

Experimentálna Analýza Napätí 2003

EXPERIMENTAL - COMPUTING APPROACH TO SOLVE BREAK DOWN OF BODY OF EMERGENCY GATE IN THE HYDRO-ELECTRIC POWER PLANT

EXPERIMENTÁLNO - VÝPOČTOVÝ PRÍSTUP K RIEŠENIU HAVÁRIE TELESÁ RÝCHLOUZÁVERU VO VODNÝCH ELEKTRÁRNACH

František Trebuňa^{*}, Bigoš Peter^{**}, Vladimír Jurica^{***}, Juraj Ritók^{****}, Jozef Bocko^{*****}

This contribution deals with crash analysis of rib tables of quick operating valves in hydro-electric power plants. It contains theoretical stress analysis of tables and solution by means of FEM and by experimental methods. A method of routing is applied to determine the residual stresses.

Keywords

Plate with ribs, failure, strain-gage measurements, finite, element method, determination of life time

Rebrová dosková konštrukcia, havária, tenzometrické merania, metóda konečných prvkov, určenie životnosti

ÚVOD

Po preštudovaní zápisov a vizuálnej obhliadke plasticky zdeformovaného telesa tabule rýchlouzáveru bolo konštatované, že pre expertízu príčin havárie okrem vyššie uvedených informácií je nutné vykonať nasledovné kroky :

- Namodelovať nosnú časť doskového telesa pre analýzu napätosti metódou konečných prvkov s presnou formuláciou okrajových podmienok.
- Vykonať výpočet metódou konečných prvkov a vykresliť napäťové polia i polia redukovaných napätí pre výpočtový model.
- V prípade vysokých hladín napätí (ak úroveň redukovaných napätí sa blíži resp. prekračuje medzu klzu materiálu), vykonať výpočet metódou konečných prvkov aj so zreteľom na pružne plastické deformácie.
- Znázorniť prípadné miesta pružneplastických deformácií a vykresliť polia redukovaných napätí po zohľadnení pružneplastických deformácií.
- Stanoviť vnútorné pnutia v materiály rýchlouzáveru metódou odvítavania v súlade s postupom TECHNOT 503 – 4, resp. podľa normy ASTM E 837.
- Superpozíciou jednotlivých účinkov posúdiť vhodnosť konštrukcie pre prácu v definovaných podmienkach.
- Zohľadniť rovnomerný úbytok hrúbky materiálu koróziou.
- Na základe poznatkov z expertízy vypracovať návrh nového doskového telesa uzáveru.
- Po vykonaní výpočtu nového telesa rýchlouzáveru posúdiť jeho vhodnosť z hľadiska pevnostnej analýzy.

^{*}Prof. Ing. František Trebuňa, CSc., Doc. Ing. Vladimír Jurica, CSc., Doc. Ing. Jozef Bocko, CSc., Katedra aplikovanej mechaniky a mechatroniky, Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta, Letná 9, 041 87 Košice E-mail: frantisek.trebuna@tuke.sk,

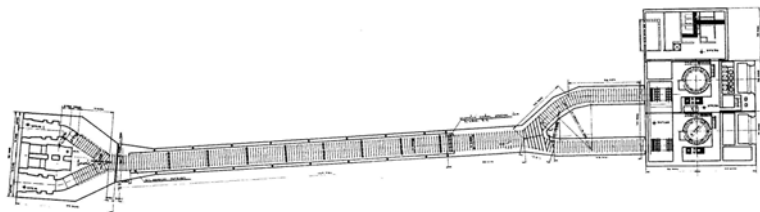
^{**} Prof. Ing. Peter Bigoš, CSc., Ing. Juraj Ritók, PhD., Katedra konštruovania, dopravy a logistiky, Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta, Letná 9, 041 87 Košice E-mail: peter.bigos@tuke.sk,

- V miestach extrémneho namáhania konštrukcie, ak je uvedené miesto vhodné z hľadiska aplikácie daných typov tenzometrov ale i vedenia signálu od snímačov tlenenými káblami k meracej aparátúre, naaplikovať tenzometrické snímače v počte nutnom pre verifikáciu výpočtu ale i pre určenie časových zmien napätí nevyhnutných pre posúdenie životnosti telesa rýchlostného zariadenia.
- Pre známe materiálové charakteristiky určené z príslušných noriem pre použitý typ materiálu a tenzometrickým spôsobom určené pomerné deformácie v prípade jednoosovej i viacosovej napätosti určiť zložky napätosti resp. redukované napätia ako časové zmeny pri jednotlivých činnostiach rýchlostného zariadenia.
- Pre známe časové priebehy napätí podľa vhodných teórií kumulácie únavového poškodenia určiť životnosť doskovej tabule rýchlostného zariadenia.

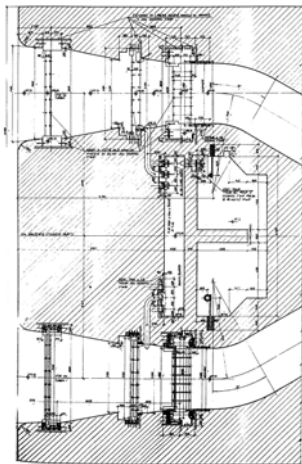
Pri riešení otázok zistenia príčinných súvislostí havárie rýchlostného zariadenia sa vychádzalo z najnovších poznatkov, dostupných prístrojových, hardvérových a softvérových možností pracoviska a skúseností z riešenia niekoľkých desiatok havárií technických zariadení v priemyselnom zázemí fakulty a univerzity. Pre potvrdenie správnosti postupu pri riešení úlohy bola navrhnutá metóda verifikácie výsledkov modelovej analýzy, tvaru lokálnych plastických deformácií v kritickom uzle a tiež metóda experimentálnej napäťovej analýzy, ktorá umožní zaregistrovať nielen statické, ale i dynamické zložky namáhania v telese rýchlostného zariadenia pri jeho prevádzke.

POPIS KONŠTRUKCIE DOSKOVÉHO RÝCHLOUZÁVERU

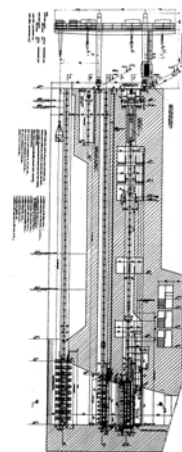
Kvôli názornosti v príspevku je uvedený len pôdorys prírodného potrubia (pozri obr.1) ako aj miesto rýchlostného zariadenia vo vodnom diele (pozri obr.2). Na obr.3 je poloha rýchlostného zariadenia vo vertikálnom reze.



Obr. 1 Pôdorys prírodného potrubia



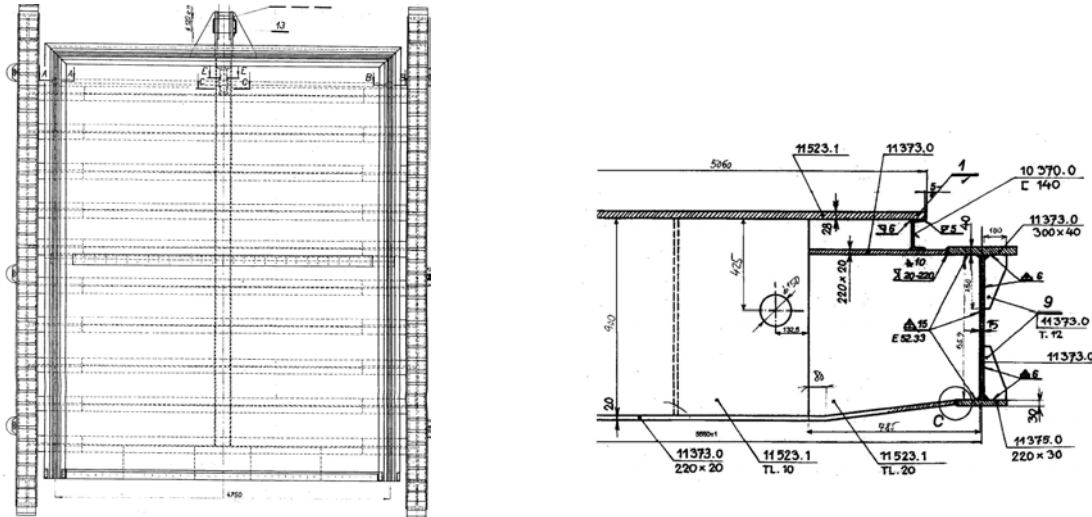
Obr. 2 Detail miesta rýchlostného zariadenia



Obr.3 Rýchlostný zariadenie

Medzi základné skupiny rýchlostného rýchlouzáveru patrí tabuľa rýchlouzáveru o hmotnosti cca 24 270 kg a podvozok o hmotnosti 4 138 kg.

Pre pevnostnú kontrolu tabule rýchlouzáveru so zreteľom na možnosti namodelovania a dosiahnutia požadovanej presnosti výsledkov výpočtu, bolo nutné poznať rozmery jednotlivých prvkov a údaje o použitých materiáloch. Tieto základné údaje sú na obr. 4.



Obr.4 Dosková tabuľa rýchlouzáveru

Po uzatvorení vtokov rýchlouzávermi bola plánovaná revízia rýchlouzáveru. Pootvorením rozvážacieho kola turbíny na cca 5% sa potrubie vyprázdnilo a potom ním pretekali iba priesaky cez rýchlouzáver. Došlo teda k úplnému uzatvoreniu rýchlouzáverov. Rýchlouzávery boli tiež zabezpečené proti nedovolenej manipulácii. Následne po rázovitom prasknutí v šachte sa začalo zatápať potrubie a vtoková veža. To nastávalo i napriek tomu, že rozvážacie kolo turbíny bolo stále pootvorené. Rýchlosť plnenia bola asi dvojnásobná oproti normálnemu plneniu cez rýchlouzáver v plniacej polohe. Po naplnení potrubia boli vtoky zahradené provizórnymi hradidlami a po následnom opätovnom vyprázdnení potrubia, bola vykonaná revízia rýchlouzáveru. Pri prehliadke rýchlouzáveru nebolo možné so zreteľom na provizórne zahradenie dostatočne skontrolovať veľkosť priesakov a tesnenie uzáveru okolo rámu hradidiel. Bolo tiež zistené, že celá tabuľa po celej dĺžke z oboch strán uzáveru je zdeformovaná.

Na základe výsledkov prehliadky bolo konštatované:

- Rýchlouzáver je neopraviteľný vzhľadom k deformáciám a skorodovaniu spôsobenému dlhoročnou prevádzkou. Prehliadkou nebolo možné určiť príčinu deformácie rýchlouzáveru.
- Vzhľadom k rozsahu poškodenia rýchlouzáveru je nutné určiť príčinu jeho poškodenia a navrhnúť opatrenia na zabezpečenie bezpečnej funkcie rýchlouzáveru.
- Musí byť vykonaná demontáž rýchlouzáveru a jeho vytiahnutie zo šachty.
- Montáž a prevádzka nového rýchlouzáveru vyžaduje repasáciu vedenia a tesniaceho rámu rýchlouzáveru.

Po demontáži rýchlouzáveru a jeho obhliadke boli vykonané nasledovné práce:

- Odoberanie vzoriek materiálu k expertíze z poškodenej tabule rýchlouzáveru.
- Vykonanie kontroly zvarov hradidiel.

Na základe získaných informácií kolektív riešiteľov sa rozhodol pre nasledovný postup prác pri riešení úlohy, so zreteľom na mimoriadnu udalosť :

- určiť numerickými metódami napätosť v pôvodnej tabuli, pri menovitých rozmeroch,
- určiť napätosť v tabuli pri rovnomernej korózii a vzniknutej malej nespojitosti,
- výpočtom zohľadniť i pružneplastické deformácie,
- experimentálne overiť veľkosť zvyškových napätí v tabuli,
- zistiť základné mechanické charakteristiky materiálov tabule,
- vysloviť závery vyplývajúce z analýzy príčin.,
- vykonať výpočet napätí pre zmeny navrhnuté v konštrukcii tabule.

Kvôli zisteniu výslednej napätosti a určeniu pravdepodobnej príčiny vzniku havárie rýchlostného rýchlouzáveru, bolo riešiteľským kolektívom navrhnuté uplatniť metódu odvíťavania pre určenie vnútorných (zvyškových) pnutí v materiáli, z ktorého bola vyrobená tabuľa rýchlouzáveru.

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. Vo všeobecnosti všetky výrobné postupy vyvolávajú vo vyrábanom objekte zvyškové napätia. V niektorých prípadoch zvyškové napätia vznikajú počas života konštrukcie pri montáži alebo pri prípadných preťaženiach, alebo medzných zaťaženiach pôsobiacich na integrálnu časť konštrukcie.

Zvyškové napätia môžu mať priaznivý alebo škodlivý účinok, ktorý závisí od veľkosti, znamienok a rozdelenia napätí vo vzťahu k napätiam vyvolaným zaťažením. Veľmi často však 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. Zvláštny nebezpečný aspekt zvyškových napätí je v tom, že ich prítomnosť je vo všeobecnosti neznáma a že donedávna neexistovali metódy ich merania bez toho, aby bola porušená celistvosť prvku vyšetrovanej štruktúry. Pre meranie zvyškových napätí snímačmi musia byť tieto nejakým spôsobom uvoľnené, takže snímače registrujú zmenu deformácie vyvolanú odstránením napätia. Snímače deformácie vhodne umiestnené pred vyrezaním, či uvoľnením vyšetrovanej časti, reagujú úmerne deformácii, ktorá vzniká zaniknutím zvyškových napätí. Počiatočné zvyškové napätie je z nameraných deformácií určené za predpokladu, že sú pružné.

Najpoužívanejšou technikou pre meranie zvyškových napätí je odporová tenzometrická metóda pre určovanie uvoľnených napätí v okolí odvíťaného otvoru.

Pre meranie bola použitá ružica 1 RY 21 – 3/120. Ružica pre meranie zvyškových napätí s tromi tenzometrami $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ s teplotnou kompenzáciou pre oceľ so súčiniteľom teplotnej rozťažnosti $\alpha = 10,8 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Príprava povrchu pre inštaláciu ružíc je v podstate štandardná. Podmienky by mali byť rešpektované hlavne pri obrusovaní povrchu skúšaného objektu, pretože brúsenie môže zmeniť počiatočný stav zvyškových napätí. Vo všeobecnosti možno povedať, že je dôležité vykonať všetky prípravy povrchu a proces inštalácie v najvyššej kvalite, aby bolo umožnené presné meranie malých deformácií typických pri metóde odvíťavania. Ako je zrejmé z údajov pri kalibrácii, sú uvoľnené deformácie zodpovedajúce veľkosti daného zvyškového napätia značne nižšie ako deformácie získané konvenčnou mechanickou skúškou pre tú istú úroveň napätia. Pretože merané deformácie sú malé, každá odchýlka, alebo nepresnosť pri indikovaní výstupu zo snímača, či v dôsledku nesprávnej inštalácie snímača, nestability aparatury, alebo z iných príčin má vážny vplyv na vypočítané zvyškové napätia.

Pre ružice na meranie zvyškových napätí sa nevyžaduje špeciálne prístrojové vybavenie. Keď sa meranie má vykonať v teréne je spravidla najefektívnejšou a vhodnou prenosná statická aparátúra napájaná batériou, doplnená precíznou prepínacou a vyvažovacou jednotkou. Model P-3500 tenzometrickej aparátúry a SB10 prepínacia a vyvažovacia jednotka sú ideálne pre tento typ použitia. Špeciálny off-line počítačový program (RESTRESS) automaticky vykonáva procedúry súvisiace s výpočtom veľkostí zvyškových napätí v súlade s ASTM E 837. Báza dát pre program obsahuje hodnoty koeficientov $\bar{a}$ a $\bar{b}$ pre priechodzí otvor aj pre slepý otvor a pokrýva celý rozsah odporúčených rozmerov otvorov aplikovateľných pre všetky ružice zvyškových napätí firmy Micro-Measurements a HBM.

Už Rendler a Vigness pozorovali, že „presnosť metódy (odvrtavania), pre jednotlivé prípady aplikácií, je v bezprostrednom vzťahu k schopnosti operátora umiestniť vŕtací nástroj precízne do stredu ružice deformácie“. Novšie štúdie kvantifikovali chybu vypočítaného napätia v dôsledku excentricity otvoru. Napríklad pre otvor, ktorý je 0,025 mm mimo stred ružice chyba vypočítaného napätia neprevýšila 3% (pre jednoosovú napätosť). V praxi požadované precízne nastavenie do 0,025 mm je uskutočnené použitím odvrtavacieho zariadenia (RS-200) Milling Guide. Odvrtavacie zariadenie je pripojené k meranému objektu prilepením troch nožičiek rýchloschnúcim lepidlom. Do jednotky je potom inštalovaný mikroskop a vizuálne nastavenie je umožnené pomocou štyroch nastavovacích skrutiek v smeroch X–Y umiestnených na vonkajšej časti zariadenia.

Presnosť merania zvyškových napätí je, ako v každej inej forme experimentálnej analýzy napätosti, limitovaná presnosťou akou je určený modul pružnosti a Poissonove číslo. Typické nepresnosti týkajúce sa mechanických vlastností bežnej ocele sú v intervale 1% až 3% a teda menšou mierou prispievajú k možným chybám pri analýze zvyškových napätí. Omnoho väčšie chyby môžu byť vyvolané odchýlkami od predpokladov, ktoré so sebou prináša základná teória. Kľúčovým predpokladom sú napríklad lineárne pružné vlastnosti materiálu vyplývajúce z Hookeovho zákona a superpozícia napätí. Ak je závislosť medzi napätím a deformáciou nelineárna v dôsledku poddajnosti (popúšťania) alebo z iných príčin budú vypočítané zvyškové napätia chybné.

Ako je odporúčené v ASTM E 837 je vždy preferované vytváranie otvoru po malých prírastkoch hĺbky pri súčasnom zaznamenávaní deformácií a hĺbky otvoru po každom prírastku. Robí sa to za účelom získania údajov pre posúdenie, či zvyškové napätie je po hĺbke rozložené v podstate rovnomerne a teda či sú platné výpočty veľkostí napätí prostredníctvom koeficientov pre plnú hĺbku. Ak nie sú vykonané inkrementálne merania, nie je možné vysloviť záver, že napätie je rovnomerné a či vypočítané zvyškové napätia nie sú ovplyvnené chybou. V prípadoch, keď sa napätie po hĺbke mení, je vypočítané napätie vždy menšie, ako skutočné maximum.

V súčasnej dobe neexistuje absolútne kritérium pre overenie rovnomernosti napätia od povrchu skúšanej súčiastky až pre dno dovŕtaného otvoru. Inkrementálne údaje uvoľnených napätí v závislosti na hĺbke možno po určení rovnomerného rozdelenia napätia využiť dvoma rozdielnymi spôsobmi. Prvým z nich je výpočet percenta uvoľnenej deformácie pre každú hĺbku inkrementu a pre každý snímač ružice. Výsledné údaje sa môžu graficky znázorniť a porovnať s očakávaným pásom rozptylu. Ak sú vynesené body mimo pásma značí to, že napätia sú po hĺbke otvoru rozložené nerovnomerne. Na nešťastie táto skúška nie je veľmi presná a je zložitá interpretovať ju ako kritérium skutočnej zmeny napätia po hĺbke.

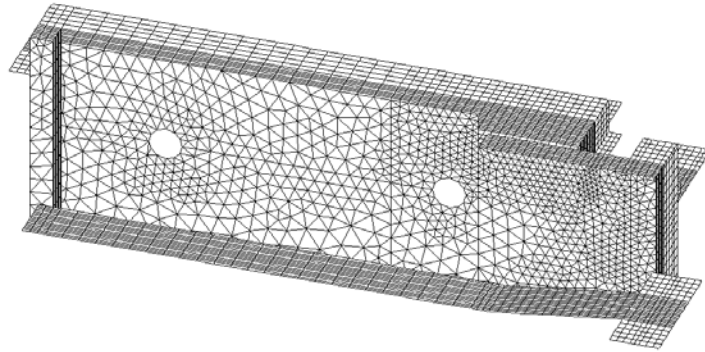
Z vyhodnotených výsledkov merania je zrejmé, že hodnoty hlavných zvyškových napätí dosahujú veľkosť $\sigma_1 = 67 \text{ MPa}$ a $\sigma_2 = 41 \text{ MPa}$, čo sú pomerne vysoké hodnoty hlavných normálových napätí. V ťahovej oblasti sa prevádzkové napätia na ne superponujú, čo zvyšuje pravdepodobnosť vzniku poruchy a pre túto časť výstužných rebier tabule sa javia ako nebezpečné.

URČENIE NAPŤOVÝCH POMEROV V TABULI RÝCHLOUZÁVERU

Výpočet napätosti v tabuli rýchlouzáveru bol vykonaný na pracovisku riešiteľov špičkovými programovými produktmi.

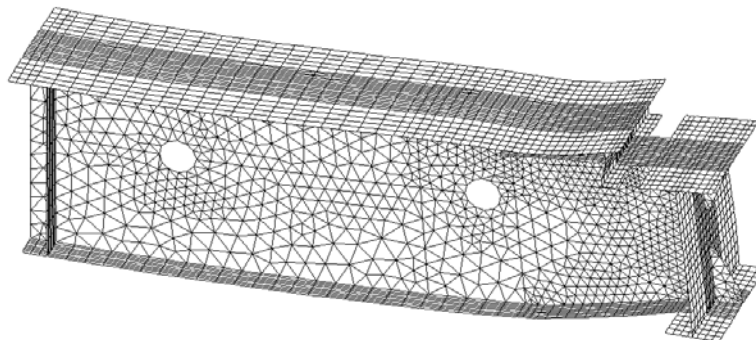
Rozmery nosných prvkov a materiály, z ktorých bola podľa dokumentácie tabuľa rýchlouzáveru vyrobená sú na obr.4. Pri výpočte napätí bolo uvažované s hydrostatickým tlakom vodného stĺpca o výške 51 metrov.

Rozdelenie nosnej časti výpočtového modelu na konečné prvky je na obr.5. Bola tu využitá symetria a časť nosnej konštrukcie bola rozdelená na 5842 konečných prvkov so 4939 uzlami.



Obr.5 Výpočtový model a delenie na prvky

Zdeformovaný tvar je na obr.6, detail na fotografii obr.7.

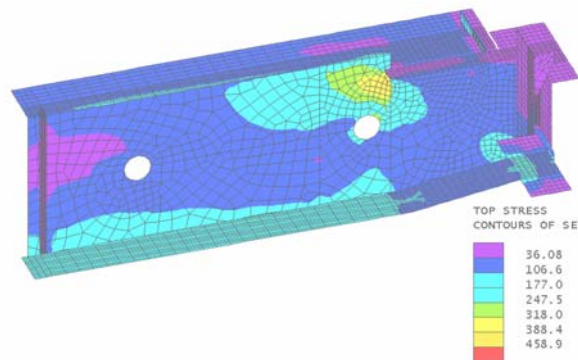


Obr.6 Zdeformovaný tvar



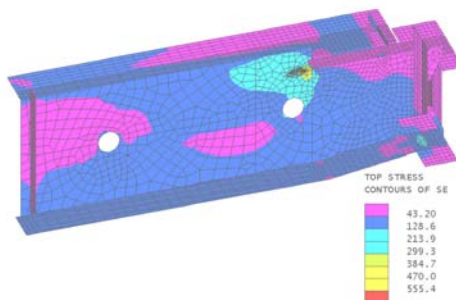
Obr. 7 Fotografia zdeformovanéhoU profilu

Na obr. 8 sú redukované hodnoty napätí podľa teórie HMM, z ktorých je úplne zrejmé, že v miestach koncentrátorov napätí, hodnoty redukovaných napätí už pri uplatnení lineárneho výpočtového modelu jasne dokumentujú vznik plastickej deformácie.

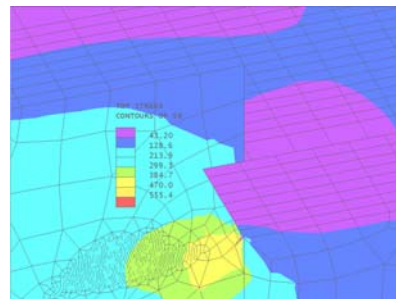


Obr.8 Polia redukovaných napätí

V ďalšej časti bol realizovaný výpočet, pri ktorom bola zohľadnená rovnomerná korózia do hĺbky 1 mm. Boli vymedzené oblasti, kde dochádza k vzniku plastickej deformácie. Výpočet bol realizovaný pre prípad, keď v mieste najvyššej koncentrácie by bola porucha, t.j. v dôsledku zaťaženia je koncentrátor napätia vyvolaný aj nespojitosťou. Na obr.9 sú polia napätí pre prípad uvedenej lokálnej nespojitosti t. j. so zohľadnením poruchy i rovnomerného úbytku hrúbky materiálu v dôsledku korózie do hĺbky 1 mm.



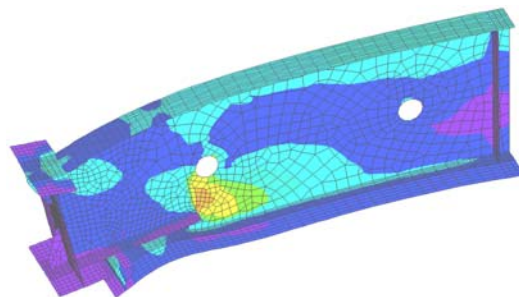
Obr.9 Pole napätí pri lokálnej poruche



Obr.10 Detail v okolí poruchy

Na obr. 10 je napät'ové pole v okolí tejto poruchy.

Na obr. 11 je fotografia zborštenia stojiny výstužného rebra tabule rýchlostného závěru. Porovnaním tejto fotografie s poľom napätia (obr.12) v odpovedajúcom mieste je zrejmé, že kritické miesto určené metódou konečných prvkov je identické s miestom lokálnej plastickej deformácie.



Obr.11 Miesto plastickej deformácie Obr.12 Napät'ové pole v mieste plastickej deformácie

Na obr. 13 je možné vidieť veľkosť lokálnej plastickej deformácie.



Obr.13 Detail lokálnej deformácie



Obr.14 Deformácie na ďalších rebrách

Obr.14 dokumentujeme, že lokálna plastická deformácia je na všetkých stojinách rebier tabule rýchlouzáveru. Podrobným výpočtom nosného prvku tabule rýchlouzáveru metódou konečných prvkov pre lineárny i pružneplastický výpočet bolo jednoznačne dokázané, že pri hydrostatickom tlaku vody o výške 51 m, daných rozmeroch a materiáloch musí dôjsť k vzniku plastickej deformácie v miestach koncentrácie napätí určených výpočtom. Pri rovnomernej korózii plechov ktorá zasahuje do hĺbky 1mm napätie v kritických miestach dosahuje medzi pevnosti materiálu a z toho jasne vyplýva, že návrh konštrukcie tabule so zreteľom na koncentratory napätí pre uvedené zaťaženie pevnostne nevyhovuje. Ak zohľadníme vplyv ťahových zvyškových napätí v stojine výstužného rebra, potom prekročenie medze klzu je úplne evidentné a bolo by len otázkou času, kedy by došlo k havárii. So zreteľom na viac ako 20% nižšiu hodnotu medze klzu materiálu, z ktorej je vyrobená stojina rebra (ako určuje norma), vznik plastickej deformácie je teda úplne samozrejímavý.

Z uvedeného dôvodu sme považovali za nevyhnutnú zmenu konštrukčného systému tabule rýchlouzáveru. Ak uvážime, že výška stojiny výstužných rebier je 900 mm, rozpätie 5550 mm, potom je zrejmé, že tu dochádza i k výraznému uplatneniu posuvných účinkov, ako na deformáciu, tak i na napätosť a potenciálnu energiu akumulovanú v tabuli dosky. Z rozboru napätosti je zrejmé, že k plastickej deformácii vyvolanej predchádzajúcou lokálnou stratou stability muselo dôjsť v dôsledku tlakových hlavných normálových napätí, čo jednoznačne potvrdzuje zbortenie stojiny a orientácia tohto zbortenia. Cesta riešenia tohoto problému je zvýšenie hrúbky stojiny v mieste koncentrátora (rebra i otvoru) resp. vystuženie otvoru, odstránenie koncentrátora a súčasne posunutie neutrálnej osi výstužných rebier zmenou hrúbky pásnice výstužného rebra, čím sa dosiahne zrovnomenenie namáhania celej tabule.

ZÁKLADNÉ MECHANICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLU TABULE RÝCHLOUZÁVERU

Základné mechanické vlastnosti materiálu tabule rýchlouzáveru boli zisťované na vzorkách vybraných zo stojiny výstužného rebra, ktorá podľa dokumentácie je vyrobená z materiálu 11 523.1. Vzorka bola odobratá z miesta stojiny výstužného rebra, pričom bol označený smer valcovania plechu.

Pre určenie mechanických vlastností materiálu U profilu bola odobratá vzorka z miesta spojenia hornej a spodnej časti tabule rýchlouzáveru.

Z dodaného materiálu boli vyrobené skúšobné tyče pre skúšku rázom v ohybe malých telies a skúšku jednoosovým ťahom. Pre skúšky ťahom boli použité tyče Tyč 6 x 30 STN 42 0316. Pre skúšku rázom v ohybe malých telies (vrubovej húževnatosti) boli použité

tyče Tyč STN 42 0381.5. Experimenty boli vykonané postupom uvedeným v príslušných normách.

Mechanické vlastnosti namerané na materiále stojiny rebra sú uvedené v tabuľke 1.

Tabuľka 1

Číslo vzorky	R_{eL}/R_{eH} [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]	Z [%]
1	276/285	510	32,3	62,0
2	278/285	511	31,3	60,5
3	276/283	510	32,3	61,1

Výsledky skúšky rázom v ohybe materiálu stojiny rebra sú uvedené v tabuľke 2.

Tabuľka 2

Číslo vzorky	KC [J]	KCV[J.cm ⁻²]
1	43	54
2	51	64
3	41	51

Mechanické vlastnosti namerané na vzorkách vyrobených z profilu U sú uvedené v tabuľke 3. Z profilu U boli odobraté tyče podľa STN 42 0319. Pre skúšky bola použitá tyč 5 x 20 x 50 STN 42 0319.

Tabuľka 3

Číslo vzorky	R_{eL}/R_{eH} [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]	Z [%]
1	289	412	27,4	49,4
2	280/314	428	39,4	53,0

Materiál stojiny rebra podľa výkresovej dokumentácie je plech hrúbky 10 mm akosti 11 523.1.

Podľa STN 41 1523 mechanické a technologické vlastnosti zaručované normou pri stave .1 pre hrúbku nad 3 mm a do hrúbky 16 mm(čo odpovedá použitej stojine), musia mať minimálnu medzu klzu 353 MPa. Nameraná minimálna hodnota medze klzu je 276 MPa, čo je takmer o 22% nižšia hodnota ako hodnota zaručovaná normou. Nameraná hodnota pevnosti odpovedá presne spodnej medzi, t. j. 510 MPa. Ťažnosť vyhovuje.

Podľa STN 41 1373 vlastnosti zaručované normou sú: minimálna medza klzu R_e = 235 MPa, pevnosť R_m = 363 – 441 MPa, čomu materiál U profilu plne vyhovuje.

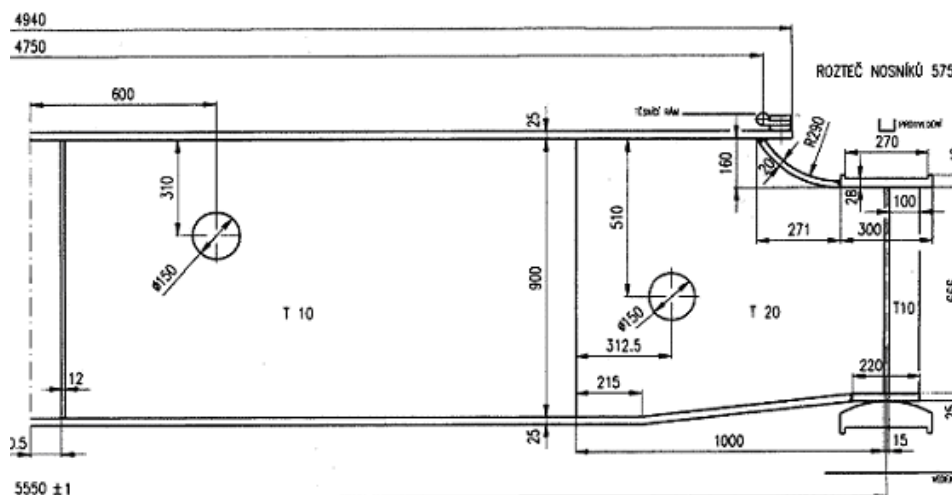
NOVONAVRHNUTÉ RÝCHLOUZÁVERU

KONŠTRUKČNÉ

USPORIADANIE

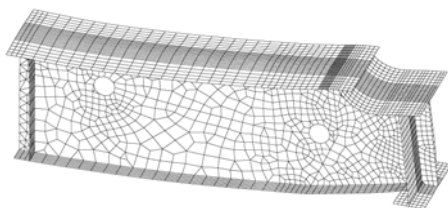
TABULE

Navrhnutá úprava konštrukcie tabule bola orientovaná na zmenu hrúbky stojiny výstužných rebier v miestach maximálnych posuvných účinkov z 10 na 20 mm, zmenu hrúbky pásnice výstužných rebier z 20 na 25 mm a zásadnú zmenu konštrukčného usporiadania v miestach, kde boli predtým U profily (pozri obr. 15).

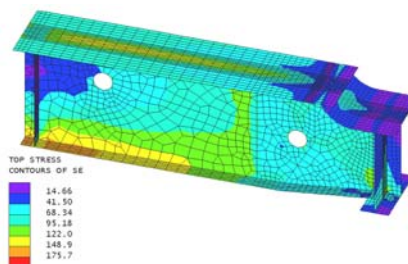


Obr. 15 Základné rozmery rebra tabule rýchlouzáveru

Výpočet bol vykonaný metódou konečných prvkov pri zachovaní okrajových podmienok a zaťažení v úplnej zhode s predchádzajúcim výpočtom (samozrejme pre menovité rozmery a bez uvažovania nespojitosti). Pri výpočte bolo použitých 5974 prvkov a 5981 uzlov. Deformácia novonavrhovanej konštrukcie je na obr. 16 a pole redukovaných napätí na obr. 17.



Obr.16 Deformácia rebra

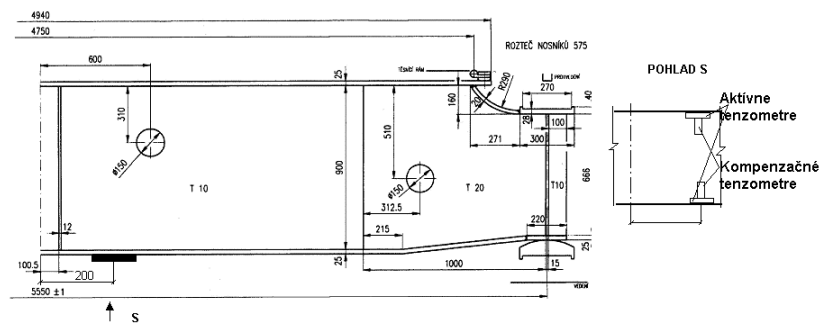


Obr.17 Napät'ové pole

Z polí napätí je zrejmy pokles maximálnych hladín napätí pri uplatnení lineárneho i pružneplastického výpočtového modelu a menovitých rozmeroch podľa vyššie uvedených konštrukčných úprav približne 2,6 krát, čo jednoznačne potvrdzuje správny prístup k riešeniu príčin havárie.

METODIKA EXPERIMENTÁLNEHO URČENIA ČASOVÝCH ZMIEN NAPÄTÍ V MIESTACH EXTRÉMNYCH NAMÁHANÍ TABULE RÝCHLOUZÁVERU

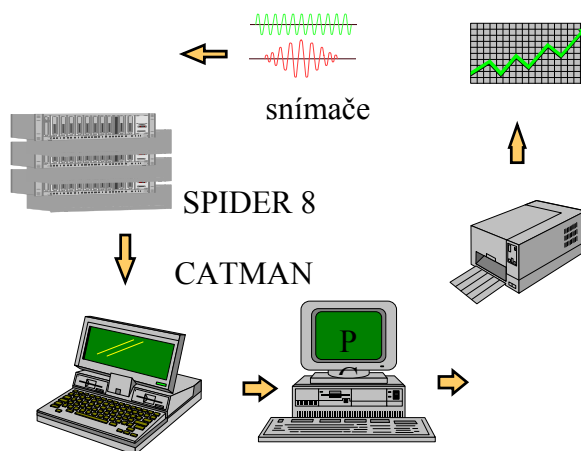
Pre experimentálne určenie napätosti bola zvolená metóda odporovej tenzometrie. Tenzometrické meranie bolo vykonané pre zistenie pomerných deformácií v miestach extrémneho namáhania tabule rýchlouzáveru vypočítaného metódou konečných prvkov. Schéma umiestnenia tenzometrických snímačov je na obr.18. Pre meranie sú navrhnuté snímače HBM s konštantou deformačnej citlivosti 2,05 a ohmickou hodnotou $R=120 \Omega$.



Obr. 18 Miesta aplikácie tenzometrických snímačov na tabuli rýchlostného záveru

Teplotná kompenzácia bude vykonaná 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.

Pre prepojenie tenzometrov s meracími aparátúrami budú použité tienené káble. Merací reťazec bol vytvorený tenzometrickými aparátúrami SPIDER a notebookom. Schéma meracieho reťazca aj reťazca pre vyhodnotenie a spracovanie nameraných hodnôt je na obr. 19. Na meranej tabuli rýchlostného záveru boli naaplikované tenzometre na dvoch výstužných rebrách – ich pásniciach, po 4 aktívne a 4 kompenzačné snímače a teda celkove bola naaplikovaných 16 tenzometrických snímačov (8 aktívne a 8 kompenzačné). Dva snímače oproti sebe na každej strane od osi symetrie sú kvôli vylúčeniu prípadnej poruchy snímača v priebehu merania.



Obr. 19 Merací a vyhodnocovací reťazec

ŽIVOTNOST PRI NÁHODNOM PRIEBEHU NOMINÁLNYCH NAPÄTÍ

Pri náhodnom zaťažení (čo je prevládajúci prípad pre prevádzkové zaťaženie tabule rýchlostného záveru) pristupujú problémy s reprezentatívnym spôsobom jeho analýzy a spoľahlivou hypotézou kumulácie poškodenia. Jednotlivé kroky dynamického výpočtu únavovej pevnosti a životnosti podľa konceptu nominálnych napätí objasňuje obr.20. Životnostnú skúšku hladkých vzoriek použitého materiálu vyjadruje Wöhlerova krivka materiálu. Wöhlerova krivka súčiastky zohľadňuje veľkosť súčiastky, tvar, povrch súčiastky a vonkajšie podmienky súčiastky. Obr.20 znázorňuje odlišnosť pri prechode z kvázistatického výpočtu únavovej

pevnosti k dynamickému výpočtu únavovej pevnosti a životnosti pri použití konceptu nominálnych napätí vo vysokocyklovej únave.

Spravidla sa priebeh namáhania určuje tromi spôsobmi:

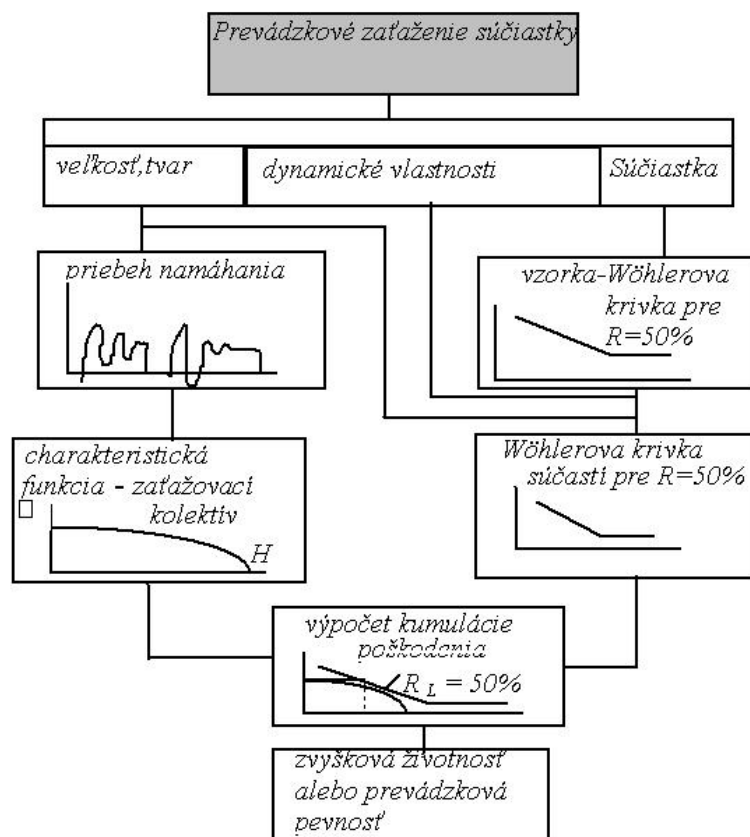
- experimentálne meraním,
- výpočtom pomocou simulačných metód,
- kombináciou merania a výpočtu.

Tabuľa rýchlozáveru je v prevádzke vystavené spravidla zaťaženiám, ktoré majú nepravidelný priebeh. Jeho charakter v čase je náhodný a musí sa pre únavové aplikácie výpočtovo vhodne spracovať. Sú známe dva odlišné spôsoby vyhodnotenia:

- spracovane pomocou korelačnej a spektrálnej analýzy,
- spracovane pomocou charakteristických parametrov.

Určovanie početnosti charakteristických parametrov je vhodné len pre životnostné aplikácie. Pomocou týchto metód sa určuje početnosť niektorého alebo početnosti niektorých charakteristických parametrov procesu namáhania, napr. maximálna amplitúda, relatívny rozkmít, stredná hodnota, prechody hladinami a pod. Podľa počtu sledovaných charakteristických parametrov sa uvedené metódy rozdeľujú na jedno - a viacparametrické. Z hľadiska únavovej životnosti sú najdôležitejšie nasledujúce kritériá:

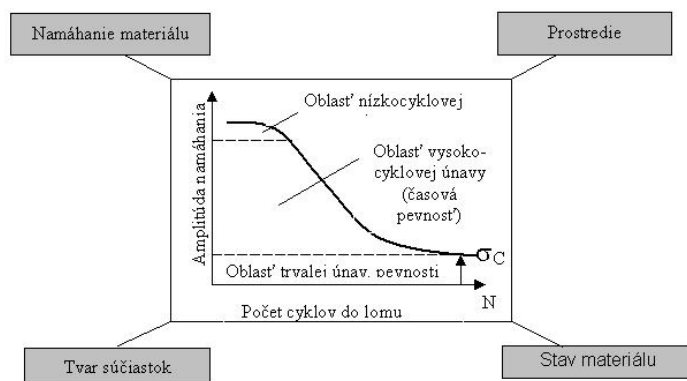
- počet striedania zaťažovacieho cyklu,
- amplitúda dynamického namáhania,
- stredná hodnota namáhania,
- frekvencia namáhania.



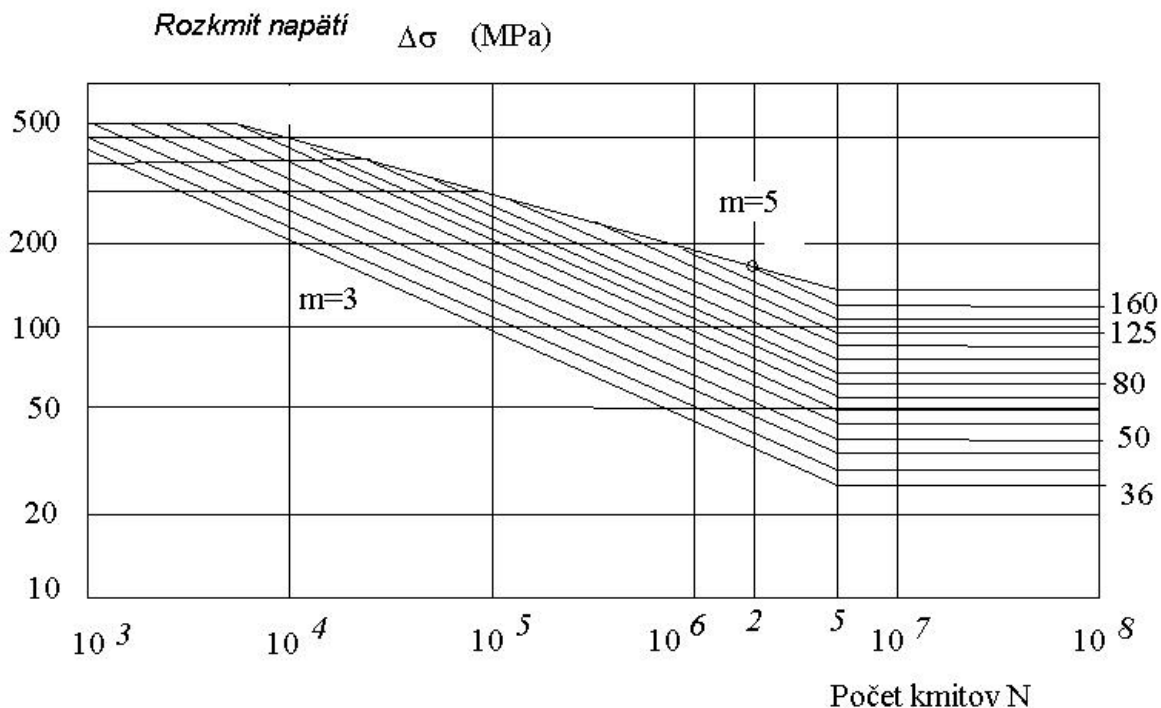
Obr.20 Odhad životnosti alebo zvyškovej životnosti

Rozhodujúci vplyv na únavovú životnosť má amplitúda namáhania a počet jej striedania. Preto tento parameter pri všetkých metódach musí byť priamo alebo nepriamo určený.

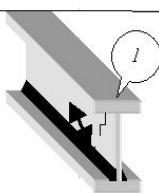
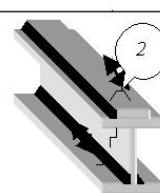
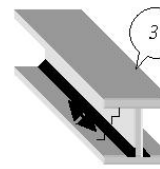
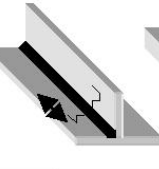
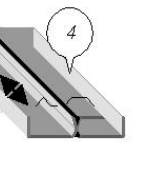
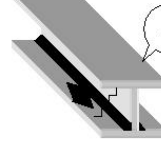
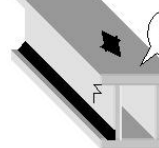
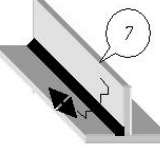
Podľa obr.20 Wöhlerovu krivku materiálu ovplyvňujú 4 hlavné skupiny faktorov (obr.21), ktoré vplyvajú na únavovú pevnosť a prevádzkovú životnosť tabule. Dá sa povedať, že uvedené faktory ovplyvňujú tvar a hranicu únavy tabule. Dajú sa skúmať jednotlivo, aj zohľadňovať pri výpočtoch, alebo sa dajú použiť normové Wöhlerové krivky. Jedná z noriem, ktorá uvádza Wöhlerove krivky so zohľadnením vplyvových faktorov je STN 73 1401 „Navrhovanie oceľových konštrukcií“ pre rôzne typy zvarovaných konštrukcií. Na obr. 22 sú tieto Wöhlerove krivky pre jednotlivé kategórie detailov 36 až 160. Príklady usporiadania zvarovaných detailov kategórii 100, 112 a 125 sú na obr.23. Na obr.23 sú vyznačené aj tvary trhlín.



Obr.21 Vplyvové faktory na pevnosť pri cyklickom namáhaní



Obr.22 Wöhlerove krivky pre skupiny detailov

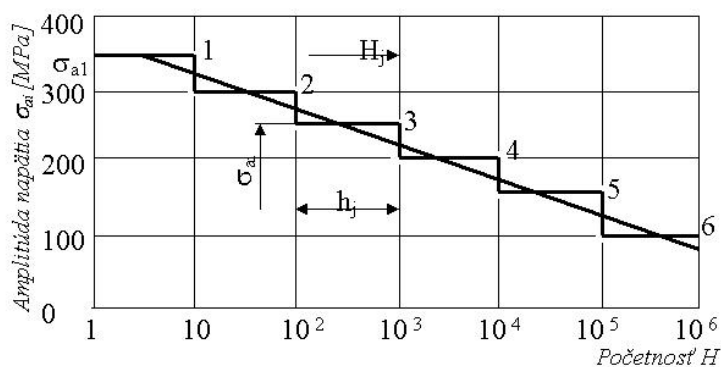
Kategória	ZVAROVANÝ DETAIL
125	 
112	  
100	  

Obr.23 Príklad usporiadania zvarovaných detailov do kategórie vrubov, namáhania detailov a možnosti vzniku trhlín

Pre výpočet životnosti tabule zaťaženej spektrom, nominálnym namáhaním, ktorého amplitúdy prekračujú medzu únavy, sa používajú tzv. hypotézy kumulácie únavového poškodenia.

Pre výpočet životnosti je potrebný kolektív amplitúd znázornený napr. stupňovitou krivkou (pozri obr.24). Wöhlerova krivka tabule je vyjadrená rovnicou v tvare (1).

$$\sigma_N^m \cdot N = \sigma_C^m \cdot N_C = \text{konšt.}, \quad (1)$$



Obr.24 Stupňový kolektív amplitúd napätia

Miera poškodenia D je definovaná prostredníctvom elementárnych poškodení ΔD_i jedného cyklu namáhania:

$$\Delta D_i = \frac{1}{N_i}, \quad N_i(\sigma_{a_i}, \sigma_{m_i}). \quad (2)$$

Pritom N_i je počet cyklov z Wöhlerovej krivky pri amplitúde napätia σ_{a_i} a strednej hodnote napätia σ_{m_i} . Kritická hodnota poškodenia je podľa lineárneho pravidla suma elementárnych poškodení

$$D = \sum_i \Delta D_i = 1 \quad (3)$$

pre lom súčiastky.

Pri viacerých počtoch cyklov h_i na jednej úrovni amplitúdy napätia σ_{a_i} a strednej hodnote σ_{m_i} je relatívne poškodenie rovné

$$D = \sum_i \frac{h_i}{N_i} = 1. \quad (4)$$

Výpočet lineárnej kumulácie poškodenia platí za predpokladu, že všetky vyskytujúce sa amplitúdy kmitavého namáhania prekračujú medzu únavy, alebo ak Wöhlerova krivka nevykazuje prakticky medzu únavy, prípadne medza únavy sa neberie do úvahy.

Rovnicu Wöhlerovej krivky možno podľa (1) napísať v tvare

$$N_i \cdot \sigma_{a_i}^m = N_o \cdot \sigma_{a_o}^m = \text{konšt.}, \quad (5)$$

kde N_o a σ_{a_o} je ľubovoľný známy bod na Wöhlerovej krivke. Z toho vyplýva

$$D = \sum_i (h_i / N_i) = \sum_i (h_i \cdot \sigma_{a_i}^m / N_o \cdot \sigma_{a_o}^m). \quad (6)$$

Pre životnosť platí vzťah

$$\bar{N} = (N_o \cdot \sigma_{a_o}^m) \cdot \left[\left(\sum_i h_i \right) / \left(\sum_i h_i \cdot \sigma_{a_i}^m \right) \right]. \quad (7)$$

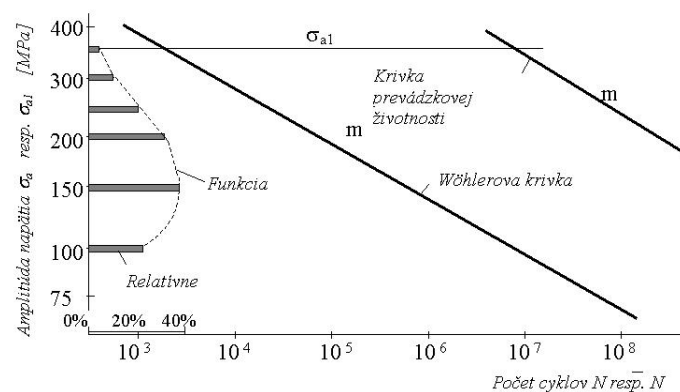
Výpočet životnosti (7) je možné realizovať po zavedení pomerných amplitúd napätí:

$$x_i = \sigma_{a_i} / \sigma_{a_1}, \quad (8)$$

pričom σ_{a_1} je najvyššia hodnota amplitúdy v kolektíve zaťaženia, ktorej zodpovedá N_1 počet cyklov z Wöhlerovej krivky.

$$\text{Potom} \quad \bar{N} = N_1 \cdot \left[\left(\sum_i h_i \right) / \left(\sum_i h_i \cdot x_i^m \right) \right]. \quad (9)$$

Podľa elementárneho tvaru Minerovho pravidla pri neuvažovaní medze únavy získa sa na základe kolektívu namáhania životnosť $\bar{N}$, ktorá je násobkom počtu cyklov N . Počet cyklov N zodpovedá amplitúde σ_a rovnakej σ_{a_1} (najvyššej amplitúde v kolektíve namáhania) na Wöhlerovej krivke. Počet cyklov (životnosť) $\bar{N}$ zodpovedá amplitúde σ_{a_1} na krivke prevádzkovej životnosti. V súradnicovom systéme log-log je krivka prevádzkovej životnosti s Wöhlerovou krivkou rovnobežná, obr.25.



Obr.25 Zobrazenie krivky prevádzkovej životnosti, Wöhlerovej krivky a funkcie poškodenia

ZÁVER

Na základe vykonanej napät'ovej a deformačnej analýzy tabule rýchlostného rýchlouzáveru bolo možné navrhnúť metodiku experimentálnej verifikácie napätí v miestach extrémnych namáhání. Uvedená analýza umožnila navrhnúť miesta aplikácie tenzometrických snímačov ktorých poloha je tiež určovaná možnosťou vhodnej teplotnej kompenzácie snímačov. Časové priebehy napätí získané z nameraných zmien pomerných deformácií umožnili na základe metodiky určenia kumulácie poškodenia stanoviť životnosť konštrukcie tabule rýchlostného rýchlouzáveru. V príspevku sú využité poznatky z riešenia grantového projektu „Adaptatívne metódy výpočtov a experimentálneho overenia únosnosti nových prvkov ľahkých a ultraľahkých konštrukčných systémov“, č. 1/9397/02.

Literatúra

- [1] Trebuňa F., a kol.: Expertíza príčin havárie rýchlostného rýchlouzáveru TG1 vo VE Ružín I. Sjf TU v Košiciach, 2001.
- [2] Trebuňa F. a kol.: Zistenie a sledovanie napät'ových pomerov na doskovom telese rýchlostného rýchlouzáveru TG1 vo VE ružín i po konštrukčnej úprave a následnom uvedení do prevádzky. Sjf TU v Košiciach, Košice 2002.
- [3] Trebuňa F., Bigoš P.: Intenzifikácia technickej spôsobilosti ťažkých nosných konštrukcií. Viena, 1999.
- [4] Trebuňa F., Buršák M.: Medzné stavy-kovy, Grafotlač Prešov, 2002.