

تحقیق در چقرمگی شکست چدن نشکن با استفاده از انتگرال J

سید محمد علی بوتراپی
استاد

غلامرضا کزازی
کارشناسی ارشد

دانشکده مواد، دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده

در این پژوهش مقادیر چقرمگی شکست (K_{Ic}) برای چدن نشکن با ساختار زمینه متفاوت در کربن معادل های مختلف (۳ / ۳.۴ / ۳ و ۳ / ۳ درصد)، با استفاده از انتگرال J محاسبه شد. جهت حصول ساختارهای مختلف از عملیات حرارتی آنیل، نرماله و آستمپر استفاده شد. آزمایشات بررسی چقرمگی شکست کرنش مسطح همچنین بر اساس استاندارد BS5447 و از نوع خم سه نقطه انجام گرفت. نتایج نشان داد که نمونه های آستمپر شده بالاترین چقرمگی شکست را دارند و در کربن معادل ۳ / ۴ % چقرمگی شکست نمونه های ریختگی و آنیل شده رقابتی نزدیک با نمونه های آستمپر شده دارند با این وجود در صورتیکه سایر خواص مکانیکی از جمله (سختی، استحکام کششی استحکام تسلیم و ...) در کنار چقرمگی شکست مورد نظر باشد، نمونه های آستمپر شده بهترین خواص را ارائه می دهند. همچنین مقایسه نتایج حاصل از آزمایش کرنش مسطح بر اساس استاندارد BS5447 و انتگرال J نشان می دهد که قابلیت اعتماد به اعداد به دست آمده در روش انتگرال J بسیار بالاتر از روش شیب ۵ درصد ارائه شده در استاندارد BS5447 است.

کلمات کلیدی

چقرمگی شکست، انتگرال J، کربن معادل، کرنش مسطح، ریزساختار

Fracture Toughness of Ductile Cast Iron Using J-Integral

S.M.A. Boutorabi
professor

G. Kazazi
Ms. c.

Material Science Department Iran University of Science and Technology

Abstract

The effects of carbon equivalents of 2.3, 3.3 and 4.3% on the microstructure, hardness and fracture toughness of a low alloyed ductile cast iron in as cast, annealed, normalised and austempered conditions have been investigated. Fracture toughness was measured using a plain-strain fracture toughness (k_{Ic}) test and also J-Integral approach.

The results show that the pearlite content increases as the CE decreases from 4.3 to 2.3%. The nodularity and nodule count also decrease with decreasing the CE%. The annealed samples show a predominantly ferritic structure. Iron with 2.3 CE% shows pearlitic microstructure. The austempered microstructure contains bainitic ferrite and retained austenite at all carbon equivalents.

The fracture toughness value (kQ and k_{Ic}) of ductile iron increases with increasing the CE% in all conditions and a maximum value is obtained in austempered condition. The hardness decreases with increasing CE% and an maximum value of 526 HV50 can be obtained at 2.3 CE% in a austempered condition.

The SEM study shows that all the fractures of austempered specimens are ductile in nature whilst all that of normalised condition are brittle. Fracture behaviour of 4.3 CE% ductile iron in as cast and annealed conditions are ductile where those of 2.3% are brittle. The iron with 3.3% shows a brittle fracture in as cast condition and a ductile fracture in annealed condition. The results show that J. integral approach can be used in measuring of k_{Ic} , particularly if the k_{Ic} values can not be achieved.

Keywords

Fracture toughness, Microstructure, Carbon equivalent Plain-Strain.

مقدمه

در سال ۱۹۶۸ J.R. Rice و همکارانش روشی به نام روش انتگرال J را جهت محاسبه مقدار چقرمگی شکست ابداع نمودند. در این روش، کل کار مورد نیاز برای شروع اشاعه ترک اندازه گیری و در نتیجه مقدار شدت تنش محاسبه می شود. Rice نشان داد که مقدار کار مورد نیاز برای شروع اشاعه ترک با سطح زیر منحنی بار جابه جایی شیار متناسب است. این کار "J" به صورت رابطه زیر محاسبه می شود:

$$J = \frac{[(\text{سطح زیر منحنی بار / جابه جایی شیار}) \times 2]}{(B \times b)} \quad (1)$$

این مقدار کار "J" با آهنگ آزاد شدن انرژی بحرانی متناسب است و با استفاده از رابطه (۲) می توان مقدار شدت تنش بحرانی (KIC) را محاسبه نمود.

$$KIC = [(J \times E) / (1 - \nu)] \quad (2)$$

روش انتگرال J به دلیل احتساب انرژی آزاد شده، برخلاف روش LEFM قادر است به راحتی شرایط الاستیک و پلاستیک نوک ترک را در نظر بگیرد. بنابراین این روش LEFM آنالیز تنش الاستیک را در نوک ترک در نظر می گیرد و برای شرایط تغییرات پلاستیکی قبل از اشاعه ترک مناسب است.

مقایسه دو روش مذکور (روش LEFM و J-Integral) را می توان به دقت در شکل (۱) مورد بررسی قرار داد. هر دو روش LEFM (E399) و انتگرال J مقادیر مشخصی از KIC را برای مواد ترد ارائه می دهند (شکل ۱ الف). روش LEFM مقدار KIC متناسب با ریشه دوم سطح زیر ABC و روش انتگرال J مقدار KIC متناسب با ریشه دوم سطح زیر A'B'C' را بدست می دهند. بنابراین در حالتی که شرایط غیر خطی بر منحنی بار - جابه جایی شیار نامشخص است (شکل ۱ ب)، می توان گفت از آنجا که سطح ABC تقریباً برابر A'B'C' است، چقرمگی شکست بدست آمده توسط روش LEFM می تواند بطور نسبی KIC معتبری را حاصل کند. برای مواد با چقرمگی شکست بالاتر (شکل ۱ ج) مشکل محسوس تر است، چرا که مقدار باری که باعث اشاعه ترک می شود نامشخص و مبهم است. غیر خطی بودن چنین منحنی هائی را می توان ناشی از تغییر شکل پلاستیک ایجاد شده در نوک ترک دانست. بنابراین استفاده از روش LEFM می تواند باعث یک گمراهی درنتیج و همچنین تخمین بسیار پائین مقدار چقرمگی شکست واقعی نمونه شود. باتوجه به شکل ۱ (ج) استفاده از روش ASTM (E399) و شیب ۵٪ مقدار چقرمگی شکست متناسب است با سطح زیر ABC که با چقرمگی شکست واقعی یعنی سطح "A''B''C''، از مقدار بسیار کمتری برخوردار است. در این حالت KQ بدست آمده تخمین بسیار پائینی از KIC واقعی است.

در این تحقیق سعی شده است که با اندازه گیری چقرمگی شکست چدن نشکن در کربن معادل های مختلف مقایسه صحیحی از مقدار این خاصیت در سه حالت با کربن معادل ۳/۴ و ۳/۳ و ۲/۳ ارائه شود و جایگاه هر یک به طور جداگانه و نهایتاً به صورت نسبی بررسی شود. باتوجه به تغییر همزمان ریزساختار در اثر عملیات حرارتی متفاوت و در صد کربن معادل مختلف، می توان در شرایط کاری مشخص هر یک از موارد بدست آمده را جهت استفاده در یک سیکل کاری و باتوجه به شرایط اقتصادی، انتخاب نمود.

۲- روش آزمایش

سه ذوب با ترکیب شیمیائی ارائه شده در جدول (۱-۱) جهت حصول کربن معادل های ۳/۴ و ۳/۳ و ۲/۳ درصد در کوره القائی ۵۰ کیلوگرمی آماده شده و عملیات کروی سازی با استفاده از NiMg 15 به مقدار ۰/۸۲ درصد و به روش ساندویچی صورت گرفت. عملیات جوانه زائی با استفاده از مواد ارائه شده در جدول (۲-۱) انجام گرفت. سیستم راهگاهی مورد استفاده برای ریخته گری ۴ نمونه Y بلوک، منطبق با تئوری سرعت بحرانی بود که در شکل (۲) آورده شده است. ۳ نمونه از ۴ نمونه Y بلوک ابتدا نحت عملیات آنیل کردن قرار گرفت و سپس همه نمونه ها جهت تهیه نمونه های آزمایش چقرمگی شکست کرنش مسطح به مقدار ۱ میلی متر مانده به اندازه واقعی ماشین کاری شدند. سپس نمونه های ماشین کاری شده تحت عملیات نهائی آنیل کردن، نرماله کردن و آستمپر کردن قرار گرفتند و در نهایت همه نمونه ها تحت ماشین کاری نهائی قرار گرفتند. سیکل عملیات آنیل، نرماله و همچنین آستمپر در شکل های (۳) و (۴) آورده شده است.

در ادامه آزمایشات نهائی، نمونه های ریخته شده و عملیات حرارتی شده، تحت آزمایش تعیین سختی و یکرز و چقرمگی شکست کرنش مسطح براساس استاندارد BS5447 قرار گرفت. در این حالت نمونه های آزمایش از نوع خم سه نقطه بود که توسط ماشین هیدرولیکی تحت نیروی استاتیکی قرار گرفت و منحنی بار / جابه جایی شیار توسط یک رسم کننده نمودار در محور x-y رسم شد و از آن، مقدار پارامتر بررسی چقرمگی شکست (KJc و KQ) محاسبه شد. محل انتخاب نمونه های آزمایشی بررسی چقرمگی شکست بر روی نمونه ریخته‌گی و همچنین ابعاد نمونه های آزمایشی در شکل (۵) آورده شده است و در نهایت آزمایشات، متالوگرافی و تهیه عکس از ریزساختار، متالوگرافی کمی تصاویر ریز ساختار و بررسی عکس های SEM تهیه شده از مقطع شکست صورت گرفت.

۳- نتایج

۳-۱- ریز ساختار

ریز ساختار نمونه های ریخته‌گی، نرماله شده، آنیل شده و آستمپر شده در کربن معادل های ۲/۳ و ۳/۳ و ۴/۳ درصد در شکل (۶) آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود در نمونه های با کربن معادل ۴/۳ درصد با تغییر عملیات حرارتی ریز ساختار نمونه ها نیز تغییر می کند به صورتیکه ریز ساختار فریتی (۹۵٪) نمونه های ریخته‌گی در شرایط نرماله شده به حالت پرلیتی درشت دانه و در حالت آنیل شده به صورت کاملاً فریتی (۱۰۰٪) و در حالت آستمپر شده به صورت فریتی بینیتی و آستنیت باقی مانده (آسنریت) در می آیند.

در نمونه های با کربن معادل ۲/۳ درصد ریزساختار پرلیتی فریتی (چشم گاوی) نمونه های ریخته‌گی در اثر عملیات نرماله و آنیل و آستمپر به ترتیب به ریز ساختارهای پرلیتی، فریتی (۹۰٪) و آسفریت تبدیل می شود. در نمونه های با کربن معادل ۲/۳ درصد ریز ساختار پرلیتی فریتی (نسبت ۹۰ به ۱۰) نمونه های ریخته‌گی به ریزساختارهای پرلیتی ریز دانه، چشم گاوی و آسفریت به ترتیب برای شرایط نرماله، آنیل و آستمپر، تبدیل می شوند.

۳-۲- متالوگرافی ریزساختار نمونه های آزمایشی

تصاویر متالوگرافی بدست آمده از نمونه های آزمایشی در حالت های ریخته‌گی، آنیل، نرماله و آستمپر شده تحت بررسی متالوگرافی کمی قرار گرفت که در این روش از تکنیک شمارش نقطه ای و مقایسه عکس های ریزساختار نمونه ها با عکس های استاندارد AFS جهت برآورد تعداد کره های گرافیت، درصد کرویت، فاز فریت و پرلیت و ... استفاده شده است. نتایج این بررسی در جدول (۳-۱) آورده شده است.

۳-۳- چقرمگی شکست کرنش مسطح

(Plain-Strain Fracture Toughness) نتایج چقرمگی شکست کرنش مسطح نمونه های ریخته‌گی، نرماله شده، آنیل شده و آستمپر شده با استفاده از منحنی های بار / جابه جایی شیار شکل (۷) و بر اساس استاندارد BS5447 و انتگرال J محاسبه در جداول (۴-۱) و (۵-۱) آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود پارامترهای KJc و KQ برای همه نمونه ها در حالت با کربن معادل ۲/۳ درصد بالاترین مقدار است. و به طور کلی در مقام مقایسه، نمونه های آستمپر شده بیشترین چقرمگی شکست را داراست.

۳-۴- بررسی عکس های میکروسکپ الکترونی (SEM) از مقطع شکست

پس از انجام آزمایش چقرمگی شکست کرنش مسطح، از مقطع شکست نمونه های آزمایشی عکس SEM تهیه شد که در شکل (۸) آورده شده است. از مشخصات این تصاویر می توان به دو حالت مدل رودخانه ای و وجود چاله های گرافیتی (dimples) اشاره نمود که به ترتیب از ویژگی های شکست ترد و نرم هستند.

بحث و تحلیل نتایج

۳-۱-۴- ریز ساختار

ریز ساختار نمونه های ریخته‌گی در کربن معادل های ۲/۳، ۳/۳، ۴/۳ به ترتیب فریتی، چشم گاوی و پرلیتی است. با اعمال عملیات حرارتی آنیل، نرماله و آستمپر بر روی نمونه های ریخته‌گی ریزساختار زمینه تغییر می کند.

سینتیتیک عملیات حرارتی در سه حالت فوق تأثیر عمده ای بر روی تعداد کره ای گرافیت و مقدار کرویت ندارد. اما آنچه که مشخص است عملیات حرارتی تأثیر عمده خود را بر روی ریزساختار زمینه اعمال می کند به صورتیکه عملیات حرارتی آنیل، ریزساختار را به سمت فریتی شدن و عملیات حرارتی نرماله کردن ریزساختار زمینه را به سمت پرلیت سوق می دهد و در شرایط آستمپر، ریزساختاری متشکل از دو فاز فریت بینیتی و آستنیت باقی مانده حاصل می شود.

با تغییر کربن معدل از ۲/۳ به ۴/۳ درصد، درصد فریت نمونه ها در حالت ریختگی و آنیل شده افزایش می یابد و در حالت آستمپر شده با افزایش کربن معادل مقدار آستنیت باقی مانده نیز افزایش می یابد.

متالوگرافی کمی ریزساختار نمونه ها نشان داد که ریزساختار ۱۰۰٪ فریتی، ۱۰۰٪ پرلیتی (ریزدانه و درشت دانه) ساختار چشم گاری (فریتی - پرلیتی، پرلیتی - فریتی) و همچنین چدن ADI با مقدار فاز آستنیت باقی مانده متغیر حاصل شده است.

۲-۴. مقطع شکست و نمودارهای بار / جابه جایی شیار

با بررسی عکس های SEM تهیه شده از مقطع شکست نمونه های آزمایش چقرمگی شکست مشخص می شود که دو نوع شکست ترد و نرم اتفاق افتاده است. از مشخصات ظاهری این نوع شکست ها می توان به مدل رودخانه ای شکست ترد و وجود سیاه چاله های گرافیتی در شکست نرم اشاره نمود. با انطباق تصاویر تهیه شده از آزمایش متالوگرافی و عکس های SEM مشخص می شود که ساختار فریتی و فریت بینیتی به همراه آستنیت باقی مانده دارای شکست از نوع نرم است و ساختارهای پرلیتی و پرلیتی فریتی دارای شکست ترد درون دانه ای است.

علت اصلی این امر را می توان در دارا بودن خاصیت (۱) Necking در دو ساختار زنیتی ۱ و فریتی زنیتی دانست که باعث می شود شکست از حالت ترد به شکست نرم تغییر یابد.

با بررسی نمودارهای بار / جابه جایی شیار ارائه شده در شکل (۷) به همراه عکس های SEM مقطع شکست مشخص می شود که هر گاه نمودار بار / جابه جایی شیار به حالت سه گوش (Triangular یا Pop - In) باشد شکست از نوع ترد و در حالتی که نمودار بار / جابه جایی شیار به صورت انحنادار باشد شکست از نوع نرم است.

۳-۴. چقرمگی شکست کرنش مسطح

۱-۳-۴. مقایسه نتایج چقرمگی شکست چدن ها با سایر محققان

نتایج به دست آمده در آزمایش چقرمگی شکست نمونه های آزمایشی با ضخامت متفاوت اکثر محققان در جدول (۱-۶) آورده شده است.

جدول (۱-۱): ترکیبی شیمیایی ذوب های تهیه شده.

کربن معادل	منیزیم	گوگرد	نیکل	منگنز	فسفر	سیلیسیم	کربن	درصد کربن / شماره ذوب
۴/۳	۰/۰۳۶	۰/۰۱۱	۰/۷۹	۰/۰۸۹	۰/۰۲۱	۲/۸۸	۳/۲۷	یک
۳/۳	۰/۰۴	۰/۰۱۱	۰/۷۹	۰/۰۸۹	۰/۰۲۱	۲/۸۲	۲/۲۳	دو
۲/۳	۰/۰۴۱	۰/۰۱۱	۰/۷۹	۰/۰۸۹	۰/۰۲۱	۲/۷۱	۱/۲۷	سه

جدول (۲-۱): مواد جوانه زای مورد استفاده در ذوب های با درصد کربن معادل مختلف.

TiAl Si	FeSiSr	ZrSi	درصد مواد جوانه زای / درصد کربن معادل
-	۰/۶	۰/۶	۴/۳
-	۰/۶	۰/۶	۳/۳
۰/۶	۰/۶	۰/۶	۲/۳

همان طور که مشاهده می شود هر گروه از محققان نتایج متفاوتی از گروه محققان دیگری حاصل کرده اند به این صورت که آنقدر تنوع در مقادیر KIC و KQ زیاد است که نمی توان طول ترک مجاز را برای یک قطعه ریختگی با ترکیب شیمیایی مشخص به صورت یک استاندارد جهانی ارائه داد. علت اصلی این امر را می توان در دو عامل دانست: یکی آنکه ضخامت های نمونه های انتخاب شده در اکثر موارد متفاوت است که می تواند به تنهایی تأثیر قابل توجهی بر روی مقادیر KIC داشته باشد. دوم اینکه روش اتخاذ شده از طرف محققان باهم متفاوت است برخی به روش کرنش مسطح و برخی دیگر به روش COD، برخی با استفاده از انتگرال J و روش پیچش مضاعف مقادیر چقرمگی را بدست آورده اند.

جدول (۳-۱) نتایج متالوگرافی کمی ریزساختار نمونه های آزمایش.

نمونه های آزمایشی			نرماله شده (Normalized)			آنیل شده (Annealed)			نقط ریختگی (Ascast)			نتایج متالوگرافی کمی
۲/۳	۳/۳	۴/۳	۲/۳	۳/۳	۴/۳	۲/۳	۳/۳	۴/۳	۲/۳	۳/۳	۴/۳	
-	-	-	-	-	-	۶۰	۹۰	۱۰۰	۱۰	۲۵	۹۵	درصد فریت %
-	-	-	۱۰۰ ریزدانه	۱۰۰ درشت دانه	۱۰۰ درشت دانه	۴۰	۱۰	-	۹۰	۷۵	۵	درصد پرلیت %
۸۰	۹۵	۱۰۰	۸۰	۹۵	۱۰۰	۷۵	۹۵	۱۰۰	۷۰	۹۵	۱۰۰	تعداد ذره های گرانیت ^۲ Module/mm
۸۰	۸۰	۹۰	۱۰۰	۷۰	۸۵	۹۵	۷۵	۹۰	۱۰۰	۸۵	۹۵	درصد کرویت %
۳	۴	۴	۳	۴	۴	۳	۴	۴	۳	۴	۴	متوسط اندازه کره ها mm

جدول (۴-۱) پارامترهای چقرمگی شکست و سختی نمونه های مورد آزمایش (KQ).

سختی	K _Q	K _{Max}	$\frac{P_{Max}}{P_Q}$	P _Q	P _{Max} (KN)	پارامترهای چقرمگی شکست	
						شماره نمونه ها	فقط ریختگی
VHN	(Mpa√m)	(Mpa√m)		(KN)			
۲۱۹	۳۶/۷۶	۴۵/۴۰	۱/۲۳	۴/۹۸	۶/۱۵	نمونه ۱	فقط ریختگی
۳۱۱	۳۲/۸۵	۳۸/۷۰	۱/۱۸	۴/۱۰	۴/۸۳	نمونه ۲	
۴۰۶	۲۷/۱۶	۲۸/۴۸	۱/۰۵	۳/۳	۳/۴۶	نمونه ۳	
۱۸۱	۳۳/۹۸	۴۲/۸۷	۱/۲۷	۴/۲۰	۵/۳۰	نمونه ۱	آنیل شده
۲۱۱	۳۲/۲۷	۴۶/۴۰	۱/۴۴	۴/۶۸	۶/۷۳	نمونه ۲	
۲۵۶	۳۲/۶۵	۳۷/۳۰	۱/۱۴	۴/۷۸	۵/۴۶	نمونه ۳	
۳۸۸	۲۸/۰۰	۳۰/۰۳	۱/۰۷	۴	۴/۲۹	نمونه ۱	نرماله شده
۴۱۰	۲۷/۶۰	۳۲/۵۰	۱/۱۷	۴/۱۰	۴/۸۳	نمونه ۲	
۴۶۵	۲۵/۵۱	۲۷/۸۳	۱/۰۹	۳/۸۵	۴/۲	نمونه ۳	
۳۵۱	۵۳/۱۸	۶۵/۹۷	۱/۲۴	۷/۹۰	۹/۸	نمونه ۱	آستمپر شده
۴۲۵	۴۹/۵۵	۶۱/۵۲	۱/۲۴	۷/۷۰	۹/۵۶	نمونه ۲	
۵۲۶	۴۵/۳۷	۵۳/۴۸	۱/۱۸	۶/۵۴	۷/۷۱	نمونه ۳	

* شماره های ۱، ۲، ۳ به ترتیب مربوط به معادل ۴/۳، ۳/۳، ۲/۳ می باشد.

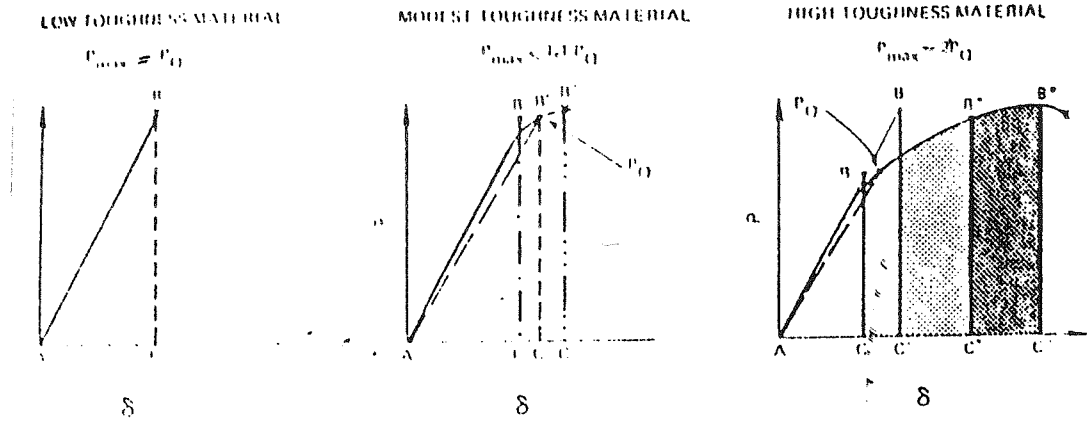
جدول (۵=۱) نتایج چقرمگی شکست بدست آمده با روش انتگرال J (KIC).

آستمپر شده (Austempered)			نرماله شده (Normalized)			آنیل شده (Annealed)			فقط ریختگی (Ascast)			نمونه ها
%۲/۳	%۳/۳	%۴/۳	%۲/۳	%۳/۳	%۴/۳	%۲/۳	%۳/۳	%۴/۳	%۲/۳	%۳/۳	%۴/۳	پارامترهای چقرمگی شکست
۲۵/۶۸	۳۱/۹	۳۶/۸	۱۴/۱	۱۶/۵	۱۶/۴	۲۴/۵	۲۷/۵	۳۲/۶	۱۳/۵	۱۸/۶	۳۱/۰۵	k_{Jc} (Mpa√m)
۳۰۴۷	۴۷۲۷	۶۲۸۰	۹۲۶	۱۲۷۱	۱۲۴۵	۲۷۷۳	۳۵۱۰	۴۹۲۶	۸۴۳/۹	۱۶۰۴	۴۴۵۵	J_{Ic} (N/M)
۲۶	۳۰	۳۷	۱۴	۱۶	۱۸	۱۹	۱۶	۲۴	۱۹	۲۱	۲۲	$\delta^{(1)}$ (10^{-3} cm)
۲۵	۴۵	۵۷	۲۰	۲۱	۲۳	۳۹	۴۰	۵۷	۲۰	۲۶	۵۵	$\delta^{(2)}$ (10^{-3} cm)

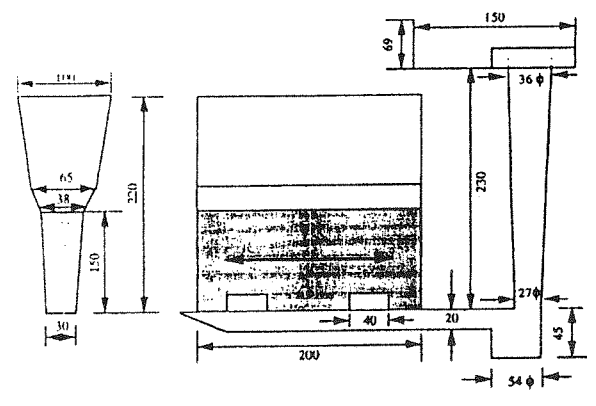
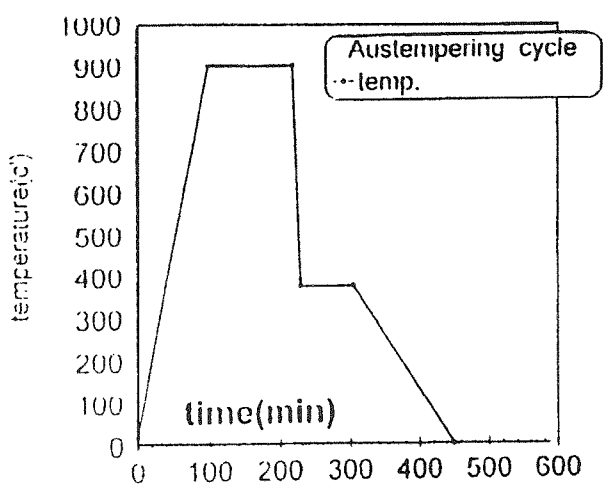
(۱) - امتداد شروع ترک
(۲) - امتداد ترک ناپایدار

جدول (۶=۱): مقایسه چقرمگی شکست چندین های مورد آزمایش توسط محققان مختلف و این تحقیق

k_{Jc} mpa√m (k_{Jc})	KU mpa√m	ضخامت نمونه cm	ضخامت ریخته cm	استحکام Mpa	سختی برزیل (ویکوز)	شماره مرجع	نوع چدن
۳۲/۹۴	۳۶/۲۳	۲/۱۰	-	۲۸۵/۴۵	۱۵۰	۴	نشکن فریتی
	۴۰/۰۷	۳/۱۷	-	۲۹۷/۱۷	۱۴۵	۳	
	۲۰/۴۲	۰/۹۵	۱/۹۰	۲۷۹/۲۴	-	۱۴	
		۲/۵۴	-	-	-	۲۰	
	۴۱/۰۶	۰/۹۹	۴/۴۹	-	-	۷	
۹۱/۱۳		۹/۹۰	۱۱/۹۳	۳۱۹/۹۲	۱۳۶	۱۵	نشکن پرلیتی
(۳۱/۰۵)	۳۶/۷۶	۱/۰۰	۳/۰۰	-	(۲۱۹)	این تحقیق	
	۴۱/۸۳	۲/۱۱	-	۳۷۳/۷۰	۲۴۰	۴	
	۴۳/۵۹	۳/۱۷	-	۴۰۱/۲۸	۲۱۰	۳	
۲۰/۰۹		۰/۹۵	۱/۹۰	۳۷۷/۱۵	-	۱۴	
۳۳/۸۱		۱/۰۰	۴/۴۹	-	-	۷	مالیبل فریتی خاکستری فریتی
۹۲/۸۹		۹/۹۱	۱۱/۹۳	۳۹۹/۹۱	۲۱۲	۱۵	
(۱۳/۵)	۲۷/۱۶	۱/۰۰	۳/۰۰	-	(۴۰۶)	این تحقیق	
	۲۳/۳	۰/۹۵	-	۶۲۰/۵۵	-	۴	
(۳۶/۸)	۵۳/۸	۱/۰۰	۳/۰۰	-	(۳۵۱)	این تحقیق	
(۲۵/۶۸)	۳۶/۵۸	۰/۹۵	-	۵۲۵	-	۴	بینشی اکروت پاپین
	۴۵/۳۷	۱/۰۰	۳/۰۰	-	(۵۲۶)	این تحقیق	مالیبل فریتی خاکستری فریتی
	۲۱/۹۶	۲/۵۴	-	-	-	۲۰	
۶/۳۶		۰/۹۵	۱/۹۰	۱۰۳/۴۲	-	۱۴	
۱۶/۱۴		۰/۹۹	۷/۶۲	۱۶۴/۱	۱۴۰	۱۹	
	۱۹/۴۳	۰/۹۹	۳/۰۴	۲۴۶/۸۴	۲۱۲	۱۹	
۲۳/۸۲		۲/۴۸	۳/۰۴	-	-	۱۶	سفید آلیاژی Rolls
۱۳/۹۴		۲/۴۸	۳/۰۴	-	-	۱۶	
۲۱/۹۶		۰/۹۹	۶۷/۰۵	-	۵۸۵	۱۷	
۲۲/۶		۰/۹۹	۶۷/۰۵	-	۶۴۵	۱۷	
۱۷۲-۲۷۱		۱/۲۷	۲/۵۴	-	۴۱۷-۷۸۰	۱۸	

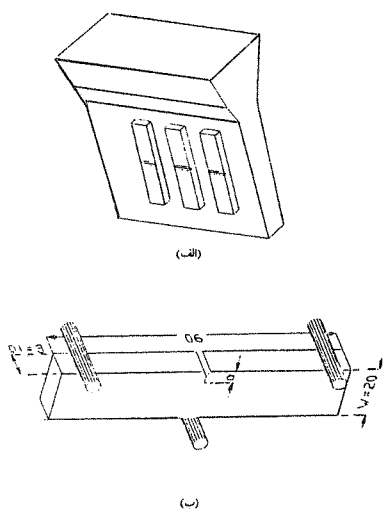


شکل (۱) نمای منحنی های بار / جابه جایی شیار برای ۳ نوع از مواد
الف) مواد با چقرمگی اندک ب) مواد با چقرمگی متوسط ج) مواد با چقرمگی بالا.

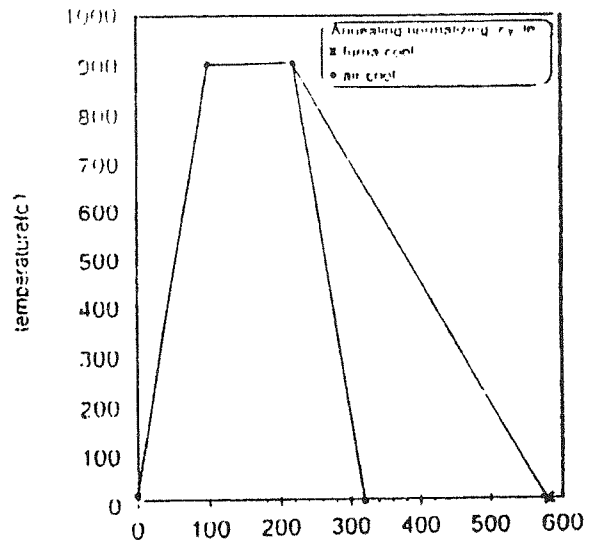


شکل (۲) سیستم راهگانه‌ای استفاده شده جهت ریخته گری قطعات
Y بلوک (این سیستم براساس تئوری سرعت بحرانی طراحی شده است و اندازه‌ها برحسب میلی متر است).

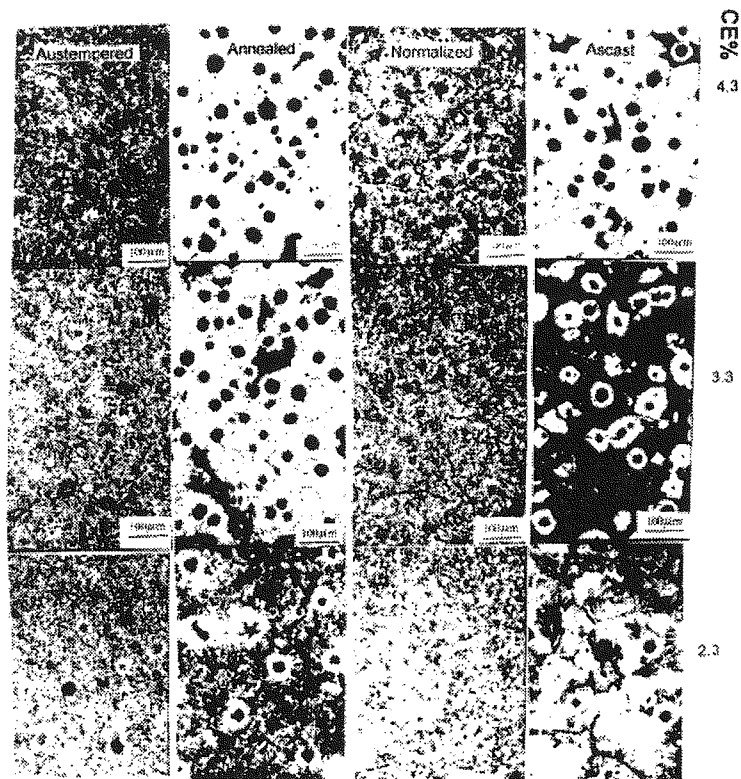
شکل (۳) سیکل عملیات حرارتی آستمبر کردن نمونه های باکربن
معادل ۳ / ۲ و ۳ / ۳ و ۴ / ۳ درصد در کوره حمام نمک.



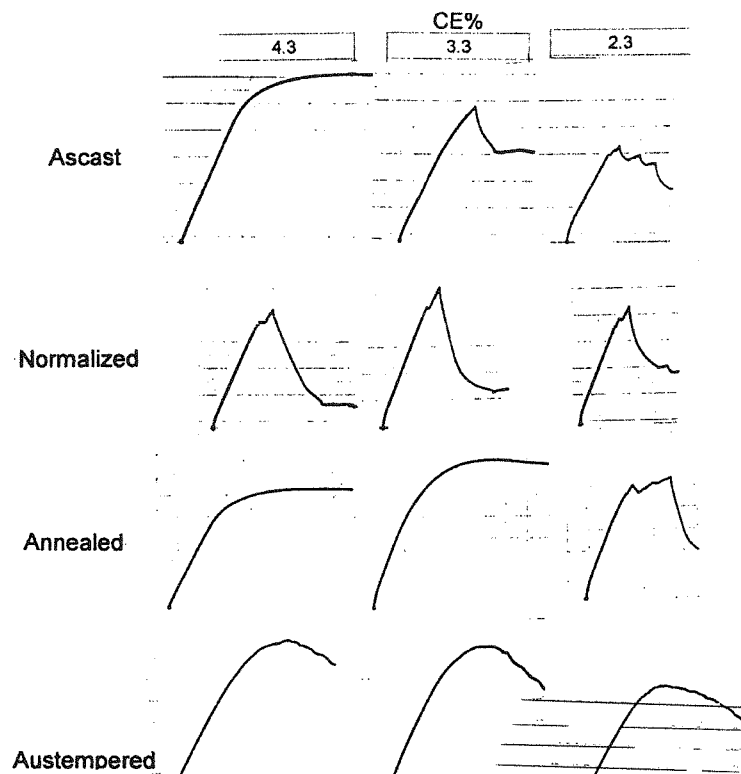
شکل (۵) الف) محل انتخاب نمونه های آزمایش چقرمگی شکست برروی
Y بلوک ریخته شده ب) ابعاد نمونه های آزمایش چقرمگی شکست
کرنش مسطح (اندازه‌ها برحسب میلی متر است).



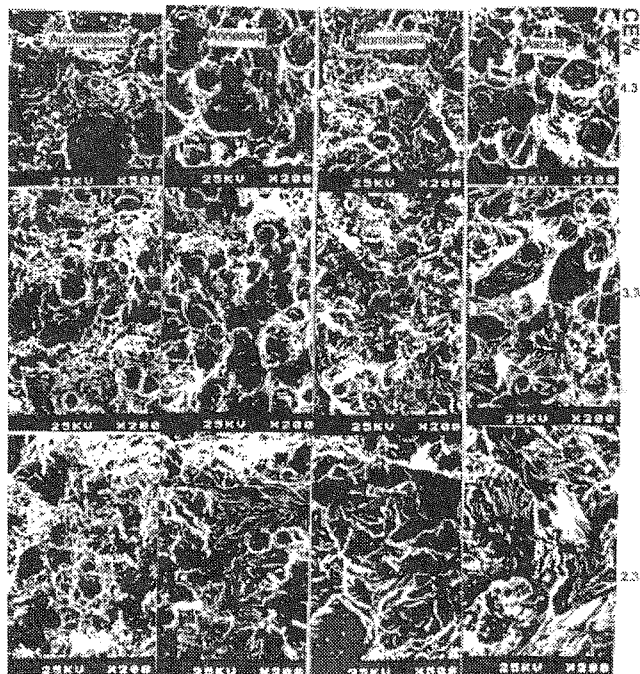
شکل (۳) سیکل عملیات حرارتی آنیل کردن و نرماله کردن برای
نمونه های با کربن معادل ۳ / ۲ و ۳ / ۳ و ۴ / ۳ درصد.



شکل (۶) ریزساختار نمونه‌های ریختگی، نرماله، آذیل آستمپر شده با درصد کربن معادل ۲/۳ و ۳/۳ و ۴/۳ درصد محلول اچ نیتال ۲٪ و بزرگنمایی ۱۰۰٪.



شکل (۷) نمودارهای بار/جابه‌جایی شیار برای نمونه‌های الف) ریختگی ب) نرماله شده ج) آذیل شده د) آستمپر شده با کربن معادل های ۲/۳ و ۳/۳ و ۴/۳ درصد.



شکل (۸) تصاویر میکروسکوپ الکترونی از مقطع شست نمونه های آزمایشی ریختگی، نرماله شده آنیل شده آستمپر شده با کربن معادل های ۴/۳ و ۳/۳ و ۲/۳ درصد.

۵- نتیجه گیری کلی

- ۱- چقرمگی شکست چدن های نشکن با کربن معادل بالا بیشتر از چقرمگی شکست چدن های نشکن با کربن معادل پائین است.
- ۲- سختی چقرمگی شکست چدن های نشکن آستمپر شده در بالاترین مقدار نسبت به سایر نمونه ها قرار دارد.
- ۳- سختی چدن های نشکن با کربن معادل پائین بیشتر از سختی چدن های نشکن با کربن معادل بالاست.
- ۴- چدن های نشکن آنیل شده و ریختگی در شرایطی که فقط خاصیت چقرمگی شکست مورد نظر باشد به ترتیب رقابت نزدیکی را با چدن های نشکن آستمپر شده دارند.
- ۵- در مواردیکه علاوه بر خاصیت چقرمگی شکست خواصی چون استحکام تسلیم، استحکام کششی، سختی و ... نیز در طراحی قطعه لحاظ شود چدن نشکن آستمپر شده پیشنهاد می شود.
- ۶- روش انتگرال J در محاسبه چقرمگی شکست چدن نشکن در مواردیکه KQ برابر با KIC نباشد، روش مناسبی تشخیص داده شد.

مراجع

- [1] Campbell, J, "Castings", Butherworth Heinemann, 1991, P.P. 274-278.
- [2] Nanstad, R.K., Worzala, F.J., Loper, C.R., Proc. 2nd. Int. Symposp. Metallurgy of Cast Iron, Genve, 1974.
- [3] Nanstad, R.K., Worzala, F.J., Loper, C.R., AFS Transactions 83, P.245, 1975.
- [4] Nanstad, R.K., Worzala, F.J., Loper, C.R., "Fracture Toughness of nodular cast Irons", AFS Transactions, 1974, P. 473-486.
- [5] Dorazil, E., Holzman, M., AFS world conference on ADI, March 12-14, 1991.
- [6] Boutorabi, S.M.A., Young, J.M., Kondic, V., "Structure and impact propertics of Austempered Spheroidal Graphite unalloyed Aluminum cast Iron", AFS world conference on ADI, March 12-14, 1991, P. 516-549.
- [7] Holdworth, S.R., Jolley, G., "Fracture Toughness Tests on pearlitic spheroidal Graphite cast Iron", The British Foundrymen, vol. 67, Mar. 1974, p. 77-82.
- [8] Eldoky, L., Voigt, R.C., "Fracture of Ferritic Ductile cast Iron", TAFS, 1985.
- [9] Mcead, H.E., Bradley, W.L., "Fracture Toughness studies of Ductile cast Iron using a J-Integral approach" TAFS, 1980, p 265-276.
- [10] Komalsu, S., Shiota, T., Nakamura, K., "Influences of Silicon phosphorus and carbon contents on transition Behaviours of Fracture Toughness in Ferritic spheroidal Graphite cast Iron.