

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA STROJNÍ



EXPERIMENTÁLNÍ METODY V MECHANICE

10. Přednáška – Fotoelasticimetrické metody

prof. Ing. Pavel Macura, DrSc.

Ing. František Fojtík, Ph.D.

Ostrava 2013

© prof. Ing. Pavel Macura, DrSc., Ing. František Fojtík, Ph.D.

© Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-3018-6



TENTO STUDIJNÍ MATERIÁL VZNIKL ZA FINANČNÍ PODPORY EVROPSKÉHO SOCIÁLNÍHO FONDU (ESF) A ROZPOČTU ČESKÉ REPUBLIKY V RÁMCÍ ŘEŠENÍ PROJEKTU: CZ.1.07/2.2.00/15.0463, MODERNIZACE VÝUKOVÝCH MATERIÁLŮ A DIDAKTICKÝCH METOD

OBSAH

10. PŘEDNÁŠKA – FOTOELASTICIMETRICKÉ METODY	3
Úvod.....	4
1. FOTOPLASTICIMETRICKÉ METODY	4
1.1 Modely z amorfních hmot.....	4
1.2 Modely z halových solí stříbra	4
1.3 Metoda povrchových fólií	4
1.4 Modely z nízkomodulových materiálů.....	9
1.4.1 Vyhodnocení tenzorových deformačních polí	10
1.4.2 Určení mechanických vlastností materiálů	11
1.4.3 Vyhodnocení tenzorových polí napětí	12
2. Použitá literatura.....	19



10. PŘEDNÁŠKA – FOTOELASTICIMETRICKÉ METODY



OBSAH KAPITOLY:

Fotoelasticimetrické metody

Vhodné materiály vhodné pro fotoelasticimetrické metody

Vyhodnocení tenzorových deformačních polí a polí napětí

Určení mechanických vlastností materiálů



MOTIVACE:

V této přednášce jsou uvedeny fotoplasticimetrické metody, které založeny na stejných principech jako fotoelasticimetrie a jsou určeny pro analýzu napětíových polí v oblasti plastických deformací. V přednášce je uvedeno základní rozdělení modelových materiálů, vyhodnocení tenzorových deformačních polí a tenzorových polí napětí a určení mechanických vlastností materiálů.



CÍL:

Fotoelasticimetrické metody – princip metody a sestavení experimentu, přehled materiálů vhodných pro fotoplasticimetrii, vyhodnocení tenzorových deformačních polí, Určení mechanických vlastností materiálů, vyhodnocení tenzorových polí napětí, Vyhodnocení tenzorových polí napětí

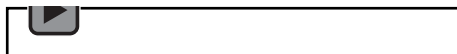


ÚVOD

Na stejných principech jako fotoelasticimetrie jsou založeny i experimentální metody pro analýzu napětíových polí v oblasti plastických deformací – fotoplasticimetrické metody. Jejich varianty lze rozdělit podle druhů použitých opticky citlivých materiálů.



Audio 0.1 Úvod



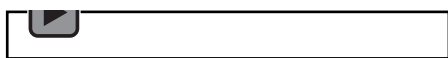
1. FOTOPLASTICIMETRICKÉ METODY

1.1 Modely z amorfních hmot

U této varianty se pro analýzu deformačních a napětíových polí používají modely, vyrobené z vhodných dvojlovných amorfních hmot – celuloidu, fenolformaldehydu, nylonu, polystyrenové pryskyřice aj. Tyto hmoty jsou dočasně dvojlovné i nad mezí mechanické úměrnosti a jejich křivka zpevnění je podobná křivce zpevnění kovových materiálů. Při měření je třeba zajistit, aby plochy, kolmé k dopadajícím paprskům, zůstaly rovinné, což lze zaručit zatěžováním ve speciálním přípravku s bočními stěnami z křemičitého skla, zpracovaného tak, aby nevykazovalo relativní dvojlohm. Důsledkem tohoto zatěžování je však vznik smykových napětí mezi sklem a zatěžovaným opticky citlivým materiálem, takže nejsou dodrženy podmínky rovinné deformace. Vliv těchto smykových napětí je možné zmenšit vhodným mazáním stykových ploch. Měření se provádí polariskopem pro průchozí světlo.



Audio 1.1 Modely z amorfních hmot

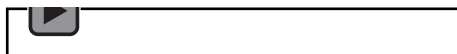


1.2 Modely z halových solí stříbra

Modely jsou v tomto případě vyrobeny z halových solí stříbra anebo thalia. Tyto hmoty mají obdobné mechanické vlastnosti i strukturu jako kovy, jsou však průhledné a opticky citlivé. Nejčastěji používaným materiálem je chlorid stříbrný, který je v nezátěženém stavu opticky izotropní, zatížením se stává anizotropní a při prosvětlení polarizovaným světlem lze pozorovat relativní dvojlohm, který po odtížení zmizí. Příprava modelů vyžaduje značné zkušenosti a je časově náročná. K měření se používá polariskop pro průchozí světlo.



Audio 1.2 Modely z halových solí stříbra



1.3 Metoda povrchových fólií

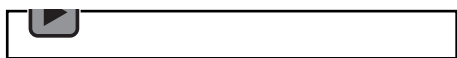
Při použití této metody je zatěžovaný vzorek vyroben z kovového materiálu, na jehož povrch je nalepena tenká opticky citlivá vrstva. Při zatěžování za normálních teplot je vzorek vyroben přímo z vyšetřovaného materiálu, pro simulaci tváření za tepla se používá náhradní modelový materiál jako olovo anebo slitiny olova a antimonu. Princip metody je založen na tom, že deformace kovového vzorku a opticky citlivé vrstvy jsou na styčné ploše stejné. Protože modul pružnosti opticky citlivé vrstvy, vyrobené zpravidla z epoxidové pryskyřice, je mnohem menší než modul pružnosti základního kovu, zůstane tato vrstva i při značných plastických deformacích kovového vzorku ve stavu pružném. Experimentální analýzu



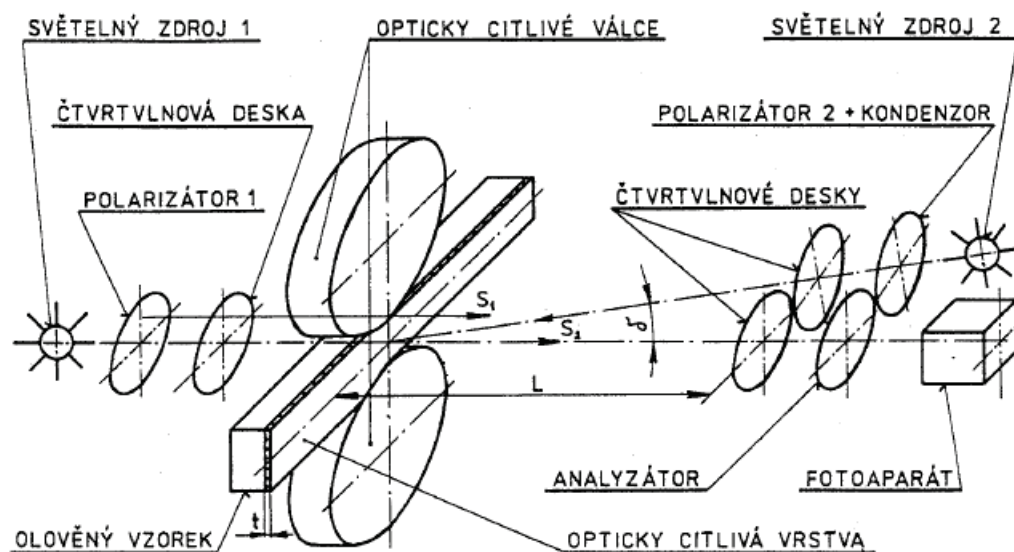
deformací v pružně deformované opticky citlivé vrstvě je možno provést pomocí fotoelasticimetrických metod, pro analýzu napětí v plasticky deformovaném kovovém vzorku je třeba použít některou z teorií plasticity. Měření se provádí v odraženém světle pomocí reflexního polariskopu.



Audio 1.3 Metoda povrchových fólií



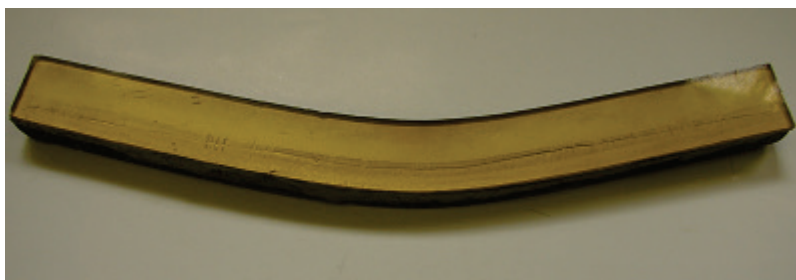
Použití této metody bude ukázáno opět pro analýzu napětí na boční ploše provalku při válcování na hladkých válcích. Vzhledem k tomu, aby bylo možno experimentálně zjistit okrajové podmínky ve formě kontaktních napětí mezi válci a válcovaným materiálem, byla autorem tato metoda rozšířena o současnou analýzu napjatosti válců a potřebných kontaktních napětí. Za tím účelem bylo nutno vyvinout a vyrobit nové speciální zařízení, nazvané transmisně – reflexní polariskop, jehož princip je znázorněn na obr. 1.



Obrázek 1 Princip měření pomocí transmisně-reflexního polariskopu

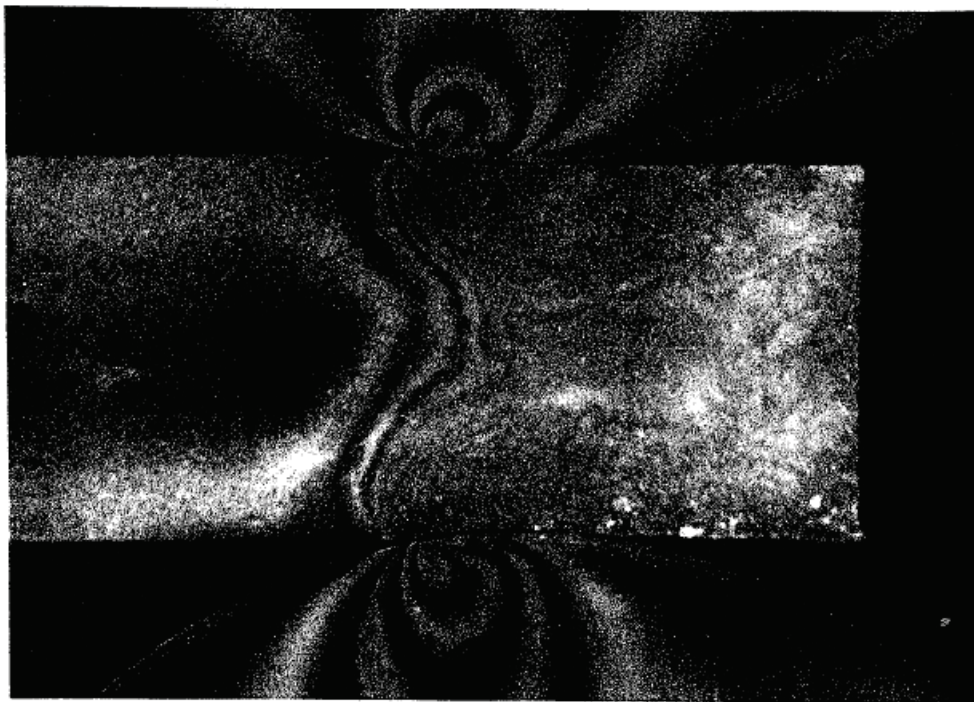
Mezi válci speciální laboratorní válcovací stolice, které jsou vyrobeny z opticky citlivého materiálu CR39, se válcují olověné vzorky, na jejichž boční ploše jsou nalepeny opticky citlivé fólie tloušťky t .

K měření napětí ve válcích je měřicí zařízení vybaveno světelným zdrojem 1, svazek paprsků S_1 je polarizován polarizátorem 1, prochází čtvrtvlnovou deskou a opticky citlivými válci. Po průchodu válci, druhou čtvrtvlnovou deskou a analyzátozem je průběh izochromatických čar ve válcích v kruhově polarizovaném světle zachycen kamerou anebo fotografickým přístrojem. K získání obrazu izoklin ve válcích jsou vyraženy z činnosti obě čtvrtvlnové desky a přístroj pracuje s přímkově polarizovaným světlem.



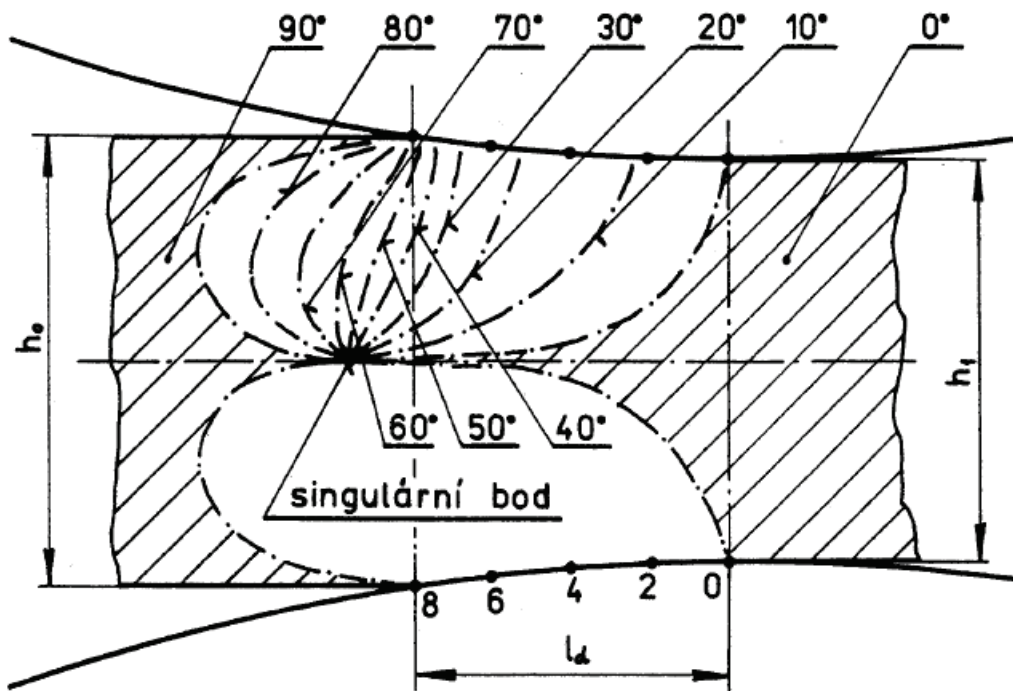
Obrázek 2 Olovněný vzorek s nalepenou opticky citlivou vrstvou

Pro měření deformací a napětí v provačku je měřicí zařízení vybaveno světelným zdrojem 2 a svazek paprsků S_2 je nejdříve usměrněn kondenzorem a pak polarizován polarizátorem 2. Po průchodu čtvrtvlnovou deskou prochází polarizovaný paprsek opticky citlivou vrstvou, odráží se od povrchu kovového vzorku, prochází znovu opticky citlivou vrstvou a přes společnou čtvrtvlnovou desku a analyzátor je obraz izochromat v opticky citlivé vrstvě zachycen na stejném negativu anebo diapozitivu jako obraz izochromat ve válcích. Pro získání izoklin v opticky citlivé vrstvě je nutno opět vyřadit z činnosti čtvrtvlnové desky. Na obr. 3 je uveden získaný průběh izochromat ve válcích i opticky citlivé vrstvě.

**Obrázek 3 Izochromaty ve válcích a na boční ploše provačku**

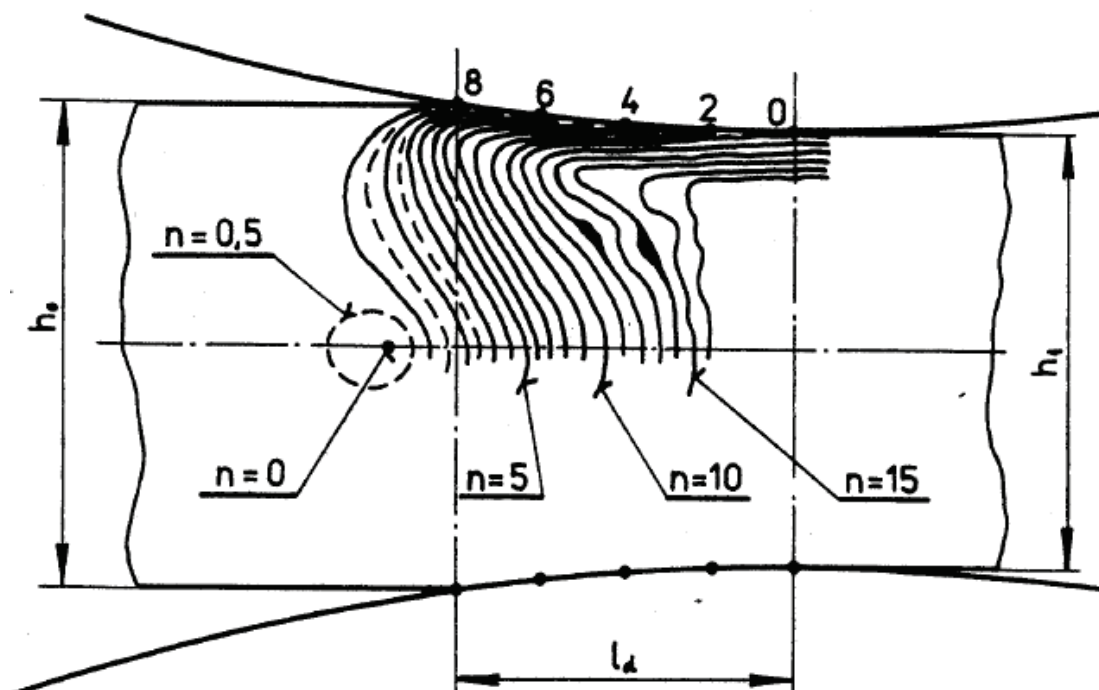
Výsledkem měření a podkladem pro vyhodnocení jsou fotografie izoklinných a izochromatických čar ve válcích a v opticky citlivé vrstvě, získané během skutečného válcovacího procesu. Způsob vyhodnocení napjatosti válců byl popsán v kapitole 1.6 - Metoda rozdílu smykových napětí přednáška 3 Postup při měření a vyhodnocování napětí u fotoelasticimetrie. Při vyhodnocování napjatosti v plasticky deformovaném kovovém materiálu je si třeba uvědomit, že závislost mezi napětími a deformacemi bude lineární pouze v materiálu opticky citlivé vrstvy. Deformace na styčné ploše kovového materiálu a opticky citlivé vrstvy budou stejné, ale napětí v obou materiálech budou různá a pro kovový materiál bude závislost mezi napětími a deformacemi nelineární. Tuto závislost je nutno pro každý materiál zjistit experimentálně (pro olovo byla uvedena na obr. 6c viz přednáška 9 Další experimentální metody).

Průběhy izoklinných čar, zachycené na jednotlivých snímcích, je vhodné přeskreslit do jednoho obrázku, viz obr. 4, podobně lze přeskreslit i průběhy izochromatických čar, obr. 5. Z průběhů izoklin lze grafickou konstrukcí podobně jako ve fotoelasticimetrii získat průběhy izostatických čar, obr. 6, případně i čar maximálních smyků, což jsou experimentálně určené kluzové čáry, používané při řešení napětíových stavů v oblasti plastických deformací metodou charakteristik, obr. 7.

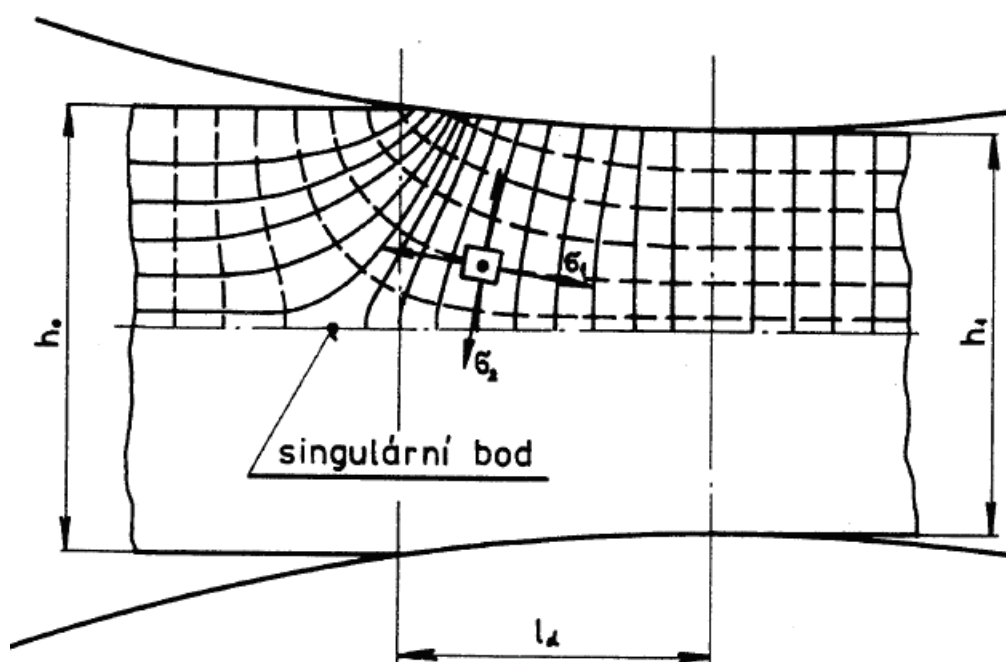


Obrázek 4 Průběhy izoklinných čar na boční ploše provalku

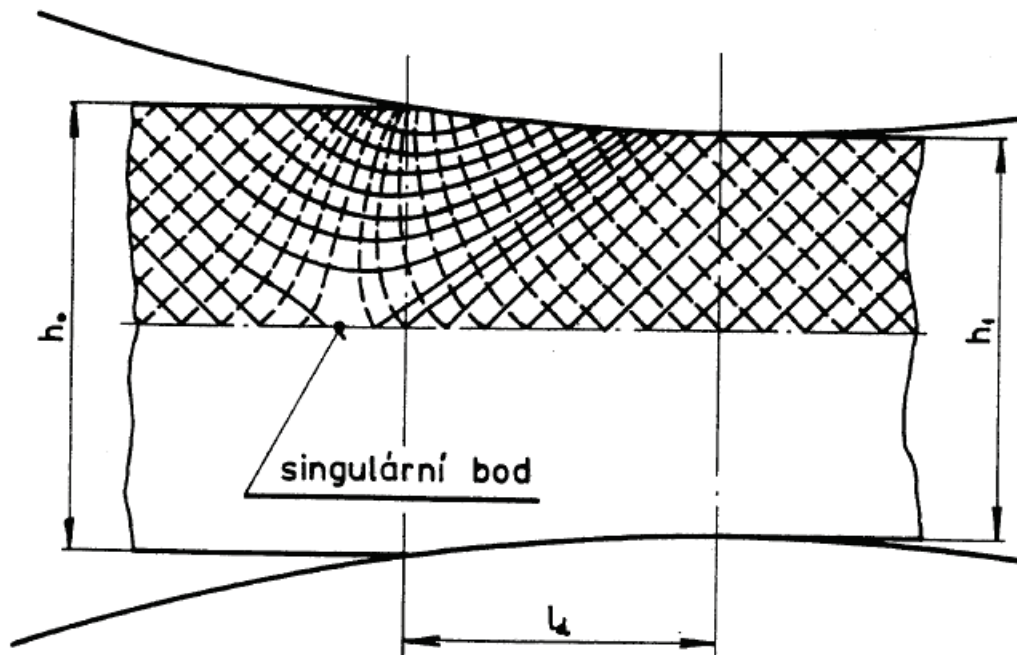
Numerickým řešením statických podmínek rovnováhy s použitím některé z teorií plasticity lze pak vyhodnotit průběhy složek tenzoru napjatosti podél libovolného počtu rovinných řezů a na základě nich pak znázornit napět'ový stav na boční ploše provalku pomocí ekviskalárních hladin. Podrobně bude způsob vyhodnocení popsán v následující kapitole. Na obr. 8 jsou jako příklad uvedeny zjištěné ekviskalární hladiny hlavních napětí, na obr. 9 pak ekviskalární hladiny intenzity smykových napětí a intenzity smykových deformací. Na základě některé podmínky plasticity, např. podmínky maximální intenzity napětí, lze určit i rozhraní mezi pružnými a plastickými deformacemi. Na obr. 10 je vyšrafována oblast, kam už plastické deformace nezasahují.



Obrázek 5 Překreslený průběh izochromatických čar u provalku



Obrázek 6 Vykreslený průběh izostatických čar a označení hlavních napětí



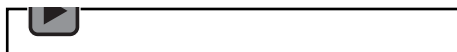
Obrázek 7 Experimentálně zjištěný průběh kluzových čar

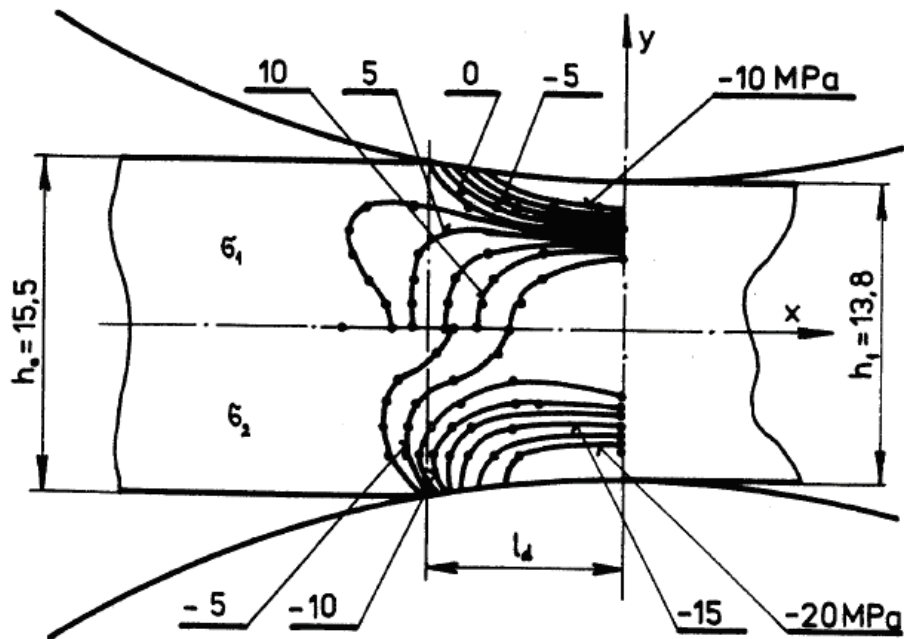
1.4 Modely z nízkomodulových materiálů

U metody povrchových fólií bylo zjištěno, že když dva slepené materiály při zatěžování vyplňují určitý prostor, např. válcovací mezeru mezi hladkými válci, jsou jejich deformace stejné. Experimenty ukazují, že pokud takovou mezeru vyplňuje při stejném způsobu zatěžování pouze opticky aktivní materiál, jsou průběhy izoklin a izochromat podobné jako u nalepeného materiálu, to znamená, že deformace materiálů ve vyplněném objemu jsou v obou případech stejné anebo velmi blízké. Lze tedy analyzovat deformační tenzorové pole v zatíženém objemu, aniž by bylo nutno opticky citlivý materiál lepit na tvářený kov. Výhodou takto provedeného experimentu jsou mnohem zřetelnější a hustší obrazy izochromat.

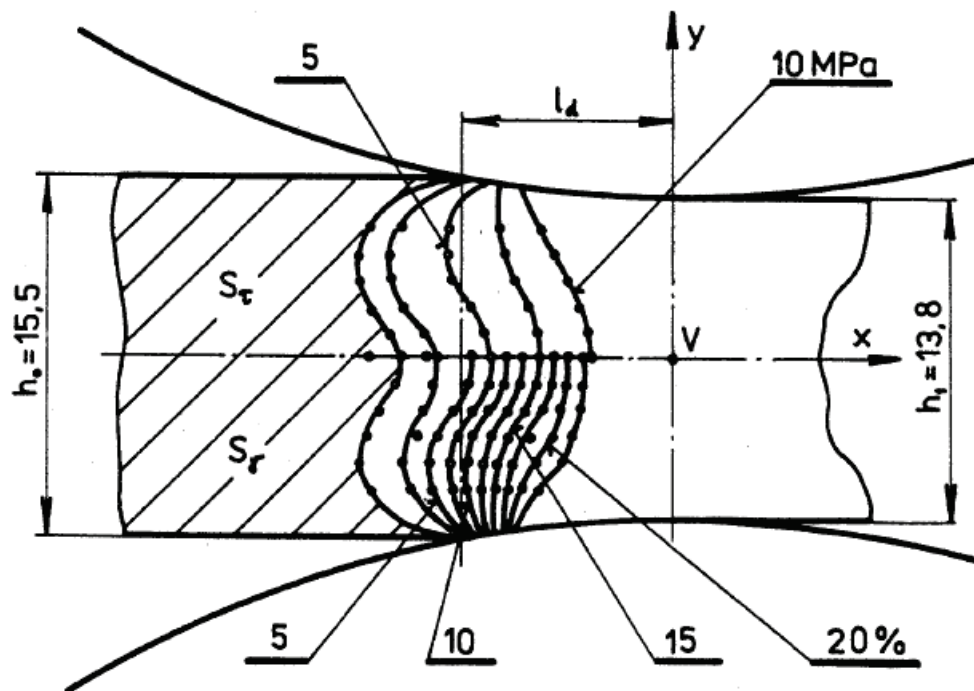


Audio 1.4 Modely z nízkomodulových materiálů





Obrázek 8 Ekviskalární hladiny hlavních napětí



Obrázek 9 Ekviskalární hladiny intenzit smykových napětí a deformací

1.4.1 Vyhodnocení tenzorových deformačních polí

Pro vyhodnocení složek tenzoru deformace jsou z provedeného experimentu k dispozici průběhy izoklinných a izochromatických čar. Izochromatické čáry spojují geometrická místa bodů, ve kterých je rozdíl hlavních poměrných deformací ($\varepsilon_1 - \varepsilon_2$) konstantní a protože nízkomodulový opticky citlivý materiál zůstane i po velkých deformacích ve stavu pružném, je i rozdíl mezi hodnotami sousedních izochromat konstantní a lineární. Wertheimův zákon v tomto případě píšeme ve tvaru (podobně jako v rovnici 2.6 viz přednáška_2 Fotoelasticimetrie:

$$\Delta = m \cdot \lambda = K \cdot t \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad (10.1)$$

odkud pro velikost rozdílu hlavních poměrných deformací pak platí:

$$(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) = m \frac{\lambda}{t \cdot K} = m \cdot f \quad (10.2)$$

Hodnota řádu f je pak dána vztahem:

$$f = \frac{\lambda}{t \cdot K} \quad (10.3)$$

Optická citlivost materiálu K bývá udávána výrobcem. Kupříkladu pro materiál PS4 americké firmy Vishay, jehož optická citlivost je $K = 0,009$, je pro vlnovou délku světelného zdroje $\lambda = 5766 \text{ Å}$ a pro tloušťku materiálu $t = 2,13 \text{ mm}$ hodnota řádu f rovna:

$$f = \frac{5,766 \cdot 10^{-4}}{2,13 \cdot 0,009} = 0,03 \quad (10.4)$$

To znamená, že v těch bodech deformovaného tělesa, kterými prochází izochromatická čára prvního řádu, je rozdíl hlavních poměrných deformací $(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$ roven 3%. Anebo rozdíl hodnot $(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$ mezi dvěma sousedními izochromatickými čarami činí rovněž 3 %.

Lze tedy při známé hodnotě řádu f z obrazu izochromat určit velikost rozdílu hlavních poměrných deformací $(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$ v libovolném bodě deformovaného tělesa prostým vynásobením změřeného řádu izochromatické čáry m v tomto bodě hodnotou řádu f dle rovnice (10.2). Izochromatické čáry rovněž spojují body, ve kterých je rozdíl hlavních napětí $(\sigma_1 - \sigma_2)$ konstantní, ale rozdíly hodnot mezi dvěma sousedními izochromatami nejsou lineární pro plasticky deformovaný materiál.

Směry hlavních poměrných deformací se určí z obrazu izoklin. Vhodné je podobně jako ve fotoelasticimetrii vykreslit i čáry izostatické.

Při řešení praktických úloh zpravidla jednotlivé složky tenzoru deformace nevyhodnocujeme a zjištěné směry a rozdíly hlavních poměrných deformací používáme jako podklad pro vyhodnocení napětíových polí v deformovaném tělese.

1.4.2 Určení mechanických vlastností materiálů

Podobně jako u metody povrchových fólií zjistíme pomocí nízkomodulového opticky citlivého materiálu deformační pole. Pro vyhodnocení tenzorového napětíového pole musíme použít křivku zpevnění materiálu, ve kterém chceme napětíové pole určit. Křivky zpevnění se nejčastěji zjišťují pomocí laboratorních tahových, krutových anebo pěchovacích zkoušek při různých termodynamických podmínkách. Ze zjištěných křivek zpevnění je nutno vyhodnotit závislosti intenzity smykových napětí na intenzitě smykových deformací, případně na intenzitě rychlosti smykových deformací podle volby použité teorie plasticity, viz rovnice 1.60 a 1.64 přednáška_1 Úvod do teorie pružnosti a pevnosti.



Kupříkladu z křivky zpevnění, získané přechovací zkouškou na vačkovém plastometru, lze za předpokladu jednoosého stavu napjatosti ve zkušebním vzorku odvodit výrazy pro intenzitu smykových napětí a intenzitu smykových deformací z rovnic 1.31 a 1.36 přednáška_1 Úvod do teorie pružnosti a pevnosti:

$$S_{\tau} = \frac{\sigma_1}{\sqrt{3}} \quad (10.5)$$

$$S_{\gamma} = \frac{2\varepsilon_1(1+\mu)}{\sqrt{3}} \quad (10.6)$$

Nejen hodnota hlavního napětí σ_1 , ale i hodnota Poissonova čísla μ je funkcí hlavní poměrné deformace ε_1 . Chyba, která vznikne při zjednodušení výpočtu volbou konstantní hodnoty $\mu = 0,5$, je však poměrně malá.

Funkční závislost intenzity smykových napětí na intenzitě smykových deformací je vhodné vyjádřit analyticky pomocí regresní analýzy. Za předpokladu mocninné závislosti lze pomocí metody nejmenších kvadratických odchylek určit tuto funkční závislost ve tvaru:

$$S_{\tau} = a(S_{\gamma})^b \quad (10.7)$$

Je tedy nutno pro každý materiál a různé termodynamické podmínky z výsledků laboratorní zkoušky určit dvě konstanty a a b dané funkční závislostí (10.7). Na obr. 12 je vykreslena zjištěná závislost pro materiál dle ČSN 417246 při teplotě 1000°C a deformační rychlosti 1,5 s⁻¹.

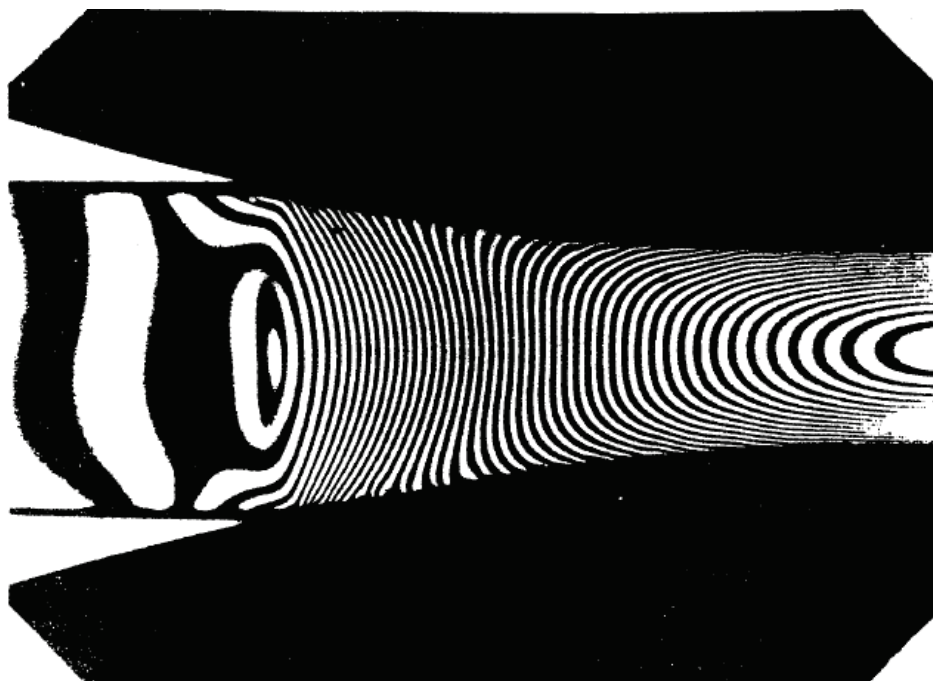
1.4.3 Vyhodnocení tenzorových polí napětí

Při analýze polí napětí je nutno vycházet z řešení statických podmínek rovnováhy, které je nutno řešit numericky kupříkladu metodou rozdílů smykových napětí, viz kapitola 1.6 přednáška_3 Postup při měření a vyhodnocování napětí u fotoelasticimetrie. Protože však závislost mezi deformací a napětím je nelineární, je pro řešení nutno použít některou z teorií plasticity.



Audio 1.5 Vyhodnocení tenzorových polí napětí





Obrázek 10 Izochromatické čáry při válcování na hladkých válcích

Podkladem pro vyhodnocení složek tenzoru napjatosti jsou podobně jako u fotoelasticimetrie a u fotoplasticimetrické metody povrchových fólií zjištěné průběhy izoklinných a izochromatických čar.



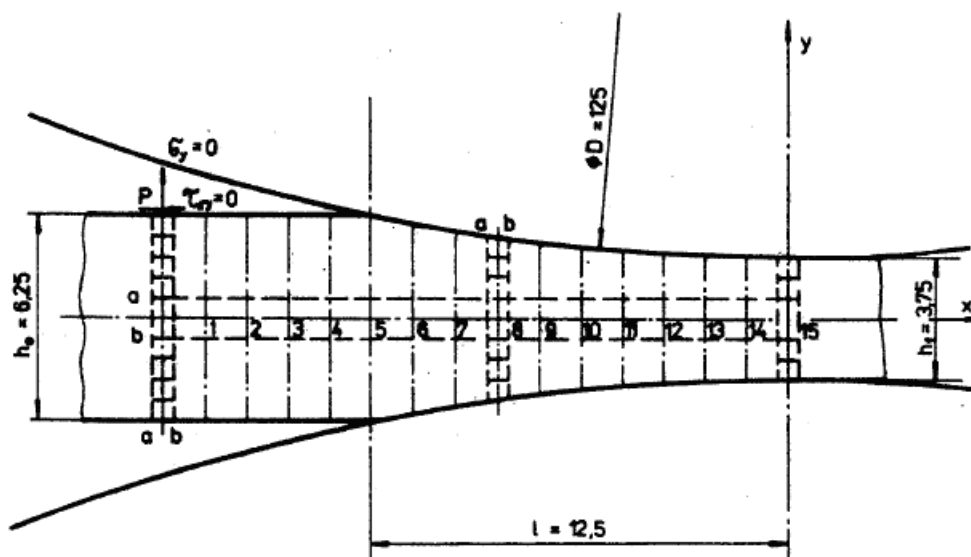
Audio 1.6 Vyhodnocení složek tenzoru napjatosti



Na obr. 10 je uveden zjištěný průběh izochromatických čar v provalku při válcování na hladkých válcích, izochromaty jsou velmi dobře čitelné i při hodnotách nad sto řádů.

Jak je vidět z obr. 10, vznikají pružné i plastické deformace již ve velké vzdálenosti před vstupní rovinou válcování. Není tedy nutno při vyhodnocování napjatosti vycházet z okrajových podmínek na kontaktní ploše mezi válci a deformovaným materiálem, ale je možno použít postupu, znázorněného na obr. 11. Před vstupní rovinou válcování se vyhodnocování provádí podél několika svislých řezů a jako okrajové podmínky pro počátek integrace slouží nulové hodnoty napětí σ_y a τ_{xy} na nezatíženém horním anebo spodním povrchu provalku. Zjištěné složky tenzoru napjatosti v ose

válcování x lze použít jako okrajové podmínky pro vyhodnocení podél této osy. Vyhodnocená napětí na ose válcování x pak slouží jako okrajové podmínky pro řešení průběhů napětí podél svislých řezů v oblasti mezi válci včetně určení kontaktních napětí na stykových plochách deformovaného materiálu s válci.



Obrázek 11 Postup při vyhodnocování složek tenzoru napjatosti

Při vyhodnocování podél vodorovných anebo svislých řezů při rovinné napjatosti v deformovaném materiálu se použije vždy jedna ze statických podmínek rovnováhy 3.4 viz přednáška_3 Postup při měření s vyhodnocení napětí u fotoelasticimetrie. Např. pro podmínky rovnováhy ve směru osy x platí:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0 \quad (10.8)$$

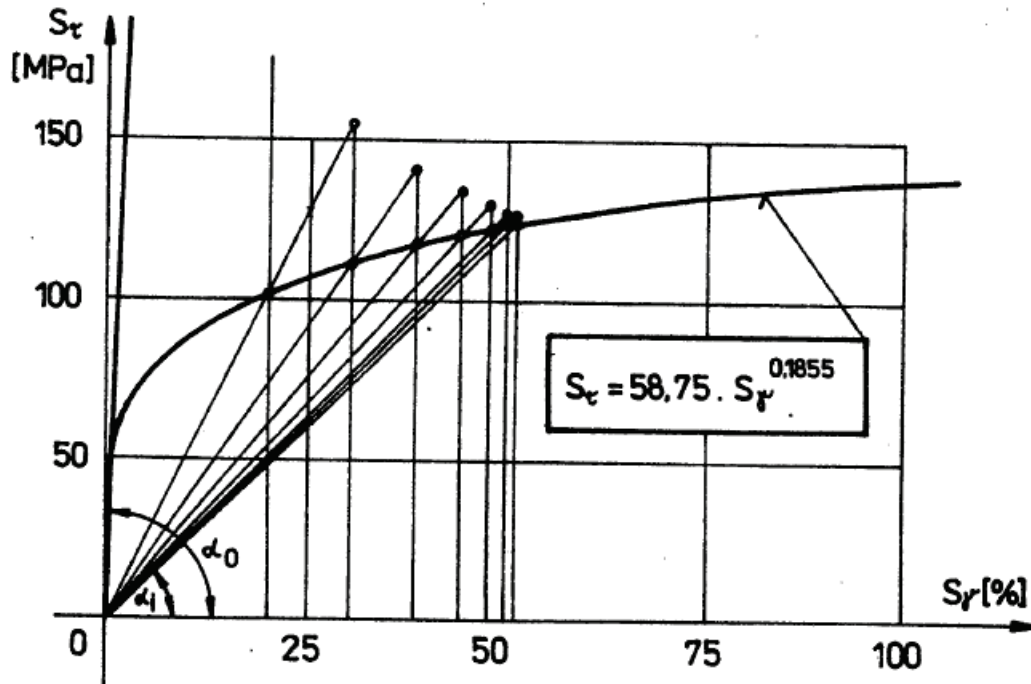
V této parciální diferenciální rovnici se vyskytují dvě neznámé σ_x a τ_{xy} . Pro řešení problému je nutno použít další rovnici, plynoucí z Mohrovy kružnice pro smykové napětí ve tvaru:

$$\tau_{xy} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\vartheta \quad (10.9)$$

K určení smykového napětí dle rovnice (10.9) je třeba znát hodnotu rozdílu hlavních napětí $(\sigma_1 - \sigma_2)$ a směry hlavních napětí, dané úhlem ϑ . Tento úhel se stanoví experimentálně z obrazu izoklin, hodnota rozdílu hlavních napětí $(\sigma_1 - \sigma_2)$ je kupříkladu podle teorie pružně plastických deformací dána rovnicí 2.60 přednáška_1 Úvod do teorie pružnosti a pevnosti:

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{2S_\tau}{S_\gamma} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad (10.10)$$

Pro řešení rovnice (10.10) jsou k dispozici experimentálně zjištěný rozdíl hlavních poměrných deformací $(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$ a funkční závislost intenzit smykových napětí a smykových deformací. Bylo by nutné ještě znát hodnoty intenzity smykových deformací ve vyšetřovaných bodech. Protože tyto hodnoty nejsou známy, provádí se řešení napjatosti metodou postupného přibližování (obr. 12).



Obrázek 12 Postup při vyhodnocování metodou postupného přibližování

Princip uvedené metody je založen na tom, že se předpokládá v prvním přiblížení lineární závislost mezi intenzitou smykových napětí a intenzitou smykových deformací. Předpokládá se tedy, že se deformovaný materiál chová pružně i nad mezi kluzu, takže potom platí:

$$S_{\tau} = G_o \cdot S_{\gamma} \quad (10.11)$$

Konstanta G_o v této rovnici představuje směrnici závislosti intenzity smykových napětí na intenzitě smykových deformací v počáteční fázi zatěžování, je to tangenta úhlu α_o na obr. 12. Potom lze z obrazu izochromat a pomocí rovnice (10.10) a (10.2) určit velikost rozdílu hlavních napětí v libovolném místě deformovaného tělesa, tedy platí:

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = 2 G_o f(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad (10.12)$$

V této rovnici se rozdíl hlavních poměrných deformací $(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$ dosazuje v hodnotách řádů izochromat, určených interpolací z obrazu izochromat.

Pro takto určené velikosti rozdílu hlavních napětí $(\sigma_1 - \sigma_2)$ a naměřené hodnoty směrů hlavních napětí ϑ z obrazu izoklin se pak metodou rozdílu smykových napětí určí složky tenzoru napjatosti v bodech dělení zvoleného řezu. Z nich se vypočte velikost intenzity smykových napětí dle vztahu:

$$S_{\tau_o} = \sqrt{\frac{1}{3}(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y) + \tau_{xy}^2} \quad (10.13)$$

Podíl intenzity smykových napětí S_{τ_o} a hodnoty G_o udává velikost intenzity smykových deformací prvního přiblížení:



$$S_{\gamma_o} = \frac{S_{\tau_o}}{G_o} \quad (10.14)$$

Pro tuto hodnotu intenzity smykových deformací se určí odpovídající velikost intenzity smykových napětí na základě experimentálně zjištěné funkční závislosti těchto intenzit (10.7):

$$S_{\tau_1} = a(S_{\gamma_o})^b \quad (10.15)$$

Podíl takto získané hodnoty smykových napětí S_{τ_1} a intenzity smykových deformací S_{γ_o} udává novou směrnicí G_1 :

$$G_1 = \frac{S_{\tau_1}}{S_{\gamma_o}} \quad (10.16)$$

S touto novou směrnicí G_1 se celý výpočet od rovnice (10.12) opakuje a získají se všechny výše uvedené veličiny druhého přiblížení a nová směrnice G_2 pro další přiblížení.

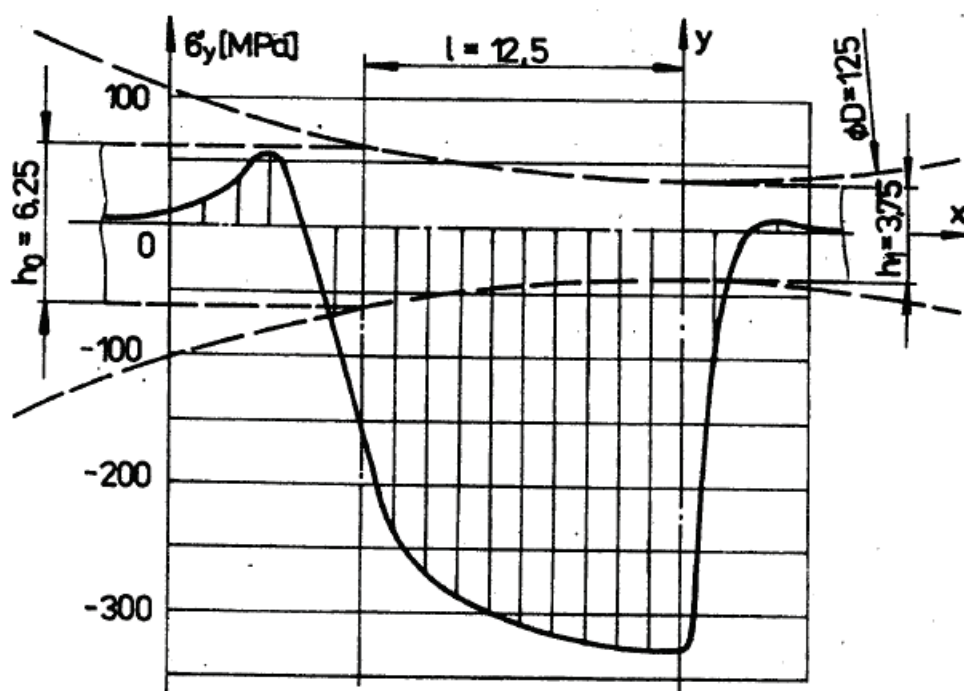
Před každým krokem přiblížení se provádí test, jak vypočtené hodnoty dle použité metody konvergují. Jako omezující podmínky pro zastavení dalších kroků přiblížení lze např. volit okamžik, kdy rozdíly hodnot intenzity smykových deformací ve dvou po sobě následujících krocích nepřesáhnou určitou hodnotu, např. 1%.

Vyhodnocování touto metodou je poměrně pracné a bez použití počítače prakticky nemyslitelné. Proto byl celý výpočet naprogramován a blokové schéma výpočtu je uvedeno na obr. 14. Jako vstupní data musí být zadány parametry izoklinných a izochromatických čar v uzlových bodech vyšetřovaného a dvou pomocných řezů, okrajové podmínky v počátečním bodě integrace P ve formě hodnot σ_o a $\Delta\tau_o$, hodnota řádu f použitého opticky citlivého materiálu, počáteční směrnice G_o a konstanty a a b mocninné závislosti intenzit reálného deformovaného materiálu, počet bodů dělení a konstanta c pro test a ukončení konvergence. Jako výstupní data jsou vytištěny složky tenzoru napětí $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, \sigma_1, \sigma_2$ a $S_\tau, S_\sigma, S_\gamma, (S_{\gamma_i} - S_{\gamma_{i-1}})$. Vypočtené hodnoty slouží jako podklad pro další grafické zpracování a znázornění zjištěných tenzorových napětíových polí ve formě průběhů složek tenzoru napjatosti podél zvolených zajímavých řezů anebo ekviskalárních hladin napětí a intenzit.

Na obr. 13 je jako příklad uveden vyhodnocený průběh normálového napětí σ_y podél osy válcování x při válcování na hladkých válcích nerezavějící oceli dle ČSN 417246. Závislost intenzit

S_τ a S_γ tohoto materiálu je uvedena na obr. 11. Vyhodnocený průběh napětí σ_y je zajímavý a na první pohled paradoxní tím, že přibližně ve stejné vzdálenosti jak před vstupní, tak za výstupní rovinou válcování toto napětí přechází z tlakových do tahových hodnot. Existenci těchto tahových napětí experimentálně potvrzuje způsob porušení těžce tvaritelných materiálů po výstupu z válců, kdy někdy dochází k jeho roztržení zrovna v místech zjištěných tahových napětí.

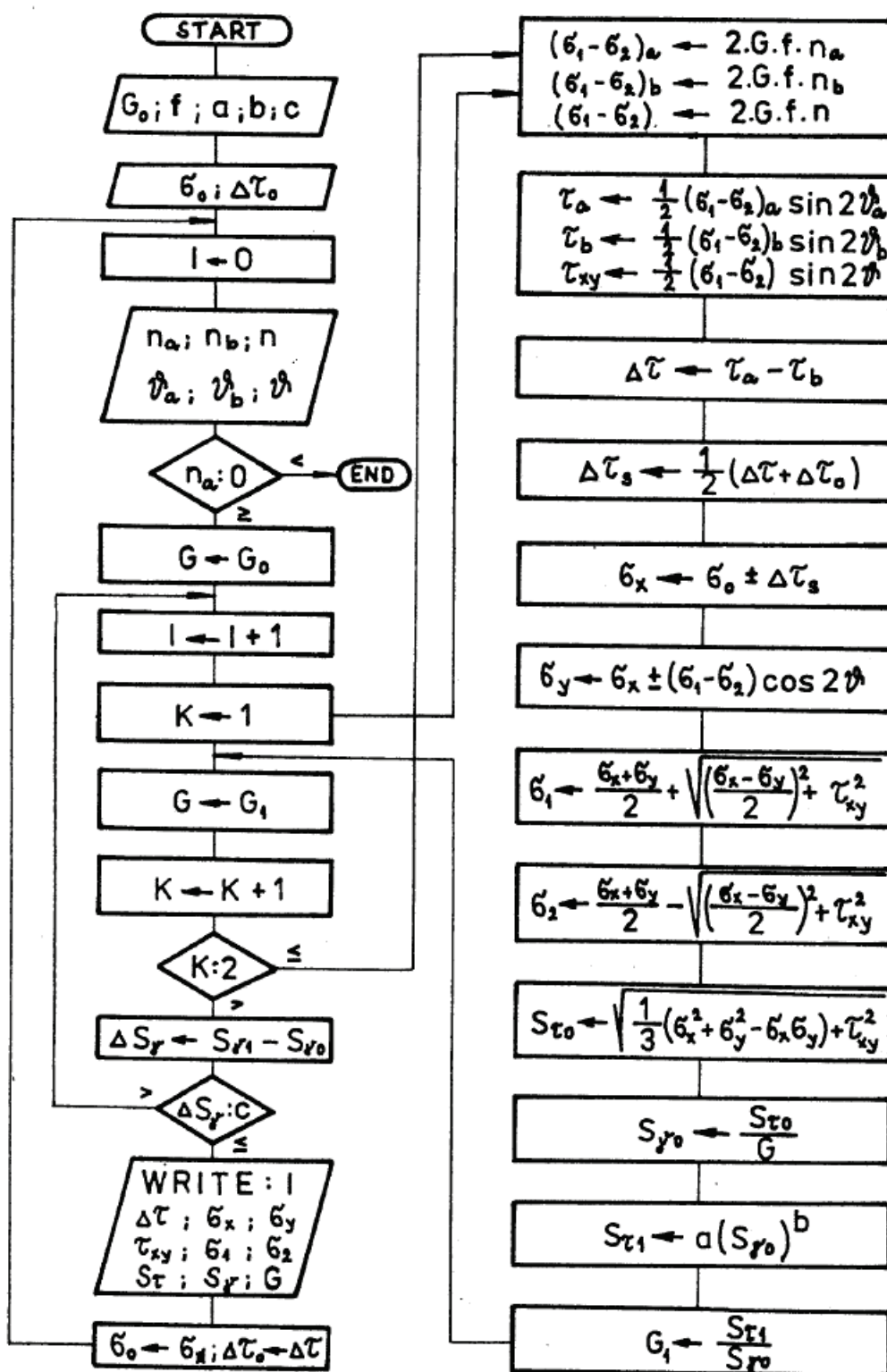




Obrázek 13 Vyhodnocení průběhu napětí podél osy válcování

Výše uvedená metodika se použila pro vyhodnocení napěťových polí v provalcích pouze po výstupní rovinu válcování, tj. v oblasti, ve které v souladu se základním předpokladem teorie pružně plastických deformací dochází k postupnému zatěžování a ve které lze použít mocninovou závislost mezi intenzitami smykových napětí a deformací. Za výstupní rovinou válcování vzniká v provalku oblast odlehčení a použitá teorie plasticity předpokládá lineární závislost mezi intenzitami smykových napětí a deformací. Tento předpoklad se respektoval a uvedený průběh napětí σ_y v oblasti odlehčování se získal analytickým řešením jako v práci [Coker, E. G., Filon, N. L. G.: Treatise on photoelasticity].

Kromě analýzy napěťových polí při válcování na hladkých válcích se tato metoda využila hlavně pro řešení napjatosti v materiálu při válcování na kalibrovaných válcích, kde použití jiných experimentálních metod je problematické. Protože při vyhodnocení složek tenzoru napjatosti se použilo jak výsledků experimentů, tak početního řešení, jsou takovéto metody taky nazývány jako experimentálně – početní anebo hybridní. Použití této metody pro řešení řady praktických problémů je uvedeno v práci [Macura, P.: Napěťová pole při válcování na hladkých a kalibrovaných válcích].



Obrázek 14 Blokové schéma výpočtu složek tenzoru napjatosti

2. POUŽITÁ LITERATURA

- Macura, P.: Experimentální metody v pružnosti a plasticitě, Skripta VŠB – TU Ostrava, 2001, 107s
- Macura, P.: Sbíрка úloh z experimentální pružnosti, Skripta VŠB – TU Ostrava, 2008, 96s
- Milbauer, M., Perla, M.: Fotoelasticimetrické přístroje a měřicí metody. Praha, ČSAV, 1959, 471s
- Milbauer, M., Perla, M.: Fotoelasticimetrie a příklady jejího použití. Praha, ČSAV, 1961, 504s
- Milbauer, M.: Fotoelasticimetrie a její použití v praxi. Praha, NČA, 1953, 134s
- Frocht, M. M.: Photoelasticity I, II, John Willey & Sons, New York, 1941
- Heymann, J., Lingener, A.: Experimentelle Festkörpermechanik. Leipzig, 1986, 486s
- Einführung in das spannungsoptische Oberflächenschichtverfahren, Firemní materiál firmy Vishay Micro-Measurements
- Vorancov, V. K., Poluchin, P.I.: Fotoplastičnost'. Moskva, Metallurgija, 1969
- Instruction for Molding and Contouring Photoelastic Sheets, Buletin IB – 221 firmy Vishay Micro-Measurements
- Macura, P.: Napěťová pole při válcování na hladkých a kalibrovaných válcích. Doktorská disertační práce, Ostrava, 1990, 142s
- Coker, E. G., Filon, N. L. G.: Treatise on photoelasticity. Cambridge at the University Press, 1957
- Macura, P., Fojtik, F.: The Application of Photostress Method for Experimental Stress Analysis of Plate Transducer, konference EAN2011, Znojmo, 2011
- Macura, P.: Metodika experimentálního určení kontaktních napětí při válcování, Hutnické listy, 34, 1979, č. 2, s. 98-103
- Trebuňa F.: Princípy, postupy, prístroje v metode Photostress, TU Košice, 2006
- Trebuňa, F., Šimčák, F.: Odolnosť prvkov mechanických sústav, TU Košice, 2004, 980s
- Trebuňa, F., Šimčák, F.: Príručka experimentálnej mechaniky, TU Košice, 2007, 1536s

Internet

Srovnávací analýza napětí součástí s vruby pomocí fotoelasticimetrie a MKP

Diplomová práce - autor Bc. Jiří Bittner

http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=726

