

ANALYSIS OF CRANE TRACK LOADING SUPPORTED BY EXPERIMENT

ANALÝZA NAMÁHANIA ŽERIAVOVÝCH DRÁH PODPORENÁ EXPERIMENTOM

Peter Bigoš,¹ Karol Kubín,² Jozef Kulka,³ Martin Mantič,⁴

Abstract: This contribution deals with the problematic of method for the determination of durability and residual durability of steel constructions. There are used experimental and computing methods. By means of experiments are determined loading collectives of tensions. By means of computation together with hypothesis of fatigue damage cumulation is determined the final durability.

Keywords: crane track, durability, residual durability, experiment,

1. Úvod

Žeriavové dráhy mostových žeriavov sú v intenzívnej prevádzke značne namáhané, predovšetkým ak žeriavy okrem funkcie zdvíhania bremena vykonávajú vo veľkej miere aj funkciu dopravných prostriedkov. Typickými prevádzkami, kde žeriavy slúžia aj ako dopravné prostriedky, sú prevádzky v hutníckych kombinátoch. Závažnosť problému dokumentujú prevádzkové poruchy – prasknutia nosníkov žeriavových dráh v dôsledku iniciácie únavovej trhliny a ich šírenia.

2. Analýza žeriavových dráh

Nasledujúca analýza, ktorá je predmetom skúmania tohto príspevku, bola robená na žeriavovej dráhe hutníckej prevádzky. Nosníky žeriavovej dráhy sú spojitý o dĺžkach 72 000 mm, 90 000 mm, 102 000 mm a 108 000 mm so vzdialenosťou stĺpov 12 000 mm, 18 000 mm a 24 000 mm. Spojité nosníky sú zvarené zo šiestich typov prierezov. Podľa štatistického rozboru urobeného na prevádzke, najintenzívnejšie sú namáhané polia medzi označenými stĺpmi 29-30, 30-31, 31-32.

Po výpočtovej analýze bol vybraný pre expertízu spojitý nosník medzi stĺpmi 29 až 34 a jeho pole 24 000 mm medzi stĺpmi 29-30. Toto pole je zvláštne aj tým, že je zvarené z troch typov prierezov I, IVc, IVb (obr.2).

Vo vybranom poli 29-30 (24 000 mm) pomocou vplyvových čiar sa určila najnepriaznivejšia poloha žeriava z hľadiska najnepriaznivejšieho namáhania. Táto poloha sa

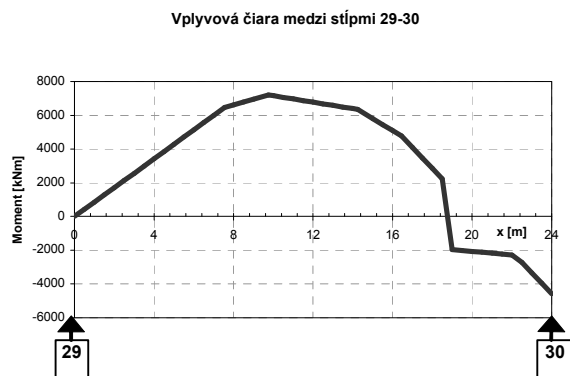
¹ prof. Ing. Peter Bigoš, CSc., TU Košice, SjF, Katedra konštruovania, dopravy a logistiky, Letná 9, 042 00 Košice, tel.: +421 55 602 2507, e-mail: peter.bigos@tuke.sk

² doc. Ing. Karol Kubín, CSc., TU Košice, SjF, Katedra konštruovania, dopravy a logistiky, Letná 9, 042 00 Košice, tel.: +421 55 602 2523, e-mail: karol.kubin@tuke.sk

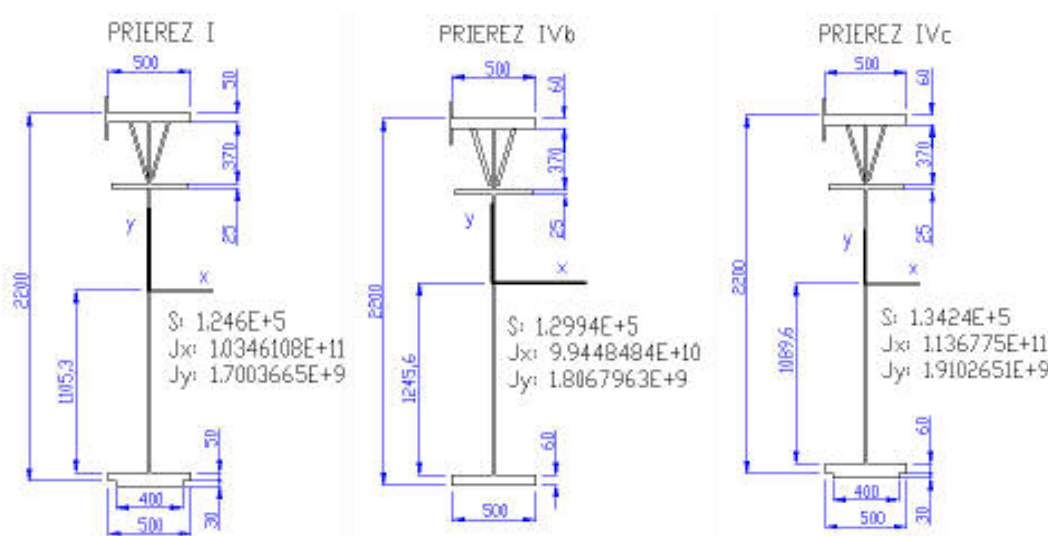
³ Ing. Jozef Kulka, Ph.D., TU Košice, SjF, Katedra konštruovania, dopravy a logistiky, Letná 9, 042 00 Košice, tel.: +421 55 602 2503, e-mail: jozef.kulka@tuke.sk

⁴ Ing. Martin Mantič, Ph.D., TU Košice, SjF, Katedra konštruovania, dopravy a logistiky, Letná 9, 042 00 Košice, tel.: +421 55 602 2507, e-mail: martin.mantic@tuke.sk

nachádza vo vzdialenosti 10 477 mm od stĺpa 29 smerom k stĺpu 30. Priebeh ohybového momentu v týchto poliach je na obr.1.



Obr.1. Vplyvová čiara poľa medzi stĺpmi 29-30



Obr.2. Typy prierezov, z ktorých je pozvábané pole 29-30

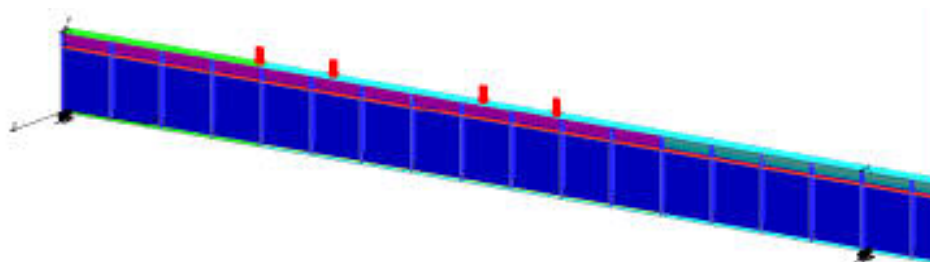
Analýza vnútorných silových veličín celého spojitého nosníka 102 000 mm medzi stĺpmi 29-34 pri rôznej polohe kliešťového žeriava 63t-33m v uvedenom poli bola uskutočnená programom COSMOS-M. Pri analýze sa za náhodné zaťaženie považovali kolosové tlaky žeriava 524 kN na jedno koleso bez uvažovania normových súčiniteľov.

3. Výpočtová simulácia namáhania žeriavovej dráhy

Cieľom výpočtovej simulácie namáhania žeriavovej dráhy bolo predbežne odhadnúť kritické miesta v prierezoch žeriavovej dráhy v oblastiach polí, ktoré boli predmetom merania. Výpočtové modely boli vytvorené pre použitie metódy konečných prvkov v prostredí programu COSMOS/M. Pre potreby simulácií bol vytvorený výpočtový model časti dráhy medzi stĺpmi 29 ÷ 30.

3.1 Modelovanie geometrie a siete konečných prvkov

Pre modelovanie dráhy boli pre model použité škrupinové prvky typu Shell. Na obr.3 je celkový pohľad na model časti dráhy, tlaky kolies prenesené na pásnicu sú interpretované červenými značkami.



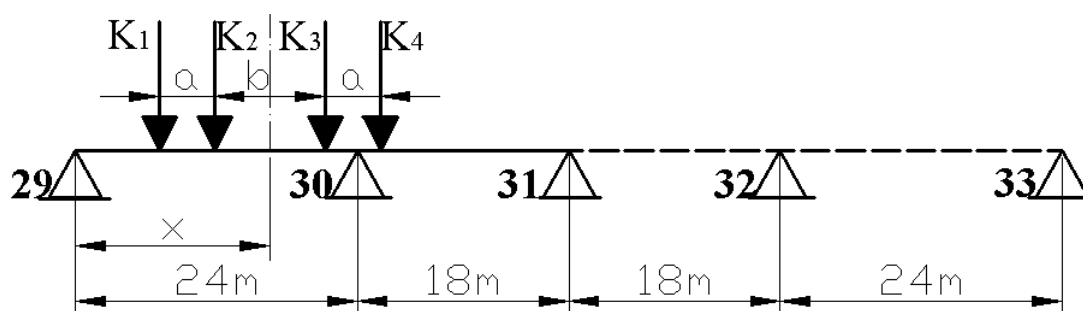
Obr.3. Celkový pohľad na model časti dráhy ,zaťaženie žeriava tlakom kolies –žeriav uprostred poľa.

3.2 Modelovanie zaťažení

Zaťaženie od tlaku kolies ($K_i = K_1 = K_2 = K_3 = K_4$) bolo interpretované ako ekvivalentný rovnomerne rozložený tlak na hornú pásnicu žeriavovej dráhy prenášaný koľajnicou JKL-120. Pre modelovanie bočných síl od priečenia žeriava boli použité vzťahy podľa STN 27 0103.

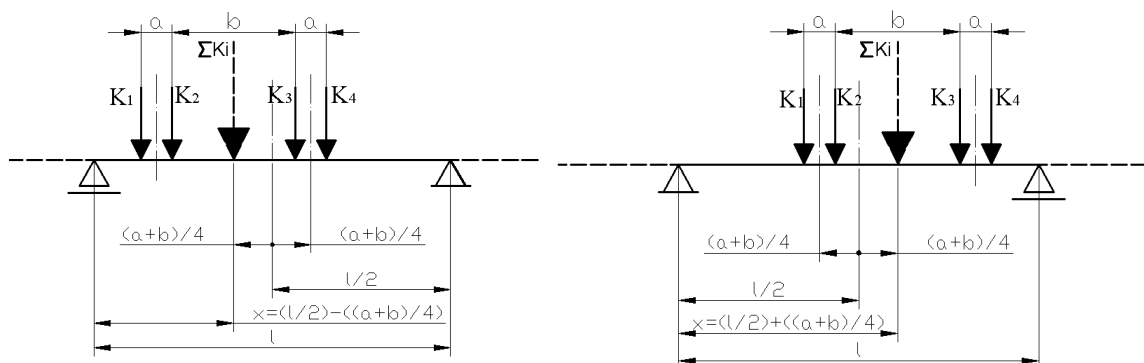
3.3 Modelovanie zaťažovacích stavov pre časť dráhy, polia 29-31

Pretože vytipovaný úsek merania medzi stĺpami 29 – 30 zľava začína dilatačnou medzerou pre sledovanie vplyvu pohybu žeriava po dráhe, je dostatočne výstižné sledovanie polí 29-30 a 30-31. Obr.4 znázorňuje výpočtový model dráhy, pričom premenná „x“ reprezentuje polohu stredu priečnika žeriava voči stĺpu 29.



Obr.4. Schématické znázornenie pohybu žeriava po dráhe

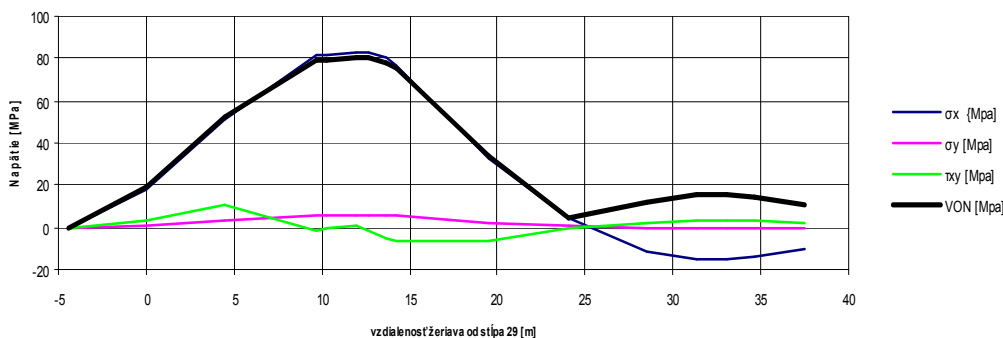
Pre potreby analýzy boli definované zaťažovacie stavy, ktoré simulujú prechod žeriava smerom od stĺpa 28 až mimo poľa 30-31. V zásade jednotlivé stavy boli volené tak, aby vystihovali najúčinnejšie pozície voči stredom modelovaných polí (obr.5).



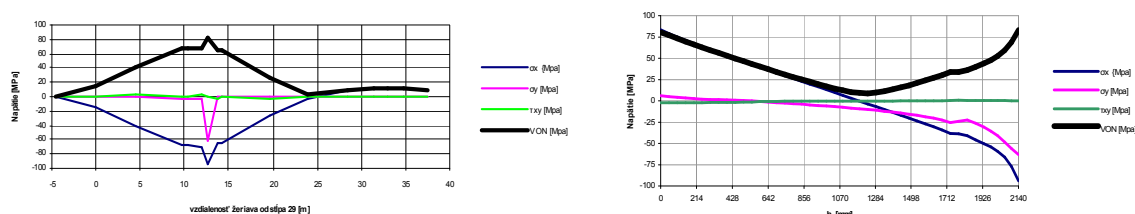
Obr.5. Najúčinnejšie polohy žeriava voči stredom nosníkového poľa.

3.4 Spracovanie analýzy namáhania dráhy

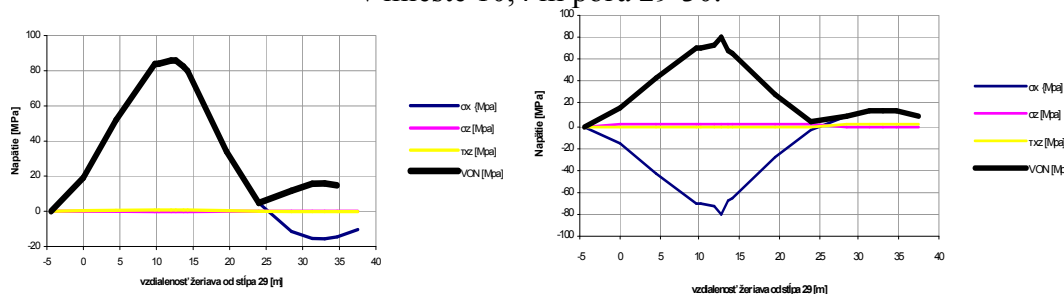
Výsledky výpočtov pre všetky zaťažovacie stavy boli spracované v grafickej podobe jednak ako „vplyvové čiary“ napätí a jednak ako priebehy napätí pre rozhodujúce konštrukčné prvky dráhy, t.j. pre stojinu, spodný a horný pás prierezu nosníka vo vzdialenosti 10,4 m od stĺpa 29. Zrovnávacie napätie σ_{ZI} je v grafoch označené symbolom „VON“.



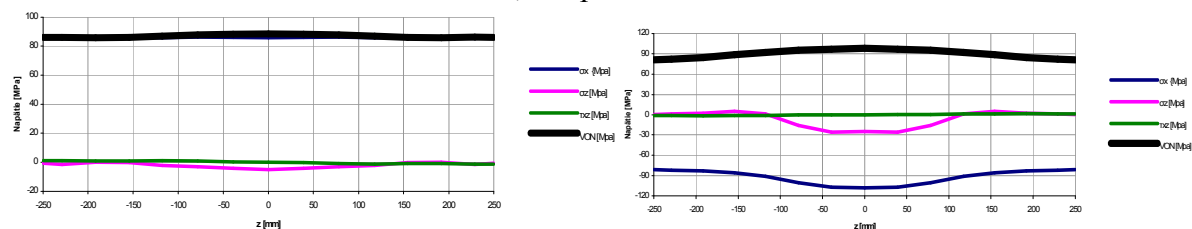
Obr.6. Vplyvová čiara napätí na spodnej hrane stojiny v mieste 10,4 m poľa 29-30.



Obr.7. Vplyvová čiara napätí na hornej hrane stojiny a priebeh napätí po výške stojiny v mieste 10,4 m poľa 29-30.



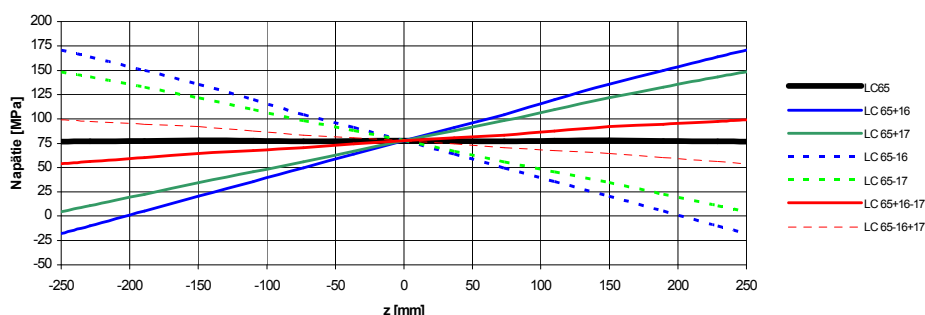
Obr.8. Vplyvová čiara napätia na okraji spodnej pásnice a na okraji hornej pásnice v mieste 10,4 m poľa 29-30.



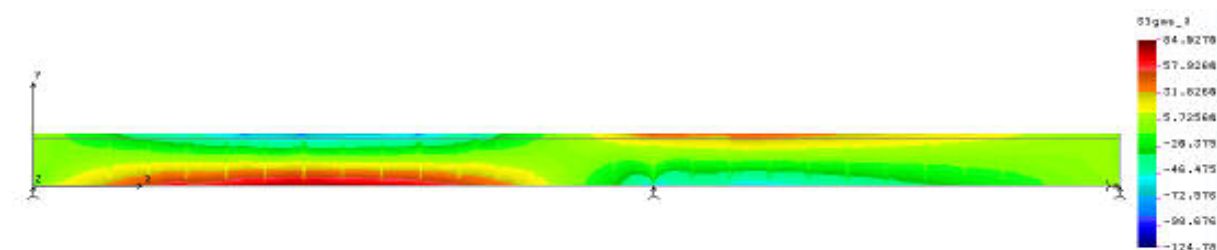
Obr.9. Priebeh napätí po šírke dolného pásu a po šírke horného pásu v mieste 10,4 m poľa 29-30.

Posúdenie vplyvu bočných síl od priečenia žeriavu bolo modelované dodatočnými zaťažovacími stavmi pre polohu žeriava, ktorá vyvoláva najnepriaznivejšie účinky v mieste 10,4 m od stĺpa 29. Ide o celkom šesť možných kombinácií zachytenia síl od priečenia žeriava. Pritom koleso K2 je stále nad meracím miestom.

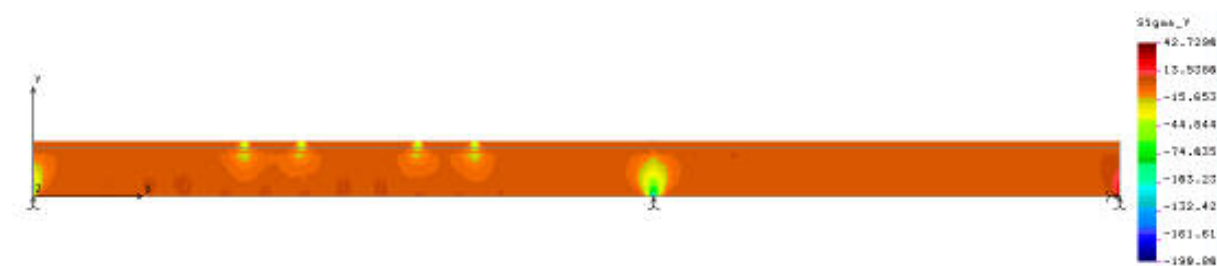
Obr.10 znázorňuje vplyv spôsobu zachytávania priečenia na zmenu normálového namáhania spodného pásu profilu žeriavovej dráhy. Na obr.11 je znázornený priebeh normálových ohybových napätí na stojine dráhy a na obr.12 je zobrazený priebeh normálových priečných napätí na stojine dráhy.



Obr.10. Priebeh normálového napätia na spodnom páse v mieste 10,4 m poľa 29-30 pri pôsobení bočnej sily od priečenia.



Obr.11. Priebeh normálových ohybových napätí na stojine dráhy.

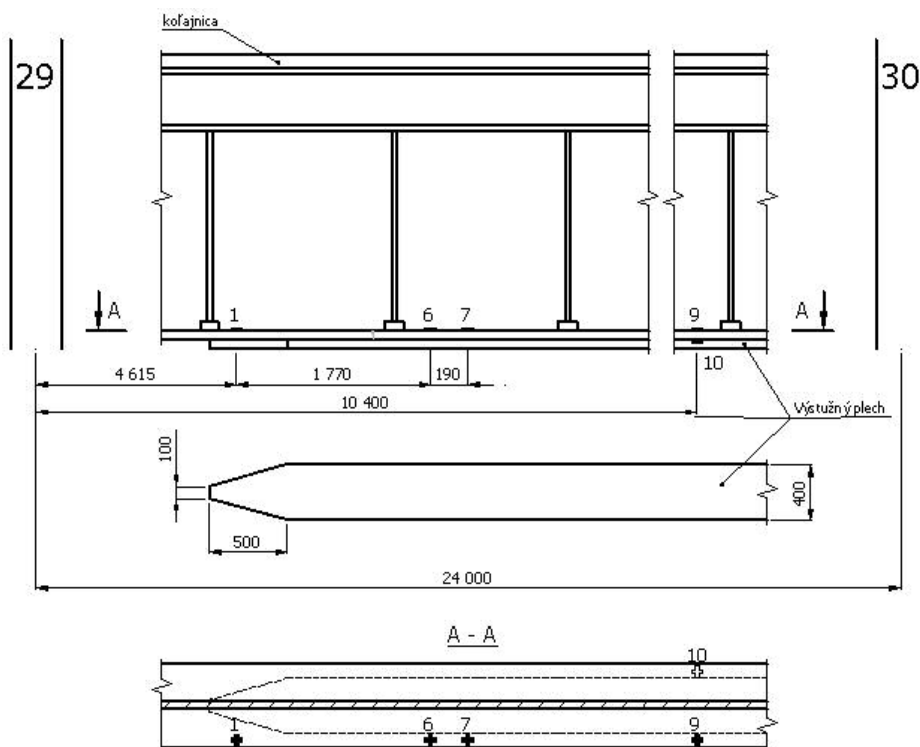


Obr.12. Priebeh normálových priečných napätí na stojine dráhy.

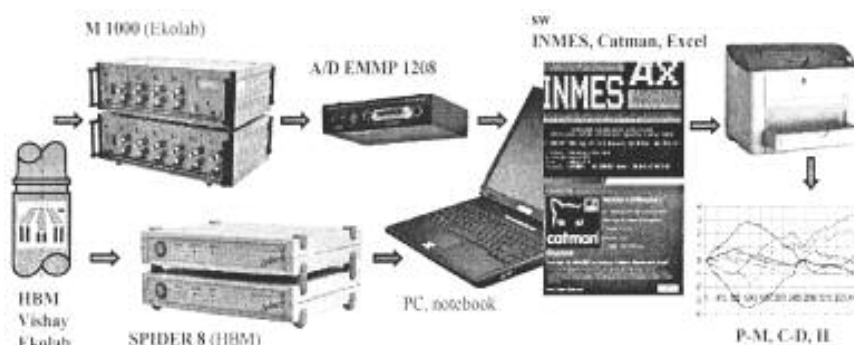
4. Tenzometrické meranie

Na základe predchádzajúcej teoretickej analýzy, vizuálnej obhliadky žeriavovej dráhy bola riešiteľmi navrhnutá metodika experimentálneho určenia deformácie, z nej vyplývajúcej napätosti. Miesta aplikácie snímačov v poli 29-30 na dráhe sú na obr.13. Z obr.13 je zrejmé, že bolo aplikovaných 5 snímačov, ktoré boli použité pre vyhodnotenie merania.

Pre meranie boli použité tenzometrické snímače HBM 6/120XY11 s ohmickou hodnotou $120\ \Omega$ s konštantou deformačnej citlivosti 2,04. Aplikácia snímačov bola vykonaná tenzometrickým tmelom HBM X60. Prepojenie snímačov s meracím prístrojom bolo vykonané tienenými vodičmi. Merací zosilovač a zároveň merací reťazec pre vyhodnotenie bol realizovaný podľa obr.14.



Obr.13. Umiestnenie snímačov



Obr.14. Merací zosilovač a merací reťazec

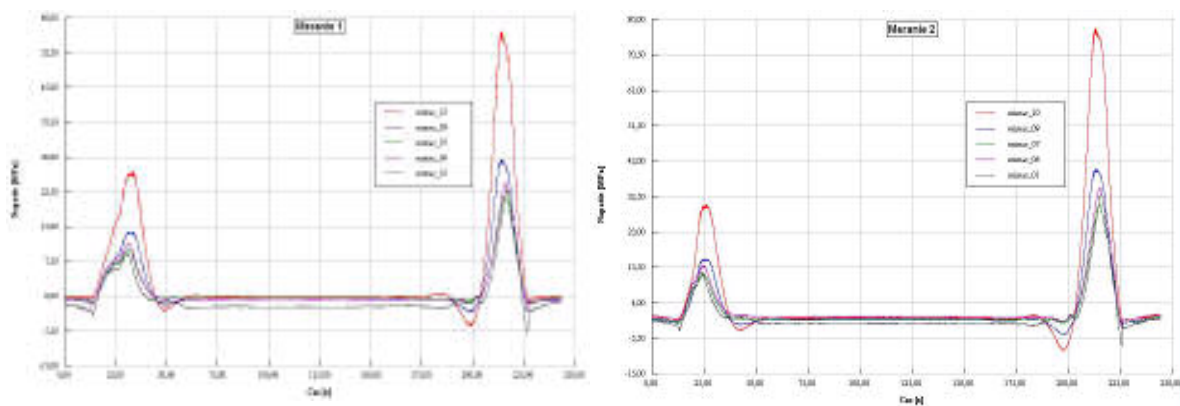
Po vyvážení aparatúry boli snímače (obr.13) zakonzervované ochranným povlakom SG 250 (f. HBM).

Z nameraných hodnôt prírastkov pomerných deformácií pri jednotlivých režimoch merania softvérom CATMAN boli vyhodnotené a tlačou zobrazené časové zmeny prírastkov normálových napätí v miestach merania podľa obr.13.

Z hľadiska posudzovania pevnosti bolo konštatované, že neboli prekročené normou stanovené návrhové pevnosti materiálu. Z priebehov napätí bolo možné stanoviť dynamický zdvihový súčiniteľ, ktorý neprekročil hodnotu 1,2.

Prírastky napätia v najviac namáhanom priereze určené z nameraných priebehov napätí v jednotlivých miestach vykazujú hodnotu až 86,2 MPa.

Uvedené priebehy sú zobrazené na obr.15. Pri zohľadnení ohybového momentu od vlastnej tiaže výsledné normálové napätie neprekročilo v najviac namáhanom priereze 100 MPa. Z hľadiska posudzovania pevnosti dá sa konštatovať, že nie sú prekročené normou stanovené návrhové pevnosti materiálu.



Obr.15. Priebehy napätí v miestach merania pri zaťažení žeriavom bez bremena a s bremenom

Priebehy nameraných normálových napätí v mieste merania 9 a 10 podľa obr. 13 znázornených na obr.15 vykazujú rozdielne hodnoty napätí až o 100%. Táto skutočnosť korešponduje s priebehom podľa obr. 10, ktorý znázorňuje vplyv zachytávania priečenia (alebo iných účinkov) na zmenu normálového namáhania spodného pásu profilu žeriavovej dráhy.

5. Kumulácia únavového poškodenia - zvyšková životnosť

Účelom posúdenia konštrukcií na medzný stav únavy je zabezpečiť s prijateľnou pravdepodobnosťou, že po dobu stanovenej životnosti sa konštrukcia nepoškodí alebo neporuší únavou materiálu.

Podľa kapitoly 8.2 STN 73 1401 konštrukčný prvok sa nemusí posudzovať na únavu ak je splnená podmienka:

- najväčší rozkmit v navrhovanom spektre

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma \leq 26\varphi_t \cdot \varphi_r / \gamma_{Mf} \quad (1)$$

kde γ_{Ff} je parciálny súčiniteľ spoľahlivosti únavového zaťaženia

γ_{Mf} je parciálny súčiniteľ spoľahlivosti únavovej pevnosti

φ_r je súčiniteľ nesúmernosti

φ_t je súčiniteľ vplyvu hrúbky

Pri premennom namáhaní konštrukčného detailu sa vyjadruje spektrum normálových napätí $\Delta\sigma_i$. Spektrum zaťaženia sa nahradí blokovým zaťažením s k-blokmi n_1 - $\Delta\sigma_1$; n_2 - $\Delta\sigma_2$; n_i - $\Delta\sigma_i$; n_k - $\Delta\sigma_k$, kde n_i je počet kmitov pri rozkmite $\Delta\sigma_i$ počas životnosti konštrukcie. Rozkmit napätí $\Delta\sigma_i \gamma_{Ff} < \sigma_L \varphi$ sa neuvažujú. Hodnoty $\Delta\sigma_D$ a $\Delta\sigma_L$ pre jednotlivé kategórie detailov sú v tabuľke 28 STN 73 14 01.

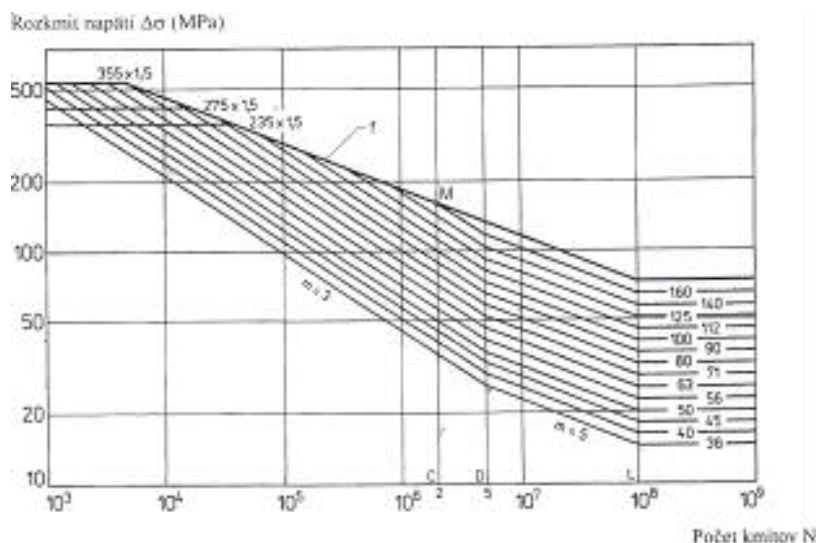
Stanovia sa parciálne únavové životnosti N_i podľa kriviek s dvojitém sklonom ($m=3$ a $m=5$) vyznačených na obr. 6. Pre kategórie jednotlivých detailov platia tieto vzťahy:

$$\text{- ak } \Delta\sigma_i \gamma_{Ff} \geq \Delta\sigma_M \varphi, \text{ potom } N_i = 2 \cdot 10^6 \left[160\varphi / (\Delta\sigma_i \gamma_{Ff}) \right]^5; \quad (2)$$

$$\text{- ak } \Delta\sigma_M \varphi > \Delta\sigma_i \gamma_{Ff} \geq \Delta\sigma_D \varphi, \text{ potom } N_i = 5 \cdot 10^6 \left[\Delta\sigma_D \varphi / (\Delta\sigma_i \gamma_{Ff}) \right]^3; \quad (3)$$

$$- \text{ak } \Delta\sigma_D \varphi > \Delta\sigma_i \gamma_{Ff} \geq \Delta\sigma_L \varphi, \text{ potom } N_i = 5 \cdot 10^6 \left[\Delta\sigma_D \varphi / (\Delta\sigma_i \gamma_{Ff}) \right]^5 \quad (4)$$

Číselné hodnoty kriviek únavovej životnosti boli brané z tabuľky 28 STN 73 14 01 str.95.



Obr.16. Krivky únavovej pevnosti s dvojitým sklonom ($m=3$ a $m=5$) pre jednotlivé kategórie detailov

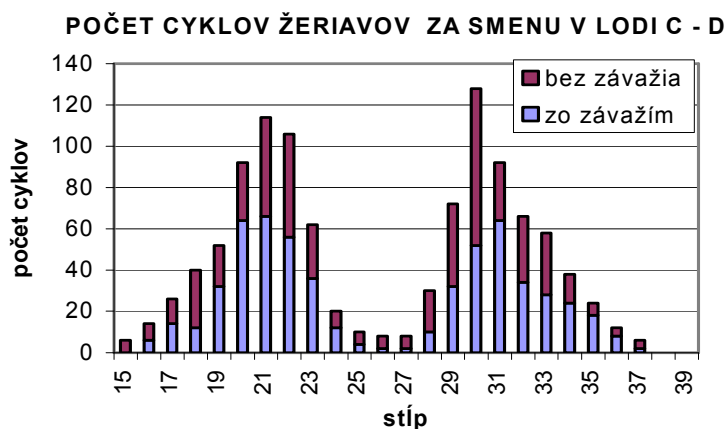
Hodnoty parciálnych únavových poškodení D_i sa určia zo vzťahu:

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \quad (5)$$

Posúdenie spoľahlivosti konštrukčného detailu namáhaného na únavu s premenným rozkmitom normálových napätí $\Delta\sigma_i$ sa robí porovnaním celkového poškodenia D_d s prípustnou hodnotou poškodenia D_L . Podmienka spoľahlivosti je vyjadrená vzťahom:

$$D_d = \sum D_i = \sum \frac{n_i}{N_i} \leq D_L \quad (6)$$

	Počet cyklov za smenu na najintenzívnejších miestach	Počet cyklov spolu za roky 1983 ÷ 2006
v rokoch 1983 ÷ 1994	70	919 800
v rokoch 1995 ÷ (1+5)/2006	100	1 249 800
Spolu		2 169 600



Obr.17. Tabuľka počtov cyklov za smenu a za roky a histogram počtu cyklov žeriava za smenu s bremenom a bez bremena

Pokiaľ nie sú stanovené presnejšie hodnoty, možno uvažovať s $D_L=1,0$. Krivky podľa obr.16 sa uvažujú s pravdepodobnosťou prežitia 95%.

Na obr.17 je grafický zobrazený histogram počtu cyklov žeriavov za smenu s bremenom a bez bremena. Zo štatistiky na obr.17 vyplýva, že zaťaženia žeriava s bremenom priemerne tvoria 54%.

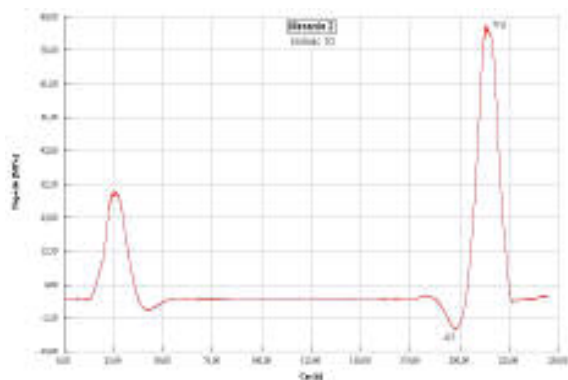
5.1 Životnosť v mieste najväčšieho ohybového momentu medzi stĺpmi 29-30

Z nameraných priebehov normálových napätí v mieste maximálneho ohybového momentu je maximálny rozkmit napätia pri zaťažení so žeriavom s bremenom $\Delta\sigma_{i=1} = \Delta\sigma_1 = 86,2\text{MPa}$ (obr.18a) a pri zaťažení žeriavom bez bremena $\Delta\sigma_{i=2} = \Delta\sigma_2 = 63,3\text{MPa}$ (obr.18b).

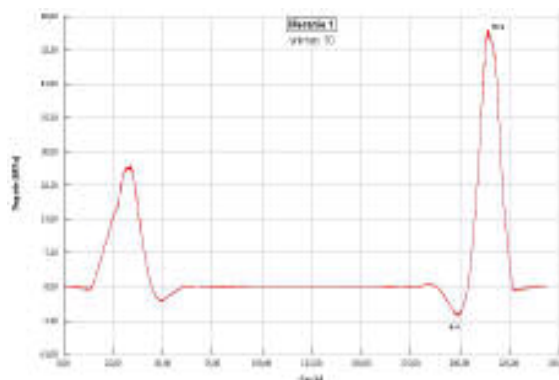
V zmysle prílohy K STN 73 1401 sa uvažuje v mieste vzdialenom od stĺpa 29 smerom ku 30 o 10 477 mm s číslom detailu 206 a kategóriou 125.

$$\Delta\sigma_{M,KD} = 232\text{MPa}, \Delta\sigma_D = 92\text{MPa}, \Delta\sigma_L = 51\text{MPa}.$$

V tomto prípade sa uvažuje s parciálnym súčiniteľom spoľahlivosti únavového zaťažovania $\gamma_{Ff} = 1,0$.



Obr.18a) Normálové napätia pri pohybe žeriava s bremenom



Obr.18b) Normálové napätia pri pohybe žeriava bez bremena

Pre rozkmity napätí $\Delta\sigma_1$ (žeriav s bremenom) a $\Delta\sigma_2$ (žeriav bez bremena) a pre φ_a a φ_b sú splnené podmienky podľa rov. (3) a preto sa podľa nej počítajú parciálne životnosti

$$N_i = 5 \cdot 10^6 \left[\Delta\sigma_D \varphi / (\Delta\sigma_i \gamma_{Ff}) \right]^3$$

Pre počty cyklov a parciálne životnosti celkové poškodenie dostaneme

$$D_d = 1,00697$$

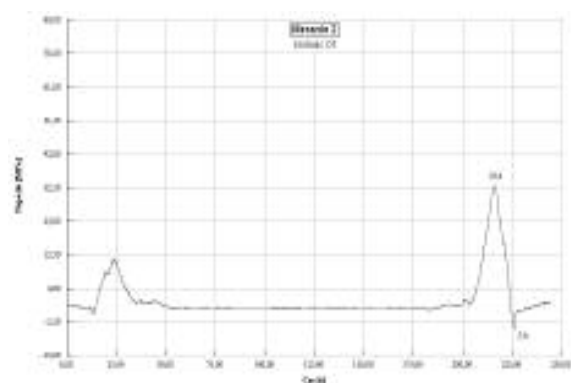
Podľa podmienky rov.(6) je ukončená životnosť.

5.2 Životnosť v mieste najnepriaznivejšieho vrubového účinku medzi stĺpmi 29-30

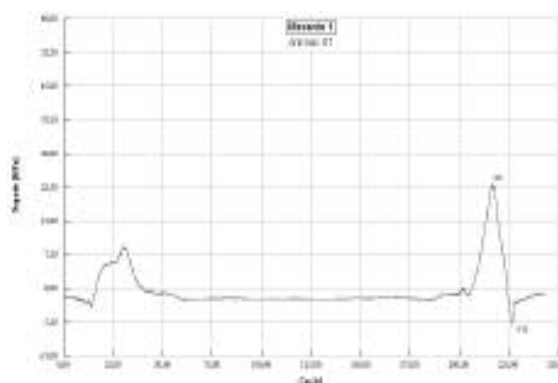
Privarením pozdĺžneho plechu pri oprave žeriavovej dráhy v roku 1995 na spodnú pásnicu o šírke 400 mm a s tupým šípovitým zakončením v mieste aplikovaného snímača 1 podľa obr.13 došlo k vytvoreniu nepriaznivému vrubovému účinku. Namerané normálové napätia v tomto mieste pri prejazde žeriavom sú takmer o 50% nižšie než v mieste maximálneho ohybového momentu medzi stĺpmi 29 a 30.

V zmysle prílohy K STN 73 1401 uvažuje sa v mieste 1 (obr.13) s číslom detailu 418 alebo 419.

Najväčší rozkmit $\Delta\sigma_1=40\text{MPa}$ pri prejazde žeriava s bremenom (obr.19a) a $\Delta\sigma_2=30,8\text{ MPa}$ pri prejazde žeriava bez bremena (obr.19b). Prierez v mieste merania odpovedá prierezu IVc podľa obr. 2. Tomuto prierezu odpovedá $\varphi = 0,65015$.



Obr.19a) Normálové napätia pri pohybe žeriava s bremenom



Obr.19b) Normálové napätia pri pohybe žeriava bez bremena

Pretože skutočnosť nezodpovedá ani jednej z uvedených kategórií, lineárnou interpoláciou sa dospelo ku kategórii detailu 56, ktorej odpovedajú z obr. 6 a tab.28 STN 73 1401 $\Delta\sigma_{M,K} = 425\text{MPa}$, $\Delta\sigma_D = 41\text{MPa}$, $\Delta\sigma_L = 23\text{MPa}$.

Vzhľadom na interpoláciu kategórií detailu a s tým súvisiacich nepresností uvažuje sa v tomto prípade v zmysle STN 73 1401, s parciálnym súčiniteľom únavového zaťaženia $\gamma_{Ff} = 1,2$.

Pre počty cyklov a parciálne životnosti podľa rovnice (3) celkové poškodenie dostaneme $D_d = 1,094$

V zmysle podmienky rov. (6) je ukončená životnosť.

5. Záver

V zmysle kapitoly 8 normy STN 73 1401 účelom navrhovania konštrukcií na medzný stav únavy je zabezpečiť s prijateľnou pravdepodobnosťou, že po dobu návrhovej životnosti sa konštrukcia nepoškodí, alebo neporuší únavou materiálu.

Vzhľadom na to, že sa jedná o nosné konštrukcie žeriavových dráh pre kliešťové žeriavy ako vyhradené zariadenia, nepripúšťa sa riziko zlyhania resp. zabezpečuje sa vysoká bezpečnosť. Na základe predchádzajúcej analýzy môžeme spojiť nosník 29-34, (alebo polia 29-30, 32-33) z hľadiska bezpečnosti pokladať za nosník po životnosti.

Tento príspevok vznikol v rámci riešenia grantového projektu VEGA 1/2196/05 Logistické prvky a systémy v materiálových a informačných tokoch, ich inovácie a použitie výpočtových a experimentálnych metód na zabezpečenie ich životnosti.

Literatúra

- [1] Bigoš, P. a kol.: *Tenzometrické meranie žeriavových dráh v lodiach C-D, D-H stĺpy č. 14-40 v prevádzke Narážacie pece a Príprava vsádzky na DZ TV*. Technická správa pre U.S. Steel a.s. Košice, KKDaL SJF TU Košice, 2006.
- [2] Bigoš, P., a kol.: *Tenzometrické meranie žeriavových dráh v lodiach C-D, D-H stĺpy č. 14 – 40 v prevádzke Narážacie pece a príprava vsádzky na DZ TV*. Košice, TU SJF

KKDaL, 2002, 74s

- [3] Hainbach, E.: *Betriebsfestigkeit*. VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, 1989, 481 s.
- [4] Hainbach, E.: Die Schwingfestigkeit von Schweissverbindungen aus der Sicht einer örtlichen Beanspruchungsmessung. LBF – Bericht Nr. FB 77 (1968)
- [5] Hainbach, E., Oliver, R.: Streuanalyse der Ergebnisse aus systematischen Schwingfestigkeitsuntersuchungen mit Schweissverbindungen aus Feinkornbaustahl. Materialprüfung 17(1975)Nr.11, 399-401 s.

STN 73 51 30 Žeriavové dráhy, 1994

STN 73 14 01 Navrhovanie ocelových konštrukcií, 1998

STN 27 02 01 Mostové žeriavy, Technické požiadavky, 1993

STN 27 01 03 Navrhovanie ocelových konštrukcií žeriavov, 1991