

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Degradace brzdných segmentů užitkových vozidel a autobusů v závislosti na
podmínkách jejich provozování

Bc. Jan Rygel

Diplomová práce

2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan RYGEL**

Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**

Studijní obor: **Dopravní prostředky-Silniční vozidla**

Název tématu: **Degradace brzdných segmentů užitkových vozidel
a autobusů v závislosti na podmínkách jejich provozování.**

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

- 1.) Popište současný stav a používané frikční materiály brzdných segmentů.
- 2.) Na konkrétním příkladě ilustруйте možnou degradaci brzdového kotouče.
- 3.) Proveďte materiálový a technologický rozbor vybraného třecího uzlu včetně diskuse získaných výsledků.
- 4.) Navrhněte alternativní frikční materiály a proveďte posouzení jejich aplikace pro brzdové systémy vozidel.
- 5.) Na základě provedených analýz formulujte vlastní stanovisko k řešené problematice - s ohledem na ekonomické posouzení a technické využití navrženého řešení v praxi.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

- [1] Vlk, František.: Podvozky motorových vozidel. Nakladatelství vydavatelství Vlk, Brno, 2000
- [2] Pluhař, Jaroslav.: Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu. Státní nakladatelství technické literatury, Praha, 1987
- [3] Vadykotoucu. [On-line] Dostupné z: <http://www.balenoklub.cz/pages/clanky/vadykotoucu.pdf>
- [4] Stručné shrnutí údajů: Brzdové automobilové kotouče? s.r.o.. [On-line] Dostupné z: [http://www.env.cz/www/ippc.nsf/\\$pid/MZPAXF1RUCP3](http://www.env.cz/www/ippc.nsf/$pid/MZPAXF1RUCP3)
- [5] Produktove-informace.pdf. [On-line] Dostupné z: <http://aa.bosch.cz/download/Brzdove-systemy/Produktove-informace.pdf>

Vedoucí diplomové práce:

doc. Dr. Ing. Libor Beneš

Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů

Datum zadání diplomové práce: **20. února 2009**

Termín odevzdání diplomové práce: **25. května 2009**



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.



doc. Ing. Miroslav Tesař, CSc.

vedoucí katedry

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 25. 5. 2009

Bc. Jan Rygel

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Dr. Ing. Liboru Benešovi, dále Ing. Pavlu Švandovi Ph.D., Ing. Luboši Minářovi a všem ostatním, kteří mi poskytli rady a materiály k sepsání této práce.

ANOTACE

Tato práce je zaměřena na frikční části brzdové soustavy vozidel. V první části je popsán brzdový systém užitkových vozidel a autobusů. V další části je proveden rozbor brzdového kotouče z autobusu, na kterém se projevila degradace materiálu. Závěr práce je věnován testu geopolymerních materiálů, jakožto alternativě za dosud používané materiály třecích segmentů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Brzdový kotouč, třecí segmenty, únavová trhлина, geopolymery

TITLE

Degradation of brake segments of commercial vehicles and buses in dependance on conditions of their operation

ANNOTATION

This work is bent on friction glazing parts brake system vehicles. In forepart is described braking system commercial vehicles and buses. In next parts is effected analysis brake disc from a bus, whereat disply manifest degradation material. Close work is devoted test geopolymer materials, as option behind till this time used materials of brake slide.

KEYWORDS

Brake disc, brake slide, fatigue crack, geopolymer

Obsah

ÚVOD	7
2 BRZDOVÁ SOUSTAVA UŽITKOVÝCH VOZIDEL A AUTOBUSŮ	8
2.1 PŘÍSTROJE ZAJIŠŤUJÍCÍ TLAKOVÝ VZDUCH	8
2.2 PROVOZNÍ BRZDA	10
2.3 KOLOVÉ BRZDOVÉ SYSTÉMY	10
2.3.1 SYSTÉM S BUBNOVOU BRZDOU	10
2.3.2 SYSTÉM S KOTOUČOVOU BRZDOU	11
3 POUŽÍVANÉ FRIKČNÍ MATERIÁLY	13
3.1 BRZDOVÉ KOTOUČE	13
3.2 TŘECÍ SEGMENTY	13
3.2.1 MATERIÁLOVÉ SLOŽENÍ TŘECÍCH SEGMENTŮ	17
4 DEGRADACE BRZDOVÝCH KOTOUČŮ	18
4.1 PŘÍPRAVA VZORKŮ PRO METALOGRAFII	19
4.2 VYHODNOCENÍ METALOGRAFIE	21
4.3 ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE	24
4.4 TERORE VZNIKU A ŠÍŘENÍ ÚNAVOVÝCH TRHLIN	28
4.4.1 STÁDIA ÚNAVOVÉHO PROCESU	29
4.4.2 STÁDIUM NUKLEACE ÚNAVOVÝCH TRHLIN	30
4.4.3 STÁDIUM ŠÍŘENÍ TRHLINY	32
4.4.4 ÚNAVOVÉ LOMY	33
4.4.5 KŘIVKY ÚNAVOVÉ ŽIVOTNOSTI	34
4.5 ODHAD PŘÍTLAČNÉ SÍLY BRZDOVÉHO OBLOŽENÍ NA BRZDOVÝ KOTOUČ	36
4.6 ODHAD ŽIVOTNOSTI BRZDOVÉHO KOTOUČE	40
5 GEOPOLYMERY JAKO FRIKČNÍ MATERIÁL	42
5.1 CHEMICKÁ PODSTATA GPM	43
5.2 ZKOUŠENÍ FRIKČNÍCH VLASTNOSTÍ GEOPOLYMERŮ	44
5.2.1 PŘÍPRAVA EXPERIMENTU	45
5.2.2 METODIKA MĚŘENÍ	46
5.2.3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ	47
5.2.4 HMOTNOSTNÍ ÚBYTEK	50
ZÁVĚRY	52
LITERATURA	54
SEZNAM OBRÁZKŮ	56
SEZNAM TABULEK	58
SEZNAM GRAFŮ	59

Úvod

Základem provozu všech silničních dopravních prostředků je bezpečnost. A to jak bezpečnost řidiče dopravního prostředku, tak také přepravovaných osob a nákladu, dalších účastníků provozu a ostatního okolí. Základním prvkem aktivní bezpečnosti u osobních automobilů, nákladních vozidel a autobusů je především spolehlivý brzdový systém.

Brzdy zachycují pohybovou a potenciální energii vozidla předanou do točících se kol a tím snižují rychlost otáčení kol a tedy celého automobilu. Útlumová energie je převáděna na teplo, které se odvádí do okolí. Kola jsou zpomalována třením mezi rotující částí a k ní dosedajícím prvkem pevně spojeným s vozem. Brzdové ústrojí je ovládáno pedálem nebo ruční pákou.

2 Brzdová soustava užitkových vozidel a autobusů

Vzduchová brzdová soustava se používá u automobilů, kde bychom při brzdění nevystačili se svalovou silou řidiče, zejména u autobusů a nákladních vozidel.

Vlastní brzdící práci tak vykonává vzduch, stlačený na tlak 0,8 až 1 MPa, rozvedený potrubím do celé brzdové soustavy. Řidič ovládá pedálem pouze ústrojí (brzdíč), které řídí účinnost brzdění vpouštěním tlakového vzduchu ze vzduchojemů do brzdových válců.

2.1 *Přístroje zajišťující tlakový vzduch*

Aby vzduchová brzda mohla brzdit, musí mít k dispozici stlačený vzduch. Ten je dodáván zásobníkovým okruhem, který tvoří tyto přístroje:

- čistič vzduchu
- vzduchový kompresor
- regulátor tlaku
- vysoušeč vzduchu nebo protimrazové zařízení
- víceokruhový jisticí ventil
- vzduchojemy a odvodňovací ventily
- omezovací ventily
- tlakoměry

Vzduchový kompresor

Pístový kompresor je zdrojem potřebného tlakového vzduchu. Stlačuje nasávaný vzduch a vzduchotlakým rozvodem jej dodává do zásobníkových vzduchojemů vozidla. Může nasávat čistý vzduch ze sacího potrubí za čističem vzduchu, nebo může mít svůj vlastní zvláštní čistič vzduchu.

Regulátor tlaku

Regulátor udržuje tlak vzduchu v zásobních vzduchojemech na určené úrovni.

Vzduchojemy jsou plněny stlačeným vzduchem z kompresoru tak dlouho, až tlak zásobního vzduchu dosáhne hodnoty nastaveného vypínacího tlaku. Po dosažení

vypínacího tlaku uzavře regulátor přívod ke vzduchojemům a vzduch dodávaný kompresorem uniká do atmosféry. Klesne-li tlak ve vzduchojemech pod hodnotu vypínacího tlaku, regulátor přepne zpět na dodávku do vzduchojemů. Přitom je uzavřen výstup do atmosféry.

Vysoušeč vzduchu

Vzduch obsahuje vlhkost, která se nesmí dostat do brzdových přístrojů, protože by mohla způsobit korozi ventilů a dalších přístrojů či jejich zamrznutí.

K vyloučení nepříznivých vlivů vlhkosti na brzdovou soustavu jsou moderní systémy vybaveny vysoušečem vzduchu. Ten může být umístěn samostatně, nebo sdružen s regulátorem tlaku.

Vlhký vzduch při průchodu vložkou vysoušeče odevzdává svou vlhkost její granulované náplni. Vysušený a vyčištěný vzduch odchází do vzduchojemů.

S vysoušečem je spojen regenerační zásobník, který je při plnění vzduchojemů naplněn vysoušeným vzduchem. Po dosažení vypínacího tlaku regulačního ventilu a po otevření výstupu do atmosféry proudí vzduch z regeneračního zásobníku zpět do vysoušečí vložky, kde odebírá vlhkost granulované náplni. Vlhký vzduch pak proudí z vysoušeče do atmosféry.

Protimrazová pumpa

Není-li instalován vysoušeč vzduchu, chrání se brzdové přístroje před korozi a zamrznutím protikorozním a protimrazovým prostředkem nastříkaným do vzduchových rozvodů. K tomu slouží ruční nebo automatické protimrazové pumpy, které mohou být instalovány před nebo za regulačním ventilem.

Jako protimrazové a protikorozní prostředky se používají speciální přípravky doporučené výrobcem nebo denaturovaný líh.

Vzduchojemy a odvodňovací ventily

Vzduchojemy slouží k vytvoření zásoby stlačeného vzduchu, aby byl k dispozici dostatečný tlak i objem vzduchu pro vzduchotlaké brzdy.

Celkový objem zásobních vzduchojemů vozidla musí být asi 15x větší než objem všech připojených brzdových válců.

Při provozu se ve vzduchojemech může hromadit kondenzovaná voda. Proto mají zásobní vzduchojemy v nejspodnějším místě ruční nebo automatický odvodňovací ventil.

2.2 Provozní brzda

Brzdy v kolech jsou uváděny do činnosti stlačeným vzduchem ze zásobních vzduchojemů, který řidič pouští do okruhů provozní brzdy. V okruhu provozní brzdy je zapojeno několik přístrojů.

Dvoukruhový pedálový brzdič

Nejdůležitější součástí systému ovládání vzduchových brzd je pedálový brzdič. Je to vlastně regulační ventil, který řídí vypouštění stlačeného vzduchu do všech brzdových válců. Velikost dodávky stlačeného vzduchu ze zásobních vzduchojemů odměřuje řidič pomocí pedálu brzdy. Tím tak řídí tlak v brzdových okruzích. Pedál brzdy bývá obvykle spojen s hlavním brzdičem v jeden celek a tvoří tzv. hlavní pedálový brzdič.

Dvoukruhový pedálový brzdič má dva vzájemně oddělené brzdové ventily, které zcela nezávisle zásobují vzduchem připojené brzdové okruhy. Proto při poruše jednoho z brzdových okruhů zůstane vždy druhý okruh plně provozuschopný.

Automatický zátěžový regulátor

Je to vzduchový regulační ventil, který při brzdění řídí tlak v brzdových válcích podle zatížení vozidla. Čím vyšší je zatížení nápravy, tím vyšší je tlak vzduchu přicházející do brzd.

Brzdové válce

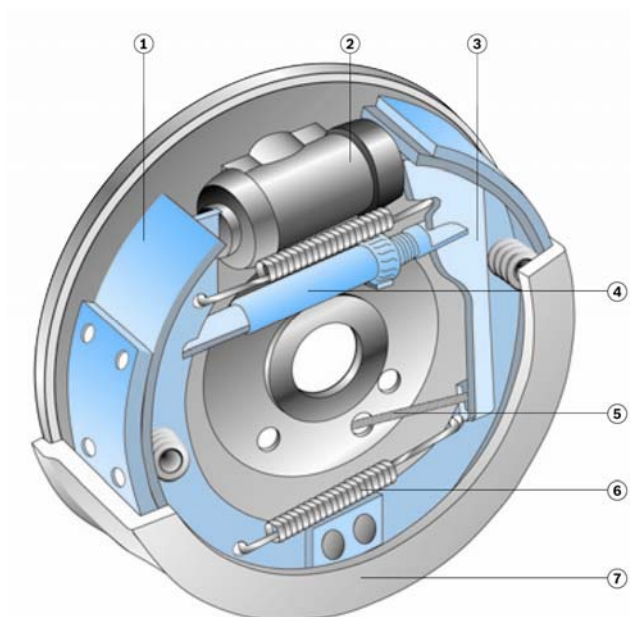
Brzdové válce slouží k ovládání brzd v kolech podle tlaku v brzdovém okruhu provozní brzdy. Pohyb pístu vyvolaný tlakem vzduchu v brzdovém válci uvádí brzdu do činnosti

2.3 Kolové brzdové systémy

2.3.1 Systém s bubnovou brzdou

Bubnové brzdy jsou používány u vozů zejména na zadní nápravě. Vytvářejí brzdnu sílu na vnitřním povrchu brzdového bubnu. Brzdové válečky přitlačují brzdové

čelisti k brzdovému bubnu. Zařazením brzdového lana a páky ruční brzdy je možno bubnovou brzdou využít také jako parkovací brzdu.



Obr. 2.1: Popis brzdového bubnu: 1 - Brzdové čelisti, 2 - Brzdový váleček, 3 - Páka ruční brzdy, 4 - Samostavná jednotka, 5 - Brzdové lano, 6 - Pružiny, 7 - Brzdový buben [12]

2.3.2 Systém s kotoučovou brzdou

Jednoduchá konstrukce, velká účinnost, snadná údržba, odolnost proti vadnutí (fadingu) a jednoduchá výměna dílů jsou výhody kotoučových brzd oproti brzdám bubnovým.

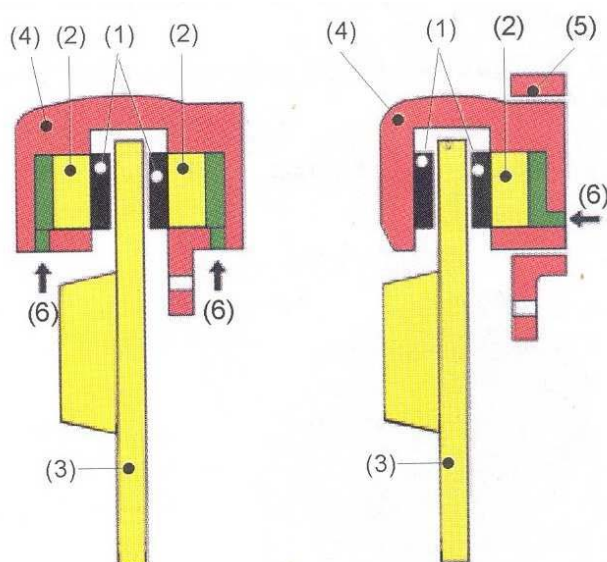
Brzdový kotouč má dvě funkční části:

- prstenec - střední část s otvory pro šrouby, kterými je připevněn k náboji kola
- brzdné plochy s vnitřním chlazením

Při brzdění je na obě strany kotouče přitlačováno brzdové obložení a vzniklým třením je k náboji kola připevněný brzdový kotouč zpomalován. Pohyb brzdového obložení zajišťuje pístek, který je tlakem v brzdovém potrubí přitlačován k třecím segmentům. K ovládání kotoučové brzdy slouží hydraulický válec nebo brzdíč. Potřebný tlak je u hydraulických brzd vyvinut silou, kterou řidič působí na pedál. U nákladních automobilů a autobusů tlak zajišťují přístroje vzduchové brzdové soustavy.

Brzdy s plovoucím třmenem

Kotoučová brzda s plovoucím třmenem má brzdový válec s pístkem jen na jedné straně kotouče. V pohyblivě uloženém tělese třmenu přitlačuje píst vnitřní brzdové obložení přímo k brzdovému kotouči. Tím vyvolaná síla reakce posouvá třmen ve vodicích čepích a nepřímou přitahuje také vnější brzdové obložení k brzdovému kotouči.



Obr. 2.2: Schéma kotoučových brzd
a) s pevným třmenem,
b) s plovoucím třmenem;
(1) brzdové obložení
(2) pístek
(3) brzdový kotouč
(4) třmen brzdy,
(5) držák brzdového třmenu
(6) přívod tlaku [12]

Brzdy s pevným třmenem

U kotoučové brzdy s pevným třmenem je nutné, aby byly brzdové válce umístěny v ose proti sobě po obou stranách kotouče. Pro vyvinutí dostatečných sil někdy jeden pár brzdových válců nestačí. Proto bývá počet válců větší. Každá pár válců musí ležet na společné ose a průměr jejich pístků je stejný. Pro případ, kdy na jedné straně kotouče je jeden válec a na druhé straně válců dva, musí platit, aby plocha jednoho pístku byla stejná jako součet ploch pístků na straně druhé.

Literatura ke kapitole 2: [1], [2], [3], [12], [13], [14]

3 Používané frikční materiály

3.1 Brzdové kotouče

Brzdové kotouče jsou vyráběny z temperované šedé litiny nebo ocelolitiny s vysokou pevností. Vzhledem k tomu, že při intenzivním brzdění dochází ke krátkodobému ohřevu až na 900°C, musí materiál kotouče vzniklé teplo rychle odvádět. Rychlý odvod tepla při nízkých cenových nákladech na materiál dobře zajistí šedá litina.

Aby nedocházelo k přestupu tepla na další části podvozku (kola, náboj, ložiska), musí být kotouč dobře chlazen. Pro lepší odvod tepla do okolí se vyrábí kotouče s vnitřním chlazením. Mezi oběma brzdnými plochami leží průchozí duté prostory opatřené větracími lopatkami. Lopatky jsou uspořádány tak, aby při jízdě vpřed docházelo k proudění vzduchu dutými prostorami. Přitom se odvádí teplo. Brzdné plochy jsou přidavně chlazeny zevnitř. Takto zůstává brzdný účinek trvale zachován.

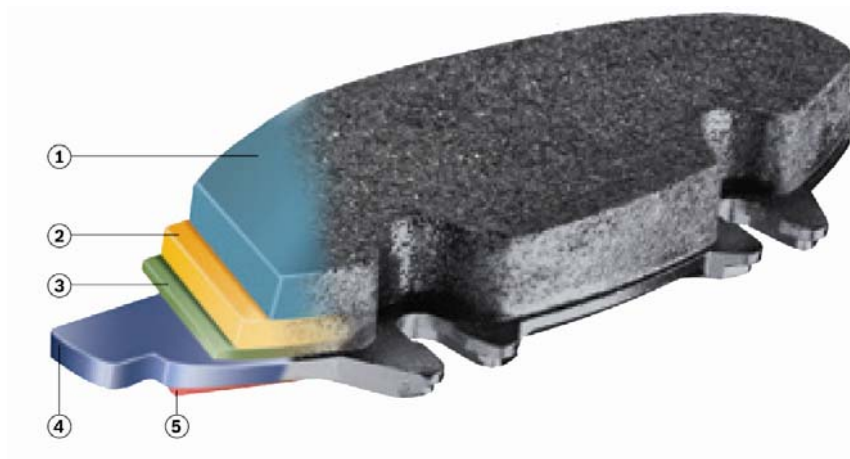
Značný vliv na opotřebení třecího obložení má jakost povrchu kotouče. Aby nebylo obložení nadměrně opotřebováno, je povrch kotoučů broušen.

3.2 Třecí segmenty

Základní vlastností třecího segmentu je, aby měl velký koeficient tření a aby byl koeficient tření konstantní za všech provozních teplot, nebo aby rostl se zvyšující se teplotou. Hlavními prvky třecích materiálů jsou:

- pryskyřice
- vlákna
- lubrikanty
- brusiva
- plnidla.

Pryskyřice má funkci pojiva, zajišťuje soudržnost brzdového obložení. Jako zpevňující vlákno je užíván kevlar, karbid, skelné vlákno nebo vlákno ocelové. Lubrikanty a brusiva ovlivňují konečný součinitel tření. Jako lubrikant slouží koks nebo grafit. Hliníková, skleněná nebo železná krupice a jiné minerální látky zvyšují součinitel tření, mají tedy funkce brusiva.

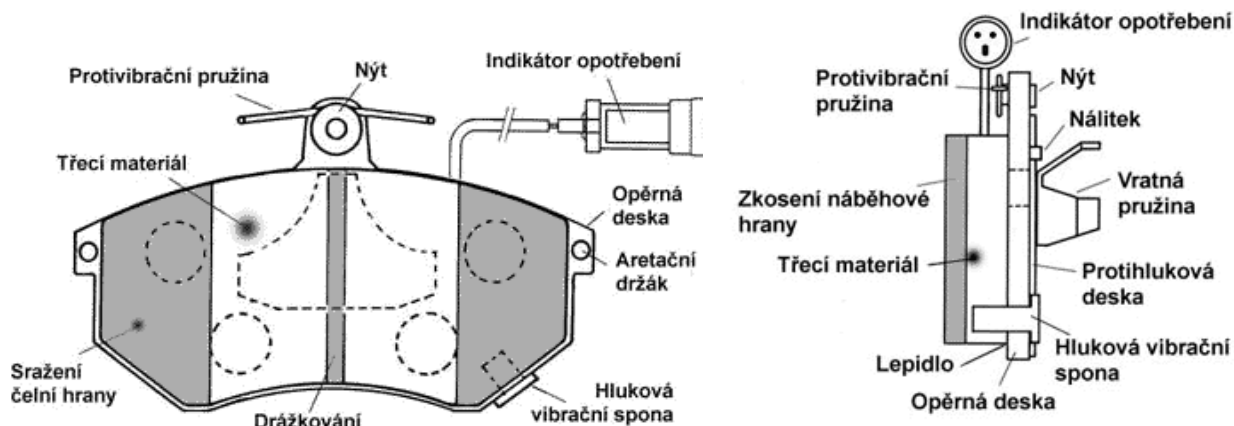


Obr. 3.1: Brzdová destička: 1 – třecí materiál, 2 – vložená deska, 3 – lepidlo, 4 – kovová opěrná deska, 5 – tlumící materiál [12]

Třecí obložení je připevněno na opěrné desce. Standardním materiálem opěrné desky je rovná měkká ocel. Tloušťka se pohybuje od 3 mm na malých destičkách, 6 - 7 mm pro lehké užitkové vozy, až po 10 mm u velkých destiček. Rozměrové tolerance jsou: 0,10 - 0,13 mm na šířku, aby umožnil brzdovému třmenu vůli. Rovinnost je požadována do 0,15 mm, plochá až konvexní na brzdě straně (k třecímu materiálu).

Vložená deska mezi třecím materiálem a opěrnou deskou odpovídá za komfort a bezpečnost a ovlivňuje stlačitelnost a rovněž hlučnost brzdění.

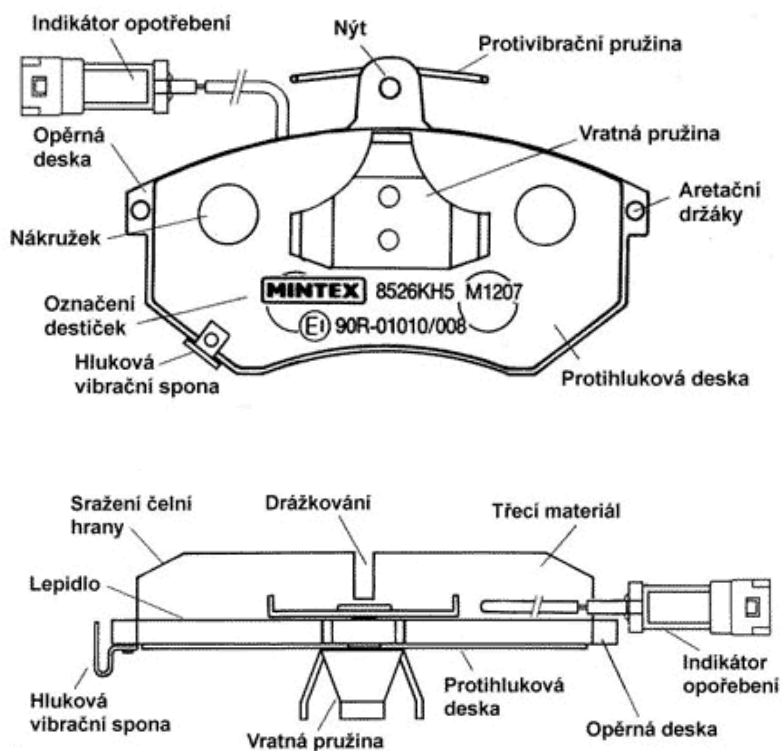
Na zadní straně opěrné desky jsou malé kovové výstupky - nálitky, které zapadají do prohlubní v třmenu pístku, které jsou připojeny k mechanismu ruční brzdy. Automatické nastavení závisí na aretaci pístku. Výstupky brání pístku v rotaci. Když jsou destičky vyjmuty, pístek je rotací vrácen to těla brzdíče. Nálitky jsou také použity k upevnění hlukových vibračních spon pro indikaci opotřebení.



Obr.3.2: Čelní a boční pohled na brzdovou destičku [18]

Otvory v opěrné desce umožňují u některých typů správnou montáž brzdových destiček a držení v těle brzdice. Zajišťují také správné usazení a zajištění proti náhodnému uvolnění brzdové destičky.

Pevné spojení mezi kovovou opěrnou deskou a třecím materiálem zajišťuje lepidlo. Lepidla musí vykazovat potřebnou pevnost ve smyku a zajišťovat, že ani při extrémních podmínkách se třecí materiál neuvolní z kovové opěrné desky. Lepidla obecně jsou tepelně vytvrzující pryskyřice nebo guma, založené na slučitelnosti s komponenty brzdových materiálů. Lepidlo je aplikováno na destičku nesoucí třecí segment ve formě roztoku založeném na ředidle nebo vodě. Tato vrstva se nechá zaschnout v přesné vrstvě dřívě, než plně vytvrdí. Vytvrzení zabraňuje měknutí lepidla, a proto musí být čas a teplota tvrzení přesně dodrženy.



Obr. 3.2: Zadní a horní pohled na brzdovou destičku [18]

Některé třecí segmenty mají drážku. Ta plní především funkci samočištění a odvodnění, tedy únikovou cestu pro uvolněné plyny a částičky. Dále pak předchází vzniku středových zlomů a mohou omezit zdvihání okrajů destiček od kotouče. Naopak drážky mohou být zdrojem hluku.

Ochranu před oddělování třecího materiálu od opěrné desky krom lepidla zajišťují otvory na opěrné desce - nákrůžky. Tvar a rozmístění nákrůžek musí respektovat tuhost destičky ve vztahu k pístku.

Na brzdové destičce mohou být připevněny pružiny. Pružina protivibrační je připojena na opěrnou desku. Alternativou je pružina přichycena ke třmenu.

Vratná pružina udržuje blízký kontakt s pístkem nebo tělem brzdíče. Pružiny jsou silně namáhány a jejich materiál se unavuje. Je třeba je vyměnit při každé výměně obložení.



Obr. 3.3: Umístění protivibrační a vratné pružiny na opěrné desce [18]

Kvůli eliminaci hlučnosti a vibracím při záběhu brzd má obložení zkosené hrany. Pro snížení hlučností jsou některá brzdová obložení opatřena tlumící (antirezonanční) vrstvou. K tomu jsou používány pryžové hmoty, plasty nebo kovové podložky.

Součástí brzdových destiček bývá indikátor opotřebení. Mechanický indikátor opotřebení (tzv. hluková vibrační spona) je vyroben z pružinové oceli. Je přinýtován k opěrné desce a umístěn tak, že když se destička opotřebuje na projektované minimum, konec spony přijde do kontaktu s brzdovým kotoučem. V tu chvíli dojde k vyvolání vibrací typu, proti kterému je brzdový systém konstruován. Délka, hmota, tuhost a nedostatek tlumení jsou projektovány pro dosažení vibrace na slyšitelném kmitočtu. Mohou být umístěny na jedné destičce nebo na obou současně. Pokud není vadný třmen, je opotřebení obvykle rovnoměrné, takže i jeden indikátor je spolehlivý.

Jako elektrický indikátor opotřebení se užívají dva typy:

- Nejjednodušší formou je jednoduchý drát zapuštěný do okraje destičky. Dotyk s brzdovým kotoučem sepne okruh s uzemněním vozu a zapne varovné světlo na palubní desce vozu. Konec vodiče je běžně izolován, aby se předešlo vodivému propojení prostřednictvím polokovového materiálu.

- Alternativní konstrukce používají dvojitý drát, který tvoří obvod kolem plastového jádra připojeného buď k okraji destičky nebo zapuštěného skrz opěrnou desku do třecího materiálu. Pokud dojde k přerušení drátu, potom vada bude signalizována na přístrojové desce vozu.

3.2.1 Materiálové složení třecích segmentů

Třecí materiál je kompozit. Stejně jako většina ostatních kompozitů je brzdové obložení složeno ze základní matrice a výstuže.

Obložení můžeme rozdělit do několika skupin podle použitého materiálu:

- organické
- kovové
- kovokeramické

Základ organických oblažení tvoří kaučuk a pryskyřice. Pro zpevnění této matrice jsou přidávány vláknité materiály na bázi skla, oceli, celulózy či vlákna uhlíková. Nevýhodou organických destiček bývá jejich nízká životnost v porovnání s ostatními druhy.

Kovové materiály - v základní železné, bronzové nebo mosazné matici mívají rozloženy jemnější kovové třecí přísady (Pb, Cu, Bi).

Kovokeramický třecí materiál – základní matrice je stejná jako u kovových třecích segmentů. Obsahují hrubší nekovové třecí přísady jako křemenný prach, karbid křemíku apod. Aby bylo zabráněno zadření, přidává se grafit.

Další složkou třecího segmentu jsou plnidla. Jako plnidla slouží materiály, které jsou schopné snížit cenu dílu a současně udržet frikční vlastnosti matrice. Těmto požadavkům vyhovují: baryt (BaSO_4), magnetit (Fe_3O_4), hematit (Fe_2O_3), oxidy vápníku, oxidy hořčíku, uhlíkové materiály a jiné.

Literatura ke kapitole 3: [1], [4], [15], [16], [17] [18]

4 Degradace brzdových kotoučů

V průběhu brzdění je brzdový kotouč vystaven velkému tepelnému zatížení. V situacích intenzivního brzdění je tepelné zatížení ještě znásobeno. V takovém případě je kotouč ve zlomku sekundy ohřát až na teplotu 900°C. Tyto velké teplotní výkyvy mají dva možné důsledky:

- plastické zdeformování kotouče
- vznik trhlin na povrchu kotouče

V následující části je uveden příklad degradace brzdového kotouče. Jde o brzdový kotouč ze zadní nápravy zájezdového autobusu SETRA 328 DT firmy CZAD Praha.

Závada na brzdovém kotouči se většinou pozná při jejich kontrole. V případě „našeho“ brzdového kotouče se závada objevila již při jízdě. Dle zprostředkovaných informací měl první indicie o neobvyklém chování brzd řidič autobusu při návratu z jižní Evropy. Během brzdění na dálnici se měly ozývat zvuky v oblasti zadní nápravy. Při zkušební jízdě, kdy měl být identifikován zdroj hluku, zkušební technik prudce sešlápl brzdový pedál. Tak rychlý nárůst brzdné síly kotouč nevydržel a došlo k jeho totálnímu zničení.



Obr. 4.1: SETRA 328 DT [26]

K určení příčiny degradace tohoto brzdového kotouče byl použit metalografický rozbor vnitřní stavby s následným porovnáním a hodnocením.

Vizuální popis kotouče

Brzdový kotouč je „rozpadlý“ na několik kusů. Třetí část kotouče je rozlomena na tři části. Další oddělenou částí je prstenec, kterým je přichycen brzdový kotouč k náboji kola.

Na kotouči jsou patrné praskliny po celé ploše. Na první pohled je však zřejmý rozdíl ve velikosti trhlin na vnější straně kotouče (myšleno na straně kotouče odvrácené od středu autobusu) a na vnitřní straně kotouče (blíže ke středu vozidla). Zatímco na vnitřní straně jsou trhliny vlasové a trhliny o malé šířce, jejichž délka je kolem 20mm, na vnější

straně se objevují trhliny o šířce až několik milimetrů. Tyto trhliny začínají na vnějším obvodu kotouče a pokračují až skoro ke vnitřnímu obvodu kotouče.

V dalším popisu bude vnější strana kotouče označována jako strana „1“, vnitřní strana bude označována „2“.



Obr. 4.2: Rozlomený brzdový kotouč a detail trhlín na jeho povrchu (dole)



4.1 Příprava vzorků pro metalografii

Odběr zkušebních vzorků

Aby odebraný vzorek plně charakterizoval zkoumaný materiál, je potřeba před vlastním odběrem uvážit, co bude v mikrostruktúře sledováno, v kterém místě a jakým způsobem bude oddělen a jak bude vzhledem k celé součásti orientována pozorovaná rovina.

Z kotouče byly odebrány dva vzorky. Jeden z vnější strany (vzorek {1}), druhý ze strany „2“ (vzorek {2}). Aby byly dobře pozorovatelné hloubky trhlín, a zároveň aby vzorky charakterizovaly celý díl, jsou vzorky vyřezány tak, jak je vidět z fotografie.



Obr. 4.3: Místo, ve kterém byly vzorky vyřezány

Vzorky byly vyřezány na pásové pile k řezání kovů. Jelikož při řezání vzniká teplo, které by mohlo ovlivnit strukturu materiálu, bylo nutné, aby byl vzorek po celou dobu řezání chlazen.

Vzhledem k tomu, že naše vzorky jsou dostatečně velké, nebylo nutné odřezané části zalévat do dentakrylu.

Broušení vzorků

Po odřezání části kotouče se plochy určené k pozorování vyrovnávali hrubým broušením pomocí brusného kotouče. Minimalizovala se tak povrchová nerovnost vzniklá při řezání. I při této úpravě povrchu je nutné, aby se vzorky nadměrně nevyhřívaly.

Po hrubém broušení následovalo broušení pozorovaných ploch sérií brusných metalografických papírů. Bylo použito celkem 5 papírů s různou zrnitostí. Při broušení se vzorek zlehka přitlačuje na rotující kotouč s brusným papírem. Na kotouč je puštěna voda – pro lepší chlazení a odplavování nečistot. Jakmile byla sledovaná plocha vyhlazena nejhrubším brusným papírem zrnitosti 60, následoval stejný proces na kotoučích s menší zrnitostí – postupně 120, 240, 600 a 1000. Broušení na jednom papíru je ukončeno, když zmizí všechny rýhy po předchozím zpracování. Mezi jednotlivými přechody je důležité opláchnutí vzorků vodou, aby se odstranily zbytky brusiva z předchozího broušení.

Při broušení je třeba dodržet rovinnost broušené plochy, neboť zaoblení plochy výbrusu se negativně projevuje při pozorování pod mikroskopem.

Leštění

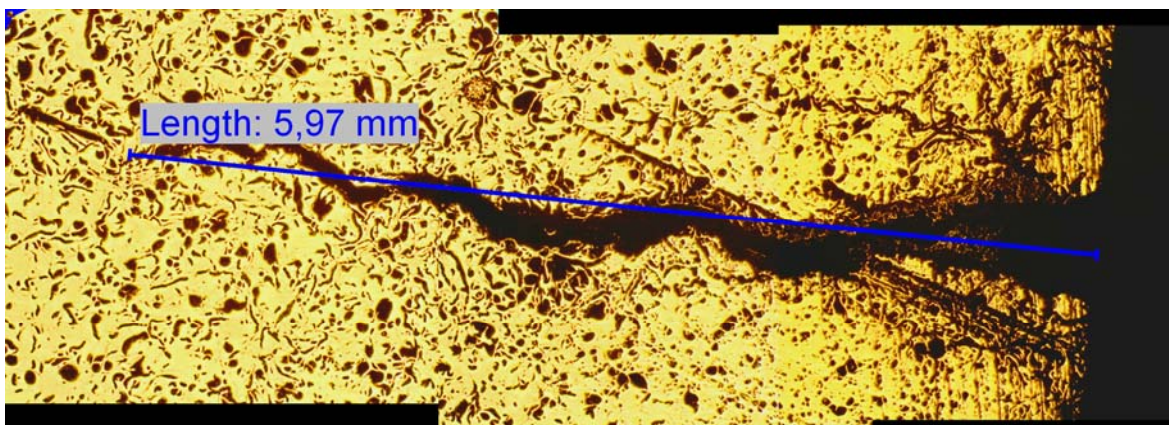
Vybroušený vzorek se zbaví zbytků brusiva a leští se. Leštěním se dosáhne kvalitní rovný zrcadlový povrch, zmizí rýhy po posledním nejjemnějším broušení. Leštěním není odebírán materiál vzorku, dochází pouze ke srovnání reliéfu povrchu.

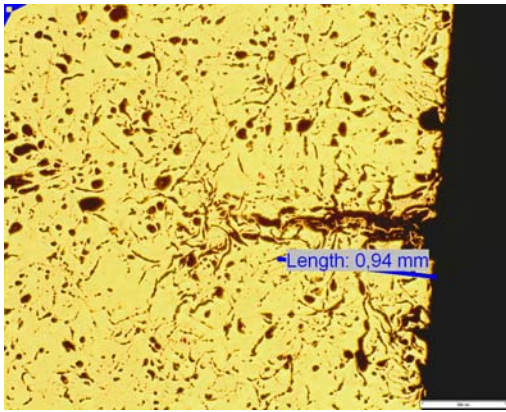
Leštění se provádí na stejném zařízení jako broušení. Místo kotouče s brusným papírem je v zařízení umístěn kotouč se speciální tkaninou. Jako leštící prostředek je použita diamantová pasta. Při leštění se vzorkem otáčí a pohybuje všemi směry, aby nedošlo k jednosměrnému natváření povrchové vrstvičky výbrusu. Kotouč je vlhčen denaturovaným lihem. Zabráni se tím korozi vzorku. Zároveň je tím zabráněno vyhřívání vzorku a nadměrnému ničení podkladu.

Po ukončení leštění jsou vzorky opláchnuty lihem. Odstraní se tak nečistoty a zbytky leštící pasty. Poté se nechají vzorky usušit.

4.2 Vyhodnocení metalografie

Na takto připravených vzorcích jsou pod optickým mikroskopem vidět rozdíly v hloubce trhlin. Zatímco největší pozorovaná trhlina na vzorku {2} je hluboká max 1mm, na vzorku {1} se vyskytují trhliny několikanásobně větší.

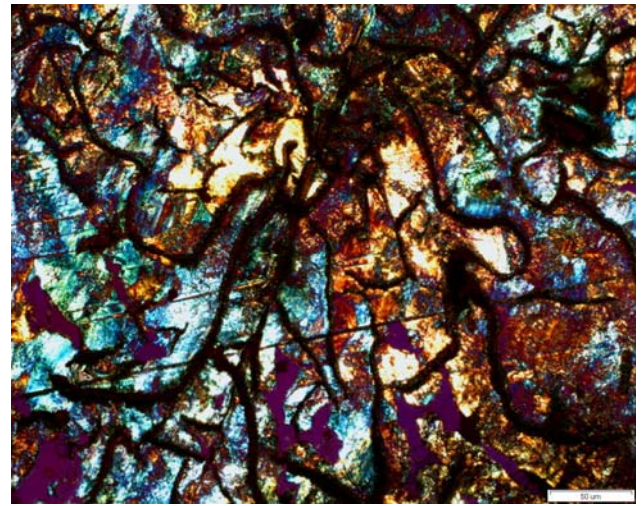
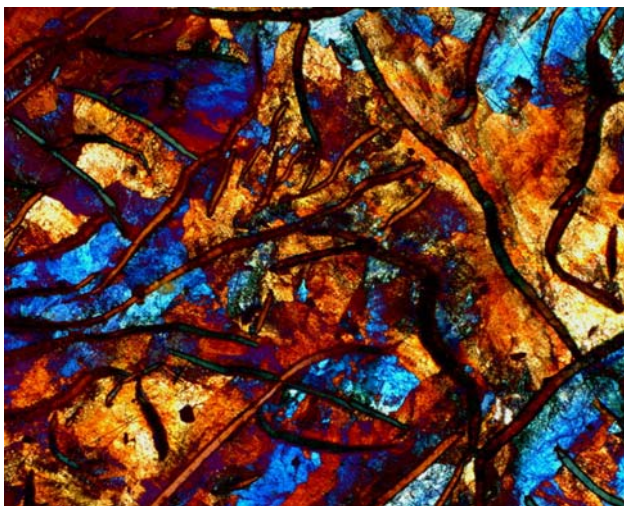




Obr. 4.4: Trhlina na vnější straně kotouče {1} (na str.21) a trhlina na straně vnitřní {2} (vlevo). Zvětšení 32x.

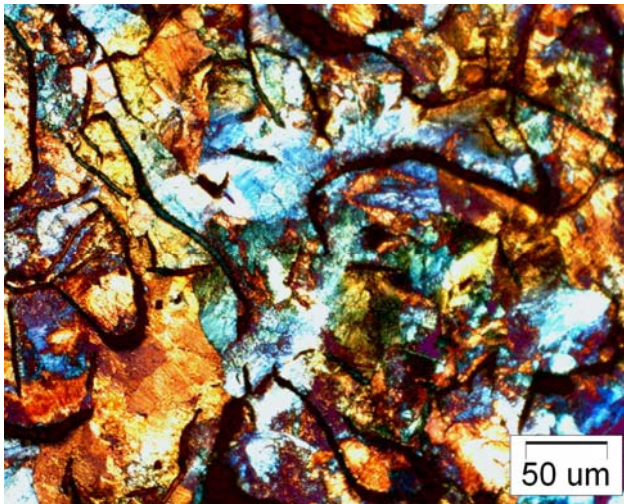
Vlastní materiál se z těchto obrázků v ničem nijak zvlášť neliší. Na obou je vidět lamelární grafit typický pro šedou litinu. Pro zviditelnění struktury kovové matrice se vzorky leptají. Jako leptadlo je použit roztok HNO_3 v etylalkoholu.

Na následujících fotografiích je zviditelněná struktura materiálu na naleptaných vzorcích nasvícených polarizovaným světlem.

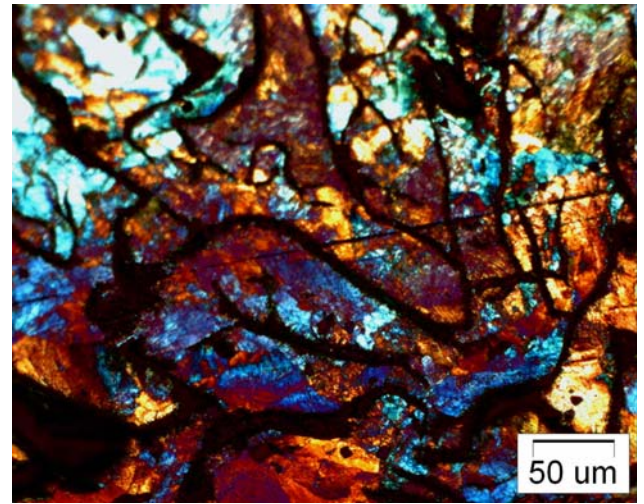


Obr. 4.5: Vzorek {1}- jádro materiálu

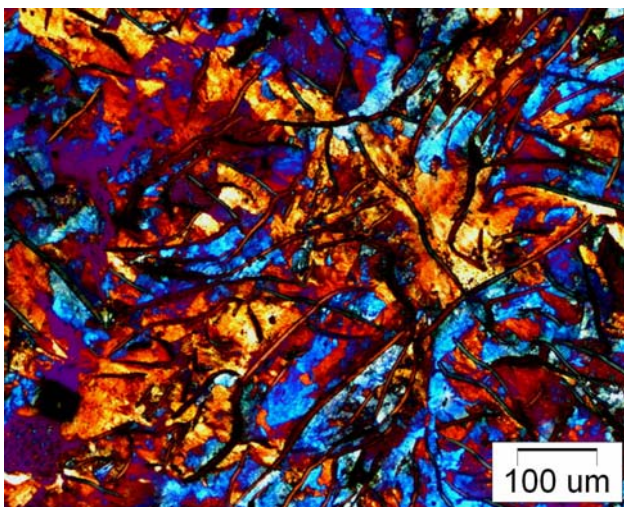
povrch (250x zvětšení)



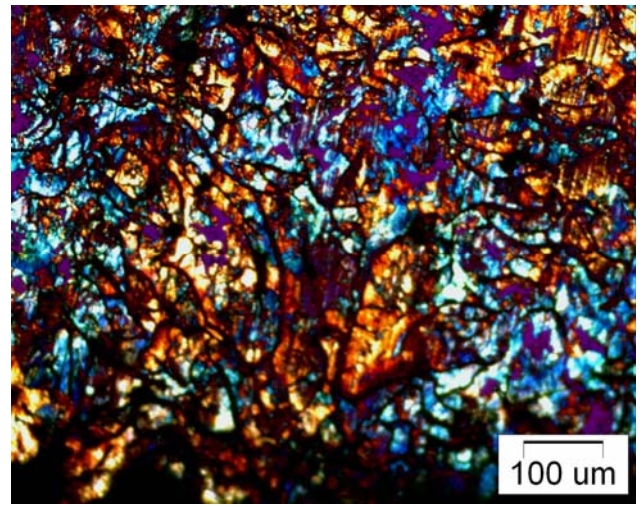
Obr. 4.6: Vzorek {2}- jádro materiálu



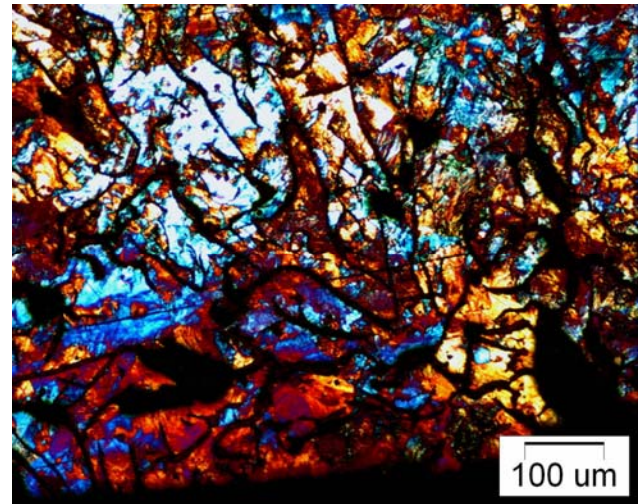
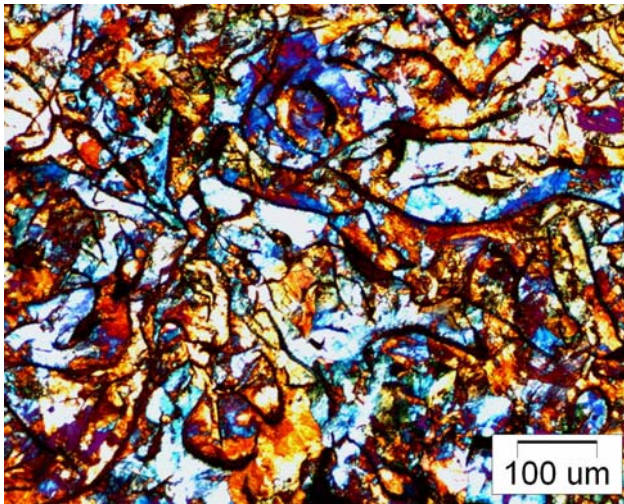
povrch (250x zvětšení)



Obr. 4.7: Vzorek {1}- jádro materiálu



povrch (125x zvětšení)



Obr. 4.8: Vzorek{2}- jádro materiálu

povrch (125x zvětšení)

Když máme snímky vedle sebe, jsou z nich patrné odlišnosti ve vzorcích {1} a {2}. Jedná se zejména o velikosti zrn perlitické matrice. Zatímco na vzorku {2} jsou velikosti zrn u povrchu kotouče i v jádru materiálu podobná, na {1} jsou vidět rozdíly. Struktura materiálu v jádru vzorku {1} se moc neodlišuje od {2}. Při povrchu jsou však zrna viditelně menší.

4.3 Elektronová mikroskopie

Z důvodů zjištění příčin únavových lomů na kotouči byl vzorek zkoumán pod elektronovým mikroskopem. Na optickém mikroskopu použitým pro světelné metalografické pozorování není možné zkoumat povrch lomu hned z několika důvodů. Prvním důvodem je nedostatečná rozlišovací schopnost optického mikroskopu, která je dána zejména relativně velkou vlnovou délkou světla. Dalším faktorem, pro náš případ hlavním důvodem použití elektronového mikroskopu, je nemožnost pozorování plastické struktury lomu. Optický mikroskop má malou hloubku ostrosti, lze na něm pozorovat jen zaostřenou hladinu, hladiny před a za ní jsou rozostřené. Elektronový mikroskop tuto nevýhodu eliminuje.

Skenovací elektronový mikroskop (řádkovací či rastrovací) používá k vytvoření obrazu od povrchu vzorku zpětně odražené primární elektrony vyzářené elektrodou a sekundární elektrony vytvořené interakcí atomů vzorku s elektrony elektronového paprsku. Tyto elektrony jsou přijímány detektorem a zpracovány tak, že obdržíme ostrý obraz povrchu vzorku. K mikroskopu lze připojit zařízení k analýze složení zkoumaných vzorků

– v našem případě energiově disperzní analyzátor (EDX). Pro naši potřebu - pozorování lomové plochy - však nebyl zapotřebí.

Princip skenovacího elektronového mikroskopu

Vakovým válcem jsou z wolframového vlákna - katody - emitovány elektrony. Poté jsou směřovány Wehneltovým válcem a urychlovány kruhovou anodou. Mezi skupinou wolframová katoda – Wehneltův válec a anodou se nachází místo překřížení drah elektronů, tzv. crossover. Pod tím se nacházejí tzv. kondenzátorové čočky, což jsou cívky vyvolávající magnetické pole, které soustřeďují elektronový paprsek. Pak paprsek prochází otvorovou clonou tvořenou tenkým plíškem s otvorem uprostřed. Ta má vliv na rozlišovací schopnost mikroskopu. Na konci válce je umístěna objektivová čočka. Tou jsou elektrony usměrněny tak, aby dopadaly do velmi malého prostoru na povrchu vzorku. Objektivová čočka obsahuje vychylovací cívky, které zaručují, že elektronový paprsek rastruje vzorek – povrch je zkoumán po řádcích a bod po bodu. Každému zkoumanému bodu vzorku odpovídá bod na obrazovce. Obraz poskytují detektorem zaznamenané zpětně odražené a sekundární elektrony.

Příprava a vyhodnocení vzorku

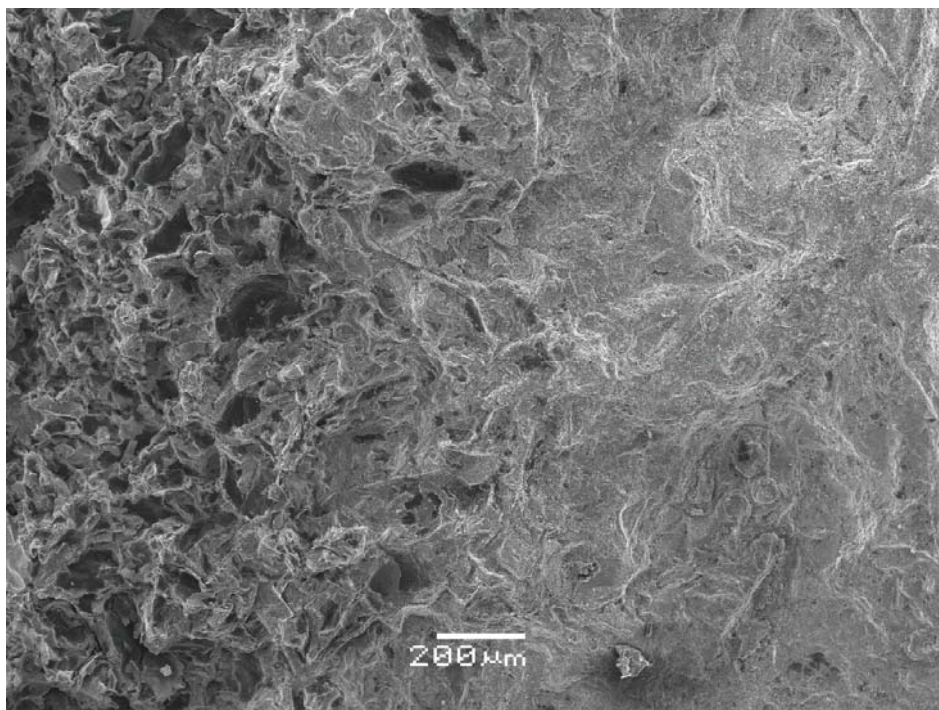
Vzorek byl vyříznut obdobným způsobem jako vzorek pro metalografické pozorování. Poté byl vyříznutý kus z vnitřní části kotouče uchycen do svěráku a úderem kladiva byla jeho část oddělena. Vznikl tak vzorek částečně s plochou původní trhliny a s plochou křehkého dolomu.



Obr. 4.9: Skenovací elektronový mikroskop JEOL JSM-5500LV s počítačovým příslušenstvím

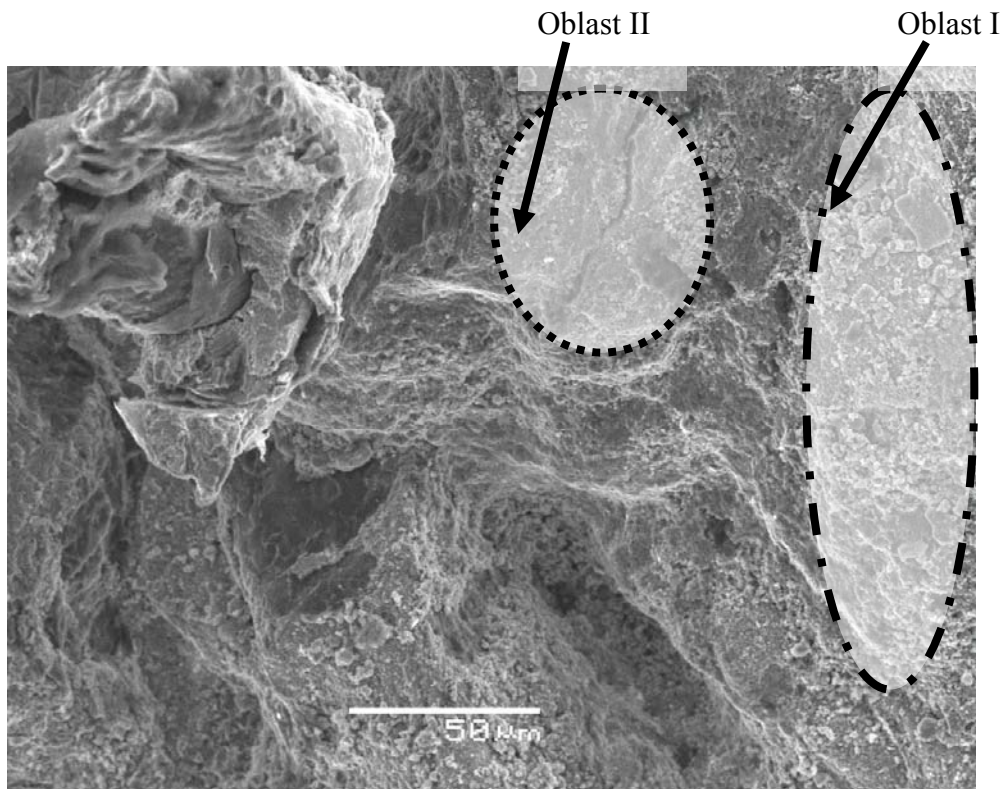
Takto vytvořený vzorek byl pozorován na elektronovém mikroskopu JEOL JSM-5500LV.

Na obrázku 4.10 je zobrazeno místo špice trhliny. Na jeho pravé části je viditelné houževnaté porušení charakterizováno intenzivní plastickou deformací. Ta se projevuje tvárným a houževnatým porušením, tedy stabilním růstem trhliny. Tyto plastické deformace zrn jsou typické pro únavové opotřebení. Deformace zrn vznikají při jejich otláčení v důsledku velkých tlaků na materiál vyvolaný brzdovým obložení při brzdění.



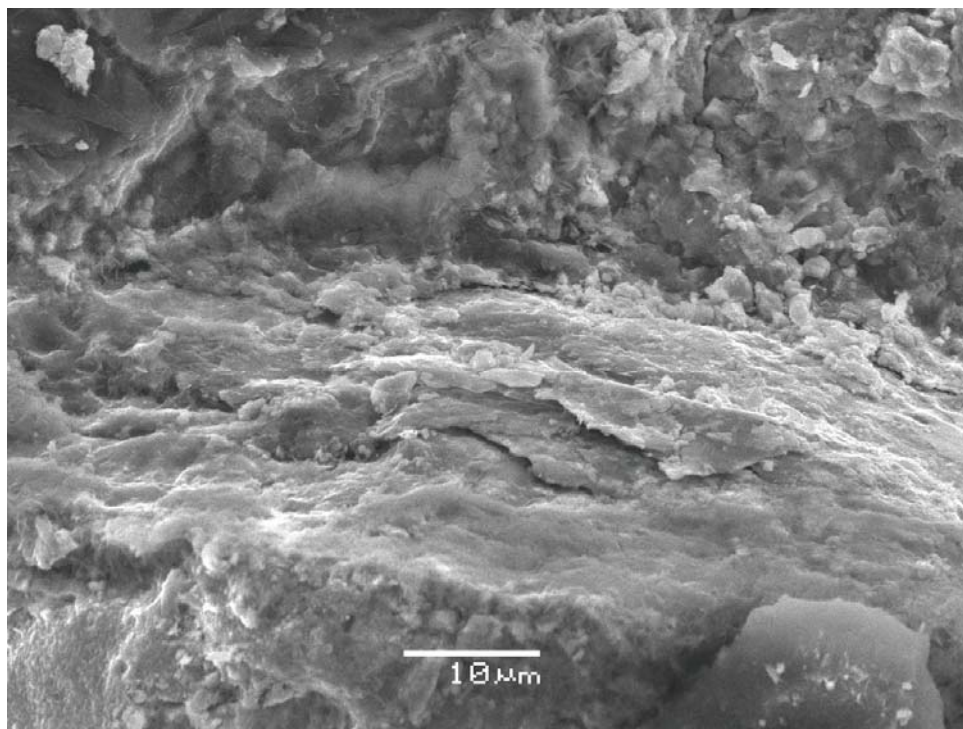
Obr. 4.10: Přejít mezi trhlinou a dolomem

Na levé části snímku 4.10 z elektronového mikroskopu je viditelné křehké porušení materiálu vzniklé při přípravě vzorku. Křehké porušení je charakterizováno rychlým – nestabilním rozvojem křehké trhliny a pouze v mikro-objemech lokální plastickou deformací.



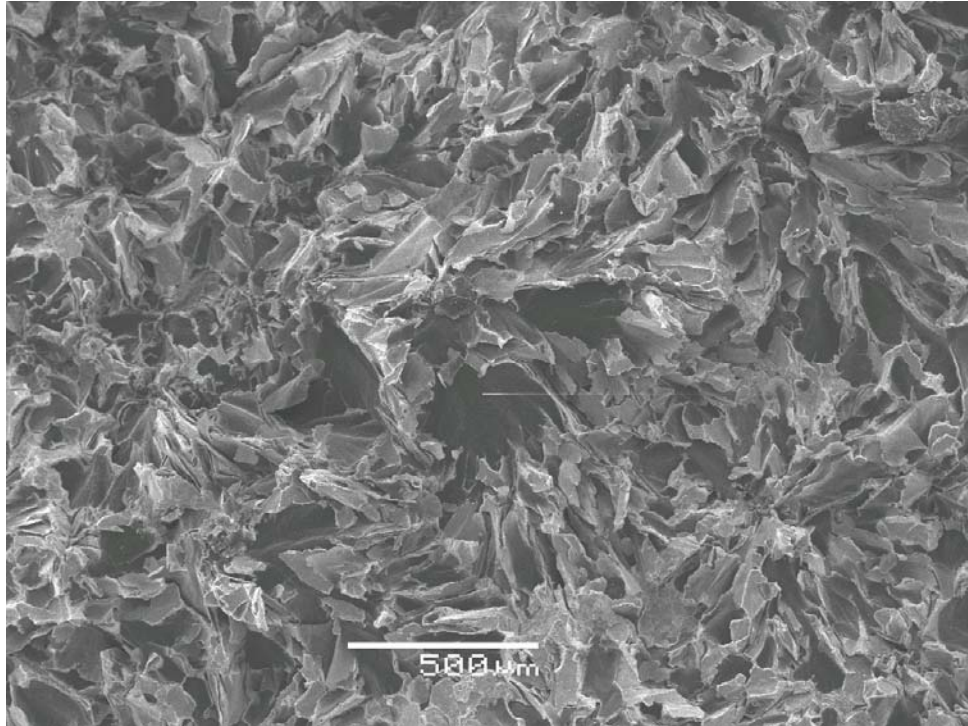
Obr. 4.11: Přibližný povrch trhliny s příznaky koroze

Po přiblížení oblasti stabilního růstu trhliny je kromě plastických deformací zřejmá koroze. V oblasti I jsou se objevují oxidy železa vzniklé elektrochemickou reakcí. V oblasti II se podél rozhraní zrn vyskytuje koroze interkrystalická.



Obr. 4.12: Detail interkrystalické koroze podél hranic zrn

Degradace brzdných segmentů užitkových vozidel a autobusů v závislosti na podmínkách jejich provozování



Obr. 4.13: *Fraktografický snímek křehkého štěpení – tento povrch vznikl při přípravě vzorku*

Křehké štěpení (Obr. 4.13) reprezentuje rozvoj rychlých trhlin, které vznikly při přípravě vzorku. Plochou křehkého štěpení – porušení – je plocha (klín) mezi dvěma plochami oddělujícími se atomů. Křehké štěpení je charakterizováno trans-krytalickými štěpnými lomy (lomy probíhající přes zrna).

4.4 Terore vzniku a šíření únavových trhlin

Únava materiálu je podstatně nebezpečnější než klidné statické namáhání, jelikož statické zatížení snáší materiál bez podstatnějších změn a poškození, avšak v průběhu opakované cyklické zátěže dochází v dílu ke kumulaci plastické deformace. Ta se poté projevuje růstem trhliny a únavovým lomem. Únava materiálu je proces změn strukturního stavu materiálu a jeho vlastností vyvolaných cyklickým zatěžováním, přičemž nejvyšší napětí je menší než mez pevnosti a ve většině případů i menší než mez kluzu.

Působením proměnných sil na materiál dochází ke změnám jeho mechanických vlastností, jako mez kluzu, mez pevnosti, mez únavy či modulu pružnosti. Proměnná zatížení mohou taktéž vyvolat zrychlené stárnutí kovů. Rozsah změn je odvislý od velikosti amplitudy, počtu cyklů, druhu a stavu materiálu a na druhu zátěžného napětí.

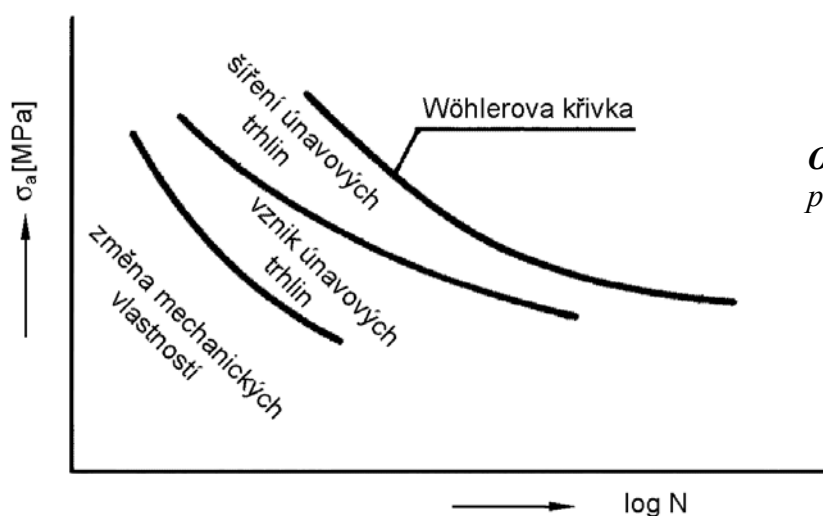
Podstatný vliv na mechanické vlastnosti má cyklus tah-tlak, při němž se maximální napětí vyskytují v celém průřezu a které ovlivní velikost zvýšení meze kluzu a pevnosti až o několik desítek procent za současného poklesu tažnosti a kontrakce.

Únava se řídí určitými zákonitostmi mikroskopických a makroskopických procesů v daném materiálu v závislosti od velikosti amplitudy napětí, stavu napjatosti, od agresivity obklopujícího prostředí a zejména od počtu zátěžných cyklů. Rozhodujícím faktorem je velikost plastické deformace, kdy mnohonásobně opakované, i jen velmi malé deformace vyvolává následné změny ve struktuře a tím i změny mechanických vlastností. Při zatížení tělesa ve směru jeho osy dojde v průřezu k lokální změně v rozdělení napětí a deformací. Nejvýrazněji se tento jev projeví na povrchu, tedy v místech vlivů vrubů, koncentraci napětí a deformací. Napjatost ve vrubu je trojosá, vlivem čehož vznikají mikroplastické deformace při cyklickém zatěžování právě zde a které podmiňují rozvoj dalšího únavového porušení.

4.4.1 Stádia únavového procesu

Podle druhu nevratných fyzikálních a chemických změn, vlivem proměnných zatížení způsobující plastickou deformaci, se proces únavy materiálu sestává ze tří časových stádií, která nejsou ostře ohraničena, ale časově se překrývají.

- Změny mechanických vlastností
- Stadium iniciace trhliny
- Stadium šíření trhliny



Obr. 4.14: Stádia únavového procesu

Během prvního stádia dochází v materiálu jak ke změnám v hustotě a rozložení dislokací a cizích částic, tak i ke změnám morfologie.

Charakteristickým znakem kovů s kubickou prostorově orientovanou mřížkou je silná závislost deformačního napětí na teplotě a na rychlosti deformace.

Rozhodujícím mechanismem změn struktur je pohyb dislokací. V nedeformovaném stavu je struktura charakteristická jejich malou hustotou. Při malé plastické deformaci, již po poměrně malém počtu cyklů, dochází k výraznému vzrůstu hustoty dislokací, přičemž jsou uspořádány víceméně homogenně. Poté se dislokace začínají shlukovat do pásů.

Následkem plastické deformace tělesa posléze vznikají jak na povrchu, tak i uvnitř tělesa, skluzová pásma, která se vyvíjejí přednostně ve vhodně orientovaných zrnech. Jejich pohyb je blokován hranicemi, které představují bariéry působící proti dalšímu postupu.

4.4.2 Stádium nukleace únavových trhlin

Nukleace únavových trhlin u homogenního materiálu probíhá vždy na volném povrchu, neboť i při zatěžování hladkých součástí v podmínkách jednoosé napjatosti je zpravidla nutno připustit jistou excentricitu zátěžné síly, která vede ke zvýšení skutečného napětí v povrchové vrstvě, vlivem vzniku jistého ohybového napětí na povrchu. Svoji funkci zde hrají i mikroskopické koncentrátoři (kořeny vrubů), neboť povrch není nikdy ideálně hladký a navíc hladina napětí na povrchu je více citlivá na povrchovou topografii. Další faktor přistupuje u nehomogenních materiálů, jež obsahují částice jiné fáze (s odlišnými elastickými vlastnostmi) které působí taktéž jako koncentrátoři napětí. Koncentrace napětí je vždy vyšší na povrchu než uvnitř materiálu. Z toho vyplývá, že částice jiné fáze na povrchu indikují vyšší koncentraci napětí, než tytéž částice uvnitř materiálu.

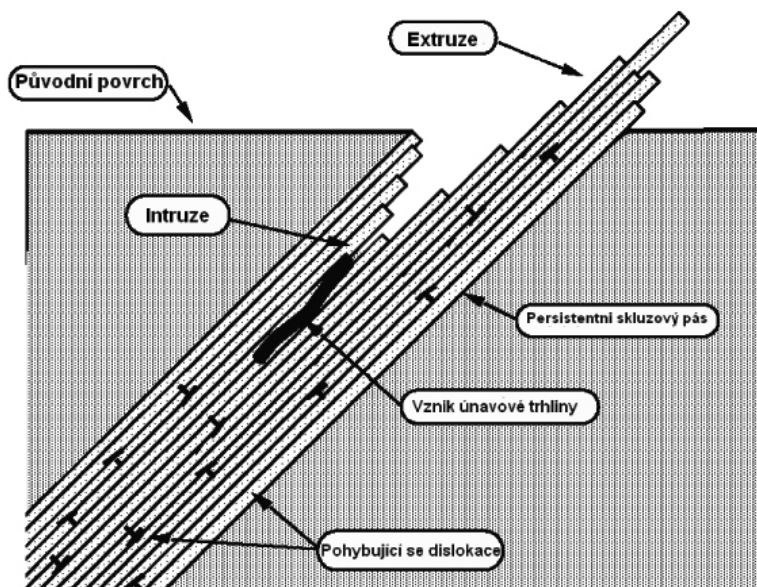
V současnosti se uvažují tři možná místa vzniku trhlin na povrchu:

- Únavová skluzová pásma (nejčastější možnost pro vznik trhlin)
- Hranice zrn, jež se uplatňuje při vysokých amplitudách a za zvýšených teplot
- Rozhraní mezi základním materiálem (matricí) a příměsemi

Na povrchu cyklicky zatěžovaného tělesa se s narůstajícím počtem cyklů postupně vytvářejí skluzová pásma, jejichž četnost a hustota roste s přibývajícím cykly. Základní typ nukleace je právě v těchto perzistentních skluzových pásmech (místech zvýšené aktivity dislokací), s tím, že vlastní nukleace na hranicích zrn či na rozhraní mezi příměsemi a maticí zpravidla předchází postupná tvorba únavových skluzových pásem.

K nukleaci dochází na povrchu z důvodů, že zde probíhají skluzové procesy vedoucí ke konečnému vzniku povrchového reliéfu, který má vrubový účinek. To vede k další koncentraci napětí a následně mikrotrhliny vzniknou právě tam, kde je maximální skluzová aktivita, která je podporována rostoucím vrubovým účinkem právě na rozhraní volného povrchu a únavového skluzového pásu. Následný povrchový reliéf je tvořen:

- Extruzemi (pohořími) – částmi vystupujícími nad povrch
- Intruzemi (údolími) – částmi vyskytující se pod původním povrchem, kde jsou zejména patrné vrubové účinky.



Obr. 4.15: Schéma vzniku a růstu skluzových pásem

Tvorba pásem začíná zpravidla na konci prvního stadia únavového procesu. Prvé vznikající mikrotrhliny jsou pozorovány vždy v povrchových intruzích. Tento jev platí obecně bez ohledu na typ materiálu. Je tedy zřejmé, že o vlastní nukleaci trhliny rozhoduje vrubový účinek intruze. Úloha skluzových procesů proto spočívá především ve vytvoření tohoto vrubu.

Počet mikrotrhlin, které vznikají v průběhu cyklického zatěžování na povrchu vzorku je zpravidla velký, avšak jen některé z nich se v následujícím procesu šíří. Po dosažení určité velikosti se zpravidla v dané oblasti šíří už jen jedna – magistralní trhlina.

4.4.3 Stádium šíření trhliny

Trhliny vzniklé v minulém stadiu nebo trhliny již existující, tzv. apriorní, se v tomto stadiu začínají šířit podle zákonitostí lomové mechaniky. Jejich vlastnosti jsou funkcí podmínek v kritickém objemu kovu v kořeni trhliny, kde je vysoká koncentrace cyklické plastické deformace, která určuje podmínky šíření a zastavení trhlin za daných podmínek. Trhliny leží podél aktivních skluzových rovin, v níž je maximální smykové napětí. V průběhu dalšího cyklického zatěžování se trhliny propojují a rostou do hloubky. Většina se však posléze zastavuje a jen malá část postupuje do hloubky větší jak desítky mikronů. S narůstající délkou se trhliny při dalším postupu odchylují od roviny hlavního skluzového systému a stáčí se do roviny kolmé na vektor hlavního napětí a na jejich čele se vytváří plastická zóna, vznikající účinkem vysoké lokální koncentrace napětí. Tento proces šíření se označuje jako proces přechodu z krystalografického (1. etapy) do nekrystalografického (2. etapy) šíření trhliny. V této etapě se již šíří jen jedna - magistralní trhlina. Pro krystalografické šíření v první etapě je zřejmě rozhodující smyková složka napětí ležící v rovině trhliny. Nekrystalografické šíření, v druhé etapě, je naopak řízeno normálovým napětím. V obou případech se trhlina šíří zpravidla transkrystalicky. Délka trhliny příslušející jednotlivým stádiím, při níž dochází k přechodu do druhé etapy šíření, závisí především na druhu materiálu a amplitudě zatěžování. Zpravidla však není větší jak několik desetin milimetrů. Primární únavové trhlinky jsou velmi jemné a proto i těžko detekovatelné.

Při zatížení do tahu dochází na špičce trhliny k výrazné plasticky lokalizované deformaci a otupování špice. Při dalším růstu napětí se trhlina dále otevírá a špice se více zaobljuje. Při odlehčení vnějšího napětí dojde k přiblížení obou částí trhlin k sobě. Nový povrch vytvořený během tahového zatížení není plně vrácen do původní polohy. Úplné odlehčení a zatížení do tlaku vede k vrácení do původní konfigurace, avšak s tím, že délka trhliny se zvětšila. V tlakovém půlcyklu je trhlina uzavřena a k dalšímu opakování procesu šíření dojde v následujícím tahovém půlcyklu. Tento mechanismus opakovaného otupování a zaostřování špice trhliny je obecným modelem šíření únavové trhliny.

Tento proces šíření trhlin je podporován oxidací, kde dochází na nově vzniknuvší površích okamžitě ke vzniku oxidické vrstvy, která zabrání znovunavázání atomových vazeb.

Šíření trhlin, v druhé etapě končí lomem, resp. dolomením, které představuje výsledek oslabování nosného průřezu při šíření a vzrůstu nominálního napětí, které dosáhlo hodnot vedoucí ke kvazikřehkému lomu.

Alternativním mechanismem pro kovy s velmi obtížným příčným skluzem, kde proces otupování nemůže snadno probíhat je skluz celé části krystalu podél roviny trhliny, která je v této etapě totožná s aktivní rovinou skluzu. V tomto případě není k šíření zapotřebí normálové složky k rovině trhliny.

U materiálů křehkých a materiálů s inkluzemi, s částicemi jiných fází a jiných nehomogenit, nepopisuje představa opakovaného otupování špice trhliny proces dostatečně spolehlivě. V současnosti jsou dvě koncepce popisu šíření trhliny u reálných materiálů s omezeným stupněm tvárnosti:

- Koncepce předpokládající, že i u těchto materiálů je proces otupování a zaostřování dominantní, postupně však k němu přistupuje křehké porušení malých oblastí v každém zátěžném cyklu.
- Koncepce založená na představě vzniku trhlinek před čelem magistrální trhliny a náhlého kvazikřehkého roztržení materiálů propojením trhlinek.

4.4.4 Únavové lomy

Únavové pásmo lomu se vyvíjí tak dlouho, dokud je nepoškozená část průřezu schopna vydržet aplikované napětí. S pokračujícím růstem únavové trhliny se mění rozložení napětí v oblasti čela trhliny. To je doprovázeno značným vzrůstem koncentrace napětí a vzrůstem místní plastické deformace označované jako primární proces a spolu s tím probíhá proces sekundární, kdy dochází ke vzájemným dotekům povrchů vzniklých během lomu. Se zvětšováním délky defektu se postupně zvyšuje rychlost šíření, avšak až do dosažení kritické délky necelistvosti jde stále o stabilní růst trhliny.

Po dosažení kritické délky nastane závěrečné období označované jako dolomení, charakterizované rychlým nestabilním růstem a tato etapa končí štěpným lomem. Lom nastává zpravidla v rovinách, kde působí největší normálové (tahové) napětí, tj. kolmo ke směru šíření.

Z makroskopického hlediska lze vzhled lomové plochy rozčlenit na dvě části:

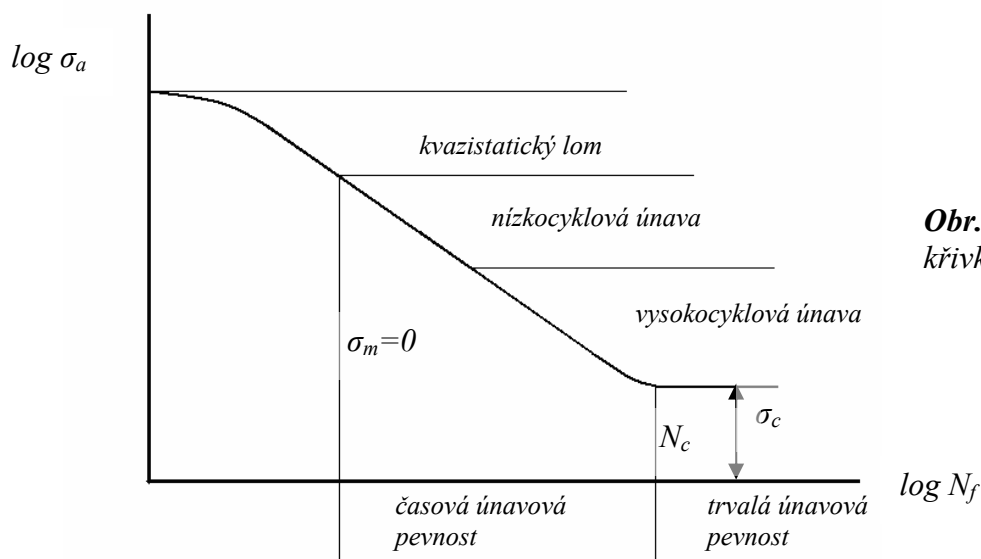
- Pásmo únavového rozrušení má charakteristický hladký povrch.
- Pásmo statického (zbytkového) dolomení

4.4.5 Křivky únavové životnosti

Pro posouzení únavových vlastností materiálů těles a konstrukcí slouží Wöhlerova křivka, která poskytuje informace o závislosti amplitudy napětí σ_a na počtu cyklů do lomu N_f . Její průběh se asymptoticky blíží k hodnotě označované jako mez únavy σ_c . Průběh křivky závisí na vlastnostech zkoušeného materiálu, přičemž společným rysem všech kovů je rostoucí počet cyklů do lomu s klesající amplitudou napětí.

Křivka životnosti se dělí na tři oblasti:

- Oblast kvazistatického lomu nebo dynamického tečení
- Oblast nízkocyklové únavy
- Oblast vysokocyklové únavy
 - oblast časované únavy
 - oblast trvalé únavové pevnosti



Obr. 4.16: Wöhlerova křivka

Přechod mezi vysokocyklovou a nízkocyklovou hodnotou únavy není jednoznačně definován. Obecně se za nízkocyklovou únavu uvažuje 10^2 až 10^4 cyklů. Při větším počtu cyklů hovoříme o vysokocyklové únavě.

K popisu chování materiálu v oblasti nízkocyklové únavy se používají Wöhlerova a Manson-Coffinova křivka. Manson-Coffinova křivka vyjadřuje závislost plastické deformace na počtu cyklů do lomu.

Křivky životnosti je možné popsat vztahy:

$$\sigma_a = \sigma_f \cdot (2N_f)^b$$

σ_f – součinitel únavové pevnosti,

b – součinitel únavové životnosti

$$\varepsilon_{ap} = \varepsilon_f \cdot (2N_f)^c$$

ε_{ap} – amplituda plastické deformace,

ε_f – součinitel únavové tažnosti

c – součinitel únavové životnosti daný sklonem přímky životnosti zobrazené v logaritmických souřadnicích

Tyto vztahy však platí jen pro symetrický zátěžný cyklus hladkých vzorků při homogenní napjatosti tah – tlak.

Z praktických důvodů se mezní stav při cyklickém zatěžování vyjadřuje amplitudou deformace, která se skládá jak z plastické tak i pružné složky. Tento požadavek respektuje, že amplituda plastické deformace je parametr, bez kterého proces v žádném z jeho stádií probíhat a vyjadřuje se křivkou životnosti $\varepsilon_{at} - N_f$.

Dle Mansona platí:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{ae} \cdot \varepsilon_{ap} = \frac{\sigma_a}{E} + \varepsilon_{ap} = \frac{\sigma_f}{E} \cdot (2N_f)^b + \varepsilon_f \cdot (2N_f)^c$$

ε_a – amplituda deformace

ε_{ae} – amplituda elastické deformace,

V oblasti vysokocyklové únavy převládá elastická složka deformace ε_{ae} , jež je až o dva řády vyšší než-li ε_{ap} . Z toho plyne, že pro oblast vysokocyklové únavy není Manson-Coffinova křivka použitelná. Únavové chování materiálů se popisuje Wöhlerovou křivkou, která se nejčastěji vyjadřuje v semilogaritmickém tvaru $\sigma_a - \log N_f$.

4.5 Odhad přitlačné síly brzdového obložení na brzdový kotouč

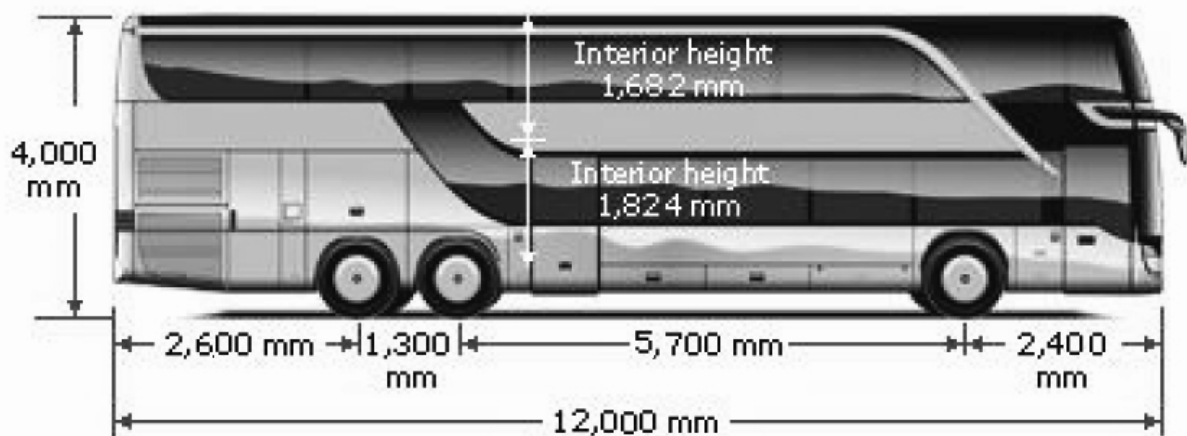
V této části práce je vypočítána síla, kterou působí brzdové obložení na kotouč při intenzivním brzdění. Základem výpočtu bylo určení všech sil působících na autobus při deceleraci. Do výpočtu je vneseno několik zjednodušení a odhadů, vycházejících zejména z neznalosti některých rozměrových parametrů autobusu. Všechna tyto zjednodušení jsou dále popsána.

Popis autobusu

Autobus SETRA S328 DT je třinápravový autobus. Rozměry a další potřebné údaje jsou uvedeny v tabulce.

Délka	12 m
přední převis	2,4 m
rozvor 1./2. náprava	5,7 m
rozvor 2./3. náprava	1,3 m
zadní převis	2,6 m
hmotnost	m_a 17160 kg
rozměr kola	315/80 R 22,5

Tab. 4.1: Hlavní rozměry a hmotnost vozu

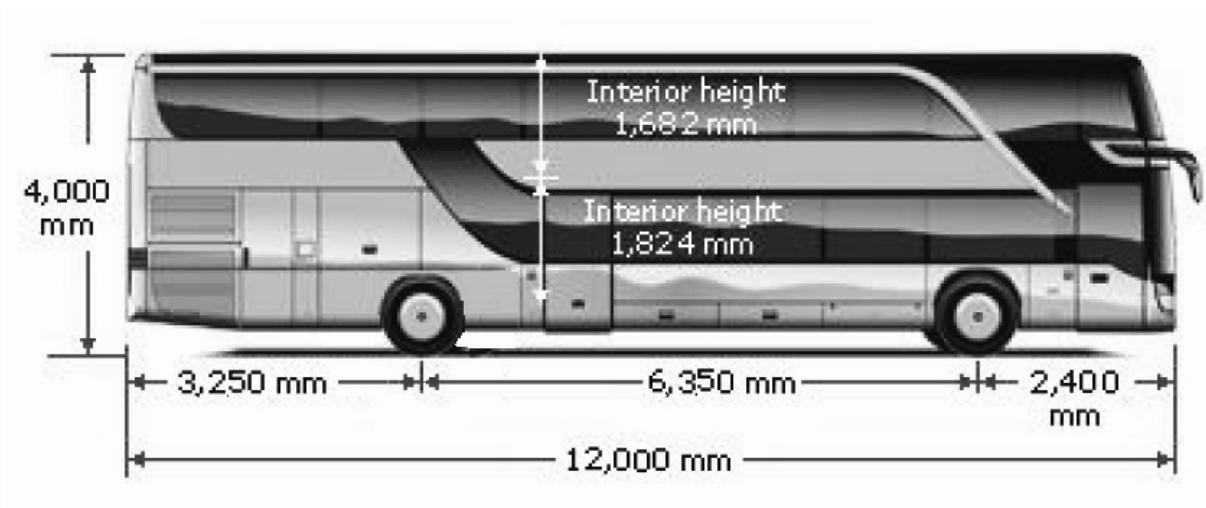


Obr. 4.17: Rozměry autobusu SETRA S328 DT

Pro zjednodušení výpočtu byly dvě zadní nápravy nahrazeny jednou nápravou. Při zachování délky autobusu se změnila délka rozvoru. V tabulce je dále odhadnuto zatížení na přední a zadní nápravu.

Zatížení přední nápravy	5000 kg
zatížení zadní nápravy	12160 kg
nový rozvor	6,35 m
nový zadní převis	3,25 m

Tab. 4.2: Hlavní rozměry a hodnoty zatížení náprav „upraveného“ autobusu



Obr. 4.18: Rozměry autobusu po zjednodušení

Výpočet délkové souřadnice těžiště:

$$l_1 = \frac{L \cdot m_2}{m_a} = \frac{6,35 \cdot 12160}{17160} = 4,5m$$

$$l_2 = \frac{L \cdot m_1}{m_a} = \frac{6,35 \cdot 5000}{17160} = 1,85m$$

Jelikož výškovou souřadnici těžiště lze určit jen experimentálně, byl tento rozměr zvolen takto:

výška těžiště: $h_T = 1,5m$

Dále bylo předpokládáno, že autobus jede rychlostí 72 km/h ze svahu s 5% klesáním. Od počátku brzdění až do úplného zastavení uplyne čas 7 sekund. Na autobus v okamžiku brzdění působí odporové síly, z nichž odpor valení a odpor vzduchu jsou ve srovnání s ostatními silami malé, proto s nimi dále nepočítáme. Dalšími silami působící na autobus jsou:

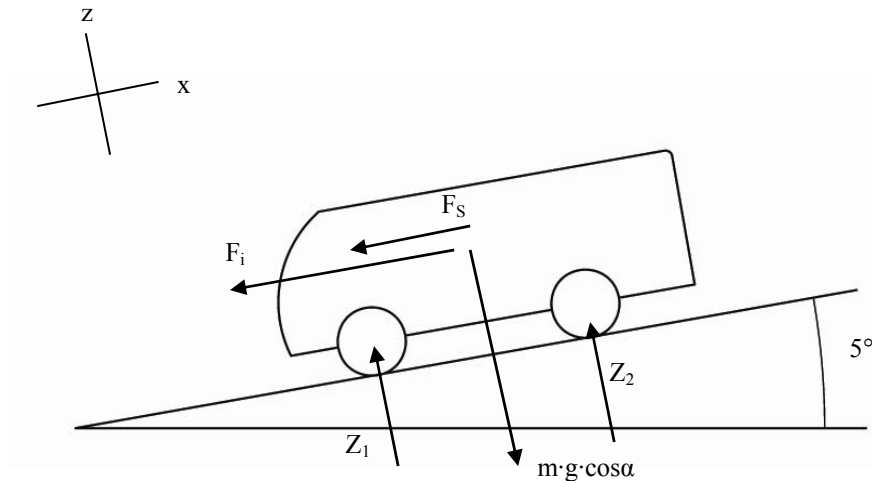
Setrvačná síla

$$F_i = m_a \cdot a \cdot \nu = m_a \cdot \frac{v}{t} \cdot \nu = 17160 \cdot \frac{20}{7} \cdot 1,4 = 68640N$$

kde ν je zvolený součinitel vlivu rotujících hmot ($\nu = 1,4$)

Složka tíhy ve sklonu svahu:

$$F_S = m_a \cdot g \cdot \sin \alpha = 17160 \cdot 9,81 \cdot \sin 2,86 = 8399N$$



Obr. 4.19: Síly působící na brzdící autobus

Vytvořená silová a momentová rovnováha:

$$\Sigma F_{iz}=0:$$

$$Z_1 + Z_2 - G_a \cdot \cos \alpha = 0$$

$$\Sigma M_1=0:$$

$$G_a \cdot \cos \alpha \cdot l_1 - F_s \cdot h_T - F_i \cdot h_T - Z_2 \cdot L = 0$$

$$Z_2 = \frac{G_a \cdot \cos \alpha \cdot l_1 - F_s \cdot h_T - F_i \cdot h_T}{L}$$

$$Z_2 = \frac{168339,6 \cdot \cos 2,86 \cdot 4,5 - 8399 \cdot 1,5 - 68640 \cdot 1,5}{6,35} = 100945 \text{ N}$$

Nyní můžeme určit reakci na přední nápravu \$Z_1\$:

$$Z_1 = G_a \cdot \cos \alpha - Z_2$$

$$Z_1 = 168339,6 \cdot \cos 2,86 - 100945 = 67181 \text{ N}$$

Celková brzdná síla:

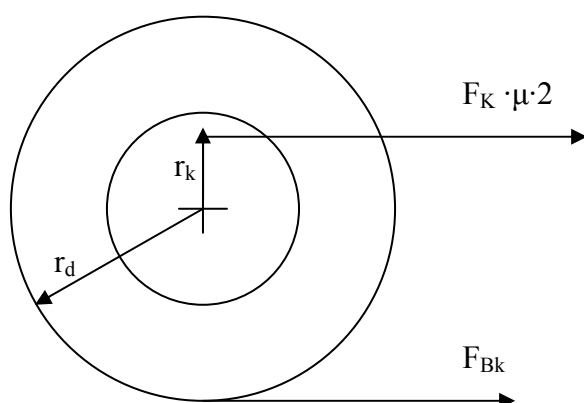
$$F_B = F_{B_1} + F_{B_2} = Z_1 \cdot \varphi + Z_2 \cdot \varphi$$

Součinitel adheze volím takto: $\varphi=0,8$, což odpovídá kvalitnímu asfaltovému povrchu.

$$F_B = F_{B_1} + F_{B_2} = 67181 \cdot 0,8 + 100945 \cdot 0,8 = 132500 N$$

Nyní máme určenou celkovou brzdou sílu autobusu F_B . V dalším kroku se zaměříme na výpočet síly, kterou působí brzdové obložení na brzdový kotouč. Budeme tuto sílu určovat na kole prostřední nápravy. Během brzdění se těžiště působením hmotnosti dynamicky přemísťuje dopředu a dochází ke klopení na přední nápravu. Aby nedocházelo k přetěžování brzdového systému na přední nápravě, je vozidlo vybaveno regulátorem brzdného tlaku. Předpokládejme, že regulátor rozděluje tlak na nápravy v poměru 40/30/30. Pro určení brzdné síly na kole F_{Bk} prostřední nápravy tak budeme počítat, že se jedno kolo podílí 15% na celkové brzdné síle autobusu.

$$F_{B_k} = 0,15 \cdot F_B = 0,15 \cdot 132500 = 19875 N$$



Obr. 4.20: Brzdná síla F_{Bk} ve styku kola s vozovkou a síla působící na kotouč

Z momentové rovnováhy na kole určíme sílu, kterou je stlačován brzdový kotouč.

Rozměry kola a kotouče:

Kolo: 315/80 R 22,5

Průměr ráfku: 22,5 in $\approx 0,5715$ m

Průměr kola: $2 \times 315 \cdot 0,8 + 0,5715 = 1,0755$ m

$r_d = 0,54$ m

Kotouč:

Vnější průměr: 430mm

Vnitřní průměr: 256mm

střední poloměr $r_K = 1/4 \cdot (0,43 + 0,256) = 0,1715\text{m}$

Jelikož působí na kotouč dvě síly (z obou stran kotouče), je ve výpočtu 2x. Za součinitel tření mezi brzdovým obložním a kotoučem volím $\mu=0,4$.

$$F_{B_k} \cdot r_d = 2 \cdot F_K \cdot \mu \cdot r_K$$

$$F_K = \frac{F_{B_k} \cdot r_d}{2 \cdot \mu \cdot r_K} = \frac{19875 \cdot 0,54}{2 \cdot 0,4 \cdot 0,1715} = 78225\text{N}$$

Brzdové obložení je ke kotouči přitlačováno přibližně silou 80kN.

4.6 Odhad životnosti brzdového kotouče

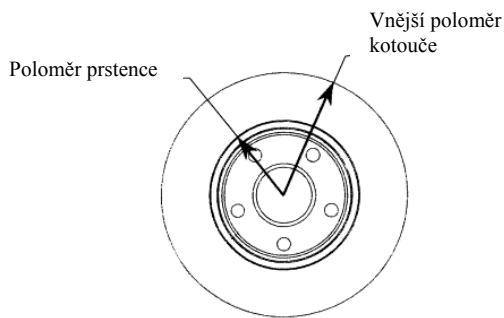
Pomocí Manson-Coffinova zákona provedl odhad životnosti brzdového kotouče Thomas J. Mackin ve své práci *Thermal cracking in disc brakem*. Autor vycházel z určení amplitudy deformace kotouče.

Omezený pohyb přišroubovaného prstence kotouče k náboji kola zabraňuje teplotní roztažnosti kotouče. Mezi prstencem a samotným kotoučem tak vzniká značné napětí.

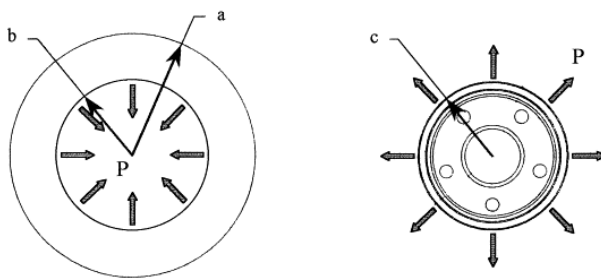
V případě možného pohybu by se kotouč volně roztahoval v množství:

$$\Delta b = b \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

Výsledné tepelné roztažení má za následek to, že elastické posunutí prstence je stejné jako vnitřní posunutí kotouče.



Obr. 4.21: Schéma brzdového kotouče: tlak který vzniká mezi prstencem a kotoučem



Dále autor pomocí metody konečných prvků zjistil teplotu, smykové a normálové napětí vyvolané v kotouči. Vykreslením těchto napětí do grafu podle von Misses byla získána závislost mezi ekvivalentním napětím a poloměrem kotouče. Z ekvivalentního napětí na poloměru zkoumaného kotouče získal autor amplitudu deformace. Po vykreslení křivky Manson-Coffinova zákona pomocí určených parametrů lze určit životnost materiálu.

Celý postup je v práci Thomase Mackina ukázán na příkladě brzdového kotouče automobilu Ford F-250 pickup. Z grafu Manson-Coffinovy závislosti byla získána hodnota 333 intenzivních brzdění, než dojde k porušení dílu. Jak ukázal experiment společnosti Ford Motor Company na stejném typu kotouče, k selhání dojde přibližně po 300 cyklech intenzivního brzdění.

Literatura ke kapitole 4: [5], [6], [7], [8], [9], [10], [19], [20], [21], [22], [23]

5 Geopolymery jako frikční materiál

Jako alternativa pro „běžné“ materiály používaných pro výrobu brzdového obložení se jeví geopolymery. V dosud provedených zkouškách vykazovaly tyto materiály dobré frikční vlastnosti.

Pod pojmem geopolymer se skrývají anorganické uměle vyrobené polymerní materiály, připravované reakcí hlinito-křemičitanových minerálů v zásaditém prostředí za normální teploty a tlaku. Tato reakce se označuje jako geopolymerizace. Jako zdroj primární suroviny vstupující do reakce lze s výhodou použít i řadu odpadních materiálů, které v mnoha případech mají značný dopad na životní prostředí (elektrárenské popílký, strusky z metalurgických procesů a jiné anorganické odpady) a lze je přeměnit na plnohodnotné geopolymerní materiály. Tyto nově vzniklé materiály lze pak uplatnit v mnoha odvětvích moderního průmyslu.

Geopolymery svými vlastnostmi připomínají přírodní kameny a při vhodném složení jsou na první pohled nerozeznatelné, svými atributy je však převyšují. Nabízejí velké množství modifikací a dosažení jedinečných kombinací vlastností, díky nimž lze materiál přizpůsobit dané konkrétnímu aplikaci. K vlastnostem geopolymerů patří zejména tyto:

- vysoká pevnost v tlaku
- odolnost vůči prostředí, jako jsou např. kyselá dešť
- odolnost vůči ohni a teplotám okolo 1000°C
- nerozpustnost ve vodě
- schopnost pevně uzavřít cizí materiál do své matrice

Značný je i ekologický přínos těchto materiálů, neboť v porovnání s nejhodněji používaným stavením materiálem jsou emise CO₂ i spotřeba energie pro aktivaci jílových materiálů značně nižší. Při použití odpadních materiálů, z elektrárenského nebo metalografického průmyslu, jsou pak emise CO₂ nulové. Oproti tomu při výrobě klasického cementu používaného do betonu dochází k produkci 1 tuny oxidu uhličitého na 1 tunu vyrobeného cementu. Jak je vidět, i v oblasti produkce skleníkového plynu je výhoda na straně geopolymerů. Díky těmto vlastnostem mají geopolymery perspektivní budoucnost v celé řadě oborů.

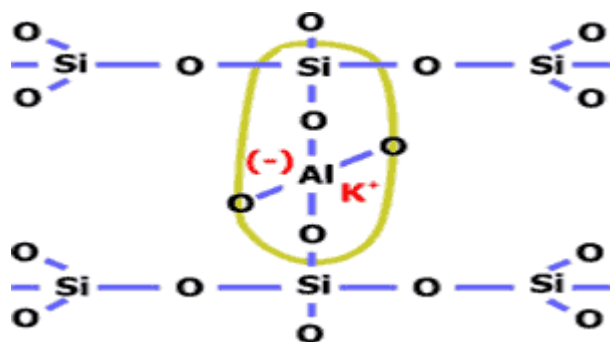
Ve stavebnictví se geopolymery uplatní (v některých případech se již uplatňují) v oblastech výstavby a oprav budov, rekonstrukcí památek či při budování dopravních staveb a letištních drah. Přidáním barviv a různých výplní je možné volit strukturu a barevný odstín geopolymery. V oblasti rekonstrukce památek může nalézt velké uplatnění, neboť je možné připravit kámen přímo odpovídající opravované památce.

Geopolymery jsou čistě anorganické látky, zcela nehořlavé a při kontaktu s ohněm nevytvářejí zplodiny, mohou být užívány místo plastů jako stropní, podlahové a dělicí panely v interiéru letadla, či jako izolace elektrických kabelů.

Výhodných vlastností geopolymery je využíváno i v automobilovém průmyslu, zejména u tepelně namáhaných dílů. Tepelný štít v oblasti motoru a další díly v okolí výfukového potrubí z geopolymery za začaly uplatňovat, stejně jako spousta dalších dílů, nejprve u závodních vozů, odkud se později rozšířily do sériové výroby automobilů.

5.1 Chemická podstata GPM

Geopolymery jsou amorfni sloučeniny hliníku a křemíku. Vazby -Si-O-Al-O jsou pojícím stavebním prvkem chemických řetězců. Ke geochemickým syntézám dochází pomocí oligomerů (dimerů, trimerů), které tvoří strukturu jednotky třírozměrné makromolekulární stavby.



Obr. 5.1: Schéma geopolymery [24]

Základní surovinou pro výrobu geopolymery jsou anorganické odpadní materiály a materiály přírodního charakteru – jíly, kaolíny. Geopolymerní hmota vzniká aktivací oxidů křemičitého (SiO_2) a hlinitého (Al_2O_3) obsažených v základním materiálu pomocí vysoce alkalických roztoků hydroxidů draselného (KOH) či sodného (NaOH) a vodního skla. Do tohoto „základu“ je možné přidávat další prvky (písek, koks, slída,...) a přizpůsobit tak materiál konkrétnímu použití. Při procesu tuhnutí postupně dochází k odpaření vody, která zde slouží jako „přenašeč“ iontů. Ta má za následek konečnou pórovitost materiálu, kterou lze omezit nebo zvýšit vhodnou technologií přípravy vzorků.

5.2 Zkoušení frikčních vlastností geopolymérů

Veličinou, která charakterizuje brzdné vlastnosti obložení a která byla zkoušena je brzdný výkon. K provedení zkoušky byly k dispozici vzorky geopolymérů vyrobené v Ústavu struktury a mechaniky hornin Akademie věd v Praze.

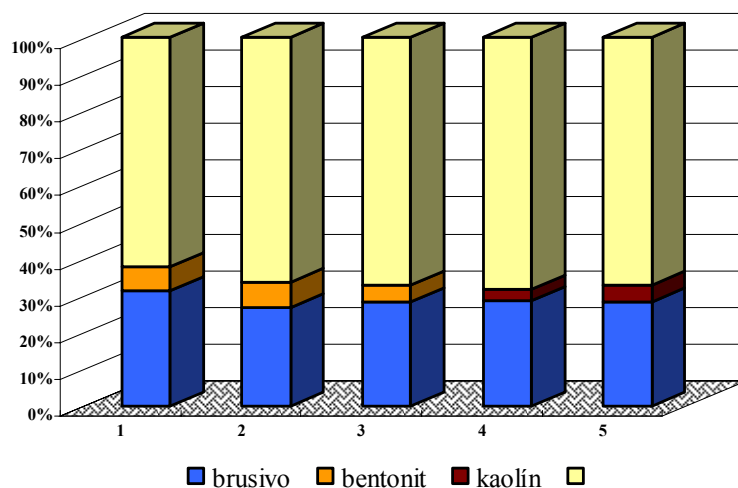


Obr. 5.2: Testované vzorky geopolymery ve tvaru válečku

Vzorky mají tvar válečků o průměru 32mm a výšce 13,5mm. Testováno bylo 5 vzorků lišících se složením brusiva a mazadla. Jejich obsah je uveden v tabulce.

Označení vzorku	brusivo	typ brusiva	mazadlo	typ mazadla
1	31,30%	obrus z pískování skla	6,30%	bentonit
2	26,70%	obrus z pískování skla	6,70%	bentonit
3	28,10%	obrus z pískování skla	4,50%	bentonit
4	28,40%	obrus z pískování skla	3,40%	kaolín
5	28,10%	obrus z pískování skla	4,50%	kaolín

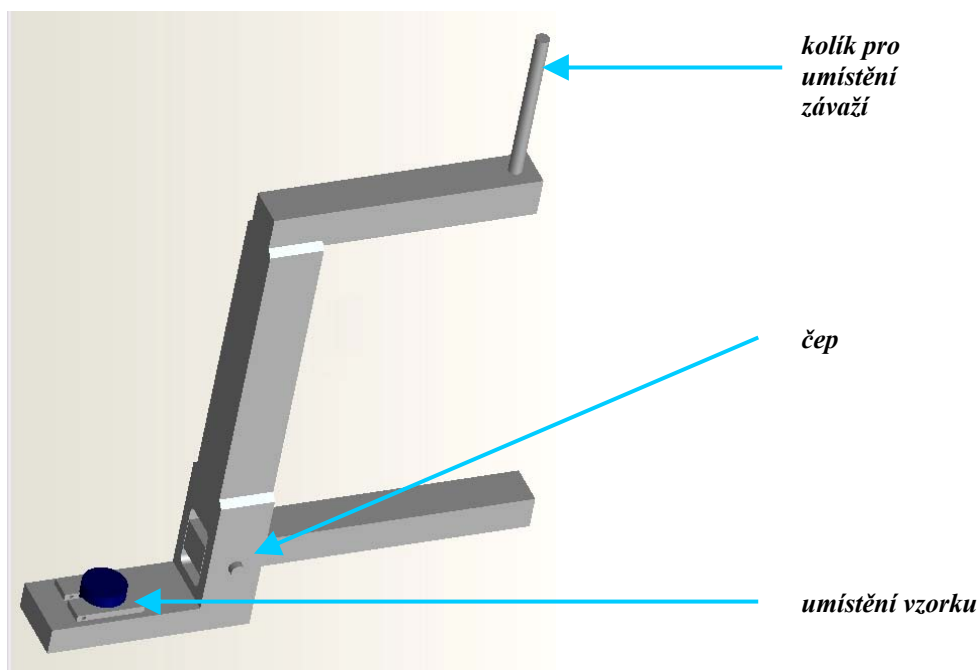
Tab. 5.1: Obsah brusiva a mazadla ve zkušebních geopolymerních vzorcích



Graf 5.1: Podíl brusiva a mazadla na celkovém složení testovaných vzorků

5.2.1 Příprava experimentu

Brzdění bylo simulováno na soustruhu. Brzděnou částí byla roztočená ocelová hřídel usazená mezi trny soustruhu. K ní byly přitlačovány zkušební vzorky. Zkoušené geopolymerní vzorky byly uchyceny do přípravku určeného pro tento experiment. Jedna jeho část byla pevně připevněna k soustruhu. Na konci pevně uchycené části je čep. Druhé části přípravku byl umožněn rotační pohyb kolem čepu.



Obr. 5.3: Model přípravku

Aby byly všechny vzorky zatíženy stejnou silou, byl přípravek zatížen závažím. Po zatížení došlo k rotaci části se vzorkem v místě čepu, čímž došlo k přitlačení vzorku k rotující hřídeli.



Obr. 5.4: Přípravek pro uchycení testovaného vzorku připevněný na soustruhu

5.2.2 Metodika měření

Proudovými kleštěmi byl měřen elektrický proud. Měření bylo provedeno na přívodním kabelu k soustruhu. Jednoduchým výpočtem tak mohl být určen příkon třífázového asynchronního motoru pohánějícího soustruh ($P = U \cdot I$). Zvýšení příkonu motoru je hledaná hodnota brzdného výkonu. Jelikož má elektrické napětí stálou hodnotu (400V), není nutné provádět přepočty na výkon. Pro porovnání vlastností jednotlivých vzorků postačuje zvýšení proudu.

Do přípravku byly postupně upevňovány vzorky. Otáčky hřídele byly nastaveny na hodnotu 240 ot./min. Na přípravek bylo upevněno závaží o hmotnosti 15kg. Této tíze odpovídá přitlačná síla vzorku na hřídel velikosti 250N. Soustruh byl před každým testem nejprve roztočen „naprázdno“ přičemž byl změřen odběr proudu bez zatížení. Z těchto hodnot pak byla vypočítána průměrná hodnota se kterou byl porovnáván naměřený proud při zátěži, tedy po přitlačení zkoušeného vzorku k roztočené hřídeli. Aby došlo k „usazení“

geopolymerních kotoučků, byly přitlačovány po dobu 5-ti minut. Po pěti minutách byl proudovými kleštěmi změřen elektrický proud.

5.2.3 Výsledky měření

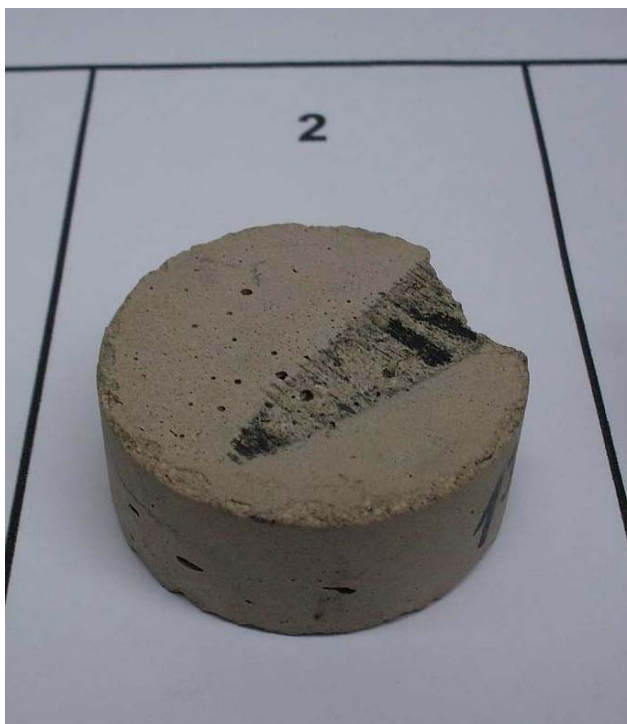
vzorek	naměřený proud [A]		nárůst příkonu %
	Φ naprázdno	při zatížení	
1	2,737	2,740	0,110
2	2,737	2,771	1,242
3	2,737	2,812	2,740
4	2,737	2,820*	3,033
5	2,737	2,780	1,571

*Tab. 5.2: Naměřené hodnoty proudu. *u vzorku č. 4 proběhlo měření po 3 minutách*



Obr. 5.5: Vzorek č.1

Příkon motoru při zatížení vzorkem 1 vzrostl nepatrně (+0,110%). Při tak malém nárůstu proudu byl testovaný vzorek výrazně opotřeben.



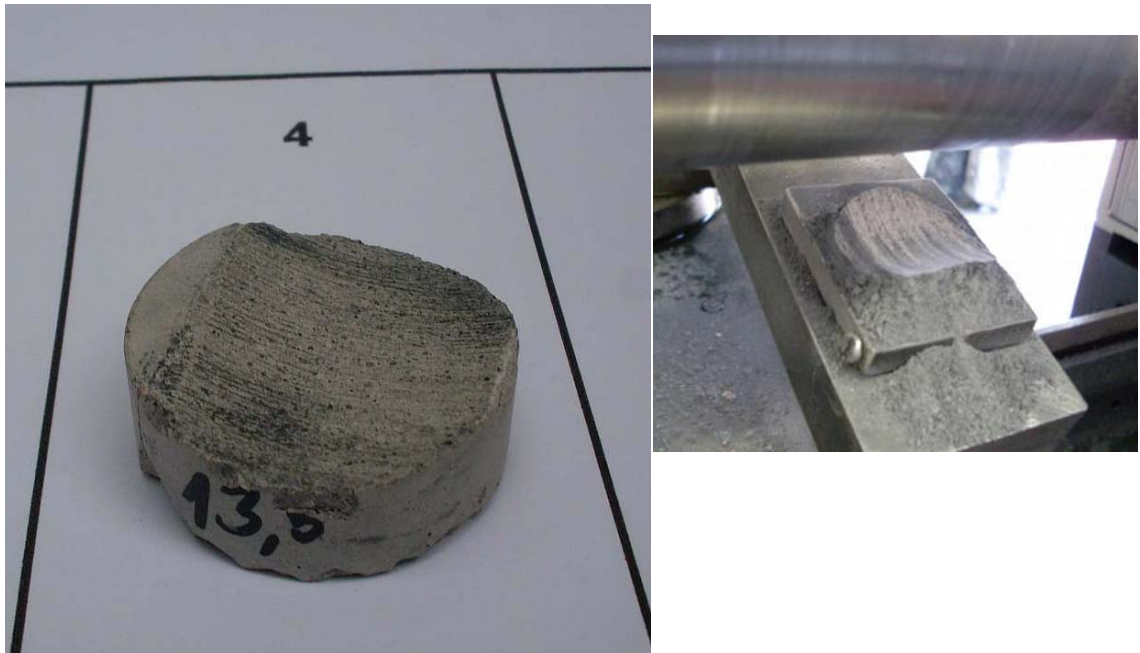
Obr. 5.6: Vzorek č.2

Vzorek č. 2 vykázal dobrý brzdný výkon při malém opotřebení. Došlo však u něj k odloupení části materiálu na obvodu vzorku.



Obr. 5.7: Vzorek č.3

Nejlepší brzdný účinek prokázal vzorek č. 3. Příkon motoru vzrostl o 2,74 procenta. Zároveň na povrchu nedošlo k výraznému otěru.



Obr. 5.8: Vzorek č.4

U vzorku č. 4 vzrostl elektrický proud až na hodnotu 2,820 A, což představuje nárůst o více jak 3%. U tohoto vzorku však došlo k tak velkému opotřebení, že hodnota 2,820 A musela být naměřena už po třech minutách „brzdění“. Při dalším opotřebení hrozil kontakt přípravku svírajícího kotouček s roztočenou hřídelí. Dá se předpokládat, že nárůst příkonu elektromotoru je dán zejména velkou styčnou plochou opotřebeného vzorku s hřídelí.



Obr. 5.9: Vzorek č.5

Pátý vzorek vykázal malý nárůst příkonu na elektromotoru a výraznější opotřebení než vzorky 2 a 3.

5.2.4 Hmotnostní úbytek

Nejpřekvapivějším výsledkem provedeného testu bylo zejména extrémní opotřebení vzorku č. 4 během velmi krátké doby. Vznikl tak důvod k provedení dalšího testu zaměřeného na hmotnostní úbytek materiálu za časovou jednotku.

V tabulce jsou uvedeny hmotnosti jednotlivých vzorků před testem

vzorek	hmotnost
1	17,2
2	16,8
3	17,1
4	17,8
5	17,7

Tab. 5.3: Hmotnosti vzorků před testem

Již výsledky prvního testu ukázaly velmi zajímavé výsledky. U testovaného vzorku č. 1 došlo k měřitelným hodnotám po cca 6-ti minutách brzdění. Úbytek materiálu byl 0,1gramu. Poté byl stejný vzorek znovu zatížen. Tentokrát došlo již po dvou minutách k rychlému a tak výraznému ubývání materiálu, že hrozil kontakt přípravku s hřídelí.

Obdobná situace nastala i u dalších vzorků. K úběru o 0,1g docházelo v čase od 3 do 6-ti minut. Jakmile se zvýšila brzděná plocha na kotoučku, začal se materiál nadměrně drobit v prach rychlostí až 1,5g za 1 minutu (vzorek 2). V této situaci nebylo možné získat měřitelné relevantní hodnoty.



Obr. 5.10: *Vzorky s velkým opotřebením*

Literatura ke kapitole 5: [4], [11], [24], [25]

Závěry

Trhliny na kotouči patří mezi závady brzdového systému, kdy vozidlo nesmí být provozováno na pozemních komunikacích, i když se při zpomalování nemusí vliv trhlín projevit. Jejich existenci však ukáže až důkladná kontrola, většinou při pravidelné kontrole na STK, která se u autobusů provádí 1x za rok. Růst trhlín může způsobit rozlomení kotouče a následnou havárii.

Ve čtvrté části této práce je proveden rozbor takto degradovaného kotouče. Tento brzdový kotouč pracoval v těžkých podmínkách. Těžkými podmínkami je myšleno zejména časté intenzivní brzdění v táhlých klesání Alp. Odpověď na otázku, „proč se objevily trhliny na povrchu jen jednoho z šesti kotoučů třínápravového autobusu?“ však můžeme jen odhadovat a vyžadoval by komplexní průzkum, včetně celého brzdového systému a zohlednění všech provozních podmínek. Jednou možnou příčinou by mohla být závada ve vysokotlakém brzděném systému. V jedné větvi systému mohl působit vyšší tlak než v ostatních částech a tím se při zpomalování přetěžoval jeden brzdový kotouč více než ostatní.

Jasnou odpověď nám dalo pozorování odebraných částí tohoto kotouče zejména pod elektronovým mikroskopem. Z něho vyplývá, že trhliny na kotouči jsou únavového charakteru. Velké tlakové síly od brzdového obložení a tepelné napětí vznikající „uvnitř“ dílu mají za následek plastické deformace zrn perlitické matrice šedé litiny, ze které je kotouč vyroben. Jako důsledek tohoto jevu vznikají na povrchu trhliny. Opakovaným zatěžováním a odlehčováním tyto trhliny rostou kolmo k povrchu kotouče dovnitř materiálu. Jakmile byl průřez tak malý, že už materiál nebyl schopen takové namáhání přenášet, došlo k rozlomení kotouče.

Omezení alespoň některé ze složek termo-mechanického namáhání brzdového kotouče by vzniku trhlín mohlo zabránit nebo alespoň oddálit jejich vznik. Jednou možností je zvýšení součinitele tření mezi brzdovým obložением a brzdovým kotoučem. Při stejné brzděné síle by se tak snížila tlaková složka síly, která působí na kotouč. Vyšší součinitel tření vykazovaly při testech geopolymerní materiály.

U dříve provedených zkoušek geopolymerů, popsané například v bakalářské práci Pavla Dvořáka z roku 2007, byly získány výsledky vykazující dobré frikční vlastnosti. Jak ukázal v předešlé části této práce popsaný test tohoto perspektivního materiálu, velký vliv

na jeho vlastnosti má základní složení a příměsi a jejich procentuální obsah. Dobré frikční vlastnosti vykazují například geopolymery, ve kterých je jako brusivo použít korund. Tento kompozitní materiál obsahující korund se projevil kvalitními frikčními vlastnostmi, teplotní stabilitou a odolností proti nadměrnému opotřebení.

Testované vzorky, kde je jako brusivo použit obrus z pískování skla, tyto vlastnosti nevykázaly. Jak vzorky 1, 2 a 3, ve kterých je obsažen bentonit (hornina vznikající zvětráváním mateční horniny z čediče), tak vzorky 4 a 5 s kaolínem neprokázaly dobrou odolnost proti opotřebení. Úběr materiálu byl i při relativně malé přitlačné síle 250N nadměrný. Geopolymery tohoto složení bezesporu mají perspektivní budoucnost v některém z jiných oborů, než je automobilový průmysl. Jako brzdové obložení však jsou zcela nepoužitelné.

Literatura

- [1] VLK, František.: *Podvozky motorových vozidel*. Nakladatelství a vydavatelství Vlk, Brno, 2000. 464 s. ISBN 80-239-6464-X.
- [2] Pultar, Lukáš.: *Diagnostika vzduchových brzd silničních vozidel.*, Univerzita Pardubice, Pardubice, 2005.
- [3] Stodola, Jiří.: *Úvod do konstrukce silničních vozidel.*, Univerzita Pardubice, Pardubice, 1996.
- [4] Dvořák, Pavel.: *Charakteristika geopolymerů a možnosti jejich aplikace pro frikční a tepelně namáhané díly silničních vozidel.*, Univerzita Pardubice, Pardubice, 2007
- [5] Vala, M.; Tesař, M.: *Teorie a konstrukce silničních vozidel I.*, Univerzita Pardubice, Pardubice, 2003.
- [6] Mackin, T. J.: *Engineering Failure Analysis*. Elsevier Science. Urbana USA, 2002.
- [7] Vlk, Miloš.: *Mezní stavy a spolehlivost*. Nakladatelství VUT Brno, Brno, 2007
- [8] Vlk, Miloš.: *Dynamická pevnost a životnost*. Nakladatelství VUT Brno, Brno, 1992.
- [9] Macek, K., Sedláček, V., Stránský, K.: *Struktura a vlastnosti konstrukčních materiálů.*, Vydavatelství ČVUT, Praha, 1996
- [10] Macek, K., Janovec, J., Novák, J., Steidl, J.: *Materiálové inženýrství.*, Vydavatelství ČVUT, Praha, 2003
- [11] Středová, D.: *Úprava nosičů brzdového obložení kotoučových brzd osobních automobilů.*, Univerzita Pardubice, Pardubice, 2008

On-line zdroje

- [12] *Brzdové systémy pro osobní vozy* [online]. Dostupné na WWW: <<http://aa.bosch.cz/download/Brzdove-systemy/Produktove-informace.pdf>>.
- [13] *Brzdy*: [online] Dostupné na WWW: <<http://bigandrew.webzdarma.cz/navody/42.htm>>
- [14] *Disková brzda*. [online] Dostupné na WWW: <<http://diskova-brzda.navajo.cz/>>.

- [15] *Brzdové kotouče - AD LUJA Autodílny*: [online]. Dostupné na WWW: <<http://www.luja.cz/index.php?id=002002400014>>.
- [16] *Chopper a cruiser: výroba brzdových kotoučů* [online]. Dostupné na WWW: <<http://www.k1400.cz/clanky/radime/brzdy/kotouce/kotouce.htm>>.
- [17] *Vadykotoucu*. [online] Dostupné na WWW: <<http://www.balenoklub.cz/pages/clanky/vadykotoucu.pdf>>.
- [18] *Firma VEPA brzdové destičky*. [online] Dostupné na WWW: <http://vepa.prodejce.cz/texty/texty_cj/hlavni.htm>.
- [19] *Metalografie I* [online] Dostupné na WWW: <http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_metalografie_1/teorie.htm>.
- [20] *CWS ANB – Česká svářečská společnost* [online] Dostupné na WWW: <<http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=250&z=2>>.
- [21] *FYZIKÁLNÍ PODSTATA ELKTRONOVÉ MIKROSKOPIE* [online] Dostupné na WWW: <<http://natur.cuni.cz/parasitology/parpages/mikroskopickatechnika/elektronova.htm>>.
- [22] *Únava a lomová mechanika* [online] Dostupné na WWW: <<http://student.chytrak.cz/unava.htm>>.
- [23] *Pavel Boucník* [online] Dostupné na WWW: <<http://www.boucnik.cz/index.htm>>.
- [24] *Clay polymer* [online] Dostupné na WWW: <<http://www.claypolymers.com/cz/clay-polymer/podstata-hmoty.html>>.
- [25] *Geopolymer Valley: Nitky směřují do České republiky* [online] Dostupné na WWW: <http://www.enviweb.cz/?env=horniny_archiv_gfecd>
- [26] *CZAD Praha s.r.o.* [online] Dostupné na WWW: <<http://www.czadpraha.cz/?x=nabidka-autobusu>>

Seznam obrázků

Obr.2.1: Popis brzdového bubnu

Obr.2.1: Schéma kotoučových brzd

Obr. 3.1: Brzdová destička

Obr. 3.2: Zadní a horní pohled na brzdovou destičku

Obr. 3.3: Umístění protivibrační a vratné pružiny na opěrné desce

Obr. 4.1: SETRA 328 DT

Obr. 4.2: Rozlomený brzdový kotouč a detail trhlin na jeho povrchu (dole)

Obr. 4.3: Místo, ve kterém byly vzorky vyřezány

Obr. 4.4: Trhlina na vnější straně kotouče {1} (nahore) a trhlina na straně vnitřní {2} (vlevo). Zvětšení 32x.

Obr. 4.5: Vzorek {1}- jádro materiálu; povrch (250x zvětšení)

Obr. 4.6: Vzorek {2}- jádro materiálu; povrch (250x zvětšení)

Obr. 4.7: Vzorek {1}- jádro materiálu; povrch (125x zvětšení)

Obr. 4.8: Vzorek {2}- jádro materiálu; povrch (125x zvětšení)

Obr. 4.9: Skenovací elektronový mikroskop JEOL JSM-5500LV s počítačovým příslušenstvím

Obr. 4.10: Přejechod mezi trhlinou a dolomem

Obr. 4.11: Přiblížený povrch trhliny s příznaky koroze

Obr. 4.12: Detail interkrystalické koroze podél hranic zrn

Obr. 4.13: Fraktografický snímek křehkého štěpení – tento povrch vznikl při přípravě vzorku

Obr. 4.14: Stádia únavového procesu

Obr. 4.15: Schéma vzniku a růstu skluzových pásem

Obr. 4.16: Wöhlerova křivka

Obr. 4.17: Rozměry autobusu SETRA S328 DT

Obr. 4.18: Rozměry autobusu po zjednodušení

Obr. 4.19: Síly působící na brzdící autobus

Obr. 4.20: Brzdná síla F_{Bk} ve styku kola s vozovkou a síla působící na kotouč

Obr. 4.21: Schéma brzdového kotouče: tlak který vzniká mezi prstencem a kotoučem

Obr. 5.1: Schéma geopolymeru

Obr. 5.2: Testované vzorky geopolymery ve tvaru válečku

Obr. 5.3: Model přípravku

Obr. 5.4: Přípravek pro uchycení testovaného vzorku připevněný na soustruhu

Obr. 5.5: Vzorek č.1

Obr. 5.6: Vzorek č.2

Obr. 5.7: Vzorek č.3

Obr. 5.8: Vzorek č.4

Obr. 5.9: Vzorek č.5

Obr. 5.10: Vzorky s velkým opotřebením

Seznam tabulek

Tab. 4.1: Hlavní rozměry a hmotnost vozu

Tab. 4.2: Hlavní rozměry a hodnoty zatížení náprav „upraveného“ autobusu

Tab. 5.1: Obsah brusiva a mazadla ve zkušebních geopolymerních vzorcích

Tab. 5.2: Naměřené hodnoty proudu. *u vzorku č. 4 proběhlo měření po 3 minutách

Tab. 5.3: Hmotnosti vzorků před testem

Seznam grafů

Graf 5.1: Podíl brusiva a mazadla na celkovém složení testovaných vzorků