

Diagram 1: Odběr odtahového ventilátoru 110 kW v průběhu obalování 100 tun

Obecně lze konstatovat, že majitelům či provozovatelům našich obaloven poskytujeme servisní zájem na vysoké úrovni. Podstatné je, že příčina každé závady je zjištěna a následně vyhodnocena. Cílem přijatých opatření je zabránit opakování závad.

Technici naší firmy pracují na dalších inovacích programu i jednotlivých uzlů obalovny tak, aby zákazník měl vždy jistotu nejmodernějšího řešení. V současnosti se jedná např. o propojení řídicího systému s jednotlivými včapalivových hořáků, včetně uhlíkových. Nosným tématem současnosti je úspora energi při výrobě obalových směsí; i v tomto směru se počítá s integrací úsporných technologií přímo do řídicího programu.

K dosažení energetických úspor při výrobě obalových směsí využíváme obě možné cesty. To znamená jak konstrukční řešení vlastní obalovny, tak i možnost produkce softsvizovaných směsí.

V prvním případě se jedná např. o inteligentní řízení elektrických motorů pomocí frekvenčních měničů, kdy k prokazatelné úspoře nákladů na elektrickou energii dochází zejména u motorů s větším výkonem, jako je např. motor ventilátoru, motor mýcháčky či sušičového bubnu. Například řízení otáček motoru odťahového ventilátoru filtru frekvenčním měničem znamená, že otáčky ventilátoru odpovídají okamžité potřebě výrobního procesu a ventilátor nemusí překonávat aerodynamický odpor regulační klapky, která je v tomto případě odstraněna.

V diagramu 1 jsou zobrazeny výsledky měření na dvou téměř shodných obalovnách za stejných povětrnostních podmínek (výkon obalovny 160 t/h, výkon při obalování 120 t/h, odťahový ventilátor 110 kW, teplota vzduchu 8 °C, těsně po dešti).

Úpravu řízení motoru frekvenčním měničem připravujeme i pro vzduchový ventilátor hořáku. Tím také dojde k výraznému snížení součtu hlukové zátěže od filtrů a hořáku.

Neopomenutelným kritériem je také organizace práce při provozu obalovny. Řídící ASKOM na obalovně o jmenovitém výkonu 160 t/h s maximálním instalovaným elektrickým výkonem 2 x 15 kW má spotřebu na jednu tunu vytříděného materiálu při 100% zatížení 0,19 kWh/t, kdežto při 50% zatížení to je 0,375 kWh/t.

Ve druhém případě lze zmínit zkušenosti se zpracováním recyklatu, které jsou shrnuty v řešení podaném na Úřad průmyslového vlastnictví jako patentová přihláška pod číslem PV 2013-64 ze dne 30. 1. 2013. Smyslem tohoto řešení je zjednodušit cestu recyklatu, zamezit zbytečné technolo-

gické dopravě tohoto materiálu v rámci obalovny a umožnit přesné věžení vsádky R-materiálu do mýcháčky spol. s přesným dávkováním vztáženého a třídného kameniva.

Instalace technologie nízkoteplotních asfaltových výrobků s přísadou EVOTHERM™ MAA3 na obalovně Klecany a příprava výroby druhé generace zařízení pro výrobu gumoasfaltu dokresluje rozsáhlou nastíněnou problematiku.

## STATISTICKÉ HODNOCENÍ ÚNAVOVÝCH ZKOUŠEK ASFALTOVÝCH SMĚSÍ A JEJICH APLIKACE PŘI NAVRHOVÁNÍ VOZOVEK – ČÁST 2

Ing. Jiří Fiedler, Ing. Josef Žák, Ing. Petr Mondschein, Ph.D., prof. RNDr. Daniela Jarušková, CSc., ČVUT v Praze, Fakulta stavební

### 1. Úvod

Životnost asfaltových hutnějších směsí v konstrukci vozovky je v laboratorních podmínkách simulována zkouškou odolnosti proti únavě. Výsledky únavové zkoušky jsou nejčastěji aproximovány Weiblerovými křivkami. Parametry únavy jsou dále využívány jako charakteristika vstupující do návrhu konstrukce vozovky. Přispěvek navazuje na první část v minulém čísle časopisu SILNICE MOSTY [7], ve které byly popsány základní vztahy při hodnocení únavových zkoušek a komentovány údaje v ČSN EN 12697-24. V této části je komentována variabilita únavových zkoušek a její dopad na návrh konstrukce vozovky. Interpretaci únavových zkoušek a jejich aplikaci do různých návrhových metod se bude zabývat další část v příštím čísle časopisu.

### 2. Poznámky k variabilitě únavových vlastností asfaltových směsí

Protože únavová zkouška je časově náročná a nákladně záležitost, je k dispozici málo údajů o variabilitě zkoušek. Jediným zdrojem informací jsou výsledky kruhové zkoušky na korněm klinu uspořádané ve Francii v roce 2000. Experimentu se zúčastnilo 11 laboratoří. Výsledky byly popsány v [2]. Zkoušky byly provedeny podle francouzské normy, tj. po 6 křesebních tělesech na 3 úrovních deformace. Vyhodnocení kruhových zkoušek bylo provedeno podle normy ISO 5725. Na základě Grubbsova testu byla jedna laboratoř z hodnocení vyloučena, protože její výsledky se příliš lišily od ostatních. Ze zbylých 10 laboratoří provedlo 9 laboratoří zkoušku směsí dvakrát, jedna jen jednou. Celkem tedy bylo k dispozici 19 výsledků úna-

vové zkoušky na stejné směsi. Zkoušená směs byla AC 0/14 se silničním asfaltem 50/70 s obsahem pojiva 5,4 % (vztáženého ke kamenivu, tj. 5,1 % ve směsi).

Hodnocené veličiny byly  $\epsilon_{10}$ ,  $\Delta\epsilon_{10}$ ,  $b$  (sklon únavové přímky). Nezávislou proměnnou bylo poměrné přetvoření a závislou počet cyklů do porušení. Variabilita byla vyjádřena pomocí reziduální směrodatné odchylky  $s_{\epsilon_{10}}$ . Ta byla ovšem hodnocena podle postupu dříve používaného ve Francii (NF P 98-261-1 z roku 1993), tj. z vyhodnocení únavové zkoušky v logaritmických přírozech. Tato skutečnost neovlivňuje hodnoty  $\epsilon_{10}$ ,  $b$ , ale vypočtené hodnoty  $s_{\epsilon_{10}}$  je nutné dělit koeficientem 2,3, abychom dostali tuto odchylku v měřítku dekadických logaritmů, které se používají při vyhodnocování zkoušky 2PB-TR dle EN. (Připomínáme, že mezi koeficientem  $B$  v rovnici  $B \cdot 7.6$  v TP 170 „Navrhování vozovek pozemních komunikací“ a sklonem přímky  $b$  platí vztah  $B = -1/b$ , což je vzorec B.7.7 v TP 170.) Všechny únavové přímky jsou znázorněny na diagramu 1.

Autoři článku mají k dispozici kompletní protokol únavové zkoušky jen pro laboratoř 22. Zkouška z první série, označená 22A, byla blízko průměru ostatních laboratoří. Proto interval spolehlivosti této regresní přímky z kruhových zkoušek zahrnoval většinu ostatních regresních přímek (viz diagram 2). I tak byly regresní přímky ze zkoušky 20A a 15A výrazně vně 95% intervalu spolehlivosti regresní přímky zkoušky číslo 22A. Variabilita byla u těchto zkoušek podobná (pro zkoušku 20A  $s_{\epsilon_{10}} = 0,186$ , pro zkoušku 15A 0,239 a pro zkoušku 0,172). Je proto zřejmé, že interval spolehlivosti těchto krajních regresních přímek by již nezahrnoval několik regresních přímek stanovených ostatními laboratořemi.

Variabilita parametrů vyhodnocených z únavových zkoušek postupem dle EN 12697-24 je zřejmě rovněž z tabulky 1.

Jak v prvé, tak ve druhé sérii zkoušek nastaly případy, kdy zjištěná hodnota  $\epsilon_{10}$  v jedné laboratoři byla menší než vypočtená hodnota  $\epsilon_{10} - \Delta\epsilon_{10}$  z jiné laboratoře. Rozdíl sice nebyl velký, ale přesto je zapotřebí dbát opatrnosti při aplikaci výsledků jednotlivých zkoušek únavy asfaltových směsí do návrhové metody.

Výše popsané úvahy slouží k ilustraci pro čtenáře, kteří nejsou s problematikou blíže seznámeni. Statistickým vyhodnocením kruhových zkoušek v [2] podle normy ISO 5725-2 [1] se došlo k závěru, že opakovatelnost únavové zkoušky (tj. při realizaci ve stejné laboratoři) pro hodnotu  $\epsilon_{10}$  je s pravděpodobností 95 %  $r = 4,2$  μs, ale reprodukovatelnost (tj. při zkoušce v jiné laboratoři) je  $R = 8,3$  μs. Tyto hodnoty pak byly převzaty do EN 12697-24 *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 24: Odolnost vůči únavě* v článku A.7.2.

Vliv rozptylu zkoušek lze názorně ilustrovat pomocí krabicového grafu, který je ve statistice často používán. Tento graf je znázorněn na diagramu 3.

Z krabicového grafu je patrný vztah mezi výslednými parametry hodnot srovnávacích zkoušek a vyhodnocením souboru výsledků na jednom

Tabulka 1: Hodnoty parametrů vyhodnocených z únavových zkoušek postupem dle EN

Zkouška	14A	15A	16A	17A	18A	19A	20A	22A	23A	24A
$\epsilon_{10}$ [μs]	98	98	99	105	101	104	110	103	105	106
$\Delta\epsilon_{10}$ [μs]	5	7	6	3	4	6	4	3	6	4
$\epsilon_{10} - \Delta\epsilon_{10}$ [μs]	93	91	93	102	97	98	106	100	99	102
menší v 1. sérii	0	0	0	4	0	0	8	3	2	4
Zkouška	14B	15B	16B	17B	18B	19B	20B	22B	23B	24B
$\epsilon_{10}$ [μs]	96	101	100	103	102	103	99	102	105	
$\Delta\epsilon_{10}$ [μs]	5	5	3	4	4	4	4	5	5	
$\epsilon_{10} - \Delta\epsilon_{10}$ [μs]	91	96	97	99	98	99	95	97	100	
menší ve 2. sérii	0	0	1	1	1	1	0	1	2	

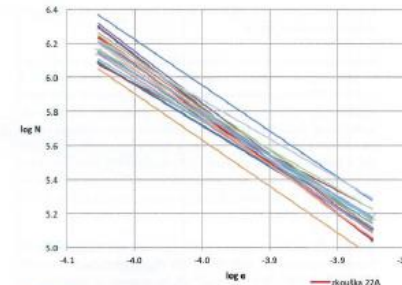


Diagram 1: Regresní přímky z 19 zkoušek při kruhových zkouškách ve Francii

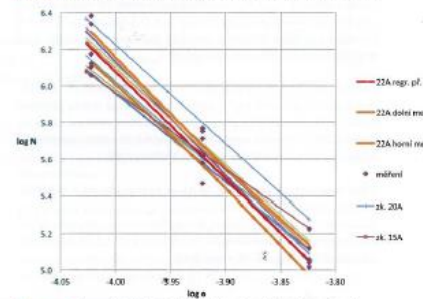


Diagram 2: Regresní přímky zkoušek odolnosti proti únavě z první série a interval spolehlivosti pro zkoušku 22

pracovní (laboratoř 22). Tento graf je prezentován pro ilustraci významu opakovatelnosti zkoušky odolnosti proti únavě jednoho pracoviště ve srovnání s výsledky naměřenými na pracovištích jiných. Krabicový graf poskytuje souhrnnou představu o výsledcích srovnávacích zkoušek jednotlivých pracovišť pro charakteristiku  $\epsilon_{10}$  a  $B$ . Pro charakteristiku  $\epsilon_{10}$  lze shrnout, že rozpětí od horního a dolního kvartilu (mezikvartilové rozpětí) je méně než polovinou rozpětí naměřených dat (od minima k maximu). Všimněme si tedy, že hodnota  $\epsilon_{10}$  není náchylná na odlehle pozorování. Hodnoty parametru sklonu regresní přímky zkoušky odolnosti proti únavě  $B$  mají obdobné rozpětí. Minimální hodnota při kruhových zkouškách byla  $B = 4,2$  a maximální  $B = 6,2$ . Tento fakt opět poukazuje na důležitost provádění zkoušky odolnosti proti únavě na co největší počet vzorků (min. 18), kdy i za těchto okolností může dojít



k naměření kvantitativně odlišných hodnot pro klíčový parametr, jakým je sklon únavové přímkky  $B$ .

Připomínáme ještě, že sklon únavové přímkky má velký vliv na vypočtený počet ježdů návrhové soupravy, jak je patrné ze vzorce B.10.4 v TP 170. Přitom i u jednotlivé zkoušky může být poměrně velký rozdíl v hodnotě sklonu únavových přímk, které by ležely uvnitř mezi intervalu spolehlivosti. Meze 95% intervalu spolehlivosti sklonu regresní přímkky lze stanovit použitím funkce regrese v doplňkovém modulu „Analýza dat“ v Excelu. Například pro výše zmíněnou směs Z2A z francouzských kruhových zkoušek (kde byla velmi malá variabilita výsledků – viz tabulka 1 v první části článku), vychází pro sklon únavové přímkky  $B = 5,8$  rozsah sklonů od 5,0 do 6,6.

Dopad rozdílnosti sklonu únavové přímkky na počet cyklů do porušení je ilustrován v diagramu 4, pro směs VMT s PMB, při prezentaci únavové zkoušky podle CSN EN 12697-24 a Dodatku TP 170. Na diagramu je znázorněna regresní přímkka a dvě přímkky so sklonem odpovídajícím maximálnímu a minimálnímu sklonu, tj.  $B_{max}$  a  $B_{min}$  (vypočteným výše zmíněným modulem „Analýza dat“). Tyto přímkky procházejí středním bodem, tj. bodem o souřadnicích [průměrný logaritmus deformace, průměrný logaritmus počtu cyklů]. Dále jsou zde znázorněny 95% meze spolehlivosti  $Y_{min,95}$  a  $Y_{max,95}$ .

Zmíněné dvě přímkky se dotýkají obou křivek mezi spolehlivostí. Je vidět, že pro počty cyklů větší než 10 milionů je rozdíl mezi oběma přímkami značný. Proto by například pro poměrné přetvoření asfaltové směsi ve vozovce 130 mikrostrainů vyšel při použití minimálního sklonu počet cyklů 2,7 milionu, ale pro maximální sklon již 8,7 milionu cyklů.

V této souvislosti se jovi logické, že jak ve francouzské, tak v naší návrhové metodě se připoúší (s určitým omezením) použití charakteristiky  $\epsilon_s$  stanovené v laboratorních zkouškách, ale nepřipouští se použití jiného sklonu únavové přímkky než návrhového die TP 170, který je  $B = 5,0$  (viz poznámka 1 u Tabulky B.5 Dodatku TP 170 z roku 2010).

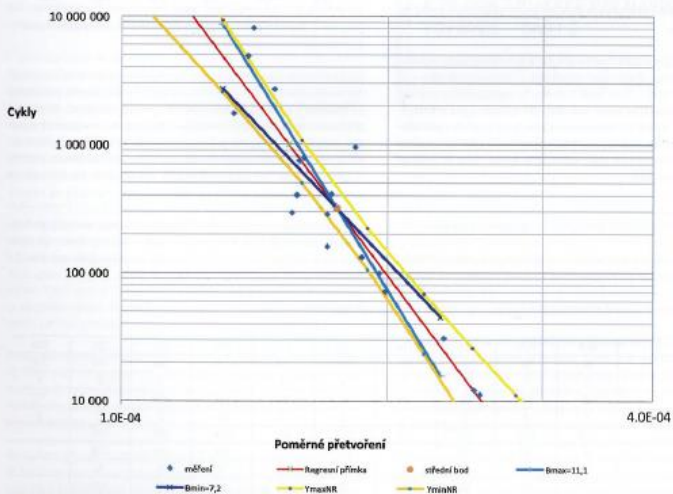


Diagram 4: Meze 95% intervalu spolehlivosti za předpokladu normálního rozdělení a únavové přímkky s minimálním a maximálním sklonem pro směs VMT s PMB

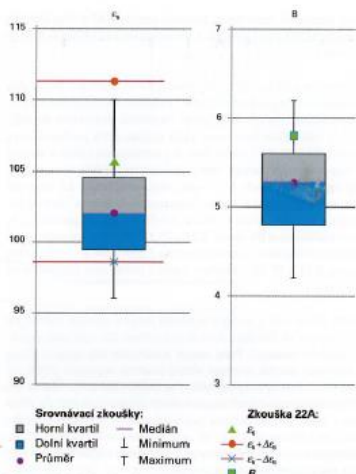


Diagram 3: Krabicový graf pro parametry  $\epsilon_s$  a  $B$  srovnávacích zkoušek ve vztahu k výsledkům jednotlivé zkoušky Z2A

Z krabicového grafu je rovněž zřejmé, že hodnoty obou naměřených charakteristik vykazují symetričnost. Krabicový graf na diagramu 3 je doplněn o zobrazení hodnot indexu kvality  $\Delta\epsilon_s$ . Z takto prezentovaných výsledků

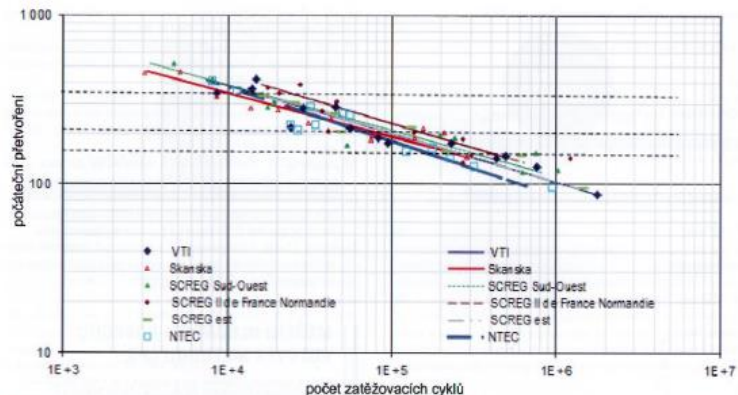


Diagram 5: Výsledky srovnávacích zkoušek únavy AC uvedené v [6]

je čitelná nejistota vyplývající z počtu naměřených dat, ale i v návrhové metodice (TP 170) nespécifikovaná nejistota plynoucí z opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření zkoušky odolnosti proti únavě.

Při interpretaci únavových zkoušek je zapotřebí mít na paměti i to, že hodnocení pomocí charakteristik  $\epsilon_s$  a  $\Delta\epsilon_s$ , zavedených evropskou normou, je sice názorné, ale na vozovkách s velkým dopravním zatížením jsou počty ježdů návrhových úprav nikoliv v milionech, ale v desítkách milionů. Přilehlavější pro tyto účely by bylo vyhodnocovat poměrné přetvoření, při kterém dojde k porušení po 10 milionech cyklů. Poměrné přetvoření odpovídající  $10^7$  cyklů lze analogicky k EN na únavu označit jako  $\epsilon_r$ . Toto přetvoření je vždy menší než  $\epsilon_s$ , protože asfaltová směs může vydržet větší počet zatěžovacích cyklů jen při své menší deformaci. Protože mezní křivky intervalu spolehlivosti regresní přímkky se s rostoucím počtem cyklů od sebe vzdalují a  $\epsilon_s < \epsilon_r$ , bude poměr  $\Delta\epsilon_s/\epsilon_s$  větší než  $\Delta\epsilon_r/\epsilon_r$ . Byl by pak rovněž větší rozdíl mezi výsledkem zjednodušenou metodou podle vzorců v EN kde se uvažuje s lineárními mezemi a postupem popsaným například v [5].

Popsaný rozdíl ve variabilitě pro  $10^6$  a  $10^7$  cyklů ilustruje obecně známou skutečnost, na kterou se však při aplikaci únavových zkoušek často zapomíná. Počty cyklů při laboratorních zkouškách jsou výrazně menší než celkové dopravní zatížení vozovek. Únavové charakteristiky stanovené laboratorní zkouškou tedy při aplikaci do návrhové metody extrapolujeme. Nejistota, se kterou jsou parametry regresní přímkky určeny, ovšem při extrapolaci mimo měřený obor vzrůstá.

V EN pro stanovení odolnosti proti únavě je zatím uvedena opakovatelnost a reprodukovatelnost jen u zkoušky na komolém klínu. V loňském roce byly publikovány v [6] výsledky srovnávacích únavových zkoušek v příčné tahu na válcových vzorcích o průměru 100 mm a výšce 50 mm. Přístroj na zkoušky v příčné tahu vlastní rovněž ČVUT. Byla na něm například provedena i informativní zkouška odolnosti proti únavě pro směs VMT s PMB firmy Eurovia, pro kterou byl výsledek zkoušky na komolém klínu uveden v první části článku.) Srovnávacích zkoušek v [6] se zúčastnilo celkem 7 laboratorů z Francie, Švédska a Anglie. Jednotlivé laboratoře zkoušely 11 až 17 těles. Byl tedy zkoušen jak v každé laboratoři, tak celkové menší počet těles než při popsaných francouzských srovnávacích zkouškách. V článku se konstatuje, že nemohly být plně dodrženy požadavky normy ISO pro vyhodnocování kruhových zkoušek. Přesto jsou výsledky zajímavé. Byl zkoušen jednak asfaltový beton Q16 a VMT Q14.

Zkoušky byly provedeny při teplotě 10 °C. Parametry regresní přímkky byly označeny v souladu s označením dle přílohy E CSN EN 12697-24 a vypočteny ze vztahu

$$N = K \left( \frac{1}{\epsilon} \right)^b \quad (1)$$

Výsledky zkoušek však byly vyneseny tradičním způsobem s deformací na svlése ose. Variabilita výsledků pro AC je znázorněna na diagramu 5.

Sklon únavové přímkky byl  $n = 3,1$  až 3,9, tj. odlišný, než obvyklá vychází při zkouškách na komolém klínu. Koefficient  $K$  (intercept) byl  $K = 1,1 \cdot 10^{12}$  až  $6,4 \cdot 10^{13}$ . (Hodnoty interceptu jsou kladné, protože relativní přetvoření se do rovnice únavové přímkky nedosazovalo jako bezrozměrné číslo, ale přímo v mikrostrainech, tj. například místo  $\epsilon = 120 \times 10^{-6}$  jen jako  $\epsilon = 120$ . Pak vychází jak  $\log \epsilon$ , tak i konstanta  $K$  jako kladné číslo.) Z diagramu je patrné, že pro zvolenou hodnotu relativního přetvoření mohou být počty cyklů do porušení stanoveny v jiné laboratoři několikanásobně rozdílně. Je také vidět, že pro milion cyklů by bylo relativní přetvoření  $\epsilon_s \approx 80 \mu\text{s}$  až 120  $\mu\text{s}$ .

Výsledky potvrzují, že únavové charakteristiky ze zkoušky v příčné tahu nelze přímo srovnávat s výsledky zkoušek na komolém klínu či na tráměčku, což bylo zmíněno již v první části článku. Nicméně pro vzájemné porovnávání odolnosti různých asfaltových směsí proti únavě jsou zkoušky v příčné tahu vhodné, protože jsou realizovatelné než zkoušky na komolém klínu či tráměčku. Lze též zkoušet vývrtky z vozovky.

Nakonec ještě připomínáme, že uvádění parametrů únavové přímkky pomocí interceptu a sklonu je pro použití v návrhové metodě nevhodné, jak při dosazování relativního přetvoření jako bezrozměrného čísla, tak v mikrostrainech. Lze to ilustrovat například na parametrech stanovených z únavové zkoušky směsi č. Z2A z francouzských kruhových zkoušek. Sklon únavové přímkky byl  $b = -0,172$ , tj.  $1/b = -5,8$ . Při dosazení relativního přetvoření jako bezrozměrného čísla bude intercept  $a = -17,2$  a po dosazení přetvoření v mikrostrainech bude  $a = +17,7$ . Při tvaru die přílohy E evropské normy by bylo (po dosazení v mikrostrainech)  $K = 5,5 \cdot 10^{17}$ . Prezentace výsledků únavové zkoušky pomocí charakteristiky  $\epsilon_s = 103$  mikrostrainů místo koeficientu  $a$ , uvedeného v tabulce 1 v první části našeho článku, je srozumitelnější.

Vhodnější tvar rovnice únavy se získá jednoduchou úpravou (reparametrizací) rovnice v EN příloze A, pro které již v ní nejsou konstanty  $a$ ,  $b$ , ale



charakteristika  $\epsilon_a$  dle EN a koeficient  $B$  uvedený v TP 170.

Pro  $B$  platí dle vzorce B.7.7 v TP 170

$$B = \frac{-1}{b} \quad (2)$$

V CSN EN 12697-24 je rovnice únavy uvedena ve tvaru

$$\log N = a + \left( \frac{1}{b} \right) \log \epsilon \quad (3)$$

Po dosažení [2] do [3] a odlogaritmování rovnice [3] bude

$$N = 10^a \times \epsilon^{-b} \quad (4)$$

a pro milion cyklů

$$10^6 = 10^a \times \epsilon_a^{-b} \quad (5)$$

z rovnice (4) a [5]

$$\frac{N}{\epsilon^{-b}} = 10^a = \frac{10^6}{\epsilon_a^{-b}} \quad (6)$$

a po úpravě

$$N = 10^6 \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_a} \right)^{-b} \quad (7)$$

V této formě byl vzorec použit v [4] a v příspěvku Bodin et al. [2010], citovaném v první části našeho článku. Po převrácení zlomku v závorce a změně znaménka u mocniny dostaneme

$$N = 10^6 \left( \frac{\epsilon_a}{\epsilon} \right)^b \quad (8)$$

Rovnice [8] je vzorec B.7.6 v TP 170. V něm má deformace  $\epsilon$  na bázi asfaltových vrstev vozovky i charakteristika  $\epsilon_a$  stejný rozměr. Ze vzorce v TP 170 je dobře patrné, jak vyšší hodnoty obou únavových charakteristik  $B$ ,  $\epsilon_a$  přibližují ovlivňují počet cyklů do porušení vozovky.

Příklad variability únavových zkoušek realizovaných letos na ČVUT metodou 4PB-PR dle EN 12697-24 (zkouška na tlásech tvaru trámečku) je zmíněn v příspěvku článku [3], publikovaného ve sborníku konference Asfaltové vozovky 2013. V něm je také upozorněno na některé problémy a nejasnosti při navrhování vozovek.

Při zohlednění variability parametrů únavy do metody navrhování vozovek je možné postupovat různými způsoby. Problematickou zohlednění výsledků zkoušek únavy při navrhování vozovek se budeme zabývat v dalším čísle časopisu.

### 3. Závěr

V článku je ilustrován vliv variability únavových zkoušek na výsledcích z kruhových zkoušek ve Francii i na zkouškách realizovaných v ČR. Dále je upozorněno na to, jak velký může být rozdíl ve sklonu přímk, které se dotýkají křivky mezi 95% spolehlivostí. V příštím čísle časopisu popíšeme, jak je možné výsledky únavových zkoušek zohlednit při navrhování vozovek.

Článek byl zčásti podpořen z projektu SGS13/090/DHK1/1T/11T, ČVUT v Praze, Fakulty stavební.

### Literatura:

- [1] CSN ISO 5725-2 Přesnost (správnost a shodnost) metod a výsledků měření. Část 2 Základní metoda pro stanovení opakovatelnosti a reprodukovatelnosti normalizované metody měření, 1997.

- [2] De La Roche, C. Essais de fatigue sur les enrobés bitumineux. Résultats de l'expérience d'exactitude. RGRA N° 793, 2001.

- [3] Fiedler, J. – Mondschain, P. – Žák, J.: Poznámky k únavovým vlastnostem asfaltových směsí a k navrhování vozovek. Sborník konference Asfaltové vozovky 2013.

- [4] Hyzl, P. – Varauš, M. – Mondschain, P. – Valentin, J. – Souček, V.: Comparison of fatigue properties using 2-point and 4-point bending tests. Czech experience. In: Four Point Bending, Pais, J. and Harway, J., London 2012.

- [5] Jarušková, D.: Pravděpodobnost a matematická statistika. Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2006.

- [6] Said, F.S. – Vieira, J.M. – Hakim, H. – Ericsson, O. – Nilsson, R. – Cocurullo, A.: Interlaboratory experiment of asphalt concrete using indirect tensile fatigue test. 5<sup>th</sup> Euroasphalt & Eurobitume Congress, 2012.

- [7] Fiedler, J. – Žák, J. – Mondschain, P. – Jarušková, D.: Statistické hodnocení únavových zkoušek asfaltových směsí a jejich aplikace při navrhování vozovek. Část I. SILNICE MOSTY 3/2013.

## MĚŘENÍ HLUČNOSTI POVRCHŮ VOZOVEK METODOU CPX

Ing. Vítězslav Klivánek, Ph.D., Ing. Petra Marková, Centrum dopravního výzkumu, v.v.i., Brno

### Úvod

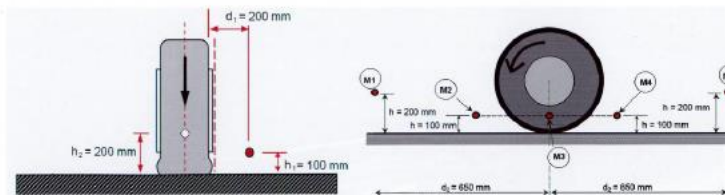
V automobilové dopravě je dominantním zdrojem hluku při nízkých rychlostech (u osobních vozidel cca do 40 km/h, u nákladních vozidel cca do 60 km/h) hlaci jednatka [13]. Při vyšších rychlostech začíná převládat hluk od pneumatik způsobený jejich odvalováním po vozovce, který je dominantní přibližně až do rychlosti 200 km/h. Při ještě vyšších rychlostech se stává dominantním zdrojem hluku aerodynamický hluk, zapříčiněný obtékáním vzduchu kolem vozidla [8]. Z pohledu sílniční sítě ČR a povolených rychlostních limitů tak je převládající složkou hluku styk pneumatiky s vozovkou. Proto je zřejmé, že snižování hluku, vznikajícího mezi pneumatikou a vozovkou, představuje významné opatření na straně zdroje [1]. Obecně emise hluku, která nevzniká, nemusí být nákladně snižována dalšími protihlukovými opatřeními.

Hladinu hluku, vznikajícího při styku pneumatika/vozovka v celé délce komunikace v běžném provozu v terénu lze nejlépe měřit pomocí metody malé vzdálenosti (Close-Proximity method – CPX). Další variantou je statistická metoda při průjezdu (Statistical Pass-By – SPB), která je ovšem velmi náročná na měřicí místo, protože je nutné velmi obezřetně vybírat průjezdy automobilů z dopravního proudu. U SPB se jedná o statickou metodu, při níž se měření provádí pouze v jednom bodě, kdy tak nevzná, jak vypadá hluková situace o pár metrů dále. Měření povrchů vozovek metodou CPX je prováděno dle návrhu norem ISO 11819-2 a ISO 11819-3 u rychlosti cca 40 km/h (dále CDV) [1], [11]. Jedná se o dynamickou rychlou metodu umožňující měřit dlouhé úseky komunikací. Nejčastěji je tato metoda využívána pro:

- ▶ porovnání hlučnosti jednotlivých typů povrchů vozovky;
- ▶ ověření účinnosti aplikace nízkohlukových povrchů vozovky;
- ▶ monitorování akustického chování vozovky v průběhu několika let používání aj.

### Průběh měření

Pro zajištění dlouhodobé opakovatelnosti měření a možnost porovnání výsledků i v delším časovém horizontu popřípadě pro možnost porovnání výsledků s výsledky zahraničními, je za strany Centra dopravního výzkumu, v.v.i. (dále CDV) při měření striktně postupováno v souladu s normami ISO [3] a [4]. Pokud se postupuje jen „volně“ dle normy a dodržují se jen některá pravidla, není dost dobře možné porovnávat výsledky, kdy měření probíhá pokadě na jiných pneumatikách, na jiném typu auta, či není v průběhu měření důsledně zaznamenávána rychlosti měřicího vozidla, popřípadě teplota povrchu. Výše uvedené i mnohé další podmínky zvyšují vlastní nepřesnost měření, čímž se zvyšuje chyba měření, kdy pak není možné některé výsledky objektivně mezi sebou porovnávat.



Obrázek 1: Poloha měřících mikrotfonů dle metody CPX (ISO/CD 11819-2) [3]

Největší nejistota měření hluku styku pneumatika/vozovka představuje vliv zvolené měřicí pneumatiky. Jelikož deštěr běžných pneumatik se mění přibližně v řádu dvou let, nebo při uplatnění běžné pneumatiky výsledky měření použít pro jakékoliv další porovnávání výsledků. Z těchto objektivních příčin používá CDV k zajištění co největší objektivnosti měření, dle návrhu norem ISO, pneumatiku Tigerpaw Unirayal 225/60 R16 SRTT, která je doporučena v automobilovém průmyslu jako standardní pneumatika pro referenční testy dle ASTM F2493-06 [2].

Pneumatika SRTT je vyráběna stále stejným způsobem a pouze jediným výrobcem, tj. jsou zaručeny trvale vlastnosti této pneumatiky. Dále hluk styku pneumatika/vozovka je ovlivňován teplotou i rychlostí, proto pro zajištění co nej přesnějších výsledků je nutné provádět korekce na referenční rychlosti a teplotu. K tomu, aby bylo možné korekce provádět, je nutné tyto parametry v průběhu vlastního měření celé délky vozovky měřit. Z toho důvodu jsou měření doprovázena v souladu s nejnovějšími doporučeními normy ISO/CD 11819-2 (návrh normy z prosince 2012, pod klasifikací ICS 17.140.30) kontinuálním měřením teploty povrchu zkoumané vozovky (byl využit teplotní infračervený senzor), kontinuálním měřením rychlosti v době zkoušky (byl využit modul GPS, možnost zajištění synchronizace měření na konkrétní poloze v terénu). Vlastní měřicí aparatura je sestavena z dílčích částí multianalýzátoru typu PULSE, kam jsou připojeny všechny měřicí mikrofony. Pro snímání hluku je použit pálpalcový předpolarizovaný měřicí mikrofon pro volné pole v tlídě přesnosti 1, s citlivostí 50 mV/Pa, frekvenčním rozsahem 6,3 Hz – 20 kHz a dynamickým rozsahem 14,6 dB – 146 dB. Vysoké rozsahy a přesnosti jsou důležitě pro minimalizaci chyb a provádění měření bez nutnosti přenastavování celého měřicího systému kvůli měření při různých rychlostech jízdy. Samotné měření je prováděno páti mikrofony (viz obrázek 1 a obrázek 2), jejichž výsledky se průměrují pro dosažení vyšší přesnosti [6].

K provádění měření byl navržen a vyroben specializovaný přívěs CPX (UV 20507), který má rozměry cca 3 m x 5 m pro splnění všech akustických podmínek (viz obrázek 2). Měřicí přívěs je konstruován tak, aby byly minimalizovány okolní nepříznivé vlivy, které by mohly ovlivnit vlastní měření. Vzdálenost referenční pneumatiky od hlací jednotky vlastního tažného vozidla přesahuje 4 m, rovněž vzdálenost od protijedoucího či předjíždějícího vozidla dosahuje vzdálenosti cca 4 m. Díky velkému vzdálenostem referenční pneumatiky od okolí (cca 4 m) vůči vzdálenosti vlastního měření (cca 0,2 m) dosahuje odstup měřeného signálu (hluk styku referenční pneumatika/vozovka) od protijedoucího nákladního automobilu (nežádoucí šum – rušení) úrovně přes 20 dB, u osobního automobilu přes 25 dB [7], tedy vlastní mě-

ření není hlukem okolního provozu ovlivňováno. Další nepříznivé vlivy pro vlastní měření představuje odrušení kol (pružiny), brzdový systém, blízkost hlací soupravy automobilu (převodovka, motor), výfuk, vzdálenost dílčích kol automobilu aj. Z důvodu, aby nebyly zachyceny nežádoucí odrazy a zvuky, je přívěs konstruován jako nezakrytý, bez blatníků a celé konstrukce je tvořena vlnicovými profily bez ostrých hran, bez brzd a se vzduchovým odrušením – těchto vlastností nelze dosáhnout na běžných automobilech, kde měření je ovlivňováno vlastní karosérií auta [5].

### Výsledky měření

Výstupem z měření je dle ISO 11819-2 ekvivalentní hladina akustického tlaku daného měřeného úseku (viz tabulka 1), která se konjuguje na referenční teplotu (20 °C) i referenční rychlosti (v tabulce 1 korigováno na 50 km/h) a třetinootřívová charakteristika daného úseku do 20 kHz (viz obrázek 4), kde je znázorněna ukážka vybraných typů povrchů.

Z dílčích výsledků měření v terénu, které byly získány v rámci projektu Technologické agentury ČR č. TA01030459 – „Změna hluku povrchů vozovek v průběhu několika let používání“ je zřejmé, že v mnoha případech lze z akustického hlediska díky náhradě stávajícího krytu vozovky krytem novým, případně „specializovaným nízkohlukovým povrchem“ dosáhnout významného snížení hlukové zátěže z automobilové dopravy. U nízkohlukových povrchů dle prvních výsledků měření [6] je nutné počítat z akustického hlediska s možnou rychlostí degradací pozitivních účinků snížení hlukové emise i z důvodu nedostatečné drážby těchto specializovaných povrchů. Pokud by byla porovnávána hlučnost zcela nových povrchů, tj.



Obrázek 2: Detail na reálné umístění jednotlivých mikrotfonů okolo pneumatiky SRTT

Tabulka 1: Naměřené hodnoty  $L_{Aeq}$  a pomocné údaje pro korekci pro různé povrchy (zdroj výzkumný projekt č. TA01030459)

Povrch	Sílní povrchu v době měření	Skutečná rychlost (km/h)	Skutečná teplota povrchu [°C]	Skutečná teplota vzduchu [°C]	Změněná $L_{Aeq}$ [dB]	Korigovaná $L_{Aeq}$ na referenční hodnoty [dB]
SMA 8 LA (normované směsí)	1 rok	48,81	30,4	25,5	87,3	88,0 ± 1,0
Viasphane (normované směsí)	1 rok	51,07	21,4	19,4	86,2	88,0 ± 1,0
PA 8 CH8B	1 rok	50,97	23,9	19,8	86,5	88,0 ± 1,0
ACO 16	1 rok	50,36	25,6	20,4	86,7	88,0 ± 1,0
SMA 11	cca 10 let	49,77	33,4	24,6	92,1	92,8 ± 1,0
Dlažební kostky	cca 10 let	51,12	27,9	20,1	96,5	96,4 ± 1,0