

اثر آلومینیم بر ساختار، سختی و خواص کششی چدن‌های خاکستری آستمپر

احسان شجاعیⁱ؛ مهدی دیوانداریⁱⁱ؛ سیدمحمدعلی بوتراپیⁱⁱⁱ

چکیده

در مقاله حاضر، تاثیر میزان آلومینیم و عملیات حرارتی آستمپر بر ساختار، خواص کششی و سختی چدن خاکستری بررسی شده است. به این منظور، سه آلیاژ حاوی ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی آلومینیم تهیه شد. بر روی نمونه‌های کشش تهیه شده از این آلیاژها عملیات حرارتی آستمپر به اجرا درآمد؛ بدین ترتیب که این نمونه‌ها در دو دمای ۸۵۰°C و ۹۰۰°C به مدت ۱۲۰ دقیقه آستنیت‌دهی و در دمای آستمپر ۲۷۵°C به مدت زمان ۱، ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ دقیقه آستمپر شدند.

نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که افزایش دمای آستنیت‌دهی از ۸۵۰°C به ۹۰۰°C در آلیاژهای حاوی ۱ و ۲ درصد وزنی آلومینیم باعث کاهش استحکام و میزان ازدیاد طول می‌شود درحالی که در نمونه‌های بدون آلومینیم و حاوی ۴ درصد وزنی آلومینیم با افزایش دمای آستنیت‌دهی میزان استحکام و ازدیاد طول افزایش می‌یابد. در آلیاژهای حاوی ۱ و ۲ درصد وزنی آلومینیم بالاترین میزان استحکام و ازدیاد طول پس از ۳۰ دقیقه آستمپر و در آلیاژهای بدون آلومینیم و حاوی ۴ درصد وزنی آلومینیم بالاترین میزان استحکام و ازدیاد طول پس از ۶۰ دقیقه آستمپر به دست می‌آید.

کلمات کلیدی

آستنیت‌دهی، آستمپر، چدن خاکستری آلومینیم‌دار، آستنیت باقیمانده

Effect of Aluminum Content on the Microstructure, Hardness and Mechanical Properties of Austempered Grey Cast Iron.

E. Shojaee; M. Divandari; S.M.A. Boutorabi

ABSTRACT

The effect of aluminum content, austenitizing temperature and austempering time and temperature on the microstructure and mechanical properties of Fe-C-Al grey cast iron are investigated. Three alloys containing 1, 2 and 4 weight percent of aluminum are provided. The tensile samples are austenitized at 850°C and 900°C for 2h, followed by an austempering process at 275°C for 1-120 min.

The results show that increase of austenitizing temperature from 850°C to 900°C in the alloys with 1wt% and 2wt% aluminum decreases the elongation and ultimate tensile strength. In the samples without aluminum and containing 4wt% aluminum increase in the austenitizing temperature leads to increasing of ultimate tensile strength and elongation. Experiments carried out on austenitized samples at 900°C show that in alloys with 1wt% and 2wt% of aluminum maximum strength and elongation appear after 30 minutes of austempering but in samples without aluminum or those containing 4wt% aluminum the maximum strength and elongation appear after 60 minutes.

ⁱ کارشناس ارشد. تلفن ۰۹۱۲۳۵۸۹۸۵۷ / e_shojaee@yahoo.co.uk

ⁱⁱ استادیار دانشگاه علم و صنعت ایران

ⁱⁱⁱ استاد دانشگاه علم و صنعت ایران

افت خواص مکانیکی را موجب شده و قابلیت آستمبر را محدود می‌کنند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که مهم‌ترین عواملی که این نوع قابلیت آستمبر را تحت تاثیر قرار می‌دهند شامل دمای آستنیت، زمان و دمای آستمبر، عناصر آلیاژی و عیوب ساختاری است [۸].

مطالعه چدن‌های داکتیل در سیستم Fe-C-Al که در آنها آلومینیم به طور جزئی یا کلی جایگزین سیلیسیم در چدن‌های داکتیل مرسوم Fe-C-Si شده است، شباهت‌های نزدیکی از دو چدن را در فاز تعادلی با اختلافات کوچکی در دماها یا درجات حلالیت اجزای آلیاژی نشان می‌دهد. چنین شباهت‌هایی همچنین در مورد فازهای استحاله‌های جامد-مایع و استحاله‌های حالت جامد وجود دارد [۶]. جایگزینی آلومینیم به جای سیلیسیم در چدن، نه تنها در حالت ریختگی سبب افزایش خواص مکانیکی می‌شود [۱۲]، بلکه در حالت آستمبر نیز کیفیت بهتری را نشان می‌دهد [۵].

خواص کششی چدن‌های داکتیل آلومینیم‌دار به شدت تحت تاثیر عملیات حرارتی آستمبر است. استحکام کششی پایین در درجه حرارت‌های پایین، ناشی از واکنش بینیتی کامل نشده به خاطر کم بودن سرعت نفوذ کربن است. در هنگام سرد کردن تا دمای اتاق، آستنیت کم کربن به مارتنزیت تبدیل می‌شود و تمایل به شکست ترد افزایش می‌یابد. مسأله دیگر، ایجاد تنش در این نمونه‌هاست و احتمالاً از کرنش برشی ناشی از تشکیل بینایت سرچشمه می‌گیرد که باعث کاهش استحکام چدن آستمبر شده در ۲۷۵-۳۰۰ درجه سانتیگراد می‌شود [۴].

تحقیقات نشان می‌دهد که ازدیاد طول نسبی چدن‌های با گرافیت لایه‌ای آلومینیم‌دار یا سیلیسیمی به وسیله افزایش توانایی گرافیت‌زایی مذاب افزایش می‌یابد [۱۰]. محدوده وسیعی از خواص مکانیکی با استفاده از عملیات حرارتی آستمبر در هر دو نوع چدن قابل دستیابی است. چدن‌های خاکستری آستمبر آلومینیم‌دار یا سیلیسیمی استحکامی بیش از ۳۰۰ مگاپاسگال و ازدیاد طولی به میزان ۱ درصد را از خود نشان می‌دهد [۱۰]. هدف از این تحقیق، بررسی اثر میزان آلومینیم و متغیرهای عملیات حرارتی آستمبر بر استحکام کششی و سختی چدن خاکستری است.

۲- روش تحقیق

به منظور بررسی اثر آلومینیم ابتدا ترکیب شیمیایی مذاب مطابق جدول (۱) تهیه شد.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی مذاب تهیه شده (درصد وزنی).

C	Si	Mn	S	P	Cu
3.2	2.2	0.37	0.04	0.04	0.12

عملیات حرارتی آستمبر برای چدن‌ها با یک مرحله عملیات حرارتی، در دمای آستنیت کردن بالا شروع می‌شود که در نتیجه ساختار زمینه را به آستنیت تبدیل می‌کند. این مرحله با کوئنچ کردن قطعه، در یک حمام نمک یا روغن با دمای ثابت در محدوده دمایی تشکیل بینایت، و نگهداری قطعه در این دما برای مدت زمان معین و سپس سرد کردن تا دمای اتاق دنبال می‌شود [۷]. استحاله آستمبر در چدن‌ها شامل ۲ مرحله است که با استحاله بینیتی یک مرحله‌ای در فولاد متفاوت است. به این دلیل نام چدن آستمبر به چدن بینیتی ترجیح داده می‌شود تا بر اهمیت اختلافات ریزساختار تاکید شود. در واقع به علت غلظت بالای کربن و سیلیسیم در چدن‌ها، استحاله آستمبر در چدن‌ها متفاوت با فولادهاست [۱].

در دماهای پایین آستمبر؛ که میزان نفوذ کربن کمتر است، ساختارهای فریتی خیلی ظریف، آستنیت پایدار شده و رسوب همزمان کاربیدها در فریت تشکیل می‌شوند. صفحات مجزای فریت؛ که با لایه‌های نازک آستنیت اشباع شده از کربن از یکدیگر جدا شده‌اند، در مرز دانه‌های آستنیت هسته‌زایی کرده و رشد می‌کنند. همان‌طور که واکنش پیش می‌رود نفوذ در جلوی صفحات فریتی مشکل‌تر شده و رشد صفحات متوقف می‌شود که در نتیجه زمینه دوگانه آستنیتی-فریتی؛ که آسفریت نامیده می‌شود، ایجاد گردد. کربن بالای موجود در چدن نشکن به تشکیل چنین ساختاری با کاهش رشد صفحات فریتی و ثبات آستنیت تمایل دارد. چون آستنیت در درجه حرارت پایین ناپایدار است، در نهایت به فریت و سمانتیت کروی خیلی ریز تحول می‌یابد. این تحول به وسیله میزان سیلیسیم بالای موجود در آلیاژ؛ که تشکیل کاربید را متوقف می‌سازد، به تاخیر می‌افتد [۱۱]. در صورتی که زمان نگهداری در درجه حرارت آستمبر کافی نباشد آستنیت به طور کامل از کربن غنی نشده و به واسطه سرد کردن بعدی به طور کامل و یا جزئی به مارتنزیت تبدیل می‌شود. در زمان نگهداری طولانی نیز آستنیت غنی از کربن به دو فاز پایدارتر فریت و کاربید تجزیه شده و به عنوان مرحله سوم استحاله شناخته می‌شود. به دلیل کاهش شدید انعطاف‌پذیری و چقرمگی، از اجرای مرحله سوم استحاله خودداری می‌شود [۱۴].

ساختار یکنواخت و مناسب آسفریتی در محدوده زمانی مشخصی که به دهانه فرایند (Processing Window) معروف است، ایجاد می‌شود (مرحله دوم استحاله). به عبارت دیگر، حضور آستنیت ناپایدار در مرحله (۱) که به تشکیل مارتنزیت منجر می‌شود و حضور کاربید در واکنش مرحله (۲) آستمبر

در مرحله عملیات حرارتی، ابتدا نمونه‌ها در دو دمای ۸۵۰ و ۹۰۰ درجه سانتیگراد و به مدت ۲ ساعت در کوره‌های الکتریکی مافلی آستنیت شده‌اند. پس از کامل شدن عملیات آستنیت‌ها، نمونه‌ها به سرعت به کوره حمام نمک در دماهای ۲۷۵ درجه سانتیگراد منتقل و به مدت ۱، ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ دقیقه در حمام نمک (نیترات آمونیم) در هر یک از دماهای مذکور تحت فرایند آستمبر قرار گرفت. نمونه‌ها پس از خارج شدن از حمام نمک در هوا سرد شدند.

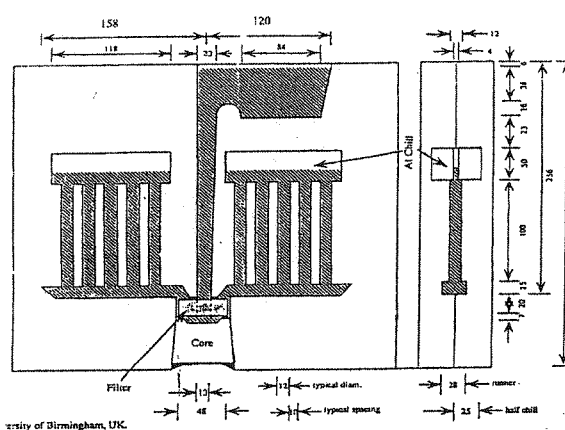
نمونه‌های آستمبر شده با دستگاه کشش آلمانی مدل ZWICK، ۲۵ تن و مجهز به کرنش سنجی (اکستنسومتر) با دقت هزارم میکرون آزمایش شد. نرخ کرنش برای آزمایش‌ها $(1/sec) \times 10^{-3}$ انتخاب شد. برای هرکدام از حالات، دو نمونه تحت آزمایش کشش قرار گرفت. برای اندازه‌گیری سختی نمونه‌های آستمبر شده، از روش سختی سنجی ویکرز استفاده شد. سختی‌های به دست آمده میانگین حداقل سه نقطه می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ریزساختار نمونه‌های آستمبر شده

آستمبر کردن در دمای پایین، $275^\circ C$ باعث تشکیل مورفولوژی خاصی از فریت بینایتی به نام فریت بینایتی پایینی در ساختار آلیاژها می‌شود. شکل (۳) ریزساختار نمونه‌های حاوی ۱ و ۲ درصد وزنی آلومینیم را که در دمای $275^\circ C$ به مدت ۶۰ دقیقه آستمبر شده‌اند، نشان می‌دهد (به دلیل اینکه بعضی تصاویر در حالت bright field تهیه شده است، رنگ گرافیت‌ها در این تصاویر روشن است). ریزساختار این نمونه‌ها حاوی سوزن‌های فریت بینایتی پایینی و آستنیت باقیمانده است. فرایند رشد فریت بینایتی پایینی با جوانه‌زنی لایه به لایه صفحه‌های فریت بینایتی در درون دانه‌های آستنیت آغاز می‌شود. همچنین در چدن‌های خاکستری وجود گرافیت لایه‌ای با سطح زیاد باعث می‌شود که مکان‌های جوانه‌زنی برای سوزن‌های فریت بینایتی بیشتر باشد. در درجه حرارت‌های پایین آستمبر امکان قرارگیری آستنیت تحت تبرید زیاد فراهم می‌شود و در نتیجه، میزان نفوذ کربن بسیار کم است. همچنین در دماهای آستمبر پایین ($275^\circ C$) به دلیل اینکه سرعت جوانه‌زنی سوزن‌های فریت بیش از سرعت رشد آن‌هاست مقدار زیادی سوزن‌های ظریف فریتی در ساختار به وجود می‌آید. به دلیل سرعت نفوذ کم کربن در این دما مقدار آستنیت باقیمانده کم است و سوزن‌های فریت بینایتی از کربن فوق اشباع هستند که این کربن ممکن است بعداً به صورت کاربید رسوب کند.

برای ذوب از کوره القایی بدون هسته فرکانس پایین ۱۰۰ کیلویی استفاده شد. چهار پاتیل ۴۰ کیلوگرمی از مذاب تهیه و به هر کدام به ترتیب ۱، ۲ و ۴ درصد آلومینیم (کابل‌های آلومینیمی با خلوص ۹۹/۹۹٪) افزوده شد (از یکی از پاتیل‌ها برای تهیه نمونه شاهد استفاده شد). مذاب در دمای ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد در پاتیل ریخته شد و سپس آلومینیم به داخل مذاب فرو برده شد (علت انتخاب دمای فوق‌گداز این است که با افزودن آلومینیم به مذاب دمای آن افت می‌کند). پس از جوانه‌زایی مذاب با فروسیلیسیم ۷۵٪ (به میزان ۰/۵ درصد وزنی) ریخته‌گری در دمای ۱۴۰۰ درجه سانتیگراد و در داخل قالب تهیه شده به روش CO_2 به انجام رسید. تصویر مدل استفاده شده در شکل (۱) آمده است.



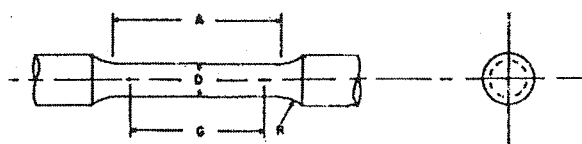
شکل (۱): نمای شماتیکی از قالب استفاده شده در آزمایش (Campbell-1998)

نمونه‌ها تا ابعاد استاندارد (ASTM A370) تراشکاری شد (شکل (۲) و جدول (۲)). برای جلوگیری از اکسیداسیون در حین عملیات حرارتی آستمبر سطح نمونه‌ها با سرامل؛ که پوششی تجاری حاوی اکسید زیرکونیم است، پوشانده شد.

جدول (۲): ابعاد استاندارد ASTM A370 استفاده شده برای نمونه کشش

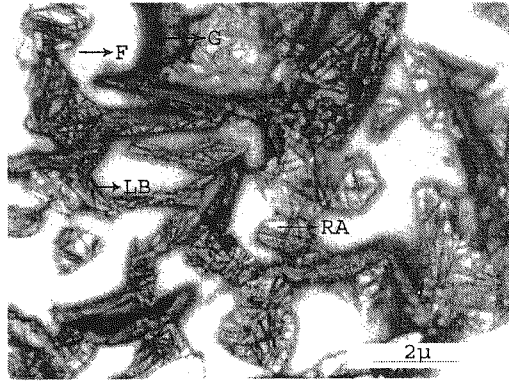
A(mm)	D(mm)	R(mm)	G(mm)
45	$D=8.75 \pm 0.18$	R=6	$G=35 \pm 0.1$

مشخصات ابعاد در شکل (۲) تعریف شده‌اند.

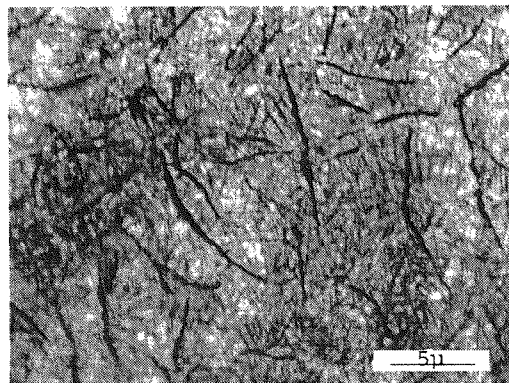


شکل (۲): شماتیکی از نمونه ماشینکاری شده

آستنیته به 900°C دیگر فریت آزاد در ساختار نمونه‌های حاوی ۴ درصد وزنی آلومینیم مشاهده نمی‌شود.



الف



ب

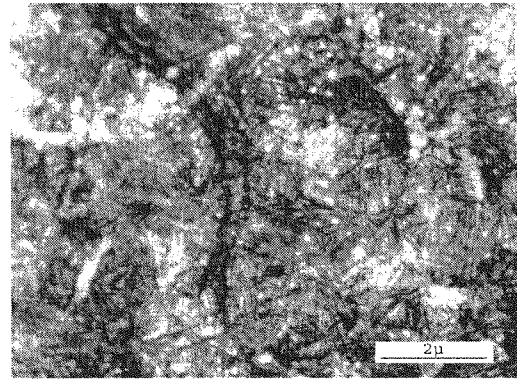
شکل (۴): ریزساختار نمونه‌های حاوی ۴ درصد آلومینیم که در دمای 275°C درجه سانتیگراد به مدت ۱۲۰ دقیقه آستمپر شده‌اند. در شکل گرافیت با G، آستنیته باقیمانده با RA، فریت یوکتوئید با F و بینایت پایینی با LB نشان داده شده‌اند.

الف- نمونه آستنیته شده در دمای 850°C به مدت ۲ ساعت
ب- نمونه آستنیته شده در دمای 900°C به مدت ۲ ساعت

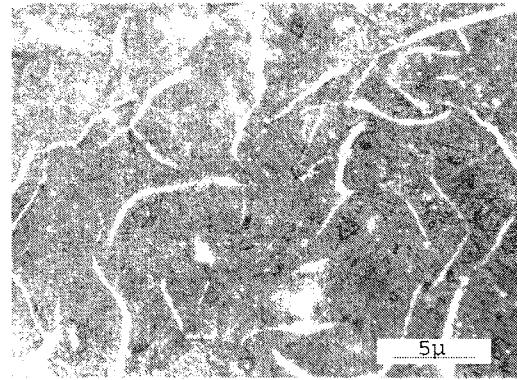
۳-۲- اثر میزان آلومینیم و دمای آستنیته بر خواص مکانیکی

از مقایسه استحکام نهایی نمونه‌های آستنیته شده در دمای 850°C و 900°C می‌توان دریافت که با افزایش دمای آستنیته استحکام نهایی در نمونه غیرآلیاژی و بدون آلومینیم و آلیاژ حاوی ۴ درصد وزنی آلومینیم افزایش یافته است (شکل (۵)). گزارش شده است که در چدن‌های نشکن غیرآلیاژی افزایش دمای آستنیته باعث افزایش کربن آستنیته و در نتیجه موجب افزایش استحکام و کاهش انعطاف‌پذیری می‌شود [۹].

مطالعات ریزساختاری ثابت می‌کند که افزایش آلومینیم دمای یوکتوئید را بالا برده و منطقه آستنیته را در دیاگرام Fe-C-Al کوچک تر می‌کند. این امر باعث شده است مقدار زیادی فریت یوکتوئید در ساختار نمونه‌های حاوی ۴ درصد



الف



ب

شکل (۳): ریز ساختار نمونه‌های حاوی ۱ و ۲ درصد وزنی آلومینیم که در دمای 275°C به مدت ۶۰ دقیقه آستمپر شده‌اند

الف- نمونه حاوی ۱ درصد وزنی آلومینیم

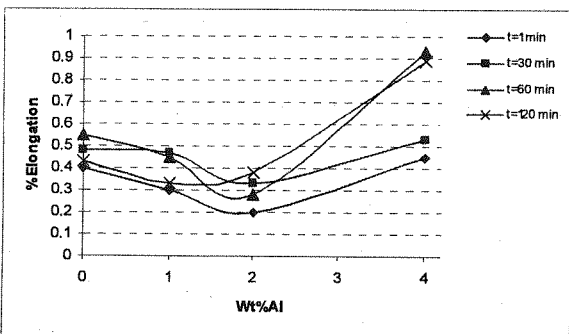
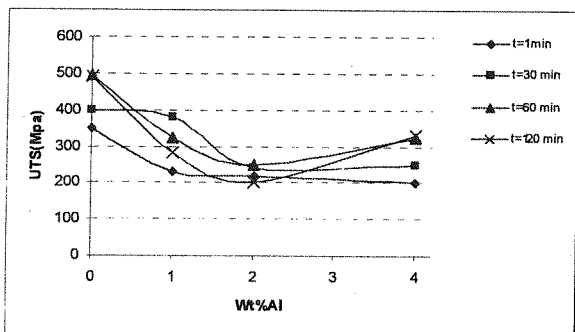
ب- نمونه حاوی ۲ درصد وزنی آلومینیم

مورفولوژی آستنیته باقیمانده در این ساختارها به شکل ورقه‌های نازکی است که در بین سوزن‌های فریتی قرار گرفته‌اند؛ همچنین مقدار کمی بلوک‌های آستنیته نیز در ساختار مشاهده می‌شود. در مجموع می‌توان گفت ریزساختار پس از عملیات حرارتی در این آلیاژها مشابه ریزساختار در دیگر چدن‌های آستمپر است.

نتایج بررسی‌های ریز ساختاری نشان داد که دمای آستنیته بر ساختار پس از عملیات حرارتی تاثیر قابل ملاحظه‌ای دارد. همان طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، ریزساختار نمونه حاوی ۴ درصد وزنی آلومینیم؛ که در دمای 850°C به مدت ۲ ساعت آستنیته شده‌اند، حاوی مقدار زیادی فریت آزاد و مقدار کمی فریت بینایتی و آستنیته باقیمانده است. این مساله احتمالاً به دلیل بالا بودن مقدار آلومینیم و پایین بودن دمای آستنیته برای این آلیاژ است و این نشان می‌دهد که آلومینیم دمای یوکتوئید را بالا برده و منطقه آستنیته را در دیاگرام Fe-C-Al کوچک تر می‌کند. در نتیجه، در این شرایط بعضی از مناطق آستنیته به اندازه کافی غنی از کربن نمی‌شود و در هنگام سرد کردن تا دمای اتاق به فریت تبدیل می‌شود. با افزایش دمای

و افزایش بیشتر آلومینیم باعث می‌شود که تعداد گرافیت‌های درشت در ساختار افزایش یابد. بالاترین میزان استحکام نهایی در کلیه زمان‌های آستمبر نیز در نمونه‌های بدون آلومینیم مشاهده می‌شود. این ویژگی به مورفولوژی گرافیت (گرافیت نوع D) در این نمونه‌ها مربوط است [۲]. این نتایج نشان می‌دهد که در چدن‌های خاکستری به دلیل پیوستگی درونی گرافیت‌های لایه‌ای ساختار زمینه نقش کوچکی را در کنترل خواص مکانیکی بر عهده دارد.

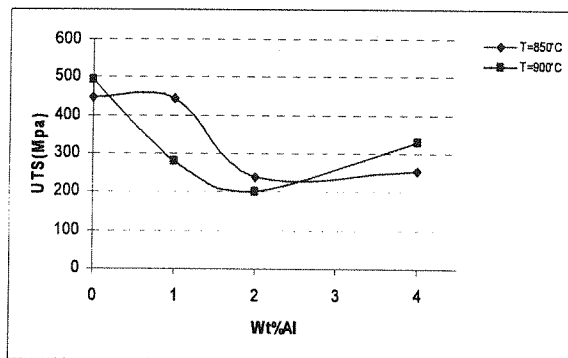
آلیاژهای حاوی ۴ درصد وزنی آلومینیم بالاترین میزان ازدیاد طول را در بین دیگر آلیاژها بویژه در زمان‌های آستمبر ۶۰ و ۱۲۰ دقیقه دارا هستند. گزارش شده است وجود گرافیت‌های ته‌گرد در چدن‌های آلومینیم‌دار باعث بهبود خواص مکانیکی در این آلیاژها می‌گردد [۲]، [۱۰]. وجود این نوع گرافیت در این آلیاژ باعث شده است که میزان ازدیاد طول افزایش یابد. به طوری که مشاهده می‌شود میزان ازدیاد طول در این آلیاژ پس از ۶۰ دقیقه آستمبر به حدود ۱ درصد رسیده است.



شکل (۷): نمودار تغییرات استحکام نهایی و درصد ازدیاد طول نمونه‌های آستمبر شده در دمای ۲۷۵ درجه سانتیگراد با افزایش میزان آلومینیم

شکل (۸) اثر میزان آلومینیم را بر سختی چدن‌های خاکستری آلومینیم‌دار پس از ۳۰ دقیقه آستمبر نشان می‌دهد. به طوری که مشاهده می‌شود با افزایش میزان آلومینیم سختی آلیاژها کاهش یافته است. احتمالاً اثر قوی تر آلومینیم در

وزنی آلومینیم؛ که در دمای ۸۵۰°C آستنتیه شده‌اند، به وجود آید و استحکام این نمونه‌ها را کاهش دهد. با افزایش دمای آستمبر به ۹۰۰°C فریت آزاد از ساختار حذف شده و استحکام نمونه‌ها افزایش می‌یابد. البته میزان استحکام در مجموع در آلیاژ حاوی ۴ درصد وزنی آلومینیم نسبت به آلیاژ حاوی ۲ درصد وزنی آلومینیم بهبود یافته است که این ویژگی به وجود مورفولوژی خاصی از گرافیت موسوم به گرافیت‌های ته‌گرد (Round ended graphite) مربوط است (شکل (۶)).



شکل (۵): نمودار تغییرات استحکام نهایی آلیاژهای آستنتیه شده در دمای آستنتیه ۸۵۰ و ۹۰۰ درجه سانتیگراد

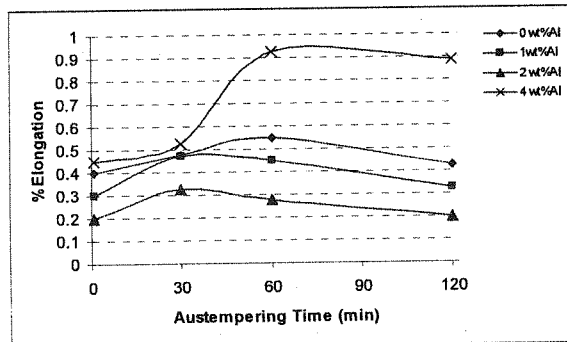
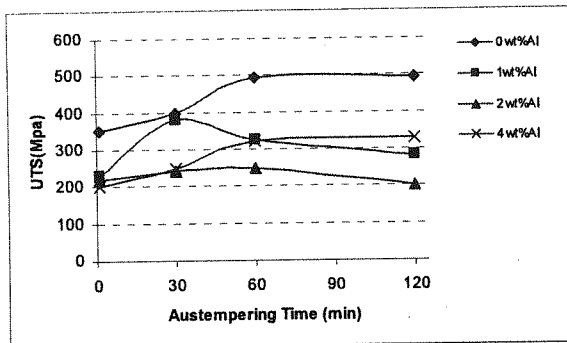


شکل (۶): مورفولوژی گرافیت در نمونه حاوی ۴ درصد وزنی آلومینیم

۳-۳- اثر میزان آلومینیم بر خواص مکانیکی

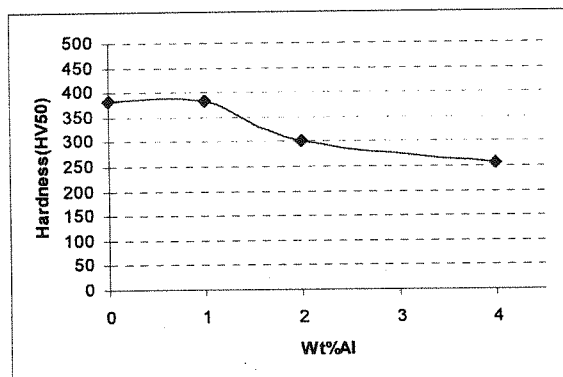
شکل (۷) تاثیر میزان آلومینیم بر استحکام نهایی و درصد ازدیاد طول در چدن‌های آلومینیم‌دار را نشان می‌دهد. آلیاژهای حاوی ۲ درصد وزنی آلومینیم در کلیه زمان‌های آستمبر استحکام کمتری نسبت به دیگر آلیاژها دارند. این مساله احتمالاً به افزایش درصد حجمی گرافیت‌ها و درشت شدن آنها در این آلیاژ مربوط می‌شود. مطالعات ریزساختاری نشان می‌دهد مورفولوژی گرافیت در چدن بدون آلومینیم تولید شده در این تحقیق از نوع D است؛ لایه‌های گرافیت به صورت رسوبات بین دندریتی تشکیل شده و جهات خاصی ندارند. با افزودن ۱ درصد وزنی آلومینیم مورفولوژی گرافیت به نوع A تغییر یافته

وجود گرافیت‌های لایه‌ای با سطح زیاد باعث می‌شود که مکان‌های جوانه‌زنی برای تیغه‌های فریت بینایی بیشتر باشد.



شکل (۹): نمودار تغییرات استحکام نهایی و درصد ازدیاد طول نمونه‌های آستمپر شده در دمای ۲۷۵ درجه سانتیگراد در زمان‌های مختلف

جلوگیری از تشکیل کاربید نسبت به سیلیسیم سبب شده است که افزایش میزان آلومینیم در آلیاژها سبب کاهش سختی در آنها می‌شود.



شکل (۸): نمودار تغییرات سختی نمونه‌های آستمپر شده در دمای ۲۷۵ درجه سانتیگراد به مدت ۳۰ دقیقه با افزایش میزان آلومینیم

۳-۴- اثر زمان آستمپر بر استحکام و میزان ازدیاد طول

شکل (۹) تاثیر زمان آستمپر بر استحکام و درصد ازدیاد طول را در آلیاژهای حاوی مقادیر مختلفی از آلومینیم نشان می‌دهد. در زمان‌های کوتاه آستمپر وجود زمینه غالب مارتنزیتی دلیل شکست زود هنگام نمونه‌هاست. سختی و شکنندگی فاز مارتنزیت باعث تردی بیش از حد نمونه می‌شود. با افزایش زمان آستمپر به دلیل اشباع شدن آستنیت از کربن و کاهش دمای تبدیل آن به مارتنزیت، مارتنزیت از ساختار حذف می‌شود. همان طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود در آلیاژهای حاوی ۱ درصد وزنی آلومینیم استحکام نهایی و درصد ازدیاد طول پس از ۳۰ دقیقه به حداکثر مقدار خود می‌رسد و افزایش زمان آستمپر تا ۶۰ دقیقه باعث کاهش میزان استحکام و درصد ازدیاد طول شده است؛ لذا شاید بتوان چنین استنباط کرد که دهانه فرایند (Processing window) در این آلیاژها بسیار کوتاه است و مرحله سوم آستمپر تقریباً پس از پایان مرحله اول آغاز می‌شود. در آلیاژ حاوی ۲ درصد وزنی آلومینیم دهانه فرایند آستمپر محدوده زمانی ۳۰ تا ۶۰ دقیقه است و افزایش بیشتر زمان آستمپر به ۱۲۰ دقیقه در این آلیاژها باعث افت خواص کششی نمونه‌ها شده است. این مساله احتمالاً نشان دهنده شروع واکنش مرحله سوم آستمپر می‌باشد. این مرحله از عملیات حرارتی آستمپر باعث کاهش جزئی در میزان ازدیاد طول می‌شود. در آلیاژهای بدون آلومینیم و حاوی ۴ درصد وزنی آلومینیم دهانه فرایند محدوده زمانی ۶۰ تا ۱۲۰ دقیقه است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد سرعت مرحله اول واکنش آستمپر در چدن‌های خاکستری بیش از چدن‌های نشکن است. این مساله شاید به این دلیل باشد که

۴- نتایج

- ۱- استحاله آستمپر در چدن‌های آلومینیم‌دار مشابه چدن‌های خاکستری سیلیسیمی است.
- ۲- به نظر می‌رسد محدوده پایداری آستنیت در چدن‌های آلومینیم‌دار به دماهای بالاتری انتقال می‌یابد به طوری که آلیاژ حاوی ۴ درصد وزنی آلومینیم در دمای ۸۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲ ساعت کاملاً آستنیتیته نمی‌شوند.
- ۳- میزان ازدیاد طول چدن‌های خاکستری آستمپر شده با افزودن ۴ درصد وزنی آلومینیم به آنها افزایش می‌یابد. این خاصیت احتمالاً به وجود گرافیت‌های ته‌گرد در این چدن‌ها ارتباط دارد.
- ۴- مرحله اول استحاله آستمپر در چدن‌های حاوی ۱ و ۲ درصد وزنی آلومینیم پس از ۳۰ دقیقه و در آلیاژهای حاوی ۰ و ۴ درصد وزنی آلومینیم پس از ۶۰ دقیقه کامل می‌شود.

- [۱] فراچی، محمدعلی؛ اثر آنتیموان بر خواص چدن‌های نشکن آستمپر، دانشکده مهندسی مواد دانشگاه علم و صنعت ایران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۸۲.
- [۲] شجاعی، احسان؛ بررسی اثر میزان آلومینیم و عملیات آستمپر بر ساختار و خواص کششی چدن خاکستری، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه علم و صنعت ایران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۸۳.
- [۳] J.Pelleg, "Aluminum-treated cast iron", The British Foundryman, pp. 349-355, September 1962
- [۴] S.M.A. Boutorabi, "Austempered Cu and Ni Alloyed Aluminum Ductile Iron", Metall. 52 Jahrgang, No.10, pp.81-88 1998.
- [۵] S.M.A. Boutorabi, J.M.Young, V.Kondic, "Ductile Aluminum Cast Iron", Cast Metals, Vol. 5, No. 3, pp. 122-129, 1992.
- [۶] S.M.A. Boutorabi, J.M.Young, V.Kondic, "Hardness and Tensile Properties of Austempered Aluminum Containing Ductile Iron", Cast Metals, Vol.6, No.3, pp. 170-174, 1993.
- [۷] D.Krishnaraj, S.Seshan, "Influence of Austempered Variables on the Structure and Properties of Unalloyed ADI", AFS Transaction, pp 767-775, 1995.
- [۸] S.C.Lee, C.H.Hsu, C.C.Chang, "Influence of Casting Size and Graphite nodule Refinement on Fracture Toughness of Austempered Ductile Iron", Metallurgical and Materials Transaction A, Vol. 29A, pp 2511-2521, 1998.
- [۹] E.Dorazil, "Mechanical properties of austempered ductile iron", Foundry M&T, pp.36-45, 1986.
- [۱۰] S.M.A. Boutorabi, T.Din, "Microstructure and Mechanical properties of As Cast and Austempered Si and Al Containing grey Cast Irons", International Journal of Engineering Iran University of Science & Technology, Vol. 8, No. 1a, pp 2333 1997.
- [۱۱] K.L.Hayrynen, S.M.Loftus, R.L.May, D.j.Moore, K.B.Rundman, "Microstructural Study of Ausformed-Austempered Ductile Iron", AFS Transaction, pp 157-161, 1995.
- [۱۲] F.Martinez, D.M.Stefanescu, "Properties of Compacted/Vermicular Graphite Cast Irons in the Fe-C-Al System by Ladle and In-mold Treatment", AFS Transaction, pp. 593-606, 1983.
- [۱۳] M.Ghoreshy, V.Kondic, "Structure and Mechanical and Casting properties of Fe-C-Al Cast Iron", Solidification Technology in the Foundry and Cast House, Metals Society, pp. 562-568, 1983.
- [۱۴] M.Bahmani, R.Elliott, N.Varahram, "The Austempering Kinetic and Mechanical Properties of an Austempered Cu-Ni-MoMn Alloyed ductile Iron", Journal of Materials Science, Vol.32, pp 4783-4791, 1997.