

به نام خدا



مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

www.Iran-mavad.com



Investigation of austempering temperature on GGG70 ductile iron for crankshaft of Peugeot 405

A.Mohammadpour, M.Khalilpou, N. Alavi, G. Gholamhoseinpour, M. Khakpour

Abstract:

Austempering is a special isothermal heat treatment that can be applied to ferrous materials for increased strength and toughness. The properties of austempered ductile iron are dependent on both chemistry and heat treatment. In this study Different cycles of austempering process applied Due to the effect of heat treatment cycle on the metal matrix structure and tensile properties of GGG70 S.G. iron for of Peugeot 405 crankshaft. This process has been done in different temperature 280,300,320,350 and 365°C.

the microstructure and mechanical properties of samples have been studied by OEM and tensile test respectively. Finally Surface fraction investigated by SEM. The results show, ductile cast iron undergoes a remarkable transformation when subjected to the austempering heat process. According to tensile and hardness test yield strength, tensile strength and hardness decrease with increasing of austempering temperature.

Key words: Austempering, S.G. Iron,Crankshaft, SEM

بررسی اثر دمای آستمپرینگ روی چدن GGG70 برای قطعه میل لنگ پژو ۴۰۵

ابوالقاسم محمدپور^۱، مقداد خلیل پور^۲، نبی الله علوی^۳، غلامحسین غلامحسین پور^۴، مریم خاکپور^۵

چکیده:

عملیات آستمپرینگ روی فلزات آهنی جهت افزایش استحکام و تافنس در صنایع مختلف بکار می‌رود. در این تحقیق نیز به منظور بهبود خواص چدن نشکن GGG70 برای میل لنگ پژو ۴۰۵، عملیات آستمپر جهت تولید چدن های ADI در دماهای مختلف روی نمونه های ریختگی به شکل Y- بلوک انجام شد. ریز ساختار نمونه های ریختگی و آستمپر شده با استفاده از میکروسکوپ نوری مورد ارزیابی قرار گرفت. خواص مکانیکی نمونه ها توسط آزمون های سختی، کشش و ضربه تعیین شد. در انتها نیز سطح شکست نمونه های ضربه و آستمپر توسط میکروسکوپ الکترونی SEM بررسی شد. تصاویر میکروسکوپ نوری نشان داد که ریز ساختار نمونه های آستمپر شده در دماهای ۲۸۰، ۳۰۰، ۳۲۰ و ۳۵۰ درجه سانتی گراد شامل فریت سوزنی و آستنیت باقی مانده است. با کاهش دمای آستمپرینگ ساختار فریت سوزنی ریزتر و آستنیت باقیمانده کاهش یافت. در حالی که برای نمونه ی آستمپر شده در دمای ۳۶۵ درجه سانتی گراد ریز ساختار شامل فریت -پرلیت بود. علاوه بر این نتایج آزمون های مکانیکی نشان داد که با افزایش دمای آستمپرینگ سختی، استحکام تسلیم و کششی کاهش می یابد، در حالیکه مقدار انرژی ضربه و درصد تغییر طول افزایش می یابد.

کلمات کلیدی: چدن نشکن، آستمپر، فریت سوزنی، آستنیت باقیمانده

^۱. کارشناس واحد تحقیق و توسعه کارخانه فولادین ذوب آمل

^۲. ریاست واحد تحقیق و توسعه کارخانه فولادین ذوب آمل

^۳. مدیریت واحد تحقیق و توسعه کارخانه فولادین ذوب آمل

^۴. کارشناس واحد تحقیق و توسعه کارخانه فولادین ذوب آمل

^۵. کارشناس واحد تحقیق و توسعه کارخانه فولادین ذوب آمل

مقدمه:

چدن نشکن آستمپر شده (ADI)، به عنوان ماده مهندسی مهم به دلیل خواص جالب آن نظیر انعطاف‌پذیری خوب، استحکام بالا، مقاومت به سایش و استحکام خستگی، مورد توجه قرار گرفته است، به طوری که چقرمگی شکست آن با فولادهایی با آلیاژ متوسط و کم آلیاژ عملیات حرارتی شده قابل مقایسه است (John, Keoug, (2011) و (Keough, Hayrynen (2000)).

مراحل آستمپر کردن چدن نشکن به ترتیب و به طور خلاصه عبارتست از: آستنیته کردن در دمایی نزدیک به 900°C ، نگهداری در دمای آستنیته کردن (معمولاً ۱ تا ۲ ساعت)، کوئینچ تا دمای آستمپرینگ، نگهداری در دمای آستمپرینگ (معمولاً بین ۲ تا ۴ ساعت) و خنک کردن تا دمای اتاق با کنترل دقیق این فرآیند می‌توان ماده‌ای با ریز ساختار مطلوب و در نتیجه خواص مکانیکی فوق‌العاده به دست آورد (Eric, et al (2006)).

فرآیند آستمپرینگ شامل ۲ مرحله است، نخستین استحاله که طی آن آستنیته اولیه به فریت (α) و آستنیته پرکربن پایدار (γ_{CH}) تبدیل می‌گردد. عموماً به عنوان مرحله I واکنش آستمپرینگ شناخته می‌شود. اگر قطعه ریخته‌گری در دمای آستمپرینگ به مدت خیلی طولانی نگهداری شود مرحله II واکنش شروع می‌شود که طی آن آستنیته پر کربن به فریت و کاربید تجزیه می‌شود (Yang, Putatunda (2004)).

تحقیقات متنوعی بر روی تاثیر دما و زمان آستنیته کردن در خواص حاصل پس از عملیات آستمپر کردن، انجام شده است. به طور کلی افزایش دمای آستنیته کردن باعث شتاب بخشیدن به فرآیند همگن سازی شده و قابلیت انحلال کربن در فاز آستنیته را افزایش می‌دهد، بدین ترتیب قابلیت آستمپرپذیری بالا می‌رود (Putatunda. S. K, Gadicherla. P. K (1999) و (Hung, Chen,) (Lui. (2006)).

از جمله عواملی که تا حد زیادی تعیین‌کننده ریز ساختار چدن نشکن آستمپر شده و در نتیجه خواص مکانیکی آن است، ترکیب شیمیایی چدن و شرایط عملیات حرارتی آن است. اصولاً مقدار کربن در چدن‌های نشکن بستگی به مشخصه قطعات تولیدی دارد و می‌تواند بین ۳-۴ درصد متغیر باشد. معمول‌ترین عناصر آلیاژی که در تولید چدن با گرافیت کروی مورد استفاده قرار می‌گیرد مس، نیکل، مولیبدن و قلع است. این عناصر پایدارکننده گرافیت می‌باشند و از تشکیل کاربید جلوگیری می‌کنند ولی چنانچه مقدار منگنز و یا مولیبدن زیاد باشد. در اثر تمرکز این عناصر، کاربید تشکیل شده و خواص مکانیکی افت پیدا می‌کند. به طور کلی، عناصر آلیاژی فوق‌همگی اثر خوبی بر روی قابلیت آستمپرینگ، به خصوص در ضخامت‌های بیشتر، می‌گذارند (Hsun, Li Chen, Jung (2007) و (Prasad Rao, Putatunda (2003)).

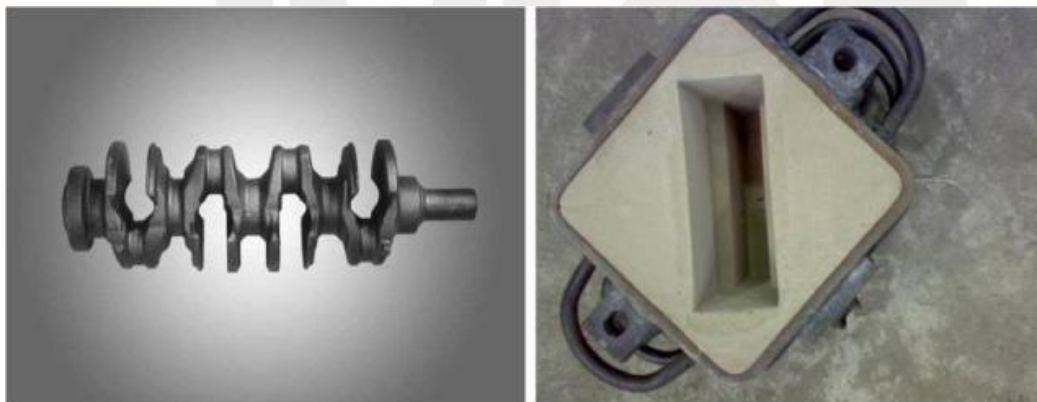
مهم‌ترین پارامتر کنترل‌کننده خواص مکانیکی چدن‌های ADI دمای آستمپرینگ است. این پارامتر، عامل کنترل‌کننده اندازه و تعداد دانه فریتی است که در زمینه آستنیته وجود دارد. به طور کلی در دماهای بالای آستمپرینگ، به دلیل کم بودن تحت تبرید، جوانه زنی فریت کمتر و ساختار درشت می‌باشد که در نتیجه آن استحکام کم و انعطاف‌پذیری زیاد می‌شود. از طرف دیگر، دماهای

پایین آستمپرینگ ساختار بسیار ریز با استحکام زیاد و انعطاف پذیری کم را ایجاد می‌کند (Hayrynen, Brandenburg, Keeough (2002)).

هدف از تحقیق حاضر بررسی دمای آستمپرینگ روی خواص مکانیکی و ریز ساختار چدن های داکتیل GGG70 و قابلیت آن برای آستمپر شدن می باشد.

روش آزمایش

به منظور بررسی تاثیر عملیات آستمپرینگ روی ریزساختار و خواص مکانیکی چدن داکتیل GGG70 نمونه های Y-بلوک ریخته گری شد. این جنس از چدن داکتیل برای تولید میل لنگ خودروهای سواری پژو و سمند بکار می رود. نمونه های ریختگی بعد از آماده سازی، در سیکل های مختلف تحت عملیات حرارتی آستمپرینگ در حمام نمک مذاب قرار با دماهای مختلف گرفتند. مذاب چدن نشکن با ترکیب شیمیایی استاندارد GGG70 با استفاده از کوره القایی تهیه شد. مواد ورودی به کوره شامل ۶۰٪ ضایعات چدن نشکن، ۴۰٪ قراضه آهن و استفاده از عناصر آلیاژی فروسیلیس، کربن و مس برای تنظیم ترکیب بوده است. نمونه های چدنی اولیه بر اساس استاندارد ASTM با شماره A897M-03 به صورت Y-بلوک، به ابعاد $210 \times 170 \times 30$ mm به روش CO₂ قالبگیری و به کمک ذوب کوره القایی ریخته گری شد. شکل ۱ قالب CO₂ تهیه شده را نشان می‌دهد که آماده بار ریزی می باشد.



شکل ۱. قالب CO₂ Y-بلوک سمت راست و میل لنگ ریختگی پژو ۴۰۵

جدول ۱. درصد وزنی عناصر موجود در نمونه های ریختگی

C	Si	Cu	Mo	Mn	Mg
۳/۵۴	۲/۴۵	۰/۸۷	۰/۵	۰/۱۶	۰/۰۴

به منظور عملیات آستمپرینگ، از قسمت پایین Y-بلوک های ریختگی، نمونه های مکعب مستطیلی به ابعاد $150 \times 20 \times 15$ mm به کمک تراشکاری تهیه شد. هر کدام از نمونه های مکعب مستطیلی در یک کوره مقاومتی در دمای 900°C به مدت ۶۰ دقیقه آستنیت شدند. پس از آستنیت کردن، نمونه ها از کوره خارج و به سرعت در حمام نمک AS140 قرار گرفت. نمونه های مختلف به

منظور آستمپر کردن، به حمام نمک در دماهای ۲۸۰، ۳۰۰، ۳۲۰ و ۳۶۵°C منتقل شده و سپس تا دمای اتاق در هوا خنک شدند. مدت زمان آستمپر کردن نمونه‌ها، ۱۲۰ دقیقه در نظر گرفته شد.

ریز ساختار نمونه‌های حکاکی شده توسط میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. سطح شکست نمونه‌های ضربه نیز با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی VEAG//TESCAN بررسی شد.

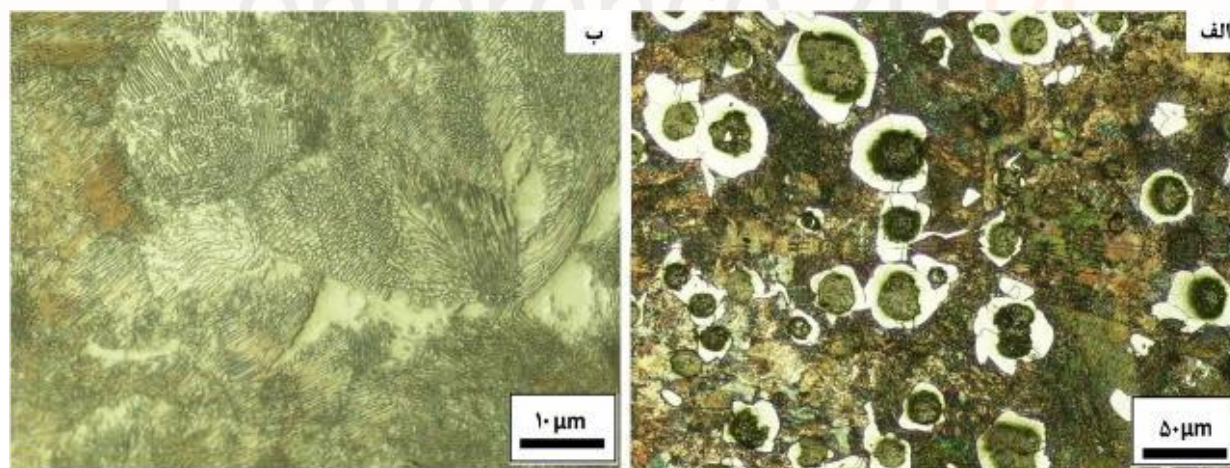
به منظور بررسی خواص مکانیکی آزمون‌های کشش، ضربه و سختی انجام شد. برای هر آزمون در هر کدام از دماهای آستمپرینگ سه نمونه مورد استفاده قرار گرفت و میانگین داده‌های بدست آمده گزارش شد. نمونه‌های مورد استفاده در آزمون کشش، مطابق با استاندارد ASTM با شماره E8M آماده سازی شد.

آزمون ضربه نیز جهت ارزیابی و مقایسه مقدار جذب انرژی ضربه برای نمونه‌ها با سیکل‌های مختلف عملیات حرارتی مطابق استاندارد E23 و A897 انجام شد. با استفاده از دستگاه سختی سنج برینل سختی نمونه‌ها اندازه گیری شد. قطر فرو رونده ۱۰ میلیمتر و نیروی اعمالی برابر ۳۰۰۰ kg.f بوده است.

نتایج و بحث

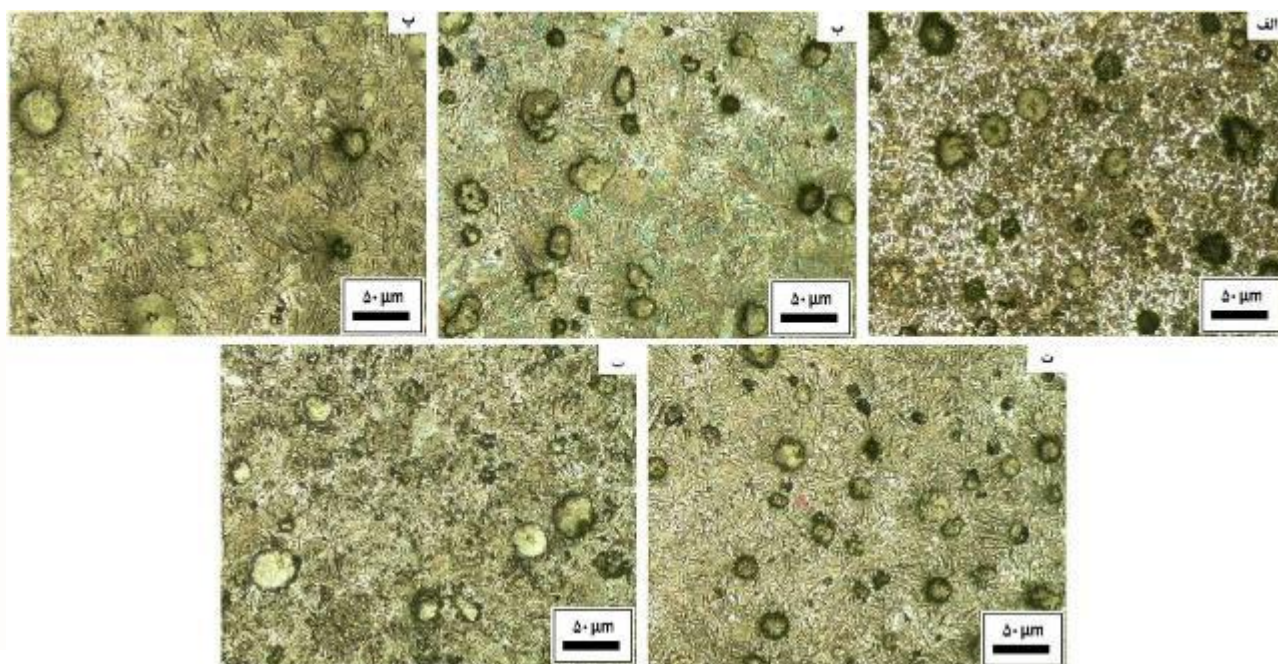
بررسی ریز ساختار چدن‌های نشکن آستمپر

یکی از عوامل موثر روی خواص مکانیکی چدن‌های نشکن، ریزساختار زمینه است. ریز ساختار نمونه ریختگی چدن نشکن پس از متالوگرافی، پرلیتی-فریتی شامل حدود ۹۰ درصد پرلیت و ۱۰٪ فریت است (شکل ۲).



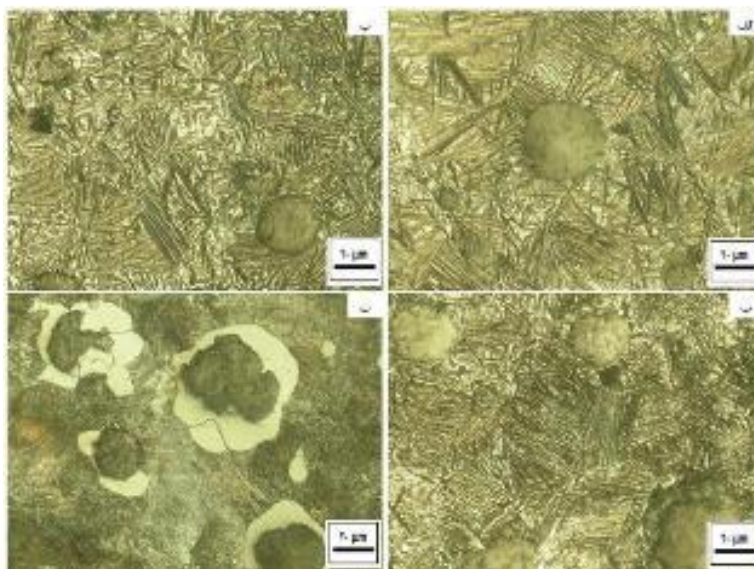
شکل ۲. ریزساختار میل لنگ ریختگی از جنس چدن نشکن GGG70 در بزرگنمایی ۱۰۰ و ۴۰۰ برابر.

ریز ساختار نمونه‌های آستمپر در شکل ۳ آورده شد. تیغه‌های فریت به رنگ تیره و آستنیت باقیمانده موجود در ریزساختار که تیغه‌های فریتی را احاطه کرده است، به رنگ روشن مشخص است. نمونه‌ی آستمپر شده در دمای 365°C دارای ریز ساختار کاملاً متفاوتی نسبت به ساختار آسفritی (ساختار حاوی فریت سوزنی و آستنیت باقی مانده) مورد انتظار دارد و می‌توان گفت که ساختار آن بجای آسفrit، ساختاری پرلیتی-فریتی با ۱۲ درصد فریت مرزدانه‌ای می‌باشد. فاز روشن نشان داده شده در شکل ۳ مقدار نسبتاً زیاد فاز فریت را در این نمونه تأیید می‌کند. در بعضی از نواحی نیز ساختار آسفrit مشاهده می‌شود. تصاویر شکل ۳ تا ث نمونه‌های دیگر آستمپر شده شامل ریزساختار آسفrit می‌باشند.



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های آستمپر شده در دماهای الف) 365°C ، ب) 350°C ، پ) 320°C ، ت) 300°C ، ث) 280°C .

به نظر می‌رسد که نمونه‌ی آستمپر شده در دمای 365°C با توجه به دمای بالا و مدت زمان عملیات حرارتی طولانی، از پنجره فرآیند عملیات حرارتی آستمپرینگ عبور کرده و وارد واکنش مرحله دوم آستمپرینگ یعنی تجزیه آستنیت باقیمانده غنی از کربن شده باشد. در این صورت انتظار بر آنست که این نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های آستمپر با ساختار آسفrit خواص مکانیکی ضعیف‌تری داشته باشند.



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه های آستمپر شده در دماهای الف) ۳۵۰، ب) ۳۰۰، پ) ۲۸۰ درجه سانتی گراد و ت) نمونه ریختگی.

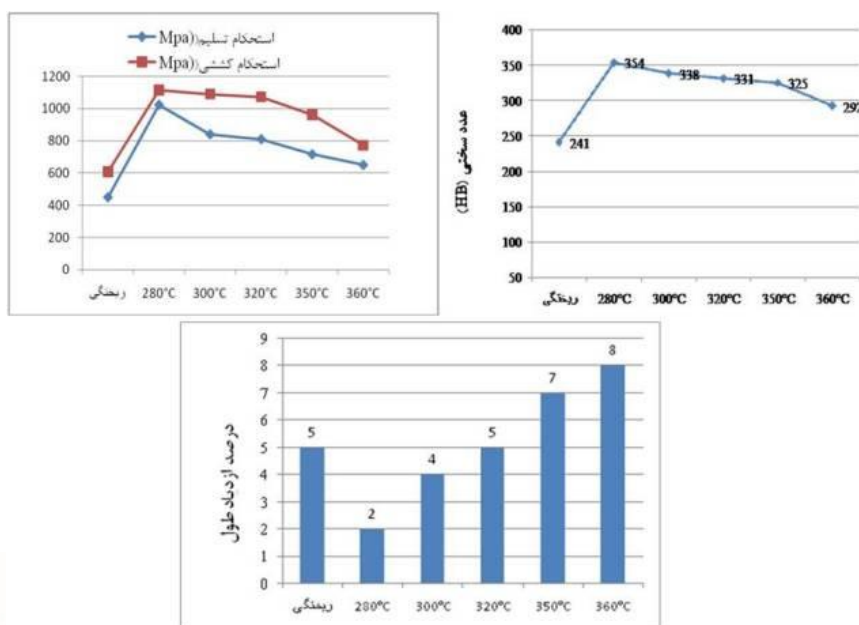
به منظور بررسی بهتر ریزساختار تصاویر میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی بالاتر در شکل ۴ برای نمونه‌های آستمپر و ریختگی نشان داده شده است.

در این بزرگنمایی تمایز بین تیغه های فریت با رنگ تیره و آستنیت باقیمانده با رنگ روشن راحت‌تر است. همانطور که مشاهده می شود درشت ترین تیغه های فریتی در نمونه آستمپر شده در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد حضور دارد. علت این امر را چنین می توان توضیح داد که در دماهای بالا به دلیل نفوذ سریعتر کربن به خارج از تیغه‌های فریتی، امکان رشد تیغه ها فراهم می شود و تیغه ها تا مرزدانه مجاور ادامه می‌یابند. با کاهش دمای آستمپرینگ از ۳۵۰ تا ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد، تیغه های فریت سوزنی کوچکتر شده و میزان آستنیت باقیمانده کاهش می یابد.

بررسی خواص مکانیکی چدن های آستمپر

آزمون سختی و کشش

یکی از مهمترین مشخصه های ارزیابی خواص فلزات جهت انتخاب مواد برای تولید قطعات صنعتی اندازه سختی و مقدار تنش تسلیم می باشد. نتایج تست سختی و کشش بدست آمده به صورت مختصر به منظور مقایسه چدن ریختگی و چدن های آستمپر شده در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. عدد سختی نمونه های ریختگی و آستمپر شده و نتایج تست کشش در دماهای مختلف به ترتیب راست، چپ و پایین.

مقادیر سختی و استحکام تسلیم و کششی نشان می دهد که با افزایش دمای آستمپرینگ این مقادیر کاهش می یابد. این افت را می توان به ریز ساختارهای تشکیل شده در حین عملیات حرارتی آستمپرینگ نسبت داد.

همانگونه که از نتایج آزمون کشش ملاحظه می شود، استحکام تسلیم و استحکام کششی تمامی نمونه های آستمپر شده از نمونه پرلیتی یا ریختگی بالاتر است و با افزایش دمای آستمپرینگ به دلیل درشت شدن ریزساختار آسفریتی استحکام تسلیم و کششی کاهش می یابد ولی در عوض ریزساختار درشت بدست آمده، افزایش درصد ازدیاد طول را به همراه داشته است.

در انتخاب مناسبترین دمای آستمپرینگ می بایست این نکته را در نظر گرفت که مشابه با آنچه در فولادهای پر کربن دیده می شود، با افزایش استحکام درصد ازدیاد طول کاهش می یابد. از این رو لزوماً افزایش استحکام بهترین راه حل نخواهد بود، چرا که در بسیاری از طراحی ها، حضور مقدار کمینه ای از ازدیاد طول الزامی است. شاید به همین دلیل است که بجای استفاده از ساختار مستحکم مارتنزیتی و ساختار نرم پرلیتی ساختارهای بینیتی و آسفریتی مورد توجه قرار گرفته اند.

آزمون ضربه

یکی از نقطه ضعف‌های انواع چدن‌ها به عنوان یک ماده مهندسی، پایین بودن میزان انرژی جذب شده قبل از شکست است. یکی از مشخصه‌های ویژه چدن‌های نشکن آستمپر میزان جذب انرژی ضربه بالای آن‌ها نسبت به چدن‌های نشکن معمولی و فولادهای فورج شده در صنایع مختلف است. در استانداردهای خودرویی این مقدار بسیار حائز اهمیت و یکی از الزامات برای پذیرش قطعات می باشد.

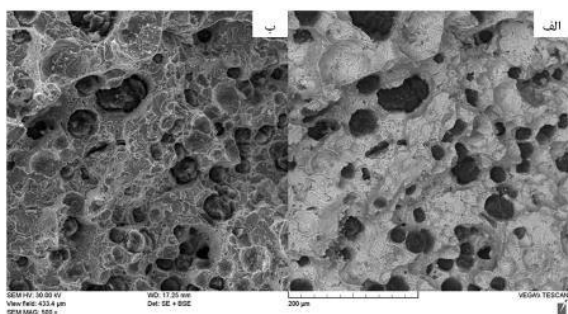
جدول ۲. نتایج آزمون ضربه نمونه های ریختگی و آستمپر شده

دمای آستمپرینگ	ریختگی	۲۸۰ °C	۳۰۰ °C	۳۲۰ °C	۳۵۰ °C	۳۶۰ °C
مقدار انرژی ضربه (J)	۲۱	۷۴	۸۶	۱۰۳	۱۲۲	۱۵۱

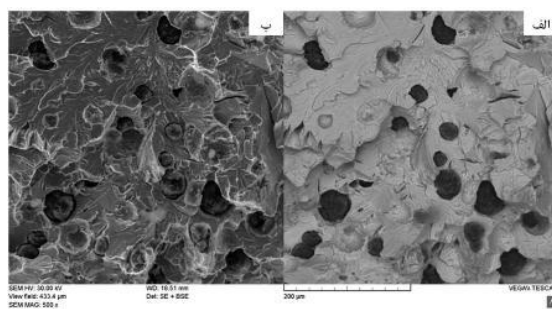
در واقع مقدار انرژی ضربه تمایل قطعه به شکست ترد را نشان می دهد. همچنین معیاری برای مقاومت ماده در برابر رشد ترک است. مقادیر مربوط به آزمون ضربه در جدول ۲ ذکر شده است. لازم به ذکر است که مطابق استاندارد ASTM نمونه های ضربه بدون فاق برای آزمون آماده سازی می شود. همانطور که نتایج آزمون نشان می دهد، با افزایش دمای آستمپر میزان جذب انرژی افزایش می یابد. میزان جذب انرژی ضربه نمونه ریختگی بسیار پایین تر از نمونه های آستمپر شده است. البته در این مورد نیز این کاهش مقادیر انرژی ضربه را می توان به تغییر ریزساختار نسبت داد، بطوری که با افزایش دمای آستمپرینگ میزان آستنیست باقی مانده افزایش می یابد و در نتیجه آن مقدار انرژی ضربه افزایش می یابد.

بررسی سطح شکست نمونه های ضربه با استفاده از میکروسکوپ SEM

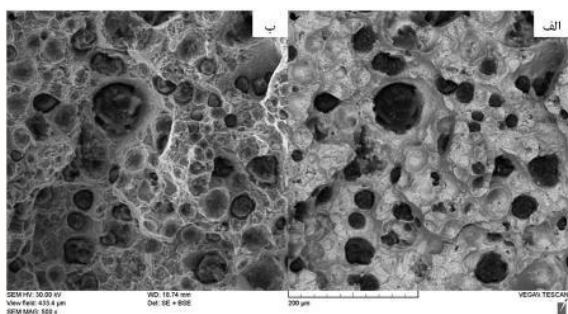
تصاویر مربوط به سطح نمونه های شکست آزمون ضربه در شکل های ۶، ۷، ۸ و ۹ نشان داده شده است. تصاویر SEM از سطح شکست نمونه های ریختگی و آستمپر نشان می دهد که با عملیات آستمپرینگ نوع شکست تغییر کرده بطوریکه نمونه ریختگی دارای سطح شکست رخ برگی (کلیواژ) است که نشانه شکست ترد می باشد. در حالیکه نمونه های آستمپر شده دارای نشانه های دیمپل هستند که بیانگر شکست داکتیل یا نرم است. با افزایش دمای آستمپرینگ دیمپل ها کوچکتر و وسعت آن در سطح شکست افزایش می یابد که آن نیز بیانگر انعطاف پذیری بیشتر نمونه های آستمپر است. این نتایج با داده های آزمون ضربه کاملاً تطابق دارد و صحه خوبی برای نتایج آن می باشد.



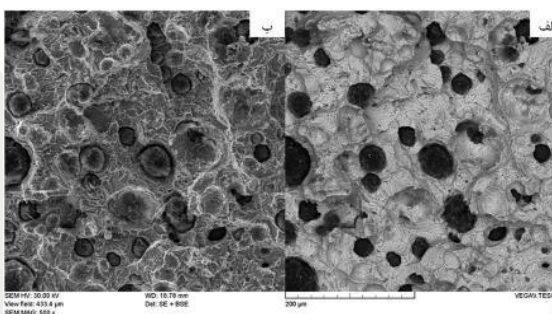
شکل ۷. سطح شکست نمونه ریختگی چدن ADI آستمپر شده در دمای ۲۸۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲ ساعت. الف) تصاویر تهیه شده با الکترون برگشتی. ب) تصاویر تهیه شده با الکترون ثانویه.



شکل ۶. سطح شکست نمونه ریختگی چدن نشکن پرلیتی. الف) تصاویر تهیه شده با الکترون برگشتی. ب) تصاویر تهیه شده با الکترون ثانویه.



شکل ۹. سطح شکست نمونه ریختگی چدن ADI آستمپر شده در دمای ۳۶۵ درجه سانتی گراد به مدت ۲ ساعت. الف) تصاویر تهیه شده با الکترون برگشتی. ب) تصاویر تهیه شده با الکترون ثانویه



شکل ۸. سطح شکست نمونه ریختگی چدن ADI آستمپر شده در دمای ۳۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲ ساعت. الف) تصاویر تهیه شده با الکترون برگشتی. ب) تصاویر تهیه شده با الکترون ثانویه.

نتیجه گیری

- با کاهش دمای آستمپرینگ از ۳۵۰ تا ۲۸۰ درجه سانتی گراد، تیغه های فریت سوزنی کوچکتر شده و میزان آستنیت باقیمانده کاهش می یابد. همچنین با ترکیب شیمیایی مورد نظر افزایش دمای آستمپرینگ بیش از ۳۵۰ درجه سانتی گراد نمونه ها گرایش به تشکیل ساختار پرلیتی و فریتی دارند.
- نتایج بدست آمده از خواص مکانیکی چدن نشکن GGG70 حاکی از آنست که با افزایش دمای آستمپرینگ سختی، استحکام تسلیم و استحکام کششی کاهش ولی مقدار انرژی جذب شده قبل از شکست و نیز درصد ازدیاد طول افزایش می یابند.
- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که سطح شکست نمونه های آستمپر شده به صورت نرم و دارای دیپل می باشد که نشان دهنده انعطاف پذیر بودن نمونه های آستمپر می باشد، در حالیکه سطح شکست نمونه ریختگی حاوی کلیواژ می باشد که تداعی کننده شکست ترد است.

- بررسی نتایج تست کشش نشان می دهد که می توان با انجام فرآیند آستمپرینگ در محدوده دمایی ۳۰۰ الی ۳۵۰ درجه سانتی گراد به ساختاری دست یافت که درصد تغییر طول مشابه با میل لنگ پژو ۴۰۵ را داشته، اما با این تفاوت که استحکام تسلیم، استحکام کششی و سختی آن به میزان زیادی بالاتر باشد.

مراجع

Eric. O, Jovanovic. M, Sidanin. L, Rajnovic. D, Zec. S,(2006). " The austempering study of alloyed ductile iron", Materials and Design, 27 , pp. 617–622.

John R. Keoug,(2011)," Austempered Ductile Iron (ADI) - A Green Alternative for India", Applied Process Inc. Technologies Div. - Livonia, Michigan, USA.

Hayrynen. K, Brandenburg. L, K.R, Keeough. J. R,(2002). "Application of Austempered Cast Irons", AFS Transaction, pp. 2-84.

Hung. F.Y, Chen. L.H, Lui. T.S,(2006) "A study on erosion of upper bainitic ADI and PDI", Wear 260, pp. 1003–1012

Hsun Hsu. C, Li Chen. M, Jung Hu. C,(2007). " Microstructure and mechanical properties of 4% cobalt and nickel alloyed ductile irons", Materials Science and Engineering, A 444, , pp. 339–346.

Keough. J. R, Hayrynen. K. L, (2000). "Automotive Applications of Austempered Ductile Iron(ADI)", "A Critical Review", SAE Technical paper Series, p. 764.

Putatunda. S. K, Gadicherla. P. K (1999)." Influence of austenitizing temperature on fracture toughness of a low manganese austempered ductile iron (ADI) with ferritic as cast structure", Materials Science and Engineering, A268, , pp. 15–31.

Prasad Rao. P, Putatunda. S. K(2003). "Investigations on the fracture toughness of austempered ductile iron alloyed with chromium" Materials Science and Engineering, A346, pp. 254-265.

Yang. J, Putatunda. S. K,(2004). "Improvement in strength and toughness of austempered ductile cast iron by a novel two-step austempering process" Materials and Design, 25, pp. 219-230.