

به نام خدا



# مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

[www.Iran-mavad.com](http://www.Iran-mavad.com)



## افزایش میزان گرافیت زایی چدن های غیرآلیاژی در سرعت های سرد کردن بالا

علیرضا کیانی رشید<sup>۱</sup>، شادی کلاهگرآذری<sup>۲</sup>، خاطره عدالتی<sup>۳</sup>

### چکیده

در طی دهها سال گذشته گرافیت زایی در چدن ها از دیدگاه های مختلفی بررسی شده است. عواملی همچون دمای بارریزی، جوانه زایی، ترکیب شیمیایی و سرعت سرد کردن که تحت تاثیر ضخامت قطعه و جنس قالب است، مورد تجزیه و تحلیل پژوهشگران قرار گرفته اند. در تحقیق حاضر تکیه بر تولید چدن های خاکستری و به عبارتی تولید چدن های غیر تبریدی در سرعت های سرد کردن بالاتر از حدود بحرانی است. در همین ارتباط با تغییر در عوامل دمای بارریزی، جوانه زاء، میزان درصد کربن و استفاده از روشی نوین در قالبگیری و انجماد سعی شده است در سرعت های سرد کردن بالا به چنین ساختارهایی دست یافت. طبیعی است با تولید چنین چدن هایی امکان تولید قطعاتی با کیفیت مناسب در زمانی کوتاه تر فراهم خواهد شد و از نظر اقتصادی ارزش افزوده محسوسی را ایجاد خواهد کرد. اهمیت این فرآیند از این جهت است که تشکیل گرافیت در چدن ها می تواند موجب تسهیل عملیات ماشینکاری و افزایش قابلیت کارپذیری چدن ها گردد. به همین دلیل در پژوهش حاضر با توجه به شرایط متفاوت انجماد به بررسی این عوامل پرداخته شده است.

کلمات کلیدی: گرافیت زایی، انجماد، سرعت سرد کردن، ریزساختار.

---

۱- استادیار، عضو هیئت علمی گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه فردوسی مشهد  
[kianirashid@gmail.com](mailto:kianirashid@gmail.com) یا [fkiana@yahoo.com](mailto:fkiana@yahoo.com)

۲- دانشجوی مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد  
[kolahgarazari@gmail.com](mailto:kolahgarazari@gmail.com)

۳- دانشجوی مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد  
[khatereh.edalati@gmail.com](mailto:khatereh.edalati@gmail.com)

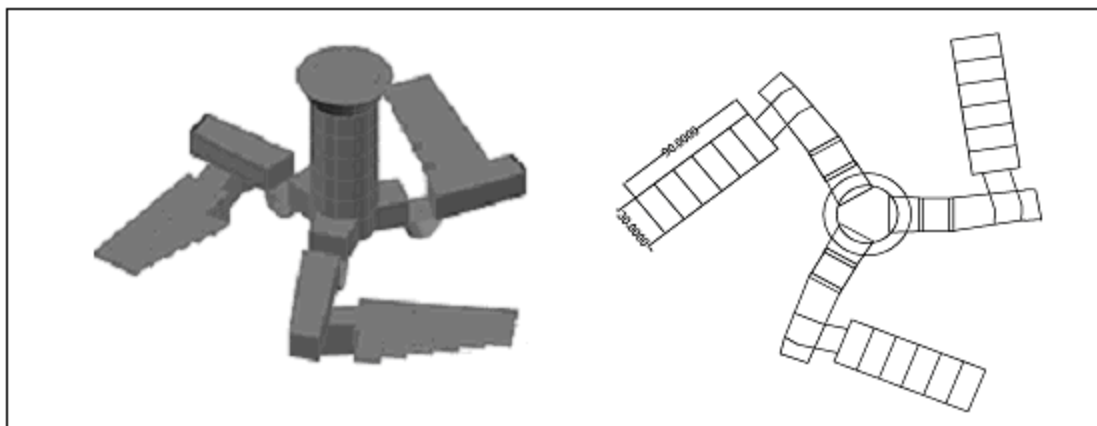
## ۱-مقدمه

تلاشهای زیادی جهت مرتبط کردن عوامل مختلف تاثیر گذار بر قابليت گرافیت‌زایی در چدن خاکستری تبرید شده یا تبرید نشده انجام شده است، که این عوامل شامل: ترکیب شیمیایی، دمای بارریزی، جوانه‌زایی، ضخامت قطعه ریختگی و جنس قالب اند، که دو عامل آخر کنترل کننده سرعت سرد شدن هنگام انجماد هستند [۱]. خواص چدنهای خاکستری تحت تاثیر اندازه، مقدار و توزیع گرافیت‌های لایه‌ای تغییر می‌کند. این پارامترها را می‌توان به سادگی توسط درصد کربن، درصد سیلیسیم و سرعت سرد شدن کنترل می‌شود (شکل ۱). کاهش سرعت سرد شدن و افزایش درصد کربن و یا سیلیسیم منجر به تشکیل گرافیت‌های بیشتر و ضخیم‌تر می‌شود. اثر ضخامت قطعه بر ریزساختار چدن‌ها ناشی از تاثیر آن بر روی نحوه انجماد و سرعت سرد شدن است. در یک ترکیب شیمیایی ثابت هر چه ضخامت قطعه بیشتر باشد سرعت سرد شدن کمتر، احتمال گرافیت‌زایی بیشتر است از سوی دیگر هر چه ضخامت قطعه کمتر باشد، سرعت سرد شدن بیشتر و احتمال تشکیل فاز کاربید بیشتر است [۲].

واضح است که جنس قالب نیز بر روی سرعت سرد کردن تاثیرگذار است به این صورت که هرچه ضریب انتقال حرارت قالب کمتر باشد (نظیر قالب‌های سرامیکی)، سرعت سرد کردن مذاب درون قالب کندتر شده و باعث افزایش گرافیت‌زایی می‌گردد [۳].

تحقیقات نشان می‌دهند که با افزایش دمای بارریزی درصد گرافیت‌های نوع A کاهش، اندازه گرافیت‌ها افزایش، تعداد سلول‌های یوتکتیک بر واحد سطح کاهش و فاصله بازوهای دندریتی افزایش می‌یابد [۴]. افزودن بعضی مواد جوانه‌زا باعث گرافیت‌زایی و جلوگیری از تشکیل فاز کاربید یا گرافیت‌های ورقه‌ای با توزیع نامطلوب D و E می‌شوند و برخی از آنها باعث ریز کردن ساختار زمینه می‌شوند. بنابراین افزودن مقدار کمی مواد جوانه‌زا به مذاب باعث می‌شود بی‌آنکه تغییر قابل ملاحظه‌ای در ترکیب شیمیایی بوجود آید ریزساختار و خواص مکانیکی چدن بهبود یابد [۵]. مواد جوانه‌زای متداول در ریخته‌گری چدن‌ها بر پایه Fe-Si بوده و عناصری نظیر Ca, Al, Mn, Sr, Zr, Ba در آنها وجود دارد [۶].





شکل ۲. شکل شماتیک مدل ترکیبی پله‌ای

## ۲-۲- قالبگیری

در این تحقیق دو نوع قالب تهیه شد، که یک قالب از جنس ماسه سیلیسی به همراه چسب سیلیکات سدیم و گاز  $CO_2$  است و دیگری همان قالب قبلی به اضافه پوشش های سرامیکی به ضخامت ۱ سانتی- متر که روی سطح پله‌ها قرار داده شدند.

## ۲-۳- ذوب ریزی

مذاب تهیه شده دارای سه ترکیب مختلف چدن خاکستری غیرآلیاژی با میزان درصد وزنی کربن معادل متفاوت است که ترکیب شیمیایی آنها در جدول ۱ مشاهده می‌شود. برای تهیه مذاب از کوره القایی با فرکانس متوسط و ظرفیت ۷۵۰ کیلوگرم و ۷۰۰ وات که با قراضه فولادی و چدنی، گرافیت و  $SiC$  شارژ شده، استفاده گردید.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی مذاب های مورد آزمایش

| %C   | %Si | %Mn | %S   | %P   | %CE  |                          |
|------|-----|-----|------|------|------|--------------------------|
| ۳/۴۵ | ۱/۸ | ۰/۶ | ۰/۰۵ | ۰/۰۵ | ۴/۱۵ | چدن خاکستری هیپوئوتکتیک  |
| ۳/۶۸ | ۱/۷ | ۰/۵ | ۰/۰۵ | ۰/۰۵ | ۴/۳۰ | چدن خاکستری یوتکتیک      |
| ۳/۸۰ | ۱/۶ | ۰/۴ | ۰/۰۲ | ۰/۰۵ | ۴/۳۷ | چدن خاکستری هایپوئوتکتیک |

به منظور بررسی اثر جوانه‌زا، ابتدا فروسیلیسیم ۰.۷۵٪ آلومینیم و کلسیم‌دار به میزان ۰، ۰/۳ و ۰/۵ درصد وزن مذاب در درون هر کدام از محفظه‌های فعل و انفعال قالب قرار داده شد، و سپس سوپرسید به میزان ۰/۳ درصد وزنی مذاب به درون پاتیل حاوی مذاب اضافه شد. بنابراین سه حالت مختلف جوانه‌زایی مورد بررسی قرار گرفت. حالت اول شامل ۰/۳ درصد وزنی سوپرسید به روش جوانه‌زنی در پاتیل و بدون جوانه‌زایی در محفظه فعل و انفعال قالب بود. در حالت دوم از ۰/۳ درصد وزنی سوپرسید به روش جوانه‌زنی در پاتیل به همراه ۰/۳ درصد وزنی فروسیلیسیم ۰.۷۵٪ آلومینیم و کلسیم‌دار به روش جوانه‌زنی در محفظه فعل و انفعال قالب و در حالت سوم از ۰/۳ درصد وزنی سوپرسید به روش جوانه‌زنی در پاتیل و ۰/۵ درصد وزنی فروسیلیسیم ۰.۷۵٪ آلومینیم و کلسیم‌دار به روش جوانه‌زنی در محفظه فعل و انفعال قالب استفاده شد. ترکیب شیمیایی مواد جوانه‌زا در جدول ۲ مشاهده می‌شود.

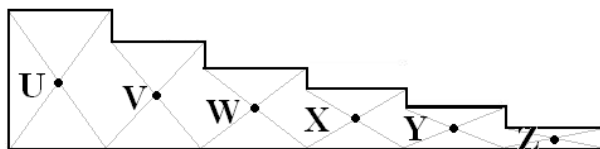
جدول ۲- نوع و ترکیب شیمیایی مواد جوانه‌زای استفاده شده.

| نوع ماده جوانه‌زا                    | %Si   | %Al       | %Ca   | %Zr  | %Fe   |
|--------------------------------------|-------|-----------|-------|------|-------|
| فروسیلیس ۰.۷۵٪ حاوی کلسیم و آلومینیم | ۷۴-۷۸ | ۱/۵-۱/۲   | ۱-۰/۵ | ۰    | مابقی |
| سوپرسید                              | ۷۰-۷۵ | ۱/۳۵-۱/۰۰ | ۰     | ۲۵-۲ | مابقی |

آزمایش در سه دمای بارریزی مختلف ۱۳۵۰، ۱۴۰۰ و ۱۴۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد و زمان بارریزی برای هر یک از قالبهای تهیه شده معادل ۷ ثانیه اندازه‌گیری گردید.

#### ۴-۲- متالوگرافی

نمونه‌های ریخته‌گری شده بعد از شات بلاست مقطع زنی و سنگ زنی شدند. مقاطع تا سنباده‌ی ۱۲۰۰ و سپس توسط خمیر الماس ۰/۲ میکرون صیقل‌کاری شدند. نمونه‌های بدون حکاکی برای تشخیص مورفولوژی گرافیت و پس از حکاکی کردن توسط محلول نایتال ۲٪ برای تعیین درصد فاز کاربید مورد مطالعه قرار گرفتند. سپس با میکروسکوپ نوری مشاهده و از ریزساختار نمونه‌ها از محل‌های نشان داده شده در شکل ۳ عکس‌برداری شد.



شکل ۳- محلهای عکسبرداری جهت بررسی ریزساختار

جهت بررسی خصوصیات ریزساختاری چدنهای ریخته‌گری شده از نظر شکل، اندازه و توزیع گرافیتها و میزان فاز کاربید از نرم‌افزار آنالیز تصویری Clemex استفاده شد. و بدین وسیله در هر یک از عکس‌ها درصد گرافیت‌های لایه‌ای با توزیع نوع E، D، A، عدد اندازه گرافیت و مقدار فاز کاربید مشخص شد.

### ۳- یافته‌ها

جدول ۳ خصوصیات ریزساختاری چدنهای ریخته‌گری شده را از نظر توزیع و اندازه گرافیت‌های لایه‌ای و میزان فاز کاربید نشان می‌دهد.

#### جدول ۳. خصوصیات ریزساختاری چدنهای ریخته‌گری شده

۱: ۰/۳٪ سوپرسید به روش جوانه‌زنی در پاتیل و بدون جوانه‌زایی در محفظه فعل و انفعال قالب

۲: ۰/۳٪ سوپرسید به روش جوانه‌زنی در پاتیل به همراه ۰،۳٪ فروسیلیسیم ۷۵٪ آلومینیم و کلسیم‌دار به روش جوانه‌زنی در محفظه فعل و انفعال قالب

۳: ۰/۳٪ سوپرسید به روش جوانه‌زنی در پاتیل و ۰،۵٪ فروسیلیسیم ۷۵٪ آلومینیم و کلسیم‌دار به روش جوانه‌زنی در محفظه فعل و انفعال قالب

#### ترکیب هیپوئوتکتیک

| دما    | ضخامت پله | قالب ماسه‌ای |             |                   |                 |    |      |        |      |    |      |        |      | قالب با سرامیک |      |        |      |
|--------|-----------|--------------|-------------|-------------------|-----------------|----|------|--------|------|----|------|--------|------|----------------|------|--------|------|
|        |           | ۱            |             |                   |                 | ۲  |      |        |      | ۳  |      |        |      | ۲              |      |        |      |
|        |           | %A گرافیت    | %D.E گرافیت | عدد اندازه گرافیت | درصد فاز کاربید | %A | %D.E | اندازه | %Cem | %A | %D.E | اندازه | %Cem | %A             | %D.E | اندازه | %Cem |
| 1450°C | U         | 2            | 98          | 5                 | 14              | 4  | 96   | 5      | 8    | 58 | 42   | 4      | 3    | 31             | 69   | 6      | 7    |
|        | V         | 1            | 99          | 6                 | 21              | 2  | 98   | 5      | 17   | 49 | 51   | 5      | 5    | 26             | 74   | 6      | 12   |
|        | W         | 0            | 100         | 6                 | 30              | 0  | 100  | 6      | 25   | 43 | 57   | 5      | 7    | 7              | 93   | 6      | 26   |
|        | X         | 0            | 100         | 7                 | 44              | 0  | 100  | 6      | 34   | 32 | 68   | 5      | 12   | 2              | 98   | 7      | 32   |
|        | Y         | 0            | 100         | 7                 | 55              | 0  | 100  | 6      | 58   | 18 | 82   | 6      | 16   | 0              | 100  | 7      | 51   |
|        | Z         | 0            | 100         | 7                 | 67              | 0  | 100  | 7      | 66   | 8  | 92   | 6      | 24   | 0              | 100  | 7      | 62   |
|        |           | 0            | 100         | 9                 | 91              | 6  | 99   | 6      | 23   | 0  | 100  | 9      | 23   | 6              | 94   | 6      | 22   |
| دما    | ضخامت     | قالب ماسه‌ای |             |                   |                 |    |      |        |      |    |      |        |      | قالب با سرامیک |      |        |      |

افزایش میزان گرافیت زایی چدن های...

| ۳              |   |    |    | ۲  |   |    |    | ۱  |   |     |    | ۳            |   |     |    | ۲  |   |     |    | ۱  |   |     |    | پله          |        |     |
|----------------|---|----|----|----|---|----|----|----|---|-----|----|--------------|---|-----|----|----|---|-----|----|----|---|-----|----|--------------|--------|-----|
| 1              | 4 | 33 | 67 | 5  | 5 | 41 | 59 | 8  | 5 | 65  | 35 | 5            | 5 | 58  | 42 | 4  | 5 | 64  | 36 | 2  | 5 | 88  | 12 | U            | 1400°C |     |
| 6              | 5 | 44 | 56 | 9  | 5 | 49 | 51 | 12 | 6 | 75  | 25 | 9            | 5 | 72  | 28 | 9  | 5 | 75  | 25 | 6  | 5 | 91  | 9  | V            |        |     |
| 9              | 5 | 57 | 43 | 16 | 5 | 57 | 43 | 26 | 6 | 83  | 17 | 11           | 6 | 88  | 12 | 13 | 6 | 84  | 16 | 9  | 6 | 93  | 7  | W            |        |     |
| 12             | 6 | 68 | 32 | 27 | 6 | 71 | 29 | 34 | 6 | 95  | 5  | 23           | 6 | 98  | 2  | 21 | 6 | 91  | 9  | 15 | 6 | 97  | 3  | X            |        |     |
| 17             | 6 | 75 | 25 | 32 | 6 | 80 | 20 | 42 | 7 | 98  | 2  | 41           | 6 | 99  | 1  | 35 | 6 | 100 | 0  | 26 | 7 | 100 | 0  | Y            |        |     |
| 25             | 6 | 90 | 10 | 45 | 6 | 93 | 7  | 54 | 7 | 100 | 0  | 52           | 7 | 100 | 0  | 41 | 7 | 100 | 0  | 31 | 7 | 100 | 0  | Z            |        |     |
| قالب با سرامیک |   |    |    |    |   |    |    |    |   |     |    | قالب ماهی‌ای |   |     |    |    |   |     |    |    |   |     |    | ضخامت<br>پله |        | دما |
| ۳              |   |    |    | ۲  |   |    |    | ۱  |   |     |    | ۳            |   |     |    | ۲  |   |     |    | ۱  |   |     |    |              |        |     |
| 0              | 4 | 18 | 82 | 0  | 4 | 23 | 77 | 2  | 5 | 52  | 48 | 0            | 5 | 46  | 54 | 3  | 5 | 61  | 39 | 1  | 5 | 84  | 16 | U            | 1350°C |     |
| 0              | 4 | 26 | 74 | 0  | 4 | 30 | 70 | 4  | 6 | 67  | 33 | 1            | 6 | 61  | 39 | 8  | 6 | 72  | 28 | 5  | 6 | 88  | 12 | V            |        |     |
| 0              | 4 | 32 | 68 | 1  | 5 | 46 | 54 | 11 | 6 | 90  | 10 | 6            | 6 | 80  | 20 | 13 | 6 | 79  | 21 | 11 | 6 | 92  | 8  | W            |        |     |
| 0              | 5 | 42 | 58 | 4  | 5 | 48 | 52 | 18 | 7 | 92  | 8  | 10           | 6 | 89  | 11 | 23 | 6 | 84  | 16 | 13 | 7 | 96  | 4  | X            |        |     |
| 2              | 5 | 67 | 33 | 7  | 5 | 71 | 29 | 29 | 7 | 99  | 1  | 19           | 7 | 94  | 6  | 26 | 7 | 90  | 10 | 21 | 7 | 98  | 2  | Y            |        |     |
| 8              | 5 | 79 | 21 | 13 | 6 | 90 | 10 | 34 | 7 | 100 | 0  | 36           | 7 | 99  | 1  | 35 | 7 | 94  | 6  | 29 | 7 | 100 | 0  | Z            |        |     |

### ترکیب یونکتیک

| دما    | ضخامت<br>پله | قالب ماسه‌ای |     |   |    |    |     | قالب با سرامیک |    |    |     |   |    |
|--------|--------------|--------------|-----|---|----|----|-----|----------------|----|----|-----|---|----|
|        |              | ۱            |     | ۲ |    | ۳  |     | ۱              |    | ۲  |     | ۳ |    |
| 1450°C | U            | 27           | ۷۳  | ۶ | 6  | ۴۱ | ۵۹  | ۶              | ۲  | ۵۲ | ۴۸  | ۵ | ۳  |
|        | V            | ۱۹           | ۸۱  | ۶ | 9  | ۳۴ | ۶۶  | ۶              | ۸  | ۴۶ | ۵۲  | ۵ | ۱  |
|        | W            | 13           | 87  | ۷ | 16 | ۲۱ | ۷۹  | ۶              | ۱۳ | ۳۵ | ۶۵  | ۶ | ۶  |
|        | X            | 4            | 96  | ۷ | 22 | ۱۶ | ۸۴  | ۶              | ۲۴ | ۲۶ | ۷۴  | ۶ | ۱۱ |
|        | Y            | 1            | 99  | 7 | 41 | ۷  | ۹۳  | ۷              | ۳۱ | ۱۷ | ۸۳  | ۶ | ۱۹ |
|        | Z            | 0            | 100 | 7 | 48 | ۲  | ۹۸  | ۷              | ۴۲ | ۶  | ۹۴  | ۷ | ۲۱ |
|        | ۴            | ۲۹           | ۱۰۰ | ۷ | ۵۰ | ۶  | ۱۰۰ | ۷              | ۶۳ | ۶  | ۱۰۰ | ۷ | ۲۹ |
| 1400°C | U            | ۳۴           | ۶۶  | ۶ | ۵  | ۴۸ | ۵۲  | ۵              | ۴  | ۵۴ | ۴۶  | ۵ | ۰  |
|        | V            | ۳۱           | ۶۹  | ۶ | ۹  | ۳۰ | ۷۰  | ۶              | ۱  | ۴۲ | ۵۸  | ۵ | ۰  |
|        | W            | ۱۲           | ۸۸  | ۶ | ۱۵ | ۱۴ | ۸۶  | ۶              | ۲  | ۳۱ | ۶۹  | ۶ | ۳  |
|        | X            | ۴            | ۹۶  | ۷ | ۲۴ | ۹  | ۹۱  | ۶              | ۷  | ۲۴ | ۷۶  | ۶ | ۸  |
|        | Y            | ۰            | ۱۰۰ | ۷ | ۳۶ | ۴  | ۹۶  | ۷              | ۹  | ۱۲ | ۸۸  | ۶ | ۱۲ |
|        | Z            | ۰            | ۱۰۰ | ۷ | ۴۹ | ۲  | ۹۸  | ۷              | ۴۶ | ۸  | ۹۲  | ۷ | ۲۳ |
|        | ۴            | ۳۹           | ۱۰۰ | ۷ | ۵۲ | ۶  | ۱۰۰ | ۷              | ۴۱ | ۶  | ۱۰۰ | ۷ | ۲۳ |
| 1350°C | U            | ۳۹           | ۶۱  | ۵ | ۰  | ۴۲ | ۷۶  | ۲۴             | ۰  | ۴  | ۲۴  | ۵ | 0  |
|        | V            | ۳۲           | ۶۸  | ۶ | ۹  | ۳۱ | ۶۴  | ۳۶             | ۲  | ۴  | ۲۶  | ۵ | 0  |
|        | W            | ۱۴           | ۸۶  | ۶ | ۱۶ | ۶۲ | ۳۸  | ۴۷             | ۳  | ۵  | ۳۸  | ۶ | 1  |
|        | X            | ۵            | ۹۵  | ۶ | ۲۲ | ۱۴ | ۸۶  | ۶              | ۵  | ۵  | ۴۷  | ۶ | 3  |
|        | Y            | ۰            | ۱۰۰ | ۷ | ۴۱ | ۲  | ۹۸  | ۷              | ۸  | ۵  | ۷۵  | ۷ | 5  |
|        | Z            | ۰            | ۱۰۰ | ۷ | ۵۶ | ۱  | ۹۹  | ۷              | ۱۹ | ۶  | ۸۵  | ۷ | 12 |
|        | ۴            | ۳۹           | ۱۰۰ | ۷ | ۵۶ | ۱  | ۹۹  | ۷              | ۱۹ | ۶  | ۸۵  | ۷ | 12 |

www.iran-mavad.com

مرجع داتلود رایگان مهندسی مواد و متالورژی



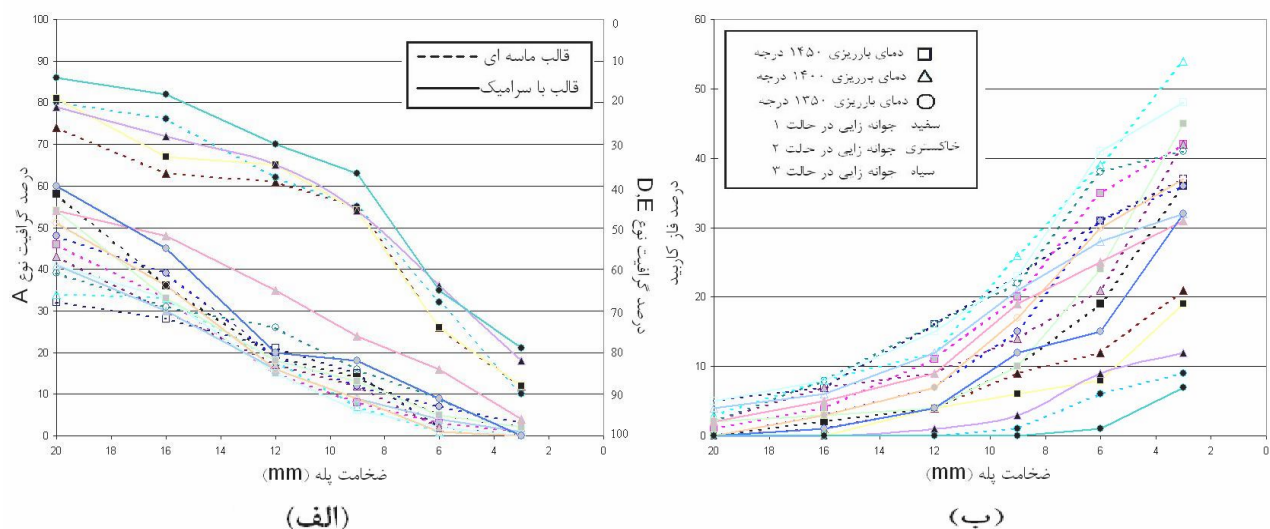
### ترکیب های پریوتکتیک

| دما    | ضخامت<br>پله | قالب ماسه‌ای |     |    |   |    |     |    |   |    |    |    |   | قالب با سرامیک |     |    |   |    |    |    |   |    |    |    |   |    |    |
|--------|--------------|--------------|-----|----|---|----|-----|----|---|----|----|----|---|----------------|-----|----|---|----|----|----|---|----|----|----|---|----|----|
|        |              | ۱            |     |    |   | ۲  |     |    |   | ۳  |    |    |   | ۱              |     |    |   | ۲  |    |    |   | ۳  |    |    |   |    |    |
| 1450°C | U            | 32           | 68  | 5  | 6 | 46 | 54  | 1  | 5 | 58 | 42 | 0  | 5 | 41             | 59  | 5  | 5 | 54 | 46 | 2  | 5 | 81 | 19 | 4  | 5 | 81 | 19 |
|        | V            | 28           | 72  | 7  | 6 | 33 | 67  | 4  | 6 | 36 | 64 | 2  | 6 | 33             | 67  | 8  | 5 | 67 | 33 | 3  | 5 | 64 | 36 | 2  | 6 | 36 | 64 |
|        | W            | 21           | 79  | 16 | 7 | 15 | 85  | 11 | 6 | 19 | 81 | 4  | 6 | 15             | 85  | 15 | 6 | 81 | 19 | 4  | 6 | 15 | 81 | 4  | 6 | 15 | 81 |
|        | X            | 15           | 85  | 23 | 7 | 8  | 92  | 20 | 7 | 14 | 86 | 10 | 6 | 8              | 92  | 22 | 6 | 86 | 14 | 6  | 6 | 86 | 14 | 10 | 6 | 86 | 14 |
|        | Y            | 2            | 93  | 31 | 7 | 3  | 97  | 35 | 7 | 5  | 95 | 19 | 7 | 2              | 95  | 41 | 7 | 95 | 5  | 7  | 2 | 95 | 5  | 19 | 7 | 2  | 95 |
|        | Z            | 0            | 100 | 37 | 7 | 1  | 99  | 42 | 7 | 2  | 98 | 36 | 7 | 0              | 98  | 48 | 7 | 98 | 2  | 7  | 0 | 98 | 2  | 36 | 7 | 2  | 98 |
| 1400°C | U            | 34           | 66  | 3  | 5 | 43 | 57  | 2  | 5 | 74 | 26 | 0  | 4 | 41             | 59  | 4  | 6 | 57 | 43 | 2  | 5 | 74 | 26 | 0  | 4 | 41 | 59 |
|        | V            | 33           | 67  | 8  | 6 | 30 | 70  | 7  | 5 | 63 | 37 | 1  | 4 | 30             | 70  | 6  | 6 | 70 | 30 | 5  | 6 | 37 | 63 | 1  | 4 | 30 | 70 |
|        | W            | 18           | 82  | 12 | 6 | 17 | 83  | 9  | 6 | 61 | 39 | 4  | 5 | 16             | 84  | 12 | 6 | 83 | 61 | 9  | 6 | 16 | 84 | 4  | 5 | 16 | 84 |
|        | X            | 7            | 93  | 26 | 6 | 12 | 88  | 14 | 6 | 55 | 45 | 9  | 5 | 9              | 91  | 21 | 7 | 88 | 55 | 28 | 7 | 16 | 84 | 25 | 7 | 16 | 84 |
|        | Y            | 1            | 99  | 29 | 7 | 2  | 98  | 21 | 7 | 26 | 74 | 12 | 6 | 4              | 96  | 28 | 7 | 74 | 26 | 12 | 6 | 16 | 84 | 25 | 7 | 16 | 84 |
|        | Z            | 0            | 100 | 54 | 7 | 0  | 100 | 42 | 7 | 12 | 98 | 21 | 6 | 1              | 99  | 32 | 7 | 98 | 12 | 7  | 0 | 98 | 21 | 31 | 7 | 0  | 98 |
| 1350°C | U            | 39           | 61  | 2  | 6 | 48 | 52  | 0  | 5 | 80 | 20 | 0  | 4 | 51             | 49  | 0  | 5 | 48 | 52 | 0  | 5 | 80 | 20 | 0  | 4 | 51 | 49 |
|        | V            | 31           | 69  | 8  | 6 | 39 | 61  | 3  | 6 | 76 | 24 | 0  | 5 | 36             | 64  | 3  | 6 | 64 | 39 | 1  | 5 | 76 | 24 | 0  | 5 | 36 | 64 |
|        | W            | 26           | 74  | 16 | 6 | 19 | 81  | 7  | 6 | 62 | 38 | 0  | 5 | 16             | 84  | 7  | 7 | 81 | 62 | 17 | 7 | 16 | 84 | 7  | 7 | 16 | 84 |
|        | X            | 16           | 84  | 22 | 7 | 12 | 88  | 15 | 7 | 55 | 45 | 1  | 5 | 9              | 91  | 17 | 7 | 88 | 55 | 30 | 7 | 16 | 84 | 7  | 7 | 16 | 84 |
|        | Y            | 9            | 91  | 38 | 7 | 7  | 93  | 31 | 7 | 32 | 68 | 6  | 6 | 1              | 99  | 30 | 7 | 68 | 32 | 30 | 7 | 16 | 84 | 7  | 7 | 16 | 84 |
|        | Z            | 0            | 100 | 41 | 7 | 3  | 97  | 36 | 7 | 10 | 90 | 9  | 6 | 0              | 100 | 37 | 7 | 90 | 10 | 37 | 7 | 16 | 84 | 7  | 7 | 16 | 84 |

با بررسی داده‌های جدول ۳ مشاهده می‌کنیم که با کاهش ضخامت قطعه گرافیتها ریزتر می‌شوند و میزان گرافیتها با توزیع نوع E,D و همچنین میزان فاز کاربید افزایش یافته و گرافیتهای نوع A کاهش می‌یابند. علاوه بر آن مشاهده می‌کنیم که چدنهای ریخته‌گری شده درون قالبهایی دارای پوشش سرامیکی، میزان گرافیتهای نوع A بیشتری نسب به حالت بدون پوشش سرامیکی دارند و میزان توزیع نامطلوب گرافیتهای نوع E,D و همچنین میزان فاز کاربید کمتری در ساختار آنها مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش میزان درصد کربن معادل در ترکیب شیمیایی چدن خاکستری، میزان گرافیت نوع A افزایش یافته و اندازه گرافیت ها درشت‌تر می‌شوند، میزان کاربید و توزیع گرافیتهای نوع

D, E نیز کاهش چشمگیری دارد. مشاهده می‌کنیم که با افزایش دمای بارریزی، درصد گرافیت‌های نوع A کاهش و اندازه گرافیت‌ها افزایش می‌یابد.

همچنین داده‌ها نشان می‌دهد که با افزایش مقدار ماده جوانه‌زا میزان گرافیت‌ها با توزیع نوع E و D و همچنین میزان فاز کاربید کاهش یافته و میزان گرافیت نوع A افزایش می‌یابد. با افزودن ۰/۳ درصد ماده جوانه‌زا گرافیت‌های ریزتری تشکیل می‌شود، اما افزودن ۰/۵ درصد جوانه‌زا گرافیت‌ها را درشت می‌کند. شکل (۴-الف) تغییرات میزان گرافیت‌های نوع A, D و E را برحسب ضخامت و شکل (۴-ب) تغییرات میزان کاربید را برحسب ضخامت قطع‌های جوانه‌زایی شده، برای سه حالت تعریف شده افزودن ماده جوانه‌زا و برای ترکیب چدن خاکستری هاپریوتکتیک نشان می‌دهد.



شکل ۴-چدن خاکستری هاپریوتکتیک (الف) تغییرات میزان گرافیت‌های نوع A, D و E را برحسب ضخامت قطعه (ب) تغییرات میزان کاربید را برحسب ضخامت قطعه

شکل ۴ نشان می‌دهد که در یک ترکیب شیمیایی ثابت، با کاهش دمای بارریزی و افزایش ضخامت قطعه و با استفاده از پوشش‌های سرامیکی در قالب می‌توان مقدار گرافیت نوع A را افزایش و میزان گرافیت نوع E و D را کاهش داد. همچنین مشاهده می‌کنیم حالت جوانه‌زایی ۳ مطلوب‌ترین ساختار را ایجاد می‌کند.

#### ۴-بحث و بررسی:

واضح است که در یک ترکیب شیمیایی ثابت هر چه ضخامت قطعه بیشتر باشد سرعت سرد شدن کمتر و احتمال گرافیت‌زایی بیشتر است از سوی دیگر هر چه ضخامت قطعه کمتر باشد، سرعت سرد شدن

بیشتر و احتمال تشکیل فاز کاربرد بیشتر است [۲]. یکی از مناسبترین روش ها برای بررسی اثر سرعت سرد کردن (یا اثر ضخامت قطعه) بر روی ریزساختار چدن استفاده از آزمایش گوه یا آزمایش پله است [۷]. زیرا در این مدلها ضخامت بطور یکنواخت تغییر می کند و همین عامل باعث تغییر سرعت سرد شدن به هنگام انجماد می شود، که در این تحقیق از آزمایش پله استفاده گردید. سپس با مطالعه ریز ساختار ایجاد شده در ضخامتهای مختلف می توان تغییرات گرافیت زایی و کاربردزایی را در سرعتهای مختلف سرد شدن بررسی نمود. در این آزمایش شرایط به گونه ای طراحی شد که بتوانیم در سرعتهای سرد شدن بالاتر از حد بحرانی متغیرهای مختلف کنترل کننده ریزساختار در این شرایط را مورد بررسی قرار دهیم. همانطور که در نتایج مشاهده می کنیم با کاهش ضخامت که با افزایش تحت انجماد همراه است، گرافیتها ریزتر می شوند [۸]. واضح است که هر چه تحت انجماد بیشتر باشد شعاع بحرانی جوانه زنی ( $r^*$ ) کاهش یافته لذا تعداد بیشتری جوانه یوتکتیک بوجود خواهد آمد که مکانی برای جوانه زنی گرافیتها محسوب می شوند، که این مسئله مترادف با ریزتر شدن گرافیتها است. این تحلیل را در نتایج آزمایشهای سرد کردن چدن خاکستری با سرعتهای زیر صفر (Cryogenic) [۹]، می توان مشاهده کرد. علاوه بر آن با سریع تر سرد شدن قطعه میزان گرافیت نوع D,E بیشتر می شود. این مسئله نیز در نتایج بخوبی دیده می شود. هر چه ضخامت پله ها کاهش می یابد میزان تحت انجماد یوتکتیک آن بیشتر شده و این نوع گرافیتها نیز بیشتر می شود. لذا از این مسئله چنین استنباط می شود که هر چه تحت انجماد یوتکتیک بیشتر شود، گرافیتهای نوع D,E بیشتر می شود. بنابراین با کاهش سرعت سرد شدن (یا میزان تحت انجماد یوتکتیک) می توان از تشکیل گرافیت نوع D,E جلوگیری نمود، اما این مسئله با درشت شدن گرافیت های نوع A همراه است، که این مشکل را می توان از طریق جوانه زایی حل کرد. با جوانه زنی مذاب اولاً میزان تحت انجماد یوتکتیک کاهش می یابد لذا امکان تشکیل گرافیت نوع D,E کاهش می یابد و از طرف دیگر با ایجاد تعداد بسیار زیادی سایت های جوانه زنی در مذاب گرافیت نوع A ریز می شود. هنگامیکه ۰/۳ درصد جوانه زنی به روش جوانه زنی در محفظه فعل و انفعال قالب اضافه کنیم (به همراه ۰/۳ درصد جوانه زنی به روش جوانه زنی در پاتیل که در همه حالت ها یکسان فرض شده است)، در مقایسه با حالت جوانه زایی نشده به روش جوانه زنی در محفظه فعل و انفعال قالب هم گرافیت با توزیع نامطلوب نوع E,D کاهش یافته و هم گرافیت با توزیع مطلوب نوع A بیشتر و اندازه آنها نیز ریزتر گردیده است.

مشاهده می‌کنیم افزودن ۰/۵ درصد وزنی جوانه‌زا منجر به درشت شدن گرافیت های نوع A می‌شود هرچند امکان تشکیل گرافیت نوع E,D کاهش می‌دهد. این مسئله بدلیل کاهش زیاد تحت انجماد یوتکتیک است که اگر از یک حدی کمتر شود گرافیت‌ها درشت‌تر خواهند شد.

با بررسی نتایج بدست آمده در مورد تاثیر نوع قالب بر ساختار علاوه بر آنکه انتظار می‌رود قالب سرامیکی سطحی با کیفیت بسیار بالا ایجاد کند [۳]، بدلیل ضریب انتقال حرارت کم، شیب حرارتی را کند می‌نماید و انجماد را به تاخیر می‌اندازد و فرصت برای جوانه‌زنی و رشد گرافیت را افزایش می‌دهد.

با بررسی ریزساختار قطعات ریخته‌گری شده و مقایسه نتایج به این نتیجه رسیدیم که چدن هایپریوتکتیک جوانه‌زایی شده ۰/۳٪ فروسیلیس ۷۵٪ کلسیم آلومینیم‌دار درون محفظه فعل و انفعال قالب به همراه ۰/۳٪ جوانه‌زای سوپرسید درون پاتیل، در شرایط کمترین دمای بارریزی (یعنی ۱۳۵۰ درجه) و در قالب مرکب از سرامیک در ضخامت های بالا، مطلوب‌ترین ریزساختار را دارد، زیرا حتی در ضخامتهای کم گرافیت با توزیع مطلوب نوع A با اندازه ریز مشاهده شد و میزان فاز کاربید و گرافیت با توزیع نوع D,E حتی در ضخامتهای کم نسبت به چدنهای دیگر کمتر بود.

ضعیف‌ترین نتایج نیز مربوط به چدن هیپویوتکتیک جوانه‌زنی شده فقط با ۰/۳٪ سوپرسید به روش جوانه‌زنی در پاتیل با بالاترین دمای بارریزی (یعنی ۱۴۵۰ درجه) در قالب ماسه‌ای در ضخامتهای کمتر بود که کمترین میزان گرافیت نوع A و بیشترین گرافیت نوع D,E با ابعاد ریز و میزان کاربید بالا را داشت که ناشی از عدم حضور شرایط مختلف کنترل کننده گرافیت‌زایی در سرعت‌های سرد شدن بالاتر از حد بحرانی است که باعث بدست آمدن قطعه‌ای با سختی زیاد و فاقد قابلیت ماشینکاری می‌گردد که بطور کلی کاربردش را محدود و در مواردی فاقد کارایی خواهد کرد.

شکل ۴ و جدول ۳ نشان می‌دهد که مطلوب‌ترین حالت ریزساختاری با بیشترین مقدار گرافیت نوع A و کمینه‌ترین گرافیت نوع D,E و کاربید را در شرایط کمترین دمای بارریزی، درصد کربن معادل بالا، ضخامت قطعه زیاد و میزان جوانه‌زای بیشتر و حالت استفاده از قطعات سرامیکی در قالب داشتیم.

##### ۵- نتیجه‌گیری

برای افزایش میزان گرافیت‌زایی چدنهای غیرآلیاژی در سرعت‌های سرد کردن بالا (یا ضخامتهای کم) می‌توان با کنترل متغیرهای زیر به ساختار مطلوب دست یافت:

- ۱- افزایش ضخامت تا ۲۰ میلیمتر
- ۲- انتخاب قالب با ضریب انتقال حرارت کم‌تر (نظیر قالب سرامیکی)
- ۳- افزایش درصد کربن معادل (حدود  $CE=4/37\%$ )

۴- کاهش دمای بارریزی (تقریباً تا ۱۳۵۰ درجه سانتی‌گراد) و

۵- افزایش مقدار ماده جوانه‌زا (نظیر ۰/۵ درصد فروسیلیسیم ۷۵٪ کلسیم و آلومینیم‌دار به روش جوانه‌زنی در محفظه فعل و انفعال به همراه ۰/۳ درصد وزنی سوپر سید در پاتیل).

#### ۶- تشکر و قدردانی

از مجموعه شرکت تولیدی و صنعتی چدن خراسان و کارگاه ریخته‌گری دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد و جهاد دانشگاهی مشهد و نیز جناب آقای دکتر باباخانی و جناب آقای تیماچی و تمام کسانی که به نحوی در به ثمر رسیدن این پروژه مشارکت داشته اند تشکر می شود.

#### ۷- مراجع

1. E. Fra , M. Gorny, W. Kapturkiewicz and H. Lopez,” Chilling Tendency and Chill of Cast Iron”, TSINGHUA SCIENCE AND TECHNOLOGY, ISSN 1007-0214 11/20, Volume 13, Number 2, April 2008, 177-183.
2. Metals HandBook, Properties and Selection, Irons And Steels, 1987, American Society for Metals, 9<sup>th</sup> ed., Vol.1.
3. Warden,T,jerry;Mikelonis ,pauls.,et al., Iron Casting Handbook, 1981, Iron Casting Society, Inc. , chapter 1-5.
4. H.D.Merchant, Solidification of Cast Iron, 1968, Gordon and Breach Publishers New York.
5. I. Riposan, M. Chisamera, S. Stan and T. Skaland, “A New Approach to Graphite Nucleation Mechanism in Gray Iron”, Proceedings of the AFS Cast Iron Inoculation Conference, September 29-30, Schaumburg, Illinois, 2005, 31-41.
6. P.J.Bilek, J.M. Domg and T.K. McCluhn, “The Role of Ca and Al in inoculation of Grey Iron,” AFS Transactions, Vol 80, 1972, 183-188.
7. ASTM HandBook, Vol.1, 160-167.
8. M. Chisamera, I. Riposan, S. Stan, C.B. Albu, C. Brezeanu and R. Naro,”High Potency Late Inoculation of Grey Cast Iron,” Advanced Materials Research Vol. 23, 2007, 303-306.
9. J. Hemanth, “Effect of Sub-zero (cryogenic) and Water Cool Chilling on Solidification and Mechanical Behavior of Casy Iron” , Material Science and Engineering A318, 2001, 244-253.

## Increasing the Amount of Graphitization of Non-alloy Cast Irons at High Cooling Rates

A.R.Kiani-Rashid<sup>1</sup>, S. Kolahgar Azari<sup>2</sup>, K. Edalati<sup>2</sup>

### Abstract

Graphitization in cast irons has been investigated from different viewpoints in last decades. Factors such as chemical composition, cooling rate, part's thickness, moulding materials, pouring and nucleation temperature have been studied by researchers. Present research is focused on the production of grey cast irons or in other words producing non-cooled cast irons in rates higher than critical limits. In this respect it is attempted to obtain such structures by changing nucleus factors, carbon percent, pouring temperature and using a new method for die making and solidification. Naturally producing such cast irons with proper quality in shorter periods is possible and will make economically a sensible added value. This process is important because the formation of graphite in cast irons can make machining operation easier and increase the workability of cast irons. For this reason in present research these factors are studied according to different circumstances of solidification.

**Keywords:** Graphitization, solidification, cooling rate, micro-structure

- 
- 1) Assistant of Prof., Ferdowsi Univ. of Mashhad, Mashhad, Dept. of Materials, [kianirashid@gmail.com](mailto:kianirashid@gmail.com) or [fkiana@yahoo.com](mailto:fkiana@yahoo.com)
- 2) Student, Ferdowsi Univ. of Mashhad, Mashhad, Dept. of Materials.