

تأثیر دمای آستمپر بر بهبود رفتار خستگی چدن داکتیل آستمپر نیمه آلیاژی Ni-Cu

امیر صدیق زاده بنام^۱ - ساسان یزدانی^۲

چکیده:

در این پژوهش تاثیر دمای عملیات آستمپرینگ بر رفتار خستگی چدن داکتیل آستمپر (ADI) نیمه آلیاژی بررسی شد. ابتدا چدن داکتیل با ترکیب $Fe - 3.5 C - 3.1 Si - 0.2 Mn - 0.24 Mo - 0.5 Cu - 0.6 Ni$ ، با استفاده از کوره القایی ریخته‌گری شد و پس از ساخت نمونه‌ها، عملیات حرارتی آستمپر در بهترین وضعیت مکانیکی (پنجره فرآیند) اعمال گردید. دما و زمان آستنیت به ترتیب $875^{\circ}C$ و ۹۰ دقیقه و دماهای آستمپر نیز $320^{\circ}C$ و $365^{\circ}C$ انتخاب شدند و نمونه‌ها تحت آزمایش خستگی خمشی - دورانی قرار گرفتند. رفتار خستگی نمونه‌ها با استفاده از نتایج آزمونهای XRD و متالوگرافی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتند. نتایج بدست آمده نشان داد که استحکام خستگی چدن داکتیل آستمپر در 10^7 چرخه برای سه دمای $320^{\circ}C$ ، $365^{\circ}C$ و $400^{\circ}C$ نسبت به چدن خام ریخته شده، به ترتیب 10% ، 20% و 24% افزایش داشته است. یعنی با افزایش دمای آستمپر، رفتار خستگی بهبود بیشتری داشته است. افزایش مقدار آستنیت پرکربن با افزایش دمای آستمپر، همراه با کاهش درصد کربن آستنیت و افزایش عرض تیغه‌های فریت اصلی ترین عامل این رویداد است. کیفیت بسیار بالایی ریزساختار تولید شده یعنی کرویت گرافیت‌ها، تعداد آنها در واحد سطح و یکنواختی توزیع آنها به دلیل استفاده از روش غوطه‌وری در تلقیح منیزیم، در دستیابی به حد خستگی بالا نقش بسیار مهمی داشته است.

۱- سازمان صنایع و معادن استان آذربایجان شرقی، amir.sadighzadeh@gmail.com

۲- دانشیار دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، Yazdani@sut.ac.ir

مقدمه:

چدن‌ها پرکاربردترین نوع آلیاژهای صنعتی هستند که با توجه به ویژگیهای منحصر به فرد آنها - چه از نظر سهولت تولید و مسائل اقتصادی و چه از نظر خواص مکانیکی - کاربردهای فراوانی دارند و جدیدترین نوع آنها یعنی چدن داکتیل آستمپر (Austempered ductile iron) موسوم به ADI، در بسیاری موارد قابلیت رقابت با برخی فولادها و جانشینی آنها را دارد. این چدن از طریق عملیات حرارتی آستمپرینگ بر روی چدنهای داکتیل ریختگی تولید می شود و به منظور انجام عملیات آستمپرینگ ابتدا قطعات ریخته شده در محدوده دمایی (۸۵۰-۹۵۰°C) آستنیت شده و سپس تا محدوده دمایی عملیات آستمپر (۲۳۰-۴۵۰°C) سرد شده و در نهایت قطعات در هوا سرد می شوند. ساختار این نوع چدن مخلوطی از تیغه های سوزنی شکل فریت در زمینه ای از آستنیت باقی مانده بوده و آسفریت نام دارد [1].

با توجه به کاربرد روز افزون این چدن در دنیا و جایگزینی آن بجای فولادها، بهبود رفتار خستگی آن از عمده مسائل پیش روی ماست؛ چرا که بیشتر قطعات ماشین ها و سازه ها تحت بارگذاری های چرخه ای مختلف قرار دارند و به همین دلیل به شدت در معرض شکستهای ناشی از خستگی هستند. خستگی اصلی ترین عامل شکست در قطعات صنعتی است و پیش بینی می شود که بیش از ۹۰٪ شکست ها ناشی از خستگی باشد [2]. از این رو تلفیق این دو موضوع در کنار هم و بررسی رفتار خستگی ADI می تواند فواید علمی، صنعتی و اقتصادی فراوانی داشته باشد.

روش تحقیق:

ابتدا مذاب چدن داکتیل در یک کوره القایی ۱۰۰ کیلوگرمی در کارگاه ریخته گری دانشگاه آماده شده و سپس عملیات ریخته گری در قالبهای آماده شده انجام شد. عمل تلقیح منیزیم به مذاب به منظور کروی کردن گرافیت ها با استفاده از روش غوطه وری (Plunging) انجام یافت و سپس نمونه های خستگی، کشش و ضربه مطابق با استانداردها از قسمت تحتانی Y بلوک های ریختگی استاندارد ماشینکاری شدند. برای عملیات حرارتی از کوره های برقی حمام نمک استفاده شد. نمونه ها به سه دسته تقسیم شدند و همه آنها در °C ۸۷۵ به مدت ۹۰ دقیقه آستنیت شده و سپس هر دسته در یک دمای خاص و برای زمانهای مختلف آستمپر شدند. دماهای آستمپر عبارتند از ۳۲۰، ۳۶۵ و °C ۴۰۰ و زمانهای آستمپر برای هر دسته از نمونه ها، زمان دست یابی به حداکثر انرژی ضربه است که در داخل پنجره عملیات حرارتی قرار دارد. نمونه های آماده شده نهایی بعد از سنگ زنی و نمد کاری تحت آزمایشهای خستگی قرار گرفتند.

آزمایشهای خستگی توسط دستگاه خستگی خمشی - دورانی با نسبت تنش خستگی برابر با ۱- (R = -1) بر روی نمونه ها انجام شد. آزمایش XRD به منظور محاسبه مقادیر دقیق فازها و درصد کربن آستنیت، استفاده از SEM برای مشاهده دقیق ریزساختارها و شکست نگاری نمونه های خستگی شکسته شده و متالوگرافی نیز انجام شدند.

نتایج و بحث:

ریزساختار بدست آمده بعد از ریخته گری شامل ۵۵٪ پرلیت و ۴۵٪ فریت است که تصویر آن در شکل ۱ دیده می شود. سختی آن HB ۲۵۵، تعداد کره های گرافیت در واحد سطح ۲۰۰، میزان کرویت گرافیتها بیش از ۹۰٪ و قطر متوسط کره های گرافیت ۲۵ μ است. دستیابی به این کیفیت بالا، به دلیل استفاده از روش غوطه وری

(Plunging) در تلقیح منیزیم به مذاب است که اثر مفید و موثر خود را در ریزساختار نشان داد. تاثیر کیفیت بالای کره های گرافیت در نتایج خستگی نیز مشهود است. مجموعه ویژگیهای ریزساختاری در جدول ۱ و ترکیب بدست آمده در جدول ۲ دیده می شوند.

بعد عملیات آستمپر، مشاهده شد که در هر دما با افزایش زمان آستمپر، بر انرژی ضربه افزوده می شود که این امر به دلیل تشکیل آستنیت پرکربن و افزایش مقدار آن با گذشت زمان است. با اتمام مرحله اول واکنش آستمپر و باز شدن پنجره عملیات، انرژی ضربه تقریباً ثابت است و بعد از گذشت زمان افت می کند که به دلیل شروع مرحله دوم واکنش، تولید کاربیدها و بسته شدن پنجره عملیات است. زمان بهینه برای دست یابی به حداکثر انرژی ضربه (پنجره عملیات) و حداکثر مقدار انرژی ضربه بدست آمده نیز در جدول ۳ مشاهده می شوند. همانطور که از این جدول پیداست با افزایش دمای آستمپر زمان رسیدن به پنجره عملیات کوتاهتر شده است که به دلیل افزایش نیروی محرکه آستمپر است.

همانطور که در شکل ۲ دیده می شود، ریزساختار شامل آسفریت (تیغه های فریت و آستنیت پرکربن) است. با توجه به ترکیب و محدوده دمای آستمپر انتخاب شده، کاربیدی در ریزساختار مشاهده نشده است. بررسی ها نشان می دهد که در ADI اگر دمای آستمپر کمتر از 300°C باشد وجود کاربیدها حتمی است و اگر دمای آستمپر بیش از 360°C درجه باشد، کاربیدی هرگز دیده نخواهد شد. در دمای آستمپر 300°C تا 360°C ، وجود یا عدم وجود کاربید بستگی به مقدار سیلیسیم موجود در ترکیب دارد [3]. از آنجاییکه مقدار سیلیسیم موجود در این ترکیب بالاست (3.1%)، در اینجا کاربیدی دیده نشد. در در مورد مناطق UAV نیز باید گفت که چون عملیات حرارتی در محدوده پنجره واکنش است و در این محدوده، واکنش مرحله اول به اتمام رسیده و واکنش مرحله دوم نیز شروع نشده است ، بنابراین همانطور که انتظار داریم این مناطق مشاهده نشدند. دمای آستنیت پائین نیز به این مورد کمک کرد.

مشخصات مکانیکی نمونه های آستمپر شده در محدوده پنجره عملیات در جدول ۴ دیده می شوند. همانطور که در این جدول مشخص است با انجام عملیات آستمپر سختی چدن داکتیل به دلیل تشکیل آسفریت بیشتر شده است. ضمن اینکه در نمونه های آستمپر شده، با افزایش دمای آستمپر سختی کاهش یافته است که به دلیل افزایش مقدار فاز آستنیت پرکربن است. بررسی رفتار مکانیکی این نمونه ها در محدوده پنجره عملیات نشان داد که حداکثر مقدار انعطاف پذیری (ازدیاد طول و کاهش سطح مقطع) نیز در 365°C مشاهده شده است . همانطور نیز که انتظار می رفت، نمونه آستمپر شده در 320°C دارای استحکام تسلیم و استحکام کششی بیشتری نسبت به سایر نمونه هاست که این موضوع مربوط است به ریز بودن ریزساختار آن نسبت به سایر ریزساختارها و مقاومت بیشتر در برابر حرکت نابجاییها.

محاسبه مقادیر آستنیت پرکربن، کربن موجود در آستنیت و عرض تیغه های فریت در هر دما نیز با استفاده از تحلیل الگوهای XRD انجام گرفت که نتایج آن در جدول ۵ آمده است. از نتایج این جدول پیداست که با افزایش دمای آستمپر از 320°C به 400°C ، بر مقدار آستنیت پرکربن افزوده شده است. با توجه به پائین بودن دمای آستنیت در این آزمایش، بدست آمدن چنین مقادیری برای مقدار آستنیت پرکربن کاملاً منطقی است. ضمن اینکه با افزایش دمای آستمپر، از مقدار کربن در آستنیت پرکربن کاسته شده است . به دست آوردن عرض تیغه های فریت نیز از جمله مسائل مهم در انجام این تحقیق بود . استفاده از فرمولها و روابط موجود در مراجع برای محاسبه عرض تیغه های فریت دارای خطای بسیار زیادی است و از این رو، برای محاسبه آنها به تصاویر میکروسکوپ الکترونی نیز توجه شد. لازم به ذکر است که در یکی از تحقیقات انجام شده، عرض تیغه های فریت ۳ الی ۵ میکرون ذکر شده بود. [4] توجه به تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) دو نکته مهم را مشخص کرد: اول اینکه عرض تیغه های فریت

بین ۱ تا ۲ میکرون است و دوم اینکه از مقایسه ضمنی تصاویر مشخص است که تیغه های فریت رشد کرده اند و عرض آنها بیشتر شده است و اینگونه نبوده است که تغییری نکنند؛ ولی مقدار رشد آن قابل ملاحظه نیست. در نهایت برای داشتن مقادیر عددی در جدول، از روابط داده شده در مراجع استفاده شد [5] و عرض تیغه های فریت برابر با مقادیر مشاهده شده در جدول ۵ به دست آمد. نمونه ای از تصاویر میکروسکوپ الکترونی تیغه های فریت نیز در شکل های ۳ و ۴ آورده شده اند.

در شکل ۵ رفتار خستگی نمونه ها و در جدول ۶ نتایج بدست آمده مشاهده می شوند. در مقایسه رفتار خستگی نمونه های آستمپر شده با نمونه های چدن داکتیل ریخته شده، مشاهده شده است که استحکام خستگی نمونه های آستمپر در دماهای ۳۲۰ و ۳۶۵ °C و ۴۰۰ °C، در ۱۰٪ چرخه به ترتیب ۱۰٪ و ۲۰٪ و ۲۴٪ افزایش یافته است. این افزایش، به دلیل تشکیل آستنیت پرکربن که یک فاز چقرمه است صورت می گیرد؛ در حالیکه در چدن داکتیل ریزساختار شامل پرلیت و فریت است. تحلیل آن نیز بر مبنای آستنیت پرکربن، کربن موجود در آستنیت و عرض تیغه های فریت انجام می گیرد. آستنیت پرکربن چقرمه، تنش ناشی از اعمال خستگی را جذب کرده و با کارسخت شدن خود، منجر به بهبود رفتار خستگی می شود. چقرمگی چدن داکتیل آستمپر که ارتباط مستقیمی با رفتار خستگی دارد، با استفاده از تابع $(X_{\gamma} C_{\gamma} / D)^{1/2}$ توجیه می شود [6]. طبق جدول ۵، با افزایش دمای آستمپر از ۳۲۰ به ۴۰۰ °C، بر مقدار آستنیت پرکربن افزوده شده است و از مقدار کربن در آستنیت پرکربن کاسته شده است؛ عرض تیغه های فریت نیز بیشتر شده است. تاثیر متقابل این پارامترها در جدول ۷ و شکل ۶ دیده می شوند. مشخص است که هرچه مقدار تابع $(X_{\gamma} C_{\gamma} / D)^{1/2}$ بیشتر شده است بر استحکام خستگی افزوده شده است. بررسی سطوح شکست نگاری نیز نشان می دهد که در هر سه دمای آستمپر با افزایش دامنه تنش، ناحیه جوانه زنی و اشاعه ترک کوچکتر شده و بنابراین با افزایش دامنه تنش، جوانه زنی و اشاعه ترک به سرعت اتفاق افتاده است و نوبت به مرحله شکست نهایی رسیده است و از این رو عمر خستگی کاهش یافته است. بررسی سطوح شکست در منطقه شکست نهایی نیز نشان می دهد که در همه نمونه های آستمپر شده، منطقه شکست نهایی به صورت نرم و شامل حفرات (Dimple) است که بیانگر عدم وجود کاربید و مارتنزیت است.

نتیجه گیری :

- ۱- استفاده از روش غوطه وری (Plunging) در تلقیح منیزیم به مذاب چدن داکتیل باعث یکنواختی ریزساختار و کیفیت بسیار بالای کره های گرافیت می شود که در رفتار خستگی نقش بسیار مهمی را ایفا می کنند.
- ۲- حد خستگی چدن داکتیل آستمپر شده در سه دمای ۳۲۰، ۳۶۵ و ۴۰۰ °C، نسبت به چدن داکتیل اولیه به ترتیب ۱۰٪، ۲۰٪ و ۲۴٪ افزایش داشته است که این تغییر به دلیل تشکیل آسفریت که دارای فاز چقرمه آستنیت پرکربن است، می باشد.
- ۳- با افزایش دمای آستمپر، مقدار آستنیت پرکربن و عرض تیغه های فریت بیشتر شده و از کربن موجود در آستنیت کاسته می شود. تاثیر متقابل این پارامترها بر رفتار خستگی اثر گذار است.

مراجع :

- 1- R.C.Voigt, "Austempered Ductile Iron, Processing and Properties", Cast Metals, vol. 2, 1989, pp. 71-93.
- ۲- جرج ای دیتز، متالورژی مکانیکی، ترجمه شهره شهیدی، مرکز نشر دانشگاهی تهران، چاپ دوم، ۱۳۷۹
- 3- T.N. Rouns, K.B. Rundman, Constitution of austempered ductile iron and kinetics of austempering, AFS Transactons, 1987, pp. 851 - 874

۴- احمد فیروزی ، تاثیر پارامترهای عملیات حرارتی بر روی مقاومت خستگی چدن داکتیل آستمپر ، پایان نامه کارشناسی ارشد ، دانشگاه صنعتی سهند ، تابستان ۱۳۸۱

5- B.D. Cullity, Elements of X-Ray Diffraction, 2nd Edition, 1978, Addison Wesley Publishing Company

6- P.P. Rao , S.K. Putatunda , Influence of microstructure on fracture toughness of austempered ductile iron , Metallurgical and materials transaction , July 1997 , Vol. 28A , pp. 1457 – 1470

جدول ۱) مجموعه ویژگیهای ریزساختاری چدن ریخته شده

Microstructure	Hardness	Nodule count	Nodularity	Nodule Diameter
P ۵۵% - α ۴۵%	۲۵۵ HB	۲۰۰ Nodule/mm ²	> ۹۰ %	۲۵ μm

جدول ۲) ترکیب چدن ریخته شده

Others %	Ni %	Cu %	Mo %	Mn %	Si %	C %
S = ۰,۰۰۶						
Ti = ۰,۰۱۲	۰,۵۹	۰,۴۹	۰,۲۴	۰,۱۹	۳,۱	۳,۵۱
Mg = ۰,۰۳۴						

جدول ۳) زمان پنجره عملیات و حداکثر مقدار انرژی ضربه بدست آمده

حداکثر انرژی ضربه	زمان دستیابی به حداکثر انرژی ضربه	دمای آستمپر
۱۲۴ ژول	۱۰۵ دقیقه	۳۲۰ °C
۱۱۰ ژول	۹۰ دقیقه	۳۶۵ °C
۱۲۹ ژول	۹۰ دقیقه	۴۰۰ °C

جدول ۴) مشخصات مکانیکی نمونه های آستمپر شده در محدوده پنجره فرآیند

استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی (MPa)	کاهش سطح مقطع (%)	ازدیاد طول نسبی (%)	سختی (HB)	دمای آستمپر
۸۰۵	۱۰۶۰	۴,۳	۴,۳	۳۰۰	۳۲۰ °C
۴۶۵	۷۰۰	۸,۳	۱۲,۳	۲۸۵	۳۶۵ °C
۵۹۰	۸۲۰	۴,۹	۷,۸	۲۶۰	۴۰۰ °C

جدول ۵) مشخصات فازی بدست آمده از عملیات آستمپرینگ

عرض تیغه های فریت D (μ)	کربن آستنیت (C _γ %)	آستنیت پرکربن (X _γ %)	دمای آستمپر
۱,۶۴	۲,۲۰۴	۱۴,۹	۳۲۰ °C
۱,۶۴	۲,۰۹۱	۱۶,۹	۳۶۵ °C

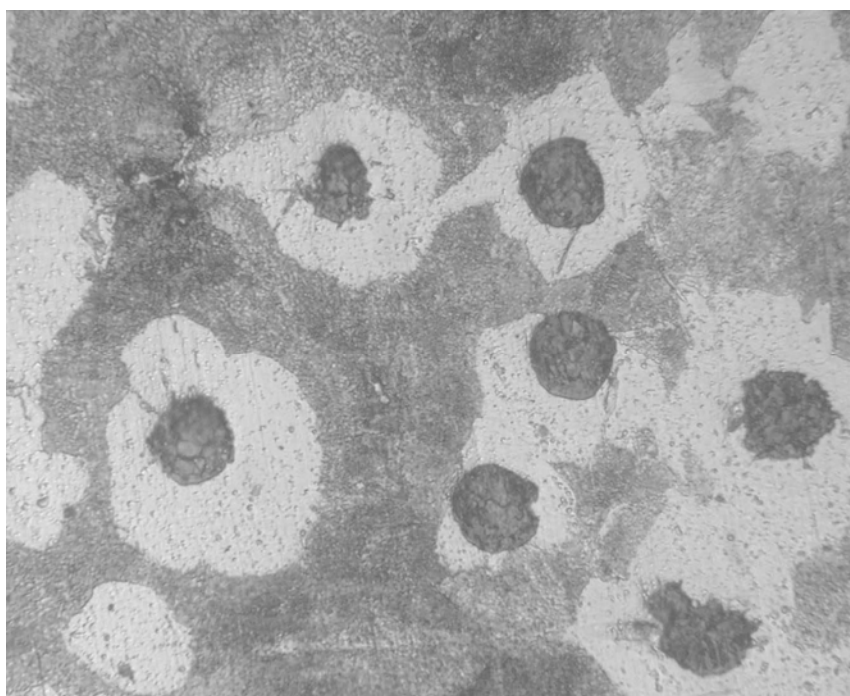
۱,۶۵	۲,۰۲۲	۲۱,۲	۴۰۰ °C
------	-------	------	--------

جدول ۶) مجموعه نتایج استحکام خستگی در 10^7 چرخه محاسبه شده برای چدنهای داکتیل و آستمپر

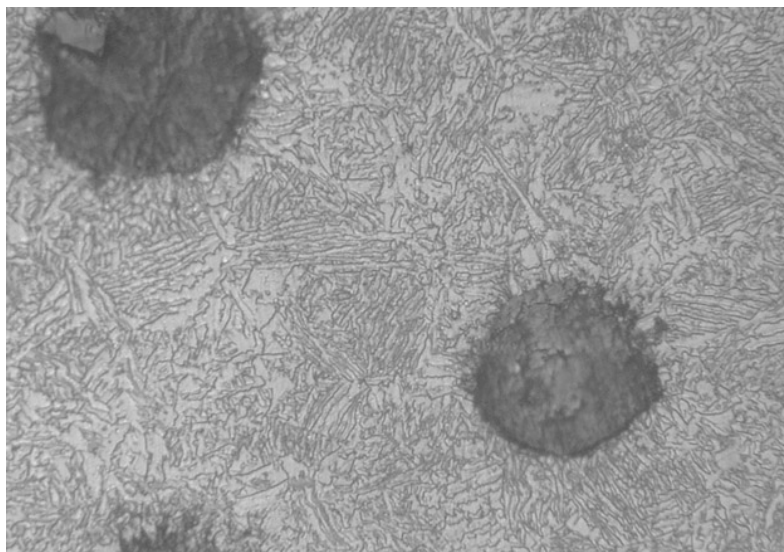
مشخصه	چدن داکتیل	۳۲۰ °C	۳۶۵ °C	۴۰۰ °C
استحکام خستگی (MPa)	۲۵۰	۲۷۵	۳۰۰	۳۱۰
افزایش حد خستگی	---	٪ ۱۰	٪ ۲۰	٪ ۲۴

جدول ۷) مقادیر $X_\gamma \cdot C_\gamma$ ، $(X_\gamma C_\gamma / D)^{1/2}$ و حد خستگی چدن داکتیل آستمپر

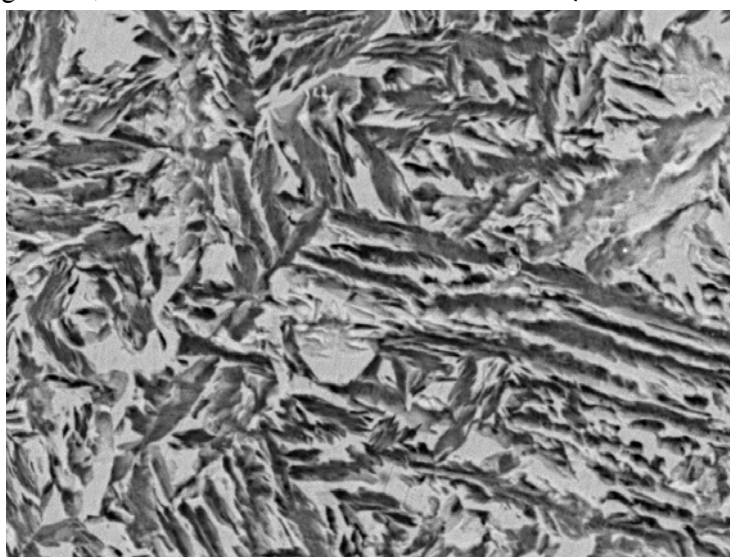
حد خستگی (MPa)	$(X_\gamma C_\gamma / D)^{1/2}$	$X_\gamma \cdot C_\gamma$	دمای آستمپر °C
۲۷۵	۰,۴۴۷۵	۰,۳۲۸۴	۳۲۰ °C
۳۰۰	۰,۴۶۴۲	۰,۳۵۳۴	۳۶۵ °C
۳۱۰	۰,۵۰۹۷	۰,۴۲۸۷	۴۰۰ °C



شکل ۱) ریزساختار چدن داکتیل آلیاژی ریخته شده در بزرگنمایی $1000 \times$ (محلول اچ: نایتال ۲٪)

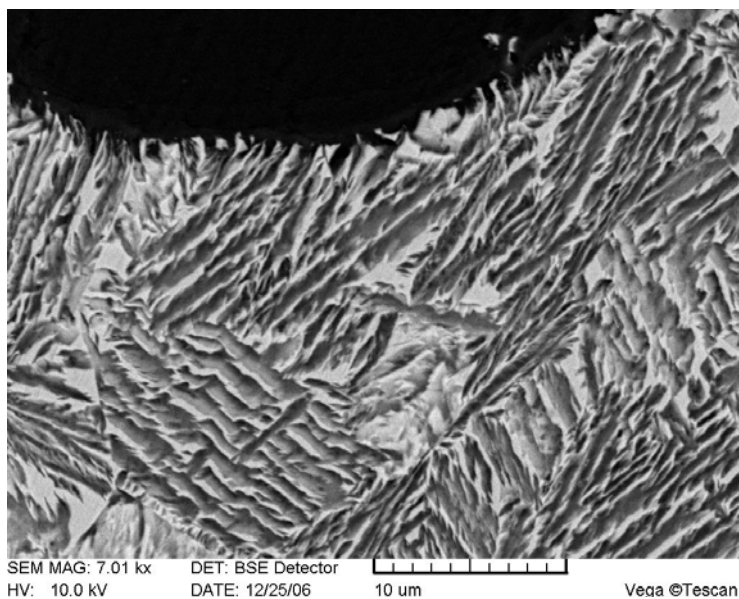


شکل ۲) ریزساختار آستمپر شده در دمای 400°C به مدت ۱۰۵ دقیقه $500\times$ (محلول اچ : نایتال ۲٪)

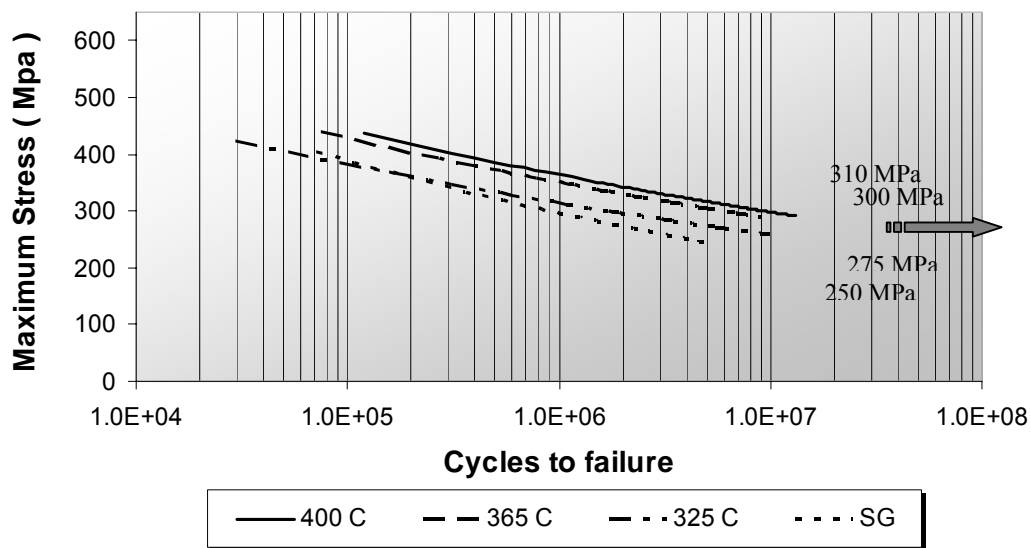


SEM MAG: 7.00 kx DET: BSE Detector HV: 10.0 kV DATE: 12/25/06 10 um Vega ©Tescan

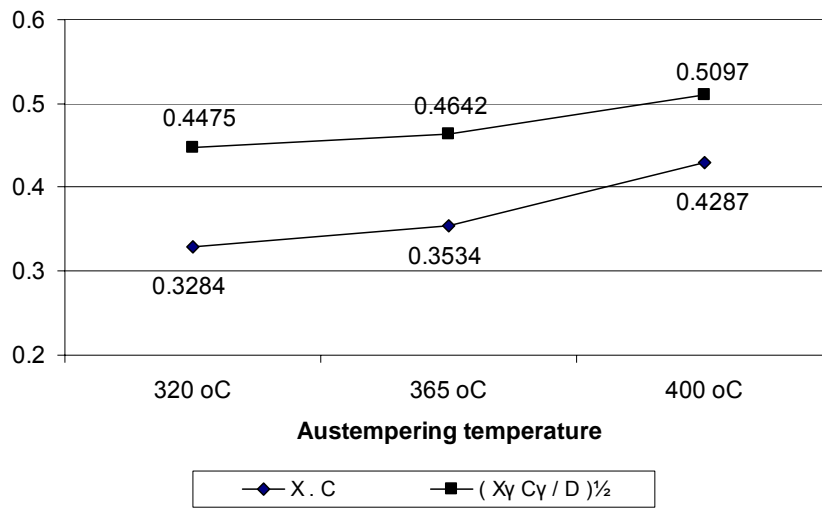
شکل ۳) تصویر SEM تیغه های فریت در دمای آستمپر 325°C و زمان ۱۰۵ دقیقه (محلول اچ : نایتال ۲٪)



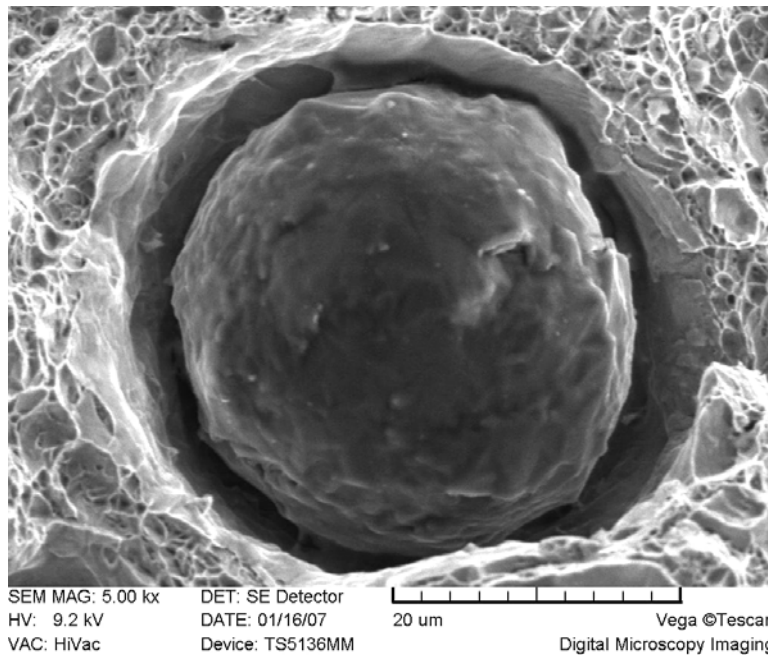
شکل ۴ (تصویر SEM تیغه های فریت در دمای آستمپر 400°C و زمان ۹۰ دقیقه (محلول اچ : نایتال ۲٪)



شکل ۵ (مقایسه رفتار خستگی نمونه های چدن داکتیل و ADI های آستمپر شده در دماهای ۲۲۰، ۳۶۵ و 400°C)



شکل ۶) نمودار تغییرات $X_{\gamma} . C_{\gamma}$ و $(X_{\gamma} C_{\gamma} / D)^{1/2}$ در هر دمای آستمپر



شکل ۷) منطقه شکست نهایی از سطح شکست نمونه آستمپر شده در $365^{\circ}C$ وجود Dimpleها در اطراف کره گرافیت مشخص است