



بررسی عملی قطعات تولید شده به وسیله سامانه نمونه سازی سریع از نوع ذوب لیزری مخلوط پودر آهن و مس

سیدعلی فاطمی¹، جمال زمانی اشانی^{2*}

1- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک (ساخت و تولید)، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- استاده، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* تهران، 1471853674 ، zamani@kntu.ac.ir

چکیده

کلیدواژگان

همواره یکی از اهداف اصلی محققان در تفجوشی لیزری پودرهای فلزی، بهینه سازی پارامترهای فرایند به منظور نزدیک کردن خواص قطعه تولیدی به ماده خام اصلی بوده است. برای این منظور آزمایشات زیادی صورت گرفته است. پارامترهایی از قبیل: چگالی، سختی سنجی، استحکام، صافی سطح و ... در موارد مختلف مورد بررسی قرار گرفته اند. در این مقاله، با استفاده از سامانه نمونه سازی سریع از نوع ذوب لیزری، طراحی و ساخته شده در آزمایشگاه شکل دهی دانشکده مکانیک خواجه نصیرالدین طوسی، تأثیر پارامترهای ورودی مانند ولتاژ، زمان روشنی پالس و سرعت اسکن و درصد مس بر روی پارامترهای خروجی از قبیل عمق نفوذ، استحکام و اثر گوی شدگی بررسی شده است. به منظور تولید قطعات چند لایه کاملاً چگال، ابتدا لازم است تا بهینه سازی پارامترها، برای تک لایه بررسی شود. در این پژوهش، آزمایشها بر روی بستر پودر به عمق 5 میلی متر انجام شده است. هر قطعه به صورت تک لایه و تنها با یک بار اسکن لیزر بر روی بستر پودر تولید شده است. با حرکت پرتو لیزر بر روی بستر پودر، قطعات دایره ای به قطر 20 میلی متر تولید شدند. بر اساس پارامترهای ورودی و آزمایشات اولیه تابعی برای بدست آوردن چگالی انرژی تعریف شد. در نتیجه، پارامترهای خروجی بر حسب چگالی انرژی و درصد وزنی پودر مس بررسی شد. نتایج نشان داد، نمودار تأثیر چگالی انرژی و درصد مس بر روی متغیرهای خروجی دارای یک نقطه زینی است. این نقطه نشان دهنده تبدیل فاز از نف جوشی به ذوب کامل است. شرایط بهینه برای تولید قطعات با نمونه سازی سریع در حالتی است که استحکام، صافی سطح، دقت ابعادی در بالاترین حد ممکن باشد درحالی که انقباض ناشی از حجم مذاب، گویی شدگی، تنش حرارتی حداقل باشد. بررسیها نشان داد که بهترین شرایط در حالتی است که چگالی انرژی بین 120-140 و درصد مس بین 18-22 تنظیم شود.

نمونه سازی سریع
پودر فلز
تفجوشی لیزری مستقیم پودر فلز
ذوب پودر از طریق ذوب لیزری

An experimental investigation of fabricated parts by laser melting of Fe-Cu powder mixture, a type of rapid prototyping devices

Seyyed Ali Fatemi, Jamal Zamani Ashany*

Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 1471853674, Tehran, Iran, zamani@kntu.ac.ir

Keywords

Rapid prototyping
metal powder
direct metal laser sintering
powder metal laser re-melting

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, micro hardness, macro hardness, strength, surface quality and residual stress in different condition of process parameters have been studied. In this paper, the effects of voltage, on-time pulse, scan speed and weight percent of Cu on the output parameters such as penetration depth, strength and balling effect, have been investigated, using selective laser melting device, which is designed and fabricated in the forming laboratory of Mechanical Engineering department of KNT University. In order to produce fully dense multi-layer parts, it is necessary to optimize 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 moving the laser beam on the powder bed, circular pieces with a diameter of 20 mm have been produced. Based on preliminary experiments and according to the input parameters, a function has defined for energy density. Therefore, output parameters have investigated based on weight percent of Cu and energy density. Results show that there is a saddle point in the diagram of the effect of energy density and weight percent of Cu on output parameters. This point shows the transmission of sintering to complete melting. Optimal condition of manufacturing parts by rapid prototyping is the condition which strength, surface finish and dimensional accuracy are at the highest possible level while shrinkage, balling and thermal stresses are at the lowest possible level. The results show that the best condition is while the energy density sets between 120-140 W/m² and weight percent of Cu sets between 18-22 %.

Please cite this article using:

S. A. Fatemi, J. Zamani Ashany, An experimental investigation of fabricated parts by laser melting of Fe-Cu powder mixture, a type of rapid prototyping devices, Vol. 5, No. 1, pp. 1-12, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

1- مقدمه

کوتاه شدن زمان تولید یکی از تمایلات بزرگ شرکت‌ها به‌منظور کوتاه‌شدن زمان رسیدن محصولاتشان به بازار است. روش‌های نمونه‌سازی سریع در دهه هشتاد برای فائق آمدن بر این مسئله ایجاد شدند [1]. نمونه‌سازی سریع روشی برای تولید نمونه‌های مهندسی بدون نیاز به شکل‌دهی سنتی است. نمونه‌های اولیه مهندسی به‌منظور ارزیابی جنبه‌های مختلفی قطعه از قبیل روابط انطباق، زیبایی شناسی، آزمایش‌های مکانیکی و تحقیق برای فروش و... استفاده می‌شود. نمونه‌های اولیه می‌توانند به‌جای هفته‌ها در چند ساعت یا یک روز تولید شوند و به این ترتیب زمان رسیدن به بازار کاهش یابد [2].

پیشرفت‌های اخیر در نمونه‌سازی سریع منجر به ایجاد روش‌های ساخت و تولید سریع شده است. برای مثال: لیزر¹، اس‌ال‌اس² و ای بی ام³ برای تولید قطعات فلزی به صورت سریع مورد استفاده قرار می‌گیرند. از بین این روش‌ها، فن‌آوری‌های پایه پودری اس‌ال‌اس متداول‌تر است. فرایند اس‌ال‌اس تولیدی لایه به لایه است که اجازه تولید قطعات پیچیده سه بعدی را از طریق جامدسازی لایه‌های پودری بر روی یکدیگر می‌دهند. ضخامت لایه در این روش بین 20 تا 150 میکرومتر است و توسط سیستم لایه نشانی ایجاد می‌شود [3]. در این فرایند، یک لیزر (در حدود 200 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 [4]. با کمک روش اس‌ال‌اس تولید قطعات با چگالی بالاتر از 63% تا 100% قابل دسترسی است و دیگر نیازی به استفاده از کوره‌های ثانویه و نفوذ وجود ندارد [5].

هیچ مشکل جدی در اس‌ال‌اس پودرهای فلزی دو جزئی وجود ندارد. یکی از مشکلات عمده در تفجوشی پودرهای فلزی تک‌جزئی پدیده گوی‌شدگی است. انقباض

عامل اصلی پدیده گوی‌شدگی است. فرایند گوی‌شدگی با افزایش فاصله بین خطوط اسکن شده، افزایش می‌یابد و با کاهش ضخامت لایه پودر، میزان گوی‌شدگی کاهش می‌یابد [6].

با توجه به وجود ذوب مجدد و جامد شدن در فرایند اس‌ال‌اس مشکلاتی از قبیل، تنش حرارتی بالای تولید شده در مواد به واسطه گرادیان حرارتی بالا، شایع می‌باشد. اما مشکل مهم‌تر اکسیدشدگی و کاهش ترشدگی مواد است. کاهش ترشدگی به واسطه اثر کشش سطحی باعث به وجود آمدن عیوبی از قبیل خلال و فرج، گوی‌شدگی و لایه‌لایه شدن می‌شود [7]. فن‌آوری اس‌ال‌اس می‌تواند به سه صورت مختلف تقسیم شود. در فرایند تفجوشی غیرمستقیم فلزی از یک لیزر توان پایین به منظور ذوب و اتصال جزء اتصال دهنده پلیمر استفاده می‌شود. تا مانند یک ماتریس عمل کند. مرحله بعدی پلیمر از ساختار خارج می‌شود و به جای آن یک آلیاژ فلزی با دمای پایین نفوذ داده می‌شود. در دی‌ام‌ال‌آر⁴ مخلوطی از دو جزء فلزی با دمای بالا و پایین تفجوشی می‌شود. در این حالت جزء با دمای پایین ذوب شده و جزء با دمای ذوب بالا را در خود می‌گیرد. در دی‌ام‌ال‌آر از یک جزء فلزی (بدون نیاز به اتصال دهنده و نفوذ) استفاده می‌شود. این امر نیاز به ذوب مستقیم، هم‌جوشی و جامد شدن مواد دارد تا قطعاتی با چگالی بالا تولید کند [9,8].

فن‌آوری دی‌ام‌ال‌آر در دانشگاه لیورپول براساس روش اس‌ال‌اس توسعه داده شد. عیب روش‌های تفجوشی غیرمستقیم فلزی و دی‌ام‌ال‌اس⁵ این است که محصول تولید شده مشخصات و خواص مکانیکی ضعیف‌ترین فاز (در تفجوشی غیرمستقیم فلزی پلیمر و در دی‌ام‌ال‌اس فاز اتصال دهنده) را نشان می‌دهد. معایب دی‌ام‌ال‌آر توسط آموون و همکارانش در سال 1993 بررسی شده است. گرادیان بالای دمای پخش شده در خلال ذوب، انقباض و جامد شدن، تنش پسماند بالایی را تولید خواهد کرد [10].

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

¹ Laser engineered net shaping (LENS)

² Selective laser sintering (SLS)

³ Electron beam melting (EBM)

⁴ Direct metal laser re-melting (DMLR)

⁵ Direct metal laser sintering (DMLS)

پرداخته‌اند [6]. ایشان به تاثیر توان در فرایند تفجوشی پرداخته اند.

تحقیقات مورگان و همکارانش بر روی پودر استیل 316 نیز موارد مشابهی از تاثیر توان را نشان می‌دهد [8]. به دلیل وجود حرکت پرتو لیزر ایشان تاثیر توان و سرعت اسکن لیزر را به صورت همزمان بررسی کرده‌اند.

بر اساس تحقیقات پوگسان و همکارانش در سال 2003 سرعت اسکن لیزری دو تاثیر عمده بر روی فرایند دارد [10]. نخست سرعت اسکن اندازه حوضه مذاب را کنترل می‌کند. این اندازه در سرعت های اسکن سریع‌تر باریک‌تر اما طولانی‌تر خواهد بود. دوم سرعت اسکن مؤثر بر زمان مذاب بودن مواد است. هر چه سرعت اسکن پایین‌تر باشد زمان مذاب بودن بالاتر است. این دو عامل باعث خواهد شد تا در توانی ثابت نمونه‌های تولید شده با سرعت بالاتر ضخامت کمتری داشته باشند.

ژو و همکارانش در سال 2005 با ریخت‌شناسی نمونه‌های تولید شده با پودر پایه مسی دریافتند، کاهش در سرعت اسکن منجر به تولید سطح چگال‌تر می‌شود [11].

مرگان و همکارانش نیز در سال 2004 در تحقیقاتشان رابطه بین سرعت اسکن و چگالی نهایی را در نمونه‌های تولید شده با پودر فولاد 316 را بررسی نموده‌اند [9]. نتایج به وضوح کاهش چگالی مواد را با افزایش سرعت اسکن نشان می‌دهد.

مورگان و همکارانش در سال 2003 [8] مطالعاتشان بر روی کوپن‌های تک لایه تولید شده از پودر استیل 316 را ارائه و تأثیر فرکانس لیزر بر شکل‌گیری پلازما را بیان کردند. ایشان نشان داده‌اند نمونه‌های تولید شده با فرکانس‌های کمتر از 30 کیلوهرتز، بهبودی در چسبندگی نشان می‌دهند و می‌توان آنها را از روی سطح برداشت. علت این پدیده وجود فشار جزئی پلازما در این فرکانس‌ها است.

تحقیقات مرگان و همکارانش در سال 2004 [9] بر روی بلوک‌های تولید شده از پودر فولاد 316 تاثیر فرکانس را بر روی چگالی قطعات تولید شده نشان می‌دهد. 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

البته محققانی این فرایند را شبیه سازی و فرموله نموده اند. برای مثال نیو و چنگ در سال 1999 با آزمایش بر روی تفجوشی پودرهای فلزی میزان تاثیر پارامترهای فرایند را بدست آورده اند [11].

پارامترهای مؤثر بر تفجوشی لیزری را می‌توان به سه گروه عمده پارامترهای فرایند، پارامترهای مواد و پارامترهای محیطی تقسیم نمود [12]. پارامترهای فرایند اغلب بر روی فرایندهای لیزری مؤثر اند 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 هستند [13]. در پاره‌ای از موارد می‌توان این پارامترها را در یک تابع، به صورت چگالی شار بررسی نمود. پارامترهای مواد شامل ترکیب شیمیایی، درصد اکسیژن، روش آلیاژسازی، مشخصات ذرات (اندازه، شکل، میزان سیلان و ...) و چگالی بستر پودر هستند. پارامترهای محیطی نیز نقش مؤثری بر کیفیت قطعات تولیدی دارند. این پارامترها شامل اتمسفر تفجوشی، میزان پیش گرم و فشار کوبشی است. شناخت و بررسی هر یک از این پارامترها، امری حیاتی در تفجوشی لیزر است [14].

با توجه به مرور مقالات انجام شده، باوجود کاربردهای فراوان آلیاژ آهن و مس (به عنوان مثال در صنعت خودروسازی)، تاکنون پژوهشی روی تفجوشی مخلوط پودر آهن و مس انجام نپذیرفته است. به عبارتی تنها از پودرهای تجاری با درصد مشخص مس استفاده شده است. همچنین در این پژوهش اثر ولتاژ، زمان روشنی پالس و سرعت اسکن و درصد مس بر روی عمق نفوذ، استحکام و اثر گوی شدگی بر روی مخلوط پودر آهن مس بررسی شده است. بدین منظور رابطه‌ای برای بررسی نحوه اثر ولتاژ، زمان روشنی پالس و سرعت اسکن بر روی چگالی انرژی اعمالی به بستر پودر توسعه داده شد. مزیت این رابطه این است که بوسیله آن میتوان بدون استفاده از پاورمتر انرژی اعمالی به پودر را محاسبه کرد.

2- مرور ادبیات

توان و سرعت مؤثرترین پارامترها در میزان مذاب به جا مانده، انحاء و گوی شدگی اولین خط اسکن هستند. نیکولای کی تولوچکو و همکارانش در سال 2003 به بررسی مکانیزم تفجوشی پودر تیتانیوم در اتمسفر خلاء

آزمایش‌های انجام شده را نشان می‌دهد. اندازه و نوع جنس پودر استفاده شده در این آزمایشات پودر آهن توسط میکروسکوپ الکترونی مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت. در این آنالیز پودر آهن با خلوص 97/17 درصد، شکل ذرات نامشخص و قطر متوسط 20 میکرومتر و مس با خلوص 98/35 درصد، شکل ذرات نامشخص و قطر متوسط 14 میکرون مورد استفاده قرار گرفته است. شکل 2 تصویر ذرات پودر را در بزرگنمایی 2500 برابر نشان می‌دهد.



Fig. 1 The setup of experiments hardware

شکل 1 نمایی از چیدمان سخت‌افزار آزمایش‌ها

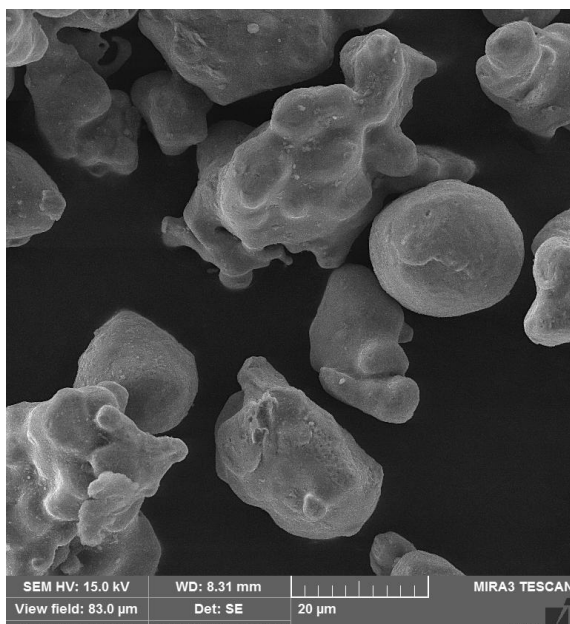


Fig. 2 SEM micrograph of Fe powder with the magnification of 2500

شکل 2 تصویر SEM از پودر آهن با بزرگنمایی 2500

چگالی خواهد شد.

ژو و همکارانش [11] تاثیر فاصله اسکن را بر روی ریخت شناسی نمونه‌های تفجوشی شده پودر مس نشان داده اند. بر طبق تحقیقات ایشان وقتی فاصله اسکن پایین استفاده می‌شود، نمونه‌ها سطحی هموار و چگالی را نشان می‌دهند. با افزایش فاصله اسکن تراکم‌ها و ترک‌های واضحی در جهت موازی با جهت اسکن لیزری دیده می‌شود. تحقیقات دیگر در مورد فاصله اسکن بر روی پودر استیل 316 نتایج مشابهی را نشان می‌دهند [8].

بسیاری از تحقیقات توابعی را به صورت ترکیب پارامترهای فرایند ایجاد نموده و آن‌را به عنوان ورودی سیستم بررسی می‌کنند. اکثر این توابع نشان دهنده چگالی شار لیزر هستند. یکی از بارزترین این توابع عدد آندرو است [15]. در واقع عدد آندرو میزانی از چگالی انرژی تشعشعی بستر پودر است و برای توضیح شرایط ویژه فرایند بسیار مفید می‌باشد.

کراس و همکارانش [4] نیز برای بررسی پارامترهای تفجوشی تابعی ترکیبی ایجاد نموده اند. این تابع ترکیبی از توان لیزر، سرعت اسکن، فاصله اسکن و ضخامت لایه است. این تابع به صورت زیر تعریف شده است و به نوعی نشان دهنده چگالی شار می‌باشد. در واقع اغلب مشخصات تفجوشی لیزری یا ذوب مجدد (ضخامت لایه، استحکام، چگالی) در چگالی انرژی دیده می‌شود. بیمن و همکارانش [9] نیز تعریفی از چگالی انرژی ارائه کرده‌اند. مورگان و همکارانش [9] نیز برای بررسی چگالی بلوک‌های تولیدی از پودر استیل از این تابع استفاده نموده اند.

نتیجش کومار و همکارانش در سال 2016 تاثیر سه پارامتر 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 [16].

3- چیدمان آزمایشات

تجهیزات آزمایش شامل یک لیزر میکرو جوشکاری مدل JW80، از نوع Nd:YAG، دارای Q-Switch و با طول موج 1.064 نانومتر می‌باشد. پارامترهای قابل تغییر در این لیزر شامل ولتاژ (250-400 ولت)، قطر پرتو لیزر D (از 0/1 تا 2/5 میلی‌متر)، زمان روشن بودن پالس یا پهنای پالس P (صفر تا 10 میلی ثانیه) و فرکانس موج خروجی f (صفر تا 15 هرتز) است. شکل 1 نمایی از چیدمان سخت‌افزار

برابر مقدار 2/5 میلی‌متر (بیشترین قطر لیزر) در نظر گرفته می‌شود. بعلاوه این قطر کمک می‌کند تا فشار پلاسمای ایجاد شده در حین تفوشی لیزری میزان اندک و قابل چشم‌پوشی باشد [۸،۹،۱۰].

در فرایندهای لیزری اغلب لازم است تا به منظور تخمین انرژی اعمالی و برآورد صحیح از عملیات، در ابتدا چگالی انرژی لیزر بررسی شود [7]. با این تعریف، چگالی توان، توان بر واحد سطح است که اغلب در واحد W/cm^2 و یا W/mm^2 بیان می‌شود. محاسبه چگالی انرژی عموماً راحت و سراسر است. با محاسبه مساحت پرتو و تقسیم قدرت پرتو به آن به سادگی به دست می‌آید [8].

توان حرارتی لیزر برابر با حاصل ضرب توان الکتریکی در راندمان دستگاه می‌باشد [17]. اگر قطر پرتو لیزر d ، ولتاژ دستگاه V ، جریان آن I ، مقاومت R و راندمان آن ν باشد، انرژی حرارتی هر پالس برابر است با:

$$E = VI\theta = \frac{V^2}{R}\theta = RI^2\theta \quad (1)$$

بنابراین چگالی انرژی هر پالس برابر است با:

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

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

$$P_w = PPD \times f = \frac{4RI^2 f}{\pi d^2}\theta = \frac{4V^2 f}{R\pi d^2}\theta \quad (3)$$

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

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

با توجه به چیدمان آزمایشات و نوع لیزر، بسیاری از متغیرهای رابطه فوق در تمام آزمایش‌ها از مقادیر ثابتی برخوردارند. این متغیرها شامل قطر پرتو لیزر d ، عدد π ، مقاومت R و راندمان θ می‌باشد. 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:

$$P_{\text{density}} = cte \frac{V^2 f}{\nu L_d} \quad (5)$$

با توجه به حرکت خطی لیزر با سرعت یکنواخت بر روی بستر پودر، با تقسیم فرکانس بر سرعت حرکت پرتو لیزر، فاصله اسکن بدست خواهد آمد. علاوه بر این این

ولتاژ بیانگر توان، پهنای پالس نشان دهنده زمان روشن بودن لیزر در هر شلیک و فرکانس مشخص کننده تعداد شلیک در هر ثانیه است. در این آزمایشات قطر پرتو لیزر 2.5 میلی‌متر و فاصله تمرکز لیزر 120 میلی‌متر می‌باشد. 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 5 لیتری تا فشار 0/15 خلاء بار تخلیه شده است. آزمایش‌ها بر روی بستر پودر به عمق 5 میلی‌متر صورت گرفته است. پودر توسط یک تیغه آلومینیومی که زاویه 10 درجه با سطح دارد، صاف می‌شود. علت استفاده از تیغه با زاویه 10 درجه کم بودن حجم پودر مقابل تیغه جهت هموارسازی است. علاوه بر این از آلومینیوم به دلیل غیر مغناطیسی بودن آن استفاده شده است.

4- طریقه آزمایشات

به منظور تولید قطعات چند لایه کاملاً چگال توسط فرایندهای لیزری پالسی، در ابتدا لازم است تا عملکرد لیزر و مواد و همچنین بهینه‌سازی پارامترها، برای تک لایه بررسی شود. آزمایش‌ها بر روی بستر پودر آزاد به عمق 5 میلی‌متر انجام شده است. هر قطعه به صورت تک‌لایه و تنها با یک بار اسکن لیزر بر روی بستر پودر تولید شده است. حرکت پرتو لیزر بر روی سطح، دواپری به قطر 20 میلی‌متر را روی پودر اسکن کرده و نمونه‌های آزمایشی تولید شدند.

عوامل مؤثر بر انرژی لیزر در واحد زمان سه عامل مساحت موج لیزر، مساحت متأثر از لیزر و تعداد شلیک‌ها می‌باشد. 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 [14]. به منظور کاهش دادن پارامترهای ورودی، سرعت اسکن و فرکانس لیزر، به صورت تابعی برای بدست آمدن چگالی انرژی اعمالی به سطح در واحد زمان، تعریف شده است.

با توجه به اینکه تولید نمونه‌ها به صورت حرکت تک مسیر و صفحه‌ای می‌باشد برای نایل شدن به قطعاتی که بتواند گویای شواهد بوده و از ابعاد نسبتاً مناسبی برخوردار باشد قطر پرتو لیزر برای تمام آزمایشات ثابت و

میانگین بین دو نمونه مشترک ملاک قرار گرفته شده است.

جدول 1 تنظیمات متغیرها در آزمایش‌ها

Table 1 Setting of parameters for experiments

شماره نمونه	ولتاژ Volt	پالس ms	سرعت اسکن mm/s	میزان مس Wt%
1	275	6	0/375	20
2	300	4	0/75	30
3	300	6	0/25	30
4	300	6	0/75	10
5	250	4	0/25	10
6	250	4	0/75	10
7	300	4	0/25	10
8	275	4	0/375	20
9	250	4	0/25	30
10	275	6	0/375	20
11	250	6	0/75	30
12	275	5	0/375	20
13	241/7	6/8	0/53	9/3
14	243/6	5/9	0/4	5/1
15	250	6	1/5	0
16	300	6	1/5	0
17	275	6	0/5	0
18	275	6	0/5	0
19	250	6	0/3	0
20	300	6	0/3	0

انرژی در هر بار شلیک لیزر به اندازه زمان تنظیم شده بر روی دستگاه روشن خواهد بود. این زمان همان پالس (P) دستگاه است و بر حسب میلی ثانیه بیان می‌شود. بنابراین:

$$P_{\text{density}} = cte \frac{V^2 \cdot f^2 \cdot P}{v^2} \quad (6)$$

دستگاه لیزری استفاده شده در آزمایش‌ها، سقف ولتاژ 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 ولتاژ و فرکانس)، راهی جز کاهش سرعت و فاصله اسکن وجود نداشت [9]. بنابراین با توجه به آزمایش‌های اولیه، فرکانس برای تمامی آزمایش‌ها روی مقدار حداکثر دستگاه یعنی 15 هرتز قرار گرفت.

به منظور بهینه‌سازی پارامترهای فرایند یک سری آزمایش‌های اولیه انجام شدند. متغیرهای این آزمایش‌ها چگالی انرژی و درصد وزنی پودر مس می‌باشد. با توجه به آزمایش‌های اولیه انجام شده بر روی مخلوط پودر آهن و مس، برای انجام آزمایشات، چگالی انرژی در محدوده (0-30) و درصد وزنی پودر مس در بازه (2000-40) بررسی شد. جدول 1 مشخصات دوازده آزمایش انجام شده بر روی پودر آهن را نشان می‌دهد. برخی از این آزمایش‌ها دو بار تکرار شده است تا تکرارپذیری فرایند نیز بررسی شود.

5- طبقه‌بندی نتایج

تنوع اثرات مشاهده شده بر روی نمونه‌ها منجر به ایجاد طبقه‌بندی‌های مختلفی شد. به واسطه مشکل بودن اندازه‌گیری این اثرات، مشاهدات به صورت مقایسه‌ای بین نمونه‌ها رده‌بندی شده است. به این ترتیب به هر یک از نمونه‌ها رتبه‌ای در مقایسه با یک نمونه مرجع داده می‌شود. طبقه‌بندی‌های کیفی بررسی شده در زیر آمده است.

شکل 3 ظاهر نمونه‌های تولیدی را نشان می‌دهد. برای هر یک از نمونه‌ها مشخصات خروجی به صورت زوایای 60 درجه بررسی و میانگین این مقادیر به عنوان خروجی‌های اصلی در نظر گرفته شده است. از مقایسه مقادیر خروجی برای نمونه‌های ایجاد شده با شرایط یکسان، قابلیت تکرارپذیری نمونه‌ها به خوبی قابل درک است. از این رو برای بررسی پارامترهای خروجی مقدار

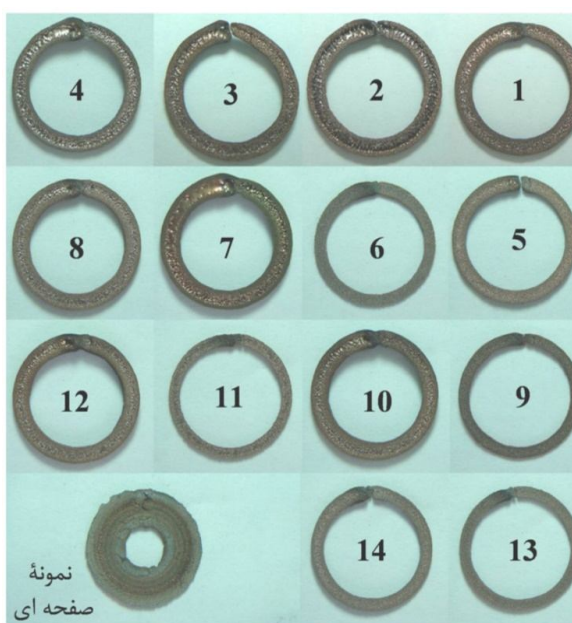


Fig. 3 Fabricated samples by sintering process

شکل 3 نمونه‌های تولید شده بوسیله فرایند تفجوشی

ساعت اندازه گیری روی آن میزان ارتفاع برجستگی های سطح نشان داده می شود. میانگین ارتفاعات بر حسب درصدی از یک میلی متر به عنوان گوی شدگی در جدول نتایج (جدول 2) ثبت شده است.

به دلیل وجود تنش حرارتی، شیارهایی بر روی بستر پودر دیده می شود. تعداد و اندازه این شیارها نیز در نمونه های مختلف بررسی شده است. میزان چسبندگی مهره های مذاب به یکدیگر نشان دهنده استحکام قطعه است. هر چه استحکام بالاتر باشد میزان چسبندگی مهره های مذاب نیز بالاتر است. به دلیل تنش حرارتی، انحناءهایی در طول نمونه ها، ایجاد می شود. انحناء نمونه ها بر اساس میزان بلند شدن از روی بستر طبقه بندی می شوند.

6- تأثیر پارامترها

6-1- تأثیر چگالی انرژی لیزر

با افزایش ولتاژ، توان لیزر بیشتر شده و میزان بیشتری از پودر را ذوب می کند. در واقع افزایش ولتاژ بیشترین و بارزترین اثر را بر چگالی انرژی لیزر دارد. با افزایش ولتاژ میزان عمق نفوذ لیزر درون بستر پودر بالا رفته و ضخامت لایه تولیدی بیشتر می شود. این روند در مورد پهنای حلقه نیز قابل مشاهده است. اما نسبت افزایش ضخامت به تغییرات ولتاژ از نسبت افزایش پهنای به تغییرات ولتاژ محسوس تر است.



Fig. 4 Fabricated samples by sintering process

شکل 4 نمونه های تولید شده بوسیله فرایند تفجوشی به دلیل افزایش مذاب و در نتیجه انقباض بیشتر، در

این مقادیر میانگین در جدول 2 نشان داده شده است. تأثیر پارامترهای ورودی با مقایسه این مقادیر میانگین بدست آمده است. مقادیر بررسی شده شامل عمق نفوذ، پهنای حلقه، میزان تععر، میزان گوی شدگی، صافی سطح و ... می باشد. عمق نفوذ، میزان مذاب ایجاد شده و اثر آن بر روی نمونه را نشان می دهد. مقدار عمق نفوذ به کمک کولیس از روی نمونه ها استخراج شده است. پهنای حلقه، وابسته به قطر پرتو بوده و میزان انتشار مذاب بر روی سطح را نشان می دهد. عمق قسمت مقعر نیز مؤید میزان انقباض بستر پودر خواهد بود. گوی شدگی و صافی سطح وابسته به یکدیگرند. معمولاً سطوحی با گوی شدگی کمتر صافی سطح بالاتری دارند. به دلیل اسکن بر روی بستر پودر سرد معمولاً گوی شدگی در اولین خط اسکن دیده می شود. اغلب نمونه هایی با سطح مقطع های مستطیلی دارای دقت ابعادی بهتری خواهند بود. سطح مقطع نمونه هایی که به مستطیل نزدیک تر است از لحاظ دقت ابعادی رده بالاتری دارند.

جدول 2 مقادیر میانگین خروجی ها

Table 2 Average values of outputs							
عمق قسمت مقعر	انحراف از قطر لیزر	صافی سطح	میزان گوی شدگی %	میانگین عمق نفوذ	ضریب چگالی انرژی دریافتی	میزان استحکام	پهنای قطعه
0/23	6/9	0/37	50	1/39	72/6	1	200
0/67	10/2	0/53	100	1/73	14/4	2	10
0/33	7/3	0/53	70	1/61	194/4	3	100
0/23	7/3	0/35	80	1/36	21/6	4	50
0/02	2/5	-0/23	15	0/9	90/0	5	500
0	2/1	-0/6	0	0/61	10/0	6	1000
0/23	8/6	0/83	70	1/52	129/6	7	100
0/17	6/4	0/26	30	1/3	48/4	8	300
0	0/1	-0/68	0	0/55	90/0	9	1200
0/23	6/6	0/34	45	1/37	72/6	10	250
0	0/1	-0/67	0	0/63	15/0	11	800
0/23	6/1	0/27	40	1/3	60/5	12	300
0	2/4	-0/38	5	0/75	31/9	13	1000
0	2/1	-0/65	2	0/67	50/8	14	1200
0/01	0/7	-0/73	30	0/39	3/8	15	600
0/33	1/5	-0/24	7	0/68	5/4	16	1100
0/23	1/9	-0/19	5	0/83	40/8	17	1200
0/25	1/8	-0/22	3	0/8	40/8	18	1250
0/05	1/0	-0/6	40	0/51	93/8	19	500
0/27	2/4	-0/12	4	1	135/0	20	1500

برای اندازه گیری میزان گوی شدگی نمونه ها بر روی سطح صاف (صفحه مغناطیسی) قرار گرفته و با حرکت

بالاتر خواهد بود. علاوه بر این عمق نفوذ بالاتر نشان از چسبندگی بیشتر لایه‌ها در حالت سه بعدی خواهد داشت. عمق نفوذ بر حسب چگالی انرژی و درصد مس به صورت یک روبه است که در چگالی انرژی 60 و درصد وزنی مس 20%، دارای یک نقطه زینی است (شکل 6).

آزمایش‌ها بر روی پودر آهن و مس نشان می‌دهد که در یک مقدار ثابتی از درصد پودر مس، با افزایش چگالی انرژی، میزان مذاب تولیدی بالا رفته و در نتیجه عمق نفوذ و پهناي حلقه زیاد می‌شود. اما بررسی تأثیر درصد مس بر روی عمق نفوذ رفتار دوگانه‌ای را بین چگالی انرژی بالاتر و پایین‌تر از 60 را نشان می‌دهد. در چگالی انرژی پایین‌تر از نقطه زینی با افزایش درصد مس، تا نقطه زینی، عمق نفوذ بالا می‌رود و بعد از آن (درصد مس بالاتر از 20) عمق نفوذ کاهش می‌یابد.

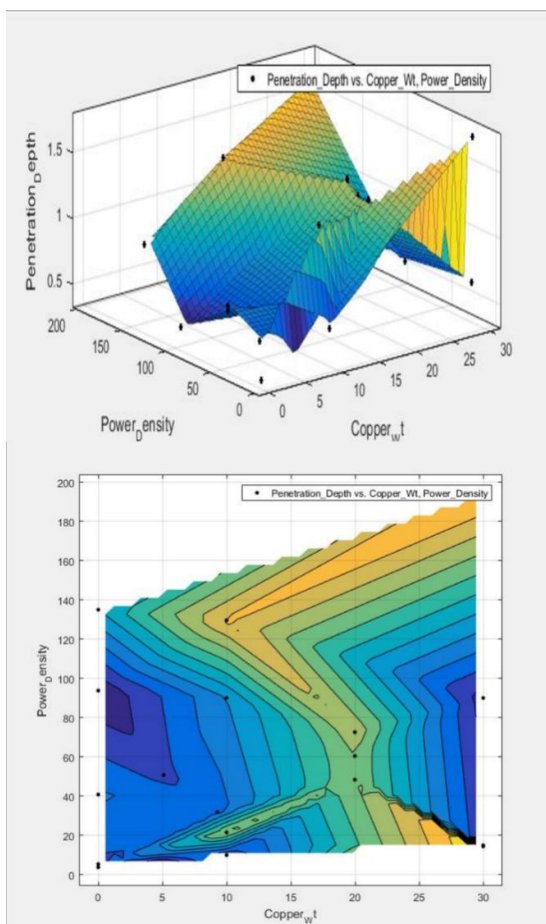


Fig. 6 Penetration depth Vs. Cu weight percent and energy density
شکل 6 مقدار عمق نفوذ بر حسب چگالی انرژی و درصد وزنی مس

در واقع در چگالی انرژی پایین‌تر از نقطه زینی، نمونه‌های تولید شده با 10% مس عمق نفوذ بیشتری را نسبت به

شرایط یکسان، در ولتاژهای بالاتر تقعر بیشتر و در نتیجه صافی سطح کمتری دیده می‌شود. اغلب در نمونه‌های تولید شده در ولتاژ پایین تنها دانه‌های ریزتر و یا سطوح دانه‌های بزرگ‌تر ذوب شده و پودر درشت‌تر را احاطه می‌کند. بنابر این به دلیل کمی انقباض، تقعر محدودی دیده می‌شود.

6-2- درصد پودر مس

افزایش درصد پودر مس برخلاف چگالی انرژی تأثیر خطی ندارد. به دلیل دمای ذوب پایین‌تر مس نسبت به آهن، افزودن پودر مس به پودر آهن باعث خواهد شد تا در چگالی انرژی یکسان حجم بیشتری از پودر ذوب شده و میزان مذاب بالاتر باشد. اما با اضافه تر شدن مقدار مس، به دلیل بالا بودن ضریب انتقال حرارت مس، مقداری از انرژی لیزر توسط مس موجود در بستر پودر خام به سرعت به گرفته شده و انرژی باقی مانده برای ذوب کردن پودر تحلیل می‌رود.

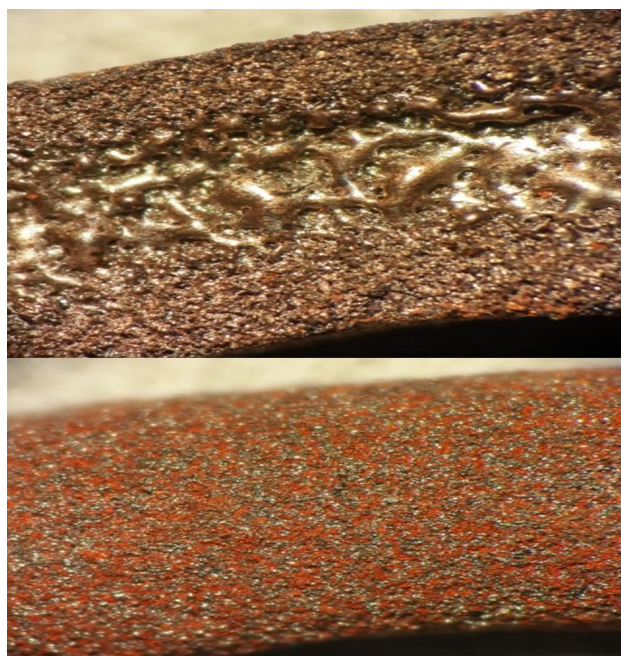


Fig. 5 Optical view of upper and lower sides of sintered samples
شکل 5 نمای اپتیکی از قسمت بالا و پایین قطعه تولید شده به روش تفجوشی

7- بحث و نتایج

7-1- بررسی عمق نفوذ

عمق نفوذ ملاکی برای سنجش راندمان و کیفیت کار است. اگر در یک چگالی انرژی ثابت عمق نفوذ بالاتر باشد، راندمان کاری

ناشی از انقباض مذاب وابسته است. هرچقدر حجم مذاب تولیدی بیشتر باشد انقباض آن بیشتر، گویی شدگی و تقعر سطح بالاتر و در نتیجه صافی سطح کمتر خواهد بود. حجم مذاب تقریباً برابر با حاصلضرب عمق نفوذ در پهنای قطعه تولیدی می باشد. شکل 9 رابطه بین صافی سطح با انرژی اعمالی و درصد مس را نشان می دهد. در این نمودار هرچقدر عدد صافی سطح بیشتر باشد نشان دهنده سطح بهتر خواهد بود.

در چگالی انرژی کمتر از نقطه زینی، به دلیل عدم ذوب پودر آهن و قرارگرفتن آن در زمینه مذاب مس، حالتی کامل از تفجوشی حالت مایع دیده می شود. به این ترتیب حجم مذاب تنها درصدی از حجم حلقه (مقداری بالاتر از درصد پودر مس) را تشکیل می دهد. این عامل باعث خواهد شد تا هیچ تقعری بر روی سطح مشاهده نشود. در چگالی انرژی بالاتر به دلیل بیشتر شدن حجم مذاب اثر تقعر به وضوح مشهود است.

همان گونه که پیش تر توضیح داده شد عامل اصلی بوجود آورنده اثر گویی شدگی انقباض مذاب است. بالاتر رفتن انرژی اعمالی به بستر پودر، باعث افزایش حجم مذاب و در نتیجه مشهودتر شدن اثر گویی شدگی بر روی سطح خواهد شد نمای اپتیکی از برخی از قطعات تولید شده در شکل های 4، 5، 7 و 8 نشان داده شده است. در مقدار مس کمتر از 10 درصد و چگالی انرژی کمتر از نقطه زینی، به دلیل عدم ذوب پودر آهن و قرارگرفتن آن در زمینه مذاب مس، حالتی کامل از تفجوشی حالت مایع دیده می شود. به همین دلیل مذاب مس کاملاً به سطح ذرات پودر آهن چسبیده و آنها را احاطه می کنند.



Fig. 8 Optical view of upper and lower sides of No.4 sample

شکل 8 نمای اپتیکی از قسمت بالا و پایین نمونه شماره 4

نمونه های تولید شده با 30% مس نشان می دهند. در حالی که این امر در چگالی انرژی بالاتر کاملاً برعکس است. زیرا در چگالی انرژی پایین، ذوب پودر آهن بسیار اندک و جزئی است و در واقع به دلیل پایین بودن ضریب جذب مس نسبت به آهن، پودر آهن گرم شده و باعث ذوب پودر مس خواهد شد.

در حالتی که درصد وزنی مس پایین تر است در واقع پودر آهن بیشتری در محیط وجود دارد و این امر باعث جذب بیشتر پرتو لیزر و در نتیجه اضافه شدن عمق نفوذ می شود. اما در چگالی انرژی بالاتر از نقطه زینی، پودر آهن کاملاً ذوب می شود. در این شرایط پودر آهن ذوب شده و ذرات مس درون مذاب آهن ذوب می شوند در نتیجه هرچه میزان پودر مس بالاتر باشد حجم حوضچه مذاب بالاتر خواهد رفت. این امر باعث خواهد شد تا در ولتاژهای بالا حلقه های با درصد مس بیشتر، عمق نفوذ بالاتری داشته باشند. دیگر عامل مؤثر در میزان عمق نفوذ، ضریب انتقال حرارت پودر است. هرچقدر درصد مس بیشتر باشد، ضریب انتقال حرارت نیز بیشتر خواهد شد. با افزایش درصد مس بخشی از انرژی اعمالی به واسطه انتقال حرارت پودر به پودر خام منتقل شده و حوضچه مذاب با سرعت بیشتری سرد می شود. این امر باعث خواهد شد تا پودر کمتری در حوضچه مذاب ذوب شده و در نتیجه حجم مذاب کاهش خواهد یافت. هرچه حجم مذاب بالاتر باشد میزان انقباض و در نتیجه تقعر سطح نیز بیشتر خواهد شد.

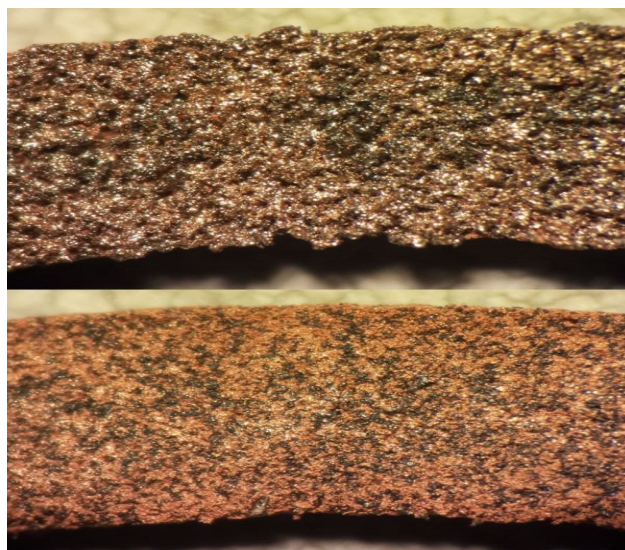


Fig. 7 Optical view of upper and lower sides of No. 11 sample

شکل 7 نمای اپتیکی از قسمت بالا و پایین نمونه شماره 11

بنابراین افزایش چگالی انرژی تقعر بالاتری را به دنبال خواهد داشت. صافی سطح به دو عامل گویی شدگی و تقعر

7-2- بررسی انحراف پهنای حلقه

یکی از نکات مورد بررسی در روش‌های ساخت و تولید سریع، دقت ابعادی قطعات تولیدی است. هرچقدر نوار جامد شده از اسکن لیزری پهنایی نزدیک تر به قطر پرتو لیزر داشته باشد و مقطع آن به مستطیل نزدیک تر باشد، دقت ابعادی بهتری خواهد داشت. شکل 10 انحراف پرتو لیزر را نشان می‌دهد. مناطق سبز رنگ پهنایی معادل قطر پرتو لیزر دارند و مقطع آنها مستطیلی شکل تر است. قطعات تولید شده با چگالی انرژی بین 140-40 و درصد مس بین 18-22 کمترین انحراف از قطر پرتو لیزر را دارند.

در این نمونه‌ها به دلیل عدم ذوب و یا ذوب جزئی پودر آهن و احاطه شدن ذرات آهن توسط مذاب مس، تقریباً هیچ انحراف و یا انحراف خیلی اندکی، بر روی سطح ایجاد شده است. شکل 10 میزان انحراف مقطع قطعات تولیدی از یک مستطیل کامل را نشان می‌دهد.

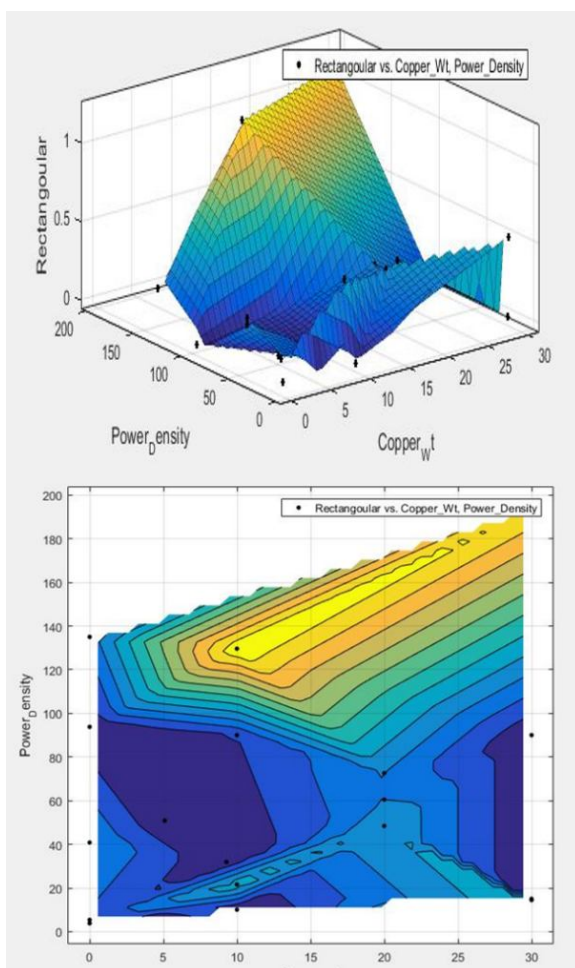


Fig. 10 Deviation of laser beam Vs. Cu weight percent and energy density

شکل 10 انحراف پرتوی لیزر بر حسب چگالی انرژی و درصد وزنی مس

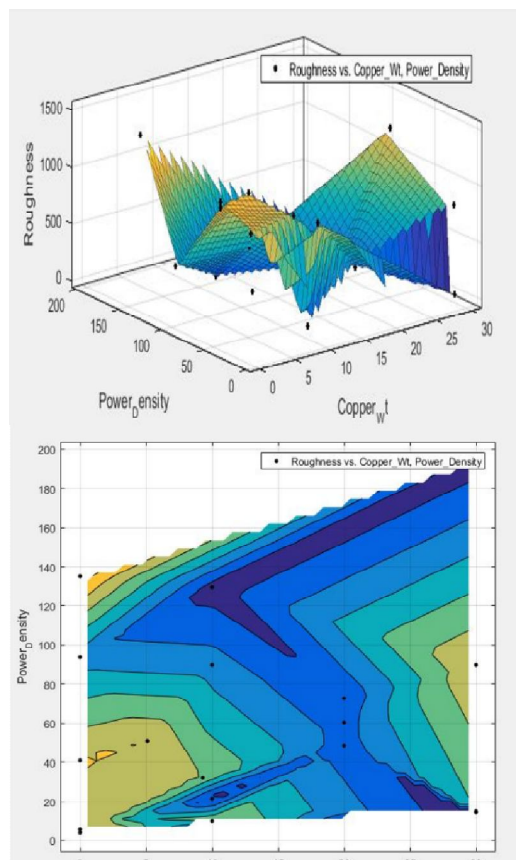


Fig. 9 Surface roughness Vs. Cu weight percent and energy density

شکل 9 زبری سطح بر حسب چگالی انرژی و درصد وزنی مس

به این ترتیب حجم مذاب تنها درصدی (مقداری بالاتر از درصد پودر مس) از حجم حلقه را تشکیل می‌دهد. این عامل باعث خواهد شد تا هیچ گویی شدگی در روی سطح مشاهده نشود. با افزایش درصد مس (بیشتر از 10 درصد)، مقداری گویی شدگی بر روی سطح دیده می‌شود. علت این امر بالارفتن میزان مذاب است. زیرا به دلیل بالابودن حجم آهن و ضریب جذب بالای آن، علاوه بر ذرات ریز آهن، مس نیز کاملاً مذاب خواهد شد. به این ترتیب این حجم مذاب تا حدودی اثر گویی شدگی روی سطح را نشان می‌دهد. اما با این حال این مقدار چندان قابل توجه نیست.

نکته جالب توجه اضافه شدن میزان گویی شدگی با افزایش درصد مس (تا مس 10 درصد) است. علت اصلی این پدیده بالاتر رفتن حجم مذاب به دلیل وجود مس بیشتر است. با افزایش درصد مس ضریب انتقال حرارت در مخلوط پودر با مس بیشتر است. انتقال حرارت بالاتر باعث پایداری کمتر حوضچه مذاب شده و احتمال جا ماندن مذاب را در حین حرکت بر روی بستر پودر را بیشتر می‌کند. بنابراین گویی شدگی بیشتر را بدنبال خواهد داشت.

8- نتیجه‌گیری

- آزمایش‌ها بر روی پودر آهن و مس نشان می‌دهد که با افزایش چگالی انرژی میزان مذاب تولیدی بالا رفته و در نتیجه عمق نفوذ و پهنای حلقه زیاد می‌شود.

- در چگالی انرژی کمتر از 60، نمونه‌های تولید شده با 10 درصد مس عمق نفوذ بیشتری نسبت به نمونه‌های تولید شده با 30 درصد مس را نشان می‌دهند. در حالیکه این امر در چگالی انرژی بیشتر از نقطه زینی کاملاً برعکس است.

- هرچه حجم مذاب بالاتر باشد میزان انقباض و در نتیجه تقعر سطح نیز بیشتر خواهد شد. بنابراین افزایش چگالی انرژی تقعر بالاتری را به دنبال خواهد داشت. علاوه بر این افزایش حجم مذاب باعث مشهودتر شدن اثر گویی شدگی بر روی سطح خواهد شد.

- استحکام قطعات تولید شده تابعی از میزان مذاب است. هرچقدر میزان مذاب بالاتر باشد، استحکام قطعات تولیدی بیشتر خواهد شد. اما افزایش حجم مذاب تأثیرات نامطلوبی از قبیل انقباض بیش از اندازه، گویی شدگی سطح، تقعر، کم شدن صافی سطح و دقت ابعادی را نیز به دنبال خواهد داشت.

- شرایط بهینه برای تولید قطعات با نمونه‌سازی سریع در حالتی است که استحکام، صافی سطح، دقت ابعادی در بالاترین حد ممکن باشد درحالی که انقباض ناشی از حجم مذاب، گویی شدگی، تنش حرارتی حداقل باشد. بررسی‌ها نشان داد که بهترین شرایط در حالتی است که چگالی انرژی بین 120-140 و درصد مس بین 18-22 تنظیم شود.

9- 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

استحکام قطعات تولید شده تابعی از میزان مذاب است. هرچقدر میزان مذاب بالاتر باشد، استحکام قطعات تولیدی بیشتر خواهد شد. اما افزایش حجم مذاب تأثیرات نامطلوبی از قبیل انقباض بیش از اندازه، گویی شدگی سطح، تقعر، کم شدن صافی سطح و دقت ابعادی را نیز به دنبال خواهد داشت.

علاوه بر میزان مذاب میزان درصد مس یا آهن موجود در حوضچه مذاب نیز در استحکام قطعات تولیدی مؤثر است. هرچقدر درصد آهن بیشتر باشد میزان استحکام نیز بیشتر خواهد بود. در واقع در یک حجم یکسان از مذاب قطعات تولید شده با درصد وزنی مس بیشتر استحکام کمتری نسبت به قطعات تولیدی با آهن بیشتر را دارند.

7-3- شرایط بهینه

شرایط بهینه برای تولید قطعات با نمونه‌سازی سریع در حالتی است که استحکام، صافی سطح، دقت ابعادی در بالاترین حد ممکن باشد درحالی که انقباض ناشی از حجم مذاب، گویی شدگی، تنش حرارتی حداقل باشد.

برای بدست آوردن نقطه بهینه در این آزمایشات، این توابع در کنار هم بررسی شده است. بررسی‌ها نشان داد که بهترین شرایط در حالتی است که چگالی انرژی بین 120-140 و درصد مس بین 18-22 تنظیم شود. شرایط بهینه در شکل 11 به صورت نواحی سفید رنگ نشان داده شده است.

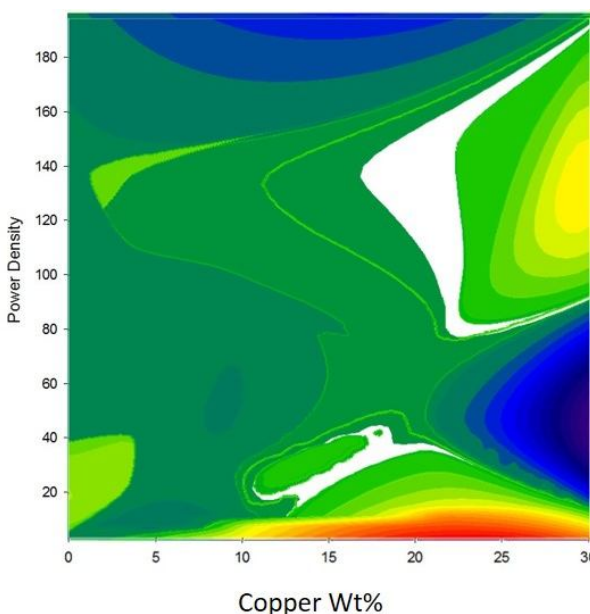


Fig. 11 Optimum condition for manufacturing of samples

شکل 11 شرایط بهینه برای تولید قطعات

- analysis of direct metal laser re-melted 316L stainless steel cubic primitives*. Liverpool : Kluwer Academic Publishers, 2004, Vol. 39, pp. 1195-1205. 0022-2461.
- [10] R. Pogson, P. Fox, C.J. Sutcliffe and W. O'Neill. *The production of copper parts using* *دی‌ام‌ال‌آر S5*, Liverpool : Emerald, 2003, Rapid Prototyping Journal, Vol. 9, pp. 334-343.
- [11] H.H. Zhu, J.Y.H. Fuh and L. Lu. *Microstructural evolution in direct laser sintering of Cu-based metal powder*. 2, Huazhong : Emerald Group Publishing Limited, 2005, Rapid Prototyping Journal, Vol. 11, pp. 74-81. ISSN 1355-2546.
- [12] Simchi, A. *Direct laser sintering of metal powders: Mechanism, kinetics and microstructural features*. Tehran : Elsevier, 2006, Materials Science and Engineering, Vol. A 428, pp. 148-158.
- [13] Itziar Tolosa, Fermín Garcíandía, Fidel Zubiri, Fidel Zapirain, Aritz Esnaola. *Study of mechanical properties of AISI 316 stainless steel processed by "selective laser melting", following different manufacturing strategies*. London : springer, 2010, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, November 2010, Volume 51, Issue 5-8, pp 639-647.
- [14] Joaquim Ciurana, Luis Hernandez, Jordi Delgado. *Energy density analysis on single tracks formed by selective laser melting with CoCrMo powder material*. London : springer, 2013, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, March 2013, Volume 54, Issue 6-7, pp 468-591.
- [15] Deckard, John D. Williams and Carl R. 2, South Carolina : *Advances in modeling the effects of selected parameters on the SLS process*. MCB University Press, 1998, Rapid Prototyping Journal, Vol. 4, pp. 90-100. ISSN 1355-2546.
- [16] Nitish Kumar, Hemant Kumar, Jagdeep Singh Khurmi. *Experimental Investigation of process parameters for rapid prototyping technique (Selective Laser Sintering) to enhance the part quality of prototype by Taguchi method*. India : 3rd International Conference on Innovations in Automation and Mechatronics Engineering., 2016. Vol. 23. 352-360.
- [17] Seyed ali Fatemi, Jamal Zamani. 2015. "Influence of process parameters on layers thickness in steel powder laser sintering." *Journal of Mechanical Aerospace (Emam Hosein University)* 14 (3): 36-39. (In Persian)
- X مسافت اسکن، mm
 θ علائم یونانی
 θ زاویه
 φ راندمان
- 10- مراجع**
- [1] M. Shellabear, O. Nyrrhilä. *DMLS – Development History and State of the ART*. Erlangen : LANE 2004 conference, 2004.
- [2] VILLALON, ADA VENUS. *Electron Beam Fabrication of Injection Mold Tooling with Conformal Cooling Channels*. North Carolina : A thesis submitted to the Graduate Faculty of, 2005.
- [3] J-P. Kruth, P. Mercelis, J. Van Vaerenbergh, L. Froyen and M. Rombouts. *Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting*1, 2005, Rapid Prototyping Journal, Vol. 11, pp. 26–36.
- [4] J.P. Kruth, S. Kumar and J. Van Vaerenbergh. *Study of laser-sinterability of ferro-based powders*. 5, Leuven : Emerald Group Publishing Limited, 2005, Rapid Prototyping Journal, Vol. 11, pp. 287-292. ISSN 1355-2546.
- [5] H.H. Zhu, J.Y.H. Fuh, L. Lu. *The influence of powder apparent density on the*. Huazhong : Elsevier Ltd, 2007, Machine Tools & Manufacture, Vol. 47, pp. 294-298.
- [6] Nikolay K. Tolochko, Maxim K. Arshinov, Andrey V. Gusarov, Victor I. Titov, Tahar Laoui and Ludo Froyen. *Mechanisms of selective laser sintering and heat transfer in Ti powder*.pdf5, s.l.: Rapid Prototyping Journal, 2003, Vol. 9, pp. 314-326.
- [7] Nikolay K. Tolochko, Sergei E. Mozzharov, Igor A. Yadroitsev, Tahar Laoui, Ludo Froyen, Victor I. Titov and Michail B. Ignatiev. *Balling processes during selective laser treatment of powders*. 2, Vitebsk : Emerald Group Publishing Limited, 2004, Rapid Prototyping Journal, Vol. 10, pp. 78-87. ISSN 1355-2546.
- [8] R. Morgan, C.J. Sutcliffe and W.O'Neill. *Experimental investigation of nanosecond pulsed Nd-YAG laser re-melted pre-placed powder beds*.pdf. 3, Liverpool : Rapid Prototyping Journal, 2001, Vol. 7, pp. 159-172.
- [9] R. Morgan, C. J. Sutcliffe, W. O'Neill. *Density*