



بررسی دقت ابعادی و هندسی چاپ سه‌بعدی ماهیچه هوای سرسیلندر موتور ارتقاء یافته TU5+

محمد کامیاب^۱، علیرضا حاجی علی محمدی^{۲*}، حسین رحیمی آسیابارکی^۳، احسان شارخی^۴

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- عضو هیئت‌علمی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۳- عضو هیئت‌علمی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

۴- رئیس اداره تأمین طرح‌ها، شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو)، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: ahajiali@semnan.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۹ بهمن ۱۴۰۲

پذیرش: ۹ مرداد ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

دقت ابعادی و هندسی

ماهیچه ماسه‌ای

درگاه هوا

سرسیلندر

ریخت‌شناسی

چکیده

با توجه به پیشرفت‌های چشمگیر روش‌های ساخت افزایشی در صنایع گوناگون انتظار می‌رود که ساخت افزایشی در صنعت ریخته‌گری سنتی تحولاتی ایجاد کند و آن را به‌گونه‌ای ارتقاء دهد که توسعه سریع، تولید یکپارچه و کم‌هزینه قطعات صنعتی با کارایی بالا و اشکال پیچیده را محقق سازد. فناوری ساخت افزایشی که معمولاً در ساخت قالب و ماهیچه ریخته‌گری به کار می‌رود، می‌تواند به فرایند توسعه محصول جدید سرعت بخشد. در این مقاله، ماهیچه ماسه‌ای درگاه هوا در سرسیلندر یک موتور توسعه‌یافته جدید که با فرایند افشانش چسب ساخته شده است، با ماهیچه ماسه‌ای ساخته‌شده با فرایند جعبه سرد با یکدیگر مقایسه و نتایج اندازه‌گیری ابعادی و هندسی مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که میانگین دقت ابعادی و هندسی در قطعه ساخته‌شده با فرایند افشانش چسب در مقایسه با روش جعبه سرد حدود ۵۰ درصد بهبود یافته است. با این حال نتایج اندازه‌گیری صافی سطح و بررسی ریخت‌شناسی سطح تفاوت چندانی بین این دو فرایند نشان نمی‌دهد؛ اما با توجه به قابل کنترل بودن پارامترها در فرایند چاپ سه‌بعدی می‌توان بهبودهایی در رابطه با کیفیت سطح نیز ایجاد کرد.

Investigation on dimensional and geometrical accuracy of the 3D printed intake sand core of TU5+ new engine cylinder head

Mohamad Kamyab¹, Alireza Hajjalimohammadi^{2*}, Hossein Rahimi Asiabaraki³, Ehsan Sharokhi⁴

1- PhD Candidate, Department of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

2- Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

3- Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

4- Head of Procurement Department, IranKhodro Powertrain Company (IPCO), Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: ahajiali@semnan.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 18 February 2024

Accepted: 30 July 2024

Keywords:

Dimensional and Geometrical Accuracy

Sand Core

Intake Port

Cylinder Head

Morphology

Abstract

Due to the significant advancements in additive manufacturing methods in various industries, additive manufacturing is expected to create changes in the traditional foundry industry and improve it so that it can grow rapidly. Fast, integrated and low-cost manufacturing for high-performance industrial parts and complex shapes. Additive manufacturing technology, commonly used in sand mold and core making, can speed up the new product development process. In this article, by measuring the sand body of the intake port in the cylinder head of the newly developed engine produced by the binder injection process, it was compared with the sand body produced by the cold box process and the results were analyzed and evaluated. The results show that the average of dimensional and geometrical accuracy of the produced part by the binder jetting process are improved about 50 percent compared to the cold mechanical method. However, the results of roughness measurement and surface morphology do not show much difference between these two processes, but due to the ability to control parameters in the 3D printing process, it is possible to perform improvement in surface quality.

Please cite this article using:

Kamyab M, Hajjalimohammadi A, Rahimi Asiabaraki H, Sharokhi E. Investigation on dimensional and geometrical accuracy of the 3D printed intake sand core of TU5+ new engine cylinder head. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Jul 22;11(5):1-12. doi: 10.22034/IJME.2024.444372.1931 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

ساخت افزایشی^۱ که معمولاً به‌عنوان چاپ سه‌بعدی^۲ شناخته می‌شود، گروهی از فناوری‌های نوظهور است که به‌طور مستقیم ساخت محصول سه‌بعدی از یک مدل دیجیتال را ممکن می‌سازد. در حال حاضر تولید قطعات با کمک فرایندهای ساخت افزایشی در فضای سه‌بعدی و با استفاده از بستر پودر طرفداران زیادی در صنعت پیدا کرده است. در دهه‌های اخیر، با معرفی فرایندهای مختلف که از فناوری ساخت افزایشی بهره می‌گیرند، صنعت ریخته‌گری متحول شده است. فرایند افشانش چسب، یکی از فرایندهای مهم در ساخت افزایشی است که در حال حاضر از پرکاربردترین فناوری‌های ساخت افزایشی در تولید قالب ماسه‌ای می‌باشد. مطالعات نشان داده است که استفاده از فرایند افشانش چسب برای ساخت قالب‌های ماسه‌ای در مراحل توسعه محصول و مراحل نمونه‌سازی قطعات مقرون‌به‌صرفه است و این‌گونه قالب‌ها بهتر از قالب‌های ساخته‌شده در سایر فرایندهای مرتبط به ساخت قالب که در ریخته‌گری سنتی مرسوم است عمل می‌کنند [۱، ۲]. برخلاف رویکرد مرسوم در ریخته‌گری قطعات فلزی در قالب، چاپ سه‌بعدی، فناوری دیجیتال و فناوری‌های جدید اتصال مواد را با یکدیگر ترکیب می‌کند تا امکان ساخت آزادانه و بدون استفاده از قالب‌های گران‌قیمت را فراهم کند. یک ساختار آزاد و بدون نیاز به الگو می‌تواند انعطاف در طراحی را افزایش دهد. در جایی که هزینه تولید یک قطعه ریخته‌گری با قالب پیچیده و پرهزینه است، استفاده از شیوه‌های جایگزین مانند ساخت قطعات به روش ریخته‌گری بدون الگو (PCM) آزادی عمل بسیار زیادی که مورد نیاز در طرح‌های توسعه‌ای است را فراهم می‌کند [۳، ۴].

چنگ و همکاران [۲]، با استفاده از چاپ در مقیاس خاکستری و توصیف الگوی مهاجرت مایع چسب در هنگام فرایند چاپ قالب ماسه‌ای سه‌بعدی، پارامترهای ساخت افزایشی از جمله اندازه ذرات را در روش افشانش چسب بررسی کردند. در مطالعه آن‌ها کوچک‌ترین اندازه ذرات ۹-۱۳ میکرومتر می‌باشد و تأثیر اصطکاک بیشتر از سایر پارامترها بود، به‌طوری‌که چسب به‌طور مؤثرتری بین ذرات حفظ می‌شود. برعکس، در اندازه ذرات بزرگ‌تر، تخلخل بیشتر از گروه اول است. این تخلخل افزایش یافته با کاهش اصطکاک چسب بین ذرات مطابقت دارد و در نتیجه چسب کمتری بین ذرات باقی می‌ماند. نتایج اندازه‌گیری ابعادی آن‌ها نشان داد که اشباع بیشتر مایع چسب با کاهش قابل توجه خطای ابعادی، استحکام و شکل‌پذیری بهتری را ایجاد می‌کند.

هارتمن و همکاران [۵]، محدودیت‌های بالقوه فناوری افشانش چسب را به‌ویژه در مورد کیفیت سطح با استفاده از ترکیبی از افشانش چسب و ریخته‌گری برای ساخت قطعات فلزی مورد بررسی قرار دادند. آشکارترین پدیده سطحی به اصطلاح اثر پله‌پله شدن^۳ سطح قطعات در سطوح شیب‌دار است. آن‌ها نشان دادند که میزان اشباع چسب با تغییر اندازه قطرات و همچنین مقدار ریزش آن‌ها مدیریت می‌شود و مهاجرت کنترل‌شده‌ای از چسب بین ذرات ماسه ایجاد می‌کند. این کار رویکرد جدیدی را در ساخت قالب‌ها و ماهیچه‌های ماسه سیلیسی^۴ با استفاده از یک چسب آلی اعمال کرد. آن‌ها عوامل مؤثر بر پله‌پله شدن سطح را ضخامت لایه، شیب سطح، مواد پودری و محدوده اندازه ذرات و نحوه توزیع معرفی کردند.

هودر و همکاران [۶]، ماسه مخصوص چاپ سه‌بعدی و ماسه ریخته‌گری سنتی یا ماسه "غیراستاندارد" را برای استفاده در یک سیستم چاپ سه‌بعدی با هم مقایسه کردند. آن‌ها از چهار ماسه مختلف برای ساخت قالب‌های ماسه‌ای با چاپ سه‌بعدی استفاده کردند. سه نوع از آن‌ها شامل ماسه 1 SIL و 3 SIL از صنایع SIL در آلبرتا (کانادا) و شن و ماسه کنترل یا M-Flex از سازنده چاپگرهای سه‌بعدی ExOne (ایالات متحده آمریکا) خریداری شدند. ماسه نوع چهارم از ریخته‌گری نوروود (آلبرتا) که قبلاً در قالب‌های تولیدی از آن‌ها استفاده شده است با نسبت مساوی 1 SIL و 3 SIL به‌عنوان ماسه بازیافتی به دست آمد. در ماسه‌ای به نام ماسه کنترل که از شرکت ExOne خریداری شد، ذرات از نظر ریخت‌شناسی دارای زاویه حاده و اندازه نسبتاً یکنواختی هستند که هر دوی این ویژگی‌ها برای چاپ سه‌بعدی ایده‌آل می‌باشد. ذرات ماسه 1 SIL و 3 SIL تیزتر از ماسه کنترل هستند و دارای توزیع گسترده‌تری از اندازه‌ها می‌باشند؛ اما ذرات ماسه 3 SIL بزرگ‌تر از ذرات ماسه 1 SIL هستند. ذرات ماسه بازیابی شده که حاوی 1 SIL و 3 SIL هستند آغشته به چسبی که از فرایند ساخت قالب‌های قبلی پوشانده شده‌اند می‌باشد که این موضوع باعث افزایش زبری سطح ماسه شده و در نتیجه اصطکاک را افزایش می‌دهد که برای استفاده در فرایند چاپ سه‌بعدی مناسب نمی‌باشد.

¹ Additive Manufacturing (AM)

² 3D-Printing

³ Stair-Step

⁴ Silica Sand

گاورونوا و همکاران [۷]، به مقایسه تأثیر قالب‌گیری با فناوری بدون پخت^۱ فوران و روش چاپ سه‌بعدی بر کیفیت سطح قطعات ریخته‌گری شده آلیاژ آلومینیوم حاصل از قالب‌ها و ماهیچه‌های ماسه‌ای پرداختند. آن‌ها برای ساخت ماهیچه‌های بدون پخت فوران از نوعی ماسه سیلیسی در دو اندازه متوسط که از منطقه‌ای به نام بیالاگورا در لهستان تأمین شده استفاده کردند. ماسه‌های سیلیسی مورد استفاده با نام‌های تجاری BG 21 و BG 27 شناخته می‌شوند. میانگین اندازه دانه ماسه که با نام تجاری BG 21 تأمین شده $0.21+0.02$ mm بوده و ماسه BG 27 با میانگین اندازه دانه $0.27+0.02$ mm می‌باشد که عمدتاً برای فناوری‌های با رزین‌های آلی استفاده می‌شود. آن‌ها علی‌رغم این واقعیت که ماسه با میانگین اندازه دانه 0.21 mm بیشتر برای مخلوط‌های ماسه آلوین استفاده می‌شود این نوع ماسه را انتخاب کردند، زیرا معرف اندازه متوسط بین گرانولومتری برای فناوری فوران و فناوری چاپ سه‌بعدی ماسه است.

هاسبروک و همکاران [۸]، با بررسی تolerانس ابعادی، خواص مکانیکی، ریزساختار و عیوب موجود در قطعات ریخته‌گری ساخته‌شده برای یک هندسه یکسان با هر دو فرایند قالب‌گیری سنتی ماسه سبز آلوین و فرایند قالب‌گیری ماسه سیلیسی به‌وسیله فرایند افشانش چسب، قطعات ریخته‌گری شده توسط هر دو نوع قالب را باهم مقایسه نمودند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که قالب‌های ماسه‌ای ساخته‌شده با فرایند افشانش چسب، قطعاتی با دقت ابعادی و تolerانس‌های یکسان یا بهتری را نسبت به قالب‌های ماسه سبز آلوین سنتی تولید می‌کنند؛ اما قطعات ماسه سبز آلوین به‌طور متوسط به میزان تقریبی ۱ میکرومتر کیفیت سطح بهتری نسبت به قالب‌های تولیدشده با فرایند افشانش چسب داشتند.

از آن‌جا که ویژگی‌های هندسی و ابعادی مرتبط با درگاه ورودی سرسیلندر موتور تأثیر مستقیم بر راندمان احتراق دارد [۹] و از طرفی با توجه به اینکه در کارهای انجام شده توسط دیگران کمتر به موضوع دقت ابعادی و هندسی در قطعات تولید شده با روش چاپ سه‌بعدی ماسه توجه شده است، بنابراین در این مقاله به مقایسه دقت ابعادی و هندسی قطعات تولید شده با روش چاپ سه‌بعدی ماسه و روش قالب‌گیری پرداخته شده است.

۲- مواد و روش‌ها

برای داشتن یک مقایسه کلی از دقت ابعادی و هندسی قطعات ماهیچه ماسه‌ای، از یک محصول واحد استفاده شده است که با دو فرایند ماهیچه‌گیری با جعبه سرد و ساخت ماهیچه با روش افشانش چسب ساخته شده‌اند. در شکل ۱ تصاویر گرفته شده با میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی ۴۰ برابر از قطعات شکسته شده ماهیچه هوای سرسیلندر موتور TU5+ که با هر دو نوع روش تولید شده‌اند آورده شده است. در شکل ۱-الف ماهیچه تیره‌رنگ با روش افشانش چسب و ماهیچه با رنگ روشن به روش جعبه سرد تولید شده است.

در ماهیچه تولید انبوهی ساخته‌شده با روش ماهیچه سرد (رنگ روشن) از ماسه سیلیکاتی با $AFS : 48 (0.32-0.45 \text{ mm})$ و چسب پایه فنول - اورتان استفاده شده که با گاز آمین سخت شده است. در ماهیچه نمونه‌سازی شده با روش افشانش چسب (رنگ تیره) از ماسه سیلیکاتی با $AFS : 80 (0.18-0.25 \text{ mm})$ و چسب پایه فوران استفاده شده است که از یک اسید و الکل تشکیل شده است و تشکیل پلیمر می‌دهد. جدول ۱ پارامترهای ورودی کنترل‌شده برای هر دو قطعه تولیدی با روش افشانش چسب و روش جعبه سرد را نمایش می‌دهد.

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌گردد در قطعه ساخته‌شده با روش جعبه سرد، اندازه ذرات بزرگ‌تر و تخلخل آن بیشتر از قطعه تولیدشده با فرایند افشانش چسب می‌باشد؛ اما برخلاف نتایج حاصل از مطالعه چنگ و همکاران [۲]، نتایج اندازه‌گیری ابعادی نشان داد که اشباع بیشتر مایع چسب باعث افزایش قابل توجه خطای ابعادی شده و استحکام کمتری را ایجاد می‌کند که این اختلاف در نتیجه‌ی تغییر فرایند ساخت می‌تواند باشد. این موضوع نشان می‌دهد که به‌طور کلی با تغییر پارامترهای ورودی، استحکام و دقت ابعادی در روش فرایند افشانش چسب، می‌تواند در هر قطعه تحت کنترل باشد اما در فرایند قالب‌گیری متغیرهای فرایند چندان تحت کنترل نیستند. شکل ۲ ماهیچه هوای تولیدشده سرسیلندر موتور TU5+ با روش افشانش چسب را نمایش می‌دهد.

¹ No-Bake



شکل ۱ الف) مقایسه میکروسکوپی یک ماهیچه‌های هوای تولیدشده سرسیلندر موتور TU5+، ب) ماهیچه بزرگنمایی شده روش افشانش چسب ج) ماهیچه بزرگنمایی شده روش جعبه سرد

جدول ۱ پارامترهای ورودی کنترل شده برای هر دو قطعه تولیدی با روش افشانش چسب و روش جعبه سرد

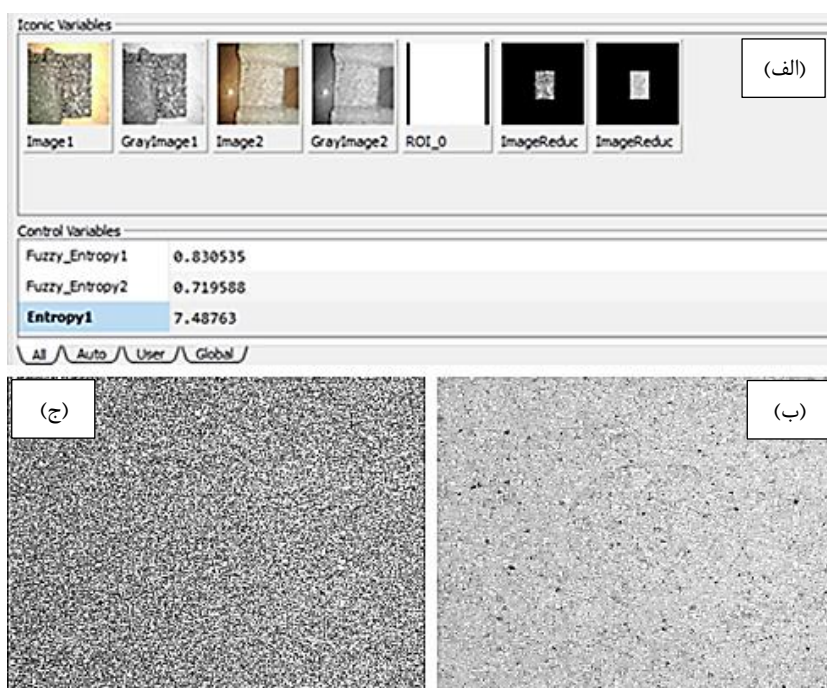
ردیف	پارامتر کنترلی	قطعه تولیدی با روش جعبه سرد	قطعه تولیدی با روش افشانش چسب
۱	اندازه ذرات	۴۵۰-۳۲۰ μm	۲۵۰-۱۸۰ μm
۲	ضخامت لایه	---	۰/۴ mm
۳	مقدار چسب	۰/۵ wt%	۰/۳ wt%
۴	استحکام کششی	۱/۳ MPa	۱/۸ MPa



شکل ۲ ماهیچه هوای تولیدشده سرسیلندر موتور TU5+ با روش افشانش چسب

بررسی مقایسه‌ای مبتنی بر الگوی سطح با تطبیق تصاویر ماهیچه‌های هوای تولیدشده سرسیلندر موتور TU5+ و تجزیه و تحلیل ریخت‌شناسی سطح برای هر دو قطعه تولیدشده با فرایند افشانش چسب و ماهیچه هوا تولیدشده با روش جعبه سرد، با استفاده از روش پردازش تصویر انجام شده است. پردازش تصویر در تشخیص عیوب ابعادی قطعات نیز کاربرد دارد [۱۰]. شکل ۳ تجزیه و تحلیل ریخت‌شناسی سطح برای هر دو قطعه تولیدشده با روش افشانش چسب و ماهیچه هوا تولیدشده با روش جعبه سرد و همچنین تصاویر پردازش شده ماهیچه‌های هوای تولیدی را نمایش می‌دهد.

در پیش‌پردازش تصویر، گاهی اوقات تصاویر تحت تأثیر ابهاماتی قرار می‌گیرند، به طوری که تشخیص جزئیات اشیاء دشوار است. از این رو عملگرهای معمولی تشخیص جزئیات می‌توانند نتایج غیرقابل اعتمادی را ارائه دهند، بنابراین استفاده از روش‌های فازی ضروری است. در این فرایند ادامه کار با استفاده از واگرایی فازی و کمی‌سازی آنتروپی برای مقایسه تصاویر مقیاس خاکستری قابل ارائه می‌باشد.



شکل ۳ الف) تجزیه و تحلیل ریخت‌شناسی سطح برای هر دو قطعه تولیدشده، ب) تصویر پردازش شده ماهیچه هوا با روش افشانش چسب، ج) تصویر پردازش شده ماهیچه هوا با روش جعبه سرد

عملگر آنتروپی (آشفتگی) خاکستری هیستوگرام فرکانس‌های نسبی مقادیر خاکستری را در تصویر ورودی ایجاد می‌کند و از روی این فرکانس‌ها آنتروپی و ضریب ناهمسانگردی را برای هر منطقه از مناطق مطابق فرمول‌های ۱ و ۲ محاسبه می‌نماید:

$$Entropy = - \sum_{i=0}^{255} rel[i] * \log_2(rel[i]) \quad (1)$$

$$Anisotropy = \frac{\sum_{i=0}^k rel[i] * \log_2(rel[i])}{Entropy} \quad (2)$$

که در اینجا، $rel[i]$ هیستوگرام فرکانس‌های نسبی مقدار خاکستری، i مقدار خاکستری تصویر ورودی (۰ تا ۲۵۵) و K کمترین مقدار خاکستری با مجموع $rel[i] \geq 0.5$ است.

برای محاسبه آنتروپی فازی، تصویر به عنوان یک مجموعه فازی در نظر گرفته می‌شود. آنتروپی فازی معیاری است از میزان تقریب تصویر به یک تصویر سفید یا سیاه که به صورت فرمول‌های ۳ و ۴ تعریف می‌شود:

$$H(X) = \frac{1}{M.N.ln2} \sum_l T_e(l)h(l) \quad (3)$$

$$T_e = -\mu(l)ln\mu(l) - (1 - \mu(l))ln(1 - \mu(l)) \quad (4)$$

که در آن $M \times N$ اندازه تصویر، $h(l)$ هیستوگرام تصویر و $u(x(m,n))$ یک تابع عضویت فازی است که مجموعه فازی را تعریف می‌کند.

برای اندازه‌گیری کیفیت سطح ماهیچه هوای تولیدشده سرسیلندر موتور TU5+ با روش افشانش چسب و همچنین ماهیچه هوای تولیدشده سرسیلندر موتور TU5+ با روش جعبه سرد از دستگاه زبری‌سنج مطابق با شکل ۴ استفاده شد. با توجه به هندسه قطعه امکان اندازه‌گیری صافی سطح در هر محدوده دلخواهی امکان‌پذیر نبوده است و این اندازه‌گیری‌ها صرفاً در شیارهای موجود در ریشه ماهیچه‌ها انجام شده است که به لحاظ شیب و هندسه شرایط یکسانی دارند. با توجه به اینکه در سطوح شیب‌دار قطعات تولیدشده با روش افشانش چسب به دلیل اثر پله‌پله شدن کیفیت سطح قطعات می‌تواند تحت‌الشعاع قرار بگیرد با وجود اینکه ماسه استفاده‌شده در فرایند افشانش چسب با دانه‌بندی ریزتری انتخاب شده است اما نتایج اندازه‌گیری کیفیت سطح شرایط نسبتاً یکسانی را در مقایسه با فرایند جعبه سرد نشان می‌دهد.



شکل ۴ اندازه‌گیری صافی سطح Rz ماهیچه هوای تولیدشده (الف) با روش جعبه سرد، (ب) با روش افشانش چسب

اندازه‌گیری سه‌بعدی و تهیه فایل ابر نقاط با استفاده از خدمات اسکن سه‌بعدی موجود در شرکت آرمان سنجش گستر و با دستگاه اسکنر تک دوربین ۲ مگاپیکسل مجهز به فناوری نور آبی^۱ کمپانی Zeiss Optotechnik برای هر دو قطعه ساخته‌شده با روش جعبه سرد و افشانش چسب انجام شده است. شکل ۵ تصویربرداری سه‌بعدی ماهیچه هوای تولیدشده سرسیلندر موتور TU5+ با روش افشانش چسب را نمایش می‌دهد.



شکل ۵ تصویربرداری سه‌بعدی ماهیچه هوای تولیدشده سرسیلندر موتور TU5+ با روش افشانش چسب

^۱ Blue LED

به دلیل اینکه در فرایند اسکن سه‌بعدی با تجهیزات مذکور نیاز به استفاده از پودر اکسید تیتانیوم و الکل جهت ایجاد پوشش بر روی ماهیچه‌ها با روش اسپری کردن است؛ لذا از قطعه آسیب‌دیده که دو درگاه وسطی آن سالم مانده است در تهیه ابر نقاط قطعه تولیدشده با روش افشانش چسب استفاده شده است.

پس از تهیه فایل ابر نقاط با فرمت STL از قطعات ساخته‌شده با روش جعبه سرد و افشانش چسب فایل‌های طراحی سه‌بعدی و فایل ابر نقاط هر دوی این قطعات با استفاده از نرم‌افزار Creo مطابق شکل ۶ هم‌راستا و مقایسه ابعادی شده است.



شکل ۶ مقایسه کلی ابرنقاط ماهیچه‌های هوای تولیدشده سرسیلندر TU5+ با مدل‌های سه‌بعدی طراحی‌شده (الف) روش جعبه سرد و (ب) روش افشانش چسب

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌گردد قطعه تولیدشده با روش افشانش چسب به‌صورت کلی نسبت به قطعه ساخته‌شده با روش ماهیچه سرد تطابق بیشتری با مدل طراحی‌شده دارد که عدم انطباق بیشتر در قطعه تولیدشده با روش ماهیچه سرد به دلیل خطاهای سیستم راهنمای قالب، جفت نشدن صحیح قالب و فرسوده‌شدن سریع قالب‌ها در این روش به دلیل سایش در اثر شوت شدن با فشار زیاد در قالب است.

شکل ۷-الف وضعیت ماهیچه هوای ساخته‌شده در قالب ریژه سرسیلندر موتور TU5+ را نشان می‌دهد که در همان فرایند مشابه با قطعات تولید انبوه تولید شده است. شکل ۷-ب قطعه تولیدشده با ماهیچه هوای ساخته‌شده در قالب ریژه سرسیلندر موتور TU5+ را نشان می‌دهد که پس از تولید کد ردیابی آن حک شد و پس از ماشینکاری در آزمایشگاه تست جریان شرکت ایپکو مورد آزمون قرار خواهد گرفت و وضعیت آن با قطعات جاری خط تولید مقایسه و بهبودهایی که در طراحی و ساخت ایجاد شده است گزارش خواهد شد.



(ب)

(الف)

شکل ۷ تصاویر قالب سرسیلندر و سرسیلندر تولید شده الف) ماهیچه هوا تولید شده با روش افشانش چسب (ماهیچه تیره‌رنگ سمت چپ) و ب) سرسیلندر ریخته‌گری شده موتور TU5+ با ماهیچه هوا تولید شده با روش افشانش چسب

۳- نتایج و بحث

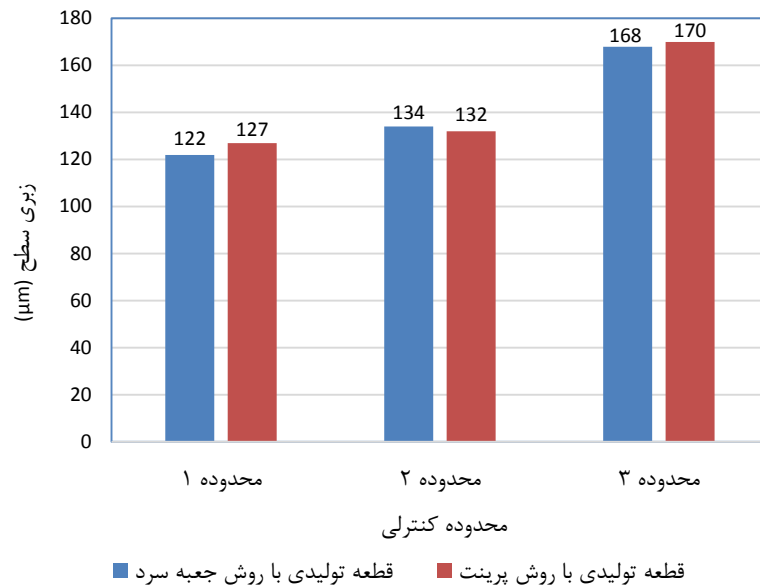
استفاده از فناوری پردازش تصویر می‌تواند برای مقایسه کیفیت سطح مورد استفاده قرار گیرد. جدول ۲ نتایج تجزیه و تحلیل ریخت‌شناسی سطح برای هر دو قطعه ماهیچه هوای تولید شده سرسیلندر موتور TU5+ با روش افشانش چسب و روش جعبه سرد را نمایش می‌دهد.

جدول ۲ نتایج تجزیه و تحلیل ریخت‌شناسی سطح برای هر دو قطعه تولیدی با روش افشانش چسب و روش جعبه سرد

ردیف	متغیر کنترلی	قطعه تولیدی با روش جعبه سرد	قطعه تولیدی با روش افشانش چسب
۱	ناهمسانگردی	۰/۵۰۵۱۳۸	۰/۵۲۲۵۷
۲	آشفتگی	۶/۴۸۷۶۳	۷/۴۸۷۶۳
۳	آشفتگی فازی	۰/۸۳۰۵۳۵	۰/۷۱۹۵۸۸

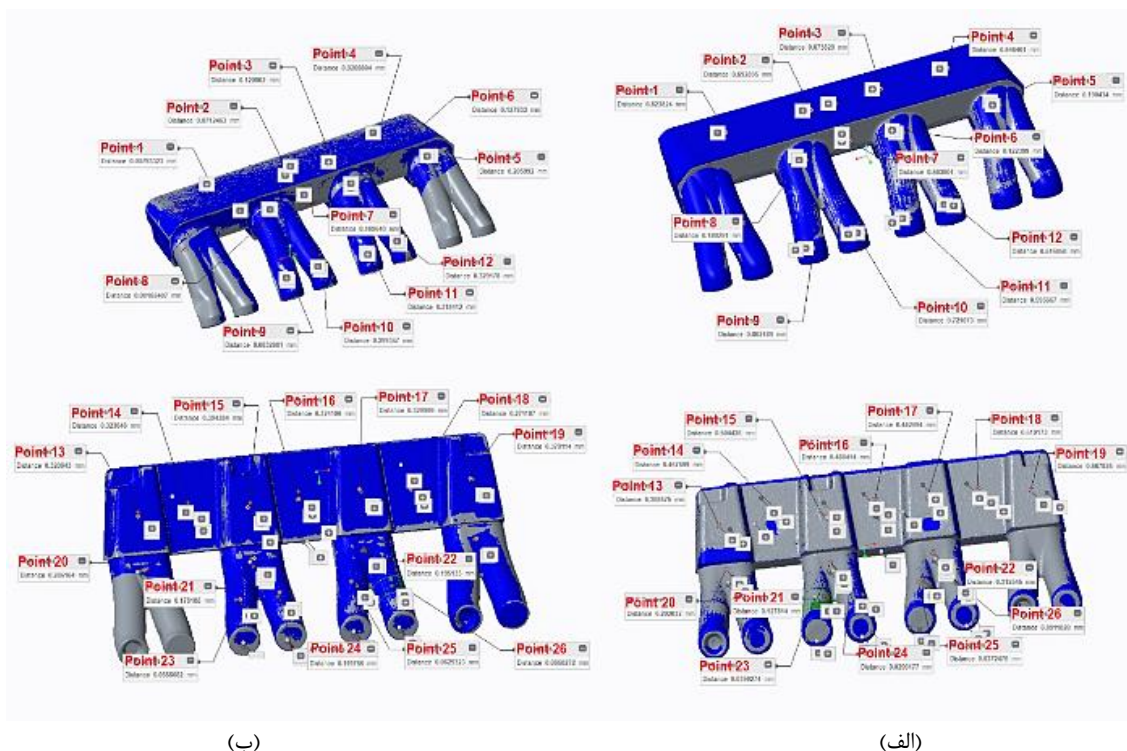
هر چند عملگرهای ناهمسانگردی و آشفتگی اختلاف چندانی بین کیفیت سطح قطعه تولید شده با فرایند افشانش چسب در مقایسه با قطعه تولید شده با فرایند جعبه سرد نشان ندادند اما نتایج حاصل از عملگر آشفتگی فازی می‌تواند به خوبی نشان‌دهنده کیفیت سطح ماهیچه ماسه‌ای ساخته شده باشد.

همان‌طور که هارتمن و همکاران [۵]، آشکارترین پدیده سطحی مؤثر بر کیفیت سطح را اثر پله‌پله شدن سطح قطعات در سطوح شیب‌دار معرفی کردند. اندازه ذرات ماسه مورد استفاده در ساخت ماهیچه نیز مستقیماً بر روی کیفیت سطح ماهیچه تولید شده اثر می‌گذارد؛ اما با توجه به اینکه کیفیت سطح شیب‌دار قطعات تولید شده با روش افشانش چسب به دلیل اثر پله‌پله شدن می‌تواند تحت تأثیر قرار گیرد نمی‌توان انتظار داشت استفاده از ماسه با دانه‌بندی ریزتر (در محدوده این پژوهش) در فرایند افشانش چسب کیفیت سطح بهتری نسبت به روش‌های قالب‌گیری حاصل شود. نتایج اندازه‌گیری کیفیت سطح در شکل ۸ نشان می‌دهد با وجود اینکه ماسه استفاده شده در فرایند افشانش چسب با دانه‌بندی ریزتری انتخاب شده است اما کیفیت سطح قطعات چاپ شده شرایط نسبتاً یکسانی را در مقایسه با فرایند جعبه سرد دارد. این بدان معنی است که فرایند تولید یک عامل مهم در ایجاد کیفیت سطح مطلوب در ماهیچه ساخته شده می‌باشد؛ به نحوی که وجود لایه‌های ماسه در روش چاپ سه‌بعدی خود می‌تواند عامل کاهش کیفیت سطح باشد که نتیجه آن به صورت اثر پله‌پله شدن نمود پیدا می‌کند.



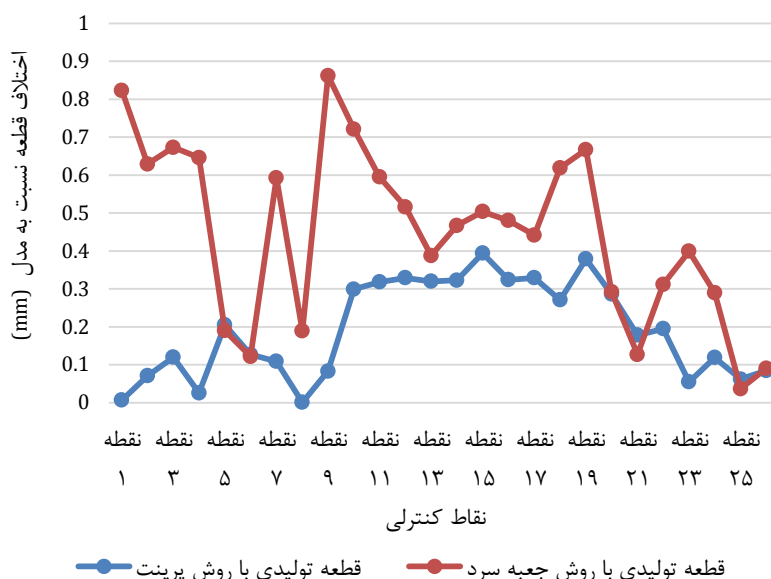
شکل ۸ نتایج تجزیه و تحلیل کیفیت سطح برای هر دو قطعه تولیدی با روش افزایش چسب و با روش جعبه سرد

نتایج اندازه‌گیری اختلاف ابعادی روی نقاطی از قطعه ماهیچه هوا که حساسیت بیشتری دارد در شکل ۹ آورده شده است.



شکل ۹ اختلاف اندازه ابر نقاط ماهیچه‌های هوای تولید شده سرسیلندر موتور TU5+ با مدل‌های سه‌بعدی طراحی شده در نقاط مختلف (الف) روش جعبه سرد و (ب) روش افزایش چسب

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود اختلاف ابعادی و تفاوت هندسی نقاط اندازه‌گیری شده با مدل طراحی شده در فرایند افزایش چسب کمتر از فرایند جعبه سرد می‌باشد.



شکل ۱۰ مقایسه اختلاف نقاط روی ماهیچه تولیدشده با مدل طراحی شده

قطعات تولیدشده با روش افشانش چسب به صورت کلی نسبت به قطعه ساخته شده با روش ماهیچه سرد تطابق بیشتری با مدل طراحی شده دارد. از آنجاکه پارامترهای ساخت در فرایند افشانش چسب بیشتر با متغیرهای عددی سروکار دارند، از طرفی هندسه قالب و پارامترهای تولید در قالب ماهیچه غیرقابل تغییر هستند، بنابراین کنترل و پایش پارامترهای روش افشانش چسب می‌تواند به دقت ابعادی و هندسی بیشتری منجر شود که در قطعاتی مانند ماهیچه درگاه هوای سرسیلندر از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. در جدول ۳ این نقاط برای هر دو قطعه که در شکل ۱۰ نمایش داده شده، به صورت نظیر به نظیر مقایسه شده است.

جدول ۳ اختلاف نقاط روی ماهیچه تولیدشده با مدل طراحی شده به mm

ردیف	نقطه کنترلی	قطعه تولیدی با روش افشانش چسب	قطعه تولیدی با روش جعبه سرد
۱	نقطه ۱	۰/۰۰۷	۰/۸۲۳
۲	نقطه ۲	۰/۰۷۱	۰/۶۹۲
۳	نقطه ۳	۰/۱۲۰	۰/۶۷۳
۴	نقطه ۴	۰/۰۲۶	۰/۶۴۶
۵	نقطه ۵	۰/۲۰۵	۰/۱۹۰
۶	نقطه ۶	۰/۱۲۷	۰/۱۲۲
۷	نقطه ۷	۰/۱۰۹	۰/۵۹۳
۸	نقطه ۸	۰/۰۰۱	۰/۱۸۹
۹	نقطه ۹	۰/۰۸۳	۰/۸۶۲
۱۰	نقطه ۱۰	۰/۲۹۹	۰/۷۲۱
۱۱	نقطه ۱۱	۰/۳۱۸	۰/۵۹۵
۱۲	نقطه ۱۲	۰/۳۲۹	۰/۵۱۶

ادامه جدول ۳

ردیف	نقطه کنترلی	قطعه تولیدی با روش افشانش چسب	قطعه تولیدی با روش جعبه سرد
۱۳	نقطه ۱۳	۰/۳۲۰	۰/۳۸۸
۱۴	نقطه ۱۴	۰/۳۲۳	۰/۴۶۷
۱۵	نقطه ۱۵	۰/۳۹۴	۰/۵۰۴
۱۶	نقطه ۱۶	۰/۳۲۴	۰/۴۸۰
۱۷	نقطه ۱۷	۰/۳۲۹	۰/۴۴۲
۱۸	نقطه ۱۸	۰/۲۷۱	۰/۶۱۹
۱۹	نقطه ۱۹	۰/۳۷۹	۰/۶۶۷
۲۰	نقطه ۲۰	۰/۲۸۶	۰/۲۹۲
۲۱	نقطه ۲۱	۰/۱۷۸	۰/۱۲۷
۲۲	نقطه ۲۲	۰/۱۹۵	۰/۳۱۲
۲۳	نقطه ۲۳	۰/۰۵۵	۰/۳۹۹
۲۴	نقطه ۲۴	۰/۱۱۹	۰/۲۹۰
۲۵	نقطه ۲۵	۰/۰۶۲	۰/۰۳۷
۲۶	نقطه ۲۶	۰/۰۸۵	۰/۰۹۱

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی ابعادی و هندسی ماهیچه ماسه‌ای درگاه هوای تولیدشده با روش جعبه سرد (مربوط به تولید جاری سرسیلندر موتور TU5) و ماهیچه ساخته شده با روش افشانش چسب (مربوط به سرسیلندر موتور توسعه یافته TU5+) پرداخته شد. با مقایسه این دو روش با یکدیگر، تجزیه و تحلیل نتایج اندازه گیری ابعادی و هندسی ارائه گردید. مهم ترین نتایج حاصل از پژوهش به شرح ذیل می باشد:

- به طور کلی کیفیت سطح و دقت ابعادی در فرایندهای مبتنی بر چاپ ماسه در مقایسه با فرایندهای قالب گیری بهتر است؛ اما اثر پله پله شدن باعث می شود که در سطوح شیب دار این بهبود با اختلاف کمتری ظاهر شود و بعضاً نتایج برعکس نیز مشاهده گردد.
- فرایند افشانش چسب در مقایسه با فرایند جعبه سرد می تواند منجر به استحکام و دقت ابعادی بهتری شود به طوری که افزایش اشباع چسب تا حد زیادی می تواند این مزیت را همچنان حفظ نماید بطوری که میانگین دقت ابعادی و هندسی در قطعه ساخته شده با فرایند افشانش چسب در مقایسه با روش جعبه سرد حدود ۵۰ درصد بهبود یافته است.
- هر چند در استفاده از فناوری پردازش تصویر عملگرهای ناهمسانگردی و آشفتگی اختلاف چندانی بین کیفیت سطح قطعه بیان نمی کنند، اما نتایج حاصل از عملگر آشفتگی فازی می تواند به خوبی نشان دهنده کیفیت سطح ماهیچه ماسه‌ای ساخته شده با فرایند افشانش چسب باشد به نحوی که نتایج حدود ۱۵ درصد بهبود کیفیت سطح را نشان می دهد.
- به دلیل اینکه پارامترهای ساخت در فرایند افشانش چسب بیشتر با متغیرهای عددی سروکار دارند و از طرفی هندسه قالب و پارامترهای تولید در قالب ماهیچه غیر قابل تغییر هستند، بنابراین کنترل و پایش پارامترهای روش افشانش چسب می تواند به دقت ابعادی و هندسی بیشتری منجر شود.

تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله مراتب قدردانی خود را از شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو) به واسطه حمایت‌های بی‌دریغشان در تهیه این مقاله اعلام می‌دارند. همچنین نویسندگان خود را ملزم می‌دانند از شرکت ریخته‌گری آلومینیوم ایران خودرو که در خصوص تهیه قطعات ریخته‌گری موتور TU5+ مساعدت نمودند تشکر و قدردانی نمایند.

References

- [1] Xia M, Nematollahi B, Sanjayan J. Influence of binder saturation level on compressive strength and dimensional accuracy of powder-based 3D printed geopolymers. In Materials science forum 2018 Dec 20 (Vol. 939, pp. 177-183). Trans Tech Publications Ltd. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.939.177
- [2] Cheng YL, Li YT, Yang YT, Tang KT, Jhuang FA, Li KH, Lu CW. Greyscale printing and characterization of the binder migration pattern during 3D sand mold printing. Additive Manufacturing. 2022 Aug 1;56:102929. doi: 10.1016/j.addma.2022.102929
- [3] Kamyab M, Mohebbi MS, Hajjalimohammadi A. Investigating of Process Design Parameters in 4043 alloy Additive Manufactured specimens, to create external features of cylinder head. The Journal of Engine Research. 2022 Nov 27;60(60):3-17. [In Persian]
- [4] Kamyab M. Production of Aluminum Parts by Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process [master's thesis]. Iran: Qom University of Technology; 2020. [In Persian]
- [5] Hartmann C, van den Bosch L, Spiegel J, Rumschöttel D, Günther D. Removal of stair-step effects in binder jetting additive manufacturing using grayscale and dithering-based droplet distribution. Materials. 2022 May 26;15(11):3798. doi: 10.3390/ma15113798
- [6] Hodder KJ, Chalaturnyk RJ. Bridging additive manufacturing and sand casting: Utilizing foundry sand. Additive Manufacturing. 2019 Aug 1;28:649-60. doi: 10.1016/j.addma.2019.06.008
- [7] Gawronová M, Lichý P, Kroupová I, Obzina T, Beňo J, Nguyenová I, Merta V, Jezierski J, Radkovský F. Evaluation of additive manufacturing of sand cores in terms of the resulting surface roughness. Heliyon. 2022 Oct 1;8(10). doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e10751
- [8] Hasbrouck CR, Fisher JW, Villalpando MR, Lynch PC. A comparative study of dimensional tolerancing capabilities and microstructure formation between binder jet additively manufactured sand molds and olivine green sand molds for metalcasting of A356. 0. Procedia Manufacturing. 2020 Jan 1;48:338-48. doi: 10.1016/j.promfg.2020.05.056
- [9] Nasiri S, Rahimi Asiabarakhi H, Razaghi E. The Effect of Multi-size Valve on Improvement of Swirl Flow for Gas-based EF7 Engine. Karafan Quarterly Scientific Journal. 2021 Jan 1;17(4):119-34. doi: 10.48301/KSSA.2021.128399 [In Persian]
- [10] Rahmatinejad B, Rahimi Asiabarakhi H, Azimpour Shishevan F. Diagnosing Dimensional Defects and Valve Cracks Using Machine Vision and Acoustic Emission. Karafan Journal. 2023 Nov 22;20(3):149-68. doi: 10.48301/kssa.2023.391572.2501 [In Persian]