EAN '96

34th Conference of Experimental Stress Analysis
34. konference o experimentální analýze napětí
3. - 6.6. 1996, Plzeň, Czech Republic

ELASTO-PLASTIC EFFECT OF STRUCTURES WITH CYCLIC LOADING AND THEIR CAPACITY LIMIT STATE

PRUŽNOPLASTICKÉ PÔSOBENIE KONŠTRUKCIÍ PRI CYKLICKOM ZAŤAŽENÍ A ICH MEDZNÝ STAV ÚNOSNOTI

EVIN J.

The paper deals with the elasto-plastic effect of structures subjected to stress of cross-bending from the viewpoint of the complet system of reliability conditions of the loading capacity limit state. The aim of the experimental investigation was to study the strain deformations and bending of the tested model of the most stressed sections due to the effect of the cyclic changes of mechanical and thermal loadings with the purpose of obtaining the working structure diagram.

Pri namáhaní materiálov nad určitú hranicu dochádza k ich plastickej deformácii. Chovanie sa materiálov v plastickej oblasti závisí vo veľkej miere od vplyvu vonkajších faktorov. Jedným z možných faktorov sú cyklické zmeny mechanického a teplotného zaťaženia materiálu, pri ktorých v ňom vznikajú konečné oblasti plastických deformácií. Pri tom je dôležité určiť rozsahy zmeny vonkajších síl a teplôt, pri ktorých prebiehajú plastické deformácie iba pri prvých cykloch zaťaženia. Po určitom počte cyklov zaťaženia prírastky plastických deformácií sa výrazne zmenšujú a pri ďalšom zaťažovaní sa konštrukcia deformuje takmer pružne.

Zvyšovanie požiadaviek na energetické, metalurgické a technologické zariadenia si spravidla vynucuje nové konštrukčné riešenia, ktoré sú obvykle spojené s problémami pevnostného a funkčného charakteru. Zariadenia sú vo väčšine prípadov namáhané mechanickým a teplotným zaťažením, ktoré nie je konštantné, ale priebehu prevádzky sa mení. Počet zmien za dobu ich pracovnej činnosti presahuje rádove stovky, ba až niekoľko desiatok tisíc. K únavovému porušeniu u týchto zariadení nemôže dôjsť pre pomerne malý počet cyklov. Porušenie vzniká vtedy, ak časovo premenné teplotné pole je sprevádzané striedaním plastických deformácií. Pri posudzovaní prevádzkovej spoľahlivosti a bezpečnosti skúmaných prvkov a konštrukcií musíme vyšetrovať veľkosť a rozloženie teplotných napätí. V prípadoch náhlej zmeny teploty vznika teplotný ráz, teplotný gradient a veľké teplotné napätie, často spôsobujú v konštrukciach krehký lom. Závažnosť a dôležitosť celej problematiky teplotných napätí si

vyžaduje získanie dostatočtočne spoľahlivých podkladov pre výpočet teplotných napätí a analýzu ich vplyvu na spoľahlivé prevádzkovanie konštrukcií a možnosti ich ovplyvnenia vhodnou reguláciou prevádzkových podmienok. V tvarove zložitejších častiach a nestacionárných teplotných poliach musíme používať približné riešenie.

Vplyv teplotných napätí pri výpočte pevnosti konštrukcii sa posudzoval rôzne v jednotlivých etapách rozvoja techniky. V literatúre môžeme nájsť diametrálne protikladné vyjadrenia vplyvu teploty. Ako prvé sa riešilo posúdenie stavu porušenia podľa celkových elastických napätí od mechanického a teplotného zaťaženia. Protikladnosť stanovísk pri skúmaní vplyvu teploty odráža ten fakt, že teplotné napätia ovplyvňujú pevnosť konštrukcií rôznymi spôsobmi, v závislosti od podmienok, stanovených vlastnosťami materiálu a charakterom zaťažovania.

Zo skúseností je známe, že jednorázové pôsobenie teplotného poľa môže byť príčinou porušenia iba krehkých materiálov (sklo, keramika, liatina). Pevnosť materiálov, ktoré majú dobre plastické vlastnosti, je spoľahlivá aj vtedy, ak fiktívne teplotno-pružné napätia prevyšujú hranicu klzu. Vplyv teplotných napätí na pevnosť pri ich jednorázovom pôsobení je analogický vplyvu iných druhov zaťažení. Iná situácia nastáva, ak je pôsobenie teplotného poľa cyklické.

Najvhodnejšie posúdenie spoľahlivosti a životnosti konštrukcie ľubovoľného druhu, ktorá je vystavená pôsobeniu teplotných polí, je možné realizovať skúškami v podmienkach, ktoré sú podobné prevádzkovým. Použitie modelov pre experimentálne štúdium procesov porušenia pri pôsobení teploty je spojené s ťažkosťami. Simulujú sa preto podmienky blízke reálnym. Použitie modelov sa osvedčilo v tých prípadoch, ak je získané výsledky možné použiť nielen pre odhad pevnosti danej konštrukcie, ale aj pre čiastočné overenie hypotéz, použitých vo výpočte. Výsledky je možné rozšíriť na konštrukcie podobného typu a využiť ich pri navrhovaní.

V technickej praxi sa často stretávame s prípadmi, keď na teleso pôsobí vonkajšie zaťaženie úmerné jednému parametru a cyklicky sa meniace teplotné pole. Mechanizmus porušenia sa pritom stanovuje na základe vonkajšieho zaťaženia a jemu prislúchajúce napätia dodatočného zaťaženia vo všetkých bodoch telesa, v ktorých prírastky plastickej deformácie za cyklus sú rôzne od nuly. Takéto zaťaženie pri výpočte na vyvíjajúce sa porušenie treba považovať za konštantné a rovné jeho maximálnej hodnote, čo bude odpovedať najnepriaznivejšiemu programu zaťaženia.

Keď konštrukcia okrem mechanického zaťaženia je namáhaná aj teplotnými cyklami a potom rovnica má tvar

$$\int_V X_i \Delta u_{io} dV + \int_{Sp} p_i \Delta u_{io} dS + \int_{Vd} \sigma_{ij} \Delta \varepsilon_{ijo}^{p} dV = \int_V f(\Delta \varepsilon_{ijo}^{p})) dV \qquad (1)$$

v ktorej v tomto prípade X_i, p_i sú maximálne hodnoty objemových a plošných síl a napätia σ_{ij} sa stanovujú z teplotných zaťažení. Rovnica (1) v tomto prípade vyjadruje zníženie nosnej schopnosti konštrukcie v súlade s pôsobením teplotných cyklov.

Ak premenlivé zložky napätia (teplotné), pôsobiace na konštrukciu, sú úmerné jednému parametru a nezahrňujú objemové si-

ly pri stanovení podmienok progresívneho porušenia z rovnice (1), je vhodné použiť totožnosť

$$\int_{V_d} \sigma_{ij} \Delta \varepsilon_{ij\circ}^{p} dV = \int_{S_p} \sigma_{ij} n_j \Delta u_{i\circ} dS \ , \qquad (2)$$

vyplývajúca z toho, že prírastky plastickej deformácie za cyklus $\Delta \varepsilon_{ij\circ}^{p}$ sú kinematicky možné a postupne späté s prírastkami reziduálnych posunutí $\Delta u_{i\circ}$.

Pre overenie spoľahlivosti poslúži vybraný konštrukčný prvok s veľkou oblasťou pružnoplastického pôsobenia, ktorý je vhodný na demonštraciu podstaty uvedenej problematiky. Cieľom príspevku je analýza určenia výpočtovej únosnosti v prípade pružnoplastického pôsobenia rámovej konštrukcie votknutej do základovej dosky z hľadiska podmienok spoľahlivosti hraničného stavu únosnosti. Na zistenie únosnosti nosného prvku namáhaného priečným ohybom v prípade pružnoplastického pôsobenia z hľadiska komplexnej sústavy podmienok spoľahlivosti hraničného stavu únosnosti bol navrhnutý experimentálny výskumm. Pre tieto účely bolo vyhotovených 58 skúšobných telies. Dimenzie telies boli vyberané vzhľadom na dané skúšobné podmienky v laboratóriu Katedrry technickej mechaniky a pružnosti SjF TU v Košiciach.

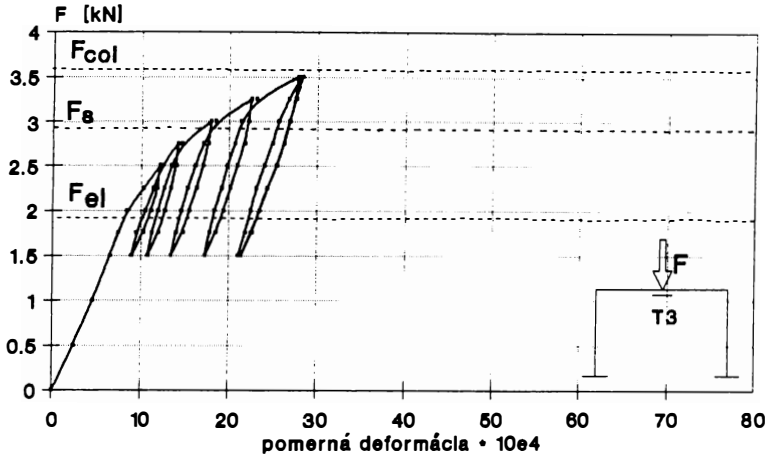
Predmetom experimentálneho vyšetrovania bolo sledovanie pomerných deformácií a priehybov skúšobného vzorku rámovej konštrukcie od účinku cyklických zmien mechanického a cyklických zmien teplotného zaťaženia vo vybraných prierezoch za účelom získania pracovného diagramu konštrukcie. Meranie pomerných deformácií bolo realizované prostredníctvom odporových tenzometrov. Na odporové snímanie pomerných deformácií bola použitá tenzometrická aparatúra M 200. Okrem pomerných deformácií boli registrované aj priehyby rámovej konštrukcie pomocou hodinkových indikátorov. Cyklické mechanické zaťaženie bolo realizované silovými skrutkami, z ktorých jednou bolo vyvodzované zaťaženie smerom hore a druhou skrutkou smerom dole. Zaťaženie smerom hore bolo realizované prevodom cez kladky. Cyklické teplotné zaťaženie bolo vyvodzované v elektrickej piecke. Zvýšenie rýchlosti ohrevu bolo dosiahnuté dvomi doplnkovými vyhrievacími špirálami a štyrmi elektrickými infražiaričmi.

Skúšobný vzorok rámovej konštrukcie bol votknutý do základovej dosky vyrobenej z materiálu ktorého súčiniteľ teplotnej rozťažnosti je rádove nížší, ako súčiniteľ teplotnej rozťažnosti ocele. Ďalšie zníženie rozťažnosti základovej dosky od teploty bolo dosiahnuté tepelnou izoláciou z azbestovej tkaniny. Pre potvrdenie správnosti teoretického riešenia úlohy navrhnutá metodika experimentálneho výskumu vyžadovala určiť taký postup, ktorý by umožňoval jednoznačne potvrdiť alebo vylučiť správnosť dosiahnutých výsledkov a zároveň vylučiť systematické chyby experimentu. V prvej fáze experimentálneho výskumu bola riešená otázka pomalého mechanickéko cyklického zaťažovania. Zaťaženie bolo vyvodzované silovými skrutkami, pričom veľkosť zaťaženia bola indikovaná dynamometrami. Uvedeným postupom a zapojením tenzometrov boli registrované len hodnoty pomerných deformácií od ohybu. Experimentálnym výskumom bolo zistené, že zmena zmyslu zaťaženia spôsobí zmenu znamienka pomernej deformácie od ohybu.

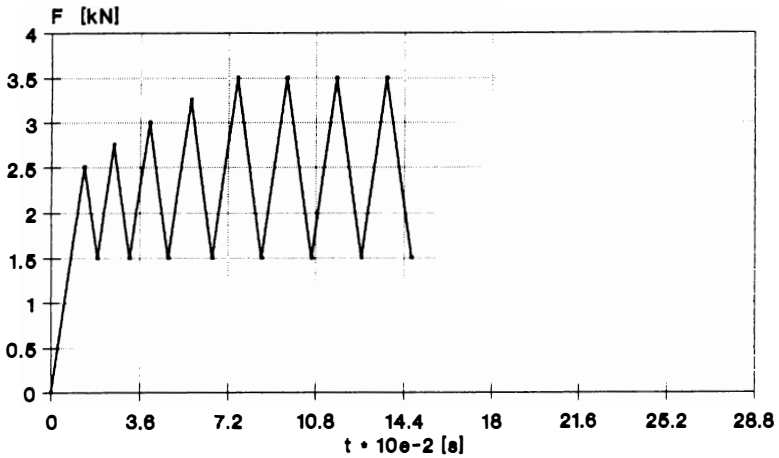
Ďalej bola riešená otázka cyklického zaťaženia od teploty pri konštantnej hladine mechanického namáhania. Veľkosť teplot-

SKÚŠOBNÝ MODEL 12

Pracovný diagram



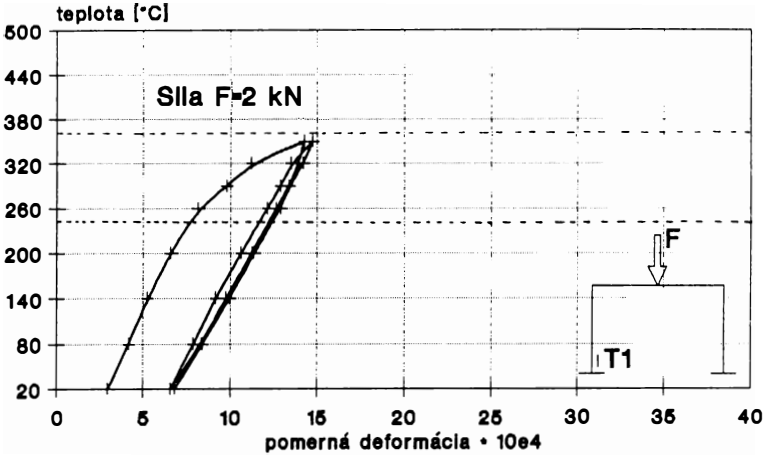
Časový priebeh zaťaženia



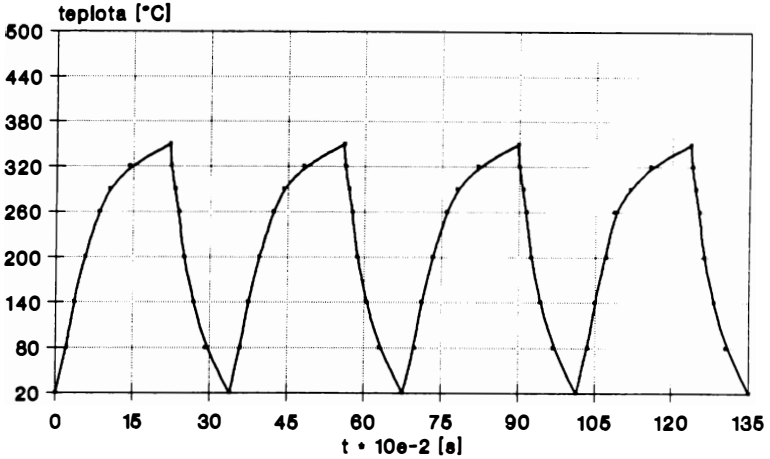
Obr. 1

SKÚŠOBNÝ MODEL 20

Pracovný diagram



Časový priebeh zaťaženia



Obr. 2

ného zaťaženia bola limitovaná použitými tenzometrickými snímačmi a použitým tmelom. So zreteľom na zapojenie tenzometrických snímačov nebolo nutné využívať krivku zdanlivej pomernej deformácie v závislosti na teplote.

Hodnoty pomerných deformácií od ohybu boli merané v piatich prierezoch, ako pri cyklických mechanických zaťaženiach, tak aj pri cyklických zaťaženiach od teploty. Pri cyklických mechanických zaťaženiach bolo ako výpočtom, tak aj experimentálne zistené, že maximálne pomerné deformácie a priehyb od ohybu sú v priereze pôsobiska zaťaženia. Na obr. 1 je znázornený pracovný diagram a časový priebeh zaťaženia skúšobného modelu **12** na ktorom sú uvedené hodnoty pomerných deformácií v mieste tenzometra **T3**. Pri cyklickom teplotnom zaťažení bolo ako výpočtom, tak aj experimentálne zistené, že maximálne pomerné deformácie od ohybu sú v mieste votknutia rámovej konštrukcie. Pre skúšobný model **20** je na obr. 2 znázornený pracovný diagram a časový priebeh zaťaženia pri konštantnej zaťažujúcej sile a cyklických zaťaženiach od teploty sú uvedené hodnoty pomerných deformácií v mieste tenzometra **T1.** Priehyb vplyvom cyklických zmien teplotného zaťaženia nebol registrovaný. V ostatných prierezoch hodnoty meraných pomerných deformácií korenšpondujú s vypočítanými hodnotami.

Z výsledkov zaťažovania skúšobných telies z hľadiska pevnosti vyplýva, že rámová konštrukcia namáhaná priečným ohybom vykazuje značnú únosnosť po prekročení pružnej oblasti pôsobenia. Vzhľadom na pomerne veľkú pružnoplastickú rezervu je potrebné pri praktickom projektovaní uvažovať s touto rezervou. Pri navrhovaní konštrukcií sa má všeobecne postupovať prístupom "zdola" t.j. cez štádia splastizovania až k hraničným hodnotám plastických deformácií. Určovanie výpočtovej únosnosti musí vychádzať z kritéria obmedzenia plastických deformácií. Závislosť výpočtovej únosnosti a hraničným plastických deformácií je možno vzťahovať k hraničnej únosnosti pri kolapse.

Literatúra

[1] Kulkarni, S., Hahn, G.T., Rubin, C.A., Bhargava, V.: Elasto-Plastic Finite Element Analysis of Theree-Dimensional Pure Rolling Contact at the Shakedown Limit. Journal of Applied Mechanics, Vol. 57, 1990, pp. 57 - 65.

[2] Ponter, A.R.S., Karadeniz, S.: An Extended Shakedown Theory for Structures That Suffer Cyclic Thermal Loading. Part 1: Theory, Journal of Applied Mechanics, Vol. 52, 1985, pp. 877 - 882.

[3] Ponter, A.R.S., Karadeniz, S.: An Extended Shakedown Theory for Structures That Suffer Cyclic Thermal Loading. Part 2: Applications, Journal of Applied Mechanics, Vol. 52, 1985, pp. 883 - 889.

EVIN Ján, Ing.
Fakulta výrobných technológií Technickej univerzity v Košiciach so sídlom v Prešove
Námestie mieru 3
Tel.: 091/7228 28