

EXPERIMENTÁLNA ANALÝZA ÚNAVOVEJ PEVNOSTI A ŽIVOTNOSTI KONŠTRUKČNÝCH OCELÍ A DETAILOV

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF FATIGUE STRENGTH AND LIFE TIME OF STRUCTURAL STEELS AND DETAILS

Pavol JUHÁS¹, Emília JUHÁSOVÁ², Otto ROTH¹

Abstrakt

Príspevok informuje o výskume únosnosti, únavovej pevnosti a životnosti zvaraných oceľových konštrukcií a ich detailov. Analyzuje experimentálne výsledky únavových skúšok konštrukčnej ocele S 380 (QStE 380 TM) vrátane zvarových spojov. Zaťaženie bolo jednak harmonické a tiež skupinové blokové, ktoré reprezentovalo premenný rozkmit napätí. Priebežné časové záznamy sily a pomerných deformácií v kritických prierezoch poskytli údaje o vývoji lokálneho porušovania v čase. Získané údaje umožnili definovať únavové vlastnosti skúmanej ocele a účinky použitých zvarov. Potvrdili sa degradačné účinky zvarov na únavovú pevnosť, najmä v prípade neopracovaných zvarov. Zvolený prístup umožňuje analyzovať účinky skutočných zaťažovacích procesov a vylepšiť metodiku posudzovania únavovej pevnosti a životnosti oceľových prvkov.

Kľúčové slová: únavová pevnosť, životnosť, premenné zaťaženie, účinok tupých zvarov.

Abstract

The paper informs about the research devoted to load-carrying capacity, fatigue strength and life-time of welded steel structures and their details. The analysis of experimental results comprises fatigue tests of structural steel S 380 (QStE 380 TM) including welded connections. Loading was represented firstly by harmonic one, then by groups of block ones that simulated loading with variable stress range. The continuous recording of force and strains in critical sections gave the data about the local failure development in time. Data sets have allowed define fatigue properties of investigated steel and effects of used welds. The degradation effects of welds on fatigue strength of structural steels were confirmed, especially in case of rough welds, without additional milling. The applied approach gives an opportunity to analyse the effects of actual loading process and improve the methodology of judgement of fatigue strength and life-time of steel elements.

Keywords: fatigue strength, life time, variable loading, butt weld effect.

ÚVOD

Oceľové konštrukcie tvoria nosné systémy mnohých mostov a priemyselných stavieb, ktoré sú často vystavené opakovanému zaťaženiu. Obyčajne sa akceptuje, že kapacita odolnosti sa plne nevyužíva vzhľadom na nepriaznivé účinky únavy. Avšak pri dynamickej odozve konštrukcie treba zohľadniť vplyvy zmien tuhosti a útlmu. Výsledkom je zmes priaznivých a nepriaznivých účinkov [1,2,10,11,15,16]. Napätostno-deformačný stav konštrukcie závisí od geometrických a materiálových vlastností a od úrovne a spôsobu zaťažovania. Takto závislosti deformácií a napätí sú nelineárne a odozva pozostáva z interakcie správania základného materiálu, druhu spojov, ich kvality a opracovania.

¹ prof. Ing. Pavol JUHÁS, DrSc., Ing. Otto ROTH, CSc., KKDK, SvF TU Košice, pavol.juh@tuke.sk, otto.roth@tuke.sk

² prof. Ing. Emília JUHÁSOVÁ, DrSc., ÚSTARČH SAV Bratislava, juhasova@savba.sk

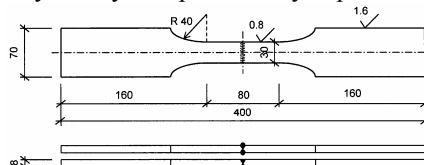
Lektoroval: Dr.h.c. prof. Ing. František TREBUŇA, CSc., KAMaM, SĽF TU v Košiciach, frantisek.trebuna@tuke.sk

Kľúčovým bodom je odolnosť spojov, kde sa očakáva koncentrácia pomerných deformácií a napätí [3,5,12,14]. V ďalšom sú analyzované experimentálne výsledky zo skúšok normalizovaných tyčí, ktoré obsahovali tupé zvary. Celkovým cieľom bolo získať lepší prehľad o skutočnom správaní oceľových konštrukcií pri extrémnom premennom zaťažení vrátane mimoriadnych zaťažení. Potreba individuálneho hodnotenia a overovania materiálových vlastností nových ocelí vyplýva aj z klasifikácie spojov podľa ich detailov a odporúčaní hodnotenia návrhovej únavovej životnosti v najnovších národných a medzinárodných normách.

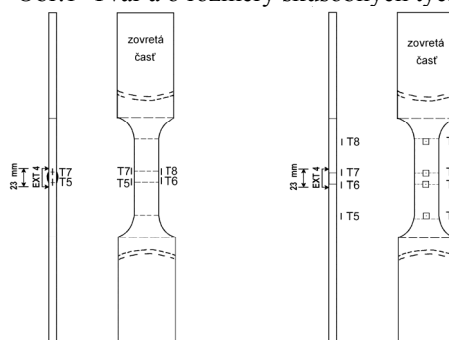
EXPERIMENTÁLNY PROGRAM

Experimentálny program sa zamerlal na únavové skúšky konštrukčnej ocele S 380 (QStE 380 TM). Celkove sa skúšali tri skupiny tyčí: pôvodné normové tyče, tyče s pričným tupým zvarom, ktorý bol dodatočne obrúsený a tyče s pričným neopracovaným tupým zvarom. Jedna časť výskumného programu bola venovaná skúškam pri harmonickom zaťažení s konštantnou amplitúdou, výsledky sú podrobnejšie opísané v [3,6,8,9]. Ďalšia časť programu bola zameraná na skúšky rovnakých typov tyčí pri blokovom zaťažovaní s premennou amplitúdou zaťaženia stanovenou na základe záznamov pomerných deformácií na skutočných konštrukciách. Každý blok pozostával zo 7 zaťažovacích stupňov s rozdielnou amplitúdou, každý o dĺžke 10 periód, pričom pri najväčšej amplitúde bola frekvencia 1 Hz a pri ostatných šiestich bola frekvencia 6 Hz. Použitý zaťažovací blok charakterizuje klesajúca stredná hodnota napätia (216-154-139-137-132-33-26 MPa) a rozkmity napätia $\Delta\sigma$ (427-70-169-204-53-18-18 MPa).

Tvar a rozmery skúšobných tyčí sú na obr. 1. Aby bolo možné sledovať rozvoj pomerných deformácií a napätí v najzraniteľnejších prierezoch skúšaných tyčí, boli na nich umiestnené miniatúrne fóliové tenzometre a extenzometer v zostave podľa obr. 2. Priebežný osemkanálový záznam časových priebehov sa urobil so vzorkovacou frekvenciou 100 Hz. Zaznamenával sa referenčný signál (1. k), pôsobiaca sila (2. k), celkové relatívne premiestnenie (3. k), predĺženie na základni 23 mm, v ktorej sa nachádzal zvarový spoj (4. k), a pomerné deformácie v prechodových prierezoch (5. k, 6. k, 7. k, 8. k). Pri tyčiach s neopracovaným zvarom boli tenzometre umiestnené z bočných strán, v prípadoch s opracovaným zvarom boli umiestnené na čelných stranách skúšaných tyčí v štyroch prechodových prierezoch (obr.2).



Obr.1 Tvar a o rozmery skúšobných tyčí



Obr.2 Usporiadanie merania tyčí so zvarom počas skúšky: vľavo s neopracovaným, vpravo s opracovaným tupým zvarom

VÝSLEDKY SKÚŠOK

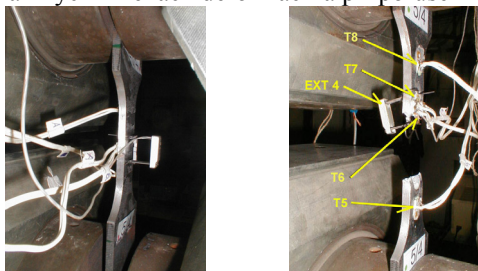
Priebežná analýza časových priebehov vychádzala zo získaných podrobných informácií o vývoji pomerných deformácií a napätí v priestore a čase. Prerozdelenie pomerných deformácií v skúšanej tyči závisí od kvality jej opracovania a od miest koncentrácií napätí blízko zvarových prierezov. Tyče s neopracovaným zvarom sa porušili na rozmedzí medzi zvarovým spojom a pôvodným materiálom tyče (obr.4). Tyče s opracovaným zvarom vykazovali dva druhy porušenia. Porušenie vzniklo buď na rozmedzí medzi stredovou zúženou časťou a rozširujúcou sa časťou, alebo v prechode medzi opracovaným tupým zvarom a pôvodným materiálom skúšanej tyče.

Dosiahnutý počet blokov počas únavových skúšok tyčí pri premennej amplitúde Tabuľka 1

Druh tupého zvaru a označenie skúšanej tyče	Počet zaťažovacích blokov			
	prvá zmena pomerných deformácií	začiatok plastizácie	porušenie roztrhnutím	pomer
	N_{b1}	N_{by}	N_{bf}	N_{by}/N_{bf}
1 – opracovaný – a	1089	2179	2339	0,932
2 – opracovaný – a	53	305	419	0,728
3 – opracovaný – a	-	4109	4662	0,881
5/4 – opracovaný – w	1448	3059	3909	0,783
05 – neopracovaný – w	-	2271	2749	0,826
12 – neopracovaný – w	2039	2279	2859	0,797
17 – neopracovaný – w	-	2358	2738	0,862

Poznámka: a – porušene mimo zvarového spoja, w – porušenie pri zvarovom spoji

Časové priebehy sledovaných veličín zachytávali dôležité štádiá nárastu deformácií. Na začiatku skúšok sa najväčší nárast prejavil v prechodových prierezoch medzi zvarom a základným materiálom, a to buď nad alebo pod zvarom. Tendencia nárastu deformácií postupne prešla do ustáleného stavu s malými skoro zanedbateľnými zmenami. Potom nárast deformácií dosiahol stav priebežnej plastizácie. Takto pokračoval až po roztrhnutie skúšanej tyče (obr.3 a obr.4). Počty blokov dosiahnuté pri významných zmenách deformácií a pri porušení sú uvedené v tab. 1.

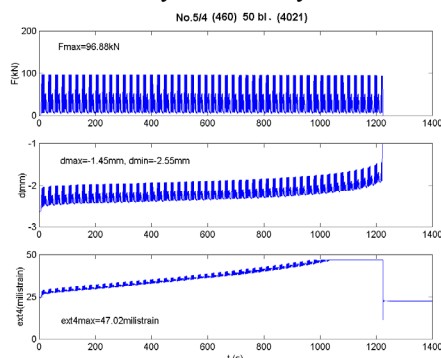


Obr.3 Pohľad na skúšku tyče 5/4 s opracovaným zvarom: vľavo začiatok trhliny, vpravo skúšaná tyč po roztrhnutí



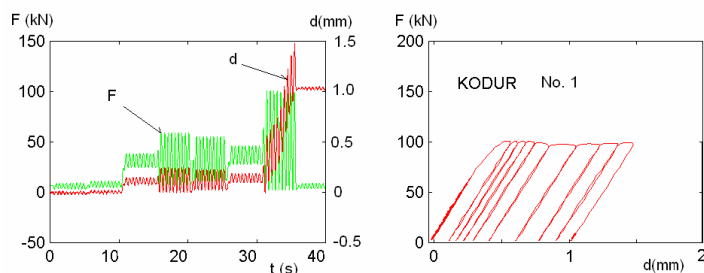
Obr.4 Pohľad na tyče 5, 12 a 17 s neopracovaným zvarom po ich únavovom porušení

Závěrečné štádium skúšky tyče 5/4 charakterizované časovými priebehmi meraných veličín až do porušenia je na obr.5. Vidieť tu výrazné zmeny v narastaní deformácií.



Obr.5 Časové priebehy sily F , výchylky medzi čel'ust'ami lisu d a pomernej deformácie podľa extenzometra $ext4$ ku koncu skúšky tyče 5/4, vrátane porušenia

Treba podčiarknuť, že v niektorých prípadoch opracovaných zvarov porušenie nastalo v iných miestach skúšanej tyče. V takých prípadoch prejav plastizácie v časových priebehoch meraných veličín nebol tak výrazný ako pri tyčoch 5/4, 05, 12 a 17. Vtedy indikáciu začiatku plastizácie bolo možné zachytiť do určitej miery z priebehov výchylky medzi čel'ust'ami lisu d (obr.6).



Obr. 6 Priebeh sily F a prírastku celkovej výchylky d ku koncu skúšky tyče 1

Obzvlášť pri mimoriadnych zaťaženiach často dochádza k prechodu pomerných deformácií a napätí do nelineárnej oblasti. V závislosti od časového priebehu zaťaženia, jeho frekvenčných zložiek a času, počas ktorého je skúšaná tyč namáhaná za medzou klzu, je možné uplatniť vyhodnotenie kumulatívnych napätí a pomerných deformácií až po porušenie. Podľa teórie malých pružnoplastických deformácií sa predpokladá, že pri plastizácii sú stavové rovnice riadené rýchlosťami pomerných deformácií a napätí. Taktó možno využiť veličiny založené na časových priebehoch rýchlostí na indikáciu začiatku a vývoja lokálnych nebezpečných zmien deformácií a napätí v čase, pozri [12,7].

EXPERIMENT A NORMOVÉ ÚNAVOVÉ KRIVKY

Výsledky experimentálneho výskumu únavy pri konštantnej amplitúde zaťaženia sa analyzovali porovnaním s normovými únavovými krivkami [9,6,7]. Závislosti zodpovedajúce experimentu $\Delta\sigma - N$ sa stanovili lineárnou regresnou analýzou pre 50 % pravdepodobnosť. Príslušná únavová pevnosť a rozkmit napätia $\Delta\sigma_C$ pre $N_C = 2 \times 10^6$ kmitov a závislosť $\Delta\sigma - N$ pre 95 % pravdepodobnosť sa stanovili s použitím prílohy L normy STN 73 1401:1998.

Výsledky únavových skúšok s konštantnou hodnotou $\Delta\sigma$ sú v tab. 2. Všetky skúšky (okrem dvoch výnimiek) končili únavovým porušením skúšaných tyčí. Ak porušenie nenastalo pred 10 miliónmi kmitov, skúška sa prerušila a rozkmit $\Delta\sigma$ sa zväčšil. Tieto skúšky sa hodnotili s uvažovaním celkového počtu kmitov N a modifikovaného $\Delta\sigma = (\Delta\sigma_1 \cdot N_1 + \Delta\sigma_2 \cdot N_2) / N$, kde $\Delta\sigma_i$ a N_i sú zodpovedajúce rozkmity napätí a počty kmitov pre $i = 1, 2$.

Experimentálne závislosti $\Delta\sigma - N$ a zodpovedajúce normové únavové krivky sú na obr.7 a obr.8. Výsledky týchto skúšok sú vyznačené plnými značkami typu „diamant“. Uvedené grafy možno doplniť výsledkami skúšok s premennou amplitúdou zaťažovania pri uvažovaní prevládajúceho účinku maximálnej amplitúdy zaťaženia. Výsledky týchto skúšok sú vyznačené hviezdikami (*). Z obrázkov možno vidieť prijateľný súhlas s odporúčanými normovými únavovými krivkami [12].

Výsledky základných únavových skúšok s konštantnou amplitúdou,
pozri napr. [3,6,7]

Tabuľka 2

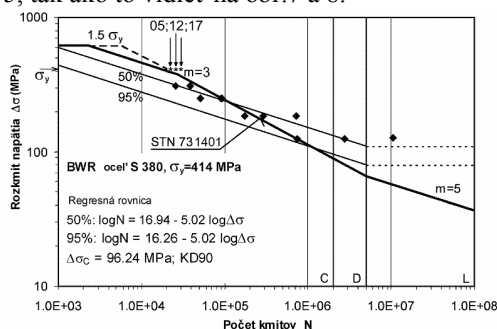
Tyč	t (mm)	b (mm)	$\sigma_D \leftrightarrow \sigma_H$	$\Delta\sigma$ (MPa)	N (tisíce)	Porušenie
NOW 1	8,06	30,10	(0,20 \leftrightarrow 0,95) σ_y	310,5	212,5	11
NOW 2	7,88	29,82	(0,20 \leftrightarrow 0,95) σ_y	310,5	249,3	11
NOW 3	8,02	30,10	(0,20 \leftrightarrow 0,95) σ_y	310,5	214,9	11
NOW 4	7,96	30,46	(0,20 \leftrightarrow 0,80) σ_y	248,4	2 125,4	11
NOW 5	8,00	30,34	(0,20 \leftrightarrow 0,80) σ_y	248,4	1 052,0	11
NOW 6	8,10	30,60	(0,20 \leftrightarrow 0,80) σ_y	248,4	-	4
NOW 7	8,10	30,20	(0,20 \leftrightarrow 0,65) σ_y (0,20 \leftrightarrow 0,80) σ_y	190,8 ¹⁾	10 000,0 774,1	12
NOW 8	8,00	30,00	(0,20 \leftrightarrow 0,65) σ_y (0,20 \leftrightarrow 0,80) σ_y	200,9 ¹⁾	10 000,0 3 060,0	12 ²⁾
NOW 9	7,90	29,70	(0,20 \leftrightarrow 0,65) σ_y (0,20 \leftrightarrow 0,80) σ_y	213,9 ¹⁾	10 000,0 7 984,4	12 ²⁾
BWM 1	8,10	30,20	(0,20 \leftrightarrow 0,95) σ_y	310,5	185,5	21
BWM 2	7,84	30,24	(0,20 \leftrightarrow 0,95) σ_y	310,5	415,3	22
BWM 3	8,00	30,02	(0,20 \leftrightarrow 0,95) σ_y	310,5	141,2	21
BWM 4	7,86	30,42	(0,20 \leftrightarrow 0,80) σ_y	248,4	221,6	2
BWM 5	7,90	30,00	(0,20 \leftrightarrow 0,80) σ_y	248,4	1 246,8	11
BWM 6	7,92	30,20	(0,20 \leftrightarrow 0,80) σ_y	248,4	197,9	22
BWM 7	7,70	30,38	(0,20 \leftrightarrow 0,80) σ_y	248,4	469,2	22
BWM 8	8,00	30,50	(0,20 \leftrightarrow 0,725) σ_y (0,20 \leftrightarrow 0,80) σ_y	230,8	10 000,0 7 679,4	22 ²⁾
BWM 9	8,00	30,30	(0,20 \leftrightarrow 0,725) σ_y (0,20 \leftrightarrow 0,80) σ_y	219,6 ¹⁾	10 000,0 788,2	22
BWM 10	8,10	30,20	(0,20 \leftrightarrow 0,725) σ_y (0,20 \leftrightarrow 0,80) σ_y	231,0	10 000,0 7 878,2	22 ²⁾
BWM 11	8,30	30,45	(0,20 \leftrightarrow 0,65) σ_y (0,20 \leftrightarrow 0,80) σ_y	187,2 ¹⁾	10 000,0 146,4	22
BWM 12	7,85	30,40	(0,20 \leftrightarrow 0,65) σ_y	186,3	701,3	21

Tabuľka 2 pokračovanie

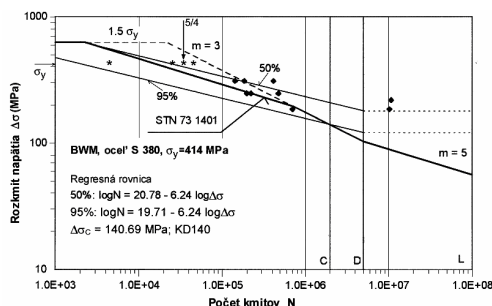
Tyč	t (mm)	b (mm)	$\sigma_D \leftrightarrow \sigma_H$	$\Delta\sigma$ (MPa)	N (tisíce)	Porušenie
BWM 13	7,70	30,20	(0,20 \leftrightarrow 0,65) σ_y (0,20 \leftrightarrow 0,80) σ_y	194,6	10 000,0 1 552,1	12 ²⁾
BWM 14	7,80	30,50	(0,20 \leftrightarrow 0,65) σ_y	186,3	7 500,0	3
BWR 1	8,20	29,80	(0,20 \leftrightarrow 0,95) σ_y	310,5	25,8	22
BWR 2	7,90	29,90	(0,20 \leftrightarrow 0,95) σ_y	310,5	-	4
BWR 3	7,95	30,20	(0,20 \leftrightarrow 0,95) σ_y	310,5	38,4	22
BWR 4	8,04	30,10	(0,20 \leftrightarrow 0,80) σ_y	248,4	91,9	22
BWR 5	7,80	29,90	(0,20 \leftrightarrow 0,80) σ_y	248,4	50,8	22
BWR 6	7,90	29,92	(0,20 \leftrightarrow 0,80) σ_y	248,4	89,3	22
BWR 7	8,01	30,20	(0,20 \leftrightarrow 0,65) σ_y	186,3	291,0	21
BWR 8	7,95	30,10	(0,20 \leftrightarrow 0,65) σ_y	186,3	716,4	21
BWR 9	7,90	30,03	(0,20 \leftrightarrow 0,65) σ_y	186,3	173,5	21
BWR 10	8,10	30,15	(0,20 \leftrightarrow 0,50) σ_y	124,2	2 773,4	21
BWR 11	8,00	29,90	(0,20 \leftrightarrow 0,50) σ_y	124,2	734,5	21
BWR 12	7,85	30,10	(0,20 \leftrightarrow 0,50) σ_y	128,1	10 000,0	21

Spôsob porušenia je ďalšou dôležitou charakteristikou, získanou zo skúšok. Je uvedený v poslednom stĺpci tab. 2 s takýmto označením: 1 – porušenie základného materiálu, 2 – porušenie pri zvare, 3 – neukončená skúška, 4 – nekorektná skúška, 11 – porušenie základného materiálu, začiatok trhliny na okraji skúšanej tyče, 12 – porušenie základného materiálu, začiatok trhliny na povrchu skúšanej tyče, 21 – porušenie pri zvare, začiatok trhliny na okraji skúšanej tyče, 22 – porušenie pri zvare, začiatok trhliny na povrchu skúšanej tyče. Príklady plôch trhlín po porušení sú na obr.4, iné príklady sú napr. v [6,7].

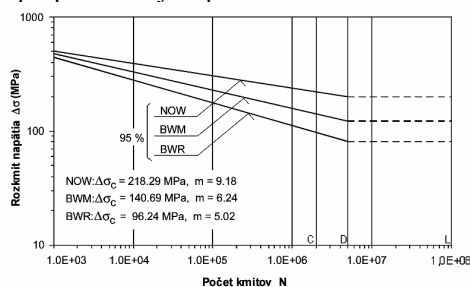
Porovnanie experimentálnych závislostí pre jednotlivé skupiny skúšobných tyčí je na obr. 9. V dôsledku rozdielnych vrubových účinkov sú rozdielne aj hodnoty rozkmitov $\Delta\sigma_C$ a sklony m zodpovedajúce jednotlivým skupinám únavových kriviek. Zväčšením vrubových účinkov prostredníctvom priečného tupého opracovaného ako aj neopracovaného zvaru sa zodpovedajúce hodnoty rozkmitov napätí $\Delta\sigma_C$, ale aj sklony m zmenšili. Konštantné sklony normových únavových kriviek ($m = 3$ a 5), pozri tiež [3,4,6,13,17,18], zrejme nezodpovedajú skutočnosti. Zákonite sa ukazuje potreba spresnenia tvarov únavových kriviek cez limitovanie skosením priamkou s $m = 5$, tak ako to vidieť na obr.7 a 8.



Obr. 7 Výsledky únavových skúšok tyčí s neopracovaným tupým zvarom (BWR). Hviezdičky zodpovedajú skúškam pri premennej amplitúde s rozkmitom $\Delta\sigma$ čiastočne za medzou klzu



Obr. 8 Výsledky únavových skúšok tyčí s opracovaným tupým zvarom (BWM). Hviezdičky zodpovedajú skúškam pri premennej amplitúde s $\Delta\sigma$ čiastočne za medzou klzu



Obr. 9 Porovnanie experimentálnych únavových kriviek. (NOW – tyče bez zvaru, BWM – tyče s opracovaným tupým zvarom, BWR – tyče s neopracovaným tupým zvarom)

ZÁVER

Prezentované výsledky výskumu a závery vyplývajúce z ich celkového hodnotenia potvrdzujú dobré únavové vlastnosti vyšetrovanej konštrukčnej ocele typu S 380M (KODUR E 380, QStE 380TM). Z hľadiska únavovej pevnosti plne vyhovuje normovým požiadavkám na náročné stavebné konštrukcie a technologické zariadenia. Tupými zvarovými spojmi sa únavové vlastnosti vyšetrovanej konštrukčnej ocele vo všeobecnosti zhoršili. Významne sa pritom prejavila povrchová úprava a kvalita zvarov. Pri zvaroch opracovaných sa únavová pevnosť ocele znížila v súlade s normovou kategorizáciou príslušného konštrukčného detailu. Pritom niektoré skúšobné tyče sa porušili mimo zvaru. Výsledky opísaných skúšok dobre zapadli do súboru výsledkov prislúchajúcich skúšobných tyčí bez zvaru. Pri zvaroch neopracovaných sa únavová pevnosť ocele znížila významnejšie ako to vyplýva z normovej kategorizácie konštrukčného detailu.

Získané experimentálne závislosti $\Delta\sigma - N$ ako i zodpovedajúce normové únavové krivky bolo možné tiež použiť pri vyhodnocovaní výsledkov únavových skúšok pri premennom blokovom zaťažovaní. Veľmi dobrá húževnatosť základného materiálu a dobre opracovaných zvarových spojov umožňujú efektívne použiť túto oceľ aj v konštrukciách vystavených mimoriadnym zaťaženiám. Pri krátkodobých, zriedkavo sa vyskytujúcich extrémnych zaťaženiach možno akceptovať krátkodobé namáhanie za medzou klzu, avšak za predpokladu, že použitý materiál preukazuje primeranú ťažnosť v exponovaných prierezoch.

Výsledky uskutočnených únavových skúšok potvrdili správnosť a dôležitosť ohraničenia platnosti jednotlivých normových kriviek, ktoré sa uplatnilo v slovenskej norme pre navrhovanie oceľových konštrukcií STN 73 1401: 1998. Ukazuje sa, že závislosti navrhnuté v EN 1993-1-9: 2005 pre únavové krivky a klasifikácie detailov spojov nie sú dostatočne bezpečné. Preto je potrebné v slovenskej národnej prílohe k EN 1993-1-9 uplatniť ohraničenie platnosti únavových kriviek pre

konštrukčné detaily s menšími vrubovými účinkami a s vyššou únavovou pevnosťou rovnako ako je to urobené v STN 73 1401: 1998.

Táto štúdia vychádza z výskumu, ktorý bol podporovaný MŠ SR a SAV v rámci projektov VEGA 2/4078/24, a VEGA 1/1137/04. Za finančnú podporu úprimne ďakujeme.

LITERATÚRA

- [1] BENČAT, J. a kol.: *Správa o výsledkoch dynamickej zaťažovacej skúšky železničného ocelového mosta v Trenčíne*. Žilina: SvF ŽU, 1995
- [2] BÍLY, M., IVANOVA, V. S., TERENTEVA, V. F. *Pevnosť súčastí a materiálov pri premennom zaťažení*. Bratislava: VEDA, 1976
- [3] JUHÁS, P.: *Únavová životnosť ocelových konštrukcií*. Stavebnícky časopis, November 1991, vol. 39, no. 11, s. 599-617
- [4] JUHÁS, P., CHLADNÝ, E., MRÁZIK, A., KÁLNA, K., VOŘÍŠEK, V., BALÁŽ, I.: *Navrhovanie ocelových konštrukcií. Komentár k STN 73 1401:1998*. Bratislava: SÚTN, 2001. 260 s. ISBN 80-88971-06-3.
- [5] JUHÁS, P.: *Fatigue failure mechanism of steel elements*. In Extending of Lifespan of Structures. IABSE Symposium, San Francisco, 1995. p. 1085-1090.
- [6] JUHÁS, P., JUHÁSOVÁ, E., ROTH, O.: *Fatigue strength of structural steel S 380 and its degradation due to effects of transverse butt welds*. Acta Metallurgica Slovaca, 2001, vol. 7, no. 1, p. 44-54.
- [7] JUHÁS, P., JUHÁSOVÁ, E.: *The effects of notches and variable loading on the fatigue strength and life time of structural steels*. In Medzinárodná konferencia Progresívne kovové materiály a ich spájanie, Bratislava, 25. - 27. októbra 2004. Bratislava: VÚZ, 2004, p. 1-6.
- [8] JUHÁS, P., JUHÁSOVÁ, E., ROTH, O.: *Vplyv konštrukčných vrubov na únavovú pevnosť a životnosť konštrukčných ocelí*. In Zborník z 20. Českej a slovenskej medzinárodnej konferencie Ocelové konštrukcie a mosty 2003, Praha, 2003. Praha: ČVUT, 2003, s. 157-162.
- [9] JUHÁS, P., ROTH, O.: *Experimentálne overovanie únavovej pevnosti a životnosti konštrukčných ocelí a prvkov*. Inžinierske stavby, 2002, vol. 50, no.1, s. 20-24.
- [10] JUHÁSOVÁ, E.: *Induced Vibrations from the Transport on Bratislava SNP Bridge*. In Traffic Effects on Structures and Environment, Jasná 1991. Žilina: DT 1991, vol. 2, p. 285-292.
- [11] JUHÁSOVÁ, E.: *The properties of cyclic loading in relation to fatigue life of steel structures*. Journal of Structural Engineering, CSIR India, 1999, vol. 26, no.1, p. 75-80.
- [12] JUHÁSOVÁ, E., VRABEC, M. *Strain-time changes in butt welds subjected to variable loading*. In 20th Conference on Fatigue and Fracture Mechanics, Bydgoszcz, 27-30, April 2004. Bydgoszcz: PAN, c2004, p. 141-146.
- [13] KÁLNA, K.: *Navrhovanie ocelových konštrukcií podľa medzných stavov porušenia – Nedostatky noriem EN 1993-1-9 a EN 1993-1-10. Zváranie – Svařování*, 2005, vol. 54, no. 11-12, p. 304-311. ISSN 0044-5525.
- [14] KAROLCZUK, A., MACHA, E.: *Critical Planes in Multiaxial Fatigue of Materials*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2005. 194 p. ISBN 3-18-329818-X.
- [15] TREBUŇA, F., BIGOŠ, P.: *Intenzifikácia technickej spôsobilosti ťažkých nosných konštrukcií*. Košice: Viena, ETOL, 1998. 345 s.
- [16] TREBUŇA, F. a kol.: *Technická správa o meraniach na nosníkoch žeriavových dráh počas prevádzky nových žeriavov*. Košice: Sjf TU, 1995
- [17] EN 1993-1-9: 2005 *Design of Steel Structures. Part 1.9: Fatigue*. Brussels: CEN, 2005.
- [18] STN 73 1401: 1998 *Navrhovanie ocelových konštrukcií*. Bratislava: ÚNMS SR, 1998.