انجمن صنفی کارخانجات صنعت ریخته‌گری ایران
www.iranfoundry.com
سال بیستم، شماره ۱۶۰ مهر و آبان ۱۳۹۸
قیمت: ۱۵۰۰۰ تومان

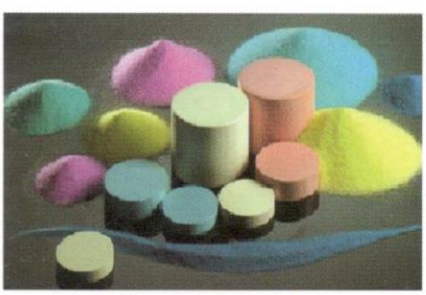
ماهنامه

صنعت ریخته‌گری

در این شماره:

- "کمبودی به نام گوش شنوا"
- باید از حالت جزیره‌ای خارج شویم
- دولت همپای صنعت نسوز کشور نبوده است
- رشد بخش معدن و صنایع معدنی در سال ۹۸
- بازار فولاد به تحریک تقاضا نیاز دارد
- مقاله‌های فنی و مهندسی با موضوعات ریخته‌گری فولاد، چدن و...
- اخبار، گزارش خبری
- بازار بورس فلزات و مواد معدنی

FRM®



WWW.FARS-RIZAN.COM

ساخت و بررسی تاثیر دستگاه سیم داغ برش فوم نیمه اتوماتیک بر ویژگی‌های مدل‌های فومی در صنعت ریخته‌گری

صادق میرزامحمدی[1]، محمد حیدری[2]، علی امیری[2]، رضا مرادی[3]

چکیده

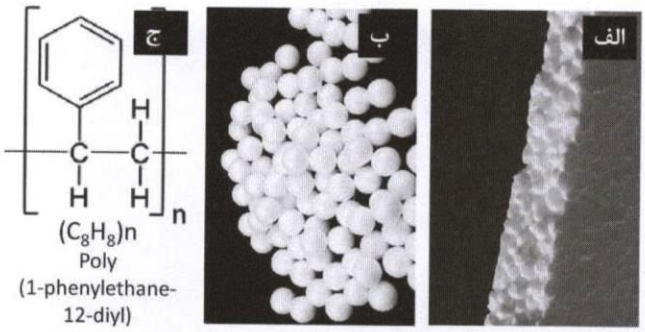
در این تحقیق، یک روش مدرن جهت ساخت مدل‌های فومی که یکی از مهم‌ترین مراحل ریخته‌گری با مدل فومی فداشونده می‌باشد، به کار گرفته شده است. جهت بریدن و ایجاد مدل‌های فومی، یک دستگاه سیم داغ نیمه اتوماتیک ساخته شد. دو نوع مدل فومی کاربردی به وسیله روش دستی و روش بریدن با دستگاه نیمه اتوماتیک آماده شدند. اندازه‌های مدل‌های فومی به دست آمده مورد ارزیابی قرار گرفت و دقت هر یک از روش‌ها در تولید مدل‌های فومی مورد مقایسه قرار گرفت. با توجه به دانسیته فوم مورد استفاده در آزمایش‌ها، حجم مدل‌های تهیه شده با روش‌های دستی و نیمه اتوماتیک به دست آمد. حجم اضافی در مدل‌ها به دست آمده و متناسب با آن تلفات اقتصادی تولید قطعات ریخته‌گری با استفاده از هرکدام از این دو روش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق مشخص کرد که دقت اندازه‌های مدل‌های تهیه شده به روش نیمه اتوماتیک بیش از دو برابر دقت مدل‌های تهیه شده به روش متداول دستی بود. مدل‌های تهیه شده به روش نیمه اتوماتیک دارای حجم اضافی ۲/۵ درصد نسبت به حجم قطعه اصلی بودند. درحالی‌که مقدار مذکور برای مدل‌های فومی بریده شده به روش دستی ۷/۴ درصد بود. بنابراین، راندمان اقتصادی ریخته‌گری قطعات با استفاده از مدل‌های فومی ساخته شده با روش نیمه اتوماتیک از نظر ذوب مصرفی برای قطعات آلومینیمی ۴/۴ درصد بیشتر از قطعات تولیدی با استفاده از مدل‌های فومی ساخته شده با روش دستی بود.

۱- مقدمه

ریخته‌گری به روش فوم فداشونده روشی جدید و پرکاربرد در تولید قطعات ریخته‌گری است. اگرچه استفاده از این روش در سایر بخش‌های ریخته‌گری به عنوان یک تکنولوژی کامل به یک رویا شبیه است اما از این روش در ریخته‌گری آلومینیم، چدن خاکستری و داکتیل استفاده می‌شود [۱]. روش ریخته‌گری با مدل فومی فداشونده، نوعی از فرآیندهای ریخته‌گری با مدل تبخیر شونده است. این روش بسیار شبیه به روش ریخته‌گری دقیق است، با این تفاوت که در آن به جای موم از فوم استفاده می‌شود. برتری اصلی این روش نسبت به ریخته‌گری دقیق (با موم) حذف مرحله ذوب و خارج کردن موم از قالب است. این کار با بهره‌گیری از دمای ذوب و چگالی بسیار پایین فوم میسر می‌شود [۲].

در ریخته‌گری به روش فوم فداشونده، مدل‌ها از جنس پلی استایرن منبسط شده (فوم) هستند و درون ماسه بدون چسب قرار داده می‌شوند [۱]. یکی از مزایای بسیار مهم استفاده از مدل فومی حذف ماهیچه در فرایند قالبگیری است. قطعه مورد نظر از لحاظ شکل و اندازه به طور دقیق از فوم، به صورت یک یا چند تکه، ساخته می‌شود. حذف ماهیچه در فرآیند قالب‌گیری سبب می‌شود که در این روش، قابلیت قالب‌گیری قطعاتی با شکل هندسی پیچیده و مشکل ایجاد شود.

۱- دکتری مهندسی مواد، استادیار، گروه متالورژی، دانشکده فنی انقلاب اسلامی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران ۶۴۷۱-۳-۱۳۷۳۶ ایران، s-mirzamohammadi@tvu.ac.ir
۲- دانشجوی کارشناسی مهندسی مکانیک خودرو، دانشکده فنی انقلاب اسلامی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران ۶۴۷۱-۳-۱۳۷۳۶ ایران
۳- دکتری مهندسی مکانیک، استادیار، گروه مکانیک، دانشکده فنی انقلاب اسلامی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران ۶۴۷۱-۳-۱۳۷۳۶ ایران



▲ شکل ۱- (الف)- حجم ساخته شده از پلی استایرن (ب)- دانه‌های پلی استایرن (ج)- فرمول شیمیایی و زنجیره هیدروکربنی ملکول‌های پلی استایرن

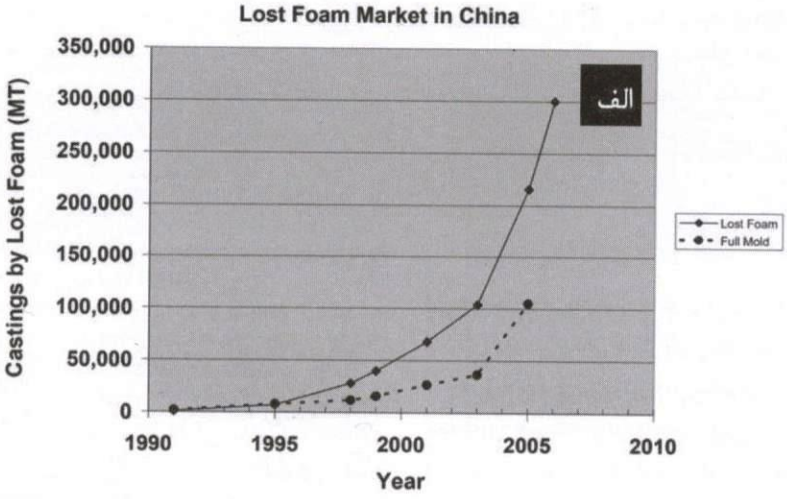
مدل نهایی ممکن است که از یک مدل شامل چندین قسمت چسبانده شده و یا از چندین مدل که در یک خوشه با هم ترکیب شده و به هم چسبانده شده‌اند تشکیل شود. سیستم‌های تغذیه‌گذاری و راهگاهی نیز از جنس فوم هستند و به مدل چسبانده می‌شوند [۳].

قبل از قرار دادن فوم درون قالب، آن را پوشش می‌دهند. مهم‌ترین هدف استفاده از پوشش، نگه داشتن ماسه و جلوگیری از فرو ریختن آن است. اعمال پوشش همچنین حرارت را درون مذاب حفظ کرده و سیالیت آن را افزایش می‌دهد. این پوشش‌ها به دلیل جلوگیری از تغییر شکل مدل فومی در حین قالب‌گیری و ارتعاش، دقت ابعادی را حفظ می‌کند [۴]. ترکیب شیمیایی پوشش شامل پودر یک ماده دیرگداز و یک چسب و یک حلال معلق‌کننده است. ماده دیرگداز معمولا از سیلیس، آلومینا، اکسید زیرکنیم، کرومیت و آلومینوسیلیکات‌هایی نظیر مولایت و پیروفیلایت تشکیل می‌شود [۵]. بنابراین پوشش حاصل که به شکل یک دوغاب است از طریق روش‌های غوطه‌وری، اسپری کردن و یا رنگ کاری با قلم بر روی مدل اعمال می‌شود. پوشش در چندین مرحله بر روی مدل اعمال و فرآیند خشک کردن معمولا در دمای ۵۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد و در زمان ۲۴ ساعت در خشک کن انجام می‌شود. ضخامت پوشش معمولا حدود ۰/۲۵ تا ۰/۵ میلی‌متر است [۶].

بعد از اتمام فرآیند پوشش دادن مدل‌ها، نمونه در داخل درجه قرار داده می‌شود و درجه از ماسه خشک روان حاوی کربن و بدون چسب پر می‌شود. در هنگام ریختن ماسه اطراف مدل‌ها در داخل درجه، کل سیستم در سه جهت لرزش داده می‌شود. این لرزش به این دلیل است که ماسه کاملا مدل را احاطه کند و تمامی حفرات قطعه را پر کند. پس از قالبگیری، ریختن مواد مذاب به درون قالب سبب می‌شود که مدل فومی کاملا تبخیر شود. استفاده از دانه‌های کم‌تراکم پلی استایرن در تهیه مدل فومی سبب می‌شود که میزان گاز حاصل از تبخیر فوم کاهش یابد [۷].

از مزایای دیگر روش فوم هدر رونده: حذف ماهیچه، حذف یا کاهش شیب های مدل، حذف چسب در ماسه قالبگیری، افزایش صافی سطح، کاهش عملیات تمیزکاری و کاهش قیمت تمام شده قطعات را می‌توان نام برد [۸]. در حال حاضر، شرکت ریخته‌گری تراکتورسازی جهت تولید قطعات کارتر کشاورزی، گیربکس میانی، گیربکس تراکتور و انواع اکسل از این روش استفاده می‌نماید. استفاده از این روش به صورت روز افزون در حال افزایش است. یک آمار به دست آمده از رشد کاربردی این روش ریخته‌گری در شکل ۲ نشان داده شده است.

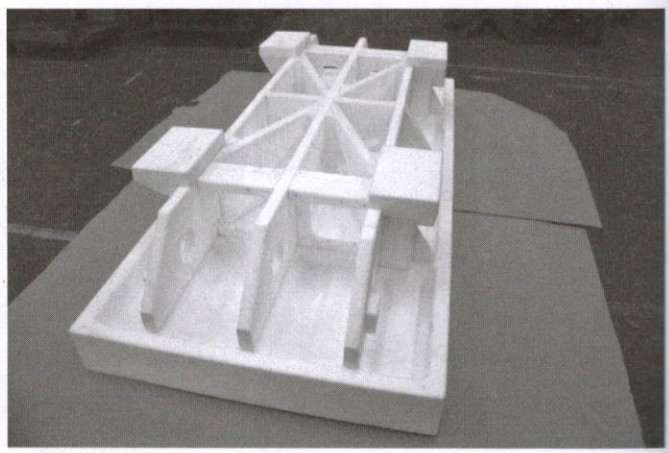
آلیاژهای متداولی که به وسیله روش فوم فداشونده ریخته‌گری می‌شوند شامل چدن‌ها، آلیاژهای آلومینیم، فولادها و آلیاژهای نیکل هستند [۱۰]. علاوه بر این، فولادهای زنگ نزن و آلیاژهای مس نیز به ندرت توسط این روش ریخته‌گری می‌شوند. مدل قطعه مورد نظر باید از لحاظ شکل و اندازه به طور دقیق از فوم، به صورت یک یا چند تکه، بریده شود و در صورت لزوم تکه‌ای



ب

Year	1991	1995	1998	1999	2001	2003	2005	2006
Lost Foam	300	7,200	28,000	40,000	68,000	103,800	216,000	300,000
Full Mold	2,000	8,000	12,000	16,000	27,000	36,800	105,000	n/a

▲ شکل ۲- (الف) رشد تعداد تولید محصولات ریخته‌گری و (ب) رشد وزنی تولید ریختگی‌ها به روش فوم فداشونده در چین، ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۶ [۹].



▲ شکل ۳- نمونه مدل فومی تهیه شده برای ریخته‌گری با روش ریخته‌گری فوم فداشونده.

مختلف به هم چسبانده شوند. در شکل ۳ یکی از مدل‌های فومی، که به وسیله کارگاه مدل‌سازی ZPS:SLEVARNA با بیش از ۹۰ سال سابقه در جمهوری چک تهیه شده است، نشان داده شده است.

اما دقت دست انسان در استفاده از سیم داغ دستگاه می‌تواند در اثر عوامل مختلف کاهش یابد. بنابراین استفاده از یک روش مکانیکی و استفاده از ماشین حرکت دهنده فوم جهت بریدن فوم‌ها می‌تواند سبب افزایش دقت در تهیه مدل‌های فومی و ازایش راندمان اقتصادی شود. به همین دلیل در این تحقیق استفاده از یک دستگاه نیمه اتوماتیک جهت برش مدل‌های فومی هدف قرار داده شد. با ساخت دستگاه نیمه اتوماتیک برای برش فوم‌ها، این امکان فراهم شد که مدل‌های فومی تهیه شده به روش نیمه اتوماتیک و روش دستی مقایسه شوند و ساخت و استفاده از دستگاه سیم داغ نیمه اتوماتیک بر ویژگی‌های مدل‌های فومی در صنعت ریخته‌گری مورد مطالعه قرار گیرد.

۲- مواد و روش تحقیق

جهت ساخت دستگاه برشکاری سیم داغ نیمه اتوماتیک، ابتدا یک صفحه فلزی (۱۰×۱۵ سانتی‌متر) انتخاب و به چهار تسمه آهنی ۳۲ سانتی‌متری که از قبل برش داده شده‌اند جوش داده می‌شود. عملیات فوق منتج به ساخت بازوهای متحرک می‌شود. دو عدد بلبرینگ تهیه شده را روی میل ترانس‌ها نصب می‌شود. به وسیله بست‌های پیچی، بلبرینگ‌ها به صفحه و بازوی متحرک متصل می‌گردد. این عمل باعث حرکت طولی بازوی متحرک شده و در واقع یک ریل (بال بوش) جهت حرکت بازوها ایجاد می‌شود. سپس زنجیر شماره ۲۵ را روی چرخ زنجیر موتور نصب می‌شود. سپس به وسیله اتصال آن به صفحه فلزی، عمل رفت و برگشت بازوهای متحرک توسط کلید سه وضعیته و درایور فراهم می‌شود. بازوی L شکل را به وسیله پیچ به میز متصل کرده و دو عدد ریل متحرک جهت تغییر در زاویه‌ی المنت روی تیر افقی و عمودی بازوی L شکل قرار می‌گیرد. المنت توسط دیمر تعبیه به منبع جریان وصل می‌شوند. دیمر حرارت مورد نیاز جهت برشکاری را کنترل می نماید. این حرارت متناسب با دانسیته پلاستوفوم و سرعت حرکت بازوی طولی قابل تنظیم است. در جدول ۱ اجزای تشکیل دهنده دستگاه برش کاری سیم داغ نیمه اتوماتیک آورده شده است.

معمولا ضخامت سیم‌ها در کارگاه‌های مختلف از ۰/۳۲ تا ۶ میلی‌متر متغیر

▲ شکل ۴- فلوچارت مراحل کلی ساخت مداهای فومی با روش نیمه اتوماتیک و روش دستی.

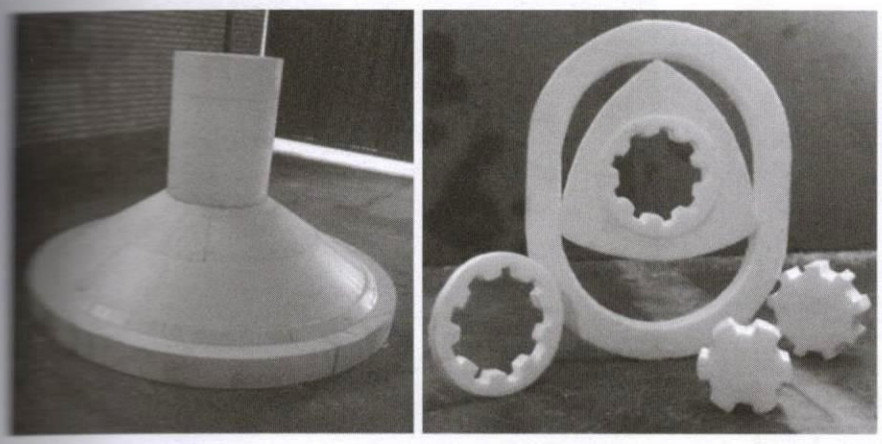
▼ جدول ۱- اجزای تشکیل دهنده دستگاه برش کاری سیم داغ نیمه اتوماتیک

ردیف	نام اجزا	ردیف	نام اجزا
۱	میزکار	۹	میل ترانس ۱۶ میلی‌متر
۲	(آهن (صفحه – نبشی – تسمه	۱۰	LME بلبرینگ
۳	زنجیر شماره ۲۵	۱۱	چرخ زنجیر ۲۲ دندانه
۴	ریل سه وضعیته	۱۲	مکانیزم کشش المنت
۵	گیره‌های نگهدارنده فوم	۱۳	(Dimmer۵۰۰۰)دیمر
۶	ولت ۱۲ DC موتور	۱۴	PCDM۱ درایور
۷	آداپتور ۱۲ ولت / ۱۰ آمپر	۱۵	المنت حرارتی (با ضخامت ۳۲/۰میلی‌متر)
۸	کلید دو مرحله‌ای و سه مرحله‌ای	۱۶	ترمینال

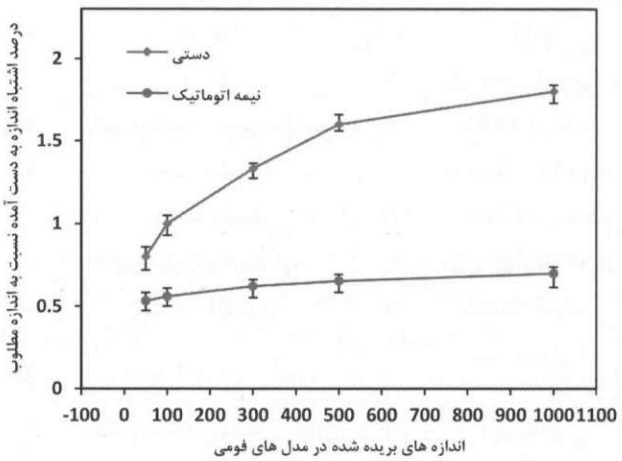
می‌باشد. لازم به ذکر است ضخامت سیم مورد استفاده ارتباط مستقیمی به دانسیته یونولیت مصرفی و ابعاد مدل دارد. با افزایش ضخامت سیم میزان آمپر دستگاه نیز باید افزایش داده شود. در روش برشکاری دستی، تمامی عملیات‌های برش به کمک اپراتور و از طریق حرکت دست صورت می‌گیرد. به عنوان مثال، در برش‌های طولی بلوک یونولیت به کمک یک صفحه راهنما هدایت می‌شود و بر اساس اندازه و ابعاد از پیش تعیین شده، عمل برشکاری در یونولیت با عبور از المنت صورت می‌گیرد و همچنین در برش‌های دورانی (استوانه زنی) با تعیین مرکز و شعاع استوانه مورد نظر و از طریق حرکت دست حول محور دوران، برش صورت می‌گیرد. در روش برشکاری نیمه اتوماتیک، برش‌های طولی به کمک مکانیزم‌های تعبیه شده در دستگاه صورت می‌گیرد. عمل برشکاری اتوماتیک بدین صورت است: بازوهای متحرک که به ریل متصل هستند به وسیله زنجیر با موتور ارتباط دارند. با فعال شدن موتور و تنظیم دور توسط درایور، بازوها را به ابتدا و انتهای میز هدایت می‌کند.

ساخت مدل‌های فومی با دو روش دستی و نیمه اتوماتیک صورت می‌گیرد. در هر دو روش، مراحل کلی ساخت یک مدل فومی (پلاستوفوم) در شکل ۴ نشان داده شده است.

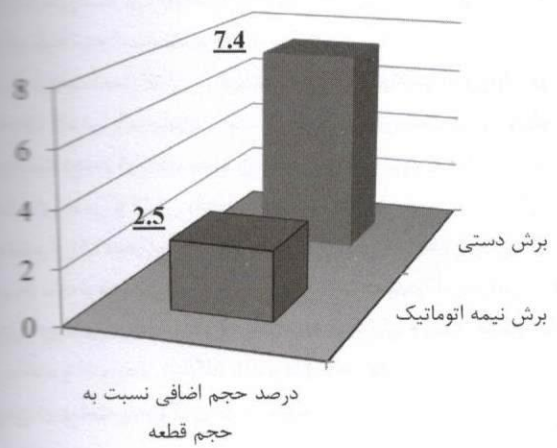
▲ شکل ۵- مونتاژ نهایی دستگاه سیم داغ برش فوم نیم اتوماتیک.



▲ شکل ۶- نمای دو مدل فومی ساخته شده از دو قطعه ریخته‌گری مختلف.



▲ شکل ۷- نمودار درصد اشتباه رخ داده در تهیه مدل‌های فومی با اندازه‌های ۵۰ تا ۱۰۰۰ میلی‌متر به وسیله روش‌های نیمه اتوماتیک و روش دستی.



▲ شکل ۸- درصد حجم اضافی مدل‌های فومی تهیه شده به وسیله روش‌های نیمه اتوماتیک و روش دستی نسبت به حجم قطعه.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- دستگاه سیم داغ برش فوم نیمه اتوماتیک

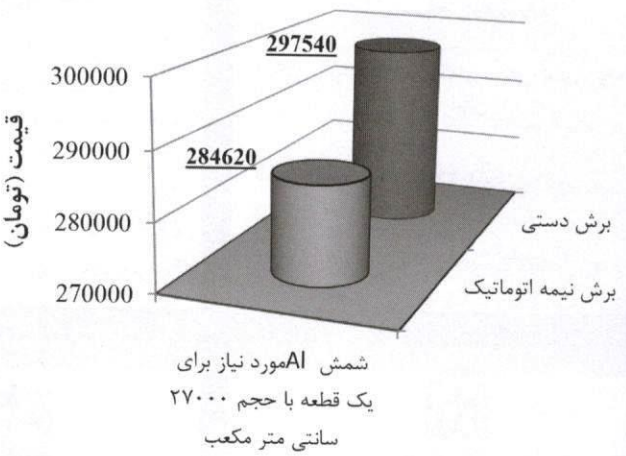
دستگاه سیم داغ برش فوم نیمه اتوماتیک مطابق با شکل ۵ ساخته شد. از جمله خصوصیات دستگاه ساخته شده می‌توان به قیمت بسیار کم دستگاه فوق نسبت به دستگاه‌های مشابه همچون دستگاه CNC، دقت بسیار بالا برشکاری اجسام بزرگ در این دستگاه نسبت به برشکاری دستی توسط اپراتور، هزینه نگهداری پایین، کارکرد راحت با دستگاه، نیمه اتوماتیک شدن بریدن فوم‌ها در این دستگاه نسبت به دستگاه‌های برش دستی و قابلیت تنظیم حرارت سیم المنت اشاره نمود.

در این دستگاه، پس از فشرده شدن کلید اصلی سیستم اجازه وارد شدن جریان برق ۲۲۰ ولت را به ترمینال موجود در دستگاه می‌دهد. ترمینال برق ورودی را به دیمر و آداپتور انتقال و تغییر می‌دهد. دیمر باعث جریان دادن به المنت می‌شود که نتیجه آن تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی حرارتی می‌باشد. همچنین اپراتور با قرار دادن فوم در میان دو گیره متحرک و فعال نمودن کلید موتور، عمل برشکاری نیمه اتوماتیک را انجام می‌دهد. جهت برشکاری اجسام استوانه‌ای شکل با مشخص کردن مرکز یونولیت و قرار دادن آن در محل طراحی شده (فلانج)، اپراتور با چرخاندن یونولیت عمل برشکاری استوانه را انجام می‌دهد.

۳-۲- تهیه مدل‌های فومی و مقایسه مدل های به دست آمده با روش نیمه اتوماتیک و دستی

دو مدل فومی از دوقطعه مختلف با روش استفاده از دستگاه نیمه اتوماتیک و روش دستی تهیه شدند. شکل ۶ تصویر این دو نمونه از مدل‌های فومی را نشان می‌دهد.

دقت مدل‌های فومی تهیه شده با دو روش برش سیم داغ دستی و با استفاده از دستگاه برش سیم داغ نیمه اتوماتیک در نمودارهای ترسیم شده در شکل ۷ نشان داده شده است. توجه به نتایج به دست آمده در این دو نمودار نشان می‌دهد که درصد اشتباه در اندازه به دست آمده در مدل‌های فومی که با روش نیمه اتوماتیک تهیه شده‌اند، بسیار کمتر از اندازه‌های حاصل در مدل‌های



▲ شکل ۹- هزینه شمش آلومینیم مورد نیاز برای یک تولید یک قطعه با حجم ۲۷۰۰۰ سانتی متر مکعب با استفاده از روش‌های نیمه اتوماتیک و دستی جهت تهیه فوم.

فومی است که با روش دستی تهیه شده‌اند. در برش ۱۰۰ میلی‌متر به وسیله روش دستی به طور میانگین ۱ درصد اشتباه مشاهده شده است ولی در برش ۱۰۰ میلی‌متر به وسیله روش نیمه اتوماتیک مقدار میانگین درصد اشتباه به ۰/۵۶ درصد تقلیل می‌یابد. مشاهده تغییرات درصد اشتباه رخ داده در روند نمودارها نشان می‌دهد که با افزایش مقدار اندازه فوم‌ها و به عبارت بهتر اندازه لازم برای مدل‌های فومی، احتمال افزایش درصد اشتباه در روش دستی با نرخ بسیار قابل توجه افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که در برش مدل فومی با اندازه ۱۰۰۰ میلی‌متر، درصد اشتباه به حدود ۱/۸ درصد افزایش می‌یابد. درحالی‌که این مقدار برای روش نیمه اتوماتیک به اندازه ۰/۷ درصد نتیجه شده است. بنابراین به طور کلی می‌توان بیان کرد که استفاده از روش نیمه اتوماتیک در تهیه مدل‌های فومی مورد استفاده در صنایع ریخته‌گری می‌تواند مقدار درصد اشتباه را از ۱/۸ به ۰/۷ درصد (نزدیک به نصف) کاهش دهد و دقت تهیه مدل‌های فومی روش ریخته‌گری فوم فداشونده را بیش از دو برابر افزایش دهد.

در ادامه، درصد حجم اضافی به وجود آمده در مدل‌های فومی تهیه شده با دو روش نیمه اتوماتیک و روش دستی محاسبه گردید و نتایج حاصل در شکل ۸ آورده شد. همان‌طور که در نمودارهای شکل مذکور مشاهده می‌شود، درصد حجم اضافی به دست آمده نسبت به حجم قطعه در مدل‌های فومی بریده شده با روش دستی ۷/۴ درصد است و با استفاده از روش استفاده از دستگاه برش سیم داغ نیمه اتوماتیک، این مقدار درصد حجم اضافی به ۲/۵ درصد کاهش می‌یابد. این کاهش حجم اضافی در مدل‌های فومی می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر قیمت تمام شده قطعات تولید شده به روش ریخته‌گری فوم فداشونده بگذارد. همانطور که در شکل ۹ دیده می‌شود، اگر از تاثیر حجم اضافی مدل‌های فومی بر بقیه هزینه‌های تولید قطعه صرفه نظر شود، تاثیر جایگزین کردن روش نیمه اتوماتیک بر روش دستی در تولید فوم‌های ریخته‌گری می‌تواند هزینه شمش آلومینیم مورد نیاز برای یک قطعه با حجم ۲۷۰۰۰ سانتی متر مکعب را به مقدار ۴/۴ درصد کاهش دهد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک دستگاه سیم داغ برش فوم نیمه اتوماتیک برای اولین بار ساخته شد و جهت تهیه مدل‌های فومی ریخته‌گری فوم فداشونده مورد استفاده قرار گرفت. مدل‌های فومی تهیه شده به روش نیمه اتوماتیک و روش دستی مقایسه شدند و ویژگی‌های مهم و موثر آن‌ها در زمینه ریخته‌گری مورد مطالعه قرار گرفت. نتایجی که در ادامه آورده شده‌اند از این مطالعه مستخرج شده‌اند:

۱- دقت اندازه‌های مدل‌های تهیه شده به روش نیمه اتوماتیک بیش از دو برابر دقت مدل‌های تهیه شده به روش متداول دستی بود.

۲- مدل‌های تهیه شده به روش نیمه اتوماتیک دارای حجم اضافی ۲/۵ درصد نسبت به حجم قطعه اصلی بودند. درحالی‌که مقدار مذکور برای مدل‌های فومی بریده شده به روش دستی ۷/۴ درصد بود.

۳- راندمان اقتصادی ریخته‌گری قطعات با استفاده از مدل‌های فومی ساخته شده با روش نیمه اتوماتیک از نظر ذوب مصرفی برای قطعات آلومینیمی ۴/۴ درصد بیشتر از قطعات تولیدی با استفاده از مدل‌های فومی ساخته شده با روش دستی بود.

منابع

۱- امامی، م.، ثقفیان لاریجانی، ح.، « اصول تکنولوژی ریخته‌گری»، شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، تهران ۱۳۹۴.

2- M. Khodai, N. Parvin, "Pressure measurement and some observation in lost foam casting", Journal of Materials Processing Technology, 206, Issues 1–3, 2008, 1-6.

3- J-l. Li, R-sh. Chen, W. Ke, "Microstructure and mechanical properties of Mg-Gd-Y-Zr alloy cast by metal mould and lost foam casting", Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 21, Issue 4, 2011, 761-766.

4- S. M. H. Mirbagheri, S. Serajzadeh, N. Varahram, P. Davami, "Modelling of foam degradation in lost foam casting process", Materials & Design, 27, 2006, 115-124.

5- D. A. Caulk, "A foam melting model for lost foam casting of aluminum", International Journal of Heat and Mass Transfer, 49, 2006, 2124-2136.

6- Sh. Tabibian, E. Charkaluk, A. Constantinescu, A. Oudin, F. Szmytka, "Behavior, damage and fatigue life assessment of lost foam casting aluminum alloys under thermo-mechanical fatigue conditions", Procedia Engineering, 2, Issue 1, 2010, 1145-1154.

7- J. Shayegh, S. Hossainpour, M. Rezaei, A. Charchi, "Developing a new 2D model for heat transfer and foam degradation in EPS lost foam casting (LFC) process", International Communications in Heat and Mass Transfer, 37, 2010, 1396-1402.

8- M. R. Barone, D. A. Caulk, "A foam ablation model for lost foam casting of aluminum", International Journal of Heat and Mass Transfer, 48, 2005, 4132-4149.

9- D. Sun, "An overview of lost foam casting technology development in china", AFS transaction of 2008, American foundry society, IL USA, 1-8.

10- L. Wang, N. Limodin, A. Bartali, J-F. Witz, "Influence of pores on crack initiation in monotonic tensile and cyclic loadings in lost foam casting A319 alloy by using 3D in-situ analysis", Materials Science and Engineering: A, 673, 2016, 362-372.