

E xperimentální 2005 A nalýza N apětí

EXPERTISE OF CLOSING SLIDE IN THE WATER INLET OF THE WATER POWER PLANT

EXPERTÍZA TABÚĽ PROVIZÓRNEHO HRADENIA VTOKOV VODNEJ ELEKTRÁRNE

František Trebuňa¹, František Šimčák², Jozef Bocko³, Miroslav Pástor⁴, Jozef Tomčík⁵

Methods of experimental analysis of stress and methods of damage cumulation in structures used for decades are required as necessary data for mathematical models verification. Paper shows that residual stress can be taken into account in consideration of the reliability of results.

Keywords:

closing slide, working life, residual stresses

Kľúčové slová:

hradidlová tabuľa, životnosť tabúľ, zvyškové napätia

Úvod

Hradidlové tabule (obr.1) slúžia na hradenie vtokov vo vodných elektrárnach. Jedná sa o doskové konštrukcie zvarané z plechov s vystužnými rebrami. Pri obhliadke demontovaných hradidlových tabúľ bolo zistené, že jedna z tabúľ je plasticky zdeformovaná v oblasti pásnice okrajového rebra (obr.2).

Vzhľadom na viditeľnú koróziu tabúľ bola realizovaná kontrola hrúbok plechov meraním pomocou ultrazvuku. V ojedinelých miestach boli namerané hrúbky menšie ako nominálne hodnoty, avšak tieto rozdiely neboli výrazné – maximálny úbytok neprekročil jeden milimeter. Vizuálna kontrola zvarov neodhalila žiadne poruchy resp. chyby.

Cieľom príspevku je posúdenie vplyvu lokálnej plastickej deformácie tabule na možné zvýšenie napätí v konštrukcii aj s ohľadom na zvyškové napätie, pre určenie ktorých bola použitá metóda odvrtávania.

¹ Prof. Ing. František Trebuňa, CSc.: Katedra aplikovanej mechaniky a mechatroniky, Sjf TU v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, tel.: +421-55-6022462, e-mail: frantisek.trebuna@tuke.sk

² Prof. Ing. František Šimčák, CSc.: Katedra aplikovanej mechaniky a mechatroniky, Sjf TU v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, tel.: +421-55-6022458, e-mail: frantisek.simcak@tuke.sk

³ Doc. Ing. Jozef Bocko, CSc.: Katedra aplikovanej mechaniky a mechatroniky, Sjf TU v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, tel.: +421-55-6022920, e-mail: jozef.bocko@tuke.sk

⁴ Ing. Miroslav Pástor: Katedra aplikovanej mechaniky a mechatroniky, Sjf TU v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, tel.: +421-55-6022465, e-mail: miroslav.pastor@tuke.sk

⁵ Ing. Jozef Tomčík: Katedra aplikovanej mechaniky a mechatroniky, Sjf TU v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, tel.: +421-55-6022450, e-mail: jozef.tomcik@tuke.sk

Napätosť a deformácia tabule pri prevádzkovom zaťažení bola určovaná analyticky (použitím postupov STN 731401) a numericky MKP aj so zohľadnením deformácie a korózneho úbytku hrúbky. Na základe výsledkov riešenia boli doporučené miesta pre experimentálnu kontrolu zvarov ultrazvukom.



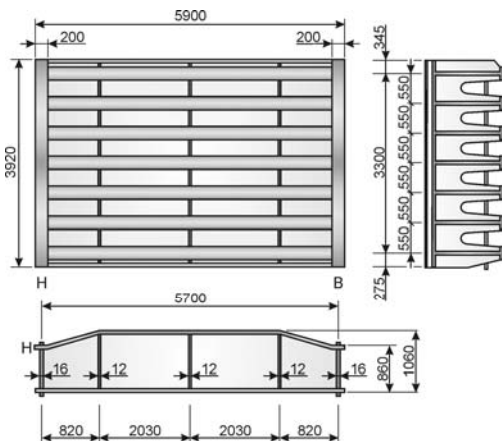
Obr.1 Pohľad na hradidlovú tabuľu

Obr.2 Deformovaná pásnica hradidlovej tabule

Vhodnosť a bezpečnosť hradidlovej tabule aj s plasticky zdeformovanou pásnicou bola overená tenzometrickým meraním v priebehu zabudovania tabule a jej prevádzky.

Vplyv zdeformovanej pásnice na napätosť hradidlovej tabule

Konštrukčné riešenie hradidlovej tabule so základnými rozmermi je na obr.3.



Obr.3 Hradidlová tabuľa – konštrukčné riešenie a základné rozmery

Hradidlová tabuľa je vyrobená zvaraním z ocelových plechov akosti 11 373. Pri výpočte uvažujeme, že hradidlová tabuľa je pri prevádzke zaťažená tlakom vody p a je kĺbovo podopretá v miestach H a B (obr.3.). Výpočtová schéma na obr.4a, znázorňuje zaťaženie jedného rebra tlakom vody v hĺbke $h = 50,45$ m.

Spojité zaťaženie q pôsobiace na jedno rebro (obr.4b) je

$$q = p_d \cdot b_1 = \gamma \cdot h \cdot b_1 = 10^4 \cdot 53 \cdot 0,55 = 29,15 \cdot 10^4 \text{ Nm}^{-1} = 291,5 \text{ kNm}^{-1},$$

pričom p_d je tlak zohľadňujúci charakteristickú hodnotu zaťaženia p a parciálny súčiniteľ spoľahlivosti zaťaženia.

Maximálne napätia od ohybového momentu sú uprostred rozpätia (miesto G obr.4b) a vo vláknach I a II nadobúdajú hodnoty:

$$\sigma_I = \frac{M_{max}}{W_{yI}} = \frac{1183,85 \cdot 10^6}{16,4 \cdot 10^6} = 72,2 \text{ MPa},$$

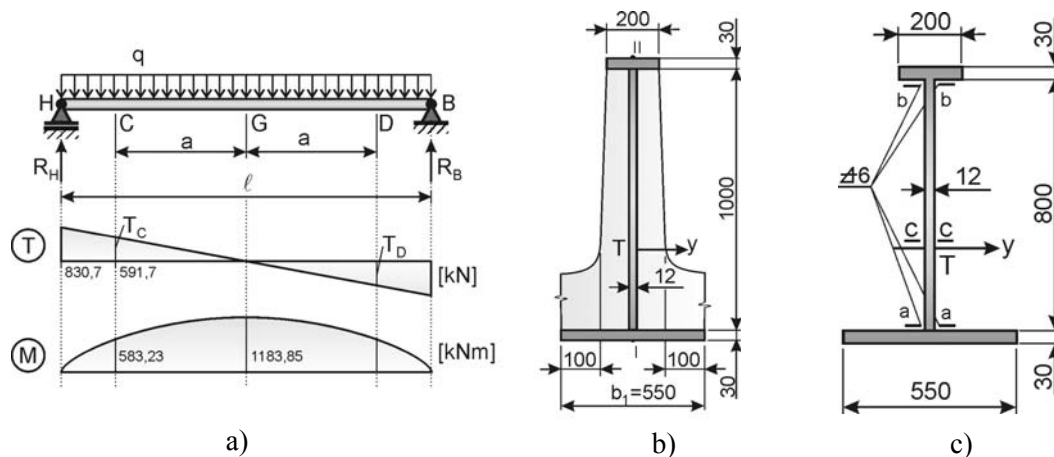
$$\sigma_{II} = \frac{-M_{max}}{W_{yII}} = \frac{-1183,85 \cdot 10^6}{8,9 \cdot 10^6} = -133,0 \text{ MPa}.$$

Maximálne šmykové napätie je v prierezoch H a B (obr.4c) v mieste $C-C$

$$\tau_{c-c} = \frac{T_H \cdot U_{y c-c}^*}{b \cdot J_{yH}} = \frac{830,775 \cdot 10^3 \cdot 5,03 \cdot 10^6}{12 \cdot 3,8 \cdot 10^9} = 91,6 \text{ MPa}.$$

Najviac namáhané prierezy hradidlovej tabule sú v mieste G (namáhanie na ohyb) a v mieste H (namáhanie na šmyk) – obr.4a. Pri aplikácii postupu podľa STN 73 1401 hodnotu zaťaženia určenú tlakom vody p_d odpovedajúcemu hĺbke 53 m budeme považovať za návrhovú hodnotu zaťaženia.

Podľa tabuľky č.3 STN 73 1401 materiálu 11 373 odpovedá podľa STN EN 10 027-1 označenie S 235. Podľa tabuľky č. 4 STN 73 1401 je pre materiál S 235 charakteristická hodnota medze klzu $f_y = 235 \text{ MPa}$.



Obr.4 a) výpočtová schéma s priebehmi T , M ; b) priečný prierez G ; c) priečný prierez H , B

Norma STN 73 1401 klasifikuje podľa časti 6.3 prierezy z hľadiska lokálnej stability podľa štíhlosti a únosnosti ich jednotlivých tlačených a ohýbaných častí t.j. stien a pásnic. V závislosti od klasifikácie rozhodujúcich prierezov sa môže uplatniť plasticitný, pružnoplasticitný alebo pružnostný výpočet oceľových prútov alebo konštrukcií.

Pre náš prípad uvažujeme triedu prierezov 3, v ktorých sa môže predpokladať iba pružná únosnosť, definovaná dosiahnutím návrhovej hodnoty pevnosti v najviac namáhaných tlačených vláknach.

Maximálnu štíhlosť β tlačených a ohýbaných častí prierezov pre triedu 3 udáva tabuľka č.13 STN 73 1401. Ak prierez spĺňa požiadavku maximálnej prípustnej štíhlosti považuje sa za kompaktný. Ak prierez nespĺňa požiadavku maximálnej prípustnej štíhlosti považuje sa za štíhly a preradzuje sa do triedy prierezov 4. Prierezy rebra na obr.4b, a 4c môžeme po aplikácii kritérií STN 731401 považovať za kompaktné.

Kompaktné prierezy sa posudzujú podľa podmienky

$$M_{Sd} \leq M_{C,Rd} \quad (1)$$

pri namáhaní na čistý ohyb, a podľa podmienky

$$V_{Sd} \leq V_{pl,Rd} \quad (2)$$

pri namáhaní na šmyk. Pritom

M_{Sd}, V_{Sd} - sú návrhový ohybový moment a priečna sila,

$M_{C,Rd}, V_{pl,Rd}$ - návrhový ohybový moment únosnosti a návrhová priečna sila únosnosti.

Aplikáciou postupu podľa STN 731401 dostaneme

$$M_{C,Rd} = 2091,5 \text{ kNm}, \quad V_{pl,Rd} = 1184,1 \text{ kN}.$$

Keďže $M_{Sd} = M_{max} = 1183,85 \text{ kNm}$, $V_{Sd} = T_{max} = 830,7 \text{ kN}$ (pozri obr.4a) podmienky (1) a (2) sú splnené.

Okrem splnenia pevnostnej podmienky (2) je nevyhnutné (aj keď sa jedná o kompaktný prierez) posúdiť šmykovú únosnosť steny s uvažovaním vydúvania steny podľa časti 6.7.3 STN 73 1401.

Podľa článku 6.7.3 STN 73 1401 je nevyhnutné overiť šmykovú únosnosť stenových častí medzi výstuhami (obr.5).

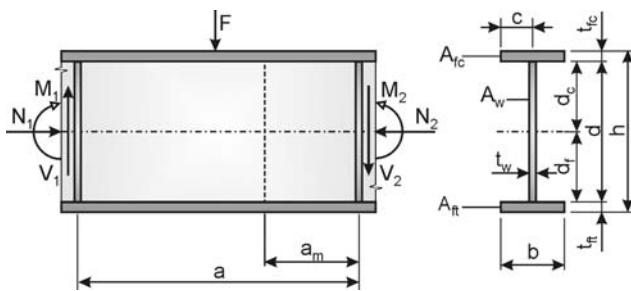
Šmyková únosnosť stien závisí od

- štíhlosti $\beta_w = d/t_w$ (alebo a/t_w), berie sa menšia z nich,
- pomeru strán polia $\alpha = a/d$ (alebo d/a), berie sa väčší z nich,
- tuhosti lemujúcich častí.

Šmykom namáhané steny so štíhlosťou

$$d/t_w > 70\sqrt{235/f_y}, \quad (3)$$

majú byť priečne vystužené minimálne v miestach podpier. Všeobecne je účelné, aby pomer strán a/d (obr.5) bol v rozmedzí 1 až 3.



Obr.5 Schéma zaťaženia pol'a steny (obr.4 STN 73 1401)

V riešenom prípade budeme uvažovať šmykové zaťaženie pol'a medzi prierezmi H a C (obr.3). Štíhlosť určíme zo vzťahu

$$\beta_w = \frac{a}{t_w} = \frac{820}{12} = 68,33.$$

Keďže súčasne platí

$$70\sqrt{235/f_y} = 70\sqrt{235/235} = 70,$$

a výstuhy sú v mieste podpier, pole nemusí byť vystužené ďalšou výstuhou.

Pomer strán pol'a je

$$\alpha = \frac{d}{a} = \frac{1000}{820} = 1,2195.$$

Medzná štíhlosť stien sa podľa STN 73 1401 pri namáhaní šmykom určuje zo vzťahu

$$\beta_{1,v} = 100 \left(0,7 + \frac{0,3}{\alpha^2} \right) \sqrt{\frac{235}{f_{yw}}}. \quad (4)$$

Dosadením dostaneme

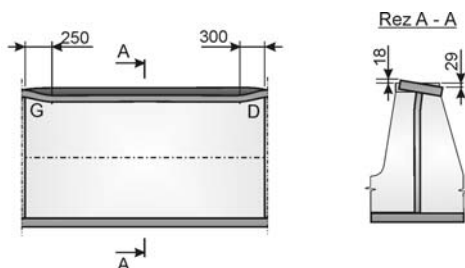
$$\beta_{1,v} = 100 \left(0,7 + \frac{0,3}{1,2195^2} \right) \sqrt{\frac{235}{235}} = 90,17.$$

Keďže je splnená podmienka

$$\beta_w = 68,33 < \beta_{1,v} = 90,17,$$

stenu môžeme považovať za kompaktnú, takže nie je potrebná ďalšia kontrola.

Kontrolou priečných výstuh podľa STN 731401 bolo zistené, že priečne výstupy svojim tvarom a rozmermi vyhovujú, pričom zabezpečujú prierezy nosníka voči vybočeniu, takže podľa Časti 6.8.2.1. STN 731401 sa ohýbané rebro nemusí posudzovať z hľadiska straty stability klopením.

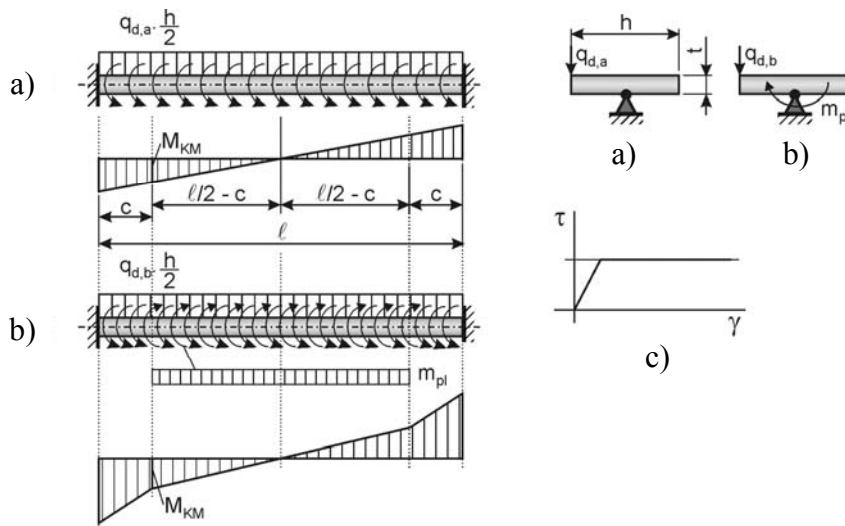


Obr.6 Zdeformovaná pásnica najnižšieho rebra v úseku *GD*

Kontrolou zvarov podľa STN 731401 bolo dokázané, že kútové zvary vyhovujú s rezervou cca 1,4 voči únosnosti zvarov v najviac namáhanom priereze.

Ako už bolo uvedené, pri demontáži dolnej hradidlovej tabule bolo zistené, že pásnica najnižšieho rebra je plasticky zdeformovaná v úseku *GD* pozri obr.3 a obr.6. Plastickú deformáciu pásnice možno vidieť aj na obr.2.

Kontrolný prepočet ukázal, že deformácia prierezu má podiel na zvýšení normálového napätia od ohybu o cca 2% pričom maximálne šmykové napätie nebolo ovplyvnené. Využitím výpočtových modelov podľa obr.7a,b bolo určené rovnomerné spojité zaťaženie q_d , ktoré je schopné plasticky deformovať pásnicu podľa obr.6.



Obr.7 Výpočtové modely pre určenie zaťaženia q_d potrebného pre deformáciu pásnice

Ak prípady 7a,b považujeme za medzné, potom pri predpoklade ideálne pružneplastického materiálu (obr.7c) je spojité zaťaženie q_d potrebné pre plastickú deformáciu v intervale $151,0 \text{ Nmm}^{-1} \leq q_d \leq 235,6 \text{ Nmm}^{-1}$.

Určenie napät'ových pomerov v nosnom prvku hradidlovej tabule

Výpočet napätosti v hradidlovej tabuli bol vykonaný na pracovisku autorov špičkovými programovými produktmi, ktorých licenciu má Strojnícka fakulta Technickej univerzity v Košiciach.

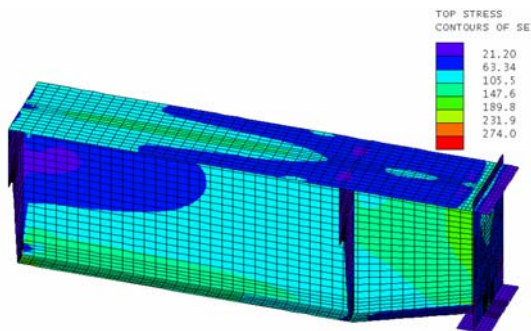
Rozmery nosných prvkov z ktorých bola hradidlová tabuľa vyrobená sú na obr.3. Pri výpočte bolo uvažované s hydrostatickým tlakom vodného stĺpca výšky $h=50,45 \text{ m}$ medzi maximálnou hladinou $327,6 \text{ m}$ a prahom $277,15 \text{ m}$.

Pri využití vlastnosti symetrie bola nosná časť rozdelená na 1948 trojuholníkových a 3209 obdĺžnikových, teda 5157 konečných prvkov s 13826 uzlami.

Použitím MKP boli určené polia hlavných normálových napätí a polia redukovaných napätí podľa teórie HMM na oboch stranách plechov tvoriacich nosnú konštrukciu. Výpočet bol realizovaný pre tri typy hrúbok plechov:

- pre nominálne hrúbky podľa výkresovej dokumentácie,
- pre všetky hrúbky rovnomerne zmenšené o 2 mm (korózný úbytok po 1 mm z každej strany všetkých plechov)
- pre rovnomerne zmenšené hrúbky plechov o rôzne hodnoty určené z najnepriaznivejšej kombinácie nameraných úbytkov hrúbok (hodnoty úbytkov sa pohybovali v rozsahu 0,07 – 0,80 mm obojstranne).

Na obr.8 je pre ilustráciu znázornené pole redukovaných napätí na horných stranách so sieťou pri rovnomernej obojstrannej korózii celej konštrukcie o 1 mm.



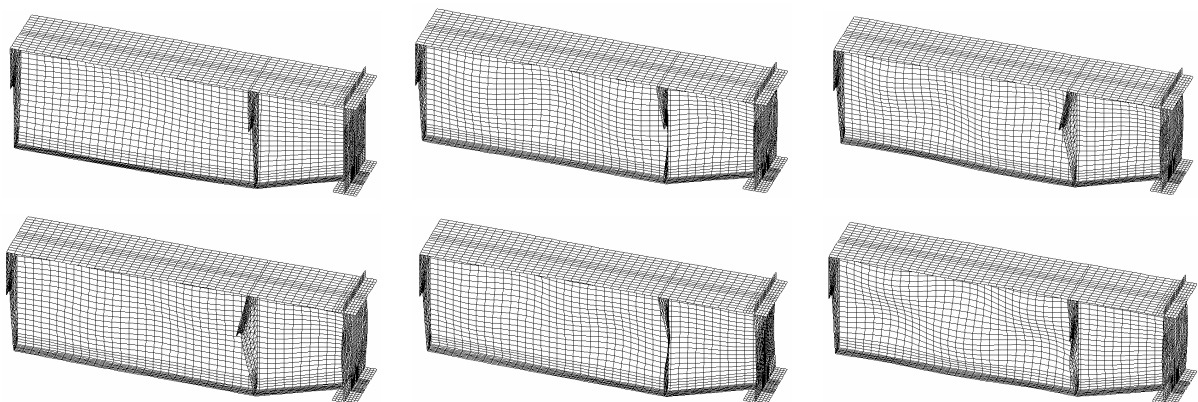
Obr.8 Pole redukovaných napätí na hornej strane pri rovnomernej obojstrannej korózii 1 mm so sieťou

Výpočtom využitím MKP boli pre jednotlivé prípady zistené nasledovné extrémne hodnoty redukovaných napätí:

- | | |
|-----------------|---------------------------------------|
| a) horná strana | $\sigma_{r,max} = 213,5 \text{ MPa},$ |
| spodná strana | $\sigma_{r,max} = 237,5 \text{ MPa},$ |
| b) horná strana | $\sigma_{r,max} = 274 \text{ MPa},$ |
| spodná strana | $\sigma_{r,max} = 274 \text{ MPa},$ |
| c) horná strana | $\sigma_{r,max} = 234,8 \text{ MPa},$ |
| spodná strana | $\sigma_{r,max} = 248,5 \text{ MPa}.$ |

Extrémne hodnoty redukovaných napätí mali lokálny charakter a vyskytovali sa v mieste spojenia plechu dosky, stojiny rebra a stojiny bočného nosníka (nad podperou).

Vlastné tvary hlavných nosných prvkov môžu tiež výrazne prispieť k poznaniu možných deformácií. Pre vytvorenie predstavy uvádzame na obr.9 len niektoré vybrané vlastné tvary.



Obr.9 Vlastné tvary hlavného nosníka

NAPÄTIA V MIESTACH TENZOMETRICKÝCH SNÍMAČOV

Tenzometrické snímače pre prevádzkové merania boli naaplikované na hornú hradidlovú tabuľu na pásnicu štvrtého a siedmeho rebra zhora podľa obr.10.

Na obr.11 je zakreslená poloha tenzometrických snímačov a ich označenie na hornej hradidlovej tabuli.

Analytický výpočet bol vykonaný pre výšku vodného stĺpca 53 m. Hydrostatický tlak v miestach s naaplikovanými snímačmi je nižší, preto bolo potrebné určiť výpočtové hodnoty napätí pre jednotlivé snímače v týchto miestach. Pre štvrté rebro t.j. pre miesta aplikácie snímačov 2 a 3 je výška vodného stĺpca

$$h_{2,3} = (53 - 3,92 - 0,27 - 1,65) = 47,16 \text{ m}$$

a pre siedme rebro, t. j. miesta aplikácie snímačov 1,4 je výška vodného stĺpca

$$h_{1,4} = h_{2,3} + 1,65 = 48,81 \text{ m} .$$

Uvedeným hydrostatickým tlakom vodného stĺpca odpovedajú maximálne napätia na pásnici rebra

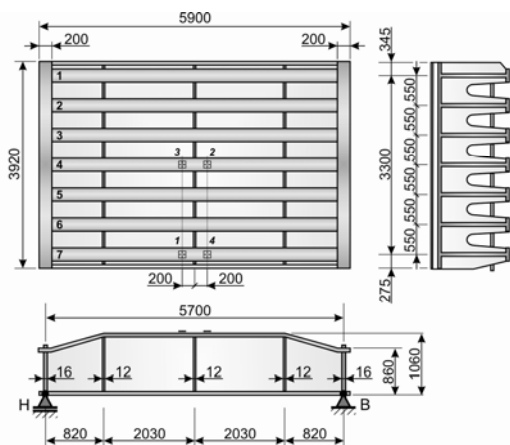
$$\sigma_{II \text{ štvrté rebro}} = -118 \text{ MPa} ,$$

$$\sigma_{II \text{ siedme rebro}} = -122,1 \text{ MPa} .$$

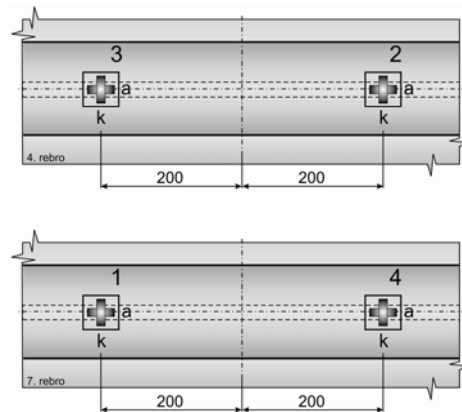
Pretože miesta aplikácie tenzometrických snímačov sú od osi symetrie tabule vzdialené 200 mm, budú v týchto miestach napätia od ohybového momentu nižšie ako maximálne a budú rovné

$$\sigma_{(2,3)} = \sigma_{II(2,3) \text{ štvrté rebro}} = 117,7 \text{ MPa} , \quad \sigma_{(1,4)} = \sigma_{II(1,4) \text{ siedme rebro}} = 121,8 \text{ MPa} .$$

Hodnoty napätí $\sigma_{(2,3)}$ a $\sigma_{(1,4)}$ zodpovedajú menovitej maximálnej výške vodnej hladiny, menovitým hrúbkam nosných prvkov hornej hradilovej tabule a tiež materiálovým charakteristikám odpovedajúcim materiálu, ktorý je udaný výkresovou dokumentáciou.

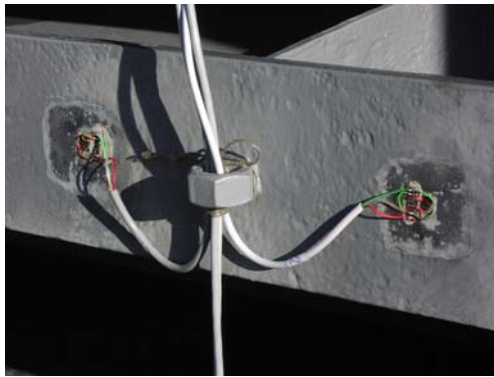


Obr.11 Horná hradilová tabuľa – miesta aplikácie tenzometrických snímačov a ich označenie



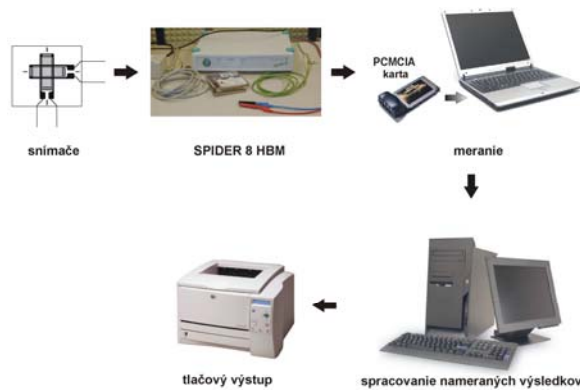
Obr.12 Miesta aplikácie tenzometrických snímačov na pásnici štvrtého a siedmeho rebra hradilovej tabule

Pre experimentálne určenie časových zmien napätí bola zvolená metóda odporovej tenzometrie. Tenzometrické meranie bolo vykonané pre zistenie časových zmien pomerných deformácií na štvrtom a siedmom rebre hradilovej tabule. Schéma umiestenia tenzometrických snímačov je na obr.12 a obr.13, kde boli naaplikované snímače HBM typu 10/120XY91 s konštantnou deformačnej citlivosti 2,07, ohmickou hodnotou $R=120 \Omega$ série 812000742/00 a so súčiniteľom dĺžkovej tepelnej rozťažnosti $\alpha = 10,8 \cdot 10^{-6} [^{\circ}C^{-1}]$.



Obr.13 Tenzometrické snímače na siedmom rebre pred zaizolovaním snímačov a po zaizolovaní snímača č.4

Teplotná kompenzácia bola realizovaná pri jednoosovej napätosti kompenzačným snímačom orientovaným v smere kolmom k smeru meranej pomernej deformácie. Aplikácia tenzometrických snímačov bola vykonaná dvojzložkovým tenzometrickým tmelom X60 a ochrana snímačov ochranným povlakom SG250 ako aj fóliou AM75 a SR-4.



Obr.14 Merací a vyhodnocovací reťazec

Pre prepojenie tenzometrov s meracími aparatúrami boli použité tienené káble. Snímače boli zapojené do polmostíkov a prepojené prostredníctvom 15 kolíkových konektorov s tenzometrickou aparatúrou. Merací reťazec pozostával z tenzometrickej aparatúry SPIDER 8 a notebooku. Schéma meracieho reťazca spolu s vyhodnocovacím reťazcom pre spracovanie nameraných údajov je na obr.14.



Obr.15 Zaizolované tenzometrické snímače na hradidlovej tabuli

Na hradidlovej tabuli boli tenzometre naaplikované symetricky vzhľadom k vertikálnej osi hradidlovej tabule. Dva snímače oproti sebe na každej strane od osi symetrie sú kvôli vylúčeniu prípadnej poruchy niektorého snímača z dôvodu pomerne veľkej hĺbky ponorenia snímača pod hladinu vody, ale i z dôvodu nebezpečia poškodenia snímača počas manipulácie žeriavom s tabuľou pred realizáciou vlastného merania.

Ako vyplýva z teórie mostíkového zapojenia snímačov pre meranie napätia, zdanlivé deformácie od teploty sú kompenzované kompenzačným tenzometrom v druhej vetve mostíka. Naaplikované, pripojené a zaizolované snímače na rebrách sú na obr.15.

Pre určenie časových zmien pomerných deformácií a teda aj napätí bola zvolená nasledovná metodika merania.

Po pripojení tenzometrických snímačov k tenzometrickej aparatúre a ich vyvážení bola hradidlová tabuľa prenesená žeriavom (pozri obr.16) nad šachtu a spustená do nej. V priebehu prenosu a spúšťania hradidlovej tabule bola zapnutá tenzometrická aparatúra a boli zaznamenané priebehy napätí, ktoré počas premiestnenia a spúšťania nepresiahli jednotky MPa.



Obr.16 Prenos a spúšťanie hradidlovej tabule

Celý proces transportu hradidlovej tabule ako aj založenia hornej hradidlovej tabule do hradiacej polohy tvorí súbor nameraných dát, uložený ako meranie č. 1. So zreteľom na hodnoty napätí v miestach meraní možno považovať namerané údaje za nepodstatné. Toto meranie, ako už bolo uvedené vyššie, slúžilo len k sledovaniu funkčnosti tenzometrov počas manipulácie s tabuľou a jej ukladania do miesta hradenia. Po uložení hornej hradidlovej tabule bola ukončená príprava na vlastné meranie pri predpokladanom maximálnom zaťažení hradidlových tabúl.

Pretože vtokové kanály boli už v tomto čase vypustené, po nadvihnutí tabule rýchlozáveru do plniacej polohy došlo k výtoku vody, ktorá bola medzi rýchlozáverom a hradidlovými tabuľami, čím hradidlové tabule začali byť namáhané hydrostatickým tlakom na ohyb a šmyk. Uvedené meranie bolo označené ako meranie č. 2 a priebehy napätí sú zaregistrované pod označením meranie č. 2.

Po spustení rýchlozáveru do spodnej (uzavretej) polohy bol otvorený ventil na plnenie priestoru medzi hradidlovými tabuľami a rýchlozáverom. Postupné napĺňanie vodou uvedeného priestoru vyvolalo vyrovnanie hydrostatického tlaku v priestoroch pred a za hradidlom, čo spôsobilo návrat do stavu nulového namáhania tabule. Uvedené meranie bolo označené ako meranie č. 3 a jeho ďalší popis je uvedený vo vlastnom vyhodnotení merania.

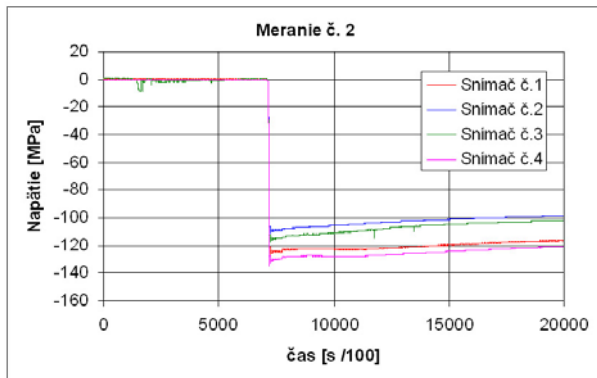
Vypočítané hodnoty napätí zreteľne dokazujú, že deformácie sú pružné a tento fakt potvrdili aj merania návratom údajov tenzometrických aparátúr na nulové hodnoty. Takmer dokonalá zhoda medzi nameranými a vypočítanými hodnotami napätí potvrdzuje správnosť prístupov k riešeniu. I to bol dôvod prečo nebolo potrebné uvedený experiment opakovať viackrát.

Ako už bolo uvedené pre ďalšie posúdenie konštrukcie hradidlových tabúl a ich spoľahlivú funkciu bolo nevyhnutné vykonať tenzometrické merania pri vypustení vody z priestoru medzi hradidlovými tabuľami a rýchlozáverom (čo simuluje maximálnu hodnotu prevádzkového namáhania) a pri opätovnom naplnení uvedeného priestoru (čo simuluje úplné odľahčenie hradidlových tabúl). Práve tieto dva prevádzkové stavy umožňujú jednoznačné posúdenie pevnosti hradidlových tabúl zo statického i časovo premenného namáhania.

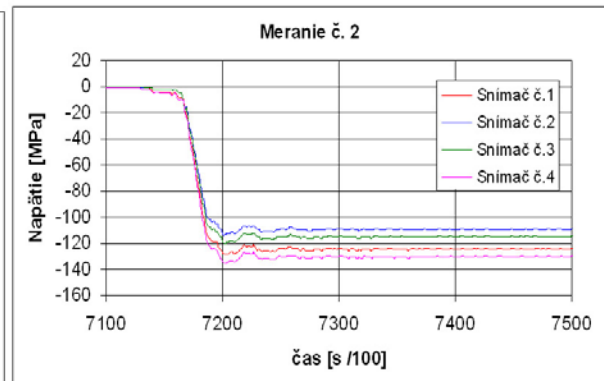
Pre posúdenie statických a dynamických zložiek namáhania ako aj ich vplyvu na životnosť a spoľahlivosť bolo potrebné analyzovať proces úplného zaťaženia a opätovného odľahčenia. Tieto procesy sú dokumentované meraniami číslo 2 a číslo 3.

Meranie č. 2 sa realizovalo po zasunutí hradidlových tabúl do polohy hradenia pri uzavretom rýchlozávere. Celý proces merania v tejto polohe hradidlových tabúl je zaznamenaný na obr.17.

Tento proces merania znázornený na diagrame časových závislostí napätí v miestach 1 až 4, dokumentuje mimoriadne rýchly nárast napätí po otvorení rýchlozáveru do plniacej polohy.

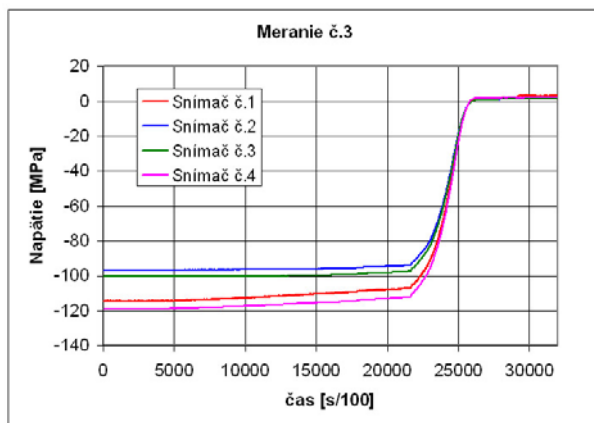


Obr.17 Priebeh napätí pri zdvihnutí tabule rýchlozáveru do plniacej polohy



Obr.18 Priebeh napätí pri zdvihnutí tabule rýchlozáveru do plniacej polohy – časový výrez

Snímače č. 1 a č. 4 sú na spodnom (siedmom) rebre hornej hradidlovej tabule, kým snímače č. 2 a č.3 sú na štvrtom rebre tejto tabule. Na obr.18 sú v inom časovom merítke znázornené časové priebehy napätí ktorými možno presnejšie dokumentovať dynamiku uvedeného javu.



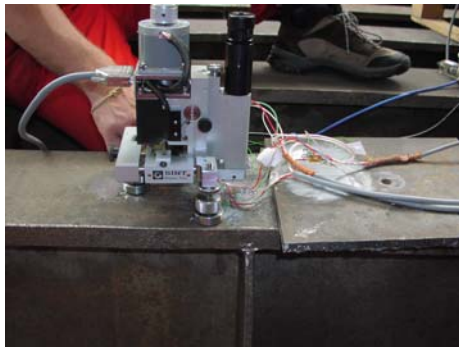
Obr.19 Priebeh napätí po zatvorení tabule rýchlozáveru a naplnení priestoru medzi hradidlovou tabuľou a tabuľou rýchlozáveru vodou

Ďalšie meranie označené ako meranie č. 3 bolo realizované nasledovne. Po uzavretí rýchlozáveru – jeho spustení na prah došlo k plneniu priestoru medzi hradidlovými tabuľami a tabuľou rýchlozáveru. Časový priebeh merania je zachytený na obr.19. Po uplynutí 50 sekúnd od zahájenia merania sa začal prejavovať vplyv plnenia a napätia sa postupne zmenšovali v absolútnej hodnote po ekvidištantách odpovedajúcich jednotlivým miestam merania. Približne v čase 220 sekúnd došlo k radikálnemu poklesu napätí, čo pokračovalo až do okamžiku vyrovnania hydrostatických tlakov pred a za hradidlovou tabuľou. Tento proces bol mimoriadne plynulý a ani vzduchové bubliny uvoľňované po vyrovnaní tlakov nezmenili charakter pozvoľných zmien napätí.

Určenie zvyškových napätí meracím systémom SINT MTS-3000 s využitím programu Restran

Zvyškové (reziduálne) napätia v materiáli sú napätia, ktoré existujú v objekte bez toho, aby bol zaťažený vonkajšími silami. Bežnou príčinou týchto napätí je výrobný proces alebo predchádzajúce zaťaženie. Ďalším bežným zdrojom týchto napätí je oprava, alebo prestavba konštrukcie. Veľmi často majú zvyškové napätia škodlivý účinok, čo možno dokumentovať na mnohých prípadoch v ktorých tieto napätia boli hlavným príspevkom k únave a iným degradáciám štruktúry v prípade ak sa prevádzkové napätia superponovali s už spomínanými zvyškovými napätiami.

V súčasnosti hardvérové a softvérové vybavenie, ktoré má k dispozícii pracovisko riešiteľov, umožňuje aj meranie zvyškových napätí premenných po hrúbke.



Obr.20 Merací systém SINT MTS-3000

Merací systém SINT MTS-3000 (obr.20) je zariadenie, ktoré sa využíva na vŕtanie presných otvorov pomocou mechanického odvrtávacieho a optického centrovacieho systému, ako aj na meranie priemeru vyvŕtaného otvoru a jej polohy voči referenčným bodom.

Kontrola operácie a získavania dát je ovládaná pomocou špeciálneho softvéru, vstupno/výstupnej karty a elektronického zariadenia. Všetky funkcie sa vyberajú pomocou grafických panelov a softvérových tlačidiel.

Každé z nich má špecifickú funkciu, ktorá je opísaná v grafickom paneli. Vŕtanie otvoru môže byť:

- so sekvenciou krok po kroku,
- s automatickou sekvenciou.

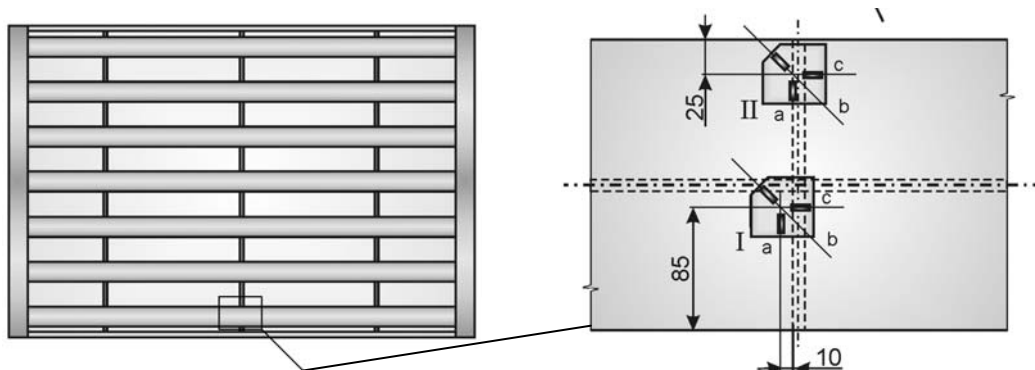
Vyhodnotenie napätí môže byť realizované:

- optimalizáciou dát ohľadom namáhania a hĺbky získaných počas operácie odvrtávania,
- výpočtom zvyškových napätí.

Pre každý krok existuje odporúčaný štandardný postup, ktorý softvér vykonáva ako prednastavený, pokiaľ nie je špecifikované inak. Systém umožňuje veľký počet krokov odvrtávania s vysokou presnosťou. Minimálny referenčný počet krokov odvrtávania podľa ASTM E 837 je 8, ale odporúča sa 20 krokov aj viac. Je vhodné postupovať v každom kroku aspoň o 0,015mm hĺbky kvôli výraznejším prírastkom hodnôt napätí, meraných počas jednotlivých krokov odvrtávania. Pre výpočet zvyškových napätí ponúka softvér nasledovné metódy:

- metódu podľa normy ASTM E 837-01,
- integrálnu metódu,
- metódu Power Series,
- Kockelmannovu metódu.

Tenzometrické ružice boli naaplikované na hradidlovej tabuli v miestach podľa obr.21.



Obr.21 Umiestnenie a polohovanie ružíc RY 21 na pásnici vystužného rebra doskovej tabule

Na spracovanie signálu tenzometrov bola použitá tenzometrická aparátúra SPIDER – 8 firmy HBM. Pre meranie boli použité tenzometrické snímače – ružice 3/120 RY 21 s ohmickou hodnotou 120 Ω , so súčiniteľom deformačnej citlivosti $k = 2,09$, série 81 2002149/00.

Zvyškové napätia určené metódou ASTM dosahovali v mieste I hodnotu 34 MPa a v mieste II hodnotu 31,4 MPa.

Záver

Maximálne normálové napätia 133 MPa od ohybového momentu resp. šmykové napätia 91,6 MPa od posúvajúcej sily určené analytickým výpočtom v miestach spodného rebra spodnej hradidlovej tabule sú dobrou garanciou jej správnej a spoľahlivej funkcie. Kontrola namáhania tabule v zmysle súčasne platnej normy STN 73 1401 pre namáhanie na ohyb, šmyk a tiež kontrola priečných výstuh i zvarov jednoznačne preukázali, že konštrukcia hradidlovej tabule umožňuje spoľahlivú a bezpečnú prevádzku.

Analytickým výpočtom bolo preukázané, že plastická deformácia pásnice rebra hornej hradidlovej tabule spôsobuje zvýšenie napätia približne o 2%, čo sa takmer neprejaví na jej spoľahlivej prevádzke pri súčasných hladinách namáhania. Na druhej strane bolo doporučené vykonať kontrolu zvarových spojov v miestach, ktoré mohli byť porušené v súvislosti s touto deformáciou. Doporučenú kontrolu zvarov zabezpečovala nezávislá organizácia.

Na základe analytického výpočtu riešiteľa dospeli k záveru, že plastická deformácia pásnice hradidlových tabúl bola pravdepodobne spôsobená pri manipulácii a nie prevádzkovým namáhaním (hydrostatickým tlakom vody).

Numerická analýza napätí a deformačných polí jasne dokumentuje, že v miestach koncentrátorov hladiny napätí dosahujú úroveň medze klzu materiálu, avšak po vykonaní kontroly zvarov v definovaných miestach a potvrdení, že tieto zvary nie sú porušené resp. sú opravené, možno jednoznačne odporučiť jej ďalšie prevádzkovanie.

Zohľadnenie rovnomerných korózných úbytkov na nosných prvkoch hradidlových tabúl dokumentuje výrazný nárast napätí. Modelovým výpočtom bola riešená obojstranná korózia hrúbky 1 mm. Napätia v miestach najväčších koncentrátorov vzrástli vo vzťahu k medzi klzu o 15 %, avšak so zreteľom na použitý materiál disponujúci s relatívne vysokou plasticitou z hľadiska bezpečnej a spoľahlivej funkcie zariadenia nemožno túto skutočnosť považovať za limitujúcu.

Za mimoriadne závažnú možno považovať skutočnosť, že hladiny zvyškových napätí určené podľa ASTM 837-01 v hradidlovej tabuli neprekročili 34 MPa, čo pri vypočítaných ale i experimentálne potvrdených hodnotách napätí zistených pri meraniach zabezpečí úplnú spoľahlivosť konštrukcie.

Maximálna nameraná hodnota napätia pri najvyššom zaťažení dosiahla 135 MPa. So zreteľom na skutočnosť, že spodná tabuľa (a jej siedme rebro) je vystavená ešte vyššej hodnote hydrostatického tlaku, maximálne nameraná hodnota by so zreteľom na výšku hladiny kvapaliny dosiahla hodnotu 146,6 MPa.

Časové priebehy napätí a z nich vyplývajúce informácie o statických a dynamických zložkách dokumentujú, že amplitúdy napätí neprekračujú 5,5 MPa.

Podľa údajov prevádzkovateľa počet manipulácií s hradidlovými tabuľami analogických operáciám pri vlastnom tenzometrickom meraní – zaťažení, ale i odľahčení neprekračuje 3 až 4 ročne. Ak uvážime, že zariadenie je v prevádzke (podľa prevádzkovateľa) od roku 1972 potom za 32 rokov bolo uvedených manipulácií vykonaných $n = 32 \times 4 = 128$.

V kapitole 8 normy STN 73 1401 je uvedený postup posudzovania nosnej konštrukcie na únavu (v odstavci 8.2 sú uvedené prípady, kedy sa toto posudzovanie nevyžaduje a hradidlová tabuľa tieto požiadavky jednoznačne napĺňa). Súvisí to i s doterajším počtom manipulácií, ale aj s časovým priebehom napätí, ktoré boli určené tenzometrickým meraním. Pre počty cyklov zaťaženi do 10^3 je posúdenie vykonávané ako pri statickom zaťaženi. So zreteľom na použité materiály a hodnotu hladín napätí podmienka pevnosti je splnená.

Na základe podrobných analytických a numerických výpočtov a ich experimentálnej verifikácie ako aj na základe určenia hladín zvyškových napätí so zreteľom na históriu zaťažovania (ale aj so zreteľom na diagnostiku zvarov a nameraných skutočných hrúbok nosných prvkov dodaných objednávatelom) možno konštatovať, že tabule provizórneho hradenia vtokov pevnostne vyhovujú a ich ďalšie prevádzkovanie je možné bez akýchkoľvek obmedzení pri súčasnej geometrii i so zreteľom na už existujúcu plastickú deformáciu pásnice. Limitovanie doby prevádzky môže byť vyvolané len výraznejšou koróziou, ktorá pri súčasnej existujúcej ochrane nemá opodstatnenie. Tabule provizórneho hradenia sú z hľadiska pevnosti v plnom rozsahu schopné ďalšej prevádzky.

Literatúra:

- [1] Juhas, P.: *STN 73 1401 Navrhovanie ocelových konštrukcií*. UNMS, Bratislava 1998
- [2] Trebuňa, F. et. al.: *Expertíza tabúl' provizórneho hradenia vtokov TG 1 a TG 2 vo VE Ružín I*, Priebežná správa TU SjF Košice, September 2004
- [3] Saga, M., Vavro, J., Kopecký, M.: *Počítačová analýza a syntéza mechanických sústav*. ZUSI, Žilina, 2002
- [4] *ASTM E 837-01 Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole Drilling Strain-Gage Method*. New York, 2001
- [5] Trebuňa, F. et. al.: *Expertíza tabúl' provizórneho hradenia vtokov TG 1 a TG 2 vo VE Ružín I*, Záverečná správa TU SjF Košice, December 2004