



مطالعه تجربی متغیرهای فرآیند ریخته‌گری مدل فومی فداشونده با استفاده از روش تاگوچی

محمدامین شاهروخیان دهکردی¹، مجیدکریمیان^{2*}

1- کارشناسی ارشد، مکانیک، باشگاه پژوهشگران و نخبگان جوان دانشگاه آزاداسلامی واحد خمینی شهر، اصفهان

2- استادیار، مکانیک، باشگاه پژوهشگران و نخبگان جوان دانشگاه آزاداسلامی واحد خمینی شهر، اصفهان

* اصفهان، صندوق پستی 119/84175، mkarimian@iaukhsh.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 17 بهمن 1395

پذیرش: 04 فروردین 1396

ارائه در سایت: 23 اردیبهشت 1396

کلید واژگان:

ریخته‌گری مدل فومی فداشونده

روش تاگوچی

تحلیل واریانس

سختی

درصدتخلخل

چکیده

روش ریخته‌گری مدل فومی فدا شونده، یک روش نوین برای ریخته‌گری قطعات پیچیده می‌باشد که علاوه بر داشتن مزایای فنی و اقتصادی نسبت به روش سنتی دارای مزایای زیست محیطی نیز بوده و از این رو مورد توجه ویژه قرار گرفته است. در این پژوهش به بررسی اثر متغیرهای چگالی فوم، دمای ذوب‌ریزی و ویسکوزیته پوشان که از اثرگذارترین متغیرهای فرآیند ریخته‌گری مدل فومی فداشونده بر روی درصد تخلخل و سختی نمونه‌ها هستند، پرداخته می‌شود. به منظور طراحی آزمایشات و تعیین سطوح بهینه هر یک از متغیرهای در نظر گرفته شده از روش تاگوچی و تحلیل نسبت سیگنال به نویز و واریانس استفاده گردید. کلیه متغیرهای در نظر گرفته شده در سه سطح و با استفاده از روش تحلیل تاگوچی آرایه متعامد L9 مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که چگالی فوم 20 kg/m^3 ، دمای ذوب‌ریزی 740°C و ویسکوزیته پوشان 20 sec به علت ایجاد حالت مناسب بین تجزیه حرارتی و تبخیر فوم با سرعت پیشروی مذاب و خروج گاز بوجود آمده در مدل از طریق منافذ پوشان و همچنین ایجاد کمترین مقدار درصد تخلخل (2.6%) به همراه بیشترین مقدار سختی (27.7 HRA)، مقادیر بهینه برای متغیرها بوده که چگالی فوم و دمای ذوب‌ریزی به ترتیب تاثیرگذارترین پارامترها بر روی درصدتخلخل و سختی با مقادیر ضریب تاثیر 64.58% و 56.35% می‌باشند.

An Experimental study on Lost Foam Casting using the Taguchi method

Mohammad Amin Shahrokhian Dehkordi, Majid Karimian*

Department of Mechanical Engineering, Young Researchers Club and the Elite Islamic Azad University of KhomeiniShahr, Esfahan, Iran

* P.O.B. 119/84175, Esfahan, Iran, mkarimian@iaukhsh.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 05 February 2017
Accepted 24 March 2017
Available Online 13 May 2017

Keywords:

Lost Foam Casting
Taguchi method
Analysis of Variance
Hardness
Porosity

ABSTRACT

Lost foam casting is a new method for casting complex parts. This method, in addition to its technical and economic advantages over the traditional methods, has environmental benefits and therefore has been of special interest. In this study, the effects of foam density, pouring temperature, and coating viscosity were studied, which are the most important factors affecting porosity and hardness in the lost foam casting method. The Taguchi method, signal to noise ratio and analysis of variance were used to design experiments and determine the optimal levels of each variable. All the considered variables were evaluated in three levels using L9 orthogonal array Taguchi analysis. Results showed that foam density of 20 kg/m^3 , pouring temperature of 740°C and coating viscosity of 20 sec were the optimal values for the variables due to creating appropriate condition between thermal decomposition and foam evaporation with speed of melting advancement and exhaust gas through the pores in the coating and creating the lowest porosity (2.6%) and the highest hardness value (27.7 HRA). Foam density and pouring temperature were the most influential parameters on the porosity and hardness with the impact factors of 64.58% and 56.35%, respectively.

1- مقدمه

ضریب انبساط حرارتی پایین اشاره نمود [3]. خواص آلیاژ Al-Si-Mg به شدت به فرآیند ریخته‌گری، ترکیب شیمیایی، رفتار مذاب و نحوه انجماد و اندازه دانه و... وابسته است [3]. انجماد آلیاژهای این گروه نقش بسیار با اهمیتی بر روی اندازه دانه، ساختار، تشکیل تیغه‌های سیلیسیم در زمینه و... دارد. فرآیند ریخته‌گری با مدل فومی یک تکنولوژی جدید برای تولید قطعات پیچیده فلزی می‌باشد. فرآیند ریخته‌گری با مدل فومی اولین بار در سال 1958 تحت عنوان ریخته‌گری توپر ابداع شد. [5,4] در چند سال اخیر روش

ریخته‌گری آلیاژهای آلومینیم و Al-Si-Mg به طور گسترده‌ای در صنایع مختلف مانند هوافضا و صنایع خودروسازی به علت خواص منحصر به فرد آن - ها استفاده می‌شود [2,1]. از مهمترین دلایل استقبال زیاد از این آلیاژها و مخصوصاً معروف‌ترین آلیاژ این گروه یعنی A356 می‌توان به مواردی چون نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به خوردگی مناسب، سیالیت و قابلیت ریخته‌گری عالی، مقاومت به ترک گرم، قابلیت جوشکاری مناسب و همچنین

Please cite this article using:

M. A. Shahrokhian Dehkordi, M. Karimian, An Experimental study on Lost Foam Casting using the Taguchi method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 327-334, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

مقدار، منومر به هیدروژن و هیدروکربن‌ها تجزیه می‌گردد که این گاز باید از طریق پوشش و ماسه خارج گردد، در غیر این صورت به درون مذاب برگشته و درون قالب محبوس می‌شود که باعث بوجود آمدن عیوب خارجی و داخلی خواهد شد [12,13].

در این پژوهش سعی بر آن است تا با استفاده از روش طراحی آزمایشات تاگوچی و تحلیل نتایج حاصل از واریانس و نسبت سیگنال به نویز پارامترهای چگالی فوم، دمای ذوب‌ریزی و ویسکوزیته پوشان که از مهمترین و تاثیرگذارترین پارامترهای فرآیند ریخته‌گری با مدل فومی فداشونده هستند، مقدار ضریب تاثیر و اثرگذاری هر یک از پارامترها بر روی مقدار درصد تخلخل و سختی قطعات ریخته‌گری شده مشخص گردد و بتوان تعیین نمود که کدام یک از پارامترها دارای اهمیت و اثرگذاری بیشتری می‌باشند.

2- مواد و روش تحقیق

به منظور بررسی پارامترهای فرآیند ریخته‌گری با مدل فومی فداشونده بر روی درصد تخلخل و سختی از آلیاژ A356 با ترکیب شیمیایی بیان شده در جدول 1 استفاده شد.

ساخت مدل فومی که از جنس پلی‌استایرن بود به صورت پلکانی و با پنج پله به ضخامت‌های 3، 6، 12، 18، 24 میلی‌متر در نظر گرفته شد. بدین منظور ابتدا بلوک خام فوم پلی‌استایرن با چگالی‌های $(16, 20, 24) \text{ kg/m}^3$ جهت بررسی اثر چگالی فوم بر ریخته‌گری مدل فومی و با ابعاد 100×250 میلی‌متر توسط دستگاه برش الکتریکی سیم داغ با دقت ابعادی 0.5 میلی‌متر برش داده شد. شکل 1 مدل فومی در نظر گرفته شده را برای این تحقیق نشان می‌دهد.

سیستم راهگاهی سرتاسری در بالا برای مدل‌ها به منظور تغذیه مناسب مذاب به مدل فومی در طول انجام عملیات ذوب‌ریزی استفاده شد. سیستم راهگاهی استفاده شده برای هر مدل فومی مطابق با چگالی فوم مدل بوده است. بعد از اتصال سیستم راهگاهی به مدل‌ها و آماده‌سازی آن‌ها، مدل‌ها در محلولی متشکل از زیرکینیم و سیلیس کلوفیدی با نسبت 3 به 1 و مقدار ویسکوزیته‌های 15، 20، 25 ثانیه که با کاپ فورد شماره پنج اندازه‌گیری شد، پوشان‌دهی شدند تا لایه‌ای نازک از مواد سرامیکی و نسوز بر روی آن‌ها ایجاد

جدول 1 ترکیب شیمیایی آلیاژ استفاده شده

Table 1 Chemical composition of A356 alloy

Zn	Si	Cu	Fe	Mg	Ti	Mn	Al
0.1	7.10	0.2	0.17	0.33	0.2	0.1	bal

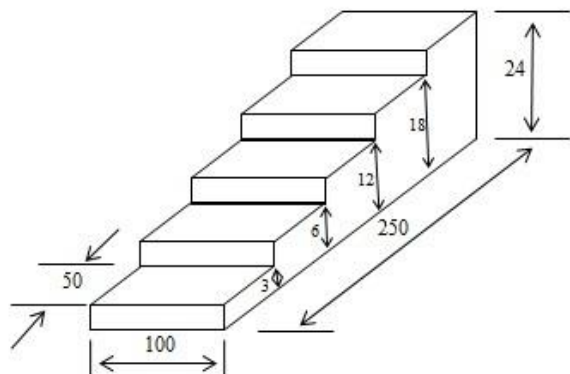


Fig. 1 View of Lost Foam Casting model dimensions (mm)

شکل 1 نمایی از ابعاد مدل فومی فداشونده بر حسب میلی‌متر

ریخته‌گری با مدل فومی فداشونده تبدیل به یک روش استاندارد برای تولید قطعات پیچیده با کیفیت سطح مناسب، کاهش هزینه‌های سوخت و ساخت قالب ... شده است [6]. برخلاف روش ریخته‌گری سنتی (ریخته‌گری ماسه‌ای)، ویژگی منحصر به فرد ریخته‌گری با مدل فومی فداشونده وجود یک مدل فومی (معمولاً از جنس پلی‌استایرن منبسط شده) که شکل نهایی قطعه مورد نظر را دارد، در مسیر فلز مذاب است. این مدل قبل از ریخته‌گری برداشته نمی‌شود و پس از پوشان‌دهی و خشک شدن آن، فلز مذاب بر روی مدل فومی ریخته می‌شود [7]. این روش ریخته‌گری شامل چندین مرحله اساسی و مهم است که برای تولید ریخته‌گری با کیفیت بالا باید تحت کنترل قرار گیرند.

فرآیند LFC با تهیه مدل فومی که در پوشان نسوز غوطه‌ور می‌شود تا یک لایه نازک از جنس پوشان را بر روی آن ایجاد کند، آغاز می‌شود. بعد از خشک شدن لایه پوششی، مدل پوشش داده شده درون قالبی قرار می‌گیرد و اطراف آن با ماسه خشک و بدون مواد چسبنده پر می‌شود، سپس ماسه به وسیله ارتعاش فشرده می‌شود تا یک ساختار محکم برای حمایت از مدل در حین ریخته‌گری به وجود آید. سپس فلز مذاب داخل قالب ریخته می‌شود، بر اثر حرارت فلز مذاب، مدل فومی تجزیه حرارتی شده و به تدریج فلز مذاب جایگزین مدل فومی می‌شود در انتها و پس از طی شدن زمان انجماد، قطعه ریخته‌گری حاصل می‌شود [8]. ریخته‌گری LFC نسبت به ریخته‌گری سنتی، مزیت‌های زیادی دارد. از جمله استفاده از روش‌های تولید ساده‌تر مانند عدم نیاز به ماهیچه، به دلیل استفاده از فوم در حین ریختن فلز مذاب، همچنین استفاده از این فرآیند امکان اتصال چند مدل به یکدیگر را فراهم می‌کند که برای تولید قطعات بسیار پیچیده با کیفیت سطح بالا و کاهش هزینه‌ها مناسب است [9]. فرآیند LFC تolerانس‌های بسته و سطح پایانی همواری را تولید می‌کند که به قطعه نهایی بسیار نزدیک است [10].

در فرآیند LFC، پراکنندگی قالب، انتقال حرارت و انجماد به شدت تحت تاثیر تجزیه مدل فومی و تخلیه گاز قالب است. سه پدیده در فرآیند LFC وجود دارد که شامل: جریان کم فلز مذاب، کاهش هوا و محصولات حاصل از تجزیه فوم می‌باشد. جریان کم فلز مذاب و کاهش اتمسفر ممکن است به کاهش اکسید و سرباره کمک کنند در صورتی که اگر محصولات حاصل از تجزیه فوم از قالب خارج نشوند ممکن است منبسطی برای تشکیل عیوب شوند [11]. بنابراین برای بهبود خواص ریخته‌گری LFC، درکی از واکنش بین مدل فومی و فلز مذاب و همچنین جابجایی و تخلیه محصولات حاصل از تجزیه مدل فومی از طریق پوشان و ماسه ضروری است.

عیوب را به طور کلی و در یک دسته‌بندی جامع می‌توان به عیوب داخلی و عیوب خارجی دسته‌بندی نمود. عیوب خارجی که اکثراً روی سطح ظاهر می‌شوند شامل: پرنشیدن کامل قالب، روی هم افتادگی، تاول زدن و یا آبله‌گون شدن هستند. عیوب داخلی ممکن است داخل قطعه ریخته‌گری ظاهر شود و شامل: تخلخل، آخال و چین‌خوردگی باشد. برخی از عیوب به ذوب شدن مدل فومی و سرعت جریان مذاب و تکه‌های بریده شده لایه پوشش که به درون مذاب کشیده می‌شوند، مربوط می‌باشد که تخلخل‌گازی و عیوب ناخالصی ممکن است ناشی از به دام افتادن محصولات تجزیه‌گازی و مایع فوم باشد [2]. زمانی که فوم در اثر حرارت مذاب تجزیه می‌گردد مقداری از آن به گاز و مقداری از آن نیز به صورت مواد سیال‌گرانو تجزیه می‌گردد به نحوی که در دمای 400°C نرخ تبخیر فوم تاحدی افزایش یافته است که محصولات گازی در این دما تشکیل می‌شوند و تا دمای 830°C این گازها عمدتاً از منومر استایرن تشکیل شده‌اند ولی با افزایش دما به بالاتر از این

جدول 2 مشخصات میز ارتعاشی

Table 2 Vibration table specification

دور موتور (rpm)	ولتاژ (V)	فرکانس ارتعاش (Hz)	ابعاد میز ارتعاشی (mm)
3000	240	0.33	410 ارتفاع × 400 عرض × 600 طول

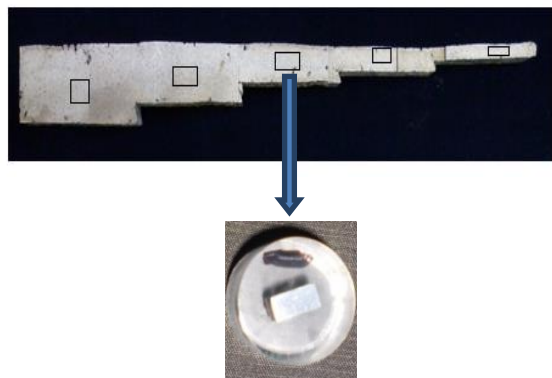


Fig. 4 Typical longitude sectioning of cast sample

شکل 4 برش طولی نمونه ریخته‌گری

پذیرفت.

3- طراحی آزمایش‌ها

به طور کلی در طراحی آزمایشات، برای مشخص کردن سطوح بهینه، سطوح پارامترها و تعیین میزان تاثیرگذاری آن‌ها، متغیرهای فرآیند به دو دسته‌ی کنترلی و غیرکنترلی تقسیم می‌شوند. عوامل کنترلی عواملی هستند که به منظور انتخاب بهترین شرایط در طراحی پروسه ساخت به کار گرفته می‌شوند. عوامل غیرکنترلی تمام عواملی هستند که باعث ایجاد تغییرات می‌شوند، اما آن‌ها بر حسب شرایط، ثابت فرض می‌شوند. نسبت سیگنال به نویز، نشان دهنده‌ی حساسیت مشخصه‌ی کیفی مورد بررسی به عوامل کنترلی و غیرکنترلی (پارامترهای اغتشاشی)، در یک فرایند کنترل شده می‌باشد. در هر آزمایش، ما همواره به دنبال بالاترین نسبت (S/N) در نتایج هستیم. مقدار (S/N) بالا نشان دهنده این است که اثر پارامترهای قابل کنترل، بیشتر از اثر پارامترهای غیر قابل کنترل و یا پارامترهای اغتشاشی است. طراحی فرآیند تولید با بالاترین نسبت (S/N) ، همواره باعث ایجاد کیفیت بهینه با حداقل واریانس می‌شود.

در روش تاگوچی، پس از تعیین پارامترهای ورودی و خروجی و مقادیر آن‌ها، تبدیل داده‌ها و مشاهدات به یک عدد (S/N) در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله اول، میانگین مجموع مربعات انحراف (MSD) ، که یک کمیت آماری است و انحراف از مقدار مشخصه و هدف را نشان می‌دهد، محاسبه می‌شود. این تابع با توجه به شرایط مسئله دارای حالت‌های مختلفی است. دو حالت استفاده شده در این تحقیق به قرار زیر است:

مقدار کوچک‌تر بهتر¹ است: در اندازه‌گیری درصد تخلخل هرچه عدد کوچک‌تر باشد بهتر است. بنابراین برای محاسبه تابع زیان از فرمول استفاده می‌شود:

$$S/N = -10 \log \left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{Y_i^2} \right) \right) \quad (1)$$

مقدار بزرگ‌تر بهتر¹ است: در اندازه‌گیری میزان سختی، هر چه عدد بزرگ‌تر باشد بهتر است، بنابراین برای محاسبه تابع زیان از فرمول استفاده

شود. پوشان‌دهی به روش غوطه‌وری و به مدت 60 ثانیه به منظور ایجاد پوششی یکنواخت و با ضخامت مناسب صورت پذیرفت. شکل 2 تصویر مدل فومی پس از اتصال سیستم راهگاهی را نشان می‌دهد.

کلیه مدل‌ها پس از پوشان‌دهی در اتاقی با دمای 27 درجه سانتی‌گراد و به مدت 24 ساعت جهت حصول اطمینان از خشک شدن کامل پوشان نگهداری شد. مدل فومی پوشان‌دهی شده بعد از خشک شدن به صورت عمودی در قالبی از جنس آلومینیم با ابعاد 350×460 میلی‌متر به صورتی که از کناره‌های قالب و کف آن فاصله 100 میلی‌متری داشته باشد، قرار گرفت و اطراف آن با ماسه سیلیسی دارای عدد نرمی AFS 40-60 پر شد [14]. در شکل 3 نحوه قرارگیری مدل فومی به همراه ابعاد جانمایی آن درون ماسه و قالب آلومینیمی نشان داده شده است.

از میز ارتعاشی که دارای مشخصاتی مطابق جدول 2 بود جهت ایجاد ارتعاش و فشردن ماسه اطراف مدل فومی استفاده شد و در نهایت ذوب فلز در کوره القایی و با سه دمای 680، 740، 800 درجه سانتی‌گراد انجام پذیرفت.

میزان درصد تخلخل نمونه‌ها به روش ارشمیدیس و سختی آن‌ها با استفاده از آزمون راکول A محاسبه شد که بدین منظور از وسط هر قسمت در نمونه پلکانی برشی مطابق شکل 4 زده شد و قسمتی از نمونه‌ها برش زده شد که پس از انجام متالوگرافی، تست سختی سنجی بر روی آن‌ها صورت

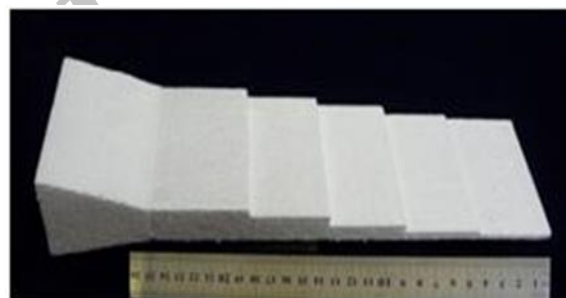


Fig. 2 View of Lost Foam Casting model with Pouring cup

شکل 2 نمایی از مدل فومی فداشونده با سیستم راهگاهی سرتاسری

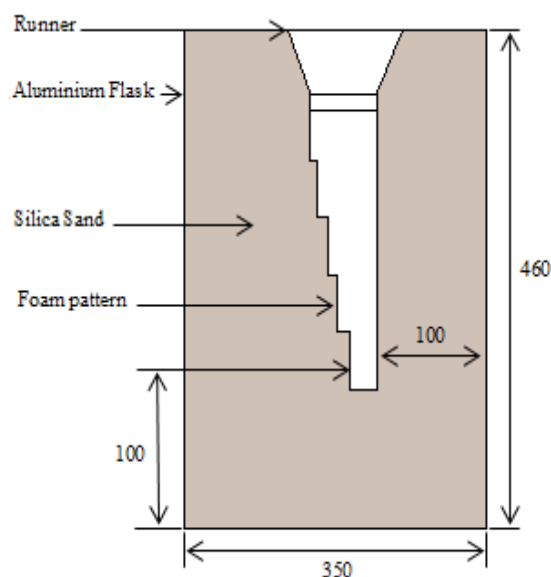


Fig. 3 Position of the Foam pattern inside the flask (mm)

شکل 3 موقعیت قرارگیری مدل فومی درون قالب برحسب میلی‌متر

¹ The Smaller is better

می‌شود.

$$S/N = -10 \log \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^2)}{n} \right) \quad (2)$$

در روابط بالا، n مرتبه تکرار و Y مقدار خروجی آزمایش و واحد نسبت سیگنال به نویز دسیبل می‌باشد. در مرحله بعد با استفاده از این مقدار نسبت سیگنال به نویز محاسبه می‌شود. پس از محاسبه تابع زیان برای هر خروجی از فرمول مقدار سیگنال به نویز کل را محاسبه می‌کنیم L در این فرمول همان مقدار تابع زیان محاسبه شده در قسمت قبل است:

$$S/N = -10 \log \left(\sum_{i=1}^n (L_i) \right) \quad (3)$$

در جدول 3 پارامترهای مورد بررسی و همچنین سطوح هر کدام در روش طراحی آزمایش تاگوچی نشان داده شده است.

4- بحث و نتایج

در جدول 4 نتایج حاصل از مقادیر سیگنال به نویز به همراه مقادیر عملی فرآیند ریخته‌گری مدل فومی فداشونده بر روی درصد تخلخل و سختی نمونه‌های ریخته‌گری شده نشان داده شده است که در ادامه به بررسی و تشریح اثر پارامترها بر روی درصد تخلخل و سختی نمونه‌ها به صورت کامل پرداخته می‌شود.

4-1 اثر پارامترهای فرآیند بر روی درصد تخلخل

در این تحقیق مقدار درصد تخلخل شامل تخلخل گازی و انقباضی می‌باشد. نتایج حاصل از نمودار سیگنال به نویز برای درصد تخلخل با اعمال حالت، دستیابی به درصد تخلخل کمتر در شکل 5 نشان داده شده است. بهترین حالت بر طبق نمودارهای سیگنال به نویز مربوط به چگالی فوم 20 kg/m^3 دمای ذوب‌ریزی 680° C و ویسکوزیته پوشان 20 sec بدست آمده است که مطابق جدول 4، آزمایش شماره 4 می‌باشد.

در چگالی فوم 24 kg/m^3 میزان جوش خوردن دانه‌های فوم نسبت به چگالی فوم‌های کمتر افزایش می‌یابد و فضای خالی کمتری بین دانه‌های فوم دیده می‌شود که این منافذ بین دانه‌های فوم در شکل 6 با بزرگنمایی 200 میکرومتر نشان داده شده است. از طرفی در خلال واکنش مذاب و فوم یک لایه پیوسته و متصل از محصولات تجزیه فوم تشکیل می‌شود که در این

جدول 3 پارامترهای مورد ارزیابی به همراه سطوح آن‌ها

Table 3 investigating parameters with their levels

پارامتر	سطح 1	سطح 2	سطح 3
A چگالی فوم (kg/m^3)	16	20	24
B دمای ذوب‌ریزی ($^\circ \text{C}$)	680	740	800
C ویسکوزیته پوشان (sec)	15	20	25

جدول 4 پارامترهای مورد ارزیابی به همراه سطوح آن‌ها

Table 4 Investigating parameters with their levels

شماره آزمایش	پارامترهای خروجی		نسبت سیگنال به نویز	
	درصد تخلخل	سختی	درصد تخلخل	سختی
1	2.9	26.8	-9.2480	28.5627
2	3.1	25.6	-9.8272	28.1648
3	5.8	22.1	-15.2686	26.8878
4	2.6	27.7	-8.2995	28.8496
5	3.2	26.8	-10.1030	28.5627
6	4.3	25.4	-12.6694	28.0967
7	6.5	27.3	-16.2583	28.7233
8	5.4	27.1	-14.6479	28.6594
9	7.5	25.8	-17.5012	28.2324

¹ The larger is better

شرایط گازه‌های داغ نمی‌توانند به طور عمیق در فوم با تراکم بالا نفوذ کنند، در نتیجه منطقه متأثر از حرارت در جلوی مذاب کاهش می‌یابد و شتاب جریان مذاب کاسته می‌شود که منجر به کاهش درجه حرارت فلز مذاب و انجماد سریع آن می‌شود و در نتیجه محصولات فوم درون مذاب به دام می‌افتند و تخلخل بیشتری را در نمونه‌ها بوجود می‌آورند. همچنین علت افزایش درصد تخلخل در چگالی فوم 16 kg/m^3 را این‌چنین می‌توان بیان نمود که در این چگالی فوم با توجه به اینکه تراکم دانه‌ها کم است در نتیجه شتاب جریان مذاب به علت کوچک‌تر شدن لایه پیوسته از محصولات تجزیه فوم و نفوذ بیشتر گازه‌های داغ به داخل ساختار مدل فومی، تبخیر فوم با سرعت بیشتر صورت می‌گیرد و گاز حاصل از این فرآیند در مدت زمان کمتری تولید می‌شود که در این بازه زمانی فرصت خروج از طریق پوشش و ماسه را پیدا نمی‌کند و در نتیجه مقداری از گاز حاصل در نمونه به دام می‌افتد و موجب افزایش درصد تخلخل در نمونه می‌شود. اما در چگالی فوم 20 kg/m^3 مشاهده می‌شود که کمترین مقدار درصد تخلخل وجود دارد زیرا سرعت پیشروی فلز مذاب و زمان تجزیه حرارتی مدل فومی با سرعت خروج گاز حاصل از تجزیه به حالت متناسب خود رسیده است و گاز توانسته است از طریق منافذ پوشان و ماسه در مدت زمانی که مدل فومی تجزیه می‌گردد، خارج شود که کومار نیز بیان نموده بود با افزایش 64 درصدی چگالی فوم، زمان پرکنندگی فلز مذاب 2 برابر افزایش می‌یابد [15]. همچنین بررسی نحوه تجزیه فوم که توسط گریفیت و همکاران در سال 2016 با استفاده از قالب شیشه‌ای صورت گرفته است نشان داده که با افزایش چگالی فوم فاصله بین جبهه مذاب و فوم بیشتر می‌شود که در نتیجه باعث انجماد سریعتر مذاب گردیده است [16].

مطابق شکل 5 مشاهده می‌شود که بالاترین مقدار نسبت سیگنال به نویز برای دمای 680° C می‌باشد. با افزایش دمای ذوب‌ریزی از 680° C تا 800° C سیالیت فلز مذاب افزایش می‌یابد و همچنین مقدار حرارت بیشتری به جهت تجزیه مدل فومی بدست می‌آورد که خود این موارد موجب می‌شوند تا سرعت پیشروی فلز مذاب بیشتر شود و گازه‌های داغ حاصل از تجزیه فوم بتوانند به صورت عمیق‌تر از لایه پیوسته بین فلز مذاب و مدل فومی عبور کرده و فوم را با سرعت و شتاب بیشتری تجزیه و تبخیر نمایند که در نتیجه نسبت حجم گاز تولید شده در طی ذوب‌ریزی به زمان پرشدن مدل فومی با افزایش دما کاهش می‌یابد یعنی گاز تولید شده فرصت زمانی کمتری جهت خروج از طریق منافذ پوشان و ماسه دارد اما با توجه به ثابت بودن منافذ پوشان و ماسه این گاز نمی‌تواند به صورت کامل خارج گردد و در نمونه‌ها به صورت تخلخل محبوس می‌شود که وارنر نیز لازم بودن سرعت پیشروی پایین مذاب به منظور دستیابی به نمونه‌های بدون عیب را بیان نموده است [17]. اما در دمای 740° C این اختلاف به مقدار کمی با دمای ذوب‌ریزی 680° C مشاهده شده است که علت این امر نفوذپذیری مناسب پوشان می‌باشد.

در شکل 5 قسمت مربوط به ویسکوزیته پوشان و براساس نمودار نسبت سیگنال به نویز بهترین حالت برای ویسکوزیته پوشان، مقدار 20 sec نشان داده شده است زیرا در این مقدار نفوذپذیری پوشان به صورت متناسب با نرخ گاز تولید شده در اثر تجزیه فوم و سرعت خروج گاز از طریق منافذ پوشان می‌باشد و در مقادیر کمتر و بیشتر آن به ترتیب نفوذپذیری زیاد و کم پوشان را داریم که خود عوامل ایجاد عیوب و افزایش درصد تخلخل در نمونه‌های تولید شده، می‌باشند. در ویسکوزیته پوشان 15 sec به سبب اینکه پوشان رقیق‌تر بوده است و در زمان ثابتی مدل فومی به روش غوطه‌وری در آن

کند، بالا می‌رود. به علت افزایش فشار در پشت پوشان و اعمال نیرو به پوشان، برآمدگی‌هایی بر سطح قطعه ایجاد می‌شود. مشکل بعدی از حرکت ناپایدار مذاب ناشی می‌شود، زیرا گازها به طور غیر پیوسته و شدید از میان فلز مذاب و پوشان خارج می‌گردند و با هر بار خروج گاز، فشار کاهش پیدا کرده، جبهه مذاب پیشرفته و به دیواره‌ی قالب همچون پتک ضربه وارد می‌کند که نتیجه‌ی این ضربه‌ها ایجاد انبساط در قطعه و یا فرو ریختن ماسه فشرده به داخل حفره‌های مدل و همچنین عدم خروج کامل گاز تولید شده در اثر تجزیه حرارتی فوم است که موجب افزایش درصد تخلخل می‌شوند.

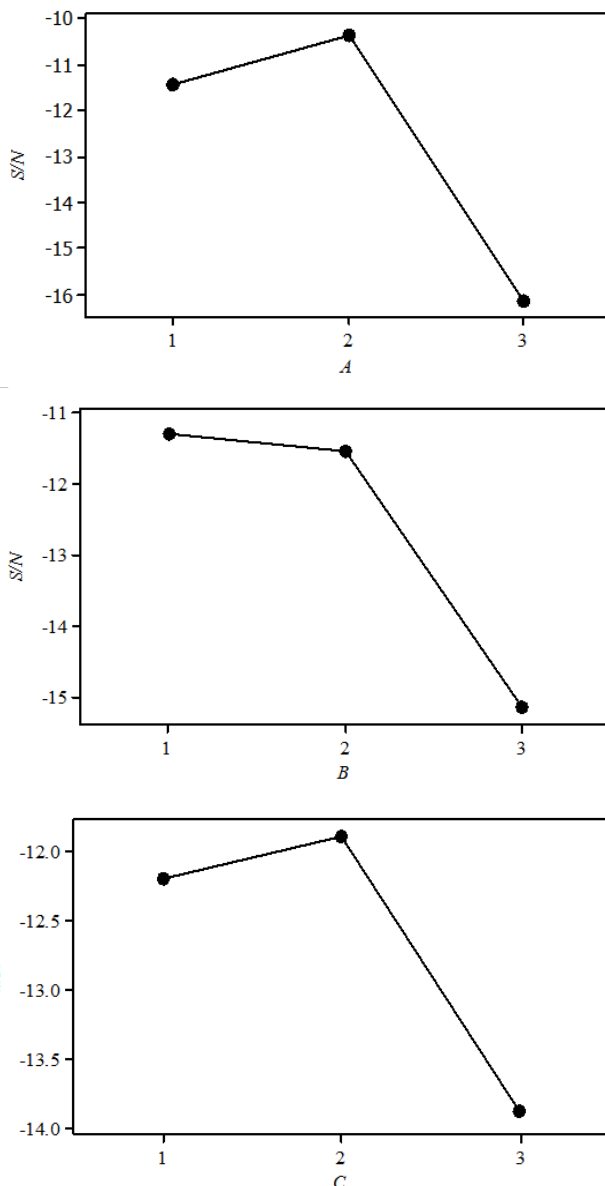
شکل 6 که با بزرگنمایی 200 میکرومتر از نمونه فوم مورد استفاده شده به عنوان مدل فومی پس از برش از وسط مدل فومی گرفته شده است، منافذ موجود در بین دانه‌بندی فوم با چگالی‌های متفاوت را نشان می‌دهد که به ترتیب (a, b, c) برای چگالی فوم‌های $16, 20, 24 \text{ kg/m}^3$ می‌باشند که نشان می‌دهند با کاهش چگالی فوم منافذ موجود در بین دانه‌های آن بیشتر و بزرگتر می‌شود که خود عاملی است برای نفوذ گازهای داغ به داخل فوم و تخریب فوم که در نتیجه افزایش سرعت پیشروی مذاب را در پی خواهد داشت و باعث می‌شود تا تخلخل در نمونه‌ها افزایش یابد.

قطعات ریخته‌گری شده در شکل 7 نشان داده شده است که شماره هر شکل مطابق با شماره آزمایش آن در جدول 4 است و همانگونه که مشخص است با افزایش دما و چگالی فوم مقدار گاز تولید شده درون قالب و محصولات حاصل از تجزیه فوم به شدت افزایش می‌یابد و با توجه به نفوذپذیری پوشان مقداری از این گاز از طریق منافذ پوشان خارج می‌گردد و مقدار باقی‌مانده همچون سدی جلوی پیشروی حرکت مذاب را گرفته و مانع از پر شدن کامل آن می‌شوند و موجب افزایش عیوب ریخته‌گری و تخلخل می‌گردند.

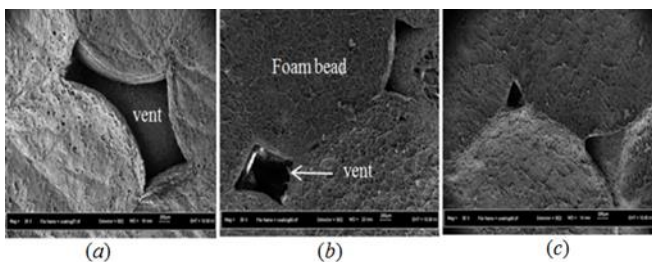
با توجه به نمودارهای S/N خروجی از نرم افزار و نتایج حاصل از قطعات ریخته‌گری شده شرایط بهینه جهت انجام ریخته‌گری با کمینه درصد تخلخل برابر 2.6% است که نسبت سیگنال به نویز آزمایش مربوطه 8.2995- می‌باشد، با اعمال همین شرایط در نرم افزار عدد حاصل از پیش‌بینی S/N نرم افزار 8.2079- می‌باشد و درصد تخلخل پیش‌بینی شده نیز 2.58889% است که بسیار به نتیجه عملی به دست آمده نزدیک می‌باشد و تطابق مناسبی با نتایج عملی آزمایش دارد.

یکی دیگر از مزایای روش سیگنال به نویز، تعیین میزان تاثیرگذاری هر پارامتر در خروجی مورد نظر می‌باشد. بدین منظور می‌توان از نتایج تحلیل واریانس داده‌های درصد تخلخل استفاده نمود. در جدول 5 نتایج حاصل از تحلیل واریانس و در نتیجه اثرگذاری متغیرهای مورد بررسی بر روی درصد تخلخل نشان داده شده است که نشان می‌دهد چگالی فوم با داشتن بیشترین ضریب تاثیر همانند آنچه در شکل 5 و نمودار نسبت سیگنال به نویز مشخص است بر روی درصد تخلخل اثرگذارتر از سایر پارامترها می‌باشد. مقدار تاثیرگذاری چگالی فوم برابر با 64.58% است که نسبت به سایر متغیرها از

پوشش‌دهی شده است لذا لایه پوشان ایجاد شده بر روی مدل فومی دارای خلل و فرج بیشتری نسبت به پوشان‌های با ویسکوزیته بالاتر است که همین امر موجب شده تا گازهای تولید شده در قالب فومی با سرعت بیشتری از قالب خارج شده که افت فشار در فضای بین فلز مذاب و پلیمر در حال ذوب ایجاد می‌شود و پوشان تحمل وزن ماسه را نداشته و ماسه به درون محفظه‌ی قالب وارد می‌شود همچنین در این حالت لایه پیوسته حاصل از محصولات تجزیه فوم که بین فلز مذاب و مدل فومی قرار داشت بسیار باریک شده و گازهای داغ می‌توانند به صورت عمیق‌تر وارد مدل فومی شده و آن‌را تجزیه نمایند که در نتیجه سرعت پیشروی فلز مذاب افزایش یافته و حالت اغتشاش مذاب درون قالب بیشتر می‌شود و گازهای تولید شده درون مذاب به دام می‌افتند که چنانچه نفوذپذیری پوشان را عاملی تعیین کننده در خروج گاز از قالب بیان نموده بود [18]. در ویسکوزیته پوشان 25sec خلل و فرج در پوشان کاهش می‌یابد که این امر موجب نفوذپذیری پایین پوشان می‌گردد. در این حالت فشار گاز در فضای خالی تا جایی که بر فشار متالواستاتیکی غلبه



شکل 5 نمودار نسبت سیگنال به نویز برای درصد تخلخل



شکل 6 منافذ بین دانه‌های فوم

است. مطابق شکل با افزایش چگالی فوم مقدار سختی افزایش می‌یابد اما با افزایش دمای ذوب‌ریزی و ویسکوزیته پوشان این مقدار کاهش می‌یابد. با افزایش چگالی فوم فشار برگشتی پیوسته که بوسیله مدل فومی و محصولات تجزیه پلیمری در خلال پر کردن قالب اعمال می‌شود، به صورت یک مقاومت در برابر جریان فلز مذاب عمل می‌کند. در مقایسه با روش‌های ریخته‌گری ماسه‌ای که در آن فلز مذاب داخل یک حفره خالی ریخته می‌شود، فلز مذاب به قالب وارد شده و مدل فومی را با یک شتاب بسیار پایین‌تر تجزیه می‌کند و در نتیجه وجه مشترک مذاب و مدل فومی، نسبتاً یکنواخت و هم شکل است. بنابراین شتاب جریان فلز با نرخ تجزیه فوم در جلوی مذاب تعیین می‌شود نه دینامیک جریان مذاب در پشت جبهه مذاب به این معنی که، فلز مذاب به حجم قالب که در اصل توسط مدل فومی اشغال شده، با همان سرعتی که فوم تجربه می‌شود و محصولات تجزیه آن از طریق پوشان و ماسه خارج می‌شوند، حرکت می‌کند. با کاهش سرعت حرکت مذاب در فوم‌های با چگالی بالاتر به علت این امر که تراکم دانه‌های پلی استایرن بیشتر است و در نتیجه برای تجزیه حرارتی آن نیاز به تبادل حرارتی بیشتر با فلز مذاب است لذا فلز مذاب حرارت خود را سریعتر از دست می‌دهد و منجمد می‌شود که خود عاملی بر ریزدانه‌تر شدن و نهایتاً افزایش سختی در نمونه‌ها می‌گردد که کومار نیز نقش افزایش زمان پرشدن قالب با چگالی فوم را بیان نموده بود [15]. در شکل 9 تصاویر متالوگرافی با بزرگنمایی 50 میکرومتر از دانه‌بندی قطعات ریخته‌گری شده نشان داده شده است که شماره هر شکل مطابق با شماره آزمایشات در جدول 4 می‌باشد. با توجه به شکل ریزدانه‌ترین حالت برای آزمایش شماره 4 و درشت‌دانه‌ترین حالت برای آزمایش شماره 3 است.

درجه حرارت مذاب، شتاب جریان مذاب را کنترل می‌کند و اینکه این شتاب مذاب به طور چشمگیری در LFC نسبت به ریخته‌گری ماسه‌ای پایین‌تر است. ریختن فلز مذاب با درجه حرارت بالاتر، شتاب جریان مذاب را افزایش خواهد داد و زمان پرکنندگی قالب را کاهش خواهد داد. زمانیکه قالب سریعتر پر شود نرخ تبادل گرمای کمتری با پوشان و ماسه اطراف آن دارد و لذا دیرتر منجمد می‌گردد که موجب درشت‌تر شدن دانه‌ها و در نتیجه کاهش سختی می‌شود و این امر به خوبی در شکل 8 که نشان دهنده نمودار نسبت سیگنال به نویز برای متغیرهای فرآیند بر روی سختی است و شکل 9 که تصاویر متالوگرافی نمونه‌های ریخته‌گری شده را نشان می‌دهد، قابل مشاهده می‌باشد.

مطابق شکل 8 در قسمت مربوط به ویسکوزیته پوشان مشاهده می‌گردد که با افزایش ویسکوزیته پوشان مقدار سختی کاهش می‌یابد زیرا با افزایش ویسکوزیته پوشان، ضخامت پوشان افزایش می‌یابد و این افزایش ضخامت همچون عایقی در برابر انتقال حرارت بین فلز مذاب با ماسه و محیط اطراف و خروج محصولات ناشی از تجزیه فوم عمل می‌نماید که موجب می‌گردد تا فلز مذاب با نرخ انجماد آهسته‌تری سرد شود و در نتیجه با توجه به شکل 9 درشت‌دانه‌تر شده و سختی در نمونه‌ها کاهش یابد و همچنین مقدار گازهای به دام افتاده در مذاب افزایش یابد.

با تحلیل نسبت سیگنال به نویز و تحلیل واریانس برای مقادیر بدست آمده سختی از نمونه‌های ریخته‌گری شده، مقادیر پیش‌بینی شده تاگوچی در بهترین حالت ریخته‌گری‌ها برای نسبت سیگنال به نویز برابر 29.0217 و مقدار سختی 28.133 بدست آمد که با مقادیر عملی آن که برای نسبت سیگنال به نویز 28.8496 و برای سختی مقدار 27.7 می‌باشد، اختلاف کمی دارد. جدول 6 نتایج حاصل از تحلیل واریانس و اثر بخشی هر یک از متغیرها را

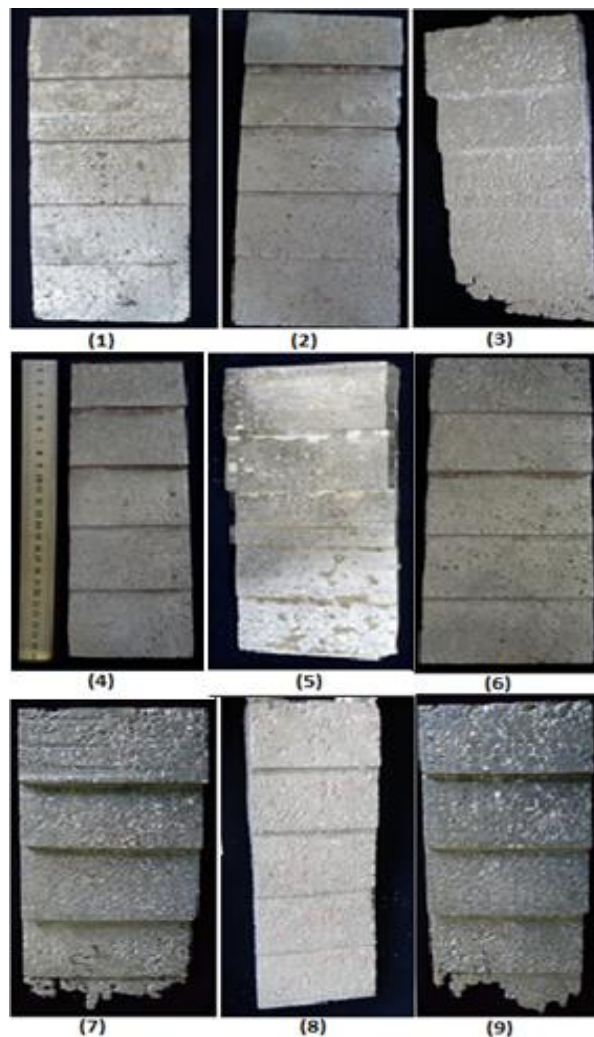


Fig.7 View of casting parts

شکل 7 نمای قطعات ریخته‌گری شده

جدول 5 تحلیل ANOVA متغیرهای مورد بررسی بر روی درصد تخلخل

Table 5 ANOVA for investigating parameters on the porosity

پارامتر	درجه آزادی (f)	مجموع میانگین مربعات (MS)	عدد فیش (F)	ضریب تاثیر (%)
چگالی فوم	2	8.17	5.49	64.58
دمای ذوب‌ریزی	2	3.68	1.23	29.09
ویسکوزیته پوشان	2	0.78	0.20	6.16
خطا	2	0.02	-	0.16

اهمیت بسیار بالاتری برخوردار است و کومار نیز افزایش زمان پرشدن قالب را با افزایش چگالی فوم بیان نموده بود [15].

2-4- اثر پارامترهای فرآیند بر روی سختی

سختی حاکی از مقاومت در برابر فرو روی نوک ابزار فرورونده به داخل قطعه بوده و این خاصیت در فلزات معیاری از مقاومت آن‌ها در برابر تغییر شکل مومسان یا دائم است. مقدار سختی نمونه‌ها وابستگی شدیدی به نرخ و نحوه انجماد فلز مذاب دارد و هرچه انجماد سریع‌تر اتفاق افتد به علت اینکه ساختار نمونه‌ها ریزتر می‌شود سختی در آن‌ها نیز افزایش می‌یابد. نمودار سیگنال به نویز برای سه متغیر در نظر گرفته شده در شکل 8 نشان داده شده

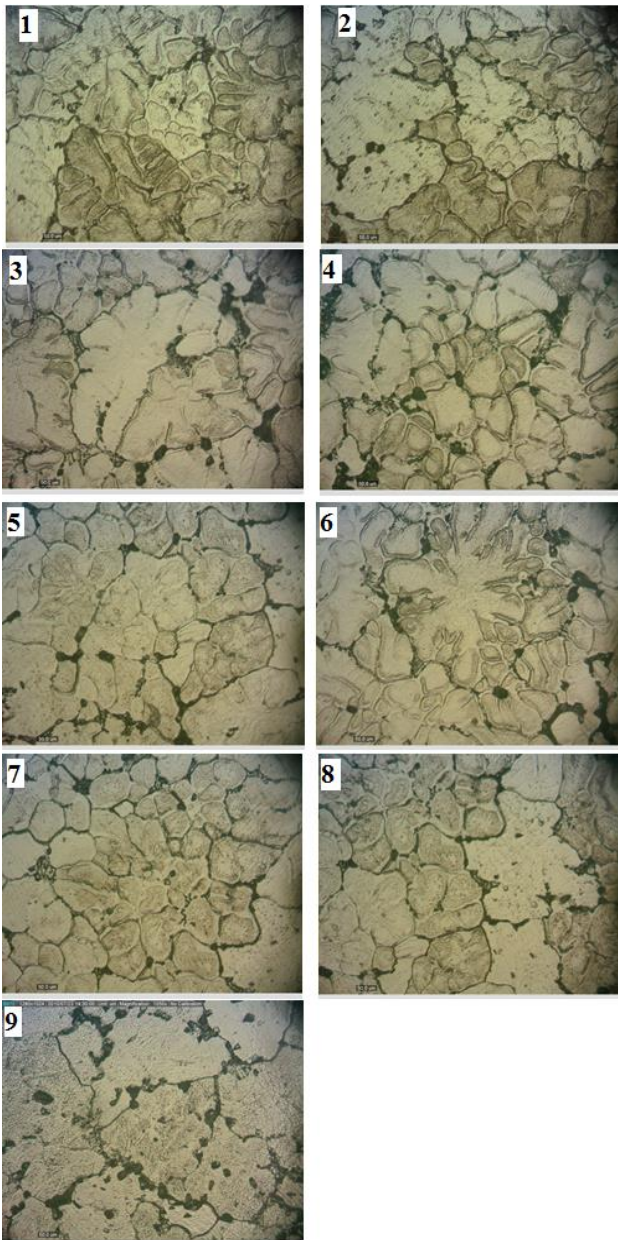


Fig. 9 Pictures metallographic samples casting

شکل 9 تصاویر متالوگرافی از نمونه های ریخته گری

به نویز بسیار کارآمد بوده است.

5- نتیجه گیری

در این پژوهش اثر متغیرهای تاثیرگذار فرآیند ریخته‌گری مدل فومی فداشونده به صورت آزمایشگاهی با استفاده از روش طراحی آزمایشات تاگوچی و تحلیل واریانس به منظور بدست آوردن مقادیر بهینه هر یک از پارامترها و بررسی درصد تاثیر هر یک بر روی درصد تخلخل و سختی نمونه‌های ریخته‌گری شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش شامل موارد زیر می‌باشد:

- 1- با افزایش دمای ذوب‌ریزی، حجم گاز بیشتری در حین پرسدن قالب و در زمان کوتاه‌تر تولید می‌شود که به علت عدم خروج این گازها از طریق منافذ پوشان درصد تخلخل افزایش می‌یابد اما مقدار سختی کاهش می‌یابد زیرا با بالا رفتن دمای ذوب‌ریزی قالب سریعتر پر

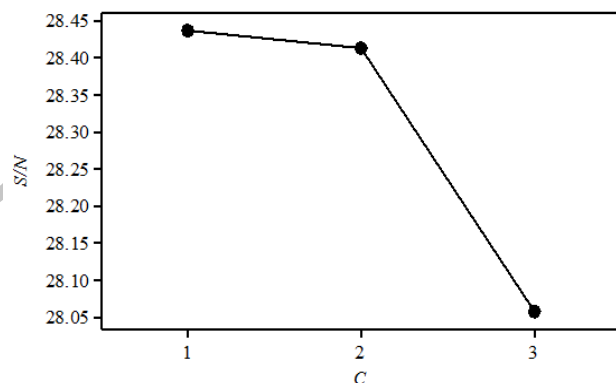
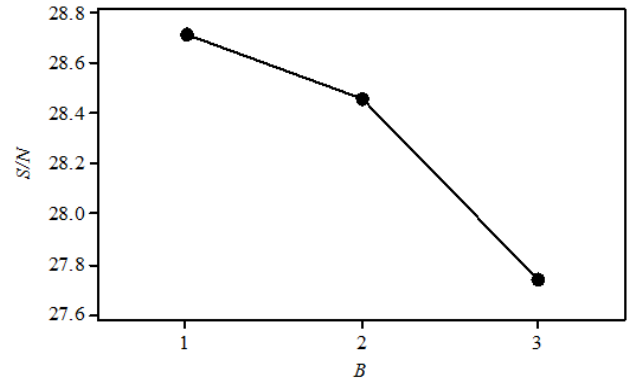
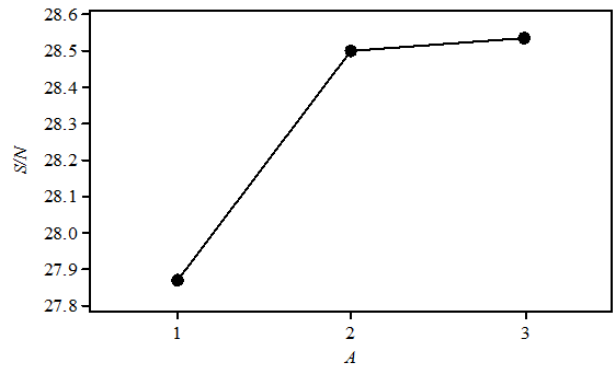


Fig. 8 S/N parameters effect on the Hardness

شکل 8 نمودار نسبت سیگنال به نویز برای سختی

بر روی سختی نشان می‌دهد. مطابق با نتایج نمودار نسبت سیگنال به نویز در شکل 8 و همچنین نتایج جدول 6 مشخص است که دمای ذوب‌ریزی بیشترین تاثیر را بر روی سختی نمونه‌ها دارد و مقدار این اثرگذاری برابر با 56.35% می‌باشد. در شکل 9 که اندازه دانه نمونه‌های ریخته‌گری شده را نشان می‌دهد می‌توان دریافت که با افزایش دما اندازه دانه‌ها بیشتر تحت تاثیر قرار می‌گیرند که برای درک بهتر این اثرگذاری تحلیل واریانس و نسبت سیگنال

جدول 6 تحلیل ANOVA متغیرهای مورد بررسی بر روی سختی

Table 6 ANOVA for investigating parameters on the Hardness

پارامتر	درجه آزادی (f)	مجموع میانگین مربعات (MS)	عدد فیشر (F)	ضریب تاثیر (%)
چگالی فوم	2	3.49	1.29	29.99
دمای ذوب‌ریزی	2	6.56	3.94	56.35
ویسکوزیته پوشان	2	1.03	0.29	8.85
خطا	2	0.56	-	4.8

- and characterization of A356 composite reinforced with SiC nanoand microparticles by stir casting method. *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 335-342, 2016. (in Persian فارسی)
- [4] H. F. Shroyer, *Cavity less Casting*, US Patent No. 2830343, 1985.
- [5] T.R.Smith, *Use of clean, unbounded sand in foam casting*, US Patent No. 3157924, 1964.
- [6] S. Tabibian, E. Charkaluk, A. Constantinescu, G. Guillemot, F. Szymka, Influence of process-induced microstructure on hardness of two Al-Si alloys, *Materials Science & Engineering A*, Vol. 646, pp. 190-200, 2015.
- [7] B. Xiao, Z. Fan, W. G. Jiang, X. Liu, W. Long, Q. Hu, Microstructure and mechanical properties of ductile cast iron in lost foam casting with vibration, *Journal of Iron and Steel Research*, Vol. 21, No.11, pp. 1049-1054, 2014.
- [8] T. N. Chakherlou, Y. V. Mahdinia, A. Akbari, Influence of lustrous carbon defects on the fatigue life of ductile iron castings using lost foam process, *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 162-169, 2011.
- [9] X. BoGtao, F. ZiGtian, J. WenGming, L. XinGwang, HU. Qiang, Microstructure and mechanical properties of ductile cast iron in lost foam casting with vibration, *Journal of Iron and Steel research*, Vol. 21, No. 11, pp. 1049-1054, 2014.
- [10] L. Wang, N. Limodin, A. Bartali, J. F. Witz, J. Y. Buffiere, E. Charkaluk, 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 & Engineering A*, Vol. 673, pp. 362-372, 2016.
- [11] W. Zou, Z. Zhang, H. Yang, W. Li, Effect of vibration frequency on microstructure and performance of high chromium cast iron prepared by lost foam casting, *China Foundry*, Vol. 13, No. 4, pp. 248-255, 2016.
- [12] M. Khodai, N. Varham, The effects of foam density and thickness of the coating on the flow patterns and some foam molding parameters, *New processes in Materials Engineering (Majlesi Materials Engineering)*, Vol. 4, No. 1, pp. 33-40, 2010. (in Persian فارسی)
- [13] M. Khodai, N. Parvin, Pressure measurement and some observation in lost foam casting, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 206, No.3, pp. 1-6, 2008.
- [14] T. N. Chakherlou, Y. V. Mahdinia, A. Akbari, Influence of lustrous carbon defects on the fatigue life of ductile iron castings using lost foam process, *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 162-169, 2011.
- [15] S. Kumar, P. Kumar, H. Shan, Effect of evaporative pattern casting process parameters on the surface roughness of Al-7% Si alloy castings, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 182, No. pp. 615-623, 2007.
- [16] W. D. GRiffiths, M. J. ainsworth, Instability of the liquid metal-pattern interface in the lost foam casting of aluminum alloys, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 47, No. 6, pp. 3137-3149, 2016.
- [17] H. Warner, B. Miller, H. Littleton, Pattern pyrolysis defect reduction in lost foam castings, *AFS Transactions*, Vol. 106, pp. 103-109, 1998.
- [18] Y. F. Chen, R. C. Chen, W. S. Hwang, Mold-filling study in the epc process-mathematical model and flow characteristics, *Transactions of the American Foundrymen's Society*, Vol. 105, pp. 459-464, 1997.
- می‌شود و در نتیجه فلز مذاب با نرخ آرام‌تری سرد می‌شود که موجب بزرگتر شدن ساختار و دانه‌ها و نهایتاً کاهش سختی می‌گردد که این نتایج بر خلاف مکانیزم اثرگذاری مربوط به چگالی فوم بر روی سختی نمونه‌ها است همچنین دمای ذوب‌ریزی بیشترین مقدار ضریب تاثیر بر روی سختی که معادل 56.35% است، می‌باشد.
- 2- جهت دستیابی به تولید قطعه با کمترین میزان تخلخل چگالی فوم و ویسکوزیته پوشان به ترتیب باید دارای مقادیر 20kg/m^3 و برای ویسکوزیته پوشان مقدار 20sec باشند که چگالی فوم با داشتن بیشترین ضریب تاثیر به مقدار 64.58% بر روی درصد تخلخل در فرآیند، مهم‌ترین و اثرگذارترین پارامتر بر روی این عیب می‌باشد.
- 3- با افزایش چگالی فوم حرارت بیشتری از فلز مذاب صرف تجزیه حرارتی و ذوب این مدل شده و در نتیجه سرد شدن سریع‌تر فلز مذاب را به همراه دارد که نهایتاً مقدار سختی افزایش می‌یابد.
- 4- با افزایش ویسکوزیته پوشان مقدار خلل و فرج موجود در آن کاهش می‌یابد و در نتیجه گازها و محصولات حاصل از تجزیه فوم نمی‌توانند به خوبی از آن خارج شوند همچنین پوشان مانند عایقی مانع از تبادل حرارتی مناسب فلز مذاب با ماسه و محیط می‌شود و در نتیجه مذاب با نرخ سرد شدن آهسته‌تر سرد می‌شود و نهایتاً موجب کاهش سختی می‌گردد.

6- مراجع

- [1] S. L. Pramod, Ravikiran, A. K. Prasada Rao, B. S. Murty, R. Bakshi, Effect of Sc addition and T6 aging treatment on the microstructure modification and mechanical properties of A356 alloy, *Materials Science & Engineering A*, Vol. 647, pp. 438-450, 2016.
- [2] W. Jiang, Z. Fan, D. Liu, D. Liao, X. Dong, X. Zong, Correlation of microstructure with mechanical properties and fracture behavior of A356-T6 aluminum alloy fabricated by expendable pattern shell casting with vacuum and low-pressure, gravity casting and lost foam casting, *Materials Science & Engineering A*, Vol. 560, pp. 396-403, 2013.
- [3] K. Amouri, J. Amouri, S. Ahmadifard, M. Kazazi, S. Kazemi, Preparation