Experimentální Analýza Napětí 2004

ORIGINAL EXPERIMENTAL METHOD FOR STRESS AND STRAIN IDENTIFICATION BASED ON OF THE HOLE DRILLING PRINCIPLE

PŮVODNÍ EXPERIMENTÁLNÍ METODA PRO IDENTIFIKACI NAPJATOSTI A DEFORMACÍ ZALOŽENÁ NA ODVRTÁVACÍM PRINCIPU

Karel Vítek[1], Karel Doubrava, Tomáš Mareš, Miroslav Španiel

Abstract: *Principles of current theories applied for the hole drilling method evaluation of residual stresses were tested by beams in bending. It was shown that considerable differences exist between the stress state estimated by the hole-drilling method and the real stress state. 3D numerical models of the beams in bending and tension were created and the principle of hole-drilling methods was tested. It was shown that the basic base function used in the current theory for definition of the radial strain around the drilled hole can not describe the stress distribution accurately. Therefore new basis functions were suggested and tested. When developing this new method for more general applications, we defined suitable base functions for specific diameters of the hole and for specific materials characterized by Young's modulus of elasticity* ***E*** *and Poisson's ratio* μ*. Since the method is sensitive to the hole geometry, modifications of the basis functions, correcting the hole eccentricity and ovalness, have been suggested. An approach to be used for the new method verification by means of physical experiments is a specific one. The proposed method is more robust than the current method, however its applications in general practice requires a complex investigation.*

Keywords: *strain, identification, stress, hole drilling principle, Hookean material, method*

1) Úvod

V tomto příspěvku formulujeme experimentální tenzometrickou metodu sloužící k identifikaci napjatosti materiálů a konstrukcí s širokou možností použití. Ve výpočetních systémech jsou konstrukce často modelovány Hookeovskými lineárními materiálovými modely. V jádru se tato metodika opírá o odvrtávací princip, který byl rozvíjen již v minulém století ve formulaci odvrtávací metody sloužící k identifikaci zbytkových napětí na analyticko-experimentálním základě.. Dále zde formulujeme teorii pro širší použití identifikace napjatosti na numericko-experimentálním základě pro lineární izotropní Hookovské materiály ve statických a dynamických problémech experimentální analýzy napjatosti zejména v povrchových vrstvách materiálů a konstrukcí. Znalost hladiny napjatosti materiálů a konstrukcí patří k základním parametrům a zejména z pohledu mezných stavů bývá znalost napjatosti v povrchových vrstvách rozhodující. Zabýváme se vzájemnými vztahy aspektů formulovaného matematického modelu nové metody s aspekty verifikace fyzikálním experimentem, neboť obě tyto formy se při aplikaci metody prolínají.

[1] Ing. Karel Vítek, CSc. – Ing. Karel Doubrava – Ing. Tomáš Mareš – Ing. Miroslav Španiel, CSc.: Ústav mechaniky; Fakulta strojní , České vysoké učení technické v Praze, Technická 4, 166 07 Praha 6, Česká republika, tel.: +42024352520, e-mail: vitek@fsid.cvut.cz

2) Statický, quasi - statický a dynamický problém identifikace napjatosti

Tenzometrické metodiky využívají snímání deformací, respektive projev interakce napjatosti s materiálovými elastickými konstantami. Zaměříme se dále na časté případy identifikace napjatosti konstrukcí a zařízení v provozu, kde kvůli experimentální analýze napjatosti by bylo nutné z důvodů verifikace experimentů výrobu buď modifikovat nebo odstavit, eventuálně se zaměřujeme na materiály a výrobky po výrobních fázích u nichž se jedná o napjatost zbytkovou způsobenou vlastními výrobními technologiemi a s tím související analýzy konstrukcí, které byly například plasticky přetvořeny následkem extrémních zatížení. Ve všech těchto případech je použití běžné tenzometrie problematické a nabízí se zde využít odvrtávací princip, který byl rozvíjen pro identifikaci zbytkových napětí v průběhu několika minulých desetiletí. Využívá se zde efektu, kdy malý semidestruktivní defekt způsobí změnu tvaru napjatého zkoumaného objektu zejména ve svém okolí, neboť se napjatost vlivem defektu přerozdělí a je-li tato změna ocejchovaná, umožňuje přepočet naměřených deformací identifikovat napjatost v místě defektu.

V případě statického nebo v čase relativně velmi malé změny napjatosti (quasi – statické) lze cejchování využít k určení profilu napjatosti v závislosti na hloubce defektu. Umělý vrub má ustálený tvar odvrtávaného kruhového otvoru a celkové odvrtání povrchové vrstvy včetně sady měření po hloubkách může trvat profesionálním zařízením jen několik minut.

U dynamických změn se profil napjatosti po hloubce touto metodikou nedá zjistit, protože obojí - jak vrtání otvoru, tak změny napjatosti probíhají v čase. Praktický význam odvrtávací metodiky se však týká povrchové vrstvy do hloubky jednoho až dvou milimetrů. Jakmile je zkoumaný objekt rozměrově nesrovnatelně větší než rozměry vrtaného otvoru, lze předpokládat malé gradienty složek napjatosti v této milimetrové hloubce a proto se i zde dá odvrtávací metodika vhodně použít. Po odvrtání určité hloubky je možno startovat časově závislá měření, která se opět teorií aplikující cejchování převedou na časově závislý průběh identifikované napjatosti. Volba hloubky vrtu ovlivňuje citlivost těchto měření. Čím hlouběji se vrtá, tím je odezva tenzometrů na podnět silnější a proto lze citlivost měření hloubkou vrtu také nastavovat.

Napjatost je metodikou určena komplexně a je v ní zahrnuta zbytková napjatost a dále vlivy ostatních možných zatížení. Proto lze také jednotlivé vlivy vymezit jen v případě jejich separace.Vytvořený malý otvor lze u zkoumaného objektu v mnoha případech ponechat, eventuálně jej opracovat některým ze způsobů vhodných na eliminaci povrchových defektů.

3) Teorie pro identifikaci napjatosti Hookeovských materiálů odvrtávacím principem

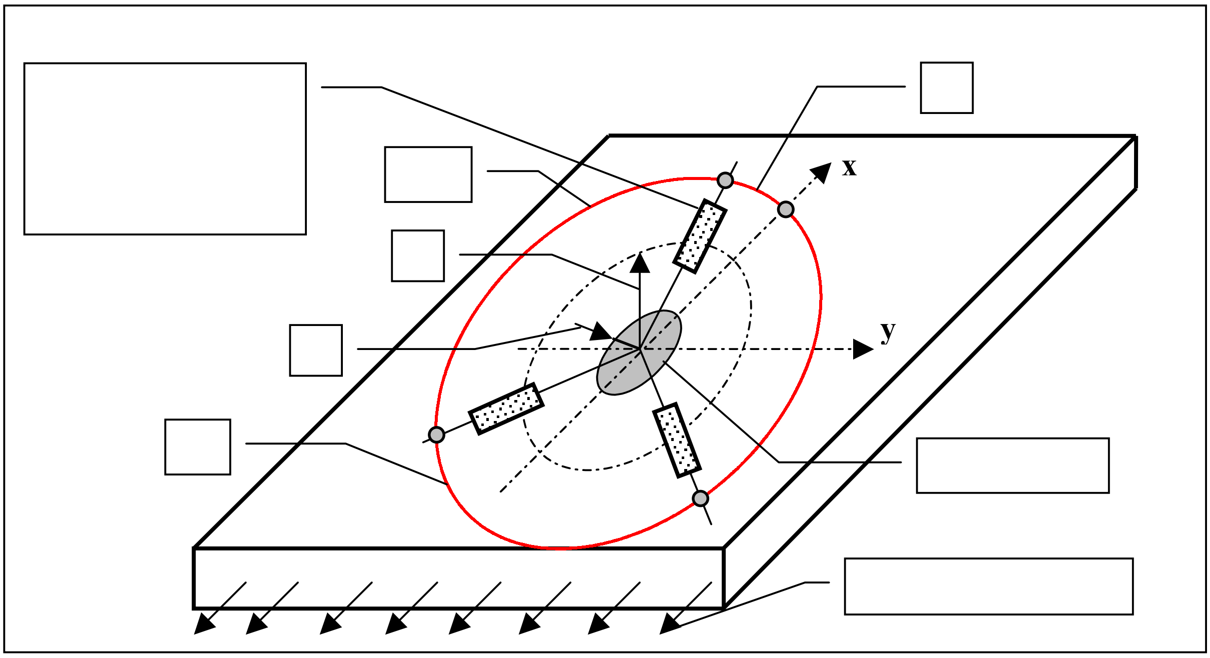
Princip experimentální odvrtávací metody používané k identifkaci zbytkové napjatosti spočívá v aplikaci tenzometrické růžice (viz schéma na obr.1) na povrch zkoumané součásti a následném odvrtání otvoru o poloměru $\boldsymbol{R_0}$ ve středu této růžice, což způsobuje změnu tvaru tělesa a vyvolané uvolněné deformace na povrchu v okolí vrtaného otvoru jsou zde měřeny tenzometrickou růžicí. Tato naměřená radiální poměrná prodloužení se pak vyhodnotí pomocí teorií pro identifikaci a určují průběh a velikost a směry dvou hlavních zbytkových napětí v místě vrtaného otvoru v rovinách rovnoběžných s povrchovou rovinou. Nulová složka hlavního napětí označeného zde $\boldsymbol{\sigma_z}$ je kolmá k povrchu ve zkoumaných bodech na ose vrtaného otvoru a odpovídá v malých hloubkách u kontaktem nezatíženého povrchu realitě, je zde předpokladem rovinné zbytkové napjatosti.

Teorie identifikace zbytkových napětí užívaná odvrtávací metodou vychází z analytického řešení rozlehlé desky s průchozím otvorem zatížené jednoosou napjatostí publikované Prof. G. Kirchem [1], kde poměrné prodloužení, respektive uvolněnou radiální deformaci v okolí vrtaného otvoru vyjadřuje vztah (1) odvozený za předpokladu jednoosé napjatosti dané hlavním napětím σ_x (s označením podle obr.1: α - úhel mezi hlavním napětím a směrem poměrného prodloužení, R_O - poloměr otvoru, R - poloměr středu tenzometrů růžice od středu otvoru, $r=R/R_0$) :

$$\varepsilon_{(\alpha)} = -\sigma_x.(1+\mu).[1/r^2-3.\cos(2.\alpha)/r^4 + 4.\cos(2.\alpha) / (r^2+ r^2.\mu)] / (2.E). \qquad (1)$$

Vztahy pro dvouosou napjatost, kde uvažujeme hlavní napětí: σ_x ,σ_y - lze pro lineárně elastický izotropní materiál formulovat superpozicí (přičemž vlastnosti materiálu a související poloměry jsou zde vyjádřeny konstantami A,B)

$$\varepsilon_{(\alpha)} = A.(\sigma_x+\sigma_y) + B.(\sigma_x-\sigma_y).\cos(2.\alpha). \qquad (2)$$



Obr.1. Model tenzometrické růžice a parametry vrtaného otvoru

Tento vztah vytvořený pro průchozí vrtaný otvor je současnými teoriemi odvrtávacích metodik používán pro neprůchozí relativně mělký otvor a uvažované modifikované konstanty základní rovnice A a B jsou zde navíc vůči původním z průchozí díry závislé i na hloubce vrtaného otvoru. Experimentálně změřená uvolněná poměrná prodloužení ze tří nezávislých signálů tenzometrů růžice tvoří pro místo vrtu (vždy pro určitou hloubku vrtu) tři algebraické rovnice podle pravé strany rovnice (2), ze kterých je možno určit dvě hlavní napětí σ_x ,σ_y rovinné napjatosti (rovnoběžná s povrchem) a úhel jejich polohy α (uvažovaný zde od směru σ_x- viz obr.1), například podle principu Mohrovy kružnice.

Testovali jsme experimentálně metodiku odvrtávacího principu s využitím italské soupravy RESTAN od firmy Sint-Technology [2] na vyžíhaných ocelových nosnících (zařízení automaticky odvrtává otvor a umožňuje vyhodnotit zbytkovou napjatost dodaným programovým vybavením) v rámci grantového projektu GAČR 106/02/0612. Ovšem nedokázali jsme jak velikostí, tak ani charakterem identifikovat tuto objektivní jednoosou napjatost vyvolanou ohybem nosníků, proto jsme se dále zaměřili na analýzu principu odvrtávací metody na základě numerických simulací - numerickým odvrtáváním otvoru v MKP modelech definovaně zatížených nosníků.

Současnou teorii odvrtávacích metod založenou na analytickém řešení rozšíříme v bázové funkci o další členy Furierovy řady, aby přesněji zachycovala deformační děj vycházející z numerických simulací odvrtávání. Vhodnou nosnou regresní signálovou funkcí tenzometrů měřících radiální poměrné prodloužení $\varepsilon(\alpha)$ v okolí otvoru je goniometrická řada s členy tvořenými konstantou K_i násobenou funkcí cosinus sudých, i-tých násobků úhlu α –

formulovaná parciálně pro jedno konkrétní (z možných dvou) hlavní napětí σ_x (model - viz obr.1)

$$\varepsilon(\alpha) = \sum K_i.cos(i.\alpha) \qquad \text{zde sčítací index: } i=0,2,4,6,8,...n. \tag{3}$$

Poměrnou hodnotu $\delta(\alpha)$ regresní signálové funkce (4) vztaženou na jednotkové napětí definujeme

$$\delta(\alpha) = \sum (K_i.cos(i.\alpha))/\sigma_x =.\sum (K_i/\sigma_x).cos(i.\alpha) =\sum k_i.cos(i.\alpha)\,. \tag{4}$$

Soustavy konstant pro ideální vrtaný otvor K_i [Pa, MPa] nebo poměrné - normalizované konstanty k_i [Pa^{-1}, MPa^{-1}] vztažených na jednotkové hlavní napětí (jednoosé napjatosti) jsou v této teorii závislé nejenom na parametrech odvrtávacích růžic a aspektech souvisejících s vrtáním otvoru, ale především na druhu zkoumaného Hookovského materiálu, respektive na elastických konstantách E, μ tohoto materiálu.

S využitím normalizovaných konstant lze signály tenzometrické růžice ε_i, ε_j, ε_k při rovinné napjatosti σ_x, σ_y (což jsou hlavní napětí rovnoběžná s povrchem, kde se identifikační otvor odvrtává) vyjádřit superpozicí. Ta pro obě uvažovaná hlavní napětí a jejich směr (polohu jednoho tenzometru růžice považujeme za osu, od které uvažujeme úhel, respektive polohu obou vzájemně kolmých hlavních napětí) nelineární soustavou algebraických rovnic (5). Z této soustavy v principu lineárně nezávislých rovnic lze parametry zbytkové napjatosti (obvykle obě hlavní napětí a úhel jejich polohy) odpovídající odvrtané hloubce ideálního otvoru výpočtem určit (zde $\alpha_{i,j}$ označuje úhel mezi i-tým tenzometrem ε_i a směrem j-tého hlavního napětí σ_j , viz obr.1.):

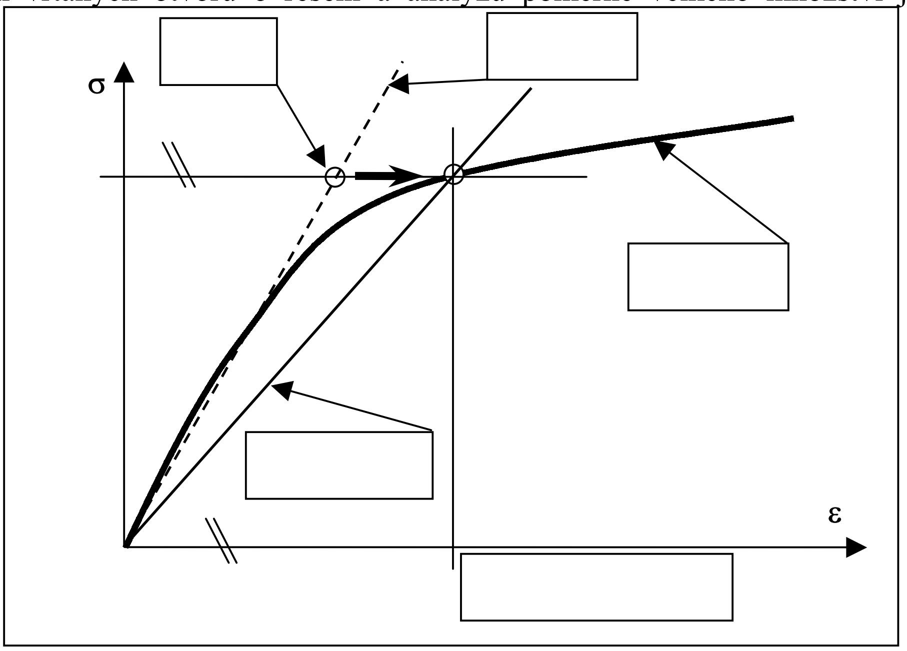
$$\left.\begin{aligned}
\varepsilon_i &= \sigma_x.\delta(\alpha_{i,x}) + \sigma_y.\delta(\alpha_{i,y})\\
\varepsilon_j &= \sigma_x.\delta(\alpha_{j,x}) + \sigma_y.\delta(\alpha_{j,y})\\
\varepsilon_k &= \sigma_x.\delta(\alpha_{k,x}) + \sigma_y.\delta(\alpha_{k,y}).
\end{aligned}\right\} \tag{5}$$

Tímto způsobem podle vztahu (5) charakterizuje zbytkovou napjatost ve světě uznávaná norma ASTM E837. U současné teorie se pro daný ideálně kruhový otvor a škálu lineárních materiálů v principu vystačí s tabelací dvou konstant s průběhem po hloubce otvoru nezávislých na Youngově modulu pružnosti a Poissonově čísle. Nová komplexní teorie metody je podstatně robustnější, protože mnohočlenná objektivní bázová funkce zatím obecně neumožňuje materiálovou separaci elastických konstant, na rozdíl od stávající teorie.

Funkčnost modelu metody je dána rozsahem platnosti Hookeova zákona. Indikace stavu napjatosti například hypotézou HMH (Misesovým redukovaným napětím $\sigma_{RED,HMH} \equiv \sigma_{Mises} \equiv \sigma_{RED}$) je vhodná, neboť formulaci omezení rozsahu použitelnosti metody je možné pojmout jako odchylku linearity materiálového modelu $\sigma_H=E.\varepsilon$ (odchylku od teorií užitého Hookova zákona) danou změnou modulu pružnosti E. Obr.2 zobrazuje poměrně jednoduše realizovatelný postup stavu identifikace napjatosti odvrtávací metodou průmětem bodu z redukovaného napětí užitého Hookeova zákona (obecně i pod jiným úhlem projekce) na objektivní křivku materiálové závislosti $\sigma(\varepsilon)$. Matematickou formulaci kritéria vyjadřuje procentuální odchylka linearity ψ, kterou je vhodné uvádět (při znalosti materiálové křivky, respektive její funkce $\sigma=\sigma(\varepsilon)$) u identifikované napjatosti jako další parametr, viz vztah (6). V případech, kdy je materiálová křivka dána pouze modulem pružnosti E, je možno orientovat kvalitu výsledků metody, neboli vlastně stav napjatosti zkoumaného objektu například porovnáním redukovaného napětí σ_{RED} s mezí úměrnosti, mezí kluzu - eventuálně s mezí pevnosti materiálu zkoumaného objektu.

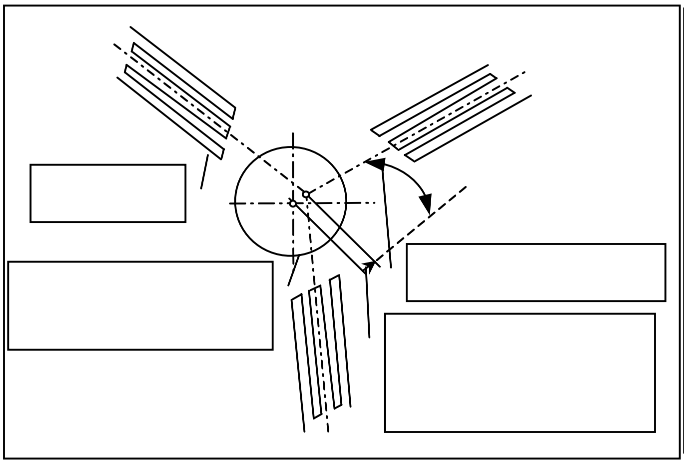
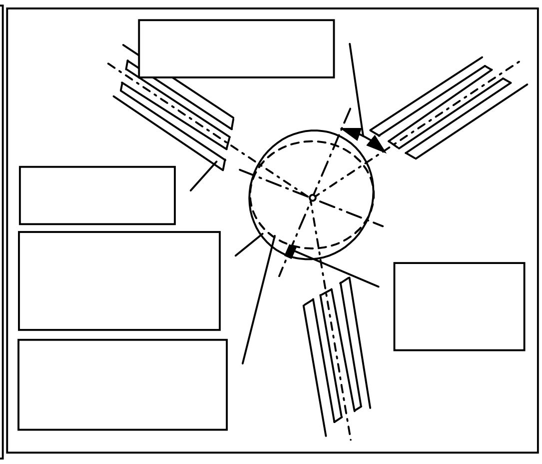
$$\left.\begin{aligned}&\sigma_{RED}=\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\left(\sigma_x-\sigma_y\right)^2+\left(\sigma_y-\sigma_z\right)^2+\left(\sigma_z-\sigma_x\right)^2},\xrightarrow[z-grafu]{}E^{\times}=\frac{\sigma_{RED}}{\varepsilon^{\times}},\\&\xrightarrow[pak]{}\psi\left[\%\right]=\frac{E-E^{\times}}{E}*100\end{aligned}\right\}\quad(6)$$

Odvrtávací růžice dodávané například německou HBM a americkou firmou Vishay jsou konstruovány odlišně pro škálu jmenovitých průměrů vrtaných otvorů a v numerickém modelování je nelze sjednotit. Pro škálu Hookeovských – lineárních materiálů, které se navzájem liší Youngovým modulem pružnosti a Poissonovým číslem jde v případě jmenovitých vrtaných otvorů o řešení a analýzu poměrně velkého množství jednotlivých



výpočtů (výpočty zde musí pokrývat nejenom průměry otvorů, ale i možné rozpětí obou materiálových konstant) shrnutých do datových výstupních souborů příslušných normalizovaných konstant $\boldsymbol{k_i}$. Datové soubory je třeba dále vhodně nahradit v uvažovaném prostoru nezávislých parametrů odvrtávacího procesu regresními funkcemi (ty jsou pak procedurou zpracovávající signály růžice konkrétnímu otvoru přiřazeny a dle vztahu (5) v každé měřené hloubce umožní identifikaci zbytkové napjatosti).

Z množiny nezávislých parametrů z nichž některé jsou dané rozměry růžice a vrtací frézy je třeba se zabývat imperfekcemi vrtaného otvoru, neboť malý vrtaný otvor je obecně vrub a proto je metoda citlivá na přesnost vrtání otvoru Zejména je třeba do výpočtového modelu zahrnout vliv korekcí na excentricitu vrtaného otvoru a její směr – viz obr.3. Obecně předpokládáme dále studie vlivu ovality včetně orientace vrtaného otvoru vzhledem k měřící růžici, viz obr.4 a podobně studie vlivu kolmosti vrtaného otvoru k povrchu. Není teď předem jasné, jaké jsou souvislosti mezi jednotlivými aspekty zkoumanými poměrně rozsáhlými numerickými experimenty a zda se nově formulovanou metodu ve vývoji dále podaří například vhodně zjednodušit.

Nelineární izotropní materiály je možno ocejchovat, přičemž tento proces určování konstant regresní funkce pak závisí na cestě po materiálových křivkách $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ a $\mu = \mu(\varepsilon,)$ - neboli nelze užít normalizaci těchto konstant. Tahový digram obvykle vyjadřuje stoupající monotónní regresní funkce z obr.5 a paralelně také průběh regresní funkce Poissonova čísla. Koncepci teorie pro lineární materiály, ve které je realizovatelná normalizace konstant (5) tabelovaných formou regresních křivek pro škálu materiálů podle kombinace modulu pružnosti $\boldsymbol{E}$ a Poissonova čísla μ je možno užít v případě, že jsou obě tyto materiálové elastické konstanty v závislosti na zatížení neproměnné, proto se nabízí linearizace materiálových křivek s alespoň přibližným řešením identifikace napjatosti.

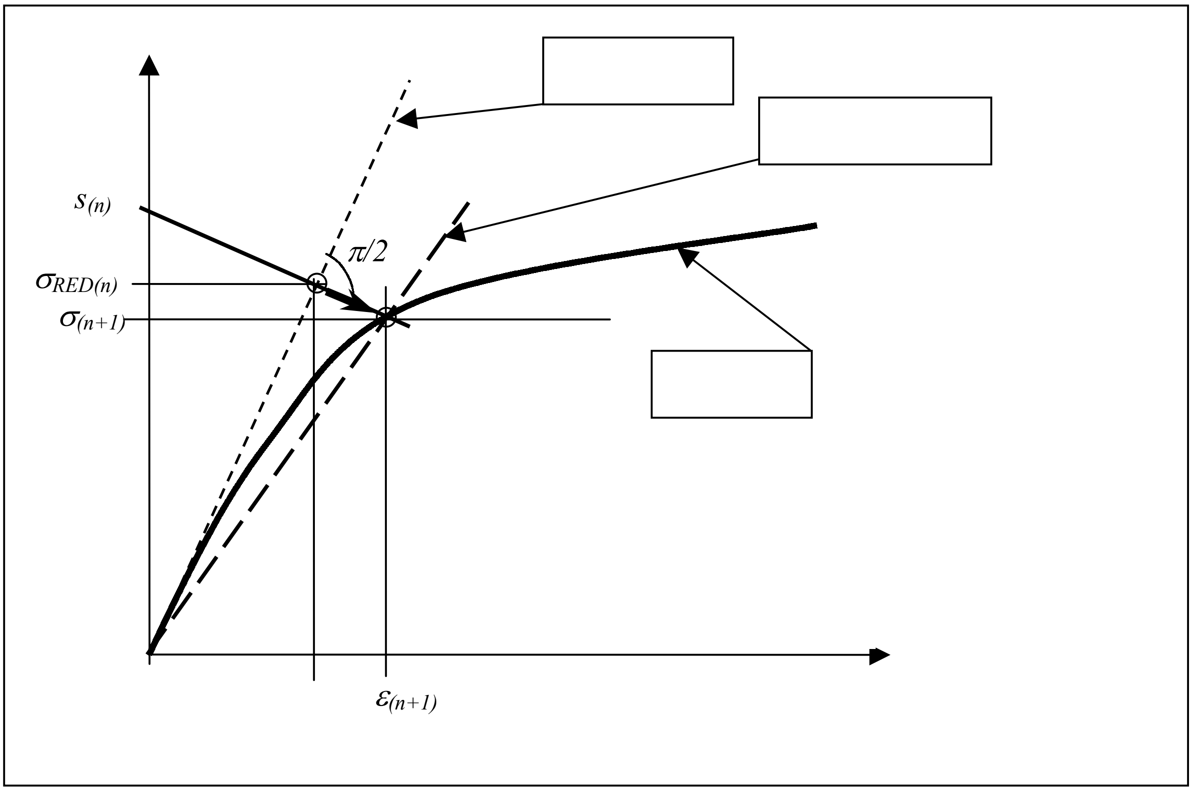
Linearizaci, respektive výběr konstant $\boldsymbol{E}$, μ pro nelineární materiál je třeba provést podle vhodného kritéria, které je obvykle založeno (při zpracování materiálových dat regresí) na metodě nejmenších čtverců. Hledisko objektivní identifikace napjatosti tímto kritériem naplněno být nemusí zvláště u větších odchylek skutečných materiálových křivek od předpokládané linearity, a proto má smysl vyvíjet výstižnější metodiky linearizace materiálových křivek, aby řešení napjatosti odvrtávacím principem odpovídalo lépe skutečnosti.

Iterativní proces zobrazený z kroku $\boldsymbol{n}$ do kroku $\boldsymbol{n+1}$ v obr.5 vychází z rovnosti Misesova napětí σ_{RED} linearizovaného modelu (v úvahu připadá i jiný funkcionál napjatosti související například jinak s měrnou deformační energií). Matematický model (7) tvoří jednak rovnice signálů tenzometrů 1 až 3, ve kterých jsou vztažena na $\boldsymbol{n}$-tý krok iterace výsledná hlavní napětí σ_x, σ_y a jejich směr i funkce poměrných konstant δ . Materiálové křivky $\sigma = \sigma(\varepsilon)$,

$\mu = \mu(\varepsilon)$ se na sebe jednoznačně zobrazují, proto používáme jako dostačující řídící omezení iterativního procesu rovnici $\sigma = \sigma(\varepsilon)$. K tenzoru napětí určenému v $\boldsymbol{n}$-té iteraci je vypočteno napětí σ_{RED}. Bodem (σ_{RED}, ε_{RED}) je vedena kolmice na materiálové omezení $\sigma = \sigma(\varepsilon)$, která má na ose σ průsečík $\boldsymbol{s}$ **.** Průsečík kolmice s materiálovou křivkou dle 7) určuje bod ($\sigma_{(n+1,}\varepsilon_{(n+1)}$), ze kterého vyplývají dle 8) materiálové konstanty $\boldsymbol{E}$, μ u další $\boldsymbol{(n+1)}$ iterace. Výsledek iterací je bod společný materiálové křivce a linearizovanému řešení ztotožňující pro oba modely hodnotu funkcionálu 4).

4) Funkce fyzikálních experimentů při verifikaci odvrtávací metodiky

Přesné, rychlé a levné určování elastických konstant Hookeovských materiálů bývá při identifikaci napjatosti odvrtávacím principem ve škále mnohdy jen přibližně a nepřesně daných materiálů zásadní problém. Proto zde je vhodné využít například také původní prstencovu metodu, která je výsledkem dokončeného grantového projektu GAČR 106/01/0958 (autorizace metodiky užitným vzorem: PUV 2004-14954). Zapojení této metody umožňuje operativně, široce dostupnou nenáročnou experimentální technikou a také levně zjistit obě materiálové elastické konstanty zkoumaného objektu. Rozšířená teorie a metody její tvorby se pravděpodobně dotknou i optimalizace konstrukcí odvrtávacích tenzometrických růžic, které by mohly být citlivější na zbytkovou napjatost a zároveň méně citlivé na imperfekce vrtaného otvoru.



Navržené teorie metod bývají vůči praktickým fyzikálním experimentům téměř pravidelně v pozici testovaného objektu. Teoreticky formulované závěry jsou fyzikálními experimenty ověřovány, teorie se modifikují, aby fyzikálním experimentům vyhověly. U metod vycházejících z odvrtávacího principu se vyvoláním semidestruktivní poruchy odvrtáním relativně malého otvoru, získá na tenzometrech umístěných poblíž otvoru odezva uvolněné napjatosti právě proto, že se relativně blízkou polohou tenzometrů potlačí Saint-

Vénantův efekt doznívání napjatosti, respektive se zde využije vlastnosti efektu vrubu. Proto zde existuje relativně velká citlivost na imperfekce otvoru, přičemž vliv imperfekcí v signálu tenzometrů lze očekávat na úrovni základního signálu ideálního vrtaného otvoru. Praxe je taková, že ideální otvor se ve fyzikálním experimentu prakticky vyvrtat nedá, tak jako se nedá vyvrtat otvor s předem danými imperfekcemi.

Proto je numerické modelování procesu odvrtávání ve vývoji metodik založených na odvrtávacím principu podstatné. Vycházíme z numericky stabilních modelů těles jednoduchého tvaru a numerická simulace odvrtávání byla na několika systémech MKP (Abaqus, PMD, Ansys) úspěšně odladěna. V numerických modelech lze jednoznačně separovat nebo superponovat jednotlivé vlivy. Současně efektivní ladění výpočetních numerických modelů na konkrétní materiálová data fyzikálních modelů je pro Hookeovské materiály dostatečně přesně vyřešeno. Těžiště přesnosti odvrtávací metody spočívá na přesnosti, respektive výstižnosti regresních funkcí matematického modelu. Tuto přesnost lze jednoznačně stanovit a také ladit. Naší snahou při tvorbě teorie, je jednak vystihnout a dále potlačit eventuální nepřesnosti v matematickém modelu numerického procesu odvrtávání tak, aby odchylky od ideálního chování modelu byly zanedbatelné. Potom budou eventuální nepřesnosti chování metodiky vlastností především fyzikálních experimentů odvrtávání.

Ve fyzikálním experimentu je třeba imperfekce vůči ideálně vrtanému otvoru identifikovat a na jejich základě přiřadit tomuto skutečnému otvoru výpočtový model daný soustavou rovnic (5), respektive tomuto konkrétnímu otvoru dodat pro řešení matematického modelu odpovídající konstanty. Je-li původní napjatost v místě odvrtávaného otvoru definovaná (předem známá), lze pak stanovit odchylky parametrů vypočítané napjatosti od daného stavu. Kvalitně formulovaný matematický model (5) (zdůrazňujeme zde, že schopnost objektivně zobrazovat kumulované spektrum imperfekcí otvoru je zde spolehlivou a ověřitelnou vlastností formulovaných numerických modelů zkušebních těles) zaručuje, že tyto odchylky napjatosti jsou způsobeny pouze neúplností tohoto matematického modelu nebo nedokonalostí fyzikálního měření a možná též nedokonalou identifikací reálných imperfekcí. Fyzikálním experimentem v podstatě nelze kroky nebo prvky metody ověřovat, neboť vždy zahrnuje komplex vlivů, ale může zde sloužit jen jako měřítko mezi ideální funkcí metodiky a praktickými možnostmi aspektů fyzikálního experimentu. Každé vylepšení metody tedy charakterizuje užší konvergence numerického a fyzikálního experimentu, přičemž fyzikální experiment zde nemůže být měřítkem přesnosti metodiky. Stále je tedy aktuální zpřesnění metodiky samotného fyzikálního experimentu odvrtávání.

Pravděpodobně zde nepřichází v úvahu eventuální paralelní testy modelů rentgenoskopicky, nebo podobně magnetoskopickým či optickým přístupem, protože zde je princip identifikace napjatosti složitý a tyto metody nejsou dostatečně citlivé a tedy nejsou ani dostatečně přesné.

5) Poděkování

Tento výzkum je podporován grantem GAČR_106/02/0612 na téma: „Optimalizace procesu tváření tlustostěnných trub a součástí z hlediska zbytkové napjatosti a deformací."

7) Literatura

[1] Timoshenko, S. - Goodier, J. M.: *Theory of Elasticity*. 2. ed., New York, McGraw-Hill. 1951, p.576.

[2] Vítek, K.- Doubrava, K.- Holý, S.- Mareš, T.: Hole-Drilling Method Test Using Bending Specimen, *40th International conference Experimental Stress Analysis, EAN-2002*, Prague 2002, Praha 2002, pp.267 - 272. ISBN 80-01-02547-0