



بررسی تجربی قطعات تولید شده از طریق ذوب لیزری پودر آهن برای دستیابی به نقطه عطف بین فرایند تف‌جوشی و ذوب کامل

سید علی فاطمی^۱، جمال زمانی اشنی^{۲*} و امیرحسین هداوند^۱

^۱ کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

^۲ استاد مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۱۶، تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۰۷/۱۸، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۰۸

چکیده

همواره یکی از اهداف اصلی محققان در فرایند تف‌جوشی لیزری پودرهای فلزی، بهینه‌سازی متغیرهای فرایند به منظور نزدیک کردن خواص قطعه تولیدی به مواد خام اصلی بوده است. برای این منظور آزمایشات زیادی صورت گرفته است. متغیرهایی از قبیل چگالی، سختی، استحکام و صافی سطح در موارد مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این مقاله تأثیر متغیرهای ورودی مانند توان لیزر و سرعت اسکن بر روی متغیرهای خروجی از قبیل عمق نفوذ، استحکام و اثر گوی‌شدگی بررسی شد. به منظور تولید قطعات چند لایه کاملاً چگال، ابتدا بهینه‌سازی متغیرها، برای تک لایه بررسی شد. آزمایشات بر روی بستر پودر به عمق ۵ میلی‌متر انجام شد. هر قطعه به صورت تک‌لایه و تنها با یک بار اسکن لیزر بر روی بستر پودر تولید شد. تابش پرتو لیزر بر روی بستر پودر، قطعات دایره‌ای به قطر ۲۰ میلی‌متر تولید کرد. نتایج نشان دادند نقطه عطف بین فرایند تف‌جوشی و ذوب کامل، بهینه‌ترین شرایط فرایندی برای تولید سریع قطعات از پودر فلز است.

کلمات کلیدی: پودر فلز؛ تف‌جوشی لیزری مستقیم پودر فلز؛ ذوب پودر؛ نمونه‌سازی سریع.

Experimental Investigation of Fabricated Parts by Laser Melting of Iron Powder to Achieve Turning Point Between Sintering Process and Complete Melting

S. A. Fatemi¹, J. Z. Ashany^{2,*}, A. Hadavand¹

¹ M.Sc., Mech. Eng., K N Toosi Univ., Tehran, Iran.

² Prof., Mech. Eng., K N Toosi Univ., Tehran, Iran.

Abstract

One of the main goals of researchers in the laser sintering process of metal powders, is optimization of process parameters in order to reach the properties of manufactured parts to the raw material properties. For this purpose, many experiments have been performed and parameters such as density, hardness, strength and surface quality in different condition of process parameters have been studied. In order to produce a fully dense multi-layer parts, it is necessary to optimise the process parameters of a mono-layer part. In the present study, experiments have performed on a powder bed with thickness of 5mm. The fabricated parts have been produced by a single laser scanning of powder bed. By Laser radiation on the powder bed, circular pieces with a diameter of 20 mm have been produced. Results showed that turning point between sintering process and complete melting is the best process condition in sintering process.

Keywords: Metal Powder; Direct Metal Laser Sintering; Powder Melting; Rapid Prototyping.

۱- مقدمه

یکی از تمایلات بزرگ شرکت‌ها، کوتاه کردن زمان تولید و ارائه محصول به بازار رقابتی امروز است. روش‌های نمونه‌سازی سریع در دهه هشتاد برای فائق آمدن بر این مسئله ایجاد شدند. نمونه‌سازی سریع (RP)^۱، روشی برای تولید نمونه‌های مهندسی بدون نیاز به شکل‌دهی سنتی است. نمونه‌های اولیه مهندسی به‌منظور ارزیابی جنبه‌های مختلف قطعه از قبیل تست‌های مکانیکی و عملکردی، حالت‌های انطباق و مونتاژ، زیبایی‌شناسی و تحقیق برای فروش استفاده می‌شود.

پیشرفت‌های اخیر در نمونه‌سازی سریع منجر به ایجاد روش‌های ساخت و تولید سریع مثل LENS^۲، SLS^۳ و EBM^۴ برای تولید قطعات فلزی به صورت سریع شده است. از بین این روش‌ها، فن‌آوری پایه پودری SLS متداول‌تر است. فرایند SLS، یک فرایند تولیدی لایه‌به‌لایه است که اجازه تولید قطعات پیچیده سه‌بعدی را از طریق جامدسازی لایه‌های پودری بر روی یکدیگر می‌دهد. ضخامت لایه در این روش بین ۲۰ تا ۱۵۰ میکرون است و توسط سیستم لایه‌نشانی ایجاد می‌شود [۱]. در این فرایند، یک لیزر (در حدود ۲۰۰ وات) به صورت مستقیم روی مخلوط پودر فلز عمل می‌کند. پودر شامل مخلوطی از برنز، نیکل و بعضی دیگر افزودنی‌ها است. مزیت این مواد این است که در خلال فرایند تفجوشی، انقباض خیلی کمی را نشان می‌دهند و در نتیجه قطعات با دقت بالایی تولید می‌شود. بعضی دیگر از مواد از قبیل مخلوط مس و قلع به منظور تولید کردن برنز و مخلوط پودر پایه آهن نیز در این روش آزمایش شده‌اند [۲]. با کمک روش SLS تولید قطعات با چگالی بالاتر از ۶۳٪ تا ۱۰۰٪ قابل دسترسی است و دیگر نیازی به استفاده از کوره‌های ثانویه و نفوذ وجود ندارد [۳].

یکی از مشکلات عمده در تفجوشی پودرهای فلزی تک‌جزئی، پدیده گوی‌شدگی^۵ است. انقباض، عامل اصلی پدیده گوی‌شدگی است. گوی‌شدگی با افزایش فاصله بین خطوط اسکن شده، افزایش می‌یابد و با کاهش ضخامت لایه پودر، میزان آن کاهش می‌یابد [۴].

با توجه به ذوب مجدد و جامد شدن در فرایند SLS، مشکلاتی از قبیل تنش حرارتی بالا در مواد به واسطه ایجاد گرادیان حرارتی بالا، شایع است. اما مشکل مهم‌تر اکسیدشدگی و کاهش ترشدگی^۶ مواد است. کاهش ترشدگی به واسطه اثر کشش سطحی باعث به‌وجود آمدن عیوبی از قبیل تخلخل، گوی‌شدگی و لایه‌لایه شدن می‌شود [۵]. فناوری SLS می‌تواند به سه دسته مختلف تقسیم شود. در فرایند تفجوشی غیرمستقیم فلزی (IMS)^۷ از یک لیزر توان پایین به منظور ذوب و اتصال جزء اتصال‌دهنده پلیمری استفاده می‌شود. در مرحله بعدی، پلیمر از ساختار خارج شده و به جای آن یک آلیاژ فلزی با دمای ذوب پایین نفوذ داده می‌شود. در DMLS^۸ مخلوطی از دو جزء فلزی با دمای ذوب بالا و پایین تفجوشی می‌شوند. در این حالت جزء با دمای ذوب پایین، ذوب شده و جزء با دمای ذوب بالا را در خود می‌گیرد. در DMLR^۹ از یک جزء فلزی (بدون نیاز به اتصال‌دهنده و نفوذ) استفاده می‌شود. این امر نیاز به ذوب مستقیم، هم‌جوشی و جامد شدن مواد دارد تا قطعاتی با چگالی بالا تولید شوند [۶و۷].

فناوری DMLR در دانشگاه لیورپول براساس روش SLS توسعه داده شد. عیب روش‌های IMS و DMLS این است که رفتار مکانیکی محصول تولید شده، بر اساس مشخصات و خواص مکانیکی ضعیف‌ترین فاز (در IMS پلیمر و در DMLS فاز اتصال‌دهنده) تعیین می‌شود [۶]. معایب DMLR توسط پوگسون و همکارانش^{۱۰} در سال ۱۹۹۳ بررسی شده است. آنها بیان داشتند گرادیان بالای دمای پخش شده در خلال ذوب (تمرکز بالای حرارتی در مساحتی بسیار کوچک)، انقباض و جامد شدن، تنش پسماند بالایی را تولید خواهد کرد [۸].

در خلال فرایند تفجوشی لیزری، واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی پیچیده‌ای رخ می‌دهد، بنابراین مطالعه و فرموله کردن این فرایند بسیار پیچیده و مشکل است. البته محققانی این فرایند را شبیه‌سازی و فرموله نموده‌اند. برای مثال ژو و همکارانش^{۱۱} در سال ۱۹۹۹ با بررسی بر روی تفجوشی

⁶ Wettability

⁷ Indirect Metal Sintering

⁸ Direct Metal Laser Sintering

⁹ Direct Metal Laser Remelting

¹⁰ Pogson

¹¹ Zhu

¹ Rapid Prototyping

² Laser Engineered Net Shaping

³ Selective Laser Sintering

⁴ Electron Beam Additive Manufacturing

⁵ Balling

مورگان و همکارانش در سال ۲۰۰۳ مطالعاتشان بر روی قطعات تک‌لایه تولید شده از پودر استیل ۳۱۶ را ارائه و تاثیر فرکانس لیزر بر شکل‌گیری پلازما را بیان کردند [۶]. نمونه‌های تولید شده با فرکانس‌های کمتر از ۳۰ کیلو هرتز در آن پژوهش، بهبود در چسبندگی لایه‌های نمونه را نشان داد که در نتیجه می‌توان نمونه‌های ساخته شده را به راحتی از روی بستر پودر برداشت. علت این پدیده وجود فشار جزئی پلازما در این فرکانس‌ها است.

تحقیقات مورگان و همکارانش در سال ۲۰۰۴ بر روی بلوک‌های تولید شده از پودر فولاد ۳۱۶ تاثیر فرکانس را بر روی چگالی قطعات تولید شده نشان می‌دهد [۷]. در فرکانس‌های پایین، نیروی برگشتی فشاری باعث تغییر شکل سطح مقطع دایره‌ای حلقه‌ها به شکل‌های صاف‌تر می‌شود. این امر باعث اتصال بهتر حلقه‌ها به یکدیگر و همچنین اتصال با لایه زیرین (لایه تشکیل شده از اسکن قبلی) شده که باعث بالا رفتن چگالی نمونه خواهد شد. ژو و همکارانش، تاثیر فاصله اسکن را بر روی ریخت‌شناسی^۴ نمونه‌های تف‌جوشی شده پودر مس نشان داده‌اند [۹]. بر طبق تحقیقات ایشان، با افزایش فاصله اسکن، ترک‌های واضحی در جهت موازی با جهت اسکن لیزری دیده می‌شود.

بسیاری از تحقیقات توابعی را به صورت ترکیب متغیرهای فرایند ایجاد نموده و آنرا به عنوان ورودی سیستم بررسی می‌کنند. اکثر این توابع، نشان‌دهنده چگالی شار لیزر هستند. یکی از معروفترین توابع، عدد آندرو است [۱۲]. کروس و همکارانش^۵ برای بررسی متغیرهای تف‌جوشی، تابعی ترکیبی ایجاد نموده‌اند [۲]. این تابع ترکیبی شامل توان لیزر، سرعت اسکن، فاصله اسکن و ضخامت لایه است. بیمن و همکارانش نیز تعریفی از چگالی انرژی ارائه کرده‌اند [۹]. مورگان و همکارانش نیز برای بررسی چگالی بلوک‌های تولیدی از پودر استیل، از این تابع استفاده نموده‌اند. کومار و همکارانش در سال ۲۰۱۶ تاثیر سه متغیر قدرت لیزر، دما و جهت اسکن را بر روی دقت ابعادی و میکرو سختی قطعات ساخته شده با استفاده از روش تاگوچی تجزیه و تحلیل کردند [۱۳].

پودرهای فلزی میزان تأثیر متغیرهای فرایند را بدست آورده‌اند [۹].

متغیرهای موثر بر تف‌جوشی لیزری را می‌توان به سه گروه عمده متغیرهای فرایند، متغیرهای مواد و متغیرهای محیطی تقسیم نمود [۱۰]. متغیرهای فرایند اغلب بر روی فرایندهای لیزری موثراند و چگالی انرژی لیزر را کنترل می‌کنند. این متغیرها شامل توان لیزر (P)، اندازه قطر پرتو لیزر (d)، سرعت اسکن (v)، فاصله خطوط اسکن (h)، ضخامت لایه (w) و هندسه و استراتژی اسکن هستند [۱۱]. در پارامترهای از موارد می‌توان این متغیرها را در یک تابع، به صورت چگالی شار بررسی نمود. متغیرهای مواد شامل ترکیب شیمیایی، درصد اکسیژن، روش آلیاژسازی، مشخصات ذرات (اندازه، شکل، میزان سیلان) و چگالی بستر پودر است. متغیرهای محیطی نیز نقش موثری بر کیفیت قطعات تولیدی دارند. این متغیرها شامل اتمسفر تف‌جوشی، میزان پیش‌گرم و فشار کوبشی^۱ است. شناخت و بررسی هر یک از این متغیرها، امری حیاتی در تف‌جوشی لیزری است.

توان و سرعت، موثرترین متغیرها در میزان مذاب به جا مانده، انحاء و گوی‌شدگی اولین خط اسکن هستند. تولوچکو و همکارانش^۲ در سال ۲۰۰۳ به بررسی مکانیزم تف‌جوشی پودر تیتانیوم در اتمسفر خلاء پرداخته‌اند [۴]. تحقیقات مورگان و همکارانش^۳ بر روی پودر استیل ۳۱۶ نیز موارد مشابهی از تاثیر توان را نشان می‌دهد [۶]. به دلیل وجود حرکت پرتو لیزر، تاثیر توان و سرعت اسکن لیزر را به صورت همزمان بررسی کرده‌اند.

بر اساس تحقیقات پوگسان و همکارانش در سال ۲۰۰۳، سرعت اسکن لیزری دو تأثیر عمده بر روی فرایند دارد [۸]. تاثیر نخست این است که سرعت اسکن، اندازه حوضچه مذاب را کنترل می‌کند. این اندازه در سرعت‌های اسکن سریع، باریک‌تر اما طولی‌تر خواهد بود و تاثیر دیگر، سرعت اسکن موثر بر زمان مذاب بودن مواد است. هر چه سرعت اسکن پایین‌تر باشد زمان مذاب‌بودن بالاتر است. این دو عامل باعث خواهد شد تا در توانی ثابت، نمونه‌های تولید شده با سرعت بالاتر، ضخامت کمتری داشته باشند.

⁴ Morphology

⁵ Kruth

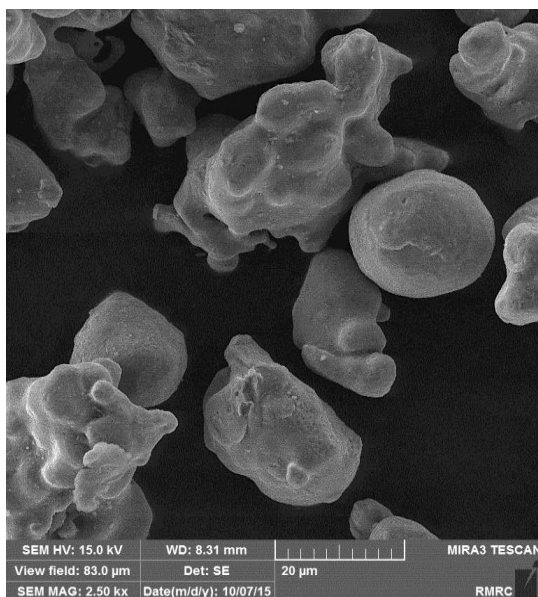
¹ Squeeze Pressure

² Tolochko

³ Morgan



شکل ۱- نمایی از چیدمان سخت‌افزار آزمایش‌ها



شکل ۲- تصویر SEM از پودر استفاده شده با بزرگ‌نمایی

۲۵۰۰ برابر با میکروسکوپ MIRA3 TESCAN

لیزر بر روی بستر پودر تولید شد. حرکت پرتو لیزر بر روی سطح، دایری به قطر ۲۰ میلی‌متر را روی پودر اسکن کرده و نمونه‌های آزمایشی تولید شدند.

عوامل موثر بر انرژی لیزر در واحد زمان سه عامل مساحت موج لیزر، مساحت متأثر از لیزر و تعداد شلیک‌ها

۲- روش تجربی

۲-۱- مقدمه

تجهیزات تست شامل یک لیزر میکرو-جوشکاری از نوع Nd:YAG، دارای Q-Switch (تولید پالس‌های نانو ثانیه‌ای با انرژی بالا) و با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر است. متغیرهای قابل تغییر در این لیزر شامل ولتاژ (۲۵۰-۴۰۰ ولت)، قطر پرتو لیزر D (از ۰/۱ تا ۲/۵ میلی‌متر)، زمان روشن بودن پالس یا پهنای پالس P (صفر تا ۱۰ میلی‌ثانیه) و فرکانس موج خروجی f (صفر تا ۱۵ هرتز) است. ولتاژ بیانگر توان، پهنای پالس نشان‌دهنده زمان روشن بودن لیزر در هر شلیک^۱ و فرکانس مشخص‌کننده تعداد شلیک در هر ثانیه است. در شکل ۱ نمایی از چیدمان سخت‌افزار آزمایش‌های انجام شده نشان داده شده است.

در این آنالیز، پودر آهن با خلوص ۹۷/۱۷ درصد، شکل ذرات نامشخص و قطر متوسط ۲۰ میکرون مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۲ تصویر ذرات پودر را نشان می‌دهد.

۲-۲- روش انجام آزمایش

در این آزمایش‌ها قطر پرتو لیزر ۲/۵ میلی‌متر و فاصله کانونی لیزر ۱۲۰ میلی‌متر است. پرتو لیزر به کمک یک میز دوار که بر روی بستر لیزر قرار گرفته است، به صورت آنالوگ بر روی سطح حرکت می‌کند. پودر درون محفظه حفاظت شده‌ای قرار گرفته و هوای اطراف آن توسط یک پمپ خلاء ۵ لیتری تا فشار ۰/۱۵ bar تخلیه شده است. آزمایش‌ها بر روی بستر پودر به عمق ۵ میلی‌متر صورت گرفته شد. پودر توسط یک تیغه آلومینیومی که زاویه ۱۰ درجه با سطح دارد، صاف می‌شود. علت استفاده از تیغه با زاویه ۱۰ درجه کم بودن حجم پودر مقابل تیغه جهت هموارسازی است. علاوه بر این، از آلومینیوم به دلیل غیرمغناطیسی بودن آن استفاده شده است.

به منظور تولید قطعات چند لایه کاملاً چگال توسط فرآیندهای لیزری پالسی، در ابتدا لازم است تا عملکرد لیزر و مواد و همچنین بهینه‌سازی متغیرها، برای تک لایه بررسی شود. آزمایش‌ها بر روی بستر پودر آزاد به عمق ۵ میلی‌متر انجام شد. هر قطعه به صورت تک‌لایه و تنها با یک بار اسکن

^۱ Laser Shoot

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

$$P_w = PPD \times f = \frac{4RI^2f}{\pi d^2} \vartheta = \frac{4V^2f}{R\pi d^2} \vartheta \quad (۴)$$

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

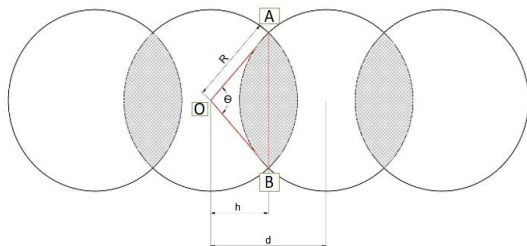
$$P_d = \vartheta \frac{4RI^2f}{\pi d^2} \times \frac{x}{v} = \vartheta \frac{4RV^2f}{\pi d^2} \times \frac{x}{v} \quad (۵)$$

با توجه به چیدمان آزمایش‌ها و نوع لیزر، بسیاری از متغیرهای رابطه فوق در تمام آزمایش‌ها از مقادیر ثابتی برخوردارند. این ثابت‌ها شامل قطر پرتو لیزر d ، عدد π ، مقاومت R و راندمان ϑ است. علاوه بر این با توجه به ثابت بودن مساحت ناحیه اسکن شده، میزان x در طول ثابت و در عرض رابطه معکوس با فاصله اسکن L_d خواهد داشت. بنابراین:

$$P_{density} = cte. \frac{I^2 \cdot f}{v \cdot L_d} \quad (۶)$$

دستگاه لیزر استفاده شده در آزمایش‌ها، میزان حداکثر آمپر محدودی داشته و از توان کمی برخوردار است. 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 [۷]. هم‌پوشانی هندسی مساحت، ناشی از فاصله اسکن بین دو پرتو لیزر است. این مساحت تابعی از قطر پرتو لیزر، سرعت اسکن و فرکانس Q-Switch است. شکل ۳ مساحت هم‌پوشانی را نشان می‌دهد.

مساحت قسمت هم‌پوشانی در تابش پرتو لیزر، دو برابر مساحت قطاع برش‌خورده بیرون از مثلث OAB خواهد بود. علاوه بر این، مساحت برش دایره برابر با مساحت قطاع منتهای مساحت مثلث است. بنابراین:



شکل ۳- شکل شماتیک از هم‌پوشانی هندسی

هستند. مساحت موج لیزر مستقیماً وابسته به پالس و ولتاژ و مساحت متأثر از پرتو لیزر ناشی از قطر پرتو خواهد بود. تعداد شلیک‌ها نیز در واقع همان فرکانس لیزر است [۱۲]. به منظور کاهش دادن متغیرهای ورودی، سرعت اسکن و فرکانس لیزر، به صورت تابعی با نام هم‌پوشانی^۱ تعریف شده است. در این صورت هم‌پوشانی به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود.

$$O = \frac{f}{v} \quad (۱)$$

که f فرکانس لیزر و v سرعت اسکن لیزر است. به این ترتیب با ثابت نگه‌داشتن قطر پرتو لیزر، تعداد متغیرهای تعیین‌کننده انرژی لیزر به سه متغیر ولتاژ، پالس و هم‌پوشانی محدود خواهد شد. با توجه به اینکه تولید نمونه‌ها به صورت حرکت تک مسیر و صفحه‌ای است، برای نایل شدن به قطعاتی که قابل اندازه‌گیری بوده و از ابعاد نسبتاً مناسبی برخوردار باشند، قطر پرتو لیزر برای تمام آزمایش‌ها ثابت و برابر مقدار ۲/۵ میلی‌متر (بیشترین قطر لیزر) در نظر گرفته شد. علاوه بر این، انتخاب این قطر باعث می‌شود تا فشار پلاسمای ایجاد شده در حین تف‌جوشی لیزری، اندک و قابل چشم‌پوشی باشد [۸،۷،۶].

در فرایندهای لیزری اغلب لازم است تا به منظور تخمین انرژی اعمالی و برآورد صحیح از عملیات، در ابتدا چگالی انرژی لیزر بررسی شود [۵]. با این تعریف، چگالی توان، توان بر واحد سطح است که اغلب با واحدهای W/cm^2 و یا W/mm^2 بیان می‌شود. برای محاسبه چگالی توان، مساحت پرتو و تقسیم قدرت پرتو به آن به سادگی به دست می‌آید [۶].

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

$$E = VI\vartheta = \frac{V^2}{R} \vartheta = RI^2\vartheta \quad (۲)$$

بنابراین چگالی انرژی هر پالس برابر است با:

$$PPD = \frac{4RI^2}{\pi d^2} \vartheta = \frac{4V^2}{R\pi d^2} \vartheta \quad (۳)$$

^۱ Overlap

جدول ۱- آزمایش‌های اولیه برای محدوده هم‌پوشانی

هندسی						
ردیف	۱	۲	۳	۴	۵	۶
V(mm/s)	۰/۵	۲	۵	۱۰	۱۵	۲۰
G.O. %	۹۷	۹۰	۷۵	۵۰	۲۷	۷

جدول ۲- آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌ها

نمونه						
۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
متغیرها	۱۲	۳	۱۰	۸	۱۱	۹
هم‌پوشانی (Pulse/mm)	۱۰	۳۰	۵۰	۱۰	۳۰	۵۰
ولتاژ (Volt)	۳۰۰	۲۷۵	۲۵۰	۲۵۰	۲۷۵	۳۰۰
پالس (ms)	۶	۶	۶	۶	۶	۶
فرکانس (Hz)	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵
قطر لیزر (mm)	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵
قطر نمونه (mm)	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
سرعت اسکن (mm/s)	۱/۵	۰/۵	۰/۳	۱/۵	۰/۵	۰/۳
هم‌پوشانی هندسی (%)	۹۲/۴	۹۷/۵	۹۸/۵	۹۲/۴	۹۷/۵	۹۸/۵

درجه بررسی و میانگین این مقادیر به عنوان خروجی‌های اصلی در نظر گرفته شده است. برای بررسی متغیرهای خروجی (جدول ۳ و ۴)، مقدار میانگین بین دو نمونه مشترک ملاک قرار گرفت.

مقادیر میانگین خروجی آزمایش‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است. تأثیر متغیرهای ورودی با مقایسه مقادیر میانگین بدست آمده است. مقادیر بررسی شده شامل عمق نفوذ، پهنای حلقه، میزان تقعر، میزان گوی‌شدگی، صافی سطح است. عمق نفوذ، میزان مذاب ایجاد شده و اثر آن بر روی نمونه را نشان می‌دهد. مقدار عمق نفوذ به کمک کولیس (و میکرومتر) از روی نمونه‌ها بدست آمده است. پهنای حلقه، وابسته به قطر پرتو بوده و میزان انتشار مذاب بر روی سطح را نشان می‌دهد. عمق قسمت مقعر نیز مؤید میزان انقباض بستر پودر است. گوی‌شدگی و صافی سطح وابسته به یکدیگرند. معمولاً سطوحی با گوی‌شدگی کمتر صافی سطح بالاتری دارند. به دلیل اسکن بر روی بستر پودر سرد، معمولاً گوی‌شدگی در اولین خط اسکن دیده می‌شود.

$$\theta = 2 \cos^{-1} \frac{h}{R} = 2 \arccos \frac{d/2}{R} = 2 \arccos \frac{d}{2R} \quad (7)$$

$$\text{مساحت قطاع} = \frac{R^2 \theta}{2} = R^2 \arccos \frac{d}{2R} \quad (8)$$

$$\text{مساحت مثلث} = \frac{d}{R} \sqrt{R^2 - \frac{d^2}{4}} \quad (9)$$

$$\text{مساحت برش دایره} = R^2 \arccos \frac{d}{2R} - \frac{d}{R} \sqrt{R^2 - \frac{d^2}{4}} \quad (10)$$

$$\text{مساحت برش دایره} = \frac{R^2 (\theta - \sin \theta)}{2} \quad (11)$$

در نتیجه:

$$\text{هم‌پوشانی هندسی} = R^2 (\theta - \sin \theta) \quad (12)$$

بنابراین هم‌پوشانی هندسی^۱ (G.O)، به فاصله اسکن (d) و شعاع پرتو لیزر (R) وابسته است. برای پیدا کردن محدوده متغیرها، ابتدا هم‌پوشانی هندسی ۷ تا ۹۷ درصد، قطر پرتو لیزر و فرکانس در تمام آزمایش‌ها به ترتیب ۲/۵ میلی‌متر و ۱۵ هرتز در نظر گرفته شده است. جدول ۱ مشخصات آزمایش‌های اولیه برای محدوده هم‌پوشانی هندسی را نشان می‌دهد.

هم‌پوشانی کمتر از ۵۰٪ باعث خواهد شد تا خطوط شکل گرفته، لبه کاملاً صافی را ارائه ندهند. این عامل باعث کاهش استحکام و دقت هندسی قطعات تولیدی خواهد شد. با توجه به توان و مشخصات لیزر، قطعات سالم در هم‌پوشانی هندسی بالای ۹۰٪ ایجاد می‌شوند و فرایند ذوب در هم‌پوشانی‌های کمتر از آن انجام نمی‌شود. متغیرها در این آزمایش، ولتاژ (چگالی انرژی لیزر) و هم‌پوشانی است. ولتاژ در محدوده (۳۰۰-۲۵۰) و هم‌پوشانی در بازه (۱۰-۵۰) بررسی شد. جدول ۲ مشخصات ۱۲ آزمایش انجام شده بر روی پودر آهن را نشان می‌دهد. هر یک از این آزمایش‌ها دو بار تکرار شد تا تکرارپذیری فرایند نیز در نظر گرفته شود.

۳- نتایج و بحث

در شکل ۴ نمونه‌های تولیدی نشان داده شده است. برای هر یک از نمونه‌ها، مشخصات خروجی به صورت زوایای ۶۰

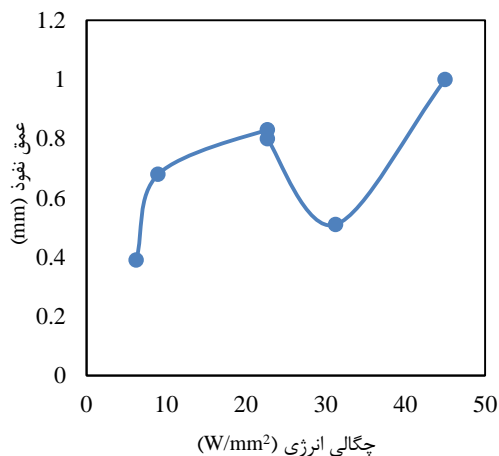
^۱ Geometric Overlap

برای اندازه‌گیری میزان گوی‌شدگی، نمونه‌ها بر روی سطح صاف (صفحه مغناطیسی) قرار گرفته و با حرکت ساعت اندازه‌گیری روی آن، میزان ارتفاع برجستگی‌های سطح بدست آمد. میانگین ارتفاعات بر حسب درصدی از یک میلی‌متر به عنوان گوی‌شدگی گزارش شده است.

به دلیل وجود تنش حرارتی، شیارهایی بر روی بستر پودر دیده شد. تعداد و اندازه این شیارها نیز در نمونه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. میزان چسبندگی مهره‌های مذاب به یکدیگر نشان‌دهنده استحکام قطعه است. هر چه استحکام بالاتر باشد، میزان چسبندگی حلقه‌های حوضچه مذاب نیز بالاتر خواهد بود. به دلیل تنش حرارتی، انحناءهایی در طول نمونه‌ها، ایجاد می‌شود. انحناء نمونه‌ها بر اساس مقدار بلند شدن از روی بستر طبقه‌بندی شدند.

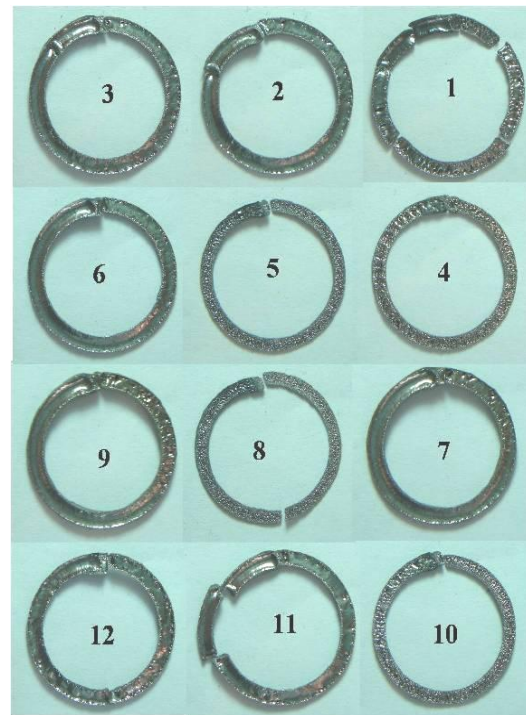
۳-۱- بررسی عمق نفوذ

همانگونه که شکل ۵ نشان می‌دهد، عمق نفوذ رابطه معناداری با ولتاژ (توان ورودی) و هم‌پوشانی دارد (چگالی انرژی لیزر رابطه مستقیمی با ولتاژ و هم‌پوشانی دارد). در چگالی انرژی ۱۰٪ (سرعت ۱/۵ mm/s) عمق نفوذ کمتری نسبت به چگالی انرژی ۵۰٪ (سرعت ۰/۳ mm/s) دیده شد. علت بالاتر بودن عمق نفوذ، ناشی از بیشتر بودن انرژی ورودی به سیستم است، زیرا در هم‌پوشانی بالاتر، تعداد شلیک‌ها در واحد سطح بیشتر خواهد بود و این امر باعث اعمال انرژی بالاتری به سیستم و در نتیجه ذوب بالاتر خواهد شد.



شکل ۵- رابطه بین عمق نفوذ و چگالی انرژی لیزر

اغلب نمونه‌هایی با سطح مقطع‌های مستطیلی دارای دقت ابعادی بهتری خواهند بود. سطح مقطع نمونه‌هایی که به مستطیل نزدیک‌تر است از لحاظ دقت ابعادی رده بالاتری دارند.



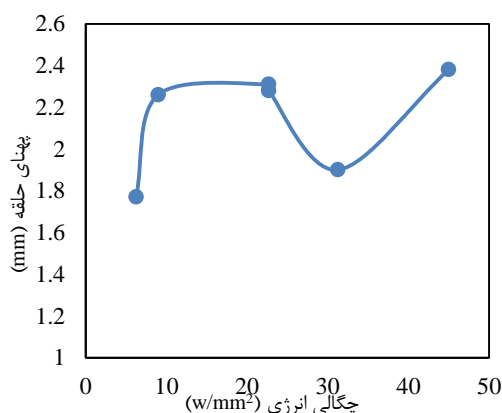
شکل ۴- نمای فوقانی نمونه‌های تولید شده

جدول ۳- میانگین مقادیر بدست آمده از نمونه‌ها

نمونه	ضریب چگالی انرژی دریافتی	میانگین عمق نفوذ (mm)	میانگین پهنای کل حلقه (mm)	میانگین عمق قسمت مقعر	ارتفاع دیواره کناری (mm)	میزان مستطیل بودن	میزان گوی‌شدگی %	صافی سطح
۱ و ۱۲	۹	۰/۶۸	۲/۲۶	۰/۳۳	۰/۵	۰/۱۸	۷	۱۱۰۰
۲ و ۳	۲۲/۷	۰/۸۳	۲/۳۱	۰/۲۳	۰/۵	۰/۳۳	۵	۱۲۰۰
۴ و ۱۰	۳۱/۲	۰/۵۱	۱/۹	۰/۰۵	۰/۵	۰/۰۱	۴۰	۵۰۰
۵ و ۸	۶/۲۵	۰/۳۹	۱/۷۷	۰/۰۱	۰/۵	۰/۰۴	۳۰	۶۰۰
۶ و ۱۱	۲۲/۷	۰/۸	۲/۲۸	۰/۲۵	۰/۵	۰/۳	۳	۱۲۵۰
۷ و ۹	۴۵	۱	۲/۳۸	۰/۲۷	۰/۷۵	۰/۲۵	۴	۱۵۰۰



شکل ۶- منطقه ذوب کامل و تفجوشی



شکل ۷- رابطه بین پهنای حلقه و چگالی انرژی لیزر

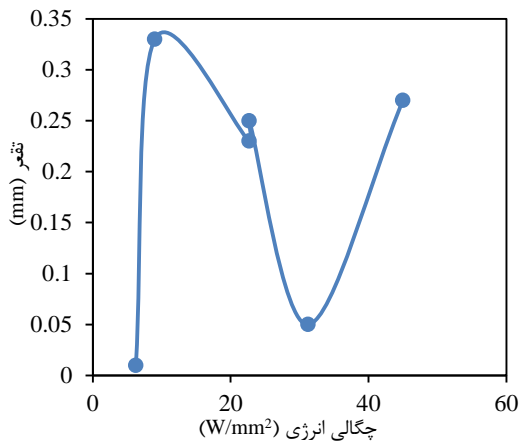
در هم‌پوشانی‌های بالاتر (چگالی انرژی بالاتر) به دلیل بالاتر بودن انرژی اعمالی پهنای حلقه کمی بیشتر است اما به دلیل اینکه انرژی لیزر معمولاً به عمق نفوذ می‌کند تفاوت چندانی بین هم‌پوشانی ۱۰ و ۵۰ دیده نمی‌شود. حتی در ولتاژهای بالاتر نیز به دلیل نفوذ پرتو به عمق این اختلاف ناچیز است. در واقع با افزایش انرژی پرتو پهنای حلقه ایجاد شده زیاد می‌شود. اما به هر حال از زمانیکه ذوب کامل اتفاق می‌افتد، افزایش ولتاژ تأثیر چندانی بر روی پهنای حلقه نخواهد داشت. علت کاهش در پهنای حلقه در چگالی انرژی ۲۵-۳۵ W/mm² به دلیل افزایش انقباض است. این انقباض در حدی است که در برخی شرایط پهنای ایجاد شده از پهنای پرتو لیزر نیز پایین‌تر است. علت انقباض نیز تفاوت بین چگالی بستر پودر خام و قطعه ایجاد شده است. معمولاً بهترین حالت زمانی است که پهنای قطعه ایجاد شده با پهنای پرتو لیزر یکسان باشد زیرا در این شرایط دقت ابعادی قطعه ایجاد شده دچار مشکل نخواهد شد.

در چگالی انرژی کمتر از نقطه عطف (حدود ۲۵ W/mm²)، انرژی لیزر تنها قادر است دانه‌های ریز پودر را ذوب کند. این مذاب ایجاد شده مانند یک چسب و اتصال-دهنده بین دانه‌های درشت‌تر عمل می‌کند. در چنین حالتی قطعات ایجاد شده حالتی اسفنجی دارند. هرچه انرژی لیزر بیشتر شود، دانه‌های بیشتری ذوب شده و در نتیجه میزان مذاب بالاتر می‌رود و در نتیجه عمق نفوذ بیشتر خواهد شد. این رویه تا زمانی که روند به صورت ذوب جزئی انجام می‌شود ادامه دارد.

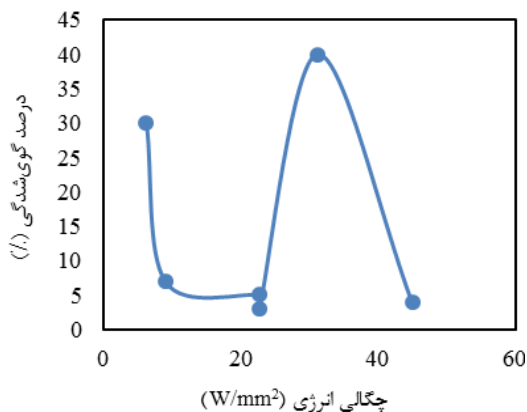
در چگالی انرژی بالاتر (حدود ۱۸ W/mm²) ماهیت فرایند از ذوب جزئی به ذوب کامل تغییر می‌کند. با بالاتر رفتن چگالی انرژی، درصد حجم مذاب بالا رفته و در نتیجه درصد پودر ذوب نشده کم می‌شود. این امر باعث افزایش عمق نفوذ خواهد شد. اما در درصدهای بالای مذاب، میزان انقباض مذاب نیز زیادتر خواهد شد. بنابراین با اینکه میزان بیشتری از پودر ذوب شده است، به دلیل انقباض بیشتر و در نتیجه شکل‌گیری قطعات با چگالی بالاتر، عمق نفوذ که به صورت ضخامت نمونه تخمین زده می‌شود نیز کاهش می‌یابد (چگالی انرژی بالای ۱۸ W/mm²). هر چه مذاب بیشتر می‌شود این کاهش نیز بیشتر خواهد شد. در انرژی‌های بالاتر میزان بیشتری از پودر ذوب می‌شود اما توان دستگاه به اندازه‌ای است تا همه پودر را ذوب کند (چگالی انرژی بالاتر از ۲۸ W/mm²). بنابراین از این مرحله به بعد با افزایش چگالی انرژی عمق نفوذ بالا می‌رود (شکل ۶) [۱۵ و ۱۶].

۲-۳- بررسی میزان پهنای حلقه

مطابق شکل ۷، عامل اصلی و تعیین‌کننده پهنای حلقه، قطر پرتو لیزر است. در چگالی انرژی کمتر از حدود ۱۵، به دلیل انرژی پایین، پرتو لیزر نمی‌تواند چگالی انرژی لازم برای ذوب کل سطح را تأمین کند. به همین دلیل در مرکز پرتو لیزر ذوب و در اطراف آن ناحیه تفجوشی شده مشاهده می‌شود. حتی ممکن است انرژی حاشیه پرتو قادر به تفجوشی پودر نیز نباشد. در این حالت بین پهنای حلقه ایجاد شده و قطر لیزر اختلاف محسوسی مشاهده می‌شود. این اختلاف باعث پایین آمدن دقت ابعادی قطعات تولیدی خواهد شد. این پدیده کاملاً چگالی انرژی کمتر از حدود ۱۵ محسوس است.



شکل ۸- رابطه بین میزان تقعر و چگالی انرژی لیزر



شکل ۹- رابطه بین گوی‌شدگی و چگالی انرژی لیزر

در سرعت بالا، حرکت پرتو لیزر نیز باعث عدم پایداری حوضچه مذاب خواهد شد. این عدم پایداری باعث عدم پیوستگی در حوضچه مذاب و در نتیجه ایجاد پدیده گوی‌شدگی خواهد شد.

در توان‌های خیلی پایین و سرعت‌های خیلی زیاد به- دلیل اتصال ضعیف بین مهره‌های مذاب و پایین بودن حجم مذاب در این مهره‌ها، قطعات تولید شده از اتصال ضعیفی برخوردار خواهند بود. در ولتاژ ۲۵۰ ولت هم‌پوشانی یکسان، اثری معکوس نسبت به ولتاژ ۳۰۰ ولت بر روی پدیده گوی‌شدگی دارد. زیرا در ولتاژ ۲۵۰ ولت حجم کمی از مذاب تشکیل شده است و تنها ذرات ریز پودر، ذوب و ذرات درشت‌تر تفجوشی می‌شوند. در واقع به دلیل ایجاد حالت

۳-۳- بررسی عمق قسمت مقعر

ناچیز بودن عمق قسمت مقعر یکی از فاکتورهای مؤثر بر دقت ابعادی است. هرچه میزان تقعر کمتر باشد، در نهایت سطح یکنواخت‌تری ایجاد خواهد شد. یکی از روش‌های مرسوم برای کاستن از تقعر جبهه مذاب، وجود زیرلایه است. در این حالت مذاب ایجاد شده به زیرلایه می‌چسبد و به دلیل کاهش کشش سطحی مذاب، مانع از بلند شدن دوطرف جبهه مذاب خواهد شد. علاوه بر این هرچه میزان انقباض مذاب بیشتر باشد تقعر شکل‌گرفته شده بیشتر خواهد بود. بنابراین عواملی مانند چگالی بالاتر سطح پودر و حجم مذاب پایین‌تر، باعث کاهش تقعر قطعه خواهند شد.

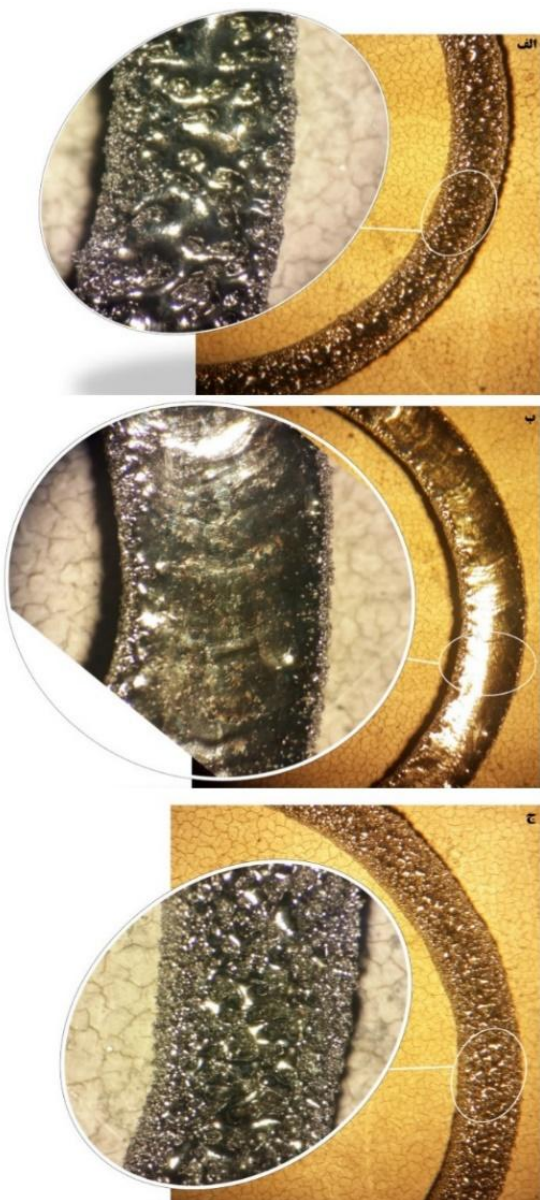
با توجه به شکل ۸، در چگالی انرژی لیزر یکسان، هم‌پوشانی بالاتر، تقعر بیشتر را بدنبال خواهد داشت. زیرا در هم‌پوشانی‌های بالاتر، انرژی اعمال شده در واحد سطح و در نتیجه حجم مذاب ایجاد شده بالاتر خواهد بود. این حجم مذاب بالا باعث انقباض بیشتر و تقعر بالاتر قطعات خواهد شد. حجم مذاب بالا و انقباض بیشتر ناشی از آن، عامل افزایش تقعر با بالا رفتن ولتاژ است. نمودار تقعر نیز ابتدا افزایش، سپس کاهش و نهایتاً دوباره یک افزایش را نشان می‌دهد. علت این امر نیز مانند عمق نفوذ تبدیل حالت ذوب جزئی به ذوب کامل در نقطه عطف نمودار است.

۳-۴- بررسی میزان گوی‌شدگی

شکل ۹ رابطه بین گوی‌شدگی و چگالی انرژی لیزر را نشان می‌دهد. در این آزمایش‌ها از لیزری با قطر پرتو بالا و سرعت اسکن پایین استفاده شده است.

در حالتی که سرعت پایین و توان لیزر بالاست، انرژی زیادی به بستر پودر القاء می‌شود. این انرژی باعث ایجاد حجم بالایی از مذاب شده و بواسطه سرعت پایین حرکت لیزر پایداری بالایی دارد. به این ترتیب با حرکت آرام لیزر جبهه مذاب نیز به آرامی حرکت کرده و سطح صاف و یکنواختی پدید می‌آورد. در این حالت هیچ نشانی از پدیده گوی‌شدگی در سطح قطعه دیده نمی‌شود. اما در سرعت‌های بالا و توان‌های پایین حوضچه مذاب ایجاد شده چندان بزرگ نیست و بعضاً مخلوطی از پودرهای ریز ذوب شده و پودرهای درشت ذوب نشده را تشکیل می‌دهند.

سطح بهینه باید هم صافی سطح و هم تقعر در پایین‌ترین حالت ممکن باشد. در چگالی انرژی حدود 25 W/mm^2 ، هر دو متغیر گوی‌شدگی و صافی‌سطح در پایین‌ترین حالت خود قرار دارد و در نتیجه بهترین شرایط برای نایل شدن به سطح بهینه است.



شکل ۱۰- مقایسه گوی‌شدگی در نمونه‌های تولیدی در بزرگ‌نمایی ۵ و ۲۰ برابر: الف-نمونه شماره ۱، ب-نمونه شماره ۲، ج-نمونه شماره ۵

ذوب جزئی مواد تک‌فاز، دیدگاه فرآیندی شبیه به آنچه السن^۱ و همکارانش ارائه نمودند، حاکم بر این ماجراست [۱۴]. به این ترتیب در سرعت‌های بالا (هم‌پوشانی پایین) حجم مذاب ایجاد شده کم است. علاوه بر این سرعت بالای اسکن، کاهش پایداری مذاب و سرد شدن سریع آن را به دنبال خواهد داشت. این عوامل باعث می‌شود تا مذاب ایجاد شده اندک باشد و تمایلی به بلند شدن از سطح را نداشته باشد.

به این ترتیب مذاب تولید شده، تنها اطراف پودر ذوب نشده را احاطه خواهد نمود و سطح زیادی در تماس با مذاب ایجاد می‌شود. این عامل باعث خواهد شد تا کشش سطحی ایجاد شده بین مذاب و پودر ذوب نشده مانع از ایجاد گوی‌های مذاب شود. در واقع پودرهای ذوب نشده مانند یک سطح آب‌دوست برای فاز مذاب عمل می‌کنند. بنابراین تقریباً سطح قطعه مانند سطح پودر خام و با میزان کم گوی‌شدگی خواهد بود. شکل ۱۰ گوی‌شدگی نمونه‌های تولیدی در بزرگ‌نمایی ۵ و ۲۰ برابر را نشان می‌دهد.

در حالتی که هم‌پوشانی بالا می‌رود در واقع سرعت اسکن کاهش خواهد یافت به این ترتیب حجم مذاب اضافه می‌شود و پایداری آن نیز تا حدودی بالا خواهد رفت. در نتیجه میزان بالاتری از پودرهای درشت ذوب و سطح تماس پودر با مذاب کمتر خواهد شد. این عوامل باعث می‌شود سطح مانند یک سطح آب‌گریز عمل کند و تمایل مذاب به تولید قطره بالا رود. بنابراین میزان گوی‌شدگی در این حالت بیشتر مشاهده خواهد شد. اما در ولتاژهای بالاتر (۳۰۰ و ۲۷۵ ولت) همان‌گونه که بیان شد افزایش هم‌پوشانی باعث کاهش گوی‌شدگی خواهد شد. در هم‌پوشانی بالاتر، حجم مذاب بیشتر و پایداری آن بالاتر خواهد رفت. در این حالت تمام پودر ذوب‌شده (ذوب کامل) و سطحی برای تولید قطره مذاب باقی نمی‌ماند.

شکل ۱۱، تقعر و گوی‌شدگی را در چگالی انرژی مختلف نشان می‌دهد. صافی سطح قطعات رابطه معکوسی با میزان گوی‌شدگی و تقعر سطح دارد. نقاطی که صافی سطح مناسبی دارند از میزان تقعر و گوی‌شدگی پایینی برخوردارند و برعکس در نقاط با صافی سطح پایین، پدیده گوی‌شدگی و تقعر به وضوح قابل ملاحظه است. بنابراین برای بدست آوردن

^۱ Elsen

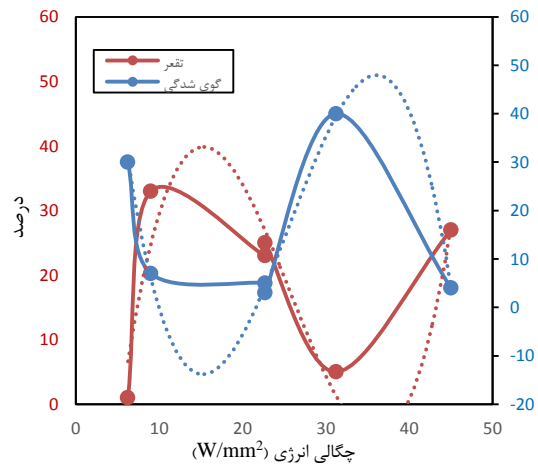
جزئی به مخلوط ذوب جزئی و ذوب کامل تغییر می‌کند. با بالاتر رفتن چگالی انرژی، درصد حجم مذاب بالا رفته و در نتیجه درصد پودر ذوب‌نشده کم می‌شود. در درصد‌های بالای مذاب، میزان انقباض مذاب نیز زیاده‌تر خواهد شد.

حجم مذاب بالاتر، صافی سطح بهتر را به دنبال خواهد داشت اما همین حجم مذاب بیشتر، انقباض بالاتر و در نتیجه تقعر بیشتر را نیز به دنبال خواهد داشت. بنابراین شرایط بهینه در حالی است که میزان تقعر و گوی‌شدگی هر دو در کمترین میزان باشد. با ثابت در نظر گرفتن متغیرهای دیگر مانند اندازه و چگالی پودر، چگالی انرژی 25 W/mm^2 بهترین میزان برای تولید قطعات خواهد بود. در واقع نقطه عطف بین فرایند تف‌جوشی و ذوب کامل بهینه‌ترین شرایط فرایندی برای تولید سریع قطعات از پودر فلز است.

نمونه تولیدی شماره ۶، بهینه‌ترین نمونه‌ساخته شده است که نزدیکترین وضعیت به نقطه عطف را داراست (جدول ۲ و ۳). در محدوده نقطه عطف، ولتاژ در رنج ۲۵۰ تا ۳۰۰ بوده که نمونه تولیدی شماره ۶، در ولتاژ ۲۷۵ ولت تولید شده است. نقطه عطف دارای ولتاژی برابر با ۲۸۰ ولت است که قاعدتا برای این نمونه از پودر و دستیابی به بهترین وضعیت، ولتاژ دستگاه لیزر باید به درستی انتخاب شود تا چگالی انرژی مناسب برای پودر ایجاد شود.

۵- فهرست علائم

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



شکل ۱۱- مقایسه تقعر و گوی‌شدگی

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با انجام آزمایش‌های اولیه و تعریف تابع هم-پوشانی، محدوده ۲۵۰ تا ۳۰۰ ولت برای ولتاژ و بازه ۱۰ تا ۵۰ برای هم‌پوشانی انتخاب شد. با توجه به متغیرهای ورودی تابعی برای چگالی انرژی تعریف و چگالی انرژی به صورت متغیر کمیتی تبدیل شد. بر روی نمونه‌های تولیدی میزان عمق نفوذ، تقعر، پهنای حلقه و گوی‌شدگی بررسی و رابطه آنها با چگالی انرژی بدست آمد.

رابطه بین عمق نفوذ، تقعر، پهنای حلقه و گوی‌شدگی با چگالی انرژی اعمالی به سطح، به گونه‌ای است که می‌بایست یک منحنی درجه سه را بر نمودار آنها منطبق کرد تا به محدوده بهینه برای دستیابی به نقطه عطف بین فرایند تف-جوشی و ذوب کامل رسید (شکل ۱۱).

نقطه عطف در این معادلات جایی است که فرایند از حالت ذوب جزئی به ذوب کامل تغییر فاز می‌دهد. در چگالی انرژی کمتر از نقطه عطف (در حدود 25 W/mm^2)، انرژی لیزر تنها قادر است دانه‌های ریز پودر را ذوب کند. این مذاب ایجاد شده مانند یک چسب و اتصال‌دهنده بین دانه‌های درشت‌تر عمل می‌کند. در چنین حالتی قطعات ایجاد شده حالتی اسفنجی دارند. هرچه انرژی لیزر بیشتر شود، دانه‌های بیشتری ذوب شده و در نتیجه میزان مذاب بالاتر می‌رود و در نتیجه عمق نفوذ بیشتر خواهد شد. این رویه تا زمانی که روند به صورت ذوب جزئی انجام می‌شود ادامه دارد. در چگالی انرژی بالاتر (حدود 18 W/mm^2) ماهیت فرایند از ذوب

- | | | |
|---|--------|---|
| [8] Pogson R, Fox P, Sutcliffe CJ, Neill WO (2003) The production of copper parts using DMLR. Rapid Prototyping J. 9: 334-343. | زاویه | θ |
| [9] Zhu HH, Fuh JYH, Lu L (2005) Microstructural evolution in direct laser sintering of Cu-based metal powder, Huazhong. Rapid Prototyping J 11: 74-81. | راندمن | φ |
- ۶- مراجع**
- | | |
|---|---|
| [10] Simchi A (2006) Direct laser sintering of metal powders: Mechanism, kinetics and microstructural features. Tehran. Mater Sci Eng A 428:148-158. | [1] Kruth JP, Mercelis P, Van Vaerenbergh J, Froyen L, Rombouts M (2005) Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. Rapid Prototyping J 11: 26-36. |
| [11] Tolosa I, Garcandía F, Zubiri F, Zapirain F, Esnaola A (2010) Study of mechanical properties of AISI 316 stainless steel processed by selective laser melting, The Int J Adv Manuf Tech 51: 639-647. | [2] Kruth JP, Kumar S, Van Vaerenbergh J (2005) Study of laser-sinterability of ferro-based powders. Rapid Prototyping J 11: 287-292. |
| [12] Deckard, Williams JD, Carl R (1998) Advances in modeling the effects of selected parameters on the SLS process. Rapid Prototyping J 4: 90-100. | [3] Zhu HH, Fuh JYH, Lu L (2007) The influence of powder apparent density on the. Mach Tools & Manuf 47: 294-298. |
| [13] Kumar N, Kumar H, Khurmi JS (2016) Experimental Investigation of process parameters for rapid prototyping technique Selective Laser Sintering to enhance the part quality of prototype by Taguchi method. India: 3rd Int Conference on Innovations in Automation and Mechatronics Engineering 23: 352-360. | [4] Tolochko NK, Maxim K Arshinov, Andrey V Gusarov, Victor I Titov Tahar L, Ludo Froyen (2003) Mechanisms of selective laser sintering and heat transfer in Ti powder. Rapid Prototyping J 9: 314-326. |
| [14] Elsen MV, Al-Bender F, Kruth JP (2008) Application of dimensional analysis to selective laser melting. Rapid Prototyping J 14:15-22. | [5] Tolochko NK, Sergei E Mozzharov, Igor A Yadroitsev, Laoui T, Froyen L, Victor I Titov, Michail B (2004) Balling processes during selective laser treatment of powders. Rapid Prototyping J 10: 78-87. |
| [15] Fatemi SA, Zamani Ashani J, (2017) Experimental investigation of laser-assisted powder bed fusion of Fe-Cu powder mixture. Prog Addit Manuf J 2:151-156. | [6] Morgan R, Sutcliffe CJ, Neill WO (2001) Experimental investigation of nanosecond pulsed Nd-YAG laser re-melted pre-placed powder beds. Rapid Prototyping J 7: 159-172. |
| [16] Kumar N, Kumar H, Khurmi JS (2016) Experimental investigation of process parameters for rapid prototyping technique selective laser sintering to enhance the part quality of prototype by Taguchi method. Proced Techno. 23:352-360. | [7] Morgan R, Sutcliffe CJ, Neill WO (2004) Density analysis of direct metal laser re-melted 316L stainless steel cubic primitives. Kluwer Academic Publishers 39:1195-1205. |