

# ÚVOD DO FOTOELASTICIMETRIE

JIŘÍ VRBA, PETR FRANTÍK<sup>1</sup>

Tento text je určen posluchačům druhého ročníku stavební fakulty pro první seznámení s popisovanou experimentální metodou. Výklad je proto maximálně zjednodušen. Podrobnější informace lze nalézt v citované literatuře, ze které tento text vychází.

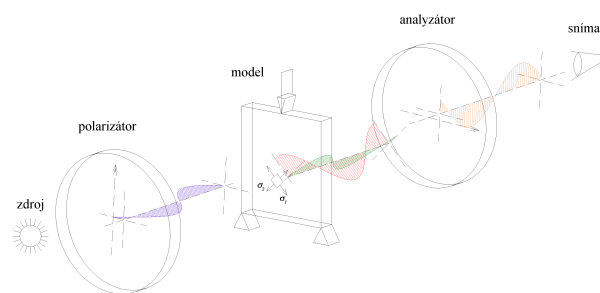
Objev fotoelasticimetrického jevu se připisuje D. Brewsterovi, který v roce 1816 uveřejnil zprávu o tom, že na skle pozorovaném v polarizovaném světle, vznikly vlivem napětí barevné obrazce. Metoda se nejprve uplatnila pro vyšetřování okrajového napětí na modelu u rovinných úloh. V dalších letech byl rozpracován postup pro kompletní řešení napjatosti rovinné úlohy. Aplikace této metody je možná i na model prostorové úlohy, ale toto měření je podstatně náročnější. Lze vyšetřovat úlohy se statickým i dynamickým zatížením. V současné době se používá také reflexní metoda, která umožňuje měření povrchového napětí přímo na skutečné konstrukci nanesením speciální látky na její povrch a pozorováním odraženého polarizovaného světla. Pro pochopení hlavních principů je však nejnázornější rovinná fotoelasticimetrie, která bude popsána dále.

Tato metoda využívá fyzikálního jevu, který se nazývá *dočasný dvojlom*. U opticky izotropních materiálů dochází k dočasnému dvojlomu vnesením napětí. Dvojlom se projeví rozkladem světelného paprsku na dva paprsky, z nichž každý se šíří jinou rychlostí a kmitá v jiné rovině.

## Polariskop

Pro měření se používá přístroj, který se nazývá *polariskop*, který je schématicky znázorněn na obr. 5.

Skládá se ze zdroje světla, polarizátoru a analyzátoru. Zdroj světla může poskytovat monochromatické nebo bílé světlo. Monochromatické světlo obsahuje pouze jednu frekvenční



Obr. 1: Schéma polariskopu

složku, používá se například sodíková lampy. Bílé světlo obsahuje všechny barevné složky.

Polarizátor i analyzátor jsou optické filtry, které usměrňují světelné paprsky buď do jedné roviny nebo do dvou rovin vzájemně kolmých. První případ může být realizován polarizačním filtrem, který propouští pouze světelné paprsky kmitající v rovině kolmé na osu tohoto filtru. Tím vzniká *přímkově polarizované* světlo. *Kruhově polarizované* světlo vznikne jako výsledek dvou přímkově polarizovaných navzájem kolmých světelných vln, které mají stejnou amplitudu a frekvenci, ale jsou fázově posunuté o  $\pi/2$ . To lze prakticky realizovat vložením čtvrtvlnové desky, která má optickou osu pootočenou o  $45^\circ$  od optické osy polarizačního filtru.

Prostor mezi polarizátorem a analyzátorem se nazývá pracovní prostor polarizátoru. V něm je umístěn model a zatěžovací rám. *Model* je vyroben ze speciálního materiálu. Tento materiál musí být průhledný, bez vnitřního pnutí, musí mít dostatečnou optickou citlivost, vhodné mechanické vlastnosti (pevnost) a musí u něj platit úměrnost mezi mechanickými a optickými vlastnostmi. Při výrobě modelu je nutné zabránit vnesení vnitřního pnutí, které může vzniknout nevhodným opracováním.

## Určení izoklín a izochrom

Při měření umístíme připravený model do pracovního pole polariskopu a pomocí zatěžovacího rámu ho zatížíme. Neusměrněné světelné paprsky ze zdroje prochází nejprve polarizátorem, který je usměrní. Tyto usměrněné paprsky dále prochází zatíženým modelem. Zde

<sup>1</sup>Ing. Jiří Vrba, Ústav stavební mechaniky FAST 1994-2001, email: vrba.j@fce.vutbr.cz,  
Ing. Petr Frantík, Ústav stavební mechaniky FAST, email: frantik.p@fce.vutbr.cz

vlivem napětí dochází k dvojlomu a jednotlivé paprsky se rozloží do dvou. Zároveň vzniká fázový posun. Pozorováním paprsků procházejících analyzátozem lze získat průběhy izoklín a izochrom. *Izoklína* je křivka jejíž body mají stejný sklon hlavních napětí. *Izochroma* je křivka jejíž body mají stejný rozdíl hlavních napětí.

Pro jejich určení využíváme dva fyzikální principy:

- polarizovaný paprsek, který projde skrz model se rozloží do dvou kolmých rovin totožných se směry hlavních napětí v daném bodě.
- každý z těchto dvou paprsků se šíří modelem jinou rychlostí, čímž dojde k jejich fázovému posuvu. Velikost tohoto fázového posuvu je úměrná rozdílu hlavních napětí v daném bodě ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ).

Nyní se podrobněji zaměříme na případ přímkového polariskopu se zkříženými osami analyzátoru a polarizátoru. Předpokládáme izochromatické světlo. Je-li intenzita světla vycházejícího ze zdroje  $I_0$ , pak pro intenzitu světla vycházejícího z analyzátoru  $I$  bude platit

$$I = I_0 \sin^2 2\alpha \cdot \sin^2 \pi m, \quad (1)$$

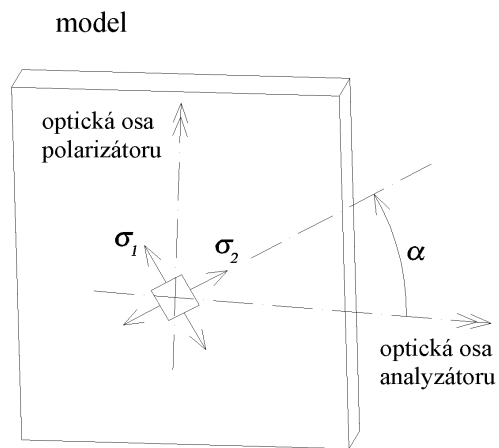
kde  $\alpha$  je úhel mezi směry hlavních napětí v daném bodě a osami filtrů, viz obr. 2,  $m$  je řád izochromatické čáry.

Izoklíny a izochromy vznikají v místech, kde je intenzita světla nulová. Podle vztahu 1 toto platí je-li

$$\sin^2 2\alpha = 0, \quad \text{odkud } \alpha = 0, \pi, 2\pi, 3\pi, \dots \quad (2)$$

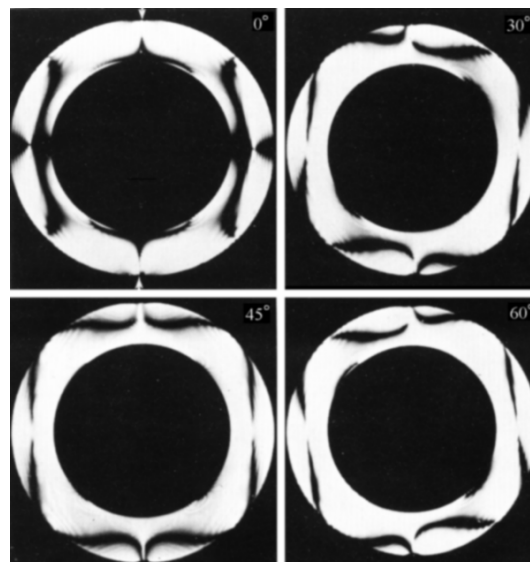
Izoklíny tedy vznikají v místech, kde směry hlavních napětí jsou totožné se směry os filtrů. Postupným současným otačením filtrů<sup>2</sup> lze získat izoklíny pro jednotlivé úhly. Izoklíny nevyovídají o velikosti napětí, pouze o směru hlavních napětí, proto nezávisí na velikosti zatížení.

<sup>2</sup>pravý úhel mezi analyzátozem a polarizátorem zůstává zachován



Obr. 2: Úhel mezi směry hlavních napětí a osami filtrů

Izoklíny u svisle zatíženého prstence jsou na obrázku 3.



Obr. 3: Izoklíny na prstenci, [3]

Nulová intenzita světla je podle vztahu 1 rovněž v bodech kde

$$\sin^2 \pi m = 0, \quad \text{odkud } m = 0, 1, 2, \dots, \quad (3)$$

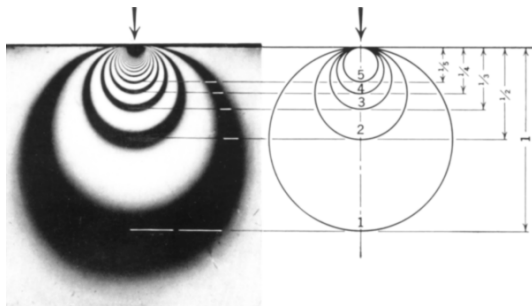
kde řád izochromatické čáry  $m$  je roven

$$m = \frac{d}{k}(\sigma_1 - \sigma_2). \quad (4)$$

$k$  je optická citlivost materiálu a  $d$  je tloušťka modelu. Úpravou vztahu (4) lze získat

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{mk}{d}, \quad (5)$$

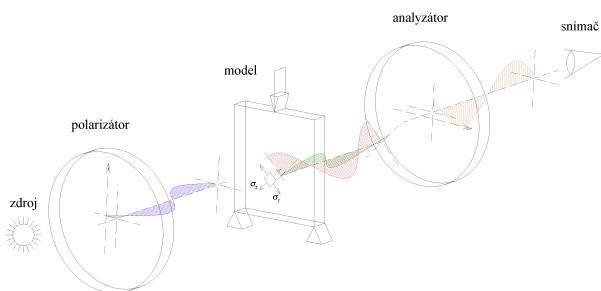
pomocí kterého určíme rozdíl hlavních napětí v daném bodě. Izochromy nezávisí na natočení filtrů, ale závisí na velikosti zatížení. Při použití bílého světla se izochromy zobrazí jako barevné přechody. Příklad izochrom je na obr. 4.



Obr. 4: Izochromy, [3]

### Vyhodnocení

Z předchozího pozorování jsme získali v každém bodě modelu směr hlavních napětí  $\alpha$  a rozdíl hlavních napětí  $(\sigma_1 - \sigma_2)$ . Tyto hodnoty jsou znázorněny na Mohrově kružnici.



Obr. 5: Mohrova kružnice

Z tohoto obrázku je zřejmé, že ze zjištěných hodnot je možné určit maximální smykové napětí

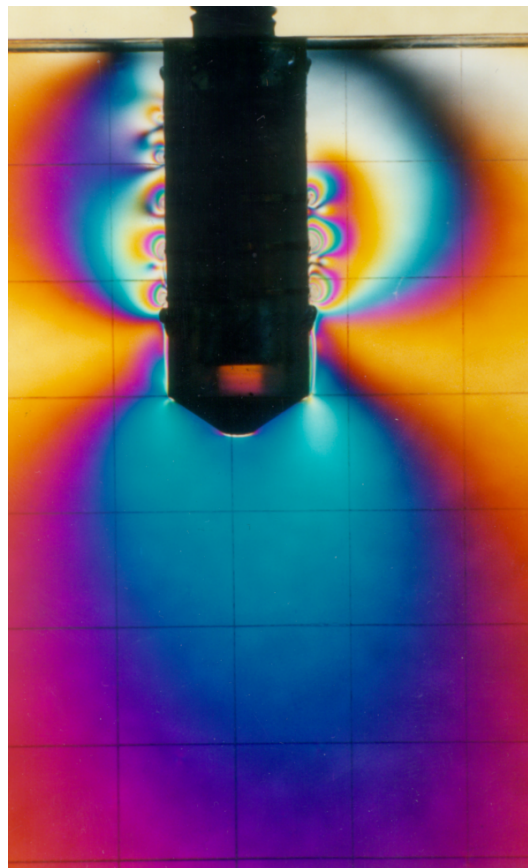
$$\tau_{max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2). \quad (6)$$

Dále je možné určit tangenciální napětí

$$\tau_{xy} = \tau_{max} \sin 2\alpha. \quad (7)$$

Ostatní složky napětí z těchto hodnot přímo neurčíme. Pro jejich určení je nutné použít podmínky rovnováhy. Zvláštním případem je nezatížený okraj, kde hlavní napětí mají směr kolmý a rovnoběžný s okrajem, a nenulová je pouze složka napětí rovnoběžná s okrajem.

Příklad praktického využití fotoelasticimetrie je obrázek ???. Jedná se o měření, jehož úkolem bylo určit rozložení radiálního kontaktního napětí po délce hmoždinky. Tato metoda poskytla názorné výsledky, které umožnily porovnat několik typů hmoždinek.



Obr. 6: Izochromy, použito bílé světlo, [4]

### Literatura

- [1] Bednár J., Kolář V., Mejzlík L., Novák P., Plechata R., Šlechta J.: Experimentální pružnost, SNTL, Praha, 1970
  - [2] Hetényi M.: Příručka experimentálnej pružnosti, SNTL, Bratislava, 1961
  - [3] Frocht M. M.: Photoelasticity I, II, John Willey & Sons, New York, 1941
  - [4] Vrba J., Suza I.: Rozložení kontaktního napětí pro různé typy hmoždinek, interní zpráva, VUT FAST Brno, 1998
- Tento učební text byl vytvořen za podpory CEZ:J22/98:261100009  
Poslední aktualizace 19. března 2001