

INVESTIGATION OF TENSILE MEAN STRESS EFFECT ON FATIGUE BEHAVIOR OF POROUS SINTERED Ni STEEL

H. Abdoos

Phd. Student, Faculty of
Mechanical Engineering,
K.N.Toosi University of
Technology,
hassan.abdoos@gmail.com.

A.R. Shahani

Professor, The Head of Fracture
Mechanic Lab., Faculty of
Mechanical Engineering,
K.N.Toosi University of
Shahani@kntu.ac.ir Technology,

H. Khorsand

Asistant Professor,
Material Division, Faculty
of Mechanical Engineering,
K.N.Toosi University of
Technology,
hkhorsand@kntu.ac.ir

Abstract: The demand for lower production costs and unique advantages resulted in the use of PM materials even for highly stressed fatigue loaded components. Behind of microstructure, mean stress, as a most important fatigue loading parameter, has a strong effect on cyclic performance of sintered steels. In present study, the effect of mean stress on fatigue behavior of diffusion-bonded, Distaloy AE, powder metallurgy low alloy steel was investigated. Axial fatigue tests were performed on standard samples of this steel with two carbon contents and in a range of tensile mean stresses. On principle the fatigue life is shortened by tensile mean stress. Microstructural investigations reveal that for tensile mean stress pores are widened and linked up by cracks. Moreover fractography evaluation on fatigue fracture surface indicated the multiple fatigue cracks initiation sites with increasing the tensile mean stress. Evaluation of experimental results and plotted curves propose criteria, that with use of this, we can predict endurance fatigue limits of this steel in non zero mean stress conditions.

بررسی تجربی تاثیر تنش متوسط کششی بر رفتار تناوبی فولادهای متخلخل تفجوشی شده حاوی نیکل

حسن عبدوس، امیررضا شاهانی و حمید خرسند

چکیده: امروزه مزایای منحصر بفرد متالورژی پودر باعث گسترش کاربرد این فرآیند در تولید اجزایی شده است که در معرض بارهای تکرارشونده قرار دارند. علاوه بر تاثیر ریزساختار بر رفتار تناوبی مواد متخلخل تفجوشی شده، پارامترهای بارگذاری و بالاخص میزان تنش متوسط، متغیرهای مهمی در تخمین عمر خستگی این مواد محسوب می گردند. در تحقیق حاضر تاثیر تنش متوسط بر رفتار خستگی فولاد با باندهای نفوذی Distaloy AE، مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور نمونه های استاندارد متالورژی پودر از جنس فولاد مذکور، محتوی دو مقدار مختلف کربن، در سه میزان تنش متوسط تحت آزمون خستگی محوری قرار گرفتند.

تاریخ وصول: ۸۶/۷/۱۳

تاریخ تصویب: ۸۷/۱۲/۲۰

حسن عبدوس، دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، hassan.abdoos@gmail.com

دکتر امیررضا شاهانی، استاد، سرپرست آزمایشگاه تحقیقاتی مکانیک شکست، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، Shahani@kntu.ac.ir

دکتر حمید خرسند، استادیار گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، hkhorsand@kntu.ac.ir.

بعلاوه مطالعات ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری و الکترونی صورت پذیرفت. نتایج آزمونهای خستگی نشان می‌دهند که ازدیاد تنش متوسط کششی منجر به کاهش حد تحمل خستگی در فولادهای مذکور می‌گردد. بعلاوه افزایش کربن در فولادهای مورد مطالعه منجر به تشکیل ریزساختارهایی با استحکام بالاتر می‌شود که بهبود عمر قطعات را به‌راه دارد. مشاهدات ریزساختاری موید تغییر شکل حفرات و اتصال آسان آنها به همراه جوانه زنی ترک از نقاط بیشتر به ازای افزایش تنش متوسط کششی می‌باشد که منجر به کاهش عمر قطعات متخلخل می‌گردد که در معرض بارهای تکرارشونده قرار دارند. همچنین ترسیم نمودارهای مربوط به رفتار خستگی در تنشهای میانگین مختلف و استفاده از معیارهای موجود، برای پیش بینی اثر تنش متوسط، رابطه و روندی را پیشنهاد می‌کنند که با استفاده از آن تخمین حد خستگی محوری این فولاد در شرایط تنش میانگین غیر صفر مقدور می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: متالورژی پودر، رفتار خستگی، تنش متوسط، ریزساختار.

۱. مقدمه

متالورژی پودر یا PM به فرآیندی اطلاق می‌گردد که در آن قطعات از طریق فشرده شدن پودر فلزات در قالب و سپس حرارت دهی تحت دما، زمان و اتمسفر مناسب (تف جوشی) تولید می‌گردند. این فرآیند بدلیل توانایی در تولید قطعات با اشکال پیچیده و ابعاد دقیق، همچنین کم کردن مراحل تولید باعث کاهش هزینه‌ها شده و در بسیاری موارد گوی سبقت را در تولید انبوه از سایر روشهای متداول مانند پرس‌کاری، ریخته‌گری و ماشین‌کاری ربوده است. ادامه این رقابت و افزایش گستره کاربرد این فرآیند تولید، مستلزم بهبود رفتار مکانیکی و بویژه رفتار خستگی قطعات تولیدی بدین روش می‌باشد، به گونه‌ای که در سالهای اخیر مطالعات زیادی نیز در این راستا صورت پذیرفته است [۱ و ۲].

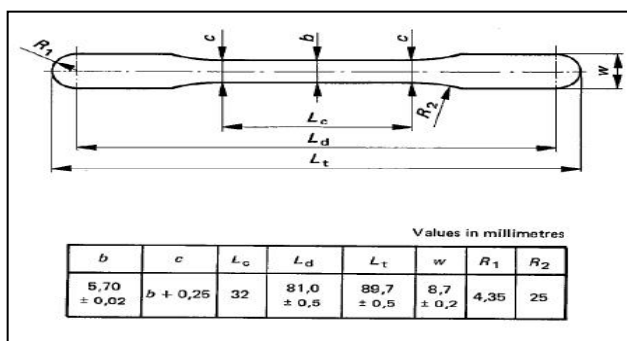
طبق تعریف [۳]، خستگی تغییرات ساختاری فراینده، موضعی و دائمی است که هنگامیکه ماده در معرض تنشها و کرنشهای نوسانی می‌باشد در آن ایجاد شده و منجر به جوانه‌زنی و رشد ترک و نهایتاً شکست ماده پس از تعداد کافی چرخه‌ها می‌شود. با توجه به پیچیدگی ماهیت خستگی، ریزساختار و دانسیته به عنوان مهمترین متغیرهای تأثیرگذار بر رفتار تناوبی مواد متالورژی پودر مطرح می‌باشند [۴ و ۵]. علاوه بر عوامل ریزساختاری موثر بر استحکام خستگی پارامترهای دیگری مانند تنش متوسط، فرکانس و اثر شکاف نیز بر عمر خستگی قطعات متالورژی پودر تأثیر گذارنده از این میان تنش متوسط، که بصورت نیروی استاتیکی اضافه شده به تنش های سیکلی اعمالی به قطعه در حین بارگذاری خستگی تعریف می‌شود، از اهمیت بیشتری برخوردار است [۶ و ۷].

ریزساختار حاصل در مواد متالورژی پودر با توجه به روش آلیاژ سازی (استفاده از پودرهای از پیش آلیاژ شده، باندهای نفوذی و از پیش مخلوط شده) می‌تواند همگن و یاغیر همگن باشد. دیدگاههای متفاوتی در مورد تأثیر همگن و یا ناهمگن بودن ریزساختار بر رفتار تناوبی این نوع فولادها وجود دارد. طبق دیدگاه کلاسیک، فولادهای با ساختار همگن (پیش آلیاژ شده) ترجیح داده

می‌شوند. در مقابل محققین دیگری [۸ و ۹]، اعتقاد دارند که فازها در ریزساختار ناهمگن موجب تقویت یکدیگر (مانند مواد کامپوزیت) شده و در نتیجه موجب ارتقاء و بهبود خواص خستگی می‌گردند. آلیاژ سازی نفوذی، شامل ایجاد باندهای حرارتی بین ذرات پودر آلیاژی کوچک و ذرات بزرگ آهن، بعنوان مهمترین روش ایجاد ساختارهای ناهمگن کنترل شده مطرح می‌باشد. عموماً پودرها برای تشویق ایجاد پیوند بین ذرات آهن و عناصر آلیاژی قبل از پرس و تف جوشی آئیل می‌شوند. نیکل، مس و مولیبدن از مهمترین عناصر در این نوع آلیاژها می‌باشند. افزایش نیکل و مس هر کدام بترتیب حدود ۴٪ و ۲٪ در ایجاد ریزساختار مقاوم در برابر خستگی مفید می‌باشند [۱۰]. آزمونهای آزمایشگاهی خستگی عمدتاً به صورتهای خمشی (چرخشی یا خمشی خالص)، پیچشی، کششی- کششی و کششی-فشاری محوری انجام می‌گیرند و بسیاری از آنها، در برگیرنده ترازهای تنشی بین یک کمینه و یک بیشینه ثابت می‌باشند. در این نوع بارگذاریها محدوده تنش $\Delta\sigma$ ، تفاوت بین مقادیر کمینه و بیشینه می‌باشد. میانگین مقادیر کمینه و بیشینه تنش متوسط، σ_m ، را نتیجه می‌دهد و نصف محدوده تنش بعنوان دامنه تنش σ_a ، شناخته می‌شود. در مورد مواد متالورژی پودر اکثر داده‌های موجود در مراجع مربوط به بارگذاریهای خمشی و سیکلهای کاملاً معکوس شونده (تنش متوسط برابر صفر) بوده و به ندرت حد خستگی این مواد در تنشهای میانگین غیر صفر تعیین شده است [۱۱]، در حالیکه کاربرد نمونه‌هایی که بطور محوری بارگذاری می‌شوند واقع گرایانه‌تر است، زیرا مشابه بارگذاری درحین کار است که تنش متوسط، متغیر مهمی می‌باشد. تأثیر تنش میانگین به صورتی است که می‌تواند دیاگرام S-N خستگی را جابجا کند. اصولاً برای یک دامنه تنش، تنش متوسط کششی منجر به عمر کوتاهتر خستگی نسبت به تنش متوسط صفر می‌شود و تنش متوسط فشاری منجر به افزایش عمر خستگی می‌گردد [۶ و ۷].

² . Stress Amplitude

صورت پذیرفت. چگالی قطعات طبق استاندارد ASTM-B ۳۲۸ [۱۶]، اندازه‌گیری گردید، که برای کلیه آنها در محدوده gr/cm^3 $0.5 \pm 7/15$ قرار دارد. تست خستگی محوری بر دو نوع نمونه با مقادیر مختلف کرن با نسبت تنش بزرگتر از صفر ($R > 0$)، بوسیله دستگاه تست خستگی، Servo-hydraulic Zwick/Roell، در آزمایشگاه مکانیک شکست دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی انجام پذیرفت. سپس تعداد چرخه‌ها تا شکست برای قطعات تحت بارگذاری خستگی با توجه به استانداردهای E-۴۶۸ و ASTM-E۴۶۶ [۱۷ و ۱۸]، تعیین گردیدند. لازم به ذکر است که در هر یک از شرایط بارگذاری، آزمایش سه بار تکرار شده و تعداد چرخه گزارش شده برابر میانگین سه آزمایش صحیح می‌باشد. برای تعیین استحکام کششی نهایی، تست کشش مطابق با استاندارد MPIF-۱۰ [۱۹]، انجام پذیرفت. همچنین مطالعات ریزساختاری و شکست نگاری نیز بر سطوح شکست خستگی قطعات به کمک میکروسکوپیهای نوری و الکترونی صورت گرفت. لازم به ذکر است که تصاویر شکست‌نگاری از نواحی مرکزی و نزدیک سطح سطوح شکست قطعات و تصاویر ریزساختاری از نواحی جانبی سطوح شکست تهیه گردیدند.



شکل ۱. نقشه فنی نمونه های تخت دمبلی طبق استاندارد ISO-۳۹۲۸ [۱۵].

۳. یافته ها و بحث

نتایج مربوط به بررسی‌های متالوگرافی در شکل ۲، برای فولاد Distaloy AE با $0/5$ درصد کرن، نشان داده شده است. ریزساختار این نوع فولاد شامل ذرات پودر پایه فریتی - پرلیتی، شبکه مارتنزیتی غنی از مس - نیکل که اطراف پودرهای پایه را احاطه کرده است و نواحی آستنیتی غنی از نیکل که عمدتاً در اطراف حفرات مشاهده می‌شود، می‌باشد. مطابق شکل ۳، با افزایش میزان کرن، کسر فریت موجود در ذرات پودر پایه کاهش یافته و به تبع آن ذرات پودر پایه دارای ریز ساختار با زمینه عمدتاً پرلیتی می‌گردند. همچنین آزمون میکروسختی به منظور تشخیص فازهای متالورژیکی و بررسی و تایید تاثیر کرن بر افزایش کسر پرلیت موجود در ذرات پودر پایه مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمون میکروسختی مؤید این حقیقت است که با افزایش کرن

مطالعات بسیار محدودی در ارتباط با اثر تنش میانگین، بر رفتار خستگی مواد متالورژی پودر صورت پذیرفته است که اکثریت آنها به تعیین ضریب حساسیت تنش متوسط^۳ در بارگذاری خمشی پرداخته‌اند [۱۲-۱۴]. حساسیت به تنش متوسط، بصورت کاهش حد تحمل به ازای افزایش تنش میانگین، تعریف می‌گردد. نمازوف^۴ [۱۴]، با انجام آزمایش و بدست آوردن ضرایب حساسیت به تنش متوسط مربوط به طیف وسیعی از فولادهای تفجوشی شده که در شرایط مختلفی قرار داشتند، مشخص کرد که این مقادیر برای مواد داکتیل کمتر از مواد ترد می‌باشد. وی همچنین عملیات حرارتی و وجود عنصر فسفر در فولادهای متالورژی پودر را عامل افزایش تردی و ضریب حساسیت می‌داند. سانسینو^۵ [۱۲]، نیز در این ارتباط با وی هم عقیده است. روش مفید دیگر برای ارزیابی تأثیر تنش میانگین استفاده از روابطی است، که دامنه تنش تناوبی را به تنش متوسط مرتبط می‌سازند (مانند روابط گودمن، گربر، مور و ...). علی‌رغم اینکه استفاده از این الگوها برای مواد با چگالی کامل توصیه گردیده و به کرات مورد استفاده قرار گرفته است [۷ و ۶]، ولیکن استفاده از آنها برای فولادهای متخلخل بسیار نادر می‌باشد. به عبارت دیگر در ارتباط با فولادهای مذکور که در معرض بارهای تکرارشونده با تنش متوسط قرار دارند، کمتر از روابط تجربی برای تخمین عمر خستگی استفاده شده است.

در مطالعه پیش رو سعی بر اینست که تخمین حدود خستگی به کمک روابط تجربی معتبر و مطرح که تنش تناوبی را به تنش متوسط مربوط می‌سازند صورت پذیرد، به گونه‌ای که در انتها روابط مناسب که با نتایج تجربی حاصل از آزمایش‌ها، سازگاری بیشتری دارد جهت تخمین حدود خستگی در تنشهای متوسط معرفی و به کار گرفته شوند. همانطور که ذکر گردید این شیوه تاکنون بصورت بسیار محدود برای فولادهای متالورژی پودر مورد استفاده واقع شده که همین امر بر جداییهای این پژوهش می‌افزاید.

۲. مواد و روش تحقیق

در این تحقیق جهت انجام آزمایشها، پودر Distaloy AE، انتخاب گردید. این پودر شامل ذرات افشانش آبی آهنی می‌باشد که با 4% نیکل، $1/5\%$ مس و $0/5\%$ مولیبدن به صورت جزئی تحت آلیاژی سازی با شرایط نفوذ در حالت جامد قرار گرفته است. به پودر مذکور $0/3$ و $0/5\%$ کرن بصورت ذرات ریز گرافیت (UF4) و $0/8\%$ استئارات روی بعنوان روانکار افزوده گردید. پس از اختلاط، مخلوط پودرها در قالب و تحت فشار حدود 600 MPa فشرده شدند و نمونه های تخت دمبلی شکل مطابق استاندارد ISO-۳۹۲۸ [۱۵]، که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند، تهیه گردیدند. تفجوشی نمونه ها دردمای 1120° و در اتمسفر $90\% N_2 / 10\% H_2$ تحت شرایط صنعتی

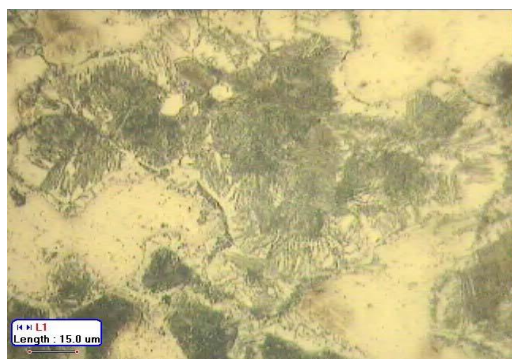
³. Mean Stress Sensitivity

⁴. S.N.Namazov

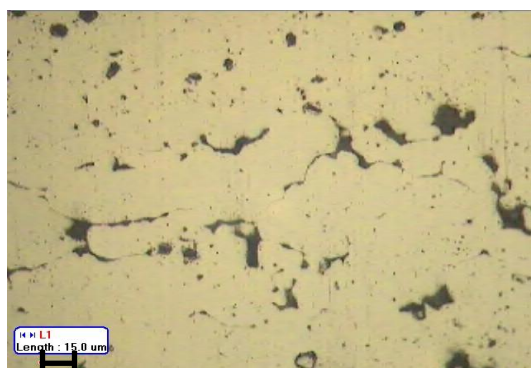
⁵. C.M. Sonsino



شکل ۳. افزایش کسر پرلیت موجود در ذرات پودر پایه در اثر افزایش میزان کربن الف) ۰/۳٪ و ب) ۰/۵٪ کربن

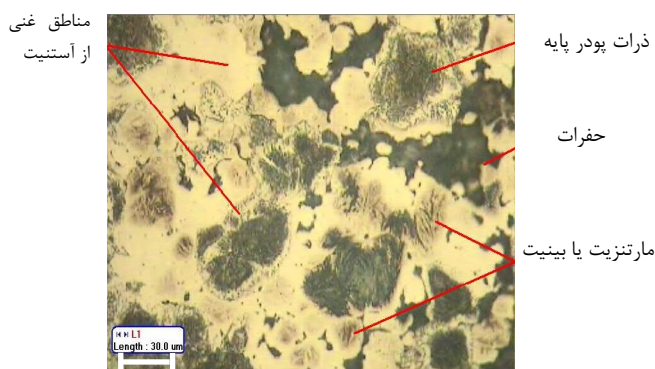


شکل ۴. ریز ساختار حفرات قبل از حک شیمیایی مربوط به فولاد با ۰/۳ درصد کربن در تنش متوسط ۲۵۰ MPa.



شکل ۵. ریز ساختار حفرات قبل از حک شیمیایی مربوط به فولاد با ۰/۵ درصد کربن در تنش متوسط ۲۵۰ MPa.

میزان سختی ذرات پودر پایه افزایش می‌یابد. افزون بر این کربن منجر به افزایش سختی و استحکام سایر فازهای موجود در ریزساختار مانند مارتنزیت و بینیت نیز می‌گردد. تحقیقات [۲۰]، نشان می‌دهد که افزایش سختی که مسلماً با بهبود استحکام مواد همراه می‌باشد تاثیر مثبتی را در مقاومت به خستگی فولادهای با باندهای نفوذی برجای می‌گذارد.



شکل ۲. ریز ساختار عمومی فولاد Distaloy AE با ۰/۵ درصد کربن.

اثر تنش متوسط بر رفتار خستگی مواد تفجوشی شده توسط پیتروسکی^۶ [۱۳]، بررسی شده است. مشاهدات وی نشان می‌دهند که افزایش تنش متوسط کششی، کاهش حد خستگی را در اثر افزایش قطر حفره‌ها و اتصال راحت‌تر ریز ترکها به یکدیگر به همراه خواهد داشت. در پژوهش حاضر نیز مشاهده ریزساختار تخلخلی قبل از حک شیمیایی، مربوط به قطعاتی که در تنش‌های میانگین مختلف تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفته‌اند، موید تغییر شکل جهت‌دار حفرات می‌باشد. این موضوع را می‌توان با مشاهده شکلهای ۴ الی ۷ برای هر دو نوع فولاد محتوی ۰/۳ و ۰/۵ درصد کربن دریافت. شکلهای مذکور مربوط به قطعاتی هستند که در دامنه تنش تناوبی ثابت ۲۰۰ MPa، و در تنشهای متوسط مختلف آزمایش شده‌اند. تغییر شکل و باز شدن حفرات با افزایش تنش متوسط از ۲۵۰ MPa در شکل‌های ۴ و ۵، به ۳۵۰ MPa در اشکال ۶ و ۷، به وضوح آشکاراست. فرآیند فوق موجب تسهیل در به هم پیوستن حفرات می‌گردد، که منجر به ازدیاد طول سریع ترک و در نتیجه عمر کوتاهتر خستگی می‌شود. تصاویر ریزساختاری که دقیقاً از سطوح زیر شکست تهیه شده‌اند اتصال آسان حفرات بدلیل تغییر شکل و باز شدن آنها را با افزایش تنش متوسط نشان می‌دهند. برای مثال در شکل ۸، ریزساختار حفرات را می‌توان در زیر سطح شکست مشاهده کرد. در این تصویر کیفیت تغییر شکل حفرات، چگونگی اتصال آنها به یکدیگر و نهایتاً ایجاد ترک برای فولاد با ۰/۳٪ کربن به آسانی قابل رؤیت می‌باشد.

⁶ A. Piotrowski

یک نقطه کمک می‌کند. به عبارت دیگر علاوه بر نواحی واقع در سطح و یا نزدیک به آن، سایر مناطق نیز جهت جوانه زنی ترک مستعد می‌گردند. تشکیل این ریز ترکها به همراه افزایش تنش متوسط موجبات رشد آسان ترک و در نتیجه شکست زود هنگام را فراهم می‌آورد.

این موضوع برای فولاد با ۰/۳ درصد کربن در شکل‌های ۹ و ۱۰ قابل مشاهده می‌باشد. شکل‌های مذکور ریزترک‌هایی را نشان می‌دهند که در اثر افزایش تنش متوسط در نواحی مرکزی قطعات، علاوه بر ترک‌هایی که از سطح نشات می‌گیرند، جوانه زده و رشد می‌کنند. نتایج تحقیقات شکست نگاری درار^۷ [۲۱]، نیز نشان می‌دهد که با افزایش میزان تنش اعمالی به قطعات در حین بارگذاری تناوبی، جوانه‌زنی ترک از چندین مکان در مناطق مختلف به طور همزمان آغاز می‌گردد.

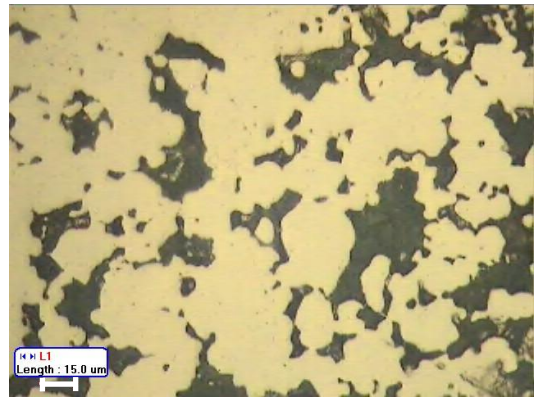
داده‌های مربوط به نتایج آزمونهای خستگی عموماً بصورت دامنه تنش بر حسب تعداد سیکل‌های شکست (دیگرامهای S-N) نمایش داده می‌شوند. شکل‌های ۱۱ و ۱۲، این نمودارها را برای فولادهای تفجوشی شده مورد آزمایش در مقادیر تنش متوسط مختلف نشان می‌دهند. رسم نمودارهای مذکور برای انواع فولادهای تفجوشی شده، نشان می‌دهد که برای این نوع فولادها، همانند مواد با چگالی کامل، نتایج حاصل از دیگرامهای S-N، را می‌توان تا قبل از 10^6 سیکل بصورت یک خط راست تقریب زد [۱۴ و ۲۲]. برای داده‌هایی که بصورت یک خط مستقیم روی این نوع ترسیم تقریب زده شوند، معادله موسوم به بسکوین^۸ بین دامنه تنش تناوبی (σ_a) و تعداد سیکلها (N_f) برقرار می‌باشد:

$$\sigma_a = A(N_f)^B \quad (1)$$

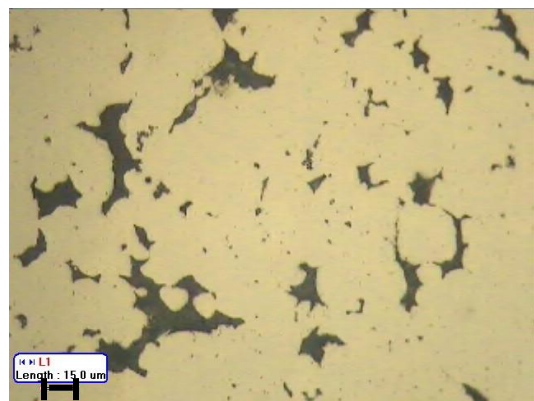
که A، ضریب استحکام و B توان استحکام خستگی می‌باشند.



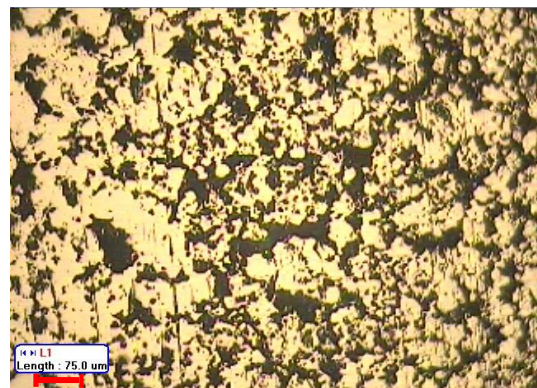
شکل ۹. ریز ترک‌های مشاهده شده در نواحی مرکزی سطح شکست، مربوط به فولاد D.AE با ۰/۳ درصد کربن در تنش متوسط ۲۵۰ MPa.



شکل ۶. ریز ساختار حفرات قبل از حک شیمیایی مربوط به فولاد با ۰/۳ درصد کربن در تنش متوسط ۳۵۰ MPa.



شکل ۷. ریز ساختار حفرات قبل از حک شیمیایی مربوط به فولاد با ۰/۵ درصد کربن در تنش متوسط ۳۵۰ MPa.



شکل ۸. تصویر قبل از حک شیمیایی مربوط به سطح زیر شکست برای فولاد با ۰/۳ درصد کربن در تنش متوسط ۳۵۰ MPa.

در پژوهش حاضر، مقایسه تصاویر میکروسکوپ الکترونی مربوط به ریزترک‌های موجود در قطعات تحت بارگذاریهای مختلف نشان می‌دهند، هنگامیکه تنش متوسط در دامنه تنش ثابت افزایش می‌یابد، تغییر فرم پلاستیک موضعی به جوانه زنی ترکها در بیش از

⁷ .H.Drar

⁸ .Basquin

(۱)، برای فولادهای مورد مطالعه به ازای تنشهای متوسط مختلف با توجه به نمودارهای $S-N$ ، محاسبه و در جدول ۱، قابل مشاهده می‌باشند. ملاحظه می‌گردد با آنکه توان استحکام خستگی در دو نوع فولاد مورد نظر تفاوت عمده‌ای نکرده، اما ضریب استحکام خستگی با افزایش میزان کربن از ۰/۳ به ۰/۵ درصد بین ۰/۶۸ تا ۱۰٪ افزایش یافته است. این موضوع مقاومت خستگی بالاتر برای فولاد محتوی کربن بیشتر را پیش‌بینی می‌کند. بررسی داده‌های حاصل از آزمایشهای خستگی و نمودارهای مربوط نیز نشان می‌دهند که در کلیه شرایط بارگذاری، فولاد با ۰/۵٪ کربن دارای مقاومت به خستگی بهتری نسبت به فولاد حاوی ۰/۳٪ کربن می‌باشد. مقاومت به خستگی با افزایش میزان کربن، در نتیجه ایجاد ریزساختارهای با استحکام بیشتر، بهبود می‌یابد. این واقعیت توسط سایر محققین نیز مورد بررسی و تایید قرار گرفته است [۲۰].

جدول ۱. ثوابت معادله (۱) برای فولادهای مورد تحقیق

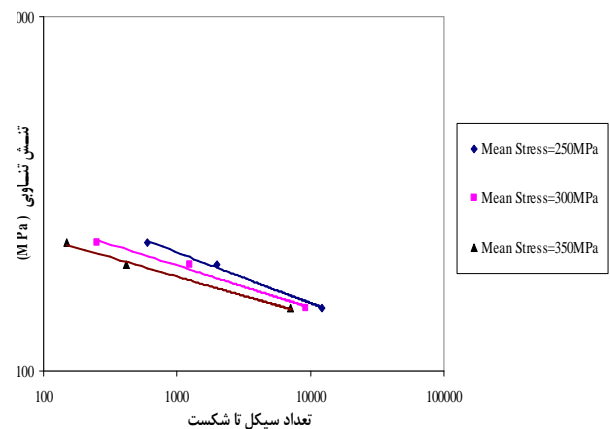
گروه	تنش متوسط (Mpa)	ثابت A	ثابت B
D.AE+0.3%C	۲۵۰	۵۸۲	-۰/۱۴
	۳۰۰	۴۵۳	-۰/۱۱
	۳۵۰	۳۹۱	-۰/۱۰
D.AE+0.5%C	۲۵۰	۵۸۶	-۰/۱۳
	۳۰۰	۴۷۶	-۰/۱۲
	۳۵۰	۴۳۲	-۰/۱۱

روشهای متفاوتی برای نشان دادن اثر تنش متوسط وجود دارد. راه حلی که در این تحقیق انتخاب شده است شامل رسم دیاگرام‌های عمر ثابت است. ترسیم این نمودارها با گرفتن نقاط از منحنی‌های $S-N$ در مقادیر مختلف عمر و سپس نمایش ترکیبات دامنه تنش و تنش متوسط که هر کدام از این عمرها را تولید می‌کنند، صورت می‌گیرد. برون‌یابی بین این خطوط روی هر نوع ترسیم می‌تواند برای تعیین عمرهای خستگی در تنشهای مختلف اعمال شده بکار رود. شکل‌های ۱۳ و ۱۴، منحنی‌های عمر ثابت حاصل از نمودارهای $S-N$ مربوط به این تحقیق را برای برخی از چرخه‌هایی که در آنها شکست اتفاق افتاده و سایر چرخه‌ها نشان می‌دهند.

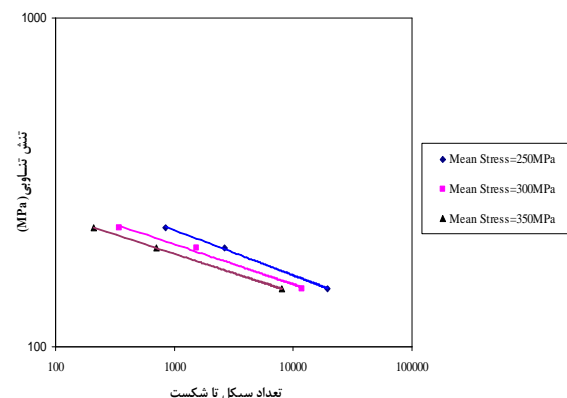
ملاحظه می‌شود که بر روی منحنی‌های عمر ثابت، افزایش تنش میانگین با کاهش دامنه تنش همراه است. این موضوع تأثیر منفی تنش متوسط کششی بر عمر خستگی قطعات متخلخل متالورژی پودر را نشان می‌دهد که در توافق با نتایج حاصل از تحقیقات سایر محققین می‌باشد [۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۲۳]. محل تلاقی نمودارها با محور افقی برابر استحکام کششی نهایی σ_{II} ، می‌باشد که با توجه به نتایج آزمون کشش نمونه‌های مورد مطالعه استخراج شده است. به بیان دیگر هنگامیکه نیرویی معادل استحکام کششی یک ماده به آن وارد شود، دامنه تنش تناوبی مجاز اعمالی بر آن، برابر صفر خواهد بود



شکل ۱۰. ریز ترکهای مشاهده شده در نواحی مرکزی سطح شکست، مربوط به فولاد D.AE با ۰/۳ درصد کربن در تنش متوسط ۳۰۰ MPa.

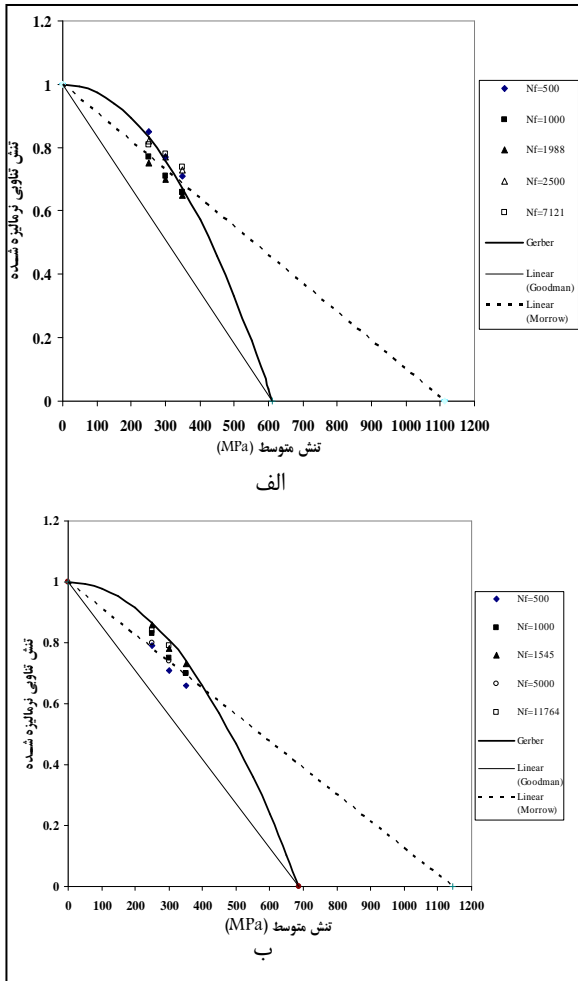


شکل ۱۱. دیاگرام S-N مربوط به فولاد Distaloy AE با ۰/۳٪ کربن در مقیاس لگاریتمی-لگاریتمی.



شکل ۱۲. دیاگرام S-N مربوط به فولاد Distaloy AE با ۰/۵٪ کربن در مقیاس لگاریتمی-لگاریتمی.

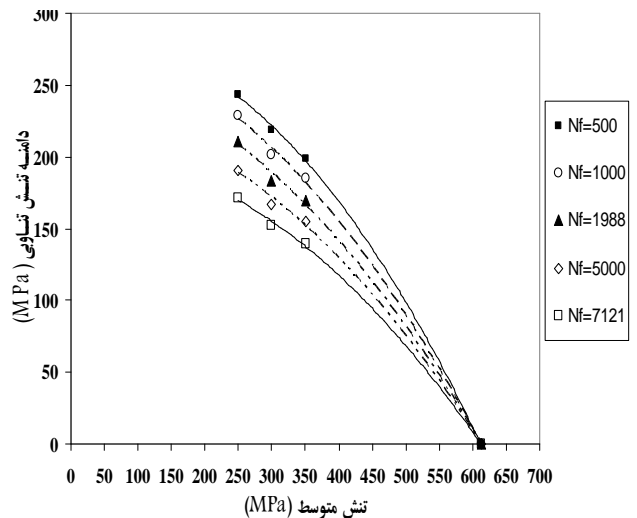
با توجه به نمودارهای موجود در شکل‌های ۱۱ و ۱۲، ملاحظه می‌گردد که تغییرات دامنه تنش تناوبی بر حسب تعداد سیکلها در ترسیم لگاریتمی-لگاریتمی بصورت خطی می‌باشد. ثوابت معادله



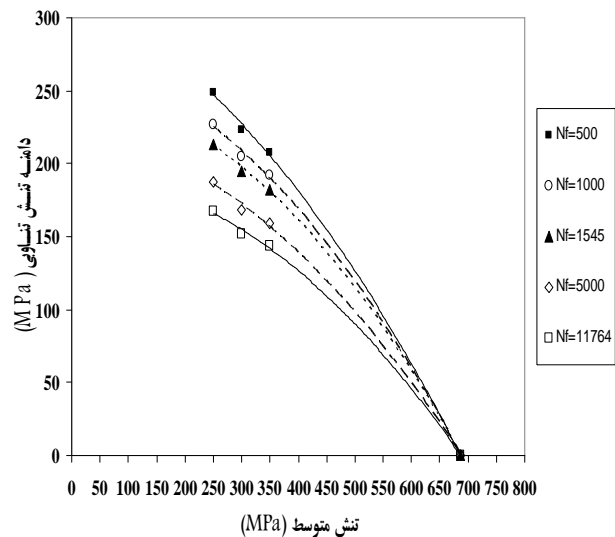
شکل ۱۵. دیاگرامهای میانگین دامنه نرمالایز شده مربوط به فولاد D.AE (الف) ۰/۳٪ کربن (ب) ۰/۵٪ کربن

عموما برای نمایش چگونگی تغییرات نتایج موجود و پیش بینی مقدار استحکام خستگی مواد در حضور تنش متوسط، در این نوع نمودارها، یک سری از روابط و یا معادلات تجربی مرسوم و متداول مورد استفاده قرار می‌گیرند. با در نظر گرفتن این مفهوم که در تنش متوسط صفر مقادیر σ_a و σ_m با یکدیگر برابر می‌باشند می‌توان به این نتیجه رسید که همه روابط و معادلات مذکور که برای بیان نحوه تغییرات نتایج در نمودارهای میانگین - دامنه نرمالایز شده^۹ ارائه می‌گردند در $\sigma_m = 0$ سازگاری داشته و تمایل دارند تا اطلاعات تنشهای میانگین مختلف و عمرها را در منحنی‌های ساده‌ای ادغام کنند. در تحقیق حاضر این امر فرصتی را برای تطبیق یک منحنی ساده خطی فراهم می‌کند. برای مقادیر دامنه تنشی که به صفر می‌رسند، تنش میانگین باید به استحکام نهایی ماده برسد. بنابراین، یک خط یا منحنی که چنین داده‌هایی را نمایش می‌دهد از دو نقطه $(0,1)$ و $(\sigma_m, \sigma_a/\sigma_{ar})$ می‌گذرد.

که در این شرایط نمونه قادر به تحمل هیچ نیروی سیکلی نمی‌باشد [۷]. اگر فرض شود که مقدار دامنه تنش برای حالت خاص تنش میانگین صفر برابر σ_{ar} باشد. روی یک دیاگرام عمر ثابت مقدار σ_{ar} ، تقاطع در $\sigma_m = 0$ منحنی برای هر عمر خاص می‌باشد. برای نمودارهای ۱۳ و ۱۴، این مقادیر (σ_{ar}) با برون‌یابی و بدست آوردن معادله مربوط به منحنی در هر عمر خاص و محاسبه محل تلاقی آن با محور y ها محاسبه شده است. نمودارهای عمر ثابت می‌توانند به شیوه ای مناسب با رسم مقادیر نسبت σ_a/σ_{ar} بر حسب تنش میانگین σ_m ، نرمالایز شوند. نتیجه این نرمال سازی داده‌ها، در شکل ۱۵، برای برخی چرخه‌ها که در حین انجام آزمون خستگی شکست در آنها بوقوع پیوسته و سایر چرخه‌ها قابل رویت می‌باشد.



شکل ۱۳. دیاگرام عمر ثابت برای فولاد D.AE+0.3%C



شکل ۱۴. دیاگرام عمر ثابت برای فولاد D.AE+0.5%C

^۹ Normalized Amplitude-Mean Diagram

بصورت معادله (۵) نشان داده می‌شود، با جایگزینی σ_u ، با ثابت σ_f ، در رابطه (۳) بدست می‌آید.

$$\frac{\sigma_e}{\sigma_{er}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_f} = 1 \quad (۵)$$

معادله فوق و اصلاح مربوط به خط گودمن توسط مورو^{۱۲} برای اولین بار در سال ۱۹۶۸ پیشنهاد گردید [۷].

همه نمودارهای مربوط به معادلات تجربی مورد بحث به همراه نتایج نرمالایز شده حاصل از آزمون خستگی در تنشهای متوسط مختلف در شکل ۱۵، نشان داده شده‌اند. نتایج حاصل از آزمونهای عملی بر روی محدوده وسیعی از مواد با چگالی کامل، نشان می‌دهند که اغلب برای تنشهای میانگین کششی، سازگاری داده‌ها به جنس ماده و خصوصیات ریزساختاری آن بستگی دارد [۷و۶]. با دقت در این شکلها می‌توان بیان نمود که داده‌ها تمایل دارند بالاتر از خط گودمن قرار گیرند. این موضوع سبب می‌گردد که در صورت استفاده از رابطه گودمن برای تخمین حد تحمل خستگی، مقادیر پیش بینی شده حالت محافظه کارانه‌ای داشته و کمتر از مقادیر واقعی باشند. به همین دلیل بنظر می‌رسد که استفاده از رابطه مورو و مقدار تقاطع بزرگتر روی محور σ_m که با خط چین در این اشکال نشان داده شده است، نسبت به استفاده از σ_u ، سازگاری بهتری را با داده‌های آزمایش برای تنش میانگین کششی مورد آزمون، از خود نشان دهد.

علاوه بر این نمودارها، منحنی گربر نیز که با توجه به معادله (۴) در شکل ۱۵ ترسیم گردیده، تطبیق مناسبی را با داده‌های آزمون خستگی مخصوصا در فولاد Distaloy AE حاوی ۰/۳٪ کربن به نمایش می‌گذارد. اما آنچه مسلم است اینکه در محدوده تنشهای مورد آزمایش هر دو روابط گربر و مورو دارای سازگاری مناسبی با داده‌های حاصل از آزمون خستگی می‌باشند، منتها کاربرد تخمین مورو بدلیل خطی بودن آن آسان تر می‌باشد.

یکی از محاسن مهم روابط تجربی که حد تحمل خستگی^{۱۳} را به تنش میانگین مرتبط می‌سازند اینست که با استفاده از آنها می‌توان حدود تحمل خستگی را در تنشهای میانگین مختلف بدست آورده و با یکدیگر مقایسه کرد. بدین منظور در ادامه بحث جهت پیش بینی مقادیر حدود تحمل خستگی توسط معیارهای گودمن، گربر و مورو به ترتیب معادلات ۴،۳ و ۵ مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در روابط مذکور به جای مقادیر σ_u ، استحکام کششی نهایی حاصل از آزمون کشش، به جای σ_f ، محل تلاقی منحنی‌های مورو در شکل ۱۵ با محور افقی و به جای σ_{er} میانگین نتایج حاصل از حداقل ۸ آزمون جداگانه و قابل اطمینان که توسط سایر

می‌گذرد [۷]. اغلب برای اتصال این دو نقطه از خط مستقیمی استفاده می‌شود. معادله خط مذکور عبارتست از:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{ar}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_u} = 1 \quad (۲)$$

این معادله را می‌توان در یک عمر خاص با جایگزینی مقدار σ_{ar} ، از منحنی کاملاً معکوس شونده S-N بکار برد. از آنجاییکه حدود خستگی، نقاطی روی منحنی‌های S-N همان عمر خاص هستند معادله به اینها نیز اعمال می‌گردد و خواهیم داشت:

$$\frac{\sigma_e}{\sigma_{er}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_u} = 1 \quad (۳)$$

که σ_e حد خستگی برای هر تنش میانگین σ_m و σ_{er} حد خستگی برای $\sigma_m = 0$ می‌باشد. معادله فوق معادله اصلاح شده گودمن^{۱۰} نامیده می‌شود. علاوه بر معادله گودمن که به آن اشاره گردید، روابط دیگری را نیز می‌توان، بمنظور انطباق بیشتر با نتایج موجود در شکل های ۱۵، بکار برد. یکی از این روابط به نام سهمی گربر^{۱۱} شناخته می‌شود، که رابطه آن بصورت ذیل بوده و در شکل ۱۵ نیز ترسیم گردیده است:

$$\frac{\sigma_e}{\sigma_{er}} + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_u}\right)^2 = 1 \quad (\sigma_m \geq 0) \quad (۴)$$

این معادله به تنشهای میانگین کششی محدود می‌شود، زیرا به طور غیر صحیحی، تاثیر مضر برای تنشهای میانگین فشاری تخمین می‌زند [۷]. با توجه به اینکه رسم خط نسبت به سهمی آسان تر بوده و نحوه تغییرات در محدوده تنشهای مورد آزمون نیز تا حد زیادی خطی بودن آنها را نشان می‌دهد، بنابراین استفاده از تقریب خط مستقیم نیز برای نمایش روند تغییرات می‌تواند مفید واقع شود. از آنجاییکه همه خطوط مربوط به روابط تجربی تخمین تاثیر تنش متوسط از نقطه (۰ و ۱) می‌گذرند، برای بدست آوردن معادله مناسب می‌توان به بهترین خطی که از این داده‌ها و نقطه (۰ و ۱) می‌گذرد متوسل شد. با توجه به اینکه خطوط مذکور محور افقی را در مقادیر بیشتری نسبت به استحکام کششی نهایی قطع می‌کنند، محل تلاقی آنها با محور X ها طبق تعریف [۷]، برابر σ_f ، یا استحکام واقعی شکست می‌باشد. برای اکثر فلزات ثابت σ_f بزرگتر از σ_u است. به این طریق می‌توان مقدار σ_f ، را برای دو نوع فولاد مورد تحقیق با استفاده از این مکانهای تلاقی بدست آورد که این مقادیر در جدول ۲ قابل مشاهده می‌باشند. رابطه مربوط به این خطوط که

¹² . J. Morrow

¹³ . Fatigue Endurance Limit

¹⁰ . Goodman

¹¹ . Gerber

که در این تحقیق نیز جستجوی بسیار جهت یافتن نتایج مربوط به آزمونهای معتبر خستگی در تنشهای متوسط منطبق با شرایط مورد نظر (تنشهای متوسط ۳۰۰، ۲۵۰ و ۳۵۰ MPa) دستاوردی در پی نداشت. حتی در معتبرترین بانک اطلاعاتی مواد متالورژی پودر در جهان^{۱۴} [۲۴]، نیز اکثر اطلاعات موجود در مورد رفتار خستگی محوری فولاد Distaloy AE، اغلب به مقادیر حد تحمل خستگی آن در شرایط بارگذاری کاملاً معکوس (تنش متوسط صفر) محدود می‌گردد.

بایس^{۱۵} [۲۳] و سانسینو^{۱۶} [۱۲]، مطرح‌ترین محققانی هستند که آزمایشهای متعددی را در ارتباط با تاثیر تنش متوسط بر رفتار خستگی انواع فولادهای متالورژی پودر انجام داده‌اند. آنها ابراز می‌دارند که بدلیل ساده بودن شرایط آزمونهای خستگی خمشی نسبت به حالت محوری، اکثر اطلاعات موجود در مقالات علمی معطوف به حدود خستگی در بارگذاریهای خمشی و در شرایط چرخه‌های کاملاً معکوس می‌گردد. بنابراین تنها راه حل این مشکل استفاده از روابط تجربی می‌باشد که قادرند حد خستگی خمشی را به حد خستگی محوری مرتبط سازند. برای مثال می‌توان به رابطه ذیل اشاره کرد که با استفاده از ۷۷ مورد از اطلاعات راجع به حد خستگی خمشی و محوری، بصورت آماری بدست آمده است و برای انواع فولادهای تفجوشی شده قابل اعمال می‌باشد [۲۳]:

$$\frac{\sigma_{eAx.}}{\sigma_{eBe.}} = 0.849 \pm 0.117 \quad (6)$$

در این رابطه $\sigma_{eAx.}$ حد خستگی در بارگذاری محوری و $\sigma_{eBe.}$ حد خستگی خمشی خالص می‌باشند.

عموماً تاثیر تنش متوسط بر رفتار تناوبی فولادهای تفجوشی شده را به صورت نمودارهای حد تحمل خستگی بر حسب تنش متوسط^{۱۷}، نمایش می‌دهند [۱۲]. با توجه به اینکه حد تحمل خستگی محوری فولاد مورد مطالعه با ۰/۵ درصد کربن و با چگالی حدود 7.15 gr/cm^3 در شرایط تنش متوسط صفر با استفاده از داده‌های معتبر [۲۴]، قابل دستیابی می‌باشد و ذکر این نکته که حد تحمل خستگی محوری فولاد مذکور در سایر شرایط تنش متوسط در دسترس نیست، لذا اگر بتوان حد خستگی خمشی مربوط به این فولاد، را در شرایط منطبق با این تحقیق از منظر فرآیند ساخت و در تنشهای متوسط دیگر یافت؛ می‌توان با استفاده از رابطه تجربی (۶) آنرا تبدیل نموده و با رسم آن در نمودارهایی که ذکر شد میزان مقادیر مورد نظر را با داده‌های بدست آمده در این پژوهش مقایسه کرد.

محققین [۲۴]، انجام پذیرفته است، جایگزین شدند. نتایج مربوط به پیش بینی σ_e طبق معیارهای فوق الذکر و دستورالعمل ذکر شده، برای هر دو نوع فولاد مورد تحقیق، در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. حدود خستگی فولاد متالورژی پودر D.AE برای تنش‌های متوسط مختلف طبق برآوردهای گودمن، گریب و مورو.

میزان کربن %	۰/۳			۰/۵		
σ_{u} (MPa)	۶۱۲			۶۸۷		
σ_f (MPa)	۱۱۱۴			۱۱۴۳		
σ_{er} (MPa) [۲۴]	۱۷۵			۲۰۵		
تنش میانگین (MPa)	۲۵۰	۳۰۰	۳۵۰	۲۵۰	۳۰۰	۳۵۰
σ_e طبق تخمین گودمن (MPa)	۱۰۳	۸۹	۷۵	۱۳۰	۱۱۵	۱۰۱
σ_e طبق تخمین گریب (MPa)	۱۴۶	۱۳۳	۱۱۸	۱۷۸	۱۶۶	۱۵۲
σ_e طبق تخمین مورو (MPa)	۱۳۶	۱۲۸	۱۲۰	۱۶۰	۱۵۱	۱۴۲

مقادیر ارزیابی شده حدود تحمل خستگی، مربوط به تنشهای متوسط کششی مختلف، نشان می‌دهند که افزایش تنش متوسط کششی با کاهش دامنه تنش تناوبی همراه می‌باشد. این کاهش برای D.AE با ۰/۳٪ کربن، هنگامیکه تنش متوسط از ۲۵۰ تا ۳۵۰ MPa افزایش می‌یابد طبق معیار گودمن تقریباً ۰/۲۷٪، بر مبنای معیار گریب حدود ۰/۱۹٪ و طبق رابطه مورو حدود ۰/۱۲٪ می‌باشد. همچنین این مقادیر برای فولاد با ۰/۵٪ کربن بترتیب حدود ۰/۲۲٪، ۰/۱۵٪ و ۰/۱۱٪ می‌باشند. واری نتایج موجود در جدول ۲، همانطور که از نمودارهای شکل ۱۵، نیز قابل استنتاج است، نشان می‌دهند که استفاده از معیار گودمن در مقایسه با معیارهای گریب و مورو منجر به پیش‌بینی حدود خستگی در مقادیر پایین‌تری می‌گردد و استفاده از آن برای تخمین حدود خستگی، در حضور تنشهای متوسط، مقادیر کمتر و غیر واقع‌گرایانه‌تری را بدست می‌دهد.

بررسی متون علمی محدودی [۱۲] و [۱۳] و [۲۳]، که در زمینه تاثیر تنش متوسط بر رفتار تناوبی فولادهای متخلخل تفجوشی شده موجود می‌باشند، نشان می‌دهند که روابط تجربی مانند گودمن، گریب و مورو که تنش تناوبی را به تنش متوسط مرتبط می‌سازند به ندرت برای این نوع مواد مورد استفاده قرار گرفته‌اند و همین امر سبب گردیده که دقت و صحت مقادیر پیش‌بینی شده توسط این معیارها در زمره مهمترین اهداف تحقیق پیش رو قرار گیرد. منتها طبق اظهار نویسندگان همین مقالات و کتب علمی، فقدان انجام آزمونهای خستگی تحت شرایط تنشهای متوسط مختلف سبب گردیده است که مطالعه تاثیر تنش متوسط بر رفتار تناوبی فولادهای تفجوشی شده با دشواری‌هایی مواجه گردد، به گونه‌ای

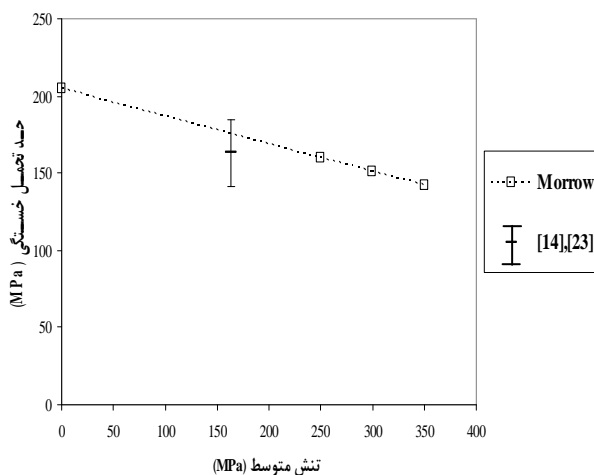
¹⁴ . Global PM Data Base in EPMA

¹⁵ . P.Beiss

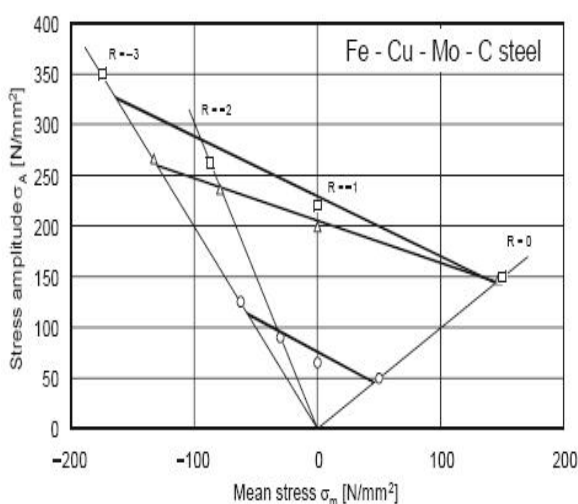
¹⁶ . C.M.Sonsino

¹⁷ . Haigh Diagram

که با داده های آزمایش بدست آمده در این پژوهش (شکل ۱۵) و نتایج حاصل از سایر محققین (شکل ۱۶) دارد، توصیه می‌گردد. نکته قابل توجه و مهم اینکه شاید مقایسه نتایج تجربی بدست آمده در این تحقیق تنها با یک داده از سایر محققین که آن هم در شرایط منطبق با آزمون های این تحقیق نبوده و با روابط تجربی تبدیل شده است، چندان مناسب نباشد. ولیکن با توجه به کمبود اطلاعات مربوط به حدود خستگی منطبق با مشخصات نمونه ها و شرایط آزمایش این تحقیق، شاید استفاده از همین داده نیز با توجه به اطمینان نسبی از صحت انجام آن، بتواند ما را در شناسایی روند کاهش حد تحمل خستگی به ازای افزایش تنش متوسط برای فولادهای تحت مطالعه یاری کند.



شکل ۱۶. مقایسه نمودارهای تغییرات حد تحمل خستگی بر حسب تنش متوسط مربوط به فولاد D.AE با ۰/۵ درصد و نتایج سایر محققان.



شکل ۱۷. نمودار دامنه تنش بر حسب تنش متوسط برای فولاد Fe-2%Cu-1.5%Mo-0.45%C. علائم مربع، دایره و مثلث مربوط به شرایط تولید مختلف [۲۳].

با جستجوی نتایج مربوط به حد خستگی خمشی فولاد Distaloy AE، که دقیقاً با شرایط تحقیق حاضر همخوانی داشته باشد، تنها یک مورد یافت گردید که در آن حد تحمل خستگی خمشی این فولاد با ۰/۵ درصد کربن و چگالی $7/105 \text{ gr/cm}^3$ در شرایط $R=0$ ($\sigma_{\min} = 0, \sigma_a = \sigma_m$) معادل 192 MPa گزارش شده است [۱۴]. به کمک رابطه (۶) می‌توان حد خستگی محوری آنرا تحت شرایط $R=0$ بدست آورد، که برابر با $163 \pm 22 \text{ MPa}$ می‌گردد.

در شکل ۱۶، حد تحمل خستگی طبق معیار مورو بر حسب تنش متوسط برای D.AE با ۰/۵ درصد کربن با توجه به مقادیر موجود در جدول ۱، رسم گردیده است. علاوه بر آن حد خستگی محوری در شرایط $R=0$ ، مربوط به نتایج آزمونهای سایر محققین، با توجه به محاسبات بالا به صورت $163 \pm 22 \text{ MPa}$ ، در آن مشخص شده است. با توجه به اینکه داده‌های تجربی حاصل از این تحقیق در شرایط تنش متوسط متفاوتی در مقایسه با نتایج سایرین بدست آمده‌اند، برای ارزیابی و مقایسه روند تغییرات حدود تحمل خستگی طبق معیار مورو نقاط مربوط به حدود خستگی پیش‌بینی شده در شکل ۱۶ با خط‌چین به حد خستگی در تنش متوسط $\sigma_m = 0$ متصل شده‌اند. محل تلاقی خط‌چین ترسیمی با محدوده حد خستگی حاصل از نتایج سایرین، حد تحمل پیش‌بینی شده توسط معیار مورو را در شرایط تنش متوسط آنها نشان می‌دهد. با مشاهده شکل ۱۶ مشخص می‌گردد که خط‌چین مذکور در محدوده حد تحمل بدست آمده توسط آزمونهای سایر محققین واقع شده است. این موضوع نشان دهنده همخوانی نسبتاً مناسب نتایج پیش‌بینی‌های این تحقیق در مقایسه با نتایج دیگران می‌باشد.

برای نمایش تاثیر تنش متوسط، رسم نمودارهایی شبیه آنچه در شکل ۱۶ ترسیم گردیده معمول و مرسوم می‌باشد. بایس [۲۳]، تعدادی از این قبیل نمودارها را که توسط محققین مختلف با انجام آزمایش برای برخی از فولادهای متالورژی پودر بدست آمده گردآوری کرده است. بعنوان مثال شکل ۱۷ نمونه‌ای از آنها را برای فولاد حاوی مس و مولیبدن نشان می‌دهد. نکته مهمی که از بررسی آنها حاصل می‌گردد نحوه تغییرات خطی کاهش حد خستگی در ازای افزایش تنش متوسط کششی می‌باشد که در همه موارد موجود قابل مشاهده است. به همین دلیل با توجه به اینکه تخمین‌گربر مانند مورو تطبیق خوبی را با داده‌های حاصل از آزمایش با توجه به شکل ۱۵ دارد، ولیکن داده‌های حاصل از این معیار بدلیل تعقیب روند غیر خطی در شکل ۱۶ نشان داده نشده‌اند. عبارت دیگر می‌توان اظهار نمود که بدلیل خطی بودن روند کاهش حد خستگی، که تا کنون برای تعدادی از فولادهای تفجوشی شده مورد آزمون قرار گرفته و تایید شده است [۲۳ و ۱۲]، در مورد فولادهای مورد تحقیق نیز استفاده از معیار خطی مورو با توجه به تطبیق مناسبی

۵- افزایش تنش متوسط کششی در فولادهای مورد مطالعه با کاهش دامنه تنش تناوبی همراه می باشد. این کاهش برای D.AE با ۳٪/۰ کربن، هنگامیکه تنش متوسط از ۲۵۰ تا ۳۵۰ MPa افزایش می یابد طبق معیار گودمن تقریباً ۲۷٪، بر مبنای معیار گریب حدود ۱۹٪ و طبق رابطه مورو حدود ۱۲٪ می باشد. همچنین این مقادیر برای فولاد با ۵٪/۰ کربن بترتیب حدود ۲۲٪، ۱۵٪ و ۱۱٪ می باشند.

۶- نتایج حاصل از آزمایشها و همچنین منحنی های ترسیم شده، نشان می دهند که برای فولادهای مورد مطالعه استفاده از معیار مورو در محدوده تنشهای مورد آزمون برای تخمین حد تحمل خستگی با توجه به خطی بودن آن و سازگاری مناسبش با نتایج تجربی مناسبتر می باشد.

مراجع

- [1] Orbon, R.L., "New Research Direction in Powder Metallurgy", Romanian Reports in Physics, Vol.3, 2004, pp.505-516.
- [2] Tengzelius, J., "PM Steel Components with The Strength of Wrought Steel", PM Asia World conference, Shanghai, China, 2007.
- [3] ASM Handbook, "Mechanical Testing and Evaluation Fatigue Testing", Vol.8, p.378.
- [4] Habibi, S.M., Khorsand, H., Tabatabaei, "The Effect of Microstructure on Mechanical Properties of PM Mo Steels", PM Auto 05 International Conf., Isfahan, Iran, 2005.
- [5] Khorsand, H., et al., "Fatigue of Sintered Steels", Materials and Structures, Vol. 37, 2004, pp.335-342.
- [6] Hertzberg, R.W., "Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials", John Wiley & Sons, 1996.
- [7] Dowling, N.E., "Mechanical Behavior of Materials", 2nd Edition, Prentice-Hall, 1999.
- [8] Saritas, S., et al., "Effect of Microstructural Inhomogeneities on the Fatigue Crack Growth Response of a Prealloyed and Two Hybrid PM Steels", World Congress on PM & Particular Material, Florida-USA, 2002.
- [9] Bergman, O., Bergmark, A., "Influence of Microstructure on The Fatigue Performance of PM Steel", PM TEC, Las Vegas-USA, 2003.
- [10] "Fatigued? Swedish Experts Poit the Way to High Performance PM", Metal Powder Report(2004), p.27.
- [11] Hardbolets, A., Wiess, B., "Fatigue Behaviour of Iron Based Sintered Materials", International Material Review, Vol.42, No.1, 1997.
- [12] Sonsino, C.M., "Fatigue Design Concepts For PM Parts", Metal Powder Industries Federation, 2003.
- [13] Piotrowski, A., Biallas, G., "Influence of Mean Stress on the Fatigue Behavior of Sintered Steel", Proceeding of PM World Congress, pp.362-368, 1998.

موضوع قابل ذکر دیگر اینکه بضاعت ما درنمایش تاثیر تنش متوسط و نحوه کاهش حد تحمل خستگی، تنها به محدوده تنشهای متوسط و نواحی نزدیک آن که آزمونها در آن انجام گرفته اند (۳۰۰، ۳۵۰ و MPa) محدود می شود، به گونه ای که تعمیم آن برای تنشهای متوسط دیگر (خصوصاً بیشتر) و معرفی یکی از روابط مورو یا گریب بعنوان معیار منطبق و مناسبتر با نتایج آزمونها، نیازمند انجام آزمایشهای خستگی در آن تنشها می باشد. برای مثال اگر به شکل ۱۵ رجوع کنیم در می یابیم که معیار مورو حتی برای تنشهای بالاتر از استحکام کششی نیز گسترش یافته است که موضوعی غیرواقعی می باشد، زیرا در حین اعمال نیرویی در حد استحکام کششی نهایی، امکان بارگذاری چرخه ای وجود ندارد.

با این اوصاف و با توجه به نتایج بدست آمده می توان معیار مورو را برای پیش بینی خواص خستگی فولادهای مورد مطالعه در محدوده تنشهای ۲۵۰ الی ۳۵۰ MPa، به راحتی بکار برد. ذکر این نکته ضروری است که در مورد استفاده از معیار مذکور برای تنشهای متوسطی که با این محدوده فاصله زیادی دارند می بایست با احتیاط عمل شود، مگر اینکه خطی بودن کاهش مقادیر حد تحمل خستگی، با انجام آزمایش در تنشهای متوسط مختلف دیگر نیز مشاهده گردد.

۴. نتیجه گیری

۱- افزایش میزان کربن یک روش شناخته شده برای ارتقاء حد خستگی فولادهای با باند نفوذی می باشد، به گونه ای که افزایش کسر پرلیت موجود در ذرات پودر پایه در فولاد D.AE محتوی ۵٪/۰ کربن موجب شده که این ماده خواص خستگی بالاتری را نسبت به فولاد با ۳٪/۰ کربن در همه حالات بارگذاری از خود نشان دهد. برای مثال ضریب استحکام خستگی با افزایش میزان کربن از ۳٪/۰ به ۵٪/۰ بین ۶۸٪/۰ تا ۱۰٪/۰ افزایش یافته است.

۲- بررسی ریز ساختار حفرات قبل از حک شیمیایی برای قطعاتی که تحت بارگذاریهای تناوبی با تنشهای متوسط مختلف قرار گرفته اند، نشان می دهد که افزایش تنش متوسط کششی منجر به تغییر شکل، باز شدن حفرات و در نتیجه اتصال راحت تر آنها به یکدیگر می گردد.

۳- افزایش تنش متوسط کششی سبب می گردد که علاوه بر نواحی نزدیک به سطح، ریزترکهای زیادی در نواحی مغز قطعات نیز مشاهده گردند که به هم پیوستن سریع آنها به یکدیگر، موجبات افزایش سریع طول ترک و نهایتاً شکست قطعه را فراهم آورد.

۴- در مورد فولادهای متالورژی پودر، استفاده مستقیم از روابط تجربی که برای تخمین عمر خستگی تحت تاثیر تنشهای متوسط موجود می باشند به ندرت مورد استفاده قرار گرفته است. با اینحال نتایج حاصل از این تحقیق نشان می دهند که می توان از این معیارها برای پیش بینی رفتار تناوبی مواد متخلخل تفجوشی شده همانند مواد با چگالی کامل استفاده کرد.

- [14] Namazof, S.N., Abdalla, G., Dalgic, M., Beiss, P., "Mean Stress sensitivity of Sintered Iron and Steel", Journal of Z.Metallkd, Vol. 94, pp.737-742, 2003
- [15] International Standards ISO 3928, "Sintered Metal Materials- Fatigue Test Pieces", First Edition,1977-01-15.
- [16] ASTM B-328, "Standard Test Method for Density and Interconnected Porosity of Sintered Metal Structural Parts", 1996, pp.1-4.
- [17] ASTM E-466, "Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials", Vol.3, Mechanical properties, 2003, pp.505-509.
- [18] ASTM E-468, "Standard Practice for Presentation of Constant Amplitude fatigue test results for Metallic Materials", Vol.3, Mechanical properties, 2003, pp.520-525.
- [19] MPIF-10, "Tension Test Specimens for Pressed & Sintered Metal Powders", MPIF Standard Test Methods, p.27, 1986.
- [20] Alzati, L., Bergmark, A., Andersson, J., "Microstructural Reinforcement Obtained by Diffusion Bonding", Powder Metallurgy World Congress and Exhibition (PM TEC.), Montreal, Canada, 2005.
- [21] Drar, H., "Metallographic and Fractographic Examination of Fatigue Loaded PM Steel with and without MnS Additive", Materials Characterization, Vol.42, 2000, pp.211-220.
- [22] Klumpp, S., Eifler, D., et al., "Cyclic Deformation Behaviour of Sintered Pure and Alloyed Iron", Proceeding of Powder Metallurgy Conference, Vol.6, 1999, pp.347-361.
- [23] Beiss, P., "Kapitel 5: Structural Mass Production Parts", In Landolt-Börnstein, Group VIII, Vol. 2, Subvol. A, Part 1, S. 5.1-5.199, Springer-Verlag; Berlin, Heidelberg, New York, 2003.
- [24] Wittaker, D., "Spreadsheet for Distalloy AE Fatigue Properties ", Global PM Data Base, EPMA, 2003.