ریخته گری بدون قالب، روشی نوین برای تولید قطره‌ای قطعات

مهرداد وحدتی[۱]، حامد کلامی[۲]
Vahdati@kntu.ac.ir

چکیده

در روش‌های ریخته‌گری متداول هزینه های زیادی برای طراحی و ساخت مدل‌ها و قالب‌ها صرف می‌شود. در قطعات پیچیده‌تر این هزینه‌ها بیشتر می‌شود. برای حذف هزینه‌های این کار برخی مراحل ساخت قطعات ریخته‌گری باید حذف شود. با الهام از روش‌های نمونه‌سازی سریع قطعه‌سازی به صورت قطره‌ای، یا به صورت جریانی از قطرات مذاب با دما، قطر و نرخ خروج مناسب، جهت ایجاد لایه‌های قطعه‌کار و در نتیجه ساخت قطعه کارهای پیچیده مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش قابلیت ساخت قطعات ریخته‌گری پیچیده که ساخت قالب آنها طی روش‌های متداول مشکل می‌باشد، را دارد. در این مقاله ابتدا به طراحی و ساخت یک دستگاه تولید سریع قطعات به صورت قطره‌ای پرداخته شده است. در این روش مواد اولیه به صورت سیم تغذیه می‌شوند، که پس از ذوب، جریان قطرات مذاب مورد نظر را ایجاد می‌کند. در این مقاله از آلیاژ قلع و سرب به عنوان ماده اولیه استفاده شده است. می‌توان با تغییرات جزئی در دستگاه، از سیم‌هایی با جنس‌های مختلف استفاده نمود. قطرات مذاب دارای سه خاصیت می‌باشند که بر روی شکل لایه‌ها و خواص قطعه ایجاد شده تاثیر می‌گذارد. این سه خاصیت عبارتند از: قطر، دما و نرخ خروج قطرات. عواملی که بر روی این خواص تاثیر دارند، عبارتند از: سرعت تغذیه سیم، دما و قطر نازل خروجی.

در این مقاله ابتدا به طراحی و ساخت دستگاه مورد نظر پرداخته شده است. سپس وابستگی بین خواص قطره و فاکتورهای دستگاه بررسی شده است. با کنترل قطر، دما و نرخ خروج قطرات سرعت نسبی و نحوه حرکت میز نسبت به کله‌گی قطره‌ساز مشخص می‌شود.

کلیدواژه:

ریخته گری- قالب- ریخته گری بدون قالب- نمونه سازی سریع- تولید سریع- تولید قطره‌ای- قطرات فلزی

۱- استایار، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مکانیک
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی hamedkalami@yahoo.com

۱- مقدمه

قطعات فلزی که شکل پیچیده‌ای دارند و باید توسط روش ریخته‌گری تولید شوند در هنگام تولید با روش‌های متداول، با مشکل مدل سازی و قالب سازی مواجه می شوند. به عنوان روشی جدید و جایگزین می‌توان از تولید سریع قطعات به صورت قطره‌ای استفاده کرد. سرعت تولید در این روش پایین است. ولی با توجه به دقت قابل دسترسی، از این روش برای ساخت قطعات با تیراژ کم استفاده می شود. این روش جهت ساخت نمونه‌های فلزی به کار می‌رود. از نمونه های تولید شده در این روش می توان جهت بررسی شکل سه بعدی قطعه، خواص مکانیکی، و دیگر کارایی‌ها در سیستم استفاده نمود. علاوه براین می توان جهت ساخت قطعات کاربردی استفاده نمود. دستگاه تولید سریع قطعات به صورت قطره‌ای، قطعات را به صورت لایه هایی با ضخامت مشخص ایجاد می کند، (شکل۱).

در این پروژه کله گی دستگاه ریخته‌گری لایه ای ساخته شده است. این دستگاه با دریافت مواد به صورت سیم فلزی و ذوب آن جریانی از مذاب با دبی، دما و قطر مناسب ایجاد می‌کند. این جریان مذاب جهت ایجاد لایه ها جهت ساخت قطعه استفاده می شود. هر کدام از سه پارامتر دبی، دما و قطر نازل خروجی تغییر داده می‌شود، تا اثرات آنها بر روی قطر و نرخ خروج قطرات بررسی شود.

۲-طراحی

دستگاه ریخته‌گری لایه ای دارای سه قسمت اصلی می باشد. که هر کدام وظیفه‌ای را جهت ایجاد مسیرها و ریختن مذاب به عهده دارند.

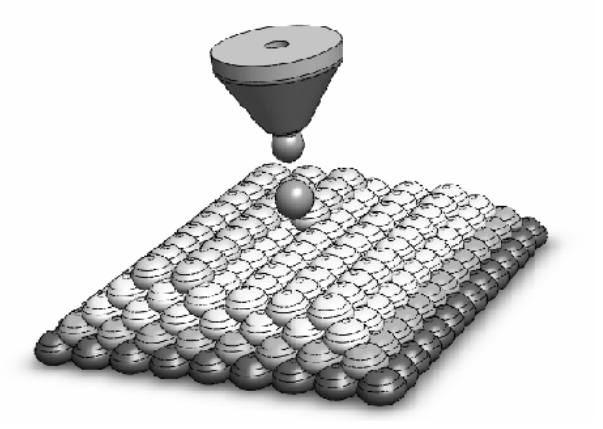
- کله گی دستگاه
- میز CNC
- بستر حرارتی

بـه علت اینکـه کله گـی دستگاه دارای وزن زیـادی بـوده و حـاوی قطعات متحرک می باشد، ثابت در نظر گرفته شده و حرکات نسبی بین کله گی و میز جهت سـاخت مسیرها و لایه ها می تواند توسط میز ایجاد شود. میز دستگاه CNC سه محور همزمان می باشد. و با حرکات مناسب و کنترل شده مسیرها را در لایه های مختلف ایجاد می‌کند. (شکل ۲ و ۳).

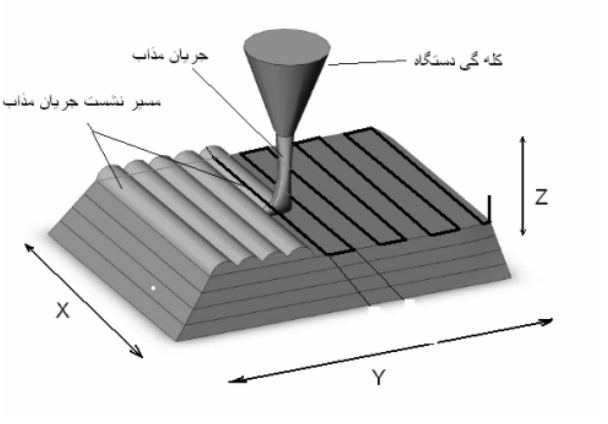
۲-۱- کله گی دستگاه

مواد خام که به صورت سیم می باشد به کله‌گی تغذیه می شود. و بعد از ذوب شدن در مجرای ذوب، مواد با دبی و دمای مناسب خارج شده و بر روی میز می نشیند. کله گی شامل قسمت های مختلف می باشد :

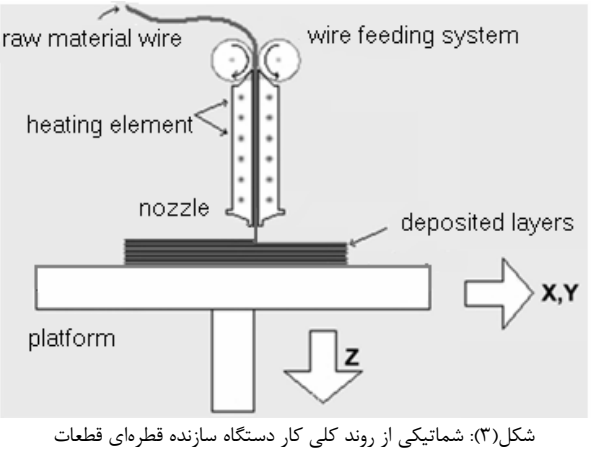
- تغذیه کننده سیم (wire feeder) و تجهیزات کنترل کننده سرعت
- مجرای مذاب و تجهیزات حرارتی مورد استفاده
- تجهیزات اندازه گیری و کنترل دما



شکل(۱): ساختار قطره ای در قطعات



شکل(۲): مسیر تشکیل دهنده لایه ها ریخته گری لایه ای



شکل(۳): شماتیکی از روند کلی کار دستگاه سازنده قطره‌ای قطعات

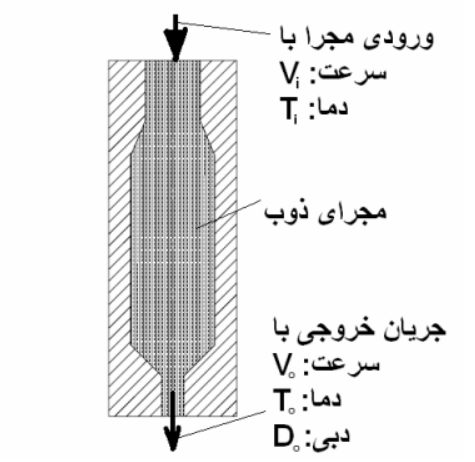
۲-۱-۱- تغذیه کننده سیم و تجهیزات کنترل کننده سرعت آن

جهت ایجاد نیروی مورد نیاز برای تغذیه سیم به داخل مجرای ذوب و همچنین کنترل و تنظیم سرعت از تغذیه کننده سیم استفاده شده است. نیروی جلو برنده صرف غلبه بر فشار مذاب در مجرای ذوب و نیروی اصطکاک مادهٔ آب بند می‌شود. موتور محرک باید توانایی ایجاد مجموع این نیروها را داشته باشد. نیروی محرک در تغذیه کننده سیم توسط یک موتور پله‌ای 1/4A و 6/5V ایجاد می‌شود، شکل(۴). گشتاور ایجاد شده در موتور برای تغذیه سیم کافی نیست و همچنین سرعت مورد نیاز برای سیم کوچک است، بنابراین حرکت دورانی ایجاد شده وارد یک گیربکس حلزونی کاهش سرعت به نسبت ۲۵ به یک می‌شود تا گشتاور منتقل شده افزایش یابد. غلتک‌های محرک سیم به قطر 40mm به شفت خروجی گیربکس متصل می‌باشد. بر روی یکی از این غلتک‌ها شیاری به قطر سیم وجود دارد تا مانع از تغییر شکل سیم شود. برای اینکه نیروی تغذیه بر روی هر دو غلتک اعمال شود، بر روی شفت‌های آنها دو چرخدنده ساده یکسان نسب شده است.

شکل(۴): قسمت‌های مختلف تغذیه کننده

۲-۱-۲- مجرای ذوب

سیم تغذیه شده از تغذیه کننده سیم، وارد مجرای ذوب می‌شود. سیم با سرعت مناسب وارد مجرای ذوب شده و پس از ذوب شدن در این مجرا با دبی و دمای مشخص خارج می شود. سیم از بالای مجرای ذوب وارد آن می‌شود. در این قسمت اطراف سیم ورودی آب‌بندی شده و از ورود هوا به داخل مجرای ذوب جلوگیری می‌شود، بنابراین مجرای ذوب یک فضای بسته می‌باشد و به ازای هر مقدار سیم که به آن وارد شود، به همان مقدار، در پایین، مذاب از نازل خارج می شود.



شکل(۵): بررسی نسبت فاکتورهای ورودی سیم و خروجی مجرای ذوب

پس با داشتن سرعت و قطر سیم می‌توان طبق روابط زیر دبی خروجی از نازل را محاسبه کرد. در شکل (۵) جزئیات این قسمت نشان داده شده است. رابطه (۱) نشان دهنده نسبت دبی‌های ورودی و خروجی است.

$$D_i = D_O \Rightarrow V_i A_i = V_O A_O \Rightarrow V_i = (\frac{d_O}{d_i})^2 \qquad (۱)$$

بنابراین رابطه زیر را داریم[۱]:

$$V_i = (\frac{4D_O}{\pi d_i^2}) \qquad (۲)$$

خروجی مذاب از پایین مجرای ذوب به صورت قطره‌ای می‌باشد. دو فاکتور در نحوه خروج قطرات دخیل می‌باشد یکی حجم قطرات و دیگری نرخ خروج قطرات (تعداد قطرات خارج شده از نازل در یک ثانیه). در فصل آزمایشات بررسی خواهد شد که حجم قطرات به فاکتورهای مختلفی از جمله قطر نازل خروجی و دمای مذاب و سرعت سیم تغذیه شده که در ابتدای آزمایش بر روی دستگاه تنظیم می‌شوند، بستگی دارد. با آزمایشات مختلف می‌توان نسبت حجم قطرات را به تنظیمات دستگاه مشخص کرد. بنابراین می‌توان با تنظیم این فاکتورها حجم قطرات را تنظیم کرد.

با مشخص بودن دبی خروجی D_o در رابطه (۲) و حجم قطرات می توان نرخ خروج قطرات را نیز محاسبه کرد.

$$D_O = T_d V_d \qquad (۳)$$

با جایگذاری رابطه (۳) در رابطه (۲)، رابطه‌ای حاصل می‌آید که با

داشتن حجم قطره مورد نیاز و قطر نازل خروجی، سرعت سیمی که باید اعمال شود، مشخص می شود.

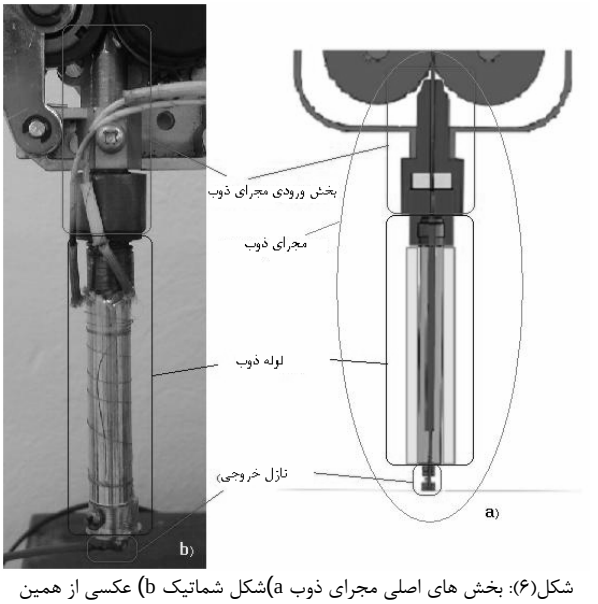
$$V_i = (\frac{4T_d V_d}{\pi d_i^2}) \quad (۴)$$

در روابط فوق پارامترهای مورد استفاده به صورت زیر تعریف می شوند:

دبی ورودی	D_i
دبی خروجی	D_o
سرعت سیم ورودی	v_i
سرعت جریان خروجی	v_o
قطر سیم	A_i
قطر نازل خروجی	A_o
نرخ خروج قطرات	T_d
حجم قطرات	V_d

همانطور که در شکل ۶ آمده، مجرای ذوب از سه بخش تشکیل شده است :

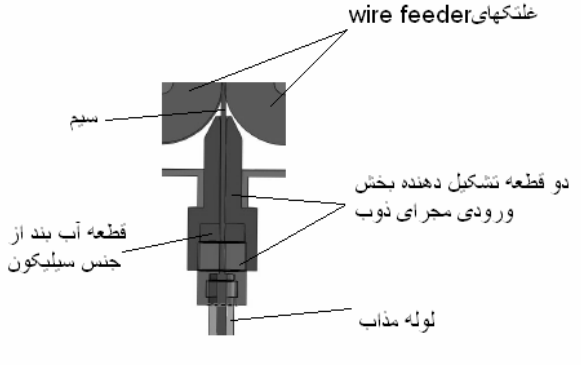
- ورودی سیم
- لوله ی ذوب
- خروجی مذاب



شکل(۶): بخش های اصلی مجرای ذوب a)شکل شماتیک b) عکسی از همین بخش

۲-۱-۲-۱- ورودی سیم

سیم تغذیه شده وارد بخش ورودی مجرای ذوب می شود تا به داخل لوله ذوب هدایت شود. همچنین در این بخش اطراف سیم آب بندی می شود. همانطور که در شکل(۷) نشان داده شده بخش ورودی دارای دو قطعه می باشد. این دو قطعه به هم پیچ می شوند. بین این دو قطعه فضای خالی وجود دارد که داخل ان یک واشر از جنس سیلیکون قرار می‌گیرد. این قطعه سیلیکونی نقش آب‌بندی را به عهده دارد. قطعه سیلیکونی به دو روش ساخته می‌شود، یکی با قالب‌گیری از چسب سیلیکون، و روش دیگر با بریدن از یک لایه سیلیکون آماده. قطعه نوع اول نرم‌تر بوده و برای سیم‌های با قطر کمتر مناسب می‌باشد چون نیروی کمتری برای تغذیه سیم لازم بوده و بنابراین احتمال کمانش بین تغذیه‌کننده و ورودی مجرای ذوب کمتر می‌باشد. ولی این نوع آب‌بند زودتر مستهلک می‌شود.

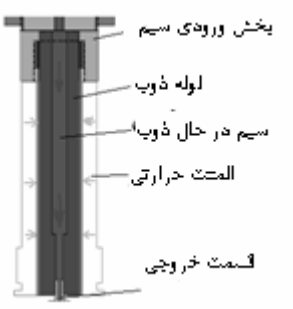


شکل(۷): بخش ورودی مجرای مذاب

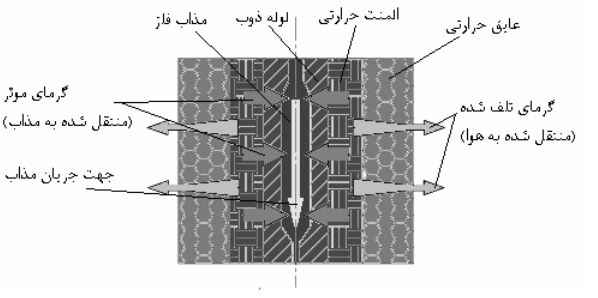
۲-۱-۲-۲- لوله ی ذوب و المنت حرارتی گرم کننده

این بخش شامل یک قطعه لوله ای شکل می باشد که سوراخ داخلی آن توسط فرایند سوپردریل و به قطر ۱/۵ mm ایجاد شده است. همانطور که مفتول در طول لوله ذوب حرکت می‌کند، به تدریج ذوب می شود. با حرکت مذاب سیم در طول لوله بر دمای آن افزوده می‌شود تا با دمای مورد نظر به نازل خروجی برسد. اطراف لوله ذوب یک المنت حرارتی وجود دارد که حرارت مورد نیاز برای گرم کردن لـوله ذوب و ذوب کـردن سیم را تـامین می‌کند شکل(۸). از المنت های موجود در هویه ها که در توان‌های مختلف ۱۰۰ و ۱۳۰ و ۱۸۰ وات وجود دارد، به عنوان حرارت دهنده استفاده شده است. توان مورد نیاز المنت حرارتی بستگی به جنس مفتول (خواص حرارتی مفتول)، قطر سیم و سرعت تغذیه آن به داخل لوله ذوب، انتقال حرارت شعاعی لوله ذوب (که میزان حرارت انتقالی از سطح بیرونی در تماس با المنت به سطح داخلی در تماس با مذاب را مشخص می‌کند) و همچنین میزان انتقال حرارت از خود المنت حرارتی به محیط بستگی دارد. شکل (۹) حالت‌های انتقال حرارت را

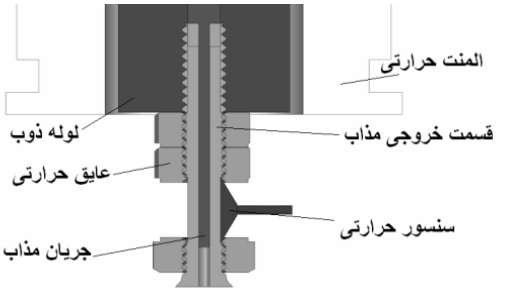
در لوله ذوب نشان می‌دهد.



شکل(۸): لوله ذوب



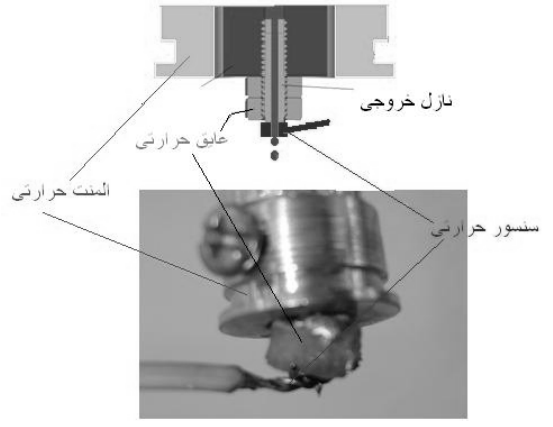
شکل(۹): انتقال حرارت در بین لایه های مختلف نازل و مذاب



شکل(۱۰): قسمت خروجی و حسگر دما

۲-۱-۲-۳- قسمت خروجی

این قسمت شامل یک پیچ M3 می باشد که در یک طرف آن یک سنسور حرارتی k-type جوش شده است و در طول این پیچ سوراخی ایجاد شده است. قطر این سوراخ پله‌ای بوده و در دو اندازه می باشد. قطر سوراخ در سمت آزاد پیچ 1mm ، در سمت دیگر که حسگر وجود دارد 0.4 یا 0.8 می باشد. به عبارتی دو پیچ وجود دارد که در یکی قطر سوراخ خروجی 0.4 و در دیگری 0.8 می‌باشد. میزان تاثیر هرکدام از این دو نازل بر روی قطر و نرخ خروج قطرات مورد بررسی قرار می‌گیرد. همانطور که در شکل(۱۱) نشان داده شده، این پیچ به قسمت پایین سوراخ لوله ذوب پیچ می شود. انتهای سوراخ نازل خروجی از میان اتصال جوش سنسور می‌گذرد که باعث اندازه‌گیری دقیق دمای مذاب در حین خروج از نازل می شود.

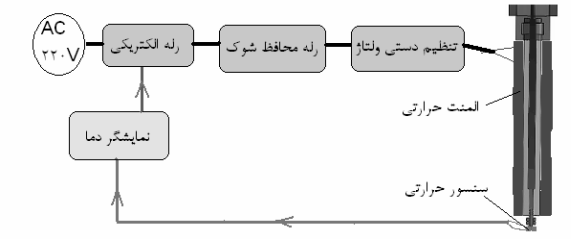


شکل(۱۱): شماتیک و تصویر نازل خروجی نصب شده روی لوله ذوب

۲-۱-۳- کنترل کننده دمای مذاب

کنترل کننده دما شامل دو قسمت می باشد. شکل(۱۲):

- سنسور حرارتی
- نمایشگر و رله الکتریکی



شکل(۱۲): نحوه تنظیم و کنترل دمای نازل خروجی

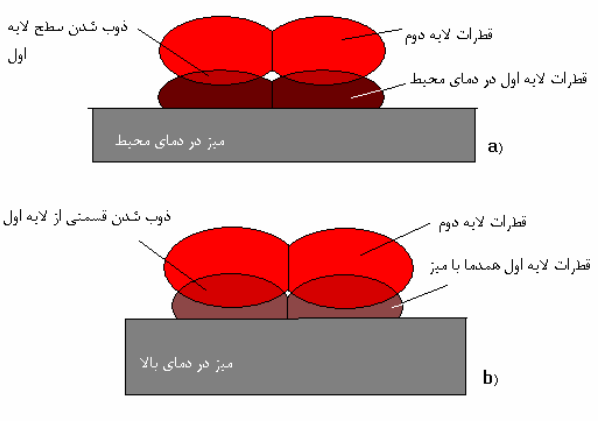
حسگر حرارتی مورد استفاده از نوع k-type می باشد. این حسگر قابلیت اندازه گیری دما را تا 400ºC دارد. و از دو سیم تشکیل شده، که روی آنها روکش مقاوم به حرارت کشیده شده است. انتهای این دو سیم از طریق یک اتصال جوشی به هم مرتبط می شود. هنگامی که دمای اتصال جوشی تغییر کند، جریان الکتریکی در سیم ایجاد می شود. در این حسگر فقط قسمت اتصال جوشی حساس به گرما می باشد و با تغییر دما ولتاژهای متفاوتی ایجاد می شود که با اندازه‌گیری ولتاژ حاصله، می توان دما را اندازه گرفت. با جوش دادن انتهای دو سیم به انتای نازل خروجی هم اتصال بین آنها ایجاد شده و هم امکان اندازه‌گیری دمای قطرات در موثرترین نقطه، یعنی هنگام خروج از نازل فراهم شده است. عملیات اتصال جوش توسط جوش آرگون بدون فیلر یا در صورت امکان با فیلر نقره انجام می پذیرد.

شکل(۱۳):نمایشگر دمای نازل خروجی و میز حرارتی

نمایشگر و رله الکتریکی که وظیفه نمایش و کنترل دما را دارد شامل temperature controller autonics KZN4S می باشد. همانطور که در شکل(۱۳) نشان داده شده، بر روی این دستگاه دو نمایشگر وجود دارد. نمایشگر بالایی که به رنگ قرمز می باشد، دمای اندازه‌گیری شده توسط سنسور را نمایش می دهد (در این قسمت چون سنسور به نازل خروجی متصل می باشد بنابراین دمای قطرات خروجی نمایش داده می شود). نمایشگر پایینی که به رنگ سبز می‌باشد، دمای تنظیم شده می باشد. این دما، همان دمای مورد نظر برای قطرات در آزمایش می باشد. داخل واحد کنترل دما یک رله الکتریکی نیز وجود دارد. همانطور که در شکل(۱۲) مشخص شده، این رله به المنت حرارتی گرم کننده لوله ذوب متصل می باشد. در صورتی که دمای اندازه‌گیری شده کمتر از مقدار تنظیم شده باشد، این رله عمل کرده و المنت حرارتی جریان مذاب را گرم می‌کند. در نتیجه دمای مذاب خارج شده از نازل بالا می‌رود. بنابراین با قطع و وصل شدن رله بنا به تغییرات دمای اندازه‌گیری شده نسبت به دمای تنظیم شده، دمای جریان مذاب به دمای مورد نظر (مقدار تنظیم شده) نزدیک می‌شود.

۲-۲- بستر حرارتی

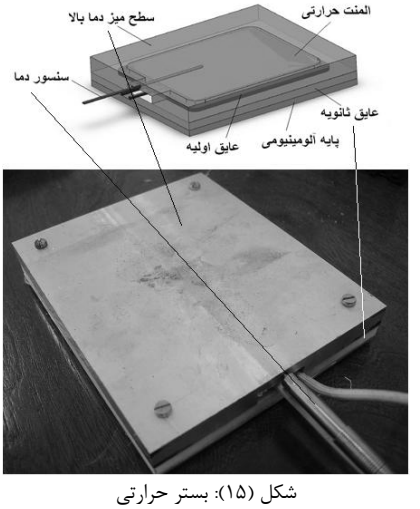
هنگامی که قطرات خروجی از نازل بر روی میز زیرین می‌چکند و اولین لایه را می‌سازند، قطرات لایه دوم روی قطرات منجمد شده لایه اول قرار می‌گیرند. با فرض اینکه لایه اول منجمد شده و دمای آن تقریباً تا دمای محیط پایین آمده است، در این صورت قطرات لایه دوم که دمای آنها کمی بالاتر از دمای ذوب می‌باشد، در هنگام نشستن بر روی لایه اول حرارت خود را سریعاً به لایه زیرین داده و منجمد می‌شوند. به همین دلیل مقدار جزئی از سطح تماس دو لایه ذوب شده، و اتصال خوب و محکمی بین دو لایه بوجود نخواهد آمد. برای حل این مشکل دمای لایه پایینی باید تا مدتی در حد مناسبی نگه داشته شود، تا قطرات لایه دوم در حین نشستن روی لایه اول مقداری از سطح این لایه را ذوب کنند و اتصال محکم‌تری ایجاد شود شکل(۱۴). این کار توسط گرم نگه داشتن میز انجام می‌پذیرد[۲]و [۳].



شکل (۱۴): نحوه ذوب لایه پایینی هنگام نشستن لایه بالایی a) میز در دمای محیط b) میز در دمای بالا

بستر حرارتی به ابعاد 12×10×1cm ساخته شده و از جنس آلومینیوم می‌باشد. قسمت زیر آن به شکل مستطیل با ابعاد 7.5×9.5cm و عمق 8mm ماشین کاری شده است تا المنت حرارتی صفحه‌ای در آن جای گیرد. همچنین در وجه کناری آن و به صورت افقی سوراخی به قطر 2mm در فاصله 5mm از سطح ایجاد شده است. حسگر حرارتی در این سوراخ جای می‌گیرد. در شکل (۱۵) جزئیات این قطعه نشان داده شده است.

وظیفه گرم کردن بستر آلومینیومی بر عهده المنت حرارتی صفحه‌ای می‌باشد. این المنت در قسمت ماشینکاری شده در زیر بستر آلومینیومی قرار می‌گیرد. این المنت 300 وات بوده و توانایی رساندن دمای سطح بستر تا 200C را دارد.



شکل (۱۵): بستر حرارتی

در زیر بستر آلومینیومی یک لایه عایق حرارتی از جنس PTEF قرار دارد. این عایق توانایی تحمل دمای تا 270°C را به طور پیوسته دارد. عایق حرارتی از هدر رفتن حرارت ایجاد شده توسط المنت به سمت پایین جلوگیری می‌کند. همچنین مانع رسیدن گرما به تجهیزات میز CNC که در زیر میز حرارتی قرار دارد، می‌شود. این لایه عایق باعث می شود که حرارت المنت به سمت بالا منتقل شده، و بستر آلومینیومی را گرم کند. زیر عایق حرارتی یک ورق فولادی 3mm وجود دارد، که برای دقت بیشتر تعبیه شده است[۴].

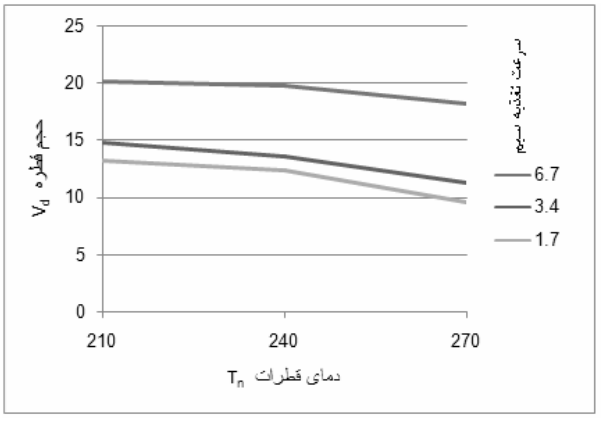
۳- آزمایشات

کیفیت قطعه ایجاد شده در این روش به حجم قطرات، و نحوه نشستن آنها بر روی لایه‌های پیشین مرتبط است. نحوه نشستن قطرات نیز به حجم و نرخ خروج قطرات وابسته می‌باشد. همانطور که در رابطه (۴) بررسی شد، با داشتن حجم قطره و قطر و سرعت سیم ورودی به نازل می‌توان نرخ خروج را محاسبه نمود. بنابر این در این بخش سعی بر آن است تا بتوان حجم قطره را کنترل نمود. طبق ماهیت دستگاه سه عامل می‌تواند بر حجم قطرات تاثیرگذار باشد. این سه عامل دمای قطرات خروجی T_n، سرعت سیم تغذیه شده v_w، و قطر نازل خروجی d_n می باشند. در اینجا تاثیر دو فاکتور بررسی می‌شود. همانطور که در جدول (۱) آمده است، دمای نازل در سه حالت ۲۱۰ و ۲۴۰ و ۲۷۰ درجه سانتیگراد و سرعت سیم ۶/۷ و ۳/۴ و ۱/۷ میلیمتر بر ثانیه بررسی شده است. این در حالیست که قطر نازل خروجی ثابت و برابر ۰/۸ میلیمتر فرض شده است. هر آزمایش دو بار انجام شده و اعداد مربوط به حجم قطرات در سطرهای مربوطه و زیر هم نوشته شده است.

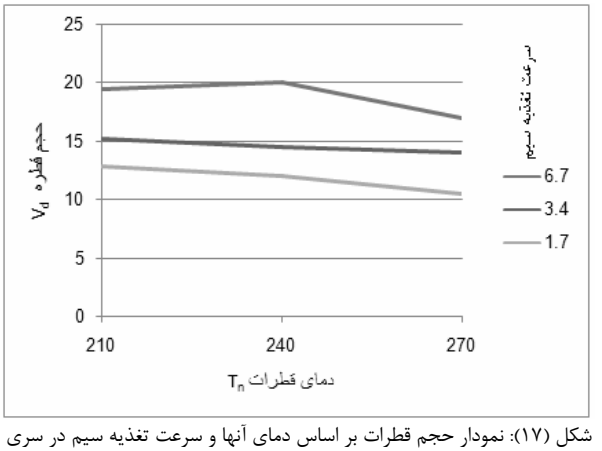
جدول(۱): حجم قطرات بدست آمده در آزمایشات

T_n °c	v_w mm/s	d_n mm	حجم قطره V_d mm^3
210	6.7	0.8	20.1
			19.5
240	6.7	0.8	19.7
			20
270	6.7	0.8	18.2
			17
210	3.4	0.8	14.8
			15.5
240	3.4	0.8	13.5
			12.7
270	3.4	0.8	11.3
			11.5
210	1.7	0.8	13.2
			12.8
240	1.7	0.8	12.3
			12
270	1.7	0.8	9.5
			10.5

نمودارهای(۱) و (۲) وابستگی حجم قطرات به سرعت تغذیه سیم و دمای قطرات را به ترتیب در آزمایشات اول و دوم نشان می‌دهند.



شکل (۱۶): نمودار حجم قطرات بر اساس دمای آنها و سرعت تغذیه سیم در سری اول آزمایشات



شکل (۱۷): نمودار حجم قطرات بر اساس دمای آنها و سرعت تغذیه سیم در سری دوم آزمایشات

همانطور که در نمودارهای مربوطه مشخص می‌باشد، با کاهش سرعت تغذیه سیم و افزایش دمای قطرات، حجم قطرات کاهش می‌یابد. تعدادی از قطرات ایجاد شده در این روش در شکل(۱۸) آمده است.

شکل(۱۸): تعدادی از قطرات ایجاد شده توسط این روش

۴- نتیجه‌گیری

با استفاده از مکانیزم ذوب قطره‌ای مواد می‌توان قطعات ریخته‌گری را بدون استفاده از قالب تولید نمود.

خواص قطعات تولید شده بستگی به تعداد قطره در واحد زمان، حجم قطره، و دمای بستر حرارتی دارد.

با افزایش دمای قطرات و کاهش سرعت تغذیه سیم حجم قطرات تولید شده کاهش می‌یابد.

۵- مراجع

[1] J. Campbell, "castings", original ISBN: 0-7506-4790-6, 2005.

[2] S. X. Cheng, T. Li and S. Chandra, "Producingmolten metal droplets with a pneumatic droplet-on-demand generator", journal of materials processing technology, 2004.

[3] M. Fang, S. Chandra and C. B. Park, "building three dimensional objects by deposition of molten metal droplets", rapid prototyping journal, ISSN: 1355-2546, 2007.

[4] G. E. Dieter, "ASM HANDBOOK", Vol. 20, materials selection and design , first edition 1997.