

## (بررسی تجربی تاثیر ترکیب شیمیایی و دما در تولید چدن نشکن ADI به روش اینمولد)

### داریوش رکرک

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مکانیک-واحد الیگودرز-دانشگاه آزاد اسلامی، الیگودرز-ایران  
Dariush.rokrok@gmail.com

### پرویز کحال

عضو هیئت علمی دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی  
parviz\_pkl@yahoo.com

### چکیده

در این پژوهش تولید چدن داکتیل به روش اینمولد بوده بدین صورت که عنصر کرومی کننده گرافیت ها یعنی فرو سیلیکو منیزیم را به صورت جامد درون قالب گذاشته و پس از ذوب ریزی در ذوب حل شده و به درون قالب هدایت می شود و به این صورت عمل کرومی گرافیتها انجام می شود. این پژوهش که در شرکت فولاد و چدن شهرستان دورود انجام شد ابتدا الگوی قالب جهت ذوب ریزی به روش اینمولد طراحی شد و پس از طراحی قالب اقدام به قالب گیری کردیم و با استفاده از ماسه سیلیسی و چسب سیلیکات سدیم با دانه بندی دو درصد قالب مورد نظر آماده شده و چون در این پژوهش ما نمی دانستیم که در چه دمایی و با چه مقدار جرمی عنصر فرو سیلیکو منیزیم با توجه به شرایط ذوب ریزی و محاسبات اولیه انجام شده در درون قالب واکنش نشان می دهد و عملیات کرومی کردن را انجام می دهد و به همین دلیل از چند قالب جهت ذوب ریزی در دماهای مختلف ۱۴۵۰، ۱۴۲۰ و ۱۳۸۰ درجه سانتی گراد تهیه نموده که هر قالب دارای چهار الگو بود، که این چهار الگو درون هر قالب با یک فاصله از سیستم راه گاه فاصله داشته و بدین صورت که پس از ذوب ریزی یک قالب با یک فاصله و زمان پر شدن الگوها و فاصله آنها تا سیستم راه گاه متفاوت بودند و پس از ذوب ریزی با ترکیب شیمیایی مناسب از هر نمونه از سه قالب نمونه های آزمایشگاهی تهیه کرده و جهت متالوگرافی و تعیین ریز ساختارهای آنها به آزمایشگاه برده و پس از پولیش کاری و سمباده کاری به کمک محلول پیگرال ۲٪ آنها را اچ کرده و به کمک میکروسکوپ نوری زمینه و گرافیت های آنها را مورد بررسی قرار دهیم و در مرحله بعد جهت اینکه بتوان ریز ساختارها و زمینه ی چدن داکتیل را تغییر داد و آن را به چدن نشکن ADI تبدیل نمود نیاز به یک عملیات حرارتی مناسب بود که در این عملیات از سه مرحله استفاده شد که در مرحله اول آستنیته کردن بود و در این مرحله از هر قالب که دارای چهار الگو بود و پس از نام گذاری هر سه قالب با توجه به زمان و دمای ذوب ریزی شروع به آستنیته کردن نمودیم که برای گروه C, B, A دمای آستنیته ۸۵۰، ۸۷۵، ۹۰۰ درجه سانتی گراد و به مدت ۶۰ دقیقه به کمک کوره آزمایشگاهی الکتریکی عملیات آستنیته انجام شد و پس از آن در مرحله دوم که عملیات آستمپرینگ بود و در این مرحله سرد کردن نمونه ها A, C, B در دمای ۳۵۰، ۳۵۰، ۳۶۰ درجه سانتی گراد به مدت ۶۰ دقیقه آستمپرینگ شدند و بعد از آن مرحله سوم سرد کردن نمونه ها تا دمای محیط بود و در این حالت که نیازی به سریع سرد کردن نمونه ها نبود و پس از عملیات حرارتی نمونه ها را متالوگرافی نموده و ریز ساختارها و زمینه های آن ها را مورد بررسی و بحث قرار دادیم.

**واژگان کلیدی:** تولید چدن نشکن آستمپر شده، خواص و ترکیب شیمیایی چدن نشکن آستمپر شده، تولید چدن داکتیل به روش اینمولد، عملیات حرارتی ADI، آستمپرینگ

### مقدمه

چدن های نشکن آستمپر شده (ADI) به دلیل دارا بودن خصوصیات عالی مکانیکی از قبیل استحکام کششی مناسب، مقاومت در برابر ضربه؛ استحکام خستگی خوب و سختی زیاد مورد توجه طراحان قرار گرفته و تحقیق در مورد خواص، ترکیب شیمیایی، نحوه اضافه کردن عنصر کروم کننده، دمای بار ریزی، عملیات حرارتی و ساختارهای آن در اولویت های مراکز تحقیقاتی چدن جهان قرار گرفته است.

شکل (۱) خواص این خانواده را با انواع آلیاژهای آهنی متداول در صنعت مقایسه می کند. [۲]  
اما همواره تولید قطعات ADI مشکل سختی بالا و قابلیت ماشینکاری پایین وجود داشته که موجب بالا رفتن هزینه های تولید آن می شود. اصولاً تولید قطعات ADI شامل چهار مرحله عمده می باشد [۳و۴]

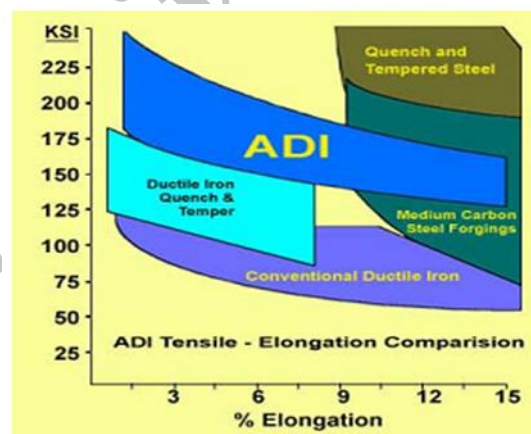
الف: ریخته گری و تولید قطعه از جنس چدن نشکن با عناصر آلیاژی معین

ب: ماشینکاری اولیه (خشن کاری)

ج: عملیات حرارتی آستمپرینگ

د: ماشینکاری نهایی (سنگ زنی)

همانطور که ملاحظه می شود تولید قطعات ADI شامل دو مرحله ماشینکاری می باشد که علت آن به سختی بالا قطعات پس از فرآیند آستمپرینگ است و لذا قسمت اعظم ماشینکاری قبل از فرآیند عملیات حرارتی انجام می شود [۵، ۶، ۷]. دمای بالا عملیات حرارتی امکان تاب برداشتن قطعات را به همراه داشته که این مشکل ممکن است با عملیات ماشینکاری نهایی برطرف نگردد و موجب ضایع شدن قطعات تولیدی می گردد.



شکل ۱ مقایسه خواص مکانیکی چدن های ADI با انواع آلیاژهای آهنی متداول [۱]

به منظور رفع این مشکل خانواده جدیدی از این ها با نام چدن های نشکن آستمپر شده در سال های اخیر به صنعت معرفی شده اند. [۸، ۹، ۱۰]

این خانواده دارای ترکیب شیمیایی و سیکل عملیات حرارتی کنترل شده ای هستند که علاوه بر ساختار آستمپرینگ دارای قابلیت ماشینکاری مناسبی نیز هستند.

فرآیند تولید قطعات ADI شامل ۳ مرحله به شرح زیر است:

الف: ریخته گری و تولید قطعه از چدن نشکن با درصد وزنی مشخص از عناصر آلیاژ

ب: عملیات حرارتی آستینه و آستمپرینگ

ج: ماشینکاری

کاهش یک مرحله از مراحل تولید باعث افزایش بهره‌وری قطعات نهایی قابل انجام باشد در حالی که خواص چدن‌های آستمپرینگ را نیز داشته باشد. [۱۲،۱۱].

جدول ۱ ترکیب شیمیایی نمونه‌های ریخته‌گری شده در چدن نشکن (%wt)

C	Si	Mn	Ni	Cu	Mo	P	S
3.6	2.6	0.3	0.5	0.5	0.2	0.026	0.008

جدول ۲ ترکیب شیمیایی قراضه آهن (%wt)

C	Si	Mn	S	P
0.14	0.15	0.1	0.012	0.016

جدول ۳ شرایط عملیات حرارتی بر روی نمونه‌های سری A، B و C

نمونه‌ها	دمای آستنیته	زمان آستنیته	دمای آستمپر	زمان آستمپر
A	850° C	60	350° C	<b>60</b>
B	875° C	55	390° C	<b>60</b>
C	900° C	60	350° C	<b>90</b>

### روش تحقیق

برای انجام این پژوهش که در کارخانه فولاد و چدن شهرستان دورود انجام شد ابتدا طراحی قالب مهم بود چون در این پژوهش تولید چدن داکتیل به روش اینمولد یعنی اضافه کردن عنصر کرومی کننده فروسیلیکومنیزیم در دوران قالب بود که نیاز به محاسبات دقیق جهت سیستم راهگامی و فاصله آن تا ورودی قالب بود. (شکل ۲)



شکل ۲: الگوی قالب طراحی شده جهت انجام پژوهش

پس از طراحی و محاسبات الگویی قالب بصورت الگوی چوبی به کمک ماسه سیلیسی و چسب سیلیکات سدیم و با دانه بندی دو درصد شروع به قالب گیری کردیم و چون در این پژوهش نمی دانستیم واکنش فرو سیلیکو منیزیم در چه دما و در چه شرایطی بهترین ریز ساختار ها را دارد به همین خاطر سه قالب جهت ذوب ریزی در دمای مختلف تعیین نمودیم و با توجه به طراحی قالب و حجم کل قالب از ۳٪ وزن کل آن برای هر قالب یعنی ۱۷۰ گرم عنصر فروسیلیکو منیزیم استفاده کنیم و سه قالب A,B,C برای انجام پژوهش آماده کردیم. قالب A که دمای ذوب ریزی آن را ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد و قالب B که دمای ذوب ریزی آن را ۱۴۲۰ درجه سانتیگراد و قالب C که دمای ذوب ریزی ۱۳۸۰ درجه سانتیگراد با توجه به بررسی انجام شده در نظر گرفته شد.



شکل ۳: قالب های آماده شده جهت ذوب ریزی

پس از طراحی قالب و آماده کردن قالب ها نیاز به یک ترکیب شیمیایی مناسب جهت تهیه ذوب بود که در این مرحله با توجه به تحقیقات گذشته دیگر محققین یک ترکیب شیمیایی مناسب جهت انجام این پژوهش انتخاب کردیم که در جدول ۱ آورده شده اند.

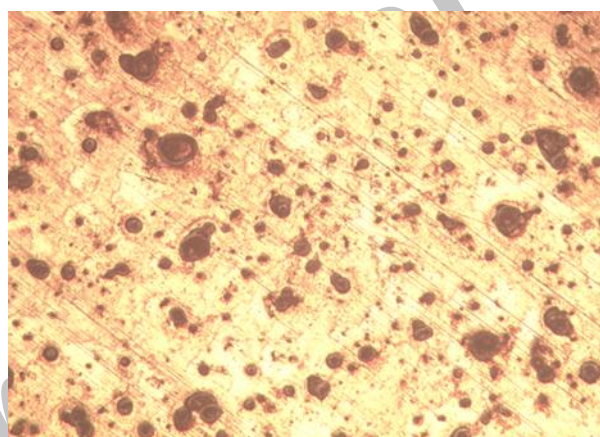
تهیه ذوب که با استفاده از یک کوره ۲۰۰ کیلوگرمی الکتریکی با فرکانس ۵۰HZ انجام شد. در تهیه ذوب، جهت پایین آوردن گوگرد در ذوب و عملیات گوگرد زدایی از قراضه آهن و فولاد و گرافیت با گوگرد پایین که در جدول ۲ آورده شده است استفاده شد. پس از تهیه ذوب مقدار کمی از ذوب را در قالب آزمایشگاهی ریخته و آن را به آزمایشگاه کوانتومتر برده و آنالیز نموده تارنج مورد نظر بدست آید و پس از تهیه و آماده شدن ذوب و آماده بودن قالب ها جهت ذوب ریزی ابتدا عنصر فروسیلیکو منیزیم را درون راهگاه قالب بصورت جامد قرار دادیم و بعد تای سر را بر روی تای زیری قالب گذاشته و آماده ذوب ریزی شدیم.

برای ذوب ریزی دمای ذوب را تا ۱۵۰۰ درجه سانتی گراد بالا بردیم و پاتیل را پیش گرم نموده و پس از گرم کردن پاتیل به کمک یک مشعل ذوب را از کوره به درون پاتیل ریخته و به کمک یک ترموکوپل دستی دمای ذوب را اندازه گیری کرده و در دمای ۱۴۵۰ درجه سانتی گراد برای قالب A عملیات ذوب ریزی انجام شد و برای قالب B در دمای ۱۴۲۰ درجه عملیات ذوب ریزی انجام شد برای قالب C در دمای ۱۳۸۰ درجه عملیات ذوب ریزی انجام شد.

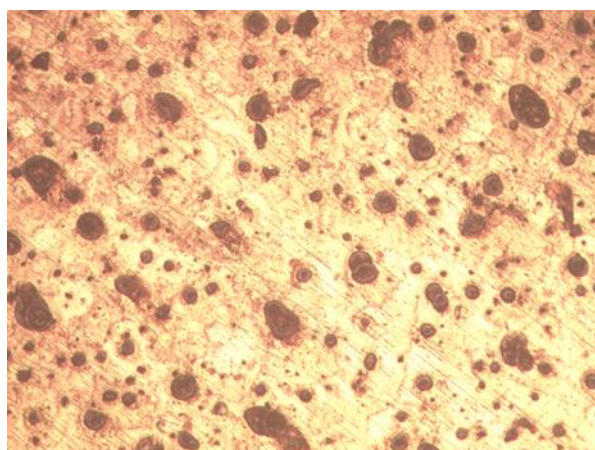
پس از به پایان رسیدن عملیات ذوب ریزی به هر سه قالب اجازه دادیم تا در دمای محیط سرد شوند و پس از سرد شدن قالب ها که هر قالب دارای چهار الگوی کوچک بودند و پس از جدا کردن نمونه ها از قالب ماسه ای از هر قالب A,B,C چند تکه

بریده شد و جهت متالوگرافی به آزمایشگاه بردیم و هر گروه متالوگرافی شد و به کمک میکروسکوپ نوری ریز ساختارهای آنها مورد بررسی قرار گرفت و در این مرحله تنها در قالب A آن هم در انتهای سیستم راهگاه گرافیت ها کروی شده بودند و در قالب ها دیگر آن بسیار ریز و یا بصورت برفکی بودند به همین دلیل سیستم راه گاه را دوباره مورد بررسی و محاسبات قرار دادیم و باز تمام مراحل انجام شده قبل از قبیل تهیه ذوب، قالب گیری را انجام دادیم و در این حالت دوم در هنگام ذوب ریزی دوباره مقدار کمی عنصر فروسیلیکو منیزیم را که بصورت پودر شده قبل از ذوب ریزی در روی کف هر قالب ریختم و به مقدار ۱۰ گرم برای هر قالب بود و عنصر فرو سیلیکو منیزیم که دارای دانه بندی بزرگی بود کوچک کردیم و قالب ها را آماده ذوب ریزی دوباره کردیم.

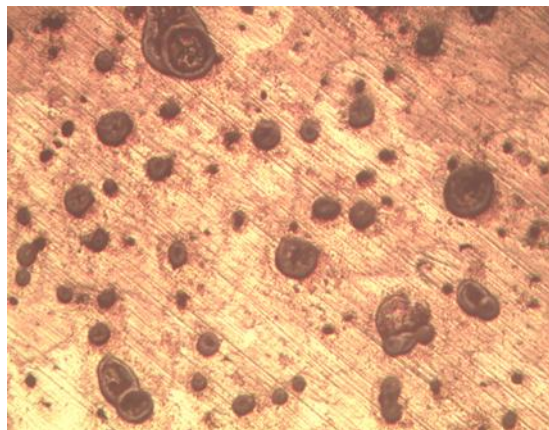
در ذوب ریزی دوباره پس از پیش گرم کردن پاتیل عملیات ذوب ریزی برای قالب A در دمای ۱۴۵۰ انجام شده و در این حالت هنگام ذوب ریزی به کمک یک لوله فولادی مقدار ۱۰ گرم عنصر فرو سیلیکوم منیزیم به ذوب اضافه شد و برای قالب های B,C که در دماهای ۱۴۲۰ و ۱۳۸۰ درجه بود همین روش بکار گرفته شد و پس از سرد شدن قالب ها آنها را از قالب ماسه ای جدا نموده و از هر نمونه A,B,C که دارای چهار الگو بودند تیکه ای بریده و جهت بررسی ریز ساختارهای آن متالوگرافی کرده و ریز ساختارهای آنها و زمینه های هر نمونه با توجه به دمای ذوب ریز به کمک میکروسکوپ نوری مورد بحث و بررسی قرار گرفتند که تصاویر نمونه های متالوگرافی شده بصورت زیر بودند. (شکل ۵: نمونه های A,B,C)



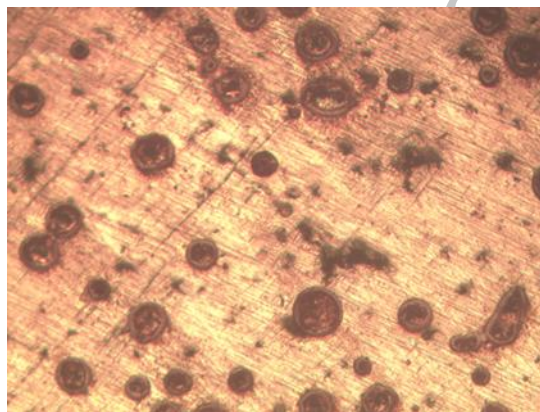
شکل ۴ نمونه متالو گرافی A1



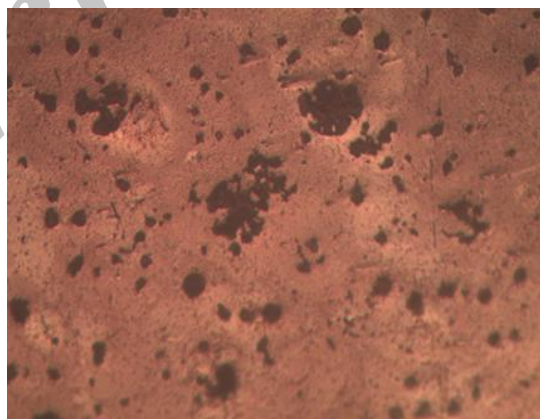
شکل ۵ نمونه متالو گرافی شده A2



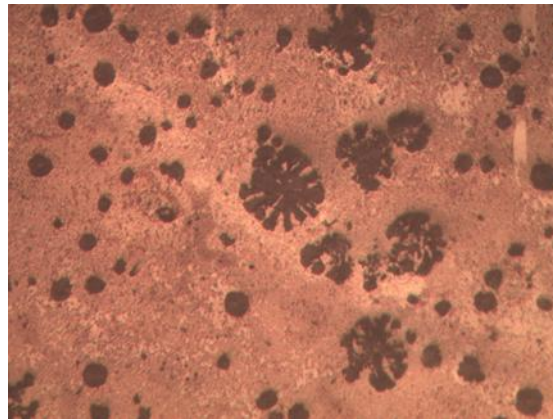
شکل ۶ نمونه متالوگرافی شده A3



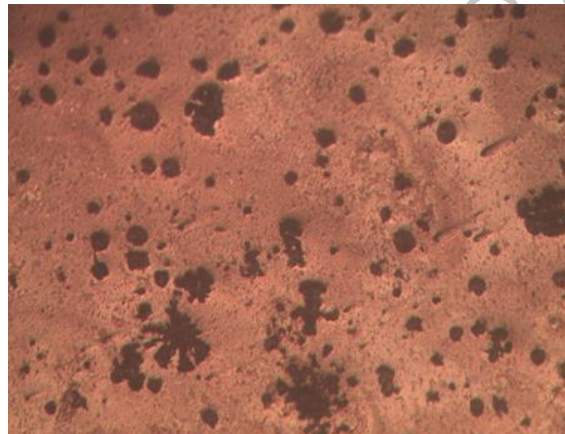
شکل ۷ نمونه متالوگرافی شده A4



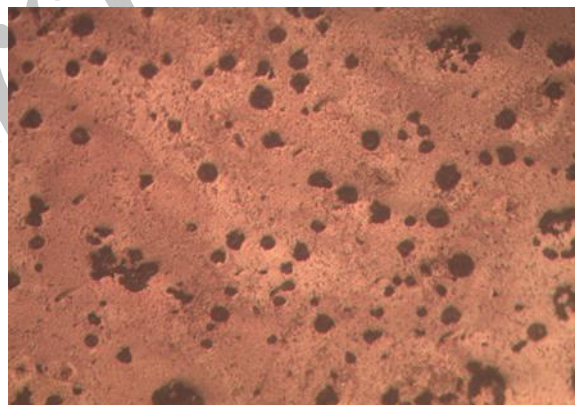
شکل ۸ نمونه متالوگرافی شده B1



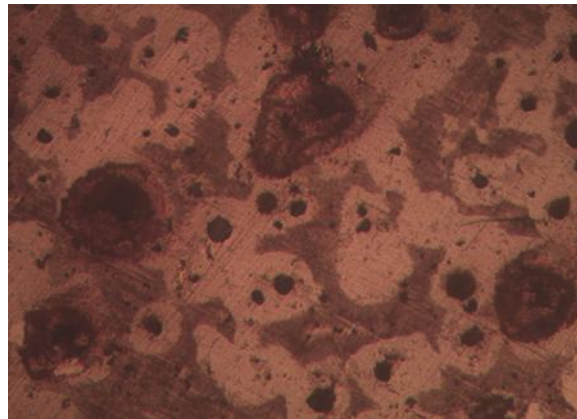
شکل ۹ نمونه متالوگرافی شده B2



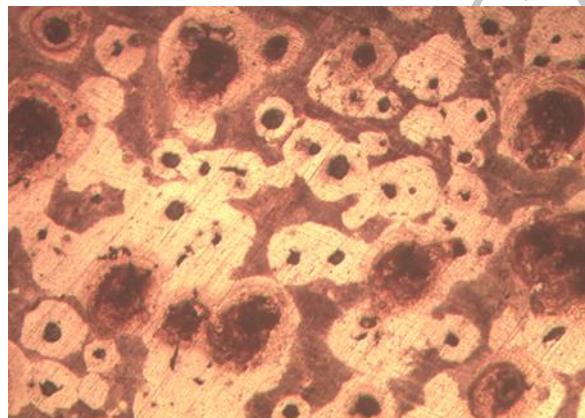
شکل ۱۰ نمونه متالوگرافی شده B3



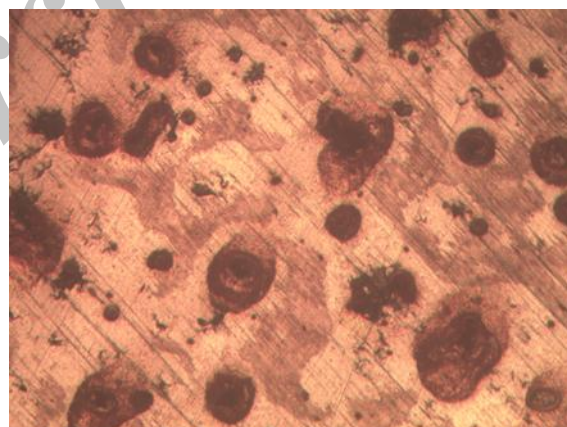
شکل ۱۱ نمونه متالوگرافی شده B4



شکل ۱۲ نمونه متالوگرافی شده C1

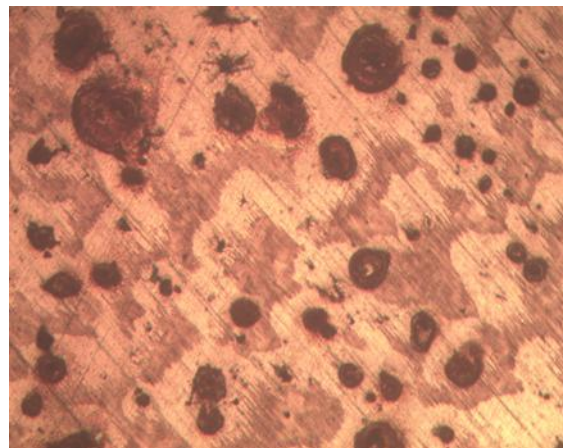


شکل ۱۳ نمونه متالوگرافی شده C2



شکل ۱۴ نمونه متالوگرافی شده C3





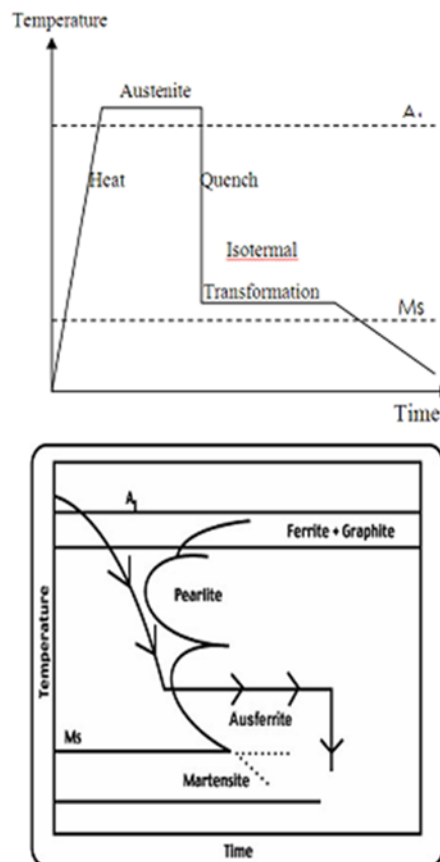
شکل ۱۵ نمونه متالوگرافی شده C4

#### عملیاتی حرارتی

عملیات حرارتی در این پژوهش در سه مرحله انجام شد که ابتدا در مرحله اول که آستنیته کردن بود و در مرحله دوم سرد کردن نمونه ها تا دمای آستمپرینگ و در مرحله سوم سرد کردن نمونه ها تا دمای محیط بود [۱]. سیکل عملیات حرارتی برای هر گروه قالب A,B,C متفاوت بود و هر گروه دارای چهار نمونه بودند و هر گروه طبق جدول ۳ عملیات حرارتی شدند.

برای عملیات حرارتی مرحله آستنیته از کوره آزمایشگاهی الکتریکی با دمای معین تعریف شده در جدول ۳ برای هر گروه استفاده شد و سپس در مرحله دوم سرد کردن نمونه ها با توجه به جدول ۳ و نگه داشتن نمونه ها در دمای آستمپرینگ در مدت زمان تعیین شده که این مرحله دمای آستمپرینگ به کمک کوره المنی آزمایشگاهی انجام شد و بعد از عملیات آستمپرینگ در مرحله سوم که سرد کردن نمونه ها تا دمای محیط است و چون در این مرحله نیاز به سرد کردن سریع نمونه ها نمی باشد و برای جلوگیری از بوجود آمدن تنش های پسماند در نمونه ها آنها را در هوای محیط قرار داده تا دمای نمونه ها به دمای محیط برسد.

کوره های آزمایشگاهی عملیات حرارتی مجهز به سیستم کنترل دما با دقت  $\pm 2$  درجه سانتیگراد بودند و مراحل عملیات حرارتی در شکل ۱۶ آورده شده اند.



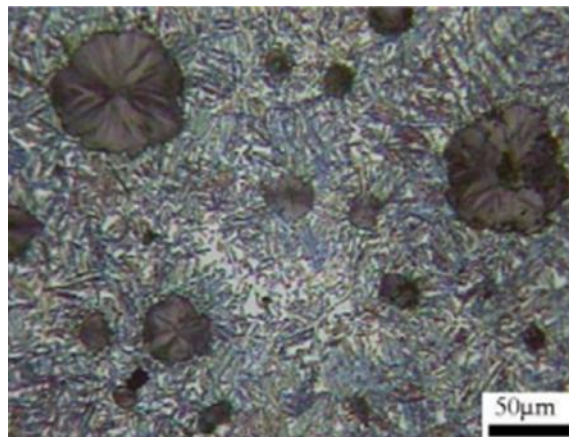
شکل ۱۶ نمایش شماتیک مراحل عملیات حرارتی

#### نتایج متالوگرافی بعد از عملیات حرارتی

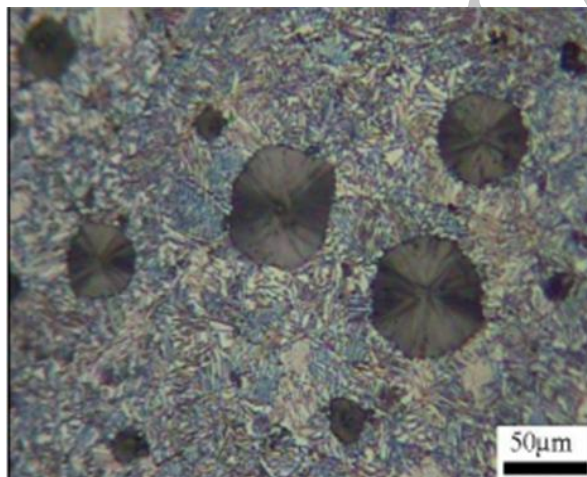
بررسی متالوگرافی از نمونه های ریخته گری نشان از کرویت بودن بالای ۹۰٪ گرافیت ها و تعداد گرانیتهای کروی در واحد سطح ( ندول کانت) جدول ۲۲۰-۱۸۰ می دهد. تصاویر میکروسکوپی آماده شده در شکل های ۱۷ تا ۱۹ ساختار آسمپرینگ در نمونه ها را نمایش می دهد. مناطق خاکستری رنگ در این تصاویر تهیه شده ساختار آسفورینگ بوده که در این ساختار شامل فریت و آستنیت باقی مانده با کربن بالا است در حالی که مناطق تیره رنگ ما بین آنها تیغه های مارتنزیتی هستند. با بیشتر شدن زمان و دمای آستنیت کرده مقدار مارتنزیت در نمونه ها کاهش یافته و میزان ساختار آسفورینگ افزایش می یابد و در واقع با افزایش زمان و درجه حرارت آستنیت کرده مقدار کربن باقی مانده در آستنیت افزایش می یابد که شرایط برای استحاله مارتنزیتی مشکل تر می شود.

همچنین نتایج نشان می دهد که با افزایش درجه حرارت آسمپرینگ میزان آستنیت باقی مانده افزایش یافته و میزان کربن باقی مانده در آن کاهش می یابد.

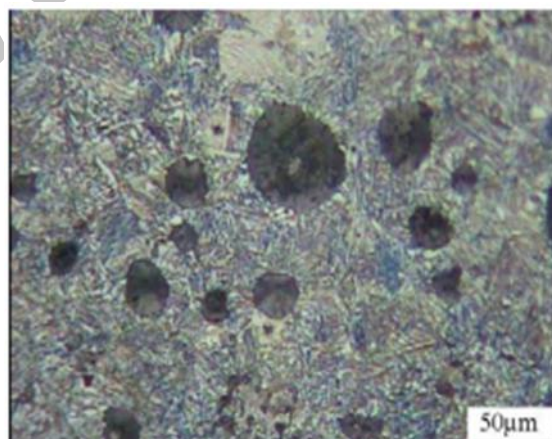
در نتیجه افزایش دمای آسمپرینگ موجب ایجاد ساختاری با تافنس بالاتر و سختی پایین تر و قابلیت ماشینکاری بهتر می گردد.



شکل ۱۷ نمونه متالوگرافی شده A بعد از عملیات حرارتی



شکل ۱۸ نمونه متالوگرافی نمونه B بعد از عملیات حرارتی



شکل ۱۹ نمونه متالوگرافی نمونه C بعد از عملیات حرارتی

## نتایج و مباحث

برای تولید چدن نشکن به روش اینمولد درجه حرارت ذوب ریزی محاسبات دقیق جهت سیستم راهگاه و سرعت ذوب ریزی بسیار اهمیت دارد. از متالوگرافی نمونه ها با توجه به ریز ساختارهای هر نمونه سری A,B,C به این نتیجه رسیدیم که در قالب A چون دمای بار ریزی در دمای ۱۴۵۰ درجه بوده و پس از ورود ذوب از گلوئی قالب با عنصر فرو سیلیکو منیزیم در سیستم راهگاه برخورد کرده و پس از حل شدن آن را شسته و ابتدا ذوب قالب  $A_4$  را پر کرده و بعد قالب  $A_2$ ،  $A_3$  و بعد  $A_1$  و با توجه به متالوگرافی نمونه ها به این نتیجه رسیدیم که بهترین شرایط و دمای بار ریزی در ۱۴۵۰ درجه بوده چون ابتدا ذوب وارد قالب  $A_4$  می گردد زمان کافی جهت ذوب کردن فرو سیلیکو منیزیم را داشته و ذوب بیشتر با عنصر کرومی شده در تماس است و به مقدار کافی در خود حل می کند و عنصر فرو سیلیکو منیزیم زمان و دمای کافی جهت واکنش شیمیایی را دارد در قالب گروه B که دمای بار ریزی آن پایین تر از گروه A است و بعد از مدت زمان ۳۰ ثانیه انجام شد ابتدا قالب  $B_4$  که دمای ذوب ریزی آن ۱۴۲۰ درجه بود و در این قالب هم پس از عبور ذوب وارد الگوی  $B_4$  و بعد  $B_3$  و  $B_2$  و در آخر وارد الگوی قالب  $B_1$  می شود و در این گروه قالب B پس از بررسی از نتایج متالوگرافی به این نتیجه رسیدیم که در قالب گروه  $B_4$  بهترین ریز ساختارها و حالت کرویت به این قالب تعلق دارد ولی چون دمای ذوب ریزی در قالب دوم از قالب اول ۳۰ درجه سانتیگراد پایین تر بوده و به همین دلیل با توجه به انتقال حرارت ذوب به قالب باعث پایین آمدن دمای ذوب می شود و به همین دلیل حالت کرومی بودن گرافیت های قالب B نسبت به A کمتر بوده و کیفیت ریز ساختارها و گرافیت ها نسبت به قالب A پایین تر بود.

قالب C که در دمای ۱۳۸۰ درجه سانتیگراد ذوب ریزی شد و چون در قالب C دما نسبت به قالب A,B پایین تر بود ذوب ریزی انجام شد و پس از عبور ذوب از سیستم راهگاه و در برخورد به عنصر فرو سیلیکو منیزیم ابتدا طبق موارد فوق ذوب وارد قالب  $C_4$  بعد  $C_3$  و  $C_2$  و  $C_1$  شد و در بررسی ریز ساختارها و گرافیت های گروه C با توجه به متالوگرافی های انجام شده به این نتیجه رسیدیم که باز در قالب  $C_4$  کیفیت گرافیت ها بیشتر از دیگر قالب های  $C_3$  و  $C_2$  و  $C_1$  است ولی کیفیت نمونه های A نسبت به B و C بهتر است و در قالب C چون دمای ذوب پایین آمده و در هنگام ذوب ریزی مقدار از دما صرف انتقال حرارت به قالب شده و مقدار دیگر از ذوب جهت ذوب کردن عنصر فرسیلیکومنیزیم شده و به همین علت دمای ذوب افت کرده و در نمونه های  $C_3$  و  $C_2$  و  $C_1$  بعضی از گرافیت ها بصورت برفکی هستند که زمان و دمای لازم جهت فعل و انفعالات کافی نبوده است.

## نتیجه گیری

- دست یابی به خواص مورد نظر چدن های ADI با کنترل دقیق ترکیب شیمیایی و فرآیند عملیات حرارتی مناسب امکان پذیر است.
- در تولید چدن داکتیل به روش اینمولد طراحی قالب بسیار مهم است و فاصله راهگاه، محافظه واکنش و مقدار درصد وزنی عنصر فروسیلیکومنیزیم در مقدار کرویت گرافیت ها نقش مهمی دارد.
- یکی دیگر از پارامترهای مهم در تولید چدن داکتیل به روش اینمولد کنترل دمای ذوب می باشد و چون دمای ذوب عنصر فرو سیلیکومنیزیم ۶۲۰ درجه سانتی گراد است و نقطه جوشش آن ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد است پس باید یک دما مناسب جهت ریخته گری مد نظر باشد که در این پژوهش بهترین دما جهت تولید چدن داکتیل به روش اینمولد ۱۴۵۰ درجه سانتی گراد بود.



۴- ترکیب شیمیایی مورد استفاده در روش اینمولد بسیار حساس است و کنترل عناصر ذوب در مقدار استاندارد نقش زیادی در کروی شدن گرافیت ها دارد و در هنگام تهیه ذوب جهت کم کردن گوگرد از قراضه آهن با گوگرد کم و یا از برگشتی های چدن نشکن در تهیه ذوب استفاده شود.

۵- عملیات حرارتی در چدن های نشکن از طریق ذوب جزئی منجر به حذف تقریبی آستنیت باقیمانده ناپایدار در چدن های نشکن آستمپر شده می شود.

۶- برای افزایش راندمان گوگرد زدائی عمل هم زدن مذاب از طریق مکانیکی و یا توسط دمیدن یک گاز خنثی در پاتیل انجام شود.

۷- در تولید چدن داکتیل به روش اینمولد دیگر مشکل زمان میرائی وجود ندارد و بازیابی عنصر فروسیلیکومنیزیم فوق العاده بالاست.

۸- انتخاب دمای مناسب آستمپرینگ موجب ظرافت در اندازه و تعداد ذرات فریتی است که در زمینه آستنیت وجود دارد.

#### منابع

گلعدار، م. ۱۳۸۰. عملیات حرارتی فولادها، جلد اول. انتشارات صنعتی اصفهان. ۴۱۰ صفحه

B. R. A.P. Druschitz, D. C. Fitzgerald, MADI: Introduction a New: Machinable Austempered Ductile Iron, SAE Paper, o-01-0831, 2003 .

Kovacs, "Development of Austempered Ductile Iron (ADI) for Aatomobile Crankshaflls", Journal of Heat Treating, Vol. 5, No. 1, p. 55-60, 1987.

F. Zanardi, The Development of Machinable ADI in Italy, Proceeding of the World Conference on ADI, Louisville, p. 69-72, 2002 .

J. Zimba, M. Samandi, D. Yu, T. Chandra, T. Navara, D. J. Simbi, Mater. Des., Vol. 25, p. 431-438, 2004 .

K. L. Hayrynen, "Another Avenue for Ductile Iron Foundries", Modern Casting, Vol. 44, p. 28-30, 1998 .

L. C. Chang, Carbon Content of Austenite in Austempered Ductile iron, Scr. Mater. Vol. 39, No. 1, p. 35-38, 1998.

M. A. Y. Gonzales, "Modeling Microstructure and Mechanical Properties of Austemperd Ductile Irons", Ph. D. Thesis, University of Cambridge, England, 2001.

M. Nili Ahmadabadi, E. Niyama, T. ohide, "Structural Control of 1% Mn ADI Aided by Modeking of Microsegregation", AFS Trans Actions, Vol. 102, p. 269-276, 1994 .

Machining Ductile Irons, International Nickel Co. Inc, New York, 2001.

O. J. Moncada, R. H. Spicacci, J. A. Sikora, "Machinability of Austempered Ductile Iron", AFS Trans. Vol. 106, p. 39-45, 1998 .

T. S. Shih, C. K. Lin, H. Z. Twan, Mechanical Properties of Various-Section ADIs, AFS Trans. Vol. 105, p. 367-376, 1997.