

تحلیل تجربی و عددی رشد ترک خستگی در پیچ‌های کربونیزه شده سرسیلندر موتور بنزینی

کریم علی اکبری*
 استادیار، دپارتمان مهندسی مکانیک، دانشکده منتظری، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان خراسان رضوی، مشهد، ایران،
 karim.aliakbari@gmail.com

چکیده

مطالعه در مورد رشد ترک خستگی پیچ‌های کربونیزه شده سرسیلندر موتور بنزینی در دو بخش تجربی و عددی انجام گردید. بخش تجربی مطالعه شامل تعیین ترکیب شیمیایی، خصوصیات کششی، سختی‌سنجی، بررسی ریزساختاری و بررسی سطح شکست بود. مشاهدات میکروسکوپی الکترونی روبشی (SEM) از سطح شکست، خستگی را به عنوان عامل اصلی شکست زودرس پیچ‌ها با عمر تقریبی 1.44×10^8 سیکل معرفی نمود. ترک از ناحیه لایه سطحی کربونیزه پیچ‌ها شروع شده است که ناخالصی‌های ترکیبات اکسیدی و حفره به انتشار ترک تا شکست نهایی کمک کرده است. بخش عددی مطالعه شامل تحلیل تنش و رشد ترک خستگی بود. تحلیل تنش نشان داد که حداکثر تنش ایجاد شده در پیچ‌ها حدود ۴٪ بیشتر از مقدار استاندارد می‌باشد. تمرکز تنش بالا در ناحیه رزوه یکی از عوامل جوانه‌زنی ترک می‌باشد که نیروی سیکنی فشار احتراق باعث گسترش ترک خستگی می‌گردد. همچنین تحلیل عددی خستگی نشان داد که وجود ترک به عمق ۰/۱۲ میلی‌متر منشاء شکست زودرس می‌شود. مقایسه دو بخش تجربی و عددی نشان داد که عمق ترک محاسبه شده با مشاهدات لایه اکسیدی میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی مطابقت قابل قبولی دارند.

واژه‌های کلیدی: موتور بنزینی؛ پیچ سرسیلندر؛ خرابی خستگی؛ ریزساختار؛ رشد ترک خستگی؛ علت خرابی.

Experimental and numerical analysis of fatigue crack growth in carbonized bolts of gasoline engine cylinder head

K. Aliakbari Department of Mechanical Engineering, Faculty of Montazeri, Khorasan Razavi Branch, Technical and Vocational University (TVU), Mashhad, Iran

Abstract

The study on the fatigue cracks growth of the carbonized bolts of the cylinder head in the gasoline engine was performed in two experimental and numerical sections. The experimental section of the study included chemical composition determination, tensile properties, hardness, microstructure, and fractography. Scanning electron microscope (SEM) observations of the fracture surface identified fatigue as the main cause of premature bolts failure with an approximate fatigue life of 1.44×10^8 cycles. The crack initiates from the carbonized surface layer of the bolts, where impurities of oxide compounds and cavities help to propagate the crack until final fracture. The numerical section of the study included stress analysis and fatigue crack growth. Stress analysis showed that the maximum stress created in the bolts is about 4% more than the standard value. High-stress concentration in the threaded zone is one of the factors in crack initiation that the cyclical force of combustion pressure has caused the propagation of fatigue cracks. Numerical analysis of fatigue also showed that the presence of cracks to a depth of 0.12 mm is the origin of premature failure. Comparison of the two experimental and numerical sections showed that the calculated crack depths are consistently consistent with the observations of the oxide layer of optical and scanning electron microscopes.

Keywords: Gasoline engine, Cylinder head bolt, Fatigue failure, Microstructure, Fatigue crack growth, Failure cause.

رخ^۱ و شبه رخ^۲ را نشان داد. فونت و همکاران [۴] خرابی پیچ‌های دو سر رزوه سرسیلندر موتور دریایی مورد تحلیل قرار دادند. محاسبات نیروی پیش بار نشان داد که علت خرابی، تمرکز تنش قابل توجه در دومین رزوه نزدیک به بخش پایین مهره می‌باشد. علی اکبری و توحیدی [۵] تحلیل خرابی خستگی پیچ‌های سرسیلندر خودروی سواری چهار سیلندر موتور بنزینی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج عددی آنها نشان داد که وجود ترک به عمق ۰/۳۵ میلی‌متر منشاء خرابی شکست زودرس می‌گردد و با نتایج تجربی تطابق دارد. کوبین و همکاران [۶] خرابی پیچ گنج فشار سیستم سوخت گاز در سکوی دریایی را مورد تحلیل قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که مقدار شکنندگی بر اثر سختی بالا و ترک حاصل از خوردگی تنش، باعث

۱- مقدمه

شکست بیشتر پیچ‌های سرسیلندر موتورهای خودرو از نوع خرابی خستگی است. مواردی از قبیل وجود ناخالصی‌ها اکسیدی، حفره‌ها، اعمال بیش از اندازه گشتاور به پیچ‌ها در هنگام سفت کردن اولیه، ماده نامناسب و اتصال نامناسب در هنگام قرار دادن پیچ‌ها در بلوک سیلندر به ایجاد ترک خصوصاً رزوه‌ها به دلیل نقاط تمرکز تنش کمک می‌نماید و عواملی از جمله نیروهای سیکنی حاصل از فشار اتاق احتراق و تنش‌های سیکنی گرمایی باعث گسترش ترک در پیچ‌ها می‌گردد. [۱-۲].

یاو و گزو [۳] تحلیل خرابی پیچ‌های سرسیلندر مورد استفاده در موتور دیزل کامیون را مورد بررسی قرار دادند. مطالعات سطح شکست و متالورژی نشان داد که سطوح شکست و میکروساختار دو پیچ ویژگی‌های مشابهی دارند و بعلاوه سطوح شکست ویژگی‌های شکست

¹ Cleavage

² Quasi-cleavage

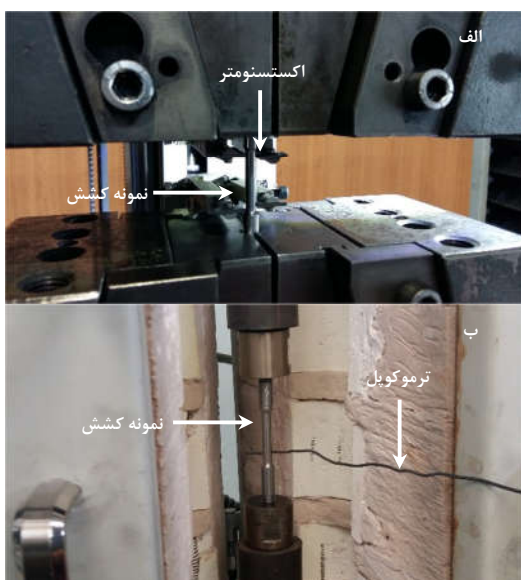
* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: karim.aliakbari@gmail.com

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۸/۰۸

تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۰/۱۵



شکل ۱- (الف) نمونه‌های تست پس از انجام آزمایش تحت دمای بالا، (ب) دمای معمولی، و (ج) نمونه تست قبل از انجام آزمایش



شکل ۲- (الف) ماشین سروهیدرولیک تست کشش همراه اکستنسومتر، و (ب) ماشین تست کشش تحت دمای بالا

یک مقطع عرضی به ضخامت ۱۰ میلی‌متر از پیچ برای بررسی ریزساختار و سختی‌سنجی توسط ماشین وایرکات EDM بریده شد و آماده‌سازی مطابق مراجع [۵، ۸] انجام گردید. تصاویر ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری از نواحی مختلف سطح مقطع پیچ انجام گردید. آزمون سختی‌سنجی مطابق استاندارد ASTM: E384-11e1 [۱۴] با دستگاه سختی‌سنج با اعمال ۳۰ کیلوگرم نیرو به مدت زمان ۱۰ ثانیه انجام شد.

برای بررسی فراکتوگرافی و تحلیل دقیق نوع ناخالصی‌ها، از مقطع پیچ پس از شکست، تصاویر SEM تهیه گردید. ابتدا نمونه از مقطع پیچ توسط ماشین وایرکات EDM برش زده شد و به مدت یک ساعت در حمام فراصوت قرار داده شد و سپس توسط دستگاه SEM مدل LEO 1450VP ساخت آلمان مجهز شده به EDS ساخت شرکت آکسفورد انگلستان تصاویر با بزرگنمایی‌های مختلف تهیه شد.

در این مقاله تخمین عمر پیچ از روش مکانیک شکست الاستیک خطی برای نمونه‌های دارای عیوب سطحی نسبت به روش نمودار S-N برای نمونه‌های عاری از نقص سطحی مطابق مرجع [۱۵] توصیه می‌شود. برای تعیین نرخ رشد ترک و چقرمگی شکست، تست رشد ترک خستگی با استفاده از سه نمونه CT با ضخامت ۶ میلی‌متر مطابق شکل ۳ انجام شد که نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM E647-11 [۱۶] از

شکست در پیچ می‌گردد. لی و وانگ [۷] دلایل اصلی شکست را در کاهش مقاومت خستگی پیچ‌ها بر اثر کربن‌زدایی ناشی از سایش قطعات با توجه به وجود فاصله زیاد بین پیچ‌ها و سوراخ‌های پیچ چرخنده داخلی مشاهده کردند. علی اکبری [۸] تحلیل خرابی پیچ‌های صفحه پایه ماشین آهنگری شعاعی را مورد بررسی قرار داد. تحلیل تنش نشان داد که مقدار نیروی پیش بار انتخاب شده پیچ کمتر از حد استاندارد پیشنهاد شده است که منجر به شل شدن اتصال می‌گردد و در نتیجه عمر خستگی پیچ را کاهش می‌دهد.

بیشتر مطالعات قبلی، تمرکز بر تحلیل خرابی خستگی در پیچ‌ها از نوع تجربی بوده است و آن نیز به نوبه خود تمرکز روی ریزساختار ماده، خصوصیات مکانیکی و میدان تنش پیچ‌ها به صورت محدود انجام گردیده است. در کار حاضر علاوه بر تمرکز روی ریزساختار و خواص مکانیکی، توجه خاصی به تحلیل‌های تنش، رشد ترک خستگی و ناخالصی‌ها شده است که در تحقیقات دیگران کمتر به آن اشاره شده است.

به طور خلاصه، اهداف مطالعه کار حاضر به شرح زیر می‌باشد:

- تجزیه و تحلیل بصری خرابی پیچ‌ها
- تعیین ترکیب شیمیایی و خصوصیات مکانیکی
- بررسی ریزساختار پیچ‌ها و سختی‌سنجی
- تحلیل شکست با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱
- بررسی ناخالصی‌ها با طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو X^۲
- تعیین تنش در پیچ حاضر و پیشنهاد شده استاندارد
- تعیین عمر خستگی در پیچ‌های سرسیلندر
- مقایسه نتایج تجربی و عددی

۲- روش بررسی کار تجربی

ترکیب شیمیایی پیچ‌های سرسیلندر موتور بنزینی مطابق استانداردهای ASTM E415-17 [۹] و ASTM E1086-14 [۱۰] به روش اسپکتروفتومتری انجام شد.

تعداد ۶ نمونه تست کشش برای سنجش خواص مکانیکی ماده پیچ شامل تنش تسلیم، تنش نهایی و تغییر طول توسط دستگاه تراش CNC آماده گردید. نمونه‌های کشش از نوع استوانه‌ای با قطر ۶ میلی‌متر مطابق استاندارد ASTM E8M-97a [۱۱] و مراجع [۱۲-۱۳] از پیچ‌های شکسته شده ساخته شد (شکل ۱). سه نمونه تست توسط دستگاه سروهیدرولیک Zwick/Roell مدل Zwick Z100/Z250 با ظرفیت ۲۵ تن تحت دمای محیط مطابق شکل ۲الف و سه نمونه دیگر توسط دستگاه تست کشش سروهیدرولیک SANTAM مدل STM 150 با ظرفیت ۱۵ تن مجهز به کوره دمای بالا تحت دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس مطابق شکل ۲ب تحت آزمایش کشش قرار گرفتند. نحوه اجرای آزمایش و ذخیره سازی داده‌ها مطابق مراجع [۱۲-۱۳] انجام گردید.

¹ Scanning Electron Microscope (SEM)

² Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)



شکل ۴- (الف) مقطع طولی نمونه پیچ سالم و شکسته شده، و (ب) مقطع سطح شکست پیچ

۳-۳- تحلیل ترکیب شیمیایی

متوسط ترکیب شیمیایی سه مرتبه تکرار شده ماده پیچ شکسته شده و ماده استاندارد در جدول ۲ لیست شده است. نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که ترکیب شیمیایی پیچ در محدوده مواد مورد انتظار است. مقادیر عناصر مشخص شده در جدول ۲ معادل با فولاد DIN 1.7033 [۱۸] در استاندارد DIN است. برای پیچ‌ها و قطعات تحت تنش خستگی توصیه می‌شود و برای تقویت این آلیاژ از فرآیند آهنگری^۱، آبدهی در روغن^۲، فرآیند برگشت^۳ و کربن‌دهی استفاده شده است.

جدول ۲- ترکیب شیمیایی DIN 1.7033 و ماده استاندارد

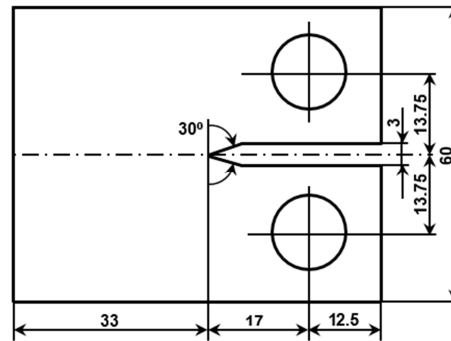
ماده استاندارد	EN 1563	عنصر
فلز پایه	۹۷/۴	Fe
۰/۰-۲۷/۳۳	۰/۳۰۵	C
۰/۰-۱۵/۳	۰/۱۱۹	Si
۰/۱-۶/۱	۰/۷۶	Mn
بیشینه ۰/۰۳۵	۰/۰۱۲	P
بیشینه ۰/۰۴	۰/۰۰۴	S
۰/۱-۷۵/۲	۱/۱۲	Cr
-	۰/۰۹۱	Ni
-	۰/۰۱۹	Al

¹ Forging

² Quenching

³ Tempering

ماده اولیه پیچ‌ها تهیه گردیدند. برای انجام آزمایش شکست و خستگی از یک دستگاه سروهیدرولیک Zwick/Roell مدل Amsler AB100 با ظرفیت ۱۰ تن استفاده شد. آزمایش خستگی در حالت دامنه ثابت بار ثابت با نسبت تنش $R = \sigma_{min}/\sigma_{max} = 0.78$ و فرکانس ۱۰ هرتز انجام گردید و طول ترک در سیکل‌های متفاوت بارگذاری با استفاده از طول سنج نصب شده روی نمونه CT اندازه‌گیری شد.



شکل ۳- ابعاد نمونه CT بر حسب میلی‌متر.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بازرسی بصری و شکست‌شناسی

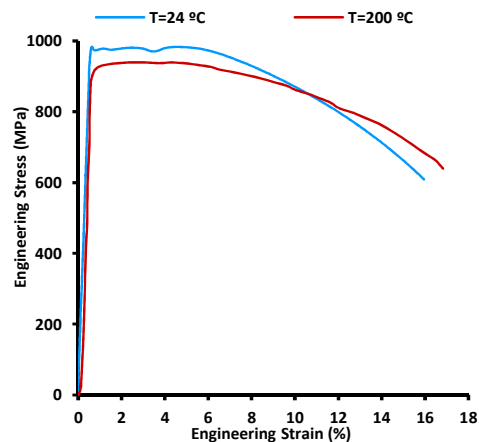
گزارشات گردآوری شده یکی از نمایندگی‌های معروف شهر مشهد در کشور ایران به مدت حدود ۳ سال نشان داد که پیچ‌های سرسیلندر خودروی سواری دچار خرابی زودرس شده‌اند. گزارشات حاکی بود که هنگام باز کردن سرسیلندر در هنگام تعمیر یک یا دو عدد پیچ شکسته شده بودند و بیشتر پیچ‌ها عمری بین ۱۰۰ تا ۱۴۰ هزار کیلومتر داشتند. پیچ‌های سرسیلندر M9×1.25 به طول ۴۰۷ میلی‌متر در شکل ۴ نشان داده شده است و مشخصات موتور آن در جدول ۱ لیست گردیده است. تعداد نیروی سیکلی وارد به پیچ‌ها نصف تعداد چرخش میل لنگ مطابق مرجع [۱۷] (با فرض متوسط سرعت ۵۰ km/h، پیمایش متوسط ۱۲۰ هزار کیلومتر و دور ۲۰۰۰ rpm) برابر 1.44×10^8 سیکل می‌باشد.

جدول ۱- مشخصات موتور

ردیف	نام مشخصه	مقدار مشخصه (واحد)
۱	بیشینه توان	۱۶۰ اسب بخار در ۵۵۰۰ دور در دقیقه
۲	بیشینه گشتاور	۲۱۵ کیلوگرم متر در ۴۵۰۰ دور در دقیقه
۳	قطر سیلندر	۸۹/۳ میلی‌متر
۴	کورس پیستون	۸۰ میلی‌متر

۳-۲- تست کشش

خواص مکانیکی ماده پیچ سرسیلندر و ماده استاندارد در جدول ۳ لیست شده است و منحنی تنش- کرنش مهندسی آن در شکل ۵ ترسیم گردیده است. خصوصیات کششی پیچ نشان داده شده در جدول ۲ در محدوده مورد انتظار استاندارد قرار دارد و معادل با فولاد DIN 1.7033 / 34Cr4 می‌باشد. کاربردهای این ماده برای پیچ‌های تحت دمای بالا، بارهای خستگی و قطعات ماشین تحت بار دینامیکی پیشنهاد می‌گردند.



شکل ۵- منحنی تنش-کرنش مهندسی ماده پیچ در دمای ۲۴ درجه و ۲۰۰ درجه سلسیوس

جدول ۳- خصوصیات مکانیکی DIN 1.7033 و آلیاژ استاندارد

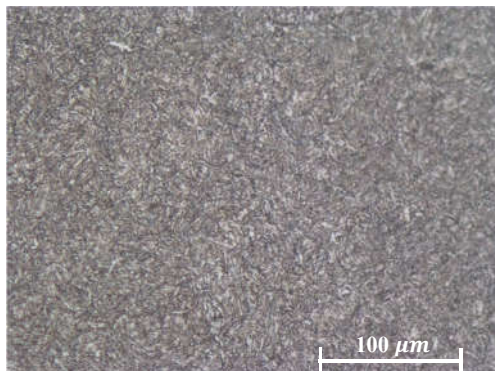
نوع خاصیت	تنش تسلیم (MPa)	تنش کششی (MPa)	تغییر طول (%)	دما (°C)
نمونه ۱	۹۷۳/۶۳	۹۸۳/۴۶	۱۵/۸۴	۲۴
نمونه ۲	۹۲۵/۹۴	۹۳۹/۵۸	۱۶/۸۳	۲۰۰
ماده استاندارد	کمینه ۷۰۰	۱۰۰۰-۹۰۰	کمینه ۱۲	دمای محیط

۳-۲- ریزساختار و سختی سنجی ماده پیچ

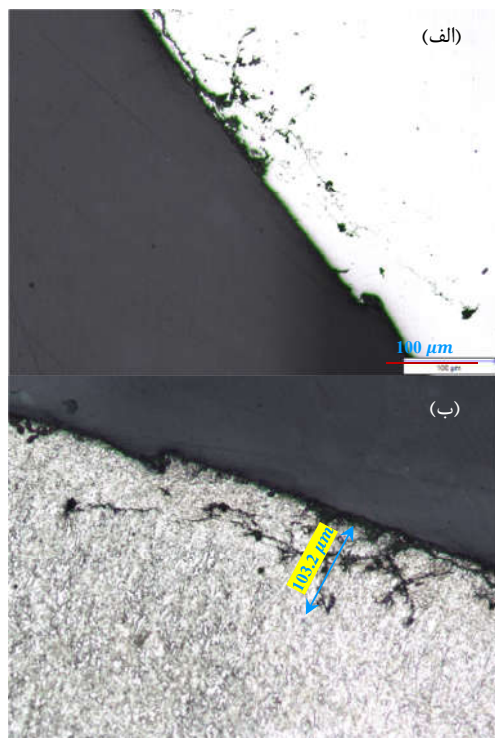
برای بررسی دقیق ریزساختار، تصاویر میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی از نواحی مختلف با بزرگنمایی‌های مختلف از مقطع پیچ تهیه گردید. شکل ۶ میکروگراف پیچ سرسیلندر را از نوع فولاد مارتنزیت را به نمایش می‌گذارد. مارتنزیت به شکل بسیار سختی از ساختار کریستالی فولاد گفته می‌شود که دارای دانه‌های کریستالی بشقاب یا توفال شکل هستند که در شکل ۶ قابل رویت است.

شکل ۷ تصاویر متالوگرافی قبل و بعد از اچ پیچ کربونیزه شده را نشان می‌دهد که رسوبات در امتداد مرزهای کربن دیده می‌شود. پیچ‌های سرسیلندر در بیشتر موتورها، سرسیلندر را به بلوک موتور متصل می‌نمایند اما در مطالعه حاضر پیچ‌ها با طول بلند از داخل بلوک سیلندر عبور کرده و سرسیلندر را به یک صفحه پایه در زیر بلوک نصب می‌کند. با نظر به اینکه در این پیچ‌ها، سر رزوه‌ها با محیط آزاد ارتباط دارند بر اثر اکسیداسیون داخلی رسوبات اکسیدی در نزدیکی سطح رخ

داده است که یک پدیده معمولی در فولاد کربونیزه شده به وسیله گاز است که در مرجع [۱۹-۲۰] نیز به آن اشاره گردیده است و عمق این اکسیداسیون در کار حاضر حدود ۱۰۳ میکرون است. این اکسیداسیون منشاء ترک است و بر اثر بار سیکلی شروع به رشد ترک خستگی می‌گردد و نهایتاً منجر به خرابی خستگی می‌گردد.



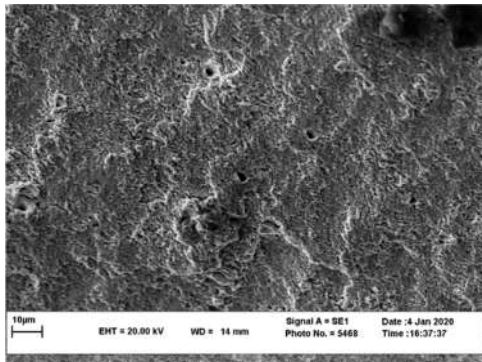
شکل ۶- ریزساختار ماده پیچ سرسیلندر با بزرگنمایی ۵۰۰



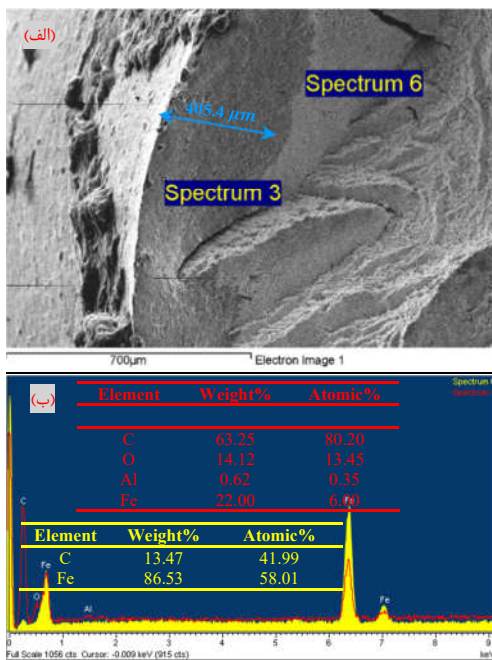
شکل ۷- تصاویر متالوگرافی: (الف) قبل از اچ، و (ب) بعد از اچ

مطابق استاندارد ISO 898-1: 2009 (E) [۲۱]، سختی سطح از نوک رزوه اندازه‌گیری شد و پروفیل سختی در شکل ۸ ترسیم گردید. مشاهدات نمودار نشان می‌دهد که لایه کربن‌دهی تا عمق ۴۰۰ میکرون نفوذ کرده و افزایش قابل توجهی در افزایش سختی دارد و با شیب تندی این سختی کاهش می‌یابد. مقادیر ۳۰۳ تا ۳۵۰ سختی برینل برای پیچ‌های یکسر رزوه، دوسر رزوه و مهره‌ها در مرجع [۲۲] پیشنهاد شده است در صورتی که در کار حاضر مقدار ۳۰۸ سختی

نشان می‌دهد که وجود درصد بالای کربن (حدود ۶۳ درصد وزنی) تأییدی بر لایه کربن‌دهی می‌باشد در صورتی که EDS بعد از لایه کربنی درصد کربن پایین (حدود ۱۴ درصد وزنی) را نمایش می‌دهد.



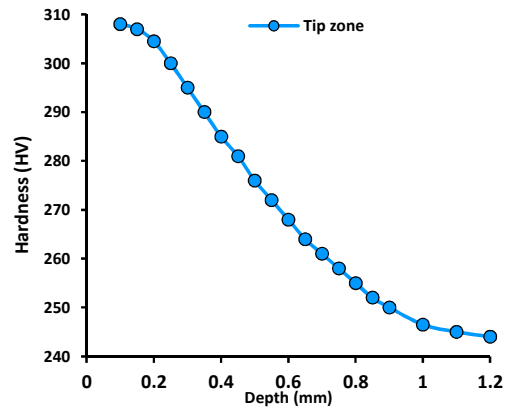
شکل ۱۰- علائم خستگی سطح شکست در ناحیه رشد ترک



شکل ۱۱- لایه کربن‌دهی (طیف ۳) و لایه ماده پایه (طیف ۶)

برای بررسی ترکیب شیمیایی ناخالصی، EDS از تصویر SEM مطابق شکل ۱۲ استخراج گردید. نمونه برداری EDS از ناخالصی‌ها، ترکیبات اکسیدی MgO ، Al_2O_3 و CaO را نشان داد که وجود این ترکیبات با توجه به مراجع [۲۵-۲۶] برای کیفیت سطح و خصوصیات شکل‌دهی محصولات نهایی مضر است. بعلاوه، وجود اجزای اکسیدی نیز می‌تواند باعث ایجاد تمرکز تنش گردد که به نوبه خود منجر به رشد ترک خستگی به دلیل نیروی سیکنی فشار اتاق احتراق شود.

ویکرز است که تقریباً برابر کمینه حد پیشنهاد شده می‌باشد.

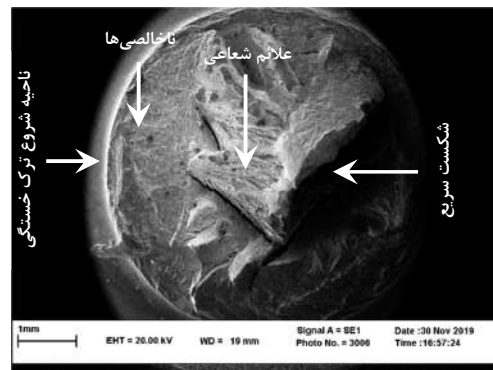


شکل ۸- پروفیل میکرو سختی در مقطع پیچ از لبه بیرونی

۳-۴- بررسی سطح شکست با SEM و EDS

برای تحلیل دقیق سطح شکست و بررسی ناخالصی‌ها از سطح شکست شکل ۴، تصاویر SEM تهیه گردید. شکل ۹ سه منطقه متمایز سطح شکست پیچ را نمایش می‌دهد؛ ناحیه شروع و رشد ترک خستگی به همراه علائم خستگی و استپ‌های جغجغه‌ای، ناحیه علائم شعاعی و نهایتاً ناحیه شکست سریع شامل لبه‌های برشی تقسیم شده است. بیشتر شکست‌های خستگی در اجزای مکانیکی تحت نیروهای کششی، خمشی و پیچشی و با ترکیب این نیروها از سه مرحله شروع، رشد ترک و شکست سریع تشکیل شده است که این سه مرحله در پیچ‌های سرسیلندر موتورهای دیزلی و بنزینی [۴-۵] و پیچ‌های فولادی استحکام بالا تحت بار سیکنی گرمایی [۲۳] نیز اتفاق افتاده است که شرایط مشابهی با کار حاضر دارند.

شکل ۱۰، SEM ناحیه رشد ترک خستگی با علائم خطبندی خستگی را نشان می‌دهد. علائم خطبندی خستگی در پیچ‌های اتصال صفحه پایه ماشین آهنگری شعاعی تحت بار سیکنی [۸]، اتصال چرخنده حلزون [۷] و بازوی بیل مکانیکی [۲۴] اشاره شده است.



شکل ۹- تصویر SEM سطح شکست پیچ

مشاهدات SEM شکل ۱۱، لایه کربنی به عمق حدود ۴۰۰ میکرون در سطح شکست را نشان می‌دهد که پروفیل سختی شکل ۷ نیز آن را تأیید می‌نماید. برای بررسی ترکیب شیمیایی لایه کربنی، عناصر تشکیل دهنده بوسیله EDS از قبل و بعد لایه کربنی از مقطع پیچ مطابق شکل ۱۱ استخراج گردید. بررسی لایه کربنی توسط EDS

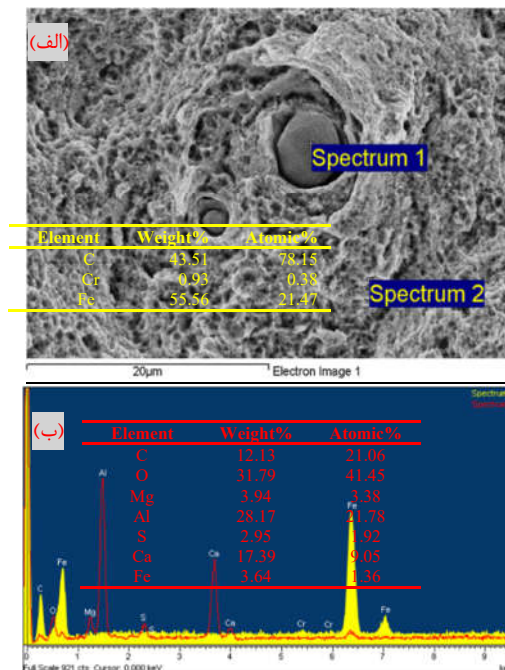
بار افزایش یابد، تنش متناوب سیکیلی σ_a کاهش می‌یابد. به علت کافی نبودن نیروی پیش بار نسبت به حالت استاندارد، خستگی زودرس ایجاد می‌شود. جدول ۴ محاسبات اتصال پیچی کار حاضر و پیشنهاد شده استاندارد با جزئیات را نشان می‌دهد. بومن [۲۸] یک پیش بار ۷۵ درصد بار محک را توصیه می‌کند، که تقریباً یکسان با توصیه‌های RB&W [۲۷] برای پیچ‌های استفاده مجدد است.

جدول ۴- محاسبات میدان تنش پیچ سرسیلندر کار حاضر و پیشنهاد شده استاندارد

کار حاضر	
$F_{minW} = F_{PT} = \frac{T}{K \times d} = \frac{80000}{0.3 \times 8.88} = 30030 \text{ N}$	پیش بار
$F_{maxW} = F_{PT} + F_G = 38323.84 \text{ N}$	بیشینه نیرو
$F_{aW} = \frac{F_{maxW} - F_{minW}}{2} = \frac{F_G}{2} = 41477 \text{ N}$	نیروی متناوب
$\sigma_{minW} = \frac{F_{minW}}{A_t} = 643.18 \text{ MPa}$	پیش تنش
$\sigma_{maxW} = \frac{F_{maxW}}{A_t} = 820.81 \text{ MPa}$	بیشینه تنش
$\sigma_{aW} = \frac{\sigma_{maxW} - \sigma_{minW}}{2} = 88.82 \text{ MPa}$	تنش متناوب
پیشنهاد شده استاندارد	
$F_{minP} = F_{PT} = 0.75F_p = 27558.92 \text{ N}$	پیش بار
$F_{maxP} = F_p = 36745.23 \text{ N}$	بیشینه نیرو
$F_{aP} = \frac{F_{maxP} - F_{minP}}{2} = 4593.16 \text{ N}$	نیروی متناوب
$\sigma_{minP} = \sigma_i = 0.75S_p = 590.29 \text{ MPa}$	پیش تنش
$\sigma_{maxP} = S_p = 787.05 \text{ MPa}$	بیشینه تنش
$\sigma_{aP} = \frac{\sigma_{maxP} - \sigma_{minP}}{2} = 98.38 \text{ MPa}$	تنش متناوب
ملاحظات	
$d_r = d - 1.226869p = 8.88 - 1.227 \times 1.25 = 7.35 \text{ mm}$	
$d_m = d - 0.649519p = 8.88 - 0.65 \times 1.25 = 8.07 \text{ mm}$	
$A_t = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_m + d_r}{2} \right)^2 = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_m + d_r}{2} \right)^2 = 46.69 \text{ mm}^2$	
$S_p = 0.85 \times S_y = 0.85 \times 925.94 = 787.05 \text{ MPa}$	
$F_p = S_p \times A_t = 787.05 \times 46.69 = 36745.23 \text{ N}$	
$A_{cyl} = \frac{\pi d_{cyl}^2}{4} = \frac{\pi \times 80^2}{4} = 5026.55 \text{ mm}^2$	
$F_{PT} = \frac{T}{K \times d} = \frac{80000 \text{ N} \cdot \text{mm}}{0.2 \times 8.88} = 45045.05 \text{ N}$	
$F_G = \alpha \frac{P_G A_{cyl}}{i} = 1.1 \times \frac{6 \times 5026.55}{4} = 8293.81 \text{ N}$	

هنگامی که موتور در حال کار است، فشار گاز منجر به افزایش طول پیچ می‌شود که می‌تواند باعث افزایش تغییر شکل سرسیلندر و کاهش تغییر شکل واشر سرسیلندر گردد. با توجه به قطر سیلندر ۸۱/۴ میلی‌متر، اندازه پیچ $M9 \times 1.25$ ، فشار احتراق ۶۰ بار و دمای کار واشر سیلندر ۲۰۰ درجه سلسیوس، تنش پیش بار σ_{minW} ، تنش پیش بار به اضافه دامنه تنش σ_{maxW} و دامنه تنش σ_{aW} با داده‌های ارائه شده در جدول ۴ به ترتیب ۶۴۳/۱۸، ۸۲۰/۸۱ و ۸۸/۸۲ مگاپاسکال می‌باشد. همه سه تنش ذکر شده باید کمتر از مقادیر پیشنهاد شده استاندارد باشند، اما در این مطالعه، مقدار تنش پیش بار حدود ۸٪ و بیشینه تنش حدود ۴٪ نسبت به مقدار استاندارد پایین‌تر است که می‌تواند یک عامل رشد ترک خستگی پیچ‌ها باشد.

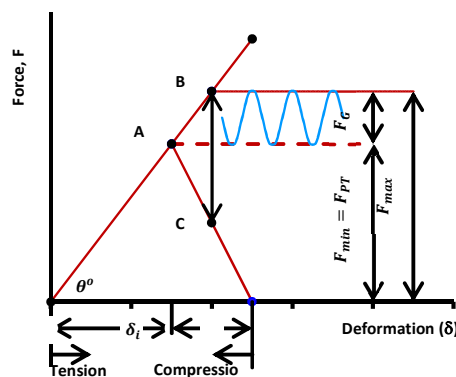
به طور کلی، ترک‌ها از نواحی رزوه شروع به رشد می‌کنند که دارای تمرکز تنش بالایی هستند. تجزیه و تحلیل سطح شکست در



شکل ۱۲- ذره ناخالصی (طیف ۱) و لایه ماده پایه (طیف ۲)

۳-۶- تحلیل تنش

از پیچ‌های سرسیلندر برای آب‌بندی بین سیلندر و سرسیلندر استفاده می‌گردد. این پیچ‌ها بایستی به اندازه کافی استحکام لازم را داشته باشند که در دمای حدود ۲۰۰ درجه سلسیوس و بارهای سیکیلی حاصل از احتراق مقاومت نمایند. بنابراین نیروهای اعمالی ایجاد تنش به پیچ‌ها شامل نیروی پیش بار F_{PT} حاصل از سفت کردن اولیه تا گشتاور توصیه شده شرکت تولید کننده موتور، حداکثر نیروی گاز F_G حاصل از فشار اتاق احتراق، نیروی حاصل از دمای احتراق F_T و میزان انبساط متفاوت بلوک سیلندر و سرسیلندر می‌باشند. نمودار شکل ۱۳ [۴] و [۲۷] رابطه بین نیروی F در مقابل تغییر شکل δ با لحاظ کردن نیروی پیش بار F_{PT} و بار سیکیلی F_G را نشان می‌دهد.

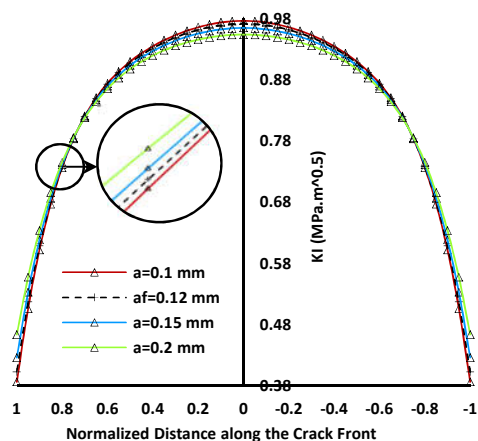


شکل ۱۳- نمودار نمایانگر اثر مفید پیش بار در پیچ‌ها

فرآیند مونتاژ پیچ یکی از مهمترین عوامل تاثیرگذار بر عملکرد خستگی است، اما اغلب نادیده گرفته می‌شوند. دامنه تنش سیکیلی اعمال شده به پیچ بستگی بسیار زیادی به پیش بار دارد، زیرا اگر پیش

(پارک ۱۹۷۴ و هلن ۱۹۷۵). برای شبیه سازی رشد ترک بر اساس اندازه گیری نیم بیضی ایجاد شده در سطح شکست پیچ از کد اجزاء محدود مراجع [۳۴-۳۵] استفاده شده است.

در این مطالعه، هندسه ترک به صورت نیمه بیضوی و بر روی صفحه که در تحلیل تنش بدست آمده است قرار می‌گیرد. طول اولیه ترک برای چهار ترک مختلف با ابعاد ۰/۱، ۰/۱۲، ۰/۱۵ و ۰/۲ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفت که به عنوان ترک اولیه در نظر گرفته شد. پس از بارگذاری پیچ مش‌بندی انجام می‌گیرد و سپس تحلیل تنش انجام می‌شود و نهایتاً مقادیر SIF جهت رشد ترک محاسبه می‌گردد. رشد ترک به صورت دستی انجام شد که در این روش میزان رشد ترک مطلوب بود. اما لازم به ذکر است که رشد ترک نباید بیش از ۳۰٪ کل طول ترک‌های قبلی باشد. پس از رشد ترک، قطعه کار مجدداً مش بندی شده و برای حل آماده می‌شود، این کار باید برای هر مرحله از رشد ترک‌ها تکرار شود. رشد ترک‌ها تا ۱۴ مرحله ادامه می‌یابد تا به طول بحرانی ۱/۹۶ میلی‌متر برسد. شکل ۱۵، SIF نرمال شده در s/s_m (که S طول کمان و s_m طول قوس AB مطابق شکل ۱۴) برای ۴ ترک نشان می‌دهد.



شکل ۱۵- SIF نرمال شده در امتداد جلوی ترک s/s_m

نتایج به دست آمده برای SIF معادل در نوک ترک در شکل ۱۶ نشان داده شده است. براساس شکل ۱۶، حداکثر SIF متعلق به ترک با طول بیشتر است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش طول ترک، مقادیر SIFها نیز افزایش می‌یابد. مطابق رابطه پاریس با افزایش طول ترک، سرعت رشد ترک نیز افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، اختلاف SIFها برای ترک با طول اولیه ۰/۲ میلی‌متر بسیار بیشتر از اختلاف ترک در طول اولیه ۰/۱ میلی‌متر است.

ناحیه رزوه وجود علامت‌های خط‌بندی‌های خستگی را نشان داد که یکی از علائم بارز خستگی تحت بار سیکلی است [۲۹-۳۰]. در کار حاضر حداکثر تنش و حداقل تنش نسبت به مقدار استاندارد به ترتیب حدود ۴ درصد و ۸ درصد پایین‌تر است. از این رو، یکی از دلایل اصلی شکست می‌تواند کمبود پیش بار و بیشینه نیروی در پیچ‌های سرسپیندر باشند که می‌تواند دامنه تنش متناوب قابل توجهی را بوجود می‌آورد. کمبود پیش‌بار و بیشینه نیرو بر اثر نیروهای سیکلی حاصل از فشار احتراق باعث شکست خستگی گردیده است.

۳-۷- بررسی فاکتور شدت تنش

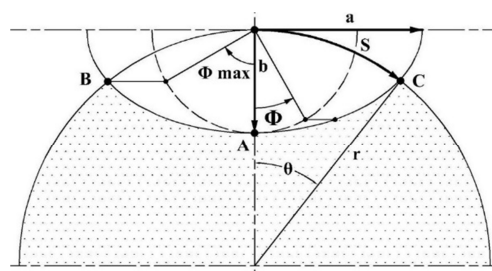
نظر به اینکه بیشتر ترک‌های ایجاد شده در پیچ‌ها با توجه به نوع بارگذاری از نوع نیمه بیضوی مطابق شکل ۱۴ است، نقاط روی قسمت جلوی ترک در عمیق ترین نقطه A ترک قرار دارند جایی که ترک‌ها با سطح بیرونی مهمترین نقاط (نقاط B و C) تلاقی می‌کنند. محورهای نیمه بیضوی به طور تجربی مطابق معادله $b = 2s/\pi$ بدست می‌آیند [۳۱-۳۲] و در نتیجه معادله (۱) بدست می‌آید.

$$a = \frac{r \sin \theta}{\sqrt{1 - \frac{r^2}{b^2} (1 - \cos \theta)^2}} \quad (1)$$

زمینه اصلی مطالعه در مورد مکانیک شکست تعیین فاکتورهای شدت تنش (SIF) است. در این مطالعه، SIF حاصل از تنش کار حاضر برای مد I شکست در امتداد جلوی ترک با استفاده از تحلیل اجزاء محدود تعیین شد که ترک‌های سطحی نیمه بیضوی عمود بر محورهای در پیچ‌های کششی قرار دارد [۳۳]. طول کل ترک قوسی $2s$ به عنوان پارامتر ترک بدست آمده از سطح شکست پیچ در حین کار تحت بار خستگی مطابق روش‌های شیراتوری و همکاران [۳۴] و فریتاس و همکاران [۳۱] انتخاب گردید. بنابراین، SIF مد I برای هر نقطه در امتداد طول ترک سطحی توسط معادله (۲) بدست می‌آید.

$$K_I = F_I \left(\frac{b}{r} \cdot \frac{b}{a} \cdot \phi \right) B_s \sqrt{\pi s} \quad (2)$$

که B_s و s به ترتیب تنش کششی اعمال شده و طول ترک نیم قوس هستند و F_I ضریب تصحیح مرزی یا SIF حالت بدون بعد I است که تابعی از شکل ترک نیمه بیضی (b/a) ، عمق نسبی ترک (b/r) و نقاط موقعیت در امتداد جلوی ترک مشخص شده توسط زاویه پارامتری ϕ می‌باشند. محاسبات FEM مطابق مراجع [۳۳، ۵] همانند شکل ۱۴ انجام گردید.



شکل ۱۴- هندسه ترک نیم بیضی [۵]

در مطالعه حاضر، SIFهای ترک سطحی پیچ از نتایج تحلیل تنش اجزاء محدود با استفاده از روش پیشروی ترک مجازی استنباط گردید

تنش لازم برای ایجاد جریان مومسان) می‌باشد. تعداد سیکل‌های مورد نیاز برای رشد ترک از طول اولیه، a_0 تا طول نهایی، a_f ، با استفاده از رابطه انتگرالی زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$N_{tot} = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{C(\Delta K_{eff})^n} \quad (9)$$

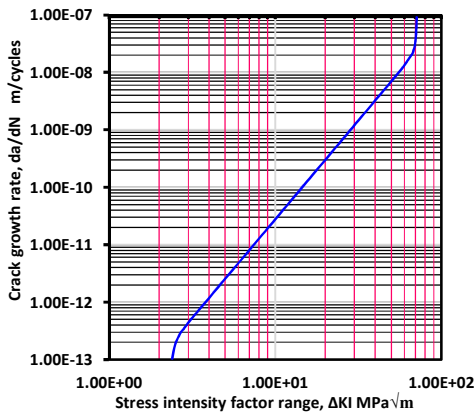
که a_0 و a_f عمق ترک اولیه و بحرانی هستند.

مقدار اندازه بحرانی ترک a_f معادله (۱۱) می‌توان با جایگزین کردن $a = a_f$ ، $\Delta\sigma = \sigma_{max}$ حداکثر تنش کششی اعمال شده، $\Delta K_I = K_{IC}$ چقرمگی شکست ماده و Y ضریب هندسه ترک در معادله (۱۰) تخمین زد [۴۲-۴۳]:

$$\Delta K_I = Y\Delta\sigma\sqrt{\pi a} \quad (10)$$

$$a_f = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{IC}}{Y\sigma_{max}} \right)^2 \quad (11)$$

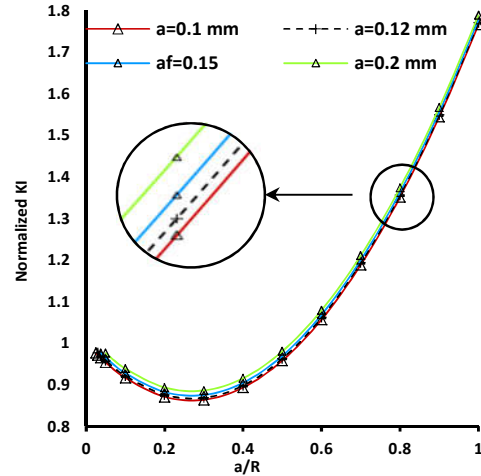
با استفاده از $K_{IC} = 71.24 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ بدست آمده از شکل ۱۷، برای $Y = 1.106$ مقدار تقریبی $\sigma_{max} = 820.81 \text{ MPa}$ و $a_f = 1.96 \text{ mm}$ مشاهده شده روی سطح شکست، است.



شکل ۱۷- محدوده فاکتور شدت تنش نرمال شده در مقابل میزان رشد با نسبت تنش $R = 0.78$

در طول انتشار ترک خستگی، مقدار $\Delta K_{eff} = \Delta K_I$ ابتدا تا رسیدن به حداقل محلی کاهش می‌یابد و سپس افزایش می‌یابد. اگر این مقدار حداقل محلی کمتر یا مساوی با محدوده SIF مؤثر آستانه باشد ($\Delta K_I < \Delta K_{eff.th}$)، ترک انتشار نمی‌یابد. در مقابل، اگر این مقدار حداقل محلی بیشتر از ΔK_{th} ($\Delta K_I > \Delta K_{eff.th}$) باشد، انتشار ترک تا شکست ادامه خواهد داشت. این روابط پایه بر اساس تعیین محدوده SIF تنش آستانه (ΔK_{th}) تشکیل می‌گردد [۴۶]. با توجه به مقدار $K_{th} = 3.08 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ استخراج شده از شکل ۱۶ و مقدار تنش اعمال شده، طول ترک معادل K_{th} برابر با $a_{th} = 0.096 \text{ mm}$ است. اما در کار حاضر وجود یک سری عیوبی است که مقدار آن بیشتر از مقدار ترک آستانه است و مستعد رشد می‌باشد.

شکل ۱۸ عمر خستگی را بر حسب طول ترک برای مقادیر مختلف طول ترک اولیه نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش طول ترک، عمر خستگی نیز کاهش می‌یابد.



شکل ۱۶- SIF نرمال شده در مقابل عمق ترک نسبی کششی

۳-۸- تعیین عمر خستگی

پس از ورود اطلاعات لازم و محاسبه مقادیر SIF، عمر خستگی برای پیچ مورد نظر محاسبه می‌شود. برای بدست آوردن نرخ رشد ترک و عمر خستگی از رابطه‌های موجود در مراجع [۳۷-۳۹] می‌توان استفاده نمود. برای این مطالعه از رابطه اصلاح شده پاریس استفاده می‌گردد که اثرات ناشی از بسته شدن نوک ترک^۱ را نیز لحاظ می‌کند. نرخ رشد ترک براساس این رابطه به شکل زیر تعریف می‌شود [۴۰]:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{eff})^n = C(K_{max} - K_{op})^n \quad (3)$$

برای بارگذاری مد یک، ΔK_{eff} معادل ΔK_I است که در معادله (۳)، ΔK_{eff} ضریب شدت تنش موثر بوده و برابر اختلاف حداکثر ضریب شدت تنش K_{max} و سطح تنش مورد نیاز برای بازشدگی نوک ترک، K_{op} می‌باشد. نمودار نرخ رشد ترک خستگی (da/dN) بر حسب نرخ تغییرات ضریب شدت تنش (ΔK) بر اساس ثبت اطلاعات طول ترک بر حسب سیکل بارگذاری و استفاده استاندارد ASTM E647-11 [۱۶] برای نمونه‌های CT در شکل ۱۷ رسم گردید. ثابت‌های ماده n و C در این رابطه با استخراج داده‌های da/dN و ΔK از دو نقطه در ناحیه خط راست (ناحیه پاریس) نمودار شکل ۱۷ بدست می‌آیند. در این مطالعه، $n = 3.44$ و $C = 1.002 \times 10^{-14} \text{ m/cycle}$ می‌باشند. بعلاوه، تابع باز شدگی ترک، f ، برای تحریک بستار پلاستیک^۲ ترک توسط نیومن به صورت زیر تعریف شده است [۴۱]:

$$f = \frac{K_{op}}{K_{max}} = \begin{cases} \max(R, A_0 + A_1R + A_2R^2 + A_3R^3); & R \geq 0 \\ A_0 + A_1R; & -2 \leq R < 0 \end{cases} \quad (4)$$

و ضرایب رابطه فوق از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$A_0 = (0.825 - 0.34\alpha + 0.05\alpha^2) [\cos(\frac{\pi}{2} S_{max}/\sigma_0)]^{\frac{1}{\alpha}} \quad (5)$$

$$A_1 = (0.415 - 0.071\alpha) S_{max}/\sigma_0 \quad (6)$$

$$A_2 = 1 - A_0 - A_1 - A_3 \quad (7)$$

$$A_3 = 2A_0 + A_1 - 1 \quad (8)$$

در این معادلات، α ، یک ضریب محدودیت برای حالت کرنش/تنش صفحه‌ای و S_{max}/σ_0 نسبت تنش اعمالی بیشینه به تنش جریان

¹ Fatigue Crack Closure

² Plasticity-induced closure

لبه‌های برشی تشکیل گردیده است.

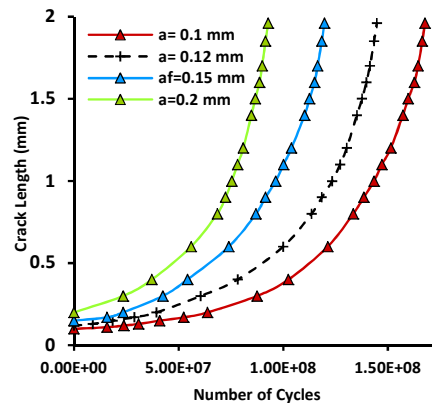
۵- نتایج EDS ترکیبات اکسیدی MgO ، Al_2O_3 و CaO را نشان داد که وجود این ترکیبات برای کیفیت سطح و خصوصیات شکل‌دهی محصولات نهایی مضر است. بعلاوه، مشاهدات SEM یکسری از ترکیبات اکسیدی را تیز نشان داد که می‌تواند باعث ایجاد تمرکز تنش و پیدایش ترک گردد و به نوبه خود بر اثر نیروی سیکلی اتاق احتراق باعث رشد ترک می‌شود.

۶- تحلیل عددی تنش نشان داد که بیشینه تنش حدود ۴٪ و کمینه تنش حدود ۸٪ نسبت به مقدار پیشنهاد شده استاندارد پایین‌تر است که می‌تواند یک عامل رشد ترک خستگی پیچ‌ها باشد.

۷- تحلیل عددی خستگی نشان داد که وجود ترک به عمق ۰/۱۲ میلی‌متر با حداکثر عمر خستگی 1.45×10^8 سیکل توافق خوبی با عمر کارکرد واقعی پیچ‌ها 1.44×10^8 سیکل دارند. بعلاوه، مشاهدات لایه اکسیدی میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی مطابقت قابل قبولی با عمق ترک محاسبه شده دارند.

۵- مراجع

- [1] Pilar V. G., Ana P.M. and Maria G.M., Failure analysis study on a fractured bolt. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 109, pp. 104355, 2020.
- [2] Yuchen Song Y., Wang J., Uy B. and Li D., Experimental behaviour and fracture prediction of austenitic stainless steel bolts under combined tension and shear. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 166, pp. 105916, 2020.
- [3] Yu Z., Xu X., Failure analysis of diesel engine cylinder head bolts. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 13, pp. 826-834, 2006.
- [4] Fonte M., Reis L., Infante V. and Freitas M., Failure analysis of cylinder head studs of a four stroke marine diesel engine. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 101, pp. 298-308, 2019.
- [5] Aliakbari K. and Akbarpour Mamaghani T., Analysis of fatigue crack growth in cylinder head bolts of gasoline engine based on experimental data. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 42(5), pp. 244, 2020.
- [6] Qin C., He S., Zhong L., Feng W., Pang J., Li Q. and He W., Fracture failure analysis of pressure gauge bolt on fuel gas system of offshore platform. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 117, pp. 104959, 2020.
- [7] Li L. and Wang R., Failure analysis on fracture of worm gear connecting bolts. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 36, pp. 439-446, 2014.
- [8] Aliakbari K., Failure Analysis of Base Plate Bolts of Radial Forging Machine. *Journal of Stress Analysis*, Vol. 4(1): 89-98, 2019.
- [9] ASTM E415-17, Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry (ASTM International, Philadelphia, 2017).
- [10] ASTM E1086-14, Standard Test Method for Analysis of Austenitic Stainless Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry (ASTM International, Philadelphia, 2014).
- [11] ASTM E8/E8M-16ae1, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials (ASTM International, Philadelphia, 2016).
- [12] Aliakbari K. and Farhangdoost KH., Plastic deformation influence on material properties of autofrettagged tubes used in diesel engines injection system. *J Press Vessel Technol*, Vol. 136, pp. 041402-1, 2014.
- [13] Aliakbari K. and Farhangdoost KH., The investigation of modelling material behavior in autofrettagged tubes made from aluminium alloys. *Int J Eng*, Vol. 27, pp. 803-810, 2014.



شکل ۱۸- طول ترک‌های اولیه در مقابل عمر خستگی

با توجه به نتایج به دست آمده برای عمر خستگی پیچ، می‌توان فهمید که شیب منحنی طول عمر خستگی در طول ترک ناچیز است. به عبارت دیگر، افزایش ناچیز در طول ترک باعث حداکثر عمر خستگی می‌شود. بنابراین، SIF در طول ترک کوتاه بسیار مهم‌تر از SIF در ترک‌های طولانی‌تر است. تحقیقات مشابه (به عنوان مثال [۴۷-۴۸]) تأثیر افزایش طول اولیه ترک بر افزایش روند طول عمر خستگی در چرخ‌های ریلی، میل‌لنگ‌ها و پیچ‌ها گزارش شده است. همچنین، نتایج شکل ۱۸ نشان می‌دهد که وجود ترک با عمق ۰/۱۲ میلی‌متر با حداکثر عمر خستگی 1.45×10^8 سیکل توافق خوبی با عمر کارکرد واقعی پیچ‌ها 1.44×10^8 دارند. یکی از دلایل خرابی زودرس پیچ‌ها ناشی از اکسید شدن لایه کربنی و وجود ناخالصی‌ها است که در شکل ۷ با عمق ۰/۱۰۳ میلی‌متر نشان داده شده است که توافق خوبی با نتایج عددی دارد. لایه اکسیدی به اضافه وجود ناخالصی‌ها یکی از دلایل شروع و انتشار ترک خستگی می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

مطالعه در مورد رشد ترک خستگی در پیچ‌های کربنیزه سرسیلندر موتور در دو بخش تجربی و عددی انجام گردید و نتایج زیر حاصل شد.

- ۱- نتایج حاصل از ترکیب شیمیایی و تست کشش تأیید نمود که مواد مورد استفاده برای پیچ سرسیلندر در محدوده استاندارد قرار دارد.
- ۲- مشاهدات ریزساختاری به همراه EDS و نمودار سختی سنجی نشان داد که ساختار ماده پیچ از نوع فولاد مارتنزیتی کربن دهی شده است و لایه کربنیزه شده تا حدود ۰/۴ میلی‌متر سخت کاری شده است.
- ۳- تحلیل نتایج و بررسی مطالعه پژوهش تحقیقات دیگران نشان داد که یک ارتباط لایه کربنیزه شده با محیط آزاد برای ایجاد رسوبات اکسیدی بر اثر اکسیداسیون داخلی در نزدیکی سطح ایجاد وجود دارد که این یک پدیده معمولی در فولاد کربنیزه شده به وسیله گاز است و عمق این اکسیداسیون در کار حاضر حدود ۱۰۳ میکرون است. این اکسیداسیون منشاء ترک است و بر اثر بار سیکلی فشار احتراق شروع به رشد ترک خستگی می‌گردد و نهایتاً منجر به شکست می‌گردد.
- ۴- نتایج فراکتوگرافی نشان داد که سطح شکست پیچ از سه ناحیه شروع و رشد ترک خستگی به همراه علائم خط بندی خستگی و استپ‌های جغجغه‌ای، ناحیه علائم شعاعی و ناحیه شکست سریع شامل

- Murakami (Ed.), Handbook of Stress Intensity Factors, vol. II, Pergamon Press, Oxford 659-665, 1987.
- [35] Hellen T.K., On the method of virtual crack extension. *International Journal for Numerical methods in Engineering*, Vol. 9, pp. 187-207, 1975.
- [36] Parks D. M., A stiffness derivative finite element technique for determination of elastic crack tip stress intensity factor. *International Journal of Fracture*, Vol. 10, pp. 487-502, 1974.
- [37] Forman R. G., Kearney V. E. and Engel R. M., Numerical analysis of crack propagation in cyclic-loaded structures, *Journal of Basic Engineering*, Vol. 89, pp. 459-463, 1976.
- [38] Elber W., The significance of fatigue crack closure, in damage tolerance in aircraft structures. *ASTM STP.*, Vol. 486, pp. 230-242, 1971.
- [39] NASA, Fatigue Crack Growth Computer Program NASGRO Version 3.0, Reference Manual. JSC-22267B, NASA, Lyndon B. Johnson Space Center, Texas, 2000.
- [40] Anderson T. L., Fracture Mechanics, fundamentals and applications, second edition. *CRC press*, 1994.
- [41] Newman J.J., A crack opening stress equation for fatigue crack growth, *International Journal of Fracture*, Vol. 24(4), pp. 131-135, 1984.
- [42] Murakami Y., Stress intensity factors handbook, Vol. 1. Oxford: Pergamon Press, 1987.
- [43] Mehrzadi M. and Taheri F., The influence of negative and positive stress ratios on crack growth rate in AM60B magnesium alloy, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 545, pp. 68-77, 2012.
- [44] Meguid S. A., Engineering Fracture Mechanics, Springer Netherlands, 1989.
- [45] Campbell F. C., Fatigue and Fracture: Understanding the Basics. ASM, 2012.
- [46] Fukumura N., Suzuki T., Hamada S., Tsuzaki K. and Noguchi H., Mechanical examination of crack length dependency and material dependency on threshold stress intensity factor range with Dugdale model. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 135, pp. 168-186, 2015.
- [47] Masoudi Nejad R., Farhangdoost KH. and Shariati M., Numerical study on fatigue crack growth in railway wheels under the influence of residual stresses, *Engineering Failure Analysis* 52:75-89, 2015.
- [48] Aliakbari K., Imanparast M. and Masoudi Nejad R., Micro-structure and fatigue fracture mechanism for a heavy-duty truck diesel engine crankshaft. *Scientia Iranica B*, Vol. 26(6), pp. 3313-3324, 2019.
- [14] ASTM E384-17, Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials (ASTM International, Philadelphia, 2017).
- [15] Farahmand B., Chapter 3: Fatigue Crack Growth and Applications. *Fracture Mechanics of Metals, Composites, Welds, and Bolted Joints*. Springer, pp. 118-179, 2001.
- [16] ASTM E647-11, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates. (ASTM International, Philadelphia, 2011).
- [17] Witek L., Sikora M., Stachowicz F. and Trzepieciniski T., Stress and failure analysis of the crankshaft of diesel engine. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 82, pp. 703-712, 2017.
- [18] DIN EN 10083-3, Steels for quenching and tempering - Part 1: General technical delivery conditions (German National Standard, Berlin, 2007).
- [19] Colombo R.L., Fusani F. and Lamberto M., On the soft layer in carburized gears. *Journal of Heat Treating*, Vol. 3, pp. 126-8, 1983.
- [20] Yu Z. W., Xu X. L., Yang Z. and Li Y. Y., Case internal oxidation and intergranular fracture of carburized splined-shaft. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 22, pp. 141-151, 2012.
- [21] ISO 898-1:2013 (en), Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel- Part 1: bolts, screws and studs with specified property classes—coarse thread and fine pitch thread, 2013.
- [22] Taylor C. F., The Internal-Combustion Engine in Theory and Practice: Volume 2: Combustion, Fuels, Materials, Design, MIT Press, Cambridge, 1985.
- [23] Kodur V., Yahyai M., Rezaeian A., Eslami M. A. and Poormohamadi A., Residual mechanical properties of high strength steel bolts subjected to heating-cooling cycle. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 131, pp. 122-131, 2017.
- [24] Li Y., Lu P., Wang B., Xiang Q. and Ma B., Failure analysis of bolts on fatigue test bench for excavator stick, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 118, pp. 104863, 2020.
- [25] Park J. H. and Kim D. S., Effect of CaO-Al₂O₃-MgO slags on the formation of MgO-Al₂O₃ inclusions in ferritic stainless steel. *Metall. Mater. Trans B.*, Vol. 36, pp. 495-502, 2005.
- [26] Lyu S., Ma X., Chen M., Huang Z., Yao Z., Wang G. and Zhao B., Application of phase equilibrium studies of CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO system for oxide inclusions in Si-deoxidized steels. *Calphad*, Vol. 68(101721), pp. 1-8, 2020.
- [27] Shigley's, Mechanical Engineering Design, ninth edition, Mc-Graw-Hill, Chap. 8, 2012.
- [28] Bowman, Distribution-Barnes Group, Fastener Facts, Cleveland. 1985.
- [29] ASM Metals Hand Book Volume 12 - Fractography. Second printing, 1992.
- [30] Infante V., Silva J. M., Silvestre M. and Baptista R., Failure of a crankshafts of an aeroengine: a contribution for an accident investigation, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 35, pp. 286-293, 2013.
- [31] Freitas M. D. and François D., Analysis of fatigue crack growth in rotary bend specimens and railway axles, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* Vol. 18, pp. 171-178, 1995.
- [32] Fonte M. and Freitas M., Semi-elliptical crack growth under rotating or reversed bending combined with steady torsion, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 20:895-906, 1997.
- [33] Fonte M, Freitas M (1999) Stress intensity factors for semi-elliptical surface cracks in round bars under bending and torsion. *International Journal of Fatigue*, Vol. 21, pp. 457-463, 1999.
- [34] Shiratori M., Miyoshi T., Sakay Y. and Zhang G. R., Factors analysis and application of influence coefficients for round bar with a semi-elliptical surface crack, in: Y.