

## TENZOMETRICKÉ METODY PŘI ÚNAVOVÝCH ZKOUŠKÁCH ŽELEZNIČNÍCH DVOJKOLÍ

### STRAIN-GAGE METHOD AT FATIGUE TESTS OF RAILWAY WHEEL SETS

Miroslav NOVOSAD, Bohuslav ŘEHA<sup>1</sup>

#### Abstrakt

Verifikace únavových vlastností nových projektů v železniční dopravě. Ověření parametrů a bezpečnosti použitých ve výpočtech. Únavové zkoušky náprav ve skutečné velikosti podle norem EN 13261 a EN 13260. Zkušební zařízení. Aplikace tenzometrických měřicích metod při řízení únavové zkoušky. Statická a dynamická kalibrace.

**Klíčová slova:** únavová zkouška, tenzometrické měření, železniční náprava.

#### Abstract

Collation fatigue quality new project in railway's transport. Verification parameter and security used in calculation. Weariness test reformation full-scale according norm EN 13261 and EN 13260. Examinable equipment. Application strain-gauge measures method at control of fatigue test. Statical and dynamical calibration.

**Keywords:** fatigue test, strain-gauge measures, rail axle.

#### ÚVOD

S vyššími rychlostmi osobní dopravy a vyššími zátěžemi nákladní dopravy se zvyšují i požadavky na bezpečnost. Tyto požadavky jsou promítnuty do nových evropských norem pro pevnostní výpočty náprav EN 13103 [1] a EN 13104 [2] a do norem EN 13261 [3] a EN 13260 [4] pro dodávky. Podle norem EN 13261 a EN 13260 jsou požadovány únavové zkoušky náprav ve skutečné velikosti. Tyto zkoušky slouží k ověření parametrů a bezpečnosti použitých ve výpočtech. Pro železniční nápravy jsou v zásadě používány dva základní typy oceli EA1N a EA4T.

#### Základní typy ocelí pro železniční nápravy

Tabulka 1

Typ oceli	Stupeň TZ	Chemické složení [%]			Pevnost v tahu Rm [MPa]
		C	Si	Mn	
EA1N	Normalizace	Max. 0,40	Max. 0,50	Max. 1,2	550 – 650
EA4T	Kalení	0,22 – 0,29	0,15 – 0,40	0,5 – 0,8	650 – 800

Pro zkoušky na zkušebních tyčích Ø 10 mm jsou pro tyto materiály stanoveny následující únavové charakteristiky podle tabulky 2.

#### Únavové charakteristiky pro typy oceli EA1N a EA4T- skúšební tyče, Ø 10 mm

Tabulka 2

Typ oceli	RfL [MPa]	RfE [MPa]	q = RfL/RfE
EA1N	≥250	≥170	≤1,47
EA4T	≥350	≥215	≤1,63

<sup>1</sup> Ing. Miroslav NOVOSAD, CSc, Ing. ŘEHA Bohuslav, BONATRANS a.s. Bohumín, [mnovosad@bonatrans.cz](mailto:mnovosad@bonatrans.cz), [breha@bonatrans.cz](mailto:breha@bonatrans.cz)  
Lektoroval: Dr.h.c. prof. Ing. František TREBUŇA, CSc., KAMaM, SJF TU v Košiciach, [frantisek.trebuna@tuke.sk](mailto:frantisek.trebuna@tuke.sk)

- kde  $R_{fL}$  mez únavy materiálu v ohybu za rotace na hladkém vzorku,  
 $R_{fE}$  mez únavy materiálu v ohybu za rotace na vzorku s vrubem o hloubce 0,5 mm, úhlu stran 30°, poloměru dna vrubu  $R = 0,1$  mm,  
 $q$  součinitel vrubové citlivosti.

Pro nápravy ve skutečné velikosti jsou (mimo jiné) požadovány minimální hodnoty únavových charakteristik podle tabulky 3.

**Minimální hodnoty únavových charakteristik pro nápravy** **Tabulka 3**

Typ oceli	Podle PrEN 13261	Podle prEN 13260
	F1 [MPa]	F3 [MPa]
EA1N	≥200	≥120
EA4T	≥240	≥145

- kde F1 mez únavy na povrchu plně nápravy,  
 F3 mez únavy pro plnou nápravu v oblasti nalisovaného spoje.

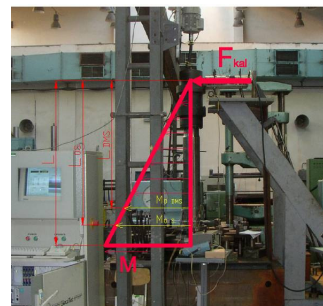
### SIMULOVANÉ NAMÁHÁNÍ NÁPRAVY

Namáhání nápravy v provozu vyvolává ohybový moment. Napětí odpovídající ohybovému momentu v jednotlivých průřezech jsou kontrolována výpočtem. Při zkoušce je ověřováno zda nedošlo k překročení maximální přípustné hodnoty ohybového napětí v jednotlivých průřezech:

$$\sigma = M/W \text{ [MPa]}, \quad (1)$$

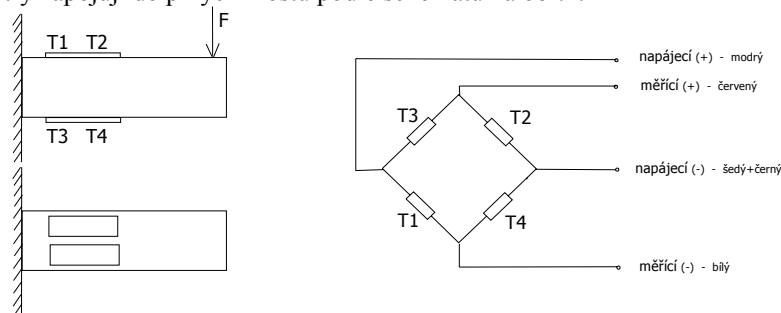
- kde  $\sigma$  - napětí v ohybu,  
 $M$  - ohybový moment,  
 $W$  - průřezový modul.

Zvolená oblast sedla nápravy se zkouší na únavovou pevnost po dobu 10 miliónů cyklů na speciálních zkušebních strojích. Pro urychlení zkoušky jsou používány rezonanční zkušební stroje, kde kmitající hmota vyvolává rotující ohybový moment ve stojící nápravě nalisované do upínacího kotouče, který je pevně přišroubován k odpruženému základu. Zkoušky uspořádané podle obr.1 se tak v závislosti na velikosti nápravy provádějí při frekvenci až 25 Hz.



Obr.1 Uspořádání únavové zkoušky železniční nápravy

Pro řízení zkušebních strojů se měření ohybového napětí provádí pomocí tenzometrů nalepených ve vybraných místech zkušební nápravy. Nejčastěji se jednoosé kontrolní a řídicí tenzometry zapojují do plných mostů podle schématu na obr.2.



Obr.2 Schéma zapojení tenzometrů při únavovém zkoušení železniční nápravy

## POSTUP PŘI KALIBRACI ZKOUŠENÉ NÁPRAVY

Kalibrace zkoušené nápravy se provádí zatěžováním volného konce nápravy silou  $F_{kal}$  a stanovením  $\sigma = f(F_{kal})$  pro napětí v řídicí rovině. Náprava je zatěžována rotujícím ohybovým momentem tak, aby v kritickém místě nápravy velikost ohybového momentu vyvolávala požadovanou velikost napětí.

Dejme tomu, že v kritickém místě nápravy je průměr  $D = 215,9$  mm a náprava je dutá s dírou o průměru  $d = 30$  mm. Moment průřezu v ohybu  $W_o$  se stanoví podle vzorce:

$$W_o = \pi * D^3 * [ \pm (d/D)^4 ] / 32 . \quad (2)$$

Například pro nápravu o průměru sedla 215,3 mm s dírou 30 mm je tedy

$$W_o = 987633,67 \text{ mm}^3.$$

Takže ze vztahu (1) lze stanovit ohybový moment v místě sedla ložiska pro které je definována hodnota napětí  $\sigma_b = 145$  MPa,

$$M_b = \sigma_b * W_b = 145 * 987\,633,67 = 143206882 \text{ N.mm} . \quad (3)$$

Potřebná kalibrační síla  $F_{kal}$  při vzdálenosti působíště kalibrační síly  $F$  a sedla ložiska  $L=1743$  mm pak bude

$$F_{kal} = M_b / L = 143206882 / 1743 = 82161 \text{ N} . \quad (4)$$

Ze zatěžující síly pak přepočteme požadované hodnoty na tenzometr v řídicí rovině:

$$\sigma_{tenzo} = F * L / W . \quad (5)$$

Vypočtená hodnota napětí  $\sigma_{tenzo}$  se nejdříve prověřuje při tzv. statické kalibraci. Ta se provádí statickým zatěžováním zkoušené nápravy s postupným navyšováním zatěžující síly až do  $F_{kal}$  se záznamem napětí při náběhu i poklesu zatížení. Příklad závislosti napětí v daném řezu zkoušené nápravy BONATRANS na velikosti zatěžovací síly je uveden na obr.3.

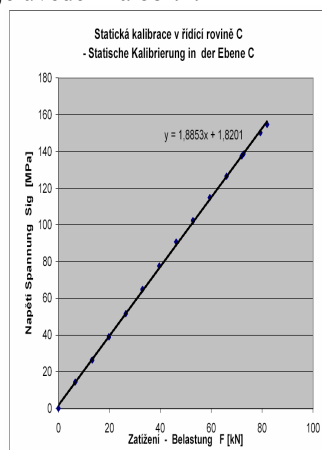
V důsledku dynamického působení kmitající hmoty nápravy a rezonátoru se velikost dynamické deformace nápravy  $y_{dyn}$  odlišuje od hodnoty deformace statické  $y_{st}$ .

$$y_{dyn} = K_{dyn} * y_{st} = (1 + A/y_{st}) * y_{st} , \quad (6)$$

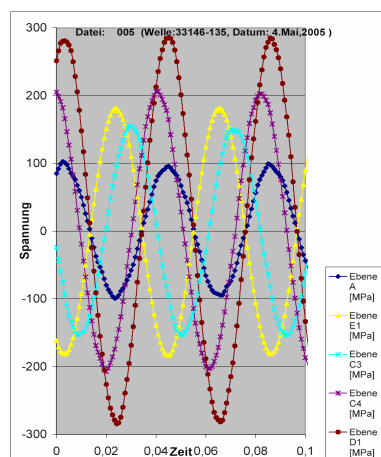
kde  $K_{dyn}$  je dynamický součinitel,

$A$  - amplituda dynamického kmitání.

Při tzv. dynamické kalibraci se provádí kontrolní měření ohybového napětí ve zvoleném řezu nápravy při stanoveném zatížení zkušební silou  $F_{kal}$  po dosažení požadované zkušební frekvence. Příklad záznamu dynamického měření napětí v různých rovinách zkoušené železniční nápravy je uveden na obr.4.



Obr.3 Příklad statické kalibrace



Obr.4 Příklad záznamu dynamického měření

Hodnota napětí v různých místech měřené nápravy je tedy závislá na velikosti zatěžující síly a vzdálenosti od jejího působíště. V kritickém místě ke zvýšení napětí dále přispívá součinitel koncentrace napětí např. v místě přechodové drážky. Proto zejména při zkoušení na zvýšených hladinách zatížení se v kritických oblastech mohou vyskytovat napětí blízká se hodnotám 300 MPa, což v kontextu s  $10^7$  zkušebních cyklů důkladně prověřuje životnost použitých tenzometrů.

## POUŽÍVANÉ TYPY TENZOMETRŮ

V průběhu únavových zkoušek byly použity čtyři typy komerčních jednoosých tenzometrů od firem HBM [5] a VISHAY [6]. Jako standardní byl od počátku používán tenzometr fy HBM typ LY11-6/120 [5] s konstantanovou měřicí vrstvou na polyamidové nosné fólii a měděnými přívodními vodiči. Druhým typem tenzometru od fy HBM byl obdobný typ LY41-6/120 [5] s pájecími ploškami (bez přívodních vodičů). U obou typů výrobce zaručuje max. příp. deformaci  $\pm 5\%$  a tyto charakteristiky únavové životnosti

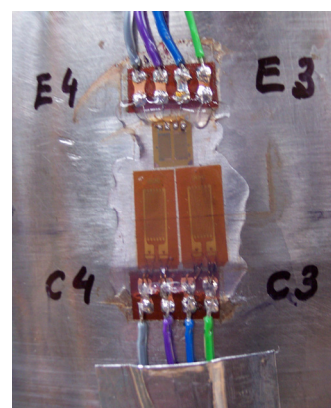
$\Delta\epsilon$ ( $\mu\text{l}$ )	N cycles of safe life
$\pm 1000$	$10^7$

Tenzometr fy VISHAY WK-06-250BG-350 [6] je únavově odolný typ s Ni-Cr měřicí vrstvou na sklo epoxidové nosné podložce. s dvojitými pružnými bronzovými přívodními vodiči. Max. příp. deformace je podle výrobce  $\pm 1,5\%$ . Má tyto charakteristiky únavové životnosti

$\Delta\epsilon$ ( $\mu\text{l}$ )	N cycles of safe life
$\pm 2400$	$10^6$
$\pm 2200$	$10^7$
$\pm 2000$	$10^8$

Tenzometr fy VISHAY typu N2A-06-T006Q-350 [6] má obdobně jako použité tenzometry fy HBM konstantanovou měřicí vrstvou na polyamidové nosné fólii. a pájecími ploškami. Max. příp. deformace je  $\pm 3\%$ . Má tyto charakteristiky únavové životnosti

$\Delta\epsilon$ ( $\mu\text{l}$ )	N cycles of safe life
$\pm 1700$	$10^6$
$\pm 1500$	$10^7$



Obr.5 Detail řídicích a kontrolních tenzometrů

## VLIV KABELÁŽE

Měření prováděná při statické kalibrace potvrdily teoretické zásady kompenzace ztrát vedením. Pro tenzometry zapojené v tzv. dvou vodičovém připojení podle Keila [8] platí pro relativní změnu citlivost  $E^*/E$  vztah

$$E^*/E = R_b / (R_b + 2R_k), \quad (7)$$

kde  $R_b$  je ohmový odpor měřícího můstku,  
 $R_k$  - ohmový odpor přívodních kabelů.

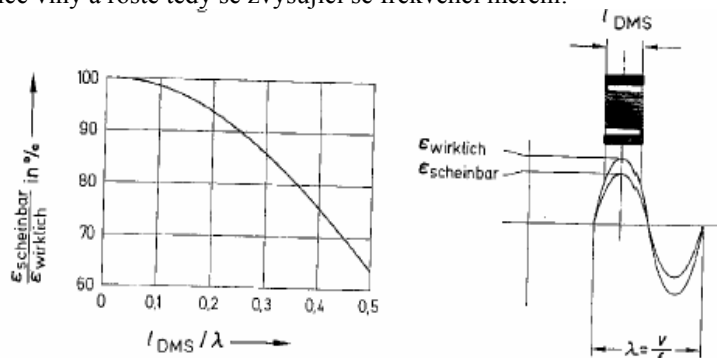
V případě tzv. tří- a čtyřvodičového připojení používaného u aparatury Spider se ztráty snižují na poloviční hodnotu. [5,6].

Zjednodušeně pro poměr odporu DMS před a po připojení kabelů lze napsat, že

$$K = R_{zap} / R_{DMS}. \quad (8)$$

Když pro 120  $\Omega$  můstek naměříme 122  $\Omega$  po připojení, máme  $K = 1,017$ , takže naměříme-li napětí 200 MPa pak je tam ve skutečnosti napětí 203,4 MPa. Z uvedeného vyplývá, že z připojovacích kabelů do Spideru ve čtyřvodičovém zapojení při používané délce 5 m mohou ztráty vedením činit max. 0,5%, tj. 1 MPa při 200 MPa.

Vzhledem k použitým frekvencím při zatěžování sehrává nezanedbatelnou úlohu při měření vliv dynamické roztažnosti taktéž popisované v literatuře [8, 9]. Vliv na velikost naměřené hodnoty deformace  $\varepsilon$  je, jak je zřejmé na obr.6, nepřímo úměrný poměru velikosti tenzometru/délce vlny a roste tedy se zvyšující se frekvencí měření.



Obr.6 Vztah mezi velikostí tenzometru a frekvencí zatěžování [9]

### KVALITA NAMĚŘENÉHO SIGNÁLU

Vzhledem k používanému kmitočtu zatěžování 16 až 25 Hz se ukázalo, že u běžných tenzometrů typu HBM LY11-6/120 při namáhání nad 1000  $\mu\text{m/m}$  dochází k porušování tenzometrů nebo pájených spojů, které se projeví vadami signálu. Úrovně signálu jsme roztřídili následujícím způsobem

1. Dobrý signál (bez vady)
2. Signál deformovaný v horní části sinusovky.
3. Deformovaný tvar signálu.
4. Bez signálu nebo silně zkreslený signál

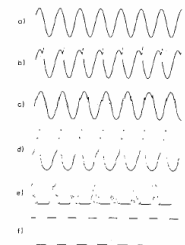
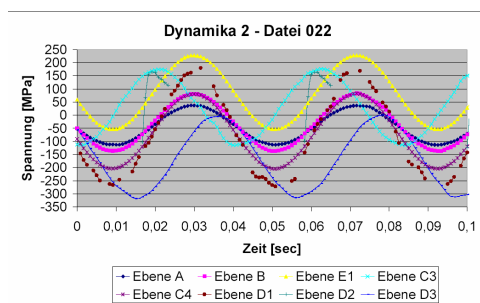


Bild 3.3-21: Einige typische, im Lauf der Wechselbeanspruchung auftretende Schwingungsbilder (nach [3-33]). Die Eckmarken am rechten Rand der Diagramme geben die Schwingbreite von 4000  $\mu\text{m/m}$  an, die ein unzerstörter DMS anzeigen müßte.

Obr.7 Ukázka naměřeného signálu různé kvality a typy signálů podle Hoffmanna [9]

Toto rozdělení signálu odpovídá v podstatě rozdělení kvality signálu podle Hoffmanna [9] jak ukazuje příklad na obr.6. V průběhu zkoušek byla různými způsoby postupně zlepšována životnost tenzometrů. Byly ověřeny tenzometry se zaručovanou zvýšenou dynamickou životností jako VISHAY WK-06-250BG-350 a použití dvousložkového lepidla M-Bond AE-10. Přesto se nepodařilo zvýšit životnost tenzometrů v oblastech zatěžovaných ohybovým napětím přes

250 MPa frekvencí nad 20 Hz výrazně nad  $10^5$  cyklů. Z praktického hlediska se jako nejvhodnější ukázala kombinace tenzometrů HBM LY41-6/120 lepených lepidlem VISHAY M-BOND 200 s pružně uchycenými pájecími podložkami a krytých pružným silikonovým povlakem HBM SG 250, které prokazovaly vyhovující signál  $1,5 \cdot 10^5$  cyklu.

## ZÁVĚR

Použitá aparatura Spider 8/30 s využitelnou frekvencí 1200 Hz při napojení plného počtu osmi měřících kanálů umožňuje analýzu dynamického signálu a vyhodnocení jeho kvality. Při zpracování získaných dat se osvědčil software CONMES, který umožňuje zpracování rozsáhlých souborů dat v porovnání s programem Excel. Umožňuje také uchovávat velké soubory měřených dat.

Při dynamickém měření s frekvencí od 16 do 25 Hertzů vzniká chyba měření v důsledku dynamické únavy tenzometrů. Z toho důvodu je nutná velmi pečlivá příprava, lepení a napojení tenzometrů. Jako výhodná se ukázala minimální délka přívodních kabelů. Ochranné izolace na kabelech zvyšují jejich hmotnost a přispívají ku kmitání přívodních vodičů. Osvědčilo se použití pružných podložek a ochrana tenzometrů pružným silikonovým povlakem, který mj. chrání přívodní kabely vůči nadměrnému chvění. Praktické zkušenosti ukázaly, že lepší vlastnosti mají tenzometry s pájecími ploškami a tedy manuálně pájené než tenzometry s přívodními vodiči pájené průmyslově. Při měření nebyla vyhodnocena velikost chyb z hlediska vlivu frekvence a velikosti tenzometrů, ale přesto vzhledem k lepší a jednodušší manipulaci při přípravě experimentu se ukazuje vhodným použití větších tenzometrů v souladu s literárním doporučením.

Zkoušení s hodnocením dynamického signálu dává představu o odolnosti navržené konstrukce v provozu. Deformace při statickém zatěžování nápravy byly porovnávány s výpočtem napětí pro dané zatížení a byla konstatována dobrá shoda výsledků. Do budoucna nutno uvažovat o zkouškách s několika úrovněmi zkušebního zatížení, které zpřesní simulaci provozního namáhání součásti a umožní lepší využití jejího materiálu.

## LITERATURA

- [1] EN 13103: *Železniční aplikace – Dvojkolí a podvozky – Nepoháněné nápravy – Metody konstrukce.*
- [2] EN 13104: *Železniční aplikace – Dvojkolí a podvozky – Poháněné nápravy – Metody konstrukce.*
- [3] EN 13260: *Železniční aplikace – Dvojkolí a podvozky – Dvojkolí – Požadavky na výrobek.*
- [4] EN 13261: *Železniční aplikace – Dvojkolí a podvozky – Nápravy – Požadavky na výrobek.*
- [5] katalog fy HBM: *Strain Gauges and Accessories*
- [6] manual fy VISHAY: *DMS MESSTECHNOLOGIE – Formeln ud Tabellen.* 1991
- [7] html stránky fy HBM, HOTline 1/00, Kleckers, Baumel: *Einfluss der Kabellängen bei DMS in 2-leiter-Schaltung*
- [8] KEIL, S.: *Beanspruchungsermittlung mit Dehnungsmessstreifen.* CUNEUS, 1995
- [9] HOFFMANN, K.: *Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmessstreifen.* HBM GmbH, Darmstadt, 1987