود. بنابراین برای نایل شدن به چگالی انرژی مورد نیاز جهت ذوب جزئی پودر فلز، در توان حداکثر لیزر (بیشینه جریان و فرکانس)، راهی جز کاهش سرعت و فاصله اسکن وجود ندارد [۹].

تاثیر توان و سرعت: برای پیدا کردن پارامترهای بهینه جهت تولید نمونه با بهترین سطح و ضخامت، ۱۶ آزمون به کمک روش طراحی آزمایشات انجام شد. شکل ۳ چگالی انرژی در این آزمون‌ها را نشان می‌دهد. بر مبنای این آزمایش‌ها، چگالی انرژی به صورت یک بردار نرمال طراحی شده است.

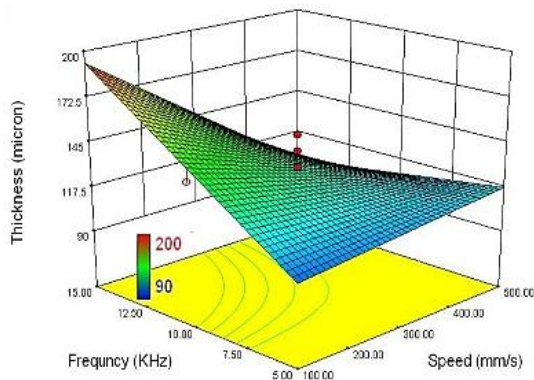
توان و سرعت موثرترین پارامترها در میزان مذاب به جامانده، انحناء اولین خط اسکن و گوی‌شدگی می‌باشند. وقتی که توان لیزر نسبتاً پایین است، نمونه‌ها به صورت ساختار با خلل و فرج ایجاد می‌شوند [۱۰].



شکل (۳): نمودار چگالی انرژی در آزمون‌ها.

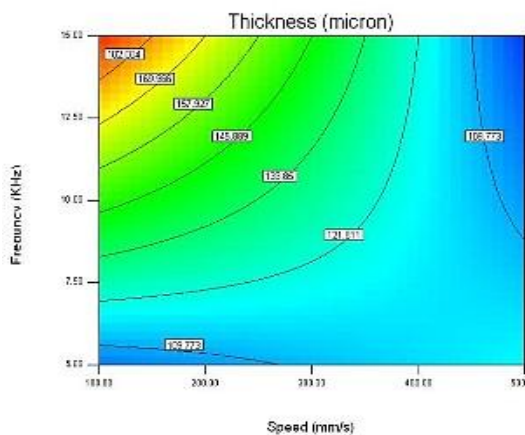
آزمایش‌ها بر روی پودر استیل نیز موارد مشابهی از تاثیر توان را نشان می‌دهد. در جریان‌های پایین (کم‌تر از ۸ آمپر) و سرعت‌های بالا، نمونه‌ها مذاب محدودی را نشان می‌دهند (اتصال از طریق تفجوشی) و گوی‌شدگی و انحناء به صورت محدود دیده می‌شود. به محض این‌که سرعت اسکن کاهش می‌یابد میزان کمی از گوی‌شدگی در اولین خط اسکن مشاهده می‌شود. انحناء کاهش و مذاب افزایش می‌یابد. در توان‌های بالاتر و سرعت‌های بیش‌تر ساختارهایی با شاخه‌های نازک از مذاب و افزایش کمی در میزان گوی‌شدگی اولین خط اسکن و انحناء دیده می‌شود. به محض این‌که سرعت کم می‌شود، الگوهای سطحی نامنظمی مشاهده می‌شود و میزان گوی‌شدگی اولین خط اسکن نیز در اندازه و عمق افزایش یافته و حالت هیچ انحنائی دیده نمی‌شود. در سرعت‌های اسکن پایین الگوهای نامنظم سطح تبدیل به سطوح جامد حفره‌ای و یا

اثر سرعت و فرکانس: شکل‌های ۶-۵ تأثیر سرعت و فرکانس بر ضخامت نمونه‌های تولیدشده را نشان می‌دهد. این شکل نیز بسیار به شکل قبلی نزدیک است و دلایل این شباهت نیز همان مسئله انرژی منتقل شده به لیزر است بنابراین هرچه فرکانس افزایش یابد انرژی بیشتر به سطح پودر منتقل شده و ضخامت نمونه افزایش می‌یابد. و هرچه سرعت کاهش یابد انرژی انتقالی افزایش می‌یابد.



شکل (۵): نمودار سه‌بعدی تاثیرات سرعت و فرکانس بر روی ضخامت در جریان ۹ آمپر و فاصله خطوط ۱۵۰ میکرون.

اثر فرکانس پالس: موج لیزر می‌تواند به دو صورت پیوسته و پالسی تولید شود. موج پالسی با استفاده از یک Q-Switch تولید می‌شود. این قسمت موج پیوسته لیزر را به موج‌های کوچک‌تر می‌شکند. در هر دو حالت توان خروجی کلی لیزر ثابت است. هرچه فرکانس Q-Switch بالاتر باشد، تعداد موج‌های لیزر بیشتر تر و بیش‌ترین توان هر موج کم‌تر می‌شود. به این ترتیب توان خروجی (مساحت زیر منحنی) همواره ثابت است.



شکل (۶): نمودار دوبعدی تاثیرات سرعت و فرکانس بر روی ضخامت در جریان ۹ آمپر و فاصله خطوط ۱۵۰ میکرون.

سرعت اسکن: سرعت اسکن لیزری دو تأثیر عمده بر روی فرآیند دارد. اول سرعت اسکن اندازه حوضچه مذاب را کنترل می‌کند. این اندازه در سرعت‌های اسکن بیشتر، باریک‌تر اما طولانی‌تر خواهد بود. دوم سرعت اسکن موثر بر زمان مذاب بودن مواد است. هرچه سرعت اسکن پایین‌تر باشد زمان مذاب بودن بالاتر است. این دو عامل باعث خواهد شد تا در توانی ثابت نمونه‌های تولیدشده با سرعت بالاتر ضخامت کم‌تری داشته باشند. برای این که یک لایه کاملاً موفقیت‌آمیز به لایه قبلی متصل شود، باید مواد مذاب زیر لایه را تر کند. این امر زمانی ممکن است که مقداری از زیر لایه نیز ذوب مجدد شود. در توان‌های بالاتر و سرعت‌های پایین‌تر (۲۵ mm/s) لبه ابتدایی و انتهایی نمونه‌ها لوله‌شده و می‌پیچند. در این حالت اعوجاجی شکل گرفته بر روی سطح، بیرون زدگی‌هایی را تولید خواهد کرد. با همان شرایط سرعت اسکن (۲۵ mm/s) و توان کم‌تر، فرخوردگی‌ها، اگرچه هنوز باقی است اما کاهش می‌یابد. به هر حال در این موارد پارگی‌ها و شکاف‌هایی نیز مشاهده می‌شود. از طرفی با همان توان پایین، افزایش سرعت اسکن (۲۵۰ mm/s) باعث گرمای ورودی کم‌تر و افزایش شیارهای سطحی خواهد شد. اگر سرعت اسکن ثابت باشد (۲۵۰ mm/s) و توان لیزر کاهش یابد، اگرچه گرمای ورودی کاهش یافته است، پارگی‌ها بیش‌تر مشاهده می‌شوند در واقع افزایش توان باعث بالارفتن تنش حرارتی پسماند و اعوجاج می‌شود. با کاهش توان این اعوجاج نیز کم می‌شود اما در این حالت شکاف‌ها و ترک‌هایی بر روی سطح تولید می‌شود که با افزایش سرعت مقدارشان اضافه می‌شود.

در واقع با ریخت‌شناسی نمونه‌ها می‌توان دریافت، کاهش در سرعت اسکن منجر به تولید سطح چگال‌تر می‌شود. زیرا در سرعت اسکن پایین‌تر و فاصله اسکن کم‌تر، انرژی ورودی بالا منجر به چگالش بالاتر خواهد شد. رابطه بین سرعت اسکن و چگالی نهایی، در نمونه‌های تولیدشده با پودر استیل، به‌وضوح کاهش چگالی مواد را با افزایش سرعت اسکن نشان می‌دهد. در سرعت‌های اسکن پایین نمونه‌ها بالاترین چگالی را نشان می‌دهند. این نتیجه این حقیقت است که در سرعت‌های اسکن پایین، میزان بالاتری از انرژی در واحد طول به یک مهره مذاب می‌رسد و این امر منجر به ذوب شدن پودر بیشتر و تولید مهره‌های بزرگ‌تر می‌شود. در واقع در سرعت‌ها بالاتر انرژی در واحد طول کاهش می‌یابد و بنابراین پودر کم‌تری ذوب شده و مهره‌های کوچک‌تری شکل می‌گیرد. این مهره‌ها به‌میزان کافی بزرگ نیستند تا در یک لایه چگال جامد شوند.

فاصله اسکن مهم‌ترین اثر را بر روی کل انرژی رسیده به پودر دارد. فاصله اسکن‌های کوچک افزایش هم‌پوشانی خطوط اسکن و افزایش انرژی رسیده روی بستر پودر را نتیجه می‌دهد. در نزدیک‌ترین فاصله اسکن (۵۰٪)، و دورترین فاصله اسکن (۰٪) برای پرتو لیزری به قطر $20\mu\text{m}$ ، تأثیر فاصله اسکن از تأثیر سرعت و توان پررنگ‌تر است. به عبارتی فاصله‌های اسکن کم، حتی در سرعت بالا و توان نسبتاً پایین اتصال محکم و مشخصات چسبندگی بالایی را در نمونه‌ها نشان می‌دهد.

فاصله اسکن کم باعث ذوب مجدد شدن بخش مهمی از اسکن اولیه خواهد شد و این امر منجر به افزایش بیش‌تر حجم مهره‌های مذاب خواهد شد. علاوه بر این جدا شدن پودر جدید قرار گرفته در معرض پرتو لیزر نیز به حجم مذاب افزوده می‌شود. افزایش موثر و زیاد در حجم مذاب، به واسطه افزایش دما و اسکوزیته را کاهش خواهد داد. این امر باعث افزایش جریان سیال شده و نهایتاً منجر به چگالی بالاتر لایه‌ها می‌شود. در واقع می‌توان این روند را به صورت زیر نمایش داد. البته این روند در مورد لایه‌های تولید شده در بستر پودر خام و عدم وجود زیر لایه صادق است. البته این کاهش فاصله اسکن تا حد مشخصی تأثیر مثبت داشته ولی به دلیل افزایش دمای متوالی قسمت‌های منجمد شده و اختلاف گرادیان حرارتی در دو سمت این نمونه‌ها این کاهش فاصله باعث افزایش فرخوردگی و تاب برداشتن نمونه‌ها شده که این امر در لایه‌هایی با ضخامت حدود $200\mu\text{m}$ میکرون بسیار مشکل‌ساز بوده زیرا نمونه‌های تک‌لایه تولید شده در این روش به دلیل ضخامت کم استحکام کمی داشته و باعث عدم چسبیدن یکنواخت لایه‌های دیگر بر روی این لایه تاب برداشته می‌شود. از این رو کاهش فاصله اسکن تا حدود ۲۵٪ مناسب برآورد می‌شود.

کاهش فاصله خطوط اسکن باعث افزایش زمان تولید نیز می‌شود که این امر نیز مطلوب نبوده و تا حد امکان سعی بر این است که فاصله خطوط اسکن را نگاه داریم. به عبارت دیگر سرعت عملیات ذوب لیزری در فاصله اسکن ۰٪ نسبت به فاصله اسکن ۵۰٪ چیزی در حدود ۲ برابر است و این امر در قطعات با ابعاد بزرگ بسیار مشخص و قابل مشاهده است.

در فاصله‌های اسکن بالاتر، میزان کم‌تری از گلوله‌های مذاب اولیه ذوب می‌شود و بیش‌تر بستر پودر خام ذوب می‌شود. بنابراین در این حالت، مهره‌های مذاب در جهت عمود بر جهت اسکن رشد می‌کنند و رشدی در جهت اسکن ندارند. شکل فوق اساس این امر را نشان می‌دهد. اضافه شدن فاصله اسکن

هرچه فرکانس لیزر بالاتر باشد (طول موج (λ) پایین‌تر)، انرژی لیزر یکنواخت‌تر به سطح داده می‌شود. اما انرژی بیشینه کم‌تری از آن ساطع خواهد شد. توانایی لیزرهای پالسی برای تولید لایه‌های جامد در سرعت‌های بالای اسکن و فواصل اسکن بالا باعث کاهش زمان تولید قطعات فلزی بدون نیاز به افزایش توان لیزر خواهد بود. در نتیجه این امر باعث صرفه‌جویی زیادی در قیمت و هزینه خواهد شد و از اثرات حرارتی ایجاد شده توسط فرآیند نیز جلوگیری می‌کند.

به دلیل بخار شدن و یونیزه شدن پودر، فشار برگشتی پلاسما القاء می‌شود. این فشار برگشتی مانند موجی ضربه‌ای بر روی سطح عمل می‌کند. در نتیجه این موج ضربه‌ای لایه قبلی را از محدوده واکنش خارج می‌کند و باعث جدایی لایه پودر می‌شود. هرچه توان لحظه‌ای ورودی به بستر پودر بیش‌تر باشد، فشار پلاسمای تولیدی بالاتر خواهد بود. زیرا با توان بالاتر حجم بالاتری از پودر بخار خواهد شد.

نمونه‌های اسکن شده در حالت موج پیوسته (CW) نشانه‌های از شکل‌گیری پلاسما نشان نمی‌دهد. نرخ‌های تکرار بالای پالس بزرگ‌تر تفاوت کمی را نسبت به نمونه‌های تولید شده در حالت CW نشان می‌دهد. در واقع اثر دمایی این حالت به دلیل زمان پاسخ دمایی سیستم، بسیار شبیه به حالت CW است. در فرکانس‌های بالا به دلیل انرژی کم پالس، اثر ناچیزی از فشار پلاسما دیده می‌شود.

با کاهش فرکانس پالس، انرژی پالس افزایش می‌یابد، بخار شدن پودر به وجود می‌آید و شکل‌گیری پلاسما اتفاق می‌افتد. به هر حال این اثرات تنها در میانگین توان بالاتر اتفاق می‌افتد.

سطوح تولید شده در وضعیت CW و یا فرکانس‌های پالس بالا چگالی پایینی را در مقایسه با نمونه‌های تولید شده با فرکانس کم‌تر نشان می‌دهند. در فرکانس‌های پایین نیروی برگشتی فشاری باعث تغییر شکل سطح مقطع دایره‌ای مهره‌ها به شکل‌های صاف‌تر می‌شود. این امر باعث اتصال بهتر مهره‌ها به یکدیگر و لایه زیری می‌شود. و باعث بالا رفتن چگالی خواهد شد. این روند برای کلیه فاصله‌های اسکن ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد دیده می‌شود.

تأثیر فاصله اسکن: فاصله اسکن فاصله بین خطوط اسکن شده متوالی توسط لیزر می‌باشد. عموماً فاصله اسکن کسری از قطر پرتو است. به منظور اطمینان از هم‌پوشانی بین خطوط اسکن متوالی، معمولاً قطعات با الگوهای اسکن دوجبهته تولید می‌شوند.

این امر باعث ایجاد ساختاری موزائیکی شکل در نمونه‌ها می‌شود. به دلیل وجود مذاب کم‌تر تشکیل شبکه یک‌پارچه فلزی در این نمونه‌ها مشکل‌تر بنابراین استحکام نمونه‌هایی با ساختار موزائیکی شکل از نمونه‌هایی با ساختار مرجانی شکل کم‌تر است.

با کاهش بیش از حد انرژی لیزر تنها ذرات پودر گرم شده و در مقطعی به صورت تف‌جوشی به یکدیگر متصل می‌شود. در این حالت هیچ مذابی در بین ذرات پودر و در نتیجه شبکه فلزی ناشی از آن نیز وجود نخواهد داشت. این امر باعث کاهش بسیار زیاد استحکام قطعات تولیدی می‌شود.

میزان هم‌پوشانی بین خطوط اسکن نسبت به جریان لیزر و سرعت اسکن چندان قابل توجه نیست. در خطوط اسکن با هم‌پوشانی بیش‌تر (فاصله اسکن کم‌تر) حجم مذاب بالاتر رفته و گرانروی آن کاهش می‌یابد، در نتیجه جریان مذاب در بین ذرات پودر بیش‌تر شده و چگالی نمونه‌ها افزایش می‌یابد.

۶- مراجع

1. Shellabear, M. and Nyrhilä, O. "DMLS-Development History and State of the Art", Erlangen: LANE 2004 conference.
2. Villalon, A.V. "Electron Beam Fabrication of Injection Mold Tooling with Conformal Cooling Channels", North Carolina: A Thesis Submitted to the Graduate Faculty.
3. Kruth, J-P., Mercelis, P., Van Vaerenbergh, J., Froyen L., and Rombouts, M. "Binding Mechanisms in Selective Laser Sintering and Selective Laser Melting", Rapid Prototyping Journal, Vol. 11, No. 1, pp. 26-36, 2004.
4. Nikolay K., Tolochko, M.K., Arshinov, A.V., Gusarov, V.I., Titov, T.L., and Ludo, F. "Mechanisms of Selective Laser Sintering and Heat Transfer in Ti Powder", Rapid Prototyping Journal, Vol. 9, pp. 314-326, 2005.
5. Nikolay K., Tolochko, S.E., Mozzharov, I.A., Yadroitsev, Tahar L., Ludo F., Victor I.T., and Michail B.I. "Balling Processes During Selective Laser Treatment of Powders". Rapid Prototyping Journal 2, Vitebsk: Emerald Group Publishing Limited, Vol. 10, pp. 78-87, 2004.
6. Dongdong G. and Yifu S.N. "Balling Phenomena During Direct Laser Sintering of Multi-Component Cu-Based Metal Powder". Elsevier, Alloys and Compounds, Vol. 432, pp. 163-166, 2007.
7. John N., DuPont, S.B., and Stephen, L. "Welding of Materials for Energy Applications." Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 44, No.7, pp. 3385-3410, 2013.

به‌حدی می‌رسد که زنجیره اولیه مذاب نمی‌تواند به قدر کافی ذوب مجدد شود تا با زنجیره تولیدشده وصل شود بنابراین سطحی از زنجیره‌هایی با عدم اتصال به یکدیگر خواهیم داشت.

در نهایت برای قطعات سه‌بعدی تصمیم بر آن شد که از کم‌ترین سرعت ممکنه یعنی ۲۵ میلی‌متر بر ثانیه و بیش‌ترین جریان (۱۰ آمپر) و فرکانس پیوسته استفاده شود. با توجه به آزمایشات و سایر مقالات انجام‌شده در این زمینه فاصله خطوط اسکن نیز برابر با ۱۵۰ میکرون در نظر گرفته شد. مطابق شکل ۷ نمونه بهینه‌شده به دست آمد که گویای بیش‌ترین ذوب پودر استیل در پارامترهای لیزر می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

با انجام آزمایش‌های فوق اطمینان از عملکرد صحیح دستگاه ساخته‌شده حاصل شد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد با افزایش جریان و کاهش سرعت اسکن، چگالی انرژی اعمالی به پودر خام افزایش یافته و در نتیجه پودر بیش‌تری مذاب می‌شود در حالتی که حجم مذاب بالاست امکان اتصال مذاب تشکیل‌شده به یکدیگر در سطح بیش‌تر وجود دارد. بنابراین شبکه‌ای از مذاب که ذرات پودر تف‌جوشی شده را احاطه کرده است تشکیل می‌شود. هرچه انرژی لیزر بیش‌تر شود حجم مذاب بالاتر و ساختار متراکم‌تری تشکیل می‌شود این نوع ساختار حالتی مرجانی شکل دارد.

با کاهش جریان و یا افزایش سرعت میزان ذرات پودر تف‌جوشی‌شده محبوس در شبکه مرجانی بیش‌تر شده و نمونه حالت توری‌شکلی به خود می‌گیرد.

قطرات مذاب ایجادشده بر روی سطح به‌واسطه خاصیت موئینگی سیال تمایل به چسبیدن به یکدیگر را دارند. این قطرات مذاب متصل‌شده به هم باعث شکل‌گیری تاول‌هایی بر روی سطح شده و صافی سطح را کاهش می‌دهند هرچه میزان این قطرات بیش‌تر باشد تاول زده‌تر و صافی سطح نیز کم‌تر می‌شود.

با کاهش بیش‌تر جریان لیزر و افزایش بیش‌تر سرعت اسکن چگالی انرژی اعمالی نیز افت بیش‌تری می‌کند. در این حالت انرژی تنها برخی از ذرات پودر که از اندازه کم‌تری برخوردار هستند را ذوب نموده و اکثر آن به صورت پودر تف‌جوشی شده باقی می‌ماند. بنابراین نمونه‌های تولیدشده شامل سطح تف‌جوشی شده‌ای از پودر است که قطرات مذاب به صورت جزایری در آن پخش شده است.

8. Xiaoge P., Haiyong Z., Yanmin D., Jiuyi C., Yaoju Z., Jian Z., and Dingyuan T. "Diode-end-Pumped Nd:YAG Ceramic and Crystal Operation at 1,123 nm", Journal of Russian Laser Research, Vol. 34, No. 5, pp. 458-462, 2013.
9. Subrata K.G., Kaushik B., and Partha S. "Development of an In-Situ Multi-Component Reinforced Al-Based Metal Matrix Composite by Direct Metal Laser Sintering Technique - Optimization of Process Parameters", Materials Characterization, Vol. 93, pp. 68-78, 2014.
10. Di, W., Yongqiang, Y., Ziheng Y., and Xubin S. "Research on the Fabricating Quality Optimization of the Overhanging Surface in SLM Process" The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 65, No's. 9-12, pp. 1471-1484, 2013.

Archive of SID