

UPLATNENIE PREDIKCIE ÚNAVOVEJ ŽIVOTNOSTI URČENEJ PROSTRIEDKAMI EAN PRI EXPLOATÁCII ŤAŽKÝCH NOSNÝCH KONŠTRUKCIÍ

UTILIZATION OF FATIGUE LIFE PREDICTION BY MEANS OF EXPERIMENTAL STRESS ANALYSIS METHODS FOR THE DETERMINATION OF EXPLOITATION OF HEAVY LOAD-CARRYING STRUCTURES

Peter SIVÁK¹

Abstrakt

Článok sa zaoberá predikciou únavovej životnosti, ktorá bola určená s pomocou prostriedkov experimentálnej analýzy napätí a jej uplatnením pri rozhodovaní o možnosti ďalšieho používania ťažkých nosných konštrukcií strojov a zariadení. Súčasne je uvedený opis experimentu a použitého meracieho reťazca, ako aj niekoľko relevantných prípadov z praxe, kde bol použitý metodický postup predikcie únavovej životnosti založený na koncepte nominálnych napätí.

Kľúčové slová: únavová životnosť, kumulácia únavového poškodenia, Wöhlerova krivka, ťažké nosné oceľové konštrukcie.

Abstract

The paper deals with assessment of fatigue life of heavy load-carrying steel structures by means of experimental stress analysis methods. Fatigue life prediction has an influence upon the determination of exploitation of heavy load-carrying structures. The description of measuring methods and measuring chain are presented. There are demonstrated several practical applications of utilization of fatigue life calculations based on Nominal Stress Analysis (NSA).

Keywords: fatigue life, fatigue damage cummulation, Wöhler curve, heavy load-carrying steel structures.

ÚVOD

Posudzovanie spôsobilosti nosných prvkov a konštrukcií, spravidla oceľových, pre dlhodobú prevádzku a predikcia jej celkovej alebo zvyškovej životnosti je závažný a veľmi zložitý technický problém. Týka sa prvkov a konštrukcií namáhaných premenlivým zaťažením, ktoré môže spôsobiť kumuláciu únavového poškodenia v kritických miestach, rast a šírenie únavových trhlin až po únavový lom. Sú to najmä nosné prvky a zariadenia konštrukcií mostových, portálových a vežových žeriavov, žeriavové dráhy, nosné a podporné konštrukcie pod strojnými a tepelnými zariadeniami, nosné konštrukcie kompresorov, turbín, ventilátorov a iných zariadení s dominantným otočným účinkom, potrubné systémy na transport rôznych médií, postihnuté zaťažením od pulzácie tlaku a píšťalovými efektmi, priemyselné plošiny pod rôznymi zariadeniami vystavené cyklickým dynamickým účinkom, cestné, lodné a železničné mosty, nosné konštrukcie vrát vzdúvadiel, priepustí a kanálov. K únave materiálu môže takisto dôjsť u veľmi štíhlych oceľových konštrukcií stožiarov, veží, komínov, vysokých budov a podobných

¹ Ing. Peter SIVÁK, KAMaM, SJF TU v Košiciach, peter.sivak@tuke.sk

Lektoroval: doc. Ing. Jan VAVRO, CSc., TrU AD Trenčín, FPT Púchov, vavro@fpt.tnuni.sk

konštrukcií vystavených dynamickým účinkom zaťaženia len vetrom alebo v súčinnosti s ďalšími poveternostnými vplyvmi, u ktorých vplyvom tzv. Karmanovho efektu môže dôjsť k porušeniu nízkokycklovou únavou alebo aj krehkým lomom. Norma STN 73 1401 nepriamo definuje prvky, ktoré je nutné posúdiť na únavu ako prvky, ktoré podopierajú zdvíhacie zariadenia, prenášajú pohyblivé zaťaženia, sú opakovane namáhané od nevyváženosti strojov alebo kmitajú od účinku vetra a pohyblivého zaťaženia.

Únavovým poškodením môžu byť nosné prvky postihnuté aj vďaka nevhodným konštrukčným návrhom, nedodržaním technologickej disciplíny počas výroby zariadenia, nevhodou dodatočnou konštrukčnou úpravou (napr. po generálnej oprave) alebo použitím zariadenia spôsobom, ktorý je v rozpore s jeho určením. V dôsledku toho je potom skutočný charakter namáhania ďaleko nepriaznivejší ako sa predpokladalo pri návrhu konštrukcie, pričom môže dôjsť k zmene smeru, gradientu, veľkosti alebo redistribúcií napätí. Typickým príkladom je mimostýčnikové alebo mimoosové zaťaženie spojené so vznikom prídavných napätí, veľký rozdiel tuhostí paralelných nosných prvkov alebo nepredpokladané nespôsobenie častí prierezu alebo spojovacích a spojovaných prvkov s následným neželaným prerozdelením napätí, veľké pretvorenia konštrukčných prvkov vplyvom dlhotrvajúcich vysokých teplôt, atď. Únavové trhliny môžu pritom vychádzať z koncov zvarov, miest náhle zmeny prirezov, kútov výrezov a iných koncentrátorov napätia, niekedy aj v súčinnosti s nevhodnou kvalitou a vlastnosťami použitého materiálu. Negatívnu úlohu tu môžu zohrávať najmä štruktúrna nehomogenita, použitie ocele s nízkou vrúbkovou húževnatosťou hlavne pri nízkych teplotách, malá plasticita, resp. iné formy degradácie ocele ako dôsledok starnutia materiálu.

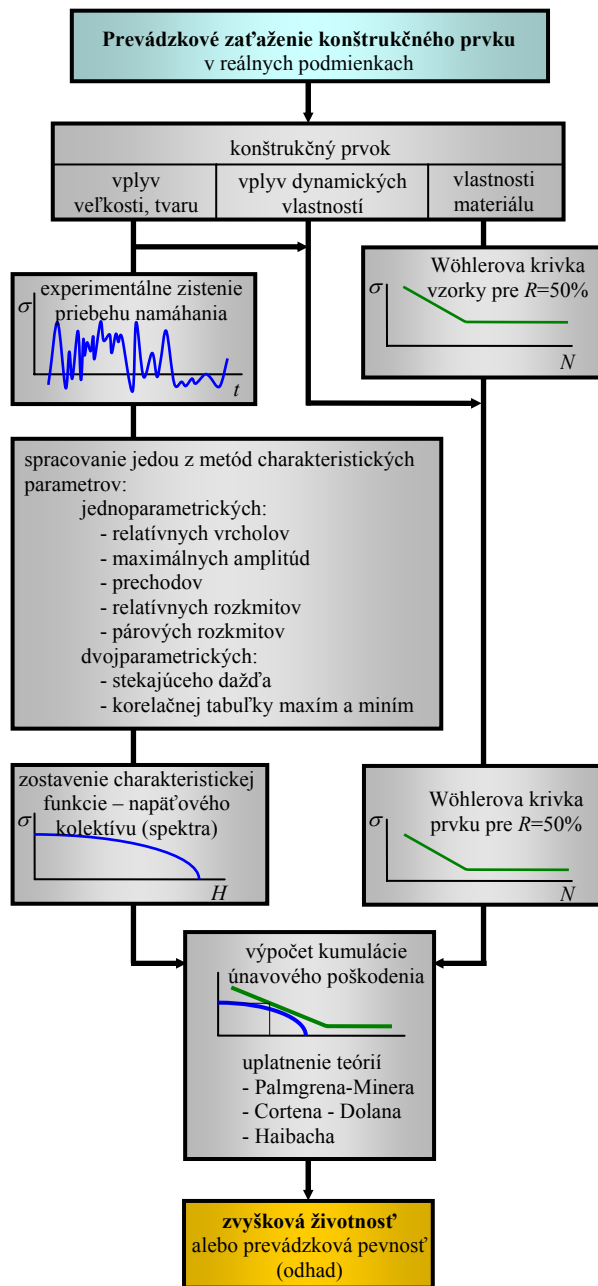
Najčastejším dôvodom uplatnenia výsledkov výpočtu kumulácie únavového poškodenia je odhalenie príčin vzniku prevádzkovej poruchy, potreba úpravy hlavných sledovaných parametrov (napr. nosnosti žeriavov) alebo predikcia zvyškovej životnosti, determinujúcej ďalšie využívanie zariadenia po havárii alebo generálnej oprave. Výpočet životnosti u konštrukcií aplikujeme aj vtedy, ak je nutné zaistiť ich bezpečnú životnosť počas predom stanovenej doby prevádzky, vyjadrenej v počtoch pracovných cyklov alebo v iných jednotkách (počte prevádzkových hodín alebo rokov, letových hodín, odjazdených kilometrov atď.).

ÚNAVOVÁ ŽIVOTNOSŤ A EXPERIMENT

Experiment je nezastupiteľným prostriedkom predikcie zvyškovej životnosti u už existujúcich konštrukcií pri jeho „ex post“ nasadení. V niektorých prípadoch ani neexistujú iné efektívne spôsoby získania určitých druhov kľúčových informácií, bez ktorých je v súčasnosti čo možno najpresnejšie určenie únavovej životnosti prakticky nemysliteľné. Ide hlavne o vplyv zvyškových a technologických napätí, koncentrátorov napätí atď, kvôli ktorým boli zavedené a metodicky rozpracované metódy odvrávaní a metódy fotoelasticimetrické.

Aj keď okrem prístupu empiricko-experimentálneho je k dispozícii prístup teoreticko-analytický a výpočtovo-simulačný, alebo ich kombinácia, z hľadiska rozboru postupov a okolností stanovenia únavovej pevnosti a životnosti a z hľadiska objektívnosti získaných záverov je možné vysloviť názor, že experimentálna analýza napätí je a zostane prostriedkom získavania tých najobjektívnejších zdrojov údajov a informácií, ku ktorým by sme sa pri použití neexperimentálnych metód mohli priblížiť niekedy len veľmi vzdialene.

Vzhľadom na jeho časovú a materiálovú náročnosť je len samozrejmé, že nasadenie experimentu pri predikcii únavovej životnosti, ako zdroja informácií „z prvej ruky“, musí byť vykonané uvážene, triezvo a po zhodnotení jeho prínosu a efektívnosti.

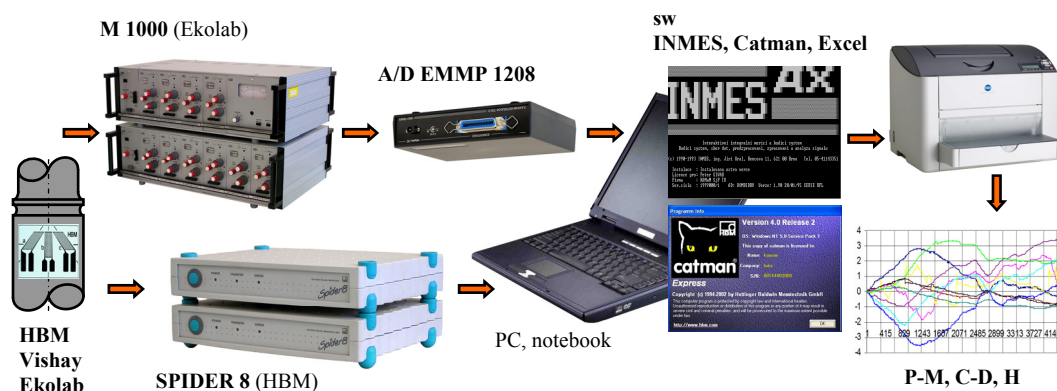


Obr.1 Schéma procesu posudzovania únavovej životnosti

OPIS POUŽITÝCH EXPERIMENTÁLNYCH METÓD

Jednotlivé kroky stanovenia životnosti, príp. stanovenia zvyškovej životnosti použité v ďalej uvedených príkladoch rámcovo charakterizuje schéma na obr. 1. Ide o výpočtový postup podľa konceptu tzv. nominálnych napätí, ktorý je typický pre oblasť elastických deformácií, teda v rámci vysokocyklovej únavy. Vychádzalo sa pritom zo skutočného prevádzkového zaťaženia konštrukcie a jeho jednotlivých režimov, pričom tzv. kritické prvky, konštrukčné uzly a kritické miesta v nich, u ktorých možno očakávať, že budú rozhodovať o životnosti celej konštrukcie a pre ktoré sa vyjadril stupeň kumulácie únavového poškodenia boli vybrané v prípravnej fáze merania. Pretože účinok (odozva) zaťaženia v konštrukcii je na zaťaženi lineárne závislý iba v prípadoch pružného pôsobenia a statického zaťaženia, preto pokiaľ to bolo možné, do ďalších výpočtov nevstupoval získaný prípadný priebeh zaťaženia ale reprezentatívnejší priebeh namáhania. Priebeh namáhania bol neskôr spracovaný do kolektívu namáhania (napät'ového kolektívu).

Časová priebohá závislosť namáhania – deformačnej a napät'ovej odzvy konštrukcie bola na povrchu vybraných kritických miest určená tenzometrickými meraniami pomocou elektrických odporových tenzometrov. Použité boli drôtkové alebo fóliové tenzometrické snímače s nominálnou hodnotou ohmického odporu 120Ω s jednou meracou mriežkou, dvomi mriežkami (tenzometrické kríže) alebo s tromi mriežkami (tenzometrické ružice 45° a 60°) s konštantou deformačnej citlivosti (k – faktorom) 2,01 až 2,09, väčšinou teplotne kompenzované pre ocel, firmami HBM, Vishay a Mikrotechna (Ekolab). Ich druh a zapojenie bolo volené s ohľadom na typ rovinatej napätosti a na potrebu snímání konkrétneho typu meranej veličiny, väčšinou so zapojením do klasického mostíka alebo poissonovho polmostíka (sekundárny tenzometer plní pri jednoosovej napätosti zároveň funkciu aktívnu aj kompenzačnú), výnimočne do celého mostíka, vždy s kompenzáciou vplyvu zmeny teploty. Pre ich aplikáciu boli použité tenzometrické tmely X 60, resp. Z 70 (obe od firm HBM), v prípade potreby chránené ochranným povlakom SG 250 alebo hliníkovou fóliou s vrstvou plastickej hmoty ABM 75 (obe od firm HBM). Na prenos signálu slúžili tienené päťžilové káble s príslušnými koncovkami.



Obr.2 Príklady používaných meracích a vyhodnocovacích reťazcov

Merací reťazec ďalej tvorila dynamická tenzometrická aparátúra systému M 1000, A/D prevodníkom (DAS 16D alebo EMMP-1208) prepojená s notebookom. Neskôr bol merací reťazec inovovaný s použitím dynamickej tenzometrickej aparátúry SPIDER 8, napojenej na notebook. Obe možnosti prepojenia sú znázornené na obr. 2.

Na zber, ukladanie, triedenie, spracovanie a vyhodnocovanie získaných dát meraných veličín bol vo väčšine prípadov použitý interaktívny softvérový produkt INMES. Ten prostredníctvom svojho zásuvného softvérového modulu umožňoval získaný časový priebeh spracovať do charakteristickej funkcie – napätového kolektívu (spektra), reprezentujúceho početnosti príslušných nameraných amplitúd, alebo rozkmitov napätí. Táto schematizácia sa pritom vykonala metódou stekajúceho dažďa (Rain-flow), tzn. jednou z triediacich metód, založených na početnosti charakteristických parametrov.

Príslušné Wöhlerove krivky (spravidla pre materiály triedy 37 a 52) neboli vytvorené ale prebrané v závislosti na vyšetrovaných prvkoch a ich vzájomných spojeniach (skrutkových, nitových a zvarových). V použitých príkladoch pritom dominovali zvarové spoje a pre stanovenie (priradenie) ich Wöhlerových kriviek boli využívané normové Wöhlerove krivky, uvedené v normách STN 73 1401 – Navrhovanie oceľových konštrukcií a STN 27 0103 – Návrh oceľovej konštrukcie žeriavov, alebo krivky vyplývajúce z európskych smerníc (Eurocod č.3). Wöhlerove krivky uvedené v norme STN 27 0103 pre konštrukčné ocele triedy 37 a 52 pre najpoužívanejšie tvary prvkov, spojov podľa tvaru, druhu a kvality zvarov, ktoré ovplyvňujú vrubové vlastnosti, sú prevzaté z normy DIN 15 018. Rozčlenené sú do piatich vrubových skupín označených K0 až K4 a zodpovedajú vysokej pravdepodobnosti prežitia $R=97,5\%$. Uvedené krivky boli v programe zohľadnené pomocou svojich charakteristických znakov (medze únavy, počtu cyklov na medzi únavy a sklonu Wöhlerovej krivky).

Konečné stanovenie životnosti, prípadne zostatkovej životnosti potom bolo vykonané pomocou teórií kumulácie únavového poškodenia, konkrétne pomocou lineárnej teórie Palmgren-Minera (P-M) a nelineárnych teórií Cortena-Dolana (C-T) a Haibacha (H). V niektorých prípadoch sa pristúpilo k posúdeniu zostatkovej životnosti v zmysle posupov predpísaných oficiálnymi výpočtovým predpismi, uvedenými v normách STN. Samozrejme v prípadoch, v ktorých je životnosť do značnej miery ovplyvnená technológiou výroby, hlavne v prípadoch zvarovaných spojov alebo konštrukcií, je možné vykonať predikciu životnosti len s efektom veľkého rozptylu výsledkov.

**Relevantné príklady riešených úloh s dôvodom a výsledkom expertízy
s využitím výsledkov kumulácie únavového poškodenia**
Tabuľka 1

Zariadenie resp. konštrukčný celok (sledovaný prvok resp. konštrukčný uzol)	Dôvod určenia kumulácie únavového poškodenia a predikcie únavovej životnosti	Špecifické prevádzkové podmienky a okolnosti merania	Výsledky a odporúčenia expertízneho konania
Otočný liaci stojan o nosnosti 250 t (traverza, ramená a podpera stojana)	Intenzifikácia zariadenia so zvýšením prevádzkového zaťaženia na 280 t	Ťažká hutnícka prevádzka	Dostatočná rezerva zostatkovej životnosti nosnej konštrukcie aj pre zvýšenú nosnosť 280 t
Otočný liaci stojan (ramená so spojovacou časťou)	Vznik medzného stavu a následnej poruchy (trhliny v spodnej časti ramien)	Ťažká hutnícka prevádzka	Vyčerpanie životnosti (nevhodná konštrukcia ramien, nesprávna činnosť hydraulického systému)
Liaci mostový žeriav 250 t + 63/12,5 t – 18,6 m (hlavné nosníky, priečniky a vahadlá)	Rekonštrukcia nosnej konštrukcie na nosnosť 280 t + 63/12,5 t – 18,6 m	Ťažká hutnícka prevádzka, veľké kolesové tlaky žeriavovej mačky	Z hľadiska únavy vyhovujúce nosníky a priečniky, vahadlá až po realizácii originálnej konštrukčnej úpravy
Mostový žeriav 200/50/12,5 t – 18,6 m (hlavné nosníky)	Porušenie pozdĺžnych zvarov hlavných nosníkov pod dráhou žeriavovej mačky s následným otvorením profilu nosníkov	Ťažká hutnícka prevádzka, veľké kolesové tlaky žeriavovej mačky	Návrh originálnej konštrukčnej úpravy poškodených hlavných nosníkov pre časovo obmedzené prevádzkovanie
Drapákový portálový žeriav typu HEEDE 25/5 t – 48/77 m (hlavné nosníky, nohy s pohonom)	Vplyv priečenia žeriava na životnosť jeho nosnej konštrukcie, vznik trhlín v spodnej časti pevných nôh	Vplyv (ne)synchronizácie pohonu pojazdu, priečenie žeriava	Z hľadiska únavy vyhovujúce hlavné nosníky, u nôh doporučená ich výmena
Nosná konštrukcia teplárenského parného kotla (hlavné stĺpy nosnej konštrukcie)	Určenie nosnosti a technického stavu po viac ako 30 ročnej prevádzke	Výrazné teplotné a korozívne účinky	Zaručenie zostatkovej životnosti pre 58, resp. 131 nábehov (pre R=97,5%)
Nosná konštrukcia teplárenského parného kotla (hlavné stĺpy nosnej konštrukcie)	Posúdenie životnosti a spoľahlivosti po generálnej oprave	Výrazné teplotné a korozívne účinky, poškodenia skryté pod výmurovkou	Podľa posúdenia v súčinnosti s STN 73 1401 vylúčenie vplyvu kumulácie únavového poškodenia
Potrubné dvory a potrubné rozvody plynu (časť potrubia s odbočkou a pätkou)	Návrh a overenie metodiky určenia zvyškovej životnosti potrubia bez a s použitím vibroizolačných prvkov	Pulzácia tlaku, píšťalové efekty, dynamické účinky turbokompresorov	Podľa analýzy v zmysle STN 73 1401 je životnosť bez úpravy dostatočná, s úpravou „neobmedzená“

VÝSLEDKY EXPERIMENTOV A DISKUSIA

Tabuľka 1 uvádza vybrané relevantné príklady riešených úloh, týkajúcich sa predikcie únavovej životnosti s dôvodom a výsledkom expertízy, realizovanej s využitím výsledkov kumulácie únavového poškodenia. Tvoria len malú časť úloh vyriešených a riešených na Katedre aplikovanej mechaniky a mechatroniky Sjf TU v Košiciach, v súčinnosti s inými pracoviskami univerzity. Analýzy únavovej životnosti boli často vykonávané ako súčasť komplexných expertíz, vrátane pevnostných výpočtov, rozboru zvyškových napätí metódou odvrávania, zahrnutím vplyvu úbytku materiálu vplyvom korózie, numerických výpočtov MKP atď.

V mnohých prípadoch bola na základe použitia experimentálnych metód dokázaná spôsobilosť prvkov a celých konštrukcií po dlhodobej prevádzke pre ďalšie využívanie bez väčších zásahov. V niektorých prípadoch nebola spôsobilosť konštrukcií potvrdená a konštrukcie boli navrhnuté na vyradenie z prevádzky bez pokusu o opravné či rekonštrukčné práce. V ďalších prípadoch boli pre dočasné alebo núdzové využitie konštrukcií navrhnuté a uskutočnené ich opravy a úpravy, ktoré sa vyznačujú svojou originalnosťou a špecifickosťou. Tu je možné uviesť úpravy a opravy odstraňujúce koncentrátoory napätí, ďalej úpravy, ktorých výsledkom je prechod z oblasti plastickej deformácie späť do oblasti deformácie elastickej v kritickom mieste konštrukcie, alebo opravy konštrukcie po únavovej poruche (trhlina) atď. V určitých prípadoch v súčinnosti s normou STN 73 1401 vzhľadom na nízke hladiny rozkmitov napätí nebola preukázaná nutnosť ďalšieho posudzovania na únavu a konštrukcie sa tak za splnenia určitých podmienok javili ako konštrukcie s „neobmedzenou“ životnosťou. U ďalšej skupiny úloh bolo ich riešenie zamerané na možnosti zvýšenia hlavných sledovaných parametrov, ako je napr. zvýšenie nosnosti konštrukcie a ich výsledky potom použité ako podklad pre zákonný schvaľovací proces príslušným štátnym dozorným orgánom. Typickým príkladom sú zdvíhacie zariadenia, napr. vežové, mostové, portálové a iné špeciálne žeriavy, u ktorých niektoré konštrukčné uzly a celky, napr. žeriavové dráhy sú mimoriadne náchylné na únavové poškodenie. Znovu uvedenie do prevádzky po generálnej oprave alebo pretipovanie žeriavov v súvislosti so zvýšením hodnoty ich nominálnej nosnosti na území SR je potom podmienené schválením Slovenskou technickou inšpekciou.

Všetky konštrukcie, u ktorých bolo vykonané expertízne posúdenie týkajúce sa predikcie únavovej životnosti s využitím prostriedkov EAN, boli alebo sú toho času v bezpečnej prevádzke.

ZÁVER

Predikcii únavovej životnosti, získanej metódami EAN a jej uplatneniu pri exploatacii ťažkých nosných konštrukcií je potrebné venovať neustálu a starostlivú pozornosť, aj keď realizácia životnostných expertíz s využitím uvedených metód je po časovej, materiálovej, odbornej a logistickej stránke veľmi náročná. Ako ukazujú uvedené príklady, predikcia únavovej životnosti má v praxi svoje opodstatnenie. Uvedenú metodiku je avšak nutné ďalej verifikovať a rozvíjať, hlavne s ohľadom na vstupujúce materiálové charakteristiky, použité teórie únavového poškodenia a možnosti zapracovania výsledkov z rozboru zvyškových napätí v materiáli.

Autor ďakuje Vedeckej grantovej agentúre MŠ SR za podporu v rámci riešenia projektu č.1/2187/05.

LITERATÚRA

- [1] BIGOŠ, P.: *Dynamická pevnosť a životnosť*. ALFA, Bratislava 1987
- [2] BIGOŠ, P., TREBUŇA, F.: *Zvýšenie nosnosti ťažkých mostových žeriavov na základe tenzometrického merania a teórie kumulácie únavového poškodenia*. 32. konferencie o experimentálnej analýze napätí 1994 VŠST Liberec. Liberec 1994 Czech Republic

- [3] BIGOŠ, P., TREBUŇA, F.: *Intenzifikácia technických spôsobilostí ťažkých nosných konštrukcií*. Acta Mechanica Slovaca 1/97. Košice 1997. ISSN 1335-2393
- [4] BIGOŠ, P., TREBUŇA, F.: *Metodické postupy riešenia otázok zostatkovej životnosti nosných konštrukcií experimentálnymi metódami*. Acta Mechanica Slovaca 2/98. Košice 1998. ISSN 1335-2393
- [5] JUHÁS, P. a kol.: *Navrhovanie ocelových konštrukcií*. STN 73 1401. SUTN, Bratislava 1998
- [6] JUHÁS, P. a kol.: *Navrhovanie ocelových konštrukcií*. STN 73 1401, Komentár. SUTN, Bratislava 2001
- [7] ŚLEDZIEWSKI, E., AUGUSTYN, J.: *Havárie ocelových konštrukcií*. SNTL, Praha 1988
- [8] TREBUŇA, F., BIGOŠ, P.: *Intenzifikácia technickej spôsobilosti ťažkých nosných konštrukcií*. Viena, Košice 1998. ISBN 80-967325-3-6
- [9] TREBUŇA, F., BURŠÁK, M.: *Medzné stavy, lomy*. Grafotlač, Prešov 2002. ISBN 807165-362-4
- [10] TREBUŇA, F., ŠIMČÁK, F.: *Odolnosť prvkov mechanických sústav*. Emilena, Košice 2004. ISBN 80-8073-148-9
- [11] TREBUŇA, F., ŠIMČÁK, F., JURICA, V.: *Pružnosť a pevnosť II*. Viena, Košice 2000. ISBN 80-7099-478-9
- [12] TREBUŇA, F. a kol.: *Určenie zvyškovej životnosti potrubných dvorov*. Priebežná a záverečná správa IV. etapy. Výskumná správa. TU Sjf v Košiciach. Košice 2004
- [13] TREBUŇA, F. a kol.: *Tenzometrická kontrola napätosti nosnej konštrukcie PK I pred a po GO za účelom určenia stavu, posúdenia životnosti a spoľahlivosti*. Záverečná správa. TU Sjf v Košiciach. Košice 2005
- [14] BALDA, M.: *Vícekanálové sledování kumulace poškození v reálném čase*. Dynstr96.pdf. [www:<http://www.cdm.cas.cz/publications/balda/>](http://www.cdm.cas.cz/publications/balda/)
- [15] RŮŽIČKA, M.: *Kritéria a postupy při posuzování únavové pevnosti a životnosti konstrukcí*. Ústav mechaniky FS ČVUT, Praha 1998
[www:<http://mechanika.fs.cvut.cz/sources_old/pzk/>](http://mechanika.fs.cvut.cz/sources_old/pzk/)
- [16] SVOBODA, J., BALDA, M., FRÖHLICH, V.: *Fatigue strength and life of real structures under combined random loading*. Svratka04.pdf
[www:<http://www.cdm.cas.cz/publications/balda/>](http://www.cdm.cas.cz/publications/balda/)