

کروی نمودن گرافیت‌ها از طریق مذاب تغذیه در طی بارریزی قطعات چدنی*

سید محمد حسین میرباقری⁽¹⁾محسن هرسیج⁽²⁾

چکیده هدف پژوهش حاضر ارائه فرایندی نو برای تولید قطعات چدنی است. بر پایه این پژوهش، یک قطعه چدنی را می‌توان به صورت دو لایه مجزا، شامل یک لایه بیرونی (پوسته قطعه) و یک لایه داخلی (مغز قطعه)، براساس خواسته طراح، ریخته‌گری نمود. برای مثال در حین تولید (ریخته‌گری و انجماد) یک قطعه چدنی می‌توان با استفاده از روش ارائه شده در این پژوهش ساختار قسمت بیرونی (پوسته) قطعه را از جنس چدن خاکستری با گرافیت ورقه‌ای و ساختار قسمت داخلی آن را (از زیر پوسته مذکور تا مرکز آن) کاملاً از جنس چدن داکتیل با گرافیت کروی طراحی نمود. از این رو سعی شده است با طراحی یک قطعه پیچیده و به کارگیری فرایند یاد شده، فناوری این روش استخراج و تدوین گردد. در این فرایند سعی شده است که محفظه مواد کروی کننده و محفظه تغذیه در یکجا ادغام شوند؛ به عبارت دیگر عملیات کروی نمودن در تغذیه انجام شود. نتایج نشان داد که برای قطعات چدنی با تغذیه گذاری از نوع تقلیل فشار، مذاب تلقیح شده از تغذیه به داخل قطعه برگشت نمود و پوسته اولیه به صورت چدن خاکستری منجمد شد؛ اما مذاب باقی مانده در مغز قطعه کاملاً به چدن داکتیل تبدیل گردید.

واژه‌های کلیدی چدن، تلقیح، گرافیت، انجماد، تغذیه، ورقه‌ای، کروی، ریخته‌گری، فناوری.

Spheroidizing of molten Cast Iron from riser cavity during mould filling

S.M.H. Mirbagheri

M. Harsij

Abstract In this investigation a new procedure has been developed for producing of Cast Iron parts. The Cast Iron parts were produced as two layers during of solidification. They had two zones, outer zone which was Grey Iron and inner zone which was Ductile Iron. At first, a complex cast part with a blind riser was designed. Second, some inoculants were placed into the blind riser on a wire screen for inoculation of melt. Finally, the micro structure from the outer skin toward the inner zone of the part was investigated by metallographic testing. Results showed that graphite's in outer layers were from type of flake graphite, and the central zones were spherical graphite. In fact, at the first step of solidification, outer skin is solidified as Grey Iron. Then due to contact melt and inoculants material concurrent with cavity shrinkage as well as back pressure into the riser, a flow of inoculated melt move from the riser toward mold cavity. This phenomenon lead to formation of spherical graphite's at the central zones. This procedure is very economic for casting industries, because in this technique the blind riser has the role of a reaction cavity, instead of melt compensation.

Key Words Cast Iron, Inoculation, graphite, Solidification, Riser, Flake, Spherical, Casting, Technique.

نسخه اولیه مقاله در تاریخ 86/3/2 و نسخه نهایی آن در تاریخ 87/7/13 به دفتر نشریه رسیده است.*

(1) استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(2) کارشناس، بخش مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

مقدمه

استاندارد و ایجاد زمینه با ساختار مورد نیاز [6,5]. از طرف دیگر پایداری جوانه‌ها به زمان فرآیند بستگی دارد و با گذشت زمان جوانه‌ها کم کم از بین می‌روند. از این رو، جوانه‌زنی در داخل قالب برای فائق آمدن بر میراثی هسته‌ها معرفی شده است. اما روش‌های تزریق جوانه‌ها را به چند گروه نسبتاً بزرگ می‌توان محدود نمود که عبارتند از: فرآیند دمش گاز خنثی، پاتیل‌های لرزان، هم زن برقی، توپ‌های متخلخل کف پاتیلی و توپ‌های متخلخل ممتد [3,7]. اما روش‌های کروی نمودن چدن‌ها به عنوان عملیات کیفی مذاب دارای راندمان و کارایی‌های مختلفی هستند. از جمله روش‌های متداول با کارایی مناسب می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [2,3,8]:

- 1- روش انتقال پاتیل باز 2- روش ساندریجی
- 3- روش پاتیل بارریز درپوش‌دار 4- روش فروبری
- 5- فرآیند در قالب 6- فرآیند عملیات از خارج بر جریان سیال 7- پاتیل فشاری و محفظه فشاری
- 8- فرآیند توپ‌های متخلخل 9- راکتور کج شده
- 10- روش سقوط مستقیم.

از جمله این روش‌ها می‌توان به روش فرآیند در داخل قالب اشاره نمود که فرآیندی برای کروی کردن مذاب چدن در داخل خود قالب می‌باشد. در این روش یک محفظه واکنش ویژه بین سیستم راهگاهی و راهگاه اصلی تعبیه می‌شود. سپس مواد کروی کننده در داخل محفظه گذاشته شده و واکنش به هنگام عبور مذاب از بین مواد کروی کننده رخ می‌دهد. اما روش‌های تغذیه گذاری چدن‌ها را می‌توان به روش‌های معروف زیر محدود نمود [3,9]:

- 1- تغذیه‌گذاری معمولی (Conventional Riser))
- 2- تغذیه‌گذاری فشاری (Pressure Riser))
- 3- تغذیه‌گذاری فشاری به کمک سیستم راهگاهی (System Pressure Riser with-the Gating))

چدن نشکن با ساختاری شامل گرافیت‌های کروی شکل، نخستین بار در سال 1948 در کنگره جامعه ریخته‌گران امریکا معرفی شد. اگر چه در تاریخچه این نوع چدن، زمان اختراع به 2000 سال قبل و محل تولید به کشور چین اشاره شده است، اما توسعه سریع آن از دهه 1950 آغاز شد و مصرف آن در دهه‌های بعد به سرعت رو به افزایش نهاد [1,4]. با توجه به اینکه کربن معادل این چدن‌ها بالا می‌باشد، بایستی گوگرد (S) تا حد معینی حتماً کاهش داده شود. برای تولید این نوع چدن، عموماً عملیات کروی نمودن گرافیت باید توسط عناصری مانند منیزیم (Mg) و سریم (Ce) انجام گیرد ولی منیزیم از نظر اقتصادی مناسبتر است. برای اصلاح و بازیابی بهتر منیزیم، برخی عناصر دیگر با آن ترکیب یا آلیاژ می‌شوند و این ترکیب یا آلیاژ باعث کاهش مصرف منیزیم و تعدیل آن خواهد شد. منیزیم را می‌توان به شکل‌های مختلفی اضافه کرد که شامل: فلز منیزیم (Mg)، آلیاژهای Ni-Mg ، Ni-Si-Mg ، Fe-Si-Mg و یا منیزیم کک (Mg coke) است. از روش‌های اضافه کردن منیزیم به مذاب می‌توان به روش انتقال پاتیل، روش پاتیل درپوش‌دار، روش به هم زدن با توپ‌های متخلخل، و روش در(داخل) قالب اشاره نمود. در این روش‌ها مقدار منیزیم مصرفی در مدت زمان کوتاهی قبل از ریخته‌گری اضافه می‌شود به طوری که منیزیم باقیمانده در قطعه ریخته‌گری به مقدار 0/05-0/03 درصد وزنی، باقی بماند. فلز مذاب تماماً یا بعد از افزودن منیزیم تلقیحی بایستی مورد جوانه زنی قرار گیرد. از لحاظ خواص مکانیکی کنترل ترکیب در چدن‌های با گرافیت کروی باید نیازهای اساسی زیر را به طور همزمان بر آورده کند: عاری بودن از کاربیدها (فسفیدی و بین سلولی)، شکل و توزیع گرافیت به صورت درست و یکنواخت، فاکتور کرویت طبق نمونه

دهد؟ یا اینکه پس از عملیات ریخته گری، ابتدا قطعه و سپس تغذیه به صورت جهت‌دار منجمد می‌شوند و این عملیات بدون نتیجه باقی می‌ماند. در مواجهه با این مشکل می‌توان گفت هر سیستم تغذیه‌گذاری قادر به انجام این عملیات نیست. تنها تغذیه‌گذاری فشاری توانایی دارد این کار را انجام دهد، به این صورت که با شکل‌گیری یک پوسته جامد از قطعه، مذاب داخل تغذیه از طریق گردن تغذیه به همراه مواد کروی کننده به مرکز قطعه راه پیدا می‌کند؛ اما به دو شرط: 1- ریز بودن مواد کروی کننده، 2- کوچک نبودن قطعات ریختگی (یعنی لزوم نیاز به تغذیه). در پژوهش حاضر پس از بررسی‌های زیاد روی طرح‌های مختلف قطعات ریختگی تصمیم گرفته شد قطعه‌ای مطابق شکل (1) انتخاب شود و سپس طراحی سیستم راهگاهی، تغذیه و محفظه واکنش بر اساس معیارهای معتبر طراحی و تکنولوژی قطعات ریختگی انجام گیرد. در ادامه جزئیات محاسبات یاد شده به همراه مراجع مورد استفاده در طراحی آورده شده است.

مراحل طراحی

مطابق شکل (2) ابتدا قطعه‌ای با وزن بیشتر از 10 کیلوگرم (چرا که قطعات با وزن کمتر از این مقدار قابلیت تغذیه‌گذاری ندارند) طراحی شد و سپس محاسبات مربوط به سیستم راهگاهی قطعه مذکور با استفاده از مراجع معتبر [1,3] انجام گرفت. ابتدا محاسبات مربوط به مقدار انقباض حالت جامد و اضافه تراشکاری و شیب مدل برای قطعه مذکور مطابق اندازه‌های درج شده در نقشه شکل (2) تعیین شد. سپس مدل چوبی قطعه یاد شده به صورت خام (بدون تغذیه و سیستم راهگاهی) تهیه شد. تصاویر شکل‌های (3) - الف تا 3-ج، مدل چوبی قطعه طراحی شده را پس از ساخت با در نظر گرفتن کلیه نکات تکنولوژیکی آن نشان می‌دهند.

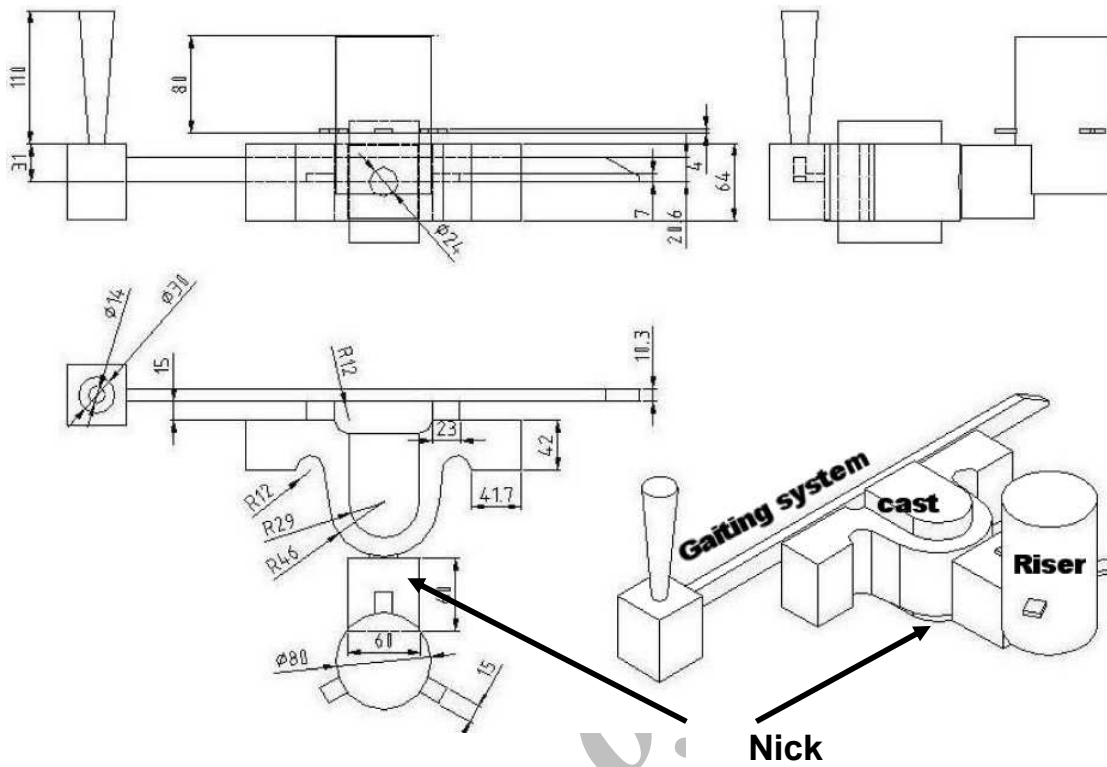
4- عدم استفاده از تغذیه (Riserless design)

5- تغذیه‌گذاری تقلیل فشار (Pressure Relief or Pressure control-Rising)

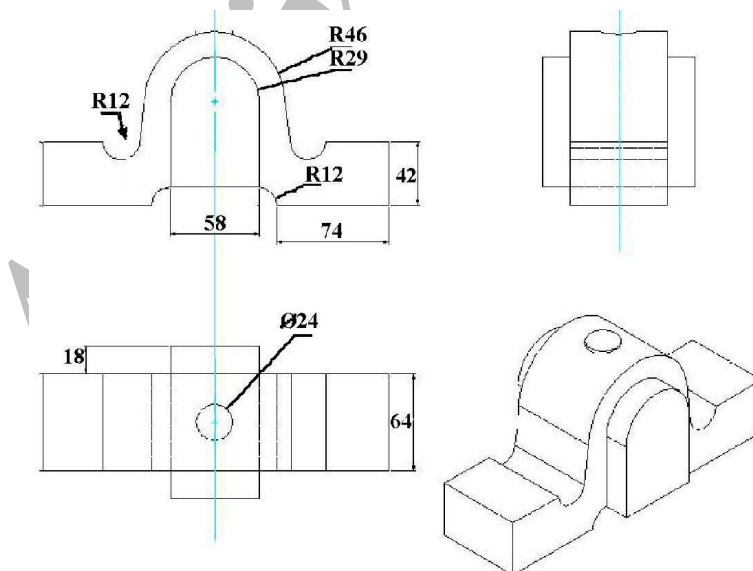
از مطالعه منابع می‌توان چنین استنباط کرد که تغذیه‌گذاری فشاری در چدن ریزی یکی از روش‌های عملی و اقتصادی است؛ البته روز به روز روش تغذیه‌گذاری تقلیل فشار، بخصوص در ریخته‌گری‌های ماشینی، موارد مصرف بیشتری می‌یابد. از این رو به نظر می‌رسد می‌توان طرح جدیدی برای تغذیه‌گذاری و عملیات کروی کردن، توأم با هم، ارائه داد. این مقاله سعی دارد جزئیات این طرح جدید را با جزئیات و مستندات که طی سالیان متمادی به دست آمده، به پژوهشگران صنایع ریخته‌گری ارائه نماید.

روش تحقیق

در این تحقیق ایده اولیه بر این اساس بود که آیا در مراحل مختلف تولید قطعات چدن نشکن می‌توان مرحله کروی نمودن را با مرحله تغذیه‌گذاری در هم ادغام نمود. در این صورت علاوه بر افزایش کارایی کروی نمودن گرافیت‌ها به علت حذف زمان میرایی، هزینه تمام شده چنین قطعاتی بسیار کاهش خواهد یافت و گرایش به سمت این روش توجیه اقتصادی خواهد داشت. حال با توضیحات گفته شده این سؤال مطرح می‌شود که ادغام محفظه واکنش مواد کروی کننده و تغذیه، یا به عبارتی دیگر استفاده از مواد کروی کننده در داخل تغذیه تا چه حد امکان پذیر بوده و در صورت انجام شدن چه مقدار باعث بالا رفتن راندمان کاری خواهد شد؟ هرچند هر مسئله‌ای در نگاه اول قابل انجام شدن می‌باشد، اما با مشکلاتی نیز مواجه خواهد بود که محدودیت‌هایی را برای آن به وجود خواهد آورد. برای مثال آیا تغذیه توانایی دارد که مذاب کروی شده را به همراه مواد کروی کننده به داخل قطعه انتقال



شکل 1 نمایی از قطعه انتخاب شده در پژوهش حاضر و طراحی‌های سیستم راهگامی و تغذیه گذاری آن.



شکل 2 نقشه قطعه انتخابی و ابعاد آن



شکل 3-الف نمای از بالای مدل



شکل 3-ج نمای روبروی مدل



شکل 3-ب نمای جانبی مدل

حداقل فاصله بین اولین راهگاه فرعی و راهگاه
بارریز [3]: 150mm
حداقل فاصله بین آخرین راهگاه فرعی و انتهای راهگاه
اصلی [3]: 150mm
نسبت‌های بین A_R و A_G و همین‌طور نسبت‌های بین
 A_S و A_G به صورت زیر توصیه می‌شود [2-3]:

$$\frac{A_R}{A_G} + \frac{1}{1.5} \quad (4)$$

$$\frac{A_S}{A_G} = \frac{4}{3} \quad (5)$$

با استفاده از نمودار شکل (5) سطح مقطع تنگه یا
همان راهگاه فرعی تعیین می‌شود [3]:

$$A_{Chok} = A_G = 3.2 \quad (6)$$

الف) محاسبات مربوط به سیستم راهگاهی فشاری.
مقدار حجم مدل بر اساس ابعاد مندرج در نقشه قطعه
(شکل 2):

$$V = 14311041 \text{ mm}^3 \quad (1)$$

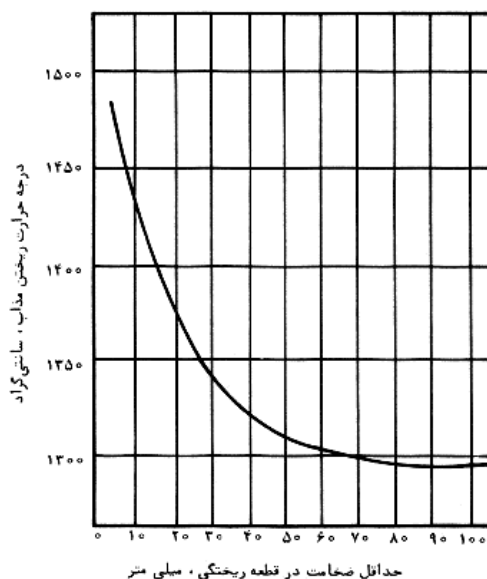
جرم قطعه چدنی با احتساب دانسیته 8 gr/cm^3 :

$$m = \rho V = 8 \times 14311041 = 11448.83 \text{ gr} \quad (2)$$

جرم تقریبی قطعه و سیستم راهگاهی با همدیگر:

$$w = 1.1 \times 14311041 = 12594.0 \text{ gr} \quad (3)$$

دمای ریخته‌گری بر اساس حداقل ضخامت
ریخته‌گی 24mm از نمودار شکل (4) برابر 1350°C
به دست می‌آید [3]:



شکل 4 تعیین دمای بارریزی براساس حداقل ضخامت قطعه ریختگی [4]

با استفاده از روابط (4) و (6) داریم:

$$\frac{A_R}{3.2} = \frac{1}{1.5} \Rightarrow A_R = 2.13 \text{ cm}^2 \quad (7)$$

در کارگاه داریم:

$$d' = 2.324 \sqrt{\frac{2}{15}} \Rightarrow d' = 1.4 \text{ cm} \quad (11)$$

مرحله بعدی محاسبه طول و عرض راهباره (Gate) می‌باشد. با استفاده از فرمول زیر ضخامت راهباره را به دست می‌آوریم [2,3]:

$$T = 1.9 \times 1.6^{\log \frac{w}{5}} = 2.29 \text{ cm} \quad (12)$$

با استفاده از دمای ریختن و نمودارهای آورده شده در منبع [4] عرض راهباره برابر با 0.8 cm به دست می‌آید. حال با داشتن عرض و ضخامت یک راهباره، سطح مقطع هر راهباره به دست می‌آید:

$$A_G = 2.29 \times 0.8 \text{ cm}^2 \quad (13)$$

با توجه به فشاری بودن سیستم، سطح مقطع A_G همان A_{Chok} می‌باشد. در این قسمت سطح مقطع کل بر سطح محاسبه شده بر سطح مقطع هر راهباره (A_G) تقسیم شده و تعداد راهگاه‌های فرعی به دست می‌آید:

با انتخاب مقطع مربع مستطیل با نسبت 2:1 و داشتن مقدار مساحت مقطع ابعاد هر یک از اضلاع محاسبه می‌شود:

$$A_R = 2a^2 = 2.13 \text{ cm}^2 \Rightarrow a = 1.3 \text{ cm} \quad (8)$$

با استفاده از روابط (5) و (6) مساحت و در نتیجه قطر ابتدا و انتهای راهگاه بارریز نیز محاسبه می‌شود:

$$\frac{A_S}{3.2} = \frac{4}{3} \Rightarrow A_S = 4.26 \text{ cm}^2 \quad (9)$$

چون راهگاه بارریز دارای مقطع دایره‌ای است لذا:

$$4.26 = \frac{\pi}{4} d^2 \Rightarrow d = 2.32 \text{ cm} \quad (10)$$

با در نظر گرفتن قانون پیوستگی و انتخاب ارتفاع راهگاه بارریز 15 سانتی متر بر اساس درجه‌های موجود

حداقل فاصله دو راهگاه فرعی را نیز می توان با استفاده از فرمول زیر محاسبه کرد [11]:

$$T = 3.2 \times 1.6^{\log \frac{w}{5}} = 3.86 \text{ cm} \quad (17)$$

با انتخاب شکل استوانه برای پاشنه راهگاه بار ریز، عمق حوضچه پای راهگاه با توجه به شکل شماتیک (6) قابل محاسبه می باشد:

$$R = 2a = 2 \times 1.03 = 2.06 \text{ cm} \quad (18)$$

$$1.5R = 1.5 \times 2.06 = 3.09 \text{ cm} \quad (19)$$

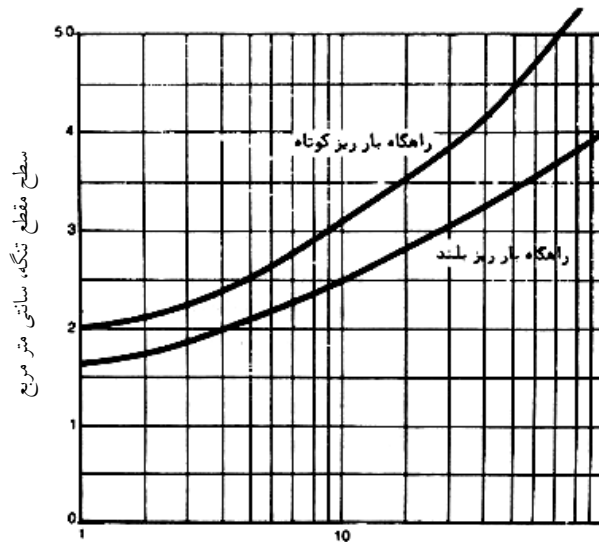
$$(14) \text{ تعداد راهگاه فرعی: } \frac{A_G}{A_G} = \frac{3.2}{2.06} = 1.74 \cong 2$$

با دانستن تعداد دقیق راهگاه های فرعی و داشتن سطح مقطع کل مجدداً سطح مقطع هر راهبار محاسبه می شود:

$$(15) \quad \frac{3.2}{2} \times 1.6 \text{ cm}^2$$

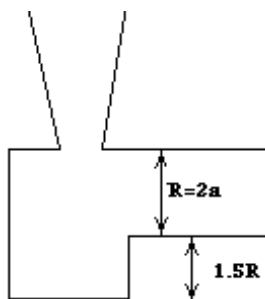
با داشتن مقدار دقیق مساحت هر راهبار و ضخامت هر کدام از آنها، عرض راهبار به دست می آید:

$$(16) \quad 2.29 \times b = 1.6, \quad b = 0.7 \text{ cm}$$



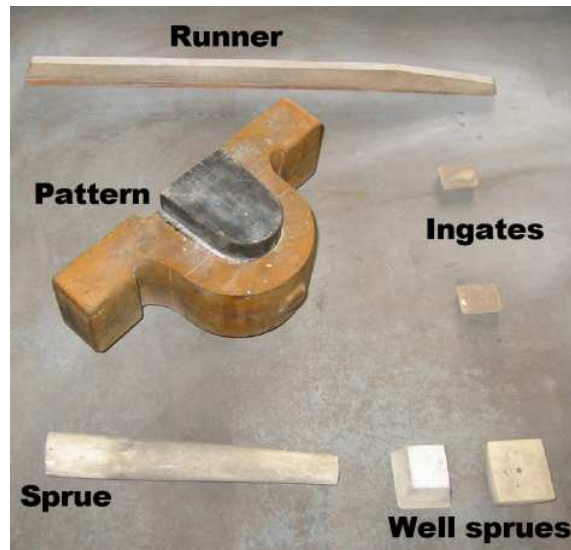
وزن قطعه ریختگی برای هر تنگه، کیلو گرم

شکل 5 راهنمای تقریبی انتخاب سطح مقطع تنگه در ارتباط با وزن قطعه ریختگی (برای قطعات سبک)



شکل 6 نمایی از حوضچه پای راهگاه استوانه ای طراحی شده در پژوهش حاضر

شکل (7) تصویرمدل چوبی هریک از اجزاء سیستم راهگاهی ساخته شده در کار حاضر را در کنار مدل خود قطعه، بر اساس نتایج محاسبات طراحی مندرج در جدول (1)، نشان می‌دهد.



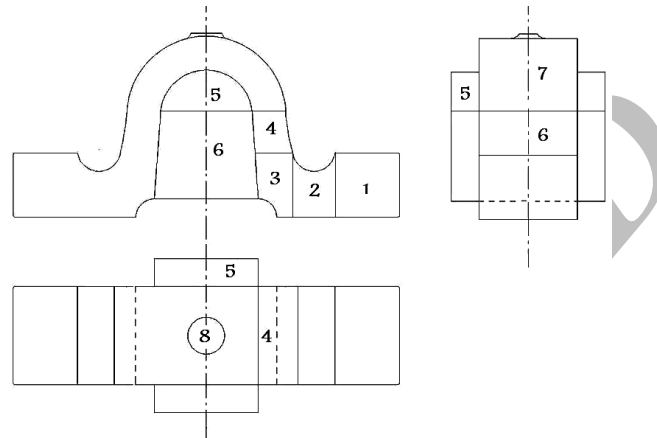
شکل 7 مدل اجزاء سیستم راهگاهی به همراه مدل قطعه

جدول 1 ابعاد سیستم راهگاهی طراحی شده برای قطعه شکل (5).

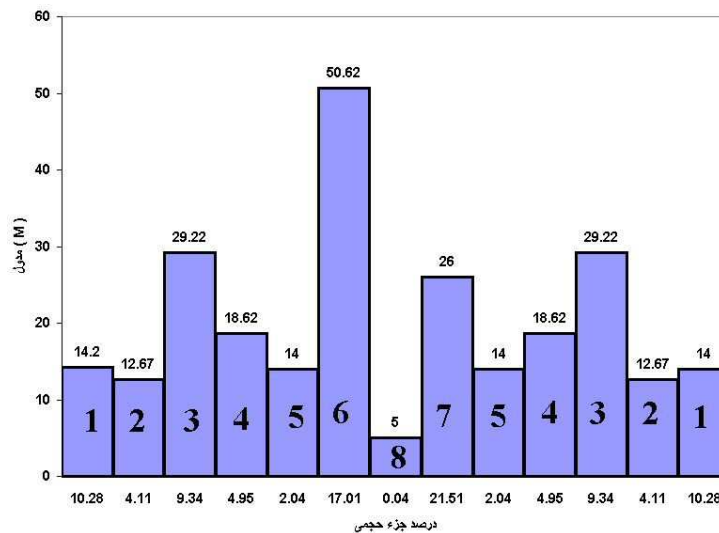
واحد (mm)	اجزاء سیستم راهگاهی
150	فاصله بین اولین راهگاه فرعی و راهگاه بارریز
150	فاصله بین آخرین راهگاه فرعی و انتهای راهگاه اصلی
$A_R : A_G = 1:1.5$	نسبت‌های بین A_G و A_R
$A_S : A_G = 4:3$	نسبت‌های بین A_G و A_S
$A_{Chok} = A_G = 3/2$	سطح مقطع تنگه
21/3	سطح مقطع راهگاه اصلی: A_R
$A_R = 2a^2 = 2/13$	ابعاد مقطع راهگاه اصلی
23	قطر ابتدای راهگاه بارریز
14	قطر انتهای راهگاه بارریز ($H_s = 150$)
23	طول راهباره
8	عرض راهباره
2	تعداد راهگاه‌های فرعی
16	سطح مقطع هر راهباره

با رسم مدول هر قسمت بر حسب درصد حجمی هر جزء مطابق شکل (9) می توان توالی قسمت‌هایی که دارای مدول‌های بالا یا کم هستند، را به منظور تعیین مکان اتصال تغذیه به قطعه شناسایی نمود.

ب- محاسبات تغذیه. با در نظر گرفتن شکل پیچیده قطعه آن را می توان به احجام هندسی ساده مطابق شکل (8) تقسیم بندی نمود. جدول (2) نتایج مدول و درصد حجم هر قسمت را پس از محاسبه نشان می دهد. سپس



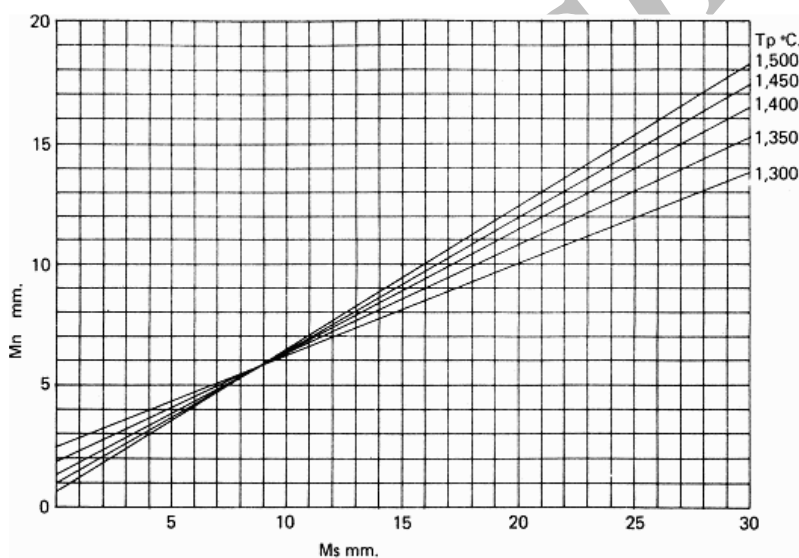
شکل 8 تقسیم بندی شکل قطعه مورد آزمایش به حجم‌های هندسی ساده برای محاسبه مدول اصلی قطعه



شکل 9 نمودار مدول (MS) بر حسب درصد حجمی هر جزء از قطعه شکل (8)

جدول 2 نتایج مدول و درصد حجمی هر جزء از قطعه بر اساس شکل (8)

درصد حجمی جزء %	مدول M_s (mm)	قسمت‌ها
10/27	14	جزء (1)
4/11	12/67	جزء (2)
3/9	29/22	جزء (3)
4/95	18/62	جزء (4)
2/04	14	جزء (5)
14/01	50/62	جزء (6)
21/51	26	جزء (7)
0/04	5	جزء (8)



شکل 10 نمودار تعیین مدول گردنه تغذیه (Mn) برای تغذیه‌گذاری فشاری بر اساس دمای بارریزی و مدول قطعه [4]

نمود. با فرض تغذیه استوانه با نسبت ارتفاع به قطر 2، ارتفاع تغذیه برابر با 128 میلیمتر به دست می‌آید. با کنترل فاصله مذاب رسانی تعداد یک تغذیه برای قطعه یاد شده کافی خواهد بود.

$$M_n = \frac{a_N^2}{4 \times a_N} = 16.12 \quad \Rightarrow \quad a_N = 64.48 \text{ mm} \quad (20)$$

در مورد قطعه مورد نظر، بزرگترین مدول مربوط به جزء 6 می‌باشد که برابر با $M_s = 50/64$ میلیمتر است. از این رو مکان نصب تغذیه روی این جزء قرار می‌گیرد. مدول گردنه تغذیه با داشتن مدول مهم قطعه و دمای بارریزی، به کمک شکل (10)، برابر با 16/12 میلیمتر به دست می‌آید. سپس با فرض مربع بودن سطح مقطع گردنه تغذیه، می‌توان ابعاد گردنه تغذیه را تعیین

عملیات ریخته‌گری

با توجه به ابتکاری بودن طرح نیاز به انجام چندین بار ریخته‌گری در شکل‌های مختلف ضروری بود. در اولین قدم برای اینکه از عملکرد سیستم راهگامی اطمینان حاصل شود، ابتدا ذوبی بدون ملاحظات کیفی و صرفاً با در نظر گرفتن سیستم راهگامی انجام گرفت. این عملیات بدون مشکل صورت گرفت و باعث شد طراحی سیستم راهگامی بدون مشکل قلمداد شود. مرحله بعدی کار استفاده از مبرد بود و به این منظور صورت گرفت که از جهت‌دار شدن انجماد اطمینان حاصل شده و در نهایت تغذیه به صورت مناسب‌تری عمل کند. ذوب بعدی انجام عملیات کروی کردن چدن خاکستری به روش معمولی بود. این ذوب به این منظور انجام شد تا مشکلات کیفی مذاب در حین کروی شدن شناخته شده و برطرف گردد. از آنجا که با هر بار ذوب ریزی کوره‌های موجود دچار استهلاک زیادی می‌شدند، تصمیم گرفته شد با انجام قالبگیری در زمین دو عملیات فوق با یکبار ذوب ریزی انجام شوند.

پس از پایان ذوب ریزی نمونه‌های سری اول که با استفاده از مبرد منجمد شده بودند، با متالوگرافی مشخص شد که در اکثر آنها انجماد جهت‌دار صورت گرفته است. نتایج آزمایش نمونه‌های اول نشان داد که استفاده از مبرد باعث تبریدی شدن قطعه و ایجاد ساختار چدن سفید می‌شود. از این رو، استفاده از مبرد در سایر آزمون‌ها منتفی شد، چراکه هر چه سرعت سرد شدن چدن افزایش پیدا کند، ساختارهای حاصله به سمت سفید شدن پیش می‌رود. ذوب‌های سری دوم که به منظور کروی شدن صورت گرفت با عدم موفقیت روبرو شد. علت عدم موفقیت، کاهش کربن معادل چدن در اثر سوختن کربن در طی فرایند ذوب بود. آزمون متالوگرافی نمونه‌های یاد شده نشان داد دوباره چدنی با ساختار سفید و کاربیدهای فراوان و بسیار سخت به دست آمده است. با تجربه کردن این

مشکلات تصمیم گرفته شد هم از مبرد استفاده نشود و هم اینکه مذاب چدن قبل از ذوب ریزی توسط نمونه برداری آنالیز شیمیایی شود تا از عدم افت کربن مذاب اطمینان حاصل شود و در صورت درست بودن کربن معادل، عملیات ذوب ریزی انجام گیرد. نتایج نشان می‌داد بستن درب کوره و محافظت سطح با سرباره سازهای گرافیتی بهترین روش در کاهش افت کربن چدن است. در این مرحله ذوب نهایی که در بردارنده جزئیات پروژه بود انجام گرفت. از آنجا که انجام پروژه از حساسیت ویژه‌ای برخوردار بود تمام عوامل کیفی مورد توجه قرار گرفت. نخستین اقدام استفاده از کاربید کلسیم به منظور گوگردزدایی بود. با ریز کردن مقدار 500 گرم کاربید کلسیم و افزودن آن به مذاب 10 دقیقه قبل از ریختن گوگردزدایی انجام شد. برای جوانه‌زایی از فروسیلیس استفاده شد که پس از خرد کردن به مقدار 500 گرم قبل از روشن کردن کوره و به همین مقدار نیز در اواخر ذوب به شارژ اضافه شد. در مورد اضافه کردن فرو سیلیس منیزیم به عنوان ماده کروی کننده مطابق تصاویر الف و ب شکل (11) از یک توری نگهدارنده در پایین تغذیه استفاده شد. همچنین در نقشه شکل (6) محل سه تکیه گاه توری، از اطراف تغذیه، به صورت تیغه‌های بیرون زده نمایش داده شده است. از طرف دیگر ایجاد منفذی در بالای تغذیه، مطابق شکل (12)، به عنوان جایگاه ماهیچه مدادی طراحی گردید. از این سوراخ برای وارد کردن مواد کروی کننده به داخل تغذیه و قرار دادن آن‌ها روی توری نگهدارنده استفاده شد. مقدار فرو سیلیس منیزیم برای استفاده 50 گرم بود و مقدار 30 گرم منیزیم خالص نیز در کنار این ماده اضافه شد.

خاطر نشان می‌سازد تغذیه مورد استفاده در شکل (12) دارای ارتفاعی برابر با 13 سانتی‌متر و قطری برابر با 8 سانتیمتر بود که از اندازه محاسبه شده کمی بزرگتر

گازهای موجود در قالب و همچنین گازهای متصاعدشونده از مواد کروی کننده، در اطراف محفظه قالب در درجه بالایی تعبیه گردید.

می‌باشد که آن هم به خاطر حجمی است که مواد کروی کننده در تغذیه به خود اختصاص می‌دهند. در نهایت مطابق شکل (13)، چندین سوراخ هواکش برای عبور



(ب)



(الف)

شکل 11 نمایی از قسمت زیرین تغذیه به همراه تکیه گاه‌های توری (الف) و توری نگهدارنده مواد کروی کننده (ب).



(ب)



(الف)

شکل 12 نمایی از ماهیچه مدادی (الف) و طرز قرار گرفتن آن در تغذیه (ب)



(ب)



(الف)

شکل 13 نمای دو درجه از سطح جدایش: (الف) درجه بالایی با سوراخ‌های هواکش (ب) درجه پایینی



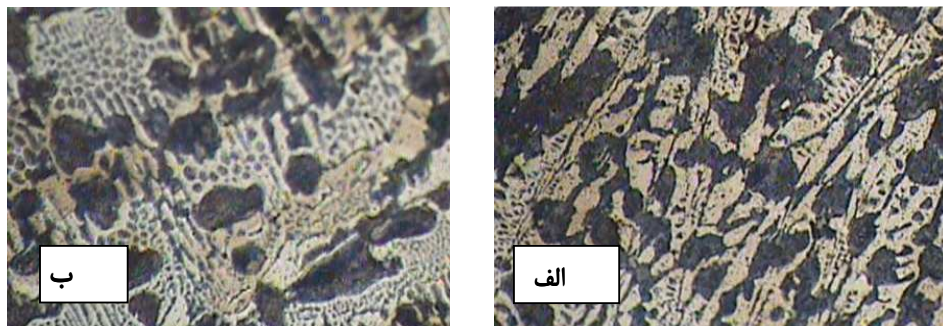
شکل 14 تصاویری از قطعه ریخته شده پس از جدانمودن تغذیه همراه سیستم راهگاهی و مدل چوبی آن.

و با کد 3 نامگذاری شد. به این ترتیب پس از انجام مراحل تهیه نمونه همگی توسط محلول اچ مناسب متالوگرافی شدند تا شکل، توزیع، پراکندگی و درصد کروی شدن گرافیت‌ها و همین‌طور ساختار زمینه؛ از سطح بیرونی به طرف قسمت حجیم (مدول بالا) قطعه مشخص گردد. شکل (15) ریزساختار چدن را برای نمونه 1 به ترتیب در تصویر (الف) برای سطح و در تصویر (ب) برای مغز (منطقه با مدول حرارتی بالا) با گرافیت کروی نشان می‌دهد. شکل (16) نتایج متالوگرافی را برای نمونه شماره 2 (گردن تغذیه) نشان می‌دهد که ساختاری حاوی گرافیت کروی است. شکل (17) تصویر متالوگرافی برای نمونه شماره 3 را در محل اطراف اتصال سیستم راهگاه به قطعه نشان می‌دهد که فاقد گرافیت کروی می‌باشد. در آزمایش بعدی هریک از نمونه‌های یاد شده سختی سنجی شدند که نتایج آزمون در جدول (3) ارائه شده است.

پس از اینکه درجه‌ها روی یکدیگر قرار گرفت و مواد کروی کننده در محل خود در داخل تغذیه جای داده شد، ماهیچه مدادی نیز در جایگاه خود قرار داده شد و ذوب‌ریزی انجام گرفت. شکل (14) قطعه ریخته‌گی را پس از جدانمودن تغذیه آن به همراه سیستم راهگاهی نشان می‌دهد.

نتایج

ابتدا آزمایش متالوگرافی برای بررسی کروی شدن گرافیت‌ها در سرتاسر قطعه انجام گرفت. به این منظور نمونه برداری مخرب از قطعه از سه محل بحرانی و حساس انجام گرفت. نمونه اول از منطقه‌ای که بزرگترین مدول حرارتی را داشت جدا شد و با کد 1 نامگذاری شد. نمونه دوم از محل گردن تغذیه جدا شد و با کد 2 نامگذاری شد. نمونه سوم از محلی نزدیک اتصال سیستم راهگاهی (پوسته بیرونی قطعه) جدا شد



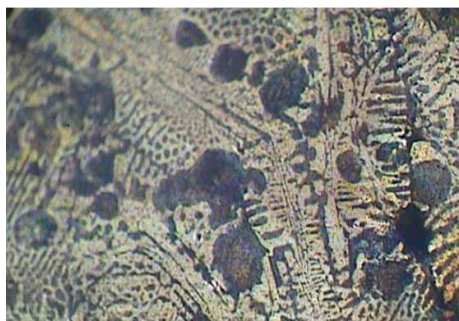
شکل 15 ریزساختار نمونه 1 (قسمت مدول بالا) پس از 200 روز بزرگنمایی 200 الف- تصویر سطح ، ب- تصویر مغز

جدول 3 نتایج آزمون سختی سنجی

مکان	عدد سختی برینل	سختی میانگین
مرکز قسمت مدول بالا	340-388-410	380
مرکز سطح گردن تغذیه	330-260-277	289
مرکز تغذیه	260-277-293	277
3 سانتیمتری زیر راهگاه	578-555-555	563
پوسته اطراف راهگاه	555-600-630	562



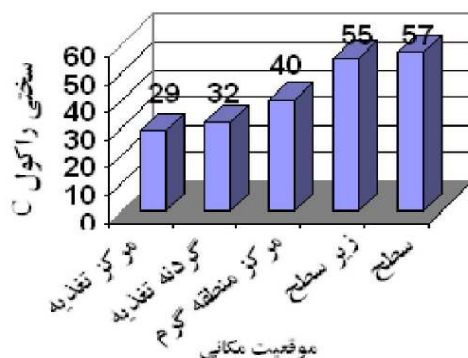
شکل 17 ریزساختار نمونه 3 (اتصال سیستم راهگاهی) پس از 200 روز بزرگنمایی 200



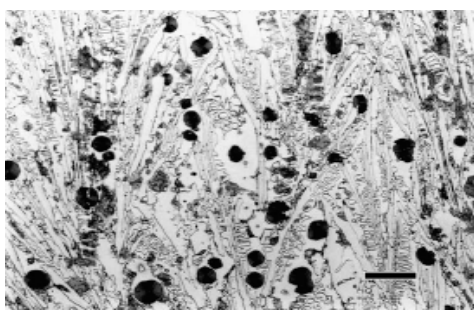
شکل 16 ریزساختار نمونه 2 (گردن تغذیه) پس از 200 روز بزرگنمایی 200

می‌شود با حرکت به سمت تغذیه و یا گرمترین قسمت قطعه، سختی کاهش می‌یابد که علت آن تغییر ساختار چدن از سطح بیرونی که چدن خاکستری است به مغز قطعه که چدن نشکن است، می‌باشد. اگرچه ساختار زمینه هم علاوه بر مورفولوژی گرافیت‌ها بر این تغییرات سختی مؤثر بوده است.

نمودار شکل (18) تغییرات سختی قطعه را از سطح قسمتی از قطعه که سریعتر از بقیه مقاطع سرد می‌شود (اطراف راهگاه فرعی) به طرف گرمترین قسمت و سپس به سمت مرکز تغذیه، روی مسیر انجماد جهت‌دار، یعنی از سردترین مقطع به طرف گرمترین مقطع نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه



شکل 18 تغییرات سختی قطعه روی مسیر انجماد جهت دار از سردترین مقطع به گرمترین مقطع



ب) تصویر مغز نمونه 1، بزرگنمایی 100



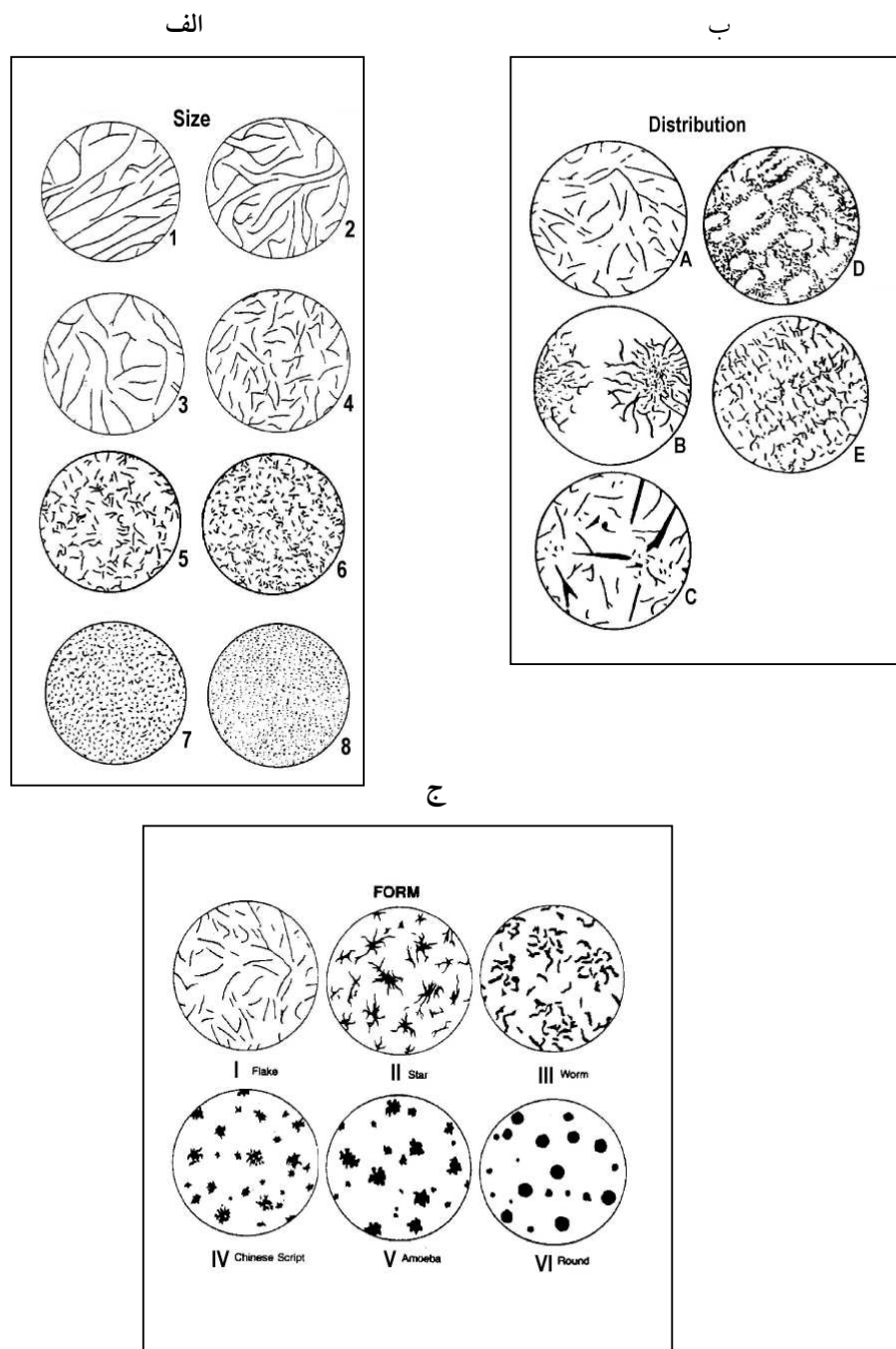
الف) تصویر لبه خارجی نمونه 1، بزرگنمایی 100

شکل 19 اختلاف شکل گرافیت‌ها به ترتیب در لبه خارجی و مغز نمونه برای مقایسه با استاندارد ASTM A247

همانطور که حدس زده می‌شد ساختار به سمت چدن خاکستری تا سفید میل می‌نماید. افزایش سختی در پوسته نیز این مطلب را تأیید می‌کند. این تصاویر به منظور مقایسه با استاندارد ASTM A247 [13,12] شکل (20)، ارائه شده‌اند. همان طور که ملاحظه می‌شود در مغز نمونه 1 گرافیت‌ها کروی هستند که با شکل VI و اندازه 5 از استاندارد یاد شده قابل انطباق است. اما اگر پوسته بیرونی همین نمونه با استاندارد مقایسه شود، گرافیت‌های خاکستری دارای شکل I با توزیع A و اندازه 3 مطابقت دارند. تصاویر متالوگرافی از محل اتصال سیستم راهگاه نشان می‌دهند که از کروی شدن خبری نیست و تنها نکته قابل توجه وجود مقدار زیادی ناخالصی است که علت آن مقطع زدن از قسمت انتهایی راهگاه است؛ یعنی دقیقاً در جایی که ناخالصی‌ها و سرباره‌ها در آنجا جمع می‌شوند.

بحث و نتیجه‌گیری

با تجزیه و تحلیل نتایج متالوگرافی مشاهده می‌شود که در نمونه‌های شماره 1 و 2 مقدار قابل توجهی گرافیت کروی تشکیل شده است و این مقدار در گردن تغذیه خیلی بیشتر می‌باشد. نتایج سختی سنجی نیز مؤید این مطلب می‌باشد. از طرف دیگر بررسی توزیع و مورفولوژی کره‌های گرافیتی نشان می‌دهد که گرافیت‌ها بسیار ریز شده و در بعضی نقاط به هم چسبیده‌اند، گویی در حین کروی شدن دچار مشکل شده‌اند. دلیل این امر ممکن است در اختیار نداشتن مواد کروی کننده کافی و یا کمبود کربن معادل چدن باشد. نکته دیگری که از تصاویر متالوگرافی لبه خارجی نمونه در شکل (19) دیده می‌شود این است که هر چه به پوسته نزدیک‌تر می‌شویم کره‌های گرافیتی بیشتر حذف شده و گرافیت‌ها به صورت ورقه‌ای رسوب نموده‌اند و



شکل 20 انواع شکل، توزیع و اندازه گرافیت‌ها بر پایه استاندارد ASTM A247

سوی دیگر در قطعات بزرگ که سیستم تقلیل فشار در تغذیه رخ نمی‌دهد، این روش کارایی چندانی ندارد زیرا فشار برگشتی تولید نمی‌کند که مذاب تلقیح شده از تغذیه وارد محفظه قطعه شود. به عبارت ساده‌تر قبل از شروع انجماد همه جانبه در اثر آزاد سازی گرافیت‌ها در بین خط لیکوئیدوس و سالیدوس، بایستی مذاب تلقیح شده از داخل تغذیه به داخل فضای بین دندریت‌های اولیه رفته و پس از کروی کردن مذاب یوتکتیکی باقی مانده، گردنه تغذیه منجمد شود. حال گرافیت زایی در ابعاد وسیع آغاز می‌شود. به این ترتیب، انبساط حاصل از گرافیت‌ها باعث پرشدن حفره‌های انقباضی می‌شود و قطعه سالم درمی‌آید.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله به این وسیله از همکاری آقای مهندس حامد اسکندری و جناب آقای دکتر صدرالسادات، عضو هیأت علمی دانشگاه شهید چمران اهواز، برای انجام آزمون‌های علمی تشکر و قدردانی می‌نمایند.

بررسی فازهای زمینه در تصاویر متالوگرافی نشان می‌دهد که در همه نمونه‌ها زمینه پرلیتی شده و هر چه به سمت پوسته نزدیک می‌شویم شاهد افزایش پرلیت به همراه سمیت‌های پراکنده هستیم. در نهایت شاهد چیزی در حدود 65 الی 70 درصد کروی شدن هستیم که با اعمال حساسیت بیشتر روی نکات کیفی مذاب این مقدار قطعاً افزایش پیدا خواهد کرد. به این ترتیب، با استفاده از روش ابتکاری ارائه شده در پژوهش حاضر با حذف محفظه واکنش مواد کروی کننده می‌توان ساختار قطعه چدنی را از سطح بیرونی به طرف مرکز قطعه به ترتیب از چدن خاکستری به چدن داکتیل تغییر داد. این دوگانگی ساختار می‌تواند منشاء بسیاری از کاربردهای صنعتی و مهندسی باشد.

بررسی ریزساختار در شرایط مختلف نشان داد که دمای بارریزی طبق نمودار شکل (4) مناسب است، ولی اگر دما بیشتر بالا رود به هنگام رسیدن مذاب به مواد کروی کننده در تغذیه امکان واکنش شدید و ترک‌شدن قالب ماسه‌ای از منطقه بالای سر تغذیه وجود دارد. از

مراجع

1. P.C. Mukherjee, "Fundamental of metal casting technology", Oxford presses, (1979).
2. R. Beadle, "Castings", Macmillan press, (1971).
3. P. Beely, "Foundry technology", Butterworth-Heinemann press, (2001).
4. پرویز دوامی، "اصول طراحی سیستم راهگامی و تغذیه‌گذاری چدن‌ها"، انتشارات جامعه ریخته گران ایران، (1368).
5. Jelrey L. Hutter, John Bechhoefer, "Banded spherulitic growth in a liquid crystal", Journal of Crystal Growth 217, 332-34, (2000).
6. Janina M. Radzikowska, "Effect of specimen preparation on evaluation of cast iron microstructures", Materials Characterization 54, 287- 304, (2005).
7. Lin PC, Loper CR., "Observation on the graphite morphology in cast iron", Trans AFS, 88-97, (2005).
8. Vander Voort GF., "Metallography Principles and Practice", McGraw-Hill Book Co., New York (1984), ASM International, Materials Park, Ohio, (1999).

9. Edalati, K., Akhlaghi, F., Nili-Ahmadabadi, M., "Influence of SiC and FeSi addition on the characteristics of gray cast iron melts poured at different temperatures", J. of Mater. Proc. Tech. 160, 183–187, (2005).
10. Rikard Källbom, K. Hamberg, M. Wessén, E. Björkegren, "On the solidification sequence of ductile iron castings containing chunky graphite", Materials Science and Engineering A, 413–414, 346-351, (2005).
11. H.L. Rosenthal, "Principles of metal casting", McGraw-Hill press, (1992).
12. Standard ISO 945: Cast Iron- Designation of microstructure of graphite.
13. Standard ASTM A247: Test method for evaluation the microstructure of graphite in iron castings.

Archive of SID