



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**METODY STANOVENÍ OPOTŘEBENÍ ŽELEZNIČNÍHO
KOLA**

METHODS FOR THE WEAR DETERMINATION OF A RAILWAY WHEEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Čížek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Kamil Řehák, Ph.D.

BRNO 2021

Zadaní bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Petr Čížek**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce: **Ing. Kamil Řehák, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Metody stanovení opotřebení železničního kola

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Se zvyšující se rychlostí koridorů a používaných vlakových souprav se kolejová doprava stává velmi atraktivní, především při cestování na dlouhé vzdálenosti. Zatížení jedné vlakové soupravy dosahuje velmi vysokých hodnot. Vzájemný kontakt kolejnice a kola je tak vystaven velkému zatížení, které je současně ovlivňováno dalšími vlivy pro zajištění dostatečné trakce a brzdného efektu. Tím dochází k vzájemnému opotřebení, které je předmětem řady výzkumných a vývojových prací.

Cíle bakalářské práce:

Provést rešerši. Provést rozdělení jednotlivých přístupů pro stanovení opotřebení železničního kola. Vyhodnotit technický experiment za účelem posouzení opotřebení.

Seznam doporučené literatury:

SOLEIMANI, Hesam a MOAVENIAN Majid. Tribological Aspects of Wheel–Rail Contact: A Review of Wear Mechanisms and Effective Factors on Rolling Contact Fatigue, Urban Rail Transit, 2017, 227–237.

KAISER, Ingo; POLL, Gerhard a VINOLASA Jordi. Modelling the impact of structural flexibility of wheelsets and rails on the wheel-rail contact and the wear, Wear, 2020.

LEWIS, R. a OLOFSSON U. Wheel/Rail Interface Handbook. 2009. ISBN-10: 143980146

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

.....
prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.

ředitel ústavu

.....
doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou měření opotřebení železničních kol. Železniční kola podléhají vysokým zatížením, a proto také jejich profil trpí vysokým opotřebením. Včasné zachycení poškozeného kola může předejít fatálním nehodám vlakové soupravy, a proto je potřeba měřit opotřebení nejen periodicky v laboratoři, ale i v reálném čase při provozu vlaku. Metody měření opotřebení jsou v současné době rozděleny na 3 typy, z nichž nejrozvinutější jsou metody měření na trati a metody měření v laboratoři. Metody měření na vlakové soupravě jsou z hlediska náročnosti jejich aplikace na soupravu ve většině případů pouze ve fázi studií.

KLÍČOVÁ SLOVA

Dvojkolí, styk kolo/kolej, opotřebení železničních kol, ploché kolo, jízdní profil

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the problem of measuring the wear of railway wheels. Railway wheels are subject to high loads and therefore their profile also suffers from high wear. Early exposure of a damaged wheel can prevent fatal train accidents, and hence there is a need to measure wear not only periodically in laboratory but also in during train operation. Wear measurement methods are currently divided into 3 types, the most developed of which are the on-track and laboratory measurement methods. On-train measurement methods are in most cases only at the study stage due to the difficulty of their application to the train set.

KEYWORDS

Wheelsets, wheel/rail contact, rail wheel wear, wheel flats, wheel profile

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČÍŽEK, P. *Metody stanovení opotřebení železničního kola*. Brno, 2021. Bakalářská práce. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132237>. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 46 s. Vedoucí práce Kamil Řehák

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Kamil Řehák Ph.D a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 20. května 2021

.....

Jméno a přímení

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji vedoucímu své bakalářské práce Ing. Kamilu Řehákovi Ph.D za jeho rady a doporučení, které mi pomohli při vypracování bakalářské práce. Také bych chtěl poděkovat Vojtěchu Hlomovi za umožnění přístupu do laboratoře a jejímu vybavení pro provedení technického pokusu.

OBSAH

Úvod	11
1 Železniční doprava	12
1.1 Historie.....	12
1.2 Současnost.....	12
2 Dvojkolí železničních souprav	13
2.1 Popis dvojkolí	13
2.2 Základní části dvojkolí.....	13
2.2.1 Náprava.....	13
2.2.2 Kola	15
3 Styk kolo/kolej.....	16
3.1 Styk v oblasti A.....	16
3.2 Styk v oblasti B.....	16
3.2.1 Jednobodový styk	16
3.2.2 Dvoubodový styk.....	17
3.3 Styk v oblasti C.....	17
4 Příklady vad vyskytujících se na železničním kole	18
4.1 Ploché kolo.....	18
4.2 Nápeče na kole	18
4.3 Vydroleniny materiálu	18
5 Metody měření opotřebení kola na trati.....	19
5.1 Zjišťování plochého kola	19
5.1.1 Maximální velikosti plochého kola	19
5.1.2 Měřicí metody pro odhalení plochého kola	19
5.2 Zjišťování horkoběžnosti kola	21
5.2.1 Zjišťování horkoběžnosti obručí/brzd	21
5.3 Měření nepravidelností jízdního profilu	22
5.3.1 Měření profilu kola.....	22
5.3.2 Měření průměru kola	23
6 Metody měření opotřebení v laboratoři	24
6.1 Měření plochého kola	24
6.1.1 Detekce měřením válcovitosti kola	24
6.1.2 Detekce pomocí Dopplerova efektu	24
6.2 Měření profilu kola	25
6.2.1 Kontrola profilu pomocí laseru.....	25
6.2.2 Kontrola profilu pomocí měrek	25
6.3 Kontrola kola proti vzniku prasklin v povrchu/materiálu.....	26
6.3.1 Kontrola pomocí infračervené kamery	26
6.3.2 Měření změny elektromagnetického pole.....	26
6.3.3 Měření pomocí ultrazvukových vln.....	26
7 Metody měření opotřebení na vlakové soupravě.....	27
7.1 Měření sil na kole pomocí bezkontaktního „gap senzoru“	27

7.2	Kontrola kontaktu pomocí ultrazvukových vln.....	27
7.3	Detekce plochého kola	28
7.3.1	Detekce pomocí vibrační kola.....	28
7.4	Měření profilu.....	28
7.4.1	Měření tloušťky okolku.....	28
8	Kontrola železničních kol	29
8.1	Příprava měření	29
8.2	Průběh měření.....	29
8.2.1	Měření profilu kola	29
8.2.2	Měření rozkolí.....	30
8.3	Vyhodnocení měření	30
9	Omezení opotřebení	31
9.1	Mazání kola/kolejnice pro snížení tření	31
9.1.1	Mazání kol.....	31
9.1.2	Mazání kolejnice	31
9.2	Změna profilu kola	31
9.2.1	Nové obrysy vzniklé z obrysu UIC-ORE	32
9.3	Úprava kol	32
9.3.1	Materiály kol.....	32
9.3.2	Nátěry kol pro omezení vnějších vlivů	33
9.3.3	Změna konstrukčního řešení kol	33
10	Simulace vývoje opotřebení železničních kol.....	34
10.1	Měřicí metody pro simulaci opotřebení.....	34
10.1.1	Metoda dvou či více zmenšených disků	34
10.1.2	Metoda s použitím kola v plné velikosti	35
10.1.3	Metoda pin-on-disc	35
10.2	Experimentální simulace opotřebení okolku a koleje pomocí dvou disků	36
10.2.1	Průběh experimentu	36
10.2.2	Výsledky experimentu	36
10.3	Experimentální ovlivnění kontaktní únavy pomocí změny materiálu koleje pomocí kola v plné velikosti	37
10.3.1	Průběh experimentu	37
10.3.2	Výsledky experimentu	38
10.4	Experimentální simulace opotřebení pomocí metody pin-on-disc	39
10.4.1	Průběh experimentu	39
10.4.2	Výsledky experimentu	39
	Závěr	40
	Seznam použitých zkratk a symbolů	45
	Seznam příloh	46

ÚVOD

Železniční doprava je jednou z nejčastěji využívaných možností pro přepravu osob a materiálu z důvodu její relativně nízké ceny oproti například letecké dopravě. Vlakové soupravy tedy musí podléhat kontrolám, aby se předešlo fatálním nehodám na železnici.

Železniční kola jsou jednou z nejkritičtějších součástí celé vlakové soupravy. Na kolech se může vyskytovat mnoho vad, které je třeba včas zachytit, jak z důvodu bezpečnosti, tak z důvodu omezení dopadů vady na chování celé vlakové soupravy, díky čemuž lze omezit výdaje na údržbu vlakových souprav. Opotřebení kol se historicky měřilo v laboratoři, ale v nynější době už vznikl požadavek na měření opotřebení v reálném čase, protože mezi intervalem periodické kontroly v laboratorním prostředí může uplynout například až jeden rok, což může být nájezd několika set tisíc kilometrů. Měření se tedy mohou dělit na metody periodického charakteru a metody měření v reálném čase, kde metody v reálném čase lze uplatnit jak na železnici, tak na vlakové soupravě.

Průběh opotřebení je v současnosti možné simulovat za pomoci různých měřících zařízení. Tyto zařízení nám poskytnou informace o tom, jak se bude profil železničního kola/kolejnice chovat během jeho postupného sjíždění.

1 ŽELEZNIČNÍ DOPRAVA

1.1 HISTORIE

Rozvoj železniční dopravy souvisí s rozvojem průmyslu a počátku 19. století, kdy vznikla potřeba dopravy většího množství lidí případně zboží na větší vzdálenosti. První zmínka použití kolejnice pochází ze začátku 18. století, kdy v Anglii přišli na důlních drahách na to, že kůň utáhne po kolejnicích 10x více nákladu než po silnici. První železnice byly jen dřevěné desky nebo trámy, vedení kol bylo většinou zajištěno vodícím prknem na straně trámů. Čechy a Morava byli průmyslovým centrem tehdejší Rakouské monarchie, proto se zde musela řešit železniční doprava. První koněspřežná železniční trať na našem území vznikla mezi Českými Budějovicemi a Lincem v roce 1827. Vůz této dráhy vidíme na obrázku 1. Nejdůležitějším vynálezem pro rozvoj železnic byl Wattův parní stroj, ze kterého vznikla parní lokomotiva. To umožnilo větší rozvoj železniční dopravy. Poté se koncem 19. a začátkem 20. století začalo přecházet na elektrifikované tratě.



Obr. 1 Rekonstruovaný vůz koněspřežné dráhy [48]

1.2 SOUČASNOST

V Evropě jezdí vysokorychlostní vlaky např. TGV a dosahují rychlosti až 550 km/h. V České republice jsou zatím tyto vlaky spíše budoucností, tratě jsou zatím stavěny na maximální rychlost 160 km/h, které dosahují vlaky typu RailJet či Pendolino. Vlak Pendolino můžeme vidět na obrázku číslo 2. Vyspělejší státy v současnosti přecházejí na jiné typy tratí např. Maglev, kde vlak nejede po železnici, ale je tzv. nadnášen elektromagnety, které jsou v celé trati. Nevýhoda Maglevu spočívá v nutnosti co nejrovnější dráhy a je třeba mít pozvolné oblouky.



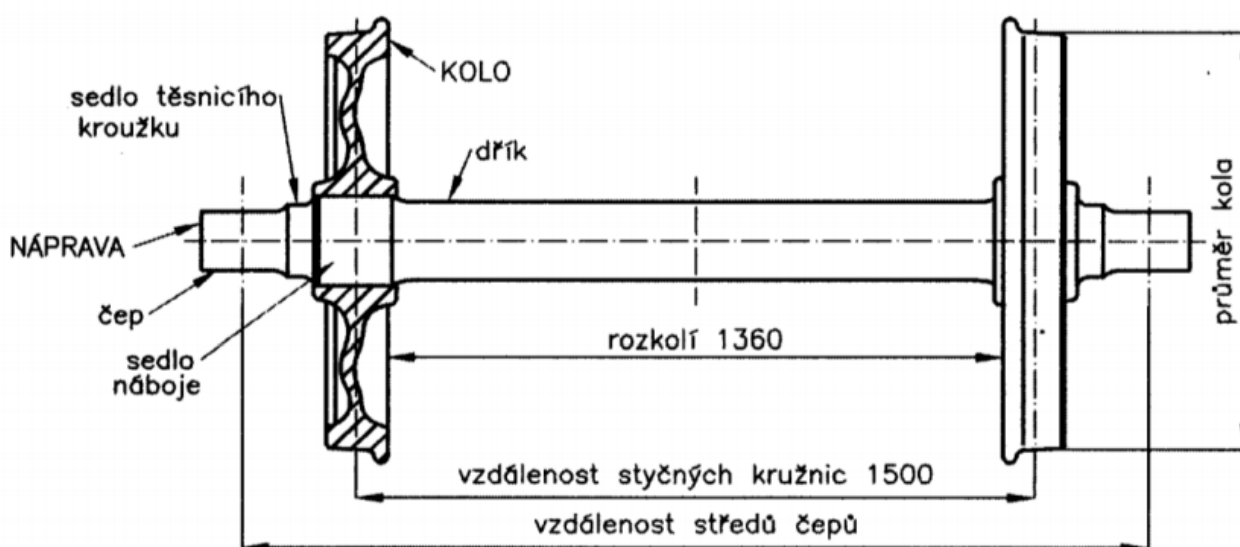
Obr. 2 Vlak typu Pendolino [2]

2 DVOJKOLÍ ŽELEZNIČNÍCH SOUPRAV

2.1 POPIS DVOJKOLÍ

Dvojkolí je základní část pojezdu kolejových vozidel. Přenáší síly mezi vozidlem a jízdni drahou tzn. kolejí. Princip kola a jeho základní geometrie se ve své podstatě od vzniku železnice neměnila. Dvojkolí je tvořeno ze dvou základních částí, nápravy a dvou kol. Kola jsou nalisována na nápravu s přesahem. [4]

Podle konstrukce dělíme dvojkolí hnací a hnané dvojkolí. Hnací dvojkolí je opatřeno na hřídeli nápravy prvkem pro přenos kroutícího momentu. Případně oba typy dvojkolí mohou mít na hřídeli nalisované brzdové kotouče. Na obrázku číslo 3 vidíme základní schéma hnaného dvojkolí se základním názvoslovím. [4]



Obr. 3 Základní schéma hnaného dvojkolí [4]

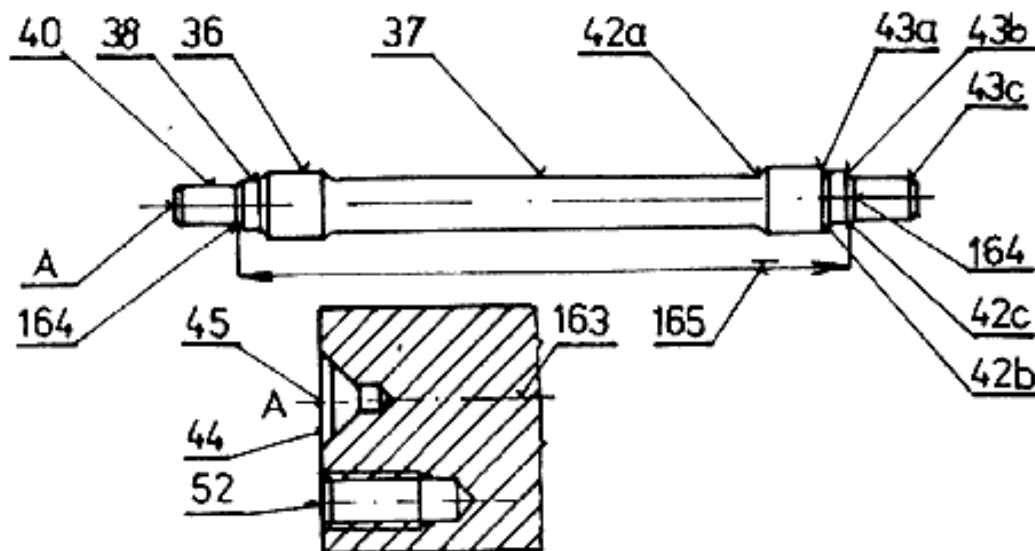
2.2 ZÁKLADNÍ ČÁSTI DVOJKOLÍ

2.2.1 NÁPRAVA

Náprava je válcový nosník, který slouží k upevnění obou kol a udržení jejich rozchodu. Hnací náprava na sobě má nalisovaný prvek pro přenos kroutícího momentu, dále se na nápravu montují nápravová ložiska a pokud má být dvojkolí opatřeno brzdou, lisují se na ni brzdové kotouče. [5]

Nápravy můžeme dělit na nápravy duté nebo plné. Plné nápravy se používají nejčastěji z důvodu jednodušší výroby. Duté nápravy se používají v modernějších vlacích z důvodu úspory hmotnosti nápravy, ale tato náprava je nákladnější na výrobu z hlediska nutnosti udělat do nápravy vývrt skrz celou hřídel. [5]

Nápravy mohou mít vnější ložiskové čepy anebo vnitřní. Pokud jsou ložiskové čepy uvnitř je náprava kratší, ale z hlediska budoucí kontroly za provozu jsou výhodnější čepy na vnější straně z důvodu jednoduššího přístupu k ložisku. Pro případnou výměnu ložiska na nápravě s vnitřními čepy je třeba sundat celé kolo z nápravy, a proto se primárně používali nápravy s vnějšími čepy. Moderní nápravy např. pro nákladní vlaky jsou vyráběny s vnitřními čepy pro ložiska, protože moderní ložiska mají živostnost stejnou jako celé dvojkolí vlaku. Na obrázku 4 můžeme vidět plnou nápravu s vnějšími ložiskovými čepy. [5]



Obr. 4 Plná náprava s vnějšími čepy [5]

Popis obrázku 4

36 ... sedlo kola	37 ... dřík
38 ... sedlo opěr. kroužku	40 ... čep ložiska
42a ... výkružek dříku	42b ... výkružek sedla opěr. kroužku
43a ... zaváděcí kužel sedla kola	43b ... zaváděcí kužel opěr. kroužku
43c ... zaváděcí kužel čepu lož.	44 ... čelo nápravy
45... středící důlek	52 ... díra pro šroub koncové desky
163.. osa nápravy	164 ... základní hrana
165.. vzdálenost základních hran	

2.2.2 KOLA

Kola ve dvojkolí rozdělujeme na dva typy a to jsou: Celistvá kola a obručová kola

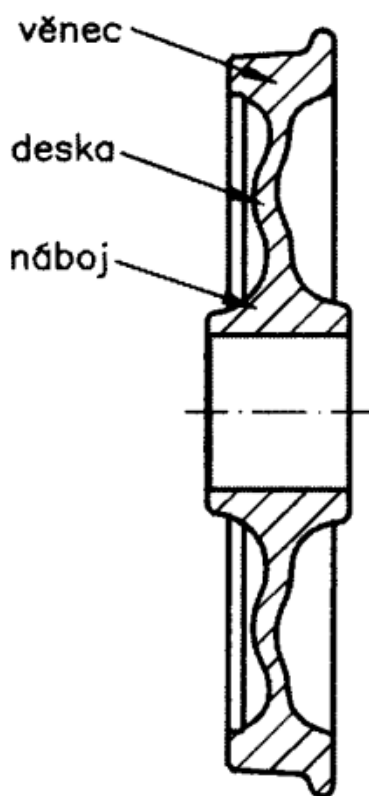
OBRUČOVÁ KOLA

Obručové kolo se skládá z kotouče, na který se lisuje obruč, která slouží jako vlastní jízdní plocha kola. Před montáží musíme obruč rovnoměrně zahřát po celém obvodu na 200-250 °C. Obruč je po montáži zajištěna vzpěrným kroužkem, který zamezuje pohybu obruče. Vzpěrné kroužky mohou být přímé nebo lomené. [7] [8]

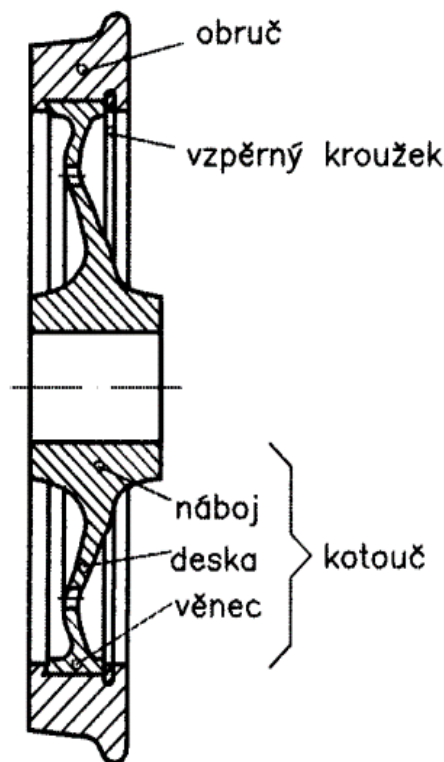
Kotouč se skládá z náboje a zvlněné desky. Nábojem je kotouč nalisován na nápravu a volně přechází v desku, která je většinou zvlněná z důvodu tlumení rázů mezi kolem a kolejnicí. Deska kotouče poté přechází ve věnec kotouče, na který se lisuje samotná obruč. Obručové kolo vidíme na obrázku 6. [7] [8]

CELISTVÁ/MONOBLOKOVÁ KOLA

Celistvé kolo je vyválnováno z jednoho kusu oceli. Kolo se skládá podobně jako u obručového kola, z náboje s vrtáním pro sedlo náboje nápravy, desky, která spojuje náboj s věncem, na kterém je opracovaná jízdní plocha. Celistvé kolo má na čele po celém obvodu tzv. mezní drážku, ta značí mezní opotřebení kola. Celistvé kolo vidíme na obrázku číslo 5. [7] [8]



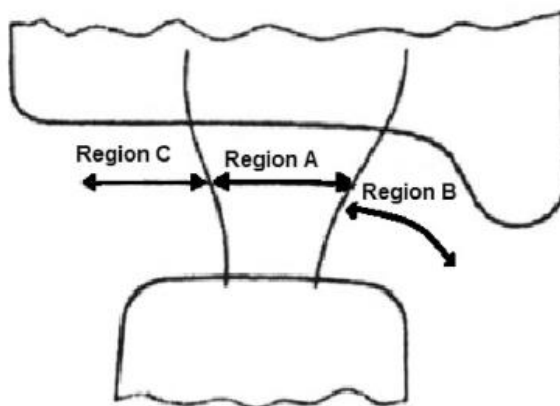
Obr. 5 Celistvé kolo [4]



Obr. 6 Obručové kolo [4]

3 STYK KOLO/KOLEJ

Ideální design styku kolo/kolej vidíme na obrázku číslo 8. Na obrázku jsou vidět tři oblasti na které můžeme styk rozdělit. V oblasti B leží okolek, oblast A je střed věnce kola a oblast C je krajní část věnce kola.



Obr. 7 Oblasti doteku [11]

3.1 STYK V OBLASTI A

Styk v této oblasti se vyskytuje nejčastěji při jízdě po přímé koleji. Styk mezi kolejí a kolem je valivý. V této oblasti dochází ke vzniku nejmenšího napětí při styku než oblasti B a C z hlediska toho, že zde vznikají nejmenší síly na kolo. [13]

3.2 STYK V OBLASTI B

Styk v této oblasti nastává při průjezdu ostrými oblouky na trati z důvodu odstředivých sil působících při průjezdu obloukem. Styková oblast je mnohem menší než v oblasti A. Při kontaktu v této oblasti dochází k vysokému opotřebení kola a vysokým stykovým silám.

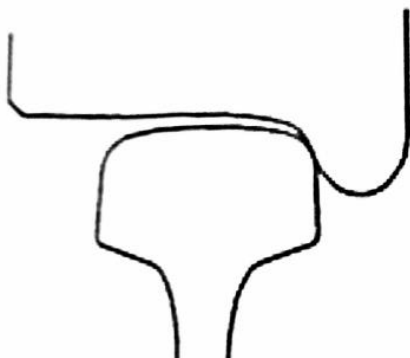
V oblasti B uvažujeme dva možné styky kolo/kolej. [13]

3.2.1 JEDNOBODOVÝ STYK

Stykové napětí je soustředěno do jednoho malého místa ve tvaru elipsy. Podle Soleimani [11] je jednobodový kontakt nejhorším možným dějem, protože způsobuje opotřebení na vnitřní straně koleje a únavové opotřebení na kole. Pokud by došlo ke kontaktu na okolku, opotřeboval by se nadměrně okolek. Heller [12] uvádí, že jednobodový kontakt je nejlepší pro provoz z hlediska snížení jízdních odporů a symetrického opotřebovávání kola. Tento styk vidíme na obrázku číslo 8.

3.2.2 DVOUBODOVÝ STYK

Stykové napětí na kole působí do dvou částí kola, většinou to bývá na okolku a na věnci kola. Soleimani [11] uvádí, že během dvoubodového styku dochází ke zmenšení stykových sil, ale opotřebovává se více kolejnice z hlediska doteku okolku s kolejí. Heller [12] ve svých skriptech o kolejových vozidlech uvádí, že dvoubodový styk se nacházel spíše u staršího kuželovitého kola a při dnešní optimalizaci kol by se měl vyskytovat pouze sporadicky. Dvoubodový styk vidíme na obrázku 9.



Obr. 8 Jednobodový styk [12]



Obr. 9 Dvoubodový styk [12]

3.3 STYK V OBLASTI C

Styk v této oblasti nenastává tak často jako v oblastech A a B. Styk v této oblasti může nastat v případě velkého opotřebení kola či kolejnice. Při tomto styku mohou nastat vysoká kontaktní napětí z důvodu kontaktu konce věnce kola s kolejí. Dotek v této oblasti může způsobit špatné zatáčení dvojkolí a v nejhorším případě může dojít k vykolejení celé vlakové soupravy při průjezdu ostrým obloukem. [13]

4 PŘÍKLADY VAD VYSKYTUJÍCÍCH SE NA ŽELEZNIČNÍM KOLE

4.1 PLOCHÉ KOLO

Ploché kolo je označení pro kolo, na kterém vznikla rovná ploška na kole vlivem dlouhého stání soupravy na jednom místě bez pohnutí, či jízdou soupravy se zablokovanou brzdou čili kolo se neotáčí, ale smýká se po kolejnici. Ploché kolo může zaniknout během následující jízdy soupravy, vlivem sil působících na kolo. Ploché kolo ovlivňuje jízdní charakteristiku kola, a proto se tento jev snažíme odhalit co nejdříve, abychom minimalizovali poškození soupravy či riziko vykolejení. Vzhled plochého kola můžeme vidět na obrázku číslo 10. [9] [18]



Obr. 10 Příklad plochého kola

4.2 NÁPEČE NA KOLE

Vznikají z důvodu hromadění materiálu na kole. Nápeče bývají způsobeny buďto odloupenutím materiálu z brzd, pokud brzdíme přímo na jízdní ploše kola, anebo při odlupování materiálu kolejnice. Nápeče indikují nadměrnou tepelnou zátěž kola. Příklad nápeče je zobrazen na obrázku číslo 11. [9] [18]



Obr. 11 Nápeč na kole [9]

4.3 VYDROLENINY MATERIÁLU

Vydroleniny vznikají únavou materiálu, anebo nadměrným zatížením materiálu. Princip je takový, že pod povrchem nebo na povrchu materiálu vznikne trhлина, která se šíří materiálem a pokud dosáhne určité velikosti, materiál se oddělí od kola a vznikne vydrolenina. Tento jev může vzniknout i například z velké plošky na kole tzn. plochého kola. [18]

5 METODY MĚŘENÍ OPOTŘEBENÍ KOLA NA TRATI

5.1 ZJIŠŤOVÁNÍ PLOCHÉHO KOLA

5.1.1 MAXIMÁLNÍ VELIKOSTI PLOCHÉHO KOLA

Pro předejití nebezpečným situacím, které může ploché kolo způsobit, vydala UIC maximální možné velikosti ekvivalentní plochy. Tyto hodnoty můžeme vidět v tabulce číslo 1.

Tab. 1 Maximální délka plošky [9]

Průměr kola (mm)	$v_{\max} \leq 160 \text{ km/h}$	$v_{\max} \leq 200 \text{ km/h}$	$v_{\max} > 200 \text{ km/h}$
	Maximální délka plošky na kole (mm)		
330–630	≤ 30	Nesmí se vyskytovat	
630–1000	≤ 60	≤ 30	nedefinováno

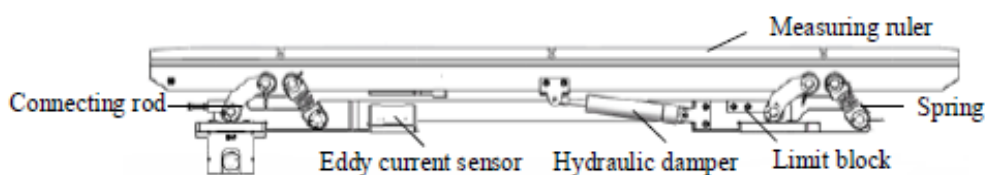
5.1.2 MĚŘICÍ METODY PRO ODHALENÍ PLOCHÉHO KOLA

Kola se kontrolují periodicky v laboratoři, ale z důvodu nutnosti brzkého odhalení plochého kola, z důvodu možného poničení celého dvojkolí, či možného vykolejení vlakové soupravy při provozu ve vyšších rychlostech, se využívají provozní měřicí systémy na tratích anebo na samotné vlakové soupravě.

DETEKCE POMOCÍ ODSKOKU KOLA (POLOHY KOLA VŮČI KOLEJNICI)

Základem této metody je mechanismus, který se skládá z „měřicího pravítka“, což je plocha, na kterou kolo při průjezdu systémem najede, hydraulických tlumičů, které tlumí účinky sil působících od projíždějícího železničního kola a senzoru změny polohy „měřicího pravítka“. Princip měření je takový, že vlak při průjezdu stiskne „měřicí pravítko“ a senzor změny polohy zaznamenává vertikální pohyb kola, jelikož při pohybu plochého kola, se mění vzdálenost středu kola od kolejnice. [24]

Tvůrci tohoto mechanismu, museli tento systém odladit tak, aby byl imunní vůči vibračním způsobených vlakovou soupravou, proto bylo třeba určit ideální polohu senzoru pro měření změny vzdálenosti, aby vibrace měla co nejmenší vliv. Dále bylo také třeba počítat s postupnou deformací materiálu pravítka, proto bylo pravítko přiděleno pomocí hydraulických tlumičů, což zmenšuje jak vibraci, tak omezuje rázy na materiál pravítka. Praktické testy ukázali, že je tato metoda použitelná do rychlosti 15 km/h a dokáže změřit velikost plochy na kole. Rozložení tohoto systému vidíme na obrázku číslo 12. [24]



Obr. 12 Rozložení systému polohy kola [24]

DETEKCE POMOCÍ ZMĚNY NAPĚTÍ

Měřena je změna napětí v obvodu způsobena plochým kolem. Na každé kolejnici je zdroj buď stejnosměrného nebo střídavého napětí. Při průjezdu vlakové soupravy s plochým kolem se změní kontakt kola s kolejnici, a tím se změní napětí proudící ze zdroje proudu. Tato metoda zjistí, že máme ploché kolo, ale nedokáže vyhodnotit, jak moc je ploška na kole velká a ani její umístění na kole samotném. [9]

OPTICKÁ DETEKCE

Metoda vyhodnocuje vzdálenost od okraje okolku do konce věnce kola. Pokud projíždí přes měřicí zařízení vlaková souprava s plochým kolem, změní se vzdálenost kola od kolejnice, což ovlivní množství proudícího světla mezi zdrojem světla a přijímačem. Pokud se tato změna zaznamená, vedle kolejníc je fotobuňka, která zaznamená typ vlaku a pořadí kola, které je ploché, pro budoucí opravu nebo výměnu kola. Kolo je možné měřit v jakékoli rychlosti vlakové soupravy. [9]

DETEKCE MĚŘENÍM AKCELERACE VLAKOVÉ SOUPRAVY

Akcelerační senzory jsou připevněny na kolejnici a měří ploché kolo při jeho dopadu na kolejnici. Vibrace způsobená projíždějící soupravou je použita jako indikátor pro měření zrychlení soupravy. Pokud vznikne odchylka zjistíme tím, že máme ploché kolo. Tato metoda je více účinná v menších rychlostech vlakové soupravy z důvodu vibrací způsobených průjezdem vlakové soupravy po kolejnici ve vyšších rychlostech. [9]

DETEKCE POMOCÍ LASEROVÉHO PAPRSKU

Měří se síly působící na kolo projíždějící soupravy pomocí změny směru laserového paprsku při průjezdu vlaku. Díky tomu, můžeme identifikovat množství a případně velikosti plošek na kole. Během průjezdu vlaku s plochým kolem je vytvořena „chyba“ a tím se zdroj a přijímač vůči sobě relativně posunou a pomocí dalších senzorů je vytvořen výstupní signál do systému. [9]

DETEKCE POMOCÍ PIEZOELEKTRICKÝCH ELEMENTŮ

Měřicí přístroj se skládá ze dvou cívek a dvou detektorů plošek na kole, které jsou umístěny diagonálně vůči sobě čili jedna cívka naproti detektoru a naopak. Díky tomuto rozložení je možné měřit, zda máme ploché kolo na obou kolech či pouze na jednom. Cívky musí být dokonale odizolované, aby na ně neměly vliv vibrace kolejnice při průjezdu soupravy. Detektory plošek jsou složeny z upínek s pružinou, která zajišťuje předpětí plochy, na které je umístěn piezoelektrický snímač. [9]

DETEKCE POMOCÍ ANALÝZY VIBRACÍ KOLA

Metoda spočívá v matematickém porovnání vibrací kola. Dopad plochého kola na kolejnici způsobuje výkyv ve vibraci kola při průjezdu po kolejnici. [25] Uvádí provedení několika experimentů se zmenšeným dvojkolím v laboratoři, která měla simulovat pohyb po reálné kolejnici. V tomto experimentu bylo prokázáno, že na grafickém výstupu ze senzorů jsou výkyvy způsobené dopady plošky na kolejnici. Tento výkyv byl rozpoznán změnou vertikální akcelerace kola, změřené pomocí akcelerometrů umístěných na každé straně testovacího zařízení. Principiálně stejně jako provedený pokus je tato metoda používána prakticky, kde je toto zařízení umístěno na kolejnici.

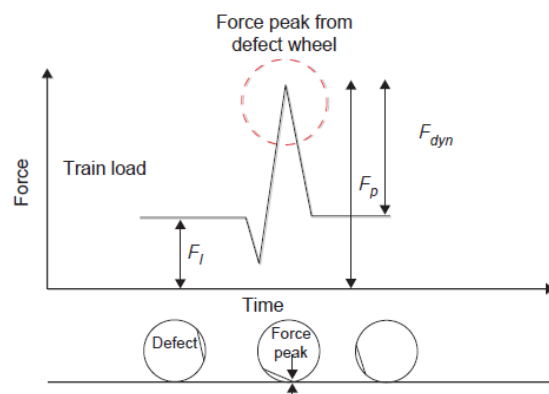
DETEKCE POMOCÍ MĚŘENÍ ZMĚNY SIL NA KOLE

Pomocí této metody je možné zjistit přítomnost plochého kola tím, že měří maximální velikost dynamické síly na kolo a porovnává ji se specifikací projíždějícího vlaku. Tato metoda využívá tenzometrů, optických senzorů, akcelerometrů, senzorů zatížení. Na obrázku číslo 14 vidíme schéma sil na kolo, F_p znamená maximální sílu od defektu, F_{dyn} je dynamická změna sil a F_l je zatížení kola od vlakové soupravy. Na spodní části grafu vidíme schématické zobrazení plochého kola. Pro zjištění defektu se používá výpočet poměru mezi F_p a F_l , který vidíme jako vzorec číslo 1. Umístění systému pro měření dyn. sil vidíme na obrázku 13. [9] [14]

$$RATIO (R) = \frac{F_p}{F_l} \quad (1)$$



Obr. 13 Systém pro měření změny dyn. sil [9]



Obr. 14 Grafické znázornění sil [14]

5.2 ZJIŠŤOVÁNÍ HORKOBĚŽNOSTI KOLA

Horkoběžnost je nežádoucí jev během jízdy, může nastat několik jevů: prvním jevem je přehřátí ložisek na kole; dalším jevem je přehřívání kola během jízdy. Přehřívání kola může způsobit zaseknutí brzda na kole samotném, díky čemuž vzniká tření a kolo se ohřívá. Jízda se zabrzděným kolem může také vést ke vzniku plochého kola. Velmi vysoká teplota je problém z hlediska možnosti svléknutí obruče u obručových kol. Přehřáté kolo také podléhá zvýšenému opotřebení jízdního profilu. Proto je pro nás měření horkoběžnosti kol důležité i z hlediska metod opotřebení.

5.2.1 ZJIŠŤOVÁNÍ HORKOBĚŽNOSTI OBRUČÍ/BRZD

SNÍMÁNÍ POMOCÍ INFRAČERVENÉHO TEPLoměRU A KAMERY

Mimokolejový snímač je umístěn ve stojánku na vnější straně koleje. Snímač je namířen do prostoru spodní části bližšího kola tam jsou umístěny brzdové špalky a také to umožňuje snímat teplotu obruče. S kolejnicí svírá úhel 70° a tím vznikla možnost snímání prostoru mezi koly. Druhá strana koleje je opatřena krytem, který zabraňuje ovlivňování měření. [10] [49]

Další typ snímače se umísťuje do prostoru mezi kolejnicemi a snímá spodní části kol projíždějícího vlaku a prostor mezi koly. [49]

Oba snímače odešlou data do systému, který vyhodnotí, zda není teplota brzd nebo obruče nad kritickou hodnotou. Pokud je naměřená teplota 200 °C nad teplotou okolí, dispečerovi vyskočí hláška o závadě a vlak je v další stanici zkontrolován. V případě naměření teploty větší o 300 °C nad teplotou okolí zobrazí se hláška a vlak je zastaven okamžitě. [10] [49]



Obr. 15 Snímač teploty Cyberscan [10]

5.3 MĚŘENÍ NEPRAVIDELNOSTÍ JÍZDNÍHO PROFILU

5.3.1 MĚŘENÍ PROFILU KOLA

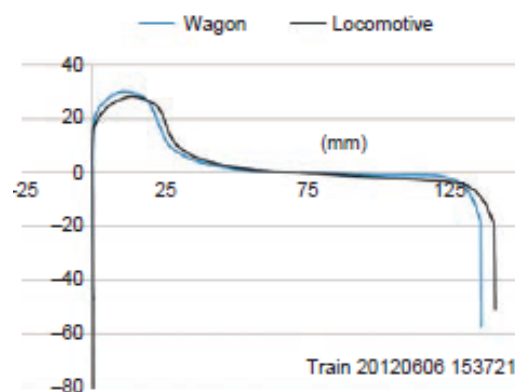
Systém pro měření profilu kola má čtyři zvlášť uložené schránky, z nichž dvě obsahují vysokorychlostně snímající kamery a ty zbylé dva obsahují zdroje promítání laserového paprsku. Před těmito čtyřmi schránkami je umístěn indukční senzor přítomnosti vlakového kola. Při průjezdu vlaku, kolo přejede tento indukční senzor, otevrou se schránky s kamerami a zdroji laseru, případně se pouze spustí kamera a zdroj laseru, pokud nejsou zakrytovány. Laserový zdroj začne promítat přímku na projíždějící kolo a vysokorychlostní kamera zaznamená promítnutí této přímky na projíždějícím kole.

Tyto fotky zaznamenané vysokorychlostně snímající kamerou jsou uloženy do počítačové jednotky, která je pomocí algoritmu převede do dvourozměrného souřadnicového systému x-y. Data získaná převedením do souřadnicového systému porovná s daty, které jsou uvedené jako optimální pro provoz kola a v případě nevyhovujícího parametru vyhodnotí chybu. Systém měří například výšku okolku, tloušťku okolku, strmost okolku či tloušťku obruče u obručového kola. Při měření mohou vzniknout nepřesnosti z důvodu měření při vysoké rychlosti průjezdu vlaku [15].

Na obrázku číslo 17. vidíme příklad zakrytovaného systému a na obrázku číslo 16. je vidět příklad změřeného profilu projíždějící soupravy. Oba tyto obrázky pocházejí ze Švédské „Iron Ore Line“ [14]



Obr. 17 Umístění systému pro měření profilu [14]



Obr. 16 Příklad změřeného profilu kola [14]

5.3.2 MĚŘENÍ PRŮMĚRU KOLA

Tato metoda je principiálně podobná metodě měření profilu pomocí laserového paprsku. Metoda využívá celkem osmi zdrojů laserového paprsku a tří vysokorychlostních kamer, které snímají tyto paprsky. Pro zjištění přítomnosti kola je využíván indukční senzor změny napětí, což nám určí, zda přijíždí vlaková souprava. Tři zdroje laserového paprsku jsou nasměrovány na kolo samotné a snímají jeho profil, proto aby byl určen krajní bod průměru věnce kola, čtvrtý zdroj paprsku směřuje na nápravu, díky čemuž je určen střed kola pro výpočet celkového průměru kola. [28]

Při návrhu této metody bylo třeba počítat s možností ohnutí nápravy z důvodu zatížení. To by totiž mohlo vést k vysokým nepřesnostem měření průměru. Toto ohnutí bylo kompenzováno tak, že paprsek, co snímá nápravu je nasměrován co nejbližší ke kolu, z důvodu toho, že ohnutí nápravy je na krajích nejmenší. [28]

Systém jako takový je umístěn pod kryty, které jsou umístěny mimo podloží kolejnice, z důvodu toho, aby bylo zabráněno vlivu vibrací na měření. Tato metoda je také vhodná pouze pro měření vlaků, které mají odhalenou nápravu dvojkolí z důvodu nutnosti snímání nápravy. Umístění systému vidíme na obrázku číslo 18. [28]



Obr. 18 Umístění zdrojů paprsku [28]

6 METODY MĚŘENÍ OPOTŘEBENÍ V LABORATOŘI

6.1 MĚŘENÍ PLOCHÉHO KOLA

6.1.1 DETEKCE MĚŘENÍM VÁLCOVITOSTI KOLA

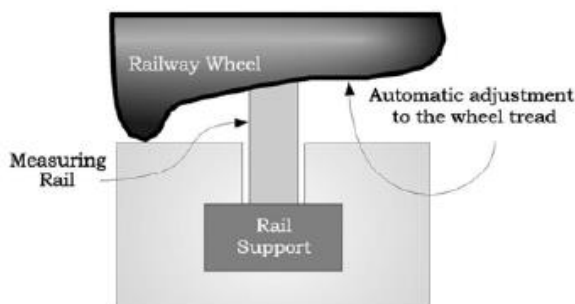
Tři sondy na měřidle jsou v přímém kontaktu s věncem kola, kde kolo je nadzvednuté a otáčíme jím manuálně rukou. Sondy jsou umístěny vedle sebe podél virtuální linie v axiálním směru kola (směrem do středu). Umístění sond lze měnit podle toho, jakou část kola chceme kontrolovat. Pokud budeme měření opakovat na různých polohách, lze tímto přístrojem získat přesný 3D tvar kola a detekovat možné nedostatky tzn. ploché kolo a nedokonalou válcovitost kola. Měřidlo vidíme na obrázku číslo 19. [17]



Obr. 19 Měřidlo pro měření válcovitosti kola [17]

6.1.2 DETEKCE POMOCÍ DOPPLEROVA EFEKTU

Metoda spočívá v proudění ultrazvukových vln v kolejnici. [26] Měřicí zařízení obsahuje vysílač a přijímač vln, přijímač vln je umístěn za vysílačem, aby se předešlo odrazům vln. Nominální Dopplerova frekvence je nastavena na hodnotu 2 kHz. Přítomnost plošky na kole je zjištěna pomocí měření odchylky od nominální frekvence ultrazvukových vln. Přístroj pro toto měření musí být umístěn před laboratoří z důvodu potřeby co nejmenší průjezdové rychlosti vlaku, které je maximálně 15 km/h. Na obrázku číslo 20 vidíme rozložení kolejnice a kola při této metodě.



Obr. 20 Rozložení pro měření změny frekvence [26]

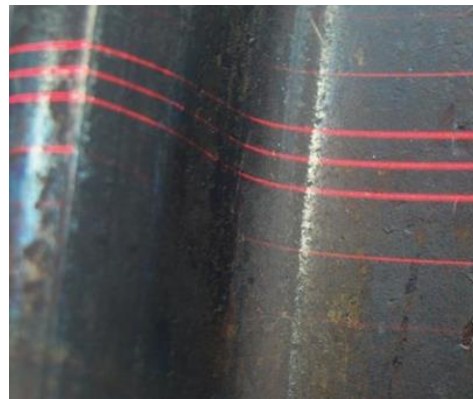
6.2 MĚŘENÍ PROFILU KOLA

6.2.1 KONTROLA PROFILU POMOCÍ LASERU

Jedná se o bezkontaktní metodu měření, přístroj se skládá ze zdroje laserového paprsku a kamery, která zaznamená promítnutí paprsku na kolo samotné. Přístrojů je více druhů, buďto se přiděluje pomocí magnetu na vnitřní hranu kola a promítá paprsek, anebo je potřeba tento přístroj nasměrovat na kolo jako vidíme na obrázku číslo 21. Po zaznamenání paprsku na kole, je tento snímek obdobně, jako za provozu vlaku, převeden do x-y systému souřadnic a vyhodnocení parametrů strmosti, výšky a šířky okolku, tloušťky věnce se zobrazí na obrazovce či v počítači. Tento systém dokáže také změřit ploché kolo. Na obrázku číslo 22 vidíme promítnutí laserového paprsku na kolo. [16] [17]



Obr. 21 Přístroj Calipri Prime [16]



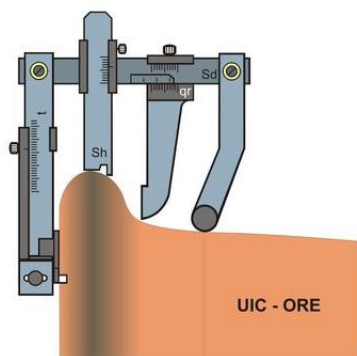
Obr. 22 Paprsek na kole [16]

6.2.2 KONTROLA PROFILU POMOCÍ MĚREK

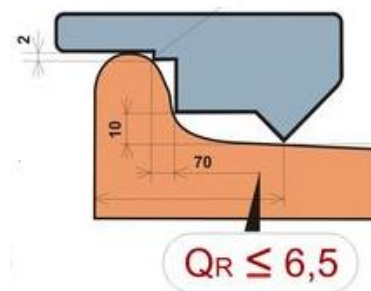
V menších laboratořích se používá metoda měření profilu pomocí základních měrek. Tyto měrky mohou vyhodnotit strmost okolku, výšku okolku a tloušťku okolku a je schopná měřit i výšku obruče/věnce kola.

Měrka funguje na principu posuvného měřítka, z hlediska měření strmosti měrka měří od 6,5 mm, ryska je od 6,5 mm pouze červený obdélníček a od 7 mm už máme klasické dělení rysky po 1 mm. Ostatní rysky mají nonia také po 1 mm. Při tomto měření mohou vzniknout nepřesnosti z hlediska chyby operátora při měření. Příklad měrky vidíme na obrázku 24. Měření profilu měrkou je popsáno v kapitole číslo 8.

Dále je možné pro rychlé měření využít šablonu, která se přiloží na hranu kola a zjistí, jestli vyhovuje strmost okolku. Poznává se to tak, že nevyhovující okolek se dotýká hrany šablony. Zobrazení šablony vidíme na obrázku 24. [19]



Obr. 23 Měrka na kontrolu profilu [19]



Obr. 24 Šablona na strmost [19]

6.3 KONTROLA KOLA PROTI VZNIKU PRASKLIN V POVRCHU/MATERIÁLU

6.3.1 KONTROLA POMOCÍ INFRAČERVENÉ KAMERY

Tato metoda detekuje praskliny v materiálu kola pomocí určení změny tepelné vodivosti v kole a vzduchové kapsy, která vznikne v prasklině. Jakýkoliv odpor, který vznikne v důsledku praskliny v kole, znamená zvýšení teploty v okolí praskliny.

Článek [20] uvádí pokus, při kterém byla nahrána změna teploty na věnci kola pomocí infračervené kamery. Tato metoda potřebuje k realizaci externí zahřívání kola a praskliny lze detekovat až po 3 minutách od začátku samotného měření. Dále je také potřeba nastavit vlnovou délku pro snímání infrakamerou. Proto tedy z pokusu vyplynulo, že tato metoda je případně použitelná pouze v laboratoři, i přes to, že bylo možné určit praskliny v povrchu i pod povrchem.

6.3.2 MĚŘENÍ ZMĚNY ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE

Tato metoda spočívá ve vytvoření elektromagnetického pole v železničním kole. Toto elektromagnetické pole vytvoří proud v kole, které je samo o sobě vodivým materiálem a měříme pokles tohoto proudu v kole, což určí potenciální prasklinu.

Testy provedené na několika železničních kolech pomocí připevnění indukčních kabelů na obvod kola. Z nich vyplývá, že indukční kabeláž pro vytvoření elektromagnetického pole musí být umístěna v určité vzdálenosti od prasklin – přibližně 5 mm, aby bylo možno praskliny detekovat. Poté, co je prasklina detekována musí se senzory a kabel přeorientovat, aby byly kolmo k prasklině, proto tato metoda je prakticky těžko realizovatelná. [20]

Uvedený praktický pokus v článku [22], který byl proveden po jeho úpravě z důvodu nadměrného opotřebení. Byla měřena změna magnetizace v kole, ve kterém se pomocí elektromagnetu vytvořilo magnetické pole. Tato měřená změna je funkcí plastických nebo únavových deformací v závislosti na počtu cyklů, které proběhly. Pokus prokázal možnost použití této metody v praxi, z hlediska schopnosti detekovat i praskliny, které jsou ve větší vzdálenosti od věnce kola.

6.3.3 MĚŘENÍ POMOCÍ ULTRAZVUKOVÝCH VLN

Zdroj vysílá ultrazvukové vlny, které projdou kolem, a pokud narazí na prasklinu, prasklina vlnu oslabí a toto oslabení rozezná přijímač. Pokud je v systému použito více senzorů, může systém vypočítat velikost a umístění praskliny na kole. Pro tuto metodu je potřeba co nejmenší rychlost průjezdu, maximální rychlost průjezdu je tedy 15 km/h. Nejčastější umístění tohoto systému je buď to v laboratoři, kde se provádí kontrola vlaků, nebo před laboratoří na příjezdové kolejnici, z hlediska potřeby co nejmenší rychlosti průjezdu. Použití této technologie pro „real-time“ měření je zatím pouze v testovací fázi na okruzích. [21]

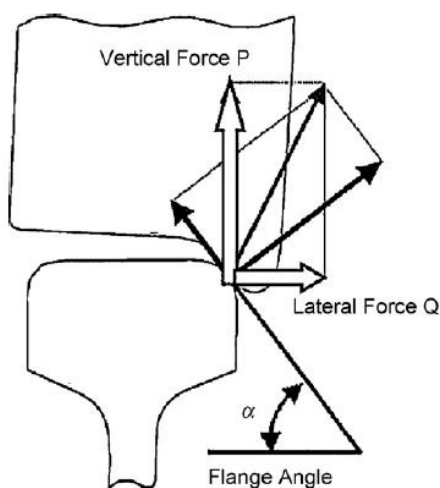
7 METODY MĚŘENÍ OPOTŘEBENÍ NA VLAKOVÉ SOUPRAVĚ

7.1 MĚŘENÍ SIL NA KOLE POMOCÍ BEZKONTAKTNÍHO „GAP SENZORU“

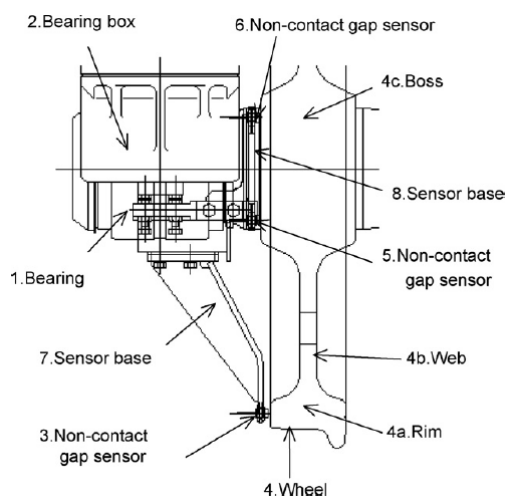
Pomocí této metody je vypočítáván koeficient vykolejení, což je výpočet poměru sil působících na kolo. Ve vzorci číslo 2 jsou písmena Q a P, kde Q je síla boční a P je síla vertikální. Pokud se tento koeficient přibližuje jedničce, je pravděpodobné vykolejení. Síly na kole vidíme na obrázku číslo 25. Tato metoda se začala zkoumat z důvodu vysokého počtu vykolejení vlaků v ostrých obloucích. [23]

$$Ratio = \frac{Q}{P} \quad (2)$$

Autoři článku [23] navrhli speciální zařízení, které využívá bezkontaktního „gap senzoru“, který je přidělán na nepohyblivou část nápravy, tzn. ložiskový box. Kvůli nutnosti kompenzovat pohyb kola bylo rozhodnuto použít senzory dva, dále bylo potřeba kompenzovat axiální posunutí a také bylo potřeba udělat držák senzorů pod úhlem z důvodu tohoto axiálního posunutí. Toto zařízení měří síly působící na kolo Q a P a vypočítá z nich koeficient vykolejení. Schématické zobrazení tohoto zařízení vidíme na obrázku číslo 26. Tato metoda byla prakticky testována, ale v době vydání článku byla pouze ve fázi dalšího testování na komerčních vlakových soupravách.



Obr. 25 Síly působící na kolo [23]



Obr. 26 Rozložení zařízení [23]

7.2 KONTROLA KONTAKTU POMOCÍ ULTRAZVUKOVÝCH VLN

V článku [27] byl navržen postup pro kontrolu velikosti kontaktu mezi kolem a kolejnicí. Principem bylo připevnění transduktoru, který vysílá i přijímá ultrazvukové vlny. Vyslané ultrazvukové vlny by se při kontaktu odrážely zpět do transduktoru a díky zjištění koeficientu odrazu je možné určit velikost kontaktu či síly působící v kontaktu kola s kolejnicí. Tato metoda byla zkoušena pouze experimentálně v laboratoři na kusu vyřiznutého kola a kolejnice zatěžované hydraulickým pístem. Z hlediska praktického použití bylo spekulováno autory, že by nejspíše bylo potřeba více senzorů pro snímání kontaktu, jelikož kontakt na jednom místě trvá v rámci několika milisekund, a také jeden senzor by nejspíše nedokázal detekovat existenci více než jednobodového kontaktu kola s kolejnicí. Dále by byl také problém se životností senzoru jako takového z důvodu vibrací působících při jízdě vlakové soupravy.

7.3 DETEKCE PLOCHÉHO KOLA

7.3.1 DETEKCE POMOCÍ VIBRACÍ KOLA

Tato metoda je principiálně stejná jako metoda pro měření na trati, porovnává tedy odchylky vibrací kola při dopadu plochého kola na kolejnici. Hlavním rozdílem je umístění akcelerometrů a senzorů na nerotující části nápravy tzn. ložisková skříň.

Pro provedení testu této metody bylo vybráno místo, kde jsou podklady kolejnice z betonu místo dřeva, proto aby se omezilo ovlivnění vibrací vibracemi podloží. Bylo experimentováno i s použitím několika vibračních senzorů pro přesnější měření. Díky použití dvou senzorů je možné přesněji určit přítomnost plochého kola. Z hlediska využití je měření vibrací na vlakové soupravě jako takové výhodnější hlavně cenově oproti systému položeném na kolejnici, a hlavně také z hlediska ovlivnitelnosti měření, kde traťové senzory mohou být ovlivněny vibracemi způsobenými např. silnicí v blízkosti trati. [29]

7.4 MĚŘENÍ PROFILU

7.4.1 MĚŘENÍ TLOUŠŤKY OKOLKU

Metodou vyhodnocujeme tloušťku okolku pomocí indukčního senzoru. Senzor vysílá napětí, které je převedeno na vzdálenost mezi senzorem a okolkem kola. Toto převedení je předem určeno pomocí manuálního měření pomocí voltmetru a mikrometru. Čím větší napětí od senzoru je, tím menší je tloušťka okolku.

Při provádění laboratorních testů této metody bylo zjištěno, že metoda měla nepřesnost o velikosti 3,9 mm. Tato nepřesnost byla vyřešena pomocí přesnějšího upevnění senzoru, aby byl odolnější vůči vibracím, což ovlivňovalo přesnost měření. Dále je třeba senzor periodicky kalibrovat, aby se nehoršila přesnost měření a nevyhodnocovali se chyby tzn. malá tloušťka okolku. Metoda měření tloušťky okolku je zatím stále ve fázi testování. [30]

8 KONTROLA ŽELEZNIČNÍCH KOL

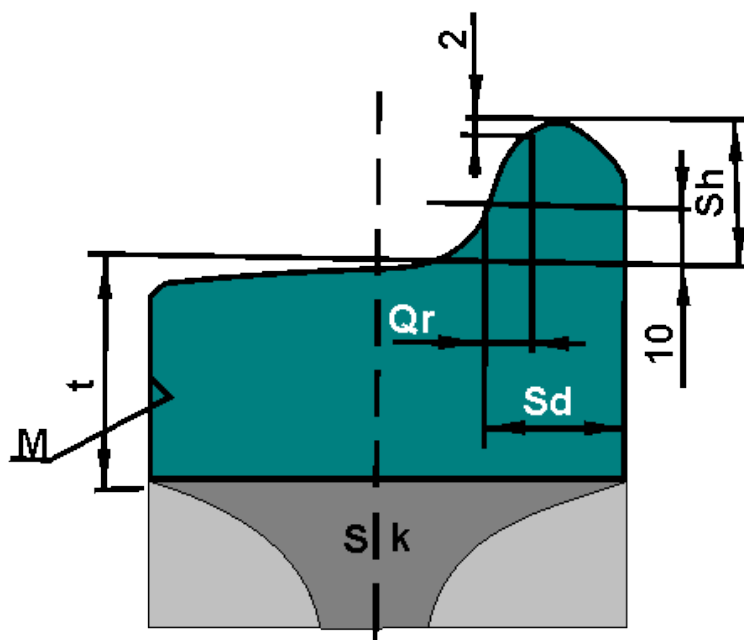
8.1 PŘÍPRAVA MĚŘENÍ

Před měřením je třeba mít lokomotivu/vagón např. v depu, anebo pokud to situace dovolí lze celé dvojkolí z vlaku vymontovat. Primárně se během provozní kontroly v depu pouze odstavuje lokomotiva na koleje, mezi nimiž je tzv. díra, která nám umožní jakožto operátor měřit i rozkolí. Kolo před měřením prohlédneme, jestli nevykazuje nějaké viditelné známky opotřebení, jako jsou vydroleniny, vruby, nápeče po obvodu, anebo jestli se celistvé kolo neopotrebovalo až na mezní drážku.

8.2 PRŮBĚH MĚŘENÍ

8.2.1 MĚŘENÍ PROFILU KOLA

Pro provozní měření kola používáme základní posuvnou měрку. Tato měřka změří výšku okolku od styčné kružnice, tloušťku okolku, zkos/strmost okolku. Měření kola se provádí na 3 místech, buďto popojedeme celou lokomotivou, aby se potočilo kolem, anebo měříme bez popojetí na obvodu kola. Měřené veličiny můžeme vidět na obrázku číslo 27. a měření kola na obrázku 29.



Obr. 27 Měřené veličiny [8]

S_h – výška okolku (max. 36 mm)

t – Tloušťka obruče (min. 30 mm)

S_d – Tloušťka okolku (min. 22 mm)

M – Mezní drážka opotřebení

Q_R – Strmost okolku (více než 6,5mm)

S_k – Rovina styčné kružnice

8.2.2 MĚŘENÍ ROZKOLÍ

Dále měříme vzdálenost vnitřních čelních ploch kol, tzv. rozkolí. Rozkolí se měří pomocí měřidla zvaného rozkolka. Toto měřidlo funguje na principu mikrometru, ale je výrazně delší. Maximální hodnota rozkolí se s ohledem na průměr kola toleruje na hodnotě 1360 ± 3 mm.

Pomocí tohoto měření můžeme detekovat nadměrně ohnutou nápravu. Měříme u temene kola tzn. v místě styku kola s kolejnicí. Po provedení prvního měření musíme s lokomotivou/vagonem popojet či vymontované dvojkolí manuálně pootočit a měřit opět na stejném místě. Pokud bychom s vozidlem nepojížděli, mohlo by se stát, že vzhledem k velkému ohnutí nápravy by mohlo být měření znehodnoceno. Ukázku měření rozkolnou vidíme na obrázku číslo 28.



Obr. 29 Měření kola měrkou



Obr. 28 Měření rozkolu dvojkolí

8.3 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

Měření jsme provedli na třech dvojkolích v pojezdech, které byly vymontované z vozidla z důvodu údržby. V příloze č.1 je přiložený vytvořený protokol s naměřenými hodnotami. Po zhodnocení měření vyplynulo, že všechna rozkolí byla vyhovující, ale na hnaném soukolí bylo jedno kolo nevyhovující, což znamená, že se toto kolo bude muset vyměnit za nové, nebo osoustružit na požadovaný rozměr.

9 OMEZENÍ OPOTŘEBENÍ

9.1 MAZÁNÍ KOLA/KOLEJNICE PRO SNÍŽENÍ TŘENÍ

9.1.1 MAZÁNÍ KOL

Systémy pro mazání kol jsou umístěny většinou na nepohyblivých částech nápravy nebo na vlakové soupravě.

Nejčastějším a nejlevnějším prostředkem pro snížení tření mezi kolem a kolejnicí je písek, ale jako takový má nežádoucí účinky typu poškozování kola či kolejnice a také vysoké znečištění kol a okolí kolejíště.

Dále se používají maziva s nízkým koeficientem tření, které se nanášejí pomocí spreje přímo na kolo, tzn. místo mezi nákolkem a okolkem. Místo spreje se může použít systém, kdy je pevné mazivo v zásobníku, který ho tlačí pomocí pružiny přímo na námi určené místo, což má lepší vlastnosti oproti postřiku kolem, jelikož nevzniká tak velká kontaminace okolí. Tyto systémy jsou buďto ovládány manuálně strojvůdcem anebo je integrovaný senzor ve vlaku, který tento systém sám spustí, pokud je v blízkosti např. ostrý oblouk. [31] [32]

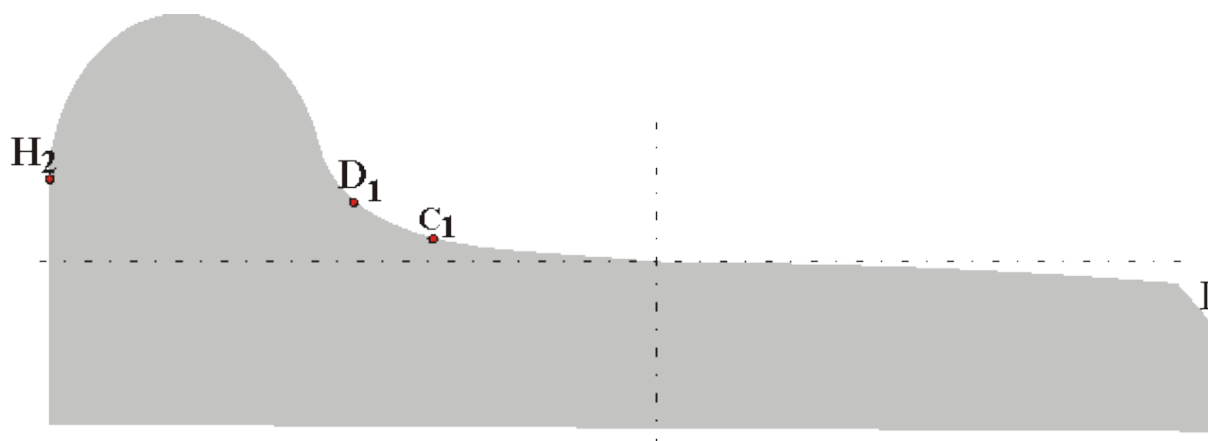
9.1.2 MAZÁNÍ KOLEJNICE

Umístění těchto systémů bývá umístěno například před nadcházejícím obloukem, aby se snížilo tření mezi kolem a kolejnicí. Přítomnost vlaku je určována pomocí indukčního senzoru přítomnosti kola. Po zjištění přítomnosti kola systém na kolejnici aplikuje přesnou vrstvu maziva přímo na kolejnici a kolo, které přes tuto vrstvu přejede si mazivo „odveze“ skrze následující úsek. [31] [32]

9.2 ZMĚNA PROFILU KOLA

Základním jízdním obrysem pro železniční kola je profil UIC-ORE S1002, ze kterého vycházejí všechny ostatní profily. Volba jízdního profilu závisí na povaze trati, na které se bude vlaková souprava pohybovat. Obrysy železničních kol se dají rozdělit na 3 oblasti:

Všechny tyto oblasti vidíme na obrázku číslo 30. [8]



Obr. 30 Oblasti věnce kola [8]

JÍZDNÍ PLOCHA

Jízdní plocha je plocha, která začíná na kraji kola a končí na počátku zaoblení před okolkem čili končí 26 mm od styčné kružnice kola. Oblast I až C1. [8]

PŘECHODOVÁ OBLAST

Tato oblast začíná 26 mm od styčné kružnice směrem k vnitřní čelní ploše kola a přechází do kolku ve vzdálenosti 35 mm od styčné kružnice. Oblast C1 až D1. [8]

OKOLEK

Okolek je část kola, která začíná 35 mm od styčné kružnice a končí na vnitřním čele kola. Okolek je jako jediná část věnce kola určena normou a musí být u všech obrysů stejná. Ve vyhlášce UIC jsou uvedeny 3 výšky okolku, a to jsou 28 mm, 30 mm a 32 mm. Oblast D1 až H2. [8]

9.2.1 NOVÉ OBRYSY VZNIKLÉ Z OBRYSU UIC-ORE

V České republice byly navrženy obrysy ZI-3 a ZI-4, které jsou přizpůsobené skutečnému opotřebení obrysu kola. [33]

Tento obrys byl navržen tak, aby odpovídal střední poloze mezi základním tvarem UIC-ORE a jeho opotřebeným tvarem po 300–400 tisících kilometrech. Důvodem k této úpravě bylo to, že vnější část jízdní plochy se dostává do kontaktu s hlavou kolejnice nejméně často, a to pouze při projíždění výhybek. Po zkouškách tohoto obrysu vyplynulo, že opotřebování těchto dvou obrysů je po celé jejich délce rovnoměrné po celé šířce věnce kola. Počáteční opotřebení obrysu může být větší v případě velkých nepřesností při výrobě kola. Tento obrys byl zaveden do provozu u Českých drah v roce 2000. [33]

9.3 ÚPRAVA KOL

9.3.1 MATERIÁLY KOL

Materiály železničních kol jsou určeny normou ČSN EN 13232. Norma rozděluje materiály do dvou skupin, kde první skupina je využívána pro vlaky jedoucí nad 200 km/h, druhá pro vlaky jedoucí pod 200 km/h. [34] Přednostně mají být využívány ocele tříd ER6 až ER9. V Tabulce 2 vidíme charakteristiky těchto materiálů v tahu.

Tab. 2 Charakteristiky materiálů kol v tahu dle ČSN EN 13262 [34]

Věncí kola				Deska kola	
Třída oceli	Re [MPa]	Rm [MPa]	A [%]	Změna Rm [MPa]	A [%]
ER6	≥ 500	780/900	≥15	≥100	≥16
ER7	≥ 520	820/940	≥14	≥110	≥16
ER8	≥ 540	860/980	≥13	≥120	≥16
ER9	≥ 580	900/1050	≥12	≥130	≥14

9.3.2 NÁTĚRY KOL PRO OMEZENÍ VNĚJŠÍCH VLVIVŮ

JEDNOVRSTVÉ NÁTĚRY

Jednovrstvé nátěry se využívají u kol bržděných špalíkovou brzdou. Pokud brzda přehřeje kolo tento nátěr opadne a je možné pomocí toho indikovat možné nedokonalosti v brzdovém systému jako je např. horkoběžnost kola. Tyto nátěry jsou ale málo korozivzdorné čili mají menší životnost. [35]

DVOUVRSTVÉ NÁTĚRY

Dvouvrstvé nátěry mají dvě složky: základní a vrchní. Dvouvrstvé nátěry se vyznačují dobrou ochranou proti korozi a vnějším vlivům. Postupem času odstín zmatní, díky vlivu povětrnostních podmínek. [35]

9.3.3 ZMĚNA KONSTRUKČNÍHO ŘEŠENÍ KOL

Jak bylo zmíněno v kapitole číslo 2.2.2 v praxi se používají dva typy železničních kol, a to jsou celistvá a obručová kola. Tyto kola mají jisté výhody a nevýhody. Z těchto výhod a nevýhod vychází lépe kolo celistvé, které je používáno v závislosti na jeho aplikaci častěji. [7] [8]

CELISTVÉ KOLO

Výhody proti obručovým kolům jsou menší hmotnost a nehrozící uvolnění obruče při zvýšené teplotě kola. Nevýhodou tohoto kola naopak je nerovnoměrné zahřívání při brzdění špalíkovou brzdou, což může vést k lomu kola. Další nevýhodou je také vyšší spotřeba materiálu. [7] [8] [12]

OBRUČOVÉ KOLO

Nevýhodou obručového kola je možnost přehřátí obruče při jízdě, což může způsobit svléknutí obruče z kotouče a destrukci kola. Výhodou naopak je, že v případě nadměrného opotřebení kola, které je určeno tloušťkou věnce, můžeme vyměnit pouze obruč a není třeba soustružit nebo měnit celé kolo soupravy. [7] [8] [12]

10 SIMULACE VÝVOJE OPOTŘEBENÍ ŽELEZNIČNÍCH KOL

10.1 MĚŘÍCÍ METODY PRO SIMULACI OPOTŘEBENÍ

Pro simulaci opotřebení železničního kola případně koleje se v moderní praxi používají primárně 3 metody simulací. Tyto simulace jsou: simulace pomocí dvou disků, simulace pomocí kola v plné velikosti, a jako poslední je metoda zvaná pin-on-disc. Všechny tyto metody se mohou používat pro simulaci adheze a koeficientu opotřebení. [37]

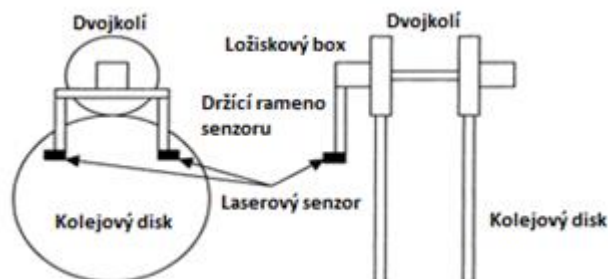
10.1.1 METODA DVOU ČI VÍCE ZMENŠENÝCH DISKŮ

Metoda disků je realizována pomocí zařízení, které se skládá ze dvou nebo více disků. Jedním z nich je disk brzdící, který bývá nejčastěji vnímán jako disk kolejový, druhý disk je hnací disk, který je vnímán jako železniční kolo, přičemž mívá také přímo profil kolejového kola. Tyto disky jsou udržovány v kontaktu pomocí konstantního zatížení na každý z nich, nebo jeden z nich. Vstupními parametry do simulace je normálová síla a prokluz mezi disky a výstupem je tangenciální síla a množství opotřebení. Opotřebení je obvykle znázorněno koeficientem opotřebení tzn. opotřebení za cyklus nebo ujetou vzdálenost. Touto metodou lze také měřit třecí síly a simulovat adhezi. Primárně se využívá dvou měřicích stavů a to jsou: měření za suchých podmínek a měření při lubrikaci disků, možností je také využití enviromentální komory okolo přístroje pro lepší kontrolu prostředí. Metodu lze také využívat pro hodnocení prokluzu, opotřebení, únavy materiálu, případně i zvukového projevu za jízdy.[36] [40-43] [46-47]

Tato metoda je cenově přijatelnější než například metoda pomocí reálně velkého kola z důvodu možnosti mít kolo v měřítku např. 1:5. Výhodou je možnost nastavování úhlu doteku disků a rychlosti jejich rotace. [36] Nevýhodou je nutnost přepočtu výsledných hodnot na reálné velikosti z hlediska zmenšení zařízení. Další nevýhodou je problematika chlazení disků, které se mohou přehřívat a hodnoty poté nemusí odpovídat realitě, což ale lze řešit umístěním do klimatické komory, což by mohlo zvýšit cenu, z hlediska nákladů na její pronájem /stavbu. Dále je možné disky po určitém počtu cyklů kontrolovat, zda se nepřehřívají. [37] V kapitole číslo 10.2 je uvedený experiment pomocí metody dvou disků, pro určení opotřebení hrany koleje a okolku železničního kola.

PŘÍKLAD PŘÍSTROJE METODY ZMENŠENÝCH DISKŮ

Zařízení [42] využívá tuto metodu například pro měření třecí síly mezi dvojkolím a kolejnicí. Využíváno není dvou disků, ale celkem čtyř, z nichž dva menší spojené pomocí nápravy simulují dvojkolí v měřítku 1:5, které jsou v tomto případě disky brzdící a dva další disky simulují kolejnici, a jsou poháněny pomocí elektromotorů se zabudovanou planetovou převodovkou, díky čemuž je možný rozsah otáček od 0.03125 min^{-1} do $312,5 \text{ min}^{-1}$. Zatížení zmenšeného dvojkolí je realizováno pomocí pružiny umístěné na zmenšeném podvozku, ve kterém je umístěné zmenšené dvojkolí. Schéma tohoto zařízení je vidět na obrázku číslo 31.



Obr. 31 Rozložení zařízení pro měření třecí síly [42]

10.1.2 METODA S POUŽITÍM KOLA V PLNÉ VELIKOSTI

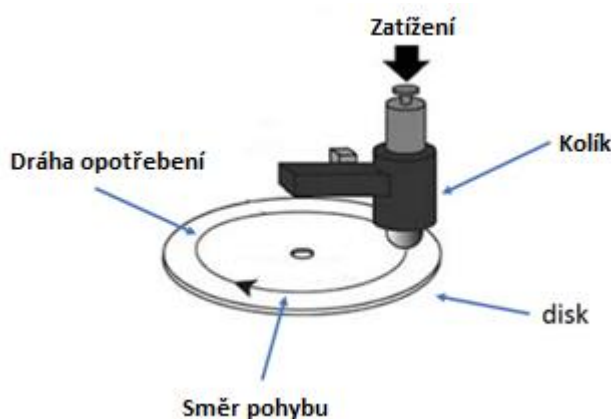
Tato metoda obecně spočívá v použití železničního kola v plné velikosti. Kolo je usazeno buď přímo na části vyříznuté koleje, jak je uvedeno v kapitole 10.3, kde je pohyb kolejnice simulován pomocí pístů, anebo na větším kole, které simuluje kolejnici. [45] Při této metodě je také možné zajistit vibrace jednoho ze subjektů, aby přibližně odpovídali reálnému prostředí. Testovací stavy jsou primárně dva, za sucha a za „mokra“ podobně jako u metody pomocí disků, ale v případě této metody je možné aplikovat mazivo podobným přístrojem jako na reálné vlakové soupravě či kolejnici. Při této metodě lze také využít jinou „kontaminaci“ prostředí měření jako je například voda. [37][39][45]

Tato metoda je jednou z nejdražších metod z důvodu použití reálně velkých kol a velikosti testovacích zařízení obecně. Výhodou této metody je ale přesně ta plná velikost testovaného kola, díky čemuž jsou profily kolejnice a kola přesně takové jaké mají být a také je možné v případě potřeby řešit opotřebení kolejnice. [39] Příklad experimentu na zjištění opotřebení kolejnice je uveden v kapitole 10.3, kde můžeme vidět i příklad přístroje.

10.1.3 METODA PIN-ON-DISC

Tato metoda využívá tribometru zvaného pin-on-disc. Metoda spočívá v použití stacionárního kolíku, který zatěžuje rotační disk konstantním zatížením. Kolík může být jakéhokoli tvaru, ale nejpoužívanějšími jsou sférické tvary, jako je například kulička, nebo také cylindrické tvary, jako je například klasický kolík. Během testování tribometr měří teplotu, koeficient tření a vypočítává koeficient opotřebení. Pro tuto metodu existují dva měřicí stavy, a to je suché měření a měření s mazivem. Mazivo je na disk třeba nanášet zvlášť, jelikož tribometr většinou neobsahuje vlastní nástroj pro mazání. [44] Pro potřeby měření opotřebení kolejových ploch, či ploch železničního kola, je materiál většinou vyříznut v požadovaných rozměrech přímo z vyrobeného kola/koleje a materiál kolíku se volí většinou stejný jako je materiál protikusu tzn. pokud chceme měřit opotřebení koleje, použijeme jako kolík materiál kola a naopak. [37-38]

Výhodou této metody je její finanční nenáročnost z hlediska použití tribometru. Nevýhodou této metody je její jednotvárnost tzn. můžeme měřit odolnost proti opotřebení, případně schopnost maziv omezovat opotřebení. Další nevýhodou je nutnost vyřezávání materiálu z kola/kolejnice pro měření, což může být např. logisticky obtížné. [37] Schématické zobrazení tribometru pin-on-disc vidíme na obrázku číslo 32 a experiment pomocí této metody je uveden v kapitole 10.4.



Obr. 32 Schématické zobrazení tribometru [44]

10.2 EXPERIMENTÁLNÍ SIMULACE OPOTŘEBENÍ OKOLKU A KOLEJE POMOCÍ DVOU DISKŮ

10.2.1 PRŮBĚH EXPERIMENTU

Disky pro simulaci opotřebení v tomto experimentu [36] jsou vyrobeny ze stejných materiálů, ze kterých se vyrábí kolo a kolejnice. Disk simulující kolo má průměr 500 mm a disk simulující kolejnici má průměr 350 mm. Rychlost otáčení kolejového disku byla na začátku experimentu stanovena na 70 km/h, ale v průběhu experimentu ji bylo třeba snížit na 30 km/h pro omezení velikosti vibrační zařízení. Kolový disk se otáčel rychleji než kolejový disk, ale poměr prokluzu mezi nimi byl udržován na hodnotě přibližně 0,001. Úhly náběhu kola byly mezi 0,3 a 0,6 stupni, což simuluje oblouk o poloměru 400 a 200 m.

Pro výpočet zatížení disků byl použit model podle metody konečných prvků. Zatížení disků bylo vypočteno tak, aby odpovídalo reálnému zatížení kola při pohybu na kolejnici. Přesnější radiální zatížení reálného kola je průměrně 23 kN a tahové zatížení kola bývá průměrně 9,1 kN, což odpovídá vertikální síle o velikosti 75 kN a boční síle o velikosti 30 kN. Boční síla na testovací disk tedy byla v rozmezí velikostí 24–35 kN a tahové zatížení bylo v rozmezí velikostí 7,6–11 kN. [36]

Testů proběhlo celkem 8 z nichž 7 bylo provedeno za podmínek „suchého podnebí“ čili disky nebyly ničím mazány. Osmý test proběhl za podmínek „mokrého podnebí“ například za deště. Déšť byl simulován pomocí ostříku disků 200 mililitry vody za minutu. Po každém testu byly disky vyměněny za jiné disky, které měli jinou materiálovou specifikaci. [36]

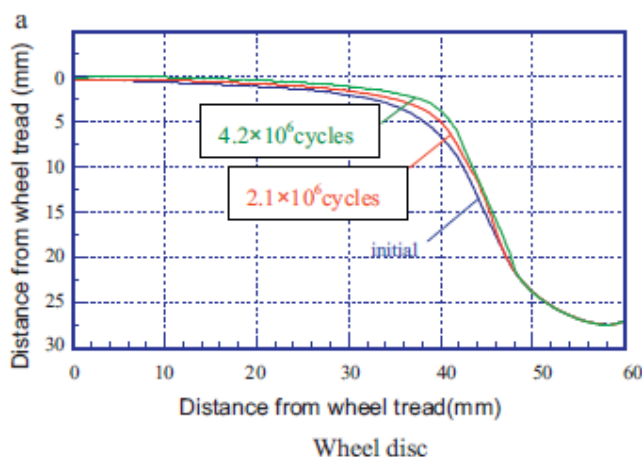
Měření opotřebení bylo provedeno pomocí zařízení Miniprof, které měřilo od $0,2 \times 10^6$ cyklů až do 6×10^6 cyklů. Z hlediska rozdílů disků kol 3×10^6 cyklů kolejového disku odpovídá $2,1 \times 10^6$ cyklům kolového disku, což také odpovídá jízdě 3300 km a převozu 45 megatun materiálu. [36]

10.2.2 VÝSLEDKY EXPERIMENTU

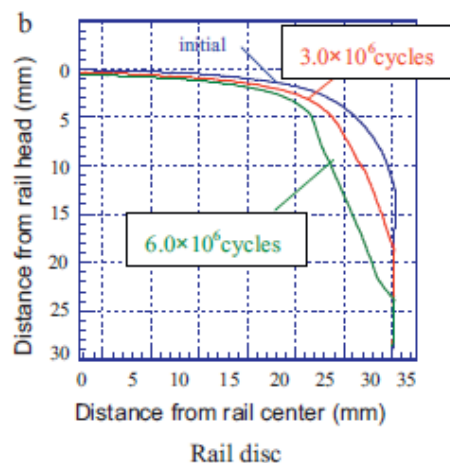
Z experimentu vyplynulo, že opotřebení disků je podobné reálnému opotřebení kola a kolejnice po ujetí 3300 km a převozu 45 megatun materiálu. Dále na výsledcích bylo vidět, že kolejový disk měl větší rozdíly koeficientu opotřebení při zvětšujícím se počtu cyklů oproti disku kolovému, kde tak vysoké rozdíly nejsou. [36]

Dále bylo také zjištěno, že se zvyšujícím se úhlem náběhu kola, se zvyšuje koeficient opotřebení. Zvýšení je způsobeno tím, že se zvyšujícím se úhlem náběhu se zvyšuje vzdálenost mezi bodem dotyku obou disků, což způsobuje větší prokluz mezi kolejnicí a kolem. Koeficient opotřebení okolku a hrany kolejnice je tedy větší než středu věnce kola a vršku kolejnice. Rozdíl ve velikosti koeficientu opotřebení se tedy zvětšuje díky zvětšujícímu se úhlu náběhu kola. [36]

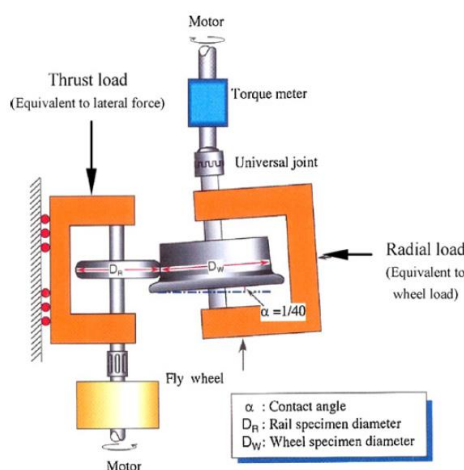
Během experimentu se měnila tvrdost kolejového disku za konstantní tvrdosti kolového disku. Bylo zjištěno, že zvětšením tvrdosti kolového disku z hodnoty 250HB na 380HB, což bylo více než měl kolový disk (kolový disk měl tvrdost 350HB), vede k polovičnímu zmenšení koeficientu opotřebení kolejnice. Zvýšení tvrdosti kolejového disku ale vedlo ke zvýšení koeficientu opotřebení kolového disku během prvních $1,26 \times 10^6$ cyklů, po $2,1 \times 10^6$ cyklů se rychlost změny koeficientu opotřebení kolového disku zpomalila. Zvýšení tvrdosti zpomalilo růst opotřebení jako takového, ale jak bylo řečeno, rychlost opotřebení kola v první fázi experimentu se zvětšila. Při provádění osmého pokusu byly disky postříkovány pomocí vody, což nejen zmenšilo koeficient tření, ale také zmenšilo opotřebení obou disků. [36]



Obr. 33 Vývoj opotřebení profilu kola [36]



Obr. 34 Vývoj opotřebení kolejnice [36]



Obr. 35 Rozložení simulačního zařízení [36]

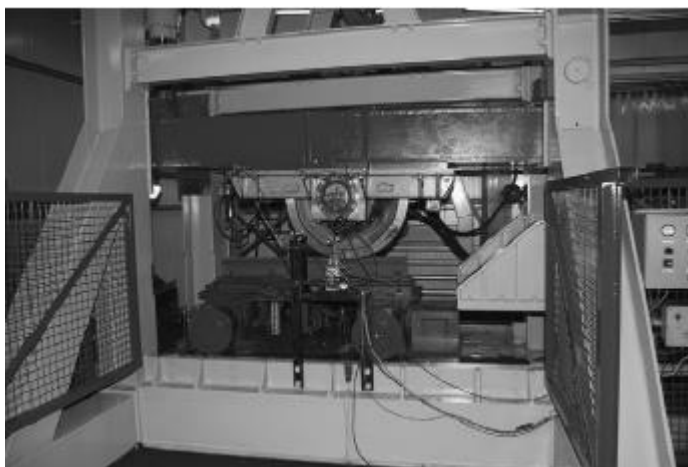
10.3 EXPERIMENTÁLNÍ OVLIVNĚNÍ KONTAKTNÍ ÚNAVY POMOCÍ ZMĚNY MATERIÁLU KOLEJE POMOCÍ KOLA V PLNÉ VELIKOSTI

10.3.1 PRŮBĚH EXPERIMENTU

Test v článku [39] byl proveden pomocí zařízení, které je v měřítku 1:1. Toto zařízení umožňuje nasadit pod kolo až 1,5m dlouhou část kolejnice, kterou je možno pohybovat pomocí hydraulických pístů. Maximální realizovatelná zatížení jsou: boční síla až 100 kN a zatížení od soupravy až 1000 kN. Tření mezi kolem a kolejnicí je na tomto stroji možné realizovat postřikem kontaktního místa mazivem jako je např. olej.

Pro experiment bylo použito kolo o průměru 900 mm se standartním jízdním profilem UIC – ORE. Kolo bylo zatíženo vertikální silou o velikosti 230 kN a boční silou o velikosti 40 kN, úhel náběhu kola byl po celý experiment 0 stupňů. Kolejnice byly použity dvě: R260 o tvrdosti 300HB a R350HT s tvrdostí až 390HB. Po celou dobu experimentu, pokud byl za použití maziva, bylo nanášeno přibližně 0,25 mililitrů maziva každých 250 simulovaných průjezdů kola po kolejnici. Opotřebení kolejnice bylo měřeno pomocí zařízení Miniprof v určeném intervalu a celkový počet simulovaných projektů byl 100 000. [39]

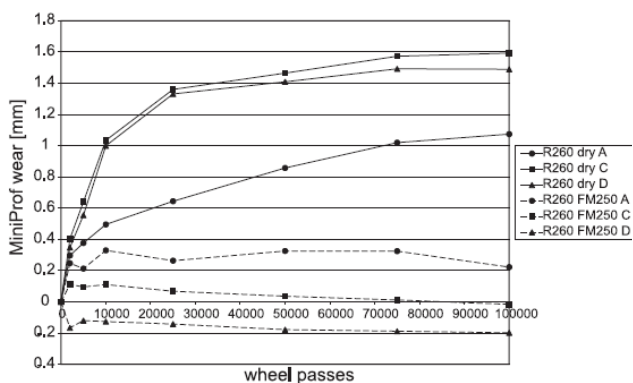
Po dokončení 100 000 simulovaných průjezdů byla kolejnice odříznuta v místě měření zařízením Miniprof na délku 20 mm, to proto, aby bylo možno zkontrolovat kolejnici pro případné praskliny. Vyříznutá část kolejnice byla poté poprášena fluorescentním práškem a pomocí magnetu byl rozprostřen po kolejnici a poté pod UV světlem byla kolejnice vyfotografována pro analýzu prasklin na jejím povrchu. [39]



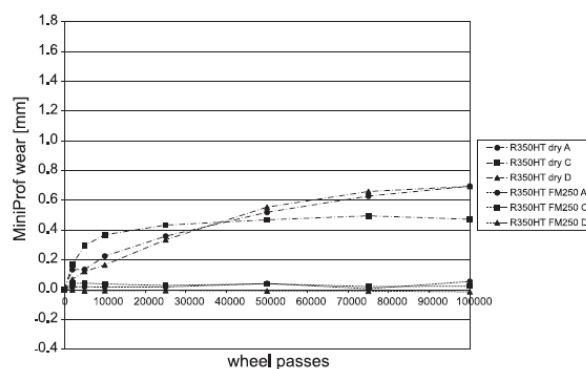
Obr. 36 Testovací zařízení [39]

10.3.2 VÝSLEDKY EXPERIMENTU

Experimentem bylo zjištěno, že při použití obou typů kolejnic za podmínek bez mazání, bylo opotřebení zvýšené během prvních 25000 simulovaných projetí kola na kolejnici. Po tomto počtu projetí se na sebe materiály kola a kolejnice začali adaptovat a docílilo se konformního kontaktu kola s kolejí. Ve výsledku ale byl koeficient opotřebení kolejnice R260 přibližně 2.2x větší než kolejnice R350HT. Aplikace maziva zapříčinila razantní omezení opotřebení kolejnice R260 a na kolejnici R350HT nebylo téměř žádné měřitelné opotřebení. Při aplikaci maziva se na žádné z kolejnic nevyskytovali praskliny. Při pokusech bez maziva byly praskliny na kolejnici R260 asi 2x větší a četnější než na kolejnici R350HT. Z experimentu tedy vyplynulo, že použití kolejnice s větší tvrdostí povrchu vede k omezení opotřebení vršku kolejnice a kolejnice jako takové. Porovnání lze vidět na obrázku 37 a 38. [39]



Obr. 37 Opotřebení kolejnice R260 [39]



Obr. 38 Opotřebení kolejnice R350HT [39]

10.4 EXPERIMENTÁLNÍ SIMULACE OPOTŘEBENÍ POMOCÍ METODY PIN-ON-DISC

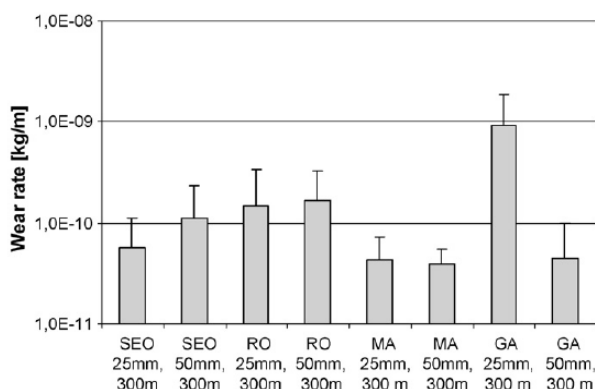
10.4.1 PRŮBĚH EXPERIMENTU

Měřicí zařízení pro experiment [38] bylo umístěno v klimatické komoře, díky které bylo možné upravovat teplotu od 0 do 40 °C a relativní vlhkost prostoru od 20 do 100 %. Rychlost rotace disku byla vypočítána z reálného zatížení vlakové soupravy a zatížení kolíku bylo určeno z poloměru rotujícího disku a normálové síly. Po provedení testu byla velikost opotřebení zaznamenána pomocí 2D mikroskopu a koeficient tření byl vypočten jako poměr tangenciálního zatížení a normálového zatížení.

Disky byly vyrobeny z materiálu kola R7 o tvrdosti 400HV a kolíky z materiálu UIC900A, který má tvrdost 300HV. Průměry kolíků byly 5, 25 a 50 mm a každý z nich byl poté použit pro jinou kontaktní sílu s diskem. Mazání kontaktního bodu bylo provedeno při každém testu jinak. Mazivo bylo při experimentu použito celkem 9, pro 3 pokusy byly například použity minerální oleje. Mazivo bylo nanášeno pomocí injekční stříkačky nastavené na dávkování 0,02g maziva každých 8 m prokluzu kolíku po disku. [38]

10.4.2 VÝSLEDKY EXPERIMENTU

Koeficient opotřebení byl vypočítán pomocí konstantní kluzné délky, která činila 300 m, a také změřením velikosti „jizvy“ opotřebení na povrchu měřicích kolíků. Nejmenší koeficient opotřebení byl zaznamenán při použití minerálních olejů. Největší koeficient opotřebení byl naměřen při použití oleje vyrobeného z řepky. Porovnání použitých olejů můžeme vidět na obrázku číslo 39. [38]



Obr. 39 Porovnání olejů [38]

ZÁVĚR

V dnešní době jsou nejrozvinutější metody měření opotřebení na trati a v laboratoři, z hlediska jednoduššího konstrukčního řešení a nutnosti menší odolnosti komponent. Laboratorní měření je rozvinuté hlavně díky možnosti používání jednoduchých měrek, ale tyto měrky mohou být nepřesné hlavně díky nutnosti odečítat hodnoty z nonia. V budoucnu nejspíše trend bude směřovat k vývoji a zavádění více metod pro měření opotřebení na vlakové soupravě, a to hlavně z důvodu neustálého vývoje senzorického vybavení. Senzorické vybavení je totiž v dnešní době stále celkem křehké a hlavním důvodem pro nerozvinutost tohoto odvětví je také složitost upevnění senzorů na vlakovou soupravu.

Simulování opotřebení železničních kol vede k možnému využití dat pro predikci opotřebení kola jako celku. Podle naměřených hodnot lze vytvořit matematický model, který bude predikovat chování vývoje opotřebení což se dnes již aplikuje. Simulační metody ale v určitých ohledech nutně nemusí odpovídat realitě, ať už z hlediska zmenšení kol, nebo z hlediska neřešení kontaminace stykových ploch kol během reálné jízdy, jelikož styková plocha není ve většině případů dokonale čistá. Pomocí těchto metod lze také simulovat i jiné děje, než opotřebení čili díky nimž bude nejspíše v budoucnu možné omezit například hluk vlakové soupravy při rozjezdu či zatáčení v oblouku, nebo také omezení vibrací vlakové soupravy obecně.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] ANTONICKÝ, S., F. HERZÁŇ, J. JELEN, a K. SELLNER. Lokomotivy a historie. Praha: Nadas, 1989. ISBN 31-009-89 09-18
- [2] Lokomotiva Pendolino. Atlas lokomotiv [online]. Dostupné z: <http://www.atlaslokomotiv.net/loko-680.html>
- [3] Maglev. SVAZ DOPRAVY [online]. Dostupné z: <https://www.svazdopravy.cz/html/cz/maglev.html>
- [4] ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA. DVOJKOLÍ [online]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~pheller/ZSDM/ZSDM%20Dvojkoli.pdf>
- [5] Historický vývoj železnice [online]. Dostupné z: https://geography.upol.cz/soubory/lide/hercik/GEDP/historicky_vyvoj_dopravy_2.pdf
- [6] TNŽ 282100. Kolejová vozidla: Dvojkolí. Federální ministerstvo dopravy, 1984.
- [7] Dvojkolí vývoj a popis. PAROSTROJ [online]. Dostupné z: <http://www.parostroj.net/technika/dvojkoli/dvojkoli.htm>
- [8] KOLA KOLEJOVÝCH VOZIDEL. VAGONY.CZ [online]. Dostupné z: <https://vagony.cz/pojezdy/kola.html>
- [9] SCHÖBEL, Andreas a Simo MIRKOVIĆ. FLAT WHEEL DETECTION AS A PART OF WAYSIDE TRAIN MONITORING SYSTEMS [online]. Dostupné z: <http://www.engineeringscience.rs/images/pdf/article%20179.pdf>
- [10] ZAHRADNÍK, Zdeněk. DIAGNOSTIKA ZÁVAD JEDOUČÍCH VOZIDEL [online]. 2010 Dostupné z: <https://www.spravazeleznic.cz/documents/50004227/50159407/15sb.pdf>
- [11] SOLEIMANI, Hesam a Majid MOAVENIAN. Tribological Aspects of Wheel–Rail Contact: A Review of Wear Mechanisms and Effective Factors on Rolling Contact Fatigue [online]. 2017
- [12] HELLER, Petr. Kolejová vozidla I. Plzeň, 2017. ISBN 978-80-261-0693-7.
- [13] LEWIS, R. a OLOFSSON U. Wheel/Rail Interface Handbook. 2009. ISBN-10: 1439801460.
- [14] ASPLUND, Matthias, Stephen FAMUREWA a Matti RANTATALO. Condition monitoring and e-maintenance solution of railway wheels. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. Emerald Group Publishing Limited, 2014, **2014**(20), 17. Dostupné z: doi: 10.1108/JQME-05-2014-0027
- [15] ZHI-FENG, Zhang. Computer vision based method and system for online measurement of geometric parameters of train wheel sets. *Sensors*. 2012, **2012**(12), 12. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s120100334

- [16] *Roste trade: Calipri prime* [online]. [cit. 2021-03-27]. Dostupné z: <https://www.roste.cz/calipri-prime/>
- [17] MÜLLER, Roger, Pau GRATACOS, Jens NIELSEN, Joseph FENG a Steven CERVELLO. *Definition of wheel maintenance measures for reducing ground vibration* [online]. 2017 [cit. 2021-03-27]. International Union of Railways (UIC). Vedoucí práce Wolfgang Behr.
- [18] ČSN EN 15313. *Železniční aplikace – Požadavky na dvojkolí v provozu – Údržba dvojkolí v provozu na vozidlech a po demontáži*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, listopad 2017.
- [19] Speciální měřidla. *Krnovské opravny a strojírny* [online]. [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: [http://kos.cz/index.php?id=specialni-midla&lang=cz#!prettyPhoto\[specialni-meridla\]/3/](http://kos.cz/index.php?id=specialni-midla&lang=cz#!prettyPhoto[specialni-meridla]/3/)
- [20] ALEMI, Alireza, Francesco CORMAN a Gabriel LODEWIJKS. Condition monitoring approaches for the detectipn of railway wheel defects. *Rail and rapid transit*. 2017, **2017**(231), 20. Dostupné z: doi:10.1177/0954409716656218
- [21] NGIGI, R.W., C. PISLARU, A BALL a F GU. Modern techniques for condition monitoring of railway vehicle dynamics. *Journal of Physics*. 2012, **2012**(364), 12. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/364/1/012016
- [22] ZUREK, Zbigniew. Magnetic monitoring of fatigue procces of the rim material of railway wheel set. *NDT&E International*. 2006, **2006**, 4. Dostupné z: doi:10.1016/j.ndteint.2005.12.004
- [23] MATSUMOTO Akira a SATO Yasuhiro. A new measuring method of wheel–rail contact forces and related considerations. *WEAR*. 2008, **2008**(265), 8. Dostupné z: doi: 10.1016/j.wear.2008.02.031
- [24] GAO, Run, Qixin HE a Qibo FENG. Railway Wheel Flat Detection System Based on a Parallelogram Mechanism. *Sensors*. 2019, 2019(19), 13. Dostupné z: doi:10.3390/s19163614
- [25] Liang B., Iwnicki S., Feng G., Ball A., Tran V.T., Cattley R., 2013, Railway wheel flat and rail surface defect detection by time-frequency analysis, *Chemical Engineering Transactions*, 33, 745-750 DOI: 10.3303/CET1333125
- [26] BRIZUELA, Jose, Alberto IBANEZ, Patricia NEVADO a Carlos FRITSCH. Railway Wheels Flat Detector Using Doppler Effect. *Physics Procedia*. 2010, **2010**(3), 7. Dostupné z: doi:10.1016/j.phpro.2010.01.104
- [27] DWYER-JOYCE, R.S., C. YAO, R. LEWIS a H. BRUNSKILL. *An ultrasonic sensor for monitoring wheel flange contact*. Department of Mechanical Engineering, University of Scheffield, , 12.
- [28] GONG, Zheng, Junhua SUN a Guangjun ZHANG. Dynamic Measurement for the Diameter of A Train Wheel Based on Structured-Light Vision. *Sensors* [online]. 2016, **2016**(16), 19. Dostupné z: doi:10.3390/s16040564

- [29] PAPAELIAS, Mayorkinos, Zheng HUANG, Arash AMINI, Patrick VALLELY, Nigel DAY, Rajesh SHARMA, Yannis KERKYRAS a Spyridon KERKYRAS. Advanced wayside condition monitoring of rolling stock wheelsets. *11th European Conference on Non-Destructive testing*. Praha, 2014, **2014**, 12.
- [30] TURABIMANA, Pacifique a Celestin NKUNDINEZA. Development of an On-Board Measurement System for Railway Vehicle Wheel Flange Wear. *Sensors*. 2020, 2020(20), 20. Dostupné z: doi:10.3390/s20010303
- [31] *Railsystem.net: Rail-wheel Lubrication* [online]. Railsystem [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: <http://www.railsystem.net/rail-wheel-lubrication/>
- [32] *Tribotechnika.sk: Modifikace a regulace tření kola a kolejnice* [online]. Slovensko: TechPark, 2009 [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-1-2009/modifikace-a-regulace-treni-kola-a-kolejnice.html>
- [33] ZELENKA, Jaromír a Jiří IZER. Nový jízdní obrys železničního kola a jeho zkušební provoz. *Vědeckotechnický sborník ČD*. Česká Třebová, 2000, **2000**(10), 18.
- [34] ČSN EN 13262. Železniční aplikace – Dvojkolí a podvozky – Kola – Požadavky na výrobek. 2011. Třídící znak 280521.
- [35] ONDRIAŠOVÁ, P. Metody kontroly železničních kol v současné technické praxi. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 31 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Juliš, Ph.D.
- [36] JIN, Ying, Makoto ISHIDA a Akira NAMURA. Experimental simulation and prediction of wear of wheel flange and rail gauge corner. *Wear*. 2011, **271**(1-2), 259-267. ISSN 00431648. Dostupné z: doi: 10.1016/j.wear.2010.10.032
- [37] Lewis, Roger & Magel, Eric & Wang, Wen-jian & Olofsson, Ulf & Lewis, Stephen & Slatter, Tom & Beagles, Adam. (2017). Towards a Standard Approach for Wear Testing of Wheel and Rail Materials. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 231. 10.1177/0954409717700531.
- [38] SUNDH, Jon, Ulf OLOFSSON a Krister SUNDVALL. Seizure and wear rate testing of wheel–rail contacts under lubricated conditions using pin-on-disc methodology. *Wear*. 2008, 265(9-10), 1425-1430. ISSN 00431648. Dostupné z: doi: 10.1016/j.wear.2008.03.025
- [39] STOCK, Richard, Donald T. EADIE, Dave ELVIDGE a Kevin OLDKNOW. Influencing rolling contact fatigue through top of rail friction modifier application – A full scale wheel–rail test rig study. *Wear*. 2011, 271(1-2), 134-142. ISSN 00431648. Dostupné z: doi: 10.1016/j.wear.2010.10.006
- [40] TASSINI, N., X. QUOST, R. LEWIS, R. DWYER-JOYCE, C. ARIAUDO a N. KUKA. A numerical model of twin disc test arrangement for the evaluation of railway wheel wear prediction methods. *Wear*. 2010, **268**(5-6), 660-667. ISSN 00431648. Dostupné z: doi: 10.1016/j.wear.2009.11.003

- [41] HSU, S S, Z HUANG, S D IWNICKI, D J THOMPSON, C J C JONES, G XIE a P D ALLEN. Experimental and theoretical investigation of railway wheel squeal. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 2016, 221(1), 59-73. ISSN 0954-4097. Dostupné z: doi: 10.1243/0954409JRRT85
- [42] MATSUMOTO, Akira, Yasuhiro SATO, Hiroyuki ONO, Yonjin WANG, Masayuki YAMAMOTO, Masuhisa TANIMOTO a Yasushi OKA. Creep force characteristics between rail and wheel on scaled model. *Wear*. 2002, 253(1-2), 199-203. ISSN 00431648. Dostupné z: doi: 10.1016/S0043-1648(02)00100-X
- [43] BRAGHIN, F., R. LEWIS, R.S. DWYER-JOYCE a S. BRUNI. A mathematical model to predict railway wheel profile evolution due to wear. *Wear*. 2006, **261**(11-12), 1253-1264. ISSN 00431648. Dostupné z: doi: 10.1016/j.wear.2006.03.025
- [44] Pin on disk test. Tribonet [online]. Tribonet, 2019, 24.02.2019 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.tribonet.org/wiki/pin-on-disk-test/>
- [45] ZHANG, Weihua, Jianzheng CHEN, Xuejie WU a Xuesong JIN. Wheel/rail adhesion and analysis by using full scale roller rig. *Wear*. 2002, 24.02.2019, 253(1-2), 82-88. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/S0043-1648(02)00086-8
- [46] HSU, S S, Z HUANG, S D IWNICKI, D J THOMPSON, C J C JONES, G XIE a P D ALLEN. Experimental and theoretical investigation of railway wheel squeal. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 2016, 221(1), 59-73. ISSN 0954-4097. Dostupné z: doi:10.1243/0954409JRRT85
- [47] WANG, W.J., P. SHEN, J.H. SONG, J. GUO, Q.Y. LIU a X.S. JIN. Experimental study on adhesion behavior of wheel/rail under dry and water conditions. *Wear*. 2011, **271**(9-10), 2699-2705. ISSN 00431648. Dostupné z: doi: 10.1016/j.wear.2011.01.070
- [48] Modul – FAST 10 - Železniční stavby: Kapitola I. Historie a současnost železničních staveb (ČÁST I) [online]. Ostrava: VŠB-TU, 2009. Dostupné také z: <http://projekt150.ha-vel.cz/node/80>
- [49] NETUŠIL, František. *Diagnostika závad jedoucích drážních vozidel systémem ASDEK*. Pardubice, 2014. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Martin Kohout.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

F_p	[kN]	Maximální síla od defektu
F_{dyn}	[kN]	Dynamická změna sil
F_l	[kN]	Zatížení kola
HB	[–]	Tvrdost podle Brinella
HV	[–]	Tvrdost podle Vickerse
P	[kN]	Vertikální síla
Q	[kN]	Boční síla
UIC		Mezinárodní železniční unie

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1. Protokol z měření tří dvojkolí