



بررسی تجربی اثر متقابل چگالی ظاهری و انتقال حرارت پودر بر روی کیفیت قطعات ساخته شده در سامانه ذوب لیزری انتخابی

سید علی فاطمی^۱، جمال زمانی اشنی^{۲*}

۱- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی، تهران

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* تهران، صندوق پستی zamani@kntu.ac.ir، ۱۹۹۹۱۴۳۳۴۴

چکیده

این مقاله به بررسی تجربی اثر متقابل چگالی ظاهری پودر فلز و خواص حرارتی آن با استفاده از سامانه طراحی و ساخته شده در این دانشگاه تحت عنوان "دستگاه نمونه‌سازی سریع قطعات فلزی با استفاده از فناوری لایه نشانی پودر به روش ذوب لیزری" می‌پردازد. ذوب لیزر انتخابی (SLM)، یکی از زیر مجموعه فرایندهای نمونه‌سازی سریع است. در این سامانه قطعات از طریق پخش کردن لایه به لایه پودر و تابش پی در پی پرتو لیزر شکل می‌گیرند. یکی از نکات مهم در SLM توجه به خواص حرارتی پودر فلز (ضریب انتقال حرارت گرمایی و ضریب نفوذ حرارتی) است. در این تحقیق، ضریب گردایت و نفوذ حرارتی پودر فلز با چگالی ظاهری متفاوت بررسی شده است. با توجه به روش اندازه‌گیری اختلافی دو دما، آزمایش‌ها وابستگی خواص حرارتی پودر فلز به چگالی ظاهری را نشان داد. تغییرات چگالی ظاهری از طریق فشار اعمالی به بستر پودر خام و فشرده سازی آن ایجاد شد. این بررسی‌ها در محدوده چگالی ظاهری ۴۴.۷۵٪ تا ۵۶.۴٪ نسبت به چگالی آهن خالص انجام شده است. از مقایسه نمونه‌های تولید شده در چگالی‌های ظاهری مختلف این مطلب درک شد که فشار اعمالی به بستر پودر خام دارای نقطه بهینه‌ای است. در واقع بهترین کیفیت قطعات تولیدی، در چگالی ظاهری حدود ۴۶٪ حاصل شد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۰ مهر ۱۳۹۵

پذیرش: ۱۲ آبان ۱۳۹۵

ارائه در سایت: ۱۳ آذر ۱۳۹۵

کلید واژگان:

نمونه‌سازی سریع

ذوب لیزر انتخابی (SLM)

چگالی ظاهری پودر فلز

ضریب انتقال حرارت گرمایی پودر

ضریب نفوذ حرارتی

Experimental study on interaction of powder apparent density and heat transfer on the quality of parts made in selective laser melting

Seyed Ali Fatemi, Jamal Zamani Ashani^{*}

Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 1999143344 Tehran, Iran, zamani@kntu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 01 October 2016

Accepted 02 November 2016

Available Online 03 December 2016

Keywords:

Rapid prototyping
Metal powder apparent density
Selective Laser Melting (SLM)
Thermal conductivity
Thermal diffusivity

ABSTRACT

This paper presents an experimental study on interaction effects of apparent density and heat transfer characteristics of metal powder by Direct Metal Laser Sintering device which is developed at K. N. Toosi university of technology. Selective Laser Melting (SLM) is a direct fabrication of part through layer by layer powder deposition and successive laser beam irradiation. One of the important properties of the SLM is thermal conductivity and thermal diffusivity of the metal powder. In this paper, thermal conductivity and diffusivity of metal powder with various apparent densities were studied. According to the method of measuring (the difference between two temperatures), The tests showed the dependency of thermal properties to metal powder apparent density. Variations in apparent density was established through the pressure applied to the raw powder bed. This study was performed between apparent density of 44.75% to 56.4% compared to the density of pure iron. Comparing the samples which is produced in different densities, it is concluded that the pressure applied to the raw powder bed had an optimum point of arrest. In fact, the best quality of the manufactured parts, in density of about 46% was obtained.

و تولید سریع شده است. برای مثال^۱: LEN^۲ و EBM^۳ برای تولید قطعات فلزی به صورت سریع مورد استفاده قرار می‌گیرند. از بین این روش‌ها، فن آوری‌های پایه پودری SLS متدائل تر است [۲].

ذوب لیزری انتخابی (SLM^۴) یکی از روش‌های ساخت و تولید سریع است که دارای پتانسیل بالا برای توسعه محصولات کاربردی می‌باشد. SLM یک

۱- مقدمه
بکی از تمايلات بزرگ شرکت‌های تولیدی کوتاه شدن زمان تولید، به منظور کوتاه شدن زمان رسیدن مخصوصاً از تولید شدن زمان تولید، به منظور سریع در دهه هشتاد برای فائق آمدن بر این مسئله ایجاد شدند. نمونه سازی سریع روشنی است که عموماً برای تولید نمونه‌های مهندسی بدون نیاز به شکل‌دهی سنتی استفاده می‌شود [۱].

پیشرفت‌های اخیر در نمونه‌سازی سریع منجر به ایجاد روش‌های ساخت

¹ Laser Engineered Net Shaping

² Selective Laser Sintering

³ Electron Beam Melting

⁴ Selective Laser Melting

می‌شود. بستر پودر توسط غلتک هموارسازی شده و تحت کوبش قرار می‌گیرد. میزان این کوبش با سرعت دورانی و انتقالی غلتک قبل دستیابی خواهد بود. فشارهای بسیار بالا باعث پایین آمدن جریان پذیری پودر خواهد شد. بنابراین لازم است فشار مناسب برای هموارسازی بستر بدست آید. برای این منظور بستر پودر تحت فشارهای مختلف قرار گرفته و سپس تفحوشی می‌شود. به این ترتیب میزان مناسب فشار کوبشی بستر بدست خواهد آمد. به این ترتیب در صورت به دست آوردن فشار بهینه برای هر پودر، بدون نیاز به صرف هزینه بالا برای تولید پودر با چگالی خاص، رسیدن به بهترین کیفیت تولید در دسترس خواهد بود.

1-1- مروری بر تحقیقات

چگالی بستر پودر به صورت مستقیم بر روی میزان چگالی قطعه نهایی مؤثر است. در ماسینهای ساخت و تولید سریع، چگالی بستر عموماً توسط غلتکهای هموار کننده سطح ایجاد می‌شود. این غلتکها فشاری را بر روی سطح اعمال می‌نمایند که باعث افزایش چگالی بستر پودر می‌شود. چگالی ظاهری پودر در تفحوشی لیزری مستقیم می‌تواند همان چگالی قطعه خام ایجاد شده با تفحوشی حالت مایع باشد. به این ترتیب چگالی نهایی با افزایش چگالی ظاهری پودر رسبو داده شده در تفحوشی لیزری انتخابی افزایش می‌یابد [9]. چگالی ظاهری مربوط به اندازه، شکل و توزیع اندازه پودر می‌شود. برای کره‌های تک اندازه بهترین چگالی ظاهری به صورت تئوری 74% محاسبه می‌شود. به هر حال چگالی ظاهری بالاتر پودر می‌تواند با مخلوط کردن پودرهایی با اندازه مختلف بدست آید. به صورت تئوری چگالی ظاهری بدست آمده با مخلوط کردن چند پودر می‌تواند تا 98% نیز برسد. در حقیقت، پودرهای صنعتی موجود، چگالی ظاهری در محدوده 70%-20% دارند. زیرا محدوده وسیعی از اندازه ذرات در آنها وجود دارد. بررسی‌های پیشین نشان می‌دهد که با کمک مخلوط دو نوع پودر با اندازه مختلف چگالی ظاهری 63% بدست آید [12].

چگالی ظاهری پودر فلز متأثر از فاکتورهای زیادی از قبیل: اندازه ذرات، شکل، توزیع اندازه، اصطکاک بین ذرات، شیمی سطح، گلوله شدن، نوع جمع کردن و غیره می‌باشد. عموماً با کاهش اندازه ذرات، به دلیل اصطکاک بالاتر بین ذرات، چگالی ظاهری پودر روی هم قرار گرفته کاهش می‌یابد. عموماً پودرهای کروی نسبت به دیگر اشکال، به واسطه اصطکاک کمتر، چگالی ظاهری بالاتری دارند. به عبارت دیگر زبری سطح بالاتر و با بی قاعده بودن شکل ذرات منجر به کاهش چگالی ظاهری می‌شود. ژو و همکارانش به بررسی رابطه بین چگالی نهایی و چگالی ظاهری بستر پودر پرداختند. ایشان چگالی بالاتر پودر را از طریق مخلوط کردن سه پودر با اندازه ذرات مختلف بدست آورده اند. به طوری که D_L , D_M و D_S به ترتیب قطر کره‌های بزرگ، متوسط و کوچک می‌باشند. بنابراین زمانی که رابطه بین قطر ذرات به صورت، ۱ : ۳.۸۳ : ۹.۲۳ برقرار باشد، بالاترین چگالی پودر بدست خواهد آمد. برای مثال اگر نسبت عددی ذرات ۱:۱:۴ باشد چگالی ظاهری چیدمان ۹۵.۷% می‌تواند بدست آید. اما در واقعیت ترکیب پودر با این رابطه هندسی به دلیل عدم امکان رسیدن به پودر فلز تک سایز و وابستگی اندازه پودر به پارامترهای مختلف فرایند و قیمت تمام شده آن غیر ممکن است. برای مثال بزرگترین اندازه ذرات پودر باید کوچکتر از ضخامت لایه (در محدوده ۰.۱ الی ۰.۰۲ میلی‌متر) باشد. پودر فلز با اندازه ذرات خیلی کوچک اثر ضعیف تری بر روی بهبود چگالی ظاهری دارد زیرا براحتی متراکم شوند. علاوه بر این امکان تبخیر پودرهای خیلی ریز در هنگام برخورد پرتو

روش ساخت مستقیم محصول با خواص نزدیک به ماده پایه است که از طریق سیستم تولید لایه لایه انجام شده است. فرایند ثبت حوضچه مذاب و فرایند جامد شدن آن، اثر مستقیمی بر روی خواص مکانیکی و ظاهری نمونه‌های تولید شده دارد. به دلیل تأثیر هدایت حرارتی و خواص ترموفیزیکی پودر در فرایند ثبت مذاب، اندازه‌گیری نرخ انتقال حرارت از طریق مواد از همیت بالایی برخوردار است. علاوه براین چگالی ظاهری پودر نیز به صورت مستقیم در خواص مکانیکی و ظاهری نمونه‌های تولید شده مؤثر است. پودر در چگالی‌های ظاهری مختلف خواص حرارتی متفاوتی دارد. بنابراین بررسی خواص حرارتی در چگالی ظاهری مختلف برای شناخت بهتر فرایند بسیار با اهمیت است [3].

در طول SLM، پرتو لیزر به سطح پودر می‌تابد. قبل از ثبت حوضچه مذاب و اتصال بین ذرات پودر، انتقال گرما از پودر تحت تابش به دیگر ذرات پودر مجاور انجام می‌شود. تحکیم خوب بین ذرات پودر فلز به مقدار مناسب حرارت برای ذوب شدن ذرات پودر بستگی دارد. این حرارت مناسب می‌تواند به واسطه انتقال حرارت به پودرهای اطراف منتقل شود و از طریق تفحوشی ذرات پودر شکل جامدی ایجاد نماید. در طی فرایند ثبت، انتقال حرارت از طریق ذرات پودر و هوا رخ می‌دهد. بنابراین، هدایت حرارتی یک عنصر ضروری در درک روند تحکیم پودر فلزات است. به منظور تعیین هدایت حرارتی از پودر فلز، تکنیک‌های مختلف از جمله فوتواکوستیک [4]، سیم داغ [5]، پروب سوزن گذرا [6]، تحریک گرمایش کرنل [7] و تکنیک تصاویر پیرووالکتریک [8] وجود دارد. در این پژوهش روش تطبیقی در حالت پایدار استفاده شده است. این روش نسبتاً ساده، مؤثر، سریع و کم هزینه است و در عین حال منجر به یک نتیجه قابل اعتماد می‌شود.

چگالی ظاهری پودر در تفحوشی لیزری مستقیم می‌تواند همان چگالی قطعه خام ایجاد شده با تفحوشی حالت مایع باشد. به این ترتیب چگالی نهایی با افزایش چگالی ظاهری بستر پودر خام در تفحوشی لیزری انتخابی افزایش می‌یابد [10,9]. چگالی ظاهری مربوط به اندازه، شکل و توزیع اندازه پودر می‌شود. اما چگالی بستر پودر خام علاوه بر چگالی ظاهری پودر به نحوه هموار سازی بستر نیز بستگی دارد. به همین دلیل روش‌هایی که با فشار کوبشی بستر همراه هستند، چگالی بالاتر بستر پودر خام را به دنبال دارند [11].

به دست آوردن چگالی مناسب برای پودر از طریق توزیع مناسب اندازه پودر نیز امکان‌پذیر است. اما به چند دلیل به دست آوردن چگالی مناسب از طریق اعمال فشار به بستر پودر راه کار بهتری است. نخست اینکه رسیدن به پودر فلز شامل ذرات تک سایز خالص غیر ممکن است. دلیل دیگر اینکه اندازه پودر در تفحوشی لیزری انتخابی، محدود به خیلی از پارامترها از قبیل ضخامت لایه، جریان پذیری، مشخصات رسبوگذاری و قیمت تمام شده می‌باشد. تولید پودر با اندازه دانه کاملاً یکنواخت و ترکیب با درصد مناسب نیازمند چندین بار الک کردن پودر و به دست آوردن اندازه یکسان است. به دست آوردن اندازه یکسان از پودر و در نتیجه ایجاد چگالی مطلوب تقریباً غیر ممکن و بسیار پر هزینه است [12]. هرچقدر پودر مورد استفاده ارزان‌تر باشد این هزینه اضافه کمتر توجه‌پذیر است. با توجه به اینکه پودر آهن یکی از ارزان‌ترین و پرکاربردترین پودرهای فلزی برای نمونه‌های تجاری در نمونه‌سازی سریع است، این تحقیق بر روی پودر آهن انجام شده است.

در این مقاله سعی شده است تا چگالی مطلوب از طریق فشرده‌سازی پودر کنترل

(0-100) ميلى متر بر ثانية) و فركانس موج خروجي (20-0 كيلو هرتز) و فاصله كانوني 185 ميلى متر است.

جريان بيانگر توان، پالس نشان دهنده زمان روشن بودن ليزر در هر شليك و فركانس مشخص كننده تعداد شليك در هر ثانية است. اين ليزر دارای سистем اسكنى است که در جهت‌های X و Y حرکت دارد. شکل 1 نمایي از اين ليزر را نشان مى دهد.

اندازه و نوع متريال پودر استفاده شده در اين آزمایش‌ها (پودر آهن) توسط ميكروسكوب الکتروني مورد تست و بررسی قرار گرفت. در اين آتاليز پودر آهن با خلوص 97.17 درصد، شکل ذرات نامشخص و قطر متوسط 20 ميكرومتر مورد استفاده قرار گرفته است. چگالی ظاهري پودر خام استفاده شده برابر با 44.75 آهن خالص بود. جدول 1 ترکيب اندازه دانه‌های پودر و شکل 2 تصویر ذرات را نشان مى دهد.

به منظور توليد قطعات چند لایه کاملاً چگال توسط فرآيندهای ليزري بالسى، در ابتداء لازم است تا عملکرد ليزر و مواد و همچين بهينه‌سازی پaramترها، برای تک لایه بررسی شود. آزمایش‌ها بر روی بستر پودر آزاد به عمق 5 ميليمتر انجام شده است. هر قطعه به صورت تک لایه و تنها با يك بار اسکن ليزر بر روی بستر پودر توليد شده است. سه عامل مساحت موج ليزر، مساحت متأثر از ليزر و تعداد شليك‌ها، عوامل مؤثر بر انرژي ليزر در واحد زمان هستند [21].

آمپر دستگاه بيانگر توان، پنهانی پالس نشان دهنده زمان روشن بودن ليزر در هر شليك و فركانس مشخص كننده تعداد شليك در هر ثانية است. طراحی آزمایش‌ها جهت بهینه‌سازی، پaramترهای ذوب ليزري پودر استيل را مشخص نمود [22]. بدین منظور جريان در بازه 8 تا 10 آمپر، سرعت در محدوده 10 تا 50 ميلى متر بر ثانية، فركانس % بين 10 تا 20 كيلوهرتز و همپوشاني خطوط اسکن بين 0 تا 50% تعیین شد. علاوه بر اين هاشور مناسب نوع 1 با زاویه 45 درجه در تمام نمونه‌ها انتخاب شد. به دليل حذف انتقال حرارت پودر از طريق اتمسفر، کلیه آزمایش‌ها در شرایط خلاء انجام شده است.



Fig. 1 Experimental device, test setup

شكل 1 دستگاه و چیدمان آزمایش‌ها

ليزر با بستر زیاد مى باشد. تبخیر پودر احتمال تولید پلاسمما را افزایش مى دهد [12].

محدوده وسیعی از قطر ذرات ($Q < 50\mu\text{m}$) ممکن است سبب تغیير در میزان مذاب شود. پرتوی به قطر 100 میکرومتر ممکن است ذرات 50 میکرومتر را تنها ذوب جزئی کند، در حالی که ذرات کمتر از يك میکرومتر در اين حالت ممکن است بخار شوند. در نتيجه توزيع مناسب اندازه پودر برای از بین بردن اين اثر و در نتيجه بالا رفتن چگالی ظاهري لازم است [13].

ژو و همكارانش اين بررسی را به صورت عملی نيز بر روی تفجoshi بسترهای پودری با چگالی‌های مختلف انجام داده‌اند. ايشان دريافتند که نمونه‌های تولید شده با چگالی بستر بالاتر، چگالی نهايی بيشرتري را نشان مى دهند. با توجه به اين آزمایش‌ها به راحتی درک مى شود که بالا رفتن چگالی ظاهري پودر مستقيماً بر چگالی نهايی قطعات توليد شده مؤثر است. اما اين نكته قبل بررسی است که در چگالی ظاهري خيلي بالا امكان جريان پذيری پودر پايین مى آيد. اين امر باعث عدم جريان پذيری مذاب و پايین آمدن چگالی ظاهري و افزایش گويي شدگي مى شود [12].

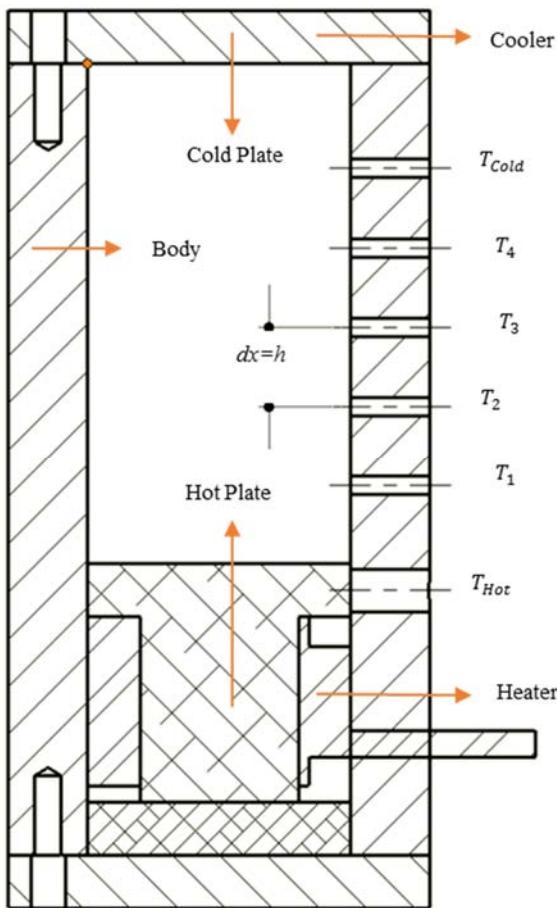
در برخی تحقیقات ديگر تأثير اندازه دانه را بر روی اندازه جبهه مذاب و ناحيه تفجoshi شده بررسی نموده‌اند. نيكولاي تولچکو و همكارانش [14] به بررسی اين اثر بر روی پودر تيتانيوم پرداخته‌اند. ايشان از سه پودر با اندازه مختلف استفاده نموده اند. بر اساس نظریه ايشان انتقال حرارت از سه طريق، هوا، تشعشع و تماس انجام مى شود. بهدلیل وجود پودر در خلاء مى توان از انتقال حرارت از طريق هوا صرف‌نظر نمود. اندازه و شکل ذرات و توزيع اندازه آنها به صورت قابل ملاحظه‌اي بروي چگالی ظاهري مؤثر است. با افزایش چگالی ظاهري میزان انتقال حرارت تماسی بالا مى رود. اگر ناحیه تفجoshi با انتقال حرارت از طريق تماس کنترل شود، اين ناحیه با افزایش چگالی ظاهري افزایش خواهد يافت.

پودر با اندازه ذرات پايین تر انتقال حرارت تشعشعی کمتری دارد [15]. اين امر توضیح مى دهد که چرا با يك توان ليزر ثابت پودر نرم‌تر میزان ناحیه تفجoshi شده کمتری مى دهد. بنابراین چون اهمیت انتقال حرارت تشعشعی بالاتر از تماسی است [16]، مقدار ناحیه تفجoshi با افزایش اندازه پودر افزایش مى يابد. علاوه بر اين با افزایش چگالی ظاهري میزان آنتالپی پودر بالا مى رود. بنابراین گرمای ليزر با افزایش چگالی ظاهري بروي سطح بيشرتري پخش مى شود [17]. در نتيجه میزان ناحیه تفجoshi شده با افزایش چگالی ظاهري پایین مى آيد. با افزایش چگالی ظاهري انتقال حرارت تماسی ذرات پودر بالا مى رود. اما با افزایش اندازه دانه، چگالی ظاهري کم شده و میزان انتقال حرارت تشعشعی بالا مى رود [18]. از طرفی با افزایش چگالی ظاهري میزان آنتالپی نيز بالا مى رود. هر چه میزان انتقال حرارت تماسی و تشعشعی و آنتالپی بالاتر باشد، گرمای ورودی در سطح بيشرتري پخش مى شود [19]. در نتيجه میزان جبهه مذاب و تفجoshi کاهش مى يابد. در مکانیزم تفجoshi ترتیب اهمیت بر اساس، آنتالپی، انتقال حرارت تشعشعی و انتقال حرارت تماسی مى باشد [20].

2- چیدمان آزمایش‌ها

يك ليزر حکاکی ان دی‌نیگ¹ با حداکثر توان 75 وات برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد. تجهیزات تست شامل يك ليزر حکاکی، از نوع Nd:YAG-75DP با منبع دیود پمپ، طول موج 1.64 نانومتر و دارای کیو سوئیچ است. پaramترهای قابل تغیير در اين ليزر شامل جريان (10-5 آمپر)، سرعت اسکن

¹ Nd:YAG



شکل ۳ نمای شماتیک از مخزن تست خواص حرارتی پودر

شکل ۴ نمای شماتیک از مخزن تست خواص حرارتی پودر

با توجه به شرایط پایدار دما، نرخ تغییرات دما در واحد زمان در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر در این حالت بعد زمان در نظر گرفته نمی‌شود. بنابراین با جایگذاری معادلات (2) و (3) در معادله (1)، معادله (6) نتیجه خواهد شد.

$$K = -\frac{mC_p(T_{Hot} - T_{Cold})dx}{A(T_2 - T_3)} \quad (6)$$

معادله (7) نیز از جایگذاری معادلات (4) و (5) بدست آمده است.

$$K = -\frac{C_p\rho h^2(T_{Hot} - T_{Cold})}{(T_2 - T_3)} \quad (7)$$

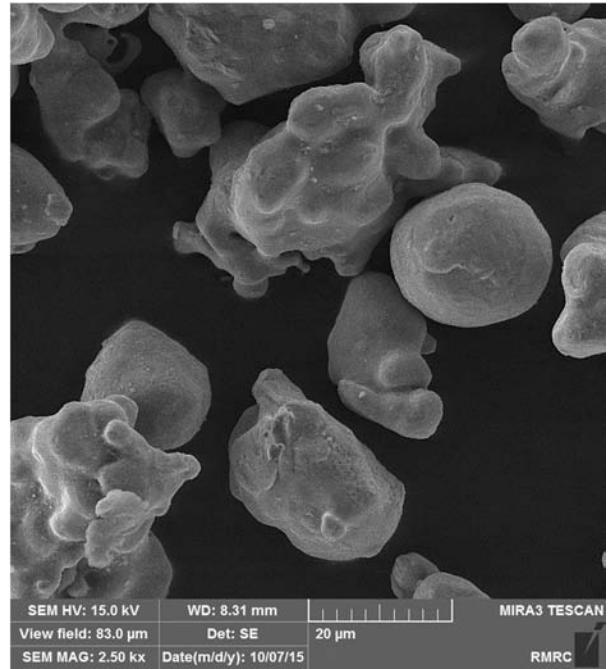
با توجه به معادله (7) ضریب انتقال حرارت برای چگالی ظاهری مختلف قابل دسترس است. علاوه بر ضریب انتقال حرارت، برای بررسی و تحلیل صحیح، باید ضریب نفوذ گرمایی نیز بدست آید.

$$\alpha = \frac{K}{\rho C_p} \quad (8)$$

با توجه به معادله (8)، با داشتن چگالی ظاهری مختلف پودر ضریب نفوذ گرمایی نیز به راحتی قابل محاسبه خواهد بود.

- ۳- طریقه آزمایش‌ها

با منظور بررسی تأثیر چگالی ظاهری بر روی خواص قطعات، تمام آزمایش‌ها با پارامترهای فرایندی یکسان و بهینه‌سازی شده در آزمایش‌ها قبلی انجام شده است [22].



شکل ۲ تصویر SEM از پودر استفاده شده با بزرگنمایی 2500 برابر

جدول ۱ ترکیب اندازه دانه‌های پودر استفاده شده در آزمایش‌ها

Table 1 The composition of the powder grain size used in the experiment

محدوده اندازه	≥ 100	100-70	70-40	40-10	10 \leq
درصد ذرات	Trace	2.9%	12.4%	58.2%	26.5%

به منظور بدست آوردن ضریب انتقال حرارت در چگالی ظاهری مختلف، پودر در یک مخزن، تحت فشارهای مختلف قرار گرفت. این مخزن به صورت استوانه‌ای با قطر 50 و ارتفاع 95 میلی‌متر طراحی شده است. در کف مخزن یک هیتر برقی با سیستم کنترل دما گرفته است. این سیستم همیشه دما هیتر را روی 130 درجه سانتی‌گراد نگه می‌دارد. در قسمت فوقانی مخزن دما همواره برابر با دمای محیط نگه داشته می‌شود. بین منبع سرد و منبع گرم حرارتی دما‌سنج‌هایی به فواصل 15 میلی‌متری قرار گرفته است. با روش شدن هیتر دما مخزن بالا می‌رود. دمای هر کدام از دما‌سنج‌ها در زمان ثبت شده است. ثبت دمایها تا زمانی که دمای مخزن به تعادل برسد ادامه دارد.

شکل ۳ نمایی شماتیک از مخزن تست پودر را نشان می‌دهد.

با توجه به معادلات انتقال حرارت [23] نتایج به صورت معادلات (1) تا (8) حاصل شد.

$$H = \frac{Q}{t} = -KA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

با توجه به ثبت داده‌ها تا رسیدن سیستم به حالت پایدار معادلات (2) و (3) نتیجه می‌شود.

$$Q = mC_p\Delta T = mC_p(T_{Hot} - T_{Cold}) \quad (2)$$

$$dT = T_2 - T_3 \quad (3)$$

$$dx = 15\text{mm} = h \quad (4)$$

$$\rho = \frac{m}{V} \rightarrow m = \rho V \xrightarrow{V=A \times dx} m = \rho Adx \quad (5)$$



Fig. 4 Testing set up for powder thermal properties

شکل ۴ چیدمان آزمایش‌ها برای تست خواص حرارتی پودر

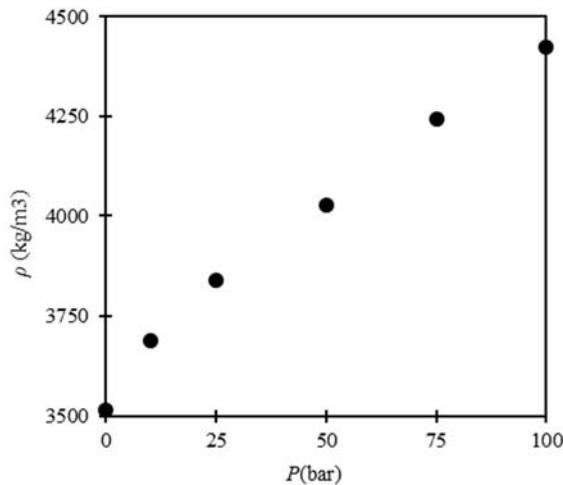


Fig. 5 Apparent density changes according to the applied pressure iron powder

شکل ۵ تغییرات چگالی ظاهری بر حسب فشار اعمالی به پودر آهن

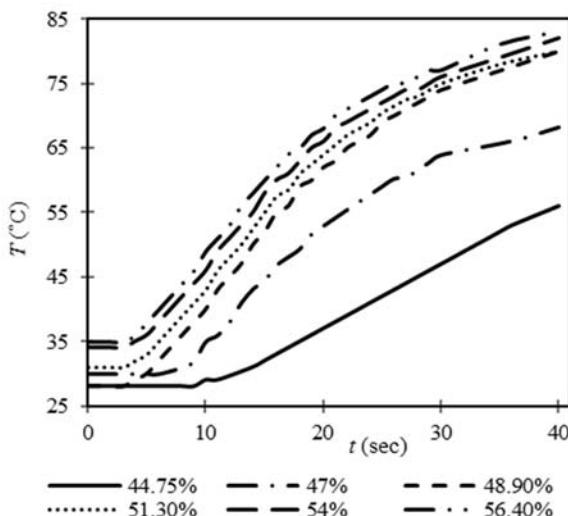


Fig. 6 Temperature changes over time in T2 locations and different apparent density

شکل ۶ تغییرات درجه حرارت نسبت به زمان در نقطه T2 و چگالی ظاهری مختلف

4- نتایج و طبقه‌بندی آن

نتایج حاصل از نمونه‌های تولید شده در سه گروه مقایسه ابعادی، بررسی اپتیکی و خواص فیزیکی طبقه‌بندی شده است. در مقایسه ابعادی عمق نفوذ،

انتقال حرارت به طریق هدایت در داخل اجسام موقعی پدید می‌آید که گردیان دمایی بین دو نقطه از جسم ایجاد شود. هر قدر گردیان دما بیشتر باشد شدت انتقال حرارت زیادتر خواهد بود. هدایت حرارتی در واقع، انتقال انرژی از ذرات پرانرژی به ذرات کم انرژی در یک ماده است که توسط فعل و انفعال بین ذرات صورت می‌گیرد.

ضریب انتقال حرارت و نفوذ حرارتی پارامترهایی هستند که در بسیاری از صنایع، برای مشخص کردن و مدل نمودن فرایند عملیات مهم می‌باشند. نفوذ حرارتی ($\alpha = k/\rho \times C_p$) جزء خواص ماده است. ضریب انتقال حرارت به خواص فیزیکی حرارتی محیط، ویژگی‌های محصول (اندازه، شکل، دمای سطح و زبری سطح)، خواص مواد و ابزار انتقال حرارت بستگی دارد [3].

پارامترهای انتقال حرارت (ضریب انتقال حرارت و نفوذ حرارتی) برای مشخص کردن، مدل نمودن و بهینه کردن فرایندهای انتقال حرارت مهم می‌باشند. شیوه‌های متفاوتی با جزئیات برای تعیین تجربی این پارامترها توضیح داده شده است. به دلیل اینکه این شیوه‌ها با راه حل‌های تحلیلی نیازمند داده‌های آزمایشگاهی از ماده مورد نظر است، لذا فواید بیشتری نسبت به بسیاری از روش‌های دیگر مانند روش سیستم انباسته یا معادلات تجربی برای تعیین این پارامترها دارد. همان‌طور که دیده شد در این روش‌ها، دانستن یکی از پارامترها برای تعیین پارامتر دیگر مورد نیاز است. مثلاً تعیین ضریب انتقال حرارت برای تعیین ضریب نفوذ حرارتی باید معلوم باشد. بنابراین هنوز گسترش و بهینه کردن روشی برای تعیین همزمان این دو پارامتر اهمیت دارد. برای انجام آزمایش‌ها ابتدا پودر تحت فشارهای مختلف قرار گرفت. جدول 2 فشارهای مختلف برای آزمایش و خواص حرارتی پودر در چگالی ظاهری مختلف را نشان می‌دهد.

با توجه به مشخص بودن حجم و وزن مخزن قبل از قرار گرفتن پودر درون آن، با وزن کردن مخزن پر شده از پودر، تحت فشارهای مختلف، بدست آوردن چگالی ظاهری به راحتی امکان پذیر خواهد بود. شکل 4 چیدمان آزمایش‌ها برای تست خواص حرارتی پودر و شکل 5 تغییرات چگالی ظاهری در فشارهای مختلف را نشان می‌دهد. بدنه مخزن از جنس فایبر گلاس در نظر گرفته شده است تا هم بتواند در برابر فشار اعمالی تحمل داشته باشد و هم از انتقال حرارت بین پودر با محیط اطراف جلوگیری کند.

با حرارت دادن به مخزن دمای T4 تا T1 در فواصل زمانی برابر ثبت شده است. با رسیدن مخزن به تعادل و با توجه به معادله 8 و 9 مقادیر ضریب رسانایی و نفوذ گرمایی بدست خواهد آمد.

با توجه به شکل 3 و معادله 8 با داشتن دمای تعادل برای نقاط T2 و T3 می‌توان ضریب انتقال حرارت و نفوذ گرمایی پودر را در چگالی ظاهری مختلف به دست آورد.

شکل‌های 6 و 7 تغییرات دمای مخزن نسبت به زمان به ترتیب در نقاط T2 و T3 را نشان می‌دهند. برای به دست آوردن ضریب نفوذ حرارتی، طرفیت گرمایی ویژه پودر با آهن خالص یکسان فرض شده است.

جدول 2 خواص حرارتی پودر در چگالی ظاهری مختلف

Table 2 Thermal properties of powders in different apparent density

K	α	%	چگالی ظاهری	چگالی ظاهری (بار)	فشار (بار)
6.27	3.80	44.75	3513.2	0	
17.34	10.07	47.0	3690.2	10	
23.46	13.21	48.9	3840.4	25	
31.14	16.47	51.3	4028.2	50	
35.90	18.21	54.0	4242.7	75	
39.52	19.11	56.4	4425.1	100	



Fig. 8 Top view of produced samples

شکل 8 نمای فوقانی نمونه‌های تولید شده

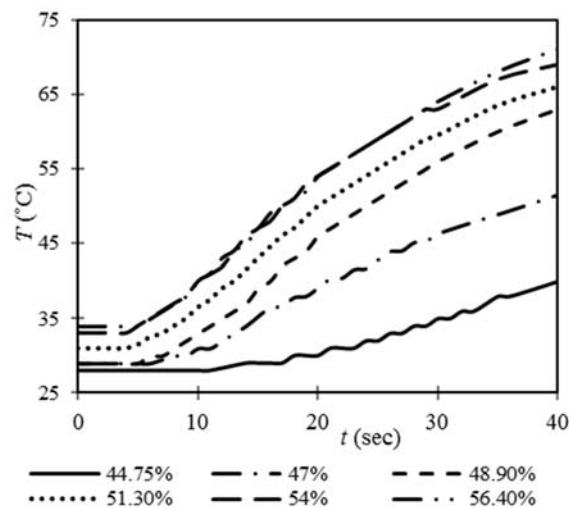


Fig. 7 تغییرات درجه حرارت نسبت به زمان در نقطه T3 و چگالی ظاهری

مختلف

پهنهای حلقه، عمق قسمت مقعر، ارتفاع دیواره و قطر داخلی به کمک کولیس اندازه‌گیری شده است. اندازه‌ها در زوایای 60 درجه نسبت به شروع تفجوشی، ثبت شده و میانگین آنها ملاک قرار گرفته است. علاوه بر مشخصات ابعادی نمونه‌ها مشخصاتی از قبیل صافی سطح، میزان گویی شدگی، انحنای و وجود شیار نیز به کمک میکروسکوپ و با مقایسه‌ای بین نمونه‌ها بدست آمده است. خواص فیزیکی از قبیل استحکام، میزان اکسیدهای سطحی به صورت رتبه‌بندی بین نمونه‌ها بررسی شده است. شکل 8 نمای فوقانی نمونه‌های تولید شده در چگالی ظاهری مختلف را نشان می‌دهد.

در بررسی اپتیکی و مقایسه ظاهری، میزان گویی شدگی و صافی سطح نمونه‌ها به کمک میکروسکوپ ارزیابی شد. بعد از مقایسه نمونه‌ها میزان گویی شدگی به صورت رتبه‌بندی نشان داده شده است. این رتبه‌بندی با توجه به استاندارد اروپایی برای اندازه گذاری صافی سطح سمباده انجام شده است. در واقع مانند استاندارد اروپایی که اندازه و تعداد ذرات روی سطح درجه سمباده را مشخص می‌کند، اعداد به دست آمده برای صافی سطح نشان دهنده همین مطلب است.

با افزایش فشار، چگالی ظاهری به صورت خطی بالا می‌رود. به طوری که چگالی ظاهری 100% در فشار 470 بار حاصل شد (شکل 5). نتایج آزمایش حرارتی پودر نشان داد که با افزایش چگالی ظاهری، ضریب رسانایی و نفوذ گرمایی نیز بالا می‌رود. اما این بالا رفتن به صورت یکتابع لگاریتمی است که به صورت حدی در چگالی ظاهری نهایی به مقدار استادارد برای آهن خالص میل می‌کند.

شکل 9 رابطه بین نفوذ گرمایی و ضریب رسانایی را در چگالی ظاهری مختلف نشان می‌دهند. هر دو تابع حالت لگاریتمی دارند اما به دلیل ثابت فرض شدن ظرفیت گرمایی و پذیر پودر آهن در چگالی ظاهری مختلف، شبیه تغییرات ضریب هدایت حرارتی بیشتر است.

5- بحث و بررسی نتایج

5-1- مقایسه ابعادی

با افزایش فشار اعمالی بر روی بستر پودر خام در نمونه‌ها کاهش عمق نفوذ دیده می‌شود. علت این پدیده بالا رفتن چگالی بستر پودر در فشارهای بالاتر

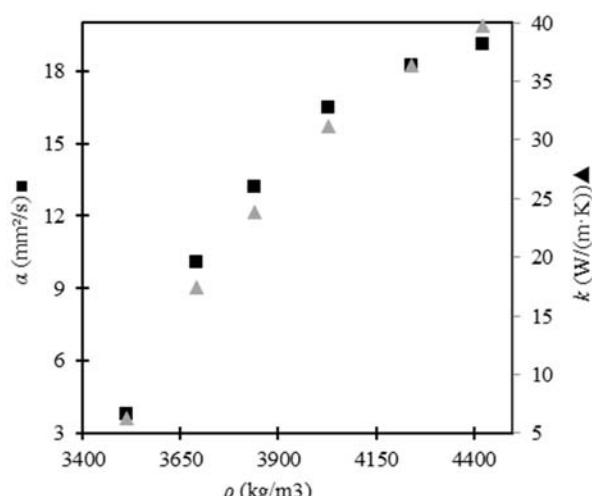


Fig. 9 Variations of thermal diffusivity and thermal conductivity in different density

شکل 9 تغییرات ضریب نفوذ و هدایت حرارتی در چگالی ظاهری مختلف

است؛ زیرا با افزایش چگالی ظاهری، حجم بالاتری از پودر در معرض انرژی لیزر قرار می‌گیرد. علاوه چگالی ظاهری بالاتر، نفوذ لیزر در بستر را مشکل‌تر خواهد کرد و در نتیجه عمق نفوذ نیز کاسته خواهد شد. علاوه بر این ضریب جذب پودر فلز، از فلز پایه بالاتر است، بنابراین هرچه میزان فشردگی بیشتر باشد ضریب جذب پودر نیز کمتر خواهد شد. این عامل نیز نقش مهمی در کاهش میزان عمق نفوذ دارد. زیرا خواص پودر با فشردگی بالاتر شbahat بیشتری به

اندازه ذرات خیلی ریز خواهد شد. عدم تبخیر پودر از تولید پلاسمای و در نتیجه رانده شدن حوضچه مذاب به اطراف جلوگیری خواهد کرد. پلاسما و رانده شدن مذاب به اطراف خود یکی از عوامل مؤثر بر تغیر سطح است [13,12].

میزان تغیر در فشارهای بالاتر از 25 بار تقریباً ثابت بوده و به میزان حدی 0.02 میلی متر میل می‌کند. در این فشارها چگالی ظاهری پودر تقریباً همان چگالی قطعه را دارد و این میزان انقباض ناشی از انقباض مذاب بوده و تغییرات چگالی چندان بر آن اثری ندارد. علاوه بر این افزایش فشار باعث اتصال کامل ابتدا و انتهای حلقه می‌شود بگونه‌ای که در کلیه شرایطی که فشار اعمال شده است، هیچگونه انحناء و بلند شدگی از روی سطح در نمونه‌ها دیده نمی‌شود. این امر نیز نشان از انقباض کمتر قطعه در فشارهای بالاتر دارد.

نکته جالب که از شکل‌های 10 و 11 درک می‌شود، تقاطع دو نمودار در چگالی ظاهری حدود 46% است. در چگالی ظاهری کمتر از 46% تأثیر چگالی ظاهری بر روی عمق نفوذ پر رنگ تر از تأثیر ضریب انتقال حرارتی بر آن است. اما در چگالی ظاهری بالاتر از 46% ضریب انتقال حرارت تأثیر پر رنگ تری دارد. این چگالی ظاهری در فشار تقریبی 7 بار بدست آمده است.

5- بررسی اپتیکی

اغلب میزان گوئی شدگی و صافی سطح رابطه معکوس با یکدیگر دارند. همان‌طور که در شکل 12 نشان داده شده است، رابطه صافی سطح با افزایش چگالی ظاهری بستر پودر، دارای نقطه بهینه‌ای است. در چگالی ظاهری 46.5% (شار 7 بار) کمترین گوئی شدگی و بهترین صافی سطح نتیجه می‌شود.

بالا رفتن فشار باعث خواهد شد تا علاوه بر کم شدن انرژی لیزر، حرکت حوضچه مذاب نیز مشکل تر شود. زیرا به دلیل فشرده شدن پودرها در یکدیگر حرکت ذرات به داخل حوضچه مذاب و چیدمان مجدد آنها مشکل تر خواهد شد [25,21]. این امر باعث بالا رفتن گوئی شدگی سطح پودر می‌شود. اما چگالی ظاهری زیر 47% (شارهای کمتر از 10 بار) باعث خواهد شد تا حجم مذاب تا حدودی کمتر شود. این امر به کاهش گوئی شدگی کمک خواهد نمود.

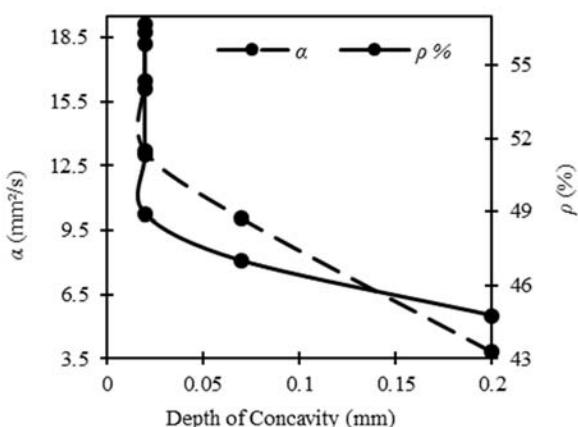


Fig. 11 تغییرات تغیر و انقباض مذاب نسبت به ضریب نفوذ حرارتی و چگالی ظاهری

فلز پایه خواهد داشت و در نتیجه ضریب جذب آن نیز کمتر خواهد بود. مقایسه نمونه‌های تولیدی نشان داد که افزایش عمق نفوذ در فشارهای بالا همگرا به عددی ثابت می‌شود. در واقع بالا بردن فشار تا حدی مؤثر بر کاهش عمق نفوذ و از حدی بالاتر تأثیر چندانی بر تغییرات عمق نفوذ نخواهد داشت. زیرا فشارهای بالاتر تأثیر کمتر بر میزان افزایش چگالی بستر دارد.

شکل 10 تغییرات عمق نفوذ نسبت به ضریب نفوذ حرارتی و چگالی ظاهری پودر را نشان می‌دهد. با افزایش چگالی ظاهری نفوذ حرارتی نیز اضافه شده است. بنابراین انرژی اعمالی به حجم بیشتری از پودر وارد خواهد شد. در نتیجه گرادیان حرارتی بر روی بستر پودر خام نسبت به چگالی ظاهری پایین‌تر، کمتر خواهد بود. این امر باعث شدگی از روی سطح در نتیجه عمق نفوذ کاسته می‌شود.

بررسی پهنهای کل حلقه در نمونه‌های تولیدی نشان می‌دهد که پهنهای کل حلقه با افزایش فشار کاهش می‌یابد و در فشارهای بالا به مقدار حدی 1.8 میلی‌متر میل می‌کند. در واقع این کاهش پهنا تا چگالی ظاهری 49% (شار 25 بار) به صورت خطی است اما در فشارهای بالاتر از آن تغییرات با شبیه کمتری انجام می‌شود و نهایتاً در فشارهای بالاتر به میزان حدی 1.8 میلی‌متر میل می‌کند.

در واقع اعمال چگالی ظاهری بالاتر از 50% تأثیر چندانی بر روی تغییرات پهنهای کل حلقه ندارد. زیرا با افزایش فشار چگالی ظاهری بستر پودر بالا رفته و به میزان چگالی قطعه اصلی نزدیک می‌شود. در چنین شرایطی میزان پودر در واحد سطح بالا رفته و علاوه بر این میزان جذب بستر نیز با افزایش فشار کاسته خواهد شد. در نتیجه با توجه به ثابت بودن توان لیزر، میزان مذاب کاسته شده و پهنهای مذاب نیز کم خواهد شد. در واقع در چگالی ظاهری بالاتر از 50% میزان انقباض قطعات تولید شده به کمترین حالت رسیده و پهنهای قطعات تولید شده با قطر لیزر برابر است.

تأثیر دیگر فشار بر روی هندسه قطعه کاهش تغیر جبهه مذاب با افزایش فشار است، به گونه‌ای که در فشارهای بالا میزان تغیر به صفر میل می‌کند. علت اصلی وجود آمدن تغیر، انقباض مذاب می‌باشد. هرچه چگالی پودر به چگالی مذاب نزدیکتر باشد، انقباض ناشی از ذوب نیز کمتر خواهد بود [24,13]. بنابراین اضافه شدن چگالی باعث کاسته شدن انقباض و در نتیجه کاهش تغیر خواهد شد. علاوه بر این افزایش چگالی ظاهری با اعمال فشار به بستر پودر خام، باعث قفل شدن پودر و در نتیجه جلوگیری از تبخیر پودر با

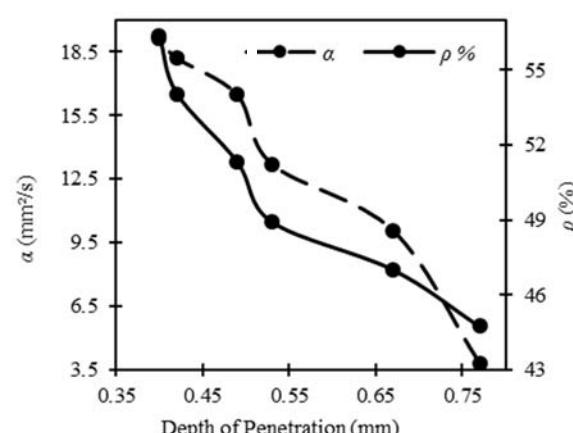


Fig. 10 تغییرات عمق نفوذ نسبت به ضریب نفوذ حرارتی و چگالی ظاهری

شکل 10 تغییرات عمق نفوذ نسبت به ضریب نفوذ حرارتی و چگالی ظاهری

تنظیم شود که این فشار را ایجاد نماید. زیرا در این فشار هوای محبوس در پودر بدون کاهش چشمگیر سیلان پودر می‌تواند از آن خارج شود.

شکل 14 نیز تغییر استحکام نسبت به ضریب نفوذ حرارتی و چگالی ظاهری را نشان می‌دهد. اما در چگالی ظاهری (فشار 7 بار) به دلیل امکان ایجاد چیدمان مجدد ذرات پودر و حرکت حوضچه مذاب، ترک‌های زیر سطحی به وجود نمی‌آید. بعلاوه به دلیل بالا بودن چگالی پستر پودر خام، چگالی ظاهری قطعات تولید شده نیز بالاتر خواهد بود و در نتیجه استحکام قطعات تولید شده بیشتر است.

6- نتیجه گیری

آزمایش‌ها بر روی ضریب نفوذ حرارتی پودر آهن در چگالی ظاهری مختلف انجام شد. نتایج آزمایش حرارتی پودر نشان داد که با افزایش چگالی ظاهری،

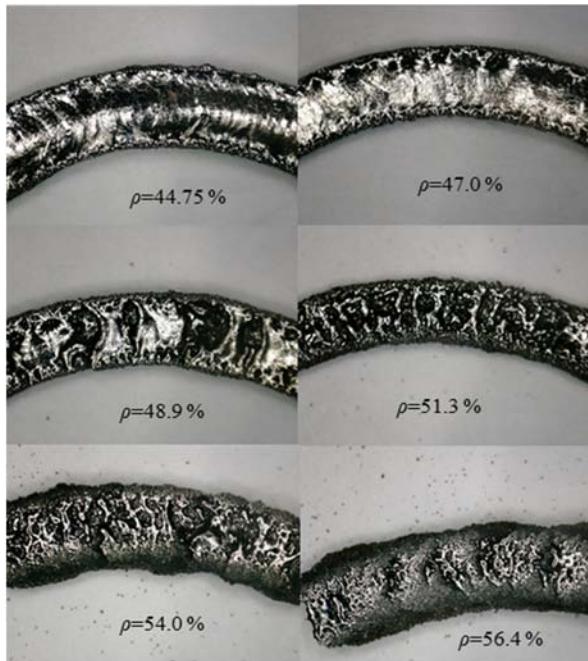


Fig. 13 View of the samples produced at 40X magnification optics
شکل 13 نمای اپتیکی با بزرگ نمایی 40 برابر از نمونه‌های تولید شده

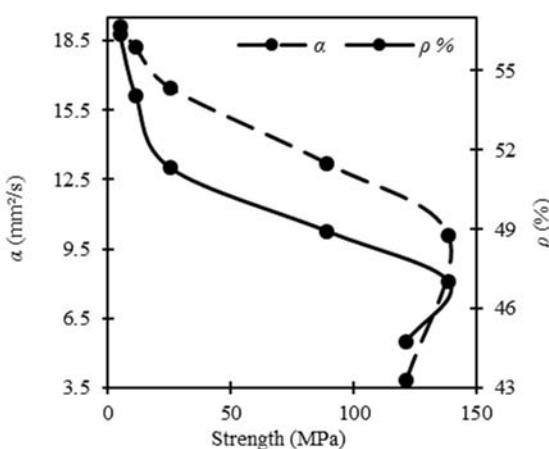


Fig. 14 Variations to the Strength of the thermal diffusivity, density
شکل 14 تغییر استحکام نسبت به ضریب نفوذ حرارتی و چگالی ظاهری

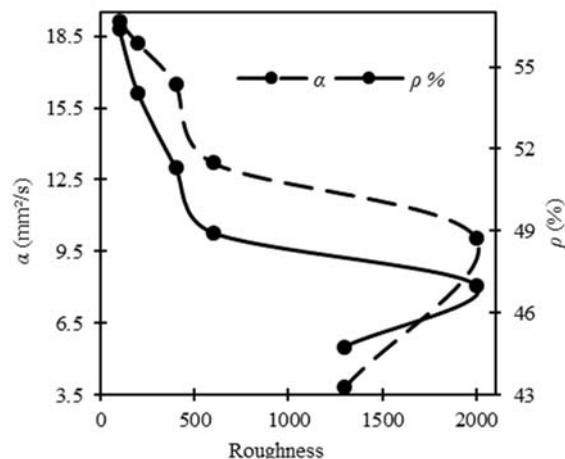


Fig. 12 Variations to the Roughness of the thermal diffusivity, density
شکل 12 تغییرات صافی سطح نسبت به ضریب نفوذ حرارتی و چگالی ظاهری

علاوه بر این بالا رفتن چگالی پستر باعث کاهش انقباض مذاب تولید شده خواهد شد. ولی این میزان فشار آنقدر نیست که باعث قفل شدن ذرات پودر در یکدیگر شود و در نتیجه حوضچه مذاب می‌تواند بر روی سطح حرکت کند. بنابراین کمترین میزان گویی شدگی در چگالی ظاهری (فشار 7 بار) دیده می‌شود. شایان ذکر است در همین فشار بهترین کیفیت سطح نیز قابل مشاهده است.

با توجه به شکل 12، در چگالی ظاهری کمتر از 46٪، تأثیر چگالی ظاهری از انتقال حرارت بیشتر است (مانند شکل‌های 10 و 11). اما با افزایش چگالی ظاهری قطعات این روند معکوس می‌شود. زیرا هرچه اثری اعمالی به پستر کمتر جذب شود، مذاب ایجاد شده کمتر خواهد بود و تعداد ذرات ذوب نشده با اندازه بزرگ‌تر باقی خواهد ماند. در نتیجه صافی سطح کاهش خواهد یافت. اما در چگالی ظاهری کمتر ذوب بیشتر است و در نتیجه صافی سطح بهتر خواهد بود. افزایش چگالی ظاهری تا حدود 46٪ باعث کاهش انقباض مذاب می‌شود. این کاهش انقباض تأثیر مستقیمی در صافی سطح قطعات تولیدی خواهد داشت. اما در چگالی ظاهری بالاتر از 46٪ تأثیر کاهش حجم مذاب به قدری است که توانایی حرکت حوضچه مذاب از آن گرفته خواهد شد. بنابراین مذاب به واسطه کشش سطحی سیال به شکل قطراتی بر روی سطح دیده می‌شوند [26]. شکل گیری این قطرات باعث کم شدن صافی سطح و افزایش گویی شدگی خواهد شد.

5- خواص فیزیکی

نکته قابل توجه بالا رفتن تعداد ترک‌ها زیر سطحی و پایین آمدن استحکام نمونه‌های تولید شده در فشارهای بالا است. زیرا در فشارهای بالا امکان اتصال مهربه‌های مذاب به دلیل عدم سهولت در حرکت حوضچه مذاب سیار ضعیف است و بین هر کدام از اتصالات ترک‌هایی دیده می‌شود که باعث کاهش استحکام قطعه شده است. به این ترتیب نمونه‌های تولید شده در فشارهای بالا از استحکام پایینی برخوردارند. شکل 13 این مطلب را به وضوح نشان می‌دهد.

به این ترتیب قطعات تولید شده در این فشارها علاوه بر صافی سطح مناسب، از استحکام خوبی نیز برخوردارند. بنابراین باید در سیستم‌های تولید سرعت سریع حرکت دورانی و خطی غلتک‌های صاف کننده بستر طوری

$$\alpha \text{ ضریب نفوذ حرارتی (mm}^2/\text{s)}$$

8- مراجع

- [1] A. V. VILLALON, *Electron Beam Fabrication of Injection Mold Tooling with Conformal Cooling Channels*, PhD thesis, North Carolina University, USA, 2005.
- [2] J. P. Kruth, P. Mercelis, J. V. Vaerenbergh, L. Froyen, M. Rombouts, Binding mechanisms in selective laser sintering, selective laser melting, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 11, No. 1 pp. 26-36, 2005.
- [3] M. R. Alkhari, T. Furumoto, T. Ueda, A. Hosokawa, Ryutaratanaka, M. S. A. Aziz, Thermal conductivity of metal powder, consolidated material fabricated via selective laser melting, *Key Engineering Materials*, Vol. 523, pp. 244-249, 2012.
- [4] Gersho, A. Rossencwaig, *Theory of the photoacoustic effect with solids*, in *Applied*, Vol. 47, No.1, pp. 64-69, 1976.
- [5] I. H. Tavman , Effective thermal conductivity of granular porous materials, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 23, No. 2, pp. 169-176, 1996.
- [6] N. Lockmuller, J.Redgrave, L.Kubičák, Measurement of thermal conductivity with the needle, *High Temperatures - High Pressures*, Vols. 36, No. 2, pp. 127-138, 2003.
- [7] F. Albouchi, F. Mzali, S.B.Nasrallah, Measurement of the Effective Thermal Conductivity of Powders Using a Three-Layer Structure, *Porous Media*, Vol. 10, No. 6, pp. 537-549, 2007.
- [8] M. Rombouts, L. Froyen, A. Gusalov, E. Bentefour, C. Glorieux, Photopyroelectric measurement of thermal conductivity of metallic powders, *Applied Physics*, Vol. 97, No. 2, 2005.
- [9] A.Simchi, The role of particle size on the laser sintering of iron powder, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 35, No. 5, pp. 936-948, 2004.
- [10] H. Zhu, J. Fuh, L. Lu, Microstructural evolution in direct laser sintering of Cu-based metal powder, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 11, No. 2, pp. 74-81, 2005.
- [11] Schueren, B. V. der, a. J. Kruth., Powder deposition in selective metal powder sintering, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 1, No. 3, pp. 23-31, 1995.
- [12] H. Zhu, J. Fuh, L. Lu, The influence of powder apparent density on the, *Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, No. 2, pp. 294-298, 2007.
- [13] R. Morgan, C. J. Sutcliffe, W. O'neill, Density analysis of direct metal laser re-melted 316L stainless steel cubic primitives, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 39, No. 4, pp. 1195-1205, 2004.
- [14] N. K. Tolochko, M. K. Arshinov, A. V. Gusalov, V. I. Titov, T. Laoui, L. Froyen, Mechanisms of selective laser sintering, heat transfer in Ti powder, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 9, No. 5, pp. 314-326, 2003.
- [15] C. J. Li, T. W. Tsai, C. C. Tseng, Numerical Simulation for Heat Mass Transfer During Selective Laser Melting of Titanium alloys Powder, in *Laser Assisted Net Shape Engineering, 9th International Conference on Photonic Technologies Proceedings of the LANE*, Fürth, Germany, September 19-22, 2016.
- [16] A. Foroozmehr, M. Badrossamay, E. Foroozmehr, Finite element simulation of selective laser melting process considering optical penetration depth of laser in powder bed, *Materials & Design*, Vol. 89, pp. 255-263, 2016.
- [17] E. Olakanmi, R. Cochrane, K. Dalgarno, A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing microstructure properties, *Progress in Materials Science*, Vol. 74, pp. 401-477, 2015.
- [18] J. Živčák, M. Šarik, R. Hudák, FEA Simulation of Thermal Processes during the Direct Metal Laser Sintering of Ti64 Titanium Powder, *Measurement*, Vol. 94, pp. 893-901, 2016.
- [19] Y. Huang, L. Yang, X. D., Y. Yang, Finite element analysis of thermal behavior of metal powder during selective laser melting, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 104, pp. 146–157, 2016.
- [20] Q. Shia, D. Gua, M. Xiaa, S. Caoa, T. Rong, Effects of laser processing parameters on thermal behavior, melting/solidification mechanism during selective laser melting of TiC/Inconel 718 composites, *Optics & Laser Technology*, Vol. 84, pp. 9-22, 2016.
- [21] D. Gu, Y. Shen, Balling phenomena during direct laser sintering of multi-component Cu-based metal powder, *Alloys Compounds*, Vol. 432, No. 1, pp. 163-166, 2007.

ضریب رسانایی و نفوذ گرمایی نیز بالا می‌رود. اما این بالا رفتن به شکل یک تابع لگاریتمی است که به صورت حدی در چگالی ظاهری نهایی به مقدار استاندارد برای آهن خالص می‌کند.

آزمایش‌های تفجوشی لیزری بر روی بستر پودر با چگالی ظاهری متفاوت نشان داد که قطعات تولیدی در چگالی ظاهری %46.5 (فشار 7 بار) بهترین کیفیت را از خود نشان می‌دهند.

میزان گویی شدگی با افزایش چگالی ظاهری تا حدود 46% کاهش می‌یابد و افزایش بیشتر از آن باعث افزایش گوی شدگی و ترک‌های سطحی می‌شود. در فشارهای بالا امکان اتصال مهره‌های مذاب به دلیل عدم سهولت در حرکت حوضچه مذاب بسیار ضعیف است و بین هر کدام از اتصالات ترک‌هایی دیده می‌شود که باعث کاهش استحکام قطعه شده است.

در چگالی ظاهری کمتر از 46% تأثیر چگالی ظاهری بر روی عمق نفوذ پرنگ‌تر از تأثیر ضریب انتقال حرارت تأثیر پرنگ‌تر دارد.

در چگالی ظاهری بالاتر از 50% میزان انقباض قطعات تولید شده به کمترین حالت رسیده و پهنهای قطعات تولید شده با قطر لیزر برابر است.

آزمایش‌ها نشان داد می‌توان به جای روش پر هزینه و کم بازده ترکیب دانه‌بندی پودر از روش فشرده سازی بستر پودر خام برای بالا بردن کیفیت قطعات تولیدی استفاده نمود. در این روش نیازی به وجود ترکیب پودر با دانه‌بندی خاص و شکل کروی نیست. علاوه بر این نیازی به اضافه کردن ذرات بسیار ریز که ایجاد پلاسمای در حین فرایند می‌کنند نخواهد بود. چون این چگالی بعد از لایه نشانی پودر ایجاد می‌شود، افزایش چگالی تأثیر منفی بر روانروی پودر نیز نخواهد داشت.

بنابراین باید در سیستم‌های تولید سریع، سرعت حرکت دورانی و خطی غلتک‌های صاف کننده بستر طوری تنظیم شود که فشاری در حدود 7 بار را ایجاد نماید. اما این فشار برای پودرهای مختلف متغیر بوده و باید محدوده مناسب آن با تنظیم فشار غلتک به دست آید.

آزمایش‌ها و تحقیقات بیشتر شbahat این رفتار برای جنس‌های مختلف پودر را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر پودرهای با چگالی ظاهری یکسان برای بدست آوردن بهترین خواص قطعات تولیدی، میزان فشار بهینه یکسانی دارند. تحقیقات بیشتر برای تکمیل تر شدن نتایج در دست اقدام است.

7- فهرست عالیم

A	مساحت ناحیه انتقال حرارت (m ²)
C _P	ظرفیت گرمایی ویژه (kJ/(kg K))
H	نرخ انتقال حرارت (kJ/Sec)
h	فاصله بین دو دما (m)
K	ضریب انتقال حرارت جابجایی ((W)/(m K))
m	جرم (kg)
P	فشار (bar)
Q	انرژی حرارتی (W)
t	(Sec) زمان
T	دما (°C)
T _x	دما در نقطه x
V	حجم (m ³)
ρ	چگالی ظاهری (kg/m ³)

علائم یونانی

- [25] N. K. Tolochko, S. E. Mozzharov, I. A. Yadroitsev, T. Laoui, L. Froyen, V. I. Titov, M. B. Ignatiev, Balling processes during selective laser treatment of powders, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 10, No.2, pp. 78-87, 2004.
- [26] J. McWilliams, C. Hysinger, J. J. Beaman, Design of a high temperature process chamber for the selective laser sintering process. Austin : University of Texas at Austin, Solid Freeform Fabrication Symposium, Vol. 3, pp. 110-117, 1992.
- [22] S. A. Fatemi, J. Zamani, Influence of process parameters on layers thickness in steel powder laser sintering, *Mechanical Aerospace*, Vol. 14, pp. 36-39, 2014. (in Persian)
- [23] H. Carslaw, J. C. Jaeger, *Conduction of Heat in Solids*, pp. 256-261, Oxford: Oxford University Press, 1959.
- [24] R. Morgan, C. Sutcliffe, W.O'Neill, Experimental investigation of nanosecond pulsed Nd-YAG laser re-melted pre-placed powder beds, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 7, No. 3, pp. 159-172, 2001.