

NON-LINEAR ANALYSIS OF THE HINGED CONNECTION ON THE ROOF WITH LAMELLAR LATTICE-GIRDERS

M. Tomko*, I. Demjan*

Summary: *The paper deals with static analysis of existing ice-ring bearing steel structure, also with static calculation of its roof structure loaded by new roof coat. According to the static analysis results, the repair of initial state was designed and realized, with designing of details, which must be modified. By means of software ANSYS, the detail of hinged joint support of laminated lattice-girders was 3D-modeled with volume elements. The deformation-stress analysis of mentioned detail was also done.*

1. Úvod

Pokiaľ je nevyhnutné realizovať rekonštrukciu stavebných objektov, musí byť preukázaná ich adekvátne odolnosť proti novým zaťažovacím účinkom. Základným predpokladom dobrého statického zhodnotenia stavebnej konštrukcie je poznanie fyzikálno-mechanických vlastností jednotlivých prvkov konštrukcie a ich vzájomné statické pôsobenie v konštrukcii, teda parametrov, ktoré obsahuje aj teoretický výpočtový model, ak sa má dosiahnuť ekvivalencia medzi reálnym správaním sa stavebnej konštrukcie a teoretickou odozvou statického výpočtového modelu.

2. Všeobecná charakteristika objektu

Predmetný zimný štadión bol postavený a daný do užívania pred 33 rokmi, t.j. pri predpokladanej životnosti objektu cca 70 rokov, sa zimný štadión nachádza približne v polovici svojej životnosti. V danom prípade nastal stav, kedy objekt prestáva plniť štandardy požadované užívateľom a bolo rozhodnuté realizovať rekonštrukciu zimného štadióna, t.j. kompletná výmena podkladných vrstiev pod ľadovou plochou, súvisiace technologicko-technické zariadenie pre ľadovú plochu, výmena nevyhovujúcej, poškodenej a zatekajúcej strešnej krytiny a nahradenie ju novou, s lepšími tepelnoizolačnými charakteristikami, odstránenie fyzického opotrebenia, alebo poškodenia objektu tak, aby sa obnovili funkčné, vzhľadové a bezpečnostné vlastnosti a zvýšila sa prevádzková kvalita a úžitkovosť objektu. Uvedené skutočnosti si vyžiadali realizáciu statického prepočtu súčasného stavu konštrukcie s novo navrhovanou strešnou krytinou.

Zvýšená vlhkosť prostredia z ľadovej plochy prispela tiež ku koróznemu pôsobeniu na oceľové prvky stavebného objektu. Nosná oceľová konštrukcia strechy, ako aj ďalšie prvky

* Ing. Michal Tomko, PhD., Ing. Ivo Demjan, PhD.: Ústav inžinierskeho staviteľstva, Technická univerzita v Košiciach; Vysokoškolská 4; 042 00 Košice; tel.: +421.55 602 4249, e-mail: michal.tomko@tuke.sk

objektu boli lokálne napadnuté koróziou, t.j. bolo potrebné realizovať experimentálne meranie hrúbok jednotlivých koróziou napadnutých prvkov ocelevej nosnej konštrukcie (Tomko, M. & Demjan, I. (2008)).

Dôležitým faktorom pre prípravu relevantného výpočtového modelu pre statický výpočet bolo zistenie skutočnej nivelety hrebeňa strešnej ocelevej konštrukcie objektu, t.j. či nedošlo k poklesu celej, resp. niektorej časti ocelevej konštrukcie strechy oproti pôvodnému projektu. Uvedená skutočnosť si vyžiadala realizáciu geodetického zamerania, ktorého výsledky sú uvedené (Tomko, M. & Demjan, I. (2008)).

Zastrešenie zimného štadióna je riešené lamelovou klenbou s rebrami vedenými šikmo, ktoré sa vzájomne prenikajú. Jednovrstvové klenby pôsobia ako krátke valcové škrupiny a sú vo vzdialenostiach menších ako rozpätie vystužené priečnymi výstuhami (diafragmy, väzníky), obrázok 1. Konštrukcia klenby je z rúrok B95/4, ktoré sú prepojené zvislicami z rúrok B70/2.9. Rebrá sú zostavené z jednotného stále sa opakujúceho a vzájomne zameniteľného dielca dĺžky do 8,0m (Zeman, J. (1971); Marek, P. a kol. (1985)).



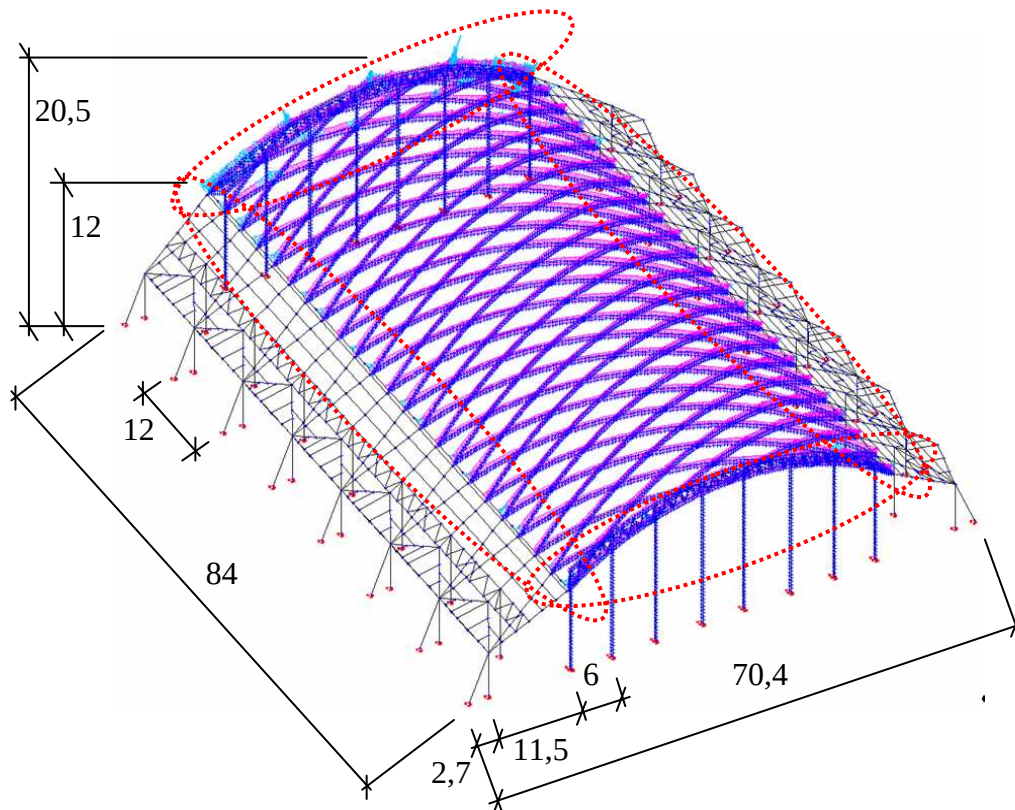
Obrázok 1. Pohľad na oceľovú nosnú konštrukciu strechy zimného štadióna (pôvodný stav)

3. Statický výpočet

Statický výpočtový model zimného štadióna bol vytvorený v programe IDA NEXIS. Priestorový model obsahuje 14452 uzlov a 22357 prútov, obrázok 2. Vzájomné spolupôsobenie jednotlivých prútových prvkov bolo klbové alebo tuhé. Pri výpočte sa uvažovali 4 nelineárne kombinácie zaťaženia a výpočtový model bol analyzovaný použitím geometricky nelineárneho výpočtu, kde bolo použitých 20 prírastkov zaťaženia. Zaťažovacie účinky boli určené podľa STN 73 0035 a posúdenie bolo realizované podľa STN 73 1401. Stavebný objekt po predpísaných a vykonaných úpravách vyhovuje na I. a II. medzný stav podľa súčasne platnej normy.

Pri posúdení boli prekročené hodnoty medzných napätí v okrajoch horného a spodného pásu lamelových oblúkov o 20% až 30%, obrázok 2. Vypočítané napätia niektorých zvislíc oblúka nosnej konštrukcie strechy boli prekročené o 40% oproti medzným napätiam v pružnej oblasti, obrázok 2. Ostatné oceľové prvky konštrukcie vyhovovali na 75% až 95% medzného napätia. Maximálna deformácia v strede lamelovej kupoly bola 142mm (Tomko, M. & Marko, L. & Brda, J. (2008)).

Na základe realizovanej statickej analýzy boli konštatované závery súvisiace s podmienkami technológie realizácie prác, požiadavky na povrchovú úpravu, kontrolu zvarov a skrutkových spojov, podmienok užívania objektu súvisiacich s naakumulovanou vrstvou snehu a definovali sa nutné požiadavky súvisiace so statickými úpravami, t.j. na základe statického výpočtu bolo nutné realizovať úpravy (do prvého poľa všetkých väzníkov tvoriacich strešnú konštrukciu dovariť plech hr. 8mm), obrázok 3.



Obrázok 2 Výpočtový model zimného štadióna (rozmery v [m]), nevyhovujúce časti spodného, horného pásu a zvislíc oblúka nosnej konštrukcie strechy (svetlomodré vyznačené)



Obrázok 3 Pripojenie lamelového väzníka ku klbovému čapu

4. Statická analýza zosilnenia klbového pripojenia väzníkov

Cieľom navrhnutého zosilnenia prvého poľa lamelových väzníkov oceľovou platňou hr. 8mm je prerozdelenie napätí v jednotlivých častiach, t.j. v zistených nevyhovujúcich častiach nosnej oceľovej konštrukcie strechy, obrázok 2, 3.

V programe ANSYS bol vytvorený FEM 3D-model predmetného prvého poľa lamelového väzníka s čapovým uložením. Pri modelovaní predmetného detailu bol použitý objemový prvok SOLID 187 (3-D space, 10-Node Tetrahedral Structural Solid) a SOLID 186 (3-D space, 20-Node Tetrahedral Structural Solid or Layered Solid):

1) bez zosilnenia – 42 156 uzlov, 20 514 elementov, obrázok 4a);

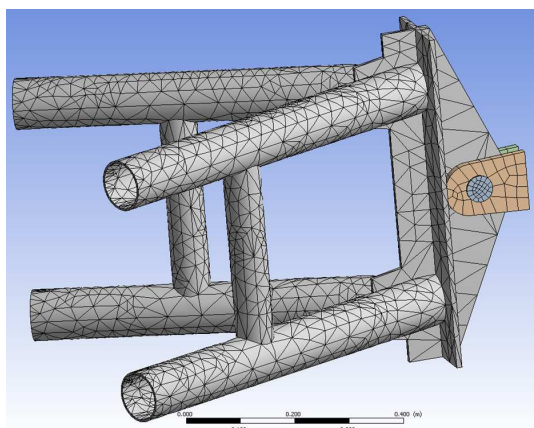
2) zo zosilnením oceľovou platňou hr. 8mm – 42 692 uzlov, 20 577 elementov, obrázok 4b).

Kontakt čapových dosiek s čapom je uvažovaný len na tlak. Pri metóde plastických zón sa uvažoval pružno-plastický materiál so spevnením v ťahu charakterizovaný bilineárnou aproximáciou pracovného diagramu ocele S 235 (obrázok 10), t.j. $E = 209821\text{MPa}$, $E_{\text{spev}} = 8944\text{MPa}$ (Kmeť, S. & Tomko, M. & Brda, J. (2006)).

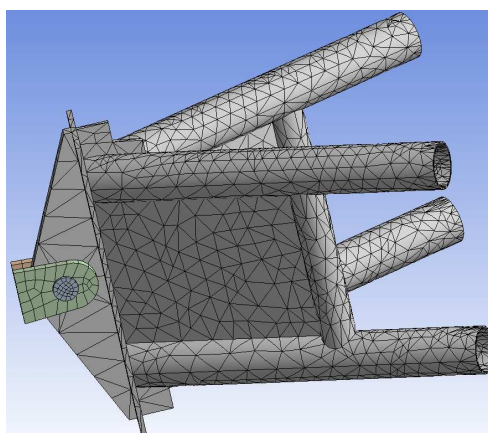
Výpočet sa realizoval prírastkovou Newton-Rapsonovou metódou.

Osové sily boli prevzaté zo statického výpočtu (Tomko, M. & Marko, L. & Brda, J. (2008)), t.j. sila v hornom páse = 152,11kN, sila v dolnom páse = 41,67kN a následne boli sily prepočítané na obvodovú plochu rúry upravenú o korózne úbytky $A_r = 1041,9\text{mm}^2$ (pôsobiacie zaťaženie na plochu A_r rúry horného pásu je $14,6 \cdot 10^4\text{kPa}$ a spodného pásu je $4 \cdot 10^4\text{kPa}$).

a) bez zosilnenia



b) zo zosilnením oceľovou platňou hr. 8mm



Obrázok 4 Výpočtový model prvého poľa lamelového väzníka s čapovým uložením

5. Podmienka plasticity

Pri analýze detailu uloženia a určovaní pomerných plastických deformácií bola aplikovaná Von Mises podmienka plasticity:

$$f = \sigma - k(\chi) = 0 \quad (1),$$

kde $k(\chi)$ je premenná medza plasticity:

$$\chi = \int \sigma \cdot d\varepsilon^p \quad (2).$$

Napätie je definované:

$$\sigma = \frac{\sqrt{2}}{2} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 + \tau_{xy}^2) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3),$$

a pomerná plastická deformácia:

$$\varepsilon^p = \sqrt{\frac{2}{3}} \left\{ (\varepsilon_x^p)^2 + (\varepsilon_y^p)^2 + (\varepsilon_z^p)^2 + \frac{1}{2} [(\gamma_{yz}^p)^2 + (\gamma_{zx}^p)^2 + (\gamma_{xy}^p)^2] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4).$$

Vzťah medzi celkovou pomernou deformáciou a plastickou pomernou deformáciou:

$$\varepsilon_p = \varepsilon - \varepsilon_e \quad (5),$$

kde ε_e je elastická pomerná deformácia.

Napätie a pomerná plastická deformácia sú zviazané pracovným diagramom materiálu:

$$\sigma = H(\varepsilon^p) \quad (6).$$

Dotyčnicový modul plasticity:

$$H = \frac{d\sigma}{d\varepsilon^p} \quad (7).$$

Podľa teórie tečenia je rýchlosť deformácie v uvažovanom bode telesa určená okamžitou existujúcou napätosťou a rýchlosťou tejto napätosti. Výsledné deformácie je potrebné riešiť prírastkovou cestou. Výsledný stav sa získa súčtom jednotlivých prírastkov.

6. Diskusia k získaným výsledkom statického výpočtu

Výsledky statického výpočtu pri uvažovaní skutočných hrúbok jednotlivých prvkov ocelevej konštrukcie (zohľadnenie korózných úbytkov), boli vo všeobecnosti o 3% až 5% väčšie, ako výsledky statického výpočtu s uvažovaním prvkov ocelevej konštrukcie bez korózných úbytkov, t.j. podľa projektovej dokumentácie (stav po zmontovaní konštrukcie).

Boli sledované pomerné plastické deformácie a Von Mises napätia, obrázok 5, 6, 7, 8, 9, 10.

Maximálna deformácia zistená pre celý modelovaný detail:

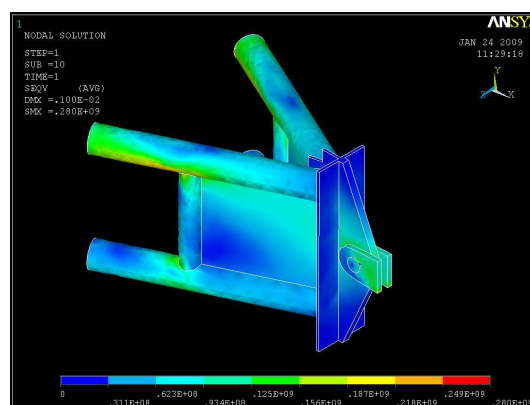
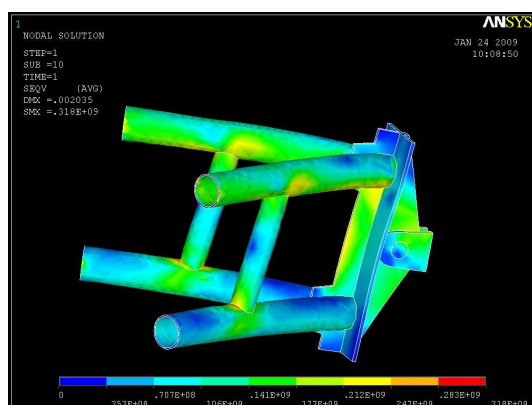
- bez zosilnenia: 2,035mm;
- zo zosilnením oceleovou platňou: 1,0mm.

Maximálne napätia zistené pre celý modelovaný detail:

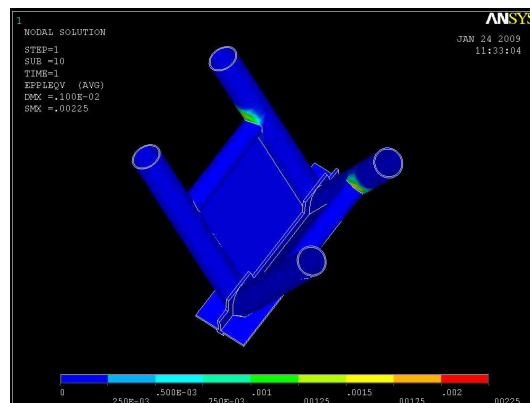
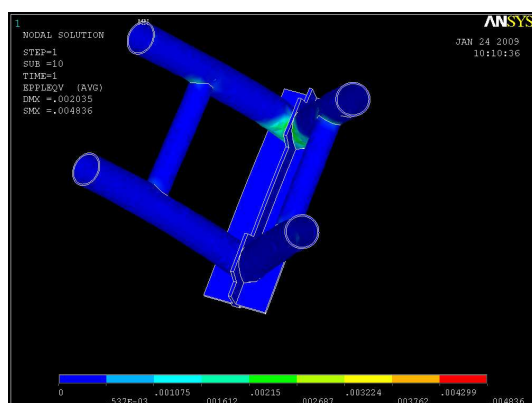
- bez zosilnenia: 318MPa;
- zo zosilnením oceleovou platňou: 280MPa.

Maximálne pomerné plastické deformácie zistené pre celý modelovaný detail:

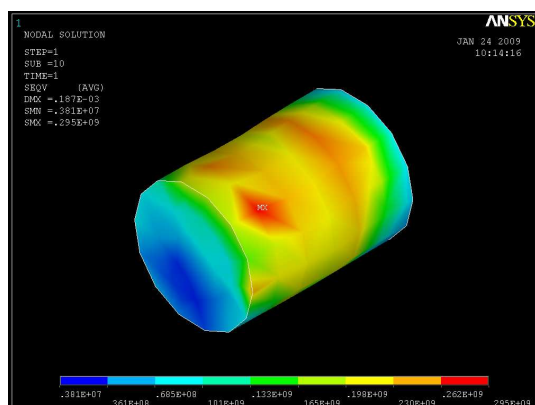
- bez zosilnenia: 0,0048;
- zo zosilnením oceleovou platňou: 0,0025.



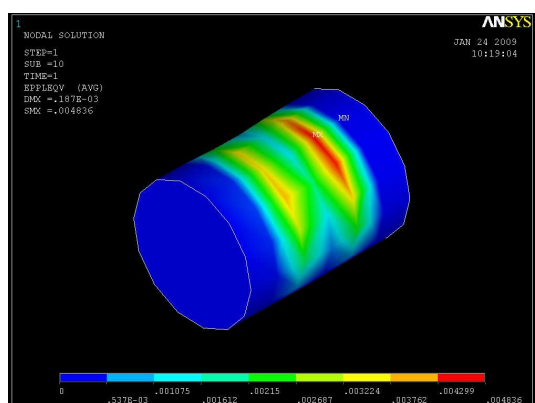
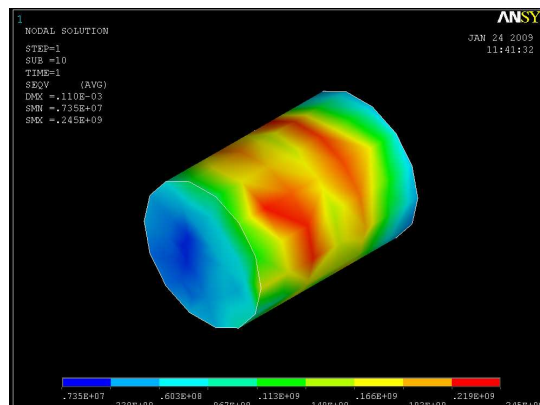
Obrázok 5 Von Mises napätia



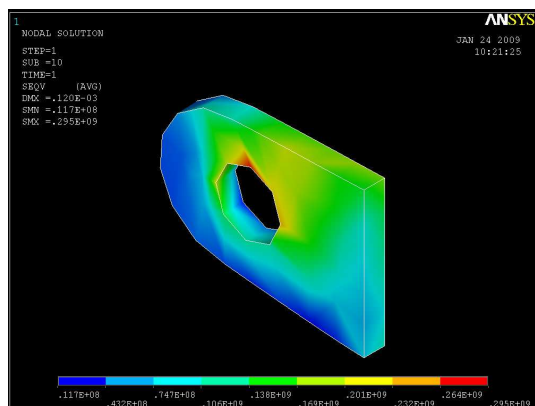
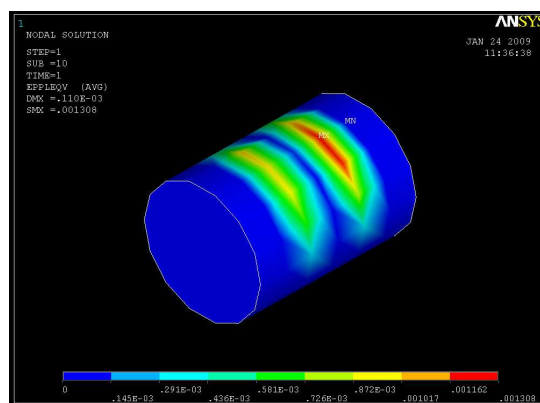
Obrázok 6 Pomerné plastické deformácie



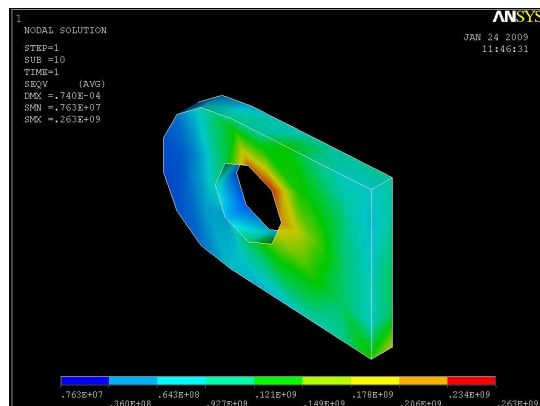
Obrázok 7 Von Mises napätia – čap



Obrázok 8 Pomerné plastické deformácie – čap



Obrázok 9 Von Mises napätia – čapová doska



Maximálne napätia v čape:

- bez zosilnenia: 295MPa;
- zo zosilnením oceľovou platňou: 245MPa.

Maximálne pomerné plastické deformácie v čape:

- bez zosilnenia: 0,0048;
- zo zosilnením oceľovou platňou: 0,0013.

Maximálne napätia v čapovej doske:

- bez zosilnenia: 295MPa;
- zo zosilnením oceľovou platňou: 262MPa.

Maximálne pomerné plastické deformácie v čapovej doske:

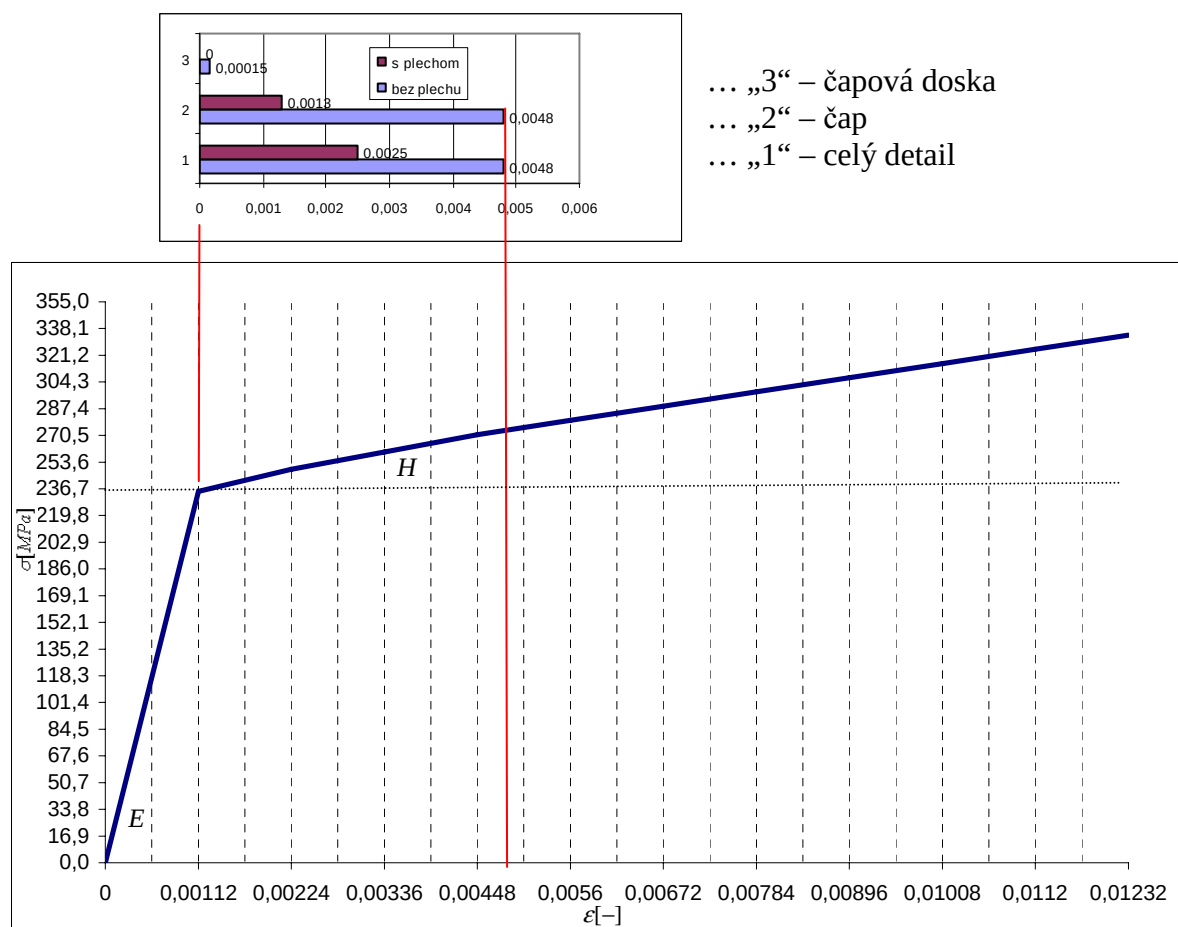
- bez zosilnenia: 0,00015;
- zo zosilnením oceleovou platňou: nevznikli.

Maximálne pomerné plastické deformácie v oblasti horného pásu pri styku dvoch rúr a plechu spájajúceho rúry:

- bez zosilnenia: 0,0026;
- zo zosilnením oceleovou platňou: 0,0015.

Pomerné plastické deformácie v čapových doskách sa lokálne prejavili len v lamelovom väzníku bez zosilnenia a pomerné plastické deformácie v čapových doskách nevznikli pri lamelovom väzníku zo zosilnením.

Ak nastal stav počas 33 rokov užívania objektu, že napadol sneh v uvažovanej maximálnej normovej hodnote zaťaženia podľa STN 73 0035, tak sa jedná sa o dominantné zaťaženie snehom, potom je možné, že vznikli lokálne plastické zóny v hornom, resp. spodnom páse prvého poľa, v čapových doskách a čape. Uvedený predpoklad nie je možné exaktne tvrdiť, je možné len predpokladať, že vznikli plastické zóny a potom prezentované výsledky statickej analýzy pre detail zosilnenia prvého poľa lamelového väzníka oceleovou platňou hr. 8mm sú ovplyvnené neuvažovaním už vzniknutých plastických zón (plastické deformácie a sú trvalé) v stave ešte pred zosilnením. Prezentovaný výpočet pre prvé pole lamelového väzníka zosil-



Obrázok 10 Pracovný diagram ocele S235 a pomerné plastické deformácie

neného oceleovou platňou je potom len informáciou, ako sa prerozdělilo napätie pri uvažovaní ocelevej platne v lamelovom väzníku, že danou konštrukčnou úpravou sa „pomohlo“ lamelovému väzníku pri jeho statickom pôsobení v konštrukcii, t.j. rúra v hornom pase pri výpočte bez zosilnenia oceleovou platňou v lamelovom väzníku podľa noriem nevyhovuje, „pomohlo“ sa čapu a čapovým doskám, lebo sa prerozdělili sily a napätia, aj napriek tomu, že tam už „bola“ trvalá deformácia.

V prípade, že by v priebehu 33 rokov nenapadlo maximálne normou STN 73 0035 uvažované množstvo snehu na objekt, potom by nedošlo k plastickým deformáciám a prezentovaný výpočet lamelového väzníka zosilneného oceleovou platňou je možné považovať z hľadiska podmienok zaťaženia za relevantný.

5. Záver

Pri tvorbe výpočtového modelu jestvujúcej budovy, ktorá má už určitú časť svojej životnosti má za sebou, nie je možné dôsledne aplikovať modelovanie budovy tak, ako je to pri novostavbách, pretože je nutné spresniť výpočtový model z hľadiska materiálovo-fyzikálnych charakteristík jednotlivých konštrukčných prvkov a staticko-tuhostných vlastností budovy. Miera realizovanej údržby a opráv, resp. vykonávaných stavebných zásahov do objektu, môžu spôsobiť zmeny, ktoré je potrebné zohľadniť v pri tvorbe výpočtového modelu. V súčasnej dobe existuje rozsiahly výpočtový aparát pre statické výpočty budov a v praktických realizáciách slúži väčšinou k návrhu nových budov, kde na základe normami predpísanými a zavedenými postupmi s istou mierou bezpečnosti je možné budovu navrhnuť. Opačný postup, t.j. priblíženie sa výpočtu k namáhaniu už existujúcej budovy a vystihnúť miery jej spoľahlivosti je obtiažnejšie.

PodĎakovanie

Príspevok bol vypracovaný v rámci riešenia projektov VEGA č. 1/4197/07.

6. Literatúra

- Tomko, M. & Demjan, I. (2008) Statické posúdenie nosnej ocelevej konštrukcie strechy zimného štadióna. in: *Znalectvo v odboroch Stavebníctvo a Podnikové hospodárstvo*, USI ŽU Žilina, roč. XIII, č. 3-4, Žilina
- Zeman, J. (1971) *Projektová a výrobná dokumentácia - časť statika* (nekompletná)
- Marek, P. a kol. (1985) *Kovové konstrukce pozemních staveb*, SNTL/ALFA, Praha
- Tomko, M. & Marko, L. & Brda, J. (2008) *Statický posudok ocelevej nosnej konštrukcie strechy zimného štadióna v Poprade*
- Kmeť, S. & Tomko, M. & Brda, J. (2006) Pravdepodobnostné posúdenie spoľahlivosti sústav na báze visutých ohybovo-tuhých prvkov. in: *Spolehlivost konstrukcí: Od pravděpodobnostního posudku spolehlivosti prvků a dílců stavebních konstrukcí k pravděpodobnostnímu posudku systémů*: 7. ročník celostátní konference se zahraniční účastí: Sborník referátů: Praha 5.4.2006, Ostrava: Dům techniky
- STN 73 0035 (1988) *Zaťaženie stavebných konštrukcií*
- STN 73 1401 (1998) *Navrhovanie oceľových konštrukcií*