

PHD WORKSHOP 2023 – DOPORUČENÍ PRO ÚPRAVU STÁVAJÍCÍCH POSTUPŮ POSUZOVÁNÍ BETONU NA ÚNAVU

Miklas Petr, *

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.
petr.miklas@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

Príspevek se zabývá únavovou odolností betonových mostů a možnostmi zpřesnění postupů pro posuzování betonu na únavu. V současné době se často stává, že betonové konstrukce - zejména železničních mostů - ve většině případů výrazně nevyhovují při posouzení betonu na únavu i přes to, že tyto konstrukce nevykazují únavová porušení - z toho je patrné, že únava betonu dosud není dostatečně prozkoumána. Príspevek se snaží odhalit možné příčiny rozporu mezi reálným stavem konstrukcí a výsledky dosud dostupných výpočetních postupů. Na základě dosavadních poznatků príspevek nabízí doporučení pro zpřesnění únavových posouzení betonových konstrukcí ve formě možné redukce únavového zatížení či zpřesnění únavové odolnosti betonu založené na zpracování a přímém využití reálných Wöhlerových křivek.

KLÍČOVÁ SLOVA

Wöhlerovy křivky • Únava betonu • Palmgren-Minerovo pravidlo • Posouzení únavy betonu • Betonové mosty • Železniční mosty

ABSTRACT

The paper is focused on the fatigue resistance of concrete bridges and on the possibilities of refining the procedures for fatigue assessment of concrete. Nowadays, it often happens that concrete structures - especially railway bridges - fail significantly in the fatigue verification of concrete, despite the fact that these structures do not exhibit fatigue damages – which indicates that concrete fatigue has not yet been sufficiently investigated. This paper attempts to reveal the possible reasons for the discrepancy between the actual conditions of the structures and the results of the computational procedures available so far. Based on the work made so far, the paper offers recommendations for refining the fatigue verification of concrete structures in the form of a possible fatigue load reduction or a precisement of fatigue resistance of concrete with a direct use of actual Wöhler curves.

KEYWORDS

Wöhler curves • Fatigue of concrete • Palmgren-Miner rule • Verification of fatigue of concrete • Concrete bridges • Railway bridges

1. ÚVOD

Príspevek se zabývá výzkumem únavové odolnosti betonových konstrukcí. Z doposud získaných výsledků je patrné, že problematika únavové odolnosti betonových konstrukcí není dosud dostatečně prozkoumána. Toto zjištění plyne z faktu, že stávající konstrukce – zejména železničních mostů - ve většině případů při posouzení betonu na únavu výrazně nevyhovují, ačkoliv nevykazují poruchy, které by mohly s únavou betonu souviset. Proto je vhodné se touto problematikou a jejím rozvojem i nadále zabývat.

V první části príspevku je stručně popsána posuzovaná konstrukce a následně jsou stručně shrnuty výsledky provedených posudků betonu na únavu.

V druhé části se príspevek věnuje popisu a následnému využití Wöhlerových křivek z dosažených výsledků experimentů při posuzování betonu na únavu včetně porovnání těchto křivek s dosaženými výsledky provedených posouzení. V druhé části kapitoly jsou představeny další možnosti obdobného posouzení ve formě Goodmanových a Smithových křivek.

V hlavní části tohoto príspevku jsou představena dvě doporučení pro úpravu stávajících postupů při ověřování únavové odolnosti betonových konstrukcí, zaměřená na redukci únavového zatížení a na zpřesnění únavové odolnosti betonu.

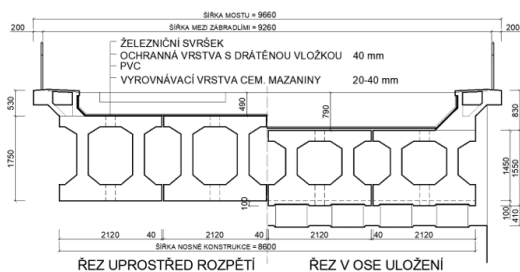
Ve věci redukce únavového zatížení je na základě získaných výsledků představeno sestavení ekvivalentní vlakové soupravy pro posuzování betonu na únavu, která lépe vystihuje skutečné únavové zatížení železničních mostních konstrukcí. Další možností tohoto typu postupu, která bude v dalším výzkumu rovněž rozpracována, je stanovení (upřesnění) vhodného součinitele pro úpravu účinků Modelu zatížení 71 při posuzování únavy.

* Školitel: doc. Ing. Roman Šafář, Ph.D.

Ve věci zpřesnění únavové odolnosti betonu je představen nový možný postup pro stanovení únavové odolnosti betonu na základě využití co nejrealnějších Wöhlerových křivek. Postup je založen na využití experimentálně stanovených Wöhlerových křivek a jejich následné přípravě pro použití prostřednictvím parametrizace pomocí čtyř koeficientů. Výsledkem výpočtu je počet cyklů napětí potřebných pro únavové porušení konstrukce stanovených přímým výpočtem pomocí experimentálně stanovených Wöhlerových křivek.

2. VÝPOČET ÚČINKŮ REÁLNÝCH VLAKOVÝCH SOUPRAV VYUŽITÝCH PRO POSOUZENÍ

Pro posouzení a následně vyhodnocení byla vybrána předpjatá železniční mostní konstrukce přes Chodovskou ulici v Praze, která byla vybudována v roce 1961. Jedná se o jednopolevou konstrukci z prefabrikovaných předpjatých betonových nosníků – celkem jsou v konstrukci použity čtyři komorové nosníky. Každý komorový nosník je složen ze dvou prefabrikovaných polonosníků průřezu „I“, spojených podélnou dobetonávkou horní i dolní desky. Rozpětí nosné konstrukce je 30 m. Pevnostní třída betonu prefabrikované a monolitické části této mostní konstrukce je dle dřívějšího značení značka 500 (dnes C 35/45). Nosníky jsou proměnného průřezu - výška průřezu je uprostřed rozpětí 1750 mm a v ose uložení 1450 mm. Každý komorový nosník je předepnut pomocí 58 předpínacích kabelů. Jedná se o předpínací kabely složené z dvaceti patentovaných drátů o průměru 4,5 mm s pevností v tahu 1650 MPa. (Archivní dokumentace mostu 1960). [7] Na obr. 1 je znázorněn příčný řez mosní konstrukcí.



Obrázek 1: Příčný řez mostem uprostřed rozpětí a v ose uložení

Pro mostní konstrukci byly od Správy železnic s.o. získány údaje o reálných vlakových soupravách, které po tomto mostě přejíždějí. Celkem se jedná o 600 typů vlaků, které byly použity pro podrobné výpočty namáhání mostu.

Pro konstrukci byly stanoveny maximální a minimální hodnoty normálových napětí pro nejkritičtější průřez nosné konstrukce, který se nachází ve staničení 16 m (měřeno od čela nosníků), což je poblíž středu rozpětí, který je ve staničení 15 m.

Nejprve byly stanoveny ohybové momenty během průjezdu všech těchto vlakových souprav. Z ohybových momentů byla následně vypočtena napětí v horních i dolních vlákních během celého průjezdu všech vlakových souprav.

Dle výpočtu v konstrukci dochází k velkému nárůstu ohybového momentu během nájezdu lokomotivy vlakové soupravy, zatímco při nájezdu následujících vagonů dochází

již pouze k menšímu kolísání ohybových momentů a napětí v závislosti na aktuální poloze vagonů na mostě. Patrný rozdíl pak tvoří fakt, zda jsou vagony těžké – plně naložené, nebo jestli jsou prázdné.

Z těchto ohybových momentů během průjezdu všech uvedených vlakových souprav bylo cílem stanovit spektrum rozkmitů napětí. Pro jeho stanovení byla využita metoda stékajícího deště. Na základě stanovených ohybových momentů byly spočítány hodnoty normálových napětí, které byly následně využity pro posouzení únavy betonu.

3. POPIS POSOUZENÍ ÚNAVOVÝCH ÚČINKŮ

Při standardním posouzení nosné konstrukce mostu na únavu je nutné pro všechna posouzení stanovit nejprve únavovou pevnost betonu. Pro posouzení byly využity nejprve čtyři doporučené postupy dle ČSN EN 1992 a dále tři postupy uvedené v Model Code 2010 (*fib*), kde jsou metody do určité míry principiálně podobné, nikoliv však stejné. V obou případech se jednalo o zjednodušené metody založené na využití časté kombinace zatížení a metody založení na využití ekvivalentního poškozujícího rozkmitu napětí.

Z provedených výpočtů lze konstatovat, že při zjednodušených posouzeních a v posouzeních využívající ekvivalentní rozkmit napětí konstrukce nevyhověla, přesto však nevykazuje jakékoliv únavové poškození. U zjednodušených metod konstrukce nevyhověla výrazněji než u posudků založených na ekvivalentním rozkmitu napětí. Následně byla provedena další posouzení, a to s využitím Wöhlerových křivek, dostupných z dosud provedených a publikovaných únavových experimentů. Dalším cílem bylo na základě provedených posudků stanovení možných doporučení pro úpravu stávajících postupů posuzování betonu na únavu. Tato doporučení jsou v příspěvku představena dvě. Doporučení jsou níže podobněji popsána.

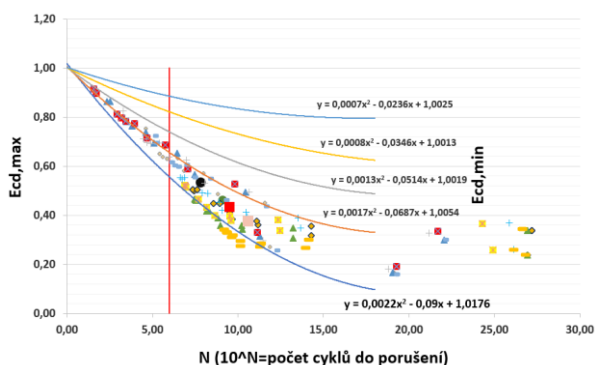
4. POROVNÁNÍ A POSOUZENÍ VÝSLEDKŮ S WÖHLEROVÝMI KŘIVKAMI

Vzhledem k faktu, že konstrukce nevyhověla v žádném zjednodušeném postupu ani v postupu využívajícím ekvivalentního rozkmitu napětí, se tato kapitola zabývá využitím dostupných výsledků experimentálního zjišťování únavové odolnosti betonu, které byly převzaty z experimentálních zkoušek provedených a publikovaných dalšími autory zabývajícími se únavovou odolností betonových konstrukcí. Výsledkem tohoto posouzení je poté porovnání počtu cyklů do porušení konstrukce. V první části kapitoly je představeno porovnání výsledků z posouzení s Wöhlerovými křivkami z reálných experimentů pro zpřesnění představy o skutečném chování betonových konstrukcí při únavovém (cyklickém) zatížení. Wöhlerovy křivky by měly představovat nejpřesnější postup pro zjišťování skutečného počtu cyklů o daném rozkmitu napětí, který je potřeba k dosažení únavové odolnosti dané betonové konstrukce.

V druhé části této kapitoly jsou představeny další možné postupy pro výpočet počtu cyklů do porušení ve formě Goodmanových a Smithových křivek.

4.1. Využití Wöhlerových křivek pro posouzení betonu na únavu

Tato kapitola se věnuje využití Wöhlerových křivek, které představují základ prakticky pro jakékoliv posuzování materiálu na únavu, zde jsou však použity „přímo“, což lze považovat za dosud nejpřesnější postup pro stanovení počtu cyklů napětí do porušení posuzované betonové konstrukce. Nejprve bylo seskupeno několik dostupných Wöhlerových křivek publikovaných různými autory, kteří tyto křivky sestrojili na základě vlastních experimentálních výzkumů. [1,2,3,4] Provádění rozsáhlých experimentálních únavových zkoušek pro sestrojení množství Wöhlerových křivek je velmi časově i finančně náročné. Z tohoto důvodu bylo přednostně využito již dostupných – publikovaných experimentálních výsledků. Z tohoto množství grafů od různých autorů byl sestrojen jeden reprezentativní graf Wöhlerových křivek zohledňující všechny dostupné experimentální výsledky. Tento graf je znázorněn na obr. 2. Do grafu byly pro posouzení doplněny v závislosti na $E_{cd,min}$ a $E_{cd,max}$ (minimální a maximální úroveň tlakového napětí) výsledky popsané v kap. 4. Funkce v obr. 2 znázorňují úroveň únavového napětí pro jednotlivé hodnoty $E_{cd,min}$ od 0,2 do 0,8. U každé této funkce je pak zobrazena její příslušná polynomiální funkce. Ve vzorcích tedy po dosazení za „x“, což je počet cyklů do porušení N obdržíme pro jednotlivé úrovně napětí $E_{cd,min}$ příslušné úrovně napětí $E_{cd,max}$. Z tohoto předpokladu vychází doporučení č. 2 uvedené v kap. 5.2. Z grafu lze tak jednoduše odečíst počet cyklů do porušení u jednotlivých posouzení. Červená čára znázorňuje počet cyklů do porušení doporučený dle aktuální normy – $N = 10^6$. Jednotlivé body pak značí výsledky jednotlivých posudků dle ČSN EN 1992-1-1, ČSN EN 1992-2 a Model Code 2010 a lze je tedy snadno porovnat s experimentálně stanovenými Wöhlerovými křivkami (jednotlivými funkcemi pro jednotlivá $E_{cd,min}$). Body, které se nacházejí vlevo od svislé červené čáry dle posouzení nevyhovují pro stanovený počet cyklů do porušení. Naopak u bodů, které se nacházejí v oblasti počtu cyklů do porušení 10^8 a více se jedná při daném napětí o nekonečnou únavovou pevnost (v tomto případě podporové oblasti). Na vodorovné ose se nachází exponent N , kdy po dosazení do jednoduchého vztahu 10^N dostaneme počet cyklů napětí při dané horní a dolní úrovni napětí, který je potřebný pro dosažení meze únavové odolnosti betonové konstrukce.



Obrázek 2: Reprezentativní Wöhlerovy křivky z experimentálních zkoušek (převzaty z publikovaných výsledků od dalších autorů) s vnesenými výsledky únavových posouzení dle ČSN EN 1992 a Model Code 2010 [1,2,3,4]

Z grafu na obr. 1 je vidět, že při dosazení výsledků posouzení dle ČSN EN 1992 [8, 9] a Model Code 2010 [10] do Wöhlerových křivek některá posouzení nevyhovují pro počet cyklů 10^6 (tzn. nacházejí se v grafu vlevo od svislé červené přímkou). Jedná se především o zjednodušené posudky a posudky využívající ekvivalentního poškozujícího rozkmitu napětí. Pro posouzení založená na ekvivalentním poškozujícím rozkmitu napětí se využívají další podrobnosti, jako návrhová životnost, umístění posuzovaného průřezu v konstrukci (v poli, nad podporou, ...) apod. a uvažuje se zde rovněž hmotnost vlakových souprav včetně nákladu, která po mostě přejede za rok. Lze však říci, že vliv této hmotnosti na výsledky výpočtu je minimální a výpočetní postup bude vhodné podrobit dalšímu zkoumání a zřejmě zpřesnění. Obecně lze z dosažených výsledků říci, že zjednodušené metody jsou značně na straně bezpečné.

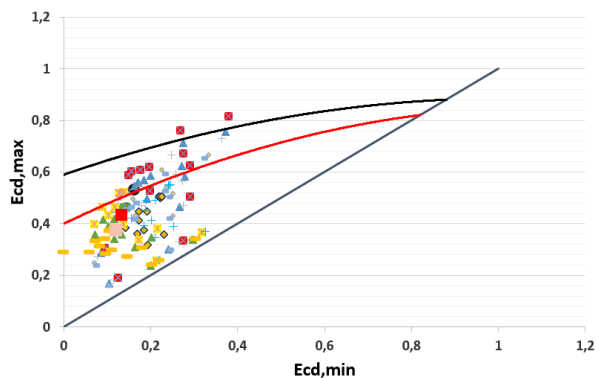
Hodnoty uvedených Wöhlerových křivek jsou znázorněny včetně redukčního součinitele materiálu pro beton, který je stanoven hodnotou 1,5, tedy stejně jako pro jednorázová namáhání (v souladu s ČSN EN 1992).

4.2. Další možné postupy výpočtu s využitím Goodmanových a Smithových křivek

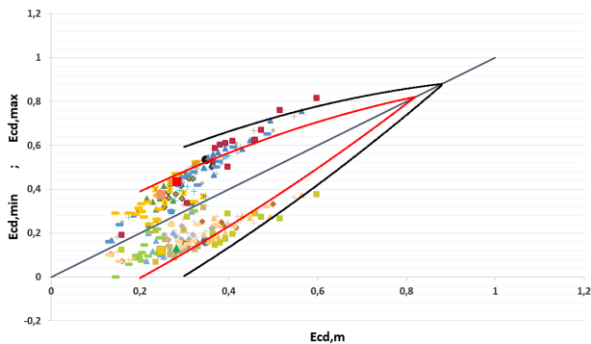
Dalšími obdobnými způsoby pro stanovení počtu cyklů do porušení v závislosti na rozkmitu napětí jsou například Goodmanovy nebo Smithovy křivky. Jedná se o období více využívaných Wöhlerových křivek. Jednotlivé body představují stejně jako u Wöhlerových křivek jednotlivé posouzení dle příslušných norem. V obou grafech červená křivka ohraničuje oblast s počtem cyklů do porušení 10^9 a černá křivka ohraničuje oblast s počtem cyklů do porušení 10^6 .

Goodmanovy křivky znázorňují opět závislost minimální a maximální úrovně napětí na osách a jednotlivé křivky pak zobrazují mocninel N (pro určení odpovídajícího počtu cyklů). V případě, že se bod vytvořený mezi $E_{cd,min}$ a $E_{cd,max}$ nachází uvnitř této uzavřené křivky, pak posudek pro daný počet cyklů vyhovuje.

Smithovy křivky fungují obdobným způsobem, pouze s tím rozdílem, že na vodorovné ose se nachází střední hodnota napětí. Na svislé ose pak nalezneme $E_{cd,min}$ a $E_{cd,max}$ (hodnoty vyjadřující úroveň napětí – podrobnosti viz kap. 4.1). Oba popsané typy křivek včetně posouzení jsou znázorněny na obr. 3 a obr. 4. [1]



Obrázek 3: Goodmanovy křivky pro stanovení počtu cyklů do porušení



Obrázek 4: Smithovy křivky pro stanovení počtu cyklů do porušení

5. DOPORUČENÉ ÚPRAVY POSTUPŮ PRO POSUZOVÁNÍ BETONU NA ÚNAVU

Vzhledem k dosaženým výsledkům jsou připravována doporučení pro úpravu stávajících postupů posuzování betonových konstrukcí na únavu. V této kapitole jsou uvedena dvě dosud rozpracovaná hlavní doporučení. Prvním je doporučení zaměřené na redukci únavového zatížení využívaného v jednotlivých posudcích. Toto doporučení vzniklo na základě výsledků z posouzení a zjištění sil a rozložení jednotlivých náprav skutečných vlakových souprav. Popis vzniku a výsledku tohoto doporučení je popsán v *kap. 5.1.*

Druhým doporučením je zpřesnění únavové odolnosti betonu s přímým využitím Wöhlerových křivek popsaných v *kap. 4.* Pro použití byly křivky parametrizovány způsobem, který je detailně popsán v *kap. 5.2.*

5.1. Redukce únavového zatížení

Z dostupných údajů bylo stanoveno reálné zatížení konstrukce a účinky tohoto zatížení na reálnou konstrukci. [6] Následně byly obdobným způsobem stanoveny účinky od zatížení doporučeného dle normy, tj. zatížení dopravou LM 71 včetně všech relevantních součinitelů.

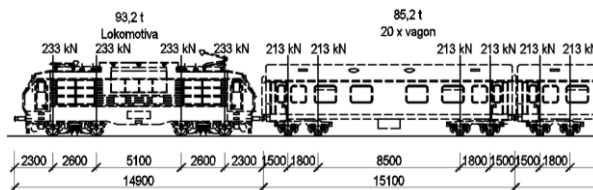
Návrh ekvivalentní vlakové soupravy byl proveden pomocí statistických metod ze skutečných údajů o vlakových soupravách vyskytujících se na uvažované mostní konstrukci. Z tohoto souboru vlakových souprav bylo snahou stanovit charakteristickou ekvivalentní vlakovou soupravu, kterou bude následně možno využívat pro posuzování betonu na únavu místo dosud využívaného modelu zatížení LM 71. Ekvivalentní vlaková souprava byla vytvořena pro kvantil odpovídající charakteristické kombinaci, tedy pro kvantil 95 %. Tato souprava by měla tedy reprezentovat charakteristické reálné únavové zatížení mostní konstrukce. Postup stanovení této soupravy byl následující. Nejprve byl stanoven počet vagonů ekvivalentního vlaku. Následně bylo přistoupeno k výpočtu, kde pomocí statistických metod, jako je průměr, směrodatná odchylka či výpočet požadované hodnoty pro daný kvantil byly stanoveny dvě veličiny. Těmito veličinami jsou síla na jednu nápravu a jednotlivé vzdálenosti mezi nápravami. Tyto vypočtené hodnoty byly následně zaokrouhleny u hmotnosti („síly na nápravu“) na 0,1 t a u vzdáleností na 0,1 m. Přehled jednotlivých parametrů navržené soupravy je uveden v *Tab. 1.* Na *obr. 5* je pak vzhled

ekvivalentní vlakové soupravy, která má jednu lokomotivu a 20 vagonů.

Další možností, jak zpřesnit hodnoty únavového zatížení pro výpočet, by mohlo být nalezení zpřesněné hodnoty součinitele k přenásobení modelu zatížení LM71 pro únavové posouzení. Pro definitivní návrh ekvivalentní vlakové soupravy a/nebo součinitele pro přenásobení LM71 bude nutno provést další výpočty a porovnání pro různé konstrukce. [5]

Tabulka 1: Přehled jednotlivých parametrů navržené ekvivalentní vlakové soupravy pro posuzování betonu na únavu (navrženo pro most přes Chodovskou ulici)

Ekvivalentní vlaková souprava			
Délka vlakové soupravy		316,9 m	
Délka lokomotivy		14,900 m	
Délka jednoho vagonu		15,100 m	
Lokomotiva - 1 x			
Vzdálenost od nárazníku k nápravě podvozku	Hmotnost na 1 nápravu (t)	Vzdálenost mezi nápravami jednoho podvozku (m)	Vzdálenost mezi poslední nápr. 1. podv. a první nápr. 2. podvozku (m)
2,300	23,300	2,600	5,100
Vagon - 20 x			
Vzdálenost od nárazníku k nápravě podvozku	Hmotnost na 1 nápravu (t)	Vzdálenost mezi nápravami jednoho podvozku (m)	Vzdálenost mezi poslední nápr. 1. podv. a první nápr. 2. podvozku (m)
1,500	21,300	1,800	8,500



Obrázek 5: Grafické znázornění části ekvivalentní vlakové soupravy

5.2. Zpřesnění únavové odolnosti betonu - přímé využití Wöhlerových křivek

Druhým doporučením je zpřesnění únavové odolnosti betonu pomocí přímého využití reálných Wöhlerových křivek popsaných v *kap. 4.* Základem tohoto doporučení je předpoklad přesnosti Wöhlerových křivek, které jsou stanoveny na základě experimentálních zkoušek množstvím autorů zabývajících se únavovou odolností betonových konstrukcí. V prvním kroku byly převzaty tyto Wöhlerovy křivky z dostupných publikací a z tohoto množství křivek byl vytvořen jeden graf Wöhlerových křivek zobrazený na *obr. 2*, které respektují všechny shromážděné křivky, čímž byla zaručena maximální možná přesnost. K tomu byla použita numerická parametrizace – křivky určené pro posuzování byly z publikovaných křivek stanoveny metodou nejmenších čtverců – viz *kap. 4.1* a *obr. 2*. Následně byly pro jednotlivé křivky vygenerovány jejich funkce, které jsou rovněž v tomto grafu na *obr. 2* popsány. Jedná se o polynomické funkce druhého stupně. Z těchto funkcí byl pro jednotlivé koeficienty A, B a C funkcí křivek $E_{cd,min}$ nalezen vztah opět podle metody nejmenších čtverců. Jedná se o

celkem tři koeficienty – polynomický, lineární a konstantní (označeny jako koeficienty A, B a C). Pro tyto koeficienty byly stanoveny vlastní grafy a jejich příslušné funkce. Po nalezení požadovaných křivek a jejich funkcí pro tyto koeficienty byl sestaven postup pro posuzování betonu na únavu pomocí přímého využití Wöhlerových křivek. Postup je založen na řešení těchto polynomických funkcí. Řešením je tedy nalezení kladného kořene pro rovnici 3.

Při využití tohoto postupu je nejprve nutné stanovit hodnoty úrovně únavového napětí pro $E_{cd,max}$ a $E_{cd,min}$. Následně z křivek pro jednotlivé koeficienty, případě z jejich příslušných rovnic, lze odečíst hodnoty jednotlivých koeficientů pro další výpočet. Stanovením koeficientů A, B a C obdržíme rovnici pro příslušné $E_{cd,min}$ ve formě dle rovnice 1.

$$E_{cd,max} = A * N^2 + B * N + C \quad (1)$$

Tak, abychom na levé straně dostali „0“, je nutné přesvést $E_{cd,max}$ na druhou stranu. Proto je nutné nejprve stanovit koeficient D dle rovnice 2.

Následně dle rovnice 3 stanovíme exponent N jako řešení kvadratické rovnice pro výpočet počtu cyklů napětí potřebného pro dosažení únavové odolnosti betonové konstrukce. [5]

$$D = C - E_{cd,max} \quad (2)$$

$$N = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4 * A * D}}{2 * A} \quad (3)$$

Po stanovení exponentu N jej dosadíme do vztahu 10^N a dostaneme počet cyklů napětí při dané horní a dolní úrovni napětí, který je potřebný pro dosažení únavové odolnosti betonové konstrukce. Pro posouzení je využito dílčího součinitele spolehlivosti materiálu pro beton hodnotou 1,5, který je využit ve výpočtu návrhové odolnosti betonu pro posouzení na únavu. Tato pevnost se následně promítne ve výpočtech $E_{cd,max}$ a $E_{cd,min}$.

Pro definitivní znění doporučení bude i v tomto případě nutno provést ještě řadu výpočtů pro různé typy konstrukcí a jejich zatížení pro stanovení konečné podoby tohoto doporučení.

6. ZÁVĚR

Výsledkem dosud provedeného výzkumu únavové odolnosti betonu a posuzování betonu na únavu jsou dvě doporučení pro úpravu stávajících postupů pro posuzování betonu na únavu. Obě doporučení jsou založena na dosavadních výsledcích popsání výzkumu. Prvním doporučením je redukce únavového zatížení betonových konstrukcí. Zde je stanovena nová podoba ekvivalentní vlakové soupravy, která by mohla být využívána při posouzení betonu na únavu a která lépe vystihuje skutečné únavové zatížení betonových mostních konstrukcí. Tato souprava byla stanovena statistickými metodami na základě skutečného zatížení jednoho mostu vlakovou dopravou. Součástí této metody bude po provedení dalších výpočtů návrh úpravy součinitele pro přenásobení modelu zatížení LM71 pro jeho

využití posouzení betonu na únavu. Druhým doporučením je návrh zpřesnění únavové odolnosti betonu, které je založeno na přímém využití reálných Wöhlerových křivek, které jsou pro tento účel numericky parametrizovány. Výsledkem tohoto postupu je stanovení počtu cyklů do porušení konstrukce v závislosti na maximální a minimální úrovni tlakového napětí.

PODĚKOVÁNÍ

Práce vznikla za podpory SGS 2022 a i nadále pokračuje. Dále je poděkování věnováno doc. Ing. Romanu Šafářovi, Ph.D. za jeho odborné vedení a užitečné rady při zpracování této práce.

Reference

- [1] Hansen, M. Determination and assessment of fatigue stresses on concrete bridges, *Structural Concrete*, 21(4), 2020, pp. 1286–1297. doi: 10.1002/suco.201900432
- [2] KIM, J.-K.; KIM, Y.-Y. Experimental study of the fatigue behavior of high strength concrete. *Cement and Concrete Research*, 1996, 26.10: 1513-1523.
- [3] MIAO, Y.-Y.; NIU, D.-T.; CHENG, N. Durability of Concrete Under the Combined Action of Carbonization and Fatigue Loading of Vehicles. *Science of Advanced Materials*, 2019, 11.12: 1781-1787.
- [4] PAYMAN, A., SZYMANSKI, M. *Fatigue in Plain Concrete*, Göteborg, 2006
- [5] MIKLAS, P. *Fatigue resistance of concrete bridge structures. Mezinárodní Masarykova konference 2022, 2022*, pp 1323-1333 ISBN 978-80-87952-37-5.
- [6] Správa železnic, s.o., *Podklady přejezdů jednotlivých vlakových souprav přes most Chodovská*, 2016
- [7] Správa železnic, s.o., *Archivní dokumentace mostu Chodovská TU 0206 km 3,007*
- [8] ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: *Navrhování betonových konstrukcí*
- [9] ČSN EN 1992-2 Eurokód 2: *Navrhování betonových konstrukcí – Část 2: Betonové mosty – Navrhování a konstrukční zásady*
- [10] fib, (2013), *Model Code 2010 for Concrete Structures 2010*. ISBN 978-3-433-60409-0