



Národní konference s mezinárodní účastí
INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2002

13. – 16. 5. 2002, Svratka, Česká republika

**EXPERIMENTAL MECHANICS OF SOLIDS – TODAY
AND FUTURE**

Miloš Vlk – Miroslav Hrabovský – Stanislav Holý¹

Motto: „Nothing is more expensive than unreliable and uncertain data“

Abstract: Having new, very powerful tool for stress analysis in form of modern simulation methods as FEM we are able to determine stress and strain state in the examined structures theoretically of any shape and under an arbitrary loading. In every schematization, joint with every transformation of the solved problem, there are hidden less or more latent possible variations from the reality and danger of getting defective results. Only experiment can approve reliability of the schematization.

Recent requirements for higher quality, warranted life, lower mass of the structure together with the economic approach need guaranteed solving process that can be assured only in cooperation of theoretical, numerical and experimental solution.

The presented paper deals, besides the above mentioned problems, with experimental methods. High attention is given to strain gauge methods and optical ones. In the conclusion authors voice their opinion about future existence of experimental methods, but orientated to analyzing stresses of technologic origine and based on optical methods and thermodynamic ones.

Keywords: experimental mechanics of solids, experimental stress analysis, strain gauges, optical methods of engineering analysis

1. Experimentální mechanika a úspěšnost výrobků

Zdařilé uplatnění výrobku na náročných světových trzích, kde většinou výrazně převyšuje nabídka nad poptávkou, je podmíněno – vedle jeho dostupnosti a ceny – jeho vysokou technickou úrovní a jakostí. Dosažení tohoto cíle nezbytně vyžaduje koordinované a systematické zajištění řady procesů a činností vedoucích k výrobkům s vysokou přidanou hodnotou a rovněž ovlivňujících jakost ve všech etapách životního cyklu výrobku (výzkum, vývoj, výroba, užívání, rekonstrukce, likvidace atp.). Z užitných vlastností, které projektant, konstruktér, výpočtář nejvýznamněji ovlivní svým konáním, to pak je hlavně spolehlivost (míněna v širším slova smyslu), zahrnující především bezporuchovost, bezpečnost a životnost. Podle úrovně svých znalostí,

¹ Doc.Ing. Miloš Vlk, CSc., VUT-FSI, Ústav mechaniky těles, Technická 2, 616 69 Brno, E-mail: vlk@umt.fme.vutbr.cz

Doc.RNDr. Miroslav Hrabovský, DrSc., Společná laboratoř optiky Palackého univerzity a AV ČR, tř. 17. listopadu 50, 772 07 Olomouc, E-mail: hrabovsky@sloup.upol.cz

Prof.Ing. Stanislav Holý, CSc., ČVUT-FS, Ústav mechaniky, Technická 4, 166 07 Praha, E-mail: holys@fsid.cvut.cz

schopností, možností a celé řady dalších faktorů ovlivňujících jejich činnost pak tito pracovníci „vdechnou“ výrobku jistou míru apriorní (inherentní) spolehlivosti. Zdařilost tohoto procesu je značnou měrou ovlivněna mírou a kvalitou uplatněných experimentálních prací v souvislosti s řešením problémů mechaniky těles při navrhování a posuzování daného výrobku.

Nežřídká je však možno se setkat s námitkami a pochybnostmi o užitečnosti a přínosnosti experimentu. Je nesporné, že náklady související s touto činností nejsou většinou zanedbatelné. Kvalitní lidská práce, investice (měřicí a pomocné přístroje, počítače, software aj.), spotřební materiál, režie (administrativa, budovy, energie aj.), odborná příprava pracovníků, zajišťování potřebných informací – to vše něco stojí. Připomeňme si ale v této souvislosti známou pravdu: „není nic dražšího než nespolehlivé a nepřesné údaje“. Co můžeme ale položit na stranu přínosů? Souhrnně je možno říci, že to jsou

- zvýšená jakost, promítající se ve vyšší bezporuchovosti, snížených nákladech na záruční opravy, běžné opravy a náhradní díly,
- delší doba života,
- zvýšená důvěra zákazníků (odběratelů),
- zvýšená přitažlivost výrobku.
- nižší hmotnost efektivněji navržené konstrukce,
- menší problémy s vyhověním požadavků legislativy (norem, předpisů aj.) na výrobek (viz zákoník Hamurabiho 18.stol. př. Kr.: zřítí-li se dům a usmrtí majitele, stavitel bude usmrčen),

Výše nákladů se objeví v ekonomické rozvaze – shora uvedené přínosy však nikoliv (nelze je – nebo snad velmi obtížně – vyjádřit v penězích); proto také nemusí být známé vyššímu managementu. To potom u něho leckdy vede k názoru, že experimentální oddělení jsou neproduktivním oddělením.

2. Hlavní úkoly experimentální mechaniky

V tomto příspěvku se zaměříme pouze na problematiku související s mechanikou těles, kde se jedná o následující okruhy problémů:

1. Získání vstupních dat pro výpočtové modelování.

Jedním ze základních podkladů pro dimenzování a posuzování je znalost provozních podmínek - především velikostí a časových průběhů zatížení působících na konstrukci v průběhu jejího provozu. Pomocí soudobé měřicí techniky lze příslušná vyšetřování uskutečňovat nejen u konstrukcí namáhaných staticky, ale i dynamicky s vysokými frekvencemi a získané hodnoty dále analyzovat. Zvláště významné to je u konstrukcí se stochastickým charakterem napětově deformační odezvy, kde s pomocí počítače, jako integrální součástí měřicího a vyhodnocovacího řetězce je tato analýza oproti nedávné minulosti již běžnou samozřejmostí. Komplexní vyšetřování na složité konstrukci v provozu však není ani jednoduchou ani lacinou záležitostí. Výsledky jsou však neocenitelné pro návrh dalších stejných nebo obdobných zařízení.

Další nenahraditelnou rolí experimentu je získávání potřebných materiálových dat. Je třeba si v této souvislosti uvědomit, že účinnost výpočtového modelování závisí na kvalitě vstupních dat. Metoda konečných prvků se svými možnostmi podrobnější a přesnější analýzy napětí a deformací, s možnostmi řešení komplexních a optimalizačních úloh tak zdůrazňuje význam experimentu. Kvalita experimentu se tak stává jedním z limitujících faktorů využití MKP.

V průběhu času je zde možno pozorovat jisté změny – zvětšuje se počet dat, požaduje se jejich vyšší přesnost.

2. Ověřování výsledků výpočtového modelování

Při návrhu nového typu (nebo i při významnějších úpravách stávajícího typu) konstrukce je též nutná vzájemná vazba mezi výpočtovým a experimentálním modelováním. Vhodnost konstrukce pro daný účel by sice též bylo možné ověřit až při zkouškách prototypu stroje; tento postup však není účelný zvláště u složitých, drahých a mnohdy unikátních zařízení nebo dokonce u zařízení, u nichž by případná porucha znamenala ohrožení zdraví nebo dokonce života lidí. Experimentálním modelováním pak je možno

- a) ověřit si výpočtovou teorii v její podstatě. Zde je třeba co nejpečlivěji skloubit předpoklady teorie, provedení modelu a jeho zatěžování tak, aby byl zajištěn předpokládaný charakter vazeb;
- b) ověřit si výstižnost výpočtového modelování pro dané technické provedení a zjistit odchylky mezi výpočtem a měřením vlivem skutečného provedení spojů, výztuh, prostorového účinku nevyjádřeného ve výpočtu, vliv výrobních nepřesností apod. Model nám umožňuje vzájemné porovnání různých konstrukčních variant řešení, úprav detailů, systémů spojování aj. Lze na něm určit celkový účinek zatížení, kdy neplatí spolehlivě princip superpozice. Experimentálním modelováním též lze získat představu o budoucím chování konstrukce za jinak nepřipustných - např. havarijních - stavů;

Experimentální vyšetřování na skutečné konstrukci se pak uskutečňuje pro ověření její spolehlivosti, pro určení lokálních namáhání, koncentrací napětí, vlastních frekvencí a tvarů kmitů, vlivu vůlí ve vazbách, vlivu způsobu obsluhy stroje, zatížení a chování stroje v provozních podmínkách. Obvykle se tak zjistí celkový účinek mnoha vlivů – např. včetně účinku montážních napětí, vlastní tíhy ap. – mnohdy s obtížnou nebo nepřesnou možností jejich separace.

Jednoznačně tak lze odmítnout představy, že vznik a dostatečný rozvoj metody konečných prvků vyřeší všechny problémy. Je třeba chápat výpočtové a experimentální modelování v jejich integrální jednotě.

3. Náhrada výpočtu

Získat podklady pro dimenzování a posuzování konstrukce, jejíž výpočtové modelování je neúměrně obtížné, zdlouhavé nebo vůbec nemožné. Význam modelové analýzy v tomto případě zužuje – s výjimkou problematiky únavové životnosti dílců a konstrukcí.

4. Monitorování a diagnostika

U náročných a důležitých konstrukcí by měl být požadavek jejich komplexního experimentálního vyšetření při uvádění do provozu naprostou samozřejmostí. Avšak i později – za provozu – podle povahy konstrukce, charakteru a velikosti namáhání v nebezpečných místech, je možno pomocí provozních analyzátorů sledovat toto namáhání nebo dokonce vzniklá poškození, signalizovat obsluze případná přetížení, registrovat je (pasivní systémy) a případně i zařízení samočinně odstavit z provozu (aktivní systémy). Cílevědomé monitorování konstrukce dovolí potom identifikaci jejího zatížení a dynamických vlastností. Výpočtový model konstrukce je tak integrován do procesu experimentu.

5. Získávání nových poznatků

Konečně metody experimentální mechaniky jsou též účinným prostředkem při poznávání probíhajících procesů, k získání poznatků a objevení nových zákonitostí,

kteřé pak mohou být účinně uplatněny při budoucím navrhování mechanických soustav. Chápat experimentální mechaniku jako pouhou ověřovatelku výsledků získaných jinými metodami nebo hospodárnější řešitelku jiných předepsaných úloh by byla tedy zúžená představa o její úloze.

Uvedené problémy se tedy objevují ve všech etapách života výrobku – v průběhu výzkumu, vývoje, výroby, montáže, dopravy, užití a případné rekonstrukce. Souvisejí tak s celou řadou dalších oborů – řízením jakosti, kontrolou výrobních procesů, zkoušením materiálu, analýzou poškození, expertními systémy aj.

3. Významnější metody experimentální mechaniky

Oblastí zájmu je zde především vyšetřování velikostí přetvoření, napětí, posunutí, parametrů pohybu a s tím souvisejícím silovým působením (síly, tlaky, krouticí momenty). Největšího uplatnění dosahují v současné době hlavně elektrické metody a rozmanité metody optické; těm je také v tomto příspěvku věnována největší pozornost. Zbývající metody budou charakterizovány pouze heslovitě.

3.1 Elektrické metody

3.1.1 Zhodnocení elektrických metod

Jejich přednosti jsou nesporné: je to vysoká přesnost, citlivost a rychlost měření i na vysokém počtu sledovaných míst, možnost výstupního signálu v analogové formě (ovládání dalších prvků) nebo v digitální formě (snadná registrace a další zpracování výsledků). To vše je ovšem spojeno s vyššími investičními a provozními náklady na měřicí soupravu a vyššími kvalifikačními požadavky na obsluhující personál.

3.1.2 Snímače

V současné době se můžeme setkat se snímači několika generací.

Snímače I. generace využívají základní fyzikální jevy a principy. Jejich vývoj je v podstatě ukončen. Výjimečně se setkáváme s novými technologiemi, konstrukcemi nebo dokonce novými fyzikálními jevy.

Za snímače II. generace jsou považovány polovodičové snímače; jejich nástup začal kolem roku 1950. Vyznačují se vyšší citlivostí, přesností a miniaturními rozměry. Seriově se vyrábějí integrované snímače tlaku, síly apod. Používají se CCD snímače obrazové informace pro viditelnou, infračervenou a ultrafialovou oblast. Vývoj této generace není ukončen.

Snímače III. generace jsou snímače světlovodné. Na rozdíl od předchozích dvou generací (kde se pracuje na výstupu s elektrickým signálem) je zde výstupním signálem světelný tok. Využití světlovodů k přenosu signálu sebou přináší některé výhody, jimiž jsou především možnost přenosu signálu na větší vzdálenost, velká šířka přenášeného pásma a odstranění problémů s rušením elektrickými a magnetickými poli. Snímače tohoto typu mohou mít výrazně vyšší citlivost a podstatně menší rozměry než snímače předchozích generací.

Zdaleka ne pouze ojediněle se dnes setkáme s inteligentními snímači (Smart Sensors) v nichž je vlastní čidlo snímače v jednom kompaktním celku s obvody pro zpracování, analýzu a unifikaci signálu. Polovodičovým inteligentním snímačem poslední generace je mikroelektronický snímač s integrací měřicího řetězce na jediném čipu.

Současné zavádění biologických principů do denní praxe, a to nejen v biomechanice, nás velice brzo postaví před používání biosenzorů, které jsou představovány kombinací biologických a fyzikálních elementů. To zřejmě povede k vytvoření snímačů IV. generace.

Největšího rozšíření doznaly snímače odporové; z nich potom – především pro účely experimentální analýzy napjatosti – odporové tenzometry kovové, zatímco tenzometry polovodičové našly svoje uplatnění především při konstrukci siloměrů. Výrobní programy světových výrobců kovových odporových tenzometrů nabízejí jejich široké spektrum splňující rozmanité požadavky uživatelů zaměřené na možnost měření:

- jak lokálních špiček napětí v místech jejich koncentrace tak příslušných gradientů napětí (tenzometrické řetězce), ale též měření průměrných hodnot napětí na nehomogenních materiálech. Tomu odpovídá rozpětí měrných délek tenzometrů od 0,5 mm do 150 mm;
- v jednom směru, ve dvou směrech (tenzometrické kříže) – při známých směrech hlavních napětí, ve třech směrech (tenzometrické růžice) – při neznámých směrech hlavních napětí, případně ve více směrech (v některých zvláštních případech – např. pro zpřesnění naměřených výsledků, při snaze o vystižení nehomogenní napjatosti na povrchu apod.), nebo konečně speciální snímače – např. pro měření membránových napětí na tělesech typu deska, pro možnost měření v silném magnetickém poli, pro měření zbytkových napětí odvrátací metodou nebo metodou sloupku, v siloměrech nebo snímačích krouticího momentu;
- různých velikostí délkových přetvoření a to jak při statických namáháních (běžně do 2 až $3 \cdot 10^{-2}$ m/m, speciální tenzometry do cca $10 \cdot 10^{-2}$ m/m) tak při cyklických namáháních, kdy dochází i u tenzometru k jeho únavovému poškození;
- při teplotách obvyklých, nízkých (-200°C) nebo vysokých – podle materiálu podložky tenzometru (nebo bez podložky – s volnou mřížkou) a technologie jeho aplikace (lepením, přivařením – do cca $250\text{--}300^{\circ}\text{C}$, s volnou mřížkou do cca 900°C). Obvyklé přivařovací tenzometry jsou použitelné do cca $250\text{--}300^{\circ}\text{C}$, speciální pak i do 650°C (ovšem za cenu podstatně vyšší). Problémy teplotní kompenzace (v jistém rozmezí teplot) odpadají při použití samokompenzovaných tenzometrů;
- i za působení radioaktivního záření (především toku neutronů).

Vzhledově jsou odporovým tenzometrům podobné snímače teplot, snímače pro sledování růstu únavového poškození (tzv. snímače únavové životnosti), snímače pro indikaci vzniku trhlin a snímače pro sledování růstu těchto trhlin.

Využití odporových kovových tenzometrů je jak v oblasti experimentální analýzy napětí, tak vy výrobě různých snímačů – sil, tlaků, krouticích momentů.

Polovodičové tenzometry mají sice až o dva řády vyšší citlivost, avšak především vzhledem ke svým specifikám (křehkost vlastního prvku, tepelná závislost, vyšší cena) jsou využívány prakticky pouze k výrobě snímačů.

Indukčnostní a kapacitní druhy snímačů se uplatňují především u průtahoměrů (pro měření malých deformačních posuvů), některých siloměrů a při měření posuvů a polohy.

Doménou piezoelektrických snímačů je především oblast měření zrychlení (kdy v důsledku jejich nízké hmotnosti dochází k minimálnímu ovlivnění vyšetřovaného

objektu) a u snímačů tlaku za extrémních podmínek (jako jsou ve válcích spalovacích motorů apod.).

3.1.3 Úprava a zpracování elektrického signálu

Nástup číslicové techniky do praxe též výrazně ovlivnil konstrukci aparatur pro úpravu a zpracování signálu. Se zvyšující se přesností a rychlostí A/D převodníků a jejich miniaturizací se posouvalo analogově-digitální rozhraní od výstupu měřicího zesilovače až těsně za vstupní zesilovač a číslicová technika pak postupně přebírala funkce realizované dříve analogovými obvody. Podmiňujícím momentem byla také miniaturizace výpočetní techniky do jednodeskových a později do jednočipových mikropočítačů, které je nyní možno namontovat do těsné blízkosti analogových obvodů se kterými spolupracují, řídí jejich funkci, nastavují a ukládají jejich parametry. Není potom problém uložit do paměti mikropočítače třeba stomístné ústředny odlišné konfigurace měřené cesty pro každé jednotlivé měřené místo. Rychlost mikropočítačů umožňuje uskutečnění většiny základních zpracování signálů v reálném čase. Tak je možno okamžitě po skončení měření posoudit výsledky a reagovat na případné nesrovnalosti.

Současné převodníky pokrývají díky svému vysokému rozlišení celý měřicí rozsah snímačů bez dříve nutného přepínání citlivosti vstupního zesilovače. Pokud je požadován výstup měřicího řetězce opět v analogové formě (což při číslicovém zpracování ztrácí na významu), jsou k dispozici stejně kvalitní D/A převodníky.

Firmy nabízející číslicovou měřicí techniku většinou také dodávají programové vybavení pro měření s těmito přístroji pomocí PC. To umožní přes určité rozhraní nastavit parametry měřicí ústředny, spustit měření a jeho výsledky většinou uložit na diskovou jednotku PC v dohodnutém formátu tak, aby bylo bezproblémové následné zpracování. Řada takových firemních programů obsahuje i knihovnu matematických a grafických prostředků pro zpracování a prezentaci výsledků.

Jiný přístup volila firma National Instruments, která vytváří pomocí programového prostředí LabView virtuální měřicí a vyhodnocovací řetězec spojováním vstupů a výstupů bloků představujících jednotlivé měřicí, výpočetní a prezentační moduly v grafické formě.

3.2 Optické metody v experimentální mechanice

Optické metody v experimentální mechanice jsou založeny na několika optických principech které jsou analogií zkoumaného jevu. Jsou to optická polarizace a dvojlom, optická difrakce a interference, superposice, holografie aj.

3.2.1 Stereometrické a stereofotogrammetrické

metody patří historicky k nejstarším, jsou založeny na principu stereoskopického vidění, respektive záznamu [13]. Užití je tradiční, zpravidla pro měření křivosti, deformace, napětí apod. Poměrně malá citlivost těchto metod ji předurčila k užití pro měření relativně makroskopická. Tyto metody, při užití moderních technických prvků a postupů při vyhodnocování, se mohou dočkat své uživatelské renesance, a to pravděpodobně i v netradičních oborech jejich užití.

3.2.2 Fotoelasticimetrie

je tradiční soubor metod založený na principu dvojlomu některých materiálů, který vzniká při jejich silovém namáhání [13], [14], [15], [16] aj. Velikost a projevy dvojlomu jsou pak mírou napětí v daném materiálu. Podle užití metody a také podle volby

použitého materiálu (často je užíváno modelových materiálů) rozeznáváme *fotoelasticimetrii transmisní a reflexní*, dále *fotoelasticimetrii teplotní* aj. Tato hojně užívaná, zejména jako modelová, metoda byla průběžně technicky zlepšována svými uživateli (hovoří se často o školách²) a následně především profesionálními výrobci těchto měřicích zařízení, takže lze, v současné době, hovořit o klasické metodě, technicky provozované na současné špičkové technické úrovni, a to pro 2D i 3D úlohy. Její výsledky udávají jak směry hlavních napětí tak i rozdíly hlavních napětí. Separací, spočívající ve využití lokálních hodnot isochromatického a izoklinného parametru v celé oblasti nebo alespoň podél dráhy mezi místem vyšetřované napjatosti a místem napjatosti známé, např. na volném okraji, je možno určit velikosti a směry hlavních napětí v daném místě. Dnes je reflexní fotoelasticimetrie používána převážně pro určení nebezpečných míst na konstrukci a směrů hlavních napětí. Vlastní určení přetvoření je pak pro řádově vyšší citlivost provedeno tenzometricky.

3.2.3 Optické metody superpozice a interferometrie

Klasická optika popisuje interferenční a difrakční jevy pomocí pojmů *ideálně koherentních* a *ideálně nekoherentních* světelných svazků, nověji potom pomocí pojmu *částečně koherentních* světelných svazků.

Mějme ideálně monochromatický bodový zdroj světla. Pak jakékoliv změny elektrického pole ve dvou bodech v prostoru jsou ve vzájemné korelaci. O takovémto světle pak říkáme, že je *koherentní*.

Reálné termální zdroje světla nejsou nikdy ideálně monochromatickými, protože amplituda i fáze elektrického pole ve kterémkoliv bodě zdroje vykazují rychlé chaotické fluktuace. Vlny pocházející z různých, dostatečně vzdálených, bodů takového zdroje světla jsou nekorelovány. Kontrast interferenčních proužků je závislý na koherenci záření.

Z obecného hlediska se *teorie koherence* zabývá statistickým popisem elektromagnetického pole. Popis a klasifikaci optických koherentních jevů lze provést buď z hlediska klasického – vlnového, nebo z hlediska kvantového. V prvním případě je teorie koherence založena na Maxwellově vlnové teorii a na matematické teorii stochastických funkcí, v druhém případě je teorie koherence formulovaná pomocí pojmů kvantové elektrodynamiky.

Superpozice ideálně koherentních nebo částečně koherentních světelných svazků dovoluje pozorovat, například na stínítku, interferenční obrazec, ve druhém případě však s kontrastem interferenčních proužků menším, než je kontrast interferenčních proužků vytvořených koherentními svazky. U interferenčního obrazu požadujeme zpravidla časovou stacionárnost a stejnou frekvenci interferujících svazků, což lze poměrně jednoduše zajistit požadavkem jednoho primárního koherentního zdroje záření. V případě užití nekoherentních světelných svazků je interferenční obraz nepozorovatelný, lze však pozorovat, a tedy i technicky využívat, jevy plynoucí ze superpozice těchto, většinou intenzitních, světelných polí.

Obecně, velkému množství optických interferenčních metod a jejich technických variant provedení, s důrazem na užití v mechanice, snad nejlépe vyhovuje dělení podle fyzikálního principu, které také poměrně dobře vystihuje i jejich historický vývoj. Období před objevením fenomenálního zdroje koherentního záření - laseru, tedy zdroje záření s do té doby nemyslitelnými parametry, byla charakterizována následujícími skupinami metod.

² V padesátých letech, například, škola okolo prof. M. Milbauera [14].

3.2.3.1 Klasické optické interferometry

(1) Optické interferometry dvousvazkové

Vlnová teorie popisuje světlo jako *elektromagnetické vlnění* šířící se prostorem (prostředím). Protože elektrické i magnetické pole lze popsat formálně stejně a šířící se společně, je zpravidla užíván popis stavu tohoto pole v každém bodě prostoru pouze pomocí elektrického pole. Toto pole lze popsat pomocí časově proměnného vektoru, který se šíří rovnoběžně se směrem šířené vlny. Jestliže vektor pole kmitá v jedné rovině, pak hovoříme o lineárně polarizované vlně v této rovině. Stav elektrického pole lze v každém bodě prostoru, ve vakuu a při jeho šíření ve směru osy z popsat skalární rovnicí

$$E(x, y, z, t) = a \cos \left[2\pi \left(\nu t - \frac{z}{\lambda} \right) \right], \quad (1)$$

kde a je *amplituda světelné vlny*, ν je její *frekvence* a λ je její *vlnová délka*³. Argument na pravé straně vztahu (1) je *fáze vlny*, která se šíří ve směru osy z a je proměnná v čase t . V daném čase je fáze konstantní a vlnoplocha se šíří ve směru osy z rychlostí světla ve vakuu $c = \lambda \nu$, respektive v izotropním prostředí o indexu lomu n rychlostí $\nu = c/n$, přičemž příslušná vlnová délka λ_n je dána vztahem $\lambda_n = \lambda / n$. Je-li d *geometrická dráha* světla v prostředí charakterizovaném indexem lomu n , pak tzv. *optická dráha* je $p = nd$.

Rovnici (1) lze zapsat také ve tvaru

$$E(x, y, z, t) = E(z, t) = a \cos(\omega t - kz), \quad (2a)$$

což je vyjádření pro rovinnou vlnu, šířící se daným prostředím ve směru osy z , kde $\omega = 2\pi\nu$ je *kruhová frekvence* a $k = 2\pi/\lambda$ je *konstanta šíření*.

Z řady praktických důvodů je vhodné vztah (1), respektive (2a) zapisovat v komplexním tvaru⁴

$$E(z, t) = \operatorname{Re}\{a \exp[i(\omega t - kz)]\} = \operatorname{Re}[a \exp(-ikz) \exp(i\omega t)] = \operatorname{Re}[a \exp(-i\varphi) \exp(i\omega t)] = \operatorname{Re}[A \exp(i\omega t)], \quad (2b)$$

kde $\varphi = 2\pi z / \lambda$ a $A = a \exp(-i\varphi)$ je tzv. *komplexní amplituda*.

Rovnice (2) je popisem rovinné vlny šířící se prostředím. Pro sférickou vlnu je užíváno vyjádření ve tvaru $E(r, t) = \frac{a}{r} \cos(\omega t - kr)$, přičemž r je poloměr kulové (sférické) vlnoplochy a při velmi velké vzdálenosti bodového zdroje světla lze sférickou vlnu aproximovat vlnou rovinnou.

Energie záření procházející jednotkou plochy, jejíž normála je shodná se směrem šíření optického svazku, za jednotku času, je úměrná střední hodnotě čtverce elektrického pole $\langle E^2 \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T E^2 dt = \frac{a^2}{2}$, přičemž podle konvence faktor $1/2$ je zanedbáván, takže *optická intenzita* je definovaná jako $I = a^2 = AA^* = |A|^2$, kde $A^* = a \exp(i\varphi)$ je *komplexní amplituda konjugovaná* ke komplexní amplitudě A .

Předpokládejme dvě vlny šířící se stejným směrem, jejichž polarizační roviny jsou shodné a frekvence obou záření jsou také shodné. Pak tyto vlny vzájemně interferují, přičemž komplexní amplitudu ve kterémkoliv bodě interferenčního obrazce

³ Ve viditelné oblasti světla jsou vlnové délky přibližně od 400 nm (modrá barva) do 750 nm (červená barva), čemuž odpovídají frekvence od $7,5 \cdot 10^{14}$ Hz do $4,0 \cdot 10^{14}$ Hz.

⁴ $\operatorname{Re}\{\dots\}$ značí reálnou část a $i = (-1)^{1/2}$.

je možné zapsat ve tvaru $A = A_1 + A_2$, kde $A_j = a_j \exp(-i\varphi_j)$, $j = 1, 2$. Intenzita v tomto bodě je pak dána výrazem

$$I = |A|^2 = (A_1 + A_2)(A_1^* + A_2^*) = |A_1|^2 + |A_2|^2 + A_1 A_2^* + A_1^* A_2 = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \cos \Delta\varphi, \quad (3)$$

kde I_1 a I_2 jsou intenzity jednotlivých vln a $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ je *fázový rozdíl* mezi nimi.

Jestliže obě vlny pocházejí od stejného zdroje záření (mají tedy „stejnou“, přesněji korelovanou, související fázi), pak v daném bodě pozorování je fázový rozdíl $\Delta\varphi$ ve vazbě s optickou drahou podle vztahu $\Delta p = \frac{\lambda}{2\pi} \Delta\varphi$, respektive v časovém

vyjádření podle vztahu $\tau = \frac{\Delta p}{c} = \frac{\lambda}{2\pi c} \Delta\varphi$ a tzv. *řád interference* $N = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} = \frac{\Delta p}{\lambda} = \nu\tau$.

Interferenční obrazec má v daném místě maximum intenzity o hodnotě $I_{\max} = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2}$, kde $\Delta\varphi = 2m\pi$ nebo $\Delta p = m\lambda$, přičemž m je celé číslo a minimum intenzity o hodnotě $I_{\min} = I_1 + I_2 - 2(I_1 I_2)^{1/2}$, kde $\Delta\varphi = (2m+1)\pi$ nebo $\Delta p = (2m+1)\frac{\lambda}{2}$.

Kontrast C interferenčního obrazce je definován pomocí vztahu

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2(I_1 I_2)^{1/2}}{I_1 + I_2}, \text{ kde } 0 \leq C \leq 1.$$

Dvousvazkové interferometry jsou zařízení využívající dva svazky záření šířící se k místu superpozice (interference) po různých optických drahách, přičemž jeden svazek je obvykle nazýván referenčním a druhý předmětovým. Rozdíl optických drah obou interferujících vlnoploch je $\Delta p = p_1 - p_2 = \sum n_1 d_1 - \sum n_2 d_2$, kde n_i je index lomu a d_i je geometrická dráha každého úseku obou svazků, $i = 1, 2$.

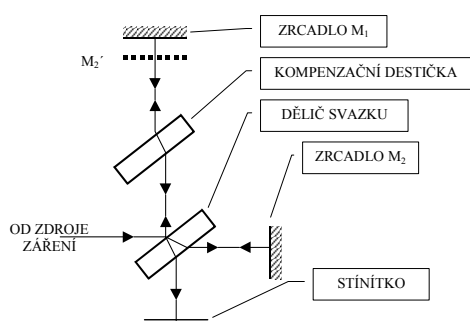
U interferenčního obrazu požadujeme zpravidla časovou stacionárnost a stejnou frekvenci interferujících svazků, což lze poměrně jednoduše zajistit požadavkem jednoho primárního koherentního zdroje záření. Rozeznáváme dvě základní metody získání dvou svazků z tohoto zdroje, a to *metodu dělení vlnoplochy* a *metodu dělení amplitudy*.

Na principu dělení vlnoplochy je založen, například, *Rayleighův interferometr* [17,18], kde jsou použity dva separované rovnoběžné kolimované svazky. Jeden svazek prochází zkoumanou látkou a druhý látkou referenční, přičemž geometrická dráha obou svazků je stejná. Zařízení, v tomto případě, slouží pro měření indexu lomu, například plynu. Řád interferenčních proužků odpovídá vztahu $N = (n - n_o) \frac{d}{\lambda}$, kde n je index lomu zkoumaného plynu, n_o je index lomu referenčního plynu, d je geometrická délka trubice (se zkoumanou i referenční látkou), které jsou identické.

Metoda dělení amplitudy využívá principy některých optických prvků, které mohou dělit primární svazek. Jsou to optické prvky založené na užití polopropustné odrazné tenké optické vrstvy, dále využívající difrakční průchozí nebo reflexní optickou mřížku, produkující jeden nebo více difragovaných svazků a polarizační hranol produkující dva ortogonálně polarizované svazky [17]. Na principu dělení amplitudy je založen, například, *Michelsonův (Twymanův–Greenův) interferometr*, *Machův–Zehnderův interferometr* (oba typy s velmi četnými aplikacemi ve strojírenství), *Newtonův*, *Fizeaův*, *Haidingerův*, *Sagnacův interferometr* aj.

Princip Michelsonova interferometru je na obr.1, kde svazek od zdroje je rozdělen na tenké polopropustné vrstvě nanesené na planparalelní destičce a stejná

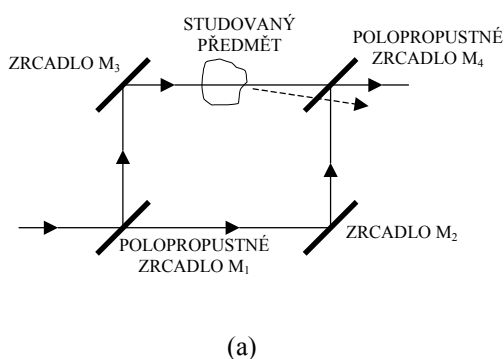
vrstva je využita ke sdružení svazků odražených od zrcadel M_1 a M_2 . Kompenzační destička je použita pro vyrovnání optických drah v obou ramenech interferometru. Jak je zřejmé z obr.1, odraz na dělicí vrstvě zobrazuje virtuální obraz M'_2 zrcadla M_2 . Můžeme tedy také interferující svazky interpretovat jako svazky pocházející od virtuálních zdrojů záření S_1 a S_2 , které jsou obrazy zdroje S na zrcadlech M_1 a M'_2 . Interferenční obraz vzniká na základě rozdílu optických drah v obou větvích interferometru, přičemž interferenční obraz je v praxi popisován, z hlediska technické konstrukce interferometru, respektive principu užitého zdroje, jako: (a) - interference při



užití bodového zdroje, (b) - interference při užití zdroje konečných rozměrů, (c) - interference při užití kolimovaného svazku – tzv. Twymanův–Greenův interferometr.

Michelsonův interferometr je jedním z nejčastěji užívaných interferometrů v praxi, například je užíván pro velmi přesné měření délek, testování optických prvků ve výrobě [18], [19], [20] apod.

Obr.1 Michelsonův interferometr



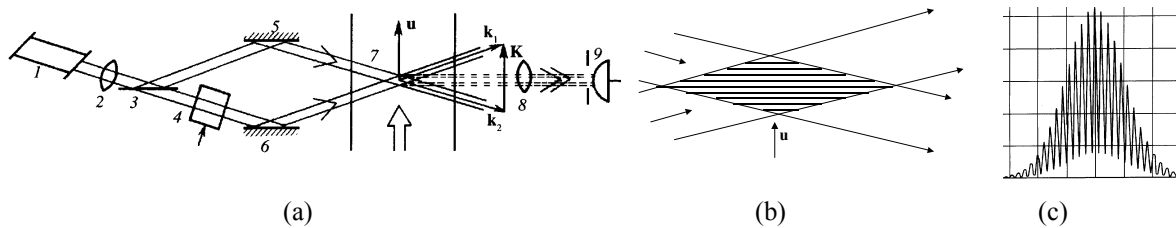
(a)

(b)

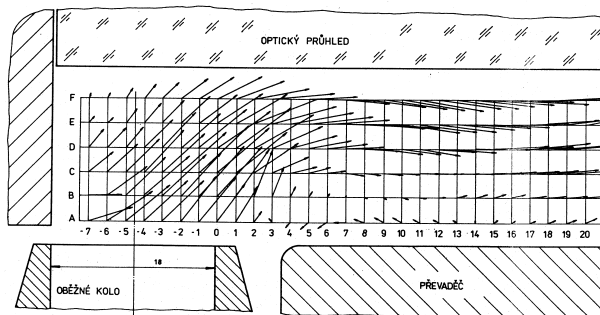
Obr.2 Machův–Zehnderův interferometr, (a) – princip, (b) – interferenční obraz prouděné

Princip Machova–Zehnderova interferometru je na obr.2a, přičemž jsou užívány dva svazky procházející různými optickými drahami. Interferometr je v praxi poměrně náročný na justáž a stabilitu, je však přesto velmi často užíván zejména ke studiu proudění, přestupu tepla, teplotních polí v různých opticky průhledných médiích (například voda, vzduch, plasma), pro měření rychlosti proudění, obr.2b, vibrací apod. [21], [22], [23], [24] aj.

Na principu dvousvazkového interferometru je také založena významná metoda nazývaná *laserová interferenční anemometrie* (známější pod názvem LDA), která umožňuje lokální stanovení rychlosti proudění. Metoda pracuje na principu průchodu mikroskopické částice, obsažené v proudícím médiu, definovaným interferenčním útvarem [23]. Princip metody je na obr.3, na obr.4 je příklad výsledku měření – rychlostní pole na výstupu z oběžného kola čerpadla radiálního typu.



Obr.1 Laserová interferenční anemometrie, (a) – schéma měření, (b) – měřicí sonda, (c) – řasový průběh signálu



Obr.2 Rychlostní pole na výstupu z oběžného kola čerpadla

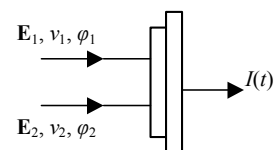
Od roku 1982 se objevují aplikace tzv. *interferometrie v bílém světle* [41], kde je využíváno, na rozdíl od klasické interferometrie, světlo s velkou spektrální šířkou a metodu je možné použít i na drsných površích.

(2) Heterodynní interference

V případě, že dva svazky se vzájemně liší svou frekvencí, pak ve kterémkoliv bodě P lze stav jejich elektrického pole zapsat vztahy $E_1(t) = a_1 \exp i(2\pi\nu_1 t + \varphi_1)$, respektive $E_2(t) = a_2 \exp i(2\pi\nu_2 t + \varphi_2)$, kde a_1 a a_2 jsou amplitudy, ν_1 a ν_2 jsou frekvence, φ_1 a φ_2 jsou fáze interferujících vln. Výsledná intenzita má pak tvar

$$I(t) = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \cos[2\pi(\nu_1 - \nu_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)], \quad (4)$$

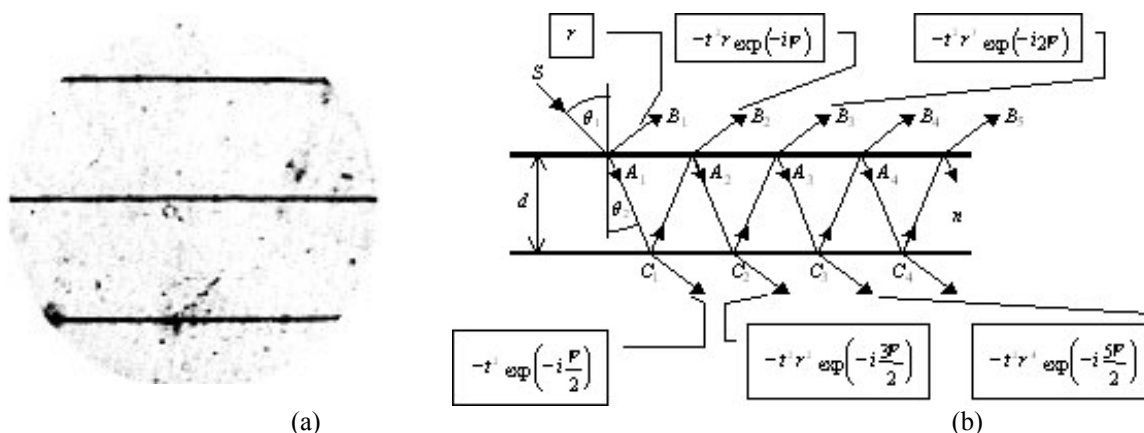
kde $I_1 = a_1^2$, $I_2 = a_2^2$, přičemž je zřejmý fázový rozdíl při známém rozdílu frekvencí interferujících svazků, respektive naopak. Vztah (4) odpovídá výstupu na fotodetektoru, obr.5, který však nedává přímou informaci o frekvencích ν_1 , ν_2 a $(\nu_1 - \nu_2)$.



Obr.3 Heterodynní detekce

(3) Optické interferometry mnohasvazkové

Předpokládáme tenkou planparalelní vrstvu o tloušťce d a indexu lomu n , na kterou dopadá rovinná vlna s jednotkovou amplitudou pod úhlem θ_1 . Vícenásobné odrazy na rozhraních a také průchody tenkou vrstvou způsobují rychlý pokles amplitudy vlny, obr.4. Fázový rozdíl mezi jednotlivými procházejícími, respektive odraženými vlnami je $\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{nd}{\cos \theta_2}$.



Obr.4 Mnohasvazková interference na planoparalelní vrstvě, (a) – princip, (b) – interferenční minima při vícenásobném odrazu na planoparalelní vrstvě

Intenzita interferenčních proužků na průchozí straně je

$$I_T(\varphi) = |A_T(\varphi)|^2 = \frac{T^2}{1 + R^2 - 2R \cos \varphi}, \quad (5a)$$

kde $R = r^2$, respektive $T = t^2$ jsou koeficienty odrazu, respektive průchodu intenzity. Intenzita interferenčních proužků na straně odrazu je

$$I_R(\varphi) = \frac{2R(1 - \cos \varphi)}{1 + R^2 - 2R \cos \varphi}. \quad (5b)$$

Interferenční proužky získané vícenásobným odrazem na tenké planoparalelní vrstvě jsou komplementární k proužkům vznikajících při průchodu touto vrstvou, tzn. jestliže $R \rightarrow 1$, pak získáváme velmi úzké proužky tmavé (minimum), obr.4b. Je tedy zřejmé, že mnohonásobnou interferencí na tenké vrstvě získáváme mnohem užší interferenční maxima oproti interferenci dvousvazkové, což je prakticky výhodné. Na principu mnohonásobné interference s částečně propustnými a vysoce odraznými povrchy je sestaven *Fabryův-Perotův interferometr*, který je velmi často využíván, například, v laserové technice, ve spektrometrii aj.

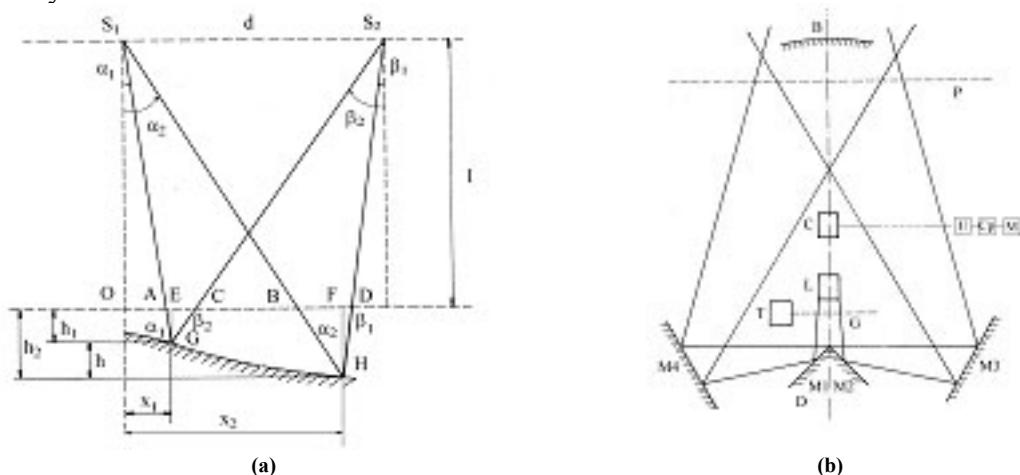
3.2.3.2 Moiré

Z optického hlediska jde o popis interferenčního útvaru, který vzniká superpozicí dvou nebo více geometrických útvarů, nejčastěji mřížek. Moiré proužky vznikají obecně prostým přeložením dvou nebo více mřížek (rastrů) - referenční a předmětové. Mřížky jsou zpravidla jednoduchého tvaru - čárové, radiální nebo zonální. Vzájemným natočením mřížek mohou vzniknout moiré proužky dvojího typu. První typ jsou tzv. *moiré proužky rozdílové* (subtraktivní), druhý typ jsou tzv. *moiré proužky součtové* (aditivní).

Stínová metoda moiré, například, topografie je realizována projekcí čar referenčního rastru na povrch předmětu jehož topografii zkoumáme. Vzniklý rastr je nazýván předmětový. Superpozicí obou mřížek vzniká pole moiré proužků, které popisují topografii zkoumaného tvaru. V podstatě rozeznáváme dvě základní metody, a to *stínovou metodu moiré s kolimovaným osvětlením a pozorováním* a *stínovou metodu moiré s "bodovým" osvětlením i pozorováním* (zdroj osvětlení i místo pozorování jsou v konečné vzdálenosti od zkoumaného povrchu). Optické uspořádání stínové metody, v druhém případě, je na obr.5a, princip technické realizace je na obr.5b. Z uvedeného je zřejmé, že výsledkem měření jsou vrstevnice na zkoumaném povrchu předmětu vzhledem ke zvolené definované (pomyslné) referenční rovině (na obr.5a rovina OD).

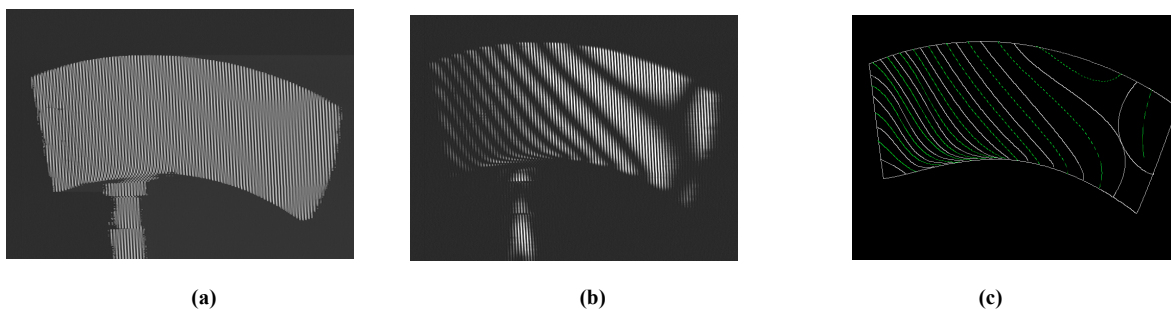
Relativně malá reálná citlivost (rozlišení) těchto metod poněkud tyto metody omezovala v užití v případech, kde rozlišení je požadováno v řádech desetin milimetrů, respektive i více. Příkladem takového požadavku je kontrola tvaru lopatky oběžného kola diagonálního čerpadla. Tento problém lze úspěšně řešit modifikací užití metody moiré topografie, tj. zavedením tzv. *přídavné fáze* do procesu zobrazení moiré [25], čím relativně zvýšit počet moiré proužků a metodu tak učinit citlivější. Současné možnosti technického využití CCD prvků, výpočetní techniky (způsob zpracování dat) apod., pak ukazují nečekané možnosti ve využití metod moiré, lze hovořit o významné renesanci této klasické optické metody. Tento postup je možné principiálně zobecnit nejen na všechny metody moiré, ale analogicky i na jiné interferenční metody.

Metody moiré a stínová metoda moiré jako topografická metoda zvláště, nabývá na významu při možnosti vhodného zpracování moiré obrazu, který v "klasickém" provedení úlohy je, mimo jiné, charakterizován velmi malým kontrastem a vysokým obrazovým šumem, obr.6a. Tato charakteristika obrazu, vedle poměrně malé reálné citlivosti, byla také zřejmě po celá desetiletí příčinou dílčího omezení v uplatnění této metody.

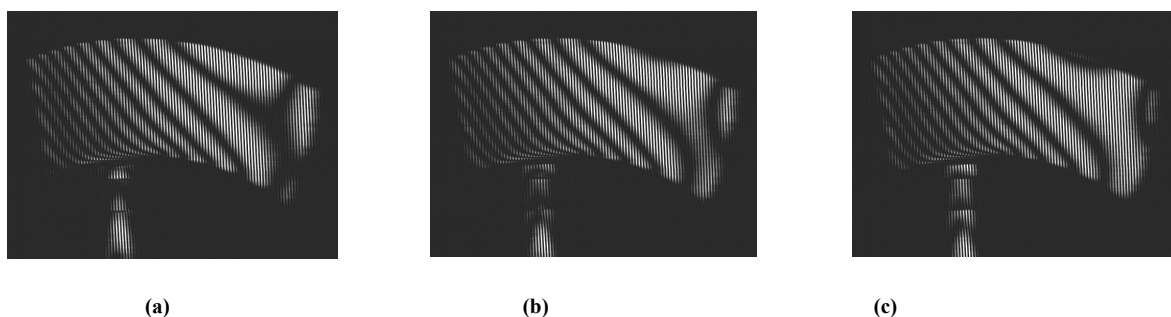


Obr. 5 Stínová moiré topografie; (a) - princip metody se dvěma zdroji osvětlení v konečné vzdálenosti od zkoumaného povrch; OD - referenční rovina, S_1, S_2 - zdroje osvětlení, GH - zkoumaný povrch; (b) - schéma technické realizace metody; L - diaprojektor s moiré mřížkou, M - zrcadla, C - kamera, B - zkoumaný povrch.

První nedostatek je možné odstranit několika způsoby. Klasickým postupem je prostá digitalizace obrazu snímaného TV kamerou a následná numerická počítačová analýza obrazu, včetně kvantitativního vyhodnocení. Toto řešení má však svá omezení v nutnosti komunikace s analyzátozem obrazu a jeho možnostmi. Jiný přístup spočívá v tom, že snímáný obraz TV nebo CCD kamerou je analogo-digitální cestou amplitudově, respektive frekvenčně filtrován, eventuálně obraz před filtrací je ještě amplitudově upraven. Tímto postupem je možné výrazně zvýšit kontrast moiré proužků a "odstranit" původní mřížkový rastr (proužkové pozadí). Jde v podstatě o elektronické jednoúčelové zařízení umožňující převedení obrazového signálu na signál černá-bílá na obrazovce monitoru. Tento postup lze také realizovat, v současné době, numericky s tím, že jsou využity další vlastnosti optického obrazu a jeho šíření - popis šíření optických vln soustavou, což je zřejmě perspektivní postup, obr.6b, c.



Obr. 6 Obraz moiré topografie lopatky čerpadla, (a) - bez zpracování, (b) – zvýšení kontrastu moiré proužků, (c) – polohy maxim a minim moiré proužků po zpracování



Obr. 7 Vliv přidavné fáze na obraz moiré lopatky čerpadla, (a) bez přidavné fáze - odpovídá obr. 6b, (c) - vliv různé přidavné fáze

Případné zlepšení citlivosti je, jak již bylo uvedeno, možné provést zavedení tzv. přidavné fáze obrazu. To je realizováno tak, že daný (nasnímaný) obraz - obr.7a (stejný jako na obr.6b) - je nasnímán ještě jednou, avšak v experimentální sestavě (obr.5b) je do jedné větve zavedena definovaná přidavná fáze, což se v obraze projeví posunem interferenčních maxim a minim, obr.7b. Tento postup lze opakovat ve více krocích, přičemž je měněna pouze velikost zavedené přidavné fáze, obr.7c. Tímto postupem lze vhodně docílit toho, že relativně velké vzdálenosti mezi moiré maximy, respektive minimy, "vyplníme". Zavedená přidavná fáze je pak při vyhodnocování příslušného moiré obrazu zohledněna, přičemž je docíleno žádoucího topografického pokrytí povrchu zkoumaného povrchu vrstevnicemi.

3.2.3.3 Holografická interferometrie

Mnohé známé způsoby dělení *holografie* a *holografické interferometrie* vesměs vycházejí ze dvou základních postupů užití této metody, [26], [27], [28], [29]. Jsou to *metoda v reálném čase* a *metoda dvojexpozice*. Na jejich principu jsou založeny další, již speciálněji užitečné základní metody, *metoda time-average*, *metoda stroboskopická*, *metoda hyperbolická* aj. Holografie, tato bezesporu revoluční metoda vyvolala velká očekávání a mnohá byla také realizována. V kombinaci s klasickými interferenčními metodami (například využitím holografických postupů při aplikaci Machova-Zehnderova interferometru), nové holografické metodické přístupy a nové metody přinesly bezesporu nebývalé zjednodušení vlastní experimentální práce a pokroky při uplatnění v mechanice, avšak dnes lze již tvrdit, že klasická holografická interferometrie spadá ještě do oboru klasických interferenčních metod, vyžadujících převážně dobré laboratorní zázemí a také vysoce kvalifikovanou obsluhu. Naopak, některé klasické metody, dříve jen obtížně aplikovatelné, jsou díky užití moderních optických a optoelektronických prvků (vláknová optika, nelineární optika, CCD, optické korelátoři aj.), výpočetní techniky, numerických a zejména statistických metod, nově a

neočekávaně aplikovány v nejrůznějších oborech, a to běžným uživatelským způsobem, technicky dostupným široké technické veřejnosti.

Holografická interferometrie, nebo též *diferenční holografická interferometrie*, je založena na možnosti interference rekonstruované vlny s jinou koherentní vlnou. Jestliže se tyto dvě vlny vzájemně příliš neliší, lze z makroskopicky viditelného interferenčního obrazce stanovit vzájemnou diferenci obou vln, přičemž je lhostejné, zda vlny charakterizují dva různé předměty nebo jeden předmět ve dvou polohách, předmět absorpční, či fázový. Podle povahy interferujících vln rozeznáváme dvě základní metody.

Metoda jednoho hologramu (*metoda v reálném čase*) je realizovaná tak, že nejprve je proveden záznam hologramu předmětu. Fotografická deska (hologram) po vyvolání je umístěna přesně do původní polohy, při zachování celé experimentální sestavy. Po osvětlení hologramu původní referenční vlnou, která je nyní rekonstrukční vlnou, dostáváme rekonstruovaný obraz předmětu v původní velikosti a poloze. Komplexní amplituda rekonstruované vlny primárního obrazu je $a_p = A_0^2 a_1$, kde, bez újmy na obecnosti, není uvažován vliv záznamového prostředí. Při této rekonstrukci je současně osvětlen i předmět, takže vlna rekonstruovaná i vlna předmětová mohou interferovat. Je-li komplexní amplituda změněné předmětové vlny $a_1' = A_1' \exp(i\phi_1')$, pak intenzita výsledného interferenčního pole tohoto obrazu je ve tvaru

$$I_I = (a_p + a_1')(a_p + a_1')^* = \overline{I_I} + 2A_0^2 A_1 A_1' \cos(\phi_1 - \phi_1'), \quad (6)$$

kde $\overline{I_I}$ je konstanta, přičemž intenzita interferenčního obrazu je modulovaná kosinovou funkcí.

Metoda dvou hologramů (*metoda dvojexpozice*) je zase realizována tak, že zpravidla na tentýž hologram jsou nezávisle zaznamenány dva stavy předmětu – dva hologramy. Předpokládáme-li, že komplexní amplituda rekonstruované vlny odpovídající první poloze předmětu je a , komplexní amplituda rekonstruované vlny druhého stavu předmětu je a' , pak intenzita výsledného interferenčního rekonstruovaného pole je

$$I = (a + a')(a + a')^*, \quad (7a)$$

kde předpokládáme $a_R' = a_R$. Ve zvláštním případě, kdy je referenční vlna použita s výhodou také jako rekonstrukční, je intenzita primárního obrazu, který je v poloze původního předmětu, stejné velikosti, tvaru a bez optických aberací, vyjádřena vztahem

$$I_I = \overline{I_I} + 2A_0^4 A_1 A_1' \cos(\phi_1 - \phi_1'), \quad (7b)$$

kde $\overline{I_I}$ je konstanta, přičemž je opět zřejmé, že průběh intenzity je modulován kosinovou funkcí.

V obou případech dostáváme výsledné interferenční pole ve formě tmavých a světlých proužků na nenulovém pozadí, přičemž kontrast těchto proužků je obecně větší v případě užití metody dvou hologramů než v případě užití metody jednoho hologramu.

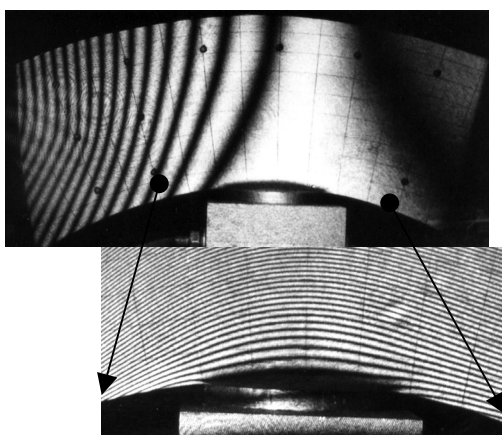
Kvantitativní vyhodnocení holografických interferogramů se v podstatě soustřeďuje na stanovení difference optické dráhy charakterizující zkoumaný děj. V případě předmětů s difusně odraznými povrchy změna optické dráhy charakterizuje změnu polohy bodu povrchu zkoumaného předmětu, v případě fázových předmětů je zase určována změna indexu lomu, který je mírou zkoumané veličiny. Tedy, změnu polohy předmětu, například před a po deformaci, charakterizuje změna fáze

$\Delta\phi = (\phi_1 - \phi_1') = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L$, kde ΔL je dráhový rozdíl optické dráhy. Odpovídá-li tato změna

fáze sudému násobku π , pak v bodě P obrazu předmětu je maximum intenzity a rovná-li se změna fáze lichému násobku π , je v bodě P obrazu předmětu minimum intenzity. V případě předmětů s difusně odrazným povrchem je zpravidla, pro vyhodnocení interferogramu, užívána metoda podle A. E. Ennose, respektive podle E. B. Aleksandrova a A. M. Bonč-Brueviče, [26]. Experimentální *analýza stavu deformace* na povrchu předmětu je žádanou aplikací v oboru pružnosti a pevnosti tuhých a poddajných těles. Kvantitativní vyhodnocení interferogramů obecně, a také holografických interferogramů, se zpravidla omezuje na stanovení vektoru posuvu $\Delta\mathbf{r}$, nebo velikosti jeho složek. Znalost vektoru posuvu (*vektoru přemístění*) $\Delta\mathbf{r}$ však, v obecném případě, neřeší otázku kvality tohoto přemístění. Obecně je nutné počítat s následujícími komponentami vektoru přemístění:

- ✓ translace předmětu jako tuhého tělesa,
- ✓ rotace předmětu jako tuhého tělesa,
- ✓ vlastní deformace předmětu vlivem silového působení (oblast pružnosti).

Na obr.8 je ilustrativní ukázka interferogramu deformované lopatky silou působící v normále k povrch lopatky v jediném bodě (v levém krajním horním bodě proudnice). V detailu je pak ukázka interferogramu skutečné modelové deformace lopatky ve studované oblasti okolo vetknutí listu lopatky.



Obr.8 Interferogram deformace lopatky oběžného kola regulačního diagonálního čerpadla BQDV

Ze znalosti vektoru přemístění nelze vždy, v obecném případě, jednoznačně rozlišit jednotlivé komponenty. Experimentální stanovení složek tenzoru deformace, v obecném případě, navrhli W. Schumann a M. Dubas [30], [31], [32], [33], kteří využívají možnost experimentálního stanovení *lokalizace interferenčních proužků*, což je však experimentálně poměrně náročné. Pro praktické využití je vhodné tenzor malé deformace elementu povrchu $\nabla_n \Delta\mathbf{r}$ vyjádřit ve složkách

$$g_x \varepsilon_x + g_y \left(\frac{1}{2} \gamma_{xy} + \Omega \right) + g_z \omega_x = -\frac{1}{L_v} (\mathbf{NV} \Delta\mathbf{r})_x + \frac{1}{L_u} (\mathbf{NU} \Delta\mathbf{r})_x, \quad (8a)$$

$$g_x \left(\frac{1}{2} \gamma_{xy} - \Omega \right) + g_y \varepsilon_y + g_z \omega_y = -\frac{1}{L_v} (\mathbf{NV} \Delta\mathbf{r})_y + \frac{1}{L_u} (\mathbf{NU} \Delta\mathbf{r})_y, \quad (8b)$$

kde g_x, g_y, g_z jsou složky vektoru citlivosti $\mathbf{g} = \mathbf{v} - \mathbf{u}$, $\mathbf{v}$ je jednotkový vektor směru pozorování a $\mathbf{u}$ je jednotkový vektor směru osvětlení, ε_x , respektive ε_y , jsou poměrná prodloužení ve směru osy x , respektive ve směru osy y , γ_{xy} je úhel smyku, ω_x , respektive

ω_x , jsou složky vektoru rotace $\boldsymbol{\omega}$ ve směru osy x , respektive ve směru osy y , a Ω je úhel natočení elementu povrchu, přičemž lokální souřadnicový systém (x,y,z) s počátkem v bodě P povrchu předmětu je orientován tak, že osy x, y jsou v tečné rovině v bodě P povrchu předmětu⁵. Dále, L_v je vzdálenost interferenčních proužků od bodu povrchu předmětu (za podmínky úplné lokalizace) ve směru vektoru $\mathbf{v}$, L_u je vzdálenost zdroje osvětlení a bodu P , tenzory $\mathbf{U}$, $\mathbf{V}$ jsou vyjádřeny vztahy $\mathbf{U} = \mathbf{I} - \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}$, $\mathbf{V} = \mathbf{I} - \mathbf{v} \otimes \mathbf{v}$. Tenzory $\mathbf{U}$, respektive $\mathbf{V}$ představují tedy operaci průmětu do roviny kolmé k příslušnému vektoru $\mathbf{u}$, respektive $\mathbf{v}$.

V případě vyšetřování předmětů fázových jde zpravidla o analýzu sledovaných veličin, které jsou ve funkční závislosti s indexem lomu fázového předmětu (teplotní pole, pole hustoty apod.).

3.2.3.4 Koherenční zrnitost (spekl)

Pozdější rozvoj holografických metod, zejména uplatnění metody tzv. *spekle holografie* (a jejich variant), však již pomyslnou bariéru pouhé laboratorní metody překračují, nikoliv však pro svůj princip, ale především pro možnost uplatnění moderních technických prvků současné doby.

Někdy jsou však metody spekle holografie, pro jejich princip popisu, nověji zařazovány do skupiny nazývané souhrnně *koherenční interferometrické metody*, také *metody koherenční zrnitosti*, respektive *spekl metody*.

Tyto metody využívají statistické vlastnosti optických polí koherenční zrnitosti (speklu) a jsou zřejmě představitelé nového směru i v oboru aplikací v mechanice.

Základní dělení:

- **spekle interferometrie (spekle fotografie)**; metoda pracuje na principu interferometrie koherenčních (speklových) polí, přičemž výstupem je zpravidla systém interferenčních proužků se zřejmou speklovou strukturou
- **statistická korelační spekl metoda**; výstupem metody již není charakteristický interferenční obraz, metoda zpravidla pracuje se soubory dvou nebo více polí koherenční zrnitosti, které jsou statisticky vyhodnocovány.

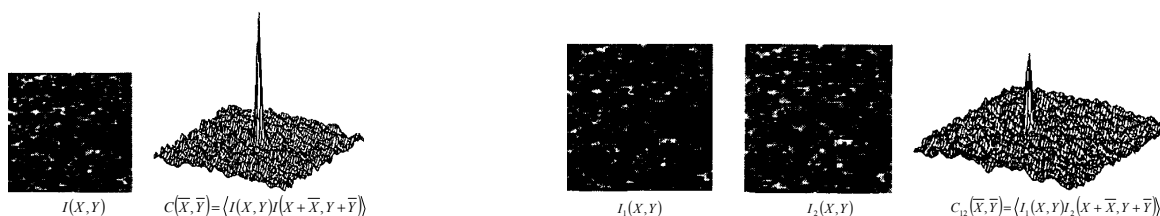
Statistickým popisem šíření a stavu světelného pole se zabývá statistická optika. Matematický aparát statistické optiky umožňuje nové pohledy na problematiku optické interference a difrakce světelných vln. Technické pokroky v oblasti světelných zdrojů, detektorů a výpočetní techniky dále umožňují i nové pohledy na aplikace, zejména v tradičních technických oborech. Lze hovořit o renesanci klasických optických měřicích metod co do jejich technické realizace a zejména užití, a to kvalitativně a kvantitativně.

Koherenční zrnitost je jev vznikající při odrazu koherentního světla od drsného rozhraní nebo při jeho průchodu takovým rozhraním. Podstatou tohoto jevu je interference světelných vln pocházejících od velkého množství mikroskopických plošek uvažovaných na povrchu předmětu při odrazu nebo vznikajících rozptylem na náhodně rozložených rozptylujících částicích při průchodu. Jev koherenční zrnitosti také vzniká při průchodu koherentního světla prostředím s náhodnými fluktuacemi indexu lomu. Vzhled a velikost koherenční zrnitosti závisí zejména na stupni koherence dopadajícího světla, na jeho polarizaci a na vlastnostech rozptylujícího prostředí. Koherenční zrnitost lze využít při experimentálním studiu řady fyzikálních a technických jevů, mimo jiné

⁵ Částečné experimentální zjednodušení pro stanovení veličiny L_v je uvedeno v [33].

také v mechanice kontinua pro měření komponent tenzoru deformace, respektive veličin z nich odvozených.

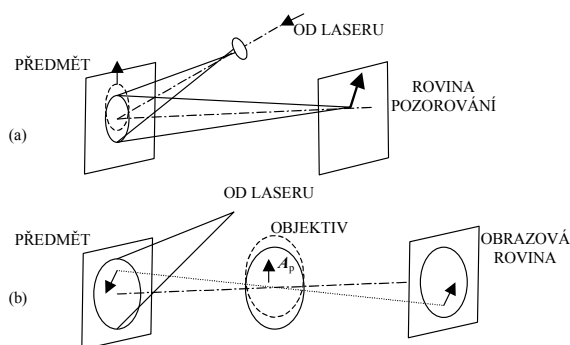
Posunutí pole koherenční zrnitosti je kvantitativně popsáno pomocí změny polohy maxima statistické funkce vzájemné korelace mezi fluktuacemi intenzit polí koherenční zrnitosti od předmětu před a po jeho deformaci, respektive posunutí [34].



Obr.9 Fotografie pole koherenční zrnitosti a autokorelační funkce

Obr.10 Fotografie polí koherenční zrnitosti před a po deformaci, respektive posunutí předmětu a vypočítaná funkce vzájemné korelace

Na obr.9 je fotografie typického příkladu pole koherenční zrnitosti a vypočítaná dvojdimensionální autokorelační funkce intenzity tohoto pole, přičemž je zřejmé, že poloha maxima této funkce je vždy v nule. Na obr.10 jsou fotografie polí koherenční zrnitosti dvou poloh předmětu, například, před a po deformaci, a tomu odpovídající funkce vzájemné korelace. Poloha maxima funkce vzájemné korelace je, při nenulové změně polohy předmětu, vždy v nenulové poloze a toto posunutí je mírou zkoumaného přemístění předmětu⁶. Současně se snižuje hodnota maxima funkce vzájemné korelace, což je dáno vlivem vzájemného posuvu polí a dílčí změnou struktury koherenční zrnitosti, stav označujeme za *dekorelaci*. Na obr.11 jsou uvedeny dvě principiální možnosti experimentálního uspořádání pro studium dekorelace polí koherenční zrnitosti, a to v opticky volném prostoru (obr.11a) nebo v obrazovém poli (obr.11b).



Obr.11 Principiální uspořádání pro studium dekorelace polí koherenční zrnitosti; (a) – v opticky volném prostoru, (b) – v obrazovém poli

Detekované pole koherenční zrnitosti, respektive jeho změny jsou mírou přemístění předmětu. Metody detekce jsou klasicky dvojí, fotografické a optoelektronické (fotodetektory).

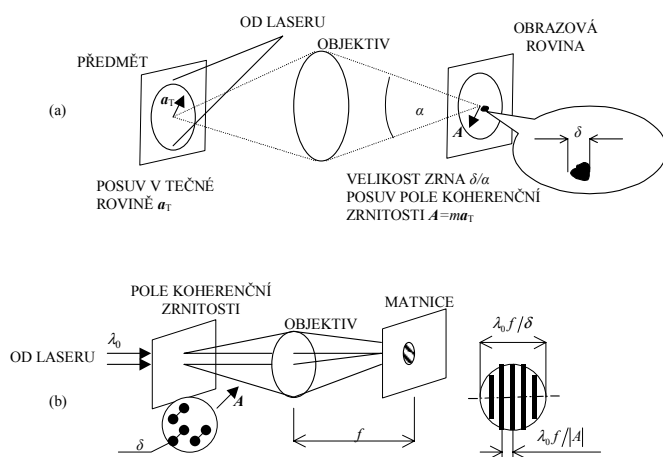
První metodou je tzv. *interferometrie na bázi koherenční zrnitosti* (nazývaná též *spekl fotografie*), obr.12, kde dvouexpoziční fotografický záznam polí koherenční zrnitosti od předmětu před a po přemístění je hodnocen pomocí optické Fourierovy transformace [35], [36], [37], [38]. Youngovy proužky ve Fourierově rovině jsou mírou

⁶ Lze také (jinak) říci, že funkce vzájemné korelace má, při nulovém přemístění (posuvu, deformaci, rotaci, ...), polohu svého maxima v nulovém bodě.

směru a velikosti posuvu pole koherenční zrnitosti. Princip záznamu a rekonstrukce je na obr.12a,b.

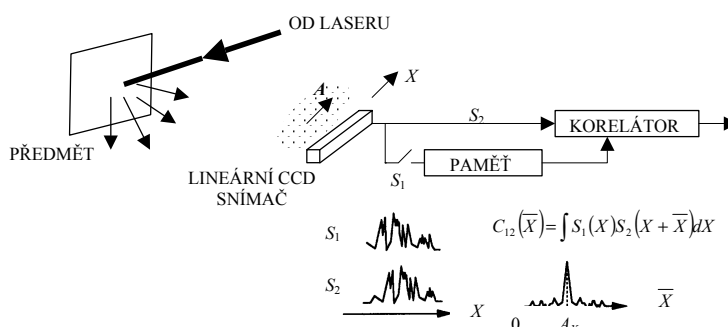
Z optoelektronických metod je to tzv. *korelační metoda*, kde pole koherenční zrnitosti předmětu před a po přemístění jsou detekovány pomocí lineárních nebo maticových detektorů (nejčastěji CCD detektory), jejichž výstupní signály jsou vzájemně korelovány, a to pomocí video-paměti a počítače nebo pomocí hardwarových korelátorů [39], [40]. Příklad principu užití jednodimensionálního korelátoru je na obr.13. Toto schéma je použitelné pro měření posunutí, rotací a složek napětí reálných předmětů (těles)⁷. Výhodou tohoto uspořádání je velmi jednoduchá experimentální sestava a možnost oddělení jednotlivých složek tensoru deformace, například posunutí a napětí apod.

Druhá optoelektronická metoda, často užívaná pro měření rychlosti, je tzv. *metoda prostorové filtrace*, kdy pole koherenční zrnitosti je detekováno tzv. diferenčním detektorem (speciální konstrukce dle principu na obr.14). Jak se pohybuje pole koherenční zrnitosti, tak detektor detekuje signál v závislosti na čase a s periodickým zpožděním, daným konstrukcí detektoru. Výstupní signál je analyzován frekvenčně a poloha frekvenčního maxima je úměrná rychlosti pohybu pole koherenční zrnitosti.

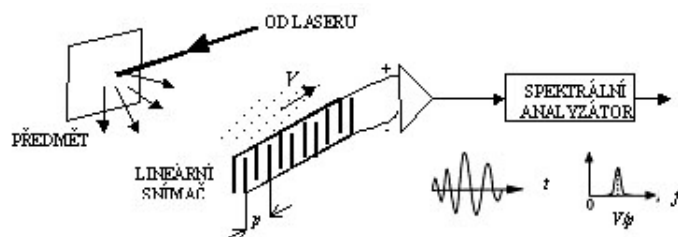


Obr.12 Princip interferometrie na bázi koherenční zrnitosti; (a) – záznam pole koherenční zrnitosti; (b) – pozorování Youngových proužků

Obr.13 Detekce pole koherenční zrnitosti pomocí lineární korelační metody



⁷ Jestliže detekujeme pohyb pole koherenční zrnitosti přesně po určitý čas, pak může být stanovena i rychlost posuvu povrchu předmětu. Analogicky lze sledovat i některé další veličiny v mechanice.



Obr.14 K principu detekce rychlosti

Poznámka

Samostatným, a dnes ještě i poněkud předčasným, rozvojovým přístupem je přístup ke klasickým interferometrům z pohledu kvantového popisu, tj. z pohledu kvantové optiky. Tento příslib současného stavu je ještě poněkud vzdálen aplikacím v mechanice, ale již velmi žhavým tématem v příbuzných oborech, například, v komunikacích pro zajištění bezpečného přenosu informace aj.

3.3 Křehké laky

Jejich aplikace je nenáročná a poměrně snadná pokud jsou užity pro kvalitativní analýzu napjatosti. Jsou vhodné pro získání předběžných informací o poli napjatosti (o místech koncentrací napětí a směrech hlavních napětí) před instalací odporových tenzometrů. Pokud by měly být použity pro kvantitativní analýzu, mají celou řadu omezení a jsou proto nahrazovány při řešení závažných úloh povrchovou fotoelasticitami.

3.4 Rentgenografie

Rentgenografie se kromě detekce necelistvostí a strukturních analýz užívá také pro napěťovou analýzu, převážně pak pro zjišťování zbytkových napětí. Tato měřicí metoda je založena na difrakci RTG paprsků v polykrystalických materiálech, kterou můžeme určit vzdálenost atomových rovin a jejich změny v důsledku pružných deformací. Při plastické deformaci dochází k prokluzu těchto rovin a tuto změnu RTG metoda nezachytí.

3.5 Akustická emise

V konstrukci nebo v jednotlivých jejích částech je třeba v některých případech sledovat dosažení určitého stavu, spojeného s výraznými body pracovního diagramu materiálu konstrukce (např. meze kluzu) nebo je třeba indikovat možnost poruchy (odpovídající mezi pevnosti materiálu). Dosažení těchto stavů napjatosti nevyplývá pouze ze zatěžovací veličiny, ale v její kombinaci s mikro- a makroskopickými poruchami materiálu. Tyto poruchy se projevují jemnými akustickými signály, zasahujícími do vysokého ultrazvukového spektra. Signály akustické emise se objevují při vzniku nespojitosti materiálu. Příčiny jsou:

- vznik a rozvoj mikrodefektů,
- fázové přeměny materiálu,
- vznik skluzových pásů a oblastí s intenzivním pohybem dislokací,
- u polymerních materiálů vznik přetvořených oblastí
- u kompozitů přetrhávání vláken výztuže, dekoheze matrice a oddělování vláken od matrice.

Jim pak odpovídá energie a frekvence detekovaného signálu, ze kterého je možno analyzovat kromě příčin i místo příslušného děje.

Metoda akustické emise se užívá jednak pro kontrolu integrity konstrukcí (např. tlakových nádob při jejich zkouškách a provozu), jednak pro kontrolu technologie (odchylky se projeví charakteristickým spektrem).

3.6 Ultrazvukové metody

Oblastí jejich využití je především nedestruktivní defektoskopie. Lze je ale též využít např. pro měření tloušťek materiálu, vzdáleností (např. sledování výšek hladin v zásobnících), průtoku kapalin, zbytkových napětí a elastických konstant materiálu.

3.7 Termální emise

Tato metoda, označovaná často zkratkou anglického názvu (Stress Pattern Analysis by Thermal Emission) jako SPATE metoda, je založena na termodynamických projevech (teplotní změny v důsledku napjatosti řádově tisíciny až setině stupně Kelvina) při cyklickém zatěžování konstrukce. Bezkontaktně snímaný signál odpovídá prvnímu invariantu tenzoru napjatosti. Citlivost metody dosahuje 1 MPa u oceli a 0,4 MPa u hliníku a jeho slitin. Kromě napěťové analýzy se metoda SPATE uplatňuje též v oblasti šíření trhlin a optimalizačních a porovnávacích měření.

3.8 Hybridní metody (experimentálně-numerické metody)

Takovýto společný postup při řešení fyzikálních problémů je velmi slibný a ekonomicky přijatelný. Jeho uplatnění je nadějně především v nelineárních dynamických úlohách a v úlohách lomové mechaniky při tvárném porušení.

4. Uplatnění metod experimentální mechaniky

V současné době se oblast využití experimentální mechaniky rozšiřuje do dalších oblastí zájmu jako jsou:

- lomová mechanika
- biomechanika
- kompozitní materiály
- modální analýza
- zbytková napjatost
- experiment jako součást výrobního procesu
- diagnostika technických objektů
- experiment v systému zajišťování jakosti výrobků

Mnohdy specifické podmínky a problémy jsou zde řešitelné pouze s využitím nových přístupů a metod a to především optických.

5. Chyby v experimentálním modelování a jejich odstraňování

Významnými zdroji chyb v experimentálním modelování může být:

- nedocnění nebo dokonce opomíjení některých činností v rámci experimentu (např. jeho plánování, statistické zpracování, posouzení),
- nedocnění významu experimentu ve výpočtovém modelování a tím i v řešení inženýrských problémů,
- nedostatečná provázanost teoretického a experimentálního řešení,

Nelze ale přehlížet i další skutečnosti:

- experiment nesmí být samoučelný (svádí k tomu rostoucí složitost přístrojů a stále hlubší specializace). Cílem není pouze poznat napjatost, ale především ji správně vyložit;
- je nutno mít představu o napjatosti, kterou vyšetřujeme. Bez předběžných znalostí očekávaných průběhů napjatosti se můžeme snadno dopustit zásadních chyb. Např. – u tlakových nádob (kde je membránové a ohybové napětí) se může stát, že na vnějším povrchu změříme jejich rozdíl, který bude malý; na vnitřním povrchu (kde

třeba může být problematické měření s ohledem na tlakovém prostředí) může součet těchto složek překročit přípustnou hodnotu. Jindy se můžeme dopustit i velkých chyb neuvážením gradientu napětí při použití tenzometru s velkou základnou.

- časté chyby vznikají při nesprávném modelování provozních nebo okrajových podmínek při modelovém výzkumu. Zanedbáním nebo nesprávným výkladem účinku smykového tření, chybným užitím principu superpozice u soustav s vůlemi nebo s plastickými deformacemi, chybnou představou o vzájemném silovém působení v soustavě těles nebo zkreslením okrajových podmínek můžeme výsledky experimentu zcela znehodnotit. (tak např. excentricita osově síly v taženém prutu o velikosti rovné pouhé desetině poloměru způsobí jednostranný vzrůst napětí o cca 40 %). Všeobecně se velmi obtížně experimentálně modelují prosté případy namáhání.

Nestačí proto pouhá experimentální rutina. Úspěšný pracovník v experimentální mechanice musí mít solidní znalosti z mechaniky, pružnosti a pevnosti, musí dobře znát mechanické vlastnosti konstrukčních materiálů za různých provozních podmínek. Využitím těchto znalostí, zkušeností a pečlivou prací pak minimalizuje možnost vzniku hrubých chyb při návrhu a realizaci experimentu. Měl by mít vždy jasnou představu o tom, na jaké otázky má dát jeho výzkum odpověď. To mu dovolí efektivněji pracovat. Samotné velké množství naměřených dat není účelem.

6. Experimentální mechanika v systému výchovy mladých inženýrů

Z uvedeného je nesporně zřejmá důležitost experimentální mechaniky a tedy i potřeba kvalitní odborné přípravy absolventů našich vysokých škol v této oblasti. Současný stav je možno v tomto směru hodnotit jako ne zcela uspokojivý. V rámci základního studia je většinou (vzhledem k vysokým počtům studentů a malé „průchodnosti“ laboratoří) možno poskytnout pouze stručné informace o experimentální mechanice a jejích možnostech. Lepší situace existuje při studiu některých specializací, majících zařazeny předměty zahrnující tuto (nebo velmi příbuznou a související) problematiku. Ani zde se však nezdá být ze strany některých kateder dostatečně oceněna úloha a důležitost experimentální mechaniky. Při objektivním hodnocení jsou zřejmě nejlepší podmínky vytvářeny v rámci specializací Aplikovaná mechanika na strojních fakultách. Rovněž tak v rámci doktorandského studia bývá problematice technického experimentu věnována patřičná pozornost.

Požadavky na zlepšení tohoto stavu by neměly zůstat nevyslyšeny. Vždyť moderního specialisty v oblasti experimentální mechaniky je možno přirovnat k lékaři: zřídka kdy ho lidé navštěvují pouze pro svoje osobní potěšení – k lékaři obvykle přicházejí, až se necítí dobře. Podobně jsou na tom specialisté v oblasti analýzy napětí a mezních stavů: nejčastěji jsou povoláváni ke konstrukci, až když je nebezpečí jejího selhání. Právě tak jako lékaři musí i oni stanovit diagnózu. Není zde však cílem třeba polepit celou konstrukci odporovými tenzometry. Je třeba posoudit celý mechanismus jejího chování, správně odhadnout, kde je chyba a vyřešit příčiny potíží. Dobří lékaři i dobří pracovníci v experimentální mechanice musejí vycházet z podobného intelektuálního zázemí - z hlubokého vědeckého poznání vzájemných vztahů buď v živém organismu nebo v neživé konstrukci. A musejí rovněž svoje odborné znalosti v souladu s rozvojem poznání neustále rozšiřovat a zdokonalovat.

Kvalita této přípravy je však též ve značné míře závislá na stupni vybavenosti a kvalitativní úrovni školních laboratoří. Účinnou pomocí je v tomto směru úzká spolupráce zastoupení některých světových firem s našimi ústavami a katedrami.

7. Charakteristické rysy soudobé experimentální mechaniky

Při jejich vymezení je možno uvést, že v dnešní době :

- setrvává význam „klasických“ metod experimentální mechaniky (s některými výjimkami jako je např. transmisní fotoelasticimetrie),
- dochází nejen k renesanci, ale k výraznému rozvoji optických metod, které se stávají jedinečnými pro řešení některých problémů,
- experiment je
 - automatizovaný
 - počítačem podporovaný
 - interaktivně řízený
 - systémově orientovaný
- vzrůstají požadavky na programové vybavení – na jeho spolehlivost, otevřenost, vyváženost mezi jeho univerzálností nebo speciálností.

Neustále se rozrůstající a stále bohatěji vybavené měřicí systémy s využitím výpočetní techniky sebou přinášejí jisté nebezpečí: přes efektně vyhlížející barevné grafy a výsledky vypočtené téměř okamžitě na pět desetinných míst nemusí být postřehnuto, že došlo třeba k záměně měřených míst nebo že je měřeno v chybných jednotkách.

8. Další očekávaný vývoj

Charakteristika dalšího rozvoje a vývoje experimentálních metod není jednoduchou záležitostí. Vždyť jejich dnešní stav je do značné míry výsledkem včerejších teorií a ty opět výsledkem předvčerejších potřeb. Zítřejší metody nebudou extrapolací dnešních, budou využívat principů dnes ještě neobjevených.

V celkovém pohledu se ukazuje, že pronikavý rozvoj zaznamenávají optické metody. Nové podněty nabízejí rovněž metody jako je např. akustická emise. Elektrické metody si udržují a zřejmě i zvýrazní svůj význam. Naproti tomu metody založené na magnetickém principu postrádají zatím možnost dostatečně jemného měření změn v magnetickém poli.

Literatura

- [1] Holý, S.: Prostředky experimentální analýzy napětí a jejich využití k minimalizaci rizika selhání konstrukce. Proceedings of the 30th Int.Conf. on Experimental Stress Analysis, Praha 1992
- [2] Holý, S.: Do we still need an Experiment in Solid Mechanics? Proceedings of the 35th Int.Conf. on Experimental Stress Analysis, Olomouc 1997
- [3] Janíček, P. – Ondráček, E.: Řešení problémů modelováním (Téměř nic o téměř všem). Skriptum VUT – FS Brno, 1998
- [4] Ďaďo, S. – Kreidl, M.: Senzory a měřicí obvody. ČVUT Praha 1996
- [5] Webster, J.G.: The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook. CRC Press, 1999
- [6] Kobayashi, A.S.: Handbook on Experimental Mechanics. Prentice-Hall, Inc. 1987
- [7] Dally J.W., Riley W.F.: Experimental Stress Analysis. McGraw-Hill 1991
- [8] Holý, S.: Danger of schematization and its Deleting by means of Experiment. Proc. 10th Danubia-Adria Symposium on Experimental Methods in Solid Mechanics, Měříň/Prague 1993
- [9] Holý, S.: Monitoring and Control Technology and Service Safety by Means of Experimental Mechanics. In: Abstracts of GAMM Jahrestagung 1996, Praha
- [10] Holý, S. – Beneš, J.: Advanced Forms of Experimental Mechanics Education. Proceedings of CTU Workshop 94, Part B, CTU Prague, Praha 1994

- [11] Holý, S.: Is an Experiment in Solid Mechanics still in Fashion? Proceedings of the 5th Bilateral Czech/German Symposium „Experimental Methods of Mechanics and Their Development in Accordance with Numerical Modelling“. Liblice 95, ÚTAM & ÚT AV ČR Praha April 1995
- [12] Holý, S.: Education of Experimental Methods in Mechanics:Yesterday, Today and Tomorrow. Seminar of CTU FEM „Experiment in Solid Mechanics – Yesterday, Today and Tomorrow“, Herbertov Sept. 1995
- [13] Kolektiv: Experimentální pružnost. SNTL, Bratislava, 1970.
- [14] Milbauer M.: Fotoelasticimetrie. SNTL, Praha, 1953.
- [15] Brepta R., Prokopec M.: Šíření napět'ových vln a rázy v tělesech. Academia, Praha, 1972.
- [16] Javornický J.: Photoplasticity. Academia, Praha, 1974.
- [17] Born M., Wolf E.: Principles of Optics. Pergamon Press, Oxford, 1980.
- [18] Hariharan P.: Optical Interferometry. Academic Press, Sydney, 1985.
- [19] Hecht E.: Optics. Addison Wesley, Reading, 1987.
- [20] Saleh B.E.A, Teich M.C.: Fundamentals of Photonics. John Wiley & Sons Inc., New York, 1991.
- [21] Malacara D.: Optical Shop Testing. John Wiley & Sons Inc., New York, 1992.
- [22] Schroder G.: Technická optika. SNTL, Praha, 1981.
- [23] Durst R., Melling A., Whitelaw J. H.: Principles and Practice of Laser Doppler Anemometry. Academic Press, London, 1981.
- [24] Ed. by Cha S. S., Bryanston-Cross P. J., Mercer C. R.: Optical Diagnostic for Fluid, Heat, Combustion and Photomechanics for Solids. Proc. SPIE, Vol. **3783**, 1999.
- [25] Kepřt J., Hrabovský M., Bartoněk L., Tůma J.: Projekční moiré topografie. *Jemná mechanika a optika* **1** (2000) 4-10.
- [26] West Ch. M.: Holographic Interferometry. John Wiley & Sons Inc., New York, 1979.
- [27] Ed. by Rastogi P. K.: Holographic Interferometry. Principles and Methods. Springer-Verlag, Berlin, 1994.
- [28] Mehta P. C., Rampal V. V.: Lasers and Holography. World Scientific, London, 1993.
- [29] Abramson N.: Light in Flight on the Holodiagram. SPIE Opt. Eng. Press, SPIE – Belingham, Washington, 1996.
- [30] Dubas M., Schumann W.: Sur la détermination holographique de l'état de déformation a la surface dun corps non transparent. *Optice Acta* **21** (1974) 547.
- [31] Dubas M., Schumann W.: On Direct Measurements of Strain and Rotation in Holographic Interferometry Using the Line of Complete Lokalization. *Optica Acta* **22** (1975) 807.
- [32] Schumann W., Dubas M.: On the Holographic Interferometry Used for Deformation Analysis with One Fixed and One Movable Reconstruction Source. *Optik* **47** (1977) 391.
- [33] Hrabovský M.: Experimentální analýza rozložení napětí na lopatce regulačního diagonálního čerpadla. *Sborník referátů z 18. mez. konf. o experimentální analýze napětí EAN'80*, 20.-22.5.1980, Tále, Čs. Společnost pro mechaniku při ČSAV a DT Banská Bystrica, 1980, 73-92.
- [34] Yamaguchi I.: Fringe Formation in Deformation and Vibration Measurement Using Laser Light. Ed. by Wolf E., *Progress in Optics* **22** (1985) 271.
- [35] Archbold E., Burch J. M., Ennos A. E.: Recording of in-Plane Surface Displacement by Double-Exposure Speckle Photography. *Opt. Acta* **17** (1970) 883.

- [36] Tiziani H. J.: Application of Speckling for in-Plane Vibration Analysis. *Opt. Acta* **18** (1971) 891.
- [37] Tiziani H. J.: A Study of the Use of Laser Speckles to Measure Small Tilts of Optically Rough Surface. *Opt. Commun.* **5** (1972) 271.
- [38] Archbold E., Burch J. M., Ennos A. E.: Displacement Measurement from Double-Exposure Lasers Photography. *Opt. Acta* **19** (1972) 253.
- [39] Yamaguchi I.: Real-Time Measurement of in-Plane Translation and Tilt by Electronic Speckle Correlation. *Jpn. J. Appl. Phys.* **19** (1980) L131.
- [40] Peters W. H., Ranson W. F.: Digital Imaging Techniques in Experimental Stress Analysis. *Opt. Eng.* **21**, 3(1982) 427.
- [41] Pavlíček P.: Měření profilu předmětu pomocí interferometrie v bílém světle. *Jemná mechanika a optika* **3** (2002) 83-85.
- [42] Lu, J.: Handbook of Measurement of Residual Stresses. The Fairmont Press, Inc. 1996

Poděkování

Výsledky publikované v této publikaci byly získány za finančního přispění MŠMT ČR v rámci podpory projektu výzkumu a vývoje č. LN 00A015 „Výzkumné centrum pro optiku“.