



مروری بر عوامل موثر بر عملکرد جوانه زا در چدن

کاوه افتخارنیا

دانش آموخته دانشگاه فردوسی مشهد، مسئول آزمایشگاه متالورژی گروه صنایع گازار

مهدی حسنزاده

دانش آموخته دانشگاه نیشابور، مدیر کنترل و تضمین کیفیت گروه صنایع گازار

محمدرضا بوکانی

دانش آموخته دانشگاه شاهرود مدیر فنی آزمایشگاه هیدرولیک گروه صنایع پمپ سازی گازار

چکیده

استفاده از جوانه‌زا بخش مهمی از ریخته‌گری انواع چدن است که تاثیر بسزایی در ریزساختار متالورژیکی و خواص نهایی آن دارد. در این پژوهش مروری مجموعه‌ای از پژوهش‌ها که با تمرکز بر عوامل موثر بر عملکرد جوانه‌زا انجام شده بود گردآوری و بر مبنای آن‌ها مهم‌ترین عوامل موثر بر عملکرد جوانه‌زا دسته بندی و بررسی شد. بر اساس پژوهش‌های انجام شده ترکیب شیمیایی ذوب، ترکیب شیمیایی جوانه‌زا، پیچیدگی‌های هندسی قطعه و عوامل تکنیکی در افزودن جوانه‌زا بر عملکرد جوانه‌زا و به تبع آن خواص قطعه ریخته‌گری موثر است. بر اساس نتایج بدست آمده از پژوهش‌های مختلف تغییر ترکیب شیمیایی جوانه‌زا و افزودن عناصر آلومینیوم، کلسیوم، باریوم، استرانسیوم، زیرکونیوم و عناصر نادر خاکی به فروسیلیس باعث بهبود جوانه‌زایی در شرایط مختلف ریخته‌گری شده است. همچنین با تغییر ترکیب شیمیایی ذوب و بخصوص تنظیم درست میزان عناصر منگنز و گوگرد در ذوب امکان بهبود عملکرد جوانه‌زا فراهم می‌آید. در زمینه عوامل تکنیکی با استناد به پژوهش‌ها نشان داده شد به تاخیر انداختن افزودن جوانه‌زا در فرآیندهای جوانه‌زایی در قالب و جوانه‌زا پاششی می‌تواند باعث بهبود خواص قطعه ریخته‌گری بشود.

واژگان کلیدی: ریخته‌گری، چدن، جوانه‌زا



مقدمه

استفاده از جواهرها به جزء جدایی ناپذیری از فرآیند ریخته‌گری انواع چدن‌ها تبدیل شده است. عوامل مختلف تکنیکی، شیمیایی و پیچیدگی‌های هندسی قطعه ریخته‌گری در عملکرد جواهرها موثر است از این رو برای اطمینان از عملکرد صحیح جواهرها و بدست آوردن یک قطعه ریخته‌گری با خواص مطلوب نیاز است تا جمع این عوامل در نظر گرفته شود. به این دلیل در این پژوهش مروری به بررسی مجموعه مطالعاتی که در زمینه عملکرد جواهرها در شرایط مختلف و با تغییر متغیرهای مختلف انجام شده است پرداخته شده تا دید کاملی از عوامل موثر بر عملکرد جواهرها بدست آید.

بررسی اثر ترکیب شیمیایی جواهرها بر خواص قطعه ریخته‌گری

انواع مختلف جواهرها شامل انواع جواهرها بر پایه فروسیلیس، کاربید سیلیسیوم و گرافیت کریستالی در ریخته‌گری چدن کاربرد دارد. تغییر نوع و یا ترکیب شیمیایی جواهرها در ریز ساختار قطعه ریخته‌گری، خواص مکانیکی و خواص ماشین کاری آن موثر است (Borse and Mangulkar 2014).

جواهرها بر پایه فروسیلیس پرکاربردترین نوع جواهرها در ریخته‌گری چدن است. اگرچه فروسیلیس به عنوان ماده اصلی سازنده جواهرها شناخته می‌شود، فروسیلیس به شکل خالص اثر جواهرزایی مطلوبی نداشته و به این دلیل فروسیلیس به همراه مقادیر کمی از عناصر دیگر مانند باریوم، استرانسیوم، زیرکونیوم، کلسیم و عناصر نادر خاکی مورد استفاده قرار می‌گیرد (W.Maschke and M.Jonuleit 2016). هریک از عناصر فوق اثر متفاوتی بر فرآیند جواهرزایی دارد و انتخاب جواهرها بر اساس مسائل فنی تولید مانند زمان نگهداری جواهرها در ذوب، دمای بارریزی و پیچیدگی‌های هندسی قطعه انجام می‌شود (Riposan et al. 2009) و (Borse and Mangulkar 2014).

دارد در جدول 1 ترکیب شیمیایی جواهرهای بر پایه فروسیلیس آورده شده است و در جدول 2 اثر عناصر مختلف بر عملکرد جواهرها دیده می‌شود.

جدول 1 ترکیب شیمیایی تقریبی برای جواهرها بر پایه فروسیلیس (Pearce et al. 2008) و (Soiński et al. 2011)

جواهرها	%Si	%Al	%Ba	%Ca	%Mn	%RE	%Sr	%Zr
FeSi-Sr	75	0	0	0	0	0	0/5	0
FeSi-Ba1	75	1	1	1	0	0	0	0
FeSi-Ba2	75	1	2/5	1/5	0	0	0	0
FeSi-Zr	75	1/2	0	2	0	0	0	1/5
FeSi-Mn-Zr-Ba	65	1/2	0/8	1/2	4/5	0	0	4/5
FeSi-RE	75	1	0	0/8	0	2	0	0
FeSi-Sr-RE	75	<0/5	0	<0/1	0	2	0/8	0
FeSi-Zr-Sr	75	<0/5	0	<0/1	0	0	0/8	1/2



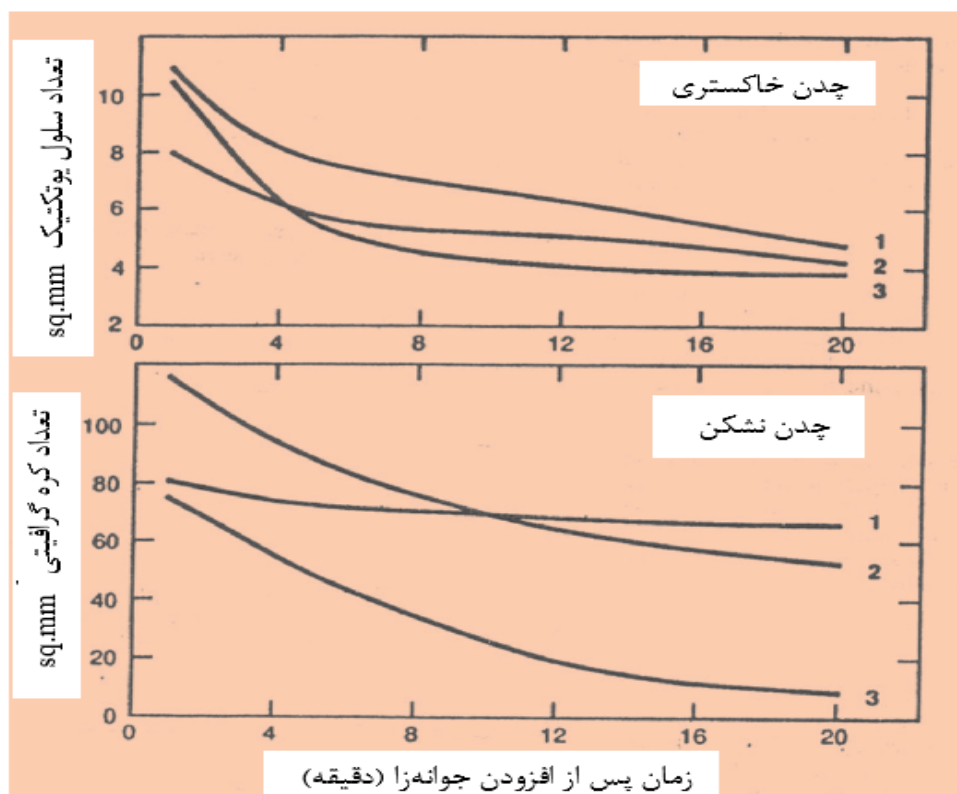
جدول 2 اثر عناصر افزوده شده به فروسیلیس در عملکرد آن به عنوان جوانه‌زا (Borse and Mangulkar 2014).

عناصر افزوده شده	اثرات
Zr	زمان میرایی بالا
Ba	جلوگیری از تشکیل ترکیبات تحت تبرید ¹ ، زمان میرایی بالا
Ce	مناسب برای جوانه‌زایی در چدن با گوگرد کم
Bi	مناسب برای قطعات با دیواره نازک
Sr	جلوگیری از تشکیل ترکیبات تحت تبرید، کاهش انقباض نامتقارن

همانگونه که در جدول 2 دیده می‌شود افزودن هر یک از عناصر به جوانه‌زا می‌تواند اثر متفاوتی بر جوانه‌زایی داشته باشد و از این رو برای بدست آوردن قطعه ریخته‌گری با کمترین میزان عیوب توجه به ترکیب شیمیایی جوانه‌زا ضروری است. در انتخاب جوانه‌زا باید توجه شود که اثر جوانه‌زا با گذشت زمان کاهش می‌یابد و زمانی که اثر جوانه‌زا از بین می‌رود زمان میرایی نامیده می‌شود. در صورتی که فاصله زمانی افزودن جوانه‌زا و بارریزی زیاد باشد باید از جوانه‌زا با زمان میرایی بالا استفاده شود. به شکل کلی وجود باریوم و استرانسیوم در جوانه‌زا باعث ایجاد تعداد بیشتری از مراکز جوانه زنی در ذوب می‌شوند و به این دلیل زمان میرایی بالاتری دارند (Patel et al. 2016). در شکل 1 اثر تغییر نوع جوانه‌زا بر جوانه‌زایی با گذشت زمان در چدن‌های خاکستری و نشکن دیده می‌شود. همانگونه که در شکل 1 دیده می‌شود در فاصله زمانی کوتاهی پس از افزودن جوانه‌زا بیشینه اثر جوانه‌زایی وجود دارد و با گذشت زمان این اثر کاهش می‌یابد که البته جوانه‌زا حاوی باریوم و استرانسیوم زمان بیشتری توان جوانه‌زایی خود را حفظ می‌کنند (Pearce et al. 2008).

در پژوهشی که به مقایسه جوانه‌زایی در چدن هیپویوتکتیک به وسیله سه جوانه‌زا بر پایه فروسیلیس که حاوی استرانسیوم، باریوم و کلسیوم بودند پرداخته شد. در این پژوهش میزان، نوع و توزیع گرافیت و همچنین فازهای تحت تبرید ایجاد شده در ساختار مورد بررسی قرار گرفت و بر اساس نتایج بدست آمده این پژوهش جوانه‌زا حاوی استرانسیوم بهترین عملکرد را داشت و پس از آن کلسیوم و باریوم در جایگاه بعدی قرار گرفتند. همچنین مشخص شد که با افزایش سرعت سرمایش تفاوت بین عملکرد جوانه‌زا حاوی استرانسیوم با دو جوانه‌زا دیگر افزایش می‌یابد (Riposan et al. 2007). وجود عناصر نادر خاکی در جوانه‌زا باعث بهبود جوانه‌زایی بخصوص در شرایطی که میزان گوگرد در ترکیب شیمیایی چدن کم است می‌شود همچنین نتایج پژوهشی که به بررسی تاثیر استفاده از جوانه‌زا حاوی عناصر نادر خاکی در ریخته‌گری چدن نشکن پرداخت نشان داد که حضور عناصر نادر خاکی در جوانه‌زا باعث افزایش تعداد و بهبود توزیع کره‌های گرافیتی می‌شود (Ferro et al. 2013).

¹ منظور از ترکیبات تحت تبریدی Chill و یا ترکیبات کاربید آهن است که در ساختار بجای گرافیت تشکیل شده است.



شکل 1 اثر گذشت زمان بر توان جوانه‌زایی 1-جوانه‌زا فروسیلیس حاوی Ba و Ca 2-جوانه‌زا فروسیلیس حاوی استرانسیوم 3-فروسیلیس معمول استفاده شده در ریخته‌گری (Pearce et al. 2008)



اثر تغییر ترکیب شیمیایی ذوب بر عملکرد جواهرها

مواردی مثل کربن معادل، میزان گوگرد و منگنز، و عناصر آلیاژی که خواسته و یا ناخواسته وارد ذوب چدن شده‌اند در عملکرد جواهرها و خواص قطعه ریخته‌گری موثر است و از این رو انتخاب صحیح و کنترل دقیق مواد اولیه تاثیر مهمی در جواهرزایی و خواص قطعه ریخته‌گری دارد (Dwulat 2023). با افزایش میزان کربن و سیلیس در ذوب و در پی آن افزایش کربن معادل عملکرد جواهرها موثر تر خواهد بود و در نتیجه آن گرافیت‌زایی بهبود پیدا کرده و احتمال تشکیل کاربید آهن و حفره انقباضی در قطعه ریخته‌گری کاهش می‌یابد (Sangame and Reddy 2023).

میزان گوگرد موجود در ذوب تاثیر مهمی در جواهرزایی چدن دارد به شکل کلی گوگرد جواهرزایی را تسهیل می‌کند از این رو در صورت کمتر بودن میزان گوگرد نیاز به استفاده از مقدار بیشتری جواهرها و یا نوع مرغوب‌تری از جواهرها است (I Riposan 2016). در پژوهش‌های مختلفی به بررسی سازوکار اثر گوگرد در جواهرزایی پرداخته شده است. مهمترین اثر گوگرد کمک به تشکیل ترکیبات سولفیدی است که به عنوان محل جواهر زنی گرافیت در مذاب عمل می‌کنند. این ترکیبات سولفیدهای متشکل از منگنز و عناصر دیگر با فرمول شیمیایی $(Mn, X)S$ است (که در آن X می‌تواند آهن، آلومینیوم، اکسیژن، سیلیس، کلسیم و استرانسیوم باشد) (Riposan et al. 2017).

با توجه به نقش گوگرد در جواهرزایی پژوهش‌های مختلفی با تمرکز بر نقش گوگرد و همچنین اثر افزودن ترکیبات حاوی اکسیژن و گوگرد به منظور بهبود جواهرزایی انجام شده است. در پژوهشی ریخته‌گری یک چدن خاکستری هیپو یوتکتیک با کربن معادل حدود 3/7 درصد به وسیله جواهرها حاوی کلسیم و باریم یکبار به همراه یک ترکیب تقویت کننده حاوی گوگرد و یکبار بدون افزودنی گوگردی انجام شد (ترکیب شیمیایی مطابق جدول 3) و تاثیر افزودنی گوگردی بر جواهرزایی و تشکیل ترکیبات تحت تبریدی² به وسیله تست گوه بر اساس استاندارد ASTM A367 سنجیده شد. بر اساس نتایج این پژوهش در حالتی که افزودنی حاوی گوگرد و اکسیژن به همراه جواهرها استفاده شده است جواهرزایی بهبود و میزان ترکیبات فوق تبریدی کاهش پیدا کرد (Ion-cuza and Ciprian 2015). در پژوهشی دیگر به بررسی اثر گوگرد بر ماشین‌کاری چدن خاکستری پرداخته شد. بر اساس نتایج آن در صورتی که عنصر منگنز به مقدار کافی در چدن وجود داشته باشد افزایش درصد گوگرد باعث تغییر در خواص مکانیکی چدن نشده ولی باعث تشکیل فاز MnS در زمینه می‌شود و وجود این فاز باعث بهبود عمر ابزار تراش در سرعت‌های تراشکاری بالا می‌شود (Diniz 2015).

جدول 3 ترکیب شیمیایی جواهرها و افزودنی گوگردی (Ion-cuza and Ciprian 2015).

%S	%O	%Al	%Ba	%Ca	%Si	آلیاژ
-	-	0/96	1/68	0/94	72/6	FeSi-Ba,Ca
21/17	7/49	17/48	-	5/24	12/24	افزودنی تقویت کننده گوگرد و اکسیژن

بررسی مسائل تکنیکی در افزودن جواهرها به چدن

علاوه بر نوع جواهرها و ترکیب شیمیایی ذوب مسائل تکنیکی در هنگام افزودن جواهرها در خواص نهایی چدن تاثیر بسزایی دارد. راه‌های مختلف افزودن جواهرها به چدن شامل پیش جواهرزایی³ یا پیش آماده سازی⁴، جواهرزایی در پاتیل، افزودن جواهرها

² منظور از ترکیبات تحت تبریدی Chill و یا ترکیبات کاربید آهن است که در ساختار بجای گرافیت تشکیل شده است.

³ Pre-inoculation

⁴ Pre-conditioning



به جریان مذاب، استفاده از سیم مخصوص جوانه‌زایی و جوانه‌زایی در قالب است (Maschke and Jonuleit 2016).

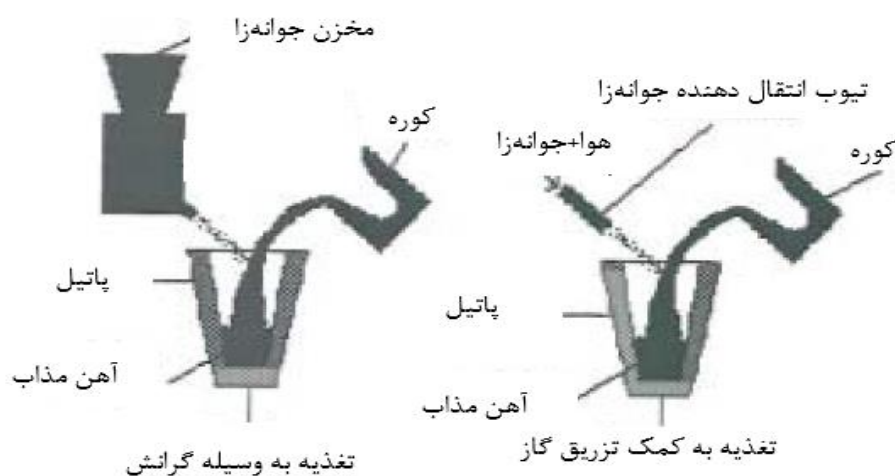
پیش آماده‌سازی

پیش آماده سازی عبارت از افزودن مواد جوانه‌زا به کوره‌ی عاری از سرپاره و آلودگی است که به لحاظ زمانی پیش از فرآیند نشکن‌سازی و انتقال مواد به پاتیل و انجام می‌شود. مواد استفاده شده در فرآیند پیش آماده‌سازی شامل گرافیت کریستالی، کاربید سیلیسیوم و فروسیلیس است. در انتخاب ابعاد این مواد باید دقت شود تا از حل شدن مناسب آن‌ها در ذوب اطمینان حاصل شود. میزان مواد استفاده شده در حدود 0/1 درصد وزنی ذوب است (Borse and Mangulkar 2014).

در پژوهشی به بررسی اثر فرآیند پیش آماده سازی با استفاده از کاربید سیلیسیوم و فروسیلیس پرداخته شد. در این پژوهش نیمی از فروسیلیس به مرور به کوره اضافه شد و نصفه دیگر 10 دقیقه قبل از باریزی به کوره اضافه شد. نتایج این پژوهش نشان داد که افزودن کاربید سیلیسیوم به کوره باعث بهبود خواص مکانیکی، تشکیل گرافیت نوع A در چدن خاکستری و جلوگیری از تشکیل ترکیبات تبریدی می‌شود (Edalati and Akhlaghi 2005). در پژوهشی دیگر به اثر پیش آماده سازی با استفاده از فروسیلیس و کاربید سیلیسیوم که 3 دقیقه قبل از بار ریزی به کوره افزوده شده بود بر خواص چدن نشکن در قطعات دیواره نازک پرداخته شد. بر اساس نتایج این پژوهش پیش آماده‌سازی باعث توزیع یکنواخت‌تر کره‌های گرافیتی در ساختار و همچنین جلوگیری از تشکیل ترکیبات تحت تبریدی می‌شود. همچنین خواص مکانیکی نمونه‌های پیش آماده سازی شده با کاربید سیلیسیوم و فروسیلیس تفاوت چندانی نداشته ولی به لحاظ آماری توزیع نرمال خواص در هنگام استفاده از کاربید سیلیسیوم کاهش یافت که به معنای یکدست‌تر بودن خواص قطعات در هنگام استفاده از کاربید سیلیسیوم به عنوان پیش آماده ساز است (Juretzko et al. 2004).

جوانه‌زایی در پاتیل

جوانه‌زایی در پاتیل مهم‌ترین روش جوانه‌زایی است که در آن جوانه‌زا در هنگام انتقال ذوب به پاتیل و معمولاً پس از نشکن سازی (افزودن منیزیوم به ذوب) به آن اضافه می‌شود. دانه بندی جوانه‌زا بسته به میزان ذوب موجود در پاتیل و زمان باریزی تعیین می‌شود و معمولاً در گستره 0/6 تا 6 میلی‌متر است. در این روش باید از ریختن جوانه‌زا به کف پاتیل اجتناب شود و جوانه‌زا به تدریج در حین انتقال ذوب به پاتیل به آن افزوده شود (Borse and Mangulkar 2014). به منظور افزودن جوانه‌زا به پاتیل می‌توان از ابزار عادی و روش ثقیلی و یا تزریق به وسیله گاز استفاده کرد که شماتیک این روش‌ها در شکل 2 دیده می‌شود (Harvey et al. 2007).



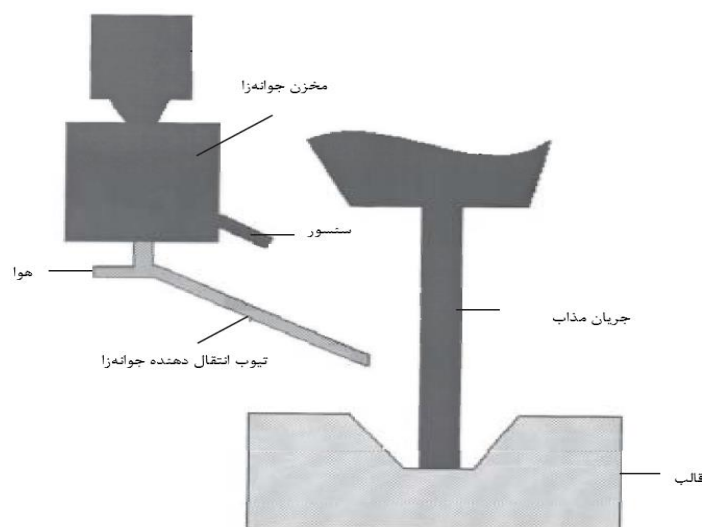
شکل 2 شماتیک روش افزودن جوانه‌زا به پاتیل

افزودن جوانه‌زا به جریان مذاب (جوانه‌زا پاششی)

در این روش جوانه‌زا در حین انتقال ذوب به قالب بر روی جریان مذاب پاشیده می‌شود. با استفاده از این روش اثر منفی حاصل از میرایی جوانه‌زا به حداقل می‌رسد. باید از ریز بودن ابعاد جوانه‌زا اطمینان حاصل گردد تا پس از انجام ذوب جوانه‌زا حل نشده در قطعه ریخته‌گری باقی نماند (Borse and Mangulkar 2014). به منظور اطمینان از حل شدن کامل جوانه‌زا در جریان مذاب ابعاد جوانه‌زا باید در محدوده 0/2 تا 0/7 میلی‌متر باشد و میزان آن نباید از 0/15 درصد وزنی ذوب منتقل شده به قالب بیشتر باشد. به منظور کنترل دقیق فرآیند می‌توان از ابزار اتومات پاشش جوانه به جریان مذاب که شماتیک آن در شکل 3 آورده شده است استفاده کرد (Maschke and Jonuleit 2016).



در پژوهشی به اثر فرآیند جوانه‌زایی پاششی در ریخته‌گری چدن نشکن هیپو یوتکتیک پرداخته شد و خواص قطعه در حالتی که فقط از جوانه‌زایی در پاتیل استفاده شده با خواص آن در هنگامی که جوانه‌زا پاششی نیز اضافه شده بود مقایسه شد. بر اساس نتایج این پژوهش استفاده از جوانه‌زا پاششی باعث افزایش تعداد و بهبود توزیع کره‌های گرافیتی و همچنین کاهش حفره‌های انقباضی در ساختار نسبت به حالتی که تنها از جوانه‌زایی در پاتیل استفاده شده است می‌شود. بهترین نتایج این پژوهش در حالتی بدست آمد که همزمان از جوانه‌زایی در پاتیل و جوانه‌زایی پاششی استفاده شد. همچنین نتایج نشان داد که استفاده از جوانه‌زای پاششی فروسیلیسی که حاوی باریم و سربیم (به عنوان عنصر نادر خاکی) است می‌تواند در مواردی نیاز به جوانه‌زایی در پاتیل را حذف کند (Soivio and Elmquist 2013).

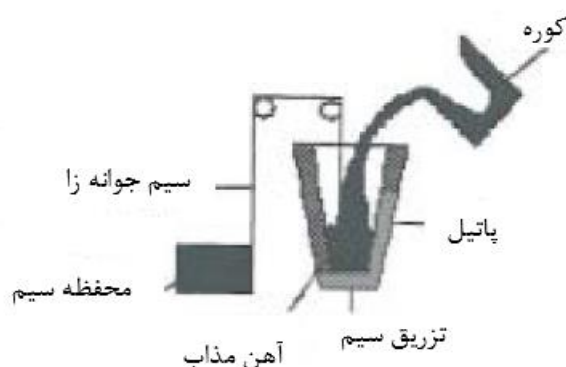


شکل 3 شماتیک روش افزودن جوانه‌زا به شکل پاشش بر روی جریان مذاب

استفاده از سیم مخصوص جوانه‌زایی

در این روش از یک سیم مخصوص که هسته آن حاوی جوانه‌زای گرانوله با ابعاد مشخص است استفاده می‌شود. در این روش سیم حاوی جوانه‌زا به وسیله یک ماشین به درون پاتیل، تاندیش و یا جریان ذوب در حال انتقال به قالب رانده می‌شود. در این روش به وسیله کنترل قطر سیم و سرعت تزریق سیم به ذوب می‌توان میزان جوانه‌زای افزوده شده را کنترل کرد. مزیت اصلی این روش کنترل دقیق بر مقدار جوانه‌زای افزوده شده است (Maschke and Jonuleit 2016). در شکل 4 شماتیک این روش نشان داده شده است. استفاده از سیم جوانه‌زا بخصوص در تولید چدن‌ها با گرافیت فشرده (CGI) و چدن نشکن که در آن‌ها کنترل دقیق میزان منیزیم مهم است اهمیت دارد. برای تولید چدن نشکن منیزیم باید در حدود 0/04 درصد و برای تولید چدن با گرافیت فشرده منیزیم د محدوده 0/015 تا 0/02 درصد است (Engineering 2012).

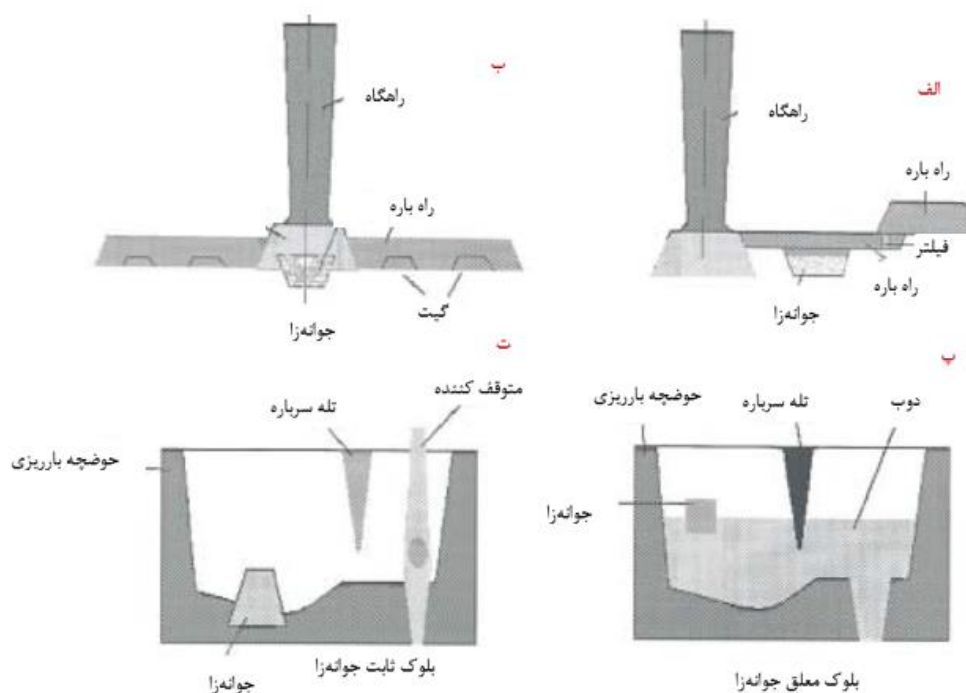
پژوهش‌های مختلفی به بررسی عملکرد سیم‌های مخصوص جوانه‌زایی و پارامترهای موثر بر آن در شرایط صنعتی پرداختند. در پژوهشی از سیم‌های جوانه‌زا حاوی فروسیلیس و منیزیم برای تولید چدن با گرافیت فشرده گرمی شکل استفاده شد و نشان داده شد می‌توان با کنترل سرعت تزریق سیم حاوی جوانه‌زا به درون مذاب می‌توان بر محدودیت‌های تکنیکی در تولید چدن با گرافیت فشرده غلبه کرد (Guzik 2010).



شکل 4 شماتیک روش افزودن جوانه‌زا به وسیله سیم

جوانه‌زایی در قالب

در این روش جوانه‌زا مستقیم در داخل قالب قرار گرفته و مذاب پس از ورود به قالب با جوانه‌زا ترکیب می‌شود و به این دلیل اثرات حاصل از میرایی جوانه‌زا در این روش به حداقل می‌رسد و همچنین اثر مخرب عناصری مثل کروم، وانادیوم، تیتانیوم و مولیبدن که ناخواسته وارد ذوب شده‌اند و به ایجاد ترکیبات تحت تبریدی کمک می‌کنند به حداقل می‌رسد. میزان موثر بودن این روش به نوع جوانه‌زا به کار رفته، دمای بارریزی و نوع سیستم راهگامی و محل قرار گیری جوانه‌زا در سیستم راهگامی بستگی دارد (Fesenko et al. 2020). در این روش به دلیل کوتاهی زمان ارتباط جوانه‌زا با ذوب احتمال عدم حل شدن جوانه‌زا در ذوب و باقیماندن ذرات حل نشده در ساختار نهایی قطعه وجود دارد از این رو چگونگی قرارگیری جوانه‌زا در قالب اهمیت بسزایی دارد (Maschke and Jonuleit 2016). برای جلوگیری از باقیماندن ذرات حل نشده جوانه‌زا در قطعه نهایی باید به محل قرار گیری جوانه‌زا در سیستم راهگامی و استفاده از فیلتر در سیستم راهگامی توجه و در صورت امکان از بلوک‌های پیش آماده جوانه‌زا استفاده نمود. در شکل 5 شماتیک تعدادی از سیستم‌های مورد استفاده در روش جوانه‌زایی در قالب دیده می‌شود (Harvey et al. 2007).



شکل 5 شماتیک روش جوانه‌زایی در قالب الف: جوانه‌زا در فرورفتگی راه باره ب: جوانه‌زا در حوضچه زیر راهگاه پ: جوانه‌زا در بلوک ثابت ت: جوانه‌زا به شکل بلوک معلق

در پژوهشی به بررسی اثر جوانه‌زایی در قالب بر خواص مکانیکی و خستگی در ریخته‌گری مقاطع سنگین چدن نشکن هیپو یوتکتیک پرداخته شد. در این پژوهش عمل نشکن‌سازی به وسیله فرو سلیکو منیزیم در پاتیل انجام و پس از آن بار به قالب که در آن به میزان 0/1 تا 0/15 درصد وزنی ذوب جوانه‌زا فروسیلیسی حاوی آلومینیوم، کلسیم و عناصر نادر خاکی قرار داده



شده بود منتقل شد. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از جواره‌زا در قالب باعث جواره‌زایی و توزیع یکنواخت گرافیت‌ها در زمینه و در پی آن کاهش حفره‌های انقباضی شد. کاهش حفره‌های انقباضی که به عنوان محل جواره‌زنی ترک‌های خستگی عمل می‌کند باعث بهبود عمر خستگی قطعات شد (Borsato et al. 2017).

در پژوهش دیگری به بررسی تغییر نوع و دانه‌بندی جواره‌زای داخل قالب بر خواص چدن نشکن پرداخته شد و نتایج آن نشان داد که ابعاد بهینه جواره‌زا در محدوده 2/5 تا 7/5 میلی‌متر است و همچنین آلیاژ نیکل منیزیم (با 15 درصد منیزیم) بهترین جواره‌زا جهت استفاده در قالب به منظور نشکن سازی است و پس از آن فرو سیلیکو منگنز و مخلوط فروسیلیس و منیزیم خالص در رتبه بعدی قرار دارند (Fesenko et al. 2020).



بحث و نتیجه‌گیری

در مقالات مروری دیگری به بررسی تاثیر عوامل مختلف در عملکرد جواهرها پرداخته شده بود (Modi 2021)، (Borse and Mangulkar 2014) و (Pearce et al. 2008). تفاوت این پژوهش با پژوهش‌های پیشین در بررسی همزمان سه عامل ترکیب شیمیایی جواهرها، ترکیب شیمیایی ذوب و نکات تکنیکی بر جواهرزایی در چدن بود. همچنین در این پژوهش تنها به بیان عوامل موثر بر عملکرد جواهرها پرداخته نشد و برای روشن‌تر شدن موضوع تعدادی از پژوهش‌های عملی انجام شده بر روی عوامل تاثیر گذار در عملکرد چدن بررسی شد.

بر اساس بررسی‌های انجام شده نشان داده شد که جواهرزایی چدن در ریزساختار قطعه، خواص مکانیکی و جلوگیری از بروز برخی عیوب ریخته‌گری مانند حفره‌های انقباضی موثر است. همچنین برای اطمینان از عملکرد مناسب جواهرها باید مشخصات هندسی قطعه ریخته‌گری، ترکیب شیمیایی ذوب، ترکیب شیمیایی جواهرها و نکات تکنیکی در افزودن جواهرها به شکل همزمان در نظر گرفته شود. در ادامه خلاصه‌ای از مهمترین نکات موثر در عملکرد جواهرها بیان شده است.

در زمینه ترکیب شیمیایی ذوب:

- با افزایش درصد کربن و سیلیس به عبارتی افزایش کربن معادل جواهرزایی بهبود پیدا می‌کند.
- افزایش درصد منگنز و گوگرد منجر به تشکیل ترکیبات سولفیدی منگنز می‌شود که این ترکیبات به عنوان محل جواهرزنی گرافیت عمل می‌کنند و از این راه جواهرزایی در چدن تسهیل می‌شود.
- وجود برخی عناصر آلیاژی مانند کروم و مولیبدن که ناخواسته وارد ذوب شده‌اند باعث سخت‌تر شدن جواهرزایی بخصوص در مقاطع نازک قطعه می‌شود و در نهایت منجر به ایجاد ترکیبات تحت تبریدی در قطعه می‌شود.

در زمینه ترکیب شیمیایی جواهرها:

- فروسیلیس به شکل خالص اثر مطلوبی به عنوان جواهرها نداشته و به منظور بهبود عملکرد باید با عناصر دیگر همراه شود.
- برای بهبود عملکرد جواهرها پایه فروسیلیس عناصری مانند آلومینیوم و کلسیوم که میل شدیدی به واکنش با اکسیژن دارند به آن افزوده می‌شود.
- عناصر دیگر بسته به ضرورت‌های عملکردی به جواهرزای پایه فروسیلیس اضافه می‌شوند در این زمینه زیرکونیوم با زمان میرایی بالا برای ذوب ریزی با زمان طولانی و یا قطعات ضخیم، عناصر نادر خاکی در شرایطی که میزان گوگرد ذوب کم است، باریم و استرانسیوم برای جواهرزایی یکنواخت در قطعات با قسمت‌های نازک و ضخیم استفاده می‌شوند.
- گرافیت در صورتی که ساختار کریستالی داشته باشد می‌تواند به عنوان محل جواهرزنی گرافیت عمل کرده و نقش جواهرزایی در چدن داشته باشد.



- کاربید سیلیسیوم به عنوان جوانه‌زا می‌تواند تاثیر مثبتی بر جوانه‌زایی در چدن داشته باشد ولی در استفاده از آن باید به نقطه ذوب بالای آن و نیاز به حل شدن آن در ذوب توجه شود.
در زمینه نکات تکنیکی افزودن جوانه‌زا:
- پیش آماده‌سازی با افزودن مقداری از مواد به کوره در فاصله کوتاهی قبل از انتقال ذوب به پاتیل انجام می‌شود و می‌تواند منجر به بهبود در جوانه‌زایی شود.
- زمان افزودن جوانه‌زا، دانه بندی جوانه‌زا و ابزار افزودن جوانه‌زا تاثیر بسزایی در عملکرد آن دارد.
- در روش‌های جوانه‌زایی پاششی و جوانه‌زایی در قالب با به تاخیر انداختن زمان افزودن جوانه‌زا به ذوب میزان میرایی جوانه‌زا به حداقل و عملکرد آن بهبود می‌یابد. در این روش‌ها احتمال حل نشدن کامل جوانه‌زا و به تبع آن ایجاد عیوب وجود دارد از این‌رو کنترل دقیق ابعاد جوانه‌زا و تعبیه فیلتر و آشغال‌گیر در راهبارة ضرورت دارد.
در زمینه مشخصات هندسی قطعه:
- مقاطع نازک سرعت سرد شدن بالایی دارند و مستعد به تشکیل ترکیبات تحت تبریدی هستند. تغییر نوع جوانه‌زا، استفاده از جوانه‌زا پاششی، جوانه‌زایی در قالب و جلوگیری از ورود ناخواسته عناصری مثل کروم به ذوب در پیشگیری از این مسئله تاثیر دارد.
- در قطعات ضخیم انجماد بخش‌های میانی با تاخیر اتفاق می‌افتد و احتمال عدم جوانه‌زایی در بخش‌های میانی و در پی آن ایجاد حفره‌های انقباضی وجود دارد از این‌رو کنترل دمای بار ریزی و استفاده از جوانه‌زا با زمان میرایی بالا در این قطعات ضرورت دارد.



منابع

- Borsato, T., P. Ferro, F. Berto, and C. Carollo. 2017. "Fatigue Strength Improvement of Heavy-Section Pearlitic Ductile Iron Castings by in-Mould Inoculation Treatment." *International Journal of Fatigue*. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2017.02.012.
- Borse, Prof S. C., and Y. E. Mangulkar. 2014. "International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology Review on Grey Cast Iron Inoculation." 3(4):30–36.
- Diniz, Anselmo Eduardo. 2015. "Effect of the Gray Cast Iron Microstructure on Milling Tool Life and Cutting Force Effect of the Gray Cast Iron Microstructure on Milling Tool Life and Cutting Force." (March 2013). doi: 10.1007/s40430-013-0004-3.
- Dwulat, R. 2023. "Influence of Charge Materials on the Metallurgical Quality of Gray Cast Iron."
- Edalati, K., and F. Akhlaghi. 2005. "Influence of SiC and FeSi Addition on the Characteristics of Gray Cast Iron Melts Poured at Different Temperatures." 160:183–87. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.06.007.
- Engineering, Foundry. 2011. "Inoculation of Grey Cast Iron with Master Alloys Containing Strontium and Zirconium." 11(3):195–98.
- Engineering, Foundry. 2012. "Preparation Vermicular Graphite in Thin and Thick Wall Iron Castings." 12(2):41–44. doi: 10.2478/v10266-012-0033-x.
- Ferro, P., A. Fabrizi, R. Cervo, and C. Carollo. 2013. "Effect of Inoculant Containing Rare Earth Metals and Bismuth on Microstructure and Mechanical Properties of Heavy-Section near-Eutectic Ductile Iron Castings." *Journal of Materials Processing Technology* 213(9):1601–8. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.03.012.
- Fesenko, M. A., A. M. Fesenko, Donbas State, Engineering Academy, and Donetsk Region. 2020. "AND CARBIDE STABILIZING INOCULATION." 21(1):83–101.
- Guzik, E. 2010. "Structure and Mechanical Properties as Well as Application of High Quality Vermicular Cast Iron." 10(3):95–100.
- Harvey, J. N., G. A. Noble, and J. N. Harvey. 2007. "55th Indian Foundry Congress 2007 Inoculation of Cast Irons – An Overview Inoculation of Cast Irons – An Overview." *AFS Trans.*, 2016 (124):247–66.
- I Riposan, et al. 2016. "Demystifying the Effects of Sulphur in Cast Irons." *AFS Trans.*, 2016 (124):247–66.
- Ion-cuza, Stefan, and Firican Mihail Ciprian. 2015. "Inoculation Enhancing Effects on Chill Tendency in the Mould Inoculated Grey Cast Iron." 1128:98–104. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1128.98.
- Juretzko, Frank R., Lucas P. Dix, Roxana Ruxanda, and Doru M. Stefanescu. 2004. "Precondition of Ductile Iron Melts for Light Weight Castings - Effect on Mechanical Properties and Microstructure." 014:1–13.
- Modi, Harshit P. 2021. "A Review on Effect of Process Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Spheroidal Graphite (SG) Cast Iron." *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology* 9(2):445–48. doi: 10.22214/ijraset.2021.33128.
- Patel, Dhruv, P. K. Nanavati, and C. M. Chug. 2016. "Effect of Ca and Ba Containing Ferrosilicon Inoculants on Microstructure and Tensile Properties of IS-210, and IS-1862 Cast Irons." (January 2013).
- Pearce, John, Ceng Prof, and Micme Fim. 2008. "Inoculation of Cast Irons : Practices and Developments." (February):28–32.
- Riposan, I., M. Chisamera, S. Stan, and D. White. 2007. "Chilling Properties of Ba / Ca / Sr Inoculated Grey Cast Irons." 20(2). doi: 10.1179/136404607X239726.
- Riposan, Iulian, Mihai Chisamera, Stelian Stan, Chris Ecob, and David Wilkinson. 2009. "Role of Al, Ti, and Zr in Gray Iron Preconditioning / Inoculation." 18(February):83–87. doi: 10.1007/s11665-008-9260-2.
- Riposan, Iulian, Stelian Stan, Valentin Uta, and Ion Stefan. 2017. "Cast Iron Inoculation Enhanced by Supplementary Oxy-Sulfides Forming Elements." *Journal of Materials Engineering and Performance*. doi: 10.1007/s11665-017-2869-2.
- Sangame, Bahubali Babanrao, and Y. Prasannatha Reddy. 2023. "Investigation on Effect of Carbon Equivalent and Inoculation on the Solidification and Shrinkage Tendency of Ductile Cast Iron Using Thermal Analysis." *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures ahead-of-p(ahead-of-print)*. doi: 10.1108/MMMS-04-2023-0143.
- Soivio, K., and L. Elmquist. 2013. "Influence of Inoculation on Shrinkage Defects in Spheroidal Graphite Cast Iron." 26(4). doi: 10.1179/1743133613Y.0000000057.
- W.Maschke and M.Jonuleit. 2016. "Inoculation of Cast Iron Inoculation of Cast Iron."

**Kaveh Eftekharnia****Metallurgy Laboratory supervisor in gazar
industrial group****Abstract -1-1**

Cast iron and ductile iron microstructure and properties are influenced by inoculation treatment. In this review paper, the results of investigations on optimizing inoculation treatment have been reviewed and analyzed. Based on conducted studies the most influential factors on the effectiveness of inoculants are inoculant chemical composition, the melt chemical composition, shape and form of the casting section, and technical issues in addition of inoculant to the melt. Investigations on inoculant chemical composition revealed that the addition of elements such as Al, Ba, Sr, Zr, Ca, and rare earth elements to FeSi-based inoculant results in the improvement of inoculation effectiveness. Also, it was found that the chemical composition of the melt is effective in the inoculation process and in particular the proper amount of S and Mn in the melt plays an important role in inoculation. From the technical point of view, it was revealed that delaying the addition of inoculant by means of in mould inoculation and melt stream inoculation can overcome the problem of fading and improve the metallurgical microstructure of cast iron.

Keywords: Cast iron, Ductile iron, Inoculation -1-2