

ČESKOSLOVENSKÁ
SPOLEČNOST
PRO MECHANIKU
PŘI ČSAV

BULLETIN



3 · 1983

BULLETIN 3 '83

ČESKOSLOVENSKÁ SPOLEČNOST PRO MECHANIKU PŘI ČSAV

ZA URYCHLENÉ UPLATŇOVÁNÍ VÝSLEDKŮ VĚDY A TECHNIKY V PRAXI

Tématem jednání 8. zasedání ÚV KSČ v červnu 1983 byly problémy současné etapy vědeckotechnické revoluce, spočívající v nedostatečném a pomalém uplatňování výsledků vědy a výzkumu v praxi. I když tempo využívání nových poznatků v porovnání s minulostí stoupá, je z hlediska potřeb naší ekonomiky nepostačující. Příčinu tohoto stavu nalézá ÚV KSČ v tom, že tato činnost se nestala osou veškerého plánování a základním obsahem řízení na všech stupních. Formuluje proto využívání nových poznatků jako základní směrnici další práce ve vědě, výzkumu i výrobě.

Tento přístup má těžiště ve správném spojení dlouhodobých a krátkodobých úkolů a jejich koncipování na základě reálných podmínek a daných možností. Rezervy k jeho realizaci má možnost poskytnout lepší využití a zhodnocování surovin a materiálů a úspory energií.

Na uskutečňování tohoto záměru mají významný podíl i pracovníci vědy. Usnesení jim ukládá koncentrovat síly na zabezpečení technicky nadějných a ekonomicky efektivních směrů. Vedle tohoto řídicího úkolu to znamená na jedné straně zvýšení účinnosti a lepší využití vlastního vědeckotechnického potenciálu, na druhé straně i změnu forem zpracovávání dosažených poznatků. Nemůže jít nadále o převod výsledků postupováním vědeckých zpráv a publikací, ale o dlouhodobou spolupráci vědy, aplikovaného výzkumu, vývoje a výroby již v průběhu řešení.

V realizaci závěrů 8. zasedání ÚV KSČ má své významné místo i ČSSM. Na její půdě se setkávají vědci a odborníci z rozhodujících oborů technické praxe při diskusích o nejnovějších poznatcích a o vědeckých a technických problémech. Jsou tak dány podmínky pro vzájemné sbližování hledisek a navazování přímé spolupráce. Příspěvkem ke zkvalitnění řídicí práce je i připravovaná nová struktura ČSSM, umožňující soustředit se na aktuální tematické okruhy, bez spoutávání rámcem klasických disciplín oboru.

Naše činnost má však i rezervy spočívající v účinnějším soustředění práce odborných skupin právě na nejvýznamnější úkoly našeho národního hospodářství. Využití těchto rezerv musí stát ve středu soustavné pozornosti všech článků řízení ČSSM a jejich členů.

Předsednictvo ČSSM

BULLETIN

3/1983

Čs. Společnosti pro mechaniku při ČSAV

vydává Čs. Společnost pro mechaniku při ČSAV
ve spolupráci s Jednotou čs. matematiků a fyziků v Praze

odpovědný pracovník: Ing. Rudolf Dvořák, CSc.
vědecký tajemník Společnosti

redakce Bulletinu: Ing. Pavel Komárek
SVÜSS, Praha 1, Husova 8, tel.247751-5 1.3

adresa sekretariátu: Vyšehradská 49, 128 00 Praha 2

určeno členům Čs. Společnosti pro mechaniku při ČSAV

tiskne: Polygrafia 6 (Prometheus), Praha 8

evid.č. UVTEI 79 038

ROZVOJ EXPERIMENTÁLNÍCH METOD V PRUŽNOSTI A PEVNOSTI

I v dnešní době poznamenané spěchem, hlubokou dělbou práce a vysokou specializací bývá čas od času užitečné ohlédnutí do historie, abychom periodicky prověřovali správný směr vývoje daného oboru a poslání naší činnosti. Je nepochybné, že již v dávnověku lidé s první cílevědomou činností přicházeli do styku s pevností materiálu, s pevností a životností různých nástrojů a konstrukcí a tudíž museli tuto vlastnost materiálu a konstrukcí brát v úvahu. Jsou zde evidentní historické památky z doby egyptské, řecké, římské či jiné kultury, které svědčí o promyšleném využívání mechaniky (přičemž pod tímto pojmem máme na mysli jak znalosti o velikosti a působení zatížení, tak znalosti o odporu materiálu proti jeho porušení), aniž se zachovaly jiné přímé doklady o hloubce znalostí tohoto oboru. Pravděpodobně se tedy jednalo o dlouhodobé nahromadění praktických zkušeností.

Teprve z patnáctého století našeho letopočtu máme zachovalé důkazy o rozvoji teoretické i experimentální mechaniky. Leonardo da Vinci (1472-1519) si zapsal: "Mechanika je ráj matematiky, protože v ní získáváme plody matematiky". Leonardo da Vinci sám experimentálně řešil pevnost tažených drátů a ohyb nosníků a stanovil některé empirické vztahy. Později následoval Galileo Galilei (1564-1642), Edme Mariotte (1620-1684) a Robert Hook (1635-1703) se svými pracemi - teoretickými i experimentálními - o ohybu nosníků a deformaci pružin a poslední též stanovením základního vztahu mezi velikostí působící síly a velikostí způsobené deformace.

Období Jakuba Bernoulliho (1654-1705) s definicí ohybové čáry pružného nosníku, Johana Bernoulliho (1667-1748) a hlavně Daniela Bernoulliho (1700-1782) - diferenciální rovnice příčného kmitání prizmatického nosníku, Leonarda Eulera (1707-1783) - stabilita nosníků a kmitání membrán, Josepha Louise Lagrange (1736-1813) - upřesnění rovnice pro chování sloupů namáhaných na vzpěr, Thomase Younga (1773-1829), jenž definoval modul pružnosti a odvodil diferenciální rovnice pro ohyb (1807), Louise Naviera (1785-1836) - upřesnění diferenciálních rovnic pro ohyb nosníků (1826), Augustina Louise Cauchyho (1789-1857), jenž odvodil pojem hlavních napětí a základní vztahy v pružnosti a pevnosti, Simona Denise Poissona (1781-1840), Josepha Rogera Boškoviče (1711-1787),

Michala Vasiljeviče Ostrogradského (1801-1861) a Gabriela Lamého (1793-1870), který odvodil základní rovnice matematické pružnosti (1852), možno považovat za období základních prací v oblasti pružnosti a pevnosti. Uvedené práce vznikaly za současného ohromného rozmachu industrializace západní Evropy. Z této doby pochází také první mechanický tenzometr pro měření místních deformací způsobených mechanickým napětím. Byl použit poprvé v roce 1856 Eatonem Hodkinsonem (1789-1861) a měl tvar klínu s malým úkosem, který se zasouval mezi dvě příložky upevněné na povrchu součásti a mohl měřit délkovou změnu s přesností asi 0,05 mm. Tenzometr vznikl proto, že Eaton Hodkinson spolu s Williamem Fairbairnem (1789-1874) měli zkoumat mechanické vlastnosti litiny, ověřit teoretické vztahy Eulera pro ohyb sloupů a zkoumat ohyb tenkostěnných trub, které měly být použity na konstrukci mostů. Zkoumali rovněž vliv času a teploty na pevnost litinových nosníků. Za tím účelem byl rovněž vyroben zatěžovací stroj "Páka Fairbairova".

Potřeby průmyslu, tj. nové konstrukce, nové způsoby namáhání, nový materiál a nahromaděné znalosti z teorie pružnosti a pevnosti, vyvolaly potřebu měření deformací (napětí) a zkoušek pevnosti materiálu, případně části konstrukce. V dané době to byl přirozený vývoj, který však s odstupem času můžeme hodnotit jako kvalitativní skok v rozvoji mechaniky. Zde začala historie experimentálních metod v pružnosti a pevnosti, která se později vyvíjela ve dvou paralelních větvích, tj. vývojem experimentální analýzy napětí a vývojem experimentálního stanovení mezních stavů materiálu. Rozvoj těchto nezávislých oborů byl založen na předpokladu, že stav napjatosti blížící se mezní podmínce je příznakem možného porušení celistvosti materiálu konstrukce.

Vývoj mechanických tenzometrů pokračoval, až se dosáhlo pákového zvětšení deformace okolo 2000 a tento tenzometr Huggenberga se užívá dodnes pro svoji jednoduchost a zejména zaručenou linearitu i při velkých deformacích.

Významným přínosem v metodách měření deformací bylo užití změny odporu tenkého drátku se změnou jeho délky (A.C.Ruga 1938). Válečné potřeby průmyslu a následující jeho rozmach vedly k masovému využívání elektrických odporových tenzometrů v metodách experimentální analýzy napětí. Poslední vynálezy v oboru elektroniky umožnily další vývoj této metody. Původně primitivní, nepřesná a zdlouhavá měřicí technika ručního měření je v současnosti nahra-

zena měřicími ústřednami vybavenými počítači pro řízení a vyhodnocování měření. Sortiment snímačů je široký pro obecné i speciální použití a i metodika lepení tenzometrů se stala jednodušší a spolehlivou. Uvedené skutečnosti vedly k tomu, že elektrická odporová tenzometrie se stala základní univerzální metodou experimentální analýzy napětí v technické praxi. Rozsah možností metody je značný, od statických měření přes dynamická, v širokém rozsahu teplot, v laboratorních i provozních podmínkách, ve vodivém, korozním i radiačním prostředí.

Kromě změny odporu drátku v závislosti na změně jeho délky byla vyvinuta a měla své speciální uplatnění celá řada metod využívajících změn různých fyzikálních parametrů v závislosti na deformaci. Rovněž ve své době - před zavedením výpočtů metodou konečných prvků - sehrály významnou roli při studiu napjatosti různé analogie, které využívaly rozdílných fyzikálních jevů, vyjádřených stejnou matematickou formulí.

Zvláštní kapitolu tvoří optické metody - metoda fotoelasticimetrie, moire a holografie. Fotoelasticimetrie, která je dnes vedle elektrické odporové tenzometrie nejrozšířenější metodou experimentální analýzy napětí, byla poprvé v inženýrské praxi využita v r. 1891 Wilsonem. V poslední době se značně využívá metoda opticky citlivých vrstev tzv. "Photostress", která částečně nahrazuje metodu křehkých laků. Spojení metody opticky citlivých vrstev s tenzometrií je dnes významným prostředkem pro stanovení maximálních napětí ve složitých reálných konstrukcích. V současné době největším rozvojem prochází metoda holografické interference. Její rozvoj umožnily dva velké objevy poválečného období, a to vynález hologramu a vynález intenzivního koherentního zdroje světla - laseru. Metoda je v současnosti využívána jako kontrolní metoda velmi přesného měření rozměrů, posuvů a celistvosti.

Z krátkého výčtu a nástinu vývoje některých metod experimentální analýzy napětí je zřejmé, že za období více než 125 let byla vyvinuta řada metod pro různá použití, byla podstatně zvýšena přesnost a spolehlivost měření a byla zavedena automatizace do měření napětí v konstrukcích nebo modelech.

Existence a budoucnost jednotlivých metod experimentální analýzy napětí spočívá v tom, jaké přednosti v období projektování konstrukce daná metoda poskytuje oproti rychle se rozvíje-

jícím metodám teoretického výpočtu napětí a zda tato experimentální metoda je použitelná pro zjišťování napětí na skutečných konstrukcích, případně v technické diagnostice. Z tohoto hlediska ze stávajících metod experimentální analýzy napětí má největší perspektivu metoda el. odporových tenzometrů.

Podobně jako u vývoje experimentální analýzy napětí probíhal vývoj zkušebních zařízení pro stanovení mezních stavů materiálů. Původně jednoduchá páková zkušební zařízení pro zjišťování mechanických vlastností materiálů na malých vzorcích jsou nahrazena programově řízenými zatěžovacími stroji pro zjišťování vlastností částí konstrukcí i ve skutečné velikosti. I zde samozřejmě bylo využito pokroku ve vývoji hydrauliky, elektroniky, automatizace, řídicích ústředí a výpočetní techniky. V roce 1881 vznikaly první firmy specializované na výrobu jednoduchých zkušebních strojů a dnes podobné firmy nabízejí dodávku celých laboratoří nebo výzkumných ústavů pro mechanická zkoušení materiálů a simulování provozních namáhání. Rovněž zatěžovací síly z původních setin MN vzrostly postupně až na 100 MN, tj. o 4 řády.

Souběžně s experimentálním stanovením mezních stavů se vyvíjela teorie procesu porušování materiálu. Mezníkem v tomto vývoji byla v roce 1921 Griffithova teorie porušování, která předpokládala, že vlastní destrukční proces začíná růstem necelistvostí, které v technických materiálech vznikají již při jejich výrobě. To znamenalo, že příznakem potenciálně slabých míst, eventuálně možného porušování, je každá necelistvost ve spojení s vysokým stavem napjatosti.

Tento poznatek vedl k rozvoji třetí větve experimentálních metod a to metod nedestruktivní defektoskopie, které jsou určeny k zjišťování vad materiálu způsoby, při kterých nedochází k jeho porušení. Obecně jsou opakovatelně použitelné v kterékoliv fázi výroby, montáže a provozu zařízení a nemají žádný přímý vliv na zkoušený objekt. První průmyslové použití metody prozařování, ultrazvukových vln a magnetické defektoskopie ke kontrole materiálu je spojováno s 30. léty tohoto století. Hlavní rozvoj nedestruktivní defektoskopie však nastal v období poválečného rozvoje průmyslu a později v období výroby jaderných elektráren. Vzniká prakticky nový vědní obor, který zdokonaluje původní a navrhuje nové metody, které jsou schopny spolehlivěji, přesněji a rychleji nalézt vady v materiálu konstrukce. Vznikají státní a mezinárodní organizace a předpisy, které definují přípustné a nepřípustné ne-

celistvosti materiálu, bohužel často bez vztahu, v jakém poli napětí se tyto necelistvosti v konstrukci nalézají. Zřejmě vývoj v této oblasti půjde podobnou cestou jako u analýzy napětí, kde od původního omezení největšího napětí vzhledem k mezi pevnosti materiálu v tahu se dnes pracuje s kategorizací především v definici a v kvantifikaci necelistvosti.

Pro hodnocení zbytkové životnosti konstrukce je v současné době k dispozici v ideálním případě informace o velikosti působících napětí, charakteru a velikosti necelistvosti a pevnostních vlastnostech materiálu v podmínkách blízkých provozu. Z posouzení (porovnání) těchto údajů je usuzováno o následném chování konstrukce.

Dalšími pokroky v poznání procesu porušování celistvosti materiálu byly později Griffithovy úvahy o původu zárodků porušení korigovány a vznikly dislokační teorie iniciace poruch soudržnosti materiálu. Bylo ukázáno, že vznik zárodků trhlin a následného porušení kovu je neoddělitelně spjat s procesem plasticke deformace a že lze rozdělit celý mechanismus lomu u všech těles a za všech podmínek namáhání na tři základní etapy, zhruba: vznik plasticke deformace a mikrotrhlin, růst trhliny a lom, které jsou složeny z dalších dílčích úseků. Dále bylo zjištěno, že se čelo porušování v každé etapě šíří materiálem ve velmi rychlých skocích, které mění lokální tuhost dané oblasti a tedy porušují rovnováhu lokálních napětí v daném místě. Mechanická rovnováha se obnoví šířením a rozpadem takto generovaných napěťových vln. Bylo zjištěno, že proces plasticke deformace je charakterizován energetickými pulsy řádu 10^{-11} až 10^{-7} J a proces šíření trhliny řádu 10^{-6} až 10^{-1} J. Celková uvolněná energie na 1 m^2 lomové plochy konstrukčního materiálu dosahuje až kJ.

První pokusy experimentálně zachytit generované napěťové vlny v namáhaném materiálu byly provedeny Masonem v r. 1948 a Kaiserem v r. 1953. Vznikla nová metoda - akustická emise - která využívá jevu, že v určitých lokalitách materiálu dochází v důsledku dynamických procesů stimulovaných vnějšími nebo vnitřními silami k uvolňování části materiálem akumulované energie. Prvně byla tato metoda průmyslově využita pro detekci růstu vady při hydraulické zkoušce rakety Polaris v r. 1964. Úspěchy v elektronice a výpočtové technice a požadavky průmyslu vyvolaly bouřlivý vývoj metody akustické emise prakticky ve všech průmyslových stá-

tech. I když se často tato metoda zařazuje do větve metod ne-destruktivní defektoskopie svou fyzikální podstatou integruje pro potřeby stanovení zbytkové životnosti konstrukce tři výše uvedené směry, tj. experimentální analýzu napětí, stanovení mezí stavů materiálu a defektoskopii.

Na základě uvedených znalostí můžeme tedy předpokládat, že příznakem procesu porušování materiálu je výskyt energetických pulsů různé intenzity ve všech etapách porušování.

Zobecnění, propracování a ověření tohoto předpokladu nám nabízí možnost posuzovat životnost konstrukce pomocí analýzy energetických pulsů místo zjišťování příslušného napětí, měnících se vlastností materiálu a případně charakteru defektu a ještě hledání vztahu mezi těmito údaji a životností konstrukce. Potřeby diagnostiky celistvosti materiálu u důležitých a složitých konstrukcí jako jsou kosmické rakety, jaderné reaktory, letadla a pod. urychlují vývoj v tomto směru. Možná, že pro potřeby stanovení zbytkové životnosti konstrukce stojíme dnes před podobným problémem experimentální mechaniky jako stáli naši předkové před 127 lety, když měli změřit něco zcela nového a to napětí v materiálu konstrukce.

Ing. Stanislav Štěpánek, CSc., Ing. Josef Vísner, CSc.

1. DUNAJSKO-ADRIATICKÉ SYMPOSIUM O EXPERIMENTÁLNÍCH METODÁCH V MECHANICE PEVNÉ FÁZE

se koná ve dnech 15. - 17. října 1984 v Stubnických Toplicích (u Záhřebu). Je spolupořádáno Jugoslávskou společností mechaniky (chorvatská sekce), Rakouskou společností EAN (ASESA) a Maďarskou vědecko-technickou společností strojních inženýrů. Na programu symposia mají být příspěvky z následujících tematických okruhů: klasické a nové optické metody, elektronika v exper. mechanice, sběr dat a mikroprocesorování, neklasické problémy a biomechanika, statistická a pravděpodobnostní hlediska hodnocení spolehlivosti, zákony podobnosti v nelineárních problémech. Vědeckými garanty symposia jsou prof. Dr. Ivo Alfirevic, Technická univerzita Záhřeb a Doc. H.P. Rossmanith, Technická univerzita Vídeň. Jednacími jazyky jsou angličtina (přednostně), němčina, maďarština a všechny jugoslávské jazyky. Konferenční poplatek činí 3 500,- dinárů. Nabídka referátů ve formě abstraktu je možno zaslat na adresu jednoho z garantů, např. prof. Alfirevice, Technical University of Zagreb, Dure Sala, Zagreb Yugoslavia, do 31. března 1984. Tamtéž možno zaslat i předběžnou přihlášku účasti.

Experimentální analýza napětí patří k oborům, které jsme si zvykli označovat za hraniční. I když svými cíli a úkoly má těžiště v mechanice, své prostředky obohacuje z jiných fyzikálních oborů a v poslední době s rozšiřujícím se poznáním o hmotných silách na mechanické děje, i z chemie. Svým uplatněním již dávno přesáhla hranice vědeckých laboratoří a stala se užitečnou metodou nejen výzkumu za speciálních podmínek okolí, ale i funkční kontroly a diagnostiky konstrukcí při jejich nasazení a během provozu.

Především bych chtěl vymezit charakter oboru, který je naším předmětem. Často dochází v praxi k neoprávněnému ztotožňování měření nebo metodiky měření s experimentem, s experimentální analýzou. Nechci zde zabíhat do problematiky měření, je to velmi důležitá oblast získávání základních informací o daném objektu, která se - možno říci - instituovala dnes do oboru, který bývá označován jako "měřicí inženýrství". Experiment má však mnohem širší, specifický záběr, jeho zaměřením je zkoumání, získávání informací o celém probíhajícím procesu. Mít na zřeteli toto hledisko v oboru, jako je např. odporová tenzometrie, vyžaduje vidět dál než jen prosté poměrování objektu. Interakci měřicího systému s procesem nutno řídit tak, aby nevedla k záznamu zkreslených dat, nesmyslných, falešných informací, a to vyžaduje postup experimentální.

Dále bych chtěl podtrhnout důležitý aspekt, který znamená v přístupu k oboru experimentální analýzy napětí změnu a který postupně nabývá prvořadé důležitosti. Z tohoto aspektu již sám název oboru je do určité míry archaický, poplatný době svého vzniku a tehdejšímu přístupu k problémům vnitřní reakce těles na vnější namáhání. Tradiční chápání, vycházející v podstatě z pojetí mechanického děje jako statického nebo kvasistatického, definuje dovolené napětí jako veličinu, kterou poměřuje napjatost a pevnost daného objektu v každém jeho bodě při zatížení. Proto se i experimentální metody vesměs soustředily na určení napětí jako cíl svého řešení. Již dnešní, ale zejména budoucí přístup musí respektovat i další parametry, veličiny, účastnící se na celém ději, který je dějem termodynamickým. Především tedy musí tento přístup respektovat všechny parametry cha-

rakterizující alespoň mechanickou energii a její změny, tj. především dynamické efekty s jejich důsledkem - existencí setrvačných sil a obvykle i velkých gradientů sil. Pro takto chápání mechanické ovládání těles a systémů je vedle napětí, resp. síly, rozhodující nejen posunutí, rychlost, ev. zrychlení posunutí, ale i iniciace, kumulace a šíření strukturních poruch, vedoucích v závěrečné fázi ke kolapsu systému. Proto i v experimentální analýze se pozornost musí obracet stále více ke zjišťování vnitřních posunutí, deformací, jejich změn, nespojitostí a poruch celého pole posunutí v důsledku strukturních změn a postupně i na distribuci mechanické energie a jejích přeměn v jiné formy energie v procesu přetváření. Všechny požadavky ukazují, že v experimentální analýze budou preferovány ty metody, které mají schopnost měřit nejen základní, ale i další fyzikální parametry na co nejmenší bázi a registrovat data s co největší rychlostí a přesností.

Předmětem experimentální analýzy není pouze prohlubování znalostí o mechanických dějích, tedy gnozeologická funkce, ale i řešení daných konkrétních technických problémů experimentální cestou, ev. ověřování a kontrola, tedy funkce aplikační. V tomto směru se v poslední době spatřují jako její velký konkurent numerické výpočtové metody, zvláště metoda konečných prvků. Je nesporné, že MKP se prosadila, neboť řeší mnoho inženýrských problémů i při geometrické složitosti konstrukcí a variabilitě zatěžovacích typů iterací na matematických modelech, což vede k úspoře času i nákladů (za předpokladu příslušné počítačové kapacity). Ale euforistické naděje, že vyřeší vše, se ukázaly být daleko od pravdy. Praktická schopnost této cesty je omezena ekonomicky (3-D problémy, nelineární, dynamické - drahé), i schopností uživatele specifikovat problém. Navíc u problémů plasticity, creepu atd. chybí konstitutivní data pro návrh přesných modelů. Přesné řešení neúplného modelu, i když někdy důležité, však problém neřeší. A prakticky jsou nutná četná zjednodušení. Uvažme např., že čím složitější je prvek MKP (~ krychle), tím větší je nárok na praxi při stavbě úlohy: proto se volí zjednodušení řešením pouze ve 2D, často s využitím symetrie. Ale zatížení je obvykle nesymetrické, je tedy nevyhnutelné užití Fourierových řad a superposic (např. využitím St.-Venantova principu řešení prvku bez otvoru příruby nebo inkluze), samostatné řešení příruby a spojení obou řešení. Důle-

žitější omezení však vyplývá často z protichůdných požadavků: např. přesné řešení s modelováním hustoty tepelné energie vyžaduje vyšší hustotu sítě, zatímco řešení napětí v této oblasti by vyžadovalo hustotu nízkou a naopak. Přitom řídká síť je obvykle nepřesná a hustá síť drahá, aniž by ke zvýšení přesnosti podstatně přispívala. Ze zkušenosti je známo, že jinak atraktivní trojúhelníková síť v problémech napětí konverguje slabě, proto je nutná vyšší hustota. Naopak početně výhodný je Suzlový isoparametrický čtyřúhelníkový prvek jak z geometrického tak i z energetického hlediska, ale stavba úlohy je i přes menší počet stupňů volnosti značně pracná. S postupem dalších fyzikálních hledisek se běžné měření stává problematické. Např. pro dynamické úlohy nejsou vesměs známy útlumové charakteristiky předem a nutno postupovat iteračním postupem nebo dosazovat hodnoty získané ze zkoušek. Obdobně je tomu v problémech, kde hraje úlohu tepelný tok a mění se materiálové vlastnosti.

Proto se pozornost často obrací k h y b r i d n í m m e t o d á m , spojujícím dílčí řešení numerické s navazujícím dílčím řešením experimentálním. Takový společný postup při řešení fyzikálních mechanismů je velmi slibný, ekonomicky přijatelný a jeho uplatnění nadějně především v nelineárně dynamických úlohách a úlohách lomové mechaniky za účasti tvárné složky porušení.

Jaká je tedy za těchto skutečností perspektiva experimentálních metod ?

Je jasné, že metody pracující jako analogové nebo v tomto smyslu používané, ztratily na svém významu a jejich uplatnění bude dále klesat. Význam mají, nebo se i dále prohloubí metody poskytující objektivní zdroj informací o studovaném mechanickém ději a respektující integritu různých aspektů při mechanické odezvě materiálů na vnější namáhání. Přitom při řešení inženýrských úloh se jistě uplatní i hybridní postupy.

Charakteristika dalšího rozvoje a vývoje experimentálních metod není prostou 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 a pro snímáče materiálů dnes ještě netušených. Ale experimentátor bude vybaven dneškem, a proto je tak důležité si uvědomit, že experimentátor se vyvíjí, zdokonaluje vstřebáváním ducha své

profese v průběhu práce na experimentech a nikoli jen aplikací toho, co získal výukou.

Klíčové symptomy současného rozpracování experimentálních metod naznačují některé hlavní rysy jejich dalšího rozvoje; nejde o symptomy objektivně stanovené, ale o jejich výběr, který může být subjektivně zabarven přes veškerou opatrnost a uvažování výše uvedených okolností.

V celkovém pohledu se ukazuje, že pronikavý rozvoj zaznamenávají metody, založené na vlastnostech záření, ať již viditelného nebo neviditelného. Nové podněty nabízejí rovněž metody, založené na principu mechanického vlnění, především akustického. Elektrické metody si udržují a zřejmě i zvýrazní svůj význam při měření energetických změn, zejména teplotních a tepelných polí. Naproti tomu metody založené na magnetickém principu postrádají zatím možnost dostatečně jemného měření změn v magnetickém poli a podobným omezením jsou poznamenány i metody kalorimetrické.

Bude tedy vždy záležet na experimentátoru, aby navrhl vhodnou metodu v soulasu s cílem, který se výzkumu ukládá.

Experimentální metody lze v zásadě rozdělit na kontaktní a bezkontaktní. Kontaktní metody, např. tensometrie, měří v diskrétních bodech povrchu. Poskytují tedy omezenou informaci, ale co do změřené hodnoty přesnou a neodvislou od pohybů a deformací jiných částí konstrukcí.

Bezkontaktní metody jsou většinou metodami globálními, poskytujícími informaci z celého pole v záběru měřicího přístroje a jejich výhodou je, že neinterferují s měřeným objektem. Jsou to především optické metody. Tyto metody mají na druhé straně řadu inherentních nedostatků. "Vidí" objekt pouze z omezené množiny pozorovacích bodů a až na výjimky jsou citlivé na všechny pohyby zatěžovaného objektu.

Podle fyzikální podstaty lze možnosti, sféru uplatnění a rozvojové trendy experimentálních metod charakterizovat následovně:

E l e k t r i c k é m e t o d y , především odporová tenzometrie, se zdají, že vyčerpaly své principiální rozvojové možnosti. Přesto zbývají nevyužité možnosti indukčního, ale spíše kapacitního principu s ohledem na měření "bodová", tj. velmi malého rozměru. Přitom nadále zůstávají přitažlivé jejich nesporné výhody, tj. dálkové ovládání a měření na skrytých místech,

a zejména poskytování jednoduchého signálu, snadno digitálně zpracovatelného. Kromě toho budou poskytovat nadále významnou službu při řešení problémů dynamických, zvláště vibrací.

Renesanci svého použití prožívají a rozsáhlé možnosti do budoucna naznačují metody optické.

Je to především fotoelasticimetrie, která přes nutnost práce s modely zůstává metodou relevantní. Její předností je získání žádané informace o celém pozorovaném objektu, poměrně nenákladná realizace i provoz, schopnost (optických metod vůbec) měřit s minimální délkou báze, tj. délkou vlny a konečně i praktická nezávislost na relativních pohybech mezi modelem a analyzátorovou optikou. Je schopna bez zvláštních obtíží realizovat nejen statické, ale i dynamické děje, včetně tlumení, i procesy nelineární. Pro techniku povrchových dvojlomných folií platí stejné hodnocení jako pro jiné metody povrchových měření, o nichž bude zmínka dále.

Současný její rozvoj možno charakterizovat čtyřmi směry:

- první směr sleduje vypracování metod měření absolutního fázového posunutí dvojlomných paprsků. Byla již vypracována řada technik tohoto měření, založená vesměs na modulaci optického signálu, např. rotujícím analyzátozem [1,2] (modulační techniky vůbec rozšiřují své uplatnění při měření dějů vyhovujících undulačním teoriím, jde o jakousi obdobu heterodynních technik v optice). Takto zpracovaná optická informace má výhodu nejen snadného digitálního zpracování, ale nabízí i možnost úplnější analýzy dvojlomu, která by byla schopná vyhodnocovat nezávisle dvojlom napětový a dvojlom vyvolaný deformací a oprostila tak metodu závislosti na předpokladech o vztahu napětí a deformace, potřebných zatím při vyhodnocování.

- druhý směr se orientuje na automatizaci ftel. měření a vyhodnocování. Dosud realizované techniky trpí omezením na měření v diskretních bodech a zpracování měření podle přijaté teorie [3]. Piezzo-optické měření dvojlomu umožňuje zde měření rozdílu fázového posunu až na $0.5 \cdot 10^{-6}$ a měření úhlů na 10^{-4} [4]. Skutečným přínosem by byly automatizované holotabulární metody, které zatím neskýtají efekt adekvátní vynaloženým nákladům na přístrojovou techniku. Dosavadní principy zejména neumožňují jednoduššími prostředky provádět měření při uvažování časových závislostí, zvláště rychlých dynamických dějů.

- třetí směr se soustřeďuje na řešení technik prostorového vyhodnocování. Jsou vesměs založeny na Tyndallově efektu a většina z dosud realizovaných je schopna jen měření v diskretních bodech. Významným přínosem jsou práce skupiny Lagardovy a skupiny Robertovy, které odvodily principy a postavily aparatury pro globální měření na prostorových modelech užitím technik vycházejících z představy ftel. modelu jako sekvence tenkých dvojlomných vrstev, přičemž k vyhodnocení se používá vztahů, uvažujících kompenzaci příspěvku mezi povrchem a měřeným bodem odvozením vztahů pro zpožďovací efekt tzv. "tlustého media" [5].

Mimořádným přínosem v těchto technikách se jeví holotabulární metoda, vypracovaná skupinou Lagardovou, tzv. metoda optického rozřezávání [6]. Umožňuje prostřednictvím specklové interference vyhodnocovat na tenké vrstvě modelu, vymezené dvěma sousedními paprsky laseru, obdobným způsobem jako při zmrazovací metodě. Zatím trpí tato nadějná metoda nízkým kontrastem pruhů, který je uvažován zvýšit použitím polychromatického laseru, zlepšujícím poměr mezi signálem a šumem.

- konečně čtvrtý, nikoli však nejméně významný směr, je orientován na zdokonalení modelů, aby odpovídaly reálným materiálovým strukturám. Jde o modelové vyjádření variací mechanických vlastností, a to nejen pro postižení nelineárního chování klasických konstrukčních materiálů, ale zejména materiálů moderních a kompozitních [7,14].

Metoda moiré (mechan. interference) je druhou rozšířenou optickou metodou. Znamená jistý pokus o umožnění optických měření posunutí na dálku. I když vzhledem k nanášení a superpozici rastrů jde o metodu částečně kontaktní, její necitlivost na příčná posunutí mezi měřícím elementem a objektem ji činí metodou v podstatě bezkontaktní.

Je však zatížena některými inherentními nevýhodami:

- nižší citlivost, v závislosti na jemnosti mřížky (20 um krok), což však lze zlepšit násobící technikou nebo elektronickým zpracováním informace;
- pouze omezenou plochu objektu lze vyšetřovat v daném čase (real time);
- povrch objektu musí být rovný, nezborcený, jinak vznikají chyby, pokud není použit telecentrický čočkový systém. Tím však není vyloučeno její použití na měření velkých objektů i s velkými deformacemi. Fotografickou technikou, navrženou Burchem a For-

nou [8], používající hrubou mřížku a modifikaci čoček šterbinovou aparaturou irisového typu, lze vyladit prostorovou frekvencí mřížky a zaručit velkou hloubku ohniska. Zobrazování difrakční technikou dovoluje měřit deformace řádu 10^{-5} šířky zobrazovaného objektu. Jiná technika rozšiřuje použití metody do oblastí vysokých teplot (do 600°C) užitím jemných šablon z odrazného kovového materiálu na objektu.

Téměř ideální splnění požadavků představují metody koherentního světla, především holografické interferometrie. Protože laserové světlo jako koherentní zdroj splňuje podmínku přesné geometrické relace mezi fází paprsku a příslušnými body jeho dráhy, může tato metoda zaznamenat efekt posunutí v daném okamžiku v každém viditelném bodě trojrozměrného objektu s přesností vlnové délky. Ve specifických případech může skutečně tato metoda využít svých teoretických možností, ale zcela obecně má jistá omezení.

- Technologické omezení dané záznamovým procesem: fotogr. desky mají jen určitou citlivost a dlouhé expozice znamenají vnášení chyb z nestability okolí. Tomu lze čelit užitím intenzivních pulzních laserů, ale za cenu značných nákladů a nutnosti specializované obsluhy.

- Různá citlivost signálu vzhledem ke směru deformace. Holografická interferometrie měří přednostně pohyby z roviny. Odvození deformací v roviny vyžaduje pak vytváření rozšířeného hologramu nebo násobný hologram, což techniku komplikuje a znevýhodňuje časově závislé děje.

Vedle toho představuje komplexnost procesu odečítání pruhů a vyhodnocování jisté omezení pro větší rozšíření této metody. Samotný údaj hodnotový však může být odečten s velkou přesností především užitím heterodynových metod, které nevnašejí systematickou chybu jako aparatury čočkové.

Další rozvoj metody je možno očekávat v rozpracování cest automatizace vyhodnocovacího procesu.

K holografickým metodám patří i fotoelastická holografie [15] využívající skutečnosti, že paprsek z laserového světelného zdroje je polarizovaný. Ve své podstatě nepřináší více než jen alternativu k fotoelasticimetrickým technikám klasickým. Nelze však vyloučit, že se uplatní v budoucích univerzálních aparaturách s automatickým vyhodnocováním obrazu umožňujícím spojit ně-

kolik různých metod do jediné komplexní sestavy. Obdobně i holografické moiré je metodou, která principiálně nepřináší žádnou změnu. Její výhodou je zvýšená hustota poskytované informace a tím zvýšení přesnosti, ale zejména užitím techniky daného času schopnost eliminovat celkové pohyby objektu a řídit lokalizaci pruhů, což zvyšuje její použitelnost [16].

Specklová metrologie, zahrnující specklovou fotografii a specklovou interferometrii. Specklová fotografie je charakterizována nespornou výhodou, kterou je oproštění od referenčního paprsku, nutného v holografii, užitím zobrazovací čočky pro záznam kódovaných vln laserového světla, rozptýlených povrchem objektu. Vyhodnocování posunutí se pak děje korelací poloh zaznamenaného specklového obrazu opticky. Není to tedy metoda interferenční a proto také není zatížena požadavky na stabilitu a může být použita i mimo laboratoř. Přitom citlivost na deformaci v rovině zůstává vysoká a měření se může provádět v rozsáhlé oblasti povrchu objektu. Je poněkud méně citlivá než holografie a zobrazovací systém může vnášet systematickou chybu (aberraci), vedoucí za určitých podmínek i k chybě v měření deformací.

Nevýhodou jsou i zde dlouhé expozice a navíc nemožnost provádět vyšetřování v daném čase. Jistým přínosem je vyvinutí automatického systému pro vyhodnocování speckle-fotografií.

Specklová interferometrie umožňuje vztažení interferometrie povrchů objektů s elektronickým odečítáním a TV zobrazováním [10]. Zobrazovací čočka malé apertury generuje hrubý specklový obraz, který je modulován referenčním paprskem (in-line). Povrchová deformace se objevuje na stínítku jako pruhový obraz získaný korekcí specklu s původně zaznamenaným obrazem. Systém může pracovat v daném čase a toleruje poměrně velké disturbance prostředí v důsledku své krátké doby odezvy. Obdobně jako holografie je i tento systém citlivý pouze na jeden deformační vektor v daném čase. Modifikací s dvojitém osvětlením lze však docílit, že tento vektor leží v rovině a dovoluje tak vyšetřování rovinných deformací.

Nevýhodou této metody jsou velké pořizovací náklady a potřeba vysoké intenzity laserového světla a dále i nízká rozlišovací schopnost pruhů. Tato nevýhoda se však odstraňuje tím, že optickou informací se sytí přímo zařízení pro její zpraco-

vání a vyhodnocování provádí počítač.

Mezi optickými metodami zaslouží připomenout i metody fotogrametrické, které se široce uplatňují při vyšetřování drobně strukturních objektů a jejich zpracování automatickou cestou, jako je tomu při vyšetřování stereologických, v densitronu a obdobných aparaturách.

Další oblastí metod, které jsou v prudkém rozvoji, jsou metody akustické (převážně ultrazvukové). Akustická emise je metodou, která zatím nevyčerpala své možnosti ani po stránce poskytování informací, ani materiálové. Její informace zůstávají informacemi kvalitními, pokud odhlédneme od integrálního efektu, schopného jisté kvantifikace. Proto dosud nalézá převážně své uplatnění jako metoda defektoskopická.

Aktuálním problémem je rozšíření jejího uplatnění na materiály s vyššími útlumovými účinky, především na bázi plastmas [11].

Stejná omezení se vztahují na metody ultrazvukové vůbec, kde překročit mez kvalitativní informace je obvykle ještě nesnadnější a uplatnění proto zůstává v oblasti defektoskopie.

Velmi podnětným přínosem v těchto metodách je akustická polarometrie. Svým charakterem připomíná fotoelasticimetrii. Ultrazvuková vlna je do objektu vysílána jako smyková, polarizovaná, s polarizační osou rotující úhl. rychlostí Ω . Po průchodu objektem je přijímána detektorem a vyhodnocováno její fázové zpoždění, jakož i úhlové natočení. Elastoakustický efekt, objevující se v objektu po zatížení jako optický dvojlom, je přímo vázán na elipticitu prošlé akustické vlny. Nevzniká však dvojlom, a informace musí být získávána porovnáním vyslané a přijaté vlny. Orientace rychlé osy polarizované vlny a fázový rozdíl jsou vázány na lokální orientaci napětí a na maximální smykové napětí.

Metoda byla autory (ze skupiny vedené Robertem) realizována postavením jednak přístroje na průchod vlny, jednak ale též přístroje pracujícího s reflexní vlnou, což je uspořádání mobilnější [12]. Velikost takového snímače je válec $\varnothing$ 28 a délky 55 mm, s dvěma keramickými polarizovanými zkříženými transduktory velikosti 5 x 6 x 0.6 mm. Signál je snímán elektricky a zpracováván určitou heterodynní technikou. Měření má přesnost

1° při určování orientace a $\pm 0.2^\circ$ při určování fázového rozdílu. Komerčně firmou Ultrasonic Analysis Inc. vyráběná aparatura měří jak povrchová zbytková napětí do hloubek 0,4 - 3,2 mm s přesností (různou pro různý materiál) lepší než 7 MPa.

Slabinou metody zatím zůstává nedostatečné propracování elastoakustického efektu, tj. materiálových parametrů ve vztahu akustického efektu a deviátoru napětí, případně dalších veličin.

Velkou přesností této metody je, že otevírá novou možnost měření napětí a deformací (zatím jen přímo na kovech) a to nejen z dočasného namáhání, ale především počátečních a zbytkových napětí, pro které jiné nedestruktivní metody poskytují informace jen velmi omezené.

Mezi metodami reálného použití nutno zmínit i termické. Nabízí se především metoda termovize (s videokamerou), která však zatím zůstává kvalitativní metodou a i co do kvantitativní informace o dosažených teplotách je pro potřeby experimentální analýzy nepříteli citlivá.

Metoda tepelné emise (IČ termografie) je příbuzná, ale ve svých prostředcích méně efektní, zato přiměřenější potřebám analýzy. Vychází z integrity různých aspektů mechanické odezvy materiálů na zatížení, svůj zájem však soustřeďuje na vztah tepelné emise a vzniklého napětí. I když tento fyzikální efekt je znám 150 let, teprve současná přístrojová technika umožňuje její racionální aplikaci. Dřívější použití měla nevýhodu v kontaktním snímání, byla pomalá a poskytovala jen bodovou informaci.

Experimenty realizované novou metodou [13] využívají pouze komerčně dosažitelných aparatur, tj. skanovací zařízení pro infračervené světlo v daném čase. Spočívá na použití vnějšího tepelného zdroje (zahřívání nebo ochlazování) a tepelného toku objektem. Variace tohoto toku jsou způsobovány lokálními poruchami, vyvolávajícími tepelné gradienty, které se zviditelní termografickou kamerou. (Jde tedy o pasivní techniku, oproti aktivním technikám, využívajícím zdroj mechanické energie působící na objekt a měřící jeho část transformovanou v teplo. Tyto techniky vyžadují však pro interpretaci složitější fyzikální i matematické modely, u kterých zatím zůstává mnoho nejasného).

Metoda je holotabulární, poskytuje vizuální obrazy isoterm po celém povrchu objektu; jejich hodnota se určuje kalibrací.

Tepelná emise, vztahující se k napětí, je zde uvažována jako hlavní forma energie, přeměněné z mechanické. Pro interpretaci vztahu pozorovaného tepelného jevu a mechanického efektu jsou zapotřebí fyzikální modely. Zatím byly uvažovány iniciace a šíření poškození během zatěžování, vnitřní tření, viskoelasticita, termoelasticita. Propracování vyžaduje parametrická závislost napětí z tepelné emise na proměnných, jako je velikost poškozené zóny, tepelná vodivost, délka vlny, materiálová nehomogenita a další.

Výhodou je možnost použití in situ, nevýhodou zatím zůstává omezená citlivost, závislá mj. i na tepelné vodivosti vyšetřovaného materiálu. Pro běžné videokamery, schopné rozlišit 150 čar na $\varnothing$ 50 mm, to znamená rozlišovací schopnost 1.5 čarových párů/mm.

Závěrem ještě alespoň stručná zmínka o metodách rentgenografických.

V současné době zatím nepředstavují velkou oblast použití a své uplatnění nalézají hlavně v kvalitativních vyšetřovacích defektoskopických.

Příznak jejich budoucího významného uplatnění však představuje objektová tomografie, která je dosud v počátcích svého vývoje v oblasti inženýrského použití. Nejnovější práce v tomto směru se soustřeďují na propracování jejího použití v kvantitativních měřeních posunutí uvnitř objektů z konstrukčních materiálů a jejich výsledky jsou velmi slibné.

Tento stručný přehled o experimentálních metodách analýzy napětí a přetvoření charakterizuje jejich současný stav a náznaky dalšího rozvoje. Perspektiva těchto úvah zahrnuje zhruba příštích 10 let, prognóza dalšího vývoje by měla příliš spekulativní charakter, neboť, jak již v úvodu bylo zmíněno, tyto metody se vyvíjejí za významné účasti zpětné vazby (uživatelské). Novými možnostmi však neztrácejí na významu stávající, avšak zdokonalené metody; pozmění se jistě intenzita jejich použití ve prospěch metod progresivnějších. Prostředky, vkládané dnes do rozpracování těchto nových metod, nejsou v žádném případě samostatný přepych, ale nutnost, která přinese v pravý čas nesporný užitek; tato skutečnost by se neměla ztrácet ze zřetele.

LITERATURA:

- [1] A.Lagarde, Symp. IUTAM Optical Methods in Mechanics of Solids, 1979, 1-40; [2] A.Robert, J.Royer, J. Optics (Paris) 10, 1979, 219-229; [3] A.Robert, J.Royer, Sciences et techniques de l'armement, 52, 1978, sv. 3, 467-489; [4] S.Redner, Experimental Mechanics, 14 (1974) 486-491; 16 (1976) 221-225; [5] A.Robert, J.Royer, Sborník 20.čs.konference EAN, Karlovy Vary, 1982; [6] R.Desailly, A.Lagarde, C.R.Acad.Sc. (Paris) 10. janv. 1977, t. 284, série B; [7] J.Javornický, Proc. 4th Int. Conf. Exper. Stress Analysis, Cambridge, 1970, 39-46; [8] J.M.Burch, C.Forno, Opt. Engineering, 14 (1975), 178-184; [9] N.Abramson Proc. Symp. "The Engineering Uses of Coherent Optics", Glasgow 1975, Univ. Press 1976, 631-645; [10] J.C.Dainty, Laser speckle and related phenomena, Springer-Verlag, Berlín 1975; [11] M.G.Light, A.Singh, T.Rudwick, Material Evaluations, 40, (1982), 783-790; [12] J.Rouge, A.Robert, Y.Le Corre, Proc. Ultrasonic Symp., Phoenix, Arizona, Oct. 26-28, 1977; [13] K.L.Reifsnider, E.C.Henneke, Proc. Int. Conf. on Therm. Stresses in Materials and Structures in Severe Thermal Environ., Blackburg 1980, Plenum Press, 1980, 709-726; [14] R.Prabhakaran, Optical Engineering, 21 (1982), 679-688; [15] R.J.Sanford, Optical Engineering, 21 (1982), 489-495; [16] C.A.Sciammarella, P.K.Rastogi, P.Jacquot, R.Narayanan, Exp. Mechanics, 22 (1982), 52-63.

Doc. Ing. Jan Javornický, DrSc.

INFORMACE EAN

Konference EAN

pracovníků z podunajských zemí se koná v říjnu 1984 ve Varaždíně (Jugoslávie). Bližší údaje sdělí Prof. Dr. Ing. S. Jecić, TU Zagreb, Faculty of Mechanical and Ship-building Engineering, Chair of Mechanics and Strength, 41000 Zagreb, Kačićeva 24.

8. GESA- Symposium

se koná ve dnech 14. - 15. května 1984 v Duisburgu. Informace VDI/VDE-Gesellschaft Mess. und Regelungstechnik, Postfach 1139, D-4000 Düsseldorf 1.

Sborník 7. GESA-Symposia (Schliersee 1983)

vyšel jako č. 480 periodika VDI-Berichte, v rozsahu 216 stran (A 4). Distribuce: VDI-Verlag, Postfach 1139, D-4 Düsseldorf 1. Cena asi 140,- DM.



6. října 1983 se dožil významného životního jubilea nestor československých fyziků, dlouholetý profesor fyziky na ČVUT, RNDr. Zdeněk Horák, DrSc. Narodil se 6. října 1898 v Praze, vystudoval reálné gymnázium a filosofickou fakultu University Karlovy. Ještě před ukončením studia v r. 1920 nastoupil místo asistenta na ČVUT a pedagogické práci zůstal věrný 50 roků, až do svého odchodu do důchodu v r. 1970. Akademické hodnosti doktora přírodních věd dosáhl po složení rigorosních zkoušek v r. 1923 na základě di-

sertační práce "Princip energie a rovnice fyziky".

Významným obdobím v životě prof. Horáka byla léta 1928 až 1930. Do tohoto období spadá jeho studijní pobyt na Sorboně a publikace jeho práce "O anholonomních systémech". V uvedené práci prof. Horák poprvé vůbec definoval pojem anholonomních systémů (tj. systémů s neintegrabilními vazbami), nezávisle na francouzském badateli Vranceanu, který je - neprávem - považován za objevitele tohoto pojmu, i když priorita objevu chronologicky náleží prof. Horákovi. Na základě uvedené práce se Horák habilitoval jako soukromý docent ČVUT a stal se spolupracovníkem prof. Nachtikala.

V období uzavření českých vysokých škol nacistickými okupanty působil prof. Horák jako vědecký pracovník ve Státním radiologickém ústavu v Praze. Po osvobození naší vlasti byl jmenován řádným profesorem fyziky, přednostou Ústavu technické fyziky a po r. 1954 vedoucím katedry fyziky strojní fakulty ČVUT.

Je nemožné, v tomto krátkém článku počít přehled vědeckého díla prof. Horáka, které čítá 133 původních prací! Jeho činnost zasahovala - a dodnes zasahuje - do všech odvětví fyziky, což je

v současném období úzké specializace zcela mimořádným zjevem. Jako členové Čs. společnosti pro mechaniku při ČSAV se proto zmíníme především o jeho pracích z oboru mechaniky.

V oblasti teoretické mechaniky je pro prof. Horáka typická snaha o spojení klasické mechaniky s mechanikou relativistickou event. kvantovou. Tak např. na základě studia dynamiky mechanických systémů v obecných neholonomních souřadnicích dospěl k invariantnímu tvaru základních rovnic mechaniky, platným pro libovolné prostoročasové souřadnice. Aplikace těchto principů na kvantovou mechaniku vedla prof. Horáka k zobecnění Schrödingery vlnové rovnice pro neholonomní systémy.

Významné místo v díle prof. Horáka zaujímá studium dynamiky rázu drsných těles. Podařilo se mu teoreticky objasnit chování těles při tzv. vrtném rázu a tyto poznatky experimentálně ověřit. Studium těchto otázek vedlo prof. Horáka k zobecnění Hertzovy teorie rázu pro drsná a nedokonale pružná tělesa. V souvislosti s těmito otázkami se zabýval rovněž kontaktní úlohou drsných elastických těles v práci "Teorie vrtného tření a její experimentální ověření".

Další odvětví jeho činnosti se týká oblasti praktické a experimentální fyziky. Sem patří práce z oblasti fyzikálních měření a teorie chyb, která vedla prof. Horáka k návrhu nové metody pro vyhodnocování fyzikálních měření - tzv. metody skupinové, která je v praxi snadnější než metoda nejmenších čtverců, vede však téměř ke stejné přesným výsledkům. Svoje poznatky a dlouholeté zkušenosti z oblasti fyzikálních měření shrnul ve své monografii "Praktická fyzika", jež vyšla v několika vydáních a je naší technické veřejnosti velmi dobře známa.

Nechceme se na tomto místě šířit o vynikajících pracích prof. Horáka v oblasti elektrodynamiky, elektromagnetismu, speciální a obecné teorie relativity a relativistické kosmologie. Je však třeba se zmínit o jeho výzkumech z posledních let, které objasnily souvislost Machova principu s obecnou teorií relativity. Tyto práce jsou zvláště významné pro mechaniku, neboť objasňují faktický původ setrvačných sil, které jsou dle prof. Horáka jen výsledkem dynamického působení vzdálených nebeských těles. Bližší podrobnosti o těchto výzkumech byly již publikovány v tomto časopise v č.3/1981.

V posledních letech studoval prof. Horák význam kosmických neutrin v teorii gravitace a dospěl k zobecnění Archimédova zákona a modifikovanému gravitačnímu zákonu. Ukázal, že vliv prostředí na

gravitační interakci makroskopických těles se konkrétně uplatňuje při nejnovějších měřeních gravitační konstanty a vede k opravě hodnoty hmotnosti Země. Bližší vysvětlení najde čtenář v následujícím příspěvku.

Není možné se na tomto místě nezmínit o literární a publikační činnosti prof. Horáka, zejména pokud jde o učebnice a technické příručky. Z řady knih, které sepsal buď sám, nebo se svými spolupracovníky, zaslouží zvláštní ocenění zejména "Základy technické fyziky" a hlavně encyklopedické dílo "Technická fyzika" z roku 1960, které je možno označit jako fundamentální v čs. vědeckotechnické literatuře. Jmenované publikace se vyznačují srozumitelným, avšak velmi přesným a zasvěceným výkladem základních pojmů a slouží proto dodnes jak odborníkům, tak i studentům a nejširší technické veřejnosti. V této publikační činnosti prof. Horák přes pokročilý věk stále úspěšně pokračuje, takže např. v minulém roce vyšla jeho "Fyzika" v dalším vydání.

Prof. Horák je nositelem Řádu práce a četných dalších vyznamenání a členem mnoha vědeckých společností našich i zahraničních.

Čs. společnost pro mechaniku se připojuje k ostatním blahopřáním, kterých se jubilantovi dostává, aby se mohl ještě dlouhá léta těšit z výsledků své práce.

Předsednictvo Společnosti

GRAVITAČNÍ INTERAKCE TĚLES V TEKUTÉM PROSTŘEDÍ

V klasické fyzice platí Newtonův gravitační zákon pro každé dvě částice bez ohledu na přítomnost dalších částic. To znamená, že pro gravitační síly platí princip superpozice: síly působící na jednu částici od všech ostatních částic se vektorově skládají. Podle obecné teorie relativity platí princip dostatečně přesně pro slabá pole těles při rychlostech malých proti rychlosti světla.

Přesnými pokusy bylo prokázáno, že hmota vložená mezi tělesa nemá vliv na jejich vzájemnou interakci. Z toho se usuzuje, že gravitační konstanta je nezávislá na prostředí a že platí v prostředí stejný gravitační zákon jako ve vakuu. To však neznamená, že tělesa obklopená prostředím podléhají v gravitačním poli stejným silám jako ve vakuu, protože na výsledném silovém působení se podílí také prostředí jednak svým vlastním gravitačním polem jednak hydrostatickými silami, které vznikají v prostředí vlivem vnějšího gravitačního pole. To je v souladu s Archimédovým zákonem, který platí dosti přesně pro tělesa v tíhovém poli zemském, proti němuž je gravitační pole prostředí mizivě slabé.

Problém vlivu prostředí na gravitační pole makroskopických těles je snadno řešitelný v případě homogenní koule ponořené do nekonečné homogenní tekutiny. Před ponořením koule je totiž gravitační pole tekutiny v celém prostoru nulové a proto je výsledné pole všude vně koule stejné, jako kdyby koule byla ve vakuu a měla hmotnost zmenšenou o hmotnost vytlačené tekutiny. Nazveme-li tuto zmenšenou hmotnost zdánlivou hmotností ponořené koule, můžeme říci, že její pole je v tekutině stejné jako pole koule se zdánlivou hmotností ve vakuu. Úvaha obdobná té, kterou se obvykle dokazuje platnost klasického Archimédova zákona, vede k větě obrácené: Homogenní koule ponořená do nekonečné homogenní tekutiny podléhá v gravitačním poli stejné síle, jako kdyby byla ve vakuu a měla zdánlivou hmotnost. Z obou těchto vět plyne pak tento zobecněný gravitační zákon:

Dvě homogenní koule ponořené do nekonečné homogenní tekutiny se přitahují silou

$$F = k \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (1)$$

kde r je vzdálenost mezi středy koulí, m_1 a m_2 jejich zdánlivé hmotnosti a k značí Newtonovu gravitační konstantu.

Zdánlivá hmotnost koule ponořené do hustší tekutiny je ovšem záporná a koule s opačnými zdánlivými hmotnostmi se podle (1) přitahují zápornou silou a tedy se odpuzují.

Rovnice (1) platí přesně vzato jen pro koule v nekonečné tekutině, lze jí však užít i v dalším důležitém případě. Gravitační pole homogenní tekutiny rozložené souměrně kolem středu (nebo osy) symetrie je totiž ve středu (nebo v ose) symetrie nulové, takže platí tyto dva teoremy:

(a) Homogenní koule ponořená do homogenní tekutiny vzbuzuje, ve středu nebo na ose symetrie plochy ohraničující tekutinu, stejné gravitační pole, jaké by budila ve vakuu koule se zdánlivou hmotností.

(b) Homogenní koule ponořená do homogenní tekutiny, rozložené středově nebo osově symetricky kolem ní, podléhá v gravitačním poli stejné síle, jaké by podléhala ve vakuu koule se zdánlivou hmotností.

Spojením teoremů (a) a (b) plyne, že rovnice (1) platí také pro sílu, které koule K_1 , obklopená homogenní tekutinou rozloženou středově nebo osově symetricky kolem ní, podléhá v gravitačním poli koule K_2 umístěné kdekoli v (obecně jiné) homogenní tekutině rozložené se stejnou symetrií kolem koule K_1 . Zdánlivá hmotnost každé koule je rovna její skutečné hmotnosti zmenšené o hmotnost jí vytlačené tekutiny.

Rovnici (1) vyjadřující zobecněný gravitační zákon jsem uvedl již na 6. a 7. konferenci čs. fyziků v letech 1979 a 1981. Lze ji také pokládat za zobecnění Archimédova zákona, který se dosud aplikuje výhradně na tíhové pole zemské, v němž platí s velkou přesností pro těleso ponořené do tekutiny libovolných rozměrů, protože intenzita vlastního gravitačního pole tekutiny je mizivě malá proti tíhovému zrychlení.

Zobecněný gravitační zákon (1) nabyl praktického významu v r. 1981, kdy Luther a Towler provedli v National Bureau of Standards ve Washingtonu nové měření gravitační konstanty. Měřili dobu kyvu torzního kyvadla, zavěšeného ve vzduchoprázdňém svislém válci v gravitačním poli dvou wolframových koulí, které přiložili ke koncům kyvadla v jeho rovnovážné poloze. Koule byly vně vyčerpáného válce a okolní vzduch tedy zeslaboval jejich gravitační sílu úměrně jejich zdánlivým hmotnostem, menším než skutečné v poměru

$$1 - \frac{1,2}{19000} \sim (1 - 6,3 \cdot 10^{-5}).$$

Proto bylo třeba hodnotu gravitační konstanty vypočtené z Newtonova zákona platného ve vakuu zvětšit v poměru

$$1 + 6,3 \cdot 10^{-5}$$

Ačkoli Luther a Towler ve zprávě uveřejněné v lednu 1982 ve Physical Review Letters se o této opravě vůbec nezmiňují, ujistili mne na můj dotaz, že oprava na vakuum je už započtena v hodnotě

$$k = (6,6726 \pm 0,0005) 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1} \quad (2)$$

kteřou publikovali. Touto opravou vzrostla střední hodnota gravitační konstanty o 84% standardní odchylky měření, takže bylo nutné přihlížet k vlivu okolního vzduchu na gravitační pole koulí.

Zobecněný gravitační zákon (1) nebyl dosud experimentálně ověřen; lze však očekávat, že se to podaří vhodně upravenou metodou torzního kyvadla. Stačilo by obklopit kyvadlo dutou válcovou nádobou a měřit dobu kyvu s dvěma koulemi v prázdné nádobě a s koulemi v nádobě naplněné nějakou kapalinou. Zdánlivé hmotnosti železných koulí ve vodě jsou skoro o 13% menší než ve vzduchu.

Kdybychom železné koule ponořili do rtuti, měly by jejich zdánlivé hmotnosti záporné hodnoty o 28,5% menší než ve vzduchu. Proto by kyvadlo od spojnice svých středů odchylovalo, takže by kývalo kolem polohy kolmé k této spojnici.

Vliv prostředí na gravitační pole tělesa má obdobnou příčinu jako vliv dielektrika na elektrické pole nabitých těles. Vložením tělesa do tekutiny se totiž změnilo rozložení hmotnosti tekutiny v prostoru podobně jako vložení nabitého tělesa do dielektrika se změnilo rozložení jeho nábojů: dielektrikum se polarizuje. Pole v prostředí plyne v obou případech ze zákonů platných ve vakuu, bereme-li v úvahu kromě ponořených těles také prostředí s dutinami a počítáme-li nejen s volnými náboji ale i s vázanými náboji polarizačními.

Prof. RNDr. Zdeněk Horák, DrSc.

Československá společnost pro mechaniku při ČSAV pořádala dne 22.6.1983 v přednáškové síni ÚTAM ČSAV v Praze technický seminář o některých problémech tribologie a tribotechniky strojních konstrukcí, zaměřený zejména na teorii a praxi kluzných ložisek spalovacích motorů. Na semináři bylo předneseno pět referátů předních odborníků z výzkumných a výrobních organizací, seznamujících přítomné se současným stavem poznání a s aktuálními problémy v tomto oboru.

V úvodu semináře zdůraznil jeho význam předsedající doc.Ing.

J. Valenta, DrSc., člen korespondent ČSAV

Ing.M.Vocel,CSc. ve svém příspěvku "Některé problémy tribologie v technice" poukázal na skutečnost, že v důsledku nevládnutí tribotechnických problémů dochází u nás ročně ke ztrátám ve výši 5 až 10 miliard Kčs, z čehož připadá značné procento na odstranění poruch, údržbu a na výrobu náhradních dílů v důsledku jejich nízké životnosti a rychlému opotřebování. Mnoho by bylo možno ušetřit na investicích a na nákladech za energii, paliva a maziva. Na příkladech opotřebování mlýnů, ztrát v pivovarnictví a při těžbě a rozrušování zemin ukázal význam snížení tření a opotřebení kluzných uzlů a pracovních ploch. Naznačil některé cesty sledované u nás i v zahraničí, zejména v SSSR, na omezení těchto ztrát (poznatky o selektivním přenosu materiálu s minimálním třením a opotřebením, mazání glycerinem a jiné). Problémem nadále zůstává objektivní určení mezních hranic opotřebení z hlediska spolehlivosti konstrukcí a ekonomie výroby i provozu.

Ing.J.Nezval,CSc. z SVÚSS Praha se zaměřil ve svém referátě "Základní teoretické problémy mazání kluzných ložisek" na kritický rozbor současného teoretického přístupu k řešení hydrodynamiky kluzných ložisek, vyžadujícího pro možnost praktické aplikace značná zjednodušení. Poukázal na potřebu neizotermického řešení na základě energetické rovnováhy a na nutnost úzké spolupráce matematiků a fyziků pro zvládnutí náročné problematiky. Zabýval se mezemi stability rotorů na kluzných ložiskách s ohledem na jejich anizotropnost a na vznik samobuzených kmitů. Nedocenění těchto problémů vedlo v praxi již k řadě havárií. Poukázal na skutečnost, že v případě vzniku turbulentního proudění v ložiskách rychloběžných strojů vzrůstají ztráty třením více než o řád. Nový pohled se uplatňuje i na oblast proudění při nižších Rey-

noldsových číslech (Taylorovo proudění - $Re = 1200$ až 1400) a na vznik vírů i při nižších rychlostech (dolní mez hydrodynamické stability). V současné době však ještě není dostatek teoretických podkladů pro praktická řešení a je třeba používat poloempirických vztahů. Filozofie zaměření v oblasti teorie kluzných ložisek, zejména rychloběžných, je však známá a její postupné prosazování do výzkumných programů je opodstatněné. Cílem je dosažení stabilního provozu náročných energetických celků při současné minimalizaci třecích ztrát v jejich ložiskových uzlech.

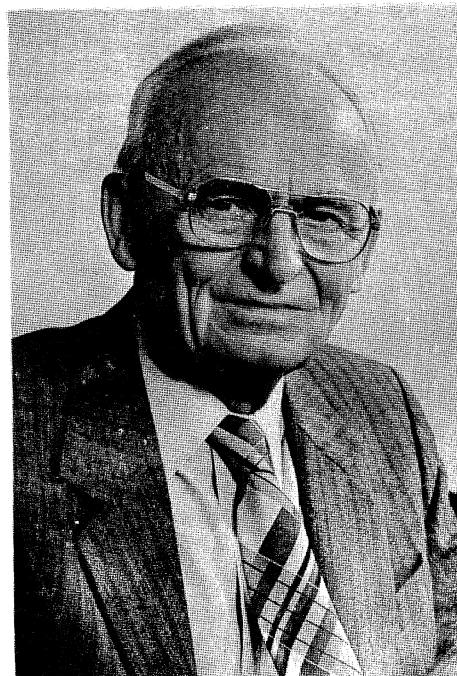
Ing.V.Oliva,CSc. z ČVUT-FJFI Praha v referátě "Mikroskopický obraz povrchu kluzných ložisek" informoval o výsledcích některých materiálových rozborů a šetření poruch kluzných ložisek spalovacích motorů, zejména se zaměřením na studium únavových procesů. Na rozbořech napjatosti na výstelce ložiskových kovů ozřejmil podmínky pro vznik únavových trhlin v povrchových i podpovrchových vrstvách. Únavový proces je charakterizován u kluzných ložisek převážně rozvojem složité prostorové sítě mikrotrhlin v souvislosti s nehomogenní strukturou ložiskového kovu, bez výrazné přednostní orientace. V některých případech však mohou ve výstelce vzniknout i značná tahová pnutí, podporující vznik a rozvoj magistralních únavových trhlin (při velkém gradientu hydrodynamického tlaku na hranicích zatížené zóny). Na snímcích z elektronového mikroskopu ukázal příklady poruch a některé další zajímavé a typické morfologie porušených povrchů (adheze, abraze, kavitace). Tato systematická šetření významně přispěla k poznání procesů poškozování ložisek v praxi a k určení vhodných nápravných opatření (např. zkvalitnění povrchu čepů).

Ing.E.Fašung z výrobního závodu ZVL Dolný Kubín seznámil přítomné v referátě "Výzkum, vývoj a výroba kluzných ložisek v ZVL Dolný Kubín" s historií výroby tenkostěnných ložiskových pánví a pouzder v uvedeném závodě, která započala zavedením licence Glacier v roce 1965 a dále se rozvíjela i vlastními cestami. Závod věnuje velkou pozornost vývoji moderních vícevrstvých ložisek na bazi olověných bronzů a hliníkových slitin a je předním dodavatelem těchto ložisek nejen u nás, ale i

v rámci LD států. Na promítnutých obrázcích byly ukázány vývojové trendy jednotlivých typů těchto ložisek a porovnána kvalita jejich výroby, pokud se týká tolerancí hlavních rozměrů v závislosti na průměru ložisek se světovými výrobci Glacier a Glyco i s normami ISO, SAE a DIN. V závěru referátu uvedl životnosti ložisek z materiálů KU a KX v závislosti na součinu měrného zatížení a kluzné rychlosti v porovnání s výrobky Glacier (DU, DX) a SKF (Glycodur A a F). Z těchto srovnání je patrná dobrá jakost naší výroby, která je předpokladem pro úspěšné praktické aplikace.

V závěrečném referátu "Poznatky z provozu dynamicky zatížených kluzných ložisek spalovacích motorů" shrnul Ing. K. J. Němec, CSc. z VÚ ČKD Praha své poznatky z dlouholeté činnosti v oboru teoretického i praktického výzkumu kluzných ložisek a zhodnotil jejich současný stav i perspektivu. Při klasifikaci poruch těchto ložisek poukázal na technickou i ekonomickou závažnost nedodržování zásad teorie i praxe tribologie a tribotechniky a vytypoval směrnice pro konstrukci, výrobu i provoz ložiskových uzlů spalovacích motorů za účelem dosažení jejich vysoké spolehlivosti a životnosti v náročných provozních aplikacích.

Seminář přinesl řadu zajímavých informací a dokumentoval zájem našich odborných pracovišť o obor, který má rozhodující význam pro úspěch a ekonomii našich strojních konstrukcí, jejich technickou úroveň i užité parametry. Tato problematika bude i nadále středem zájmu našeho strojírenství a je proto účelné, aby byla i v programu dalších osvětových akcí Československé společnosti pro mechaniku při ČSAV. V tomto smyslu uzavřel seminář akademik Jaroslav Němec.



Doc. Ing. Dr. Vilém Kočka, CSc. se narodil 11. 11. 1908 v Praze. Po maturitě na karlínské reálce vystudoval na ČVUT strojní inženýrství včetně letecké specializace. V letech 1936/37 byl vyslán na Vysokou leteckou školu (ENSA) do Paříže, kde prohloubil zejména své znalosti z aerodynamiky a mechaniky letu. Po návratu byl přidělen do Vojenského technického a leteckého ústavu (VTLÚ) v Letnanech. V tomto ústavu, který byl v r. 1954 převeden do civilního rezortu jako Výzkumný a zkušební letecký ústav (VZLÚ), pracoval Doc. Kočka nepřetržitě 35 let jako vedoucí vědecký pracovník až do svého odchodu do důchodu.

Doc. Kočku lze považovat za zakladatele čs. mechaniky letu, neboť již v r. 1938 vytvořil ve VTLÚ pracovní skupinu, která tento vědní obor pod jeho dlouholetým vedením soustavně rozvíjela. Položil základy českého názvosloví a zabýval se zprvu především klasifikací letových vlastností letadel a metodikou jejich určování a hodnocení na základě letových měření. Za původní práci "Podélná úhlová

obratnost letounů" mu ČVUT udělilo v r. 1945 titul doktora technických věd. V r. 1950 vedl z pověření MNO celostátní kurs pro vojenské a civilní zalétávací a zkušební piloty a techniky, kde se snažil o uplatnění tehdy nového objektivního pojetí letových zkoušek.

V r. 1952 dokončil Doc. Kočka revizi metodiky měření letových výkonů a vlastností letadel, odpovídající tehdejšímu stavu letecké a měřicí techniky. V té době vedl též prototypové zkoušky řady letounů a zúčastnil se letových měření jako technický pozorovatel. Po r. 1954 vedl několik náročných výzkumných úloh, zaměřených jednak k přímé podpoře vývoje čs. letadel, jednak k zajištění perspektivy tohoto vývoje novými koncepcemi. Podílel se i na přípravě technických požadavků pro nová čs. letadla se snahou o docílení jejich co nejvyšší technické úrovně.

Od r. 1958 se Doc. Kočka zabýval rovněž problémy identifikace dynamických systémů a její aplikací v mechanice letu. Zejména zde zaváděl objektivní statistické testy použitelnosti matematických modelů neustálených letů ve vztahu ke správnosti a přesnosti vý-

sledků letových měření. V r. 1968 začal spolupracovat na výzkumu vlivu atmosférické turbulence na letové a přepravní vlastnosti letadel a na jejich životnost s použitím statistické dynamiky a technické kybernetiky. S tím souvisel i výzkum metodiky měření náhodných procesů za letu.

Během své výzkumné práce v mechanice letu se podílel na vytváření názvosloví a na zpracování norem pro tento obor v národním i mezinárodním měřítku a získal při tom v ISO pro ČSSR mezinárodně uznávané postavení.

Pedagogicky pracoval Doc. Kočka již v letech 1937/39 a 1945 až 51 na ČVUT v Praze a v letech 1955/56 na VAAZ v Brně. Jako školitel vědeckých aspirantů v oboru mechaniky letu vychoval řadu vědeckých pracovníků. V r. 1959 získal na základě dizertační práce "Měření aerodynamické opravy pitot-statické hubice na rychlých letounech" vědeckou hodnost kandidáta technických věd na VAAZ v Brně, kde se též v r. 1966 habilitoval jako docent pro obor mechaniky letu.

Doc. Kočka zastával v leteckém ústavu po řadu let funkci vedoucího oddělení mechaniky letu, které systematicky budoval se snahou vytvořit z něj odborně i kádrově vysoce fundované pracoviště. Své podřízené a spolupracovníky vedl s náročností k dosahování progresivních a perspektivních pracovních výsledků.

Výzkumná a vědecká činnost Doc. Kočky, kladně hodnocená i v zahraničí, byla a je podstatným přínosem nejen pro letecký ústav, ale i pro celé čs. letectví.

Doc. Kočka se celý život angažoval rovněž společensky a aktivně se podílel na budování naší socialistické společnosti. Jako uznání za jeho zásluhy o čs. letectví mu udělilo GR Aero v r. 1968 čestný titul "Zasloužilý pracovník čs. letectví". Přesto, že je již více než 10 let v důchodu, spolupracuje stále s VZLÚ jako konsultant.

Je též jedním ze zakládajících členů Čs. společnosti pro mechaniku při ČSAV a aktivně pracuje rovněž v Čs. kybernetické společnosti při ČSAV, ze které se snaží přenášet pokrokové metody do oblastí řízení letadel.

K významnému životnímu výročí, kterého se Doc. Kočka dožil v plném zdraví a duševní svěžesti, mu jménem jeho spolupracovníků, žáků i všech členů Společnosti srdečně blahopřejeme a do dalších let mu přejeme, aby se mohl ve zdraví a pohodě ještě dlouho aktivně podílet na práci pro čs. letectví, jemuž zasvětil svůj celý plodný život.

Předsednictvo Společnosti

Zprávy odborné skupiny experimentální analýzy napětí

Informace o 21. čs. konferenci EAN

Jako každý rok, tak i letos, se konala konference o experimentální analýze napětí. 21. čs. konferenci EAN uspořádala pobočka ČSVTS SIGMA za vědecké garance OS EAN ČSSM jako národní ve dnech 23. až 26. 5. 1983 v rekreačním středisku SIGMA v Luhačovicích. Účast 98 osob byla omezena ubytovací kapacitou střediska. Byli pozváni dva hosté ze socialistických států, kteří se aktivně zúčastnili konané konference.

Jednání probíhalo ve dvou plenárních zasedáních a paralelně ve dvou sekcích. Celkem bylo předneseno 40 referátů a do programu byla zahrnuta i exkurze do zkušeben závodu "Rudý říjen" v Otrokovicích.

Firemní výstavka byla omezena na prototypy n.p. Mikrotechna. V rámci programu byl i společenský večer a kolegiální posezení. Byl vydán sborník referátů.

Celkový profil konference je charakteristický, bez převratných novinek. Je patrný určitý posun zájmu, jak k užitečným pohledům na teoretické pojetí experimentu, tak i ke špičkovým problémům současné mechaniky kontinua a těles.

Z hlediska využívaných metodik se referáty týkaly jak obecné teorie experimentu, jeho plánování, efektivnosti, dimenzionální analýzy, tak konkrétních metodických přístupů, jako jsou fotoelasticimetrie, holografie, metoda kaustik, speciální interferometrické postupy, rychlostní kinematografie, tenzometrie, telemetrický přenos akustické emise apod.

V referátech byla popsána řešení jak základních problémů metodických tak i aplikace metod v mechanice kontinua. Pozornost byla věnována i výuce experimentální analýzy napětí v postgraduálním studiu.

I když příspěvky na konferenci byly velmi různorodé, lze vycítit, že prakticky stejně dobrá úroveň jejich obsahu směřuje k řešení perspektivních směrů rozvoje techniky a adekvátně se uplatňuje při řešení potřeb našeho průmyslu.

(Podle materiálu J. Poláčka zpracoval
J. Beneš)

Komplexní statická zkouška není maličkost

Zkoušky při vývoji nového cestovního proudového letadla Boeing 767 probíhaly ve čtyřech hlavních fázích:

- 1 - zkoušení prvků,
- 2 - statické zkoušky,
- 3 - únavové zkoušky,
- 4 - letové zkoušky.

Samotné statické zkoušky představovaly použití:

2204 jednosměrných tenzometrů osazených na draku (většinou
s bází 3 a 6 mm)

1162 růžicových tenzometrů

4100 přístrojových kanálů

219 km elektrických kabelů

120 hydraulických zvedacích zařízení se zdvihy 0,25 až 3 m

19 km hydraulických vedení

100 000 hodin technických prací

250 000 hodin řemeslnických prací.

Cena statického programu přesáhla 41 milionů dolarů.

Do statických zkoušek je počítáno i osazení 36 akcelerometrů, uplatňujících se při aplikaci velkých zatížení a 36 akustických mikrofónů pro sledování neobvyklých ozvů během zkoušek. Hlavní inženýr projektu sledoval průběh zkoušek na monitorech o celkové délce 6 m, které měl umístěny před sebou.

Statické zkoušky o celkem 21 samostatných testech byly provedeny během 6 měsíců, přičemž časový rozsah jednotlivých testů byl 2 až 8 hodin.

Prvý stroj typu 767 vzlétl 8. září 1982.