



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

KLASIFIKACE A HODNOCENÍ OPOTŘEBENÍ KOLEJNIC

CLASSIFICATION AND EVALUATION OF RAIL WEAR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ROSTISLAV NOHEL

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. RADOVAN GALAS

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2014/15

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Rostislav Nohel

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

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:

Klasifikace a hodnocení opotřebených kolejnič

v anglickém jazyce:

Classification and evaluation of rail wear

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je popsat mechanismy opotřebených kolejnič. Práce bude obsahovat klasifikaci a příčiny mechanismů opotřebených a způsoby hodnocení opotřebených.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce musí obsahovat: (odpovídá názvům jednotlivých kapitol v práci)

1. Úvod
2. Analýza problému a cíl práce
3. Přehled současného stavu poznání
4. Diskuze
5. Závěr
6. Seznam použitých zdrojů

Forma práce: průvodní zpráva

Typ práce: rešeršní; Účel práce: vzdělávání

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 - 20 stran textu bez obrázků).

Zásady pro vypracování práce:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2015.pdf

Šablona práce: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/UK_sablona_praci.zip

Seznam odborné literatury:

Wheel-rail interface handbook: materials, mechanisms and practice. 1st pub. Editor R Lewis, Ulf Olofsson. Cambridge: Woodhead, 2009, xxii, 842 s. Woodhead publishing in mechanical

engineering. ISBN 978-1-84569-412-8.

Wear: materials, mechanisms and practice. 1st pub. Editor G Stachowiak. Chichester: John Wiley, c2005, xv, 458 s. Tribology in practice series. ISBN 04-700-1628-0.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Radovan Galas

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 16. 11. 2014



v. z. Hartl

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

v. z. Radou

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

ABSTRAKT

Předložená bakalářská práce je zaměřena na opotřebení kolejnic. V práci se čtenář nejprve seznámí se základními pojmy kolejové dopravy jako je názvosloví kola a kolejnice, adheze, součinitel adheze, kontaktní plocha, skluz, trakční křivka a opotřebení. Následně jsou v práci popsány základní typy opotřebení materiálu (adhezivní, abrazivní a únavové), které nastávají při kontaktu kola a kolejnice. V další části je práce zaměřena na analýzu jednotlivých kolejnicových vad vzhledem k místům, kde vznikají. Výstupem bakalářské práce je přehled a popis nejběžnějších vad kolejnic, které zpravidla způsobuje únavové opotřebení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kolo, kolejnice, adheze, opotřebení, abraze, únava, trhлина, vady kolejnic

ABSTRACT

This bachelor's thesis is focused on the wear of rails. In this thesis, the reader will be firstly introduced to the fundamentals such as nomenclature of wheel and rail, adhesion, adhesion coefficient, contact area, slip, traction characteristic and wear. Subsequently, the fundamental types of material wear (adhesive, abrasive and fatigue) will be explained, which occur in the wheel-rail contact. In the next part, the individual rail defects are analysed with respect to locations. The output of the bachelor's thesis is overview and description of the most common rail defects which are usually caused by fatigue wear.

KEY WORDS

Wheel, rail, adhesion, wear, abrasion, fatigue, crack, rail defects

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NOHEL, R. *Klasifikace a hodnocení opotřebení kolejnic*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 45 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Radovan Galas.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že předloženou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením Ing. Radovana Galase a všechny literární zdroje, ze kterých jsem čerpal, jsem uvedl v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 22. května 2015

.....
Rostislav Nohel

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat především Ing. Radovanovi Galasovi za jeho výborné vedení, cenné rady a připomínky, které mi velice pomohly. Dále bych chtěl poděkovat mé rodině za podporu během studia.

OBSAH

ÚVOD	12
1 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	13
1.1 Analýza problému	13
1.2 Cíl práce	13
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1 Základní pojmy	14
2.2 Adhezivní opotřebení	19
2.3 Abrázivní opotřebení	22
2.4 Únavové opotřebení	24
2.5 Vady kolejnic	26
3 DISKUZE	38
4 ZÁVĚR	40
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	41
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	44
SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	45

ÚVOD

Kolejová doprava patří mezi efektivní způsob přepravy osob a nákladu na dlouhé i krátké vzdálenosti. Mezi její výhody patří zejména nízká energetická náročnost, vysoká přepravní kapacita a rychlost. Další její výhodou je především environmentální nezávadnost, protože ve srovnání se silniční dopravou má kolejová doprava výrazně nižší dopad na životní prostředí.

Bezpečnost a spolehlivost kolejové dopravy je ovlivňována řadou faktorů. Jedním z nejpodstatnějších faktorů jsou třecí podmínky v kontaktu kola a kolejniče. Kontakt kola a kolejniče je tzv. otevřený tribologický systém, což znamená, že okolní podmínky v kontaktu se neustále mění. Z toho důvodu nemá kontakt kola a kolejniče mnoho analogií s jinými kontakty dvou těles z oblasti strojírenství. Možná analogie se nabízí s kuličkovými ložisky, ale tato ložiska mají pevně definované okolní podmínky, které se po celou dobu životnosti ložiska nemění.

Tření mezi kolem a kolejnici je doprovázeno opotřebením materiálu, což má negativní dopad na míru vibrací, hladinu hluku a na komfort cestujících. Navíc, toto opotřebenění může vést až k iniciaci trhliny a následné kontaktní únavě. Z hlediska bezpečnosti a spolehlivosti kolejové dopravy je nutné tyto vady včas detekovat a odstranit.

1 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

1

1.1 Analýza problému

1.1

Jedním z klíčových faktorů kolejové dopravy je kontaktní plocha mezi kolem a kolejnicí, která zajišťuje přenos trakčních sil z kola na kolejnici. Přenos sil mezi kolem a kolejnicí je doprovázen adhezivním a abrazivním opotřebením. Vzhledem k povaze zatížení jsou navíc tyto součásti cyklicky namáhány, což může vést až ke kontaktní únavě. Z těchto důvodů jsou v praxi každoročně vykládány nemalé finanční prostředky související s kontrolou stavu kolejnic, přebroušováním, popř. výměnou některých částí kolejnic. Vzhledem k širokému spektru vad, které se na kolejnicích objevují, je tedy nezbytné umět tyto vady klasifikovat a posoudit jejich dopad na provoz a bezpečnost kolejové dopravy.

1.2 Cíl práce

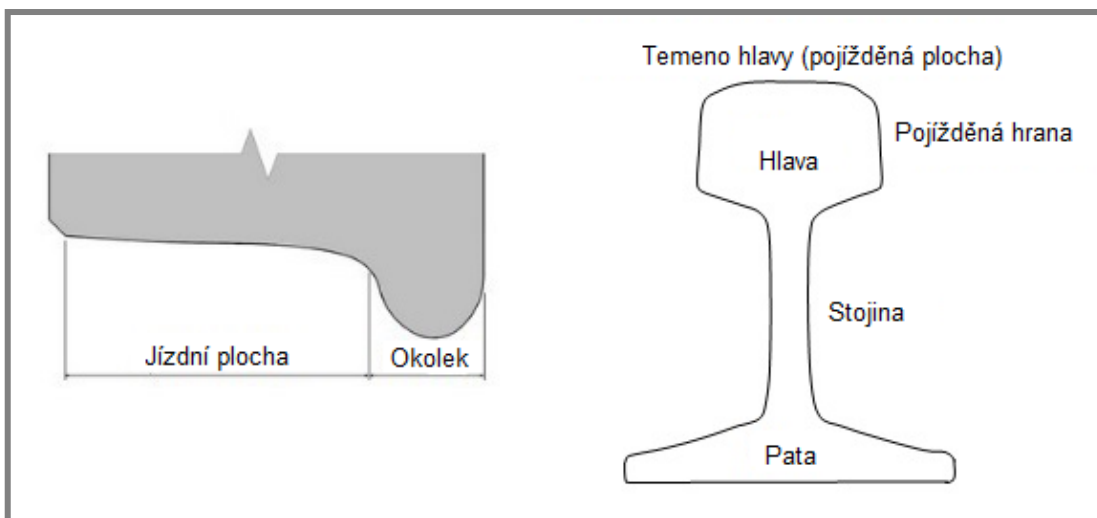
1.2

Primárním cílem bakalářské práce je popsat nejběžnější kolejnicové vady, které vznikají v důsledku různých mechanismů opotřebení. Součástí práce bude také popis těchto mechanismů opotřebení a definice a vysvětlení základních pojmů kolejové dopravy.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Základní pojmy

Názvosloví kola a kolejnice



Obr. 2-1 Názvosloví kola [1] a kolejnice [2]

Obr. 2-1 popisuje názvy jednotlivých částí kola a kolejnice. Kolo je tvořeno dvěma částmi a to okolkem a jízdnicí. Primárním cílem okolku je zajištění vedení vozidla při průjezdu traťovým obloukem. Jízdní plocha má tvar odpovídající přibližně výseku z rotačního hyperboloidu nebo soustavě komolých kuželů, přičemž průměr kola se vzhledem k vnějšímu okraji zmenšuje [3]. Tento tvar zajišťuje stabilní vedení kola po kolejnici i hladký průjezd obloukem.

Kolejnici lze rozdělit na tři části. Spodní část kolejnice se nazývá pata, přičemž její šířka je volena s ohledem na široké spektrum zatížení (tlakové, smykové, aj.), které mohou na trati nastat. Šířka paty je vždy menší než celková výška kolejnice. Poměr šířky a výšky kolejnice se pohybuje u evropských kolejnic v rozmezí 0,8 až 0,9 [2]. Druhá část kolejnice je označována jako hlava a lze ji rozdělit na dvě části. Vrchní část, kde dochází ke styku s jízdnicí, se říká temeno hlavy. Další část se nachází na vnitřní straně kolejnice a v literatuře je označována jako pojížděná hrana. Zde dochází ke kontaktu s okolkem. Třetí část kolejnice je označována jako stojina, která spojuje hlavu a patu a má největší podíl na celkové výšce kolejnice. V České republice se nejčastěji vyskytují kolejnice s označením S 49 (tab. 2-1) [2].

Tab. 2-1 Typy kolejnic dle tvaru [2]

Tvar	Výška [mm]	Šířka paty [mm]	Šířka hlavy [mm]	Tloušťka stojiny [mm]	Plocha průřezu [cm ²]	Hmotnost 1 m délky [kg]
UIC 60	172	150	72,0	16,5	76,86	60,34
S 49	149	125	67,0	14,0	62,97	49,43
R 65	180	150	72,8	18,0	82,70	64,98

Adheze

Adheze je schopnost přenosu třecích sil mezi dvěma povrchy [4]. V kolejové dopravě se tedy jedná o přenos třecích (trakčních) sil mezi kolem a kolejnicí. Míra adheze je ovlivňována řadou faktorů, jako je např. přítomnost vody, oxidů a nečistot v kontaktu.

Součinitel adheze

U většiny kovových materiálů se součinitel adheze pohybuje mezi hodnotami 0,3 až 1 [5]. Jeho velikost silně závisí na okolních podmínkách. Při suchých podmínkách je možné dosáhnout hodnoty součinitele adheze kolem 0,3. Jeden z nejvýznamnějších kontaminantů, který vede ke snížení adheze je listí. Vlivem vysokého kontaktního tlaku je listí v kontaktu drceno a dochází k uvolňování tzv. pektinu, který v kontaktu působí jako mazivo. V takovém případě může hodnota adheze klesnout až na hodnotu 0,07 (tab. 2-2). Adhezi je možné zvýšit za pomoci pískování [6]. Pískování je proces, při kterém se do kontaktu kola a kolejnice přivádí směs písku a vzduchu a to buď mechanicky, nebo elektropneumatiky.

Tab. 2-2 Závislost součinitele adheze na povrchových podmínkách [7]

Povrchové podmínky koleje	Součinitel adheze
Suchá kolej	0,25 - 0,30
Mokrá kolej	0,18 - 0,20
Mokrá kolej s pískem	0,22 - 0,25
Kolej s plastickým mazivem	0,15 - 0,18
Sníh na koleji	0,10
Sníh na koleji s pískem	0,15
Mokrý listí na koleji	0,07

Součinitel adheze je bezrozměrná veličina a definuje se jako podíl třecí a normálové síly (vztah 2.1) [4]. Při průjezdu traťovým obloukem je nezbytné vyjádřit součinitel adheze jako vektorový součet. Pohybuje-li se vozidlo po přímé trati, pak se součinitel adheze uvažuje pouze v jednom směru.

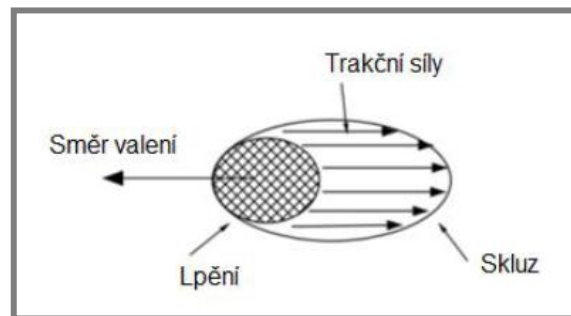
$$\mu = \sqrt{\mu_x^2 + \mu_y^2} = \sqrt{\left(\frac{F_{tx}}{F_n}\right)^2 + \left(\frac{F_{ty}}{F_n}\right)^2} \quad (2.1)$$

kde:

μ	1	je celkový součinitel adheze
μ_x, μ_y	1	- součinitel adheze v ose x resp. v ose y
F_{tx}, F_{ty}	N	- třecí síla v ose x resp. v ose y
F_n	N	- normálová síla v kontaktu

Kontaktní plocha

Mezi kolem a kolejnicí je pro zjednodušení uvažována kontaktní plocha jako elipsa, jejíž hlavní poloosa má totožný směr s pohybem vozidla (obr. 2-2). Velikost kontaktní oblasti, stejně jako velikost tlaku, je zpravidla vypočítána s využitím Hertzovy teorie. Výše zmíněnou kontaktní plochu lze rozdělit na dvě oblasti a to na oblast lpění a oblast skluzu. Oblast lpění je tvořena mikrosvary a vzniká na náběžné straně, přičemž povrchy kola a kolejnice se zde odvalují bez vzájemného posuvu. Naproti tomu oblast skluzu zajišťuje přenos trakčních sil z kola na kolejnici a dochází zde již ke vzájemnému posuvu [5].



Obr. 2-2 Kontaktní plocha mezi kolem a kolejnicí [5]

Maximální kontaktní tlak se stanoví podle následující rovnice [5]:

$$p = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot P \cdot E^2}{2 \cdot \pi^3 \cdot R^2 \cdot (1 - \nu^2)^2}} \quad (2.2)$$

kde:

p	MPa	je maximální kontaktní tlak
P	N	- normálové zatížení
E	MPa	- redukovaný Youngův modul
R	mm	- redukovaný poloměr křivosti
ν	1	- Poissonovo číslo

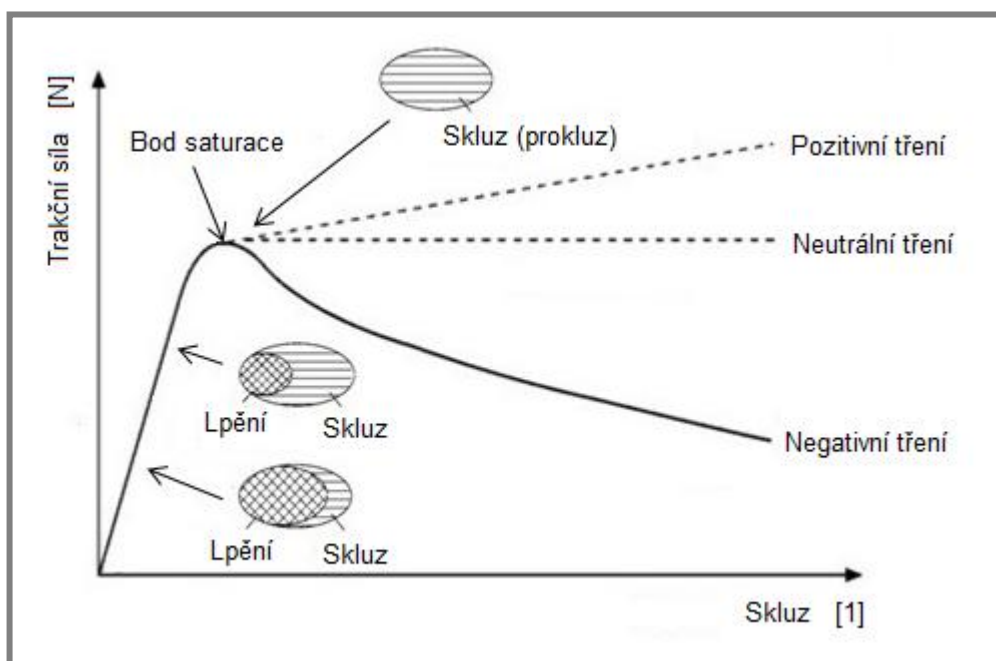
Skluz

Skluz je definován jako rozdíl mezi obvodovou rychlostí kola a vlastní rychlostí vozidla [4].

Trakční křivka

Trakční křivka popisuje závislost trakční síly na skluzu [5]. Na trakční křivce se nachází bod saturace, který ji rozděluje na dvě části (obr. 2-3). První část křivky se nazývá efektivní a nachází se před bodem saturace. Druhá část křivky se nazývá neefektivní a nachází se za bodem saturace. Kontaktní plocha v efektivní části je tvořena oblastí lpění a skluzu, přičemž se zvyšující se trakční silou postupně zaniká oblast lpění a zvětšuje se oblast skluzu. Po dosažení bodu saturace zcela zanikne

oblast lpění a celá kontaktní plocha se ocitne ve stavu neefektivního skluzu, který je v literatuře označován jako „prokluz“ [5].



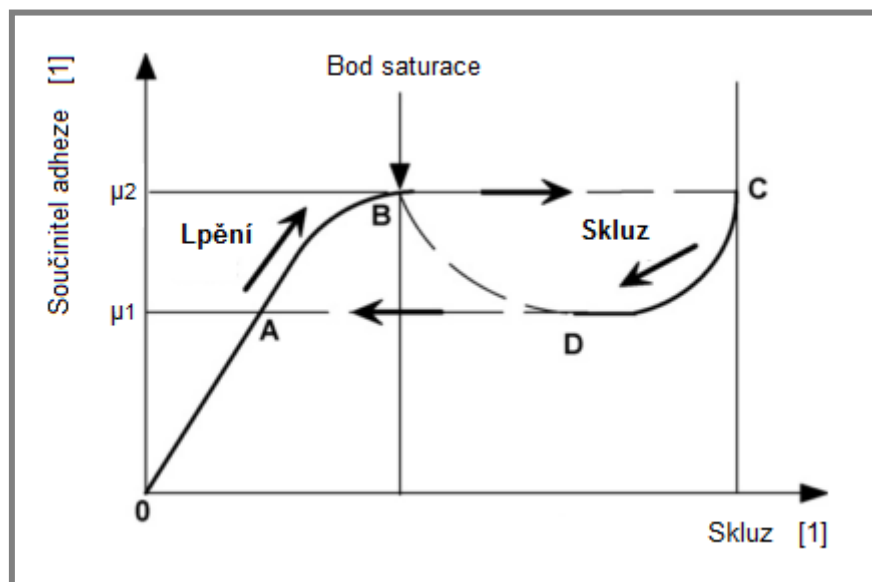
Obr. 2-3 Trakční křivka – upraveno [5]

Podle sklonu trakční křivky za bodem saturace se rozlišují tři případy tření. Za běžných okolních podmínek (suchý kontakt, přítomnost písku) má trakční křivka za bodem saturace průběh negativního tření, které je základním předpokladem pro výskyt tzv. stick-slip cyklu (obr. 2-4). Jedná se o jev, kdy se v kontaktní ploše, která se již nachází ve stavu neefektivního skluzu, začne znovu objevovat oblast lpění [5].

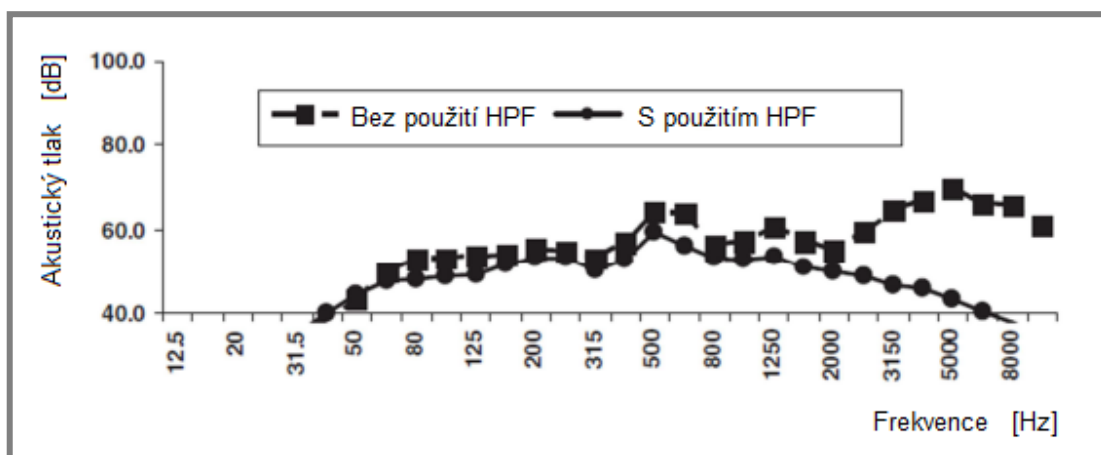
Pozitivního tření lze dosáhnout pomocí tzv. modifikátoru tření s pozitivními třecími vlastnostmi, který může být aplikován buď na jízdní plochu kola, nebo na temeno hlavy (pojízdnou plochu) kolejnice pomocí stacionárních aplikátorů. Modifikátor tření je materiál, který může mít nízký (LCF), vysoký (HPF) nebo velmi vysoký (VHPF) součinitel tření [8]. V kolejové dopravě se zejména používají HPF modifikátory, protože zabráňují tvorbě negativního tření a tím i výskytu stick-slip cyklu. Aplikace HPF modifikátoru vede i ke snížení hlučnosti (obr. 2-5) a k poklesu laterální (boční) síly až o 50 %.

Opotřebení

„Opotřebení je trvalá nežádoucí změna povrchu, nebo rozměrů tuhých těles, vyvolaná vzájemným působením funkčních ploch, nebo funkční plochy a média, které opotřebení vyvolává“ [9]. Na odolnost proti opotřebení má vliv řada faktorů: konstrukční řešení, výrobní proces součásti, provozní podmínky, materiál a v poslední řadě tepelné či chemicko-tepelné zpracování [10].



Obr. 2-4 Stick-slip cyklus [11]

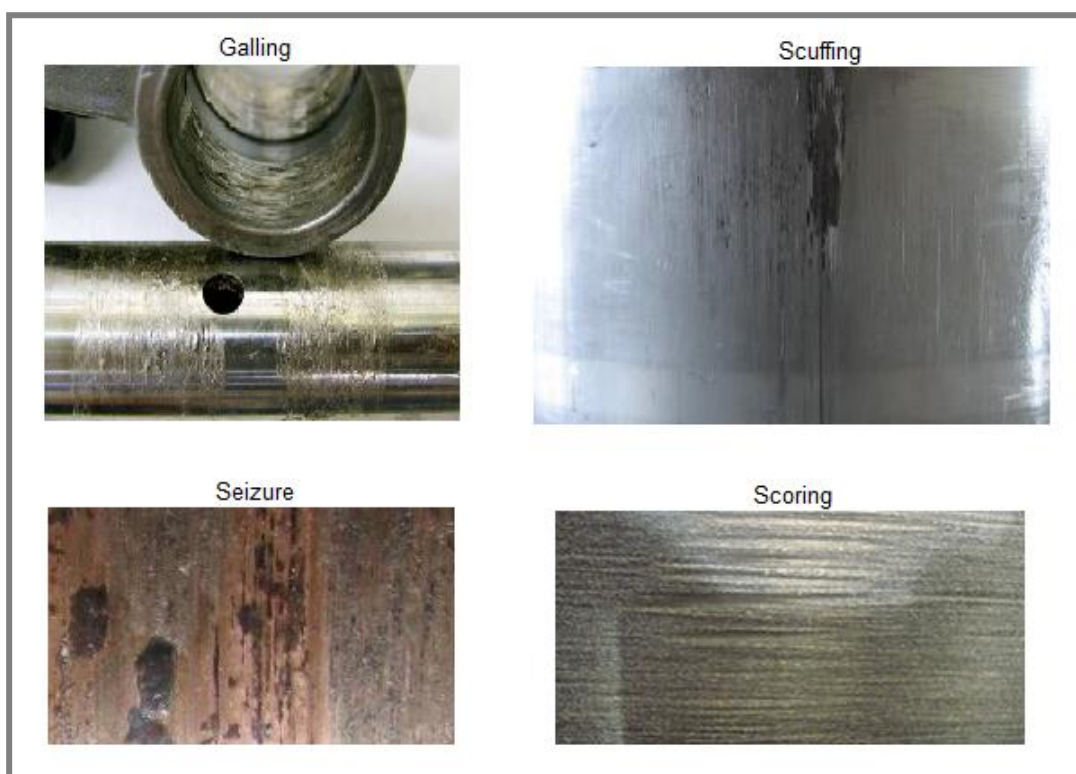


Obr. 2-5 Srovnání hluku před a po aplikaci HPF [12]

2.2 Adhezivní opotřebení

Adhezivní opotřebení je typické pro případy, kde dochází ke smýkání nebo valení dvou tuhých těles [13]. Vzhledem k tomu, že u valení dochází také ke smyku, nastává adhezivní opotřebení i v kontaktu kola a kolejnice. Jelikož povrchy materiálů nejsou dokonale hladké, vzniká lokální styk mikronerovností a dochází k elastické a plastické deformaci a ke tvorbě tzv. mikrospojů, které jsou následně porušovány působením normálních sil v kontaktu [10]. Elastická deformace vzniká hned od počátku kontaktu a má lineární průběh. Pokud tlakové napětí dosáhne hodnoty meze kluzu, dochází postupně k plastické deformaci materiálu, přičemž porušován je materiál s horšími mechanickými vlastnostmi (mez pevnosti, mez kluzu, tvrdost). Při porušování mikrospojů dochází k prudkému zvýšení lokální teploty, což vede ke tvorbě oxidických vrstev.

Adhezní síly způsobují čtyři základní druhy opotřebení povrchu materiálu (obr. 2-6) a to „galling“ (odírání), „scuffing“ (zadírání), „seizure“ (úplné zadření) a „scoring“ (rýhování) [5]. Jestliže částice tvrdšího materiálu při porušování mikrospojů vnikne do měkčího materiálu, pak nastává tvárný nebo křehký lom. Tento lom může vést k úplnému vytržení kusu materiálu a tato situace je v literatuře označována jako galling. Pokud takové opotřebení nastane v důsledku selhání mazání, pak je toto opotřebení označováno jako scuffing a může vést k úplnému zadření systému, tedy k seizure. Poslední druh opotřebení se nazývá scoring a vyznačuje se rýhovaným povrchem. Scoring je téměř vždy prvním předpokladem výskytu abrazivního opotřebení.

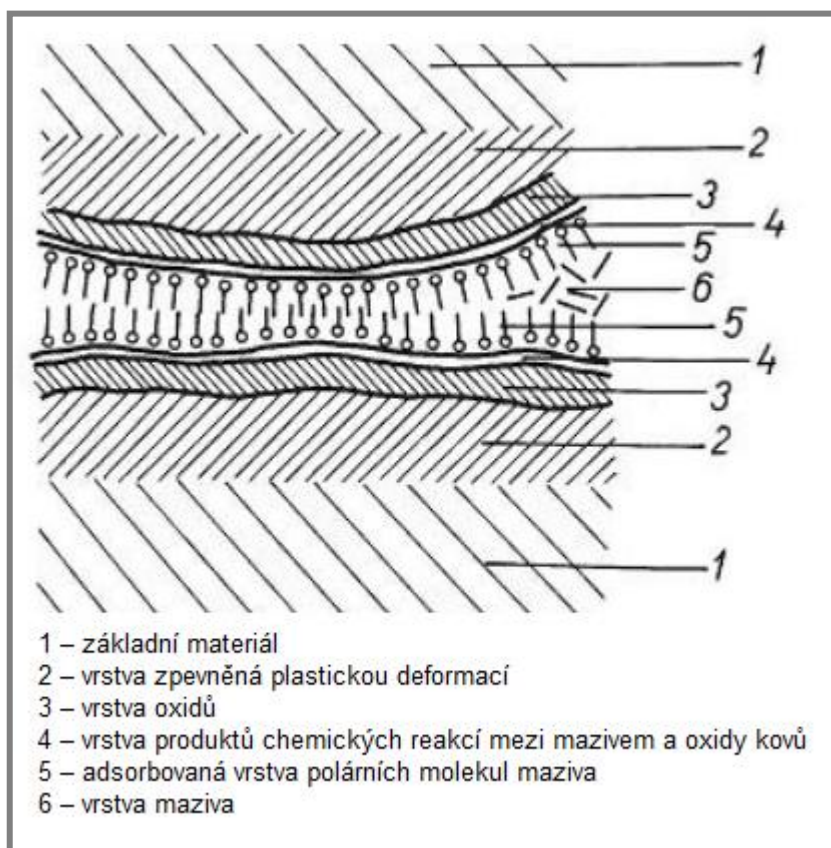


Obr. 2-6 Opotřebení povrchu materiálu způsobené adhezí [14,15,16,17]

Faktory ovlivňující adhezivní opotřebení

Mezi významné faktory ovlivňující adhezi patří především [10]:

- materiály třecích dvojic, kde zejména záleží na jejich povrchových vrstvách (obr. 2-7) a mechanických vlastnostech, kde za jednu z nejdůležitější je považována tvrdost,
- zatížení, které může působit v jednom nebo více směrech a může být stálé nebo proměnlivé,
- hloubka vnikání a poloměr zakřivení povrchových mikronerovností,
- mazivo a způsob provedení mazání,
- relativní rychlost pohybu (malé rychlosti způsobují plastickou deformaci),
- okolní prostředí,
- doba funkce,
- teplota.



Obr. 2-7 Schéma povrchových vrstev v oblasti dotyku dvou kovových materiálů [10]

Dva případy adhezivního opotřebení

V závislosti na úrovni jednotlivých faktorů lze intenzitu adhezivního opotřebení rozdělit na dva případy.

- V prvním případě dochází pouze k mírnému opotřebení. To nastává, pokud rychlost porušování adsorpční a oxidové vrstvy na povrchu je menší než rychlost její obnovování. V takovém případě působí tyto vrstvy jako ochrana povrchů, brání vzniku adhezních spojů, které jsou méně četné a méně dokonalé, takže při jejich následném porušování nedochází k významnějšímu přenosu materiálu mezi povrchy [10]. Tato míra opotřebení se vyznačuje lesklým a vyhlazeným povrchem bez rýh a stop po zadírání (obr. 2-8).



Obr. 2-8 Mírné adhezní opotřebení povrchu pouzdra [13]

- Ve druhém případě je míra opotřebení podstatně větší. Rychlost porušování vrstev je zde vyšší, a proto se tyto vrstvy nestíhají obnovovat. Vzniká zde více mikrospojů, které jsou následně rozrušovány a dochází k přenosu materiálu, případně ke vzniku volných (tzv. otěrových) částic, které následně mohou způsobovat abrazivní opotřebení [13]. Takto intenzivně opotřebovávané povrchy jsou rýhované (scoring). V tomto případě vzrůstá velmi silně odpor proti pohybu a v některých případech tato intenzita opotřebení končí úplným zadřením strojní součásti (seizure). Na obr. 2-9 je možné vidět vysokou míru opotřebení kola.

V technické praxi se častěji vyskytuje adhezní opotřebení s přenosem materiálu, protože při velkých plastických deformacích v místě adhezního mikrospoje dochází ke zpevnování materiálu a to způsobuje, že k následnému rozrušení mikrospoje dojde mimo původní rozhraní povrchů [10].



Obr. 2-9 Adhezní opotřebení kola [18]

2.3 Abrazivní opotřebení

Abrazivní opotřebení je jedním z velmi intenzivních degradačních procesů a je typický pro případ styku dvou povrchů, přičemž jeden nebo oba povrchy mají vysokou tvrdost a drsnost. Ve většině případů začne působit současně s adhezivním opotřebením. Uvádí se, že 50 % všech případů opotřebení strojů a strojních součástí je způsobeno abrazí [5].

Faktory ovlivňující abrazivní opotřebení

Významnými faktory, které ovlivňují míru abrazivního opotřebení, jsou mechanické vlastnosti volných (otěrových) částic [13]. Při nízké pevnosti částic dochází vlivem silového působení k vysokému kontaktnímu tlaku a částice je drcena. V důsledku tohoto procesu dochází k otupování a odlamování hran a vznikají nové menší částice, které mohou působit intenzivněji než předchozí částice.

Tvrdost částic má podstatný vliv na intenzitu opotřebení. Jestliže má částice vyšší tvrdost než materiál, pak její schopnost vniknout do materiálu je podstatně zvýšena. Hodnoty tvrdostí některých minerálů, abraziv a kovových materiálů zobrazuje tab. 2-3.

Tab. 2-3 Tvrdost některých minerálů, abraziv a kovových materiálů [9]

Materiál	Tvrdost (HV)	Kovový materiál	Tvrdost (HV)
Vápenec	110	Železo Armco	90
Sklo	500	Žíhané oceli	100 - 250
Živec	600 - 750	Perlitická ocel	230 - 350
Křemen	900 - 1280	Ocel pro ložiska	700 - 950
WC	1900	Nástrojové oceli	700 - 1000
Korund	2000	Cementovaná ocel	900
TiC	2450	Nitridovaná ocel	900 - 1250
SiC	2500	WC + Co	1400 - 1800

Dalším faktorem ovlivňujícím abrazi je celkový rozměr částice [13]. Jedná se zejména o tvar a velikost. Tvar částice má podobně jako tvrdost podstatný vliv na intenzitu opotřebení. Ostrohranné částice mají několikanásobně vyšší intenzitu opotřebení než zaoblené částice. Z hlediska velikosti je možné částice rozdělit do dvou skupin a to na malé a velké. Částice, které jsou větší, než je vůle mezi povrchy materiálu, jsou označovány za velké a v takovém případě dochází k abrazivnímu opotřebením (obr. 2-10). Naproti tomu malé částice jsou takové, které mají menší rozměr než je vůle mezi povrchy materiálu.

V neposlední řadě je nutné mezi tyto faktory zařadit i množství otěrových částic. Čím více částic bude působit mezi funkčními povrchy, tím více bude opotřebení intenzivnější.

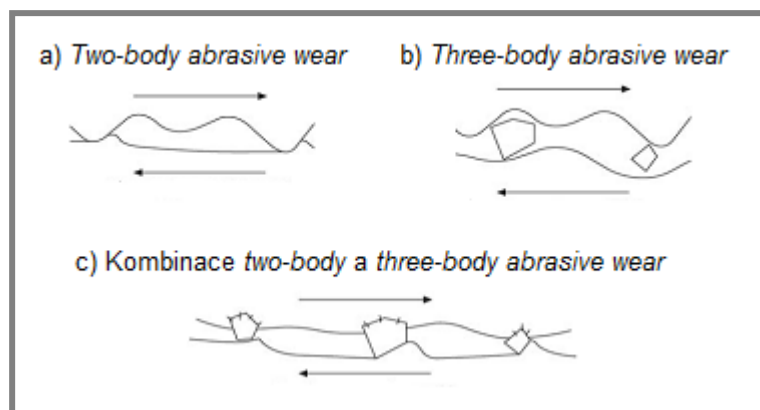


Obr. 2-10 Abrázivní opotřebení pístu [19]

Tři případy abrazivního opotřebení

Podle působení ošetrových částic a intenzitě jednotlivých faktorů lze abrazi rozdělit na tři případy [5].

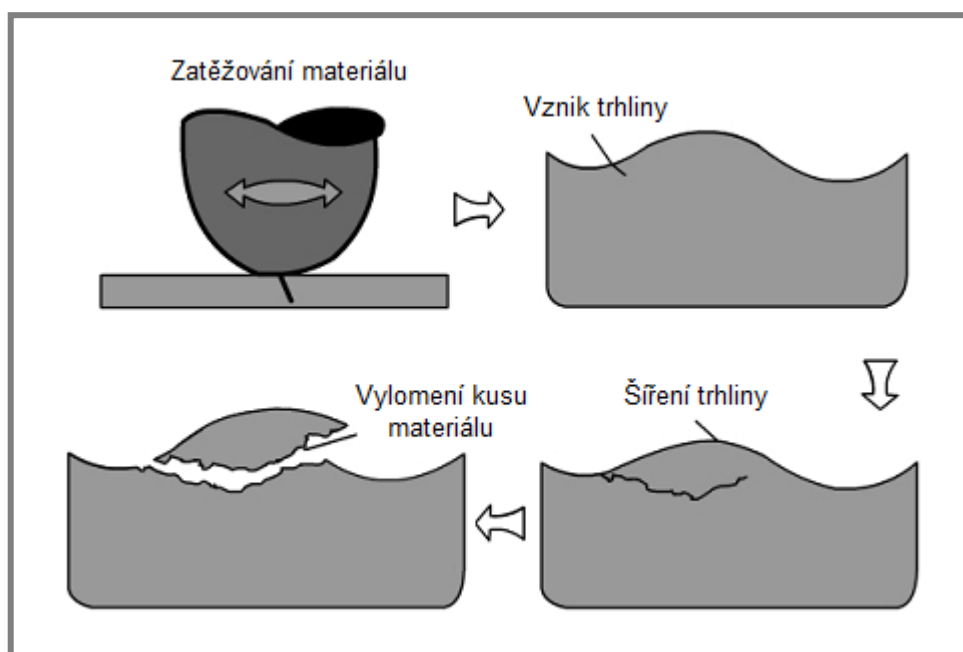
- První případ abrazivního opotřebení nastává již při vzájemném pohybu funkčních povrchů součástí a v literatuře je označován jako „*two-body abrasive wear*“ (obr. 2-11a). Vlivem pohybu funkčních ploch a působení normálové síly dochází ke styku mikronerovností, které se nachází na povrchu součásti. Přitom dochází k oddělování a přemísťování částic materiálu.
- Druhý případ abrazivního opotřebení nastává v důsledku působení volných (otěrových) částic. Částice jsou volně umístěny mezi dvěma povrchy a při vzájemném pohybu funkčních ploch působí nepříznivě jako další element na oba povrchy. Tento mechanismus je v literatuře označován jako „*three-body abrasive wear*“ (obr. 2-11b). Intenzita takového opotřebení silně závisí na jednotlivých faktorech, zejména na celkovém rozměru a tvaru částice.
- Třetí případ abrazivního opotřebení je kombinací prvního a druhého případu. Vzniklé volné (otěrové) částice mohou vniknout do materiálu, který má horší mechanické vlastnosti (zejména tvrdost) a vytvořit tím další nerovnosti na povrchu (obr. 2-11c). Hloubka vnikání částic do povrchu závisí na tvaru, velikosti částice a normálové síle, která na částici působí.



Obr. 2-11 Případy abrazivního opotřebení [5]

2.4 Únavové opotřebení

Kontaktní únavové opotřebení vzniká při silovém, cyklicky opakovaném styku dvou těles, při kterém se vyskytují vysoké lokální tlaky [13]. K tomu dochází zejména při styku součástí s nekonformní geometrií (boky zubů ozubených kol, kontakt kola a kolejnice, aj.). Mimo vysoké lokální tlaky zde navíc působí skluz, který způsobuje smykové namáhání, což způsobuje intenzivnější porušení povrchu. Pokud kontaktní napětí nepřekročí hodnotu meze kluzu, pak se jedná o vysokocyklovou únavu. V opačném případě, kdy napětí překročí hodnotu meze kluzu, jde o nízkocyklovou únavu. Na obr. 2-12 lze vidět mechanismus únavového opotřebení.



Obr. 2-12 Mechanismus únavového opotřebení [20]

Únava kola a kolejnice

Únavové opotřebení kola a kolejnice lze rozdělit na povrchové vady, které vznikají v důsledku tzv. „*ratchetingu*“ a podpovrchové vady, které vznikají v důsledku iniciace trhliny pod povrchem materiálu kolejnice [5]. Výsledkem povrchové únavy může být vada, která je v literatuře označována jako „*head checks*“¹ nebo vada, která se nazývá „*squat*“¹. Výsledkem podpovrchové únavy je nejčastěji odlupování materiálu z povrchu kolejnice, které je v odborné literatuře označováno jako „*shelling*“¹.

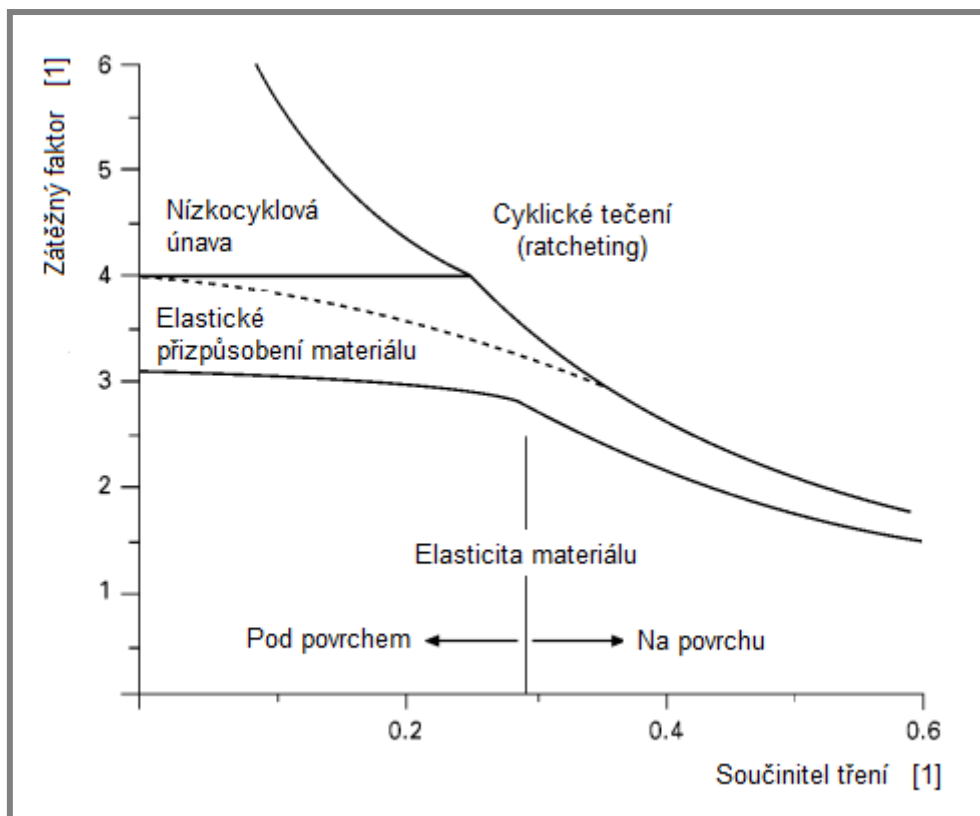
Ratcheting

Ratcheting (cyklické tečení) je kumulace plastické deformace materiálu [5]. Jeho příčinou v kolejové dopravě je působení trakční síly na povrchu materiálu, kdy dochází k nárůstu a současně k přesunu maximální hodnoty napětí směrem k povrchu

¹ Vady budou podrobněji vysvětleny v podkapitole „*Vady kolejnic*“.

materiálu. Jestliže napětí překročí hodnotu meze kluzu, pak dojde ke tvorbě povrchových nebo podpovrchových deformací.

Oblast ratchetingu je znázorněna na shakedown mapě (obr. 2-13). Tato mapa popisuje závislost zátěžného faktoru na součiniteli tření. Ve většině případů hodnotu zátěžného faktoru nelze ovlivnit. Naopak hodnotu součinitele tření lze ovlivnit aplikací maziva, písku, popř. modifikátoru tření. Jestliže součinitel tření je přibližně pod hodnotou 0,3, pak dochází ke kumulaci plastické deformace pod povrchem materiálu. Po překročení této hodnoty součinitele tření nastává plastická deformace přímo na povrchu materiálu.



Obr. 2-13 Shakedown mapa [5]

Faktory ovlivňující únavové opotřebení

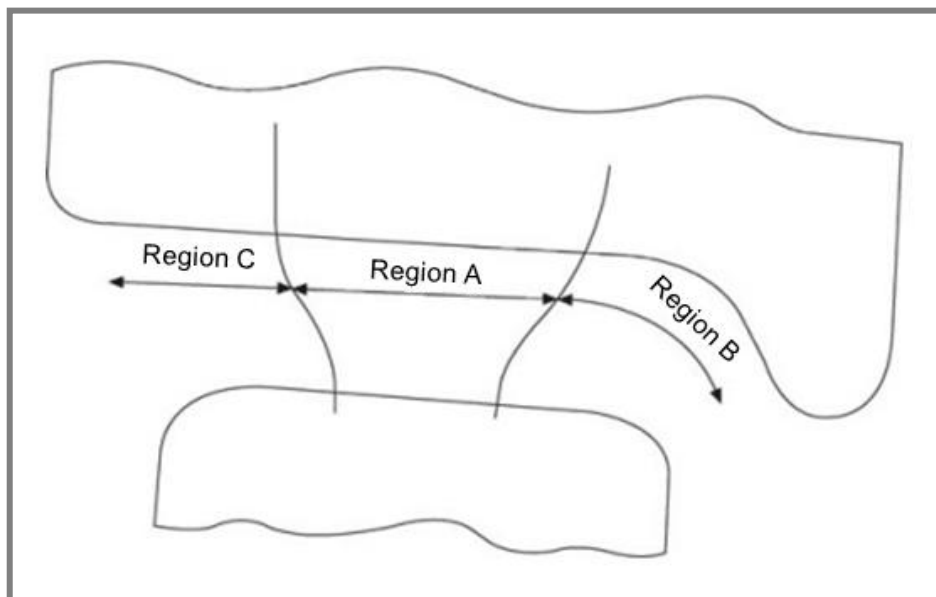
Mezi nejdůležitější faktory patří tvrdost povrchové vrstvy, přítomnost nečistot a vměstků, drsnost povrchu a přítomnost maziva [13]. Experimentálně bylo prokázáno, že s rostoucí tvrdostí se zvyšuje odolnost proti únavovému opotřebení. Tato závislost má lineární charakter a projevuje se i v oblastech vysokých tvrdostí (55 až 68 HRC) [13]. Přítomnost vměstků působí nepříznivě, protože způsobují v materiálu vrubový účinek a vznikají únavové mikrotrhliny. Stejně jako v případě vměstků může působit také jako vrubový účinek drsnost povrchu. Mazivo významně prodlužuje životnost, ale v případě únavového opotřebení může mít i negativní vliv. Jestliže v povrchu materiálu vznikne trhlina, pak je mazivo vlivem vysokého kontaktního tlaku vtlačováno do této trhliny a způsobuje tak její růst.



Obr. 2-14 Kontaktní únava (pitting) na boku zubů [21]

2.5 Vady kolejnic

Kontaktní regiony mezi kolem a kolejnicí

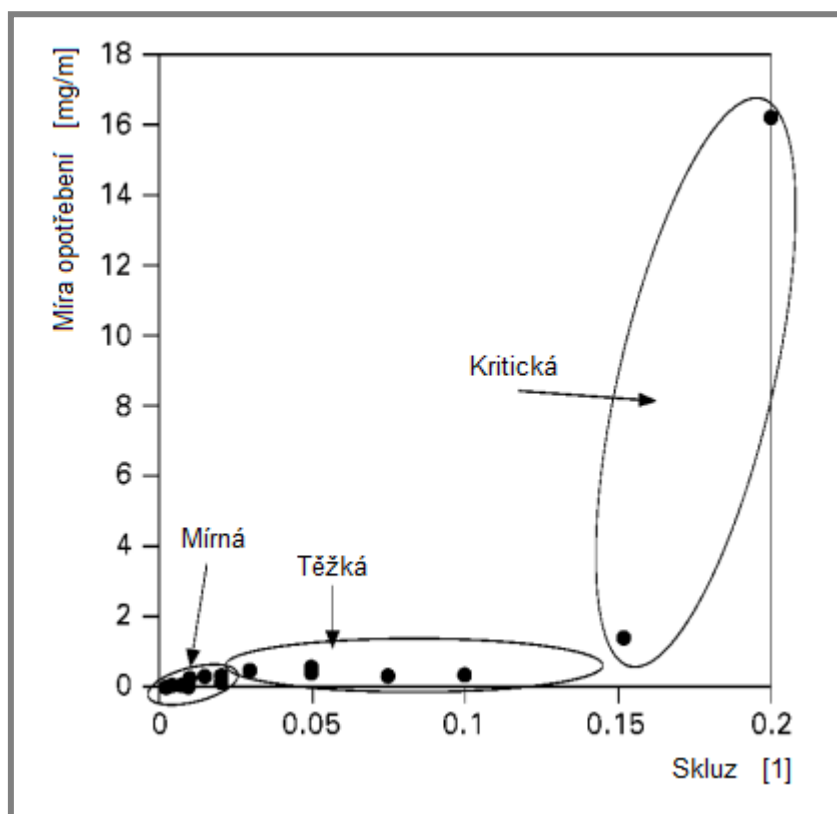


Obr. 2-15 Kontaktní regiony kola a kolejnice [5]

Obr. 2-15 popisuje tři kontaktní regiony, které se vyskytují při kontaktu kola a kolejnice [5].

- Region A označuje kontakt jízdní plochy kola a temena hlavy kolejnice. Tento region je typický pro pohyb kolejového vozidla po přímé nebo po zakřivené trati s velmi vysokým poloměrem křivosti. Kontakt zde je pro kolejovou dopravu nejpříznivější, protože míra opotřebení je zde nízká (obr. 2-16).

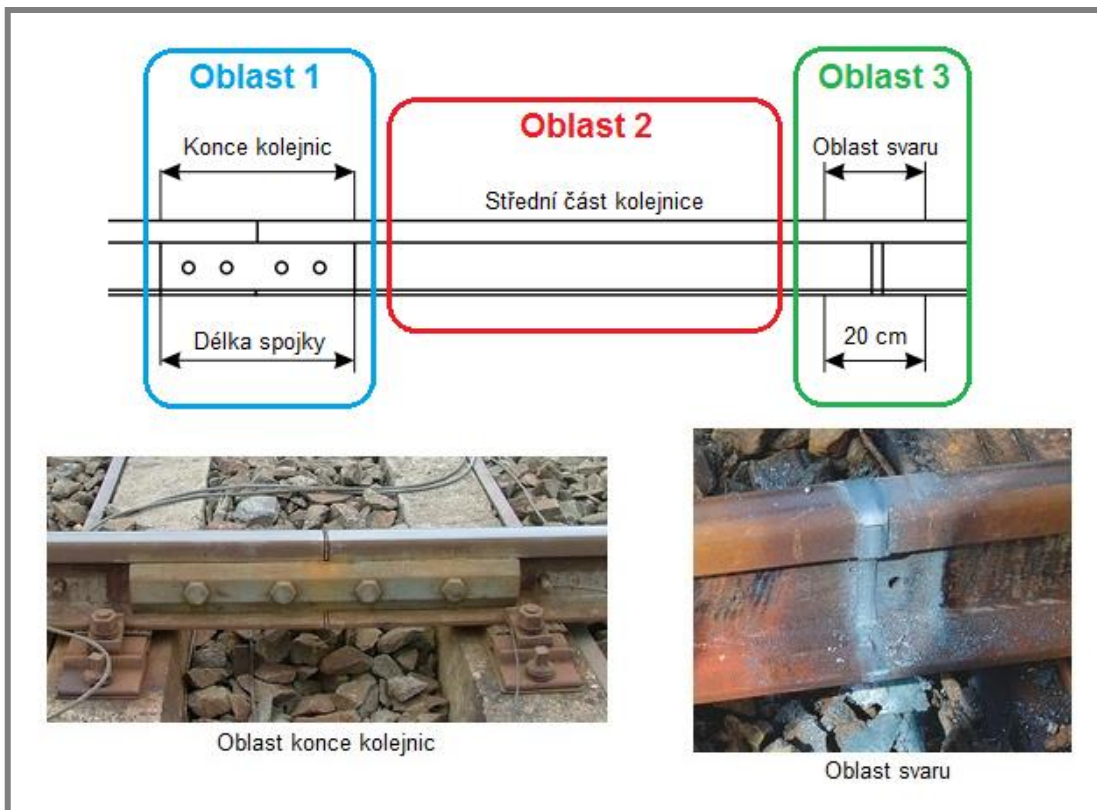
- Region B označuje kontakt mezi okolkem a pojížděnou hranou kolejnice. Kontakt v tomto regionu je menší, ale mnohem závažnější oproti regionu A, protože kontaktní napětí a míra opotřebení je zde mnohem vyšší.
- Region C označuje kontakt mezi koncem kola a kolejnice z vnější strany. Kontakt v tomto regionu je nejméně pravděpodobný. Pokud nastane, tak se zde vyskytuje velmi vysoké kontaktní napětí a dojde k nežádoucímu opotřebení kola (míra opotřebení je zde kritická).



Obr. 2-16 Míra opotřebení materiálů kola a kolejnice [5]

Rozdělení vad podle oblastí kolejnice

Vady se mohou nacházet na konci kolejnice, ve střední části kolejnice nebo v oblasti svarového spoje [22]. Konec kolejnice se rozumí část, která je kryta spojkou (obr. 2-17). Střední část je celá délka kolejnice mezi jejími konci resp. oblastí svaru a částí, která je kryta spojkou. Poslední část je oblast svaru, která je vymezena oboustranně od středu svaru délkou 10 cm. České dráhy v roce 1997 vydaly publikaci „S67: Vady kolejnic“ [22], ve které jsou popsány vady a lomy kolejnic. Přehled nejdůležitějších vad kolejnic zobrazuje tab. 2-4.



Obr. 2-17 Oblasti kolejnice [22, 23, 24]

Tab. 2-4 Přehled nejdůležitějších vad kolejnic [22]

Oblast 1	Oblast 2	Oblast 3
Odlupování na hraně poježděné plochy a konce kolejnice (122)	Shelling (2222) ²	Příčná trhlina v oblasti S svaru (411/421/431)
	Head checks (2223)	
	Squats (227)	
	Vlnkovitost koleje a skluzové vlny (2201)	
	Vlnovitá deformace (dlouhé vlny) (2202)	
	Příčné únavové trhliny (111/211)	
	Koroze paty a stojiny (134/234 a 154/224)	Příčná trhlina v hlavě kolejnice v návaru (471)

² Číslkové zařazení kolejnicových vad podle katalogu UIC.

Odlupování na hraně pojížděné plochy a konce kolejnic

Vada má zdroj v pojížděné ploše a vzniká v důsledku opotřebení a následné únavy materiálu. Vyskytuje se na čelní straně hlavy kolejnice a vypadá jako malá trhlinka v hloubce několika milimetrů od pojížděné plochy. Často bývá spojena s mírným roztačením a převalkem ve styku, který odpovídá vytlačení materiálu (obr. 2-18). V pokročilém stádiu dochází k oddělování (odlupování) kusů materiálu. Vada je často zaměňována vadou „Vodorovné trhliny v hlavě kolejnice“. Tyto vodorovné trhliny mají příčinu již ve výrobě a jejich zdroj je ve větší hloubce od pojížděné plochy [22].



Obr. 2-18 Vytlačení materiálu na čelní straně hlavy kolejnice [22]

Odlupování na hraně pojížděné plochy lze zjistit dvěma způsoby a to vizuálně (pohledem) nebo za pomoci ultrazvukového defektoskopu.

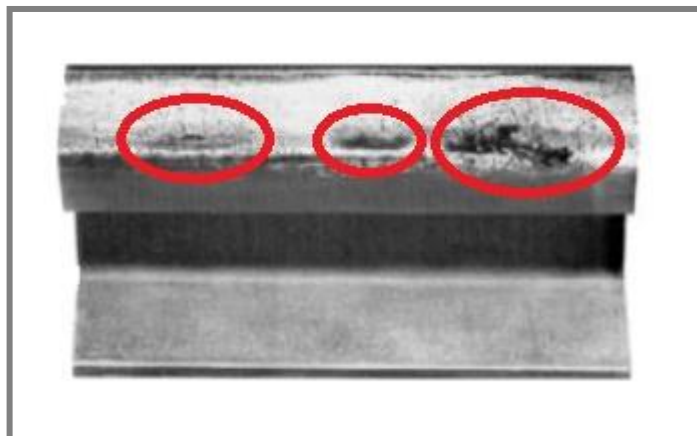
Jestliže se vada dostane až do stádia odlupování materiálu z povrchu kolejnice, je nutné provést opravu poškozeného místa. Oprava probíhá nejčastěji navařením dalšího materiálu na poškozené místo [22]. Po dokončení opravy je nutné hlavu kolejnice zabrousit pomocí brusného stroje (obr. 2-19).



Obr. 2-19 Bruska kolejnic [25]

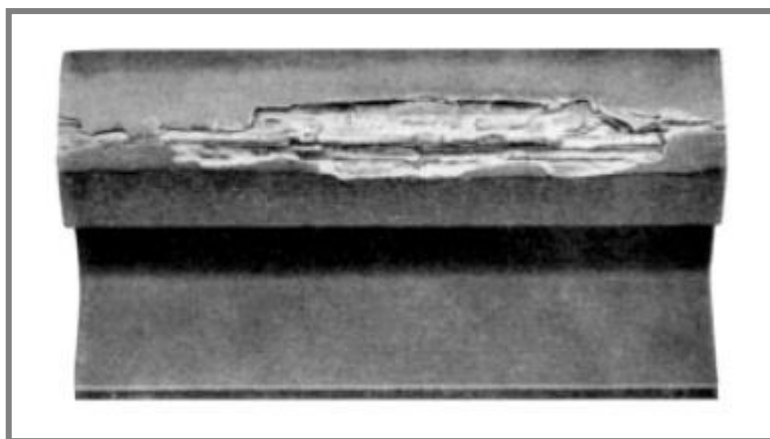
Odlupování materiálu z pojížděné hrany (Shelling)

Příčinou vzniku této vady je podélná trhlinka vyskytující se pod povrchem pojížděné hrany kolejnice [22]. Trhlinka vzniká v důsledku kontaktních a skluzových sil při pohybu kolejového vozidla po nepřímé (obloukové) trati. K iniciaci vady dochází zpravidla v místě vrubu kolejnicové oceli. Na kolejnicích se nejprve objevují tmavé podélné skvrny v nepravidelných vzdálenostech na zaoblení pojížděné hraně hlavy kolejnice (obr. 2-20).



Obr. 2-20 Tmavé podélné skvrny na kolejnici [22]

Tyto skvrny jsou prvním důkazem, že existují pod povrchem materiálu kolejnice vnitřní trhlinky. Po určitém čase se tyto trhlinky projeví jako převalok materiálu na boční ploše. Důsledkem toho začnou vznikat první praskliny a následuje úplné oddělení materiálu od pojížděné hrany kolejnice [22].



Obr. 2-21 Shelling [22]

Stejně jako v případě odlupování na hraně pojížděné plochy lze Shelling zjistit dvěma způsoby a to vizuálně (pohledem) nebo v pokročilejším stádiu za pomoci ultrazvukového defektoskopu [26]. Při zjištění této vady je nutné vždy vyměnit celou kolejnici, protože podpovrchové trhlinky se mohou rozšířit, což může vést k dalšímu šíření vady.

Šikmé trhliny na pojížděné hraně (Head checks)

Příčinou vzniku této vady je vysoký kontaktní tlak v regionu B. Head checks jsou povrchové trhliny, které se objevují zejména v traťových obloucích na pojížděné hraně kolejnice v pravidelných vzdálenostech. Tyto vzdálenosti se pohybují mezi hodnotami 1 až 5 mm [22]. Trhliny mohou zasahovat do hloubky až 2 mm a při pohledu shora jsou orientovány pod úhlem 35 až 70° vzhledem k pojížděné ose kolejnice (obr. 2-22).



Obr. 2-22 Head checks [27]

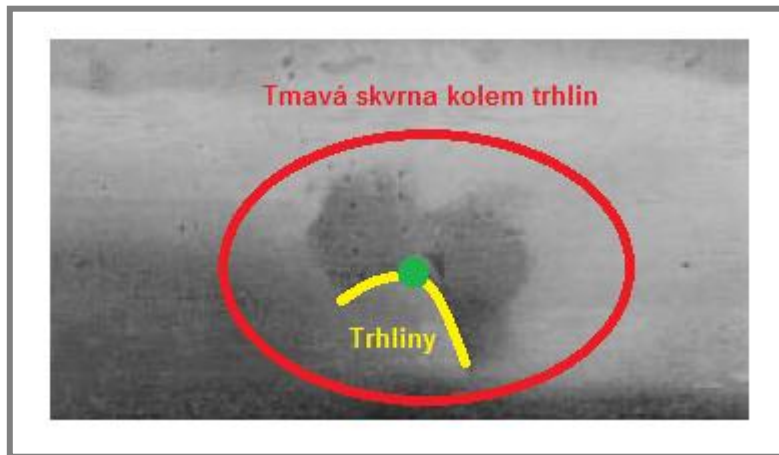
Head checks z počátku není nijak nepříznivá vada, ale po delší době provozu může dojít na trati v důsledku opakovaného zatěžování k vylamování materiálu kolejnice mezi jednotlivými trhlínami. Vylomená místa se poté mohou spojovat v delší prohlubně a vada se může rozvinout v příčnou trhlinu. Výsledkem této příčné trhliny v kombinaci s vadou Shelling je zpravidla únavový lom [22].

Vada je zjišťována pouze jedním způsobem a to vizuálně (pohledem). Zjišťování za pomoci ultrazvukového defektoskopu je v tomto případě problematické, protože vada se zpravidla nachází v blízkosti zaoblení pojížděné hrany, kde je účinnost ultrazvukových čidel omezena [26]. Při zjištění vady je nutné posoudit, zda se vada vyvinula již v příčnou trhlinu. Jestliže se vada již v tuto trhlinu vyvinula, pak je nutné postižené místo kolejnice opravit (nejčastěji broušením) nebo kolejnici úplně vyměnit. Pokud se vada zatím nevyvinula v příčnou trhlinu, pak stačí pouze zvýšit pozorování postiženého místa kolejnice [22].

Šikmé trhliny na pojížděné ploše (Squats)

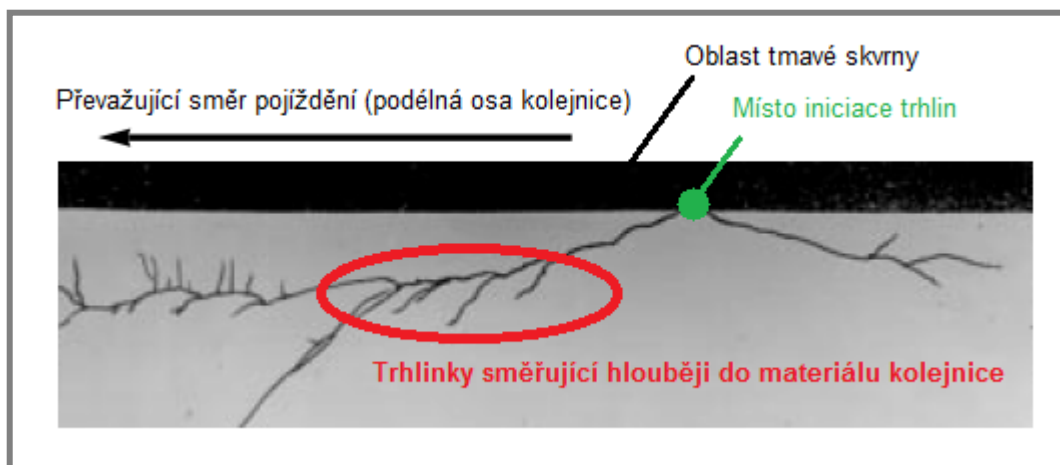
Squats je kontaktně únavová vada iniciovaná z povrchu a vzniklá v důsledku působení ratchetingu. V počátečním stádiu se projevuje náhodně rozmístěnými trhlínami mezi středem hlavy kolejnice a pojížděnou hranou [22]. Tyto trhliny jsou dlouhé 12 až 15 mm a směřují pod úhlem kolem 45° k pojížděné hraně kolejnice (obr. 2-23)³.

³ Zelená tečka na obr. 2-23 zobrazuje místo iniciace trhlín.



Obr. 2-23 Trhlíny na pojezděné ploše kolejnice a tmavá skvrna kolem nich [22]

V dalším stádiu se trhlina začíná šířit směrem do hlavy kolejnice. Z povrchu hlavy směřuje trhlina pod úhlem kolem 10 až 15° od podélné osy kolejnice do její hlavy v podélném směru na obě strany (obr. 2-24). Jestliže tato trhlina dosáhne hloubky kolem 1,6 mm od povrchu hlavy kolejnice, pak se na jejím povrchu objeví tmavá skvrna, která naznačuje rozdělení materiálu (obr. 2-23). Trhlina se dále rozvíjí zejména ve směru jízdy kolejového vozidla a po dosažení hloubky kolem 4 mm se rozvětňuje na další malé trhlínky, které zpravidla směřují hlouběji do materiálu kolejnice (obr. 2-24). Při kritické velikosti trhliny může dojít až ke křehkému lomu [22].



Obr. 2-24 Trhlina v materiálu kolejnice (řez kolejnicí ve svislé podélné rovině) [22]

Vada *Squats* se vyskytuje na přímých tratích nebo na obloukových tratích s vysokým poloměrem křivosti, které jsou poježděny rychlostí 160 km/h a více. Vada se také může vyskytovat ve stoupání na tratích, které jsou poježděny nižšími rychlostmi [22]. Vadu lze zjistit vizuálně (pohledem) nebo ultrazvukovým defektoskopem. Při zjištění této vady je nutné co nejdříve opravit postižené místo kolejnice. Jestliže je vada v počátečním stádiu, pak tato oprava probíhá nejčastěji broušením nebo hoblováním postiženého místa kolejnice. Pokud je již vada ve vyšším stádiu, pak je nutné celou kolejnici vyměnit, aby nedocházelo k dalšímu šíření trhliny pod povrchem hlavy kolejnice [26].

Vlnkovitost koleje a skluzové vlny

Vznik vlnkovitosti způsobuje mnoho faktorů a to zejména hrubý povrch kolejnice z výroby, konstrukce železničního svršku, charakter provozu a stick-slip cyklus [22]. Vlnky se vyznačují pravidelným sledem lesklých vrcholků a tmavých prohlubní na pojezděné ploše kolejnice (obr. 2-25) a jejich délka se pohybuje mezi hodnotami 3 až 8 cm. Hloubka vlnek bývá zpravidla 0,1 až 1,2 mm. Vlnkovité opotřebení vzniká především na přímých tratích a na obloukových tratích s vysokým poloměrem křivosti.



Obr. 2-25 Vlnkovitost kolejnice na trati mezi Brnem a Blanskem [1]

Skluzové vlny jsou krátké vlny na pojezděné ploše kolejnice, jejichž vyvýšeniny mají mezi sebou vzdálenosti 8 až 30 cm. Hloubka krátkých vln se pohybuje mezi hodnotami 0,1 až 1,2 mm a jejich vyvýšeniny i prohlubně vypadají stejnoměrně světle. Takové krátké vlny se vyskytují zejména na obloukových tratích s poloměrem křivosti menším než 600 m [28].

Vlnkovitost kolejnice a skluzové vlny vyvolávají mnoho negativních vlivů [28]:

- Zvýšení dynamických účinků, což je doprovázeno nežádoucím hlukem a šířením vibrací,
- vliv na výškovou polohu koleje,
- opotřebení kolejového vozidla,
- zvýšené nároky na opravu a údržbu tratě,
- vliv na spotřebu energie.

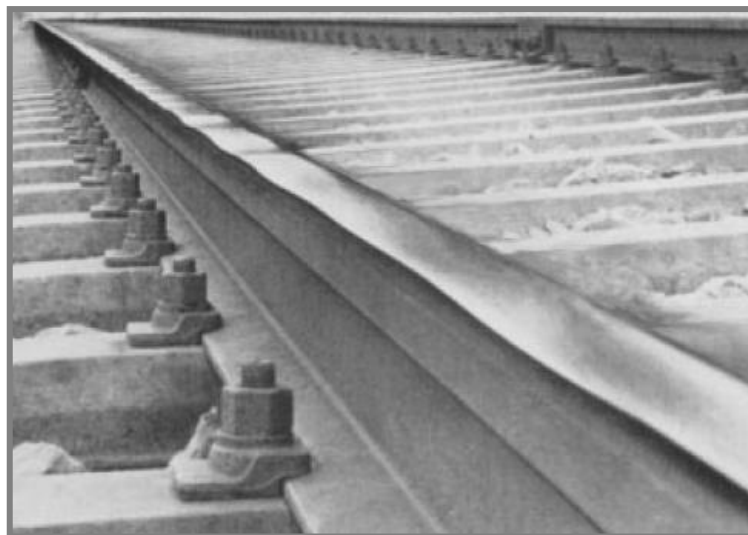
Vlnkovité opotřebení kolejnice se zjišťuje třemi způsoby a to vizuálně (pohledem) nebo zvukově (poslechem) nebo za pomoci měřicího zařízení (obr. 2-26), které snímá profil povrchu kolejnice bezkontaktním snímačem [29]. Při zjištění této vady je třeba posoudit hloubku vln. Jestliže hloubka vln dosáhla míry, která je kritická vzhledem ke komfortu cestujících (vysoká hladina hluku, nadměrné vibrace vozidel), pak je nutné poškozené místa kolejnice přebrousit.



Obr. 2-26 Měřicí zařízení MDK01 [29]

Vlnovitá deformace (dlouhé vlny)

Tato vlnovitá deformace je další vada kolejnice, která má původ již ve výrobním procesu, zejména v rovnání kolejnic za pomoci neokrouhlých rovnacích válečků [30]. Taková vlnovitá deformace (obr. 2-27) se vyznačuje pravidelnými vertikálními vlnami, jejichž délka je 1,5 až 3 m a hloubka jejich prohlubní je více než 2 mm [22].

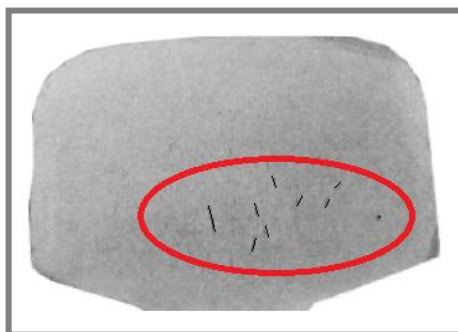


Obr. 2-27 Vlnovitá deformace (dlouhé vlny) kolejnice [26]

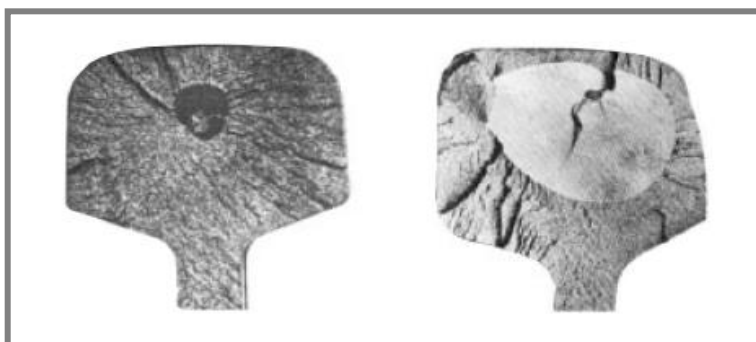
Dlouhé vlny se zjišťují dvěma způsoby a to buď vizuálně (pohledem) nebo stejně jako v případě vlnkovitosti koleje pomocí měřicího zařízení (obr. 2-26). Při zjištění této vady se musí hlava kolejnice přebrousit pomocí brusného stroje. Toto broušení probíhá až v rámci opravných (údržbových) prací, protože vlnovitá deformace není extrémně nebezpečná vada [22].

Příčné únavové trhliny

Prvotní příčinou této vady jsou příčné vločky (drobné husté trhlinky, které vznikají již při výrobě a vyskytují se převážně ve spodní třetině kolejnice – obr. 2-28), které se za působení dynamických účinků vozidel rozšiřují až v příčné únavové trhliny (obr. 2-29). Tyto trhliny také mohou vznikat z plynových dutin a nekovových vměstků a jejich důsledkem je zpravidla příčný únavový lom [22].

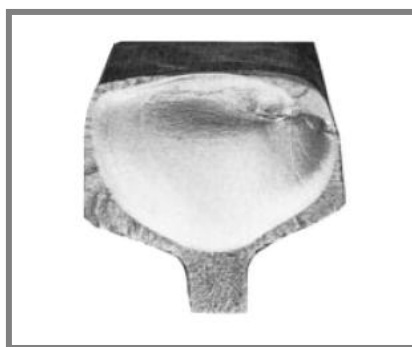


Obr. 2-28 Vločkovitost hlavy kolejnice [22]



Obr. 2-29 Příčné únavové trhliny [22]

Příčné únavové trhliny se mohou dostat až na povrch hlavy kolejnice, ale jejich rozměr je tak malý, že pro lidské oko jsou téměř neviditelné, a proto se tato vada zjišťuje většinou za pomoci ultrazvukového defektoskopu. Pokud je přesto vada viditelná pouhým okem, tak lomová plocha bývá zkorodovaná. Naopak jestliže dojde k lomu předtím, než je vada viditelná, tak se lomová plocha vyznačuje lesklým povrchem oválného tvaru (obr. 2-30). Při zjištění této vady je nutné kolejnici vyměnit [22].



Obr. 2-30 Tvar lomové plochy [22]

Koroze paty a stojiny

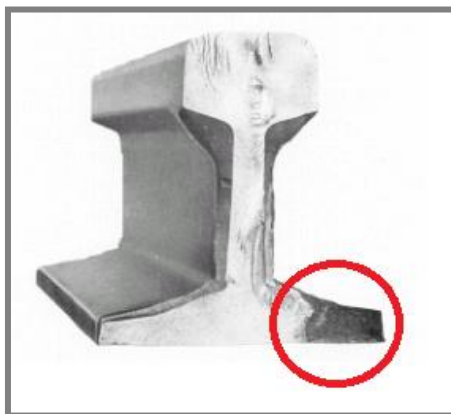
Koroze je nežádoucí trvalá změna povrchu materiálu způsobená elektrochemickými a chemickými vlivy okolního prostředí [13]. Podle mechanismů korozních procesů se koroze dělí na chemickou a elektrochemickou. Chemická koroze se vyskytuje poměrně zřídka a dochází u ní k chemickým reakcím v nevodivém prostředí (např. tvorba okují). Elektrochemická koroze je nejčastější a může probíhat tam, kde se stýkají různé kovy a je přítomen elektrolyt (vzdušná vlhkost, voda, půda, aj.)

Koroze paty kolejnice je vada, která převážně vzniká mechanismem elektrochemické koroze zejména v tunelech nebo na železničních přejezdech. V tunelech je větší vzdušná vlhkost, a proto v nich kolejnice podléhají rychlejší korozi. Koroze probíhá postupně oddělováním „plátek“ rzi od paty kolejnice a tím dochází k jejímu postupnému zmenšování, tedy k oslabování profilu kolejnice. Důsledkem takového oslabování profilu může být v některých případech lom kolejnice [22].

Stejně jako v případě koroze paty kolejnice působí mechanismus elektrochemické koroze i na stojinu kolejnice a opět dochází k oslabování nosného profilu. Obě vady (koroze paty a koroze stojiny) se zjišťují pouze vizuálně. Korozi lze předcházet již při výrobě kolejnic použitím legujících prvků, jako jsou nikl, chrom a molybden [2].

Příčná trhlina v oblasti S svaru

Tato příčná trhlina je nejčastěji způsobená vrubovým účinkem studeného spoje v hlavě kolejnice a vede ke vzniku lomu. Další příčinou mohou být vruby, které jsou způsobeny nesprávným opracováním povrchu svaru. Lomová plocha se vyznačuje příčnou svislou ploškou v oblasti původního čela kolejnice před svařováním. Jestliže trhlina vychází přímo z paty kolejnice, pak na lomové ploše paty kolejnice vzniká tmavé místo (obr. 2-31) [22].



Obr. 2-31 Tmavé místo na lomové ploše paty kolejnice [26]

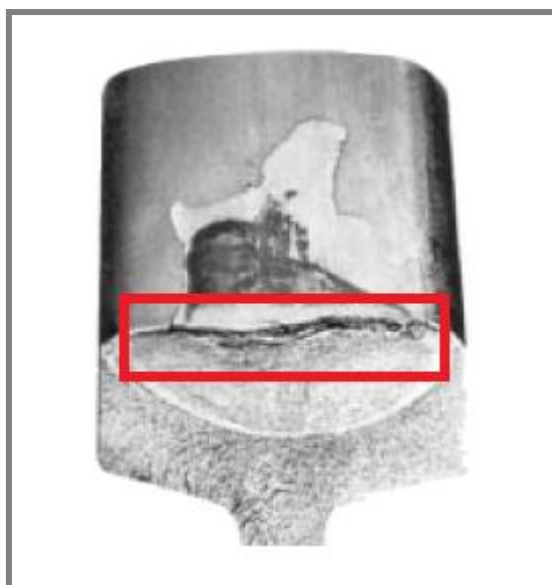
Příčná trhlina se zjišťuje vizuálně (pohledem) nebo za pomoci ultrazvukového defektoskopu [22]. Po zjištění této trhliny je nutné vadu opravit, nejčastěji dalším navařením materiálu.

Příčná trhlina v hlavě kolejnice v návaru

Tato příčná trhlina prochází celým návarem (viz obr. 2-32), zejména od místa vzniku kořenu návaru. Tímto místem může být [22]:

- Struskový vměstek,
- studený spoj,
- dutina vzniklá následkem vlhkosti elektrod,
- místně nevyhovující soudržnost návaru se základním materiálem kolejnice.

Příčná trhlina také může pocházet již z výrobních vad v základním materiálu kolejnice. Další rozvoj této trhliny může vést ke vzniku lomu, jehož lomová plocha se vyznačuje hladkým a lesklým povrchem [22].



Obr. 2-32 Příčná trhlina v hlavě kolejnice v návaru [22]

Vada se zjišťuje dvěma způsoby a to buď vizuálně (pohledem) nebo za pomoci ultrazvukového defektoskopu [22]. Při zjištění této trhliny je nutné provést opravu poškozeného místa. Oprava se nejčastěji provádí navařením dalšího materiálu s následným broušením kolejnice.

3 DISKUZE

Ze získaných poznatků plyne, že při kontaktu kola a kolejnice se vyskytuje opotřebení materiálu. Toto opotřebení lze rozdělit na tři základní typy (adhezivní, abrazivní a únavové), které probíhají ve zmiňovaném kontaktu současně. Základní typy opotřebení mohou dále způsobovat nebezpečné kolejnicové vady.

Míru a intenzitu opotřebení materiálu kolejnice ovlivňují různé faktory. K důležitým faktorům patří chemické a mechanické vlastnosti materiálu. Chemické vlastnosti kolejnicových ocelí vycházejí ze způsobu výroby oceli a složení použitého druhu železné rudy [2]. Za jednu z nejdůležitější mechanickou vlastnost je v tomto případě považována tvrdost. Tvrdost ovlivňuje zejména abrazivní a adhezivní opotřebení a má na ni významný vliv obsah uhlíku v oceli. Se zvyšujícím se obsahem uhlíku roste tvrdost, pevnost, odolnost proti otěru, ale i křehkost. Čím vyšší tvrdosti je schopen materiál dosáhnout, tím nižší bude intenzita případného opotřebení. V kontaktu kola a kolejnice bude jednoznačně intenzivněji opotřebováván povrch kola, protože jeho materiál má zpravidla nižší tvrdost než materiál kolejnice.

Mezi další důležité faktory, které ovlivňují míru a intenzitu opotřebení materiálu kolejnice patří zejména zatížení, rychlost poježdění, drsnost povrchu a přítomnost maziva mezi poježděnou hranou a okolcem.

- Zatížení kolejnice je ve většině případů pevně dáno hmotností kolejové soupravy. Vysoké zatížení může nepříznivě ovlivňovat únavové opotřebení, ale i adhezivní a abrazivní opotřebení kvůli vysokým normálovým silám, které působí na vznikající volné (otěrové) částice.
- Rychlost poježdění kolejnice ovlivňuje stejně jako v případě zatížení všechny tři základní typy opotřebení kolejnice, ale je možné ji regulovat v určitých úsecích železniční tratě, což může vést k eliminaci některých kolejnicových vad (zejména Squats).
- Drsnost povrchu je faktor, který ovlivňuje zejména abrazi. Vyšší hodnoty drsnosti jsou nepříznivé, protože při vzájemném styku mikronerovností vznikají částice, které mají určitý tvar a rozměr. Dalším působením abrazivního mechanismu jsou částice v kontaktu drceny, což vede ke vzniku nových menších částic. V dnešní době jsou dostupné technologie, kterými je možné získat nízkou hodnotu drsnosti povrchu materiálu kola i kolejnice. Problémem je, že drsnost povrchu se při provozu kolejové dopravy mění v důsledku působení dalšího opotřebení.
- Přítomnost maziva mezi poježděnou hranou a okolcem má pozitivní dopad na adhezi a abrazi. Při dostatečné tloušťce mazacího filmu nedochází ke styku mikronerovností a adhezivní a abrazivní opotřebení pak nemusí vůbec nastat. Na únavové opotřebení má ovšem mazivo v kontaktu negativní dopad. Pokud v materiálu kolejnice vznikne trhлина, pak mazivo je vlivem vysokého kontaktního tlaku do této trhliny vtlačováno a způsobuje její další růst.

Pokud by v kontaktu kola a kolejnice působilo pouze adhezivní a abrazivní opotřebení, pak by při nižší intenzitě nebyly tyto typy opotřebení pro kolejovou dopravu kritické. Za klíčový problém je považován výskyt únavového opotřebení, protože rýhovaný povrch materiálu kolejnice způsobený adhezí a abrazí může představovat vysoký koncentrátor napětí pro únavu materiálu. Výsledkem únavy materiálu je široké spektrum kolejnicových vad, kde ty nejnebezpečnější vady mohou skončit až únavovým lomem. Některým vadám lze předcházet snadno např. včasným broušením či hoblováním kolejnic. Významný problém představují vady, které mají příčinu již ve výrobě, protože eliminace takových vad je téměř nemožná.

4 ZÁVĚR

Předložená bakalářská práce se zabývá opotřebením kolejnic, které nastává při kontaktu kola a kolejnice a analýzou kolejnicových vad.

Bakalářská práce obsahuje kapitolu „*Přehled současného stavu poznání*“. V této kapitole jsou poprvé popsány základní pojmy kolejové dopravy. V další části kapitoly jsou popsány jednotlivé typy opotřebení materiálu kola a kolejnice a to adhezivní, abrazivní a únavové. U každého typu opotřebení jsou zmíněny důležité faktory, kterými je daný typ ovlivňován a mechanismy vzniku. V poslední části kapitoly jsou popsány nejběžnější kolejnicové vady, které jsou rozděleny do určitých částí kolejnice, ve kterých se vyskytují. Jedná se o vady na konci kolejnice, ve střední části kolejnice a vady svaru. U každé vady je zmíněna příčina, způsob zjištění a prevence.

Závěrečnou kapitolou bakalářské práce je „*Diskuze*“. V této kapitole jsou rozepsány důležité faktory, které ovlivňují opotřebení v kontaktu kola a kolejnice, a to chemické a mechanické vlastnosti materiálu, zatížení, rychlost pojíždění, drsnost povrchu a přítomnost maziva mezi pojížděnou hranou a okolkem. Součástí diskuze je také popis vlivu adhezivního a abrazivního opotřebení na únavové opotřebení, jehož výsledkem může být únavový lom.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Pojednání o styku kola a kolejnice. *ŽelPage* [online]. 2012 [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: <http://zelpage.sk/clanky/pojednani-o-styku-kola-a-kolejnice?url=pojednani-o-styku-kola-a-kolejnice&url=pojednani-o-styku-kola-a-kolejnice&oddil=3&lang=en>
- [2] České vysoké učení technické v Praze. ŽIŽKA, Jan. *Materiály pro kolejnice a výhybky* [online]. 2009 [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: http://www.fd.cvut.cz/personal/zizkaja5/kolejnice_vyhybky.html#vady
- [3] Dvojkolí. *STROJARINA.jecool.net* [online]. [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: <http://www.strojarina.jecool.net/wp-content/uploads/Data/MZV/Dvojkol%C3%AD.pdf>
- [4] LATA, Michael. *Konstrukce kolejových vozidel II*. Vyd. 1. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2004, 206 s. ISBN 80-719-4696-6.
- [5] *Wheel-rail interface handbook*. 1st pub. Editor R Lewis, Ulf Olofsson. Cambridge: Woodhead, 2009, xxii, 842 s. Woodhead publishing in mechanical engineering. ISBN 978-1-84569-412-8.
- [6] OMASTA, Milan, Martin MACHATKA, David SMEJKAL, Martin HARTL a Ivan KŘUPKA. 2015. Influence of sanding parameters on adhesion recovery in contaminated wheel–rail contact. *Wear*. 322-323: 218-225. DOI: 10.1016/j.wear.2014.11.017.
- [7] GALAS, R. *Konstrukce experimentálního zařízení pro studium pískování kolejových vozidel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 102s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Šperka, Ph.D..
- [8] Wheel / rail friction management solutions. . *The University of Edinburgh: School of Engeneering* [online]. [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: <http://www.see.ed.ac.uk/~shs/Mike/rail%20friction.pdf>
- [9] SUCHÁNEK, Jan. Abrázivní opotřebení kovových materiálů. *Tribotechnika* [online]. [cit. 2015-03-17]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-12010/abrazivni-opotrebeni-kovovych-materialu.html>
- [10] SUCHÁNEK, Jan. Adhezivní opotřebení. *Tribotechnika* [online]. [cit. 2015-03-17]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-22010/adhezivni-opotrebeni.html>
- [11] SUN, Y.Q. a S. SIMSON. Wagon–track modelling and parametric study on rail corrugation initiation due to wheel stick-slip process on curved track. *Wear*. 2008, vol. 265, 9-10, s. 1193-1201. DOI: 10.1016/j.wear.2008.02.043.

- [12] EADIE, D.T. a M. SANTORO. 2006. Top-of-rail friction control for curve noise mitigation and corrugation rate reduction. *Journal of Sound and Vibration*. 293(3-5): 747-757. DOI: 10.1016/j.jsv.2005.12.007.
- [13] Degradace strojních součástí. *Degradace* [online]. [cit. 2015-03-22]. Dostupné z: http://degradace.tf.czu.cz/Dgrd_txt/Mngr_ram_txt2.htm
- [14] 1911Forum. *Is this galling on stainless steel?* [online]. [cit. 2015-03-22]. Dostupné z: <http://forums.1911forum.com/showthread.php?t=416644>
- [15] Adventure Rider. *The Garage* [online]. [cit. 2015-03-22]. Dostupné z: <http://www.advrider.com/forums/showthread.php?t=623685>
- [16] Panolin. *Zajímavosti z tribotechniky* [online]. [cit. 2015-03-22]. Dostupné z: <http://www.e-panolin.cz/?zajimavosti-nejen-z-tribotechniky,31>
- [17] Cylinder service JAEGER. *TM: KonturSchliff* [online]. [cit. 2015-03-22]. Dostupné z: <http://www.jaeger-gmbh.com/de/leistungen/tm-tissuemaschinen/tm-konturschliff>
- [18] RRUKA. *Rail Research UK Association: The Adhesion Riddle* [online]. [cit. 2015-03-26]. Dostupné z: <http://rruka.org.uk/inside-rruka-projects-the-adhesion-riddle/>
- [19] Údržba a opravy stájové techniky - Abrazivní opotřebení. *Mendelova univerzita v Brně* [online]. [cit. 2015-03-22]. Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/stranka.php?kod=3596
- [20] NPTEL. *Mechanical Engineering - Tribology* [online]. [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <http://www.nptel.ac.in/courses/112102015/14>
- [21] Gear - Defects treated. *Novexa* [online]. [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <http://www.novexa.com/en/engrenage-defaults.php>
- [22] S67: Vady a lomy kolejnic. *České dráhy* [online]. 1997 [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: http://iwan.eu07.pl/jw/john_woods2008/predpisy/S/S67.pdf
- [23] *SOOM* [online]. [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://www.soom.cz/data/zeleznice1.jpg>
- [24] SILNICE ŽELEZNICE. *Technologie stykového odtavovacího svařování kolejnic a zřizování bezstykové koleje* [online]. [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/technologie-stykoveho-odtavovaciho-svarovani-kolejnic-a-zrizovani-bezstykove-koleje/>
- [25] Broušení kolejí a výhybek. *Chládek & Tintěra Pardubice* [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.cht-pce.cz/svarovani/brouseni-koleji-a-vyhybek/>

- [26] *Mechanika kolejové jízdní dráhy* [online]. PLÁŠEK. O. [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/CN01-Zeleznicni%20konstrukce%20I/M02-Mechanika%20kolejov%C3%A9%20j%C3%ADzn%C3%AD%20dr%C3%A1hy.pdf>
- [27] Delta Test. *Rail inspection* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://www.deltatest.de/en/dienstleistungen/railwayinspection.php>
- [28] *CESTI* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://www.cesti.cz/technicke_listy/tl2013/2013_WP2_TL2_1_2.pdf
- [29] Komerční železniční výzkum. *MDK-01* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://kzv.cz/Czech/mdk01.php>
- [30] *Vady kolejnic* [online]. PLÁŠEK, O. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://lences.cz/skola/subory/-%20-%20PREDMETY%20%20%28semester%201%20-%2010%29%20-%20-%20-%20-%20CN01%20-%20Zeleznicni%20konstrukce%20I/prednasky/12_Vady_kolejnic.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

Seznam zkratek

HPF	High Positive Friction
LCF	Low Coefficient of Friction
SiC	Silicon Carbide
TiC	Titan Carbide
VHPF	Very High Positive Friction
WC	Wolfram Carbide
WC + Co	Wolfram Carbide + Cobalt

Seznam symbolů a veličin

Označení	Jednotka	Název
μ	1	součinitel adheze
μ_x	1	součinitel adheze v ose x
μ_y	1	součinitel adheze v ose y
ν	1	Poissonovo číslo
E	MPa	redukovaný Youngův modul
F_n	N	normálová síla v kontaktu
F_{tx}	N	třecí síla v ose x
F_{ty}	N	třecí síla v ose y
p	MPa	maximální kontaktní tlak
P	N	normálové zatížení
R	mm	redukovaný poloměr křivosti

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Seznam obrázků

- Obr. 2-1** Názvosloví kola a kolejnice
- Obr. 2-2** Kontaktní plocha
- Obr. 2-3** Trakční křivka
- Obr. 2-4** Stick-slip cyklus
- Obr. 2-5** Srovnání hladiny hluku před a po aplikaci HPF
- Obr. 2-6** Opotřebení povrchu materiálu způsobené adhezí
- Obr. 2-7** Schéma povrchových vrstev v oblasti dotyku dvou kovových materiálů
- Obr. 2-8** Mírné adhezivní opotřebení povrchu pouzdra
- Obr. 2-9** Adhezivní opotřebení kola
- Obr. 2-10** Abrazivní opotřebení pístu
- Obr. 2-11** Případy abrazivního opotřebení
- Obr. 2-12** Mechanismus únavového opotřebení
- Obr. 2-13** Shakedown mapa
- Obr. 2-14** Kontaktní únava (pitting) na boku zubů
- Obr. 2-15** Kontaktní regiony kola a kolejnice
- Obr. 2-16** Míra opotřebení materiálů kola a kolejnice
- Obr. 2-17** Oblasti kolejnice
- Obr. 2-18** Vytlačení materiálu na čelní straně hlavy kolejnice
- Obr. 2-19** Bruska kolejnic
- Obr. 2-20** Tmavé podélné skvrny na kolejnici
- Obr. 2-21** Shelling
- Obr. 2-22** Head checks
- Obr. 2-23** Trhliny na pojížděné ploše kolejnice a tmavá skvrna kolem nich
- Obr. 2-24** Trhlina v materiálu kolejnice (řez kolejnicí ve svislé podélné rovině)
- Obr. 2-25** Vlnkovitost kolejnice na trati mezi Brnem a Blanskem
- Obr. 2-26** Měřicí zařízení MDK01
- Obr. 2-27** Vlnovitá deformace (dlouhé vlny) kolejnice
- Obr. 2-28** Vločkovitost hlavy kolejnice
- Obr. 2-29** Příčné únavové trhliny
- Obr. 2-30** Tvar lomové plochy
- Obr. 2-31** Tmavé místo na lomové ploše paty kolejnice
- Obr. 2-32** Příčná trhlina v hlavě kolejnice v návaru

Seznam tabulek

- Tab. 2-1** Typy kolejnic dle tvaru
- Tab. 2-2** Závislost součinitele adheze na povrchových podmínkách
- Tab. 2-3** Tvrdost některých minerálů, abraziv a kovových materiálů
- Tab. 2-4** Přehled nejdůležitějších vad kolejnic