



VÝZKUM, VÝVOJ A ZKUŠEBNICTVÍ KOLEJOVÝCH VOZIDEL
Bucharova 1314/8, Stodůlky, 158 00 Praha 5

ZKUŠEBNA KOLEJOVÝCH VOZIDEL A KONTEJNERŮ

CERTIFIKOVANÁ METODIKA

Metodika stanovení zbytkové životnosti nápravy kolejového vozidla

Autoři:

Vypracoval Ing. Zdeněk Malkovský, Ph.D.

Spolupracoval Ing. Miloslav Jára

Přezkoušel Josef Žák

Schválil Ing. Zdeněk Malkovský, Ph.D.

Technický vedoucí zkušební laboratoře

Ředitel zkušební laboratoře

Certifikovaná metodika je výstupem z řešení projektu TAČR č.TH02010542
„Eliminace provozních poruch náprav kolejových vozidel“.

Praha, 9/2019

OBSAH

1	Úvod	3
2	Podklady a literatura použité pro přípravu metodiky	3
3	Výchozí podmínky, zdůvodnění metodiky	4
3.1	Normativní požadavky pro měření v provozu	4
3.2	Zodpovědnosti	5
4	Popis podvozku se zkoušenou nápravou	5
5	Zkušební tratě	5
6	Měřené veličiny	7
6.1	Provozní zkoušky	7
6.1.1	Napětí na ložiskovém čepu	8
6.1.2	Napětí u sedla kola	8
6.1.3	Pohyby ložiskové komory vůči rámu podvozku	8
6.1.4	Další měřené veličiny	9
6.1.5	Vzorkovací frekvence a filtrování měřeného signálu	9
6.1.6	Zpracování naměřených signálů namáhání	9
6.2	Únavové zkoušky na dynamickém zkušebním stavu	11
6.2.1	Cíl únavové zkoušky	11
6.2.2	Pojmy, zkratky, použité přístroje a software	12
6.2.3	Popis zkoušky	13
6.3	Stanovení zbytkové životnosti	13
7	Popis uplatnění metodiky	14
8	Seznam publikací, které předcházely metodice	14

1 Úvod

V rámci programu na podporu aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje EPSILON byl řešen projekt č. TH02010542 „Eliminace provozních poruch náprav kolejových vozidel.“ Jedním z výstupů tohoto projektu je certifikovaná metodika popisující způsob stanovení zbytkové životnosti nápravy kolejového vozidla na základě provozního měření mechanického napětí v kritických místech nápravy, únavových zkoušek nápravy v reálném měřítku a numerických výpočtů se zohledněním reprezentativního spektra provozního namáhání nápravy.

Při vypracování metodiky se vycházelo nejen z podkladů normativního nebo doporučujícího charakteru, ale zejména ze zkušeností Zkušebny kolejových vozidel a kontejnerů VÚKV a.s. z reálných měření na různých kolejových vozidlech provedených měření v různých provozních podmínkách na vybraných železničních tratích a na Železničním zkušebním okruhu Výzkumného ústavu železničního v Cerhonicích.

Předkládaná metodika popisuje způsob provozního měření s vyhodnocením naměřených napětí z hlediska provozní pevnosti, provedení únavových zkoušek a výpočet životnosti. Rozsah provozních měření je závislý na typu nápravy, zda se jedná o nápravu běžnou nebo hnací a také na typu kolejového vozidla.

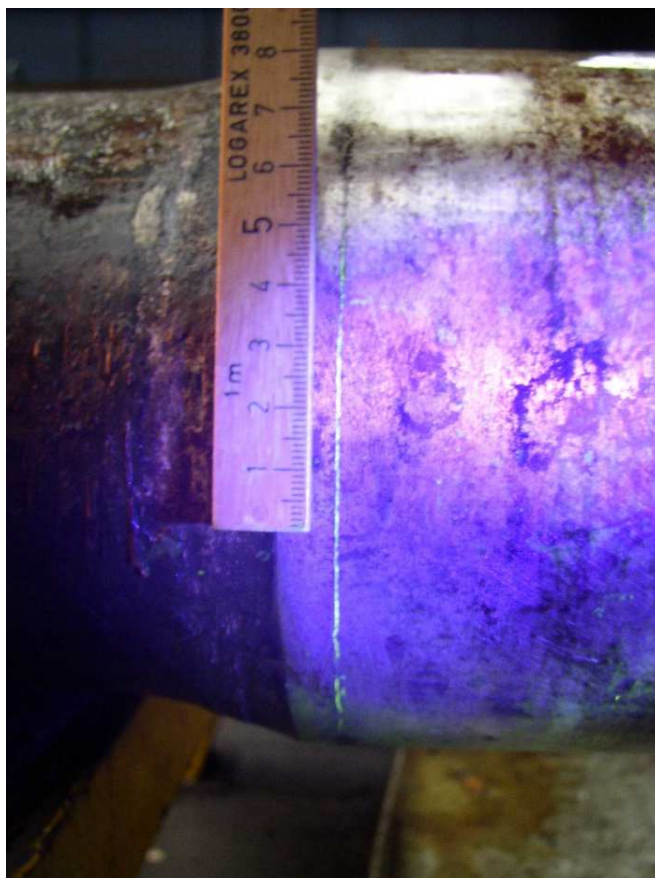
2 Podklady a literatura použité pro přípravu metodiky

- [1] EN 13749:2011 „Železniční aplikace – Dvojkolí a podvozky – Metody specifikování požadavků na rámy podvozků“, (Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle – Spezifikationsverfahren für Festigkeitsanforderungen an Drehgestellrahmen), Ausgabe März 2011;
- [2] EN 15827:2011 „Železniční aplikace – Požadavky na podvozky a pojezdy“, (Bahnanwendungen – Anforderungen für Drehgestelle und Fahrwerke), Ausgabe Oktober 2011;
- [3] EN 15663:2009 „Železniční aplikace – Definice referenčních hmotností vozidla“, (Bahnanwendungen – Fahrzeugmassedefinitionen), Ausgabe May 2009;
- [4] EN ISO/IEC 17025:2005 „Posuzování shody – Všeobecné požadavky na způsobilost zkušebních a kalibračních laboratoří“, (Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien), Ausgabe May 2005;
- [5] DIN-Taschenbuch 491/1 „Schienenfahrzeuge 1. Radsätze“. Berlin, Beuth Verlag GmbH 2013;
- [6] DIN-Taschenbuch 491/2 „Schienenfahrzeuge 2. Bahnanwendungen. Radsätze und Drehgestelle“. Berlin, Beuth Verlag GmbH 2014;
- [7] EN 13103-1:2017 Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle – Teil 1: Konstruktionsleitfaden für außengelagerte Radsatzwellen;
- [8] FKM-Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen“, 6. überarbeitete Ausgabe 2003;
- [9] ČSN EN 14363:2016+A1:2018 „Železniční aplikace - Přejímací zkoušky jízdních charakteristik železničních vozidel - Zkoušení jízdních vlastností a stacionární zkoušky“, ČNI 2006;
- [10] Question B 136 Rapport 11. „Essieux montés boîtés; conception, entretien, standardisation. ORE, Utrecht, avril 1979;
- [11] UIC-Kodex 515-3. 1. Ausgabe „Eisenbahnfahrzeuge. Drehgestell – Laufwerke. Verfahren für die Berechnung von Radsatzwellen. UIC, Paris, 01.07.1994.
- [12] ČSN EN 13261:2009+A1:2010 „Železniční aplikace – Dvojkolí a podvozky – Nápravy – Požadavky na výrobek“, ÚNMZ květen 2011
- [13] Metodika ZL-15-15 „Únavová zkouška náprav“, VÚŽ Praha, srpen 2018
- [14] ČSN EN 16910-1:2018 „Železniční aplikace - Vozidla - Požadavky na nedestruktivní zkoušení pojezdu při údržbě - Část 1: Dvojkolí“, ÚNMZ listopad 2015

3 Výchozí podmínky, zdůvodnění metodiky

Nutnost metodiky, která popisuje postup stanovení zbytkové životnosti náprav na základě provozního měření mechanického napětí v kritických místech nápravy a sestavení reprezentativního spektra provozního namáhání nápravy, vyplývá z následujících faktů:

- Základní normativní zatížení aplikované v současné době pro dimenzování náprav je uvedeno v normě EN 13103-1 [7]. Metodika stanovení namáhání nápravy byla prakticky beze změn převzata ze zprávy ORE B136 RP 11 [10] (40 let stará), resp. vyhlášky UIC 515-3 [11];
- Provozní poměry jak v osobní, tak i nákladní železniční dopravě se od roku 1979 do současnosti výrazně proměnily;
- V poslední době začaly být zjišťovány ve větším rozsahu indikace trhlin na nápravách. Příklad indikace v oblasti sedla je uveden na obr. 1.



Obr. 1

3.1 Normativní požadavky pro měření v provozu

Pro měření namáhání náprav v provozních podmínkách neexistuje žádný normativní předpis. Lze však využít některá doporučení uvedená v DIN-Taschenbuch 491/1 [5], DIN-Taschenbuch 491/2 [6] a EN 13749 [1]. Program měření musí obsahovat zejména:

- Podrobná identifikace kolejového vozidla, se kterým bude měření realizováno;
- Umístění měřené nápravy ve zkušební soupravě;
- Popis měřících jízd – popis tratí včetně směrových poměrů, délka měření, typ kolejí, rychlost jízdy;
- Stav vozidla;
- Poloha snímačů a typ měřené veličiny – relativní pohyby, zrychlení, mechanické napětí;
- Typ snímačů;
- Metoda vyhodnocení naměřených veličin a interpretace změřených napětí;
- Dovolené hodnoty napětí;
- Kritéria akceptace.

3.2 Zodpovědnosti

Měření musí provést zkušební laboratoř akreditovaná podle normy EN ISO/IEC 17025.

Akreditovaná zkušební laboratoř je zodpovědná za:

- Aplikaci měřících míst;
- Kompletaci měřícího vybavení;
- Prokabelování;
- Přípravu odborného měřícího týmu pro provedení zkoušek;
- Vyhotovení zkušebního protokolu;
- Použití kalibrovaných přístrojů.

4 Popis podvozku se zkoušenou nápravou

Namáhání nápravy je ovlivněno reálným konstrukčním provedením podvozku. Z tohoto důvodu musí být podvozek s měřenou nápravou velmi podrobně popsán. Jedná se zejména:

- Typ podvozku – běžný nebo hnací
- Typ a tuhost vypružení;
- Typ a charakteristika všech tlumičů;
- Typ brzdy – špalíková (oboustranná nebo jednostranná), kotoučová (na nápravě nebo v kole, počet kotoučů), elektrodynamická, kolejnicová;
- Typ pohonu – asynchronní nebo synchronní;
- Způsob regulace pohonu u hnacího podvozku;

5 Zkušební tratě

Měření provozního namáhání musí pokrýt typy tratí, na kterých se předpokládá provoz kolejového vozidla s měřenou nápravou. Určitým vodítkem pro výběr tratí může být Směrnice pro zkoušky na trati podle DIN EN 13749, která je obsažena v DIN-Taschenbuch 491/2 [6]. V České republice lze na základě obdobného přístupu stanovit např. následující tratě podle typu vlaků:

- Předměstská osobní doprava: trať Beroun – Praha – Lysá nad Labem - Kolín
- Regionální osobní doprava: trať Kutná Hora – Havlíčkův Brod - Brno
- Dálková osobní doprava: trať: Praha – Ostrava, Česká Třebová - Břeclav
- Nákladní doprava: viz tabulka 1 a obr. 2

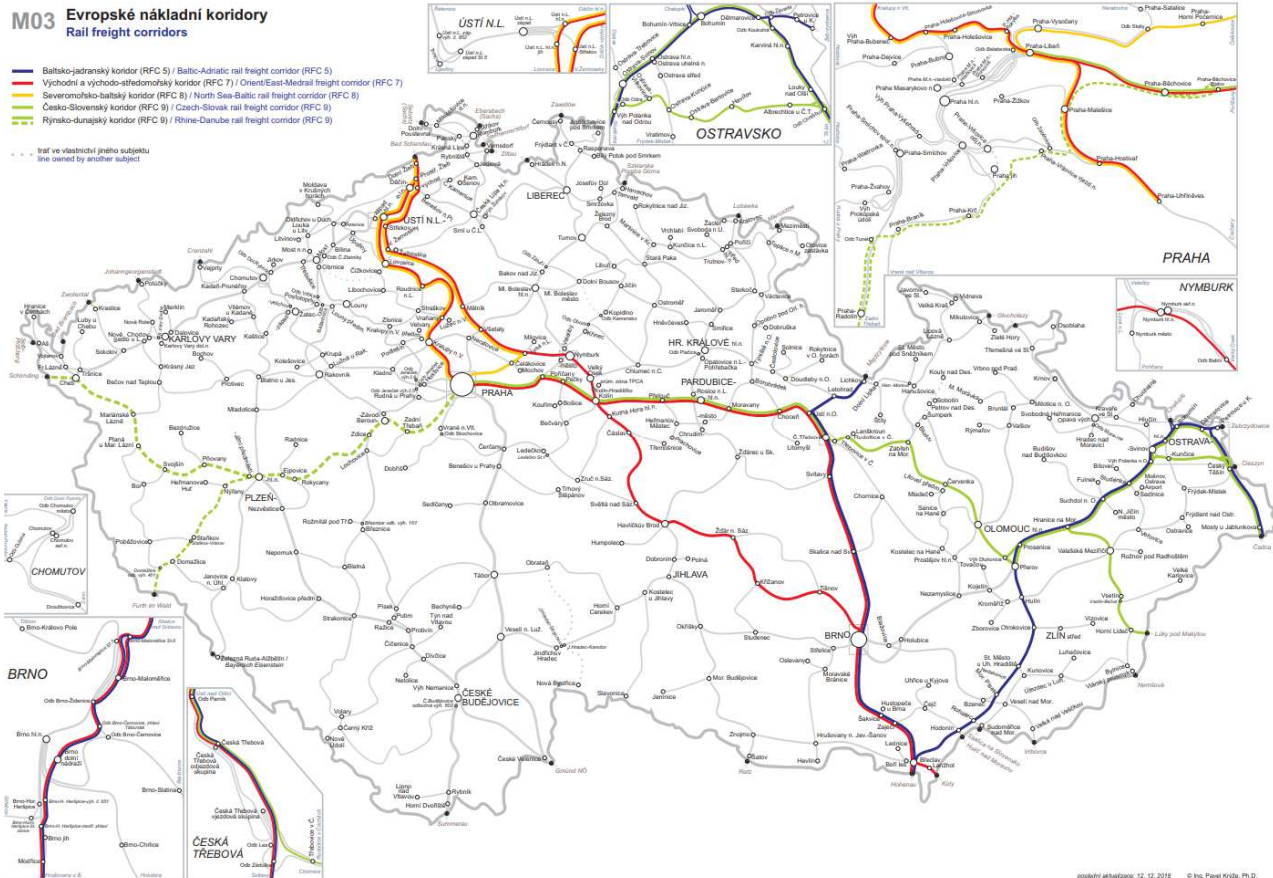
Tabulka 1

Číslo trati	Úsek	Délka (km)	Traťová třída	Traťová rychlost (km/h)	Úklon kolejnice
010	Praha - Česká Třebová	164	D4	125 - 160	1/40
260	Česká Třebová - Brno	91	D4	125 - 140	1/40
250	Brno - Havlíčkův Brod - Kolín	195	D4	65 - 120	1/20
231	Kolín - Lysá nad Labem	38	D4	105 - 120	1/20
072	Lysá nad Labem - Ústí nad Labem	94	D4	75 - 120	1/20
073	Ústí nad Labem - Děčín	28	D4	75 - 80	1/20
090	Děčín - Praha	129	D4	105 - 160	1/40

M03 Evropské nákladní koridory
Rail freight corridors

- Balticko-jaderský koridor (RFC 5) / Baltic-Adriatic rail freight corridor (RFC 5)
- Východní a východo-středomořský koridor (RFC 7) / Orient-East-Mediterranean freight corridor (RFC 7)
- Severomohavsko-baltický koridor (RFC 8) / North Sea-Baltic rail freight corridor (RFC 8)
- Česko-Slovenský koridor (RFC 9) / Czech-Slovak rail freight corridor (RFC 9)
- Rýnsko-dunajský koridor (RFC 9) / Rhine-Danube rail freight corridor (RFC 9)

Trati ve vlastnictví jiného subjektu
line owned by another subject

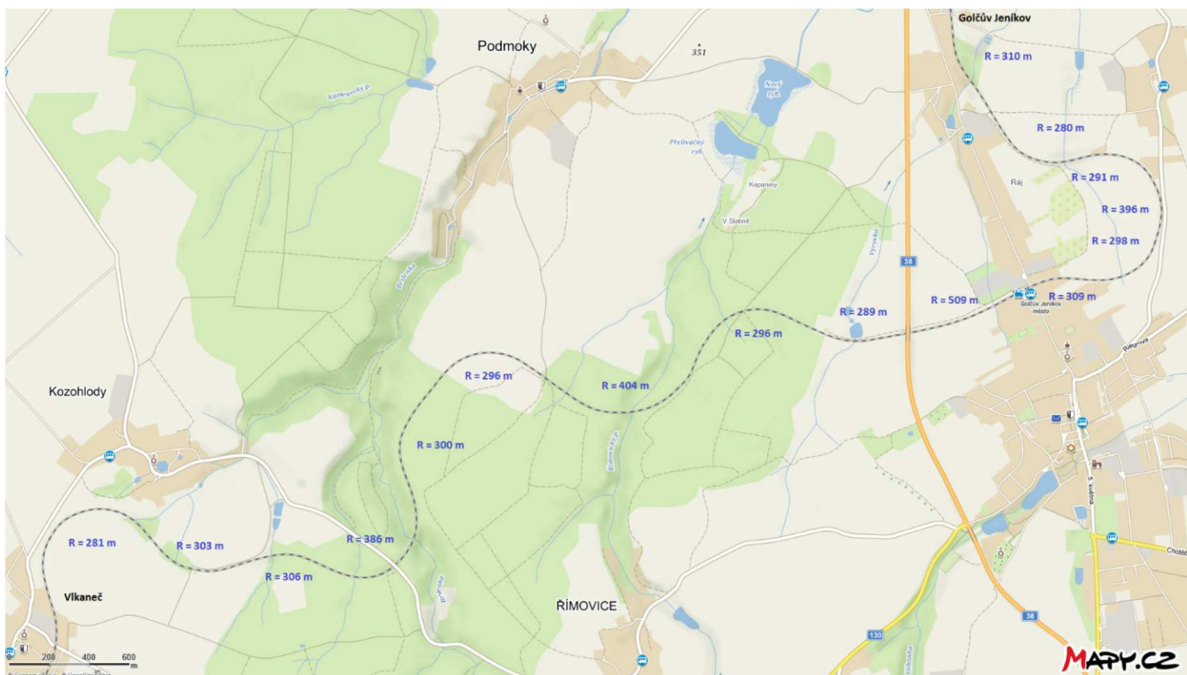


poslední aktualizace: 12. 12. 2019 © Ing. Pavel Kyják, Ph.D.

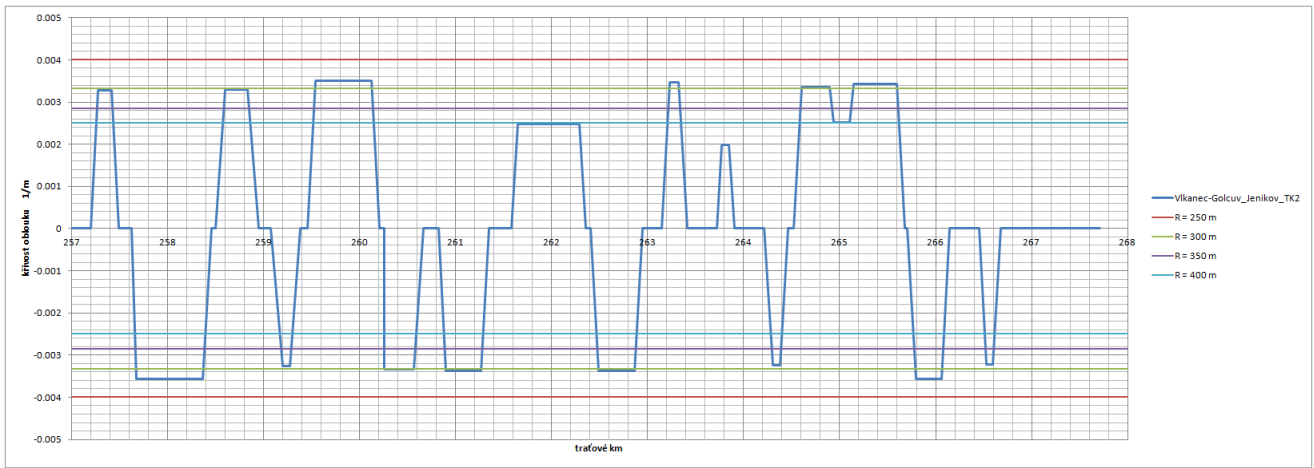
Obr. 2

Délka 739 km představuje 28,5% všech tratí SŽDC zařazených do evropského železničního systému. Na vybraných tratích jsou zastoupeny všechny úrovně kvality QN podle EN 14363 [9], oba dva úklony kolejnic a všechny typy oblouků. Prakticky na celém uvedeném okruhu je možné realizovat, po udělení výjimky od SŽDC a povolení Drážním úřadem České republiky, zkušební jízdy i s nákladními vozy konstruovanými pro maximální hmotnost na nápravu 25 t. Všechny úseky jsou součástí evropských nákladních koridorů.

Alespoň pro tratě s malými poloměry oblouků je potřeba mít k dispozici podrobnější informace o směrových poměrech trati. Příklad je uveden na obr. 3 a 4 pro trať Golčův Jeníkov - Víkaneč.



Obr. 3



Obr. 4

V případě trakčního podvozku se musí kromě klasického ohybového namáhání nápravy měřit i namáhání od torzního kmitání dvojkolí. To vyplývá z požadavku uvedeného v kapitole 5.5 normy EN 13103-1 [7]. Postup tohoto speciálního měření je uveden v DIN-Taschenbuch 491/1 [5].

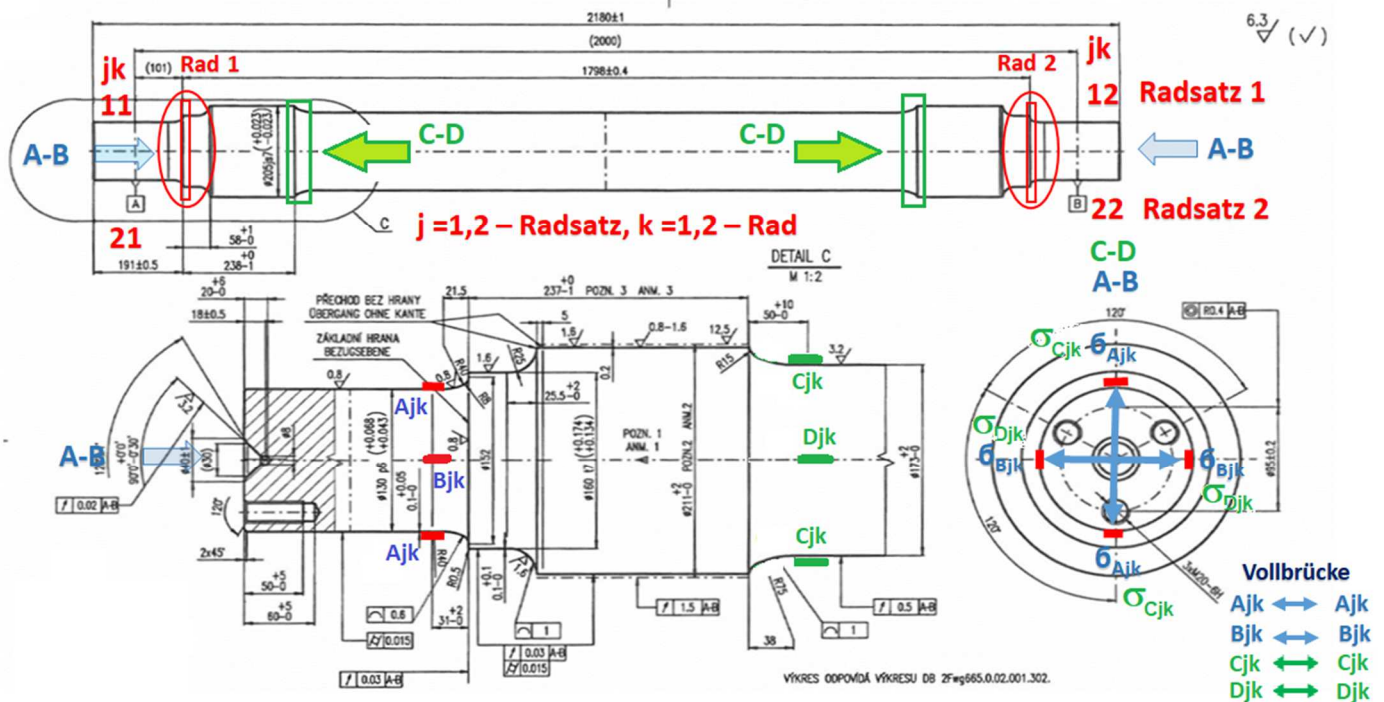
6 Měření veličiny

6.1 Provozní zkoušky

V závislosti na typu nápravy, a u hnacích náprav na způsobu přenosu krouticího momentu, se měření napětí v provozu doporučuje realizovat v následujících řezech:

- Napětí na ložiskovém čepu;
- Napětí u sedla kola směrem ke středu nápravy;
- Napětí u sedla talířového kola, je-li aplikováno (např. pohon motorového vozu ř. 812).

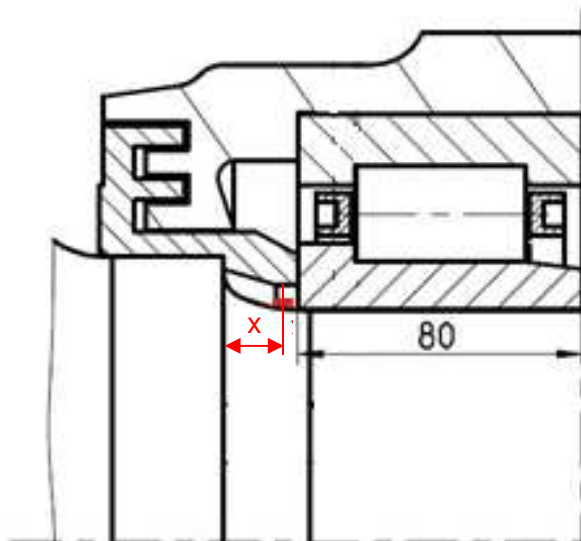
Napětí je nutné měřit pomocí lineárních zdvojených tenzometrů, např. firmy HBM Typ DMS 1-DY11-3/350 s délkou fólie 9 mm. Pozice tenzometrů pro první dva řezy je uvedena na obr. 5. Na tomto obrázku je zároveň uveden návrh číslování v případě měření namáhání u obou náprav dvounápravového podvozku. V každém řezu se měří pomocí dvou celých můstků vzájemně potočených o 90°. Celý můstek je tvořen dvěma tenzometry vzájemně potočenými o 180°. Přesná poloha tenzometrů musí být uvedena v protokolu.



Obr. 5

6.1.1 Napětí na ložiskovém čepu

Měření na ložiskovém čepu se provádí u obou ložiskových čepů na nápravě. Tenzometry musí být umístěny co nejbližěji vnitřnímu kroužku ložiska – viz příklad na obr. 6 a 7.



Obr. 6



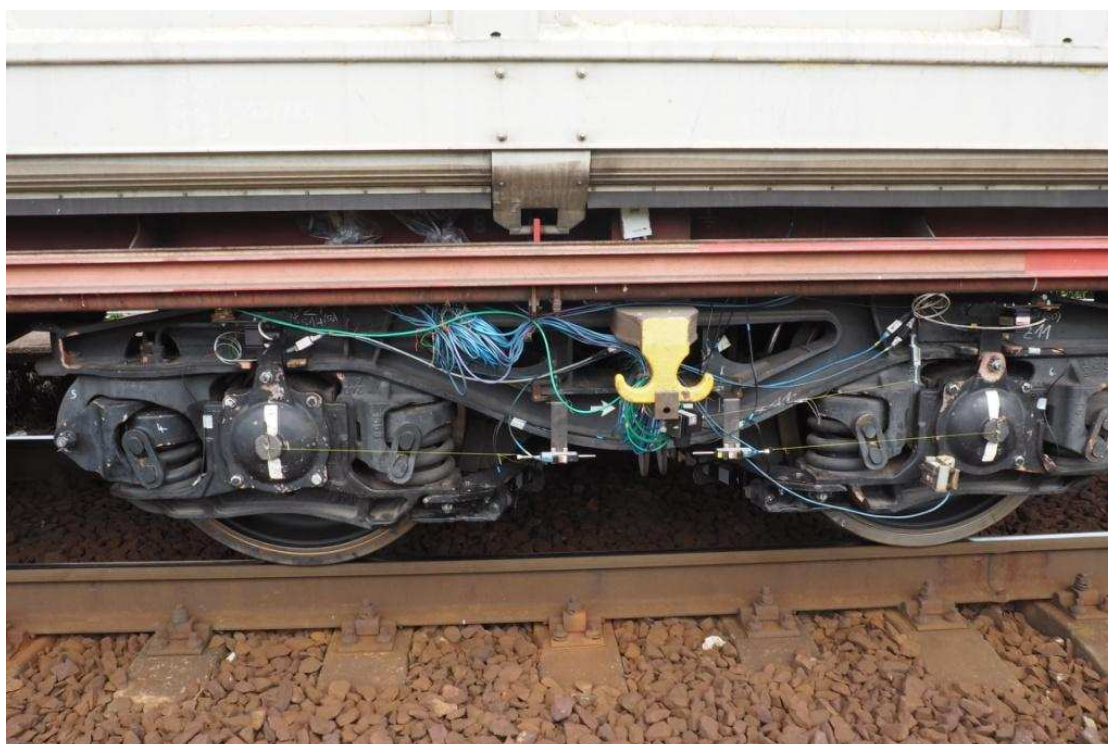
Obr. 7

6.1.2 Napětí u sedla kola

Také v tomto řezu je nutné napětí měřit pomocí lineárních zdvojených tenzometrů (např. firmy HBM Typ DMS 1-DY11-3/350 s délkou fólie 9 mm). Tenzometry jsou umístěny na počátku přechodového rádiusu z díčku do sedla (viz tenzometry Cjk a Djk na obr. 5)

6.1.3 Pohyby ložiskové komory vůči rámu podvozku

Na podvozku s měřenou nápravou musí být měřeny pohyby mezi ložiskovou komorou a rámem podvozku. Příklad měření pohybů při měření dvou náprav je uveden na obr. 8.



Obr. 8

6.1.4 Další měřené veličiny

Akreditovaná zkušebna musí během měření zaznamenávat následující veličiny:

- Tlak v brzdovém potrubí;
- Rychlost jízdy;
- Směr jízdy;
- GPS-protokol;
- Projeté traťové úseky, včetně jejich délky;
- Teplota okolního prostředí;
- Datum a čas;
- mimořádné povětrnostní podmínky (déšť, sníh, bouřka apod.)

6.1.5 Vzorkovací frekvence a filtrování měřeného signálu

Vzorkovací frekvence musí být:

- Pro měření napětí nejméně 2000 Hz;
- Pro měření zrychlení nejméně 800 Hz;
- Pro měření pohybů nejméně 100 Hz.

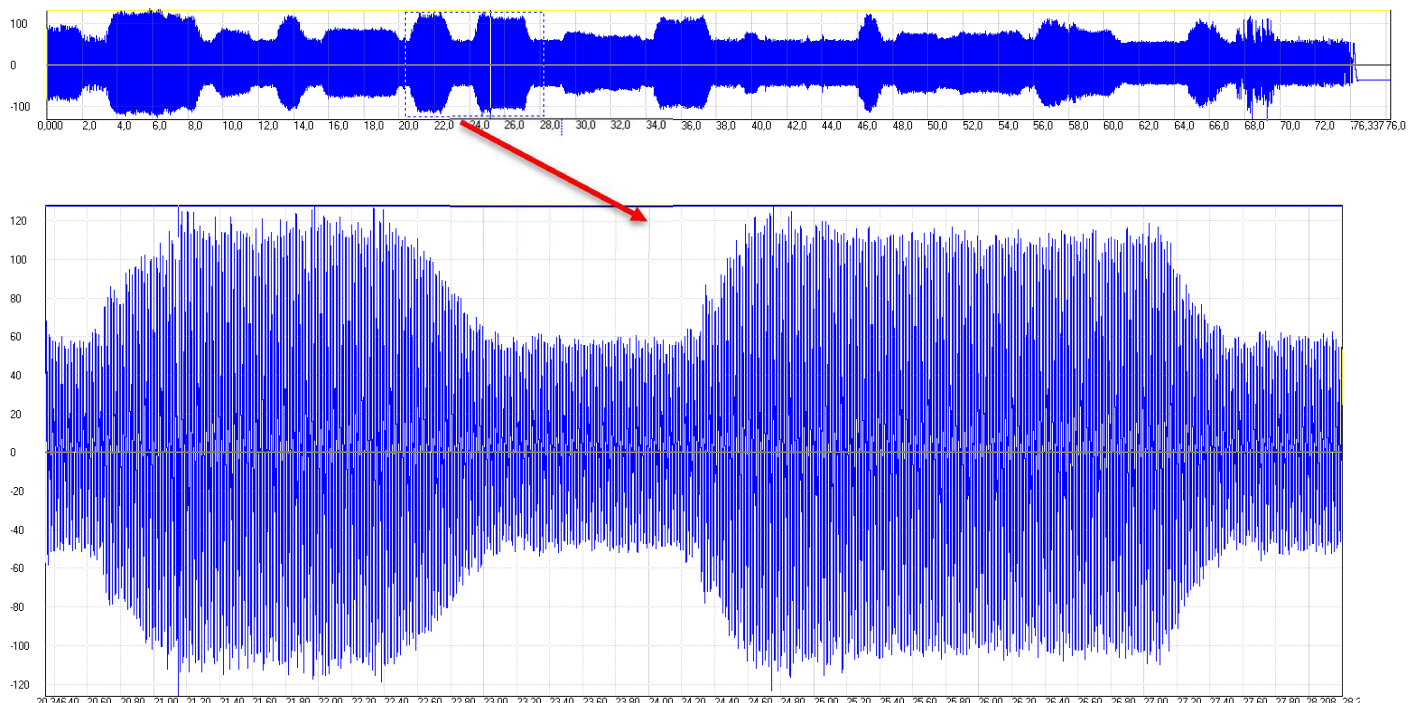
Zaznamenané signály jsou filtrovány dolnoproputným filtrem. Aplikovaná frekvence je:

- Pro měření napětí nejméně 200 Hz;
- Pro měření zrychlení nejméně 100 Hz;
- Pro měření pohybů nejméně 10 Hz.

Před vyhodnocením musí být kontrola signálů z hlediska výskytu možných výpadků signálu (drop out).

6.1.6 Zpracování naměřených signálů namáhání

Příklad naměřeného signálu na čepu nápravy je uveden na obr. 9.



Obr. 9

Na každém čepu jsou pomocí tenzometrů zapojených do plného můstku měřena prodloužení ve dvou řezech vzájemně pootočených o 90°. Protože k měření jsou použity jednoduché tenzometry, je napětí dáno vztahem

$$\sigma_{ij} = E \cdot \varepsilon_{ij}$$

kde $\varepsilon_{ij}(-)$ je prodloužení v řezu ij (obr. 5);

$i = 1, 2, 3, 4$ (pořadové číslo řezu, v němž je prodloužení měřeno);

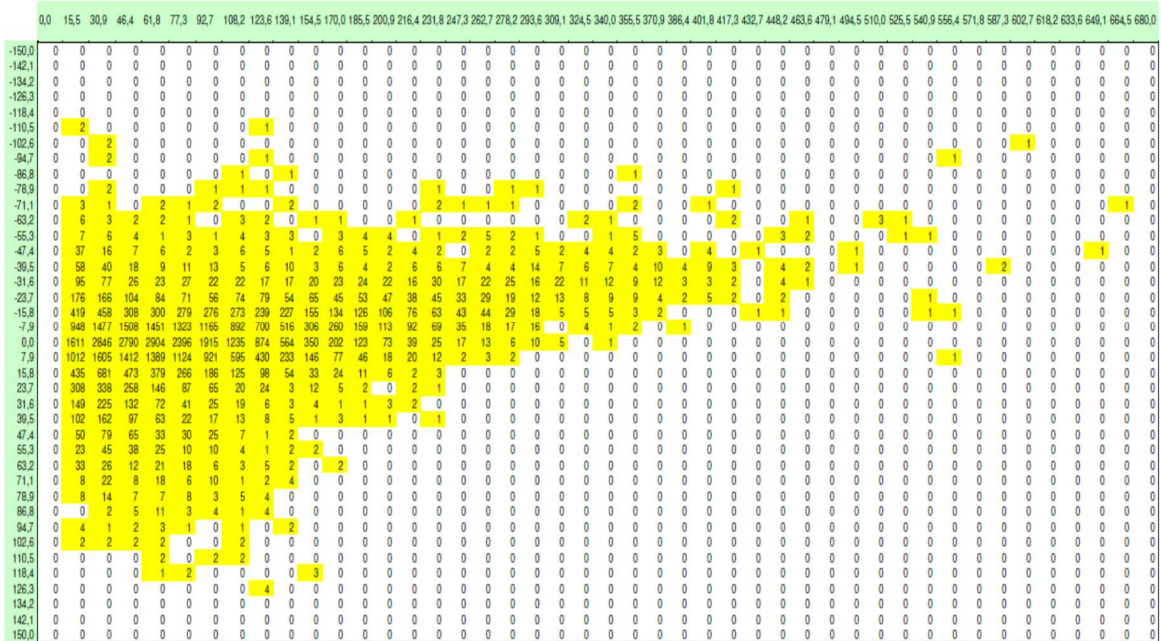
$j = 1, 2$ (pořadí plného můstku v řezu)

E (MPa) je modul pružnosti v tahu ($E = 2,05 \cdot 10^5$ MPa);

Z napětí změřených v jednotlivých řezech se v každém okamžiku vyhodnotí maximální napětí

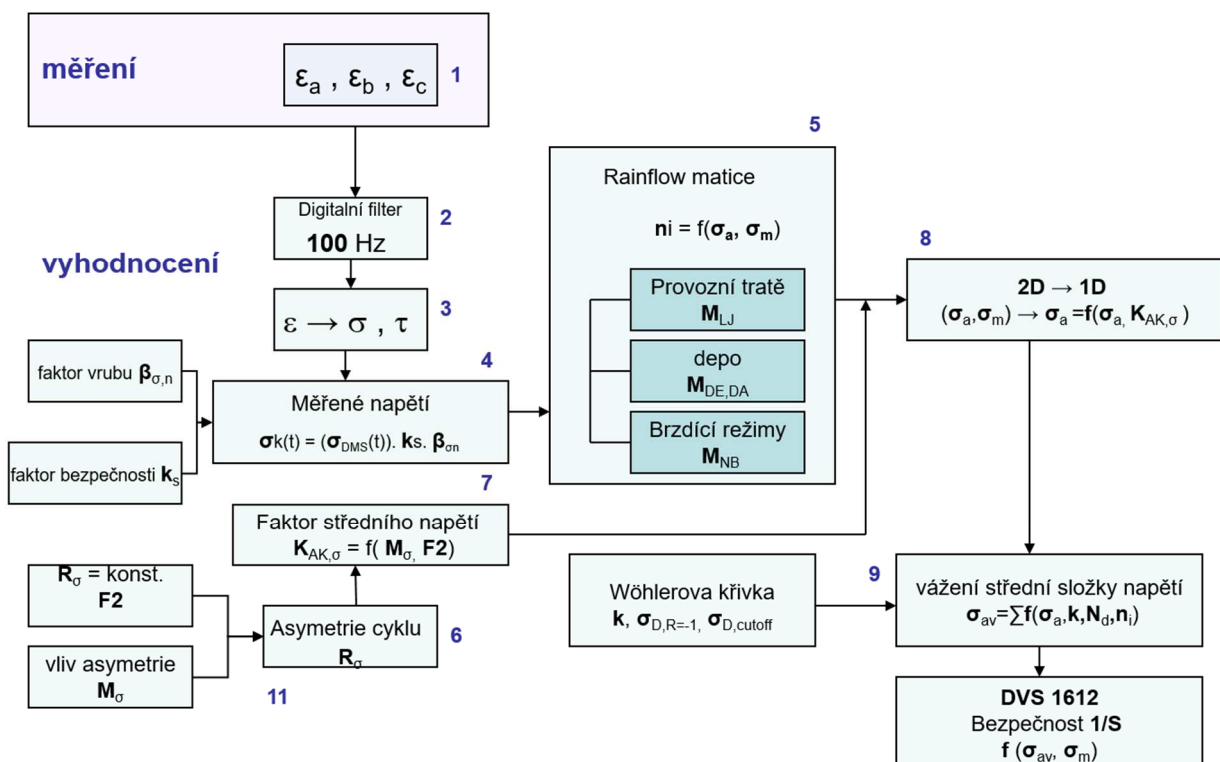
$$\sigma_{vi} = \sqrt{\sigma_{i1}^2 + \sigma_{i2}^2}$$

Tento signál bude vyhodnocen metodou Rainflow do matice o rozměru minimálně 32x32 (obr. 10).



Obr. 10

Obecný vývojový diagram pro zpracování naměřených signálů namáhání je uveden na obr. 11



Obr. 11

6.2 Únavové zkoušky na dynamickém zkušebním stavu

Únavové zkoušky nápravy na dynamickém zkušebním stavu slouží k experimentálnímu zjištění šíření trhliny, která vznikla v provozu u daného typu nápravy. Zkouška probíhá až do celkového lomu nápravy. Takto získaný výsledek zkoušky je stejně jako výsledek měření mechanického napětí v provozu - viz kap. 6.1 podkladem pro stanovení zbytkové životnosti nápravy.

6.2.1 Cíl únavové zkoušky

Zjistit průběh šíření trhliny při namáhání ohybem za rotace při uspořádání zkoušky - viz obr. 12 až do úplného lomu nápravy – viz obr. 13.



Obr.12



Obr.13

6.2.2 Pojmy, zkratky, použité přístroje a software

Pojmy a zkratky: jsou vysvětleny v textu, základní pojmy jsou následující:

- únavová zkouška: zkouška při namáhání nápravy ohybem za rotace;
- šíření trhliny při namáhání ohybem za rotace: nárůst hloubky trhliny v závislosti na počtu cyklů;
- řízení zkoušky: nastavením ohybového mechanického napětí v měřeném místě nápravy v kombinaci s frekvencí rotace nápravy (cykly).

Použitá zařízení, přístroje a software:

- Dynamický zkušební stav (DZS) vybavený testovacím zařízením pro zkoušky náprav ohybem za rotace - viz obr. 12.
- Měřicí řetězec:
 - o Tenzometrické snímače odporové foliové např. HBM 1-LY-6/350
 - o Zesilovače např. typu KWS nebo MGC od firmy HBM
 - o Měřicí (řídící) počítač s A/D převodníkem
- Řídící a měřicí software splňují funkce:
 - o Nastavení velikosti ohybového napětí v měřených místech při ohybu za rotace,
 - o Sledování a záznam ohybového napětí v průběhu zkoušky
 - o Záznam počtu cyklů ohybu za rotace v průběhu zkoušky
 - o Frekvence cyklování (může být maximálně 20 Hz)

- Přístroj nedestruktivního testování (NDT) např. ONISCAN MX pro sledování a záznam šíření trhliny v průběhu zkoušky.

6.2.3 Popis zkoušky

- Náprava s nalisovaným kolem a identifikovanou provozní trhlinou v oblasti nalisovaného spoje se nainstaluje na DZS do testovacího zařízení;
- Na dřík nápravy se ve vzdálenosti 50mm od hrany sedla nalepí po obvodu tenzometrické snímače v rozteči 90° - obdobně jak je uvedeno na obr. 5;
- Tenzometrické snímače se zapojí do měřicího řetězce do plných můstků obdobně, jak je uvedeno v bodě 6.1.2;
- Nevývažkem (upevněné těleso o hmotnosti 2-4 kg na volném konci nápravy) v kombinaci s otáčkami budiče rotace na volném konci nápravy se naladí ohyb za rotace tak, aby na tenzometrických snímačích byla docílena zvolená hladina měřeného mechanického napětí (volí se cca 200-250 MPa);
- Zaznamenají se údaje (datum, čas, teplota, vlhkost) a parametry zkoušky (hodnota mechanického napětí, počet cyklů, frekvence cyklování) a zkouška se začne;
- V průběhu zkoušky se po etapách vždy cca 50-100 tis. cyklů běh zkoušky přeruší a provede se NDT zjištění hloubky trhliny po celém obvodu nápravy;
- Podle rychlosti šíření trhliny se po každé etapě cca 50-100 tis. cyklů může snížit hladina nastaveného mechanického napětí tak, aby celkový počet cyklů do úplného lomu byl alespoň 500 tis. cyklů;
- Etapy cca 50-100 tis. cyklů se opakují až do úplného lomu nápravy;
- V průběhu zkoušky se zaznamenávají a ukládají tyto hodnoty měřených veličin:
 - o Mechanické napětí;
 - o Počty cyklů;
 - o Hloubka trhliny;
- Zkouška končí v okamžiku úplného lomu nápravy;
- Výsledkem zkoušky je závislost hloubky trhliny na počtu cyklů při nastaveném napětí.

6.3 Stanovení zbytkové životnosti

Stanovení zbytkové životnosti, vycházející z výše popsaných zkoušek (kap. 6.1, 6.2), se provede standardním postupem při aplikaci následujících vstupů:

- Použitím výpočtového modelu, validovaného na podmínkách únavové zkoušky odpovídajícího typu nápravy v reálném měřítku (viz **kap. 6.2**). Zkouška definuje rychlost rozvoje trhliny konkrétního typu a stavu materiálu v jednotlivých etapách rozvoje lomu. Výchozí stav poškození konkrétní zkoušené nápravy včetně zatěžovacího režimu a ostatních vstupních parametrů je součástí postupu dané zkoušky a jejího vyhodnocení;
- Výpočtem s uvažováním výchozí obvodové trhliny, indikované na nápravě, která je předmětem predikce zbytkové životnosti v dalším provozu. Hloubka a pozice trhliny (resp. celkového výchozího stavu poškození sedla nápravy) musí být měřeny nedestruktivní zkouškou dle platného předpisu (kupř. podle Technologického předpisu pro zkoušení ultrazvukem – **TD VII 2.084** „Zjišťování příčné orientovaných únavových trhlin na celém povrchu nápravy“);
- S uvažováním zátěže podle provozních zkoušek (viz **kap. 6.1**) na základě zadání zkoušky ze strany provozovatele.

7 Popis uplatnění metodiky

Metodika je určena pro stanovení zbytkové životnosti náprav v případě evidence provozního poškození typu únavových trhlin, které nepřesahují normativně stanovené limity. Jedná se o indikace příčných únavových trhlin v oblastech lisovaných spojů sedlo nápravy – náboj kola, případně v oblasti ložiskových čepů.

Uplatnění metodiky spočívá ve kvalifikovaném odhadu zbytkové životnosti náprav se zohledněním provozního zatížení a kvality nalisovaného spoje.

Metodika umožňuje vyspecifikovat provozní nasazení takto poškozených náprav bez rizika náhlých provozních lomů, tj. de facto umožňuje bezpečné provozování náprav s indikací přípustných poškození. Dosavadní postupy z hlediska kritérií přípustnosti provozování náprav s únavovými trhlinami vycházejí pouze z rozměrových limitů (ve vztahu k nedestruktivním zkouškám) a intervalů nedestruktivních zkoušek, bez kvantitativního provázání na reálné provozní zatížení (s respektováním typu vozidla) a stavu napjatosti v kritických pásmech lisovaných spojů.

Uplatnění metodiky se předpokládá u dopravce jako zadavatele provozních měření na nové (resp. prokazatelně nepoškozené) nápravě odpovídajícího typu. Jednotlivé zkoušky, včetně únavových zkoušek musí provádět akreditovaná zkušební laboratoř dle odst. 3.2.

8 Seznam publikací, které předcházely metodice

1. Malkovský, Z.: Problematika dimenzování nákladních kolejových vozidel, Dizertační práce, Praha 2016;
2. Culek, B. – Schmidová, E. – Schmid, M.: Studie problematiky poruch náprav kolejových vozidel, XXIII. konference Současné problémy v kolejových vozidlech, Česká Třebová 2017;
3. Vojtek T.: Analýza lomu nápravy hnacího kolejového vozidla, diplomová práce, Pardubice 2010;
4. Schmidová, E. – Holec, J: The specificities of fatigue damage and diagnostics of railway axles, Deterioration, dependability and diagnostics, Brno, 2011;
5. Schmidová, E. – Paščenko, P. – Švanda, P.: Analýzy poškození náprav, technická zpráva KMMČS č. 68/2010, České dráhy, a.s., 2010;
6. Malkovský, Z.: Spezifikation zu den Messungen Betriebsbeanspruchung der Achsschenkel des Drehgestells TVP 2007, Zpráva VÚKV č. 19-C 007
7. Heptner, T.: Podvozek TVP 2007. Jízdní pevnostní měření. Nápravy a křížová vazba. Zpráva VÚKV č. 19-C 033;
8. Heptner, T.: Lokomotive ŠKODA 109 E3. Torsionsmomente in den Radsätzen. Messtechnische Ermittlung. Zpráva VÚKV č. 17-C 049.
9. Heptner, T.: Lokomotive ŠKODA 109 E. Torsionsmomente in den Radsätzen Messtechnische Ermittlung der Radsatzwellenbeanspruchung. Zpráva VÚKV č. 13-C 085.