

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Rozbor provozního lomu bloku motoru

Filip Trojan

Bakalářská práce

2014

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Filip Trojan**
Osobní číslo: **D10378**
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**
Studijní obor: **Dopravní prostředky: Silniční vozidla**
Název tématu: **Rozbor provozního lomu bloku motoru**
Zadávací katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Představení problému.
2. Rozbor vnitřního uspořádání motoru z hlediska charakteru namáhání a použitých materiálů.
3. Teoretický rozbor možných mechanismů poškození.
4. Metodiky hodnocení poškození materiálu a identifikace lomových mechanismů.
5. Materiálové analýzy vybraných částí.
6. Souhrnné posouzení vlastních výsledků ve vztahu k charakteru poškození.

Rozsah grafických prací: **podle pokynů vedoucího diplomové práce**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran textu a přílohy**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

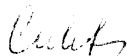
Seznam odborné literatury:

1. Pluhař J., Puškár A., Koutský J., Macek K., Beneš V.: Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu, SNTL/Alfa, 1987
2. Puškár A., Hazlinger M.: Porušovanie a lomy súčastí, Žilinská univerzita, 2000
3. PTÁČEK Luděk. Nauka o materiálu I. Brno: CERM, 2001. 505 s. ISBN 80-7204-193-2.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Eva Schmidová, Ph.D.**
Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů

Datum zadání bakalářské práce: **15. února 2013**

Termín odevzdání bakalářské práce: **23. května 2013**



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.
děkan

L.S.



doc. Ing. Miroslav Tesař, CSc.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. února 2013

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne

Filip Trojan

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat paní prof. Ing. Evě Schmidové, Ph.D. za cenné rady, připomínky, ochotu a hlavně za to, že se ujala vedení mé bakalářské práce. Dále chci poděkovat mé rodině za veškerou podporu při studiu.

ANOTACE

Tato práce je zaměřena na analýzu provozního lomu bloku motoru z materiálového hlediska. Zpočátku práce pojednává o teoretickém základu z oblasti uspořádání motoru, mechanismů poškození a identifikaci těchto mechanismů. Stěžejní částí práce jsou analýzy poškozených součástí a jejich posouzení ve vztahu k charakteru poškození.

KLÍČOVÁ SLOVA

provozní lom, motor, metalografická analýza, fraktografická analýza

TITLE

Analysis of operating break of engine block

ANOTATION

This work is focused on analysis of operating break of engine block from material aspect. At first, the work deals with teoretical basis in the field of engine arrangement, damage mechanisms and identification of these mechanisms. The main section of this work is an analysis of the damaged parts and their assessment in relation to the nature of the damage.

KEYWORDS

operating break, engine, metallographic analysis, fractographic analysis

OBSAH

1. Představení problému	8
2. Rozbor vnitřního uspořádání motoru z hlediska charakteru namáhání a použitých materiálů	10
2.1. Píst.....	10
2.2. Pístní čep	11
2.3. Ojnice	11
2.4. Kluzná ložiska.....	13
2.5. Klikový hřídel	13
3. Teoretický rozbor možných mechanismů poškození	15
3.1. Lom z přetížení	15
3.2. Únava a únavový lom.....	16
3.2.1. Inkubace únavového procesu.....	16
3.2.2. Nukleace submikroskopických trhlin a jejich šíření.....	16
3.2.3. Šíření únavové trhliny.....	17
3.2.4. Úsek konečného lomu.....	17
4. Metodiky hodnocení poškození materiálů a identifikace lomových mechanismů.....	18
4.1. Metalografie	18
4.1.1. Odběr vzorku	18
4.1.2. Preparace vzorku.....	19
4.1.3. Broušení vzorků.....	19
4.1.4. Leštění vzorku.....	19
4.2. Fraktografie	20
4.2.1. Makroskopické hodnocení	20
4.2.2. Mikroskopické hodnocení.....	20
5. Materiálové analýzy vybraných částí	22
5.1. Aplikace metalografie na poškozené součásti.....	22
5.2. Aplikace fraktografie poškozené součásti.....	27
6. Souhrnné posouzení vlastních výsledků ve vztahu k charakteru poškození	30
7. Závěr	33
Použité zdroje	34
Seznam obrázků.....	35

1. Představení problému

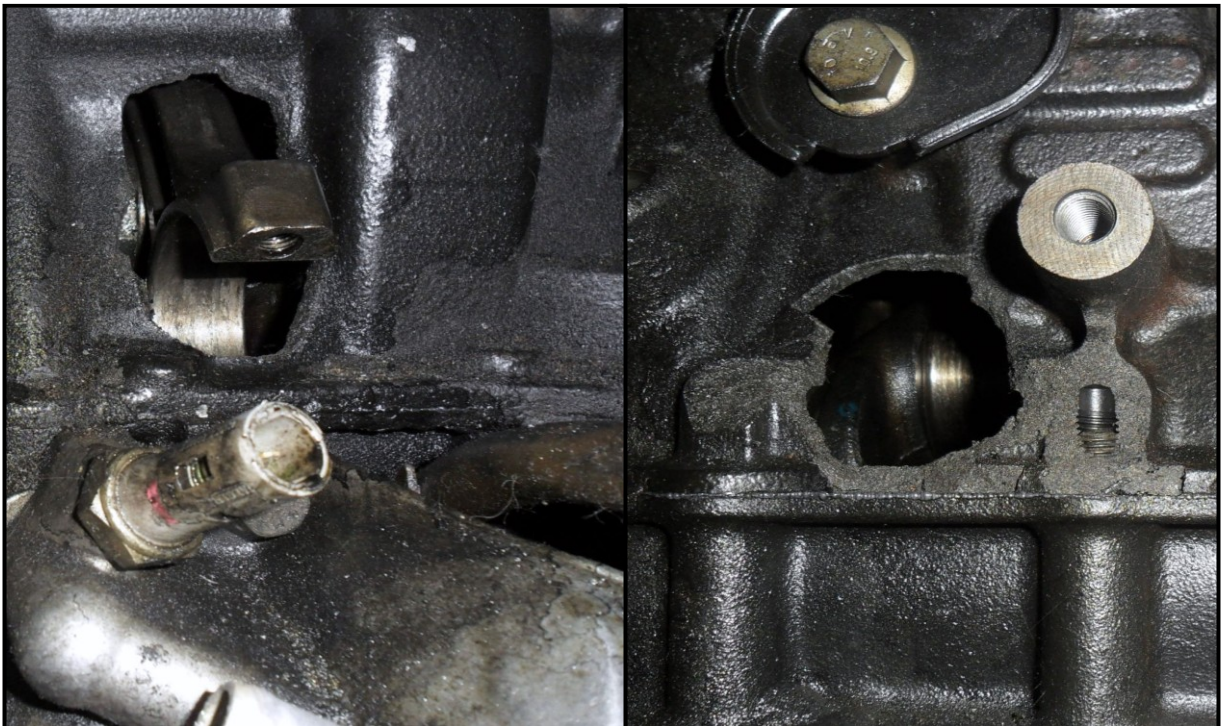
V dnešní době jsou na motory osobních vozidel kladeny velmi protichůdné požadavky. Ne vždy se tedy povede sestrojít agregát, který by vyhověl všem požadavkům. V praxi se často setkáváme s motory, které se i přes výbornou péči majitelů rychle opotřebí nebo rovnou přestanou plnit svojí funkci. Nejen pro optimalizaci vývoje motorů je velmi vhodné zabývat se příčinami selhání motorů. Taktéž jsem se setkal s velmi kuriózním případem selhání motoru a rozhodl jsem se, že se stane předmětem mého zkoumání. Jedná se o analýzu provozního lomu bloku motoru 2,2 dCi, který se nacházel v automobilu Renault Espace IV.

Vozidlo Renault Espace IV bylo vyrobeno v roce 2003 a dle údajů ze servisní knížky bylo o vozidlo vzorně staráno. Veškeré plánované návštěvy servisu byly dodržované a nikdy nebyl překročen servisní interval výměny oleje, který činí 30000 km nebo dobu dvou let dle toho, co nastane dříve. Na tachometru sledovaného vozidla bylo 168 324 km. Závada na motoru automobilu byla ihned nalezena. Po bližším ohledání bloku motoru, který byl celý od oleje, byla nalezena díra v bloku motoru. Po vyndání motoru z automobilu bylo zjištěno, že díry (Obrázek 1) v bloku motoru jsou dvě a každá je z jedné strany. V jedné z těchto děr byla zaseknutá hlava ojnice, která vytvořila díry v bloku motoru. Po sundání spodního víka motoru byly nalezeny úlomky z bloku motoru, víko hlavy ojnice, v oleji rozemletý různorodý materiál, jeden ojnicí šroub a pouze jedno ložiskové lůžko. Ostatní ojnicí ložisková lůžka také nejsou v naprostém pořádku. Znamky opotřebení jsou viditelné pouhým okem.

Od nezávislých automechaniků bylo zjištěno, že závada, s níž jsem se setkal, je jednou z mnoha. Toto tvrzení se potvrdilo. Během dalšího působení v praxi jsem se setkal se stejným automobilem, ve kterém se také nacházel motor 2,2 dCi, avšak pozorný majitel nechal vše včas zkontrolovat a tak předešel totální destrukci motoru. Bohužel bylo nutné vyměnit ojnicí ložisková lůžka za nová. Dalším důkazem je množství automobilů s vadou motoru, které stojí v autobazarech po celé Evropě. Pro ověření tohoto tvrzení jsem použil internetové stránky, kde jsem dal vyhledat automobily Renault, které mají motor 2,2 dCi. Omezil jsem se pouze na modelovou řadu Espace IV. Dále bych rád vypíchl zkušenosti majitelů anglického renault klubu (1), kde hned na prvním příspěvku je seznam lidí, z fóra, kterým se také podobným způsobem porouchal motor. Dalším náznakem problémovosti motoru 2,2 dCi je článek v motoristickém časopisu (2), kde autor doslova říká: „*Mechanici tvrdí, že je na něm všechno*

špatně. Má choulostivý „spodek“, zlobící rozvody, EGR okruhy i fórovou elektroinstalaci.“. Všechny tyto indicie nás přesvědčují o tom, že je s tímto motorem něco v nepořádku.

Z předchozích poznatků vyplývá, že uvedený typ motoru (tj. 2,2 dCi) je na dnešní dobu nadměrně problémový. Problém může být v konstrukci motoru nebo v použití nedostatečných materiálů nebo může být vada v motoru z hlediska tribotechnologického. V mé bakalářské práci se budu snažit prokázat vadu z hlediska materiálového.



Obrázek 1: Díry v bloku motoru.

2. Rozbor vnitřního uspořádání motoru z hlediska charakteru namáhání a použitých materiálů

Zkoumaným subjektem je čtyřtákní vodou chlazený řadový čtyřválcový vznětový motor o objemu 2,2 litru. Je přeplňován jedním turbodmychadlem a využívá vstřikování paliva Common Rail. Ventilový rozvod je řešený systémem DOHC a hlava motoru je osazena 4 ventily na válec. Motor má udávaný maximální výkon 110 kW při 4000 ot/min.

Při rozboru vnitřního uspořádání motoru z hlediska charakteru namáhání a použitých materiálů se zaměřím na klikové ústrojí motoru mimo setrvačnicku, protože problém, který budu zkoumat v mé práci, postihuje motor v tomto místě.

2.1. Píst

Při provozu motoru je píst namáhán převážně tepelně a mechanicky.

Tepelné namáhání způsobují zpravidla hořící plyny, jejichž teplo přestupuje do dna pístu. Je žádoucí, aby přestup tepla do dna pístu byl minimální, a současně potřebujeme dosáhnout velmi dobrého odvodu tepla z pístu. Teplo přestupující do dna pístu je především závislé na teplotě a rychlosti proudění plynů, dále na době hoření, na velikosti plochy dna daného pístu (3).

Pro zlepšení odvodu tepla z pístu se používají materiály s dobrou tepelnou vodivostí spolu s dobrým chlazením válců po celé dráze pístních kroužků. U zkoumaného motoru je píst ještě chlazen olejem, který je nastřikován do dutiny v hlavě pístu. Zbytek tepla se odvede pístními kroužky, můstky mezi pístními kroužky a pláštěm pístu. Menší část tepla také odvede plyn v klikové skřini (3).

Píst je mechanicky namáhán zejména silami od tlaku plynů a silami setrvačnými. Po součtu sil se výsledná síla přenáší hlavou pístu do nálitků pro pístní čep na pístní čep. Zde se síla rozloží na dvě složky. Jedná se o sílu normálovou, která je kolmá k ose válce a sílu v ose ojnice. Normálová síla přitlačuje píst na obě strany válce. Je nutné vhodně dimenzovat plášť pístu, aby nedocházelo k vytlačování oleje z kluzných ploch. Tento jev se může stát při překročení přípustné hodnoty měrného tlaku mezi pístem a stěnou válce (3).

Jak již bylo zmiňováno, materiál pístu musí odolávat tepelnému a mechanickému namáhání. Vzhledem k tomu, že se jedná o vznětový motor, kde písty pracují při větším mechanickém namáhání, musí být píst velmi pevný a tuhý.

Materiál sledovaného pístu je z hliníkové slitiny, přesněji 4032. Uvedená slitina se skládá převážně z hliníku a křemíku. Další legující prvky jsou měď, nikl, hořčík a další.

2.2. Pístní čep

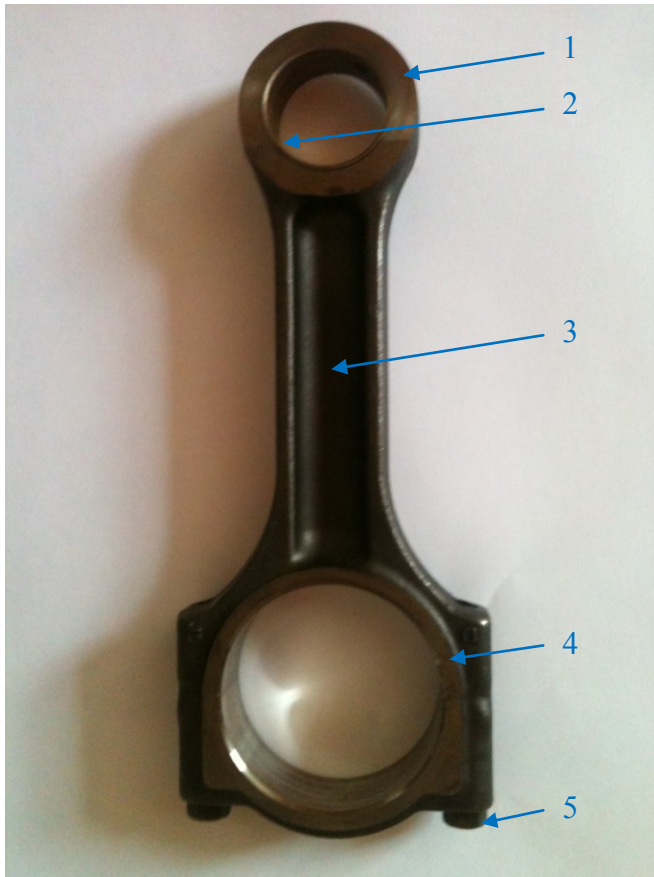
Pístní čep je přenašečem silových účinků mezi pístem a ojnící. Namáhání čepu je převážně způsobeno silami od tlaku plynů a setrvačnými hmotnostmi pístu a pístních kroužků. Proměnnost velikosti i směru zatěžujících sil má za následek namáhání čepu únavově a u rychloběžných motorů se svým charakterem blíží rázu.

Absence pravidelného rotačního pohybu a působení velikých sil nevytváří dobré podmínky pro kapalinové tření čepu. Důsledkem těchto skutečností je zvýšené opotřebení čepu.

U motoru 2,2 dCi je pístní čep uložen v nálitcích pístu a v oku ojnice otočně, tzv. plovoucí uložení. Při plovoucím způsobu uložení je nutno čep pojistit v axiálním směru. Zde je pojištění realizováno pomocí dvou kroužků kruhového průřezu. Pístní čep má tvar trubky, což je nejjednodušší a nejčastěji používané řešení. Působení velkého namáhání na kluzné plochy vyžaduje, aby povrch čepu byl co nejtvrdší. Ovšem jádro musí být houževnaté, protože nejlépe odolává rázovému namáhání. Pro toto řešení nejčastěji používáme cementační oceli 12012, 14120, 15220, 16420. Pro zvýšení životnosti čepu je nutné zvětšit odolnost proti opotřebení. Otěrová odolnost se zvýší zvětšením tvrdosti a hladkosti povrchu daného čepu. Na mez únavy pozitivně působí oboustranné tepelné zpracování a leštění obou jeho povrchů.

2.3. Ojnice

Ojnice je součást ve spalovacím motoru, která přenáší síly z pístu na klikový hřídel. Zejména při vysokých otáčkách je ojnice vystavena velmi vysokým zatížením. Pro splnění všech požadavků na funkci ojnice je důležitý její tvar (Obrázek 2).



Obrázek 2: Ojnice vyjmutá z motoru 2,2 dCi.

Oko pro pístní čep (Obrázek 2 pozice 1) má na ojnici lichoběžníkový tvar. Této konstrukce se využívá u značně zatížených přeplňovaných motorů. Jak již bylo uvedeno výše, je uložení pístního čepu plovoucí. Z tohoto důvodu bylo do otvoru oka ojnice zalisováno bronzové pouzdro (Obrázek 2 pozice 2), (4). Po nalisování pouzdra do oka ojnice vznikne napětí působící ve všech směrech oka ojnice. Napětí se ještě zvýší po zahřátí ojnice při provozu motoru, protože pouzdro a oko ojnice je vyrobené z různých materiálů o různém součiniteli tepelné roztažnosti (3).

Dřík (Obrázek 2 pozice 3) ojnice je namáhán tahem od setrvačné síly, tlakem od síly tlaku plynů a ještě musíme ojnici kontrolovat na vzpěr. Ojnice má průřez dříku ve tvaru „I“, který je tuhý a lehký.

Hlava ojnice (Obrázek 2 pozice 4) by měla být tuhá a lehká tak, aby nedocházelo k deformaci ložiskových pánví. Tuhost zvyšují plynulé přechody do dříku ojnice. V případě našeho motoru je hlava ojnice dělená, protože klikový hřídel byl vykován vcelku. Dělicí rovina hlavy ojnice má velikost přibližně průměru ojničního čepu a je kolmá na osu ojnice (4). Zachycení sil v dělicí rovině zabezpečuje struktura lomové plochy, která dosahuje efektu ozubení s přesným a nezaměnitelným lícováním a velkou příčnou stabilitou.

Víko ojnice je připevněno k patě ojnice ojničními šrouby (Obrázek 2 pozice 5). Polohu víka ojnice zabezpečuje lomová plocha v dělicí rovině ojnice spolu s předpětím ojničního šroubu. Tím je zachována kruhovitost a válcovitost ložiskové pánve i po montáži ojnice na klikový hřídel.

Horní pánev v hlavě ojnice je zatěžována krátkodobě silami od tlaku plynů. Spodní pánev ve víku ojnice je dlouhodobě zatěžována silami setrvačnými od posuvných i rotačních hmotností. Ocelové ojnice jsou kovány v zápustce a pro vznětové motory byla použita legovaná ocel 14240. Pro zvýšení únavové pevnosti byla ojnice kuličkována (4).

2.4. Kluzná ložiska

Kluzná ložiska jsou tvořena ze dvou částí. První částí je čep klikového hřídele, který je z tvrdého materiálu a druhou částí je ložisková pánev, která je z měkčího materiálu v porovnání s klikovým hřídelem.

Požadavky na výstelky ložiskových pánví vyplývají z jejich zatížení. Třecí plocha je namáhána dynamickými tlakovými účinky za zvýšené teploty. Musí být tedy odolná proti únavovému namáhání. V důsledku mazání olejem, který je postupně znehodnocován zplodinami a palivem musí být povrch ložiska odolný proti korozi. Dále musí povrch výstelky pohlcovat tvrdé částice, které se do ložiska dostanou s mazacím olejem a musí taktéž dobře snášet mezní stavy provozu ložiska, jako je polosuché tření při startu a doběhu motoru (4).

Ve sledovaném motoru se nacházejí dva druhy výstelek. První druh výstelky se skládá z třech různých materiálů. Základ tvoří ocelová opěrná pánev, na které je nanesena mezivrstva z olovnatého bronzu a spojovací niklové mezivrstvy. Jako poslední se nanáší ternární kluzná vrstva, která je složena z olova, cínu a mědi. Účelem niklové mezivrstvy je zabránit difuzi cínu z ternární vrstvy do bronzové mezivrstvy. V druhém případě se jedná o dvojrstvé ložiskové pánve. Ložiskový materiál složený ze slitiny hliníku, zinku, křemíku, mědi a olova se za tepla naválcuje na ocelový opěrný prsteneček (5).

2.5. Klikový hřídel

Klikový hřídel je uložen v ložiskách klikové skříně. Síly tlaku plynů a setrvačné síly přenášené ojnici na klikový čep vyvolávají v uložení hřídele reakce a na hřídeli točivý moment. Mechanické namáhání klikového hřídele je vyvoláno silovým tokem v hřídeli. Hmotnost klikového hřídele a hmotností s ním spojených částí klikového ústrojí spolu s pružností hřídele tvoří kmitavou soustavu. Kmitání hřídele vybuzené periodicky působícími

silami vyvolává často v klikovém hřídeli značná napětí. Čepy klikového hřídele jsou v ložiskách vystaveny poměrně vysokým měrným tlakům a opotřebením (3).

Ve zkoumaném motoru se nachází klikový hřídel uložený na pěti hlavních ložiscích. Přívod oleje k hlavním i ojničným ložiskům je řešen mazacími kanálky vyvrtaných do kovaného hřídele. Vyústění mazacích kanálků v čepch klikového hřídele je zaobleno a leštěno zřejmě pro snížení vrubového účinku. Klikový hřídel je také opatřen dvěma ozubenými koly. Umístění prvního kola je na začátku hřídele, myšleno směrem od prvního válce řadového motoru. Tímto kolem s přímým ozubením je poháněno vstříkovací čerpadlo a vodní čerpadlo. Druhé ozubené kolo s šikmým ozubením pohání vyvažovací hřídele. Nachází se mezi třetím a čtvrtým válcem přesněji za čtvrtým hlavním čepem klikového hřídele. Materiál klikového hřídele bude nejpravděpodobněji nitridační ocel, vzhledem k použití rozdílných ložiskových kovů.

3. Teoretický rozbor možných mechanismů poškození

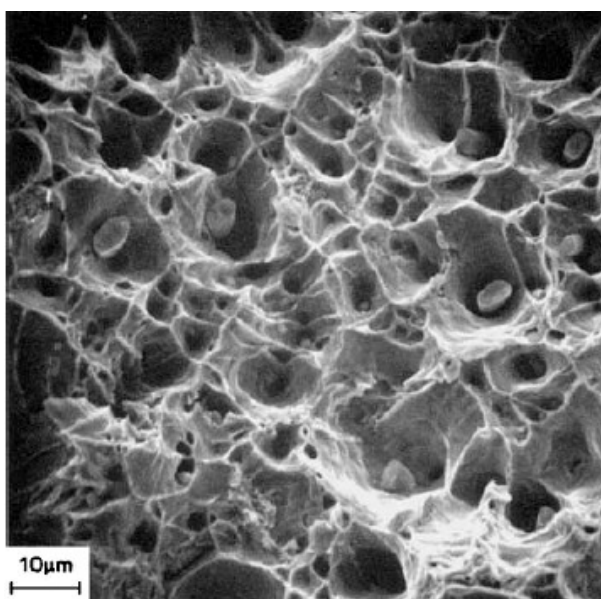
V následujících řádcích bych rád rozebral problematiku lomů, které vznikají mechanickým zatěžováním součástí. Především se chci zmínit o statickém lomu neboli lomu z přetížení a únavovém lomu.

3.1. Lom z přetížení

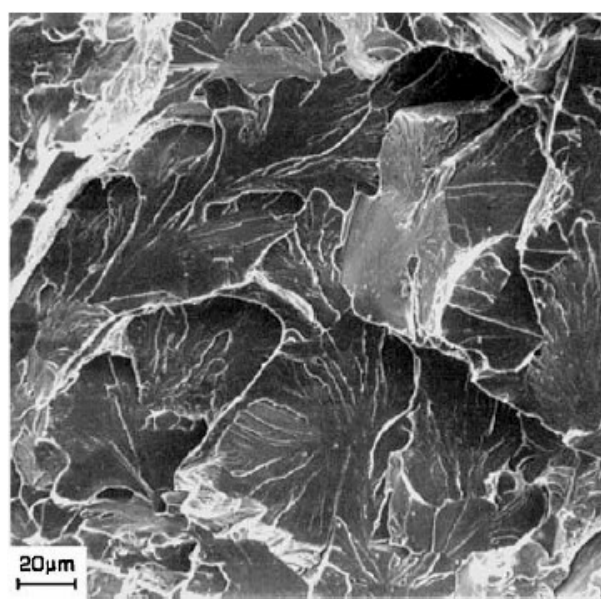
Pro lomy z přetížení, které nastávají při jednoosém zatížení, můžeme rozlišit dva mechanismy vzniku lomu a to smyk a štěpení.

Smykový lom je mikroskopicky tažný, vzniká skluzem ve skluzových rovinách, které jsou přednostně orientované vzhledem k rovinám maximálního smykového napětí. Znaky charakterizující smykový lom jsou jamky v částech osahující nežádoucí příměsi anebo chemické sraženiny. Zdrojem prvních lokálních prasklin jsou právě tyto jamky (Obrázek 3), (6).

Na rozdíl od smykového lomu je štěpný lom mikroskopicky křehký. Štěpný lom je kolmý na maximální tahové napětí, které převládá nad kohezními silami mřížky. Povrch lomu je charakteristický svými štěpnými rovinami, říčkami někdy jazyky a typickým rozštěpením rovin při jejich křížování přes stočené hranice zrn (Obrázek 4), (6).



Obrázek 3: Povrch jamkovitého lomu (6).



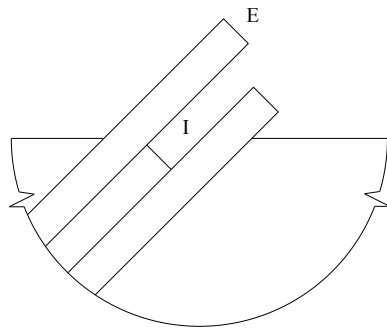
Obrázek 4: Povrch štěpného lomu (6).

Oba dva případy mají společné šíření lomu přes zrno, málokdy mezi zrny. Faktory, které podporují vznik štěpného lomu, jsou víceosové tahové napětí, vysoké rychlosti zatížení, nízké teploty a hrubá zrna. (6)

3.2. Únava a únavový lom

Únava materiálu a posléze únavový lom jsou způsobeny cyklickým mechanickým, tepelným nebo tepelně-mechanickým zatěžováním součásti. Mechanickou únavu můžeme rozdělit do čtyř úseků než-li dojde k únavovému lomu.

3.2.1. Inkubace únavového procesu



Obrázek 5: Schematické znázornění intruzí I a extruzí E mikroreliefu.

V prvním stádiu mechanické únavy dochází převážně k pohybu dislokací na volný povrch a zvyšuje se hustota dislokací v blízkosti hranic zrn. Významně se projeví heterogenita v rozložení mikroplastické deformace povrchových zrn. V tomto stádiu se nezjistí měřitelné změny mechanických vlastností. Ovšem v následujícím stádiu se situace změní. Zde již můžeme naměřit změny některých mechanických

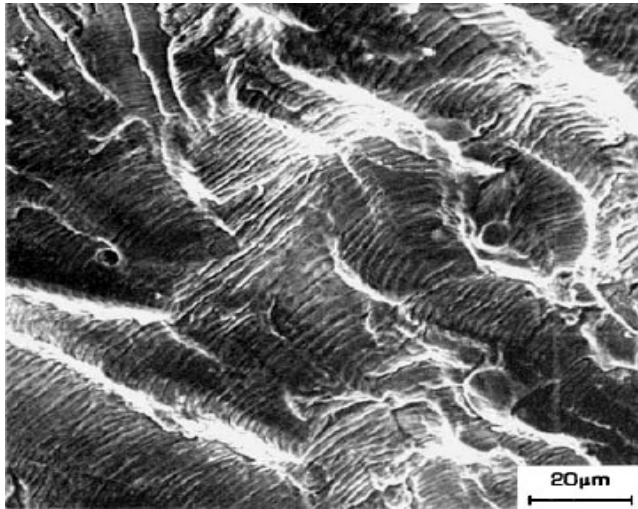
charakteristik materiálu. Na povrchu součásti se objevují únavové skluzové čáry případně pásy, které jsou submikroskopických rozměrů, a vzniká tzv. mikrorelief. Mikrorelief je charakteristický svými vyvýšeninami (extruzemi) a prohlubněmi (intruzemi), jak můžeme vidět na Obrázek 5. Spolu s procesem mikroplastické deformace se materiál zpevňuje. Zpevnění materiálu je důsledkem výrazných změn konfigurace a zvýšení hustoty dislokací v zasáhnutých zrnech (7).

3.2.2. Nukleace submikroskopických trhlin a jejich šíření

Úsek můžeme charakterizovat rostoucím počtem povrchových skluzových pásů, vznikem a prodlužováním submikroskopických trhlin. Dále se rozšiřuje cyklická mikroplastická deformace na větší počet povrchových zrn a prohloubí se povrchový mikrorelief. Na zrna, která byla nevýhodná pro aktivaci skluzových procesů, se nyní rozšířil proces mikroplastičnosti. Submikroskopické trhliny se postupně propojují, rostou a vznikají mikroskopické trhliny v povrchové vrstvě vzorku. Na konci tohoto úseku se nahromadila

poškození z inkubačního úseku a navíc přibýly trvalé skluzové pásy a výrazně se zvýšila hustota dislokací. Zvýšilo se množství submikroskopických a mikroskopických trhlin, které nepřesahují rozměr zrna (7).

3.2.3. Šíření únavové trhliny



Obrázek 6: Strie na únavovém lomu (6).

Pro úsek je charakteristický přechod mikrotrhlin přes hranice zrn. Šíření trhlin vzniká v rovinách kolmých na směr působícího zatížení a v podmínkách dvojosé napjatosti v čele trhliny. V tomto úseku se na povrchu lomu objevují typické brázdy, které nazýváme strie (Obrázek 6), (7).

3.2.4. Úsek konečného lomu

Etapa konečného lomu souvisí s nestabilním růstem únavové trhliny. Zvýšení napětí z poklesu průřezu způsobí statické dolomení zbytku součásti (6).

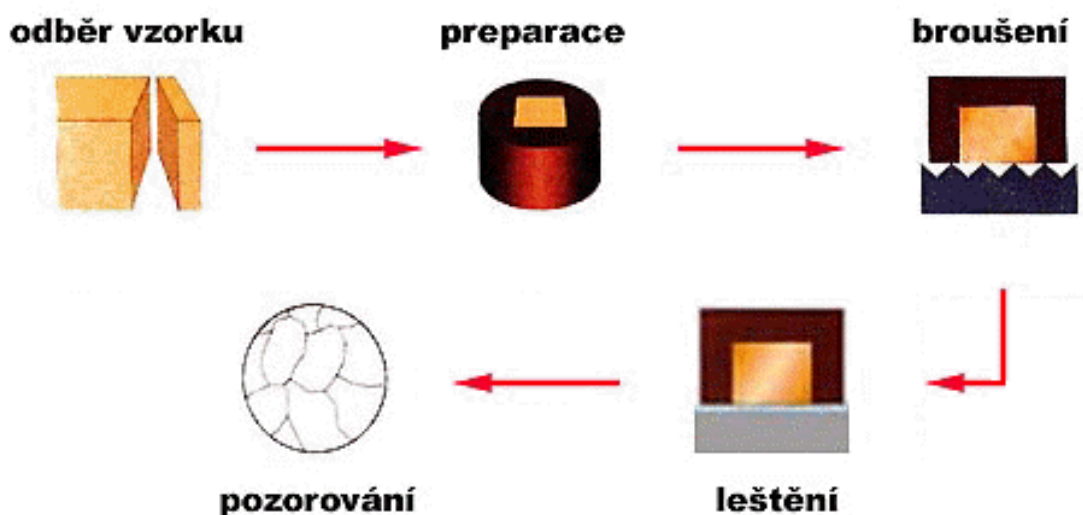
Pokud bychom měli zhodnotit samotný únavový lom, dovolím si tvrdit, že makroskopicky je únavový lom obvykle málo členitý ovšem podle stavu napjatosti a podle homogenity materiálu se může únavový lom větvit nebo je možné pozorovat několik trhlinek, které vycházejí z více iniciačních center. Samotné dolomení je zpravidla více členité, ale bez větších známek deformace.

4. Metodiky hodnocení poškození materiálů a identifikace lomových mechanismů

Pro zhodnocení míry a mechanismu poškození vybraných součástí motoru byly využity dvě metodiky. Postupně si tedy rozebereme metodiku metalografie a fraktografie.

4.1. Metalografie

Metalografie je věda zabývající se vnitřní stavbou materiálu. Umožní nám zviditelnit strukturu materiálu pomocí optického nebo elektronového mikroskopu. Nejdůležitějším krokem pro sledování vybraného materiálu je příprava vzorku, který rozdělíme do čtyř kroků (Obrázek 7).



Obrázek 7: Schéma metalografického výbrusu (8).

4.1.1. Odběr vzorku

Volba místa pro odběr vzorku se řídí účelem pozorování. Vzorek by měl daný materiál plně charakterizovat. Důležité je, aby při odběru vzorku nedošlo k jeho ovlivnění ani deformací ani vyvinutým teplem. Já jsem při odběru použil úzký brusný kotouč, který byl chlazen studenou vodou. Po oddělení vzorku bylo nutné jeho rychlé usušení, aby po styku s vodou nedocházelo ke korozi. Poslední úpravou před dalším krokem bylo odstranění hran po řezání.

4.1.2. Preparace vzorku

Velikost vzorku hraje významnou roli v dalších úpravách. V našem případě byly vzorky malých rozměrů, proto bylo nutné za tepla zalisovat do bakelitové pryskyřice. Usnadnila se tím práce se vzorky v dalších etapách, přednostně budu jmenovat dosažení rovinnosti plochy při výbrusu a manipulace se vzorky při leštění.

4.1.3. Broušení vzorků

Po preparaci vzorku následovalo jeho broušení. Cílem broušení je odstranit bakelit, který se natavil na plochu vzorku určenou pro mikroskopické pozorování. Také snížit povrchové nerovnosti a vytvořit tak rovinnou plochu vzorku. K broušení bylo použito metalografického brusného papíru o zrnitosti 1000 dle značení FEPA. Při broušení vzorku je nutné udržovat přítlak kolmý na plochu vzorku. Dále byl vzorek broušen nejprve jedním směrem a potom směrem kolmém na předešlé rýhy. Při změně směru broušení byl vzorek vždy opláchnut vodou, aby nedocházelo k pálení bakelitu a znehodnocování brusného papíru.

4.1.4. Leštění vzorku

Poslední etapou pro přípravu našeho metalografického vzorku bylo leštění. Při leštění vzorku neubývá materiál, tak jak je tomu při broušení, ale odstraňování mikronerovností se dosahuje zahlazováním. V případě mechanického leštění tedy dochází k intenzivní plastické deformaci v tenké povrchové vrstvě nazývané Beilbyho vrstva. Deformovaná vrstva dosahuje tloušťky od 1/10 až po 1/6 středního rozměru použitého brusiva. Jako leštící prostředek bylo použito diamantové pasty s velikostí zrna 7 μm a 5 μm . Diamantová pasta byla nanášena přímo na povrch vzorku injekční stříkačkou. Pro leštění bylo použito rotujícího kotouče potaženého tkaninou. Při leštění je nutné měnit směr leštění nejlépe krouživými pohyby proti směru rotace, aby nedocházelo k protažení některých strukturních součástí. Pro očištění leštěné plochy používáme aceton, aby opět nedocházelo ke korozi materiálu.

Protože vzorky byly odřezány z pánví ojnicních ložisek a šlo nám primárně o vypořádání mechanismu a rozsahu škod na součásti, nebylo nutné vorek naleptávat. Jednotlivé vrstvy pánví nám poskytly dostatečný kontrast pro pozorování.

4.2. Fraktografie

Fraktografie je vědní obor studující zákonitosti lomů a deformací pevných látek. Vycházíme z morfologie lomových ploch, které vedou k optimalizaci konkrétní konstrukce nebo součásti. Lomové plochy jsou analyzovány nejrůznějšími metodami, které začínají běžnou vizuální metodou přes využití zvětšovacího skla až po využití řádkovacího elektronového mikroskopu. Hodnocení lomové plochy můžeme tedy rozdělit do dvou hlavních kategorií a to hodnocení makroskopické a mikroskopické.

4.2.1. Makroskopické hodnocení

Při studiu lomu součásti jsem využil nejprve makroskopického hodnocení, konkrétněji vizuálního pozorování. Je však možné použít i zvětšovací sklo, ale v našem případě jej nebylo zapotřebí. Hranicí mezi makroskopickým pozorováním a mikroskopickým pozorováním je zpravidla až 40násobné zvětšení. Makroskopické pozorování lomu nám velice pomůže při získávání základních informací o samotném lomu. Už jen pomocí pouhého pohledu na lomovou plochu jsme schopni identifikovat strukturní heterogenitu materiálu, vrub v součásti, podíl makroskopické deformace nebo dokonce i samotný únavový proces. Případně nám pohled na součást napoví, kterou oblast lomu je vhodné podrobit mikroskopickému pozorování.

4.2.2. Mikroskopické hodnocení

Ke zkoumání mikromorfologie byl použit skenovací elektronový mikroskop TESCAN VEGA\\ SB.

Elektronový mikroskop pracuje se svazkem elektronů urychlených vysokým napětí místo světla, jak je tomu u klasického optického mikroskopu. Tenký svazek urychlených elektronů fokusovaných na povrch vzorku emituje elektrony v širokém pásmu energií. Obraz je vytvořený elektrony, které jsou odražené případně emitované z povrchové vrstvy vzorku. Svazek elektronů v mikroskopu povrch vzorku bod po bodu bombarduje a emitované elektrony jsou zachyceny a zesílené na elektrický signál, který vytváří samotný obraz preparátu na obrazovce. Kontrast na obrazovce je způsobený interakcí elektronů s tuhou látkou a je výsledkem reliéfu povrchu (7).

Obrovskou výhodou skenovací elektronové mikroskopie jsou minimální požadavky na přípravu vzorku. V zásadě stačilo pouze oddělit vzorek od tělesa bez ovlivnění lomové plochy

deformací ani vyvinutým teplem. Opět byl použit brusný kotouč chlazený studenou vodou. Vzorek byl ještě očištěn od provozních nečistot acetonem a tím byl připraven na pozorování.

5. Materiálové analýzy vybraných částí

V minulé kapitole byly představeny metodiky hodnocení poškození materiálu pomocí metalografie a fraktografie. Pro hodnocení metalografické byly zvoleny poškozené výstelky ojnicích kluzných ložisek. Jak již bylo uvedeno, problémy se zkoumaným motorem nejsou ojedinělé, a proto jsem měl k dispozici výstelky ojnicích ložisek i z jiného motoru 2,2 dCi, který měl dokonce podobný tachometrový kilometrový proběh. Z hlediska fraktografie jsem posuzoval poškozenou lomovou plochu mezi víkem ojnice a hlavou ojnice.

5.1. Aplikace metalografie na poškozené součásti

Při metalografickém posuzování je nejdůležitější výběr a příprava vzorku. Při volbě vhodných vzorků byly vybrány nejvíce poškozené ojnicní pánve, které nejlépe prezentovaly charakter a mechanismus poškození. Byly vybrány 3 ojnicní pánve z motoru, u kterého prošla ojnice skrz blok motoru (Obrázek 8) a 3 ojnicní pánve z motoru, u kterého sice nedošlo k destrukci bloku, ale vykazoval opotřebení (Obrázek 9). Po řádném očištění ojnicních pánví bylo již zřejmé, že vzorky 1,2,4,5 jsou jiné než vzorky 3 a 6. Definitivní jistotu nám poskytla až preparace vzorků určených k zalisování do bakelitu. Po vyjmutí bakelitové tablety bylo nutné obrousit a naleštit povrch pro sledování pod mikroskopem.

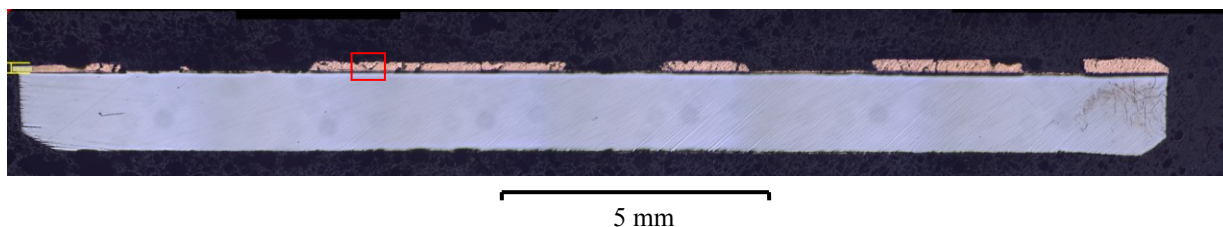


Obrázek 8: Poškozené ojnicní pánve, vzorky 1,2,3.

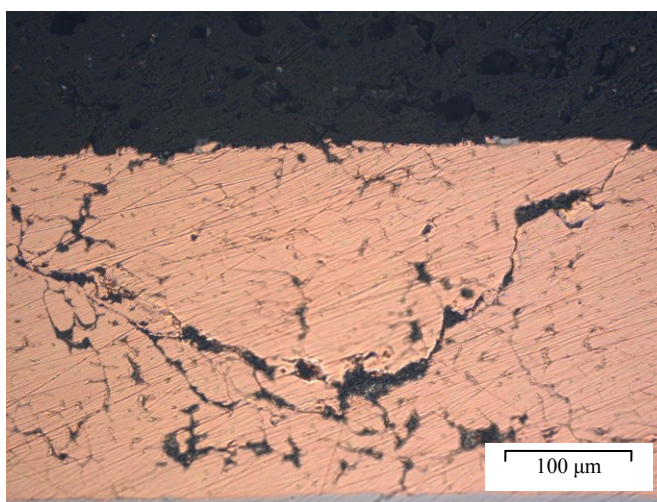


Obrázek 9: Poškozené ojniční pánve, vzorky 4,5,6.

Mikroskopické pozorování struktury ojničních pánví bylo započato vzorkem 1. Výška ložiskového materiálu činila pouhých 179,6 μm v nejvyšší části výstelky. Struktura vzorku 1 je na Obrázku 10, ve kterém je vyznačený detail v červeném obdélníku.



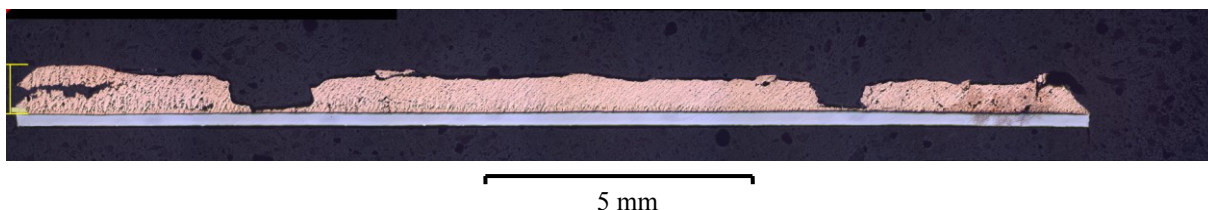
Obrázek 10: Struktura vypreparovaného vzorku 1.



Obrázek 11: Detail z Obrázku 10 zvětšení 250x.

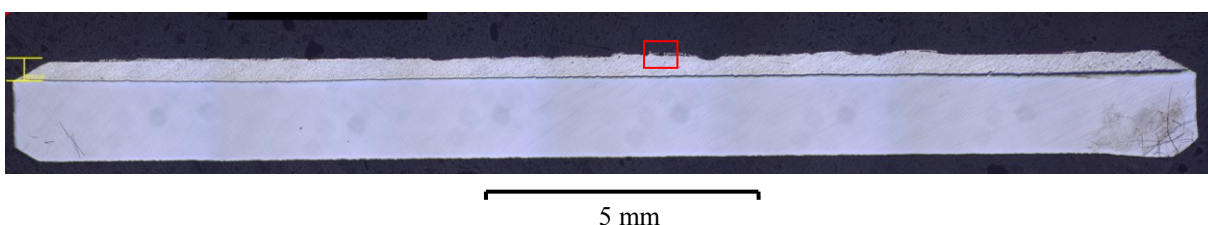
V detailu na Obrázku 11 můžeme pozorovat šedé mikročástice na povrchu ložiskového materiálu, které zde působí jako abrazivo. Uvnitř ložiskového kovu byly pozorovány rozsáhlé trhliny, vedoucí k odlupování větších částí ložiskového materiálu.

Vzorek 2 byl na pozorování mnohem zajímavější. Na Obrázku 12, kde je zobrazena struktura vzorku 2 jsou vidět různé etapy odlamování ložiskového kovu. Opět se jedná o velký kus ložiskového kovu, který se začal odlamovat z kraje ložiskové pánve. V zbytku snímku je možné pozorovat vylamování menších částí ložiskového kovu, které jsou blíže k povrchu výstelky. Výška ložiskového kovu v nejvyšším bodu činila 938 μm .



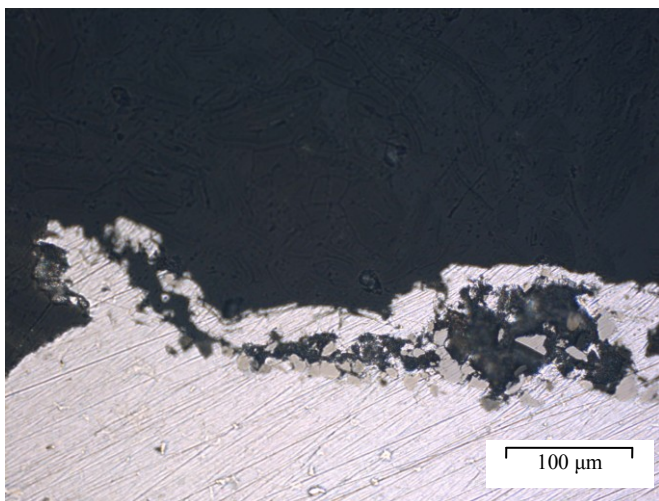
Obrázek 12: Struktura vypreparovaného vzorku 2.

Posledním vzorkem na pozorování z motoru, kde ojnice prorazila blok motoru, byl vzorek 3. Na Obrázku 13 je možné prohlédnout si strukturu vzorku 3. Na první pohled je zřejmé, že se jedná o úplně jiný ložiskový kov než v prvních dvou případech. Taktéž charakter poškození je jiný. V prvních dvou případech se ložiskový kov převážně odlamoval po větších kusech a z větší vzdálenosti od povrchu výstelky na rozdíl od vzorku 3, kde se kov odlamuje při povrchu výstelky a netvoří tak krátery, jako je tomu např. na Obrázku 12. Výška ložiskového kovu v nejvyšším bodě byla 413,3 μm .



Obrázek 13: Struktura vypreparovaného vzorku 3.

V detailu, který je vyznačen na Obrázku 13 červeným obdélníkem a zvětšen 250x na Obrázku 14 je názorně vidět mechanismus odlamování ložiskového kovu. Je zde velké množství abrazivních částic, které způsobily odlomení ložiskového materiálu. Avšak v porovnání se vzorky 1 a 2 je množství odlomeného kovu daleko menší, také zde není žádná prasklina, která by prorůstala na povrch a vše se děje při povrchu výstelky.

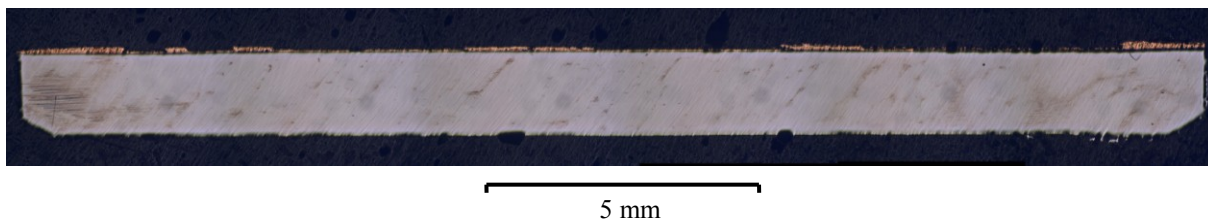


Obrázek 14: Detail z Obrázku 13 zvětšení 250x.

Druhá sada vzorků s označením 4, 5 a 6. jsou při pohledovém zkoumání identicky poškozeny jako vzorky 1,2 a 3. Vzorky 4, 5 a 6 byly vyjmuty z motoru, který nebyl tak poškozený, jako zkoumaný motor, ale vykazoval opotřebení, které se dalo lehce diagnostikovat sluchem. Účelem vzorků 4, 5 a 6 je potvrzení hypotézy, že závada, která se vyskytla na sledovaném motoru, není ojedinělá a má až na pár odlišností

stejný průběh. Sledoval jsem na těchto vzorcích charakter opotřebení, který by měl odpovídat charakteru opotřebení první sady vzorků.

Již na struktuře vzorku 4 (Obrázek 15) je vidět, že druhý motor nebyl zcela v pořádku. Vše co zůstalo z dané ložiskové pánve je ocelový opěrný prstenec a naprosté minimum ložiskového kovu, které již nemohlo plnit svou funkci.



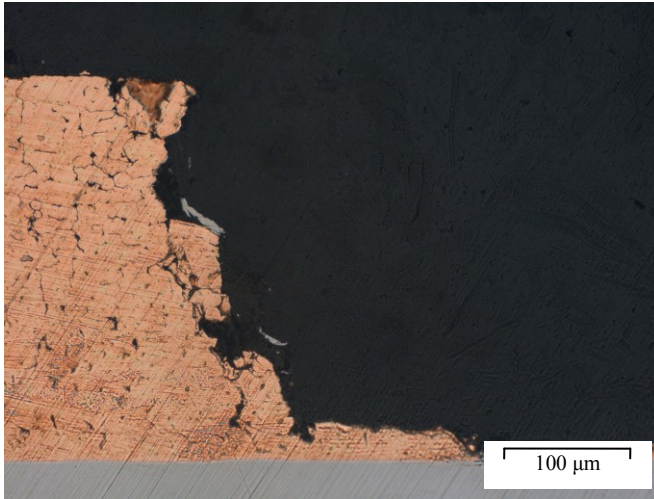
Obrázek 15: Struktura vypreparovaného vzorku 4.

Na dalším vzorku s označením 5 (Obrázek 16) jsou taktéž vidět známky vážného poškození. Předně se jedná o nestejný úbytek ložiskového materiálu, který provází tento typ výstlepek použitých na obou motorech. Opět jsou zde místa bez ložiskového kovu, tvořící krátery ve struktuře.

Při zkoumání struktury vzorku 5 byl vyroben detailní snímek, který je vyznačen v Obrázku 16 červeným obdélníkem. Při pohledu na detail (Obrázek 17) můžeme vidět praskliny ve struktuře ložiskového kovu a následné odlamování kovu, ale i další nečistoty v podobě šedých částic.



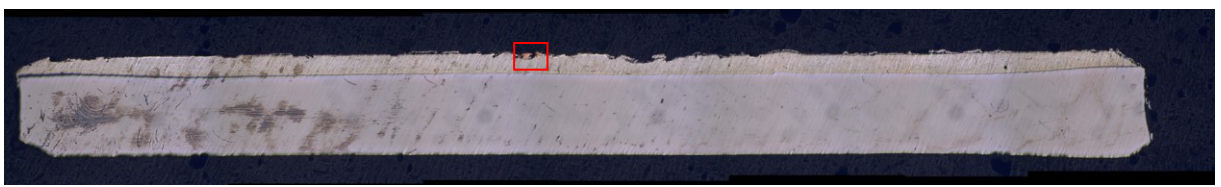
Obrázek 16: Struktura vypreparovaného vzorku 5.



Obrázek 17: Detail z Obrázku 16 zvětšení 250x.

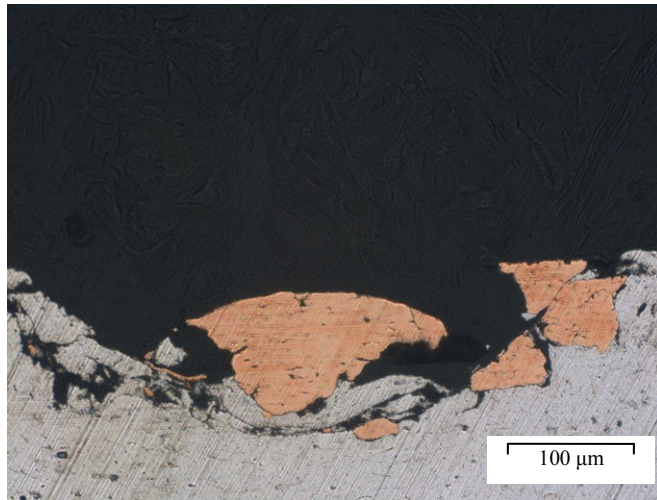
Jako poslední ze sledovaných vzorků byl zkoumán vzorek 6. Jedná se o ložiskovou pánev, která má stejný ložiskový kov na povrchu opěrného prstence, jako je tomu u vzorku 3. Strukturu vzorku 6 prezentuje obrázek 18. Mimo odlišnosti ložiskového materiálu od subjektů z druhé sady je možné pozorovat odlišný průběh odlamování ložiskového materiálu z povrchu ložiskové pánve od

předchozích dvou vzorků. Také zde není tak výrazná nesouměrnost opotřebení pánve. Celkově bych přirovnal charakter poškození vzorku 6 ke vzorku 3, které jsou téměř identicky opotřebované. Při makroskopickém pozorování struktury vzorku byla rozlišitelná část ložiskového materiálu, která má odlišnou barvu a je tedy předmětem detailu.



Obrázek 18: Struktura vypreparovaného vzorku 6.

Ve vyobrazeném detailu (Obrázek 19) je možnost vidět cizí kus ložiskového kovu, který se zachytil do ložiskového materiálu sledovaného vzorku. Tento detail svědčí o tom, že primárně poškozený materiál bronzové výstelky působil jako abrazivo u měkčího ložiskového kovu.



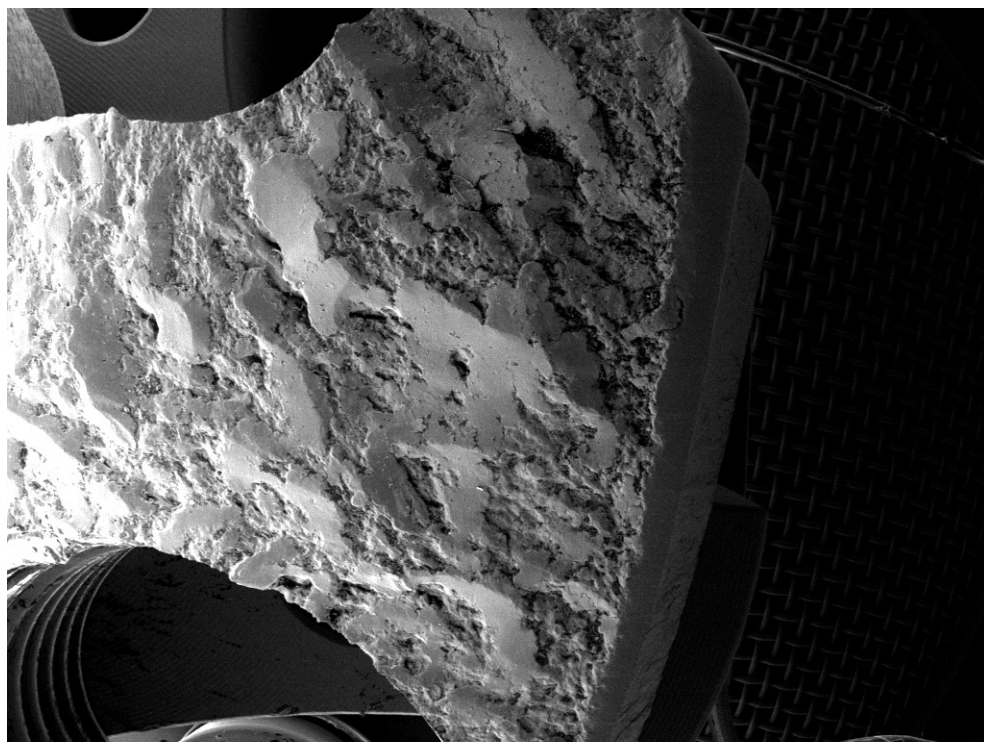
Obrázek 19: Detail z Obrázku 18 zvětšení 250x.

5.2. Aplikace fraktografie poškozené součásti

Pro fraktografické hodnocení byla vybrána lomová plocha nacházející se mezi patou a víkem ojnice. Původní lomová plocha, která slouží jako ozubení s přesným a nezaměnitelným lícováním, byla velmi poničena. Způsob poškození bloku motoru, svědčí o tom, že selhalo upevnění víka ojnice k patě ojnice. Proto je nutné podrobit Lomovou plochu fraktografickému hodnocení.

Příprava vzorku pro hodnocení byla značně jednodušší než u metalografických vzorků. Stačilo vypreparovat vzorek pro sledování tak, abychom neovlivnili lomovou plochu tepelným či mechanickým působením a očistit lomovou plochu od provozních nečistot.

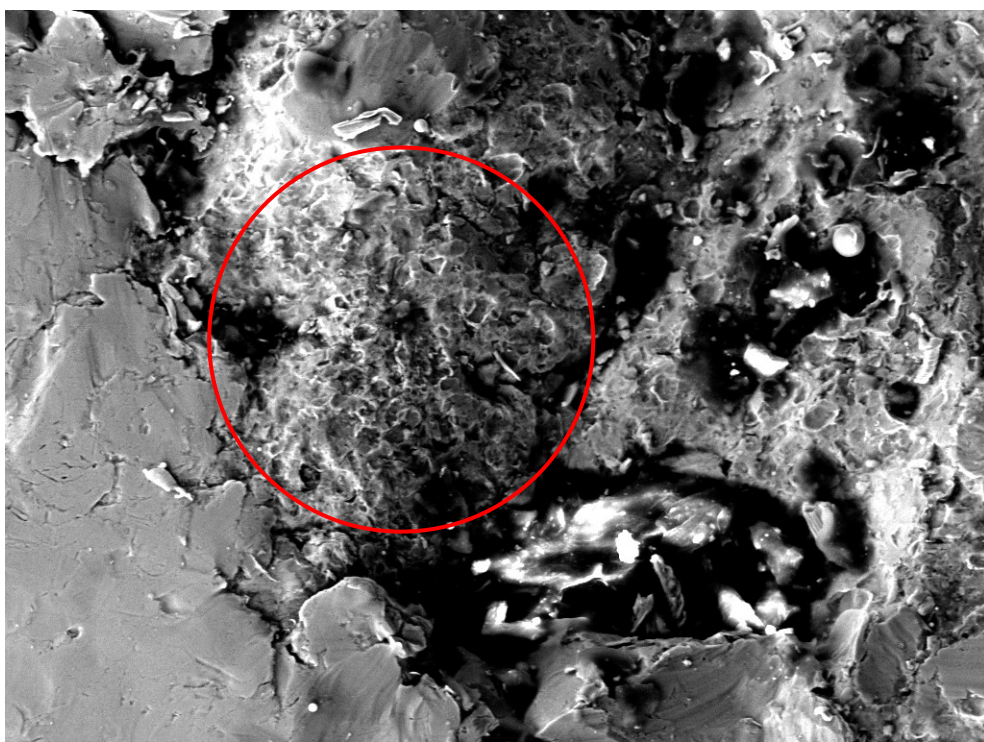
Po vložení vzorku do elektronového mikroskopu bylo vyfoceno několik snímků lomové plochy. Prvním obrázkem (Obrázek 20) bude makromorfologický snímek, na kterém je vidět stav lomové plochy. Lomová plocha byla velmi členitá a nyní je povrch mechanicky poškozený. Snímek by nám měl pomoci odhalit únavový proces, který zde však není a ani v blízkosti závitů, který by mohl posloužit jako koncentrátor napětí, a proto bychom zde mohli očekávat únavové trhliny. V dalším obrázku (Obrázek 21) se nachází snímek, v jehož levé části můžeme vidět část mechanicky poškozené hladké plochy, ale i pro nás zajímavější část v červeném kroužku s rysy důlkové morfologie. Po přiblížení oblasti v červeném kroužku (Obrázek 22), detailněji vidíme jamky, které skutečně odpovídají jamkovité morfologii.



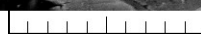
SEM HV: 30.00 kV WD: 7.117 mm
SEM MAG: --- Det: SE Detector
Date(m/d/y): 04/26/13 Mikroskop

Digital Microscopy Imaging 

Obrázek 20: Makromorfologie lomu



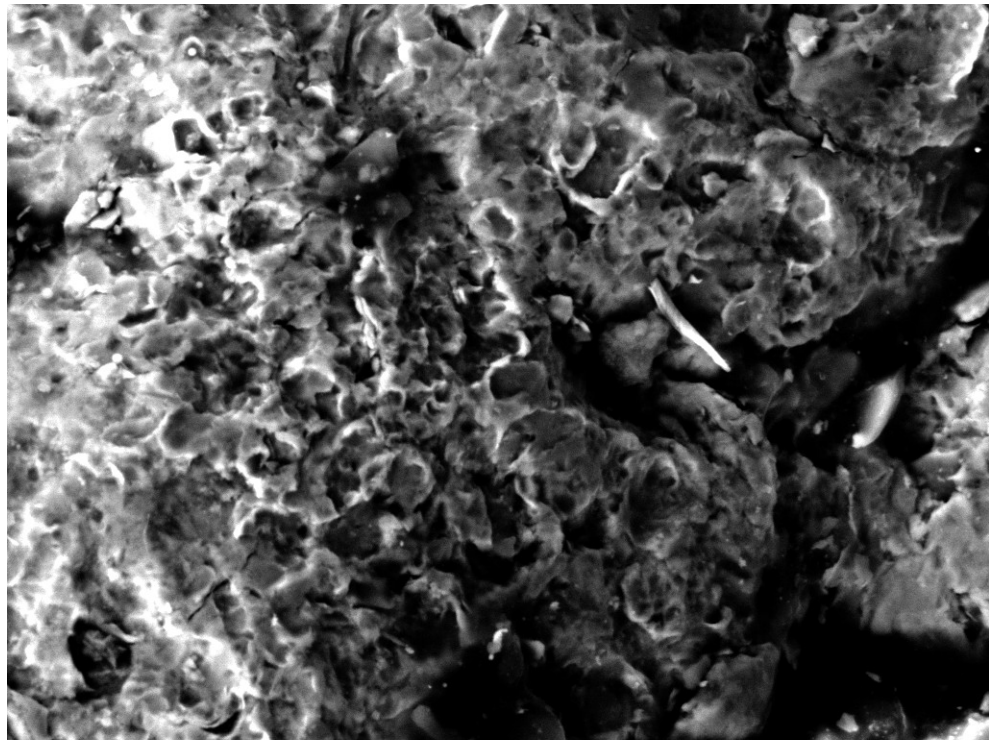
SEM HV: 30.00 kV WD: 16.70 mm
SEM MAG: 600 x Det: SE Detector
Date(m/d/y): 04/26/13 Mikroskop

 100 μ m

VEGA\\ TESCAN

Digital Microscopy Imaging 

Obrázek 21: Jamková morfologie lomu.



SEM HV: 30.00 kV WD: 16.78 mm VEGA\\ TESCAN
SEM MAG: 1.79 kx Det: SE Detector 50 µm
Date(m/d/y): 04/26/13 Mikroskop Digital Microscopy Imaging

Obrázek 22: Detail morfologie lomu.

6. Souhrnné posouzení vlastních výsledků ve vztahu k charakteru poškození

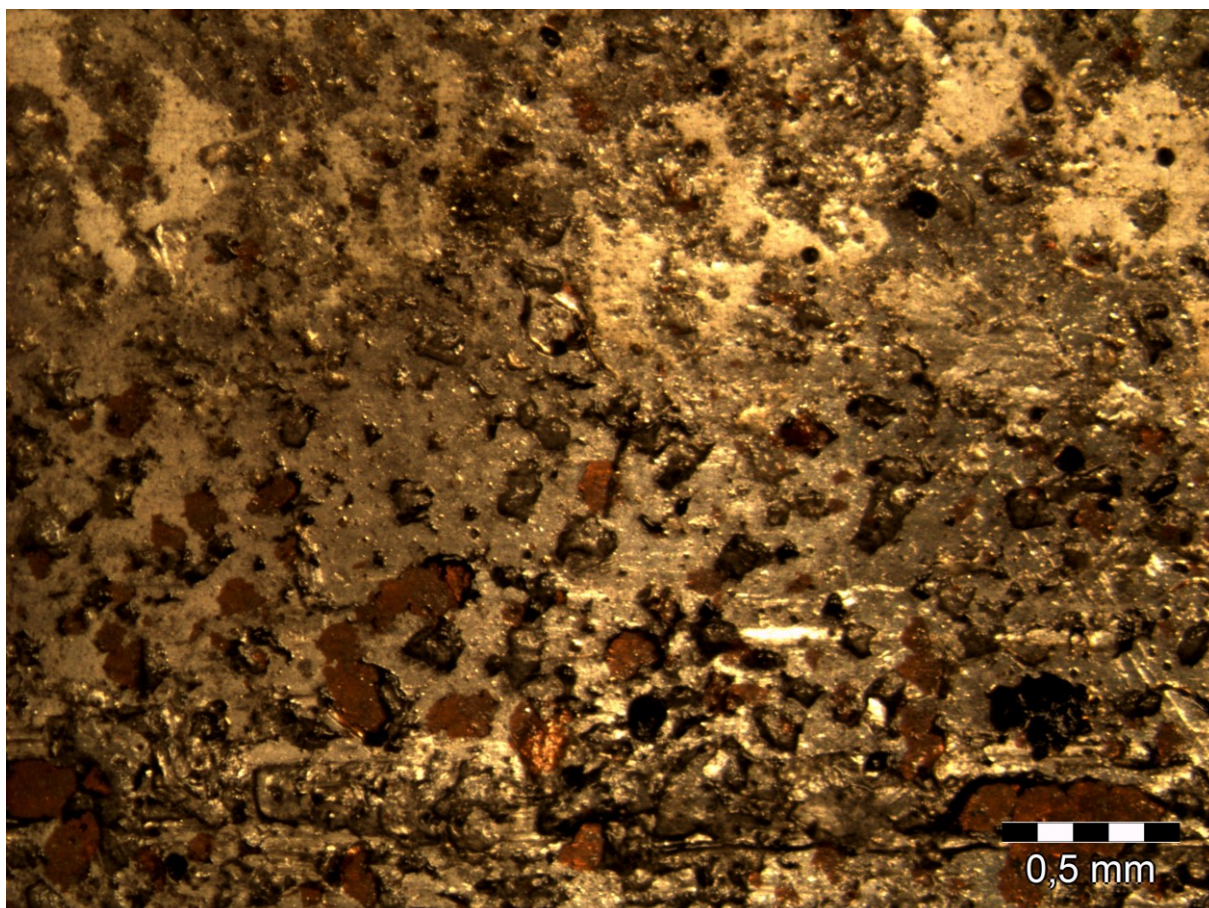
Cílem provedené teoretické studie a konkrétních materiálových analýz bylo posouzení možných příčin destrukce motoru. Vyhodnocení vycházelo i ze zjištěných provozních souvislostí a dostupných informací o četnosti závad motoru daného typu. Pro jednoznačné zjištění příčiny poškození by bylo nutno provést podrobnější analýzy, a to rovněž u jednotlivých částí daného typu motoru před destrukcí, v definovaném stadiu provozního opotřebení.

Má práce se zabývá zkoumáním součástí z poškozeného subjektu z materiálového hlediska, a proto na základě výsledků lze usuzovat na určité okolnosti destrukce. Poškození vybraných ložiskových lůžek bylo hodnoceno na metalografických výbrusech a přímým pozorováním stavu povrchu. Vyhodnocení charakteru poškození ložiskových výstelek umožnilo posoudit, zda-li za jejich stav může být zodpovědná únava materiálu nebo přetížení motoru.

Z obrázků v kapitole 5.1 vyplývá, že pokud by zde byla únava materiálu nebo životnost ložisek u konce charakter poškození a samotného odlupování byl jiný. V hodnoceném případě nebylo pozorováno postupné rovnoměrné opotřebenění ložiskového kovu, zjištěno bylo velice nerovnoměrné poškozování materiálů výstelky. Zejména u pánví, které měly ložiskový kov z olovnatého bronz, bylo zjištěno, že se ložiskový kov neopotřeboval postupně, ale po stovkách mikrometrů a v extrémním dokumentovaném případě (na obrázku 12), došlo k odlupování materiálu výstelky do hloubky 1-2 mm. V tomto případě vše nasvědčuje tomu, že byl motor přetížen a výstelka s olovnatým bronzem nesnesla rázové zatížení. Jako důkaz nám poslouží Obrázek 8 a Obrázek 9, kde můžeme vysledovat umístění kráterů převážně v oblasti předpokládaného působení rázového zatížení při pracovní fázi výbuchu motoru.

Porovná-li charakter poškození výstelek, na kterých byla použita hliníková slitina, jako ložiskový kov a výstelky, kde je ložiskovým kovem olovnatý bronz, zjistím hned několik rozdílů. V první řadě je jejich poškození soustředěno doprostřed ložiskové pánve, v místě vyústění mazacího kanálku klikového hřídele. Další rozdílů je souměrnost opotřebení

ložiskové výstelky, kde ložiskový kov tvoří stále souvislou vrstvu a nikde u sledovaných vzorků nechybí tolik ložiskového kovu, aby zde byla lokálně obnažená ocelová nosná pánev. Zde veškeré poznatky vedou k závěru, že tyto lůžka jsou poškozená převážně abrazivně, jak dokazuje Obrázek 19. Situaci dokumentuje makrosnímek povrchu ojničního lůžka, kde je ložiskovým kovem slitina hliníku (Obrázek 23). Zde je možné pozorovat mimo jiné i zapíchnuté kusy olovnatého bronzu, které zde působí jako abrazivní částice.



Obrázek 23: Snímek poškozeného povrchu ložiskové výstelky při 20násobném zvětšení.

Lomová plocha na patě ojnice byla značně znehodnocená deformací při destrukci. Fraktografické analýzy byly proto omezeny pouze na několik oblastí, ve kterých ale bylo možno identifikovat mód lomu. Ojniční víko bylo poničené ještě hůře a pro účely fraktografie bylo nepoužitelné. Jak můžeme vidět na snímcích z kapitoly 5.2 je na lomové ploše rozpoznat pouze zbytky důlkové morfologie. Důlková morfologie odpovídá statickému přetížení součásti. S ohledem na pozici oblastí, které bylo možno analyzovat, je možné z výsledků jednoznačně vyvodit, že lomová plocha mezi víkem a patou ojnice vznikla ze statického přetížení součásti.

Z provedených materiálových analýz vyplývá, že žádný z testovaných vzorků nejevil známky únavy. Charakter poškození kluzných ložisek nebyl způsoben rovnoměrným postupným opotřebením, ale soustavným přetěžováním, které hůře snášely pánve s ložiskovým kovem z olovnatého bronzu. Taktéž morfologie lomové plochy neodpovídá únavovému procesu, ale statickému přetížení, jak dokazuje důlková morfologie lomové plochy.



Obrázek 24: Fotografie vnitřní části paty ojnice se známkami tepelného zatížení.

Z uvedených výsledků lze vyvodit, že na životnosti motoru se velice neblaze podepsalo použití kluzných ložisek s různým ložiskovým materiálem. Už z logiky věci budou mít různé ložiskové kovy různé vlastnosti a také se budou různě opotřebovávat. Na obrázku 24 můžeme vysledovat stopy tepelného zatížení. Je tedy zřejmé, že opotřebovaná kluzná ložiska přestala plnit funkci a vedla k zablokování čepu klikového hřídele. Pánve kluzných ložisek se tedy začala protáčet vůči ojnici společně s klikovou hřídelí. Toto zatížení vedlo pravděpodobně k přetížení ojničních šroubů, oddělení paty ojnice od víka ojnice, a následně k destrukci bloku motoru.

7. Závěr

V úvodu této práce jsem nastínil problém, který postihuje typ motoru 2,2 dCi, uvedl fakta související s užíváním motoru v provozu a nastínil množství takto postižených strojů. V další části bylo rozebráno uspořádání motoru s důrazem na postižené součásti, jejich materiál a charakter namáhání. Třetí kapitola byla zaměřena na možné mechanismy poškozování, kde jsem zmínil nejčastěji se vyskytující lomy součástí a to statický lom a únavový lom. Teoretickou část práce pak uzavřela čtvrtá kapitola, ve které byly rozebírány metodiky hodnocení poškozených materiálů a identifikace lomových mechanismů.

Stěžejní částí práce byla analýza poškozených součástí, pro posouzení příčiny destrukce motoru. Pro vlastní analýzy byly aplikovány tyto metody:

- Metalografické analýzy poškozených výsterek kluzných ojnicích ložisek. Analýza byla prováděna pomocí světelné mikroskopie a u jednotlivých vzorků byl popsán stav struktury vzorků.
- Fraktografická analýza poškozené lomové plochy mezi víkem a patou ojnice. Analýza byla prováděna pomocí elektronové mikroskopie a byl zde popsán stav lomové plochy.

V poslední části práce byly posouzeny zjištěné skutečnosti vyplývající z materiálových analýz. Na základě výsledků analýz a celkového posouzení zjištěných provozních souvislostí bylo vyloučeno selhání součástí z hlediska únavy. Výsledky svědčí o přetížení v souvislosti s nadměrným opotřebením ložiskových výsterek v uložení ojnic. Součástí práce bylo vytvoření sady reprezentativních vzorků poškozených ložisek, rovněž dalších poškozených částí motoru. Vzorky umožňují další zkoumání a zároveň slouží jako výukový materiál.

Použité zdroje

1. Espace 2.2dci engine failures - inherent design fault?. In: *RenaultForums* [online]. © 2005-2009 [cit. 2014-05-14]. Dostupné z:
<http://www.renaultforums.co.uk/showthread.php?t=69855>.
2. Svět motorů: Ojetiny. Praha: Ringier Axel Springer CZ a. s., 2012. ISSN 0039-7016.
3. Konstrukce vozidlových spalovacích motorů. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2003. ISBN 80-7194-550-1.
4. RAUSCHER, Jaroslav. Spalovací motory: Studijní opory. Brno, 2005, 235 s.
5. AutoEXPERT: Praktická dílna: Spalovací motory II. Praha: AutoPRESS, 2005. ISSN 1211-2380.
6. HRIVŇÁK, Ivan. Fraktografia. Trnava: AlumniPress, 2009. ISBN 978-80-8096-089-6.
7. PUŠKÁR, Anton a Marián HAZLINGER. Porušovanie a lomy súčastí. Žilina: EDIS, 2000. ISBN 80-7100-654-8.
8. Metalografie I.: příprava vzorku pro pozorování mikroskopem [online]. © 2009-2013 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z:
http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_metalografie_1/teorie.htm

Seznam obrázků

Obrázek 1: Díry v bloku motoru.

Obrázek 2: Ojnice vyjmutá z motoru 2,2 dCi.

Obrázek 3: Povrch jamkovitého lomu (6).

Obrázek 4: Povrch štěpného lomu (6).

Obrázek 5: Schematické znázornění intruzí I a extruzí E mikroreliéfu.

Obrázek 6: Strie na únavovém lomu (6).

Obrázek 7: Schéma metalografického výbrusu (8).

Obrázek 8: Poškozené ojniční pánve, vzorky 1,2,3.

Obrázek 9: Poškozené ojniční pánve, vzorky 4,5,6.

Obrázek 10: Struktura vypreparovaného vzorku 1.

Obrázek 11: Detail z Obrázku 10 zvětšení 250x.

Obrázek 12: Struktura vypreparovaného vzorku 2.

Obrázek 13: Struktura vypreparovaného vzorku 3.

Obrázek 14: Detail z Obrázku 13 zvětšení 250x.

Obrázek 15: Struktura vypreparovaného vzorku 4.

Obrázek 16: Struktura vypreparovaného vzorku 5.

Obrázek 17: Detail z Obrázku 16 zvětšení 250x.

Obrázek 18: Struktura vypreparovaného vzorku 6.

Obrázek 19: Detail z Obrázku 18 zvětšení 250x.

Obrázek 20: Makromorfologie faktografického vzorku.

Obrázek 21: Jamková morfologie faktografického vzorku.

Obrázek 22: Jamková morfologie faktografického vzorku.

Obrázek 23: Snímek poškozeného povrchu ložiskové výstelky při 20násobném zvětšení.

Obrázek 24: Fotografie vnitřní části paty ojnice se známkami tepelného zatížení.