

Ing. Petr P ů s c h e l , VÚHU:

Fotoelasticimetrické modelové hmoty

Při fotoelasticimetrickém výzkumu se pracuje většinou na zmenšených modelech. Je tedy nutné, aby zvolený modelový materiál měl nejen obdobné elastické vlastnosti jako materiál modelovaný, ale také dobré optické vlastnosti.

Dostupné modelové hmoty jsou většinou vyráběny z epoxidové pryskyřice odléváním a vytvrzováním za zvýšené teploty. Výsledné hmoty bývají zabarveny tmavě hnědě a obsahují drobné bublinky vzduchu. Vlivem bublinek dochází v těchto hmotách k rozptylu polarizovaného světla a výsledné obrazce, charakterizující rozložení napětí v modelu, jsou potom neostré.

Nejdůležitějším úkolem bylo nalézt vhodný způsob výroby kvalitních modelových hmot při nezvýšené teplotě a vyzkoušení možnosti využít pro výrobu modelových hmot polyesterové pryskyřice. U metodiky přípravy hmot byl důležitý požadavek omezení toxicity. Veškeré používané suroviny jsou toxické, způsobují trvalé ekzémy, poškození sliznic, některé způsobují těžké a nevratné poškození zraku, jiné jsou vysloveně jedovaté nebo působí jako jedy nervové. Tyto účinky se samozřejmě značně zvyšují při zpracování všech používaných látek za zvýšené teploty. Zvyšování teploty na 80 - 150° C je u zavedených postupů zpracování pryskyřic běžné. Laboratoře nebývají obvykle vybaveny dobrou klimatizací, a proto byla vypracována technologie zpracování pryskyřic za laboratorní teploty, kdy tenze par toxických látek je minimální. Tento způsob má ovšem podle některých autorů neblahý vliv na stupeň vytvrzení a mechanické vlastnosti hmoty. Byl též hledán postup, který by tento záporný účinek vytvrzování za laboratorní teploty odstranil.

Teoretická část

Z metod vhodných k přípravě polymerů pro účely fotoelasticimetrie patří polymerace v bloku, termická polymerace a iniciovaná polymerace v bloku (2,9). Způsoby iniciované polymerace jsou nejběžnější. Monomer a iniciátor, popř. i katalyzátor se dokonale promísí, odstraní se vzduchové bublinky a hmota se vytvrzuje při dodržení určitého teplotního režimu ve formě.

Reakčním teplem se hmota při vytvrzování zahřívá a po dotvrzení opět chladne. Vlivem rozdílných teplot dochází ke značným objemovým změnám a to má nepříznivý vliv na vnitřní prnutí výsledné hmoty. Toto prnutí se zmírňuje separací lící formy, která nedopustí, aby hmota ke stěnám formy pevně přilnula.

Okrajové prnutí vzniká u hmot smrštěním nebo botnáním povrchu materiálu (1) nebo opracováním hmoty na model požadovaného tvaru (1,10).

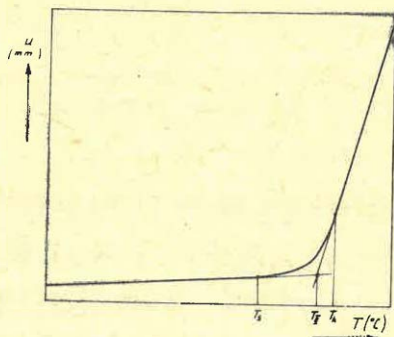
Uspořádání makromolekul ve hmotách dosahuje různého stupně uspořádanosti (9,13):

- a) krystalické uspořádání
- b) parakrystalické uspořádání
- c) smektické uspořádání
- d) nematické uspořádání
- e) amorfni uspořádání

} mezomorfni uspořádání

Hmota může současně obsahovat více stupňů uspořádanosti. Krystalické uspořádání dává na rentgenogramu charakteristické, ostré interferenční kružnice. Hmota je anizotropní. Mezomorfni uspořádání je pak přechodem k uspořádání amorfni - izotropni a jsou to např. ve fotoelasticitě hmoty v nezátíženém stavu. Krystalizační schopnost hmoty zvyšují benzenová jádra, vestavěná do rovných řetězců makromolekul.

Při zatížení podléhají hmoty mimo pružných deformací také deformacím závislým na teplotě a čase (9), viz obr. 1. Na pružnou deformaci, řídící se Hookovým zákonem do teploty sklovatění T_g , navazuje nelineární průběh viskoelastické deformace až do teploty tekutosti T_k a dále nevratná plastická deformace. Průsečík lineárních větví závislosti udává bod přechodu II. řádu.



Obr. č. 1

Jednotlivá centra vnitřního prutí makromolekul, vzniklých vzájemným působením segmentů, špatnou uspořádaností objemných skupin makromolekul a jinými vlivy, se odstraňují temperováním (9). Temperace je v podstatě vyhřátí hmoty na teplotu v okolí bodu přechodu II. řádu a postupné ochlazování podle určitého teplotního programu.

Zatíží-li se hmota, vyhřátá na teplotu přechodu II. řádu, dojde následkem vnějších sil k prostorovému uspořádání segmentů makromolekul do směru silového pole. Orientační dvojlom, vzniklý při těchto podmínkách, se postupným ochlazováním při konstantním zatížení zmrazí. Odtižením zmrazeného modelu klesne počet izochromat pouze o hodnotu silového dvojlomu.

Vlastností používaných hmot, buď epoxidových nebo polyesterových, se dají v širokém rozpětí měnit (8,11,12) použitím nejrozličnějších změkčovadel, zvláčňovadel, rozpouštědel (14) nebo i různých typů pryskyřic tvrdidel nebo i jejich kombinací (6,8,11,12,15).

Pokusná část

K pokusům bylo v naší laboratoři použito epoxidových a polyesterových pryskyřic tuzemské výroby.

CHS-Epoxy 110 (5) - je nízkomolekulární epoxidová pryskyřice neobsahující rozpouštědla a je určena k vytvrzování za normální i zvýšené teploty. Z tohoto typu pryskyřice byly použity dva výrobky Spolku pro chemickou a hutní výrobu v Ústí nad Labem: pryskyřice z tuzemských surovin a pryskyřice vyrobená z velmi čistého dianu francouzského původu. Tato pryskyřice je čirá a téměř bezbarvá a teprve po dotvrzování se objevuje slabé žlutohnědé zbarvení.

Tvrdidlo P_1 (5) - je směs technických polyalkylenpolyamidů, obsahujících převážně diethylentriamin. Používá se k vytvrzování epoxidových pryskyřic při laboratorní nebo mírně zvýšené teplotě. Použití jiných tvrdidel je popsáno v (5, 6, 7, 15).

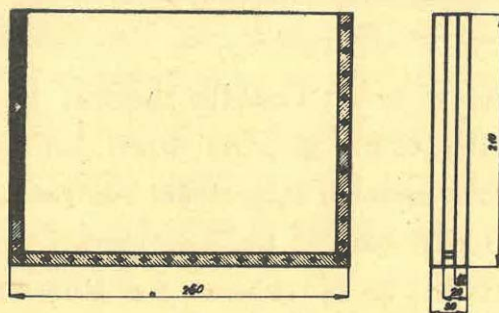
CHS-Polyester 100 (5, 11) - je roztok nenasycené polyesterové pryskyřice ve styrenu. Používá se k výrobě knoflíků a jako lící pryskyřice k zalévání biologických preparátů. Vzhledově je to čirá, bezbarvá až slabě nažloutlá sirupovitá kapalina. Polyesterových pryskyřic se vyrábí celá řada (5).

P urychlovač 1 (14) - je toluenový roztok kobaltnaftenátu. Vzhledově je to kapalina fialové barvy. Používá se s P katalyzátorem k vytvrzování nenasycených polyesterových pryskyřic. Působí tak, že dvojmocný kobalt katalyzuje rozpad organických peroxidů, jejichž radikály iniciují polymeraci.

P katalyzátor VI (14) - je 50procentní roztok metylcyklohexanonperoxidu v dibutyftalátu a metylcyklohexanolu. Používá se k vytvrzování polyesterových pryskyřic za studena.

Formy pro odlévání desek a modelů. Pro výrobu licích forem se nabízí mnoho materiálů (8); jsou to např. ocel, bronz, mosaz, hliník, nízkotavitelné slitiny, sklo, sádra nebo formy ze silikonového kaučuku.

Příprava skleněné licí formy je popsána v (12). Nejvýhodnějším materiálem pro licí formy na přípravu desek se jeví ocel - viz obr. 2. Vnitřní stěny formy byly opracovány na horizontální brusce s magnetickým upínáním. Konečná úprava povrchu byla provedena ručně leštěním.

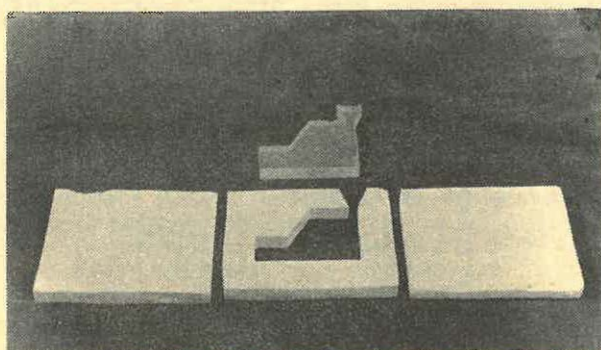


Obr. č. 2

Formy pro modely, vyrobené ze silikonového kaučuku, jsou velmi výhodné i pro přípravu modelů složitějšího tvaru. Hodí se jak pro přípravu modelů pro rovinnou fotoelasticitní, tak i pro přípravu velmi komplikovaných modelů fotoelasticitní prostorové. Formu není třeba nijak separovat. Pryskyřice sice vyplní formu dokonale i s nejjemnějšími detaily (nebo vadami), ale nepřilne k ní. Formu je možno po rozebrání použít k výrobě dalších modelů téhož tvaru. Jedné formy se dá použít až 100 krát.

Silikonový kaučuk je dvousložkový. Jednou složkou je Lukopren N 1522 a druhou složkou katalyzátor polymerace C 21. Katalyzátoru se používá 4 až 5 % váhových. Po důkladném promíchání je nutno odstranit bublinky vzduchu odstředěním na centrifuze a potom se odlévá forma. Iniciovaná směs tuhne asi po 30 minutách a po 2 hodinách je forma použitelná. Při výrobě formy je třeba připravit si nejprve model potřebných tvarů z kovu, Umaplexu nebo jiného materiálu běžnými způsoby obrábění. Podle tvaru modelu je nutno vhodně zvolit

a umístit nalévací a odvětrávací otvor, které musí silikonová forma mít, aby pryskyřice při nalévání vyplnila dokonale celý prostor včetně obou otvorů. Formu je nutno připravit rozebíratelnou z několika dílů. Na obr. 3 je odlévací forma pro model svahu spolu s hotovým odlitkem, na kterém je vidět neodříznutá část, která vyplnila nalévací otvor silikonové formy.



Obr. č. 3

Výhody formy, vyrobené ze silikonového kaučuku, je její dokonalá pružnost. Ve výsledném odlitku modelu se proto objeví jen slabé okrajové prutí, které lze snadno při dotvrzování a temperování odstranit. Nevýhodou těchto forem je, že špatně odvádějí reakční teplo polymerace pryskyřice. Tuto nevýhodu je možno odstranit tak, že se Lukopren před smíšením s katalyzátorem plní kovovým, nejlépe hliníkovým práškem. Množství katalyzátoru se ovšem stanoví v poměru k množství Lukoprenu bez plnidla.

Separování lících forem. Polyesterové a zvláště epoxidové pryskyřice vykazují silnou adhezi vůči předmětům, na nichž byly vytvrzeny, a proto je nutno lící formu před odléváním separovat. Používá se k tomu silikonových laků, silikonových olejů, silikonových tuků, včelího vosku rozpuštěného v tri-chloretylenu, polyetylénové fólie apod.. Pouze formy ze silikonového kaučuku navyžadují separování.

Silikonové nátěry (3. 8). - byly zkoušeny tyto silikonové nátěry: metyl-fenylsilikonový lak Lukosil 150, Lukosil 200, metylsilikonový lak Lukosil M 101, Lukosil M 112 a Lukosil M 122 - výrobky VCHZ Synthesia n.p., závod Kolín. Ze všech uvedených silikonových laků se jako nejvýhodnější ukázal lak Lukosil 200, který je nejpružnější.

Silikonové oleje se ukazují být velmi výhodným prostředkem k separování lící formy, používané k vytvrzování pryskyřic za laboratorní teploty. Dají se použít všechny silikonové oleje řady Lukosil M 10 - M 350, odstupňované podle

viskozity. Lepších výsledků bylo dosaženo s oleji viskoznějšími (od M 100 výše). Při vytvrzování epoxidoových pryskyřic, ředěných reaktivními rozpouštědly, je nutno film silikonového oleje na formě zesílit nebo použít k separaci hustšího oleje např. Lukooil M 350, popř. silikonového tuku, ředěného Lukooilem.

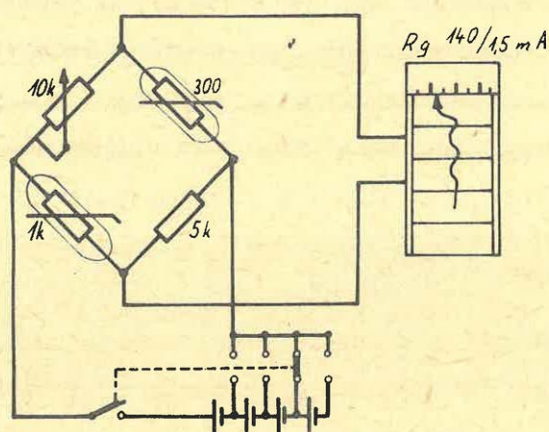
Silikonové tuky - byl použit Lukosan M 20 a Lukosan MF 20 hlavně k utěsnění spár lící formy a k separaci šroubů, určených ke stažení formy.

K vnějšímu zacelení případných netěsností se dá výhodně použít silikonový těsnící tmel Lukosan FA 90, silikonový kaučuk Lukopren N 1522 nebo Lukopren B, který přilne i ke sklu, kovům a plastickým hmotám. K separaci nebo ochraně rukou pracovníka, zpracovávajícího pryskyřice, se používá Fistrax (výrobek fy Spolek pro chem. a hut. výrobu).

Způsoby odstranění bublinek ze základní směsi. Při míchání základní směsi pryskyřic před vytvrzováním se do směsi dostane značné množství vzduchových bublinek. Omezení intenzity míchání není žádoucí - směs musí být dokonale homogenní. Snižování viskozity směsi teplotou či rozpouštědly nebo odstranění bublinek použitím vakua se ukázalo jako nevhodné (12).

Byl vypracován postup odstranění bublinek pomocí odstředivé síly. Laboratorní odstředivka Chirana (typ Ch 2) se k tomu účelu výborně osvědčila. Směs se připraví do teflonových kádinek (Labora) o obsahu 200 ml a při 3 000 ot/min jsou bublinky i případné mechanické nečistoty během tří minut dokonale odstraněny. Celý postup přípravy směsi k odlévání byl zvládnut během 10 až 15 minut. Tato doba postačí i pro zpracování polyesterových pryskyřic, u kterých je počátek želatinace od 20 minut výše.

Metodika vytvrzování pryskyřic za laboratorní teploty. Stejnomořného vytvrzování, které je pro použití hmot ve fotoelasticimetrii velmi důležité, bylo dosaženo tak, že se výhodně využilo reakčního tepla polymerace (12). Reakční teplo je po želatinaci směsi stejnoměrně rozváděno a odváděno ocelovou formou po celé ploše desky. Teplota formy dosahuje až 80° C. Nestejnoměrným ochlazováním by se do hmoty dalo proutí přenést také. Tomu bylo při pokusech zabráněno tak, že forma s pryskyřicí je během celého procesu vytvrzování uzavřena v dobře těsnícím bloku pěnového polystyrénu, který má výborné izolační vlastnosti. Ve vzdušném prostoru termobloku byl umístěn kontrolní rtuťový teploměr a termistorový snímač teploty.



Obr. č. 4

Registračním termistorovým teploměrem (viz obr. 4) bylo možno nepřímě měřit vytvrzovací charakteristiky pryskyřic. Každá připravená hmota má danou svou vytvrzovací charakteristiku a výsledná hmota se dá relativně porovnávat s hmotami, připravenými při stejném uspořádání pokusu.

Vytvrzování pryskyřice v termobloku je obvykle ukončeno po 24 hodinách a hmotu je možno vyjmout z formy. Smrštění pryskyřice při vytvrzování se obvykle projevuje tím, že deska nepřiléhá celou plochou k formě. V místech přechodu přilnuté a odlepené desky se při pozorování v polarizovaném světle projevuje ostrý přechod nepatrného prnutí. Tuto vadu lze zcela odstranit dotvrzením nebo temperováním hmoty. Většinou lze desku z formy snadno vyjmout. Pokud je adheze velmi silná, pomůže obvykle zahřátí formy i s hmotou v elektrické sušárně. Zahřívání i ochlazování se musí dít stejným způsobem jako při dotvrzování nebo temperování hmot. Po vychladnutí lze desku z formy snadno vyjmout.

Použití ředidel a reaktivních ředidel. Použitím nereaktivních ředidel

epoxidových pryskyřic jako je aceton a xylén se dá dosáhnout výsledných hmot s menším modulem pružnosti než bez použití ředidel. Použití reaktivních ředidel má pro fotoelasticimetrické hmoty význam v tom, že se dají do molekul polymeru zavést fenylové skupiny. Zavedením fenylových skupin se podle (9) může snižovat velikost relativního dvojzlomu hmot, a tím se tedy zvyšuje optická citlivost hmoty. Fenylová jádra jsou totiž v makromolekulárních řetězcích snadno polarizovatelná.

U epoxidových hmot vytvrzených za tepla se fenylová jádra zavádějí do

makromolekuly pomocí tužidel, která tato jádra obsahují (15); jsou to např. ftalanhydrid a hexahydroftalanhydrid. Při vytvrzování za laboratorní teploty je možno fenylové skupiny do sítě makromolekuly zavést pomocí reaktivního ředidla fenyglycidetér, kterého se přidává 10 - 15 % na váhu pryskyřice.

Tabulka 1

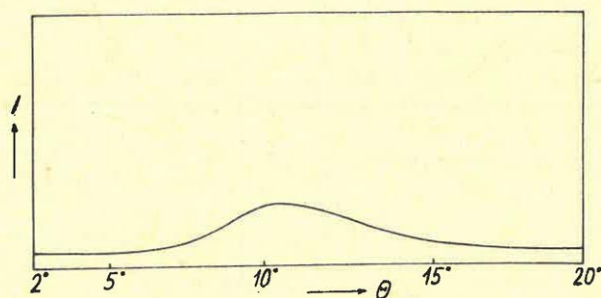
Suroviny	Vah. poměr	Označ.	$E \cdot 10^{-3}$ ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	K ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-1}$)	D^{-1} (cm^{-1})	Okrajové pnutí
Epoxy CHS 110 P 1	140 14	ČP 8	31,9	18,2	1,75	0,4
Epoxy CHS 110 P 1 RR	130 13 13	ČP 9	29,1	15,93	1,83	0,3

Vliv fenyglycidetéru na optickou citlivost epoxidové pryskyřice nebylo možno prakticky určit. Jediným reaktivním ředidlem, které bylo možno zajistit ve Spolku pro chemickou a hutní výrobu, byl butylglycidetér. Butylglycidetér zvyšuje optickou citlivost hmoty jen nepatrně a na koeficient kvality D hmoty nemá téměř žádný vliv. Výsledky pokusu s reaktivním ředidlem butylglycidetérem (RR) udává tabulka 1. I když zvýšení koeficientu kvality není tak patrné, jak lze očekávat u fenyglycidetéru, je zde jisté zlepšení vlastností hmoty. Reaktivní ředidla jsou naprosto čirá, a proto má výsledná hmota světlejší barvu než bez použití ředidla. Další výhodou je, že iniciovaná směs je méně reaktivní, polymerace proběhne pomaleji a výsledná hmota má z tohoto důvodu menší pnutí.

Dotvrzování a temperování hmot. Pro použití ve fotoelasticimetrii je nutno spojit pojmy dotvrzování a temperování hmoty. Jednotlivá centra vnitřního pnutí makromolekulárních hmot, vzniklá vzájemným působením segmentů, vodíkovými můstky a špatnou uspořádaností objemných skupin makromolekul, se dají temperováním odstranit. Jde v podstatě o pozvolné zahřátí hmoty k teplotě přechodu II. řádu, prodlevu a pozvolné ochlazení. K temperování hmot, vyrobených v naší laboratoři, bylo použito malé skříňové sušárny, regulované programovým padáčkovým regulátorem ZPA (12).

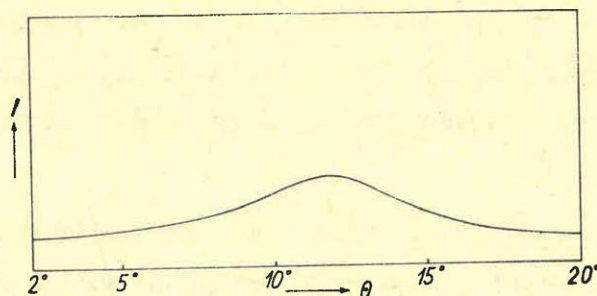
Stanovení jakosti hmot

Zkoušky vyrobených fotoelasticimetrických hmot byly vypracovány podle předpisů pro zkoušení vlastností a analytiky hmot (4, 9, 11, 13).



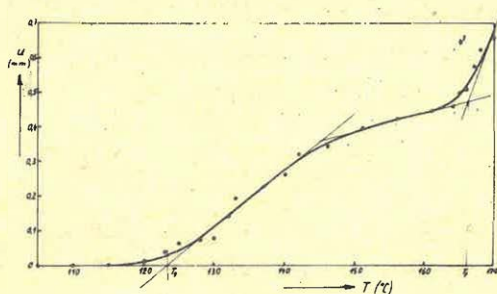
Obr. č. 5

K měření vnitrofázového stavu hmot byla zvolena rentgenografie. Pomocí rentgenografie lze určit podíl krystalického a amorfního podílu polymeru. Z výsledků měření popsaných v (12) je patrné, že epoxidové pryskyřice (obr. 5) i polyesterové pryskyřice (obr. 6) lze podle uspořádání makromolekul zařadit k typu nematickému až amorfnímu a maxima rozptylu jsou u těchto dvou typů pryskyřic vzájemně jen mírně posunuta.

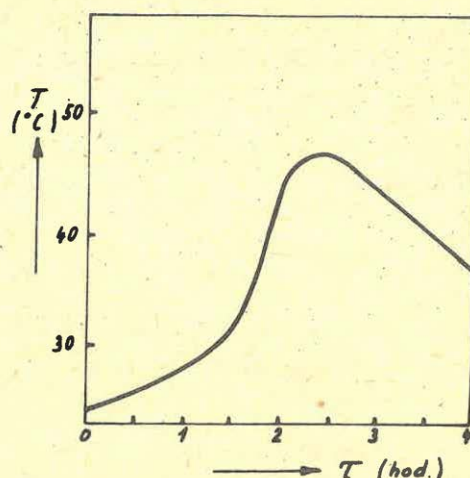


Obr. č. 6

Ke stanovení teploty přechodu II. řádu bylo použito penetrační metody popsané v (12). Na obr. 7 je typická závislost měknutí polyesterové pryskyřice. T_g je teplota přechodu II. řádu (teplota skelného přechodu), T_f je teplota tečení amorfni taveniny.



Obr. č. 7



Obr. č. 8

Vytvrzovací charakteristika byla u vzorků pryskyřic sledována při každém pokusu registračním teploměrem, jehož čidlo, termistor, bylo umístěno ve vytvrzovacím termobloku. Z průběhu křivky na obr. 8 lze zjistit počátek želatinace cca po 60 min. Polymerace je ukončena ve 120 min (maximum křivky) a potom následuje pozvolné ochlazování až na laboratorní teplotu.

K měření propustnosti světla bylo použito bílého, sodíkového a rtuťového světla fotoelasticimetru firmy Meopta, typ FP. K měření intenzity světla byla použita křemíková fotodiody Tesla 1 PP 75 a milivoltmetr (12). Tloušťka všech měřených vzorků byla 10 mm. Výsledky některých měření jsou uvedeny v tabulce č. 2, kde T = propustnost světla v procentech. Z měření vyplynulo, že všechny vzorky hmot, vyrobené v naší laboratoři, mají vyšší propustnost než vzorek hmoty, vyrobené vytvrzováním za tepla pomocí tužidla F 1 (vyrobena mimo naší laboratoř).

Tabulka 2

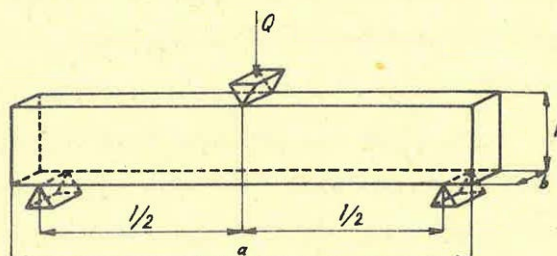
Označení vzorku	Pryskyřice	Bílé světlo		Na světlo		Hg světlo	
		mV	T (%)	mV	T (%)	mV	T (%)
ČP 5	Polyester CHS-104	42	84	40	80	42,5	85
ČP 8	Epoxy CHS-110	43	86	41	82	43,5	87
ČP 17	Polyester CHS-100	45	90	43	86	43,5	87
-	Epoxy CHS-110 F 1	40,5	81	32	65	35,5	71

Ke stanovení stupně vytvrzení polyesterových i epoxidových pryskyřic bylo použito extrakce acetonem v Soxhletově přístroji (12). Výsledek měření je uveden v tab. č. 3.

Tabulka 3

Označení vzorku	Pryskyřice	Stupeň vytvr. původní hmoty %	Stupeň vytvrzení po dotvrzení hmoty %
ČP 14	Polyester CHS 100	64,5	88,8
ČP 15	Epoxy CHS-110	93,9	99,0

Ohybová zkouška pro měření modulu pružnosti byla prováděna na zkušebních trámečcích obdélníkového průřezu na principu nosníku volně ležícího na dvou podpěrách (viz obr. 9). Všechny rozměry trámečků byly dodržovány konstantní, pouze šířka trámečku b je různá podle druhu hmoty a způsobu vytvrzení.



Obr. č. 9

Největší průhyb je v místě působící síly Q (uprostřed) a byl měřen úchylkoměrem o citlivosti 0,002 mm na jeden dílek. Sestava měření v zatěžovacím rámu - viz obr. 10. Pro největší prohnutí platí

$$y = \frac{1}{48} \cdot \frac{Q \cdot l^3}{E \cdot J} ,$$

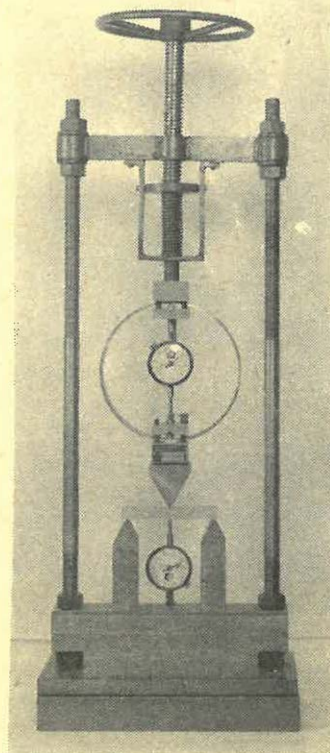
kde E - modul pružnosti /kg · cm⁻²/

b - šířka zkuš. tělesa /cm/

h - výška zkuš. tělesa /cm/

l - vzdálenost podpěr /cm/

J - moment setrvačnosti /cm⁴/



Obr. č. 10

Moment setrvačnosti obdélníkového průřezu je

$$J = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 \cdot$$

Ze vztahu pro y platí pro E :

$$E = \frac{1}{48} \cdot \frac{l^3 \cdot Q}{J \cdot y}$$

V našem případě jsou proměnnými Q a y . Pro daný trámeček tedy platí:

$$\frac{1}{48} \cdot \frac{l^3}{J} = C = \text{konstanta},$$

a potom pro E

$$E = C \cdot \frac{Q}{y} \cdot$$

Provede se více měření při různých zatížení Q a odečte na úchylkoměru příslušné y . Jako výsledná hodnota slouží průměrná hodnota E .

Optická citlivost hmoty byla zjišťována na téže zkušební trámečku na základě lineární úměrnosti mezi relativním dvojlomem a rozdílem hlavních

napětí, která je dána Wertheimovým vztahem:

$$\Delta = C (\nu_1 - \nu_2) ,$$

kde $C = \frac{t}{K}$ je konstanta úměrnosti

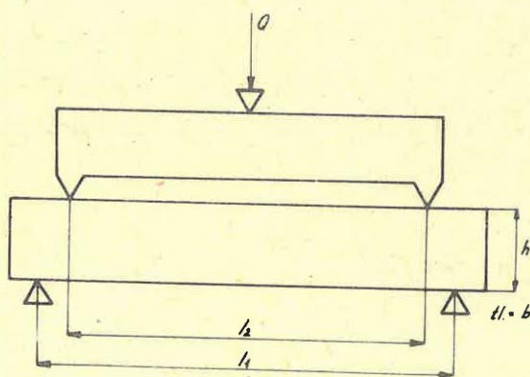
K = optická citlivost, vyjádřená v $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-1}$ pro $\Delta = 1$

$\nu_1 - \nu_2$ = rozdíl hlavních napětí

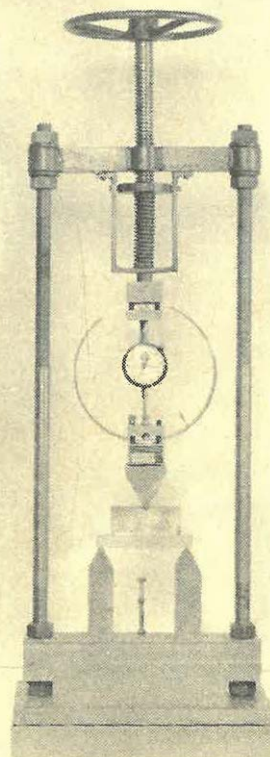
t = tloušťka hmoty nebo modelu v cm

Δ = relativní dvojlom

Schéma zatěžování trámečku je na obr. 11.



Obr. č. 11

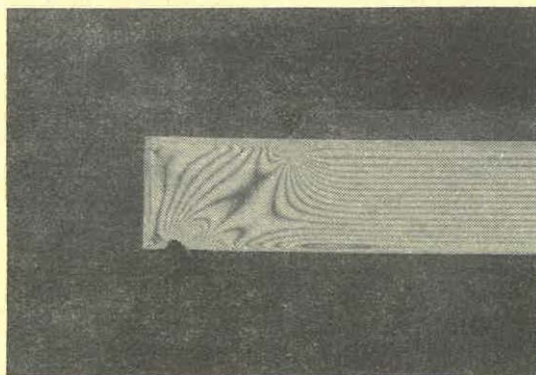


Obr. č. 12

Celkový pohled na zatěžovací zařízení, konstruované tak, aby bylo možno stanovit výslednou sílu kruhovým dynamometrem, je na obr. 12.

Abychom mohli z měření na ohybovém trámečku posoudit umělou hmotu, musíme přihlídnout k jeho deformaci. Podle teorie pružnosti a pevnosti jsou napětí a prodloužení podél výšky trámku při čistém ohybu rozložena přímkově tehdy, jde-li o průhyb dostatečně malý. To platí pro rovné trámky s vysokým modulem pružnosti, kde elastické deformace jsou minimální a kde tedy platí Hookův zákon. Izochromaty zatíženého trámečku jsou zachyceny na obr. 13 v kruhově polarizovaném, monochromatickém sodíkovém světle. Z obrázku je patrné, že singulární linie, linie nulového napětí, je shodná s podélnou osou trámku. Okrajové hodnoty jsou ovlivňovány vnitřním tlakovým prutím, vzniklým v důsledku opraco-

vání materiálu.



Obr. č. 13

To znamená, že tahová napětí budou snížena a tlaková napětí zvýšena. Dá se předpokládat, že tato malá napětí, vzniklá při opracování, jsou na obou stranách stejně velká a můžeme je tedy eliminovat tím, že pro výpočet optické citlivosti vezmeme aritmetický průměr z obou naměřených hodnot:

$$\Delta = \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2}$$

Optická citlivost hmoty potom je

$$K = \frac{Q_M}{h^2 \Delta},$$

kde $M = \frac{P}{4} (l_1 - l_2)$ a $P = Q_{\text{dyn}} + Q_{\text{vl.v.}}$

Q_{dyn} je tlak vyvolaný šroubem a měřený dynamometrem

$Q_{\text{vl.v.}}$ je hmoty břitů, uložených na trámečku a vlastní váha trámečku.

Tabulka č. 4 na následující stránce zachycuje výsledky měření vlastností některých vyrobených fotoelasticimetrických hmot.

D je koeficient kvality hmoty, daný poměrem

$$D = \frac{E}{K} (10^{-3}).$$

Tabulka 4

Suroviny	Váh. poměr	Označení	$E \cdot 10^{-3}$	K	D	Poznámka
Polyester CHS-104 P VI P I	140 4 0,75	ČP 5	30,9	27,3	1,13	/
Epoxy CHS-110 reakt.řed. P I	130 13 13	ČP 9	29,1	15,9	1,83	/
Polyester CHS-100 P VI P I	150 5 0,3	ČP 14	32,3	27,7	1,42	0,2 g kys. askorbové na 3 ml P I
Polyester CHS-100 P VI P I	150 4,5 1	ČP 11	27,6	26,6	1,04	hmota netem- perována (vnitř.pnutí)
Epoxy CHS-110 P I	140 14	ČP 8	31,9	18,2	1,75	/
Epoxy CHS-110 P I	560 56	ČP 16	29,1	12,8	2,29	/
Polyester CHS-100 P VI P I	550 14 0,1	ČP 17	33,8	26,8	1,26	/

Z á v ě r

Z výsledků pokusů a měření vyplývá, že hmoty pro fotoelasticimetrii, připravené metodou vytvrzování za laboratorní teploty, jsou pro rovinná fotoelasticimetrická měření vhodné. Za vhodné pro fotoelasticimetrii se považují hmoty, které mají koeficient jakosti D větší než 1. Tuto podmínku splňují hmoty, připravené jak z polyesterové, tak i z epoxidové pryskyřice. Epoxidové pryskyřice mají větší optickou citlivost oproti polyesterovým pryskyřicím, ty však mají tu výhodu, že jsou málo náchylné k okrajovému pnutí.

Způsoby odstraňování okrajových pnutí, v naší laboratoři vyzkoušené, plně vyhovují potřebám rovinné fotoelasticimetrie.

Metody zkoušení zaručují objektivní posouzení příp. relativní porovnávání vlastností těchto hmot.

Při odstraňování bublinek ze směsi před litím bylo dosaženo dobrých výsledků. Odstřeďování plně vyhovuje, pokud množství zpracované pryskyřice nepřesáhne 0,6 kg (objem nádobek centrifugy). Také barva výsledných hmot je zvláště u polyesterové pryskyřice anebo při použití reaktivních ředidel u epoxidové pryskyřice velmi dobrá. Hmoty jsou oproti hmotám vytvrzeným za tepla podstatně světlejší.

Jelikož vývoj pryskyřic v zahraničí i v ČSSR postupuje rychle kupředu a na trhu se objevují stále novější výrobky, bude nutno v aplikaci těchto hmot pro fotoelasticimetrii pokračovat. Také techniku a technologii, související s přípravou hmot a modelů, lze dále rozvíjet hlavně aplikací nových moderních přípravků a výrobků.

L i t e r a t u r a

- 1/ Hilscher R.: Forschung 20, č. 3, s. 66
- 2/ Holzmüller W., Altenburg K.: Fyzika polymerů, SNTL, 1966
- 3/ Hořejš V.: Speciální nátěry, SNTL, 1966
- 4/ Hugo J. a kol.: Konstrukční plastické hmoty, SNTL, 1965
- 5/ Katalogové listy Spolku pro chem. a hutní výrobu v Ústí nad Labem: 4.41, 4.01, 4.21, 3.01, 3.42, 3.62, 8.01, 4.03, 4.04, 4.42 z roku 1967
- 6/ Kučera E., Kocián V.: Chem. prům. 10/35, s. 438, 1960
- 7/ Kučera E.: Chem. prům. 14/39, s. 483, 1964
- 8/ Lidařík M., Kincí J., Roth V., Bríng A.: Epoxydové pryskyřice, SNTL, 1961
- 9/ Milbauer M., Perla M.: Fotoelasticimetrie a příklady jejího použití, ČSAV, 1961
- 10/ Milbauer M., Perla M.: Fotoelasticimetrické přístroje a měřicí metody, ČSAV, 1959
- 11/ Mležíva J.: Polyestery, SNTL, 1964
- 12/ Püschel P.: Výzkum vhodných fotoelasticimetrických hmot /Výzkumná zpráva VÚHU, 1968/
- 13/ Rybníkář F., Ditrych Z., Klácel Z., Ordelt O.: Analýza a zkoušení plastických hmot, SNTL, 1965
- 14/ Technická a obchodní zpráva Spolku pro chem. a hutní výrobu v Ústí n.L., č. 3, 1964 a č. 4, 5, 1965
- 15/ Vízner J.: Technické zprávy 2, Turčanské strojárne, n.p., Martin, 1966