

## Experimentální metody mechaniky těles

Experiment má v mechanice naprosto nezastupitelnou úlohu, přestože bývá často ve výuce mechaniky těles opomíjen. Zatímco je možné si představit experiment bez výpočtu, i když samozřejmě ne na současné úrovni, výpočet bez experimentu je naprosto nemyslitelný. Při výpočtovém modelování má experiment minimálně dvě zcela nezastupitelné role:

- ♦ **získávání vstupních údajů** pro výpočet (materiálové charakteristiky, mezní hodnoty veličin)
- ♦ **verifikace** - ověřování výsledků výpočtu

Předností výpočtu je rychlá a relativně velmi levná možnost posouzení řady variant. Existuje však řada oblastí mechaniky, pro které dosud nebyly vytvořeny použitelné výpočtové modely (problematika abraze, koroze, eroze, kavitace, pittingu aj.) a kde jiný postup než experiment není možný.

Měřicí metody v mechanice těles lze rozčlenit následovně:

1. metody pro určování **přetvoření a napětí**
2. metody pro sledování procesu **porušování**
3. metody pro určování **pohybu tělesa** (kinematických veličin)
4. metody pro určování **vnějších silových účinků** na těleso

### 1. Měření přetvoření a napětí

Úvodem této kapitoly je vhodné si uvědomit, že **napětí přímo měřit neumíme**. Při tahové zkoušce měříme sílu a přepočítáváme na napětí za předpokladu konstantní velikosti příčného průřezu vzorku. U reálných součástí vždy měříme deformaci, a to buď přímo přetvoření, nebo deformační posuvy, které se při znalosti vztahné délky dají za předpokladu homogenního stavu deformace na měřeném úseku převést na přetvoření. Pro určení napětí pak je třeba znát **parametry konstitutivních vztahů**, tedy u izotropního lineárně elastického materiálu dvě základní konstanty Hookova zákona, modul pružnosti v tahu  $E$  a Poissonovo číslo  $\mu$ . Neznáme-li elastické vlastnosti měřeného materiálu nebo není-li materiál elastický, je měření napětí prakticky nemožné.

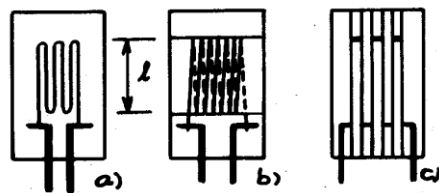
#### Přehled metod pro měření napětí a přetvoření

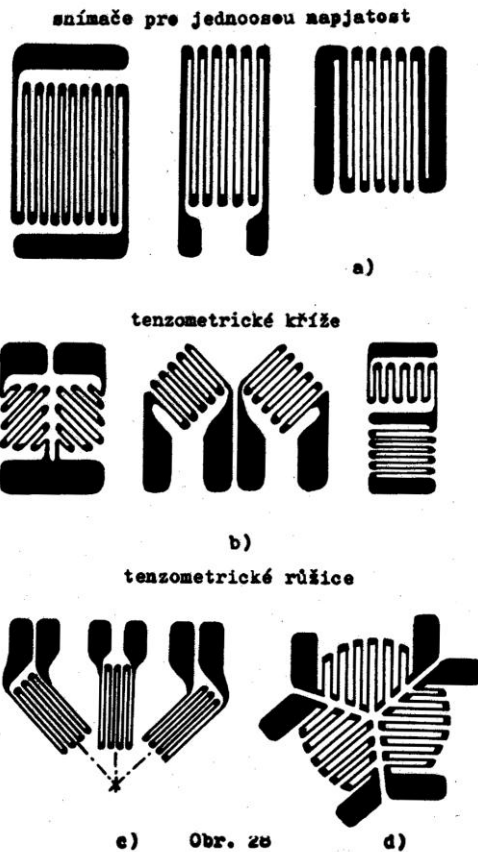
- ♦ **Tenzometrie** - nejběžnější, probereme podrobněji
- ♦ **Fotoelasticimetrie** - komplikovaný experiment na průhledném modelu, nahrazována MKP
- ♦ **Křehké laky** - založena na nízké tažnosti některých pryskyřic, praskají při jisté hodnotě přetvoření, vhodné pro určení nebezpečných míst a směru největších hlavních napětí
- ♦ **Metoda fólie s praskavou vrstvou** - analogie křehkých laků
- ♦ **Metoda moiré** - založena na interferenci světla na optických mřížkách
- ♦ **Holografické metody** - rovněž založeny na interferenci světla, využívají laseru
- ♦ **Rentgenová tenzometrie** - s využitím rentgenového záření zjišťuje změny vzdáleností krystalografických rovin vlivem zatížení
- ♦ **Metoda termální emise** - využívá přeměny deformační energie na energii tepelnou. Zjišťuje změny teploty v různých bodech tělesa vyvolané opakovanou deformací při jeho cyklickém zatěžování

Nejrozšířenějšími přístroji pro měření napětí a deformací jsou **tenzometry** různých funkčních principů a konstrukčních provedení, z nichž nejčastější jsou tenzometry odporové.

**Elektrické odporové tenzometry** jsou založeny na změně elektrického odporu vodičů (ve tvaru drátků nebo fólií) při jejich protažení. Změna odporu se měří odporovým

můstkem a převádí na střední hodnotu přetvoření nebo napětí (pro definované elastické parametry materiálu) na měřeném úseku. Pro zmenšení vztahné délky a tedy přesnější měření v případě nehomogenní napjatosti se volí různé geometrické uspořádání vodičů (viz obr.). Tenzometry stejně jako většina ostatních měřicích metod napjatosti jsou schopny měřit pouze na povrchu tělesa.

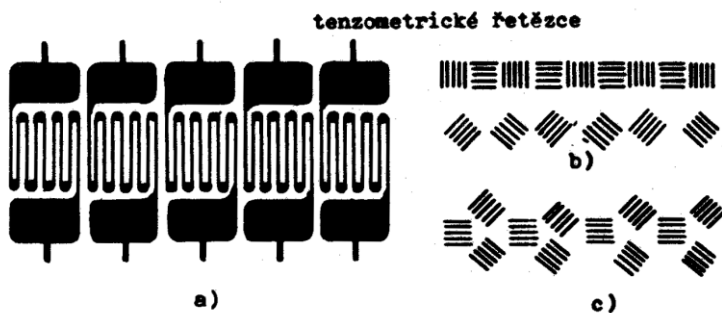




Nepůsobí-li na tento povrch významný vnější tlak (např. hydraulický), pak je vyhodnocovaná napjatost nejvýše **dvouosá**. Provedení a tím i cena použitého snímače závisí na počtu složek napětí, které potřebujeme měřit. Důležité je proto mít představu o charakteru napjatosti na povrchu tělesa. Jedná-li se o **napjatost jednoosou**, postačuje **jednoduchý snímač** (obr. a), který ovšem musí být nalepen **ve směru největšího normálového** (a současně hlavního) **napětí**. Při měření dvouosé napjatosti je rozhodující, zda **známe směry hlavních napětí**. Pokud ano, stačí pro určení obou hlavních napětí **tenzometrický kříž** (obr. b), nalepený v jejich směru. Tento směr může být dán charakterem tělesa a zatížení (např. rotační symetrie), nebo jej lze předem určit jinou experimentální metodou (např. křehký lak, praskající kolmo na směr největšího hlavního napětí). Pokud směry hlavních napětí neznáme, je třeba použít komplikovanější **tenzometrické růžice** (obr. c,d), které měří normálová napětí ve třech směrech, z nichž pak je možné vypočítat velikosti (i směry) obou hlavních napětí, v případě potřeby i jiných složek napětí, např. smykových. Smyková napětí lze měřit buď pomocí speciálních snímačů, nebo prostřednictvím příslušných hlavních napětí, která u smykové napjatosti mají stejnou velikost a jsou oproti napětím smykovým pootočena o  $\pm 45^\circ$  (viz smyková

napjatost).

Náklady na měření samozřejmě výrazně rostou s počtem použitých snímačů. Proto je důležité, aby experimentátor měl představu o **nebezpečných bodech** vyšetřovaného tělesa a charakteru pole napjatosti. Kromě své zkušenosti a znalostí PP může přitom využít výpočtu (včetně MKP) nebo jiných experimentálních metod. V místech s výrazně nehomogenní napjatostí (velkým gradientem napětí) je možné použít **tenzometrické řetězce**, které sestávají z několika samostatných tenzometrů na společné podložce (obr.). Obecně platí, že cena tenzometrického snímače roste se zmenšováním jeho základny a



počtem tenzometrů v něm obsažených.

Kromě odporových tenzometrů se používají i tenzometry **polovodičové**, které mají mnohem větší citlivost, dále **indukčnostní** a **kapacitní**. Mnohem menší význam pro strojírenskou praxi mají různé typy tenzometrů **mechanických**, **strunových** a **pneumatických**.

## 2. Metody pro sledování procesu porušování

Nejrozšířenějšími experimentálními metodami pro sledování procesu porušování jsou:

- ◆ **Akustická emise**
- ◆ Detekce trhliny vodivým nátěrem
- ◆ Indikace šíření trhlin fóliovými snímači

### Akustická emise

Je to fyzikální jev, při němž se v důsledku nevratných pohybových změn ve struktuře materiálu tělesa uvolňuje energie a šíří se materiálem v podobě napět'ových vln.

Akustika je věda zabývající se šířením zvuku. Šíření zvuku v tekutém prostředí je vlastně šířením tlakových vln. Protože na rozdíl od tekutého prostředí neplatí v tuhých látkách Pascalův zákon a napětí v různých směrech mohou dosahovat různých kladných i záporných hodnot, jedná se u nich o **šíření napět'ových vln**. K vybuzení takových napět'ových vln je třeba dodat jistou energii. Zdrojem této energie může být **energie napjatosti tělesa**. K jejímu **skokovému uvolňování** dochází např. při porušování struktury materiálu, tedy **při vzniku a šíření trhliny**. Takto vybuzené napět'ové vlny, šířící se tělesem, je možno detekovat a registrovat.

Zdrojem akustické emise mohou být:

- ◆ vznik a rozvoj mikrodefektů
- ◆ fázové přeměny materiálu
- ◆ plastická deformace spojená se vznikem skluzových pásů nebo s intenzivním pohybem dislokací
- ◆ u kompozitních materiálů přetrhávání vyztužujících vláken, odtržení vláken od matrice apod.

Čím větší jsou dimenze probíhajících změn, tím je taková emisní událost energeticky významnější a snadněji detekovatelná.

**Detekce vzniku trhlin vodivým nátěrem** je založena na změně elektrického odporu vodivého nátěru, který je od vlastního tělesa oddělen nevodivou vrstvou. Tyto změny jsou vyvolány šířením trhlin, které vznikly v tělese, ale šíří se přes materiálové rozhraní i do jednotlivých vrstev nátěru.

**Indikace šíření trhlin fóliovými snímači** se používá pro sledování růstu zjištěných trhlin a je založena na znalosti směru šíření trhliny. Snímače sestávají z řady paralelních vodičů z odporového materiálu a umísťují se tak, aby byly kolmé na směr šíření trhliny. Dojde-li k šíření trhliny pod snímačem, vyvolá trhlina porušení jednotlivých odporových drátků a tím změnu elektrického odporu snímače.

## 3. Snímače pohybu tělesa

Veličinami, charakterizujícími pohyb tělesa je kromě samotné **změny polohy (posuvu)** především jeho **rychlost a zrychlení**. Jejich určování se v rámci mechaniky těles zabývá kinematika. Pohyb tělesa jako celku je vždy popisován jako **relativní** vzhledem k jinému tělesu, jako změna rozdílu polohových vektorů dvou bodů vymezených na těchto tělesech. Je-li jedno z těchto těles pevně spojeno se Zemí, označujeme příslušný pohyb druhého z těles za **absolutní**. Zabýváme-li se vzájemnou změnou polohy dvou bodů vymezených na jediném tělese, nebo soustavě těles vzájemně nepohyblivě spojených, jedná se o **posuv deformační**, který je důležitou veličinou pružnosti a pevnosti, ovlivňující provozuschopnost strojních zařízení. Obzvláště nebezpečným a výpočtově nejobtížněji řešitelným pohybem je periodická rychlá deformace tělesa - jeho **kmitání**. Lze je snímat různými způsoby a ze změn parametrů kmitání usuzovat na procesy vedoucí k mezním stavům v tělese (porušování, opotřebení aj.). Podle použitého konstrukčního principu snímače pohybu tělesa snímají polohu, rychlost, nebo zrychlení a ostatní parametry kmitání se ze změřené veličiny dopočítávají.

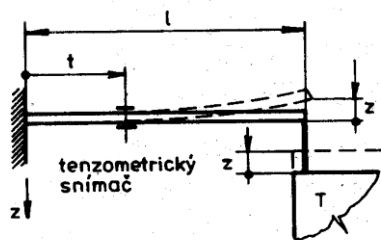
**Piezoelektrické snímače** jsou založeny na piezoelektrických vlastnostech některých krystalů. U nich vzniká elektrický náboj úměrný síle působící na krystal. Protože podle Newtonova zákona síly je tato úměrná zrychlení ( $F = m \cdot a$ ) je napětí na krystalu úměrné zrychlení. Jsou vhodné pro snímání rychlých dynamických dějů.

**Indukčnostní (induktivní) snímače** jsou založeny na změně indukčnosti, tj. střídavého elektrického odporu indukční cívky, a to změnou velikosti vzduchové mezery magnetického obvodu nebo zasouváním jádra do cívky, měří tedy změnu polohy. Jiný typ snímačů je založen na pohybu cívky snímače v magnetickém poli, který indukuje v cívice elektromotorické napětí úměrné složce rychlosti pohybu cívky kolmé k siločarám magnetického pole. Tento snímač měří rychlost pohybu. Indukčnostní snímače mají větší setrvačnou hmotnost a proto se nehodí pro snímání velmi rychlých dějů.

**Kapacitní snímače** jsou založeny na změně kapacity kondenzátoru, které je dosaženo buď změnou vzdálenosti jeho desek (elektrod), nebo změnou jejich plochy (překrytí elektrod). Jsou schopny snímat i velmi rychlé děje a jako snímače bezdotykové se hodí pro snímání kmitání rotujících nebo rychle se pohybujících těles.

**Tenzometrické snímače** jsou založeny na snímání deformace tělesa, nejčastěji prutu nebo membrány, pomocí odporových kovových nebo polovodičových tenzometrů. Tenzometry měří přetvoření  $\epsilon$ , ale jejich umístěním na různé deformovatelné podložky jich lze využít např. i pro snímání např. změny polohy (viz obr).

#### 4. Snímače vnějších silových účinků



Sem patří snímače síly, momentu síly a tlaku.

Snímače síly a momentu síly pracují nejčastěji na výše popsaném principu tenzometrickém, piezoelektrickém, indukčnostním nebo kapacitním. Principů využívaných pro snímání tlaku je velké množství, přehled lze nalézt např. v [Janíček: Technický experiment. Skriptum VUT v Brně, 1989].