

VPLYV VYBRANÝCH FAKTOROV NA ÚNAVOVÉ VLASTNOSTI OCEĽOVÝCH PLECHOV

THE INFLUENCE OF SELECTED FACTORS ON FATIGUE PROPERTIES OF STEEL SHEETS

Marián BURŠÁK, Mária MIHALÍKOVÁ¹

Abstrakt

Príspevok analyzuje vplyv rovnania za studena, tryskania a atmosférickej korózie na únavové vlastnosti pásových ocelí v plochom ohybe. Ak jednostranným ohybom budú namáhané pásy zo strany na ktorej vznikli pri rovaní zvyškové tlakové napätia, tak únavové charakteristiky sú vyššie ako pri namáhaní z opačnej strany.

Tryskaním povrchu oceľového plechu akosti 11 375.1 sa zvýši jeho medza únavy v súmernom plochom ohybe cca o 11%.

V dôsledku atmosférickej korózie oceľových plechov vyrobených z nízkoaligovanej ocele so zvýšenou odolnosťou voči atmosférickej korózii s časom expozície do dvoch rokov výrazne a následne (do 5 rokov) miernejšie klesá medza únavy v súmernom plochom ohybe (až o 36%).

Kľúčové slová: Oceľové plechy, zvyškové napätia, tryskanie, atmosférická korózia, medza únavy.

Abstract

The paper analyses the influence of cold levelling, blasting and atmospheric corrosion on fatigue properties of steel sheets in flat bending. When one-sided bending will be applied on the sheets from the side where arose residual compressive stresses by the levelling, the fatigue characteristics will be the higher comparing to the opposite side.

By blasting a sheet made of steel grade 11 375.1 the fatigue limit under symmetrical flat bending increases by about 11 %.

The fatigue limit in flat bending of low alloyed steels resistant to atmospheric corrosion is decreases during 5 years of exploitation by about 36 %.

Key words: steel sheets, residual stresses, blasting, atmospheric corrosion, fatigue limit.

ÚVOD

Technológia spracovania produktu má obvykle za dôsledok zmenu vlastností dané pôvodnou štruktúrnou stavbou ocele. Pri rovaní pásov za studena so zvitkov vznikajú vo vrchnej časti zvitku ťahové a v spodnej časti tlakové napätia, ktoré výrazne ovplyvňujú iniciáciu únavového poškodenia a aj životnosť výrobku [1,2]. Pri povrchovej úprave oceľového pásu tryskaním taktiež vznikajú v povrchovej vrstve tlakové napätia a pod touto vrstvou ťahové, pričom dochádza k deformačnému spevneniu povrchovej vrstvy a zmene drsnosti povrchu. Niektoré

¹ prof. Ing. Marián BURŠÁK, PhD., Ing. Mária MIHALÍKOVÁ, PhD., KNoM, HF, TU v Košiciach,
marian.bursak@tuke.sk

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

uvedené zmeny stavu spomaľujú procesy únavy (tlakové pnutia, deformačné spevnenie) a iné ich urýchľujú (zvýšená drsnosť, ťahové napätia pod deformačne spevnenou vrstvou) [3,4]. Z uvedeného vyplýva, že z hľadiska únavovej životnosti je potrebné pri technológii výroby produktov využiť ich priaznivý vplyv.

V dôsledku korózie dochádza k degradácii mechanických vlastností ocele. V podmienkach atmosférickej korózie je degradácia mechanických vlastností vyvolaná predovšetkým úbytkom hmotnosti (hrúbky) a zmenou reliéfu povrchu (zvýšením drsnosti). Z literárnych poznatkov vyplýva, že uvedené zmeny sú najintenzívnejšie na počiatku životnosti a s dobou expozície sa intenzita degradácie znižuje a u ocelí so zvýšenou odolnosťou voči korózii sa jej prírastok blíži k nule [5,6,7]. Úbytok hmotnosti znižuje najmä výpočtové hodnoty pevnostných vlastností a zmena drsnosti povrchu plastické vlastnosti, ale hlavne únavovú životnosť [7,8,9]. Únavová životnosť povrchovo poškodených výrobkov je veľmi citlivá na spôsob premenlivého zaťažovania [10]. Pre ploché výrobky je najčastejší spôsob premenlivého namáhania plochý ohyb, pri ktorom povrchové nerovnosti majú významnú úlohu, stávajú sa ohniskami únavového porušenia.

Cieľom príspevku je analyzovať vplyv rovnania, tryskania a atmosférickej korózie na únavové vlastnosti pásových ocelí v plochom ohybe ako aj na využitie týchto poznatkov v technickej praxi.

EXPERIMENTY A ICH ANALÝZA

Vplyv rovnania za studena zvitkov na únavové vlastnosti bol sledovaný na oceľových pásoch hrúbky 8 mm vyrobených z ocele E 700TS a vplyv tryskania na oceľových pásoch hrúbky 3 mm vyrobených z ocele 11 375.1. Experimenty vplyvu atmosférickej korózie na únavové vlastnosti boli realizované na pásoch hrúbky 2,16 a 4,46 mm vyrobených z nízkolegovanej ocele so zvýšenou odolnosťou voči atmosférickej korózii akosti KONOX 345 T.

Mikroštruktúra pásu z mikrolegovanej ocele E 700TS (C = 0,08%, Mn = 1,80%, Si = 0,41%, Al = 0,016%, Mo = 0,16%, Nb = 0,46%, Ti = 0,16%, V = 0,012%, Zr = 0,057%) po riadenom valcovaní je nepolyedrická tvorená acikulárnym feritom, bainitom a precipitátmi mikrolegujúcich prvkov. Štruktúra oceľových pásu vyrobeného z ocele 11 375.1 bola feriticko-perlitická s veľkosťou feritického zrna cca 0.012 mm odpovedajúca obsahu uhlíka 0,15%.

Mikroštruktúra pásov z ocele KONOX 345 T (C = 0,1%, Mn = 0,3%, Si = 0,3%, Cu = 0,5%, Cr = 0,8%, Ni = 0,5%) je jemnozrná feriticko-perlitická. Základné mechanické vlastnosti skúšaných plechov sú uvedené v tabuľke 1.

Základné mechanické vlastnosti skúšaných oceľových pásov

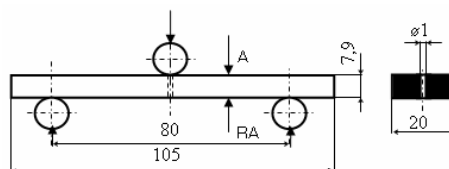
Tabuľka 1

Oceľ	Hrúbka [mm]	R _e [MPa]	R _m [MPa]	A ₅ [%]
E 700TS	8	703	832	20,4
11 375.1	3	208	400	32,0
KONOX 345 T	2,16	395	497	39,0
	4,46	418	513	35,0

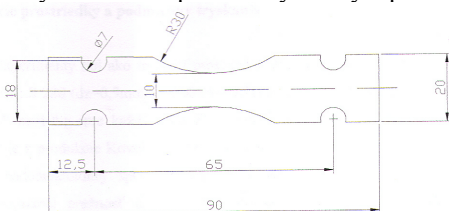
Tenzometrickou metódou merania zvyškových napätí boli v hĺbke 0,5 mm od vrchnej časti vyrovnaného pásu namerané napätia cca 120 MPa a v hĺbke 4 mm cca 70 MPa, [11]. Z pásov boli odobraté vo smere valcovania skúšobné vzorky a vyrobené skúšobné tyče s vrubom pre únavové skúšky (obr.1). Vplyv zvyškových napätí sme skúšali jednostranným ohybom s koeficientom nesúmernosti R = 0,1 a to na iniciáciu únavovej trhliny a medzi únavy.

Z pásov vyrobených z ocele 11 375.1 boli vo smere valcovania odobraté a vyrobené skúšobné tyče pre skúšky na únavu v ohybe (obr.2). Časť týchto tyčí bola otryskaná zo všetkých

strán oceľovým granulátom veľkosti 0,9 mm s uhlom dopadu 75° a tlakom 0,5 MPa. Výsledkom tryskania bolo povrchové deformačné spevnenie do hĺbky 0,05 mm pričom mikrotvrdosť tesne pod povrchom (0,01 mm) sa zvýšila oproti tvrdosti základného materiálu o 45 HV 0,01. Vzhľadom na hrúbku deformačne spevnenej vrstvy pre stanovenie zvyškového napätia v tejto vrstve bolo použitá rtg. difrakčná metóda. Touto metódou bolo zistené, že vzorka pred tryskaním mala na povrchu ťahové napätie (cca 79 MPa) a po otryskaní zvyškové tlakové napätie až 293 MPa. V dôsledku tryskania došlo k zvýšeniu drsnosti povrchu tyčí. Brúsené tyče mali strednú aritmetickú odchýlku $R_a = 0,27 \mu\text{m}$, a najvyššiu výšku profilu $R_z = 1,56 \mu\text{m}$, a otryskané $R_a = 9 \mu\text{m}$, $R_z = 45 \mu\text{m}$. Takto pripravené skúšobné tyče boli skúšané na únavu v plochom ohybe pri súmernom cykle ($R = -1$).



Obr.1 Skúšobná tyč s vrubom pre skúšky únavy z pásu ocele E 700TS



Obr.2 Skúšobná tyč pre skúšky únavy z pásu ocele 11 375.1 a KONOX 345 T

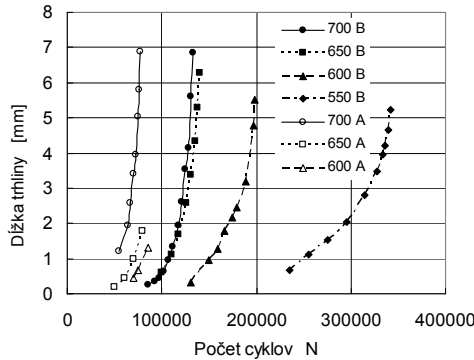
Z pásov ocele KONOX 345 T boli vyrobené tyče pre únavové skúšky v plochom ohybe (obr.2). Časť týchto tyčí bola vystavená pôsobeniu atmosférickej korózie po dobu do 5 rokov. Na takto pripravených tyčiach bola meraná drsnosť povrchu. Vo východnom stave bola nameraná stredná aritmetická odchýlka $R_a = 1,1 \mu\text{m}$ a najvyššia výška profilu $R_z = 6,2 \mu\text{m}$, po 2 rokoch atmosférickej korózie bola nameraná hodnota $R_a = 8,5 \mu\text{m}$ a $R_z = 68,5 \mu\text{m}$ a po 5 rokoch atmosférickej korózie bola $R_a = 17,7 \mu\text{m}$ a $R_z = 80 \mu\text{m}$. Skúškou na únavu v plochom ohybe ($R = -1$) pri frekvencii 35 Hz bol sledovaný vplyv doby expozície na tvar Wöhlerových kriviek. Medza únavy bola stanovená pre počet cyklov do porušenia 10^7 .

Na obr.3 sú graficky znázornené výsledky sledovania rastu únavovej trhliny pri rôznych hladinách horných napätí pri jednostrannom plochom ohybe. Ak jednostranným ohybom bola zaťažovaná tyč zo strany A, kde sú zvyškové ťahové napätia, tak doba iniciácie a rastu únavovej trhliny bola pri danom hornom napätí podstatne nižšia ako v prípade ak tyč bola zaťažovaná zo strany B kde sú tlakové zvyškové napätia. Napr. pri napätí 700 MPa trhlina dĺžky 1 mm vznikne pri namáhaní na strane A po 54 000 cykloch a na strane B po 107 000 cykloch. Z uvedeného vyplýva nepriaznivý vplyv zvyškových ťahových napätí na iniciáciu únavových trhlín.

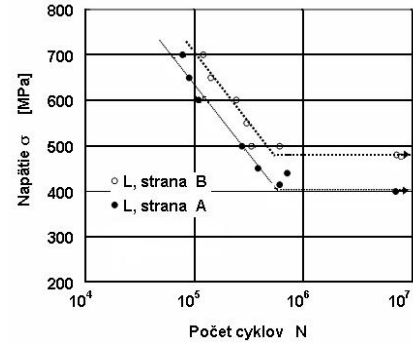
Podobne ako na iniciáciu únavovej trhliny zvyškové napätia ovplyvňujú aj hodnoty medze únavy. Na obr.4 sú prezentované Wöhlerové krivky získané na vrubovaných tyčiach pri jednostrannom ohybe zaťažované zo strany A a strany B. Počet cyklov do porušenia v oblasti šikmej vetvy krivky ako aj hodnota medze únavy v ohybe σ_{C_0} pre $7 \cdot 10^6$ cyklov sú nižšie v prípade zaťažovania tyčí zo strany A. Uvedené skutočnosti je vhodné využiť v praxi, napr. pri výrobe plochých výrobkov a ich predpokladanom namáhaní (kontajnery, vozidlá a pod.).

Experimentálne výsledky vplyvu otryskanej vrstvy na únavové vlastnosti skúšaného oceľového plechu sú graficky v podobe Wöhlerových kriviek znázornené na obr.5. Výsledky závislosti $\sigma - N$ boli spracované nelineárnou regresiou pri ktorej sa zohľadňujú aj výsledky

neporušených tyčí [12]. Medza únavy otryskaných tyčí ($\sigma_{Co} = \pm 193,5 \pm 2,2$ MPa) a teoretická medza únavy pri nekonečnom počte cyklov ($\sigma_{\infty} = \pm 190 \pm 3,5$ MPa) a brúsených tyčí $\sigma_{Co} = \pm 175,6 \pm 3,9$ MPa a $\sigma_{\infty} = \pm 171 \pm 6,0$ MPa. Medza únavy otryskaných je vyššia oproti medze únavy brúsených tyčí o 11% a to obecně platí aj v oblasti časovej medze únavy v ohybe. Z uvedeného vyplýva jednoznačný pozitívny vplyv tryskania na únavové vlastnosti, ktorý je výsledkom deformačného spevnenia a tlakových zvyškových napätí v otryskanej vrstve.

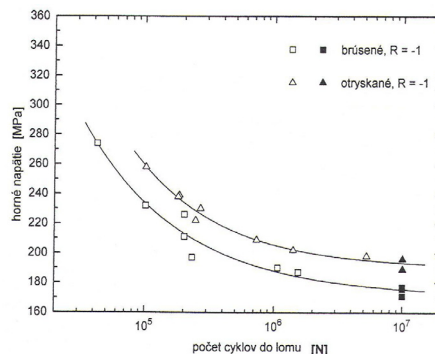


Obr.3 Závislosť rastu únavovej trhliny ocele E700 TS pri rôznych hladinách napätia; A – zvyškové ťahové napätia, B – zvyškové tlakové napätia



Obr.4 Wöhlerové krivky vrubovaných tyčí ocele E700 TS v jednostrannom ohybe (R= 0,1); A – zvyškové ťahové napätia, B – zvyškové tlakové napätia

Z analýzy rozloženia zvyškových napätí v otryskanej vrstve vyplývajú aj určité riziká pozitívneho vplyvu tryskania na únavové vlastnosti. Pod deformačne spevnenou vrstvou vznikajú zvyškové ťahové napätia, ktoré negatívne vplyvajú na únavové vlastnosti. Nepriaznivý vplyv má aj výrazne zvýšená drsnosť povrchu. V prípade preťaženia stráca sa priaznivý účinok tryskania a zrejme sa rozširuje aj Frenchové poruchové pásmo otryskaných tyčí a v dôsledku toho môže dôjsť k únavovému lomu aj pri napätí nižšom ako bola experimentálne stanovená σ_{Co} otryskaných tyčí.

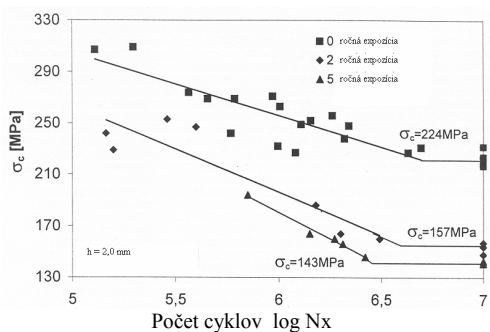


Obr.5 Wöhlerové krivky ocele 11 375.1 v plochom ohybe (R = -1)

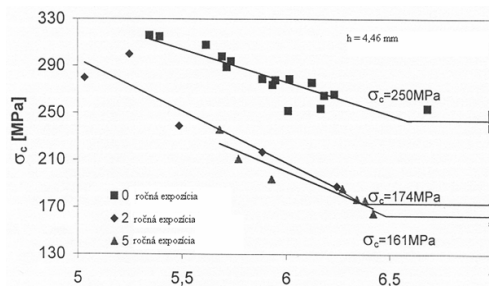
Výsledky skúšok na únavu v plochom ohybe (R = -1) oceľových pásov vyrobených z ocele KONOX 345 T sú v grafickej podobe spracované na obr.6 a obr.7. Pokles medze únavy v plochom ohybe po expozícii atmosférickej korózie oproti medze únavy v ohybe plechov vo východiskovom stave znázorňuje obr.8.

Z analýzy výsledkov skúšok na únavu v plochom ohybe pri súmernom cykle vyplýva, že do doby expozície atmosférickej korózie 2 roky sa medza únavy skúšaných plechov výrazne znižuje a po prekročení tejto doby expozície dochádza k miernemu poklesu, resp. ustáleniu

hodnoty medze únavy. Hrúbka plechu ako to vyplýva z experimentov (obr.8) prakticky neovplyvňuje pokles σ_{Co} v závislosti od doby atmosférickej korózie.

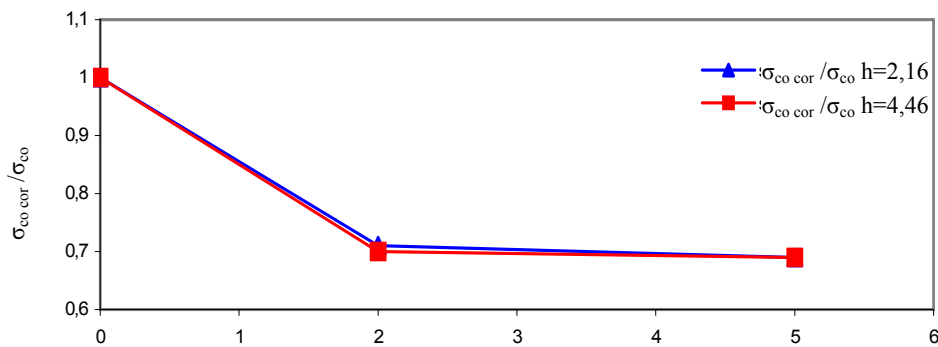


Obr.6 Wöhlerové krivky ocele KONOX 345 T pásu hrúbky 2,16 mm



Obr.7 Wöhlerové krivky ocele KONOX 345 T pásu hrúbky 4,46 mm

Z experimentálnych výsledkov a literárnych poznatkov vyplýva, že v podmienkach premenlivého zaťaženia rozhodujúcim faktorom degradácie vlastností vplyvom atmosférickej korózie je drsnosť povrchu, ktorá sa výrazne zvyšuje v prvých dvoch rokoch expozície a je nezávislá od hrúbky plechu. Zníženie medze únavy skúšaných plechov po dvoch rokoch expozície o 30%, resp. po 5 rokoch o 36% je výrazné. Hmotnostný úbytok z praktického hľadiska na zníženie medze únavy je zanedbateľný. V práci [7] sa uvádza, že hmotnostný úbytok po 5 rokoch expozície sa podieľal na znížení medze únavy len 4%.



Obr.8 Vplyv doby expozície atmosférickej korózie na relatívny pokles medze únavy v ohybe $\sigma_{CCOR}/\sigma_{Co}$

Z uvedeného vyplýva, že riešenie vplyvu atmosférickej korózie na únavovú životnosť prídavkom k hrúbke plechu je málo účinné. Riešenie spočíva v znížení drsnosti povrchu plechu (plošného výrobku) najmä jeho hodnoty R_y . Z hľadiska materiálového riešenia výrobku to znamená voliť takú akosť ocelového plechu, ktorý by zaručoval vznik rovnomernej súvislej vrstvy korózných spodín. Túto podmienku do určitej miery splňujú aj nízkoalegované ocele so zvýšenou odolnosťou voči atmosférickej korózii a teda aj skúšaná ocel KONOX 345 T. V dôsledku ich komplexného legovania v podmienkach atmosférickej korózie za dva až tri roky sa vytvorí ochranná vrstva ktorá prakticky zastaví korózný proces. V práci [7] sa porovnáva degradácia medze únavy v ťahu pri miznúcim cykle ($R = 0$) ocele so zvýšenou odolnosťou voči atmosférickej korózii 15 127.1 a nelegovanej ocele 11523.1. Po 5 rokoch expozície poklesla medza únavy pre počet cyklov 10^7 ocele 15 127.1 o 34% a ocele 11523.1 o 40%. V podmienkach plochého ohyb sa tento rozdiel ešte zväčší.

ZÁVER

Príspevok analyzuje vplyv vybraných faktorov na únavové vlastnosti komerčne vyrábaných oceľových pásov. Po rovinaní zvitku hrúbky 8 mm deformáciou za studena vyrobeného z ocele akosti E 700TS vznikajú na jednej strane pásu ťahové a na druhej strane tlakové zvyškové napätia. Tieto napätia vplývajú na únavový proces tak, že na strane zvyškových ťahových napätí pri jednostrannom ohybe ($R = 0,1$) iniciácia únavovej trhliny začína pri podstatne nižšom počte cyklov a medza únavy je tiež nižšia ako v prípade ak jednostranný ohyb je realizovaný zo strany kde sú zvyškové napätia tlakové.

V dôsledku tryskania oceľového pásu hrúbky 3 mm akosti 11 375.1 dochádza k deformačnému spevneniu povrchovej vrstvy hrúbky cca 0,05 mm, vzniku zvyškových tlakových napätí, ale aj ku zvýšeniu drsnosti povrchu. Medza únavy v súmernom ohybe pre počet cyklov 10^7 (σ_{Co}) v dôsledku tryskania je vyššia (cca o 11%) oproti σ_{Co} brúsených povrchov.

Atmosférická korózia výrazne znižuje medzu únavy v plochom ohybe ($R=-1$) ocele KONOX 345 T najmä v prvých dvoch rokoch (cca o 30%). Potom sa pokles medze únavy s dobou expozície spomalí (po 5 rokoch pokles cca 36%) až sa ustáli. Pokles medze únavy v plochom ohybe s dobou expozície atmosférickej korózie je porovnateľný s priebehom najvyššej výšky profilu drsnosti R_y . Rozhodujúcim degradačným faktorom je teda drsnosť povrchu plechu a hrúbka plechu len nepatrne vplýva na zníženie medze únavy.

Prezentované výsledky majú poslúžiť praxi pri návrhu technológie výroby plošných výrobkov (orientácia pásu vzhľadom k spôsobu namáhania) a stanovení únavovej životnosti deformačne spevnených produktov. Použitie ocelí so zvýšenou odolnosťou voči atmosférickej korózii pre produkty s dlhodobou životnosťou má vysoký ekonomický prínos z titulu nákladov na povrchovú ochranu a jej obnovu. Taktiež vyššie mechanické vlastnosti týchto ocelí umožňujú znižovať hmotnosť produktu.

LITERATÚRA

- [1] MACKINNON, J.A., POOK, L.P.: *Exprimental techniques*, september, 1987, 15
- [2] PEŠEK, L.: *Kovine, Zlitine*, Technologije, 3, 1996, No 3-4, 185
- [3] MIHALIKOVÁ, M., KOVALOVÁ, K., MICHEL, J.: *Materiálové inžinierstvo*, 11, 2004, 3, 13
- [4] KOVALOVÁ, K., MAMUZIČ, I., BURŠÁK, M.: *Metalurgija*, 43, 2004, No 4, 335
- [5] LAPČÍKOVÁ, E.: *Hutnícke listy*, 19, 11, 1976, 815
- [6] ŠEVČÍKOVÁ, J.: *Hutnik*, 33, 6, 1983, 228
- [7] MICHEL, J., MIHALIKOVÁ, M.: *Vplyv korózneho prostredia na únavové vlastnosti ocelí*, In.: Letná škola únavy 2004, Zuberec-Roháče, september 2004, 62
- [8] MIHALÍKOVÁ, M., KOVALOVÁ, K., MICHEL, J.: *Materiálové inžinierstvo*, 11, 2004
- [9] MAMUZIČ, I.: *Metalurgija*, 44, 2005, 4, 305
- [10] KOVALOVÁ, K., MICHEL, J.: *Acta Mechanica Slovaca*, 8, 2004, 3, 113
- [11] HIIDVÉGHY, J., BURŠÁK, M., VRCHOVINSKÝ, V.: *Acta Metallurgica Slovaca*, 5, 1, 1999, 165
- [12] KOHOUT, I., VĚCHET, S.: *Statistické vyhodnocování výsledků v únavě*, In.: Letná škola únavy 2004, Zuberec-Roháče, september 2004, 140
- [13] TREBUŇA, F., ŠIMČÁK, F.: *Odolnosť prvkov mechanických sústav*. Emilena, Košice, 2005, 980 str., ISBN 80-8073-148-9
- [14] TREBUŇA, F., BURŠÁK, M.: *Medzné stavy-lomy*. Emilena, Košice, 2002