

POUŽITÍ METODY MOIRÉ PRO MĚŘENÍ DEFORMACÍ
ROVINNÉHO POVRCHU

Ing. Petr Jaroš CSc
Státní výzkumný ústav pro stavbu strojů
Praha - Běchovice

S o u h r n

Referát se zabývá možnostmi zjednodušení vyhodnocovacích postupů při měření malých deformací povrchovou metodou moiré. Teorie je doložena ověřovacím měřením na vzorku namáhaném jednoosovým tahem. Zvláštní pozornost je věnována některým technologickým problémům s přihlédnutím k využití tuzemských zdrojů. Je popsána původní metoda měření transparentních vzorků a výroba měrných mřížek s použitím fotogrefické emulze.

ÚVOD

Metoda moiré umožňuje měření deformací pomocí geometrické interference mřížek (rastrů) popř. jejich obrazů. Od svého prvního technicky významného použití v oboru experimentální analýzy napětí (Weller a Shepard, 1948) prodělala metoda značný vývoj v teorii, technologii, přístrojovém vybavení a rozvětvila se do mnoha modifikací, umožňujících měření různých deformačních veličin (posuv, průhyb, úhel naklonění). V současné době patří tato metoda k základním, jak ukazuje její zařazení v učebnicích (např. [1]), počet článků v odborné literatuře a specializované výrobky předních firem pracujících na poli experimentální analýzy napětí.

S ohledem na celosvětový vývoj je v naší republice na poli této metody vývoj značně opožděn. Systematicky a dlouhodobě byla pěstována na několika pracovištích pouze Ligtenbergova metoda moiré vhodná pro řešení ohybu rovinných ploch. Pokusy o využití metody moiré k přímému měření povrchových deformací byly pouze ojedinělé, což ukazuje na objektivní potíže. Zdá se, že v posledních dvou letech se situace poněkud zlepšuje, jak ukazuje i počet příspěvků na našich konferencích. Tato změna je částečně vyvolána zavedením některých nových výrobků domácí výroby vhodných pro fotochemické kopírování mřížek na povrch vzorků, jejichž dovoz v minulosti byl zdrojem značných obtíží. Patří k nim zejména fotocitlivé vrstvy používané v polygrafickém průmyslu a fotorezist vyráběný v Lachemě Brno.

V oddělení experimentální pružnosti SVÜSS v současné době běží tříletý výzkumný úkol, jehož cílem je vypracování metodiky měření povrchových deformací s minimální potřebou dovozu. Následující referát obsahuje výsledky ukončené první etapy, ve které byla pozornost zaměřena na vývoj vyhodnocovacího procesu, postupu měření a nanášení rastrů s využitím fotoemulze.

TEORIE VYHODNOCOVACÍHO POSTUPU

Teorie jevu moiré a souvislostí pruhů moiré s vyšetřovanou rovinnou deformací byla již propracována mnoha autory na základě různých principů. Pravděpodobně nejúplnější přehled všech prací je uveden v [2]. Ve většině případů je způsob vyhodnocení dosti komplikovaný a předpokládá zpravidla použití nomogramů nebo kalkulátoru, čímž se ovšem ztrácí jedna z hlavních předností metody - názornost a okamžitý přehled o stavu deformace celé plochy najednou. Proto byl vyvinut následující vyhodnocovací postup, který při požadované přesnosti zůstává jednoduchý. Je použitelný v oblasti malých deformací, kdy platí s dostatečnou přesností formule

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}. \quad (1)$$

Nechť je na vyšetřovaný vzorek nanášena liniová mřížka s ekvidistantními pruhy šířky $\frac{\rho}{2}$ ve směru y a stejně širokými mezerami. Pro geometrický popis takového rastru je účelné schematické znázornění podle obr. 1, na kterém jsou vyznačeny pouze čáry označující periodu rastru ρ . Posuv u vzniklý deformací rastru je možné stanovit pomocí moiré efektu několika způsoby. Nejvhodnější z nich, dovolující určit smysl posuvu, volit počet pruhů moiré a citlivost měření je založen na superpozici deformované mřížky se svým původním stavem (obrazem), pootočeným o malý záporný úhel θ . Moiré pruhy prochází na obr. 1 vždy průsečíkem obou osnov. Označíme-li úhel, jenž svírá pruh moiré (popř. jeho tečna) s osou x ϑ , pak při nulové deformaci vzorku $u_{(x,y)} = 0$ platí $\vartheta = \frac{\rho}{2} = \text{konst}$ a moiré pruhy jsou tudíž rovnoběžné ve směru osy úhlu naklonění obou mřížek. Podrobíme-li vzorek deformaci, kterou pro jednoduchost odvození předpokládáme rovnoměrnou v oblasti několika period, změní se rozteč měrné mřížky na ρ' , přičemž hledané Lagrangeovo poměrné prodloužení ϵ_x je z definice a geometrie dáno (např. [1], [2])

$$\epsilon_x = \frac{\rho' - \rho}{\rho} = \frac{\cos \vartheta}{\cos(\vartheta + \theta)} - 1. \quad (2)$$

Tento vztah není sice složitý, ale bez numerického vyčíslení není fyzikální interpretace pruhů moiré příliš zřejmá. S ohledem na v praxi používané velmi malé hodnoty natočení $\theta \leq 3^\circ$ byl odvozen následující zjednodušený způsob vyhodnocení, považující průběh pruhů moiré přímo za přibližnou funkci posuvu u . Označíme-li posuv pruhu moiré vlivem deformace na souřadnici x $f(x)$ (směr y), platí pro malý úhel θ

$$u(x) \approx \theta \cdot f(x). \quad (3)$$

Hledané poměrné prodloužení je pak podle vztahu (1) dáno přímo

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \approx \theta \cdot \frac{df}{dx} = \theta \cdot \tan\left(\psi + \frac{\theta}{2}\right). \quad [\theta] = \text{rad} \quad (4)$$

Geometrický význam tohoto vztahu je přímo patrný - poměrné prodloužení je přímo úměrné směrnici změny směru pruhu moiré ve vyšetřovaném místě.

Obor vhodné použitelnosti tohoto vzorce stanovíme přímo jeho vyčíslením a srovnáním s přesným vztahem (2). Relativní chybu δ obsahují následující tabulka.

TAB. 1 RELATIVNÍ CHYBA δ % VZTAHU (4)

$\theta \cdot \psi$	10	20	30	40	50	60	70	80
1	0,16	0,33	0,52	0,75	1,07	1,56	2,50	5,36
2	0,35	0,68	1,06	1,54	2,19	3,21	5,21	11,7
3	0,56	1,06	1,64	2,37	3,37	4,96	8,17	19,2

Prakticky použitelný obor s relativní chybou do 2,5 % je vyznačen silně orámovanou částí tabulky. Následné omezení pro velikost měřeného poměrného prodloužení je podle (4) $\epsilon \leq 5\%$.

Pro správnost měření je velmi důležité přesné stanovení úhlu θ , t.j. úhel vzájemného natočení měrné a srovnávací mřížky. V praxi se tento úhel skládá ze složky nastavené úmyslně, která je s jistou přesností známa, a ze složek neznámých, jež jsou způsobeny skosem a případným deformačním natočením vyšetřované oblasti. Eliminaci těchto vlivů provedeme zjištěním skutečného úhlu θ opět pomocí pruhů moiré. Na obr. 2 je znázorněn průběh dvou pruhů moiré při nerovnoměrné deformaci měrné mřížky, kdy úhel natočení obou mřížek $\theta(x)$ je hledanou veličinou. Z obráz -

ku je zřejmé, že platí

$$\frac{p}{d} = \sin \theta_{(x)} \approx \theta_{(x)} [\text{rad}] \quad \theta_{(x)} \lesssim 5^\circ \quad (5)$$

kde d je vzdálenost pruhů moiré ve směru pruhu měrné mřížky. Nahradíme-li tuto vzdálenost přímo vzdáleností pruhů ve směru osy y označ. d_y , dopustíme se relativní chyby

$$\frac{d_y - d}{d} \leq \alpha \cdot \operatorname{tg} \vartheta, \quad [\alpha] = \text{rad}$$

kde α je úhel natočení vzorku vlivem skosu nebo deformačního natočení. Vzhledem ke dvěma parametrům je třeba posoudit použitelnost individuálně, ale pro většinu uvažovaných malých rovinných deformací, kdy $\vartheta \leq 45^\circ$, je relativní chyba menší, než neznámé natočení α , což např. umožňuje měřit skos $\rho \leq 2,5\%$ při stejně velké relativní chybě, jako při měření $\varepsilon \leq 5\%$. Proto je možné vztah (5) upravit na

$$\theta \approx \frac{p}{d_y}, \quad (6)$$

který dovoluje přímo stanovit lokální velikost úhlu $\theta_{(x,y)}$ ze vzdálenosti pruhů moiré ve směru kolmém k měření. Dosazením do (4) dostáváme výsledný vyhodnocovací vztah

$$\varepsilon_x = \frac{p}{d_y} \cdot \operatorname{tg} \left(\vartheta + \frac{p}{2d_y} \right). \quad (7)$$

EXPERIMENTY

Při použití metody moiré pro přímé měření povrchových deformací je třeba **vyřešit** následující zásadní problémy:

1. Získání originálu mřížky potřebné hustoty čar a žádaných rozměrů. Pro praktické účely klasické metody moiré (bez difrakce světla) jsou potřebné hustoty např.

$$\frac{1}{p} = 2, 5, 10, 25 \text{ a } 50 \text{ čar/mm.}$$

2. Příprava kontaktních kopií mřížky, které slouží jako pracovní mřížky pro vlastní kopírování mřížek měrných nebo jako mřížky srovnávací.
3. Propracování vhodného postupu na výrobu měrné mřížky na vyšetřovaném objektu.

4. Sestrojení optického systému zaručujícího superpozice věrných obrazů rastrů před a po deformaci.

Konkrétní splnění uvedených požadavků bylo pro účely měření poměrné deformace v podélném a příčném směru na vzorku z organického skla namáhaném jednoosým tahem provedeno následovně. Originál mřížky byl vyroben ve zvětšeném měřítku na automatickém kreslicím stole Coragraph s hustotou 2 č/mm, 500 x 500 mm. Takto zhotovená mřížka na matně průhledném materiálu Astralon byla v procházejícím světle fotograficky 5 x zmenšena, takže pracovní mřížky na plochem filmu ORWO FO 5 měly hustotu 10 č/mm a rozměr 100 x 100 mm.

Vzorek vyrobený z organického skla tloušťky $5 \pm 0,05$ mm měl podélný rozměr 270 mm a příčný 160 mm. Jednoosý tah byl vyvoláván deformačně, působící síla měřená dynamometrem s tenzometry byla na obou stranách roznesena systémem vahadel do 8 ekvidistantních působišť (obr. 3).

K vytvoření měrné mřížky bylo použito nové technologie. Jelikož t.zv. stripping film vhodný pro tento účel se u nás nevyrábí, byla s úspěchem použita fotoemulze nalitá přímo na povrch vzorku. Kopírování, vyvolávání a ustalování bylo pak shodné s prací s fotodeskami.

Při měření byly vyzkoušeny tři způsoby.

1) Přímé fotografování měrné mřížky bez mřížky srovnávací. Jako referenční mřížka sloužila nedeformovaná mřížka měrná, superpozice mřížek nastala přímo na fotodesce, jejímž natočením mezi expozicemi se volí i úhel θ . Podmínkou je dostatečná rozlišovací schopnost optické soustavy pro zobrazení jednotlivých proužků mřížky a dodržení přesně stejné vzdálenosti mřížky od této soustavy při obou expozicích, jelikož změna této vzdálenosti způsobí i změnu velikosti obrazu, což má za následek zkreslení poměrného prodloužení.

Pro použitou hustotu mřížky 10 č/mm vyhovoval velkoformátový deskový přístroj Mentor s objektivem Tessar $f = 250$ mm umístěným asi 30 cm od vzorku.

2) Fotografování superpozice mřížky měrné a srovnávací.

Tento nejčastěji používaný způsob se opírá o vytvoření super-

pozice měrné a srovnávací mřížky přímo v kontaktu na povrchu vzorku. Ve srovnání s předešlým způsobem odpadá požadavek velké rozlišovací schopnosti záznamové fotografie, jelikož pruhy moiré nevznikají dvojexpozicí. Další výhodou je možnost vizuálního pozorování živých proužků.

Navíc naopak vzniká požadavek dobrého kontaktu obou mřížek. Na rozdíl od obvykle užívaných způsobů uchycení pomocí přilnavosti mezivrstvy silikonového oleje nebo pomocí komplikovaných držáků byl úspěšně použit způsob schematicky znázorněný na obr. 4. Plochý film se srovnávací mřížkou byl opatřen tenkým drátkem ($\delta = 0,1$ mm) fixovaným ve vzdálenosti okolo 2 cm od obvodu bodově tenzometrickým tmelem. V libovolném místě této dráhy vyražený otvor průměru několika mm byl překryt přísavkou spojenou PVC hadičkou s vývěvou. Po zapnutí vývěvy a přiložení filmu s přísavkou drátkem směrem k plochému povrchu nastane v několika vteřinách dokonale přitisknutí celku k vzorku, jelikož odlehnutí filmu vlivem drátku způsobuje tunel pro odčerpání vzduchu z celé vnitřní mezivrstvy. Tento jednoduchý způsob lze použít i při kopírování mřížek větší hustoty na povrch vzorků, které nelze vložit do kopírovacího rámu.

3) Vytvoření obrazce moiré přímou kontaktní metodou.

Tento způsob vyvinutý autorem spočívá v utvoření kontaktní kopie měrné mřížky na plochý film natočený o úhel Θ před zatížením a provedení druhé expozice téže mřížky po zatížení při $\Theta = 0$. Kontakt a přichycení filmu byl proveden pomocí výše popsaného způsobu nebo pouhým přitlačením přes vrstvu molytanu. Po vyvolání je na plochem filmu přímý záznam superpozice obou mřížek s pruhy moiré bez jakéhokoli zkreslení v měřítku 1 : 1.

Po praktickém vyzkoušení všech tří způsobů byl pro vyhodnocení vybrán právě tento, jelikož poskytoval nejkvalitnější moiré obrazce a dokonale reprodukovatelné výsledky. Bylo provedeno měření podélné poměrné deformace ϵ_y , příčné poměrné deformace ϵ_x při třech hladinách zatížení $P = 1000, 2000, 3000$ N. Vyhodnocení získaných obrazců (obr. 5,6) bylo provedeno podle výše uvedeného postupu - vztah (7). Z ekvidistantního a přímého průběhu pruhů je zřejmé, že rovnoměrnost deformace je ve sledované oblas-

ti dobrá. Z naměřených hodnot je možné stanovit Poissonův poměr příčné kontrakce organického skla (jednoosý tah ve směru y).

$$\mu = - \frac{\epsilon_x}{\epsilon_y} .$$

Kontrola měření byla provedena pomocí čtyř tenzometrů M 120 umístěných v každém z obou směrů. Přehled výsledků ukazuje následující tabulka.

TAB. 2: VÝSLEDKY MĚŘENÍ

					Statistické zpracování
SÍLA		1000	2000	3000	1
MOIRÉ	$10^3 \cdot \epsilon_y$	580	1180	1760	0,59
	$10^3 \cdot \epsilon_x$	-230	-454	-672	-0,22
	μ	0,397	0,385	0,382	0,373
TENZOM.	$10^3 \cdot \epsilon_y$	470	1106	1753	0,64
	$10^3 \cdot \epsilon_x$	-203	-454	-705	-0,25
	μ	0,432	0,410	0,402	0,391

ZÁVĚR

Z tabulky 2 je zřejmé, že shoda výsledků získaných oběma metodami je dosti dobrá. Vzájemné rozdíly do 10 % jsou částečně způsobeny i nutností měření na opačných površích modelu.

Pokud se týká dalšího porovnání obou metod, dává metoda moiré při srovnatelné pracnosti přípravy měření a jeho vyhodnocení úplnější informaci o napěťovém poli na celé ploše pokryté mřížkou, což je v uvažovaném případě velmi důležité při kontrole rovnoměrnosti deformace. V tomto ohledu je charakter metody moiré bližší fotoelasticimetrii s hlavní odlišností v tom, že jsou zjišťovány deformace a nikoliv napětí, takže zjištění μ by pomocí fotoelasticimetrie nebylo možné.

Další výhodou metody moiré je možnost použití na různých konstrukčních materiálech. S ohledem na unikátní možnosti při studiu plasticity a deformací za vyšších teplot bude další usilí zaměřeno na technologii nanášení mřížek odolnějších vůči teplotě a mechanickému poškození, než je dosud užívaná fotografická emulze.

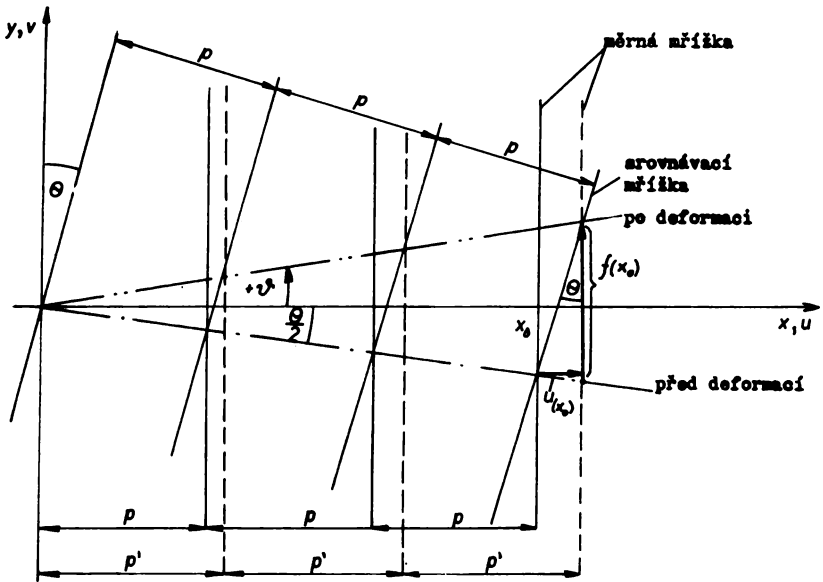
Zjednodušený postup vyhodnocení uvedený výše a vyjádřený vztahem (7) se osvědčil a lze jej doporučit pro vzájemné natočení měrné a srovnávací mřížky $\theta \leq 3^\circ$ při měření poměrných deformací $\epsilon \leq 5\%$ ($\rho \leq 2,5\%$), kdy systematická chyba je menší, než 2,5 %.

LITERATURA

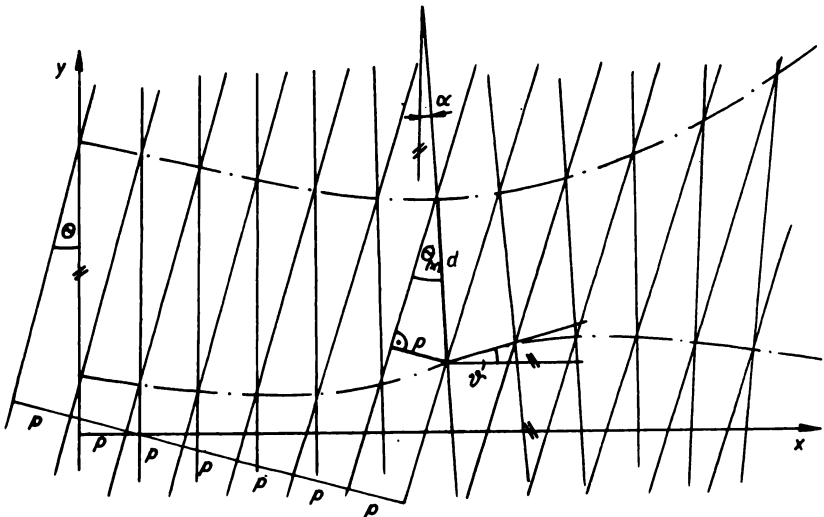
- [1] G.S. Holister : Experimental Stress Analysis. Principles and Methods
(Cambridge univ. Press 1967)
- [2] A.J. Durelli
V.J. Parks: Moire Analysis of Strain
(Prentice - Hall, Inc. 1970)

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Obr. 1 Posuv pruhů moiré při rovnoměrné deformaci
Obr. 2 Zjištění úhlu vzájemného natočení mřížek ze vzdálenosti pruhů moiré
- Příloha 2 Obr. 3 Vzorek se zatěžovacím zařízením
- Příloha 3 Obr. 4 Schematické znázornění použitého způsobu vytvoření kontaktu mřížky na filmu a vzorku
- Příloha 4 Obr. 5 Pruhy moiré při měření kontaktní metodou - měření ϵ_x , $P = 3000$ N
Obr. 6 Pruhy moiré při měření kontaktní metodou - měření ϵ_y , $P = 3000$ N.

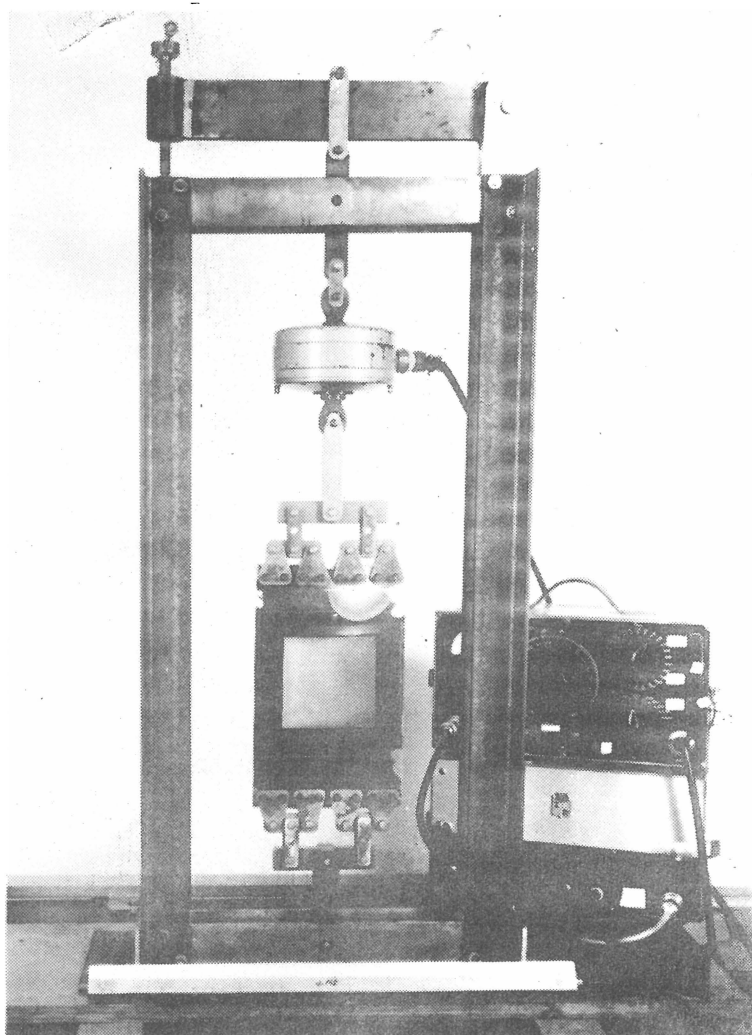


Obr. 1 Posuv pruhů moiré při rovnoměrné deformaci

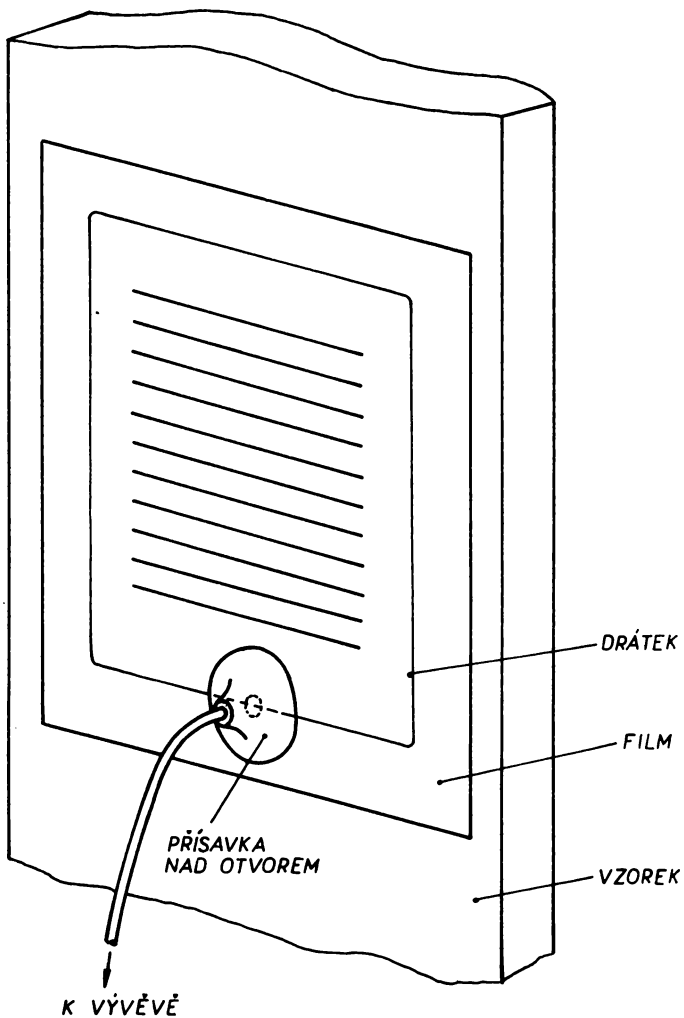


Obr. 2 Zjištění úhlu vzájemného natočení mřížek se vzdálenosti pruhů moiré

Příloha 2



Obr. 3 Vzorek se zatěžovacím zařízením

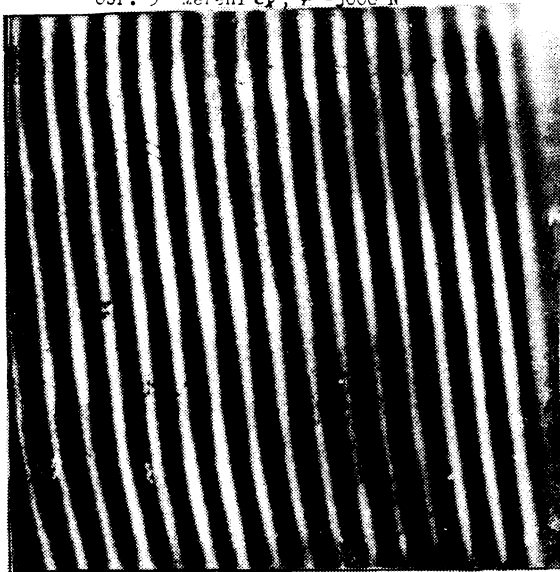


Obr. 4 Schematické znázornění použitého způsobu vytvoření kontaktu měřičky na filmu a vzorku

Pruhy moiré při měření kontaktní metodou



Obr. 5 Měření ϵ_x , $P=3000$ N



Obr. 6 Měření ϵ_y , $P=3000$ N