

تحلیل خرابی میل بادامک موتور خودرو سواری شش سیلندر

کریم علی اکبری^{۱*} و جعفر لنگری^۲

۱-دانشیار؛ گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

۲-استادیار؛ گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران.

چکیده

میل بادامک‌ها وظیفه‌ی کنترل زمان بندی سوپاپ‌های ورودی و خروجی در زمان مناسب در موتورهای احتراق داخلی را به عهده دارند. در این مطالعه، تحلیل خرابی روی دو میل بادامک در خودرو شش سیلندر ساخته شده از چدن خاکستری انجام گردید. شکست خرابی یک میل بادامک پس از حدود ۱۷۷ هزار کیلومتر و دیگری پس از حدود ۲۰۸ هزار کیلومتر در بین بادامک ۱ و ۲ اتفاق افتاده بود. برای بررسی علت خرابی میل بادامک‌ها، ابتدا یک سری آزمایشات شامل تعیین ترکیب شیمیایی، ریزساختار، سختی سنجی و فرکتوگرافی انجام شد. مورفولوژی سطح شکست نشان داد که رشد ترک بین دانه‌ایی از ناحیه‌ی تمرکز تنش و همراه با علائم جغجغه‌ایی بوده است. نتایج سختی سنجی مقطع میل بادامک حداکثر ۱۵۵ سختی برینل ترک بین دانه‌ایی از ناحیه‌ی تمرکز تنش و همراه با علائم جغجغه‌ایی بوده است. نتایج سختی سنجی مقطع میل بادامک حداکثر ۱۵۵ سختی برینل اندازه‌گیری شد، در صورتی که مقادیر متوسط سختی سطح مناطق تحت عملیات حرارتی حداقل حدود ۴۸۰ برینل سختی پیشنهاد می‌گردد. نتایج بررسی نشان داد که پدیده‌ی شروع ترک و نهایتاً شکست بادامک می‌تواند بر اثر عواملی از قبیل اعمال بار بیش از حد، سختی پایین و وجود ناخالصی در ناحیه‌ی تمرکز تنش میل بادامک باشد.

کلمات کلیدی

مهندسی خودرو، شکست میل بادامک، ریزساختار، فرکتوگرافی، علت خرابی.

Failure analysis of six-cylinder passenger car engine camshaft

Karim Aliakbari^{1*}, Jafar Langari²

1- Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Bojnord, Bojnord, Iran

Abstract

The camshafts are responsible for controlling the timing of the intake and exhaust valves at the right time in internal combustion engines. In this study, failure analysis was performed on two camshafts in a six-cylinder car made of gray cast iron. One camshaft failure occurred after about 177,000 kilometers and the other after about 208,000 kilometers between cam 1 and 2. In order to investigate the cause of cam failure, first, a series of tests including determination of chemical composition, microstructure, hardness measurement, and fractography were performed. The morphology of the fracture surface showed that the growth of the intergranular crack was from the zone of stress concentration and accompanied by ratchet marks. The hardness measurement results of the camshaft cross-section measured a maximum of 155 HB, while the average surface hardness values of the heat-treated surfaces are suggested to be at least 480 HB. The results of the investigation showed that the phenomenon of crack initiation and eventual failure of the cam can be caused by factors such as excessive load, low hardness, and the presence of impurities in the stress concentration zone of the camshaft.

Keywords

Automotive engineering, Camshaft fracture, Microstructure, Fractography, Failure cause.

۱- مقدمه

نشان داد که عملکرد و استحکام کششی با افزایش محتوای پرلیت افزایش می‌یابد. وی و همکاران [۵] یک چدن خاکستری جدید با پولک‌های گرافیتی جهت‌دار با یک فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید تهیه کردند. پیشنهاد شده بود که پولک‌های گرافیتی با حل شدن کربن، مکانیسم اصلی در فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید است. پولک‌های گرافیتی جهت‌دار، قدرت کششی را بهبود بخشید و همچنین چکش‌خواری قابل توجهی به‌طور همزمان به‌دست آمد. ایکوویلو و کوکو [۶] بررسی کردند که تأثیر عناصر گرافیتی در انتشار ترک خستگی در یک چدن چکش‌خوار فریت وجود دارد، علاوه‌براین هیچ تأثیری بر خصوصیات مکانیکی ندارد. کوالینی و همکاران [۷] تأثیر ریزساختار در مقاومت در برابر انتشار ترک خستگی چدن چکش‌خوار تحت نسبت‌های مختلف تنش را نشان داد.

ناسف و همکاران [۸] تحلیل شکست شفت میل اسبک در ماشین سواری را بررسی کردند. این شفت در بین یکی از چهار سوراخ نگهدارنده‌ی شفت در سرسیلندر شکسته‌شده بود. مسافت کار موتور فقط قبل از شکست ۴۰۶۲۶ کیلومتر بود. نتایج تحقیقات آنان نشان داد که حضور میکروتَرَک‌هایی در نزدیکی سوراخ نگهدارنده موجب خرابی شده است. این ترک‌ها ممکن است در اثر بارگذاری مکرر در طول سرویس و یا خنک‌شدن غیریک‌نواخت شفت در طول عملیات حرارتی باشد. بایرسکن و همکاران [۹] تحقیقاتی را بر روی بررسی شکست میل‌بادامک یک موتور اتومبیل ساخته‌شده از چدن کرومی انجام دادند. میل‌بادامک مورد بررسی بعد از یک دوره‌ی خیلی کوتاه مورد استفاده در خودرو می‌شکند. برای مشخص کردن عوامل شکست میل‌بادامک ریزساختار و ترکیب شیمیایی مواد میل‌بادامک تعیین گردیدند.

اکثر چدن‌ها دارای ترکیب شیمیایی ۲/۵-۴ درصد کربن، ۱-۳ درصد سیلیکون و بقیه آهن هستند. چدن خاکستری استحکام کششی و مقاومت ضربه‌ای کمتری نسبت به فولاد دارد، اما مقاومت فشاری آن با فولاد کم و متوسط کربن قابل‌مقایسه است. چدن‌ها در کاربردهای اجزای خودرو، مانند بلوک سیلندر، فلاپویل، جعبه‌دنده، منی‌فولد، ترمز دیسکی، میل‌لنگ و میل‌بادامک موتورهای احتراق داخلی استفاده می‌شود که ماشین‌کاری، میرایی ارتعاش، ظرفیت حرارتی، هدایت حرارتی و سختی بالا از مزایای آن هستند [۱]. وظیفه‌ی میل‌بادامک‌ها در موتورهای احتراق داخلی بازوبسته‌کردن سوپاپ‌های ورودی و خروجی هستند. اغلب میل‌بادامک‌ها از جنس فولاد و دارای سختی سطحی ایجادشده به روش عملیات حرارتی می‌باشند که به روش‌های آهن‌گری یا ریخته‌گری ساخته می‌شوند. میل‌بادامک‌ها بایستی دارای سختی سطحی بالا و سختی مغزی پایین جهت ضربه‌پذیری خوب باشند. شکست خستگی حاصل از بارهای خمشی و پیچشی بیشترین علل شکست میل‌بادامک‌ها در موتورهای احتراق داخلی می‌باشند [۲].

کوکو و ایکوویلو [۳] تأثیر ریزساختار را بر میکرومکانیسم‌های آسیب‌دیده در مورد ترک‌های خستگی بیش‌بار مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که افزایش سطح خسارت اثر بارزی در چدن‌های چکش‌خوار فریت و فریت پرلیت دارد، درحالی‌که چدن چکش‌خوار پرلیت هیچ انتقال معنی‌داری از پدیده‌ی خستگی به خرابی اضافه‌بار نداشت. گونزاگا [۴] تأثیر محتوای فریت و پرلیت بر خصوصیات مکانیکی سه چدن چکش‌خوار با ریزساختارهای متفاوت را مورد بررسی قرار داد. نتایج

۴- بررسی خواص مکانیکی (تست‌های سختی).

۵- بررسی ریزساختار با استفاده از میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی.

۶- تحلیل عددی میدان تنش.

۷- بررسی علت خرابی شکست.

۲- روش بررسی کار تجربی

ترکیب شیمیایی عناصر تشکیل‌دهنده‌ی میل‌بادامک بر اساس استاندارد ۱۷-ASTM E۴۱۵ & ۱۰۸۶-ASTM E۱۰۸۶-ASTM ۱۴ [۱۱،۱۲] توسط دستگاه اسپکتروفتومتر مدل SPECTROMAXx ساخت آلمان انجام شد. آزمایشات در دمای ۲۴ درجه‌ی سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۲۳٪، سه مرتبه تکرار شد.

ابتدا یک مقطع عرضی از محل شکست میل‌بادامک‌ها به ضخامت ۱۵ میلی‌متر بریده شد و از دو طرف ماشین‌کاری گردید. سپس سطح نمونه‌ها با استفاده از سنباده‌ی شماره‌ی ۶۰ تا شماره‌ی ۱۲۰۰ پرداخت گردید. پولیش‌کاری سطح نمونه‌ها توسط محلول آب و Al_2O_3 انجام پذیرفت و سپس توسط نیتال ۲ درصد اچ گردید. شستشو با الکل و خشک‌کردن با هوای داغ به عنوان مرحله‌ی پایانی پولیش‌کاری استفاده شد. تصاویر ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری از نواحی مختلف سطح مقطع میل‌بادامک انجام گردید. پس از بررسی ریزساختار ماده، آزمون سختی‌سنجی بر اساس معیار برینل، طبق استاندارد ASTM: E۳۸۴-۱۷ [۱۳] انجام شد. آزمون سختی‌سنجی روی نمونه‌های ۱ و ۲ به فواصل ۰/۵ میلی‌متری از یکدیگر با اعمال نیروی ۳۰ کیلوگرمی و در مدت‌زمان ۱۰ ثانیه سه مرتبه تکرار شد.

چندین بررسی فرکتوگرافی برای به‌دست‌آوردن شرایط شکست انجام گردید. تحلیل تنش به روش اجزای محدود برای تعیین نواحی تحت تنش بالا روی میل‌بادامک صورت گرفت. وانگ و همکاران [۱۰] پیش‌گویی خرابی خستگی میل‌بادامک را با روش‌های مدل‌سازی ترک مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که این روش میزان حد خستگی ناشی از تمرکز تنش با استفاده از نظریه‌ی مکانیک شکست تحت شرایط مختلف بارگذاری خمشی و پیچشی می‌تواند پیش‌بینی کند.

در این مطالعه، بررسی شکست روی میل‌بادامک‌های خودرو سواری شش سیلندر ساخته‌شده از چدن خاکستری انجام شد. بیشتر تحقیقات دیگران تمرکز بر تحلیل خرابی در میل‌لنگ‌ها و شفت‌های تحت بارهای پیچشی و خمشی است. با توجه به مطالعه‌ی نویسندگان در زمینه‌ی تحلیل خرابی، تاکنون تحقیقی در مورد خرابی میل‌بادامک‌های ساخته‌شده از چدن خاکستری به روش تجربی و عددی در مجلات معتبر انجام نشده است؛ بنابراین کار حاضر کمک شایانی در زمینه‌ی تحلیل خرابی و طراحی میل‌بادامک‌ها برای شرکت‌های سازنده‌ی خودرو و پژوهشگران در این حوزه می‌نماید. در کار حاضر، علاوه بر تمرکز روی ریزساختار و خواص مکانیکی، توجه خاصی به تحلیل تنش و بررسی علت خرابی شده است که در تحقیقات دیگران کمتر به آن اشاره شده است.

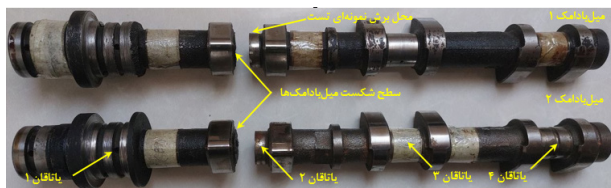
به‌طور خلاصه، ترتیب کارهای انجام‌شده در مطالعه‌ی کار حاضر به شرح زیر می‌باشد:

۱- انتخاب میل‌بادامک‌های شکسته‌شده.

۲- تجزیه و تحلیل ماکروساختار و اندازه‌گیری ابعاد.

۳- تجزیه و تحلیل ترکیب شیمیایی ماده‌ی میل‌بادامک.

یک میل بادامک پس از حدود ۱۷۷۰۰۰ کیلومتر و دیگری پس از حدود ۲۰۸۰۰۰ کیلومتر در ناحیهی فیلت بین بادامک ۱ و ۲ شکسته شده بودند و همچنین مشخصات اندازه‌گیری‌شده‌ی آن در جدول ۲ لیست شده است.



شکل ۱: تصویر محل شکست میل بادامک مورد بررسی

جدول ۲: مشخصات میل بادامک و شرایط کار

جرم میل بادامک	طول میل بادامک	قطر یاتاقان میل بادامک	قطر داخلی محور اصلی	قطر دایره بادامک	عملکرد میل بادامک	عملکرد میل بادامک
۱/۳۵ کیلوگرم	۳۹۵ میلی‌متر	۲۳ میلی‌متر	۱۰ میلی‌متر	۹+۳۵ میلی‌متر	شماره ۲	شماره ۱
					۲۰۸۰۰۰ کیلومتر	۱۷۷۰۰۰ کیلومتر

۳-۱- ترکیب شیمیایی میل بادامک و خواص مکانیکی

نتایج میانگین اعداد برحسب درصد وزنی در جدول ۳ لیست شده است. با توجه به ترکیب شیمیایی ۳، همان‌طور که از نتایج ترکیب شیمیایی انتظار می‌رفت، چدن از نوع خاکستری فریتی - پرلیتی می‌باشد.

جدول ۳: ترکیب شیمیایی ماده‌ی مورد بررسی و ماده‌ی استاندارد چدن G150 [۱]

Cu	Mo	Ni	Cr	S	P	Mn	Si	C	Fe	
۰/۰۲۸	۰/۲۳۶	۰/۰۸۹	۰/۴۳۴	۰/۰۴۱	۰/۰۳۱	۰/۶	۲/۶۴	۳/۳۲	۹۲/۵	تحقیق حاضر
-	-	-	-	≤۰/۱۵	≤۰/۰۹	۰/۵-۰/۷	-۲/۸ ۲/۵	-۳/۴ ۳/۱	پایه	چدن G150

برای بررسی سطح شکسته‌شده‌ی میل بادامک‌ها، ابتدا نمونه‌های شکسته‌شده به مدت یک ساعت در حمام آلتراسونیک قرار گرفت و سپس توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل LEO VP ۱۴۵۰ ساخت آلمان تصویربرداری شد. برای بررسی فراکتوگرافی از مقطع میل بادامک‌ها پس از شکست، تصاویر SEM تهیه گردید. ابتدا نمونه از میل بادامک‌های شکسته‌شده توسط ماشین وایرکات EDM برش زده شد و نمونه به مدت یک ساعت در حمام آلتراسونیک قرار داده شد و سپس توسط دستگاه SEM مدل LEO VP ۱۴۵۰ ساخت آلمان تصاویر با بزرگ‌نمایی‌های مختلف تهیه شد.

۳-۲ نتایج و بحث

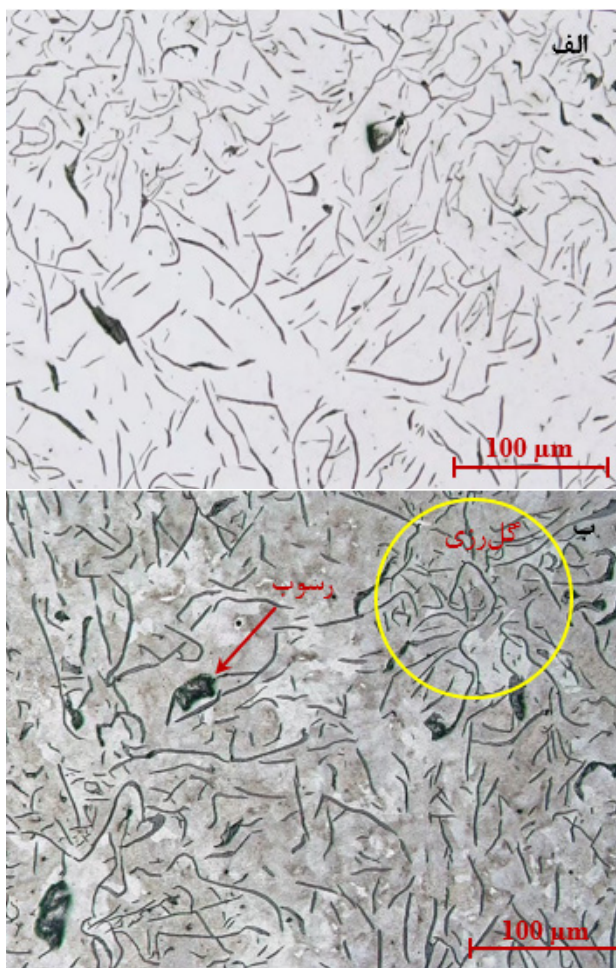
مورد مطالعه در این تحقیق، بررسی شکست روی میل بادامک‌های خودرو سواری شش سیلندر است که مشخصات موتور آن در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات خودرو

نوع موتور	ماکزیمم توان	ماکزیمم گشتاور	حجم جابه‌جایی
۶ سیلندر ۲۴ سوپاپه	۲۲۷ اسب بخار در دور ۶۴۰۰ دور بر دقیقه	۲۸۸ نیوتن متر در دور ۳۶۰۰ دور بر دقیقه	۳۰۰۰ سی سی

شکل ۱ محل شکست میل بادامک‌ها را نشان می‌دهد.

با توجه به تصاویر ۲، همان طور که از نتایج میکروگرافی انتظار می‌رفت، ریزساختار قطعه از نوع چدن خاکستری بین دو نوع A و B می‌باشد که پولک‌های گرافیت به‌طور یک‌نواخت پخش شده است و توزیع گل‌رزی هم در فواصل به‌صورت خفیف در زمینه ظاهر گردیده است. رسوبات در سطح قطعه به‌وفور در زمینه چدن مشاهده می‌شود که با توجه به هم‌پیوستگی جزئی پولک‌ها، در صورت اعمال بار، باعث شروع ترک اولیه و بر اثر بار سیکلی مطابق مراجع [۱۵-۱۷] انتشار می‌یابد.



شکل ۲: ریزساختار سطح مقطع عرضی میل بادامک؛ (الف) قبل از اچ، و (ب) بعد از اچ

شکل ۳ سختی‌سنجی در راستای شعاعی از شعاع داخلی به سمت شعاع خارجی در دو میل بادامک شکسته شده را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده،

با مقایسه‌ی نتایج ترکیب شیمیایی با ماده‌ی استاندارد، می‌توان مشاهده نمود که ترکیب شیمیایی در محدوده‌ی چدن G150 با ساختار فریتی - پرلیتی می‌باشد که از نظر خواص مکانیکی در محدوده‌ی پایین‌ترین چدن‌ها قرار می‌گیرد. خواص مکانیکی شامل استحکام کششی، استحکام فشاری، مدول الاستیسیته، نسبت پواسون و سختی چدن حاضر به ترتیب برابر ۱۵۰ مگاپاسکال، ۶۰۰ مگاپاسکال، ۱۰۰ گیگاپاسکال، ۰/۲۴ و مقادیر سختی بین ۱۶۷ - ۱۳۶ برینل سختی است [۱].

۲-۳- میکروگراف نوری و سختی‌سنجی

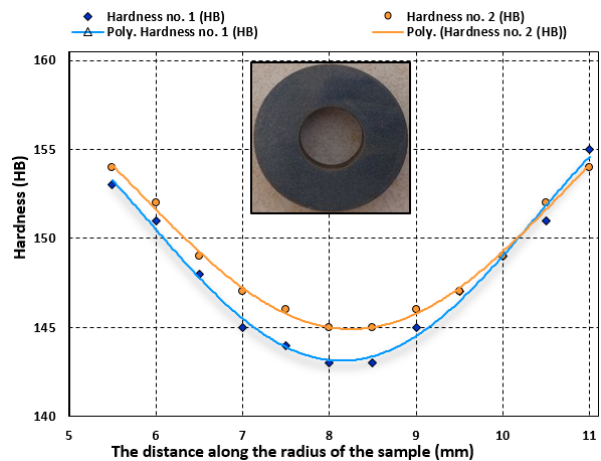
شکل ۲ ریزساختار نمونه از نوع فریتی با پرلیتی جزئی را قبل از اچ و بعد از اچ نشان می‌دهد. مطابق با استاندارد ASTM-A247 [۱۴]، نحوه‌ی توزیع ورقه‌های گرافیت در ساختمان میکروسکوپی چدن‌های خاکستری به پنج دسته تقسیم می‌شود که از A تا E نام‌گذاری شده‌اند. در نوع A، لایه‌های گرافیت به‌طور یکنواخت در زمینه پخش می‌شوند، منتها دارای جهات خاصی نمی‌باشند. در نوع B، توزیع گرافیت‌های لایه‌ای اصولاً به توزیع گل‌رزی (Rosette) موسوم است و معمولاً در چدن‌ها، با ترکیب شیمیایی نزدیک به یوتکتیک که انجماد آن‌ها با تعداد معدودی جوانه انجام گیرد، دیده می‌شود. در مرکز هر مجموعه‌ی گرافیت، لایه‌ها نازک و ظریف می‌باشند. علت این امر تحت انجماد موقتی است که در شروع انجماد به‌وجود می‌آید. سپس با آزاد شدن گرمای نهان انجماد، درجه‌ی حرارت مذاب افزایش یافته و تحت انجماد موقتی از بین می‌رود؛ بنابراین ادامه‌ی انجماد در درجه‌ی حرارت معمولی انجام گرفته و در نتیجه لایه‌های گرافیت خارجی در هر مجموعه ضخیم‌تر و درشت‌تر خواهند شد. از نظر ابعاد، این نوع توزیع گرافیت در مقاطع نازک (در حدود ۱۰ میلی‌متر) و بر روی سطوح مقاطع متوسط دیده می‌شود و گاهی نیز ناشی از عملکرد ضعیف جوانه‌زها می‌باشد.

برشی، خمشی، خستگی یا پیچشی؛ طبیعت سیستم تنش؛ مقدار و منشأ؛ وجود تمرکز تنش؛ فاکتورهای محیطی و فاکتورهای ماده است. شکست‌های نوع چکش‌خوار که خستگی سیکل بالا را طی می‌کنند، از سه ناحیه شامل ناحیه‌ی شروع ترک، ناحیه‌ی رشد ترک خستگی همراه با علائم ساحلی و خطوط شعاعی و ناحیه‌ی شکست سریع نهایی تشکیل می‌گردد [۱۸-۲۳]. شکل ۴ تصاویر میکروسکوپی سطح شکست میل‌بادامک‌های شماره‌های ۱ و ۲ را نشان می‌دهند. مورفولوژی سطوح شکست در هر دو نمونه نشان می‌دهند که بارگذاری از نوع تنش سیکل پایین می‌باشد و از دو ناحیه شامل ناحیه‌ی شروع ترک A و ناحیه‌ی شکست سریع نهایی B همراه با علائم جغجغه‌ای کوچک تشکیل شده است.



شکل ۴: تصاویر میکروسکوپی سطح شکست؛ (الف) نمونه‌ی ۱، و (ب) نمونه‌ی ۲.

مقدار ماکزیمم سختی ماده‌ی میل‌بادامک شماره‌ی یک و دو به ترتیب برابر ۱۵۵ و ۱۵۴ سختی برینل می‌باشد که در محدوده‌ی سختی ماده‌ی استاندارد G۱۵۰ [۱]، برای حالت بدون عملیات حرارتی می‌باشد. برای میل‌بادامک‌های مطابق مراجع [۲،۹]، متوسط سختی سطح مقطع برابر ۲۴۰ برینل سختی (۲۳ HRC) گزارش گردید و در صورتی که مقادیر متوسط سختی لایه‌ی سطحی تحت عملیات حرارتی بین ۴۸۵ تا ۵۷۰ برینل سختی (۵۶-۵۰ HRC) ثبت گردیده است. پس می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مقدار سختی‌های اندازه‌گیری‌شده‌ی میل‌بادامک‌های کار حاضر از مقدار سختی استاندارد به کاررفته در میل‌بادامک‌ها پایین‌تر است.

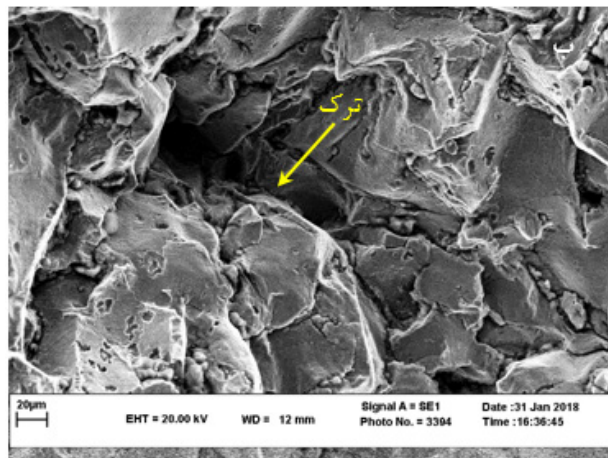
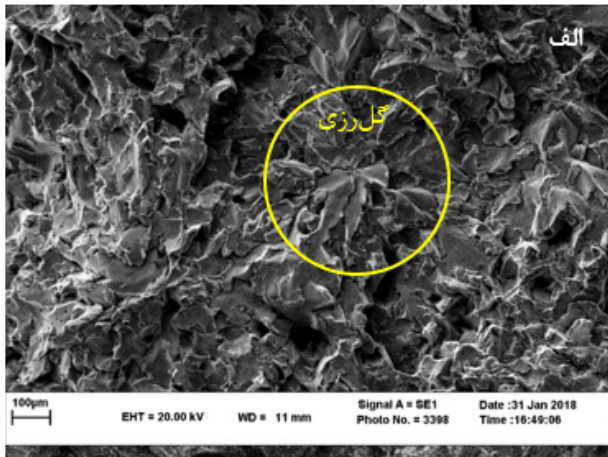


شکل ۳: سختی‌سنجی در راستای شعاعی از شعاع داخلی به سمت شعاع خارجی در دو میل‌بادامک شکسته‌شده

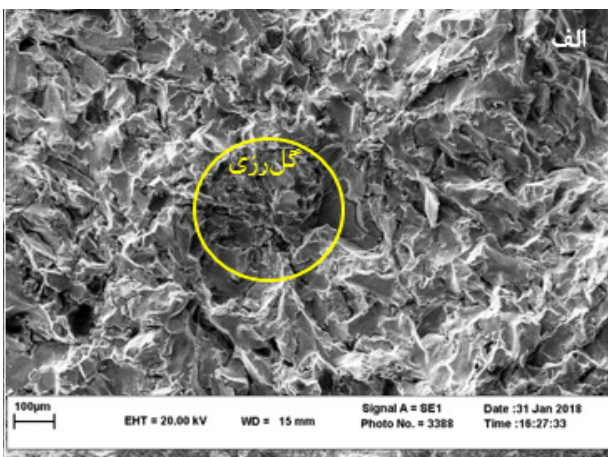
۳-۳- بررسی سطح شکست

هدف اولیه‌ی علم شکست‌شناسی پیدا کردن منشأ ترک است و برای آنالیز صحیح خرابی، امری ضروری است و علائم شکست شکل‌گرفته برای بررسی علت خرابی استفاده می‌گردد. شروع و گسترش شکست علائم مشخصی را بر روی سطوح شکست از خود بجا می‌گذارد که جهت گسترش ترک را نشان می‌دهند و از این علامت جهت منشأ ترک مورد بررسی قرار می‌گیرند. ظهور این علائم روی سطوح ترک تابعی از نوع بارگذاری کششی،

توزیع می‌شود و اثر کلیواژ بر روی ماتریس را افزایش می‌دهد؛ بنابراین استحکام نهایی چدن خاکستری کم است.



شکل ۵: تصویر SEM از رشد ترک بین‌دانه‌ای در نمونه‌ی شماره ۱ با بزرگنمایی: (الف) X۲۵۰، و (ب) X۱۰۰۰.



برای بررسی دقیق‌تر منشأ ترک، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، از سطوح شکست تصاویر با بزرگ‌نمایی‌های مختلف تهیه شدند که در شکل‌های ۵ و ۶ نمایش داده شده‌اند. از شکل مشاهده می‌شود که سطح شکست چدن خاکستری ویژگی‌های شکست کلیواژ ساختار گرافیت پولکی نوع A و B و به‌علاوه ماتریسی را نشان می‌دهد که حفره‌های زیادی روی سطح شکست وجود دارد. مطابق پژوهش مراجع [۲۴، ۲۵]، اعتقاد بر این است که به‌نظر می‌رسد این حفره‌ها ریزتخلخل هستند که در طول انجماد چدن خاکستری ایجاد شده‌اند و محققان معتقدند که شکست چدن خاکستری ناشی از کلیواژ گرافیت یا جدایی سطحی بین گرافیت و ماتریس است. علاوه‌براین از شکل مشاهده می‌شود که گرافیت گل‌شکل بیشتری در سطح شکست چدن خاکستری وجود دارد. مطابق پژوهش مراجع [۲۶-۲۸]، باور بر این است که در یک خوشه‌ی یونکتیک، مورفولوژی سه‌بعدی گرافیت پولکی به شکل گل رز است و محصولات تبدیل آستنیت یونکتیک (پرلیت یا پرلیت + فریت) بین گل‌ها توزیع می‌شود. از آنجایی که استحکام گرافیت تقریباً صفر است، هنگامی که آلیاژ تحت تنش است، موقعیت گرافیت معادل منبع ترک است و ترک قبل از ماتریس اتفاق می‌افتد. پس از ترک‌های گرافیت، ترک‌ها به سمت ساختار ماتریس منتشر می‌شوند، تا زمانی که گرافیت در قسمت جلو ترک همچنان به انتشار ترک ادامه می‌دهد که در نهایت منجر به شکست چدن خاکستری می‌شود. هنگامی که ترک در ماتریس منتشر می‌شود، ماتریس مانع انتشار آن می‌شود، به‌طوری که چدن خاکستری تنها دارای استحکام نهایی خاصی است. با این حال، در چدن خاکستری، گرافیت پولکی در ماتریس چدن خاکستری

که m و α به ترتیب جرم و شتاب مکانیزم سوپاپ می‌باشند. نیروی وزن F_g از معادله‌ی (۳) می‌تواند به صورت زیر محاسبه شود:

$$F_g = mg \quad (۳)$$

نهایتاً نیروی نرمال اعمال شده به میل بادامک F_N ، از معادله‌ی (۴) محاسبه می‌گردد.

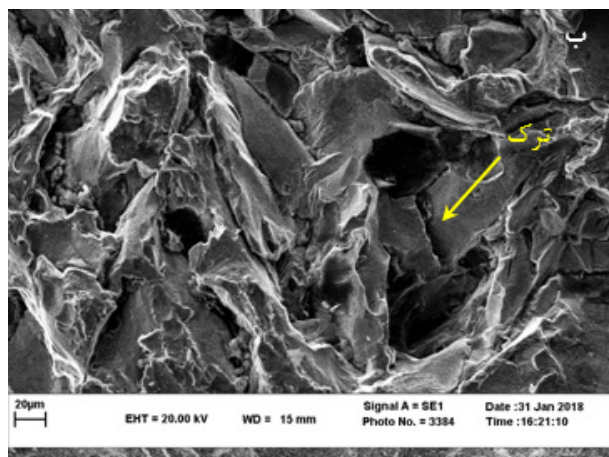
$$F_N = \frac{P}{\cos\alpha} \quad (۴)$$

$$P = F_s + F_1 + F_g + F_f \quad (۵)$$

که α زاویه‌ی فشار می‌باشد. در تحلیل ساده، نیروی وزن و نیروی اصطکاک در مقایسه با نیروهای اینرسی و فنر ناچیز فرض می‌شود و معادله‌ی (۴) به صورت معادله‌ی (۶) ساده‌سازی می‌شود.

$$F_N = \frac{F_I + F_S}{\cos\alpha} \quad (۶)$$

در مطالعه‌ی حاضر مش‌بندی، انتخاب نوع المان، شرایط مرزی، روش بارگذاری و تحلیل تنش بر اساس مراجع [۲۹،۳۰] انجام شد. ابتدا با نرم‌افزار SOLIDWORKS مدل سه‌بعدی تهیه شد و سپس توسط نرم‌افزار Abaqus تحلیل گردید. شکل ۷ نحوه‌ی اعمال بارگذاری، شرایط مرزی و مش‌بندی را در میل بادامک نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۷ الف نشان داده شده است، به دلیل اینکه برای هر سیلندر دو سوپاپ ورودی و دو سوپاپ خروجی به‌طور همزمان باز و بسته می‌گردد؛ بنابراین نیروی اعمالی برابر به بادامک‌ها اعمال گردیده است و شرایط مرزی به عنوان جابه‌جایی در محل قرارگیری یاتاقان‌های میل بادامک اعمال شده است. مقدار



شکل ۶: تصویر SEM از رشد ترک بین‌دانه‌ای در نمونه‌ی شماره ۲ با بزرگ‌نمایی؛ (الف) $\times 250$ ، و (ب) $\times 1000$.

۳-۴- تحلیل تنش

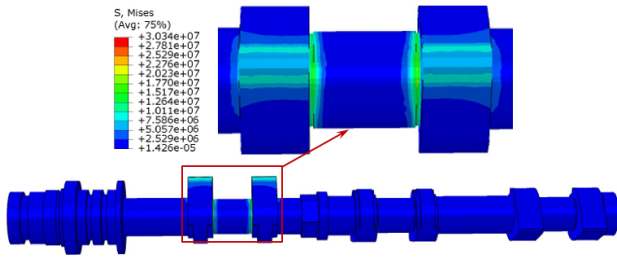
برای تعیین نقاط تمرکز تنش در ناحیه‌ی شکست با روش المان محدود (FEM)، تجزیه و تحلیل تنش میل بادامک انجام شد. برای تحلیل صحیح تنش، ابتدا نیاز به شناخت کافی از نیروهای عمل‌کننده روی میل بادامک است. نیروهای اعمالی به میل بادامک شامل نیروی اصطکاک F_f ، نیروی فنر F_s ، نیروی اینرسی F_I و نیروی وزن F_g می‌باشند. نیروی اصطکاک F_f حاصل ضرب نیروی نرمال N و ضریب اصطکاک برشی f است که بین بادامک و پیرو عمل می‌کند. نیروی اصطکاک F_f به دلیل ناچیز بودن نادیده گرفته شده است. نیروی فنر F_s اعمال شده به میل بادامک مطابق قانون هوک به صورت معادله‌ی (۱) دنبال می‌شود [۲۹].

$$F_s = k \Delta y \quad (۱)$$

که k و Δy به ترتیب سفتی و فشردگی در هنگام بلندشدن فنر می‌باشند. نیروی اینرسی F_I از معادله‌ی (۲) می‌تواند به صورت زیر محاسبه گردد:

$$F_I = ma \quad (۲)$$

شکل ۸ میدان توزیع تنش فون میزس حاصل از حداکثر نیروی اعمال شده در میل بادامک را نشان می‌دهد. توزیع تنش فون میزس در نقطه‌ی تمرکز تنش محل شکست میل بادامک برابر مقدار ۳۰/۳۴ مگاپاسکال است که حدود ۲۳ درصد تنش تسلیم ماده میل بادامک است.



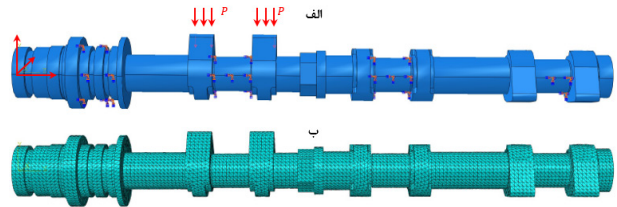
شکل ۸: توزیع تنش فون میزس در میل بادامک.

جدول ۵ نسبت تنش فون میزس مواد مورد استفاده در میل بادامک کار حاضر با میل بادامک شکسته شده‌ی تحقیقات دیگران [۹] را مقایسه می‌کند که تقریباً مشابه کار فعلی می‌باشد. همان‌طور که نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد، نسبت درصد تنش فون میزس به تنش تسلیم در میل بادامک کار حاضر نسبت به میل بادامک از نوع چدن کروی بیشتر است و این نشان می‌دهد که در معرض تنش بیشتری قرار دارد.

جدول ۵: مقایسه‌ی تحلیل تنش میل بادامک کار حاضر و تحقیقات دیگران

ایتم	تنش تسلیم (MPa)	تنش ون میزس (MPa)	نسبت تنش ون میزس به تسلیم (%)
میل بادامک کار حاضر	۱۳۰	۳۰	۲۳
میل بادامک چدن کروی [۹]	۴۵۰	۶۲	۱۴

نیروی اعمال شده از حاصل جمع نیروی فنر (حداکثر جابه‌جایی و سختی فنر) و نیروی اینرسی (جرم و شتاب مکانیزم سوپاپ) به مقدار ۵۷۷ نیوتن می‌باشد. با توجه به پیچیدگی هندسی میل بادامک از قبیل فیلت، قوس سر بادامک و شیارها، از مش‌بندی چهاروجهی ۱۰ گره‌ای استفاده گردیده است.



شکل ۷: مدل‌سازی میل بادامک؛ (الف) اعمال بارگذاری و شرایط مرزی، و (ب) مش‌بندی.

جدول ۴ حل مسئله را از نظر تعداد اجزا و حداکثر تنش فون میزس برای میل بادامک نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، مناسب‌ترین تعداد اجزا ۷۱۴۹۸ جزء برای میل بادامک است که حداکثر تنش فون میزس ایجاد شده در چرخ‌ها برابر با ۳۰/۳۴ مگاپاسکال است.

جدول ۴: نتایج مدل‌سازی اجزای محدود برای تعداد المان مختلف در میل بادامک.

مرحله‌ی	تعداد المان مختلف در میل بادامک	ماکزیمم تنش فون میزس (MPa)
۱	۵۳۳۸۲	۳۳/۳۲
۲	۵۷۹۹۳	۳۱/۴۵
۳	۵۸۶۷۹	۳۰/۶۸
۴	۶۵۷۶۱	۳۰/۱۹
۵	۷۱۴۹۸	۳۰/۳۴
۶	۷۷۹۶۲	۳۰/۴۷

۴- بررسی علت خرابی میل بادامک

با توجه به تحلیل‌های فوق، روش تحلیل خرابی میل بادامک به شرح زیر است:

تصاویر شکل ۱ نشان می‌دهند که میل بادامک‌ها با کارکردهای ۱۷۷ و ۲۰۸ هزار کیلومتر در حین کار دچار شکست شده‌اند. ابتدا مجموعه‌ای از آزمایشات شامل ترکیب شیمیایی، خواص مکانیکی، ریزساختار، سختی و فراکتوگرافی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای میل بادامک انجام شد و در نهایت تحلیل تنش برای میل بادامک به صورت عددی انجام شد.

نتایج موارد فوق نشان داد که ماده‌ی مورد استفاده در میل بادامک چدن خاکستری با گرید G۱۵۰ می‌باشد. تجزیه و تحلیل تنش نشان داد که بیشترین میزان تنش در میل بادامک حدود ۳۰ مگاپاسکال در ناحیه‌ی فیلت بود که حدود ۲۳ درصد تنش تسلیم مواد میل بادامک بود که نسبت به میل بادامک مشابه بیشتر است.

می‌توان نتیجه گرفت که ماده‌ی انتخاب شده برای میل بادامک‌های کار حاضر مطابق ماده‌ی استاندارد است. از سوی دیگر، نتایج نشان داد که سخت شدن میل بادامک با حدود ۱۵۵ سختی برینل به درستی تحت عملیات حرارتی عمیق قرار نگرفته یا از سختی القایی استفاده نشده است. برای میل بادامک‌های مطابق مراجع [۲,۹]، متوسط سختی سطح مقطع برابر ۲۴۰ برینل سختی (۲۳ راکول سی سختی) گزارش گردید و در صورتی که مقادیر متوسط سختی لایه‌ی سطحی تحت عملیات حرارتی بین ۴۸۵ تا ۵۷۰ برینل سختی (۵۰ تا ۵۶ راکول سی سختی) ثبت گردیده است. علاوه بر این، وجود ناخالصی در ساختار ماده باعث رشد ترک می‌گردد که به نوبه‌ی خود استحکام

خستگی را کاهش می‌دهد. همچنین همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، به دلیل سختی کم، روغن ناکافی و اضافه بار روی موتور، یک سِری خط‌وخش روی میل بادامک دیده می‌شود.

با توجه به موارد فوق می‌توان نتیجه گرفت که سختی کم، روغن ناکافی و اضافه بار روی موتور باعث شروع ترک و وجود ناخالصی در ماده باعث انتشار ترک‌های خستگی در میل بادامک‌ها شده است.

برای اطمینان از عمر خستگی بالا و جلوگیری از خرابی زودرس، استفاده از میل بادامک چدن‌های خاکستری با گرید بالاتر و کروی به دلیل استحکام بالا و همچنین افزایش سختی سطح میل بادامک توصیه می‌شود؛ بنابراین یکی دیگر از روش‌های جلوگیری از خرابی زودرس کنترل دقیق فشار روغن و کاهش اضافه بار روی موتور است که می‌تواند طول عمر خستگی را در میل بادامک افزایش داده و از خرابی میل بادامک‌ها جلوگیری کند.

۵- نتیجه‌گیری

مطالعه با در نظر گرفتن خرابی میل بادامک‌ها با کارکرد ۱۷۷ و ۲۰۸ هزار کیلومتر در حین کار خودرو سواری بنزینی شش سیلندر انجام شد و نتایج زیر به دست آمد.

۱- نتایج ترکیب شیمیایی تأیید می‌کند که ماده‌ی مورد استفاده در میل بادامک مطابق استاندارد از گرید G۱۵۰ است. از سوی دیگر، نتایج نشان داد که سخت شدن میل بادامک به درستی تحت عملیات حرارتی عمیق قرار نگرفته یا از سختی القایی استفاده نشده است.

۲- بررسی با میکروسکوپ نوری نشان داد که ریزساختار چدن خاکستری نوع A از نوع فریتی - پرلیتی است.

۶- منابع

- [1] Elliott R. Cast iron technology. London: Butterworths; 1988.
- [2] Yamagata H. 5 - The camshaft. In: Yamagata HBT-TS and T of M in AE, editor., Woodhead Publishing; 2005, p. 110-31. <https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9781845690854.110>.
- [3] Di Cocco V, Iacoviello F. Ductile cast irons: Microstructure influence on the damaging micromechanisms in overloaded fatigue cracks. *Eng Fail Anal* 2017;82:340-9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.06.039>.
- [4] Gonzaga RA. Influence of ferrite and pearlite content on mechanical properties of ductile cast irons. *Mater Sci Eng A* 2013;567:1-8. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.12.089>.
- [5] Wang W, Jing T, Gao Y, Qiao G, Zhao X. Properties of a gray cast iron with oriented graphite flakes. *J Mater Process Technol* 2007;182:593-7. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.09.028>.
- [6] Iacoviello F, Cocco V Di. Influence of the graphite elements morphology on the fatigue crack propagation mechanisms in a ferritic ductile cast iron. *Eng Fract Mech* 2016;167:248-58. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2016.03.041>.
- [7] Cavallini M, Di Bartolomeo O, Iacoviello F. Fatigue crack propagation damaging micromechanisms in ductile cast irons. *Eng Fract Mech* 2008;75:694-704. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2007.02.002>.
- [8] Nassef GA, Elkhatib A, Yakout M. Analysis of a failed rocker arm shaft of a passenger car engine. *Case Stud Eng Fail Anal* 2016;5:10-4.
- [9] Bayrakceken H, Uzun I, Tasgetiren S. Fracture analysis of a camshaft made from nodular cast iron.
- وجود ناخالصی‌ها در ماتریس باعث ناپیوستگی ماتریس می‌شود و منجر به کاهش برخی از خواص مکانیکی چدن خاکستری می‌گردد و این به نوبه‌ی خود باعث کاهش استحکام خستگی می‌شود.
- ۳- مورفولوژی سطوح شکست در هر دو نمونه نشان داد که بارگذاری از نوع تنش سیکل پایین می‌باشد و از دو ناحیه شامل ناحیه‌ی شروع ترک و ناحیه‌ی شکست سریع نهایی همراه با علائم جغجغه‌ای کوچک تشکیل شده است.
- ۴- تجزیه و تحلیل تنش عددی نشان داد که بیشترین تنش با حدود ۲۳ درصد تنش تسلیم در ناحیه‌ی فیلت میل‌بادامک است که در آن شکست رخ داده است.
- ۵- تجزیه و تحلیل فراکتوگرافی نشان داد سطح شکست چدن خاکستری ویژگی‌های شکست کلیواژ ساختار گرافیت پولکی نوع A و B و به‌علاوه ماتریسی را دارد. همچنین نتایج مشاهدات نشان داد که گرافیت گل‌رزی شکل بیشتری در سطح شکست چدن خاکستری وجود دارد.
- ۶- با توجه به اینکه ماده‌ی انتخاب‌شده برای میل‌بادامک چدنی کار حاضر مطابق استاندارد انتخاب شده است، اما برای اطمینان از عمر خستگی بالا و جلوگیری از خرابی زودرس، استفاده از میل‌بادامک چدن خاکستری گرید بالا و چدن کرومی به‌دلیل استحکام بالا و همچنین افزایش سختی سطح میل‌بادامک اصلی توصیه می‌شود.
- ۷- به‌دلیل روغن ناکافی و اضافه‌بار روی موتور، یک‌سری خط‌وخش روی میل‌بادامک دیده می‌شود؛ بنابراین یکی دیگر از روش‌های جلوگیری از خرابی زودرس کنترل دقیق فشار روغن و کاهش بار روی موتور است که می‌تواند طول عمر خستگی را در میل‌بادامک افزایش داده و از خرابی میل‌بادامک جلوگیری کند.

- of fatigue crack growth in cylinder head bolts of gasoline engine based on experimental data. *J Brazilian Soc Mech Sci Eng* 2020;42. <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02326-1>.
- [20] Infante V, Silva JM, Silvestre MAR, Baptista R. Failure of a crankshaft of an aeroengine: A contribution for an accident investigation. *Eng Fail Anal* 2013;35:286–93.
- [21] Aliakbari K. Failure Analysis of Ductile Iron Crankshaft in Four-Cylinder Diesel Engine. *Int J Met* 2021. <https://doi.org/10.1007/s40962-020-00550-y>.
- [22] Fonte M, Li B, Reis L, Freitas M. Crankshaft failure analysis of a motor vehicle. *Eng Fail Anal* 2013;35:147–52. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.01.016>.
- [23] Aliakbari K. Experimental and numerical analysis of fatigue crack growth in carbonized bolts of gasoline engine cylinder head. *J Mech Eng* 2022;51:423–32. (in Persian)
- [24] Farrahi GH, Hassani Gangaraj SM, Abolhassani S, Hemmati F, Sakhaei M. Failure analysis of a four cylinder diesel engine crankshaft made from nodular cast iron. *J Engine Res* 2011;22:21–8.
- [25] Abreu M, Sundberg J, Elfsberg J, Jonsson S. Morphology and mechanisms of cavitation damage on lamellar gray iron surfaces. *Wear* 2020;456:203324.
- [26] Ferro P, Borsato T, Bonollo F, Padovan S. A rapid approach to estimate the mechanical properties of grey cast iron castings. *Acta Metall Slovaca* 2018;24:213–22.
- [27] Zhao X, Wang J, Jing T. Gray cast iron with directional graphite flakes produced by cylinder covered compression process. *J Iron Steel Res Int* 2007;14:52–5.
- Eng Fail Anal* 2006;13:1240–5.
- [10] Wang G, Taylor D, Bouquin B, Devlukia J, Ciepalowicz A. Prediction of fatigue failure in a camshaft using the crack modelling method. *Eng Fail Anal* 2000;7:189–97.
- [11] ASTM E415 - 17. Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry. Philadelphia: ASTM International; 2017. <https://doi.org/10.1520/E0415-17>.
- [12] ASTM E1086 - 14. Standard Test Method for Analysis of Austenitic Stainless Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2014. <https://doi.org/10.1520/E1086-14>.
- [13] ASTM E384 - 17. Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2017. <https://doi.org/10.1520/E0384-17>.
- [14] ASTM A247 -19. Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings1. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International; 2019.
- [15] Goodrich GM. Cast iron microstructure anomalies and their causes. *AFS Trans* 1997;105:669–83.
- [16] Leach PW, Borland DW. The unlubricated wear of flake graphite cast iron. *Wear* 1983;85:257–66.
- [17] Avcı A, İlkaya N, Şimşir M, Akdemir A. Mechanical and microstructural properties of low-carbon steel-plate-reinforced gray cast iron. *J Mater Process Technol* 2009;209:1410–6.
- [18] American Society for Metals. *ASM Handbook*. Volume 12, Fractography. American Society for Metals., Metals Park, Ohio, 1987; 1987.
- [19] Aliakbari K, Akbarpour Mamaghani T. Analysis

- Failure Analysis of Ductile Iron Differential Housing Spline in 4WD Passenger Car. *Int J Met* 2021;15:587–601. <https://doi.org/10.1007/s40962-020-00487-2>.
- [28] Fan L, Hu HB, Tang XS, He JJ, Chen W. Influence of Microscopic Effects on the Static Tensile Strength of Gray Cast Iron HT200 Specimens. *Adv Mater Sci Eng* 2021;2021.
- [29] Hejma P, Svoboda M, Kampo J, Soukup J. Analytic analysis of a cam mechanism. *Procedia Eng* 2017;177:3–10.
- [30] Torshizian MR, Aliakbari K, Ghonchehi M.