

40. EAN

40. MEZINÁRODNÍ KONFERENCE
EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZY NAPĚTÍ
40th INTERNATIONAL CONFERENCE
EXPERIMENTAL STRESS ANALYSIS
3. – 6. VI. 2002, PRAHA/PRAGUE, CZECH REPUBLIC

EXPERIMENTAL MECHANICS OF SOLIDS – TODAY AND FUTURE METODY EXPERIMENTÁLNÍ MECHANIKY - DNES A ZÍTRA

Stanislav HOLÝ¹⁾, Miloš VLK²⁾, Miroslav HRABOVSKÝ³⁾

¹⁾ Czech Technical University, Faculty of Mechanical Engineering, Technická 4, 166 07 Praha 6

²⁾ Technical University Brno, Technická 2, 616 69 Brno

³⁾ Joint Laboratory of Optics of Palacky University and Institute of Physics of the Czech Academy of Science,
17. listopadu 50, 772 07 Olomouc

E-mail: Holys@fsid.cvut.cz, Vlk@umt.fme.vutbr.cz, Hrabovsky@sloup.upol.cz

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

Abstract: This paper is continuing of discussion about rightfulness of the existence of experimental methods in experimental stress analysis[1,2,4,6] . 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 schematisation, joint with every transformation of the solved problem[14], there are hidden less or more latent possible variations from the reality and danger of getting defective results[4]. Only experiment can approve reliability of the schematisation. 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[11]. The presented paper deals, besides the above mentioned problems, with a view of experimental methods. High attention is given to strain gauge methods and optical ones. In the conclusion authors point out their opinion about future existence of experimental methods, but orientated to analysing stresses of technologic origin and based on optical and acoustic methods and thermodynamic ones. The aim of the paper is to think about the position of experiment in stress analysis and in reliability control and about the perspectives and future objectives of experiment. Nonomitting is the aim to encourage the lowering number of people working in experiment.

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

1. Experimentální mechanika a úspěšnost výrobků

Uplatnění výrobku na náročných trzích, kde dnes většinou převyšuje nabídka nad poptávkou, je podmíněno vedle jeho dostupnosti a ceny hlavně jeho 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). Z užitných vlastností, které projektant, konstruktér, výpočtář nejvýznamněji ovlivní je to hlavně spolehlivost (míněna v širším slova smyslu), zahrnující především bezporuchovost, bezpečnost a životnost. Podle úrovně svých znalostí, 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 se setkáváme s námitkami a pochybnostmi o užitečnosti a přínosnosti experimentu. Je nesporné, že náklady související s touto činností nejsou většinou zanedbatelné. Kvalitní lidská práce, investice do měřicích přístrojů a pomocných zařízení, počítačů, softwaru, spotřebního materiálu, režie (administrativa, budovy, energie), odborné přípravy pracovníků, aj.– 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 opravy záruční i běžné a náhradní díly, snížení výpadků výroby v důsledku oprav;
- delší doba života;
- zvýšená důvěra zákazníků;
- zvýšená přitažlivosti výrobku;
- nižší hmotnost efektivněji navržené konstrukce;
- menší problémy s vyhověním požadavků legislativy (norem, předpisů aj.).

Výše nákladů se objeví v ekonomické rozvaze. Shora uvedené přínosy však jsou obtížněji definované (nelze je vůbec nebo jen velmi obtížně vyjádřit v penězích) a proto jsou často naprosto neznámé vyššímu managementu. Ten často považuje experimentální oddělení jako neproduktivní, která snižují zisky podniků. Bohužel tento názor našel odezvu ve vysokoškolské výchově pracovníků, kde laboratorní výuka je vyřazována nebo nahrazována prostředky virtuální reality.

2. Hlavní úkoly experimentální mechaniky

V tomto příspěvku se zaměřujeme 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 konstrukce 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 napěťově deformační odezvy, kde s pomocí počítače jako integrální součástí měřicího a vyhodnocovacího řetězce je tato analýza oproti nedávné minulosti již běžnou samozřejmostí [8,9,10]. Komplexní vyšetřování na jakékoli 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 výpočtové simulace, dnes běžně užívané, 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 [7,11]. Kvalita experimentu se tak stává jedním z limitujících faktorů využití MKP.

2. Ověřování výsledků výpočtového modelování

Při návrhu nového typu nebo i při úpravách stávajícího typu konstrukce je zcela nezbytná vzájemná vazba mezi výpočtovým a experimentálním modelováním. Vhodnost konstrukce 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 i života lidí. Experimentálním modelováním pak je možno:

- a) ověřit si výpočtovou teorii v její podstatě [7,11,23]. 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 nepřijatelných, 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 apod., mnohdy však s obtížnou nebo nepřesnou možností jejich separace.

Jednoznačně tak lze odmítnout představy, že vznik a dostatečný rozvoj metody konečných prvků vyřeší všechny problémy [10]. 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, zdoluhavé nebo vůbec nemožné [21,22] Význam modelové analýzy v tomto případě se 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 tato namáhání nebo dokonce vzniklá poškození, signalizovat obsluze případná přetížení, registrovat je (pasivní systémy) a případně i zařízení samočinně odstavit z provozu (aktivní systémy) [13]. Cílevědomé monitorování konstrukce dovolí potom identifikovat její zatížení a dynamické vlastnosti. Výpočtový model konstrukce je tak integrován do procesu experimentu [8].

5. Získávání nových poznatků

Konečně metody experimentální mechaniky jsou též účinným prostředkem při poznávání probíhajících procesů, k získání poznatků a objevení nových zákonitostí, které pak mohou být účinně uplatněny při budoucím navrhování mechanických soustav. Chápat experimentální mechaniku jako pouhou ověřovatelskou 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, jako jsou řízení jakosti, kontrola výrobních procesů, zkoušení materiálů, analýza poškození, expertní systémy atd.

3. Významnější metody experimentální mechaniky

V této kapitole provedeme stručnou inventuru metod a prostředků vybraného oboru experimentální mechaniky. Oblastí zájmu je zde především vyšetřování velikostí přetvoření, napětí, posunutí, parametrů pohybu a s tím souvisejícím silovým působením (síly, tlaky, kroutící momenty). Největšího uplatnění dosahují v současné době hlavně elektrické metody a 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: vysoká přesnost, citlivost a rychlost měření i na vysokém počtu sledovaných míst, možnost výstupního signálu v analogové formě nebo v digitální, možnost ovládání dalších

prvků, snadná registrace a další zpracování výsledků [6]. Vyšší úroveň experimentu je ovšem spojena s vyššími investičními a provozními náklady na měřicí soupravu a vyššími požadavky na kvalifikaci obsluhujícího personálu.

3.1.2 Snímače

V současné době se můžeme setkat se snímači několika generací.

Snímače I. generace využívají základní fyzikální jevy a principy [8,9,10]. 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, podstatně větší šíře 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 obvodem 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 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, např. [15,16] nabízejí jejich široké spektrum splňující rozmanité požadavky uživatelů zaměřené na možnost měření:

- jak lokálních špiček napětí v místech jejich koncentrace tak příslušných gradientů napětí ve formě tenzometrických řetězců, 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 i 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 pro měření membránových napětí na tělesech typu deska, pro možnost měření v silném magnetickém poli, pro měření zbytkových napětí odvrátavací 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 až do oblasti kryogenních nebo vysokých, kde mez je dána materiálem podložky tenzometru nebo s volnou mřížkou bez podložky, ukládanou do keramického tmelu. Těmito aplikačními technologiemi jsou dány maximální teploty pro lepení cca 250 °C, s volnou mřížkou až do cca 900 °C. Obvyklé přivařovací tenzometry jsou použitelné do cca 250 - 300 °C, speciální pak i do 650 °C. Se stoupající teplotou stoupá i cena požadavky na měřicí zařízení a hlavně na obsluhu a její

zkušenosti. 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 snímáče (tzv. snímáče únavové životnosti), snímáče pro indikaci vzniku trhlin a snímáče pro sledování růstu těchto trhlin [15,16].

Využití odporových kovových tenzometrů je jak v oblasti experimentální analýzy napětí, tak vy výrobě různých snímačů sil, tlaků, kroutících momentů [15].

Polovodičové tenzometry mají sice až o dva řády vyšší citlivosti, avšak především vzhledem ke svým specifikám (křehkost vlastního prvku, tepelná závislost, vyšší cena) jsou využívány prakticky pouze k výrobě snímačů [17].

Indukčnostní [15] 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 aparatury 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 stovky 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

Optické metody jsou podrobně popisovány na této konferenci v samostatném referátu [19]. V minulosti i přítomnosti jejich používání bylo a je rozsáhlé. Došlo ale k posunu metodickému tak i aplikačnímu od metod klasických, využívajících klasické optické interferometry a interferenci mechanickou (metoda moiré) či polarizaci u fotoelasticimetrie transmisní pro řešení úloh rovinných či prostorových a

metod k jejich modernějším modifikacím (stínové moiré či reflexní fotoelasticimetrie). Určitou aplikační oblastí, ale poměrně málo využívanou, je fotoplasticita [21,22,23,24,25,26].

Nástupem laseru, nových optoelektronických prvků, výpočetní techniky a metod vyhodnocení do technické praxe se otevřely nové možnosti optických metod (holografie, holografická interferometrie, spekl interferometrie, kvantová optika a další) [27].

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 [28,29]. 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 nevyplyvá 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) [10].

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 [27].

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 tisíce 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 napětíové analýzy se metoda SPATE uplatňuje též v oblasti šíření trhlin a optimalizačních a porovnávacích měření [30].

3.8 Hybridní metody

Společný postup experimentálně-numerický je při řešení fyzikálních problémů velmi slibný a ekonomicky přijatelný. Jeho uplatnění je nadějně především v nelineárních dynamických úlohách a v úlohách lomové mechaniky [6].

4. Uplatnění metod experimentální mechaniky

V současné době jsou metody 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

Prakticky každý experiment má s své specifické podmínky. Rutinní experimenty jsou dnes řídkou záležitostí. Dá se proto tvrdit, že předkládané problémy jsou řešitelné pouze s využitím nových přístupů a metod a to především optických.

5. Chyby v experimentálním modelování a jejich odstraňování

K celé řadě možných a někdy i velice významných zdrojů chyb v experimentálním modelování může být [5]:

- nedocení nebo dokonce opomíjení některých činností v rámci experimentu (např. jeho plánování, statistické zpracování, posouzení),
- nedocení 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 samoúčelný (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 ale bývá problematické měření s ohledem na tlakovém prostředí, může součet těchto složek překročit přípustnou hodnotu. Pokud posuzujeme konstrukci podle prvního údaje, dopouštíme se hrubé chyby. Jindy se můžeme dopustit i velkých chyb neuvážením gradientu napětí při použití tenzometru s velkou základnou. Je tedy nezbytná teoretická výpočtová příprava experimentu.
- 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 zkrácením okrajových podmínek můžeme výsledky experimentu zcela znehodnotit. Znalost geometrických imperfekcí (ovalita, změna tloušťky stěny, vyosení atd.) je nezbytným vstupním parametrem pro hodnocení experimentem získaného výsledku. Tak např. excentricita osově síly v taženém prutu kruhového průřezu o velikosti rovné pouhé desetíně poloměru způsobí jednostranný vzrůst napětí o cca 40 %. Protože tyto imperfekce se vyskytují u všech případů fyzikálního experimentu v důsledku rozměrových tolerancí a při zavádění silových účinků do konstrukce, 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 možno vzhledem k vysokým počtům studentů a malé „průchodnosti“ laboratorii poskytnout pouze stručné informace o experimentální mechanice a jejích možnostech. Lepší situace existuje při studiu v oborech a specializacích, 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 [31,32]

Požadavky na zlepšení tohoto stavu by neměly zůstat nevyslyšeny. Vždyť moderního specialisty v oblasti experimentální mechaniky je možno přirovnat k lékaři, kterého většina lidí zřídka kdy ho navštěvuje 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 musí 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 laboratorii. Účinnou pomocí je v tomto směru úzká spolupráce zastoupení některých světových firem s našimi ústavami a katedrami či spolupráce na bázi právní dohody mezi dvěma či více pracovišti (joint laboratory).

7. Charakteristické rysy soudobé experimentální mechaniky

Při jejich vymezení je možno uvést, že v dnešní době [33]:

- 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. Proto vzrůstají nároky na organizaci experimentu

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.

Autor příspěvku je přesvědčen, že experimentální metody v mechanice a to jak tuhé a poddajné fáze či mechaniky tekutin mají své oprávnění a v celé řadě případů není je možno pro řešení problému opominout. Určitým důkazem důležitosti je současná konference s vysokým počtem příspěvků, které podporují tvrzení otce lomové mechaniky G. Irvina: „Let us first ask the experiment.“

9. Literatura

- [1] Beer R.: Preface, *Proc 18th Danubia-Adria symposium on Exper. Methods in Solid Mechanics*, TU Wien/Steyr Sept 2001
- [2] Holý, S.: Do We Still Need an Experiment in Solid Mechanics? *Proc 35th Int. Conf. on Experimental Stress Analysis, Joint Lab of Optics of Palacký University, Olomouc 1997*, pp.1-6
- [3] Holý S.: An Invisible Danger of Schematisation and Its Deleting by Means of Experiment, *Proc 4th Bilateral German/Czech Symposium „Experimental Mechanics Methods in Nondestructive testing of Structures and Structural Elements, ergische Univesität Wuppertal, Physikzentrum Bad Honnef/Rhein, June 1993*, pp. 1-3
- [4] 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 Oct.1993*
- [5] Holý, S.: Prostředky experimentální analýzy napětí a jejich využití k minimalizaci rizika selhání konstrukce. *Proc 30th Int. Conf. on Experimental Stress Analysis, ČVUT Praha 1992*, pp. 73-76
- [6] Laermann K.-H.: Perspectives and Future Objectives of Experimental Solid Mechanics – Vision and Ideas, *nonpublished contribution Seminar „Experiment in Solid Mechanics – Yesterday, Today and Tomorrow“, CTU FME Praha/Herbertov, Sept 1995*
- [7] Munteanu M.Gh., Barraco A., Curtu I., De Bona F.: Experimental Validation of a Special Finite Element Type for Large Displacements Beam System, *Proc 17th Danubia-Adria symposium on Exper. Methods in Solid Mechanics, CTU Prague, oct. 2000*, pp.229-232
- [8] Webster, J.G.: The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook. CRC Press, 1999
- [9] Ďaďo, S. – Kreidl, M.: Senzory a měřicí obvody. ČVUT Praha 1996
- [10] Kobayashi, A.S.: Handbook on Experimental Mechanics. Prentice-Hall, Inc. 1987
- [11] Mang H.A.: A Plea for the Cooperation of Experimental and Analytical Research in the Field of Solid Mechanics, *Proc 6th Danubia-Adria symposium on Exper. Methods in Solid Mechanics, Seefeld, Oct. 2000*
- [12] Holý S, Kratěna J., Kratěnová M., Michalec J.: Stress Analysis of the Special Railway Dolly by the Photoelastic Coating Technique, *Proc „Al IV Lea Symposium National de Tensometrie“, TU Brasov 1986, Vol. III, pp. 127-134*
- [13] Holý, S.: Monitoring and Control Technology and Service Safety by Means of Experimental Mechanics. *In: Abstracts of GAMM Jahrestagung 1996, Praha*

- [14] Van Geen J.: Finite Element Method is the Death of Plane Photoelasticity, *nonpublished contribution 9. konference EAN, ÚTAM Praha 1971*
- [15] Firemní literatura fy Hottinger Baldwin Messtechnik Darmstadt
- [16] Firemní literatura fy Vishay Micro Measurement
- [17] Firemní literatura fy VTS - Výroba tenzometrů a snímačů Zlín
- [18] Lu, J.: Handbook of Measurement of Residual Stresses. The Fairmont Press, Inc. 1996
- [19] Hrabovský M.: Optical methods in experimental mechanics – Optické metody v experimentální mechanice, *Proc 40th Internation. Conf. on Exper. Stress Analysis, CTU FME Praha, June 2002, pp. 93-96*
- [20] Laermann K.-H.: An Overview on Optical Methods in Structural In-Situ Analysis, *Proc 17th Danubia-Adria symposium on Exper. Methods in Solid Mechanics, CTU Prague, oct. 2000, pp.177-180*
- [21] Milbauer M.: Fotoelasticimetrie. SNTL, Praha, 1953
- [22] Milbauer M., Perla M.: Fotoelasticimetrie a příklady jejího použití, NČSAV Praha 1961
- [23] Aben H., Ainola L., Anton J.: Integrated Photoelasticity for Quality Control in Glass Industry, *Proc 17th Danubia-Adria symposium on Exper. Methods in Solid Mechanics, CTU Prague, Oct. 2000, pp.1-5*
- [24] Holý S., Kratěna J., Kratěnová M.: Application of Moiré Fringe Topography for Scoliosis Screening, *Abstract of the Internation. Congress of Orthopaedicas, lékařská společnost + S.I.C.O.T., Praha 1988, p. 102*
- [25] Naumann J., Stockmann M.: Moiré Interferometry Technique and Its application, *Proc 17th Danubia-Adria symposium on Exper. Methods in Solid Mechanics, CTU Prague, oct. 2000, pp.233-234*
- [26] Malacara D.: Optical Shop Testing. John Wiley & Sons Inc., New York, 1992.
- [27] Krouzecky N., Fuchs K.G.: Surface Measurement by the Means of a Measuring Method Cobinating Ultrasonic and Laser Sensor *Proc 17th Danubia-Adria symposium on Exper. Methods in Solid Mechanics, CTU Prague, oct. 2000, pp.167-168*
- [28] Kraus I., Ganev N.: Difrakční analýza mechanických napětí, skriptum ČVUT FJFI Praha 1995
- [29] Ganev N., Dejmal J., Holý s., Kraus I.: Quantitative Comparison of Stress Evaluation Methods, *sborník 38. konference EAN, VUT FSI Brno/třešť červen 2000*
- [30] Holý S.: Co můžeme očekávat od metody SPATE, *Sborník 29. konference EAN, ŽďAS Svatka 1991, str. 32-34*
- [31] Holý, S. – Beneš, J.: Advanced Forms of Experimental Mechanics Education. *Proceedings of CTU Workshop 94, Part B, CTU Prague, Praha 1994*
- [32] 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*
- [33] Janíček, P. – Ondráček, E.: Řešení problémů modelováním (Téměř nic o téměř všem), Skriptum VUT – FS Brno, 1998

Uvedené studie, rozborů a srovnání byly provedeny v rámci Výzkumného záměru J 04/98 č. 212 200008 „Rozvoj metod a prostředků integrovaného inženýrství“.