

تحلیل شکست یک میل لنگ قطار تحت بارهای خستگی خمشی

مری، پژوهشکده توسعه تکنولوژی، جهاد دانشگاهی صنعتی شریف، تهران، ایران

کارشناس متالورژی پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران

حسن غیائی*

مصطفی سلطانیلو

چکیده

خرابی قطعات ممکن است تحت تاثیر یکی از چهار عامل طراحی، مواد، فرآیند تولید و استفاده نادرست یا ترکیبی از هر یک از این عوامل رخ دهد. لذا هدف از بررسی علت شکست قطعات، مشخص نمودن هریک از عوامل فوق و جلوگیری از تکرار آنهاست. میل لنگ قسمت مهمی از یک موتور احتراق داخلی است که تعداد زیادی از نیروهای خمشی و پیچشی تکرار شونده را در عمر کاری خود تحمل می نماید. خستگی از عوامل مهم خرابی در اکثر میل لنگ ها می باشد. در این تحقیق با انجام آزمایشهایی همچون بررسی های ماکروسکوپی، آنالیز شیمیایی، اندازه گیری زبری سطح ژورنال ها و شعاع گلوبی آنها، خواص مکانیکی، متالوگرافی و بررسی سطح شکست با میکروسکوپ الکترونی روبشی، علت شکست یک میل لنگ قطار مورد مطالعه واقع شد. در این مطالعات مشخص شد که شکست در اثر خستگی رخ داده است؛ که علت احتمالی آن کاهش مقاومت به خستگی بواسطه زبری بالای سطح ژورنال، وجود مقادیر زیاد و حجیم ناخالصی های سولفیدی و نیتریدی و کربن سوزی جزئی ناشی از ماشینکاری می باشد.

واژه های کلیدی: میل لنگ، خستگی، ناخالصی، زبری، کربن سوزی جزئی.

Failure Analysis of a Train Crank Shaft Under Fatigue Loadings

Abstract

Failure of parts may happen under the influence of four parameters, design, materials, production process and improper use or combination of these. Therefore, the goal of studying the cause of parts failure is to specify any those parameters and avoid repeating them. Crank shaft is an important component of internal combustion engine that experiences a large number of load cycle during its service life. Crank shaft is subjected to several forces which vary in magnitude and direction. Most of crank shaft fails in cause of fatigue in fillet areas due to bending load. In this research, the failure causes of a train crank shaft were studied using chemical analysis, macroscopic and microscopic investigations by optical and scanning electron microscopes, measurement of journals surface roughness and radius of fillet and mechanical properties. It was found that the cause of failure is fatigue, but a lot of inclusions and probably high roughness and partial decarburizing due to machining have been decreased the fatigue strength.

Keywords: Crank Shaft, Fatigue, Inclusion, Roughness, Partial Decarburizing.

۱- مقدمه

یک فرآیند تحلیل خرابی تقریباً یک هنر برگرفته از علم است؛ زیرا تحلیل ممکن است مبتنی بر توانایی تحلیل گر در تشخیص علائم مهم باشد. این فرضیه زمانی تقویت می شود که دو تحلیل گر درباره یک حادثه دو نتیجه گیری متفاوت ارائه می دهند [۱].

خرابی قطعات ممکن است تحت تاثیر یکی از چهار عامل طراحی، مواد، فرآیند تولید و استفاده نادرست یا ترکیبی از هر یک از این عوامل رخ دهد. لذا هدف از بررسی علت شکست قطعات مشخص نمودن هریک از عوامل مزبور و در نتیجه رفع نواقص و کاستی های موجود آمده است. از طرفی شدت تاثیر این عوامل بسته به کاربرد قطعه و نوع بارهای اعمالی بر آن متفاوت خواهد بود. یکی از این عوامل که عملاً ۹۰٪ تمام خرابی های مکانیکی نیز ناشی از آن می شود، خستگی است که تحت یک تنش تناوبی اتفاق می افتد. مقدار این تنش به قدری کوچک است که در بارگذاری غیر سیکنلی، در ناحیه الاستیک واقع شده و باعث خرابی نمی گردد.

در واقع این پدیده یک فرآیند خرابی است که توسط رشد ترک های ناشی از تنش تناوبی ایجاد شده و می تواند منجر به خرابی های ناگهانی شود. شکست میل لنگ ها معمولاً توسط خستگی خمشی، خستگی پیچشی یا ترکیبی از این دو اتفاق می

افتد. تنش های ناشی از خمش سیکنلی در طی چرخش آن، یا وجود عدم همراستایی بین ژورنال های اصلی و پیچش ناشی از انتقال قدرت توسط شفت، همگی می توانند باعث شروع و رشد ترک شوند. هرچند ارتعاشات محوری و پیچشی نیز تحت شرایط خاصی ایجاد شده و باید در تعیین علت خرابی مورد توجه واقع شوند. هرچند ارتعاش دارای نقش مهمی در تحلیل خرابی است لکن معمولاً از آن صرف نظر می شود. یک جاذب ارتعاش می تواند جلوی خسارات ناشی از ارتعاش را بگیرد [۲].

ترک های ناشی از خستگی خمشی معمولاً از ناحیه گلوبی^۱ آغاز می شوند، و حفرات مخصوص روغنکاری می توانند مسیر آنها را تغییر دهند. حفره روغن منشا شکست نیست اما یک محل تمرکز تنش است که ترک ها در آنجا به همدیگر می رسند. ترک های ناشی از خستگی پیچشی در ژورنال ها و حلزونی اطراف آنها با زاویه حدود ۴۵° نسبت به محور شفت شروع می شوند [۲ و ۳].

یکی دیگر از احتمالات ایجاد ترک در ناحیه گلوبی، ایجاد کربن سوزی موضعی ناشی از سنگ زدن هنگام کاهش قطر میل لنگ است. یا اینکه ممکن است در این سطوح مارتنزیت بسیار ترد ایجاد شده و ترک ها از آنجا شروع شوند [۴].

^۱ Fillet

های میله‌ای شکل هستند؛ زیرا سبب تمرکز تنش بیشتری در اطراف آخال می‌شوند. آخال های میله‌ای شکل تنها در بارگذاری عمود بر جهت کارمکانیکی دارای اثرات منفی قابل توجهی بر خواص خستگی هستند [۶، ۷ و ۸].

در کاربردهای حساس و پرسرعت مثل کاربردهای هوایی، نقش تمیزی فولاد در افزایش مقاومت به خستگی بسیار مهم است. مقایسه یک آلیاژ مهندسی (EN40C) و یک آلیاژ هوایی (3S132) مورد استفاده در ساخت میل لنگ از نظر تمیزی (مقدار عناصر گوگرد و فسفر) در جدول ۱ آمده است [۹]: مواد مورد استفاده در ساخت میل لنگ باید دارای قابلیت شکل پذیری مناسب و ماشینکاری آسان به همراه استحکام خستگی، چقرمگی و سختی کافی باشند. میل لنگ ها معمولاً به دو روش ریخته گری و فورج تولید می شوند که استحکام و چقرمگی نمونه های فورج شده به دلیل تراکم ساختاری زیاد، بیشتر می باشد [۱۰]. برخی از فولادهای متداول مورد استفاده در ساخت میل لنگ ها در جدول ۲ آمده است. مثلاً آلیاژ SAE1548 با سختی 241-285 BHN و سختی سطح HRC 47-52 تا عمق 2-5 mm بکار می رود و میل لنگ های هوایی از فولاد AISI 4340 با ساختار مارتنزیت تمپر شده ساخته می شوند [۲].

عوامل دیگر موثر در شکست میل لنگ عبارتند از: عیوب، شعاع نامناسب گلویی، روغنکاری ناکافی و ذرات خارجی کنده شده از میل لنگ [۴].

زمانی که عیوب ریزساختاری یا آخال مشاهده نشود، می توان نتیجه گرفت که شکست احتمالاً ناشی از عوامل خارجی بوده و به دلیل وجود یک عیب ذاتی داخلی نیست. اما در صورت مشاهده عیوب داخلی پرداختن به نقش آنها دارای اهمیت است [۲].

هنوز درک کاملی از اثرات آخال ها بر شروع ترک و حد خستگی حاصل نشده است. زیرا تاثیر آخال ها بر خواص خستگی فولاد به عوامل گوناگونی همچون ترکیب شیمیایی، اندازه و توزیع و شکل آخال، چسبندگی آخال به زمینه و ثابت الاستیک آخال و زمینه بستگی دارد. آخال های سولفیدی در طی تغییر فرمی مثل نورد یا فورج کشیده می‌شوند. اثرات مخرب این آخال های کشیده شده بر خواص مکانیکی، بالاخص زمانیکه جهت اعمال تنش عمود بر جهت کشیدگی آخال ها باشد، بسیار بیشتر است [۵، ۶ و ۷]. همچنین فاصله آخال از سطح نمونه نیز بر عمر نمونه موثر است. به طوری که هر چه آخال به سطح نمونه نزدیک تر باشد، تاثیر منفی آن بر عمر خستگی بیشتر است. شکل آخال نیز بر خواص مکانیکی، به ویژه خستگی، موثر است؛ به طوری که آخال های صفحه‌ای یا دارای شکل نامنظم و لبه‌های تیز در هر دو حالت بارگذاری موازی و عمود بر جهت کار مکانیکی دارای اثرات منفی تری نسبت به آخال

جدول ۱- ترکیب شیمیایی دو فولاد میل لنگ مهندسی و هوایی [۹]

ماده	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V
BS-EN40C	۰/۵-۰/۳	۰/۳۵-۰/۱	۰/۸-۰/۴	≤۰/۰۵	≤۰/۰۵	۳/۵-۲/۵	≤۰/۴	۱/۲-۰/۷	---
BS-3S132	۰/۴۳-۰/۳۵	۰/۳۵-۰/۱	۰/۷-۰/۴	≤۰/۰۲	≤۰/۰۲	۳-۳/۵	≤۰/۳	۱/۱-۰/۸	۲/۵-۱/۵

جدول ۲- ترکیب شیمیایی آلیاژهای میل لنگ [۱۱ و ۱۲]

ماده	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V
SAE 1548	۰/۵۲-۰/۴۴	۰/۶-۰/۰۷	۰/۴-۱/۱	≤۰/۰۳	≤۰/۰۵	۱/۴۷	۱/۴۲	۰/۱۷۹	---
AISI 4340	۰/۴	---	۰/۷۵	---	---	۰/۸۲	۱/۸۵	۰/۲۵	---
EN-30B	۰/۳	۰/۲۲	۰/۵۵	---	---	۱/۲	۴/۱۵	۰/۳	---
4330-M	۰/۳	۰/۳	۰/۸۵	---	---	۰/۹	۱/۸	۰/۴۵	۰/۰۷
32-CrMoV-13	۰/۳۴	۰/۲۵	۰/۵۵	---	---	۳	<۰/۳	۰/۹	۰/۲۸
300-M	۰/۴۳	۱/۷	۰/۷۵	---	---	۰/۸۲	۱/۸۵	۰/۴	۰/۰۷
38MnVS5	۰/۴۱-۰/۳۴	۰/۸-۰/۱۵	۰/۱-۱/۶	۰/۰۳≤	۰/۰۶-۰/۰۲	---	---	---	۰/۰۸-۰/۰۲

Schenck Trebel آزمایش کشش بر روی آن انجام شده و مقادیر استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی و درصد ازدیاد طول نسبی بدست آمد.

بررسی ریزساختار نمونه بر روی نمونه های بدست آمده از ژورنال متحرک در دو مقطع موازی و عمود بر محور طولی ژورنال و به کمک میکروسکوپ نوری Carl Zeiss Jena مدل Neophot 32 صورت پذیرفت.

قسمتی از سطح شکست ژورنال متحرک توسط وایرکات بریده شده و با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی Jeol مدل JXA-840 تحت مطالعه و بررسی قرار گرفت.

لازم به ذکر است که با توجه به عدم دسترسی به اطلاعات فنی میل لنگ مزبور و نقشه های مربوطه، نتایج بدست آمده از آزمایشها همچون ترکیب شیمیایی و مقادیر صافی سطح با اطلاعات علمی بدست آمده از منابع ذکر شده مقایسه گردید.

۳- نتایج و بحث

تصاویر ماکروسکوپی میل لنگ، قسمت های شکسته شده آن و سطح شکست در اشکال ۱ تا ۴ نشان داده می شود.



شکل ۱- تصویر میل لنگ سالم



شکل ۲- تصویر قسمت های شکسته میل لنگ، ژورنال ثابت (تصویر سمت راست) و ژورنال متحرک (تصویر سمت چپ)

میل لنگ ها بعد از شکل گیری اولیه به روش های متداول ذکر شده، ماشینکاری می گردند که این عمل باعث ایجاد تنش های پس ماند در سطح قطعه می گردد. این تنش ها در ترکیب با آخال ها یا عیوب دیگر می توانند باعث ایجاد ترک های اولیه در سطح قطعه گردند [۲]. از اینرو جهت کاهش تنش های پس ماند ناشی از ماشینکاری، سطح میل لنگ ها معمولا نیترووره، کربوره، سختکاری القایی، نورد و یا ساچمه زنی می شود که همگی با ایجاد تنش های فشاری باعث بهبود خواص مقاومت به خستگی می شوند [۴].

یکی از عوامل شکست میل لنگ، کاهش روغنکاری در فصل مشترک یاتاقان ها با شفت میل لنگ است که می تواند از ایجاد نقص در سیستم روغنکاری همچون فشار روغنکاری و نازک شدن لایه روغن یا سرعت بالای میل لنگ و خشک یا نیمه خشک شدن بین یاتاقان و شفت ناشی از دمای بالا باشد، یا به دلیل تفرانس بالای بین یاتاقان و میل لنگ، روغن بین این دو ذخیره نشده یا روغن کمی ذخیره می شود [۴].

کیفیت سطحی ژورنال ها بالاخص زمانی که لایه نازکی از روغن مابین یاتاقان و ژورنال قرار می گیرد مهم است. لایه نازک روغن زمانی اتفاق می افتد که لزجت روغن پایین است یا فشار زیادی بین سطح یاتاقان و ژورنال وجود دارد. در برخی منابع در چنین شرایطی حداکثر مقادیر مجاز برای Ra (میانگین زبری) و Rz (میانگین حداکثر ارتفاع پروفیل) را به ترتیب $0.2 \mu\text{m}$ و $0.625 \mu\text{m}$ در نظر گرفته اند. این مقادیر بایستی در شرایط فشار کم و متوسط به ترتیب $0.25 \mu\text{m}$ و $1.25 \mu\text{m}$ باشد. همچنین حداقل مقدار شعاع گلوبی باید 2 mm باشد [۱۳].

۲- روش تحقیق

در این مطالعه، علت شکست یک میل لنگ قطار پس از اولین ماشینکاری سطح ژورنال ها به اندازه 0.25 میلیمتر مورد بررسی واقع گردید. به این منظور، آزمون هایی بر روی قطعات شکسته میل لنگ انجام شد. این آزمایشها عبارتند از: بررسی های ماکروسکوپی سطوح شکست، اندازه گیری زبری، اندازه گیری شعاع ناحیه گلوبی، آنالیز شیمیایی، سختی سنجی، آزمون کشش، متالوگرافی و بررسی سطح شکست توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی.

تصاویر ماکروسکوپی توسط دوربین دیجیتال از سطوح شکست دو قسمت شکسته شده تهیه گردید. همچنین شعاع گلوبی در ژورنال ثابت و متحرک به کمک دستگاه VMM مدل C20 از شرکت Carmar و سپس کیفیت سطحی دو ژورنال توسط دستگاه زبری سنج Taylour Hobson مدل Surtronic 25 اندازه گیری شد.

ترکیب شیمیایی نمونه میل لنگ با استفاده از دستگاه کوانتومتر مدل Spectrolab مشخص گردید. پس از آن بر روی مواضع سطح و مغز میل لنگ در ناحیه ژورنال متحرک، سختی سنجی به روش ویکرز و با نیروی 30 Kgf به کمک دستگاه یونیورسال Wolpert انجام شد.

پس از استخراج یک قطعه استوانه ای شکل از قسمت ژورنال متحرک توسط وایرکات و ماشینکاری نمونه مطابق با ابعاد ذکر شده در استاندارد ASTM E8M، توسط دستگاه کشش 25 تن

ترکیب شیمیایی فوق معادل با آلیاژ 30MnVS6 به شماره 1.1302 در استاندارد DIN آلمان با ترکیب جدول ۴ است. این آلیاژ از گروه فولادهای کربن- منگنز دار است که حاوی مقادیر معینی گوگرد جهت افزایش قابلیت ماشینکاری می باشد. ترکیب شیمیایی این آلیاژ نزدیک به آلیاژ 38MnVS5 مندرج در جدول ۲ است که جهت ساخت میل لنگ مورد استفاده قرار می گیرد.

جدول ۴- ترکیب شیمیایی آلیاژ 30MnVS6

Fe	C	Si	Mn	P
base	۰/۳۳-۰/۳۶	۰/۱۵-۰/۱۸	۱/۲-۱/۶	≤۰/۰۲۵
S	Cr	N	Mo	V
۰/۰۶-۰/۰۲	۰/۳	۰/۰۲-۰/۰۱	≤۰/۰۸	۰/۲-۰/۰۸

نتایج سختی سنجی انجام شده به روش ویکرز و با نیروی 30Kgf بر روی دو قسمت سطح و مغز میل لنگ در ناحیه ژورنال متحرک به ترتیب عبارتند از ۵۴۳ و ۲۶۳ ویکرز. نتایج سختی مربوط به مغز قطعه با اعداد مندرج در منابع و استاندارد مربوطه همخوانی دارد. [۱۴]. افزایش سختی سطح میل لنگ نیز با دلیل انجام عملیات سخت کاری سطحی اولیه و یا به دلیل تغییر فرم شدید ایجاد شده تحت نیروهای زیاد بین یاتاقان و ژورنال می باشد [۱۵]. بررسی ها نشان داد که بر روی میل لنگ عملیات سختکاری سطحی تا عمق حدود ۵ mm انجام شده است.

نتایج آزمون کشش انجام شده بر روی نمونه استخراج شده از قسمت ژورنال متحرک و موازی با محور تقارن ژورنال در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵- نتایج آزمون کشش

قطر اولیه (mm)	طول گیج (mm)	استحکام تسلیم [0.2%] (N/mm ²)	استحکام نهایی (N/mm ²)	ازدیاد طول نسبی (%)
۸/۰۹	۴۰	۵۳۸	۸۳۶	۱۵/۸

میزان استحکام کششی نهایی تعریف شده برای اغلب میل لنگ ها حدود ۸۰۰ N/mm² است [۲]. نتایج فوق نشان دهنده تامین این حداقل مورد نیاز است.

بررسی های میکروسکوپی نوری انجام شده بر روی مقاطع موازی و عمود بر محور طولی ژورنال متحرک نشان دهنده موارد زیر است:

۱- ساختار میکروسکوپی پس از پولیش حجم بالایی از ذرات درشت ناخالصی سولفیدی (خاکستری) و نیتریدی (طلایی) [۱۶] را نشان می دهد که در جهت کار مکانیکی فورج کشیده شده یا جهت گیری یافته اند (اشکال ۵ و ۶). وجود ذرات سولفیدی با توجه به ترکیب شیمیایی فولاد عادی به نظر می رسد و این ذرات باعث افزایش قابلیت ماشینکاری می گردند اما از طرفی وجود این ذرات در سطح قطعه، نقاط مناسبی جهت تمرکز تنش محسوب شده و منجر به



شکل ۳- سطح شکست ژورنال ثابت



شکل ۴- سطح شکست ژورنال متحرک و قسمت بریده شده از آن جهت بررسی با SEM

همانگونه که در شکل های ۲ الی ۴ ملاحظه می گردد، شکست از ناحیه گلویی اتفاق افتاده است.

مقادیر اندازه گیری شده پارامترهای کیفیت سطح و شعاع گلویی بر روی ژورنال ثابت عبارتند از:

$$Rz = 2.05 \mu m \quad Ra = 0.268 \mu m$$

$$r = 3.523 mm$$

این مقادیر برای ژورنال متحرک به شرح زیر است:

$$Rz = 2.21 \mu m \quad Ra = 0.479 \mu m$$

$$r = 3.486 mm$$

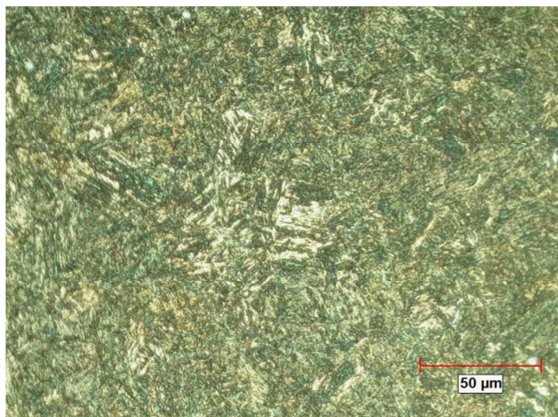
همانگونه که مشاهده می شود پارامترهای مربوط به کیفیت سطح از مقادیر مجاز در فشار حداقلی ذکر شده در منابع نیز بیشتر است.

نتایج آنالیز شیمیایی انجام شده بر روی میل لنگ فولادی به روش کوانتومتری در جدول ۳ درج شده است:

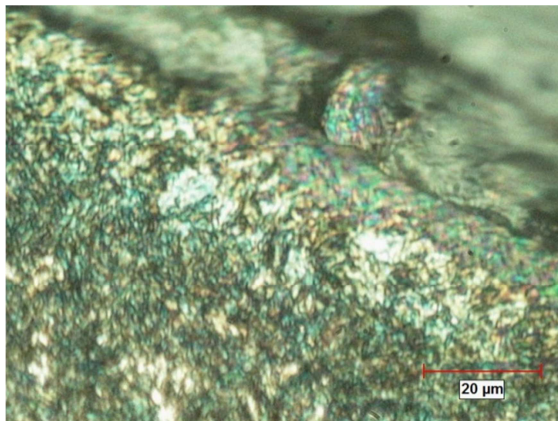
جدول ۳- ترکیب شیمیایی میل لنگ

Fe	C	Si	Mn	P
base	۰/۳۳	۰/۴۹	۱/۳۳	۰/۰۱
S	Cr	Ni	Mo	V
۰/۰۴	۰/۱۲	۰/۰۵	۰/۰۰۸	۰/۱۱

شکل ۷- ساختار میکروسکوپی زمینه پس از اچ



شکل ۸- ساختار میکروسکوپی سطح سختکاری شده پس از اچ



شکل ۹- وقوع کربن سوزی جزئی در نواحی سطحی گلوبی ژورنال متحرک

تصاویر تهیه شده از سطح شکست ژورنال متحرک توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان دهنده نواحی شروع ترک و مسیرهای پیشرفت ترک بصورت خطوط رودخانه ای (river lines) می باشد. (شکل ۱۰). خطوط رودخانه ای علاوه بر نشان دادن جهت پیشرفت ترک، ناحیه ای از شکست خستگی که ترک، رشد نسبتاً سریعی داشته، را نیز نشان می دهند [۱۸]. بعلاوه علیرغم سایش سطوح شکست بر روی هم و از بین رفتن بخشهای قابل توجهی از این سطوح، بر روی سطوح باقیمانده هیچ گونه آثاری از شکست نرم مشاهده نشده و شکست کاملاً ترد و اغلب مرزدانه ای بود (شکل ۱۱). شروع ترک ها از ناحیه گلوبی می تواند ناشی از زبری سطح و نیز وجود کربن سوزی و ناخالصی های سطحی در این ناحیه باشد. اما شکست ترد و مرزدانه ای ناشی از جدایش حجم بالای ذرات ناخالصی با توزیع غالباً مرزدانه ای است.

کاهش مقاومت به خستگی قطعه می گردد. حضور ذرات نیتربیدی با مورفولوژی گوشه دار و تیز، نیز به شدت بر روی خواص مکانیکی تاثیر منفی دارد. [۱۷]

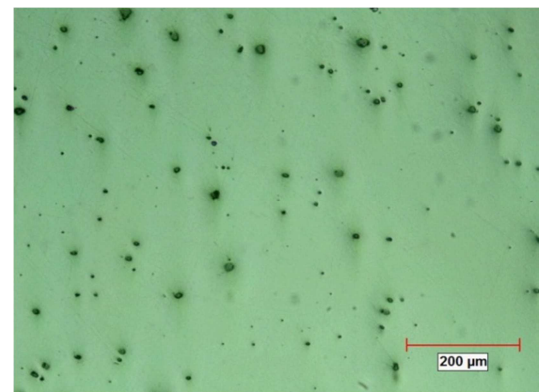
۲- ساختار میکروسکوپی پس از اچ نمونه شامل پرلیت و مقدار قابل توجهی فریت مرزدانه ای است (شکل ۷).

۳- ساختار میکروسکوپی نواحی مجاور به سطح نمونه تا عمق حدود ۵ mm شامل مارتنزیت تمپر شده است (شکل ۸).

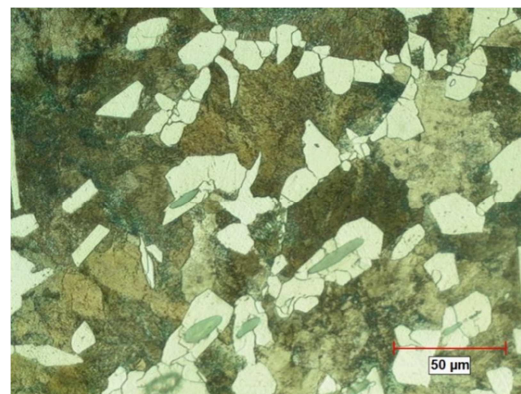
۴- در لبه های نمونه (نواحی سطحی) در ناحیه گلوبی مقدار کمی فریت مشاهده شد که می تواند در اثر کربن سوزی جزئی ناشی از ماشینکاری سطح ژورنال باشد (شکل ۹). با کاهش مقادیر کربن در سطح، استحکام سطح قطعه کاهش می یابد.



شکل ۵- ذرات سولفیدی و نیتربیدی در مقطع موازی پس از پولیش



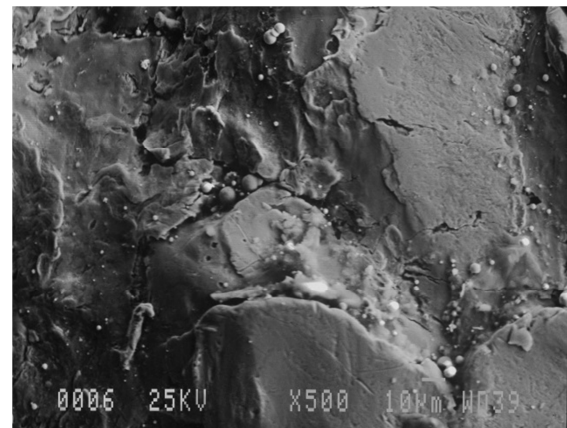
شکل ۶- ذرات سولفیدی و نیتربیدی در مقطع عمود پس از پولیش



- [2] Amardip Jadhav, Vijaykumar Chalwa, Pappu Gaikwad, Fatigue Failure Analysis Of Marine Engine Crankshaft, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 2 Issue 6, PP. 614-621, June – 2013.
- [3] Metkar1 R.M., Sunnapwar2 V.K. and Hiwase S.D., A Fatigue Analysis and Life Estimation of Crankshaft - a Review, International Journal of Mechanical and Materials Engineering (IJMME), Vol.6, No.3, pp.425-430, 2011.
- [4] <http://www.n56ml.com/corvair/flexplate/problem.html>, Corvair crank failure, Dec 2005.
- [5] Jin Ma, Bo Zhang, Daokui Xu, En-Hou Han, Wei Ke, Effects of Inclusion and Loading Direction on the Fatigue Behavior of Hot Rolled Low Carbon Steel, International Journal of Fatigue 32, 1116-1125, 2010.
- [6] Arsim Bytyqi, Nu Puk, Monika Jenko, Matja` Godec, Characterization of the Inclusions in Spring Steel Using Light Microscopy and Scanning Electron Microscopy, Materials and Technology 45, 1, 55-59, 2011.
- [7] Miha Kovačič, Sandra Senčič, Critical Inclusion Size in Spring Steel and Genetic Programming, Materials and Geoenvironment, Vol. 57, No. 1, pp. 17-23, 2010.
- [8] Nisha Cyril, Ali Fatemi and Bob Cryderman, Effects of Sulfur Level and Anisotropy of Sulfide Inclusions on Tensile, Impact, and Fatigue Properties of SAE 4140 Steel, Paper 2008-01-0434, 1-10.
- [9] <https://www.highpowermedia.com/blog/3434/crankshaft-steels>, Crankshaft Steels, Written by Wayne Ward, June 14, 2009.
- [10] Keskin A., Aydin K., Crack Analysis of a Gasoline Engine Crankshaft", Gazi University Journal of Science, 23(4), pp.487-492, 2010.
- [11] Jack Kane, A Discussion of the Technical Aspects and Challenges of Crankshaft Design, Race Engin Technology, 033, August, 2013.
- [12] www.corusengineeringsteels.com
- [13] Dmitri Kopeliovich, "Geometry and Dimensional Tolerances of Engine Bearings, Engine professional, AERA., p.70-76, 2011.
- [14] Ktan A., Haddar N., Fatigue Fracture Expertise of Train Engine Crankshafts ", Engineering Failure Analysis, 18, 1085-1093, 2011.
- [15] DIN EN 10267(08), Standard for ferritic-pearlitic steels for precipitation hardening from hot working temperatures, 2013.
- [16] ASTM E 45, Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel, 2013.
- [17] Long Du J., Examination of the Effect of Tin Particles and Grain Size On The Charpy Impact, Transition Temperature In Steels , 2011.
- [18] Sachs N.W., Understanding The Surface Features of Fatigue Fractures, Journal of Failure Analysis and Prevention, Vol. 5(2), 2005.



شکل ۱۰- ترک‌های شرع شده از سطح و خطوط رویدخانه‌ای



شکل ۱۱- سطح شکست ترد و ترک‌های مرز دانه‌ای

۳- نتیجه گیری

از مشاهدات فوق می توان نتیجه گرفت که شکست در اثر خستگی رخ داده است؛ اما عامل اصلی کاهش مقاومت به خستگی وجود حجم زیاد، اندازه بزرگ و نحوه توزیع ذرات ناخالصی عمدتاً سولفیدی و نیتریدی بوده است. البته کربن سوزی سطحی در ناحیه گلوبی و زبری سطح بالای این ناحیه نیز به کاهش مقاومت به خستگی کمک می کند.

۴- تقدیر و تشکر

در اینجا لازم میدانیم از شرکت اسپید آزمون البرز و شرکت پویش صنعت پژوهان به دلیل تامین مالی این تحقیق و ارائه اطلاعات لازم تشکر و قدردانی نماییم.

۵- مراجع

- [1] Moore D.A., Packer K.F., Jones A.J. and Carlson D.M., Crankshaft Failure and Why It May Happen Again, Practical Failure Analysis, Vol.1(3), PP.63-72, June 2001.