

# تأثیر ترکیب شیمیایی و عملیات حرارتی بر خواص، ساختار میکروسکوپی و قابلیت ماشینکاری چدن‌های نشکن آستمپر

نجم‌الدین عرب

مری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه

najmarab@iaue.ac.ir

## چکیده

چدن‌های نشکن آستمپر (ADI) با دارا بودن استحکام و مقاومت به ضربه و سایش بالا جایگاه خاصی را در صنایع به‌ویژه صنعت خودرو و صنایع حمل و نقل ریلی به‌خود اختصاص داده‌است و به‌طور وسیع در حال جایگزین شدن به‌جای قطعات فولادی در این صنایع می‌باشد. اما مشکل عمده در کاربرد قطعات ADI، سختی بالا و قابلیت ماشینکاری ضعیف آنهاست که موجب افزایش هزینه‌های ماشینکاری می‌گردد. در تحقیق حاضر اثر ترکیب شیمیایی و شرایط عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی و ساختار میکروسکوپی چدن نشکن آستمپر بررسی شده و ساختار میکروسکوپی توسط میکروسکوپ بررسی شده‌است. با مقایسه میزان سایش ابزار تراشکاری قابلیت ماشینکاری نمونه‌ها با یکدیگر مقایسه گردیده‌است. با مقایسه نتایج شرایط مناسب برای بدست آوردن چدنی با خواص بهینه ارائه شده‌است.

## واژه‌های کلیدی:

تولید چدن نشکن آستمپر، خواص و ترکیب شیمیایی چدن نشکن آستمپر، قابلیت ماشینکاری چدن نشکن آستمپر، عملیات حرارتی ADI.

## ۱- مقدمه

تولید آن می‌شود. اصولاً تولید قطعات ADI شامل چهار مرحله عمده می‌باشد [۲ و ۳].

الف: ریخته‌گری و تولید قطعه از جنس چدن نشکن با عناصر آلیاژی معین.

ب: ماشینکاری اولیه (خشن کاری).

ج: عملیات حرارتی آستمپرینگ.

د: ماشینکاری نهایی (معمولاً سنگ‌زنی).

همانطور که ملاحظه می‌شود تولید قطعات ADI شامل دو مرحله ماشینکاری می‌باشد که علت آن به‌سختی بالای قطعات پس از

چدن‌های نشکن آستمپر (ADI) به‌دلیل دارا بودن خصوصیات عالی مکانیکی از قبیل استحکام کششی مناسب، مقاومت در برابر ضربه و استحکام خستگی خوب توجه طراحان را به‌خود جلب کرده و تحقیق در مورد خواص و ساختار آن در اولویت‌های مراکز تحقیقاتی چدن جهان، قرار گرفته‌است. شکل (۱) خواص این خانواده را با انواع آلیاژهای آهنی متداول در صنعت مقایسه می‌کند. [۱].

اما همواره در تولید قطعات ADI مشکل سختی بالا و قابلیت ماشینکاری پائین وجود داشته که موجب بالا رفتن هزینه‌های

می گردد. این خواص موجب استقبال از این فرآیند جهت تولید قطعات چدن نشکن آستمپر شده است [۴].  
بنابراین در MADI هدف این است که با انتخاب ترکیب شیمیایی مناسب، ریزساختاری ایجاد شود که اجرای فرآیند عملیات حرارتی با سرعت و سهولت بیشتری انجام شود و عملیات ماشینکاری بر روی قطعه نهایی قابل انجام باشد در حالی که خواص چدن‌های آستمپر را نیز داشته باشد [۱۰ و ۱۱].

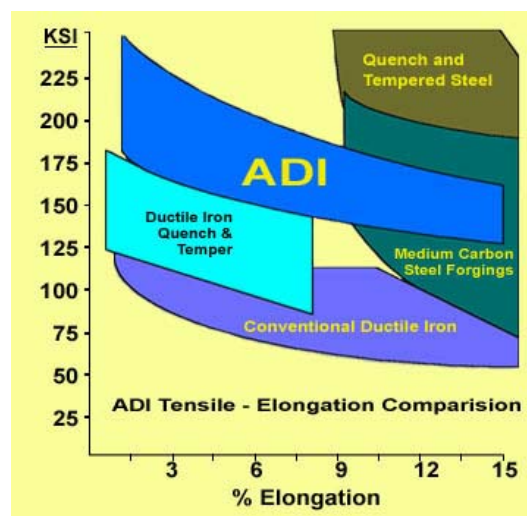
## ۲- روش تحقیق

برای انجام آزمایشات، نمونه‌های Y بلوک مطابق با استاندارد ASTM A897 آماده‌سازی شدند.

عملیات ذوب در یک کوره القایی بدون هسته و با فرکانس متوسط انجام پذیرفت و نمونه‌های Y بلوک با ترکیبات مورد نظر ریخته شدند. ترکیبات شیمیایی نمونه‌های ریخته شده در جدول (۱) آورده شده‌اند. عمل ذوب با استفاده از قراضه فولاد و گرافیت با گوگرد پائین و فروسیلیسیم ۷۰٪ آغاز شد. پس از آماده شدن مذاب و انجام محاسبات، مقادیر عناصر آلیاژی مورد نیاز به مذاب افزوده شدند. ترکیب شیمیایی قراضه و فروآلیاژهای مورد استفاده در جدول (۲) آورده شده‌است. سپس به مقدار مورد نظر فروسیلیسیم و فرومولیدین اضافه شد و پس از تنظیم آنالیز اولیه مس و نیکل اضافه گردیدند. عملیات نشکن‌سازی به روش ساندویچی و در درجه حرارت ۱۴۹۵ درجه سانتی‌گراد و در پاتیل ۱۵۰ کیلوگرمی انجام گرفت و مذاب در قالب‌های ماسه‌ای با چسب Silicate / CO<sub>2</sub> در درجه حرارت ۱۳۹۰ درجه سانتی‌گراد ذوب‌ریزی گردید. پس از سرد شدن، نمونه‌های Y بلوک از قالب خارج شده و شات بلاست گردیدند.

### ۲-۱- عملیات حرارتی

ابتدا نمونه‌ها در کوره حمام نمک مذاب آستنتیه شدند و سپس در مدت زمان حداکثر ۱۰ ثانیه وارد کوره حمام نمک با دمای معین شدند. درجه حرارت آستنتیه کردن و دمای حمام نمک در مورد هر نمونه در جدول (۳) آورده شده‌اند.



شکل (۱): مقایسه خواص مکانیکی چدن‌های AD با انواع آلیاژهای آهنی متداول [۱].

فرآیند آستمپرینگ بر می‌گردد و لذا قسمت اعظم ماشینکاری قبل از فرآیند عملیات حرارتی انجام می‌شود [۴، ۵ و ۶]. دمای بالای عملیات حرارتی امکان تاب برداشتن قطعات را به همراه داشته که این مشکل ممکن است با عملیات ماشینکاری نهایی بر طرف نگردد و موجب ضایع شدن قطعات تولیدی گردد.

به‌منظور رفع این مشکل خانواده جدیدی از این چدن‌ها با نام چدن‌های نشکن آستمپر قابل ماشینکاری (MADI) در سال‌های اخیر به‌صنعت معرفی شده‌اند [۷، ۸ و ۹]. این خانواده دارای ترکیب شیمیایی و سیکل عملیات حرارتی کنترل شده‌ای هستند که علاوه بر ساختار آستمپر دارای قابلیت ماشینکاری مناسبی نیز هستند. فرآیند تولید قطعات MADI شامل ۳ مرحله به‌شرح زیر است:

الف: ریخته‌گری و تولید قطعه از چدن نشکن با درصد وزنی مشخص از عناصر آلیاژی.

ب: عملیات حرارتی آستمپرینگ.

ج: ماشینکاری.

کاهش یک مرحله از مراحل تولید باعث افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌های ماشینکاری به‌دلیل کاهش اضافه مجاز تراشکاری و کاهش تغییرات ابعادی ناشی از عملیات حرارتی

جدول (۱): ترکیب شیمیایی نمونه‌های ریخته شده (wt %).

شماره نمونه‌ها	C	Si	Mn	Ni	Cu	Mo	P	S
A	۳/۶	۲/۶	۰/۳	۰/۵	۰/۵	۰/۲	۰/۰۲۶	۰/۰۰۸
B	۳/۸	۲/۵	۰/۱۵	۰/۷۲	۰/۶۵	۰/۲۶	۰/۰۲۴	۰/۰۰۸
C	۳/۶	۲/۶	۰/۳	۱	۰/۶	۰/۲۳	۰/۰۲۲	۰/۰۰۷
D	۳/۷	۲/۸	۰/۰۶۶	۰/۸	۰/۷	۰/۳	۰/۰۲۱	۰/۰۰۸

جدول (۲): ترکیب شیمیایی قراضه و فروآلیاژها و عناصر مورد استفاده (wt %).

مواد اولیه	%C	%Si	%Mn	%S	%P	%Cu	%Ni	%Mo	%Mg
قراضه فولاد	۰/۱۴	۰/۱۵	۰/۱	۰/۰۱۲	۰/۰۱۶	-	-	-	-
گرافیت	۹۵	-	-	۰/۱	-	-	-	-	-
فروسلیسیم	۴	۷۰	-	۱	-	-	-	-	-
فرمولیدن	۵	۱/۵	۰/۸	-	-	-	-	۵۵	-
نیکل	-	-	-	-	-	-	۹۸	-	-
مس	-	-	-	-	-	۹۹/۵	-	-	-
Fe-Si-Mg	-	۴۶	-	-	-	-	-	-	۵

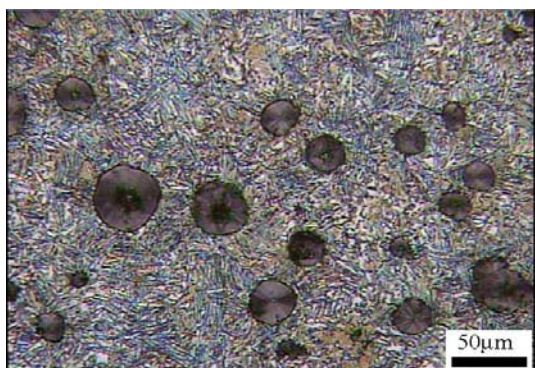
جدول (۳): شرایط عملیات حرارتی و نتایج آزمایشات مکانیکی بر روی نمونه‌های سری A.

شماره نمونه‌ها	دمای آستنیت (°C)	زمان آستنیت (دقیقه)	دمای آستمپر (°C)	زمان آستمپر (دقیقه)	استحکام کششی MPa	استحکام تسلیم Mpa	درصد تغییر طول	سختی BHN	انرژی ضربه ژول
A1	۸۵۰	۶۰	۳۵۰	۶۰	۸۹۰	۶۵۰	۱۰	۳۷۰	۶۵
A2	۹۰۰	۶۰	۳۵۰	۹۰	۸۸۰	۶۳۳	۸	۳۶۵	۴۹
A3	۹۵۰	۶۰	۳۵۰	۱۲۰	۸۷۰	۶۳۰	۹	۳۶۰	۶۰

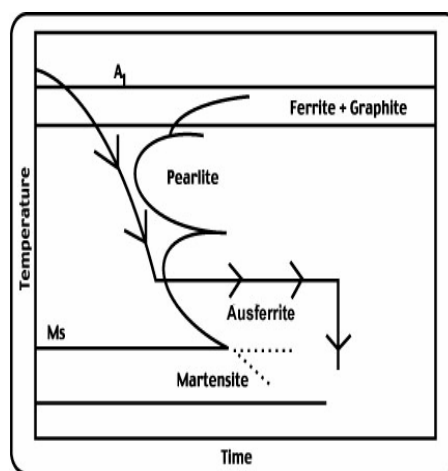
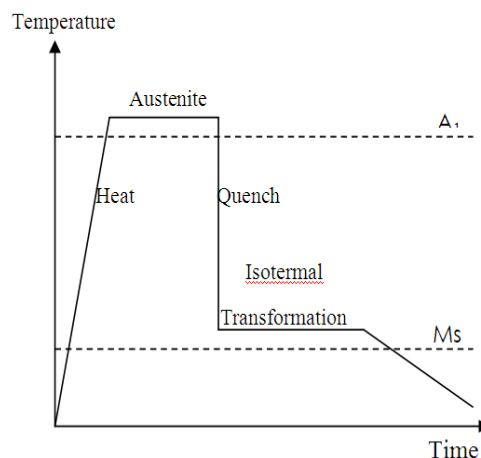
## ۲-۲-آزمون‌ها و نتایج

بعد از آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام عملیات حرارتی بر روی آنها، آزمون‌های گوناگونی همانند تست کشش، ضربه و سختی سنجی بر روی نمونه‌ها انجام گرفت که نوع سیکل عملیات حرارتی و نتایج بدست آمده از هر تست در ادامه آورده شده‌است. شکل (۳) ابعاد نمونه تست کشش را مطابق با استاندارد DIN 50125 نشان می‌دهد.

برای آستنیت کردن از حمام نمک با حجم حدوداً ۱/۳ متر مکعب و با نمک با نام تجاری GS-540 (متعلق به شرکت دبو‌سای آلمان) و برای مرحله آستمپرینگ از حمام نمک با حجم حدوداً ۲/۵ متر مکعب و با نام تجاری AS-140 استفاده گردید. کوره‌های عملیات حرارتی مجهز به سیستم کنترل دما با دقت دمایی  $\pm 2$  درجه سانتی‌گراد بودند. مراحل عملیات حرارتی در شکل (۲) آورده شده‌اند.



شکل (۴): ساختار میکروسکوپی نمونه‌های A بعد از عملیات حرارتی.



شکل (۲): نمایش شماتیک مراحل عملیات حرارتی.

تست ضربه به روش شارپی مطابق با استاندارد ASTM E 23 -06 انجام گرفت. سختی سنجی نیز به روش ویکرز و مطابق با استاندارد ASTM E 92-04 انجام گرفت آزمون متالوگرافی در سه مرحله طبق استانداردهای زیر صورت گرفت:

۱- آماده‌سازی نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM E3.

۲- میکرواچ نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM E 407.

۳- متالوگرافی نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM A247 با استفاده از محلول اچ پیکرال.

**بررسی نمونه‌های گروه A:**

شرایط عملیات حرارتی انجام شده و نتایج حاصل از آزمایشات مکانیکی بر روی نمونه‌های گروه A در جدول (۳) و ساختار میکروسکوپی در شکل (۴) آورده شده‌است.

**بررسی نمونه‌های گروه B:**

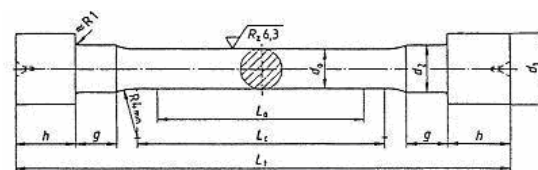
سیکل عملیات حرارتی و نتایج آزمایشات مکانیکی بر روی نمونه‌های گروه B در جدول (۴) آورده شده‌است.

**بررسی نمونه‌های گروه C:**

سیکل عملیات حرارتی و نتایج آزمایشات مکانیکی بر روی نمونه‌های C در جدول (۵) آورده شده‌است.

**بررسی نمونه‌های گروه D:**

سیکل عملیات حرارتی و نتایج آزمایشات مکانیکی بر روی نمونه‌های D در جدول (۶) آورده شده‌است.



$d_0$	$L_0$	$d_1$	$d_2$	$g$	$h_{min}$	$L_c$ (Min)	$L_1$ (Min)
۸	۴۰	۱۵	۱۰	۱۵	۱۳	۵۳	۱۱۹

شکل (۳): ابعاد نمونه‌های استاندارد تست کشش (mm).

جدول (۴): شرایط عملیات حرارتی و نتایج آزمایشات مکانیکی بر روی نمونه‌های سری B.

شماره نمونه‌ها	دمای آستنیت (°C)	زمان آستنیت (دقیقه)	دمای آستمپر (°C)	زمان آستمپر (دقیقه)	استحکام کششی MPa	استحکام تسلیم Mpa	درصد تغییر طول	سختی BHN	انرژی ضربه ژول
B <sub>1</sub>	۸۰۰	۶۰	۴۰۰	۶۰	۸۳۰	۶۲۰	۹	۲۷۵	۵۰
B <sub>2</sub>	۸۵۰	۶۰	۴۰۰	۱۲۰	۸۴۸	۶۴۶	۱۲	۲۶۲	۵۸
B <sub>3</sub>	۹۲۰	۶۰	۴۰۰	۱۸۰	۸۶۰	۶۳۸	۹	۲۵۵	۶۳

جدول (۵): شرایط عملیات حرارتی و نتایج آزمایشات مکانیکی بر روی نمونه‌های سری C.

شماره نمونه‌ها	دمای آستنیت (°C)	زمان آستنیت (دقیقه)	دمای آستمپر (°C)	زمان آستمپر (دقیقه)	استحکام کششی MPa	استحکام تسلیم Mpa	درصد تغییر طول	سختی BHN	انرژی ضربه ژول
C1	۸۵۰	۵۵	۳۹۰	۴۵	۸۳۱	۵۹۲	۹	۲۴۱	۲۷
C2	۸۷۵	۵۵	۳۹۰	۶۰	۸۲۷	۶۲۳	۸	۲۶۰	۴۳
C3	۹۰۰	۵۵	۳۹۰	۷۵	۸۱۰	۵۹۷	۱۱	۲۳۰	۳۵

جدول (۶): شرایط عملیات حرارتی و نتایج آزمایشات مکانیکی بر روی نمونه‌های سری D.

شماره نمونه‌ها	دمای آستنیت (°C)	زمان آستنیت (دقیقه)	دمای آستمپر (°C)	زمان آستمپر (دقیقه)	استحکام کششی MPa	استحکام تسلیم Mpa	درصد تغییر طول	سختی BHN	انرژی ضربه ژول
D1	۸۰۰	۹۰	۳۷۰	۶۰	۸۴۰	۶۶۰	۸	۳۰۰	۵۶
D2	۸۵۰	۹۰	۳۷۰	۹۰	۸۴۰	۶۳۰	۹	۲۹۰	۶۰
D3	۹۰۰	۹۰	۳۷۰	۱۸۰	۸۶۰	۶۸۵	۹	۲۹۴	۴۳

### ۲-۳- تست قابلیت ماشینکاری

این آزمایش بر اساس استاندارد ISO 3685 انجام شد. در این آزمایش تعداد ۳ عدد از هر نمونه و مجموعاً ۳۶ نمونه تحت عملیات ماشینکاری یکسان و مشابه قرار گرفته و میزان متوسط مصرف ابزار به عنوان معیار قابلیت ماشینکاری نمونه‌ها تعیین شد.

### ۳- نتایج و مباحث

بررسی متالوگرافی از نمونه‌های تهیه شده از Y بلوک‌ها نشان از کرویت بالای ۹۵٪ گرافیت‌ها و تعداد گرافیت کروی در واحد سطح (ندول کانت) حدود ۱۸۰-۲۲۰ می‌دهد. تصاویر میکروسکوپی تهیه شده در شکل‌های (۴) تا (۷) ساختار آستمپر

در نمونه‌ها را به نمایش می‌گذارد. مناطق خاکستری رنگ در این تصاویر ساختار آسفورمینگ بوده که شامل فریت و آستنیت باقیمانده با کربن بالا هستند. حال آنکه مناطق تیره رنگ مابین آنها تیغه‌های مارتنزیتی هستند. با افزایش زمان و دمای آستنیت کردن مقدار مارتنزیت در نمونه‌ها کاهش یافته و میزان ساختار آسفورمینگ افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش زمان و درجه حرارت آستنیت کردن مقدار کربن باقیمانده در آستنیت افزایش یافته و در نتیجه شرایط برای استحاله مارتنزیتی مشکل‌تر می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهند که با افزایش درجه حرارت آستمپرینگ میزان آستنیت باقیمانده افزایش یافته و

میزان کربن باقیمانده در آن کاهش می‌یابد. در نتیجه افزایش دمای آستمپرینگ موجب ایجاد ساختاری با تافنس بالاتر و سختی پائین‌تر و قابلیت ماشینکاری بهتر می‌گردد [۷-۹].

نتایج اندازه‌گیری مصرف ابزار نشان داد که نمونه‌های سری C مصرف ابزار کمتری داشته و لذا قابلیت ماشینکاری بهتری داشتند. همچنین نتایج آورده شده در جداول (۴) تا (۶) نیز نشان می‌دهند که نمونه‌های سری C با توجه به ترکیبات شیمیایی و شرایط عملیات حرارتی انتخاب شده نسبت به سایر نمونه‌ها سختی پائین‌تری داشته و در نتیجه قابلیت ماشینکاری بهتری را به نمایش می‌گذارند. مقایسه ساختار میکروسکوپی نمونه‌های گروه C با سایر گروه‌ها نشان از ساختاری ریزتر و هموزن‌تر می‌دهد که در نتیجه این ساختار دارای انعطاف بهتری در مقایسه با سایر خانواده‌ها است. [۱۰ و ۱۱].

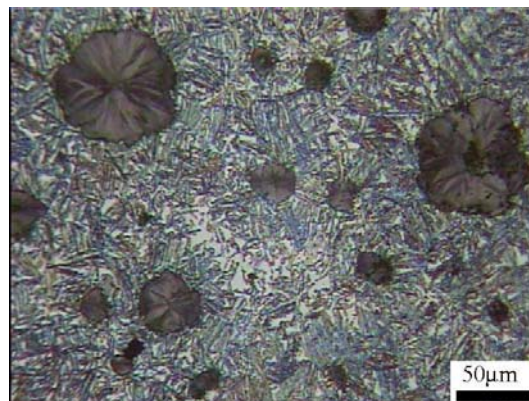
#### ۴- نتیجه‌گیری

۱- دست‌یابی به خواص مورد نظر در چدن‌های MADI با کنترل دقیق ترکیب شیمیایی و فرآیند عملیات حرارتی امکان‌پذیر است.

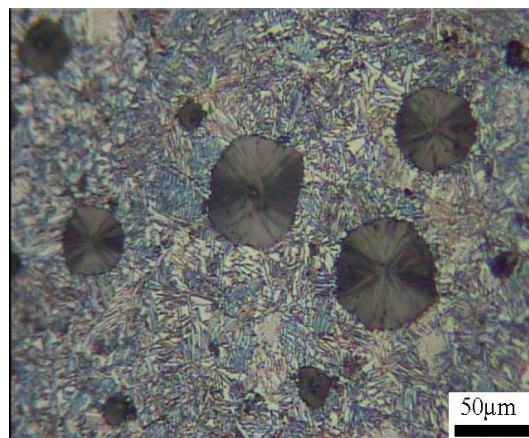
۲- در این تحقیق انتخاب ترکیب شیمیایی و سیکل عملیات حرارتی بر اساس تحقیقات سایر محققین و پیشنهادات آنها و بررسی‌های متالورژیکی و به‌منظور دست‌یابی به خواص مکانیکی، ساختار میکروسکوپی و قابلیت ماشینکاری مناسب صورت گرفت و میزان مصرف ابزار به‌عنوان معیار قابلیت ماشینکاری نمونه‌ها در نظر گرفته شد.

۳- مقایسه نتایج آزمایشات مکانیکی و بررسی‌های ساختاری نشان می‌دهند که آلیاژهای انتخاب شده تفاوت فاحشی از نظر خواص مکانیکی و ساختاری با یکدیگر نداشته اما گروه آلیاژی C خواص نسبتاً قابل قبول‌تری را به‌دست می‌دهد.

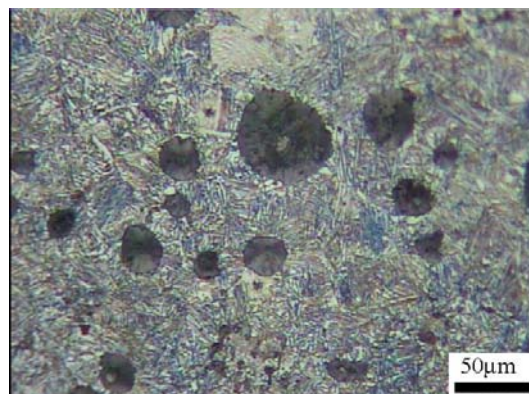
۴- عملیات آستنیت‌کردن در دمای حدود ۸۷۵ درجه سانتی‌گراد و سپس انجام عملیات آستمپرینگ در دمایی حدود ۳۹۰ درجه سانتی‌گراد تلفیق مناسب‌تری از ساختار و خواص مکانیکی و قابلیت ماشینکاری در نمونه‌ها را به‌دست می‌دهد.



شکل (۵): ساختار میکروسکوپی نمونه‌های B بعد از عملیات حرارتی.



شکل (۶): ساختار میکروسکوپی نمونه‌های C بعد از عملیات حرارتی.



شکل (۷): ساختار میکروسکوپی نمونه‌های D بعد از عملیات حرارتی.

- ۵- مراجع**
- [6] Machining Ductile Irons, International Nickel Co. Inc, New York, 2001.
- [7] O. J. Moncada, R. H. Spicacci, J. A. Sikora, "Machinability of Austempered Ductile Iron", AFS Trans. Vol. 106, p. 39-45, 1998.
- [8] K. L. Hayrynen, "Another Avenue for Ductile Iron Foundries", Modern Casting, Vol. 44, p. 28-30, 1998.
- [9] T. S. Shih, C. K. Lin, H. Z. Twan, Mechanical Properties of Various-Section ADIs, AFS Trans. Vol. 105, p. 367-376, 1997.
- [10] J. Zimba, M. Samandi, D. Yu, T. Chandra, T. Navara, D. J. Simbi, Mater. Des., Vol. 25, p. 431-438, 2004.
- [11] L. C. Chang, Carbon Content of Austenite in Austempered Ductile iron, Scr. Mater. Vol. 39, No. 1, p. 35-38, 1998.
- [1] M. A. Y. Gonzales, "Modeling Microstructure and Mechanical Properties of Austempered Ductile Irons", Ph. D. Thesis, University of Cambridge, England, 2001.
- [2] A. P. Druschitz, D. C. Fitzgerald, MADI: Introduction a New: Machinable Austempered Ductile Iron, SAE Paper, No-01-0831, 2003.
- [3] F. Zanardi, The Development of Machinable ADI in Italy, Proceeding of the World Conference on ADI, Louisville, p. 69-72, 2002.
- [4] 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.
- [5] B. R. Kovacs, "Development of Austempered Ductile Iron (ADI) for Aatomobile Crankshafls", Journal of Heat Treating, Vol. 5, No. 1, p. 55-60, 1987.