



BULLETIN

ČESKÁ SPOLEČNOST
PRO MECHANIKU

2·2011

Česká společnost pro mechaniku

Asociovaný člen European Mechanics Society (EUROMECH)

Předseda	Prof. Ing. Miloslav Okrouhlík, CSc.
Redakce časopisu	Ing. Jiří Dobiáš, CSc. Dolejšková 1402/5, 182 00 Praha 8 Ústav termomechaniky AV ČR, v.v.i. tel. 266 053 973, 266 053 214 fax 286 584 695 e-mail: jdobias@it.cas.cz
Jazyková korektura	RNDr. Eva Hrubantová
Tajemnice sekretariátu Sekretariát	Ing. Jitka Havlínová Dolejšková 1402/5, 182 00 Praha 8 tel. 266 053 045, tel./fax 286 587 784 e-mail: csm@it.cas.cz
Domovská stránka IČO Společnosti	http://www.csm.cz 444766

Bulletin je určen členům České společnosti pro mechaniku.

Vydává Česká společnost pro mechaniku, Dolejšková 1402/5 , 182 00 Praha 8 - Libeň

Vychází: 3x ročně

Místo vydávání: Praha

Den vydání: 25. srpna 2011

ISSN 1211-2046

Evid. č. UVTEI 79 038

MK ČR E 13959

Tiskne: ČVUT Praha,
CTN – Česká technika,
Nakladatelství ČVUT,
Thákurova 1, 160 41 Praha 6

BULLETIN

2'11

ČESKÁ SPOLEČNOST PRO MECHANIKU

OBSAH

Cena Z. P. Bažanta pro inženýrskou mechaniku	2
Pamětní medaile udělené členům České Společnosti pro mechaniku	6
M. Okrouhlík: Jak je to s napětím?	7
J. Rosenberg: Nevratná termodynamika očima (bio)mechanika	17
Kronika	30
Očekávané akce	41

CONTENTS

Z. P. Bazant Prize for Engineering Mechanics	2
Commemorative Medal Awarded Members of the Czech Society for Mechanics	6
M. Okrouhlík: What is Stress?	7
J. Rosenberg: Irreversible Thermodynamics Through the Eyes of Researchers in (Bio)mechanics	17
Chronicle	30
Prospective Events	41

Česká společnost pro mechaniku se rozhodla každoročně udělovat udělovat cenu nazvanou

Cena Z. P. Bažanta pro inženýrskou mechaniku.

Finanční odměna s cenou spojená je 1200,- USD. Stanovy jsou přiloženy.

Z. P. Bažant je profesorem McCormickova Institutu na Northwestern University, Evanston. Je členem NAS, NAE, AAAS a emeritním profesorem na Českém vysokém učení technickém v Praze.

Stanovy ceny profesora Zdeňka P. Bažanta

1. Cenu prof. Z.P. Bažanta za inženýrskou mechaniku uděluje Česká společnost pro mechaniku každý rok.
2. Soutěží se o jedinou cenu spojenou s odměnou 1200 USD, která bude udělena za článek, případně sérii článků na totéž originální téma, knihu nebo publikovanou dizertaci či jinou práci v jazyce českém nebo anglickém. Aby komise mohla zodpovědně posoudit publikační ohlas, předložená práce by měla být publikována několik let před podáním do soutěže.
3. Nutné je, aby se jednalo o originální aplikaci mechaniky, interdisciplinární studii nebo o práci, která přinesla nebo zjevně slibuje přinést pokrok v praxi. Přijatelné jsou teoretické i experimentální práce, především v kombinaci. Vyloučeny jsou naopak práce formalistické, tedy publikace cizelující či zobecňující formální aparát bez zřetelného přínosu mechanice jako oboru.

4. Žadatel musí být Čech, žijící v České republice nebo v kterémkoliv jiném státě, anebo cizinec, žijící v době vzniku práce v ČR, a to bez věkového omezení. Žadatel musí uvést, jaká ocenění již za tuto práci či práce související získal v minulosti. Případné předchozí ocenění automaticky nediskvalifikuje předloženou práci, je nicméně na rozhodnutí komise, zda bude návrh připuštěn do soutěže.

5. Komisi jmenuje předseda ČSM na návrh předsednictva společnosti.

Návrhy zasílejte na adresu

Česká společnost pro mechaniku,
Dolejskova 5, 182 00 Prague 8,
Česká republika.

phone: +420 266 053 045, e-mail: csm@it.cas.cz, web: www.csm.cz

Termín: 31. prosinec běžného roku

*

The Czech Society for Mechanics decided to institute a prize named

Z. P. Bazant Prize for Engineering Mechanics.

The Prize is to be given annually. The prize will include a monetary award of 1200 USD. The charter of the prize is attached.

Dr. Zdenek P. Bazant, McCormick Institute Professor at Northwestern University, Evanston, member of NAS, NAE and AAAS, and a famous alumnus of CTU in Prague.

Statutes of the Z.P. Bažant Prize for Engineering

1. The Z.P. Bažant Prize for Engineering Mechanics is awarded annually by the Czech Society for Mechanics (CSM).
2. Competition runs for one single prize accompanied by a financial reward 1200 USD. The prize is awarded for an article or a series of articles on an original topic, a book, a monograph, or a PhD thesis, written in Czech or English. To assess the impact, a work published several years before the submission is optimal.
3. The submitted work is required to report original findings in mechanics, results of interdisciplinary research, or results that make or promise progress in engineering practice. Both theoretical and experimental studies are eligible, especially their

combination. Excluded are formalistic generalizations, refinements or embellishments without evident contribution to mechanics per se.

4. The candidate must either be a Czech living anywhere or a foreigner living in the Czech Republic at the time of work inception. There is no age restriction. The candidate must declare all the previous awards that he or she might have received for the submitted work. Based on their nature, the Selection Committee may or may not disqualify the candidate.

5. The Selection Committee is proposed by the CSM Board and appointed by the CSM President.

Proposals are to be sent to

Czech Society for Mechanics,
Dolejskova 5, 182 00 Prague 8,
the Czech Republic

phone: +420 266 053 045, e-mail: csm@it.cas.cz, web: www.csm.cz

Deadline: December 31 of the current year.

Pamětní medaile udělené členům České Společnosti pro mechaniku

Commemorative Medal Awarded Members of the Czech Society for Mechanics

V Bulletinu ČSM 1/2010 bylo připomenuto životní jubileum profesora Ing. Cyrila Höschla, DrSc. Téhož roku mu byla v předvečer 17. listopadu udělena medaile Josefa Hlávky. Zpráva o tom byla uveřejněna v Bulletinu ČSM 3/2010.

Profesoru Höschlovi byla také dne 12. dubna 2011 udělena pamětní medaile Leonarda da Vinci, a to Asociací strojních inženýrů u příležitosti 20. výročí jejího založení. Spolu s ním byla udělena i dalším zakládajícím členům Asociace. Mezi nimi byli i členové naší Společnosti, a to Doc. Ing. Václav Cyrus, DrSc., Ing. Václav Daněk, CSc., Ing. Rudolf Dvořák, DrSc., Prof. Ing. Stanislav Holý, CSc., Prof. Ing. Vlastimil Křupka, DrSc., Prof. Ing. Jan Macek, DrSc., Ing. Jiří Maštovský, CSc., Prof. Ing. Jiří Nožička, CSc., Prof. Ing. Antonín Pištěk, CSc., Prof. Ing. Miroslav Šťastný, DrSc., Ing. Antonín Tuček, CSc., Prof. Ing. Stanislav Vejvoda, CSc. a in memoriam též docent Ing. Rudolf Brepta, DrSc., Prof. Ing. Jaroslav Němec, DrSc., Dr. h. c. a Prof. Ing. Jaromír Slavík, CSc.

Všem vyznamenaným gratulujeme.

Redakce

Jak je to s napětím?

What is stress?

M. Okrouhlík

Summary *The author ponders about meaning of stress and of other variables that are consensually defined and cannot be grasped, defined or measured directly.*

Obecná čeština chápe napětí širěji než my v komunitě inženýrsko-mechanické. Slovník spisovného jazyka českého, B. Havránek a kol., Nakladatelství Československé akademie věd ve vydání z roku 2006 pro *napětí* uvádí

- *vzrušení, kterým je doprovázeno napjaté očekávání,*
- *úsilí, vypětí – fyz. mechanické: síla působící na jednotku plochy, též tlak,*
- *stav hrozícího střetnutí, např. mezi dělníky a kapitalistickými podnikateli.*

Jak vidno, z posledního uvedeného příkladu, třídní boj ještě nevymizel dodnes.

Internetová příručka Ústavu pro jazyk český na adrese <http://prirucka.ujc.cas.cz> má u hesla *napětí* pojmy jako *vzrušení, pozornost, úsilí, hrozba střetu* s příklady: *čekat s napětím na výsledek jednání, nervové napětí, mezinárodní napětí, napětí v pracovním kolektivu.*

V angličtině tomu není jinak.

We generally use the word "stress" when we feel that everything seems to have become too much - we are overloaded and wonder whether we really can cope with the pressures placed upon us. Anything that poses a challenge or a threat to our well-being is a stress. Some stresses get you going and they are good for you - without any

*stress at all many say our lives would be boring and would probably feel pointless. However, when the stresses undermine both our mental and physical health they are bad. In this text we shall be focusing on stress **that is bad for you**.* Viz www.medicalnewstoday.com/articles/145855.php.

Na rozdíl od poslední věty z předchozí ukázky, která slibuje čtení pochmurné, se však v našem textu konstruktivně zaměříme na výklad **that is good for you**, tj. na *napětí mechanické* (angl. *stress*, něm. *Spannung*, fr. *contrainte*).

České terminologické normy

Terminologie týkající se základních veličin a jednotek, značek a v některých případech i definic ve vědních oborech je uvedena v normách ČSN ISO 31-0 až ČSN ISO 31-16. Část 0 je věnována *všeobecným zásadám*, část 1 *prostoru a času*, část 2 *periodickým a příbuzným jevům* a část 3 *mechanice*.

V části ČSN ISO 31-3 v odstavci 3-15.1 až 3-15.3 najdeme doporučené symboly p , σ a τ pro veličiny *tlak*, *normálové napětí* a *smykové napětí*, a to s definicí, tedy *podíl síly a plochy*.

Takto pojatá definice napětí však neříká nic o funkčním rozložení síly nad uvažovanou plochou. Používá se pojmu **síla**, pro kterou v odstavci 3-9.1 najdeme: *výsledná síla působící na těleso se rovná časové derivaci hybnosti tělesa*. To je sice noblesní definice, umožňující brát v úvahu v čase proměnnou hmotnost tělesa, avšak se statickou definicí síly se nevyrovnává, natož aby odpovídala přímo na otázku – co je síla.

Nahlédneme-li do učebnic, zjistíme, že síla se popisuje jen nepřímo, a to prostřednictvím silových účinků. Jsou to definice kruhem. Zde je několik příkladů.

*Pojem **síly** vznikl abstrakcí a generalizací subjektivního pocitu tlaku nebo tahu při vyvozování silového účinku člověkem na tělesa.* Mechanika I. díl. Statika a kinematika. Technický průvodce, Svazek 65, Juliš, K., Brepta, R. a kol. SNTL, Praha 1986.

Síla je vektorová fyzikální veličina, která vyjadřuje míru vzájemného působení

těles nebo polí. Viz <http://cs.wikipedia.org/wiki>.

V publikaci Encyclopedia of Physics, Vol. III/1, Edited by Fluege, Springer, Berlin, 1960 je na str. 532 citován d'Alambert: ***Force** is only a name for the product of acceleration by mass.*

Podobně:

***Forces** are vector quantities which are best described by intuitive concepts such as push or pull.* Viz Theory and Problems of Continuum mechanics, Mase, G.R. Schaum's Outline Series, Mc Graw-Hill, 1970.

Se silou i s napětím je to jako s časem. Každý intuitivně ví, co to je. Až do okamžiku, kdy je třeba předložit definici přímou. Ve své 11. knize Vyznání Sv. Augustin o čase říká: *Co je tedy čas? Když se mne nikdo neptá, tak vím. Když si přeji to vysvětlit tomu, co se ptá, tak nevím.*

Jak síla, tak i napětí jsou veličiny definované smluvně a nutno přiznat, že ona vícekrát zmíněná intuitivnost – nám, uživatelům mechaniky kontinua – v praxi příliš nevadí a nikoho nenapadne tyto užitečné veličiny zpochybňovat.

Hezká definice napětí, a – jak jinak – opět nepřímá, je převzata z [http://en.wikipedia.org/wiki/Stress_\(mechanics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Stress_(mechanics)).

*In continuum mechanics, **stress** is a measure of the internal forces acting within a deformable body. Quantitatively, it is a measure of the average force per unit area of a surface within the body on which internal forces act. These internal forces are produced between the particles in the body as a reaction to external forces applied on the body. Because the loaded deformable body is assumed to behave as a continuum, these internal forces are distributed continuously within the volume of the material body, and result in deformation of the body's shape.*



Za zakladatele moderní teorie elasticity je považován Navier (1785 – 1836), který poprvé formuloval pohybové rovnice pro obecný bod tělesa. Cauchy (1789 – 1857) přijal definici napětí zavedenou St-Venantem (1797 – 1886). Viz Todhunter, I., Pearson, K.: *A History of the Theory of Elasticity and of the Strength of Materials*, Vol. I and II., Dover Publications, 1960.

V publikaci *Oeuvres complètes d'Augustin Cauchy*. Série 2, tome 8 z roku 1828 je Cauchyho příspěvek s názvem *SUR LES EQUATIONS QUI EXPRIMENT LES CONDITIONS D'ÉQUILIBRE OU LES LOIS DU MOUVEMENT INTÉRIER D'UN CORPS ÉLASTIQUE OU NON ÉLASTIQUE*¹.

Augustin-Louis Cauchy

Cauchy definuje silové veličiny a zapisuje je ve tvaru

A	F	E
F	B	D
E	D	C

Dnes bychom jim říkali složky tenzoru napjatosti. Jak vidno Cauchy pro ně od samého počátku předpokládá symetrický charakter a rovnice rovnováhy pro materiálový bod² píše ve tvaru

$$\begin{aligned}\frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + \frac{\partial E}{\partial z} + \rho X &= 0, \\ \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial B}{\partial y} + \frac{\partial D}{\partial z} + \rho Y &= 0, \\ \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial C}{\partial z} + \rho Z &= 0.\end{aligned}$$

¹ Viz <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k90200c.image.f4.langEN>.

² ... pour corps solides considérés comme des systèmes de points matériels distincts les uns des autres, mais séparés par les distances très petites ... uvažuje tedy rozlišitelné materiálové body, mající tedy nulový objem a nekonečnou hustotu, které jsou od sebe jen nepatrně vzdáleny. Zde ještě není explicitně vyjádřen limitní přechod od elementárního objemu k bodu tak, jak se s ním setkáváme v pozdějších publikacích.

Kromě rovnovážných rovnic uvádí v dalším textu též rovnice pohybové, které – kromě sil vnitřních a objemových – berou v úvahu též síly setrvačné. V dnešní notaci jsou

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i = \rho \ddot{x}_i. \quad (1)$$

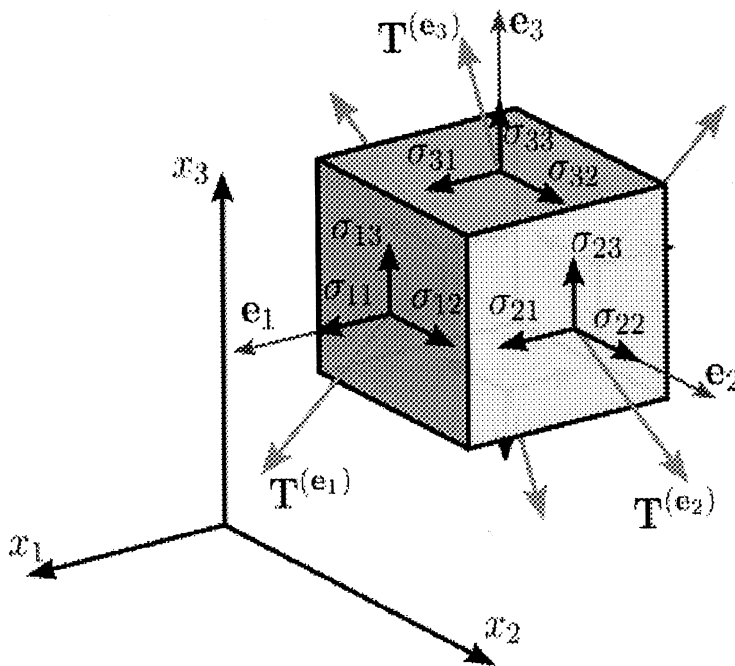
Dají-li se zanedbat setrvačné síly, pohybové rovnice mají na pravé straně nulu, a přecházejí v rovnice rovnováhy. Nemůžeme nepřipomenout, že síly v mechanice kontinua jsou smluvně vztaženy buď na jednotku hmoty [N/kg], nebo na jednotku objemu [N/m³]. Někdy jsou Cauchyho rovnice psány v alternativním tvaru

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i = \rho \ddot{x}_i.$$

V anglické literatuře se síly f_i označují pojmem *volumetric forces* (objemové síly), zatímco pro síly b_i je používán termín *body forces*. V češtině používáme běžně pojmu *objemové síly*, zatímco *tělesové síly* příliš nezlidověly. Mezi oběma typy sil je zřejmý vztah $f_i = \rho b_i$.

Při odvozování geometrických vztahů mezi složkami vektoru napětí σ_{ij} a tenzoru napětí T_i jest uvažovaným materiálovým elementem 3D těleso – krychle, se stěnami jednoznačně určenými normálovými vektory, jak je naznačeno na obr. 1.

Když se však píší pohybové rovnice, uvažovaná krychle se považuje za těleso infinitesimálních rozměrů – v limitě přecházející v bod – a namísto šesti rovnic pro těleso v prostoru se berou v úvahu jen rovnice vyjadřující složkovou rovnováhu sil. Momentové výminky – za předpokladu, že napětí se podél stěn elementu nemění a za předpokladu, že nepůsobí žádné silové dvojice – jsou splněny identicky a netřeba je uvažovat.



Obr. 1. Složky vektoru napětí $T_i^{(e_i)}$ a tenzoru napětí σ_{ij} .

Omezíme-li se na lineární trojdimensionální úlohu mechaniky kontinua s malými rotacemi a malými přetvořeními, pak máme k dispozici tři Cauchyho složkové rovnice ve tvaru (1), šest kinematických vztahů

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

a šest rovnic vyjadřující konstitutivní vztahy

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} . \quad (3)$$

Celkem tedy 15 rovnic pro vyčíslení tří složek posuvů u_i , devíti složek přetvoření ε_{ij} a devíti složek napětí σ_{ij} . Za předpokladu, že tenzory napětí a přetvoření jsou symetrické, tedy $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ a $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$, a tedy z devíti složek napětí je jen šest nezávislých (a podobně pro přetvoření), pak zmíněných 15 rovnic je právě tolik, kolik je třeba.

Běžně uváděný důkaz symetrie tenzoru napětí je založen na aplikaci zákona o zachování momentu hybnosti pro síly setrvačné, povrchové a objemové. Je-li průvodič obecného materiálového bodu $r = \{x_1 \ x_2 \ x_3\}^T$ a označíme-li povrchové síly

t_i a tělesové síly b_i , pak pro kontinuální těleso objemu V , povrchu S a hustoty ρ můžeme psát

$$\frac{D}{Dt} \int_V (\vec{r} \times \rho \vec{v}) dV = \int_S (\vec{r} \times \vec{t}) dS + \int_V (\vec{r} \times \rho \vec{b}) dV.$$

Symbolem $\vec{v}$ označujeme rychlosti, skalární veličina t reprezentuje čas. Naznačené vektorové součiny vyjádříme pomocí Levi-Civitova permutačního symbolu ϵ_{ijk} a dostaneme

$$\frac{D}{Dt} \int_V \epsilon_{rmn} x_m \rho v_n dV = \int_S \epsilon_{rmn} x_m t_n dS + \int_V \epsilon_{rmn} x_m \rho b_n dV.$$

Použitím Cauchyho vztahu $t_n = \sigma_{jn} e_j$, Gaussovy věty a vztahu pro materiálovou derivaci hybnosti, tj. $\frac{D}{Dt} \int_V \rho v_i dV = \int_V \rho \frac{Dv_i}{Dt} dV$, dostaneme

$$\int_V \epsilon_{rmn} \frac{D}{Dt} (x_m v_n) \rho dV = \int_V \epsilon_{rmn} \left(\frac{\partial (x_m \sigma_{jn})}{\partial x_j} + x_m \rho b_n \right) dV.$$

Uvážíme-li, že $\frac{Dx_m}{Dt} = v_m$, $\frac{\partial x_m}{\partial x_j} = \delta_{mj}$

a že

$$\frac{\partial (x_m \sigma_{jn})}{\partial x_j} = \frac{x_m \partial \sigma_{jn}}{\partial x_j} + \delta_{mj} \sigma_{jn} = x_m \frac{\partial \sigma_{jn}}{\partial x_j} + \sigma_{mn},$$

můžeme psát

$$\int_V \epsilon_{rmn} \left(v_m v_n + x_m \underbrace{\frac{Dv_n}{Dt}}_1 \right) \rho dV = \int_V \epsilon_{rmn} \left[x_m \underbrace{\left(\frac{\partial \sigma_{jn}}{\partial x_j} + \rho b_n \right)}_2 + \sigma_{mn} \right] dV.$$

Členy označené svorkami 1 a 2 se ruší – jsou to Cauchyho pohybové rovnice.

Navíc platí $\epsilon_{rmn} v_m v_n = 0$ a z celé rovnice nakonec zbude $\int_V \epsilon_{rmn} \sigma_{mn} dV = 0$, a to pro libovolný objem. Poslední vztah je splněn, jestliže součin vyskytující se v integrandu je nulový. A to nastane jen tehdy, když tenzor σ_{mn} je symetrický, tedy

$$\sigma_{mn} = \sigma_{nm}.$$

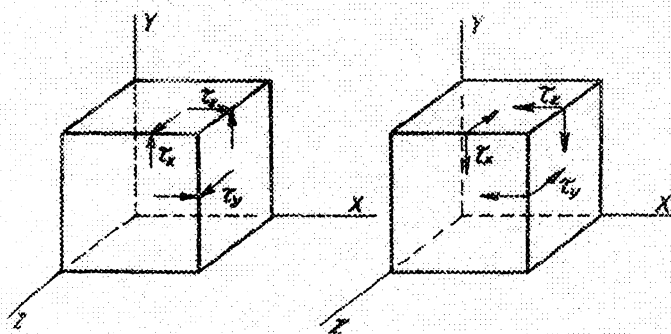
Shrňme to. Popsaný model kontinua, v němž se zanedbávají momentové výminky, implicitně předpokládá, že elementární materiálová částice limituje k bodu, že síly mezi materiálovými částicemi jsou stejně velké, kolineární a opačného směru. Dále se předpokládá, že na uvažované materiálové elementy nepůsobí ani povrchové ani objemové silové dvojice – s bodem se zkrátka nedá smysluplně zatočit. Za těchto předpokladů tenzory napětí vskutku vycházejí symetrické.

Výše uvedený důkaz neprokazuje, že tenzor napětí je symetrický obecně – je tomu tak jen za výše zmíněných předpokladů.

Po krátké terminologické odbočce se k otázce symetrie tenzoru napětí ještě vrátíme.

V inženýrské terminologii se mimodiagonální prvky symetrického tenzoru napětí nazývají složkami smykovými. Jaroslav Janátka, ve svých skriptech Pružnost a pevnost I, SNTL, 1959 na straně 49, uvádí:

Jelikož obě tato smyková napětí jsou kolmá ke směru osy Z , značí se v případech, kde není třeba je od sebe odlišovat, společným znakem τ_z .



Platí tedy:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \tau_x$$

Jelikož elementární hraniček je v limitě bodem tělesa, lze vyslovit větu:

V libovolném bodě tělesa jsou v řezech k sobě kolmých složky napětí smykových kolmé k průsečnici řeza stejné a směřují obě buď k průsečnici nebo od ní.

V jiných českých publikacích se zavádí pojem *sdužená tečná napětí*. (viz např. Němec, J., Dvořák, J., Höschl, C.: Pružnost a pevnost ve strojírenství, Technický průvodce 69, SNTL, Praha, 1989) či *sdužená smyková napětí* (Jiří Michalec a kolektiv: Pružnost a pevnost I, Vydavatelství ČVUT, Praha, 1998).

Zatímco pro symetrické vlastnosti smykových napětí Janátka postuluje **větu** a v technickém průvodci jsou vlastnosti napětí popsány **pravidlem** (str. 47), tak ve třetí

zmíněné publikaci je tento výsledek na str. 91 shrnut do " ... významného **zákona** o sdružených smykových napětích, jenž patří mezi základní zákony teorie pružnosti ... "

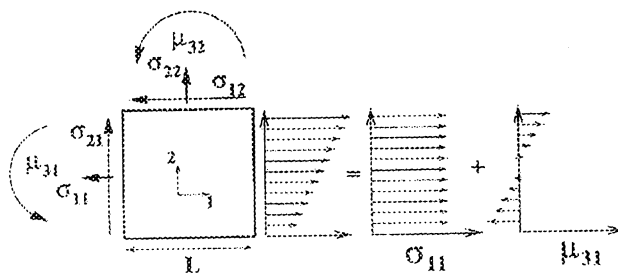
Malvern, L. E. ve své knize Introduction to the mechanics of a continuous media (Prentice-Hall, 1969) na str. 78 píše "... the symmetry of the stress matrix implies what is sometimes called the **theorem** of conjugate shear stresses ... "

I když **zákon** je stejně obtížně definovatelný jako síla či čas, intuitivně cítíme, že popisu vlastností sdružených smykových napětí sluší více *věta*, *teorém* či *pravidlo* než **zákon**.

Model kontinua s nesymetrickým tenzorem napětí uvažovali bratři Cosseratové.

Eugène-Maurice-Pierre Cosserat (1866 – 1931) byl francouzský matematik a astronom. Narodil se v Amiens a od roku 1883 do 1888 studoval na École Normale Supérieure. Později byl na univerzitě v Toulouse ředitelem astronomické observatoře. V roce 1919 se stal členem Francouzské akademie věd. Studoval Saturnovy prstence a satelity, komety a dvojhvězdy. Ve spolupráci s bratrem Françoisem se zabýval problémy mechaniky kontinua.

Při uvažování podmínek rovnováhy materiálového elementu kontinua bratři Cosseratové brali v úvahu kromě silových tenzorů napětí σ_{ij} [Pa] i momentové tenzory napětí μ_{ij} mající rozměr [Pa m], jak je naznačeno na obr. 2.



Obr. 2. Silové a momentové složky tenzoru napětí.

Předpokládá se, že interakce mezi sousedními materiálovými částicemi probíhá prostřednictvím vektorů jak silových t_i , tak i momentových m_i . Vztah mezi složkami

vektoru napětí a tenzoru napětí je vyjádřen prostřednictvím normálových vektorů, tj.

$$t_i = \sigma_{ij} e_j \text{ a } m_i = \mu_{ij} e_j.$$

Pro elementární materiálový element se píší pohybové rovnice složkové i momentové, a to ve tvaru

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i = \rho \ddot{x}_i \text{ a } \frac{\partial \mu_{ij}}{\partial x_j} - \epsilon_{ikl} \sigma_{kl} + c_i = I \ddot{\phi}.$$

Kromě objemových sil f_i se v rovnicích vyskytují i objemové dvojice c_i . Hustota je značena ρ a rotační setrvačnost I . Na rozdíl od přístupu klasického se předpokládá, že elementární materiálový element má svou úhlovou orientaci. Kartézské složky posuvu a natočení elementu jsou u_i a φ_i . Cosseratovské přetvoření je dvojího typu, dalo by se říci posuvové a rotační. Platí pro ně

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \epsilon_{ijk} \varphi_k \text{ a } \kappa_{ij} = \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_j}.$$

Cosseratovská pružnost byla až donedávna považována za intelektuální libůstku malého praktického významu. Viz např. Flügge, S: Encyclopedia of physics. Vol III/1. Principles of classical mechanics and field theory. Springer Verlag, Berlin, 1960, p. 310.

Ukazuje se však, že je efektivním nástrojem pro řešení úloh s granulovanými materiály či s tekutými krystaly – všude tam, kde materiálový element se nedá považovat za bod a má svou, úhly vyjádřenou, prostorovou orientaci – a kde pro silové působení mezi materiálovými elementy je také třeba uvažovat momentové podmínky.

Podrobnosti o numerické implementaci úloh cosseratovského kontinua najde čtenář v příspěvku Sluys a de Borsta v publikaci Stein, E., de Borst, R., Hughes, T.J.R.: Encyclopedia of Computational mechanics, Vol. 2, p. 355.

Nevratná termodynamika očima (bio)mechanika

Irreversible Thermodynamics through the Eyes of Researchers in
(Bio)mechanics

Josef Rosenberg

Summary *Using a very simple mechanical model, this contribution attempts to present three basic theories of the irreversible thermodynamics – the classic irreversible thermodynamics CIT, the internal variable thermodynamics IVT and the extended irreversible thermodynamics EIT. The motivation is twofold: firstly, for modern continuum mechanics and for biomechanics in particular, these theories are indispensable and, secondly, this kind thermodynamics seems to be very difficult for non-specialists in this field, even though there exist many different literature sources. To begin with, the classical equilibrium thermodynamics is described shortly. Then the second law of thermodynamics is formulated as a starting point for the constitutive equations and for the evolution equations involving the state variables. Finally, the reader can find some literature for a deeper and rigorous study.*

Biomechanika se velice rychle vyvíjí, překonává počáteční naivní představy, že lze živé materiály a celé orgány modelovat typickými inženýrskými přístupy, jako je použití lineární pružnosti a pevnosti atd. Moderní přístupy stále více a hlouběji pronikají do meso, mikro i nano škál a neobejdou se od respektování chemických a difuzních procesů. Tento přístup, nemá-li být čistě fenomenologický a má-li se vyvarovat principiálních chyb vyžaduje

„bohužel“ (z pohledu nefyzika) využití termodynamiky, a to dokonce nevratné termodynamiky.

Zatím co klasická vratná termodynamika je dokonale propracována, existuje pro nevratnou termodynamiku řada různých teorií. Pro nespecialistu je i přes množství literárních zdrojů obtížné se v nich orientovat, a to především z pohledu jejich uživatele. To je důvod, proč jsem si opovázil vyhovět vyzvání a napsat tento příspěvek. Z již uvedeného je patrné, že si v žádném případě nekladu za cíl exaktní a vyčerpávající výklad. Jedná se o pokus na jednoduchém mechanickém modelu ukázat základní oblasti použití několika teorií nevratné termodynamiky.

Pro potřeby biomechaniky se zdá být v současné době dostačující snažit se využívat tři z nich: Klasickou nerovnovážnou termodynamiku (Classical irreversible thermodynamics - CIT), termodynamiku s vnitřními proměnnými (Internal variables thermodynamics - IVT) a rozšířenou nerovnovážnou termodynamiku (extended irreversible thermodynamics - EIT). Cílem v tomto příspěvku bude formulovat 2. zákon termodynamiky, jenž je východiskem při hledání konstitutivních vztahů a evolučních vztahů pro stavové proměnné. Toto bude ukázáno na jednoduchém aplikačním příkladě. V závěru je uvedena literatura, z níž bylo čerpáno a kterou lze doporučit pro hlubší studium.

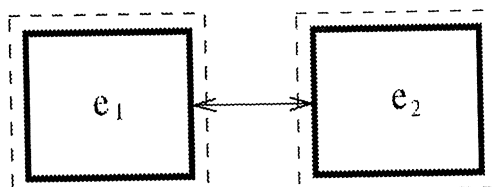
Pro názornost zde zopakujme nejprve stručně potřebné vztahy rovnovážné termodynamiky.

Rovnovážná termodynamika

Zde je uvažován termodynamický proces jako sled rovnovážných stavů *celého systému* (e_1 a e_2 vyznačené čtverci na obr. 1. – čárkovaný obrys značí adiabatickou izolaci v každém okamžiku). Označme symbolem a vektor klasických stavových veličin a symbolem F vektor příslušných sil. První zákon termodynamiky lze pak psát ve tvaru

$$du = dQ + dW, \quad dW = F \cdot da,$$

kde u je vnitřní energie, dQ přivedené teplo a dW práce konaná na systému.



Obr. 1 Schéma rovnovážné termodynamiky. Čtverci je označen rovnovážný ($e_{1,2}$ - equilibrium) stav celého systému. Čárkovaný obrys představuje adiabatickou membránu.

Přírůstek rovnovážné entropie je definován známým vztahem

$$Tds = dQ ,$$

kde entropie je funkcí vnitřní energie a stavových veličin $s = s(u, \mathbf{a})$. První zákon termodynamiky lze pak vyjádřit ve tvaru tzv. Gibbsovy rovnice

$$Tds = du - \mathbf{F} \cdot d\mathbf{a} .$$

Odtud lze pro absolutní teplotu odvodit vztah

$$T^{-1} = \frac{\partial s}{\partial u} .$$

Uvažujme nyní vývoj v čase. Zavedeme-li tepelný tok $\mathbf{q}$, lze psát

$$\dot{Q} = -\nabla \cdot \mathbf{q}$$

a první zákon termodynamiky a Gibbsova rovnice budou pak mít tvar

$$\rho \dot{u} = -\nabla \cdot \mathbf{q} + \mathbf{F} \cdot \dot{\mathbf{a}}$$

$$\dot{s} = T^{-1} \dot{u} - T^{-1} \rho \mathbf{F} \cdot \dot{\mathbf{a}} .$$

Aplikujme nyní obecný tvar bilančního vztahu na entropii

$$\dot{s} = -\nabla \cdot \mathbf{J}^s + \sigma^s .$$

Zde J^s je hustota toku entropie a σ^s hustota její produkce. Pro tok entropie z předchozího evidentně platí

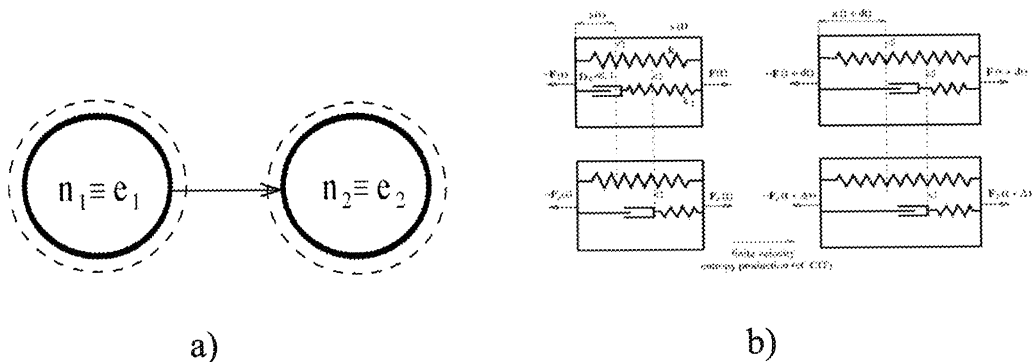
$$J^s = T^{-1}q.$$

Vyjádřeme nyní produkci entropie, jež dle druhého zákona termodynamiky musí být nezáporná

$$\sigma^s = \dot{s} + \nabla \cdot J^s = -\frac{q}{T^2} \nabla T \geq 0.$$

Nyní přejdeme ke *klasické nevratné termodynamice*. Tato teorie je založena na hypotéze lokální rovnováhy: Každý *hmotný bod* (ovály na obr. 2a.) je uvažován jako dynamický systém v rovnováze s odlišnými stavovými veličinami, jež se v čase mění.

Rychlost jejich změny je charakterizována tzv. relaxačním časem τ_m . Jevům na mikroúrovni přísluší relaxační čas τ_M . Poměr těchto dvou časů je tzv. Deborahovo číslo $De = \tau_m / \tau_M$. V CIT je předpokládáno, že je velmi malé - $De \ll 1$.



Obr.2a,b. Schéma CIT. Kružnice vlevo označují částice kontinua, o nichž se předpokládá, že v každém okamžiku velmi rychle relaxují z nerovnovážného stavu ($n_{1,2}$ - non-equilibrium) do stavu rovnovážného ($e_{1,2}$). Vpravo je situace demonstrována na mechanickém modelu.

Pro názornost je na obr. 2b znázorněn jednoduchý systém sestávající z pružiny a paralelně k ní připojené další pružině s tlumičem v sérii. Tento systém je pak vyplněn dokonalé stlačitelným ideálním médiem, které dovoluje hovořit o teplotě, teple a jeho toku. Horní dva stavy odpovídají reálnému vývoji v čase, zatím co dolní stavy představují odpovídající rovnovážné stavy, ve kterých pružina s tlumičem dokonvergovala (velmi rychle - $De \ll 1$) do rovnovážné polohy. Je samozřejmé, že i vnější síly F a F_e budou v obou případech různé – časový vývoj systému, jenž se stále nachází v rovnováze (dolní část) nerespektuje disipaci v tlumiči. Pro reálný proces platí první zákon termodynamiky v stejné podobě jako v rovnovážné termodynamice

$$du = dQ + dW, \quad dW = F \cdot da. \quad (*)$$

Poněvadž entropii definujeme pro rovnovážný stav, použijeme ji pro „vyrelaxovaný“ proces

$$du = Tds + F_e \cdot da,$$

a tedy Gibbsův vztah je

$$Tds = du - F_e \cdot da \rightarrow T^{-1} = \frac{\partial s}{\partial u}. \quad (**)$$

Dosazením z rovnice (*) do rovnice (**) obdržíme vztah pro změnu entropie

$$Tds = dQ + (F - F_e) \cdot da.$$

Zavedeme-li nyní opět čas, lze psát

$$\dot{Q} = -\nabla \cdot \mathbf{q}$$

a první zákon termodynamiky a Gibbsova rovnice budou pak mít tvar

$$\rho \dot{u} = -\nabla \cdot \mathbf{q} + F \cdot \dot{\mathbf{a}}$$

$$\dot{s} = T^{-1} \dot{u} - T^{-1} \rho F_e \cdot \dot{\mathbf{a}}.$$

Analogicky jako v rovnovážné termodynamice, tj. s využitím obecného bilančního vztahu pro entropii a se stejným vztahem pro její tok, obdržíme pro produkci entropie

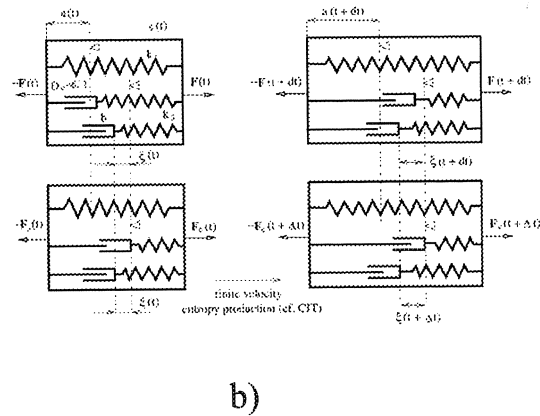
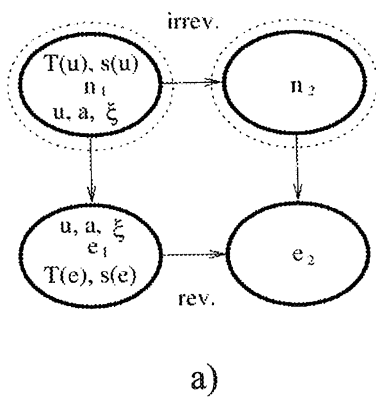
$$\sigma^S = \dot{s} + \nabla \cdot \mathbf{J}^S = T^{-1} \rho (\mathbf{F} - \mathbf{F}_e) \cdot \dot{\mathbf{a}} - \frac{\mathbf{q}}{T^2} \nabla T \geq 0.$$

Závorka $(\mathbf{F} - \mathbf{F}_e)$ představuje disipační sílu. Podmínka nezápornosti produkce entropie bude splněna např. tehdy, když bude platit

$$\mathbf{F} - \mathbf{F}_e = \mathbf{F}_{dis} = \alpha \dot{\mathbf{a}}; \quad \alpha \geq 0.$$

Avšak ne všechny jevy na mikroúrovni mají relaxační časy mnohem menší než jsou časy příslušné reálným makrojevům. Vezmeme-li v úvahu druhý extrém, tj. jevy s relaxačními časy mnohem delšími než jsou makročasy, tedy kdy $De \gg 1$, dojdeme k *termodynamice s vnitřními parametry*.

Tato teorie je založena na tzv. axiomu doprovodného stavu (accompanying state axiom – Maugin(1999)): Ke každému nerovnovážnému stavu existuje doprovodný rovnovážný stav a ke každému nevratnému procesu existuje doprovodný proces vratný. Situace je znázorněna na obr. 3a,b.



Obr. 3.a,b. Schéma IVT. Částice kontinua je v každém okamžiku izolována od okolí (horní část obr. a)) a relaxuje do rovnovážného stavu $e_{1,2}$. Vnitřní proměnné ξ relaxují tak pomalu, že je v daném okamžiku můžeme považovat za konstantní.

Množina stavových veličin sestávající dosud z vnitřní energie u a lokálních stavových veličin a je doplněna o tzv. vnitřní proměnné ξ , jež jsou měřitelné ale neřízené vnějšími podněty a odpovídají vnitřním mikroprocesům. Při přiřazení rovnovážného stavu reálnému stavu nerovnovážnému zůstávají neměnné. Na obr. 3b je to např. deformace spodní pružiny. Entropie je pak funkcí i těchto vnitřních parametrů - $s = s(u, a, \xi)$.

První zákon termodynamiky pro reálný proces (horní část obr. 3b) má stále stejný tvar (*). Pro vratný proces doprovodný (dolní část) lze pak s využitím entropie psát

$$du = Tds - A.d\xi + F_e.da,$$

kde A je síla příslušná vnitřním proměnným. Gibbsova rovnice je pak

$$Tds = du + A.d\xi - F_e.da \rightarrow T^{-1} = \frac{\partial s}{\partial u}. \quad (**)$$

Opět dosazením z (*) do (**) dostaneme vztah pro změnu entropie

$$Tds = dQ + (F - F_e).da + A.d\xi.$$

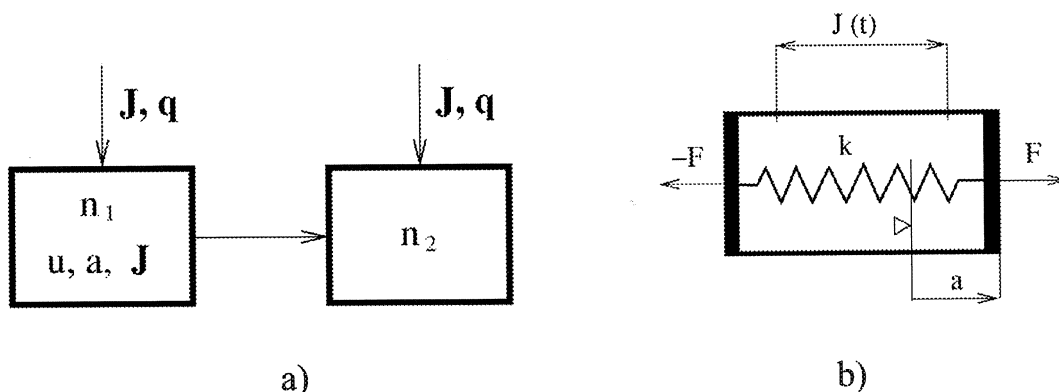
Obdobně jako pro klasickou nerovnovážnou termodynamiku lze odvodit pro produkci entropie

$$\sigma^s = \dot{s} + \nabla \cdot \mathbf{J}^s = T^{-1} \rho (F - F_e) \cdot \dot{a} + \rho T^{-1} A \cdot \dot{\xi} - \frac{q}{T^2} \nabla T \geq 0.$$

Tato nerovnost vyjadřující druhý zákon termodynamiky, je tedy pouze rozšířena o člen respektující časovou změnu vnitřních parametrů.

Existují však systémy, u kterých relaxační časy mikrojevů jsou řádově stejné, jako relaxační časy makrojevů, tj. $De \in (1 - \Delta, 1 + \Delta)$. V takovém případě lze použít tzv. *rozšířenou nevratnou termodynamiku*. Ta neuvažuje doprovodný rovnovážný stav, avšak zavádí mezi stavové veličiny toky, jež označíme $\mathbf{J}$. Mezi ně lze zahrnout i tepelný tok q . Situace je opět znázorněna na

obr. 4a,b. Jako vnější tok lze uvážit např. vnější sílu působící na náš triviální systém tentokrát spočívající pouze z jedné pružiny. Tento příklad lze chápat např. jako lineární oscilátor s vnějším buzením, kterým je právě onen tok J .



Obr. 4.a,b. Schéma EIT.

1. zákon termodynamiky lze pak psát ve tvaru (tepelný tok je zahrnut do J):

$$du = dQ + dW_c + dW_J, \quad dW_c = \mathbf{F}_c \cdot d\mathbf{a}, \quad dW_J = J \cdot d\mathbf{a}. \quad (*)$$

Poněvadž nyní jsou toky zahrnuty mezi stavové veličiny, závisí na nich i entropie – $s = s(u, a, J, (q))$.

Pro její přírůstek pak tedy obecně platí

$$ds = \frac{\partial s}{\partial u} du + \frac{\partial s}{\partial a} da + \frac{\partial s}{\partial J} dJ. \quad (**)$$

Nyní označíme $\frac{\partial s}{\partial u} = \theta^{-1}$, kde $\theta(u, J)$ je nově zavedená teplota, $\frac{\partial s}{\partial J} = \theta^{-1} \propto J$,

$\frac{\partial s}{\partial a} = -\theta^{-1} \rho^{-1} \mathbf{F}_e$. Dosadíme-li nyní tyto vztahy spolu s výše uvedeným výrazem pro du plynoucím z prvního zákona termodynamiky, obdržíme

$$(*) \rightarrow (**): \quad \Theta ds = dQ + (\mathbf{F}_c - \mathbf{F}_e + J) \cdot d\mathbf{a} + \alpha \cdot dJ.$$

Jestliže nyní budeme opět uvažovat tepelný tok jako samostatnou proměnnou, pro kterou platí $\dot{Q} = -\nabla q$, pak výše uvedené rovnice bude možné přepsat do následujícího tvaru

$$\rho \dot{u} = -\nabla \cdot \mathbf{q} + F_c \cdot \dot{\mathbf{a}} + \mathbf{J} \cdot \dot{\mathbf{a}}$$

$$\dot{s} = \Theta^{-1} \dot{u} + \Theta^{-1} \alpha_q \cdot \dot{\mathbf{q}} - \Theta^{-1} \rho F_e \cdot \dot{\mathbf{a}} + \Theta^{-1} \alpha \cdot \dot{\mathbf{J}},$$

$$\text{kde } \Theta^{-1} \alpha_q = \frac{\partial s}{\partial q}, \quad \Theta^{-1} \alpha = \frac{\partial s}{\partial j}.$$

Nyní je nezbytné učinit některé předpoklady. V literatuře (např. Jou&al.(1993)) jich je možno nalézt celou řadu. Jako příklad zde uveďme tyto

$$\mathbf{J}^s = \Theta^{-1} \mathbf{q} + \beta \mathbf{J} \cdot \mathbf{q}$$

$$\alpha_q = \alpha_{q0} \mathbf{q}, \quad \alpha = \alpha_0 \mathbf{J}, \quad (\rightarrow \Theta^{-1} = T^{-1} + \alpha_0 \mathbf{J} \cdot \mathbf{J} + \alpha_{q0} \mathbf{q} \cdot \mathbf{q}),$$

kde $\alpha_{q0}, \alpha_0 = (\alpha_{01}, \alpha_{02}, \dots)$ jsou skalární koeficienty.

Použijeme-li opět bilanční vztah pro entropii ve tvaru

$$\dot{s} = -\nabla \cdot \mathbf{J}^s + \sigma^s,$$

lze pro produkce entropie psát

$$\begin{aligned} \sigma^s = \dot{s} + \nabla \cdot \mathbf{J}^s = & \mathbf{q} \cdot [\nabla T^{-1} + \rho T^{-1} \alpha_{q0} \mathbf{q} + \nabla \cdot (\beta \mathbf{J})] + T^{-1} \rho (F_c - F_e) \cdot \dot{\mathbf{a}} \\ & + \mathbf{J} \cdot (T^{-1} \dot{\mathbf{a}} + \rho T^{-1} \alpha_0 \dot{\mathbf{J}} + \beta \nabla \cdot \mathbf{q}) \geq 0. \end{aligned}$$

Toto je formulace druhého zákona termodynamiky v EIT. Je ovlivněna uvedenými předpoklady a lze tak dojít stejným postupem i k formulacím jiným. Ty jsou pak východiskem např. při hledání konstitutivních vztahů a evolučních vztahů pro stavové veličiny. Jednoduchý příklad je uveden dále.

Příklad:

Uvažujme viskoelastické kontinuum a jeho izotermickou deformaci. Příklad je převzat z knihy Jou&al.(1993). Nechť

$$a \sim (e, \tilde{\epsilon}), F_c \sim (s', \tilde{\tau}'), F_e = F_c, J \sim (s'', \tilde{\tau}''),$$

kde $e = \frac{1}{3} \epsilon_i^i$ a s' resp. s'' je elastické resp. viskozí hydrostatické napětí. Dále $\tilde{\epsilon}, \tilde{\tau}', \tilde{\tau}''$ jsou postupně deviator deformacího tenzoru a deviatory elastického a viskozího tenzoru napjatosti. Platí

$$\tau = \tau' + \tau''$$

$$\tau' = s' I + \tilde{\tau}' \quad (***)$$

$$\tau'' = s'' I + \tilde{\tau}''$$

$$\epsilon = e I + \tilde{\epsilon}.$$

Po dosazení do vztahu pro produkci entropie, tj. do druhého zákona termodynamiky, obdržíme

$$\begin{aligned} \sigma^s &= J \cdot (T^{-1} \dot{a} + \rho T^{-1} \alpha_0 \dot{J}) = \\ &= T^{-1} [s'' \dot{e} T^{-1} + \tilde{\tau}'' \dot{\tilde{\epsilon}}] + \rho T^{-1} [\alpha_{01} s'' \dot{s}'' + \alpha_{02} \tilde{\tau}'' \dot{\tilde{\tau}}''] \geq 0. \end{aligned}$$

Tato nerovnost je splněna např. tehdy, platí-li

$$T^{-1} \dot{e} + \rho T^{-1} \alpha_{01} \dot{s}'' = L_1 s''$$

$$T^{-1} \dot{\tilde{\epsilon}} + \rho T^{-1} \alpha_{02} \dot{\tilde{\tau}}'' = L_2 \tilde{\tau}'',$$

kde L_1, L_2 jsou kladné skalární (Onsagerovy) koeficienty. Tyto rovnice lze přepsat do tvaru

$$\tau_s \dot{s}'' + s'' = \frac{T^{-1}}{L_1} \dot{e}$$

$$\tau_\tau \ddot{\tilde{\tau}} + \ddot{\tilde{\tau}} = \frac{T^{-1}}{L_2} \dot{\tilde{\epsilon}},$$

kde pro relaxační časy platí

$$\tau_s = -\frac{\rho T^{-1} \alpha_{01}}{L_1}$$

$$\tau_\tau = -\frac{\rho T^{-1} \alpha_{02}}{L_2},$$

přičemž budeme předpokládat, že $\alpha_{02} < 0$; $\alpha_{01} < 0$. Nahradíme-li nyní $\ddot{\tilde{\tau}}$ a s'' s využitím (***) veličinami $\tilde{\tau}$ a s a uvážíme-li Hookův zákon ve tvaru

$$e = \frac{1}{3\lambda + 2\mu} s'$$

$$\tilde{\epsilon} = \frac{1}{2\mu} \tilde{\tau}',$$

kde λ a μ jsou Lamého koeficienty, obdržíme základní vztahy pro Poynting-Thompsonovo těleso

$$\tau_s \dot{s} + s = 3K(e + \tau_s' \dot{e}) \text{ kde } \tau_s' = \frac{T^{-1}}{3K} + \tau_s$$

$$\tau_\tau \dot{\tilde{\tau}} + \tilde{\tau} = 2G(\tilde{\epsilon} + \tau_\tau' \dot{\tilde{\epsilon}}) \text{ kde } \tau_\tau' = \frac{T^{-1}}{2G} + \tau_\tau,$$

kde $3\lambda + 2\mu = 3K$ a $2\mu = 2G$.

Jestliže položíme v druhé rovnici $\tau_\tau = 0$, získáme konstitutivní vztah pro Kelvin-Voigtovo kontinuum a položíme-li naopak $G=0$, pak vztah přejde do tvaru pro Maxwellovo kontinuum.

Je pochopitelné, že jednotlivé modely lze propojit tak, aby bylo možno modelovat kontinua, kde probíhají současně jevy s různými relaxačními časy.

Na závěr bych rád znovu zdůraznil, že se jedná o pokus přiblížit teorie nerovnovážné termodynamiky na modelech blízkých klasickým mechanikům. Omlouvám se odborníkům v oblasti termodynamiky za všechny nepřesnosti, kterých jsem se zřejmě dopustil a budu vděčný za jejich připomínky.

Literatura

- [1] Lebon, G., Jou, D., Casas-Vazquez, J., Understanding Non-equilibrium Thermodynamics, Springer, Berlin, 2008.
- [2] Jou, D., Casas-Vazquez, J., Lebon, G., Extended Irreversible Thermodynamics, Springer, Berlin, 1993.
- [3] Jou, D., Casas-Vazquez, J., Lebon, G., Extended Irreversible Thermodynamics revisited (1988-98), Rep. Prog. Phys. 62 (1999) 1035-1142.
- [4] Lu, X., Hanagud, S., A nonequilibrium irreversible thermodynamics model for material damping, International Journal of Solids and Structures 44 (2007) 3278-3303.
- [5] Maugin, G.A. The Thermodynamics of nonlinear irreversible behaviors - An introduction. World Scientific Publishing, Singapore 1999.

**Soutěž České společnosti pro mechaniku o nejlepší práci autora
mladšího 35 let na konferenci EAN 2011,
konané ve Znojmě ve dnech 6.-9. června 2011.**

Hodnotící komise rozhodla ocenit příspěvek **Mgr. Michala Pochmona**
s názvem

Tensile Stress of Thin Ceramic Layers Measured by Fizeau Interferometry .

Finanční odměnu 3000,- Kč věnovala Česká společnost pro mechaniku.

Vítězi gratulujeme.

Doc. Ing. Hynek Klášterka, CSc. – nekrolog

V půli května 2011 otrásla námi na Západočeské univerzitě v Plzni neočekávaná zvěst, že náš kolega doc. Ing. Hynek Klášterka, CSc. měl těžkou dopravní nehodu. Po necelém týdnu přišla zpráva další, ještě smutnější, totiž, že svým zraněním podlehl. Při sedmdesátinách před dvěma lety jsme mu přáli, kromě jiného, mnoho zdraví a štěstí. To druhé se zjevně nenaplnilo. Naopak, ocitl se ve špatnou dobu na špatném místě, kde se setkal spolu se dvěma spolujezdcí se špatným řidičem kamionu, který dva z nich smetl, když opravovali kolo.

Doc. Klášterka ve svém seniorském věku byl stále plný životního elánu, který vnášel jak do své pedagogické a výzkumné práce na katedře energetických strojů Strojní fakulty ZČU, tak do zájmové činnosti a do života své rodiny. Spektrum zájmů měl právě tak široké, aby nové věci mohl důkladně prostudovat, osvojit a rozvíjet. Přitom jej zajímaly otázky energetiky, zejména teoreticky náročné, v nichž uplatňoval vrozené a cílevědomě rozvíjené analytické myšlení. Patřil k odborníkům dnes nepočtené staré gardy, vybavené schopností chápat a realizovat složité analytické výpočty. To mu usnadňovalo ujímat se na katedře v souvislosti se zahájením činnosti jaderné specializace i pro něho nových předmětů a aktivit, jako je teorie jaderných reaktorů, kombinovaných úloh hluku a vibrací, popř. teorie proudových strojů, a aktivně v nich pedagogicky a výzkumně působit.

Doc. Klášterka, rodák ze Strakonice, vystudoval na někdejší Vysoké škole strojní a elektrotechnické v Plzni obor tepelné turbíny, řízený nestorem čs. turbinářství prof. Josefem Bečvářem. Po promoci působil na katedře hydromechaniky a termomechaniky,

vedené prof. Janem Bukovským DC.Ae, dalším renomovaným odborníkem, zaměřeným na letectví a experimenty v proudění. Ač srdcem teoretik, duch katedry svedl mladého Klášterku k experimentálním pracím v oblasti konvektivního sdílení tepla a na téma palivový článek reaktoru a distanční mřížky vypracoval svou dizertační práci. Po obhajobě přešel do Ústředního výzkumného ústavu Škoda v Plzni, kde mu dělal vedoucího a rádce další skvělý specialista, tentokrát na vibrace strojů, Ing. Vladimír Pětrovský, CSc. Měl zde na starosti kmitání způsobené tekutinami a jejich prouděním, jako jsou problémy labyrintových ucpávek parních turbín, kmitání skořepin v kapalině s aplikací na nosný válec a jeho dno v jaderném reaktoru, vibrace a zvukové efekty v zavazbených soustavách trubkových svazků výměníků tepla, vibrace oběžných lopatek turbostrojů a jiné.

V roce 2001 místo do důchodu se Ing. Klášterka vrací na univerzitu a na katedru, kde započal svoji profesionální dráhu, a habilituje se na docenta. Ve výzkumné činnosti pokračuje a zprvu akcentuje nelineární vibrace trubek a efekty s nimi spojené. Později se zabývá dalšími tématy plynoucími z jeho účasti na řešených grantových projektech. Je školitelem doktorandů, členem zkušebních komisí, oborových rad, aktivně se zúčastňuje vědeckých konferencí atd. tak, jak to přináší život pedagoga a výzkumníka na fakultě. Byl též činným ve výboru západočeské pobočky Společnosti pro mechaniku a ve výboru Vědeckotechnické společnosti Výzkumného a zkušebního ústavu v Plzni. Zde byl např. jedním z iniciátorů a hlavních přednášejících vzdělávacích seminářů o mechanice, pořádaných s periodou 2 let na zámku v Nečtinech.

O tom všem, bohužel, můžeme hovořit jen v minulém čase. O jeho nekonfliktní povaze a vrozeném smyslu pro humor, s nímž překlentoval méně i více vypjaté situace. O schopnosti nalézat jádra jevů a problémů včetně společenských a naopak neschopnosti pomlouvat a podlézat nadřizeným. O jeho zálibě v pěstování nových odrůd ovoce, kde uplatňoval vědecké přístupy, důkladnost a trpělivost, když výsledky se dostavují po desítkách let. O jeho pěkném vztahu k manželce, rodině a k vnoučatům zejména. Bylo by toho ještě dost se zdůrazněním bylo.

Kolega a dobrý člověk Hynek Klášterka nám moc chybí a vzpomínky na něj budou blednout s nepatrným gradientem v čase.

Za spolupracovníky Jiří Linhart

*

Doc. Ing. Daniel Makovička, DrSc., sedmdesátiletý

V květnu 2011 se dožil doc. D. Makovička ve zdraví a v plném pracovním nasazení svých 70. narozenin. Od r. 1965 je zaměstnán na ČVUT v Praze, Kloknerově ústavu (dříve Stavebním ústavu), kde působí dosud. Před tímto obdobím byl po dobu dvou let stavbyvedoucím u firmy Dopravní stavby Olomouc. V roce 1968 obhájil kandidátskou dizertační práci na Fakultě stavební ČVUT pod vedením prof. Vladimíra Kolouška a v r. 1982 doktorskou práci tamtéž. V obou těchto pracích se zabýval dynamikou konstrukcí, které zůstal věrný až dodnes. V rámci statiky a dynamiky stavebních konstrukcí se zabývá zejména účinky statických a dynamických zatížení, přírodní a technické seismicity, účinky tlakových vln od havarijních a teroristických výbuchů a jejich posuzováním, budícími silami strojů a pružným zakládáním budov a strojů. Pro analýzu konstrukcí využívá převážně numerických metod, často v kombinaci s experimentem. Jeho práce je zaměřena na ověřování, popřípadě stanovení bezpečnosti a spolehlivosti konstrukce a její zbytkové životnosti. Ve své činnosti se zabývá také

normalizací statických a dynamických účinků na konstrukce a posuzováním jejich odezvy v rámci národních i mezinárodních norem řady ISO a CEN.

V r. 1998 se stal docentem pro obor mechanika. V rámci pedagogické činnosti na Fakultě stavební ČVUT se od r. 1979 podílel na výuce statiky, dynamiky a pružnosti a pevnosti. V současnosti je zván k přednáškové činnosti v oboru výbuchového zatížení a seismicity na TU VŠB v Ostravě a ZČU v Plzni. Externě přednášel v rámci semestrálních pobytů na RWTH Aachen, Danmarks Tekniske Højskole, Lyngby a na Chalmers University of Technology, Göteborg. V průběhu své činnosti vchoval 9 doktorandů.

Po řadu let působí jako autorizovaný inženýr v oboru Statika a dynamika staveb a soudní znalec. Je opakovaně po řadu let řešitelem projektů udělených GAČR z oblasti analýzy staticky a dynamicky zatížených konstrukcí od účinků strojů, technické a přírodní seismicity a výbuchů. Publikoval přes 260 odborných a vědeckých prací. Řada publikací zejména z posledních let je věnována využití poznatků jeho celoživotní práce při ověřování spolehlivosti konkrétních konstrukcí budov, chladicích věží, průmyslových hal a objektů jaderné energetiky. Spoluautorem těchto publikací je téměř pravidelně jeho starší syn Daniel.

Jubilant je přátelské povahy, zodpovědný a vysoce kvalifikovaný. Do dalších let přejeme jubilantovi mnoho zdraví, osobní pohody a ještě řadu dalších odborných a vědeckých úspěchů v jeho životě.

Marie Studničková

*

K životnímu jubileu prof. RNDr. Zdeňka Dostála, DSc.

V květnu tohoto roku proběhl metou svých 65. narozenin můj kolega a přítel prof. RNDr. Zdeněk Dostál, DSc. Pokusím se využít této příležitosti k připomenutí jeho profesní kariéry.

Prof. Zdeněk Dostál se narodil v Olomouci, kde také absolvoval vysokoškolské studium numerické matematiky na Přírodovědecké fakultě Univerzity Palackého. Jeho diplomovou práci tehdy vedla paní doktorka Dana Štěrbová, neobyčejná žena, která zdolávala osmitisícové hory, ale také přivedla kolegu k prof. Vlastimilu Ptákovi, vědci světového formátu, který působil na Matematickém ústavu ČSAV v Praze. Tato skutečnost a následné zahájení vědecké aspirantury u prof. Ptáka byly pro profesní vývoj mého kolegy neobyčejně důležité z několika hledisek.

Je třeba zmínit, že Zdeněk nastoupil aspiranturu ještě jako pracovník Pozemních staveb v Olomouci, ale zjistil, že potřebuje poněkud jiné prostředí a zejména více času k vědecké práci. A to ho přivedlo do Ostravy, na katedru matematiky a deskriptivní geometrie Vysoké školy báňské, kde ostatně v tu dobu již pracovala řada jeho bývalých kolegů ze studií v Olomouci. Současně Zdeněk poznal krásu funkcionální analýzy a matematického výzkumu.

Díky funkcionální analýze jsem se o svém kolegovi na katedře také brzy dověděl, i když jsem v době jeho příchodu do Ostravy vykonával povinnou vojenskou službu. Zde mě informovala má budoucí žena, že na katedru matematiky VŠB nastoupil nový pracovník, který má zájem o půjčení známé encyklopedie N. Dunforda a J. T. Schwarze, Linear operators, kterou jsem měl trvale zapůjčenou z knihovny. To bylo překvapení! Do té doby jsem v Ostravě neznal nikoho, s kým bych se měl o encyklopedii dělit. S novým kolegou jsme se po mém návratu z vojny také hned sblížili, a měl jsem možnost sledovat úspěšný vývoj jeho dizertace, který byl zakončený řadou článků o spektru matic, maticových mocninách, kritickém exponentu apod. na konci sedmdesátých let.

Další Zdeňkovo období souviselo se vznikem nového pracoviště akademie věd, Hornického ústavu ČSAV, v Ostravě. Sem nastoupil, jako jeden z prvních pracovníků, již v roce 1978 a získal ihned podporu vedení pro vytváření programů pro řešení úloh geomechaniky metodou konečných prvků. Já jsem Zdeňka v přechodu z VŠB po roce následoval a zapojil jsem se do úkolu vytvořit program pro řešení rozsáhlých 3D úloh geomechaniky. Nastoupil jsem v září a hned jsme se domluvili, že do konce roku program vytvoříme a potom budeme mít čas dále se věnovat krásným problémům funkcionální analýzy. Vše se ale vyvíjelo poněkud jinak, protože oblast okrajových úloh, metody konečných prvků a iteračních řešičů obsahovala dosti funkcionální analýzy a navíc i mnoho nových, zajímavých a důležitých matematických problémů a prostoru pro vlastní výzkum. Nakonec i na tvorbě programů bylo mnoho vzrušujícího – pro znalce v heslech: PL/I, noční směny na IBM370, úžasný předchůdce PC – stolní kalkulátor HP9845B, dostupný ne na jiném konci Ostravy, ale ve vedlejší pracovně. Uvedené období bylo završeno vytvořením pokročilých MKP programů i prvními pracemi v oblasti iteračních metod. Zdeněk tehdy objevil předpokládané projektorem, zvané taky technikou deflace v souběžných pracích R. A. Nicolaidese.

Období následující znamená počátek let devadesátých, období velkých změn společnosti, ke kterým patřila i restrikce Akademie věd a posílení vysokých škol. Na VŠB v Ostravě vznikla nová fakulta elektrotechniky a informatiky a na ní našel Zdeněk prostor k založení nové katedry aplikované matematiky. Tuto práci odvedl znamenitě. Získal podporu vedení školy pro vybudování katedry spojující výuku s výzkumem, našel nadšené mladé spolupracovníky, budoval síť kontaktů se světem (RICAM Linz, University of Colorado v Boulderu, Aalborg v Dánsku, později Stanford University a dal.), i s vynikajícími českými odborníky (za všechny jmenujme prof. J. Haslingera z MFF UK), posílal své mladší kolegy na stáže, především do světa. Přitom organizoval a vedl výuku, pracoval na nových učebních programech a formoval i výzkumný profil katedry, který zahrnoval řešení kontaktních úloh a škálovatelné metody rozložení oblasti. K těm patří metoda FETI resp. Total FETI, která je Zdeňkem a jeho spolupracovníky

využita v mnoha pracích a kontextech. Zdeňkovým velkým úspěchem je i vytvoření škálovatelných algoritmů optimalizace a autorství monografie *Optimal Quadratic Programming Algorithms*, která vyšla v nakladatelství Springer v roce 2009.

Z uvedeného je patrná bohatá a plodná činnost našeho kolegy. A to mnohé vynechávám. Nezmiňuji podrobnosti profesní kariéry, kdy postupně získával tituly docenta (MFF UK 1992), profesora (VŠB-TU 1994) a doktora věd (AV ČR 2004). Nezmiňuji ani bohatý osobní život, dva syny, cestování, dlouhodobé pobyty v Zambii a Brazílii, dovolené na kolech či nedávné absolutorium tanečních s manželkou Maruškou. A nyní se zdá, že pro Zdeňka začne opět nová životní etapa související se schválením superpočítačového projektu IT4Innovations v Ostravě, kde bude Zdeněk pověřen řízením vědeckého programu.

K tomu všemu bych mu rád, za všechny kolegy, studenty a přátele, popřál hodně zdraví a elánu, štěstí a pohodu v rodině, i něco času na koníčky a radost z úspěchů a výsledků své práce.

Radim Blaheta

*

K šedesátinám prof. Ing. Eduarda Malenovského, DrSc.

15. června letošního roku oslavil šedesáté narozeniny jeden z mladých mužů Ústavu mechaniky brněnské Strojní fakulty, profesor Eduard Malenovský. Označení mladý muž je plně na místě, pokud vezmeme v úvahu šíři jubilantových aktivit, jeho energii a zápal, se kterými se plně věnuje všem povinnostem a závazkům vysokoškolského učitele, odborníka v oblasti inženýrské mechaniky a specialisty v oboru dynamiky rotorů.

Prof. Malenovský se narodil ve Zlíně v roce 1951. Po absolvování Střední průmyslové školy strojní a železniční v Břeclavi studoval na Strojní fakultě Vysokého učení technického v Brně, kterou zakončil získáním inženýrského titulu v roce 1975. Poté nastoupil do výzkumného ústavu Závodů energetického strojírenství do oddělení, kde se zabýval výpočtovou a experimentální analýzou dynamických vlastností lopatek parních a spalovacích turbín. Tato tematika se pak stala trvalým vědeckým a odborným zájmem jubilanta. Zejména experimentální analýza jej přivedla do prostředí elektráren, kde se prováděla měření ve své době unikátní. Byl mezi prvními, kteří pomocí ruského přístroje ELIA (později ERA) provedli měření kmitání lopatek spalovací turbíny bezkontaktní magnetickou metodou. Zde také zahájil externí kandidátské – dnešní doktorské studium, které v roce 1985 úspěšně ukončil získáním titulu CSc. Školitelem mu byl prof. Jaromír Slavík, na jehož vliv a vedení jubilant dodnes vděčně vzpomíná. Právě profesor Slavík přivedl kolegu Malenovského v roce 1984 na tehdejší katedru mechaniky těles Strojní fakulty VUT v Brně.

Své bohaté zkušenosti a znalosti uplatňuje od té doby profesor Malenovský jak ve výuce předmětů základního inženýrského studia, tak ve specializaci Inženýrská mechanika a biomechanika, kterou v posledních 20 letech zásadním způsobem pomáhal budovat. Je vedoucím Odboru kinematiky a dynamiky našeho ústavu a garantem výuky obou hlavních předmětů tohoto odboru. Připravil a vede výuku tří dalších předmětů

specializace – Rotorové soustavy, Počítačové metody v dynamice a Základy technické diagnostiky. Součástí těchto aktivit je i příprava skript a dalších studijních podkladů pro uvedené kurzy.

Pedagogickou práci dokázal kolega Malenovský vždy spojit s odborným a vědeckým růstem. V letech 1995 – 2005 se postupně habilitoval, obhájil vědecký titul DrSc. a získal profesuru v oboru Aplikovaná mechanika. Kromě vědecké práce (projekty GAČR, MŠMT, desítky článků a příspěvků na mezinárodních konferencích) spolupracuje trvale s průmyslem. Zde je možno zmínit významné firmy jako Sigma a.s. Lutín, Sigma Hranice, ČKD Blansko, První brněnská strojírna Velká Bíteš, ABB Alstom Brno, ČEZ Praha (ŠPW Plzeň) a mnoho dalších. Osobně si jubilant velmi cení rovněž dlouholeté spolupráce s kolegy – prof. Pochylým z Brna a prof. Zapomělem z Ostravy.

Profesor Malenovský je dlouholetým členem Společnosti pro mechaniku, organizátorem seminářů z Dynamiky rotorů. Je rovněž členem výborů IFToMM pro dynamiku rotorů a pro vzdělávání.

Ve všech oblastech rozsáhlé vědecké a pedagogické činnosti se daří jubilantovi kvalifikovaně spojit teoretický a praktický inženýrský přístup s důrazem na srozumitelnost výkladu a osobní odpovědnost za dosažené výsledky. Mezi studenty i kolegy je znám jako přísný ale spravedlivý zkoušející a oponent a současně jako člověk vždy ochotný pomoci a předat maximum vlastních zkušeností a znalostí všem, kteří o to projeví vážný zájem. Rád proto využívám této příležitosti, abych Ti, Eduarde, poděkoval za dosavadní práci a popřál jménem svým i všech kolegů do dalších let hlavně pevné zdraví, mnoho spokojenosti a radosti v kruhu rodiny, přátel a spolupracovníků.

Jindřich Petruška

K životnímu výročí paní Ing. Jitky Havlíkové – tajemnice České společnosti pro mechaniku

Na tomto místě vycházejí články vyzdvihující úspěchy učených kolegů a spolupracovníků – členů naší Společnosti. V loňském roce téměř bez povšimnutí prošlo půlkulaté výročí narození tajemnice České společnosti pro mechaniku. Stojí zato připomenout si její životní osudy a ocenit její zásluhy přispívající k hladkému chodu Společnosti.

Ing. Havlíková se narodila 3. dubna 1955 v Praze. Je dcerou profesora Jaroslava Valenty. Vystudovala Střední ekonomickou školu a později Vysokou školu ekonomickou. Je provdána, a má dvě děti a dnes je už babičkou.

Tajemnicí Společnosti se stala 1. října roku 1990. Po jistou dobu se o tajemnické povinnosti dělila s Danielou Machkovou, která v červnu roku 1994 rozvázala pracovní poměr.

Ještě předtím, v době kdy Společnost sídlila pod křídly Ústavu teoretické a aplikované mechaniky v emauzském klášteře, měla Společnost sekretářky tři – Boženu Mackovou, Vlastu Kočnarovou a Jiřinu Obrdovou. Pamatuji si jak tyto tři dámy, v době kdy příchod dopisu z daleké ciziny byl událostí, se nad takovým dopisem rozněžňovaly, obdivovaly cizokrajné barevné známky a dlouze diskutovaly o tom, jak správně ofrankovat odpověď.

Pracovní náplň Ing. Havlíkové je rozsáhlá. Zajišťuje spolupráci s odbornými skupinami, pobočkami a s Radou vědeckých společností ČR. Přípravuje podklady zasedání předsednictva a pro výroční zprávy. Vyúčtovává finanční dotace a vede účetnictví a zúčtování dokladů. Je zodpovědná za styk s firmou Nux při vedení webových stránek, má na starosti expedici Bulletinu a pozvánek na přednášky a semináře. Vede evidenci plateb členských příspěvků, agendu společnosti na počítači a evidenci majetku.

Inženýrku Jitku Havlínovou znám více než dvacet let – spolupracovali jsme v dobách, kdy jsem byl redaktorem Bulletinu i později jako vědecký tajemník Společnosti. Vždy byla (a samozřejmě dodnes je) iniciativní spolupracovnicí, na niž je možné se plně spolehnout a bez níž si chod Společnosti jen těžko lze přestavit.

Přeji jí za sebe, za předsednictvo i za členy Společnosti, aby zdraví a osobní spokojenost, úsměv a pohoda, které kolem sebe šíří, jí vydržely i nadále.

Miloslav Okrouhlík
předseda České společnosti pro mechaniku
