

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Vratislav Havlovic

Demonstrace fotoelasticimetrické metody

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 9 (1964), No. 2, 73--80,81--85,86

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/137657>

Terms of use:

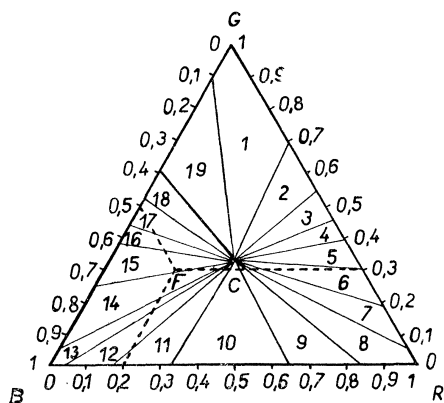
© Jednota českých matematiků a fyziků, 1964

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

životního tempa nabývají problémy barvy a jejího vnímání zvláště velkého významu. Například barevná fotografie, která pracuje dnes výhradně se systémem tří senzibilních vrstev, nebo barevná televize plně využívají moderních poznatků o barevném vidění.



Obr. 7. 1 — žlutavě zelená, 2 — žlutě zelená, 3 — zelenavě žlutá, 4 — žlutá, 5 — žlutavě oranžová, 6 — oranžová, 7 — červeně oranžová, 8 — červená, 9 — purpurově červená, 10 — červeně purpurová, 11 — červeně purpurová, 12 — purpurová, 13 — modravě purpurová, 14 — purpurově modrá, 15 — modrá, 16 — zelenavě modrá, 17 — modrozelená, 18 — modravě zelená, 19 — zelená, C — bílý bod.

Literatura

- A. ZAUSZNICA: *Nauka o barwie*. Panstwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1959.
 V. V. ŠARONOV: *Svět i cvět*. Gos. izdat. fiz. mat. literatury, Moskva 1961.
 J. FUKA - B. HAVELKA: *Optika*. SPN, Praha 1961.
Handbuch der Physik. Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1956.
 D. S. VOLOSOV - M. V. CIVKIN: *Těorija i rasčet světooptičeskich systém*. Gos. izdat. fiz. mat. literatury, Moskva 1960.

DEMONSTRACE FOTOELASTICIMETRICKÉ METODY

VRATISLAV HAVLOVIC, Hradec Králové

ÚVOD

V učebnicích určených pro výuku fyziky v 11., popř. 12. třídě VVŠ je obsažen výklad fyzikální optiky včetně polarizace. Jako ukázka praktického využití polarizačního jevu je tu zmínka o fotoelasticimetrické metodě řešení problémů rovinné napjatosti, která nabývá stále většího významu v technické a vědecké praxi. Fotoelasticimetrie je v současné době jednou z nejdůležitějších modelových metod. Umožňuje totiž získat vizuálně jasný obraz o průběhu napětí po celém rozsahu zkoušeného modelu, což jiné metody nedovolují. Úkolem tohoto článku je seznámit čtenáře se základními principy fotoelasticimetrické metody a s její dostupnou experimentální realizací na praktických příkladech z poněkud nevšední oblasti — z tělovědy.

Fotoelasticimetrická metoda prakticky využívá umělého dvojlomu modelových látek vystavených mechanickému zatížení. Řada průhledných opticky izotropních látek při elastické deformaci vykazuje umělý dvojlom. Z mnoha řezů, které lze vést kolmo k rovině modelu určitým bodem, existují jen dva navzájem kolmé řezy, v nichž smyková napětí vymizí a hodnoty normálních napětí dosahují maximálních a minimálních velikostí. Tyto řezy se nazývají hlavními a příslušná napětí pak napětími hlavními. Fotoelasticimetrická metoda umožňuje stanovit na modelech, které jsou napodobeninou některých mechanických konstrukčních elementů jako jsou nosníky, desky, kola apod., měřením optického dvojlomu rozdílly hlavních napětí a dále s pomocí různých vyhodnocovacích metod i hlavní napětí samotná. Výsledky získané na modelech lze na základě zákona fyzikální podobnosti přenášet na skutečné poměry.

Z obecného hlediska bylo pro prostorovou fotoelasticimetrii dokázáno, že šíření světla v bodě prostorově napjatého modelu je charakterizováno *indexovým elipsoidem*. Jako indexový elipsoid se označuje pomocná vlnoplocha, jež umožňuje při studiu optických jevů na krystalech dělat předpovědi o polarizačních poměrech a optickém dvojlomu. Opticky dvojosé krystaly jsou z hlediska jejich optické lámavosti charakterizovány třemi hlavními indexy lomu n_1 , n_2 a n_3 (kde n_1 a n_3 jsou extrémní hodnoty). Hlavní indexy lomu tvoří poloosy indexového elipsoidu. Se směry těchto hlavních indexů lomu jsou identické směry hlavních napětí. Mezi hlavními indexy lomu a hlavními napětími pak platí vztahy odvozené v literatuře [2]:

$$(1) \quad \begin{aligned} n_1 &= n_0 + C_1 v_1 + C_2(v_2 + v_3), \\ n_2 &= n_0 + C_1 v_2 + C_2(v_3 + v_1), \\ n_3 &= n_0 + C_1 v_3 + C_2(v_1 + v_2), \end{aligned}$$

kde v_1, v_2, v_3 = hlavní napětí (na modelu),

C_1, C_2 = absolutní optické konstanty, závislé na fyzikálních vlastnostech modelového materiálu a vlnové délce světla; udávají se v jednotkách zvaných brewster [1 brewster = 10^{-13} cm² dyn⁻¹],

n_0 = index lomu nezatíženého modelu,

n_1, n_2, n_3 = hlavní indexy lomu.

V případě jednoosé napjatosti vzniká opticky jednoosé těleso, v případě rovinné nebo prostorové napjatosti vzniká opticky dvojlomné těleso, jež se chová jako opticky dvojosý krystal. Při rovinné napjatosti ($v_3 = 0$) lze obdržet pro rozdíl obou hlavních indexů lomu vztah

$$(2) \quad n_1 - n_2 = (C_1 - C_2)(v_1 - v_2),$$

$$(2a) \quad n_1 - n_2 = (C_1 - C_2) 2\tau_{\max}.$$

Rozdíl obou hlavních indexů lomu je tedy úměrný maximálnímu smykovému napětí τ_{\max} . Jestliže se rovinný model osvětlí kolmo ke směřům hlavních napětí

v_1 a v_2 lineárně polarizovaným světlem, světlo se rozkládá do dvou složek, jejichž směry se ztotožňují se směry hlavních napětí v_1 a v_2 .

Má-li vyšetřovaný model tloušťku t , pak vykazují obě složky světla po výstupu z modelu dráhový rozdíl

$$(3) \quad \Delta = t(n_1 - n_2),$$

$$(3a) \quad \Delta = t(C_1 - C_2) 2\tau_{\max},$$

popř. fázový rozdíl

$$(4) \quad \delta = 2\pi \frac{\Delta}{\lambda_0},$$

$$(4a) \quad \delta = 2\pi t \frac{(n_1 - n_2)}{\lambda_0},$$

$$(4b) \quad \delta = 2\pi t \frac{(C_1 - C_2)}{\lambda_0} (v_1 - v_2),$$

$$(4c) \quad \delta = 2\pi t \frac{(C_1 - C_2)}{\lambda_0} 2\tau_{\max},$$

kde λ_0 = vlnová délka světla (na vzduchu), $K_{\lambda_0} = \frac{\lambda_0}{C_1 - C_2}$ optická citlivost mode-

lového materiálu závislá na vlnové délce světla. Fázový rozdíl určený úhlem δ je tedy přímo úměrný rozdílu hlavních napětí ($v_1 - v_2$), tloušťce modelu t a optické konstantě $C = C_1 - C_2$ a nepřímo úměrný vlnové délce použitého světla. Rovnice (4c) označuje se pak jako *základní rovnice fotoelasticimetrie*.

Jestliže se umístí nezatížený model zhotovený z opticky citlivých modelových hmot mezi zkřížené polarizační roviny polarizátoru a analyzátoru, zůstává zorné pole tmavé. Po zatížení modelu se jeví různá světelná intenzita v jednotlivých bodech rovinného modelu. Nulová intenzita čili ztmavění některých míst pozorovaného modelu nastává tam, kde svírá jeden ze směrů hlavních napětí s rovinou kmitů polarizovaného paprsku úhel 0° nebo 90° , obecně pak úhel

$$\alpha = n \frac{1}{2}\pi \quad (n \text{ celé číslo}).$$

Světelná intenzita po průchodu analyzátozem je dána výrazem

$$(5) \quad I_A = I_0 a \sin^2 2\alpha \sin^2 (\delta/2),$$

kde I_A = intenzita světla za analyzátozem,

I_0 = intenzita světla dopadajícího na polarizátor,

a = koeficient propustnosti (vystihuje světelné ztráty),

α = úhel mezi jedním směrem hlavního napětí a rovinou kmitů polarizovaného paprsku,

δ = fázový rozdíl mezi oběma světelnými složkami.

Dosadíme-li za úhel $\alpha = 0^\circ$ nebo 90° , bude intenzita světla I_A ze vztahu (5) rovna nule;

výsledkem budou tedy temná místa v zorném poli. Protože směr i velikost hlavních napětí na modelu se mění od místa k místu spojitě, tvoří tato místa souvislou černou čáru. Otáčíme-li polarizačními filtry zachovávající kolmost jejich polarizačních rovin o jistý úhel, změní se poloha této černé čáry. Tyto černé čáry, z jejichž průběhu lze určit *směry hlavních napětí v modelu*, se nazývají *křivky izoklinné (izokliny)*. Definujeme je jako geometrická místa bodů, v nichž směry hlavních napětí v_1 a v_2 jsou rovnoběžné nebo kolmé k rovině kmitů polarizovaného paprsku.

Ztemnění dalších míst na vyšetřovaném modelu nastává také tehdy, když ve vzorci (5) se anuluje druhá z funkcí. Tento případ nastává při fázovém rozdílu $\delta = 2\pi m$, kde m je číslo celé, jen v místech, kde rozdíl hlavních napětí ($v_1 - v_2$) je roven nule. Podle výše uvedeného vztahu (4) je fázový rozdíl δ nepřímo úměrný vlnové délce λ_0 použitého světla. Ztemnění nezávislé na vlnové délce tedy může nastat pouze tehdy, když $v_1 - v_2 = 0$. Většinou vznikají tmavé body (vzácně linie), zvané *singulární body*, které nemění svou polohu při simultánním natáčení zkřížených polarizačních filtrů. Jsou to místa, kde je rozdíl hlavních napětí roven nule. Z průběhu izoklinných křivek je zřejmé, že se tyto křivky protínají v singulárních bodech.

Dalším zatěžováním modelu v bílém světle vzniknou mimo uvedené izoklinné křivky a singulární body též *křivky izochromatické (izochromaty)*. Tyto křivky stejného zabarvení vzniknou tam, kde *rozdíl hlavních napětí $v_1 - v_2$ je stejně veliký* a není roven nule. Křivky izoklinné vznikají, jak již bylo uvedeno, v tom případě, když nezávisle na vlnové délce při fázovém rozdílu $\delta = 2\pi m$ a rozdílu hlavních napětí $v_1 - v_2 = 0$ se anuluje druhá funkce ve výrazu (5). V prvním případě při $\delta = 2\pi m$, kdy se intenzita podle vzorce (5) anuluje, nastává skutečné ztmavení, v dalších pak interferenční zbarvení, jež je způsobeno útlumem té barevné komponenty bílého světla, jejíž délka vlny vyhovuje vyslovené podmínce. Ve všech dalších případech je totiž podle vzorce (4) fázový rozdíl δ nepřímo závislý na vlnové délce λ_0 použitého světla. Interferenční zbarvení nastává tedy v těch místech zatíženého modelu, kde rozdíl hlavních napětí je konstantní, úplně zčernání pak je v bodech singulárních, v nichž rozdíl hlavních napětí ($v_1 - v_2$) je roven nule. Izochromatické křivky jsou geometrickým místem bodů stejně zabarvených konstantním dvojlomem a definují místa stejných rozdílů hlavních napětí.

Při pozorování modelů v přímkově polarizovaném světle jsou při zatížení současně patrné křivky izoklinné a izochromatické. Protože přítomnost izoklinných křivek ruší pozorování křivek izochromatických, je vhodné izoklinné křivky mimo singulární body odstranit. Za tím účelem se vkládají mezi model, polarizátor a analyzátor *čtvrťvlnové desky* a obraz se pozoruje *v kruhově polarizovaném světle*. Kruhově polarizované světlo se získá ze světla přímkově polarizovaného tak, že čtvrtvlnová dvojlomná deska (slídová, skleněná apod.) rozloží kmity přímkově polarizovaného světla do dvou rovin a udělí jim různou rychlost, takže paprsky vyjdou z fáze. Výsledné kmity musí být v rovinách skloněných od původní polarizační roviny o úhel $\alpha = \pm 45^\circ$. Z toho důvodu poloha čtvrtvlnových desek musí být vždy taková, aby jejich optické osy na sebe kolmé byly skloněny o úhel 45° proti polarizačním rovi-

nám polarizátoru a analyzátoru. Je-li fázový rozdíl roven $\frac{1}{4}\lambda$, pak koncový bod světelného vektoru opisuje dráhu ve tvaru válcové šroubovice o kruhové základně ve směru šíření paprsku. V kruhově polarizovaném světle, kde světelné vektory vykonávají kruhový pohyb s fázovým rozdílem $\frac{1}{4}\lambda$, nemohou se vytvořit izoklinné křivky a objeví se pouze křivky izochromatické. Uvedená úvaha platí přesně pro monochromatické světlo. Tloušťka čtvrtvlnových desek je v přímém poměru k vlnové délce použitého monochromatického světla.

Podrobnější teoretický výklad o polarizaci světla je obsažen např. v učebnici FUKOVĚ-HAVELKOVĚ [1], o fotoelasticimetrické metodě pak ve dvou monografiích Milbauerových-Perlových [2, 3].

FOTOELASTICIMETRICKÉ PŘÍSTROJE

Experimentální realizace fotoelasticimetrické metody je do značné míry závislá na požadavcích, které jsou na tuto metodu kladeny. Lze tedy sestavit fotoelasticimetrické přístroje od jednoduchých typů až po zařízení velmi složitá, vyhovující těm nejvyšším nárokům. Každý fotoelasticimetrický přístroj obsahuje tyto základní součásti, které budou dále podrobněji popsány: světelný zdroj, polarizátor, analyzátor a dvě čtvrtvlnové desky.

Jako *světelné zdroje* se používají zdroje bílého světla (žárovky), které slouží zejména pro vyšetřování izoklinných křivek a singulárních bodů. Pro vyšetřování interferenčních izochromatických křivek je vhodné světlo monochromatické, jež se získá rtuťovými výbojkami (linie 4358 Å, 5461 Å, 5770 Å) nebo sodíkovými výbojkami (linie 5890 Å), případně též zařazením monochromatických filtrů (zeleň s maximální propustností kolem 5600 Å nebo červeného kolem 6230 Å) předsvětelný zdroj. Z geometrického hlediska se dělí světelné zdroje na bodové (projekční žárovky) a plošné (žárovka nebo soustava žárovek či zářivek s rozptýlnou matnicí); jejich použití závisí na druhu fotoelasticimetrického přístroje.

Polarizátor a analyzátor vytvářejí přímkově polarizované světlo. V dnešní době se k tomuto účelu takřka výhradně používají umělé polarizační filtry vyrobené z mikroskopických krystalů herapatitu (perjodid síranu chininu s dvojlomnými vlastnostmi). Tyto krystaly jsou uloženy přímo mezi dvěma skleněnými deskami nebo na syntetické fólii a usměrněny zvláštním způsobem. Tak lze vyrobit polarizační filtry velkých rozměrů (až 300 mm v průměru), které jsou výhodné pro fotoelasticimetrické přístroje s velkým zorným polem k přímému pozorování modelu v procházejícím světle. Z provozního hlediska je výhodné mechanické spřažení polarizátoru s analyzátozem, jež by dovolovalo synchronní otáčení oběma filtry se zkříženými polarizačními rovinami. V ČSSR se výrobou polarizačních filtrů zabývá n. p. Meopta-Bratislava, jež běžně dodává filtry kruhového tvaru o \varnothing 100 mm nebo čtvercového tvaru 100 × 100 mm; první typ je zpravidla vhodnější. Dodávku polarizačních filtrů větších rozměrů je nutno předem projednat s výrobním závodem.

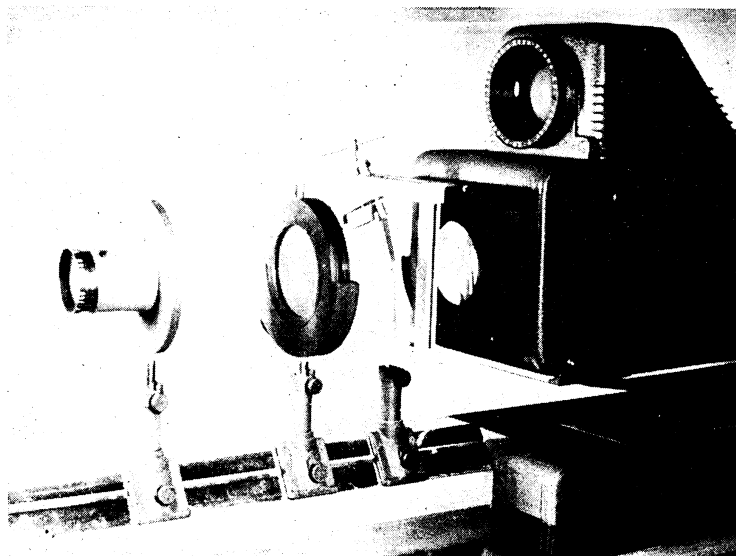
K získání kruhově polarizovaného světla potřebného pro vyšetřování izochromatických křivek jsou nezbytné *čtvrtvlnové desky*. Ty se vyrábějí z materiálů přírodních, tj. ze slídy (muskovitu), nebo syntetických, jako např. z celofánu či acetátu. Tloušťka čtvrtvlnových desek závisí na vlnové délce použitého světla; pro žluté monochromatické světlo sodíkové výbojky má být slídivá destička cca 0,033 mm tlustá. Slídivá deska se chová v polarizovaném světle jako deska napjatá jednosměrným rovnoměrným napětím. Lze ji proto též nahradit deskou skleněnou nebo z plastických hmot, namáhanou konstantním tlakem nebo tahem v zatěžovacím rámu. Pro demonstrační účely zdá se být nejvhodnější čtvrtvlnová deska slídivá, kterou lze získat štípáním elektroizolační slídy vhodných rozměrů a kvality; v této surovině jsme však odkázáni na dovoz. Proto dostupnější budou materiály umělého původu jako celofánová nebo acetátová fólie. Rovněž je možno použít dvou fólií celofánových; podrobnější popis jejich výběru je obsažen na str. 99 v monografii [2].

Jako *modelové materiály* se v praktické fotoelasticitě dnes převážně používá plastických hmot. Z nich nutno jmenovat alespoň polymetylmakryláty (umaplex, plexiglas, perspex, lucit), fenolformaldehydovou pryskyřici (dekorit, marblete, catalin 800), glyftalovou pryskyřici (bakelit), benzylmakrylát (umapolar), polyesterové pryskyřice (fosterit), epoxydové pryskyřice (epoxy, araldit), celuloid a jiné. Tyto materiály se vzájemně liší co do optické citlivosti, pružnosti, opracovatelnosti, průhlednosti apod., takže pro daný úkol je nutno volit materiál s nejvhodnějšími vlastnostmi. V ČSSR je vyráběna n.p. Uma-Semtín speciální modelová hmota na podkladě benzylmakrylátu a dodávána pod firemní značkou Umapolar v deskách 10 mm tlustých. Hotové modely, které po opracování nesmějí v nezátěženém stavu vykazovat žádné vnitřní pnutí, umístí se do *zatěžovacího rámu*, kde jsou vystaveny působení vnějších sil.

Podle způsobu získání polarizovaného světla a podle průběhu světelných paprsků jsou konstruovány fotoelasticimetrické přístroje pro odražené světlo, pro odražené usměrněné světlo (autokolimační přístroje), pro procházející světlo a pro procházející usměrněné světlo. V dalším výkladu se omezíme na popis jednoduchého fotoelasticimetrického přístroje pro procházející světlo, jenž je zejména vhodný pro demonstrační účely. Zhotovení tohoto fotoelasticimetrického přístroje je dostupné pro průměrně vybavenou mechanickou dílnu. Při větších požadavcích a při požadavcích využívat fotoelasticimetrického zařízení též k řešení konkrétních úloh z oboru experimentální pružnosti je možno k tomuto účelu doporučit v ČSSR vyráběný průmyslový fotoelasticimetr typu FP — Meopta, n. p. Bratislava [5]. Tentýž národní podnik je též výrobcem jednoduššího polarizačního přístroje „Polariskop“, typ PS-250, na prohlížení modelů a sklářských výrobků v polarizovaném světle a na zjištění jejich vnitřního pnutí.

DEMONSTRAČNÍ FOTOELASTICIMETR

Základem popisovaného jednoduchého fotoelasticimetru (obr. 1) je standardní epidiaskop „Optirex“ 8,5 × 8,5 cm, výrobek n. p. Meopta-Bratislava, pevně namontovaný na pojízdném stolku s nakláněcí základní deskou a doplněný prismatic-

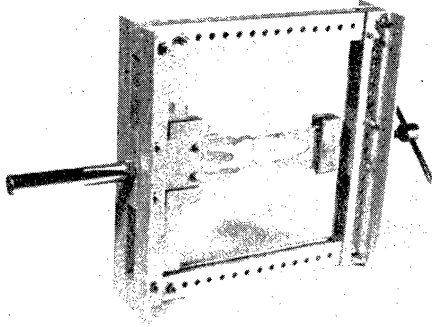


Obr. 1. Epidiaskop s demonstračním fotoelasticimetrickým zařízením na optické lavici.

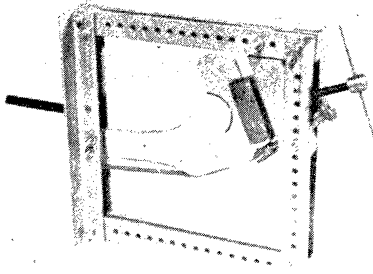
kou optickou lavicí délky cca 80 cm. Pořadí optických členů (na obr. 1 zprava doleva) je dáno takto: světelný zdroj, polarizátor, 1. čtvrtvlnová deska, model v zatěžovacím rámu, 2. čtvrtvlnová deska, analyzátor a projekční objektiv. Za účelem úspory potřebných jezdců (stojánků) byly první tři jmenované optické členy namontovány společně na epidiaskopu, ostatní pak odděleně na optické lavici.

Každý polarizační filtr o průměru 100 mm, výrobek n. p. Meopta-Bratislava, byl zasazen do kruhové objímky z plastické hmoty (pertinax, texgumoid, vinidur) a upevněn otočně v půlkruhovém držáku s drážkou. Směr polarizační roviny každého filtru byl zjištěn s pomocí fotografického polarizačního filtru Zeiss-Bernotar, jenž má orientaci polarizační roviny vyznačenou bílou ryskou. Při zkřížení polarizačních rovin filtru Bernotar a filtru Meopta musí se zorné pole maximálně zatemnit, takže pak směr polarizační roviny filtru Meopta je kolmý k rysce na filtru Bernotar. Směr polarizační roviny na našich filtrech byl označen malým čepem, jenž současně umožňuje snadnou manipulaci při otáčení filtrů. Půlkruhový držák s drážkou, upevněný jednak na epidiaskopu a jednak na samostatném stojánku, je současně nosičem čtvrtvlnových desek. Ty byly vyrobeny štípáním z tabule slídy vhodné velikosti, jak bylo již výše uvedeno, a zasazeny do podobných objímek.

Na rozdíl od fotoelasticimetrů tovární výroby popisovaný přístroj má určitou nevýhodu, způsobenou snahou po konstrukční jednoduchosti, totiž že není mechanicky spřížen pohyb analyzátoru a polarizátoru. Tím je poněkud znesnadněna



a)



b)

Obr. 2. a) Zatěžovací rám s modelem řezu horní a dolní čelisti v rovině 2. stoliček.

b) Zatěžovací rám s modelem horní části stehenní kosti a kyčelního kloubu.

a vzhledem k jeho dostupnosti též pro demonstrační účely. Při výběru materiálu, jakož i po zhotovení modelu doporučuje se přezkoušet jej v polarizovaném světle, zda nevykazuje v nezátěženém stavu vnitřní pnutí. Pro vyšetřování rozdílů hlavních napětí izochromatických křivek a vůbec pro kvantitativní vyšetřování je vhodné použít opticky citlivějších modelových hmot, např. již zmíněnou tuzemskou hmotu BZM (benzylmetakrylát) Umapolar. Hotový model se umístí do zatěžovacího rá-

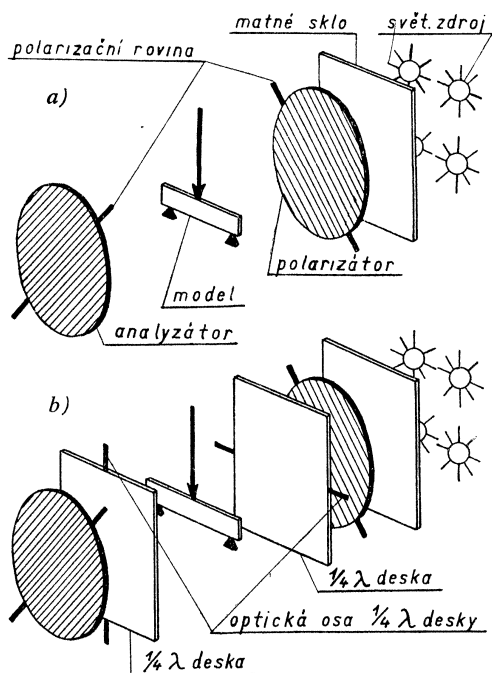
obsluha přístroje. V uspořádání s procházejícím světlem přístroj umožňuje jednak přímé pozorování, dále projekci s použitím normálního promítacího objektivu (viz obr. 1) a fotografickou registraci s pomocí vhodného fotoaparátu. Sami jsme k tomuto účelu používali přístroje na kinofilm Exakta-Varex. Aby paprsky vytvářející obraz procházely modelem pokud možno kolmo a byly spolu rovnoběžné, je nutno volit velký odstup kamery od fotografovaného modelu. Je proto nutné používat objektivů s velkou ohniskovou vzdáleností (teleobjektivů), aby zůstala velikost obrazu zachována. Snímky byly pořizovány buď na černobílý kinofilm (izoklinné křivky), nebo na barevný kinofilm Agfacolor K 16° DIN (izochromatické křivky); v tomto případě zdárný výsledek závisí do značné míry na přesném stanovení expoziční doby. Pro pozorování ve světle monochromatickém bylo používáno světelného zdroje v epidiaskopu ve spojení s absorpčními filtry.

Studované modely byly vyrobeny ručním obráběním z umaplexu, jenž jako modelová hmota se střední optickou citlivostí je zejména vhodný pro studium izoklinných křivek

mečku, jehož uspořádání závisí do značné míry na studovaném problému. Ukázkou univerzálního zatěžovacího rámečku, jakého jsme používali při našich demonstracích, přináší obr. 2. Zatěžovací rámeček byl zhotoven z úhlového železa a umožňuje různé varianty zatížení modelu, jak je patrné z obou vyobrazení. Pro měrné účely se doporučuje zatěžovat model závažím na konci vyvážené páky, která je po celé délce rozdělena stupnicí. Podle umístění páky lze model zatěžovat tlakem neb tahem. Velikost síly působící na model je pak vyjádřena závažími a poměrem vzdáleností.

Je-li fotoelasticimetrický přístroj po konstruktivní stránce připraven k uvedení do provozu, je možno přikročit k jeho seřízení (justáži) a ověření činnosti. Polarizační rovina polarizátoru orientuje se tak, aby byla vodorovná a u analyzátoru svislá. Je výhodné na objímkách obou polarizačních filtrů si vyznačit úhloměrnou stupnici alespoň s hrubým dělením po 10° neb 20° (stupňových jednotek úhlů se ve fotoelasticimetrii nepoužívá). V popisovaném postavení ukazuje polarizační rovina polarizátoru na 100° stupnice, rovina analyzátoru na 0° stupnice. Zorné pole při zkřížených polarizačních rovinách obou filtrů je charakterizováno poklesem světelné intenzity na minimum a jeví tmavě fialové zabarvení, které lze v případě nutnosti odstranit použitím monochromatického zdroje nebo filtru.

Naznačeným způsobem lze dosáhnout světla *přímkově polarizovaného* (viz obr. 3a),



Obr. 3. a) Soustava pro přímkovou polarizaci.

b) Soustava pro kruhovou polarizaci.

o jehož přítomnosti lze se přesvědčit jednoduchými zkouškami. Např. skleněná trubice nebo umaplexová tyčinka namáhaná na ohyb jeví optický dvojlom, takže se některá místa modelu vyjasní a jiná zůstanou tmavá (izokliny). V tom uspořádání lze již snímat u zatíženého modelu izoklinné křivky tak, že se nakreslí nebo fotografuje jejich průběh, odpovídající určitému postavení zkřížených polarizačních filtrů. Tento proces se opakuje pro různá postavení filtrů (např. pro 0° , 20° , 40° , 60° , 100° odpovídá 0°). Tímto způsobem zachycené izoklinné křivky se protínají v singulárních bodech, kde rozdíl hlavních napětí je nulový. Z průběhu izoklinných křivek se stanoví směry hlavních napětí.

Pro kruhovou polarizaci je nutno použít slídivých čtvrtvlnových desek, jak již bylo uvedeno. Při na-

stavených polarizačních filtrech v základní zkřížené poloze jejich polarizačních rovin vložíme do zorného pole první čtvrtvlnovou desku a otáčíme jí, až zorné pole úplně ztmavne. V tomto případě jsou její hlavní osy shodné se zkříženými polarizačními rovinami polaroidů. Definitivní poloha 1. čtvrtvlnové desky je dána úhlem 50° , o němž je nutno ji pootočit. Obdobný postup nutno zachovat u druhé čtvrtvlnové desky při vyjmuté desce první. Když založíme nakonec obě čtvrtvlnové desky do správných poloh, musí být zorné pole tmavé; to znamená, že optické osy čtvrtvlnových desek svírají navzájem úhel 100° a k polarizačním rovinám jsou skloněny o 50° (viz obr. 3b). Je-li zorné pole světlé, jsou osy obou čtvrtvlnových desek rovnoběžné (působí jako půlvlnová deska otáčející polarizační rovinu o 100°) a je nutno jednu desku otočit o 100° , aby jejich optické osy byly zkřížené.

Je-li v konečném uspořádání fotoelasticimetru zorné pole tmavé, mají obě čtvrtvlnové desky stejný dvojlom. Vhodnost čtvrtvlnových desek pro použité světlo určité vlnové délky se prokáže tak, že se prosvítí zatížený model s větším počtem izochromatických křivek monochromatickým světlem (s použitím vhodného filtru). Při nehybném polarizátoru, první čtvrtvlnové desce a modelu otáčí se společně analyzátor s druhou čtvrtvlnovou deskou. Obraz interferenčních pruhů se nesmí měnit, nýbrž musí zůstat na místě. Důkazem toho, jak tloušťka tenkých vrstev ovlivňuje interferenci polarizovaného světla, je barevný snímek na obr. 4. Na štěpitelné destičce z přírodní slídy (muskovitu) je patrné, jak každá vrstva slídy způsobuje v polarizovaném světle odchýlené interferenční zbarvení, jež se mění s přibývajícím tloušťkou vrstvy v pořadí spektrálních barev.

Při stanovení izochromatických křivek v kruhově polarizovaném světle zatěžuje se model co nejvíce k mezi pružnosti. Zvětšováním zatížení při zachování poměru jednotlivých sil, jejich směrů a působišť, roste hustota izochromatických křivek směrem k singulárním bodům. V těchto bodech je rozdíl hlavních napětí roven nule, a proto se jim přisuzuje nulový řád. Jestliže postupujeme ze singulárního bodu proti tvořícím se pruhům, lze rozeznat barevné pruhy řádu prvního, druhého atd. až k místům, kde je model maximálně namáhán. Místa konstantních dvojlomů (jednotlivé řády), jež se označují v experimentálních jednotkách λ použitého světla, vyjadřují fázový rozdíl $\delta = 2\pi m$, kde m je celé číslo. První barevný pruh s posunem fáze o 2π vystihuje tedy 1λ , druhý pruh 2λ atd. Při určitém zatížení pozoruje se model v kruhově polarizovaném světle a zakreslí se singulární body a izochromatické křivky řádu prvního (1λ), druhého (2λ) atd. Tímto stanovením barevných pruhů lze stanovit rozdíly hlavních napětí v kterémkoli bodě modelu, známe-li stupnici určující hodnoty dvojlomu jednotlivých pruhů. Např. pro určitý druh skla o tloušťce 1 cm platí tato stupnice [4]:

barva černá	nultý řád	0λ	$(\nu_1 - \nu_2) = 0 \text{ kg/cm}^2$
první rozhraní mezi červenou a modrou barvou	první řád	1λ	$(\nu_1 - \nu_2) = 250 \text{ kg/cm}^2$
druhé rozhraní mezi červenou a modrou barvou	druhý řád	2λ	$(\nu_1 - \nu_2) = 500 \text{ kg/cm}^2$

Tento postup je možný u modelových hmot s velkou citlivostí. Např. u umaplexu, kde první barevný pruh vyjadřuje vysoké hodnoty rozdílu hlavních napětí, nutno použít ke stanovení rozdílu hlavních napětí mezi 0. a 1. řádem jiných experimentálních (kompenzačních) metod, jako čtvrtvlnové desky, Soleil-Babinetova kompenzátoru nebo goniometrického kompenzačního analyzátoru apod.

PRAKTICKÉ PŘÍKLADY POUŽITÍ

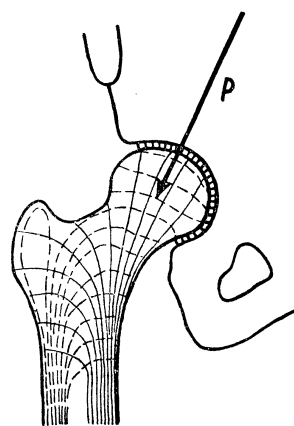
Jak již bylo v úvodu řečeno, budou dále stručně popsány dva příklady demonstrace fotoelasticimetrické metody z oblasti tělovědy.

První příklad řeší fotoelasticimetrickou metodou spolupůsobení svalů a stehenní kosti na *rozložení napětí podél stehenní kosti*. Již v roce 1867 uveřejnil německý anatom G. H. MEYER [6] studii, v níž dokázal, že uspořádání hlavních linií lamel uvnitř kostí je provedeno podle matematických zákonů silokřivek největšího odporu proti tlaku. Hlavní lamely představují trajektorie hlavních napětí a jejich tvar i vnitřní struktura je tedy závislá na povaze sil na ni působících. Na rentgenogramu horní části stehenní kosti (obr. 5) lze pozorovat hlavní lamely této kosti, jež se velmi dobře shodují se směry trajektorií hlavních napětí fotoelasticimetricky zjištěnými (obr. 6). Fotoelasticimetrickým výzkumem vzájemného působení svalů a stehenní kosti zabýval se především F. PAUWELS [7], jenž zjistil, že svaly mají značný vliv na snížení ohybového namáhání stehenní kosti. V ČSSR navázal na tyto studie v Laboratoři experimentální pružnosti ČSAV MILBAUER [3, 8], jenž navíc s použitím fotoelasticimetrické metody řešil příčiny poruchovosti akrylátových endoprotéz v krčku stehenní kosti. Ve zmíněné práci Pauwelsově [7], jakož i v pracích Milbauerových [3, 8] je proveden podrobný rozbor silových poměrů na dolní končetině.



Obr. 5. Rentgenogram horní části stehenní kosti (pozitiv).

Pro demonstraci fotoelasticimetrické metody byl zhotoven model horní části stehenní kosti z umaplexu a její hlavičce byla zasazena do modelu kyčelního kloubu z duralové desky. Protože model je rovinný, byl zvolen frontální řez v místě nejvyššího bodu hlavičce stehenní kosti, v němž působí maximální tlaky pánve. Prostor mezi modelem hlavičce stehenní kosti a kloubního pouzdra z duralu byl vyplněn měkkou syntetickou gumou, aby deformace modelů kosti a chrupavky se přiblížily skutečným poměrům. Svalový systém byl realizován pevným ocelovým páskem, jenž působil z boku na velký hrbol kosti stehenní. Ocelový pásek byl jednou stranou zakotven v zatěžovacím rámu (obr. 2b), druhou stranou byl upevněn v napínacím zařízení, jímž bylo možno měnit napětí pásku a tím imitovat různé působení hýžďového a postranního stehenního svalstva. Tlaková síla P (obr. 6), přenášející se pánví do hlavičce stehenní kosti, byla nahrazena utahováním šroubu v zatěžovacím rámu. S pomocí tohoto modelového uspořádání je možno demonstrovat a studovat, jak ovlivní poloha vnějších sil a svalstvo napětí na krčku stehenní kosti podle izochromatických křivek získaných fotografováním zatíženého modelu v kruhově polarizovaném světle. Tento snímek, získaný na popisovaném jednoduchém zařízení a provedený na barevném materiálu Agfacolor K, je zachycen na obr. 7. Vyhodnocení izochromatických křivek, které reprezentují místa stejných rozdílů hlavního napětí, lze realizovat s pomocí metod popsanych v odst. 1. a 3. Kvantitativní hodnoty získané měřením na modelu nelze však přímo aplikovat na skutečnost. Kost není homogenním ani izotropním materiálem a navíc stehenní kost jako prostorový útvar byla na modelu idealizována na rovinný útvar. Je proto vhodné spokojit se s relativním srovnáním prostých hodnot obvodových napětí, jež je podrobně zpracováno za různých silových poměrů ve výše uvedené práci [3]. Při demonstračním předvádění tohoto modelu je vhodné poukázat na změnu průběhu izochromatických křivek při změněném napětí pásku (jenž nahrazuje působení hýžďových a postranních stehenních svalů) za stejného zatížení vnější tlakovou silou P působící na hlavičce stehenní kosti.



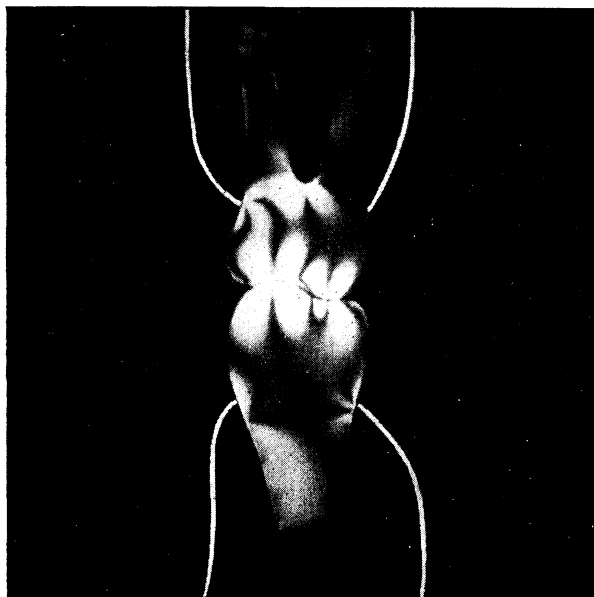
$\nu_1 = \text{-----}$

$\nu_2 = \text{—————}$

Obr. 6. Fotoelasticimetricky zjištěné trajektorie hlavních napětí v horní části stehenní kosti.

Druhý příklad je vybrán z oboru stomatologické mechaniky; platí pro něj do značné míry zásady uvedené v příkladě prvním. Běží tu o studium poměrů napjatosti při skusu dvěma stoličkami v závislosti na tvarování zubních hrbolků. Pro demonstraci tohoto nového případu bylo použito v podstatě stejné technologie jako v případě předcházejícím. Frontální řez byl veden v rovině 2. stoliček (levých) horní a dolní čelistí. Modely zubů byly zhotoveny z umaplexu a zasazeny do duralových lůžek. U modelů stoliček byly zvoleny typické skusové (artikulační) plochy. Celý systém,

upevněný v zatěžovacím rámu dle obr. 2a, byl zatížen šroubovacím mechanismem. S pomocí tohoto uspořádání je možno studovat v přímkově polarizovaném světle na popsaném experimentálním zařízení izoklinné křivky (obr. 8) určující trajektorie



Obr. 8. Izoklinné křivky určující směry hlavních napětí na modelu řezu horní a dolní čelisti v rovině 2. stoliček.

metodu řešení úkolů z oboru experimentální pružnosti, jejíž význam nejen v technické, ale i vědecké praxi neustále stoupá. Tato stať má dokázat, že výklad a hlavně demonstrace této metody nemusí zůstat omezena na specializovaná výzkumná pracoviště, ale že je možno vystačit s celkem běžnými experimentálními pomůckami a posluchačům na školách předvést velmi zajímavé a instruktivní pokusy. Jako praktické příklady doporučuje se ovšem z počátku volit jednodušší aplikace, než byly uvedeny v této stati (např. trámeček uprostřed zatížený a spočívající na dvou krajních podpěrách), aby byly neobeznámeným posluchačům srozumitelnější. V práci uvedené dva příklady z oboru tělovědy mají dokázat možnost realizace i složitějších případů s jednoduchým experimentálním zařízením a navíc dokumentovat význam fotoelasticimetrické metody i pro zdánlivě odlehlé vědní obory.

Literatura

- [1] FUKA J., HAVELKA J.: *Optika*. SPN, Praha 1961; str. 636–737.
- [2] MILBAUER M., PERLA M.: *Fotoelasticimetrické přístroje a měřicí metody*. NČSAV, Praha 1959.

hlavních napětí, jakož i v kruhově polarizovaném světle izochromatické křivky (obr. 9). Pro jejich vyhodnocení platí obdobné zásady uvedené u předchozího příkladu. Oba příklady mají dokumentovat možnost demonstrace fotoelasticimetrické metody a jejího využití i na složitějších případech při použití nejjednodušších experimentálních pomůcek.

ZÁVĚR

Výklad polarizace světla v 11., popř. 12. třídě SVVŠ je vhodné doplnit ukázkami jejího praktického využití. Zde na jednom z předních míst nutno uvést fotoelasticimetrickou

- [3] MILBAUER M., PERLA M.: *Fotoelasticimetrie a příklady jejího použití*. NČSAV, Praha 1961.
- [4] MILBAUER M.: *Fotoelasticimetrie*. SNTL, Praha 1953.
- [5] Fotoelasticimeter priemyselný „FP“. *Jemná mech. opt.* 6 (1961), 253.
- [6] MEYER G. H.: Die Architektur der Spongiosa. *Archiv für Anatomie, Physiologie und wiss. Medizin* (1867), 615.
- [7] PAUWELS F.: Über die Verteilung der Spongiosadichte im coxalen Femurende und ihre Bedeutung für die Lehre vom funktionellen Bau des Knochens. *Morphol. Jahrbuch* 95 (1954), 35.
- [8] MILBAUER M.: Použití fotoelasticimetrie v lékařství. *Vesmír* 37 (1958), 298.

Nejsvětelnější fotografický objektiv

byl vyroben v Japonsku. Je zrcadlový a jeho světelnost je 1 : 0,63. Objektivy extrémní světelnosti jsou zpravidla korigovány pro určitou předmětovou vzdálenost a používá se jich při snímání ze štítu rentgenového přístroje.

Ivan Soudek

Moderní osvitoměry (expozimetry)

s odporovým fotočlánkem ze sirníku kademnatého jsou tak citlivé, že reagují na předměty osvětlené $\frac{1}{2}$ luxu, což odpovídá přibližně osvětlení svíčkou ze vzdálenosti 2 m; výrobek firmy Bewi má vestavěnou žárovku, aby bylo možno jeho údaj za takových světelných podmínek odečíst.

Ivan Soudek

Stejnoměrnost vybíjení akumulátorových desek

zkoumal jeden západoněmecký výrobce tím, že je nechal pracovat v elektrolytu s obsahem radioaktivního izotopu S_{35} , občas je vyjímal a expozicí na rentgenový film zjišťoval povrchové rozložení radioaktivity a tedy i síranu. Ukázalo se, že rozložení hustoty proudu po povrchu desek je velmi nerovnoměrné.

Ivan Soudek

Problém autorství Illiady pomocí děrných štítků

řešil jeden americký klasický filolog. Aby určil, zda je tento epos dílem jednoho nebo více autorů, charakterizoval metrické vlastnosti každého verše čísly, která přenesl na děrné štítky, a celý komplex více než 15 000 štítků zpracoval strojem; nenašel žádné charakteristické rozdíly, které by ukazovaly na existenci více autorů.

Ivan Soudek

Pneumatické prvky pro samočinné počítače

se vyvíjejí v SSSR a USA. Jejich předností proti běžným elektrickým prvkům je jednoduchost, nižší cena (o 1–2 řády) a odolnost vůči vysokým teplotám. Objem součástí je 2–3 mm³ a je možno s jejich pomocí počítat nejen v soustavě dvojkové, ale i trojkové a také jiných soustavách.

Ivan Soudek