



## STATE OF STRESS IDENTIFICATION OF TRANSFORMED – DEFORMED PARTICULAR MATERIALS

J. Maláček\*

**Summary:** *State of stress identification consists of these parts – of miniaturised pressure sensors in matrix arrangement and of a special strain-gauge bridge – this is a complete transducer. Distribution of normal forces on the measuring surface of this transducer in contact with transformed matters can be measured by the matrix tactile sensors. The total normal force together with the total shear forces in two axes on the measuring surface of this transducer in contact with transformed matters can be measured by special strain-gauge bridge. The appropriate software is involved. Identification of deformation consists of digital interface – camera Sony and the appropriate software.*

### 1. Úvod

V technologických i přírodních procesech existuje mnoho různých partikulárních látek, disperzí, suspenzí, kapalin s vysokou viskozitou, každé z těchto látek přísluší mnoho stavů a proměn. Tyto látky při procesech přetváření a deformace není možno považovat za kontinua, snad jen za po částech spojitá kontinua, vlastnosti těchto částí včetně velikosti jsou v čase nestabilní a též neidentifikovatelné. Fyzikální zákonitosti dle mechaniky kontinua nemohou tedy průběhy těchto procesních změn deformace a napjatosti popsat. Prakticky je tedy nemožné určit rozložení sil (interaktivní napětí) mezi např. lopatkami mísiče a míseným sypkým materiálem, není pak možno nejen optimalizovat nebo regulovat příslušný proces, ale například není možno stanovit potřebný kroutící moment a výkon motoru.

Hlavní a dostupnou informací stavů a proměn těchto látek při procesech přetváření - deformace je jednak obraz přetvářeného objemu látky v podobě proudnic a kluzných čar, jednak okrajové podmínky napjatosti tohoto přetvářeného objemu. Za účelem identifikace okrajových podmínek napjatosti přetvářených objemů těchto látek bylo vyvinuto speciální čidlo s příslušným software pro zpracování informací. Za účelem identifikace kluzných čar a proudnic v přetvářeném – deformovaném objemu látky byla vybrána kamera a je v současné době upravován vhodný software.

Jako matematické a fyzikální popisy pole tenzorů napjatosti v přetvářeném – deformovaném objemu látky na základě okrajových podmínek a obrazu přetvářeného objemu látky jsou vybrány dva možné způsoby, jeden na základě teorie kluzných čar, druhý na základě Cauchyho diferenciálních rovnic rovnováhy. Pouze část druhého bude zde uvedena.

---

\* Ing. Jiří Maláček, Ph.D.: Ústav automobilního a dopravního inženýrství, VUT v Brně, FSI,  
Technická 2896/2, 616 69 Brno; tel.: +420.541 142 428, fax: +420.541 142 425;  
e-mail: malasek@fme.vutbr.cz

## 2. Identifikace napjatosti – návrh a konstrukce snímačů

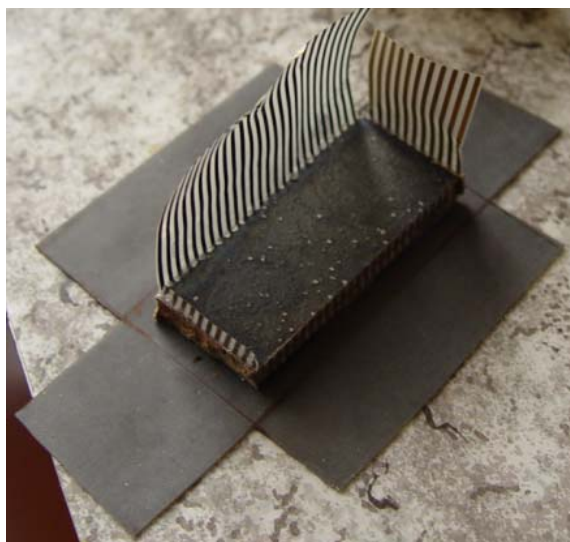
Identifikace okrajových podmínek napjatosti technologicky přetvářeného materiálu je možná měřením rozložení normálových a smykových napětí co do jejich velikosti i směru ve zkoumané hraniční ploše mezi přetvářeným materiálem a strojní součástí. V současné době není možno nakoupit vhodné snímače především z důvodu nevhodného měřicího rozsahu, citlivosti, velikosti, použitého fyzikálního principu a rovněž ceny.

Za účelem měření co možno nejvíce hodnot, podstatných pro určení okrajových podmínek napjatosti byl vyvinut speciální snímač.

Rozložení normálových napětí po měřícím povrchu snímače (strojní součásti) v kontaktu s přetvářeným materiálem možno měřit maticovými taktilními snímači. Z řady fyzikálních principů těchto snímačů je vhodné zvolit maticový taktilní snímač na piezorezistivním principu. Základem takového snímače je silikonová pryž s vydatnou příměsí vodivých částic (10 ÷ 15%), závislost elektrického odporu a normálového tlaku je nelineární, lze ji ve dvou oblastech rozsahu dostatečně linearizovat. Maticový taktilní snímač s využitím příslušného software určí spojitě rozložení normálových napětí po povrchu strojní součásti.

Rozložení smykových napětí po povrchu strojní součásti v kontaktu s přetvářeným materiálem není možno měřit. Maticový taktilní snímač je uchycen na tenzometrickém snímači – ten snímá na měřící ploše cca 26x56mm celkovou normálovou sílu a smykové síly ve dvou na sebe kolmých osách. Rozložení smykových napětí bude na základě rozložení normálových napětí a celkových smykových sil možno stanovit výpočtem z funkční podobnosti směrově odpovídajících si napětí podle materiálové charakteristiky. Za účelem následné prokazatelnosti byl zvolen systém dvou identických snímačů.

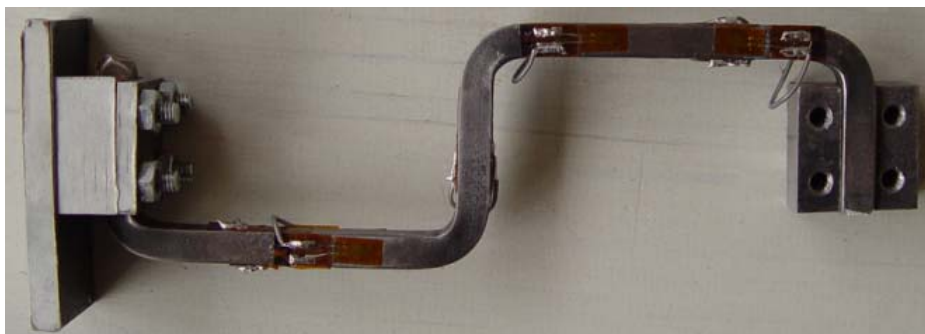
Každý ze dvou snímačů má čelní plochu rozměru 30x60mm, rozložení normálových napětí v měřící ploše cca 26x56mm je snímáno maticovým taktilním snímačem obr. 1, který je proti vnějším vlivům chráněn speciální mechanicky odolnou velmi tenkou pryží.



Obr.1: Způsob sestavování maticového taktilního snímače včetně krycí pryže a jeho konečná odkrytá poloha v tělese snímače.

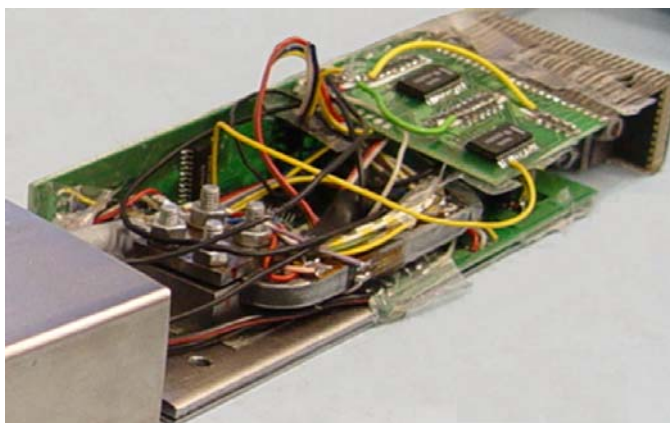
Přesnější (spojitější) rozložení normálových napětí na měřící plochu snímače možno stanovit výpočtem z jednotlivých diskrétních naměřených hodnot s ohledem na celkovou normálovou sílu, která je navíc přesně stanovena tenzometrickým měřícím členem. Podobně bude výpočtem řešeno přesnější rozložení smykových napětí na měřící plochu snímače.

Tvar tenzometrického měřicího členu včetně příslušných tenzometrů, v levé části s uchyceným maticovým taktilním snímačem a v pravé části s úchytem nosného krytu snímače představuje následující obr. 2:

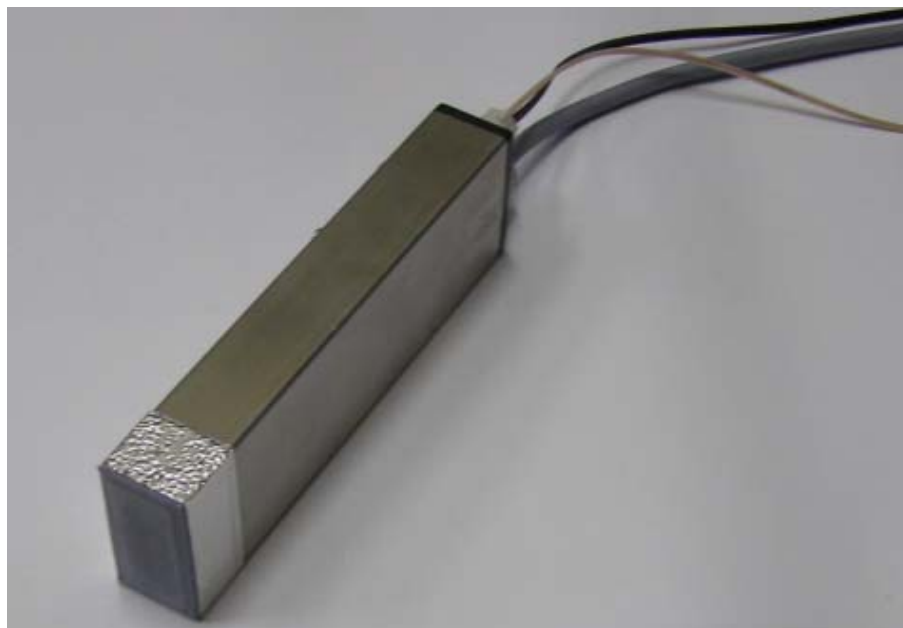


Obr. 2: Základ vnitřní konstrukce snímače.

Kryt snímače – jak je zřejmé z následujícího montážního obr. 3 je vyplněn příslušnou elektronikou. Čelní měřicí plocha 30x60mm je pouze nejmenší plochou snímače, celkový rozměr krytu snímače je 30x60x190mm – viz obr. 4:

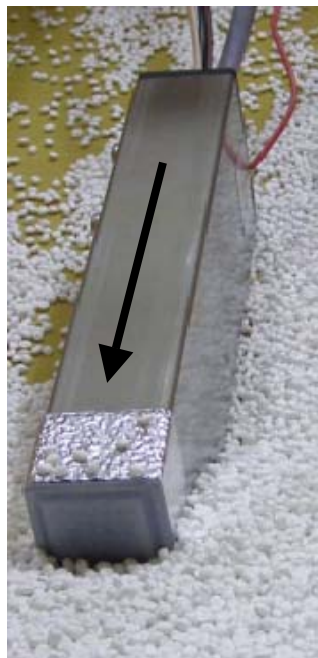


Obr. 3: Montáž snímače.

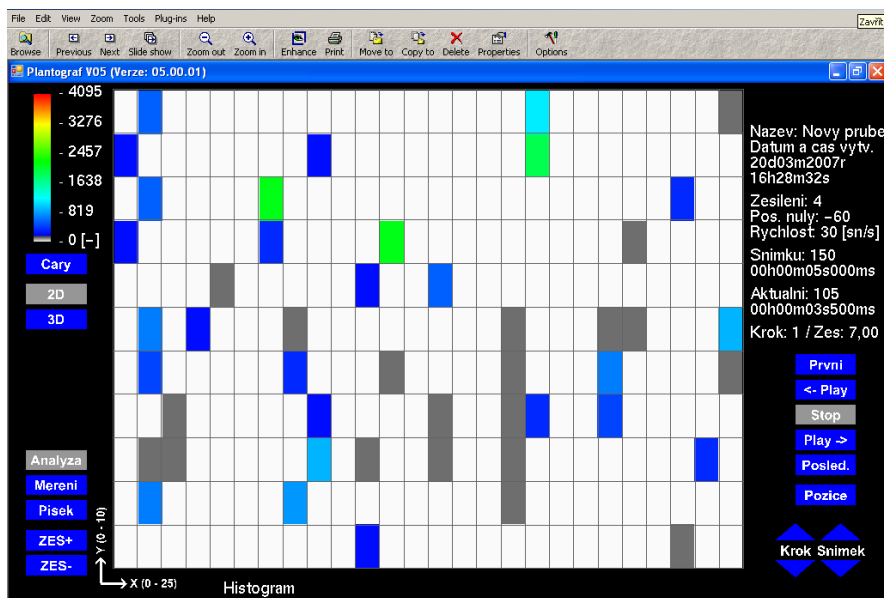


Obr. 4: Vnější design snímače.

Snímač je určen pro měření rozložení napětí po čelní ploše snímače při pronikání zkoumaným materiálem – např. zrnitým partikulárním materiálem ve směru šipky dle obr. 5a. Příslušný vyhodnocovací software nám určuje rozložení normálového napětí po čelní měřící ploše dle obr. 5b. Příslušný vyhodnocovací software nám určuje průběh normálových a smykových napětí po čelní měřící ploše dle obr. 5c:



5a



5b

5c



Obr. 5: Snímač při průniku materiálem ve směru šipky včetně vyhodnocení zatížení.

### 3. Identifikace deformace – kluzných čar a proudnic

Identifikace okrajových podmínek napjatosti technologicky přetvářeného materiálu je možná měření rozložení normálových a smykových napětí co do jejich velikosti i směru na měřící ploše zde uvedeného snímače. Přetvářený materiál nemá však vlastnosti kontinua, proto teoretický dopočet rozložení především smykových napětí nebude přesný. Alespoň některé potřebné informace o nelinearitách procesu přetváření možno získat z obrazu proudnic a kluzných čar, například dle obr. 6:



Obr. 6: Identifikace nelinearit v podobě proudnic a kluzných čar

### 4. Příklad možnosti výpočtu napjatosti v okolí měřené plochy

Jeden z příkladů matematického a fyzikálního popisu pole tenzorů napjatosti v přetvářeném – deformovaném objemu látky na základě naměřených okrajových podmínek v okolí měřící plochy snímače je založen na způsobu výpočtu odvozeného z Cauchyho diferenciálních rovnic rovnováhy a z vhodných vstupních analytických podmínek. Při odvození nahradíme diferenciály konečnými rozdíly a dostaneme následující rekurentní vzorce pro výpočet veličin uzlové sítě:

$$x_{j,k} = \frac{y_{j,k-1} - y_{j-1,k} + x_{j-1,k} \cdot \operatorname{tg} \beta_{j-1,k} + x_{j,k-1} \cdot \operatorname{cot} g(\beta_{j,k-1} + \varphi)}{\operatorname{tg} \beta_{j-1,k} + \operatorname{cot} g(\beta_{j,k-1} + \varphi)} \quad (1)$$

$$y_{j,k} = y_{j,k-1} - (x_{j,k} - x_{j,k-1}) \cdot \operatorname{cot} g(\beta_{j,k-1} + \varphi) \quad (2)$$

$$\beta_{j,k} = \frac{2 \cdot (\sigma_{s,j-1,k} \cdot \beta_{j-1,k} + \sigma_{s,j,k-1} \cdot \beta_{j,k-1}) - (\sigma_{s,j,k-1} - \sigma_{s,j-1,k}) \cdot \operatorname{cot} g \varphi}{2 \cdot (\sigma_{s,j,k-1} + \sigma_{s,j-1,k})} + \frac{\rho \cdot g \cdot [2x_{jk} - x_{j-1,k} - x_{j,k-1} + (y_{j,k-1} - y_{j-1,k}) \cdot \operatorname{cot} g \varphi]}{2 \cdot (\sigma_{s,j,k-1} + \sigma_{s,j-1,k})} \quad (3)$$

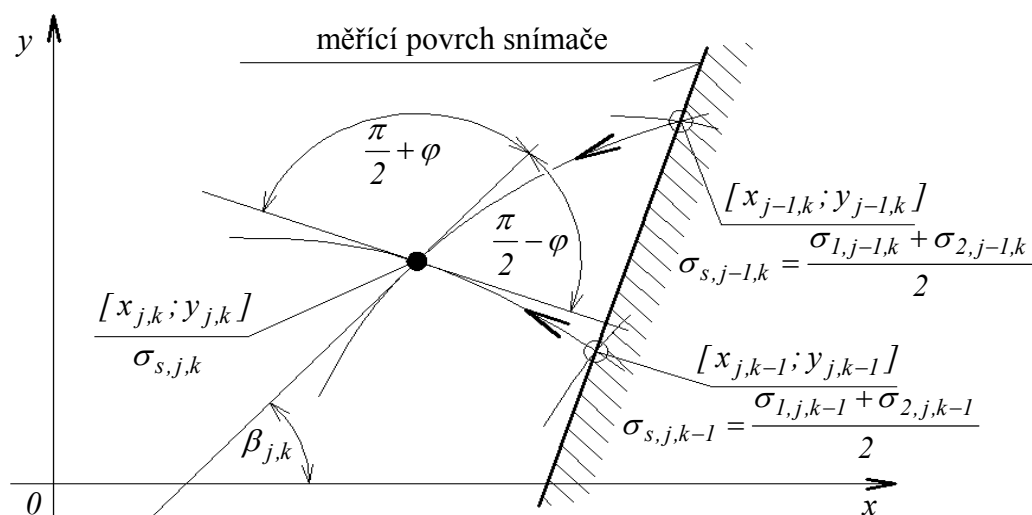
$$\sigma_{s,j,k} = \sigma_{s,j,k-1} - \frac{2\sigma_{s,j,k-1} \cdot (\beta_{j,k-1} - \beta_{j,k}) + \rho \cdot g \cdot [x_{j,k} - x_{j,k-1} - (y_{j,k} - y_{j,k-1}) \cdot \operatorname{cot} g \varphi]}{\operatorname{cot} g \varphi} \quad (4)$$

Musí být dáno měřením a výpočtem:

$$x_{j-1,k}, y_{j-1,k}, \beta_{j-1,k}, \sigma_{s,j-1,k}$$

$$x_{j,k-1}, y_{j,k-1}, \beta_{j,k-1}, \sigma_{s,j,k-1}$$

To představuje uzlové body označené  $\circ$  v následujícím obr. 7. Rovina  $x, y$  obsahuje směry napětí  $\sigma_1, \sigma_2$  - v této rovině je partikulární látka v mezním stavu popsána uzlovou sítí.



Obr. 7: Princip výpočtu uzlové sítě.

## 5. Závěr

K identifikaci napjatosti měřením i výpočtem je možno využít více různých způsobů, důležité je při tom stanovení nelinearity při deformacích materiálu. Uvedené skutečnosti mají pouze technický informativní charakter.

## 6. Poděkování

Publikovaných výsledků bylo dosaženo za podpory ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České republiky, výzkumný záměr MSM 0021630518 "Simulační modelování mechatronických soustav".

## 7. Literatura

Maláček, J.: (2004) Mísení a kompaktování partikulárních látek. ISBN 80-214-2603-9.

Maláček J.: (2003) Disertační práce. Mísení a kompaktování partikulárních látek. VUT v Brně, FSI, ISSN 1213-4198.

Volf J., Papežová S., Vlček J., Holý S.: (2004) Measuring system for determination of static and dynamic pressure interaction between man and Environment. EAN 2004.