

FOTOELASTICIMETRICKÉ VYŠETŘOVÁNÍ MEMBRÁNOVÝCH
A OHYBOVÝCH NAPĚTÍ V BOULÍCI TENKÉ STĚNĚ

Ing.Miloš Drdácký, Ing.Jindřich Kratěna,CSc.,

Ing.Marie Zörnerová

Ústav teoretické a aplikované mechaniky ČSAV,
oddělení stability tenkostěnných konstrukcí,
Vyšehradská 49, 128 49 Praha 2

Příspěvek uvádí možnost použití metody reflexní fotoelasticimetrie pro vyšetřování problémů boulení a pokritického chování tenkostěnných těles. Přitom vznikají některé potíže, neboť prostorový charakter napjatosti boulicí stěny může vyvolat složitější fotoelastický jev, zejména rotaci optických os po tloušťce průřezu. Parametry obvykle měřené při rovinné fotoelasticimetrii obecně nedostačují pro určení stavu napjatosti stěny. V příspěvku je popsáno získání potřebných údajů užitím modelu slepeného ze dvou opticky citlivých folií s vloženou odraznou vrstvou ve střednici a proměřením obou jeho povrchů v odraženém světle. Pak je umožněno provést separaci membránových a ohybových napětí v jednotlivých bodech stěny. Připojený příklad ukazuje výsledky měření na polykarbonátovém modelu stěny plnostěnného nosníku při zatížení osamělou silou uprostřed mezi výztuhami.

1. ÚVOD

Určení pole napjatosti štíhlé stěny v pokritickém stadiu jejího chování představuje velmi často pro teoretické řešení dosti složitý problém. Pro hlubší poznání problematiky je nezbytný experimentální výzkum, kde se s výhodou uplatní fotoelasticimetrie, umožňující zkoumat napjatost spojitě v celé ploše modelu nebo konstrukce.

Pokud se zajímáme při řešení uvedené problematiky pouze o stav membránových napětí stěny, lze provést obvyklá fotoelastická měření na průhledném modelu z opticky citlivého materiálu a vyhodnotit některou z používaných metod příslušná napětí ve zvolených bodech stěny. Experimenty je možno rozšířit zavedením vhodného materiálu a zmrazovací techniky na oblast velkých průhybů (boulení) stěny, jak ukázal KRATĚNA /3/,/4/. V takovém případě již vznikají značná ohybová napětí ve vrcholech vln zdeformované tenké stěny, např. v místě jejího vetknutí do pásnice, a napjatost je nutno uvažovat a měřit komplexně. Při pozorování průhledného modelu v průchozím polarizovaném světle však odpovídá výsledný řád dvojlomu a izoklína opět pouze stavu membránových napětí, neboť vliv ohybových se díky samokompensaci neuplatní. Nutným předpokladem pro takové měření je však souosost směrů hlavních napětí ohybových i membránových, jinak dochází k nepříznivým jevům, jež budou popsány níže. Ovšem pozorování je dále zatíženo chybami vyplývajícími jednak ze šikmého průchodu světla silně deformovanými částmi modelu, jednak z nelineárního průběhu ohybových napětí po tloušče stěny při větších křivostech.

Ohybová napětí u průhledných modelů lze zjistit při užití zmrazovací techniky např. stereometricky, tj. proměřením křivostí deformované stěny. Určení kompletní napjatosti stěny při velkých průhybech však můžeme provést i čistě fotoelasticimetricky, uijeme-li modelu slepeného ze dvou opticky citlivých desek a mezi ně vložíme reflexní vrstvu pro pozorování v odraženém světle. Prakticky se jedná v jednoduchých případech o použití metody fotoelastické povrchové vrstvy.

2. FOTCELASTICKÝ JEV V NEHOMOGENNÍM POLI NAPĚTÍ

Reflexní metoda umožňuje určení napětí ve všech bodech povrchu tělesa téměř tak snadno jako klasická fotoelasticimetrie, kromě oblastí s velkými gradienty nebo křivostmi. Při vyšetřování skořepin i desek namáhaných určitým způsobem se však objevuje obtíž plynoucí ze změny směru výsledných hlavních napětí po tloušťce dvojlomné vrstvy. Tato rotace je výsledkem superpozice konstantního membránového napětí a proměnného napětí ohybového, mají-li jim příslušná hlavní napětí různé směry. Fotoelastický efekt v takovém proměnném poli je složitý a parametry obvykle měřené při kolmém dopadu světla nedostačují pro určení napjatosti. V případě rotace optických os po tloušťce průřezu jsou v monochromatickém světle obecně měřitelné tři optické hodnoty. Izoklína se totiž neobjeví při zkřížených polarizačních filtrech, nýbrž při obecném úhlu vzájemného pootočení jejich os. Tato změna úhlu oproti zkříženým filtrům je další měřitelnou optickou veličinou a nazývá se úhel rotace (viz např. KUSKE /5/).

Při užití reflexní fotoelasticimetrie díky symetrii optického systému vzhledem k odrazné vrstvě vymizí úhel rotace, což umožňuje pozorovat ostré izoklíny při zkřížených filtrech. Můžeme tedy pro uvažovaný případ nehomogenity pole napjatosti určit 4 nezávislé údaje proměřením modelu z obou stran.

Metody separace membránových a ohybových napětí z naměřených optických údajů jsou dosud málo propracovány. Shrnutí způsobů inverzního řešení je možno nalézt v práci /2/. Pro účely našeho příspěvku nejlépe vyhovuje přibližný postup, jehož základní myšlenku podali BUCCI, MYLONAS, SCHUMANN /1/. Výpočet fotoelastického jevu se pak provádí za předpokladu lineární proměny rozdílu hlavních napětí po vrstvě. Pozorovaný dvojlom je pak možno uvažovat stejný jako ve vrstvě s konstantním napětím rovným skutečnému napětí ve středu vrstvy. Hlavní směry a odpovídající izoklíny jsou však uvažovány jako na volném povrchu vrstvy, tj. předpokládáme stejný sklon roviny dopadajícího i odraženého světla.

3. PŘÍKLAD MODELOVÉ ZKOUŠKY

3.1. MODEL A ZATÍŽENÍ

Měření bylo provedeno na modelu stěny plnostěnného nosníku zhotoveném dle obr. 1. Model byl vyroben z materiálu PS-1 firmy Photolastic, přičemž stěna tlustá cca 2 mm byla slepena ze dvou folií tloušťky 1 mm (přesně $0,044 \pm 0,001$ inch) originálním tmelem PC-1. Optická citlivost použitého materiálu jest 6,97 kN/m.řád.

Pro ilustrativní příklad bylo vybráno zatížení osamělou silou realizovanou břitem, jehož tvar stejně jako poloha břemena jsou patrné z uvedeného obr.1. Model byl zatěžován v rámu a potřebná síla vyvozena závažím a pákovým převodem. Vzhledem k rozsahu a závěru této práce není možné zabývat se všemi detaily provedeního měření, uveďme proto jenom některá fakta.

3.2. MĚŘENÍ FOTOELASTICKÝCH PARAMETRŮ

Všechny hodnoty uvedené dále byly získány proměřením modelu zatíženého břitem silou $P = 981$ N. Měření bylo provedeno pomocí reflexního polariskopu Photolastic - serie 030.

Na obr. 2 a,b jsou uvedeny izoklíny a na obr. 3 a,b izochromaty zmíněného zatěžovacího případu, pozorované při kolmém dopadu světla. Poznamenejme, že nebylo užito zmrazovací techniky a boulení tenké stěny je tudíž poměrně nevýrazné. Pro účely početního vyhodnocení byly zjištěny hodnoty dvojlomu a izoklín v bodech čtvercové sítě, naznačené na obrázcích.

Dále pro možnost separace jednotlivých napětí se provádělo měření při šikmém dopadu světla adaptérem pro šikmý dopad Model 033, dodávaným firmou Photolastic, i kontrolní měření Tesařovou metodou navrtávání modelu.

3.3. VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH ÚDAJŮ

Vzhledem k malé velikosti průhybů stěny byla separace hlavních rozdílných membránových a ohybových napětí provedena zmíněnou přibližnou metodou, jejíž modifikace pro případ stěny slepené ze dvou vrstev byla odvozena v již citované práci /2/. Byl sestaven program pro řešení úlohy a výpočet proveden na

programovatelném stolním kalkulátoru Hewlett-Packard 9820 A. Výsledné izostaty příslušné jak membránovým, tak ohybovým napětím jsou presentovány na obr. 4 a,b.

4. ZÁVĚR

Uvedený příklad byl uskutečněn jako ověřovací test způsobu měření a vyhodnocování fotoelastických údajů při výzkumu boulení tenkých stěn. Dalším krokem je použití reflexní fotoelasticimetrie na záznam chování napjatosti boulejší stěny ocelového nosníku. Experiment, který již byl v tomto směru též uskutečněn, prokázal možnost aplikace uvedené metody ve stabilitních úlohách (obr. 5). Pro měření oblastí s větší koncentrací přetvoření je však třeba užívat speciální optické materiály, zejména lepidla. Na obr. 5 je patrné jak se krycí deska v blízkosti břemena odlepila od ocelové stěny oddělením reflexní vrstvy od folie. V modelu popsaném v odst. 3 selhal pokus o zmrazení napětí rovněž porušením reflexního tmelu.

Získání kvalitních údajů předpokládá vyřešení řady problémů. Mimo jiné ověření linearity chování optické vrstvy při větších křivostech, věrnosti přenosu přetvoření povrchu stěny do optické vrstvy, v neposlední řadě pak již diskutovaného vlivu rotace optických os na měření. Vlivztužení tenké stěny nalepenou folií lze uvážit zavedením efektivních průřezových charakteristik.

Závěrem možno říci, že rozvoj použití prostorové fotoelasticity v popsané oblasti je nadějný a velmi žádoucí, neboť tato metoda může významně přispět k hlubšímu poznání chování tenkostěnných konstrukcí v pokritickém stadiu. Pozorování spojitě oblasti je výhodné pro získání informací o postupu plastifikace ve stěně a vytváření mechanismu zhroucení. Neméně významné je využití metody pro vyšetřování složitějších kombinací namáhání v praktických úlohách (např. krut s ohybem, apod.) a dále zejména pro získání obrazu napjatosti skořepinových konstrukcí.

Poděkování

Autoři děkují katodře pružnosti a pevnosti strojní fakulty ČVUT v Praze za laskavé zapůjčení přístrojů potřebných pro provedení experimentu, zejména pak ing. Stanislavu Holému CSc. za cenné rady a účinnou pomoc.

REFERENCE :

- /1./ BUCCI,R., MYLONAS,C., SCHUMANN,W., 1971 (March), The Separation of Membrane and Bending Shears in Shell with Two Birefringent Coatings, Trans. of ASME, J.of Appl.Mech., pp. 217 - 226.
- /2./ DRDÁČKÝ,M.; 1975 (září), Fotoelasticimetrické vyšetřování membránových a ohybových napětí ve stěně tenkostěnného nosníku při velkých deformacích, Výzkumná zpráva, ÚTAM ČSAV.
- /3./ KRATĚNA,J., 1973, Photoelastic Investigation of Membrane Stresses in Web Girders Buckled under Shear Loading, Acta Technica ČSAV, No.1.
- /4./ KRATĚNA,J., 1973, Vyšetřování membránových napětí ve stěnách tenkostěnných nosníků v pokritické oblasti pomocí fotoelasticimetrie, Stavebnický časopis SAV, č. 6-8.
- /5./ KUSKE,A., 1959, Einführung in die Spannungsoptik, Stuttgart, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft M.B.H.

SEZNAM VYOBRAZENÍ

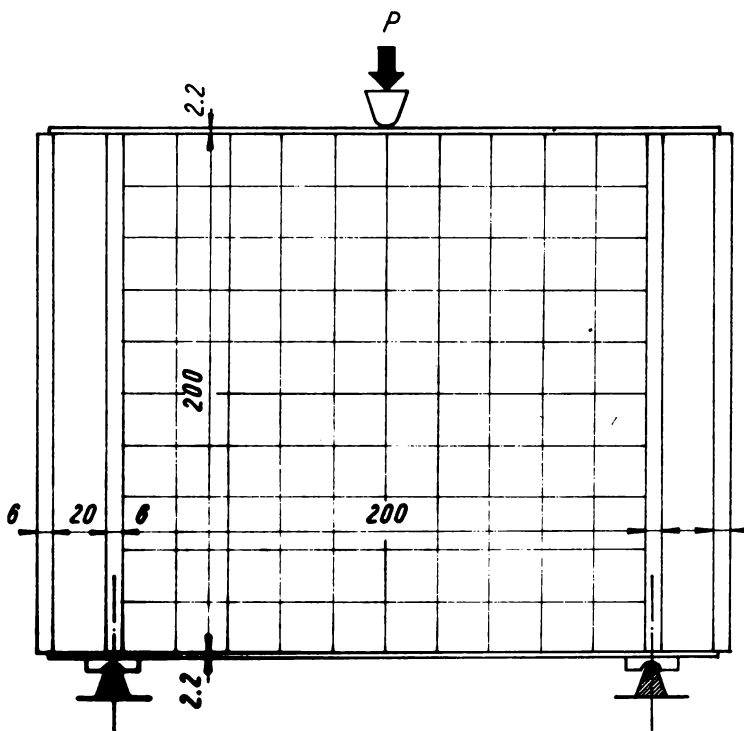
Obr. 1. Model stěny plnostěnného nosníku a schema zatížení

Obr. 2. Průběh izoklín v boulicí stěně modelu

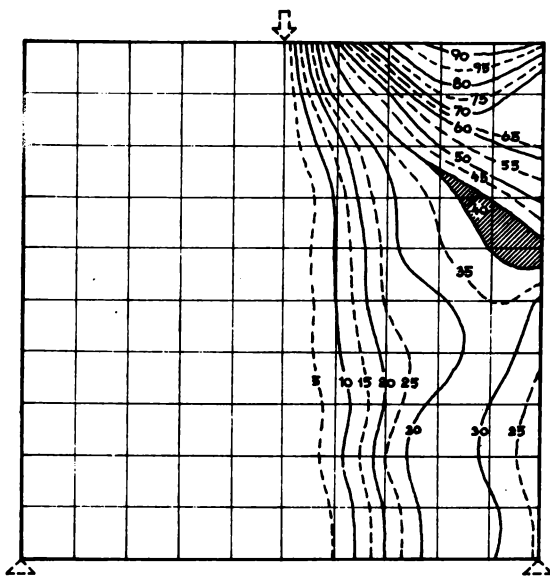
Obr. 3. Obraz izochromat v boulicí stěně modelu

Obr. 4. Výsledné izostaty membránových a ohybových napětí
v boulicí stěně modelu

Obr. 5. Obraz izochromat v opticky citlivé vrstvě nalepené na
stěně ocelového nosníku

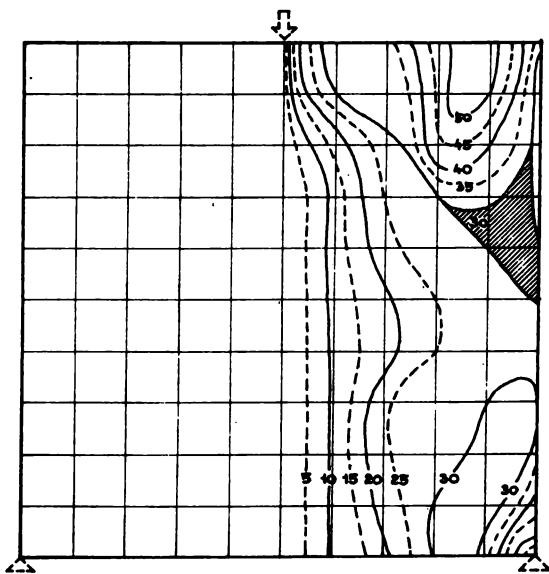


Obr. 1



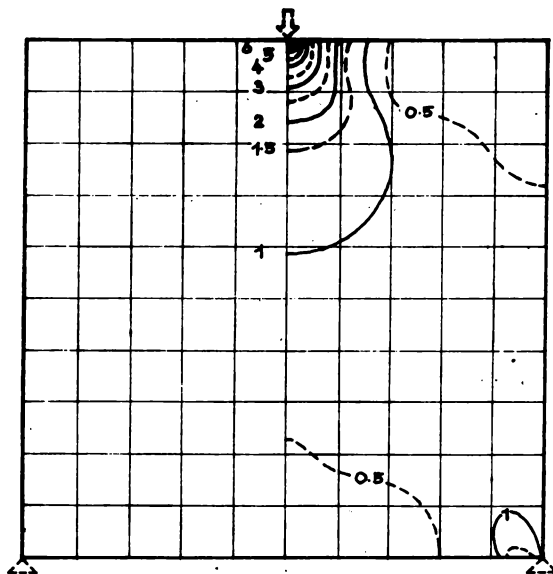
*Izokliny
strana 1*

a)



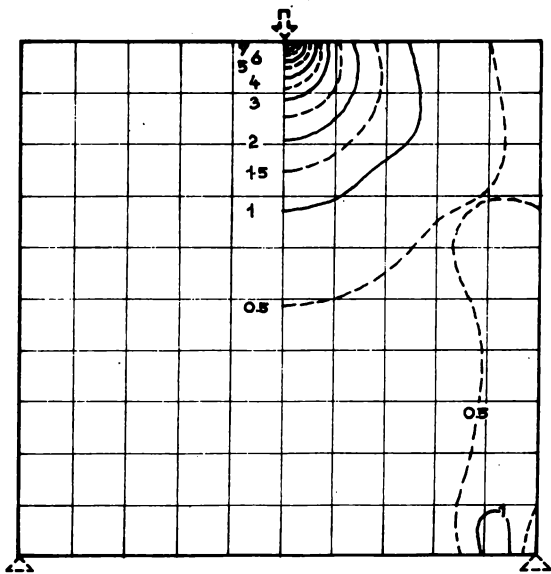
*Izokliny
strana 2*

b)



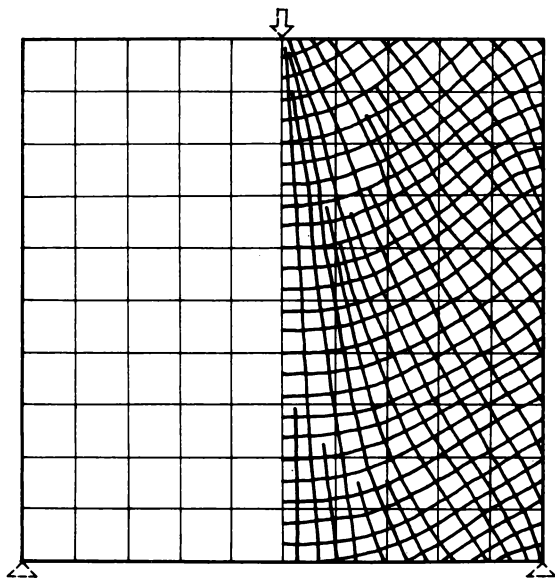
Izochromaty
strana 1

a)



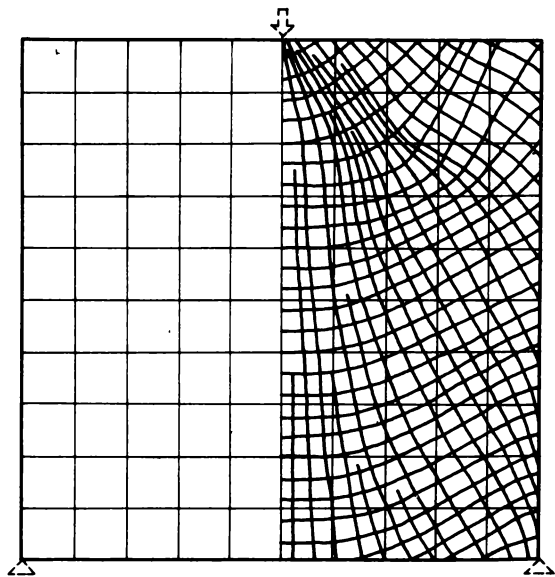
Izochromaty
strana 2

b)



*izostaty
membránového
napětí*

a)



*izostaty
ohybového
napětí*

b)

Obr. 4

- 31 -

