

ریخته‌گری بدون قالب، روشی نوین برای تولید قطره‌های قطعات

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

چکیده

در روش‌های ریخته‌گری متداول هزینه‌های 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.

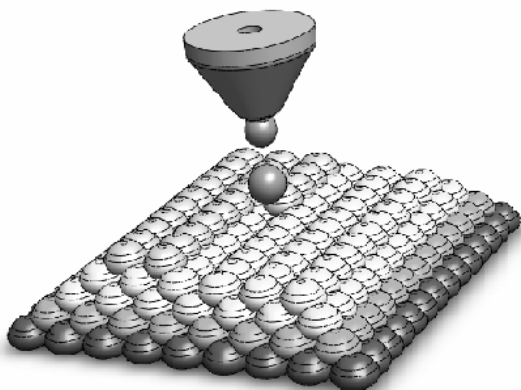
کلیدواژه:

ریخته‌گری - قالب - ریخته‌گری بدون قالب - نمونه‌سازی سریع - تولید سریع - تولید قطره‌ای - قطرات فلزی

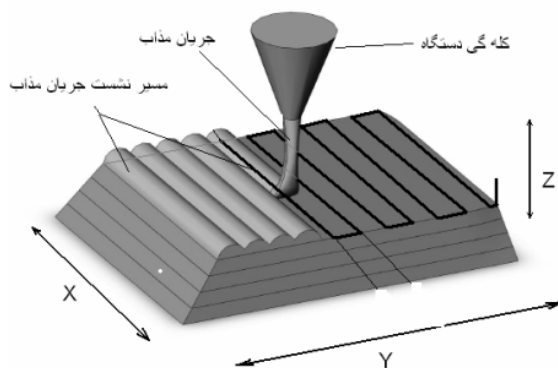
۱- استاپار، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مکانیک

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

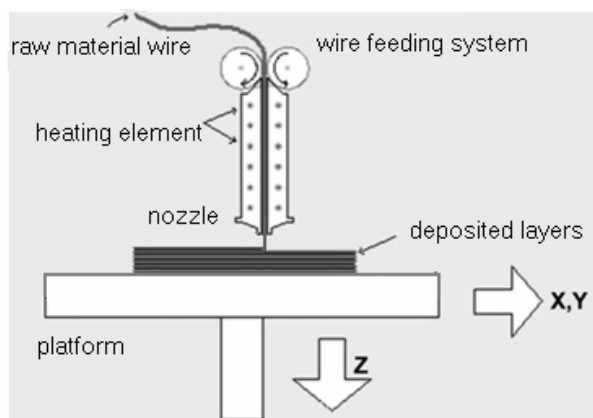
- تغذیه کننده سیم (wire feeder) و تجهیزات کنترل کننده سرعت
- مجرای مذاب و تجهیزات حرارتی مورد استفاده
- تجهیزات اندازه گیری و کنترل دما



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

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 می‌شوند. 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 می‌شود. این روش جهت ساخت نمونه‌های فلزی به کار می‌رود. از نمونه های تولید شده در این روش می‌توان جهت بررسی شکل سه بعدی قطعه، خواص مکانیکی، و دیگر کارایی‌ها در سیستم استفاده نمود. علاوه براین می‌توان جهت ساخت قطعات کاربردی استفاده نمود. دستگاه تولید سریع قطعات به صورت قطره‌ای، قطعات را به صورت لایه هایی با ضخامت مشخص ایجاد می‌کند، (شکل ۱).

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 می‌شود. 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 می‌باشد. که هر کدام وظیفه‌ای را جهت ایجاد مسیره‌ها و ریختن مذاب به عهده دارند.

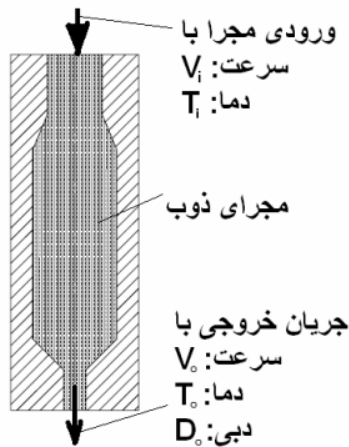
- کله گی دستگاه
- میز CNC
- بستر حرارتی

به علت اینکه کله گی دستگاه دارای وزن زیادی بوده و حاوی قطعات متحرک می‌باشد، ثابت در نظر گرفته شده و حرکات نسبی بین کله گی و میز جهت ساخت مسیره‌ها و لایه ها می‌تواند توسط میز ایجاد شود. میز دستگاه CNC سه محور همزمان می‌باشد. و با حرکات مناسب و کنترل شده مسیره‌ها را در لایه های مختلف ایجاد می‌کند. (شکل ۲ و ۳).

۲-۱- کله گی دستگاه

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

نازل خارج می شود.



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

پس با داشتن سرعت و قطر سیم می توان 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 دبی های ورودی و خروجی است.

$$D_i = D_o \Rightarrow V_i A_i = V_o A_o \Rightarrow V_i = \left(\frac{d_o}{d_i}\right)^2 \quad (1)$$

بنابراین رابطه زیر را داریم [۱]:

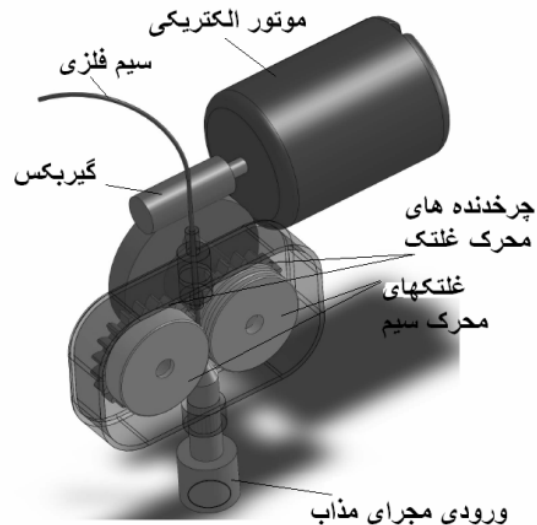
$$V_i = \left(\frac{4D_o}{\pi d_i^2}\right) \quad (2)$$

خروجی مذاب از پایین مجرای ذوب به صورت قطره ای می باشد. دو فاکتور در نحوه خروج قطرات دخیل می باشد 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 می شوند، بستگی دارد. با آزمایشات مختلف می توان نسبت حجم قطرات را به تنظیمات دستگاه مشخص کرد. بنابراین می توان 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.

$$D_o = T_d V_d \quad (3)$$

با جایگذاری رابطه (۳) در رابطه (۲)، رابطه ای حاصل می آید که با

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 ماده آب بند می شود. موتور محرک باید توانایی ایجاد مجموع این نیروها را داشته باشد. نیروی محرک در تغذیه کننده سیم توسط یک موتور پله ای 1/4A و 6/5V ایجاد می شود، 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 می شود تا گشتاور منتقل شده افزایش یابد. غلتک های محرک سیم به قطر 40mm به شفت خروجی گیربکس متصل می باشد. بر روی یکی از این غلتک ها شیار 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 شفت های آنها دو چرخنده ساده یکسان نسب شده است.

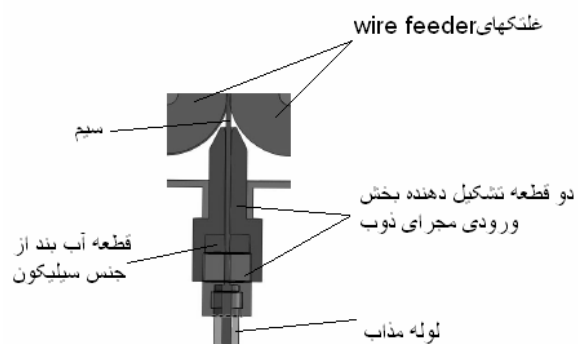


شکل (۴): قسمت های مختلف تغذیه کننده

۲-۱-۲- مجرای ذوب

سیم تغذیه شده از تغذیه کننده سیم، وارد مجرای ذوب می شود. 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 می شود. در این قسمت اطراف سیم ورودی آب بندی شده و از ورود هوا به داخل مجرای ذوب جلوگیری می شود، بنابراین مجرای ذوب یک فضای بسته می باشد و به ازای هر مقدار سیم که به آن وارد شود، به همان مقدار، در پایین، مذاب از

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 آن یک واشر از جنس سیلیکون قرار می گیرد. این قطعه سیلیکونی نقش آب بندی را به عهده دارد. قطعه سیلیکونی به دو روش ساخته می شود، یکی با قالب گیری از چسب سیلیکون، و روش دیگر با بریدن از یک لایه سیلیکون آماده. قطعه نوع اول نرم تر بوده و برای سیم های با قطر کمتر مناسب می باشد چون نیروی کمتری برای تغذیه سیم لازم بوده و بنابراین احتمال کمانش بین تغذیه کننده و ورودی مجرای ذوب کمتر می باشد. ولی این نوع آب بند زودتر مستهلک می شود.



شکل (۷): بخش ورودی مجرای مذاب

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

این بخش شامل یک قطعه لوله ای شکل می باشد که سوراخ داخلی آن توسط فرایند سوپر دریل و به قطر ۱/۵ mm ایجاد شده است. همانطور که مفتول در طول لوله ذوب حرکت می کند، به تدریج ذوب می شود. با حرکت مذاب سیم در طول لوله بر دمای آن افزوده می شود تا با دمای مورد نظر به نازل خروجی برسد. اطراف لوله ذوب یک المنت حرارتی وجود دارد که حرارت مورد نیاز برای گرم کردن لوله ذوب و ذوب کردن سیم را تامین می کند شکل (۸). از المنت های موجود در هویه ها که در توان های مختلف ۱۰۰ و ۱۳۰ 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 می کند) و همچنین میزان انتقال حرارت از خود المنت حرارتی به محیط بستگی دارد. شکل (۹) حالت های انتقال حرارت را

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

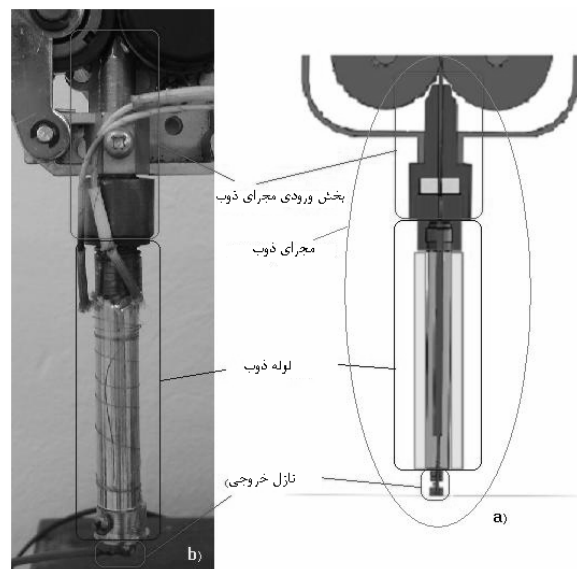
$$V_i = \left(\frac{4T_d V_d}{\pi d_i^2} \right) \quad (۴)$$

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

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

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

- ورودی سیم
- لوله ی ذوب
- خروجی مذاب



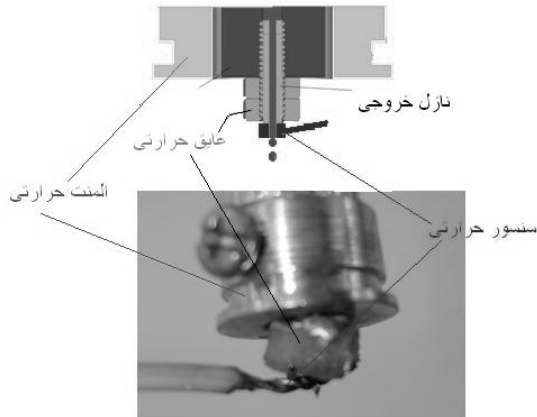
شکل (۶): بخش های اصلی مجرای ذوب (a) شکل شماتیک (b) عکسی از همین بخش

۲-۲-۱-۲- ورودی سیم

سیم تغذیه شده وارد بخش ورودی مجرای ذوب می شود تا به داخل

در لوله ذوب نشان می‌دهد.

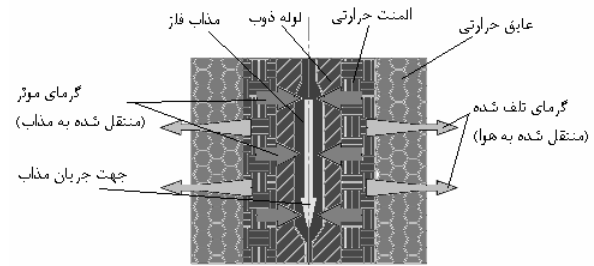
اندازه‌گیری دقیق دمای مذاب در حین خروج از نازل می‌شود.



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



شکل (۸): لوله ذوب

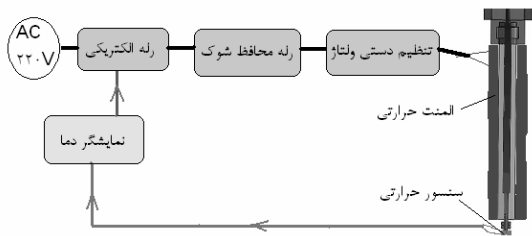


شکل (۹): انتقال حرارت در بین لایه های مختلف نازل و مذاب

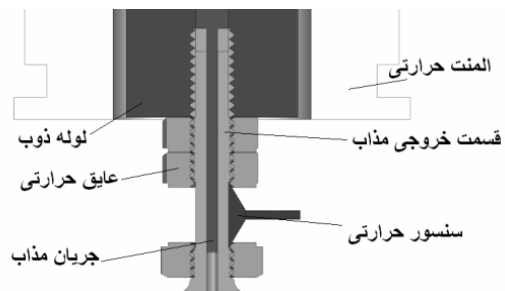
۲-۱-۳- کنترل کننده دمای مذاب

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



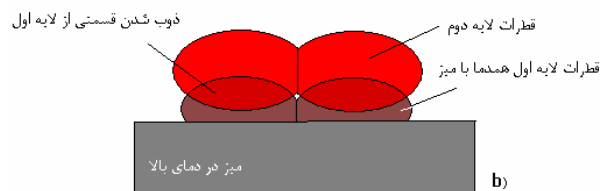
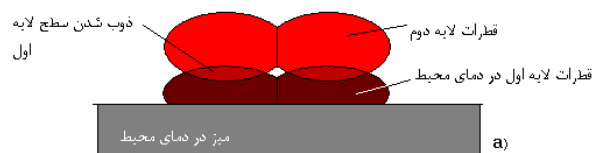
شکل (۱۰): قسمت خروجی و حسگر دما

حسگر حرارتی مورد استفاده از نوع k-type می باشد. این حسگر قابلیت اندازه گیری دما را تا 400°C 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 انتهای 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.

۲-۱-۳- 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 هر کدام 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

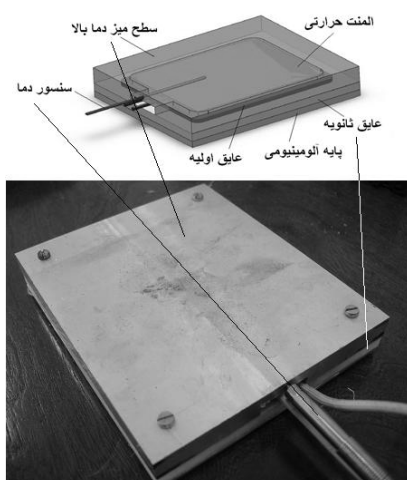
شود شکل (۱۴). این کار توسط گرم نگه داشتن میز انجام می‌پذیرد [۲] و [۳].



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

بستر حرارتی به ابعاد $12 \times 10 \times 1 \text{ cm}$ ساخته شده و از جنس آلومینیوم می‌باشد. قسمت زیر آن به شکل مستطیل با ابعاد $7.5 \times 9.5 \text{ cm}$ و عمق 8 mm ماشین کاری شده است تا المنت حرارتی صفحه‌ای در آن جای گیرد. همچنین در وجه کناری آن و به صورت افقی سوراخی به قطر 2 mm در فاصله 5 mm 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 W وات بوده و توانایی رساندن دمای سطح بستر تا 200 C را دارد.



شکل (۱۵): بستر حرارتی



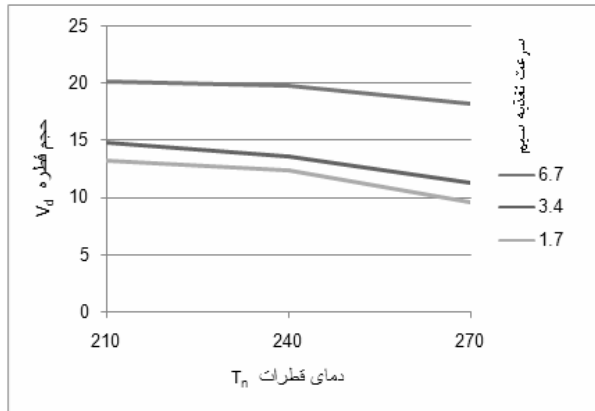
شکل (۱۳): نمایشگر دمای نازل خروجی و میز حرارتی

نمایشگر و رله الکتریکی که وظیفه نمایش و کنترل دما را دارد شامل temperature controller autonics KZN4S می‌باشد. همانطور که در شکل (۱۳) نشان داده شده، بر روی این دستگاه دو نمایشگر وجود دارد. نمایشگر بالایی که به رنگ قرمز می‌باشد، دمای اندازه‌گیری شده توسط سنسور را نمایش می‌دهد (در این قسمت چون سنسور به نازل خروجی متصل می‌باشد بنابراین دمای قطرات خروجی نمایش داده می‌شود). نمایشگر پایینی که به رنگ سبز می‌باشد، دمای تنظیم شده می‌باشد. این دما، همان دمای مورد نظر برای قطرات در آزمایش می‌باشد. 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 می‌باشد. 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.

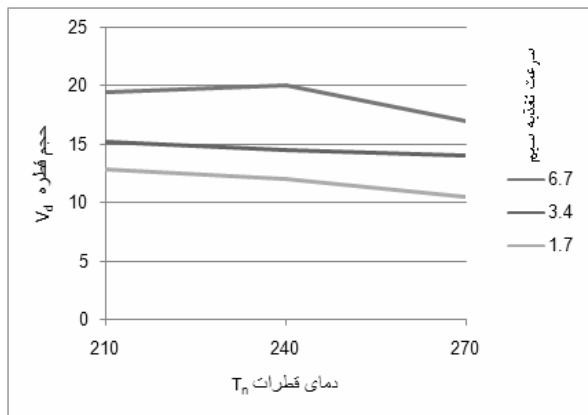
۲-۲- بستر حرارتی

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

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.

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 می‌شود 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 نشست 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 می‌باشند. 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

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, "Producing molten 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.



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.