

je d. d. Danica iz Zagreba tvornicu sumporne kiseline i superfosfata u Koprivnici. Kemijska industrija Zorka u Sapcu izgrađena je 1938 i kasnije je proširena. Nakon drugoga svjetskog rata izgrađene su još tvornice superfosfata u Prahovu (1961) i u Kosovskoj Mitrovici (1961) i tvornica petrokemijskih proizvoda u Kutini (1968; v. *Dušik*, TE 3, str. 490).

Temeljni proizvod jugoslavenskih tvornica spojeva fosfora, izuzevši tvornicu u Kutini, jest fosforna kiselina dobivena mokrim postupkom s pomoću sumporne kiseline. U tvornici u Kutini fosforna kiselina dobiva se također mokrim postupkom, samo što se tu fosfati raščinjaju dušičnom kiselinom. Proizvodnja i potrošnja spojeva fosfora u Jugoslaviji od 1939 do 1974 iskazane u kt ekvivalentnih im količina P_2O_5 prikazane su u tabl. 6.

Do 1965 jugoslavenska proizvodnja spojeva fosfora nije mogla podmiriti potrošnju. Međutim, izgradnjom novih i proširenjem tvornica koje se bave proizvodnjom spojeva fosfora u novije vrijeme ne samo što je omogućena proizvodnja koja zadovoljava domaću potrošnju spojeva fosfora nego i izvoz znatnih količina tih proizvoda (uglavnom umjetnih gnojiva). Zasad se uvoze svi sirovi fosfati potrebni ovoj industriji.

H. Hadžović

LIT.: J. R. van Wazer, Phosphorus and its compounds, New York 1961. — Gmelin's Handbuch der anorganischen Chemie, Phosphor, Weinheim/Bergstr. 1964. — S. Pantel, M. Becke-Goehring, Sechs- und achtgliedrige Ringsysteme in der Phosphor-Stickstoff Chemie, Berlin, Heidelberg, New York 1969.

H. Hadžović Ž. Viličić

FOTOELASTICIMETRIJA, eksperimentalna metoda za određivanje naprezanja i deformacija u tehničkim konstrukcijama, osnovana na činjenici da mnogi prozirni materijali u napregnutom stanju postaju optički dvolomni. Ispitivanja se vrše na prozirnom modelu od prikladnog materijala, pri čemu se model promatra u polariziranom svjetlu. Fotoelasticimetrija ima prema ostalim metodama eksperimentalne analize naprezanja prednost što daje na pregledan način sliku o stanju naprezanja u promatranom modelu. Prvobitno se metoda odnosila samo na ispitivanje u elastičnom području (odakle joj potječe i ime), a u novije vrijeme proširena je upotreba metode na plastična, viskoelastična i tekuća stanja, pa su stvoreni nazivi *fotoplasticimetrija* i *fotoviskoelasticiometrija*. Često se uz riječ fotoelasticimetrija vezuje i primjena holografije i interferometrije na analizu naprezanja i deformacija. Danas se uvodi sve više za spomenute metode zajednički naziv *optička tenzometrija* ili *fototenzometrija*.

Optički efekt na kojem se zasniva fotoelasticimetrija prvi je opazio Brewster (1816) promatrajući staklo. Sredinom prošlog stoljeća postavljen je optički zakon ovog efekta (Maxwell, Wertheim), a početkom ovog stoljeća ukazao je Mesnager na mogućnost primjene efekta na rješavanje tehničkih problema. Prvo značajno djelo o fotoelasticimetriji objavili su 1931 Coker i Filon pod nazivom: A treatise on photoelasticity na 720 stranica, a slijede ih svojim radovima Föppl, Messmer, Frocht i dr. Primjena fotoelasticimetrije naglo se širi, a naročito je posljednje drugoga svjetskog rata dobila jak poticaj kad su se pojavili novi prozirni materijali (epoksidne smole, poliesteri) pogodni za fotoelasticimetrijska ispitivanja. Danas se fotoelasticimetrija široko primjenjuje u eksperimentalnoj analizi naprezanja i deformacija, te se uređaji za provedbu fotoelasticimetrijskih ispitivanja nalaze u svakom bolje opremljenom mehaničkom laboratoriju.

Polarizacija i dvolomnost. Pojave u fotoelasticimetriji mogu se objasniti valnom teorijom svjetla. Prema toj teoriji vidljivo svjetlo predstavlja zračenje sastavljeno od transverzalnih elektromagnetskih valova duljine vala od 390 do 770 nm. Dnevno (tzv. bijelo) svjetlo sadrži valove različitih valnih duljina, a monokromatsko svjetlo valove samo jedne određene valne duljine. Radi

objašnjavanja pojava u fotoelasticimetriji prikladno je svjetlo prikazati pomoću *vektora svjetla*. Taj vektor prikazuje, za određeno mjesto na zraci svjetla i za određeni trenutak, elongaciju elektromagnetskog vala i smjer titranja zrake u ravnini okomitoj na smjer njezinog rasprostiranja. Ako je vektor svjetla orijentiran na nepredvidljiv, slučajan način, kako je prikazano na sl. 1a, svjetlo je nepolarizirano; ako je orijentiran na određen, predvidljiv način, svjetlo je *polarizirano*. Ako su vektori svjetla u svim točkama zrake orijentirani jednako, tj. ako leže u jednoj ravnini koja sadrži i smjer rasprostiranja zrake (sl. 1b), svjetlo je *linearno ili ravninski polarizirano*; ako su vrhovi vektorā koji prikazuju amplitudu vala uzduž zrake orijentirani tako da leže na kružnoj zavojnici oko smjera rasprostiranja vala (tj. ako projekcije tih vrhova na ravninu okomitu na smjer rasprostiranja leže na kružnici), svjetlo je *kružno polarizirano* (sl. 1c); ako projekcija amplitude vektora opisuje umjesto kružnice elipsu, svjetlo je *eliptički polarizirano*. Vektor svjetla može se smatrati identičnim s električnim vektorom elektromagnetskog vala svjetla. Električni vektor (vektor svjetla) i magnetski vektor elektromagnetskog vala jedan su na drugome okomiti i leže u dvije među sobom okomite ravnine. Ravnina koja sadrži električni vektor linearno polariziranog svjetla (vektor svjetla) naziva se *ravninom polarizacije* (ravninom titranja).

U staroj literaturi, a ponekad i u novijoj, ravninom polarizacije naziva se ravnina koja sadrži *magnetski* vektor linearno polariziranog svjetla, dakle ravnina okomita na ravninu titranja.

Neki materijali imaju svojstvo da se u njima vektor svjetla rastavlja u dvije među sobom okomite komponente. Drugim riječima, zraka polariziranog ili nepolariziranog svjetla koja prođe u takav materijal raspada se na dvije linearno polarizirane zrake kojima su ravnine titranja okomite jedna na drugoj. Brzine rasprostiranja valova tako dobivenih dviju zraka svjetla različite su, te se one, općenito, lome pod različitim kutovima (odatle toj pojavi naziv *dvolum*) i među njima nastaje u toku udaljavanja od točke upada zrake sve veća razlika u fazi. Smjer u kojem titra zraka manje brzine naziva se *sporom osi*, a smjer u kojemu titra zraka veće brzine *brzom osi*. (Jedan od tih smjerova identičan je sa smjerom optičke osi dvolomnog materijala.) Ploča od dvolomnog materijala koja ima takvu debljinu da se dvije komponente zrake na izlazu iz nje u fazi razlikuju za četvrtinku valne duljine, tzv. *četvrtvalna ploča*, ima svojstvo da linearno polarizirano svjetlo pretvara u kružno polarizirano. Svaka četvrtvalna ploča konstruirana je za svjetlo određene valne duljine, te se ne može upotrijebiti za svjetlo druge valne duljine.

Izotropni materijali pogodni za izradu modela u fotoelasticimetriji (*fotoelastični materijali*) postaju dvolomni kad se podvrgnu opterećenju, i to tako da jedan od smjerova glavnih naprezanja σ_1 i σ_2 ravninski napregnutog modela postaje brza, a drugi spora os. Relativno zaostajanje (fazna razlika) jedne komponente svjetla za drugom nakon prolaza kroz napregnutu fotoelastičnu ploču proporcionalno je razlici glavnih naprezanja i debljini ploče:

$$R = C(\sigma_1 - \sigma_2)h,$$

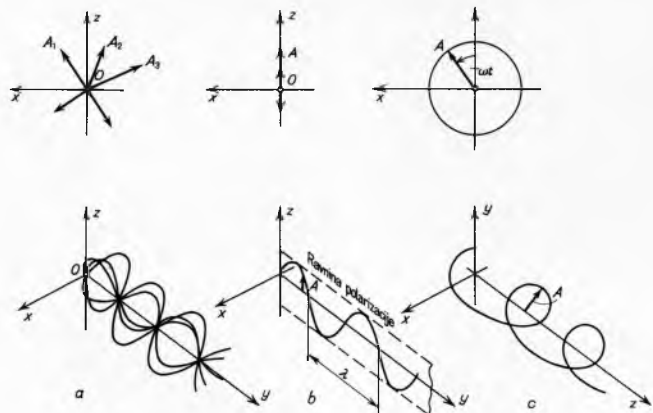
gdje je C tzv. *optička konstanta naprezanja* a h debljina ploče.

Fotoelasticimetrija se u početku razvijala kao metoda analize naprezanja ravninskih modela u kojima je pretpostavljeno ravninsko napregnuto stanje (dva glavna naprezanja leže u ravnini modela, a treće, okomito na njih, iščezava). Kasnije su razrađene metode ispitivanja prostornih modela. Te se metode svode na ispitivanje pojedinih slojeva prostornog modela, koji se mogu analizirati na sličan način kao i ravninski modeli. Prema tome uobičajilo se fotoelasticimetriju dijeliti na *ravninsku* i *prostornu*.

RAVNINSKA FOTOELASTICIMETRIJA

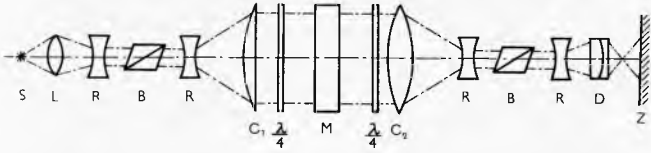
Dobivanje polariziranog svjetla i vrste polariskopā.

Ravninski polarizirano svjetlo može se dobiti na više načina: pomoću refleksije na staklenim pločama, pomoću specijalnih prizmi izrađenih od kalcita (Nicolove prizme, Ahrensove prizme, itd.) i pomoću polaroidnih filtera. Refleksija na staklenim pločama u fotoelasticimetriji se praktički više ne upotrebljava. Prizme od kalcita daju vrlo kvalitetno polarizirano svjetlo, ali se mogu izraditi samo s malim dimenzijama, pa daju male snopove polariziranog svjetla. Ako se žele ispitivati modeli većih dimenzija, uz ove prizme treba primijeniti kompliciran sistem leća. Polariskop s ovakvim sistemom leća prikazan je na slici 2. Takvi polariskopi vrlo su skupi pa se danas rjeđe upotrebljavaju. Većina polariskopā koristi se za proizvodnju polariziranog svjetla polaroidnim filterima.

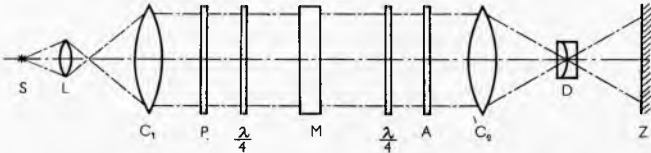


Sl. 1. Polarizacija svjetla. a) Nepolarizirano svjetlo, b) linearno polarizirano svjetlo, c) kružno polarizirano svjetlo

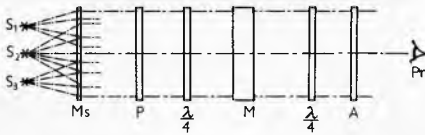
Oni mogu biti opremljeni sistemom leća (sl. 3) ili mutnim staklom koje daje disperzno svjetlo (sl. 4). Polariskop bez četvrtvalnih ploča daje ravninski polarizirano svjetlo, a ako se umetnu četvrtvalne ploče, daje kružno polarizirano svjetlo.



Sl. 2. Polariskop s prizmama i sistemom leća. S izvor svjetla, L leća za fokusiranje, R rasipna leća, B prizma, C₁ i C₂ sabirne leće, $\lambda/2$ četvrtvalna ploča, D leća kamere ili projekcionog uređaja, Z film ili zastor, M model



Sl. 3. Polariskop s polaroidnim filtrima i sistemom leća. P polarizator, A analizator, S izvor svjetla. L leća za fokusiranje C₁ i C₂ sabirne leće, $\lambda/4$ četvrtvalna ploča, D leća kamere ili projekcionog uređaja, M model



Sl. 4. Polariskop s mutnim staklom i polaroidnim filtrima. S₁, S₂, S₃ izvori svjetla, P polarizator, A analizator, Ms mutno staklo, $\lambda/4$ četvrtvalna ploča, Pr promatrač, M model

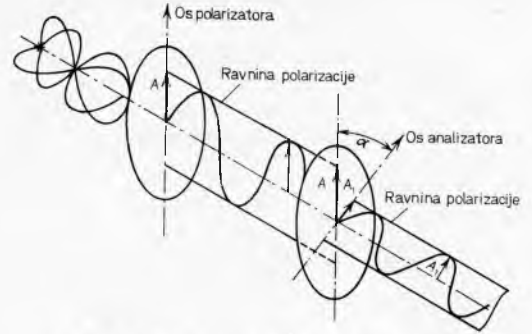


Sl. 5. Polariskop s mutnim staklom i polaroidnim filtrima

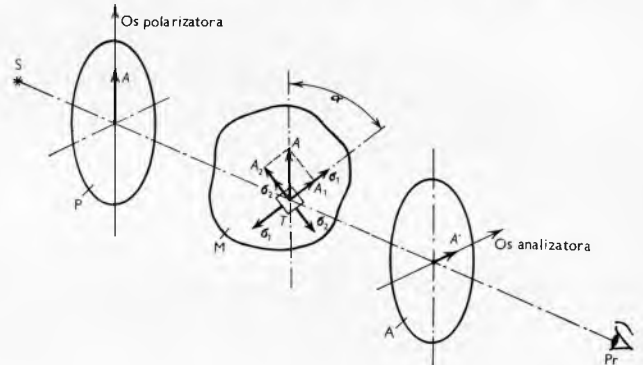
Model u ravninski polariziranom svjetlu. Ako ravninski polarizirano svjetlo pada na drugi polaroidni filtar, on će propustiti samo projekciju vektora svjetla u smjeru njegove osi, a okomitu će projekciju apsorbirati (sl. 6). Intenzitet propuštene komponente jest $A_1 = A \cos \alpha$. Prvi polaroidni filtar se naziva *polarizator*, a drugi *analizator*.

Kod polariskopa s ravninski polariziranim svjetlom osi polarizatora i analizatora su redovno ukrštene, tako da promatrač

vidi taman analizator, pa se kaže da je polariskop namješten na tamno polje (sl. 7). Ako se u polariskop postavi ravninski model M

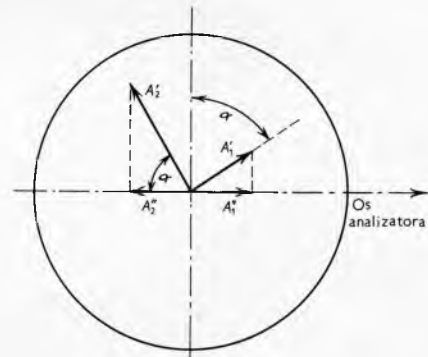


Sl. 6. Prolaz polariziranog svjetla kroz analizator



Sl. 7. Model u linearno polariziranom svjetlu

okomito na pravac širenja svjetla, svaka napregnuta točka modela ponašat će se optički kao jednoosni kristal čija je optička os okomita na ravninu modela. Ako u točki T modela pravac glavnog napreznja σ_1 čini kut α s ravninom polarizacije, vektor polariziranog svjetla A pri ulasku u model rastavit će se u dvije kompo-



Sl. 8. Sastavljanje komponenta svjetla nakon prolaza kroz analizator

nete: komponentu A_1 u pravcu napreznja σ_1 i komponentu A_2 u pravcu napreznja σ_2 , tako da je

$$\begin{aligned} A_1 &= A \cos \alpha = k \sin \omega t \cos \alpha, \\ A_2 &= A \sin \alpha = k \sin \omega t \sin \alpha. \end{aligned}$$

Obje komponente prolaze kroz model različitim brzinama, pa se nakon napuštanja modela razlikuju u fazi za iznos

$$\Delta = 2\pi \frac{R}{\lambda} = 2\pi \frac{C}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2) h,$$

gdje je λ valna duljina svjetla. Uvede li se nova oznaka $S = \lambda/C$ za veličinu koja se zove *fotoelastična konstanta napreznja*, fazna razlika Δ iznosi

$$\Delta = 2\pi (\sigma_1 - \sigma_2) \frac{h}{S}. \quad (1)$$

Podijeli li se fazna razlika podjednako na obje komponente vektora svjetla, ove će nakon izlaska iz modela imati vrijednosti

$$A_1' = k \cos \sin \left(\omega t + \frac{\Delta}{2} \right), \quad A_2' = k \sin \sin \left(\omega t - \frac{\Delta}{2} \right).$$

Komponente A_1' i A_2' dolaze do analizatora čija je os horizontalna, tako da će on apsorbirati vertikalne projekcije komponenata a propustiti njihove horizontalne projekcije A_1'' i A_2'' . Projekcije A_1'' i A_2'' nakon prolaza kroz analizator ponovo se slažu u jedinstven vektor svjetla A' . Ovaj proces je ilustriran na slici 8. Horizontalne projekcije komponenata iznose

$$A_1'' = A_1' \sin a, \quad A_2'' = A_2' \cos a.$$

Veličina rezultirajućeg vektora svjetla nakon prolaza kroz analizator dana je izrazom

$$A' = A_1'' - A_2'' = k \sin a \cos a \left[\sin \left(\omega t + \frac{\Delta}{2} \right) - \sin \left(\omega t - \frac{\Delta}{2} \right) \right],$$

što nakon sređivanja daje

$$A' = k \sin 2a \sin \frac{\Delta}{2} \cos \omega t.$$

Jakost svjetla I proporcionalna je kvadratu vektora svjetla

$$I = K \sin^2 2a \sin^2 \frac{\Delta}{2} \cos^2 \omega t. \quad (2)$$

Diskusija izraza (2) pokazuje da može doći do ekstinkcije (poništenja) svjetla uslijed tri efekta: efekta frekvencije, efekta glavnih naprezanja i efekta razlike glavnih naprezanja.

Efekt frekvencije. Ako je ωt neparni višekratnik od $\pi/2$, tj.

$$\omega = (2n + 1) \frac{\pi}{2}, \text{ faktor } \cos^2 \omega t$$

iščezava, pa iščezava također I , tj. jakost svjetla jednaka je nuli. Međutim, budući da je frekvencija svjetla vrlo velika, $\sim 10^{15}$ Hz, golim se okom, a ni brzmom kamerom, efekt frekvencije ne može registrirati. On stoga nema utjecaja na normalna ispitivanja u fotoelasticimetriji.

Efekt pravaca glavnih naprezanja. Ako je $2a = n\pi$, tj. $a = n\pi/2$ ($n = 0, 1, 2, \dots$), faktor $\sin^2 2a$ izraza (2) jednak je nuli. Ovaj uvjet je ispunjen na onim mjestima gdje je pravac jednog od glavnih naprezanja paralelan osi polarizatora. Sva ta mjesta na modelu bit će na slici modela tamna. Linija koja spaja ova tamna mjesta naziva se *izoklina*.

Izoklina parametra a je linija koja spaja sva ona mjesta u modelu u kojima pravac glavnog naprezanja čini kut a s proizvoljno odabranom osi x . Izoklinu parametra a možemo dobiti tako da os polarizatora zakrenemo za kut a od odabrane osi x , pri čemu os analizatora mora ostati ukrštena s osi polarizatora. Izokline se u svrhu analize bilo fotografiraju bilo direktno crtaju na papiru preko zastora Z (v. sl. 2 i sl. 3).

Efekt razlike glavnih naprezanja. Na mjestima modela gdje je razlika glavnih naprezanja takva da je $\Delta/2 = n\pi$, u izrazu (2) faktor $\sin^2 (\Delta/2)$ iščezava, a time i jakost svjetla I postaje jednaka nuli. Na svim onim mjestima gdje je $N = n = 0, 1, 2, \dots$ doći će do poništenja svjetla i do pojave tamnih mjesta. Interferencijske linije koje povezuju tamna mjesta nazivaju se *izokrome*. Broj

$$N = \frac{\Delta}{2\pi} \quad (3)$$

naziva se *red izokroma* ili red interferencijske linije. Izokrome se prema pripadnom broju N nazivaju izokroma nultog reda, izokroma prvog reda itd. Red dviju susjednih izokroma razlikuje se uvijek za jedinicu, a red izokroma u tamnom polju uvijek

je jednak cijelom pozitivnom broju ili nuli. Iz izraza (1) i (3) slijedi

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{NS}{h}. \quad (4)$$

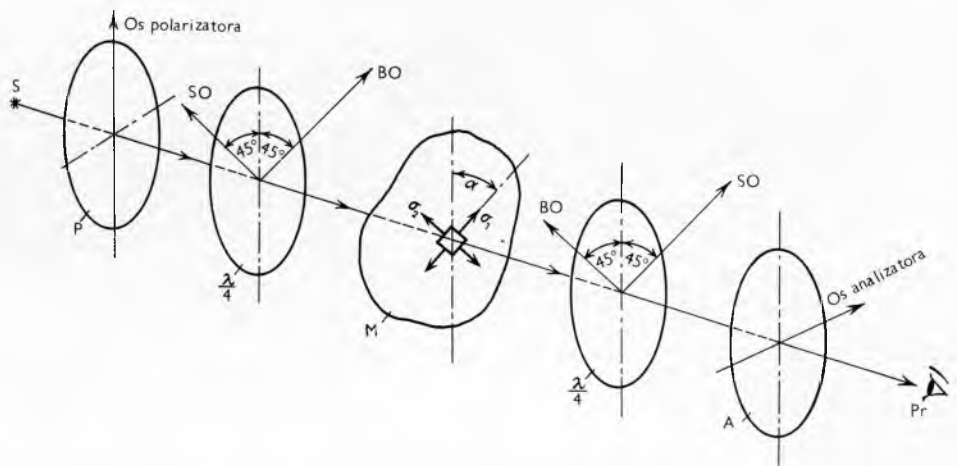
Izokroma znači linija iste boje. Naime, u početnom periodu fotoelasticimetrije nije se upotrebljavalo monokromatsko, nego bijelo svjetlo, pa je na mjestima gdje je $\Delta/2\pi = N = n$ dolazilo do poništavanja samo jedne boje, te su na slici modela sva ta mjesta bila iste, poništenoj komplementarne, boje. Danas se upotrebljava pretežno monokromatsko svjetlo, a bijelo svjetlo se upotrebljava u posebnim postupcima.

Model u kružno polariziranom svjetlu. Sl. 9 prikazuje napregnuti model u polariskopu sa kružno polariziranim svjetlom. Osi analizatora i polarizatora takvog polariskopa mogu biti ukrštene ili paralelne. Osi dviju četvrtvalnih ploča mogu također biti ili ukrštene ili paralelne, ali su uvijek postavljene pod kutom od 45° prema osima analizatora i polarizatora. Ovisno o tome kako

Tablica 1
NAMJEŠTANJE POLARISKOPA

Polje	Filtri	$\frac{1}{4}$ -valne ploče
tamno	ukršteni	ukrštene
	*paralelni	paralelne
svijetlo	paralelni	ukrštene
	ukršteni	paralelne

su postavljene osi polarizatora i analizatora te osi četvrtvalnih ploča, polariskop je namješten na svijetlo ili na tamno polje, kako



Sl. 9. Model u polariskopu s kružno polariziranim svjetlom. S izvor monokromatskog svjetla, P polarizator, A analizator, $\lambda/4$ četvrtvalna ploča, SO spora os, BO brza os, Pr promatrač, M model

je ilustrirano u tablici. Polariskop na sl. 9 namješten je na tamno polje.

Sličnom analizom kao za polariskop s ravninski polariziranim svjetlom može se pokazati da je vrijednost vektora svjetla nakon prolaza kroz napregnut model i kroz sve elemente polariskopa dana izrazom

$$A' = \frac{1}{2} k \sin \frac{\Delta}{2} \left[\cos (a + \omega t) - \sin (a + \omega t) \right],$$

te je tada jakost svjetla

$$I = K \sin^2 \frac{\Delta}{2} \left[\cos (a + \omega t) - \sin (a + \omega t) \right]^2.$$

Budući da pribiranje kuta ωt kutu a pravaca glavnih naprezanja predstavlja samo pomak početka mjerenja vremena t , ono nema utjecaja na standardna ispitivanja, tj. izokline se ne pojavljuju na fotografijama modela. Tamna mjesta, tj. interferencijske linije koje nazivamo izokrome, pojavit će se tamo gdje je $\sin (\Delta/2) = 0$, tj. kad je

$$\Delta/2\pi = N = n, \quad (n = 0, 1, 2, \dots),$$

pa i u ovom slučaju vrijedi izraz $\sigma_1 - \sigma_2 = N S/h$. I u ovom slučaju, za tamno polje izokroma je cjelobrojnog reda.

Ako je polariskop namješten na svjetlo polje, intenzitet svjetla nakon prolaza kroz napregnuti model i sve elemente polariskopa iznosi

$$I = K \cos^2 \omega t \cos^2 (\Delta/2).$$

Interferencijske linije pojavit će se tamo gdje je $\cos(\Delta/2) = 0$, tj. kad je

$$N = \frac{\Delta}{2\pi} = \frac{1 + 2n}{2} \quad (n = 0, 1, 2 \dots).$$

Izraz (4) vrijedi i u ovom slučaju, ali red izokrome poprima vrijednosti $\frac{1}{2}, 1\frac{1}{2}, 2\frac{1}{2}$ itd.

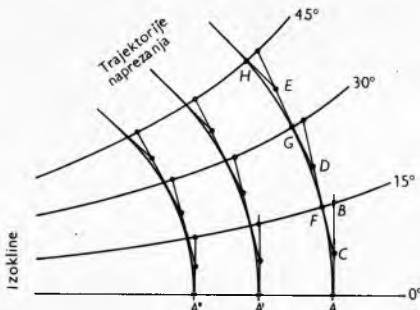
Superponirane slike izoklina i izokroma kružnog prstena opterećenog dvjema silama prikazane su na prvoj stranici priloga u bakrotisku, gore. Lijeva slika prikazuje model snimljen u polariskopu sa ravninski polariziranim svjetlom. Pozadina modela je tamna jer je polariskop namješten na tamno polje. Fotografija na srednjoj slici prikazuje isti model snimljen u polariskopu sa kružno polariziranim svjetlom koji je bio namješten na tamno polje. Na ovoj fotografiji vide se izokrome cjelobrojnog reda a model je opet na tamnoj pozadini. Fotografija na desnoj slici prikazuje model snimljen u svjetlom polju kružno polariziranog svjetla. Vide se samo izokrome polovičnog reda a pozadina modela je svijetla.

Metode kompenzacije. Iz slike izokroma može se odrediti red izokrome direktno u onim točkama modela kroz koje prolazi interferencijska linija. U ostalim točkama modela red izokrome može se približno odrediti interpolacijom, odnosno ekstrapolacijom. Ako se zahtijeva veća preciznost u određivanju reda izokrome, a interpolacija nije pouzdana zbog malog broja izokromâ, primjenjuju se različite metode kompenzacije. Jedne metode zahtijevaju dodatni uređaj, kompenzator, a u drugima kao kompenzator služi analizator polariskopa. Poznati su kompenzatori Babinetov i Soleil-Babinetov. Tardyjeva i Sénarmontova metoda koriste se analizatorom kao kompenzatorom. Te dvije metode vrlo su slične i najčešće se primjenjuju jer ne zahtijevaju dodatnu opremu, a lako se provode. U nastavku je opisana Tardyjeva metoda.

U Tardyjevom metodi analizator i polarizator kruto se spoje i zajedno se okreću dok jedna od izoklina ne prođe kroz točku modela u kojoj se želi izvršiti kompenzacija. Nakon toga se ubace ispred i iza modela četvrtvalne ploče tako da su njihove osi ukrštene i da s osima analizatora i polarizatora čine kut od 45° . Ona se okretanjem samog analizatora dovodi najbliža izokroma da prođe kroz ispitivanu točku; ostali elementi polariskopa miruju. Ako je potrebno analizator zakrenuti za kut φ da bi se izokroma reda N dovela da prođe kroz promatrane točku, i ako je N manje od reda izokrome N_1 u ispitivanoj točki, onda je

$$N_1 = N + \frac{\varphi}{180} \quad (\varphi \text{ u stupnjevima}).$$

Analiza eksperimentalnih rezultata. Iz slike izoklina može se odrediti kut koji glavna naprezanja u svakoj točki modela čine s koordinatnim osima. S pomoću nje mogu se također konstruirati trajektorije naprezanja kako je ilustrirano na sl. 10. Iz



Sl. 10. Konstrukcija trajektorija naprezanja iz slike izoklina

proizvoljne točke A povlači se odsječak AB okomito na izoklinu 0° . U raspolovnici C odsječka AB povlači se pravac CD koji se

otklanja od AB za korak izokline, u ovom slučaju za 15° . Iz slijedeće raspolovnice D povlači se pravac koji se ponovo otklanja za 15° od prethodnog, tako da je okomit na slijedeću izoklinu. Krivulja AFGH predstavlja jednu trajektoriju naprezanja. Ponavljanjem postupka počevši od točaka A', A'', itd. može se dobiti potpuna slika trajektorija jednog od glavnih naprezanja.

Iz slike izokroma može se odrediti red izokrome u svakoj točki modela. Ako se poznaje konstanta S i debljina modela, može se odrediti razlika glavnih naprezanja pomoću izraza (4). Maksimalna vrijednost tangencijalnog naprezanja u ravnini modela iznosi

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{N S}{2 h}.$$

Ako su naprezanja σ_1 i σ_2 suprotnog predznaka, τ_{\max} je ujedno i maksimalno tangencijalno naprezanje. Naprezanje τ_{xy} jeste

$$\tau_{xy} = \tau_{\max} \sin 2\alpha = \frac{N S}{2 h} \sin 2\alpha, \quad (5)$$

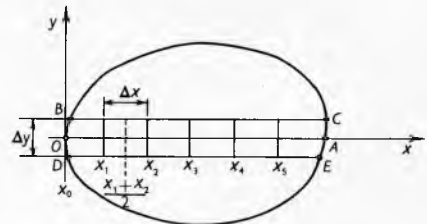
gdje je α kut koji glavna naprezanja čine s osi x, a može se odrediti iz slike izoklina. Na rubu modela je obično poznato naprezanje okomito na taj rub (najčešće je jednako nuli), pa se drugo glavno naprezanje može dobiti direktno iz izraza (4).

Dijelovi konstrukcija i strojeva vrlo se često dimenzioniraju prema najvećem normalnom naprezanju, koje se gotovo redovno javlja na površini ili na rubu modela. Prema izloženom, već jednostavna analiza rezultata fotoelastimetrijskog eksperimenta daje mnogo dragocjenih podataka. Međutim, za kompletno određivanje stanja naprezanja u svim točkama modela treba upotrijebiti posebne analitičke metode separacije glavnih naprezanja ili provesti dodatne eksperimente. U nastavku će se opisati jedna analitička i jedna eksperimentalna metoda separacije glavnih naprezanja koje se često primjenjuju. Osim toga će se reći nekoliko riječi o metodama za određivanje zbroja glavnih naprezanja, iz kojih se uz poznavanje njihove razlike mogu također odrediti sama glavna naprezanja.

Metoda integracije razlike tangencijalnih naprezanja zasniva se na približnoj integraciji diferencijalnih jednadžbi ravnoteže elementa modela u pravokutnim koordinatama

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0.$$

Metoda je ilustrirana na sl. 11. Integracija se provodi postupno



Sl. 11. Metoda integracije razlike tangencijalnih naprezanja

duž nekog pravca počevši od točke x_0 na rubu modela (ili od neke druge točke u kojoj je poznato naprezanje σ_x)

$$\int_{x_0}^{x_1} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx = - \int_{x_0}^{x_1} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dx, \quad \sigma_x|_{x_1} - \sigma_x|_{x_0} = - \frac{\Delta \tau_{xy}}{\Delta y} \Delta x.$$

S pomoću jedn. (5) može se odrediti τ_{xy} duž linija BC i DE a zatim τ_{xy} u točkama $(x_0 + x_1)/2$, $(x_1 + x_2)/2$ itd. Uz $\Delta x = \Delta y$ vrijedi

$$\sigma_x|_{x_1} = \sigma_x|_{x_0} - \Delta \tau_{xy}|_{x_0 + x_1}, \quad \sigma_x|_{x_2} = \sigma_x|_{x_1} - \Delta \tau_{xy}|_{x_1 + x_2}, \text{ itd.}$$

Metoda kosog osvjetljavanja. Po ovoj metodi model nije postavljen okomito na zrake svjetla, nego je zakrenut za kut θ . Efektivna debljina kroz koju prolazi svjetlo iznosi $h/\cos \theta$ (sl. 12). U glavnoj jednadžbi fotoelastimetrije (4) umjesto glavnog na-

prezanja σ_2 ulazi tzv. sekundarno glavno naprezanje $\sigma_2' = \sigma_2 \cos^2 \vartheta$, tj.

$$\sigma_1 - \sigma_2 \cos^2 \vartheta = \frac{N_\vartheta S}{h/\cos \vartheta}, \quad (6)$$

gdje je N_ϑ red izokrome pri kosom osvjetljavanju. Iz izraza (4) i (6) slijede vrijednosti glavnih naprezanja

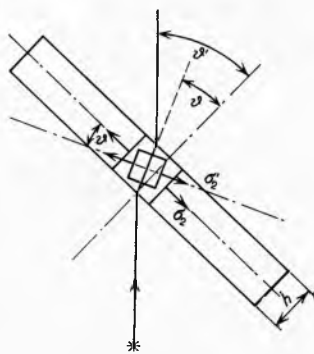
$$\sigma_1 = \frac{S \cos \vartheta}{h \sin^2 \vartheta} [N_\vartheta - N_\vartheta \cos \vartheta],$$

$$\sigma_2 = \frac{S}{h \sin^2 \vartheta} [N_\vartheta \cos \vartheta - N].$$

Metoda izopahâ. Pored opisanih metoda postoje metode za određivanje izopahâ, tj. linija koje spajaju mjesta konstantnog zbroja glavnih naprezanja ($\sigma_1 + \sigma_2$).

Nakon opterećenja ravninskog modela njegova početna debljina h promijeni se za iznos

$$\Delta h = -\frac{\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2),$$



Sl. 12. Metoda kosog osvjetljavanja

gdje je ν Poissonov koeficijent, a E modul elastičnosti. Promjena debljine Δh može se mjeriti pomoću mehaničkih ekstenzometara ili optičkih interferometara.

Prva invarijanta tenzora ravninskog stanja naprezanja $I_1 = \sigma_1 + \sigma_2$ zadovoljava Laplaceovu jednadžbu

$$\Delta I_1 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) (\sigma_1 + \sigma_2) = 0. \quad (7)$$

Rubne vrijednosti za I_1 mogu se lako odrediti iz jedn. (4). Numeričkim rješavanjem jednadžbe (7) može se dobiti vrijednost I_1 , tj. $\sigma_1 + \sigma_2$, za bilo koju točku modela, što uz poznavanje razlike $\sigma_1 - \sigma_2$ i kuta α daje potpuno stanje naprezanja u modelu.

Električni potencijal V u vodljivoj ravnini također zadovoljava Laplaceovu jednadžbu, pa se izopahâ mogu dobiti i pomoću *električne analogije*.

Prijenos rezultata s modela na original. Fotoelastični model je često manjih dimenzija nego originalni strojni ili konstruktivni dio. Modul elastičnosti i Poissonov koeficijent fotoelastičnog materijala i materijala od kojeg je izrađen original također se razlikuju. Zbog toga naprezanja u modelu nisu jednaka naprezanjima u originalu nego stoje prema njima u određenom omjeru. Model je *jednostruko povezan* ako je omeđen samo jednom zatvorenom konturom, tj. ako nema otvora. Ako je model omeđen dvjema ili više zatvorenih kontura, tj. ako on ima jedan ili više otvora, kaže se da je *višestruko povezan*. Raspored naprezanja u jednostruko povezanim modelima i u višestruko povezanim modelima, kad su sile na svakoj zatvorenoj konturi u ravnoteži, ne ovisi o elastičnim konstantama. U tim slučajevima omjer između naprezanja u modelu i naprezanja u materijalu iznosi

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_o} = \frac{F_m(L_m h_m)}{F_o(L_o h_o)},$$

gdje je F sila, L duljina u ravnini, h debljina. Indeks m odnosi se na model, a indeks o na original.

PROSTORNA FOTOELASTICIMETRIJA

Metoda zamrzavanja. U tijelu u kojem vlada prostorno napregnuto stanje mijenjaju se naprezanja i deformacije od točke do točke po pravcu, smjeru i veličini. Stoga se tako napregnuti model ne može cijeli promatrati u polariziranom svjetlu kao u ravninskoj fotoelastici, gdje se naprezanja po debljini modela ne mijenjaju. Takvim promatranjem dobio bi se samo prosječni iznos razlike naprezanja svih točaka koje leže na pravcu prolaza svjetla, a stvarni se iznos razlike naprezanja pojedinih točaka na taj način ne bi mogao odrediti. Moguće je, međutim, posebnim metodama trajno vezati deformacije za model, iz njega zatim izrezati tanke slojeve za koje se može s dovoljnom točnošću pretpostaviti da u njima vlada ravninsko napregnuto stanje. Na taj način može se učiniti svaka točka u modelu pristupačnom za promatranje u polariskopu. Za trajno vezanje deformacija za model danas se u ispitivanjima pretežno upotrebljava metoda zamrzavanja deformacija. Ona se zasniva na svojstvu koje imaju mnogi poliplasti, da deformacije uzrokovane vanjskim opterećenjem pri određenoj (kritičnoj) temperaturi ostaju trajno vezane za model ako se model pod opterećenjem polagano ohladi na sobnu temperaturu i zatim rastereti. Metodu je prvi opisao Oppel 1936.

Svojstvo da se u mnogim poliplastima mogu na ovaj način zamrznuti deformacije može se protumačiti njihovom molekularnom strukturom. U takvim materijalima makromolekule su povezane čvrstim postranim vezama koje se stvaraju pri polimerizaciji (primarnim vezama) i koje tvore prostornu mrežu u cijelom materijalu. Pokraj ovih veza postoje i manje čvrste veze (sekundarne veze) koje su stabilne samo na sobnoj temperaturi, a na određenoj povišenoj temperaturi se raskidaju. U materijalu tada vanjsko opterećenje preuzimaju same primarne veze, što dovodi do povećanih deformacija, koje su po svom karakteru elastične. Ohladi li se materijal pod opterećenjem polagano na sobnu temperaturu, očvršnu ponovo sekundarne veze, a deformacije ostaju i nakon uklanjanja opterećenja. Deformacije se mogu ukloniti samo ponovnim zagrijavanjem do kritične temperature.

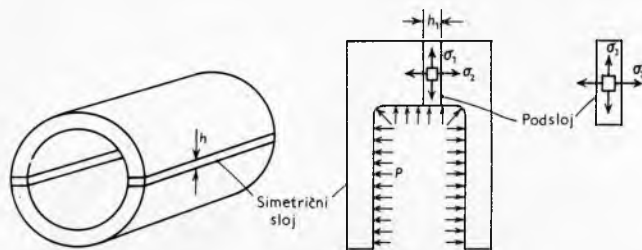
Ovakvo ponašanje materijala može se zorno predočiti pomoću spužve natopljene u vosak. Na sobnoj temperaturi vosak je krut i sprečava deformaciju spužve. Na povišenoj temperaturi vosak omekša i ne pruža otpor deformaciji spužve. Snizi li se nakon tople deformacije spužve temperatura na sobnu, vosak očvršne te spužva ostaje deformirana i nakon uklanjanja opterećenja.

Rezanje modela u slojeve. Da bi se odredilo stanje naprezanja u pojedinim točkama, model se reže u slojeve, koji se zatim zasebno promatraju u polariskopu. Sloj mora biti tanak u usporedbi s dimenzijama modela, kako se naprezanja po debljini sloja ne bi mijenjala ni po veličini ni po pravcu. Način rezanja slojeva iz modela ovisi o obliku modela i o mjestu na kojem se želi odrediti naprezanje. Kao kod ravninske fotoelastici, i ovdje se direktnim promatranjem sloja u polariskopu može odrediti samo razlika glavnih naprezanja, dok se pojedino naprezanje određuje bilo dopunskim mjerenjem bilo integriranjem polazeći od ruba modela, a u posebnim slučajevima rezanjem podslojeva.

Simetrični sloj. Ako model ima ravnine simetrije i ako je opterećenje raspoređeno prema njima simetrično, maksimalna naprezanja leže u većini slučajeva u ravninama simetrije. Stoga se slojevi ponajčešće režu tako da se poklapaju s ravninama simetrije. Jedno od tri glavna naprezanja leži okomito na sloj, te će se propuštanjem polariziranog svjetla u tom pravcu pojaviti izokrome koje određuju razliku preostalih dvaju naprezanja

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{NS}{h}.$$

Ovdje su σ_1 i σ_2 glavna naprezanja koja leže u ravnini simetrije, a h je debljina izrezanog sloja. Treće naprezanje σ_3 ne utječe na sliku izokroma, niti se ono iz te slike može odrediti. Za određivanje trećeg glavnog naprezanja režu se iz simetričnog sloja podslojevi (sl. 13), koji osvijetljeni u pravcu okomitom na prvobitni daju



Sl. 13. Simetrični sloj i podsloj modela debelostijene posude opterećene unutarnjim pritiskom

sliku izokroma iz koje slijedi razlika glavnih naprezanja σ_1 i σ_3 :

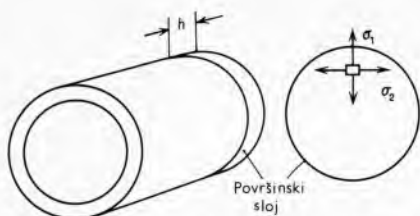
$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{N_1 S}{h_1},$$

gdje je h_1 debljina podsloja i odgovara putu polariziranog svjetla kroz podsloj. Izreže li se iz podsloja naredni podsloj debljine h_2 , novim se promatranjem u polariskopu može odrediti razlika naprezanja σ_2 i σ_3 :

$$\sigma_2 - \sigma_3 = \frac{N_2 S}{h_2},$$

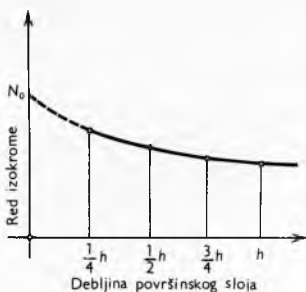
te su na ovaj način sva tri glavna naprezanja zasebno određena. Na vanjskom rubu sloja odnosno podsloja jedno od glavnih naprezanja je nula ili odgovara vanjskom opterećenju, tako da je ovdje glavno naprezanje, tanguencijalno s rubom modela, određeno direktno očitanim redom izokrome.

Površinski sloj. Za površinske slojeve modela (sl. 14) jedan od pravaca glavnih napreznja okomit je na sloj. Napreznje u tom pravcu je nula, te se promatranjem takvog sloja u polariskopu dobije iz slike izokromâ razlika preostalih dvaju glavnih napreznja. Pri tome se sloj osvjetljava u pravcu okomitom na slobodnu površinu. Određivanje napreznja u nekoj točki svodi se dakle na promatranje analogno onome u ravninskoj fotoelasticimetriji.



Sl. 14. Površinski sloj modela debelostijene posude

Međutim, u općem slučaju stanje napreznja u površinskom sloju debljine h razlikuje se od ravnog napreznog stanja po tome što se u površinskom sloju stanje napreznja mijenja po visini sloja. Da bi se povećala točnost mjerenja, treba izrezati tanak sloj (obično 1 do 3 mm) ili postepeno smanjivati debljinu sloja, i poslije svakog smanjenja promatrati sliku izokroma. Crtanjem dijagrama reda izokrome za razne debljine površinskog sloja može se iz toka dobivene krivulje (sl. 15) zaključiti koji red izokrome N_0 odgovara stanju napreznja na površini. Razlika glavnih napreznja na površini modela bit će tada



Sl. 15. Određivanje reda izokrome na površini modela

Napreznja na površini često su upravo maksimalna napreznja, te se u prostornoj fotoelasticimetriji pored simetričnih slojeva gdje je god to od koristi promatraju i površinski slojevi. Međutim, rezanje površinskog sloja iz modela moguće je praktički samo na ravnim površinama. I ovdje se može primijeniti tehnika podslojeva.

Opći sloj. Ako treba odrediti napreznje u točki modela koja ne leži na ravnini simetrije niti na površini modela, izrezani sloj u kojem leži promatrana točka imat će opći položaj u modelu. U tom slučaju ni jedno od glavnih napreznja ne leži u ravnini sloja. Promatranjem takvog sloja u polariskopu, uz pravac svjetla okomit na sloj, dobije se slika izokroma koja je određena razlikom sekundarnih glavnih napreznja σ_1' i σ_2' (sl. 16):

$$\sigma_1' - \sigma_2' = \frac{NS}{h}$$

Slikom izoklina određen je kut φ što ga sekundarno glavno napreznje zatvara s osi x , a veza s napreznjima σ_x , σ_y i τ_{xy} određena je izrazima

$$\sigma_1', \sigma_2' = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2},$$

$$\tan 2\varphi = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}$$

Iz toga slijedi i veza između reda izokrome i napreznja u pravcu x i y :

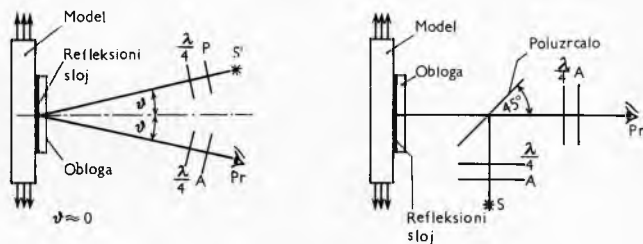
$$\frac{NS}{h} = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}$$

Potpuno određivanje napreznja σ_x , σ_y i τ_{xy} ni ovdje se ne može provesti bez dodatnih mjerenja (npr. kosim osvjetljavanjem) ili integriranja s ruba (primjenom diferencijskog postupka). Iz podslojeva moguće je odrediti vezu s napreznjem σ_2 , pa prema tome i glavna napreznja σ_1 , σ_2 i σ_3 . Zbog složenosti postupka to se rjeđe radi.

POSEBNE METODE FOTOELASTICIMETRIJE

Metoda fotoelastične obloge. Ispitivanje tom metodom izvodi se kako je opisano u nastavku. Tanka folija fotoelastičnog materijala, koja je s unutrašnje strane premazana refleksionim slojem (najčešće slojem aluminijske boje) naljepi se na model u neopterećenom stanju ljepljom u koje se stavlja aluminijski prah. (Ponekad folija nije premazana aluminijem, nego sam aluminijski prah u ljeplju služi kao refleksioni sloj.) Pošto se ljepljo osušilo, model se može opteretiti, a površinske deformacije modela prenose se posredstvom ljeplja na oblogu i u njoj izazivaju približno ravninsko stanje napreznja.

Ako se nakon toga model promatra u refleksionom polariskopu, napregnuto stanje se manifestira pojavom izoklina i izokroma. Dvije vrste refleksionog polariskopa koje se najčešće upotrebljavaju za metodu fotoelastične obloge prikazane su na slici 17.



Sl. 17. Refleksioni polariskopi

Glavna je razlika između klasičnog fotoelastičnog modela i modela s fotoelastičnom oblogom u tome što kod klasičnog modela postoji stanje ravninskog napreznja i deformacije su jednoliko raspoređene po debljini modela, a kod fotoelastične obloge deformacije se prenose s modela na oblogu i u izvjesnim slučajevima mogu znatno varirati po debljini obloge. Nejednolikost deformacija po debljini obloge može se smanjiti smanjivanjem debljine obloge, ali se debljina obloge ne može proizvoljno smanjiti jer osjetljivost obloge ovisi o njezinoj debljini (*fotoelastični efekt*). Zato se u praksi primjenjuju obloge umjerene debljine (1...2,5 mm). Povećanjem debljine obloge postaje metoda netočna zbog ojačanja modela oblogom, zbog nejednolikosti raspodjele deformacija po debljini uslijed velikog gradijenta deformacija, zbog nejednolike raspodjele deformacija po debljini uslijed zakrivljenja površine modela pod opterećenjem, zbog nejednolikosti deformacija obloge na rubu i u središnjem dijelu uslijed razlike Poissonovih koeficijenata modela i obloge i zbog pojava dodatnih deformacija uslijed promjene temperature.

Svi navedeni utjecaji, osim razlike Poissonovih koeficijenata, mogu se zanemariti kad je debljina obloge mala i djelomično ili potpuno uzeti u obzir pomoću korekcijskih faktora kad je debljina obloge veća.

Ako je obloga dovoljno tanka i ako se navedeni utjecaji mogu zanemariti, razlika je glavnih napreznja na površini izotropnog modela dana jednadžbama:

$$(\sigma_{m1} - \sigma_{m2}) \frac{E_o(1 + \nu_o)}{E_m(1 + \nu_m)} = \sigma_{o1} - \sigma_{o2} = \frac{NS}{2h},$$

gdje je ν Poissonov koeficijent, a E modul elastičnosti. Indeks m odnosi se na model, indeks o na oblogu. U nazivniku desne strane jednadžbe javlja se veličina $2h$ umjesto h jer svjetlo dvaput prolazi kroz debljinu obloge.

Metoda fotoelastične obloge ima u nekim slučajevima velike prednosti pred ostalim metodama eksperimentalne analize napreznja. Ona se može primijeniti direktno na originalnim izvedbama i ne zahtijeva izradu posebnih, često vrlo skupih modela. Obloga nalijepljena na kućišta motora, pumpi i sličnih konstrukcija može dati uvid u površinska napreznja ovih prostornih tvorevina.

Prednost je metode fotoelastične obloge pred metodom elektrotoporskih tenzometara što daje podatke za cijelo promatrano područje na modelu, a ne samo za jednu točku. (O mjerenjima pomoću rasteznih mjernih traka, v. Otporski pretvarači u članku *Električna mjerenja*, TE 3, str. 644).

Dinamička fotoelasticiometrija. U novije vrijeme sve više se primjenjuje fotoelastični efekt za proučavanje dinamičkih problema raspodjele naprezanja, posebno na proučavanje širenja valova naprezanja i deformacija. Ta se metoda danas uspješno primjenjuje za proučavanje kako ravninskih tako i prostornih dinamičkih problema širenja valova naprezanja. Oprema za dinamička ispitivanja optički je slična standardnoj opremi, ali je još opremljena brzom kamerom i potrebnom elektroničkom opremom za registriranje vremena. Slika na prilogu u bakrotisku prikazuje seriju fotografija snimljenih brzom kamerom. Na njima se jasno vidi širenje valova naprezanja u beskonačnoj ploči sa stepenicom. Materijali za dinamička fotoelasticiometrijska ispitivanja treba da imaju što manji modul elastičnosti, da bi širenje valova bilo što sporije.

Fotoplastičnost. U ispitivanju plastičnih deformacija konstrukcija danas se pored ostalih eksperimentalnih metoda sve više upotrebljava fotoplastičnost, koja omogućava da se već na temelju jedne mjerene veličine dobije slika o stanju plastičnih deformacija. Ispitivanja se mogu vršiti na dva načina: upotrebom fotoplastičnih materijala ili primjenom fotoelastične obloge.

Prva metoda, kod koje se promatra model izrađen od fotoplastičnog materijala, bolje je razrađena, a uvjetovana je pronalaskom fotoelastično osjetljivog materijala koji se ispod i iznad granice elastičnosti ponaša slično kao materijal originala (isti kriterij tečenja, slični dijagrami σ , ϵ). Ovisno o materijalu od kojeg je izrađen model i o njegovim fotoplastičnim svojstvima (posebno o ponašanju efekta dvoloma u plastičnim zonama) razrađeni su posebni postupci za djelomično i potpuno određivanje deformacija i naprezanja u modelu. Poznato je da se celuloid, polistiren i neki drugi materijali pri opterećenju ponašaju slično kao čelik, a uz to imaju također fotoelastična i fotoplastična svojstva. Tako, npr., celuloid pored svojstva dvoloma pokazuje pri opterećenju iznad granice elastičnosti poseban fotoplastični efekt, »disperziju dvoloma«, što se iskorištava za određivanje plastičnog stanja u modelu. Kod polistirena raste red izokrome s porastom elastičnih deformacija, a nakon prelaza granice elastičnosti red izokrome smanjuje se do nule (granica pune plastičnosti) i ponovo raste s veličinom plastične deformacije.

Kod druge metode primjenjuje se fotoelastična obloga, na čije se elastično stanje naprezanja preslikava elasto-plastično stanje originala. Metoda je posebno korisna za određivanje deformacija zaostalih nakon uklanjanja opterećenja, i to naročito na površini prostornih tijela različitih oblika. Međutim, metoda je netočna kad se primjenjuju deblje obloge, a i zbog »optičkog puzanja«, koje je kod materijala danas upotrebljivanih za obloge dosta izraženo.

MATERIJALI I MODELI

Većina prozirnih materijala pokazuje pod opterećenjem svojstvo dvoloma, ali samo manji broj takvih materijala dolazi u obzir za fotoelastična ispitivanja. Da bi materijal bio pogodan za izradu fotoelastičnih modela, on mora zadovoljavati ove uvjete: on mora biti optički osjetljiv; zavisnost između naprezanja, deformacija i reda izokrome mora biti linearna; on mora biti mehanički i optički izotropan i homogen; mehaničko i optičko puzanje mora biti slabo izraženo; prednaprezanja u materijalu moraju biti mala; mora se lako mehanički obrađivati.

Mjera *optičke osjetljivosti* je omjer modula elastičnosti E i fotoelastične konstante S , koji je jednak redu izokrome po jedinici debljine modela i po jediničnoj deformaciji pri vlačnom opterećenju:

$$\frac{E}{S} = \frac{N}{h\epsilon}$$

Ovaj omjer pokazuje koliki će se red izokrome N pojaviti u modelu debljine h uz očekivanu deformaciju ϵ . Kako je maksimalna deformacija do koje se smije opteretiti model ograničena dozvolje-

nim naprežanjem σ_{doz} , i maksimalni je red izokrome koji se može postići po jedinici debljine modela određen omjerom

$$\left(\frac{N}{h}\right)_{\max} = \frac{\sigma_{doz}}{S}$$

Ova dva podatka određuju granice optičke osjetljivosti, te o njima treba voditi računa kad se priprema ispitivanje. Za neke važnije fotoelastične materijale prikazane su ove vrijednosti u tablici 2.

Tablica 2
SVOJSTVA NEKIH FOTOELASTIČNIH MATERIJALA

Materijal (komercijalni naziv)	Kemijska pripadnost	Modul elastičnosti E kp/cm ²	Dozvoljeno naprežanje σ_{doz} kp/cm	Fotoela- stična kon- stanta na- prezanja S kp/cm
Araldit B	Epoksidna smola	34 000	400	10,6
Araldit D	Epoksidna smola	26 000	400	13,8
Castolit	Poliester	49 600	520	28
CR-39	Alilna smola	20 000	200	14,4
Catalin 61-893	Alkidna smola	43 200	400	15,4
Plexiglas	Metakrilna smola	27 000	200	250
Staklo	Silikat	700 000	300	200
Celuloid	Celulozni derivat	24 600	530	52
Guma	Vulkanizirani poli- merizat izoprena	5	—	0,3

Vrijednosti se odnose na trajanje pokusa 1...10 min, na sobnoj temperaturi i uz natrijevo svjetlo ($\lambda = 589,3$ nm).

Kako je cijela teorija elastičnosti zasnovana na Hookeovom zakonu linearne ovisnosti deformacije o naprežanju, a fotoelasticiometrija, osim toga, na pretpostavci da je ispitivani materijal izotropan i homogen i da je red izokrome (prema jedn. 3) proporcionalan razlici glavnih naprezanja, za fotoelasticiometrijska ispitivanja pogodni samo materijali koji su izrađeni tako da je model od njih napravljen (lijevanjem u ploče ili u prostorni model) *izotropan* (tj. da ima u svim pravcima jednaka mehanička i optička svojstva) i da je *homogen*.

Pod *mehaničkim i optičkim puzanjem*, koja se opažaju gotovo kod svih fotoelastičnih materijala, razumijeva se pojava da se deformacija i red izokrome mijenjaju tokom vremena unatoč tome što se opterećenje ne mijenja. Kako se time mijenjaju modul elastičnosti i fotoelastična konstanta, kod ispitivanja se snimanje izokroma vrši onoliko vremena nakon početka opterećenja koliko i kod određivanja spomenutih konstanti baždarenjem. Obično je to nakon 1 do 10 minuta.

Prednaprezanja mogu biti posljedica loše izrade modela (nedjednolikog hlađenja pri lijevanju ploča ili modela, povišene temperature na mjestu rezanja) ili uvlačenja vlage iz zraka u model (rubni efekt). Oboje remeti stvarnu sliku izokroma. Utjecaj tih prednaprezanja može se ocijeniti promatranjem modela u kružno polariziranom svjetlu, u kojem je model, ako je idealno slobodan od prednaprezanja, jednoliko taman.

Obrada modelâ za fotoelasticiometrijska ispitivanja složen je posao, posebno modelâ za prostorna ispitivanja. Ravninski modeli obrađuju se rezanjem, glodanjem ili tokarenjem iz gotovih ploča a prostorni modeli se sastavljaju lijepljenjem ili dobivanjem lijevanjem polioplasta u kalupe. Pri obradi primjenjuju se alati od tvrdog metala, a treba težiti za tim da se na mjestu obrade temperatura što manje povisuje. Modeli lijevani u kalupe hlade se obično u pećima u kojima se temperatura postepeno smanjuje od temperature lijevanja na sobnu (brzinom $\sim 1,5$ do 3°C/h). Uz svaki obrađeni model uzima se uzorak od istog materijala radi njegovog baždarenja, tj. određivanja modula elastičnosti i fotoelastične konstante.

LIT.: M. Frocht, Photoelasticity, 2 vols, New York 1941/48. — A. Pirard, La Photoélasticité, Paris 1947. — G. H. Lee, An introduction to experimental stress analysis, New York 1950. — T. J. Dolan, W. M. Murray, Photoelasticity: Fundamentals and two-dimensional applications. — D. C. Drucker, Three-dimensional photoelasticity, u djelu M. I. Hetényi (ed.), Handbook of experimental stress analysis, New York 1950. — A. Kuske, Verfahren der Spannungsoptik, Düsseldorf 1951. — E. C. Coker, L. N. G. Filon, A treatise on photo-elasticity, New York 1957. — R. Hiltcher, Spannungsmessung mit optischen Mitteln, u djelu Handbuch der Spannungs- und Dehnungsmessungen, Düsseldorf 1958. — A. Kuske, Einführung in die Spannungsoptik, Stuttgart 1959. — M. Milbauer, M. Perla, Fotoelasticiometričke přístroje a měřicí metody, Praha 1959. — H. Wolf, Spannungsoptik, Berlin 1961. — B. K. Воронцов, П. И. Полюхин, Фотоэластициметрия, Москва 1969. — L. Föppl, P. Mönch, Praktische Spannungsoptik, Berlin 1971.

I. Alfirević S. Jecić