

**MĚŘENÍ PLASTICKÝCH DEFORMACÍ V KOŘENI
TRHLINY METODOU MOIRE**

Doc. Ing. František Plánička CSc.

Ing. Jaroslav Kadlec

VŠSE Plzeň

V současné době jsou intensivně rozpracovávána kritéria šíření trhlinky v pružně plastickém prostředí především pro případ velké plastické oblasti před čelem trhliny. Existuje již řada modelů, které tento problém řeší, avšak exaktní řešení pro určení napjatosti a deformace v plastické zóně nebylo dosud zpracováno. Jedním z kritérií nestabilního stavu trhliny je rozevření v jejím kořeni. Toto rozevření lze určit experimentálně. Přesnost však závisí na přepočtu, který je nutno udělat.

Příspěvek se zabývá otázkou aplikace metody moire na určení kritického rozevření trhliny. Ukázalo se, že touto metodou lze stanovit rozevření bezprostředně v kořeni trhlinky. Její aplikaci však lze určit i maximální poměrné prodloužení v kořeni trhliny. Je ukázána i možnost určení napjatosti ve špici trhliny na povrchu zkušebního tělesa a analýzy pole deformace a napětí v plastické oblasti.

Ověření metody bylo provedeno na ploché zkušební tyči s bočním vybráním, která byla namáhána tříbodovým ohybem. Tvar zkušebního tělesa neodpovídá přesně tvaru pro stanovení lomové houževnatosti, neboť cílem měření bylo rozpracování metody a její ověření pro aplikaci na zkušební tělesa z ne-magnetické oceli. Výsledky ukázaly řadu předností metody moire.

Použitá označení

p	rozteč nedeformované mřížky
λ	hustota mřížky
x, y	pravouhý souřadný systém
u	složka posuvu ve směru osy x
F	síla
ϵ	poměrné prodloužení
σ	rozevření paty vrubu (špice trhliny)
σ_c	kritické rozevření paty vrubu (špice trhliny)
σ_{Pt}	mez pevnosti v tahu
σ_s	skutečné napětí vztahené k okamžité ploše průřezu
ψ	kontrakce

1. Úvod

Lomová mechanika je postavena na předpokladu, že chování makroskopické trhliny v tělese je určeno lokálním polem deformace a napětí v okolí kořene trhliny. Proto pro řešení problému je nutné tato pole znát. Nejjednodušším modelem pro jejich stanovení je předpoklad šíření trhliny v lineárně pružném kontinuu. V tomto případě je pole deformací a napětí charakterizováno jedinou veličinou - koeficientem intenzity napětí K .

U většiny reálných materiálů vzniká na špici trhliny plastická deformace. Je-li však plastická oblast malá ve srovnání s délkou trhliny a rozměrem tělesa ve směru jejího šíření, je napěťové pole charakterizováno koeficientem intenzity napětí, stejně jako v případě lineární lomové mechaniky /1/.

Zcela jiné poměry nastávají u ocelí nízkých a středních pevností. Zde, s výjimkou nízkých teplot, vzniká na čele trhliny velká plastická oblast, které mnohdy zasáhne celý průřez. V současné době jsou intenzivně rozpracovávána kritéria šíření trhlínky v pružně plastickém prostředí především pro případ velké plastické oblasti před čelem trhliny. Dnes již existuje řada modelů, které tento problém řeší, avšak exaktní řešení pro určení pole deformací a napětí v plastické oblasti dosud zpracováno nebylo /2/.

Charakteristickým znakem pro šíření trhliny v pružně plastickém stavu je její pozvolný podkritický růst. Podle některých modelů postupuje tento růst až do okamžiku, kdy zeslabený průřez již není schopen přenést stávající zatížení a dojde k lomu. Nevyřešenou otázkou zůstává mechanismus podkritického šíření trhliny. Pro vyřešení tohoto mechanismu bude vedle složitých strukturálních změn hrát významnou roli i stanovení polí deformace a napětí v plastické oblasti před čelem trhliny.

Jedním z kritérií nestabilního stavu trhliny je rozevření v jejím kořeni. Tato koncepce posuzuje chování defektu podle určité schopnosti materiálu se plasticky deformovat v kořeni trhliny. Trhlina se stane nestabilní, jestliže rozevření jejího kořene dosáhne kritické hodnoty σ_c . Pomocí nejčastěji používaných experimentálních metod nelze toto rozevření určit bezprostředně v kořeni trhliny.

Příspěvek se zabývá aplikací metody moire na určení kritického rozevření trhliny v jejím kořeni na bočním povrchu zkoušky. Touto metodou lze určit i maximální poměrné prodloužení na špicí trhlínky, které podle některých modelů může být kriteriem jejího pozvolného podkritického růstu v pružně plastickém prostředí. Metoda moire umožňuje určit pole deformace, popřípadě i napětí v celé oblasti, která nás zajímá.

2. Podstata metody

Metoda moire je založena na principu mechanické interference, která vzniká jestliže na sebe položíme dvě soustavy čar, např. rovnoběžných přímk o stejné rozteči a jednu z nich natočíme, deformujeme nebo současně deformujeme a natočíme. Získáme tmavé interferenční pruhy /3/, /4/, /5/. Budeme uvažovat mřížku, která je tvořena soustavou rovnoběžných čar o stejné rozteči p . Výhodou metody je, že pomocí ní lze určit potřebné deformace v celé oblasti.

Naneseme-li na povrch tělesa mřížku, bude se po jeho zatížení deformovat spolu s povrchem. Po přiložení analyzační mřížky dostaneme obraz interferenčních pruhů, které jsou geo-

metrickými místy bodů o stejné složce posuvu ve směru kolmém na osnovu analyzační mřížky. Relativní hodnota posuvu vůči zvolenému pruhu nultého řádu se rovná celistvému násobku rozteče analyzační mřížky. Pro složku posuvu ve směru osy x platí

$$u = kp \quad (1)$$

kde celé číslo k určuje řád pruhu a rovná se počtu pruhů od zvoleného pruhu nultého řádu.

Při řešení problému v rovině x, y (obr. 1) bude složka posuvu funkcí proměnných x, y , což lze zapsat ve tvaru

$$u = u(x, y) \quad (2)$$

Rovnice (2) vyjadřuje v souřadném systému x, y plochu s vrstevnicemi totožnými s interferenčními pruhy. Těchto vlastností funkce u bude využito při určování hledaných velikostí.

Uvažujme o obraze interferenčních pruhů pro danou orientaci mřížky podle obr. 1. Chceme-li určit rozdíl posuvu $\delta_{AB} = u_A - u_B$ dvou bodů A, B , vedeme oběma body rovnoběžné řezy kolmé na rovinu xy . Uvažujme o řezech rovnoběžných s osou x ($y_1 = \text{konst.}, y_2 = \text{konst.}$). V obou rovinách sestrojíme křivky posuvů $u = u(x, y_1)$, $u = u(x, y_2)$, které geometricky vyjadřují řezy zvolených rovin s plochou $u = u(x, y)$. Z nich pak lze určit hledaný posuv bodu B vůči bodu A , jak je zřejmé z obrázku.

Pomocí soustavy řezů $y_1 = \text{konst.}, \dots, y_n = \text{konst.}$ a odpovídajících křivek posuvů $u = u(x, y_1), \dots, u = u(x, y_n)$ sestrojíme křivku posuvů ve směru kolmém, např. pro řez $x_1 = \text{konst.}$ Tento postup je nutný v případě, kdy v uvedeném směru máme malý počet interferenčních pruhů, popřípadě řez leží mezi dvěma interferenčními pruhy. Přesnost křivky bude záviset na počtu zvolených řezů. Tímto způsobem vlastně určujeme posuv necelých řádů.

Poměrné prodloužení ϵ_x pak lze ve směru hlavních poměrných prodloužení a v případě malých deformací určit ze vztahu

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta u}{\Delta x} \quad (3)$$

3. Aplikace metody na plochou zkušební tyč s bočním vybráním

Měření bylo provedeno na ploché zkušební tyči vyrobené z duralu ($\sigma_{Pt} = 495 \text{ MPa}$, $\psi = 14 \%$). Tvar zkušební vzorku, který byl zatěžován tříbodovým ohybem, je zřejmý z obr. 2. Zkušební těleso neodpovídá přesně tvaru tělesa pro stanovení lomové houževnatosti, což bylo ovlivněno zatěžovacím zařízením. Zkouška byla zatěžována v rámu fotoelasticimetru s využitím pákového převodu. Síla byla měřena prstencovým siloměrem RKM - 150 kp, výrobce PGH Kraftmessgeräte NDR. Cílem měření byla příprava metody pro aplikaci na zkušebních tělesech z nemagnetické oceli.

Na povrch vzorku byla fotografickou cestou /5/ nanesena mřížka o hustotě $\lambda = 20$ čar/mm, což odpovídá rozteči čar $p = 0,05$ mm. Pro každý stupeň zatížení byly interferenční pruhy fotografovány na kinofilm. Pro vyhodnocení měření byl obraz překreslen na pauzovací papír pomocí profilprojektoru. Bylo použito desetinásobné zvětšení. Z obrazu interferenčních pruhů bylo na základě metody uvedené v části 2 určeno rozevření paty vrubu.

Při malých zatíženích jsme pro zvolenou hustotu mřížky dostali malý počet interferenčních pruhů. Proto byla použita metoda natočení analyzační mřížky o malý úhel /5/. Pole interferenčních pruhů při zatížení $F = 2,56$ kN je zřejmé z obr. 3. Křivky posuvů byly vyšetřovány v řezech I a II. Jsou uvedeny na obr. 5. Rozevření paty vrubu δ_1 je potom vyjádřeno rozdílem posuvů v bodech řezů I, II pro $y = y_A$.

Při větších hodnotách zatížení bylo prováděno měření při natočení analyzační mřížky o malý úhel a při rovnoběžných mřížkách. Výsledky byly porovnány. Proto na obr. 4 je uvedeno pole interferenčních pruhů při stejném zatížení, ale s rovnoběžnými mřížkami. Rozevření paty vrubu je určeno stejným způsobem jako

v předešlém případě. Je si však třeba uvědomit, že posuvy v řezech I' a II' jsou opačného znaménka. Křivky posuvů jsou uvedeny na obrázku 5. Výsledky měření, kdy $\delta_1 = \delta_2 = 0,175$ mm potvrdily závěr, že malý úhel natočení analyzační mřížky neovlivní výsledek měření /5/. Na obrázku 6 jsou fotografie polí interferenčních pruhů při natočené analyzační mřížce a rovnoběžných mřížkách. Při velkých zatíženích bylo prováděno měření pouze při rovnoběžných mřížkách, neboť při natočené analyzační mřížce počet interferenčních pruhů po jedné straně zářezu klesá a na druhé značně vzroste. Vyhodnocení tohoto pole je obtížné. Touto otázkou se podrobněji zabývá práce /6/.

Na základě takto získaných hodnot byl sestrojen diagram $F-\sigma$ (síla v závislosti na rozevření paty vrubu), který je uveden na obr. 7. Odtud lze určit kritické rozevření, které v uvažovaném případě bylo $\delta_c = 0,42$ mm. Při měření nastal od tohoto stupně zatížení trvalý pokles síly a objevila se trhlinka.

Pro určení maximálního poměrného prodloužení, které odpovídá kritickému rozevření paty vrubu potřebujeme znát křivku posuvů $u = u(x, y_A)$ v řezu jscím patou vrubu (špicí trhliny). Pole interferenčních pruhů je na obr. 8. Křivku posuvů v řezu $y' = y'_A$ sestrojíme pomocí soustavy řezů $x = \text{konst}$ (řezy I, II ...). Postup na základě uvedené teorie je zřejmý z obr. 9. Zde jsou však pro přehlednost uvedeny jen některé křivky posuvů $u = u(x_i, y)$.

Poměrné prodloužení v bodě A paty vrubu bude podle vztahu (3) určeno výrazem

$$\epsilon_x = \frac{\partial u(x=0, y_A)}{\partial x} = \text{tg } \alpha \quad (4)$$

Pro uvedený materiál a tvar vrubu bylo změřeno $\epsilon_x = 13,1\%$, což je značná hodnota deformace, neboť tažnost materiálu byla $\delta_s = 16,3\%$. δ_s vyjadřuje skutečnou tažnost s uvažováním vzniku krčku. Je určena vztahem

$$\sigma = \frac{\psi}{1 - \psi} \quad (5)$$

4. Závěr

Výsledky měření ukázaly, že aplikace metody moire na určení kritické hodnoty rozevření paty vrubu, nebo kořene trhliny má řadu předností. Pomocí uvedené metody lze určit rozevření v kterémkoliv místě. Odpadá tudíž přepočít, který je nutný při použití sponového snímače. Lze však určit i hodnotu poměrného prodloužení na špici trhliny, popřípadě celé pole deformace v oblasti, která nás zajímá. Je však nutné použít mřížky orientované vhodným způsobem. Pokud se bude trhlina šířit v rovině symetrie, lze snadno určit i napjatost na bočním povrchu zkoušky v bodech osy symetrie /5/. Pro vyhodnocení je nutné použít ortogonální mřížku a znát závislost skutečného napětí σ_0 na poměrném prodloužení ϵ , kterou lze určit tahovou zkouškou. Přitom v bodě na špici trhliny na povrchu vzorku vzniká jednoosá napjatost, neboť povrch trhliny je nezatížen. Napětí lze potom přímo určit z pracovního diagramu v závislosti na velikosti dosaženého poměrného prodloužení.

Při aplikaci metody moire je důležitá volba mřížky s vhodnou hustotou čar. Použijeme-li mřížku s malou hustotou čar, dostaneme malý počet interferenčních pruhů, tím nepřesnou křivku posuvů a tím i velkou chybu měření. Tento nedostatek lze vyloučit natočením analyzační mřížky o malý úhel.

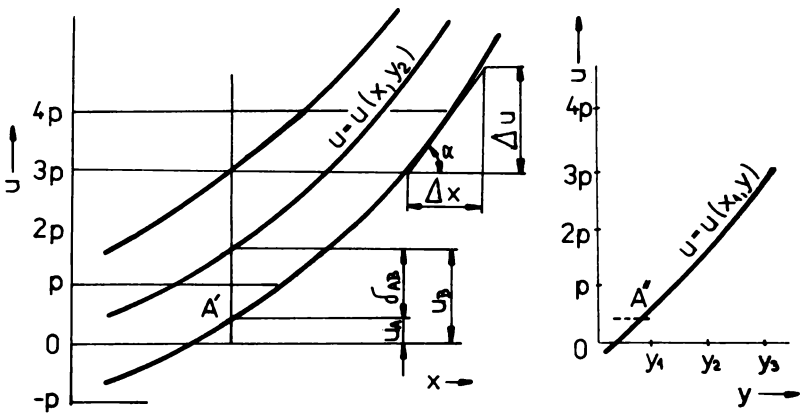
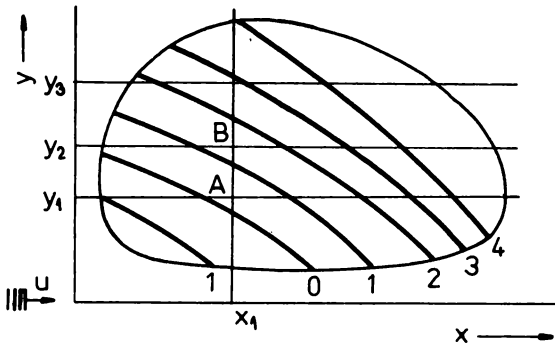
Nevýhodou metody moire však je, že pomocí ní lze provádět měření pouze na povrchu vzorku.

Použitá literatura

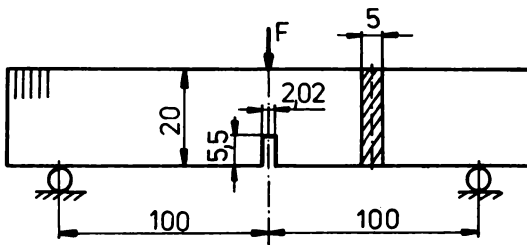
- /1/ Lukáš P., Klesnil M.: Lomová mechanika a její použití pro výběr materiálů na koncové lopatky parních turbin, Sborník referátů na sympoziu "Konstrukční a materiálová problematika lopatek koncových stupňů parních turbin pro klasické a jaderné elektrárny", Plzeň 1976
- /2/ Němec J.: Pokroky a směry výzkumu v hodnocení mezních stavů kovových konstrukcí, Sborník II. semináře "Pokroky fyzikální metalurgie", ČSAV Brno 1976
- /3/ Durelli A.J., Parks V.J.: Moire Analysis of Strain, Prentice Hall, 1970
- /4/ Holister G.S.: Experimental Stress Analysis, Cambridge University Press, Cambridge 1967
- /5/ Plánička F.: Teoreticko-experimentální analýza mezních stavů vybraných vrubovaných součástí, habilitační práce, VŠSE Plzeň 1975
- /6/ Luxmoore A., Wyatt P. J.: Application of the Moire Technique to Fracture - Toughness Test on Zirconium Alloys, Journal of Strain Analysis 1970/4

Seznam vyobrazení

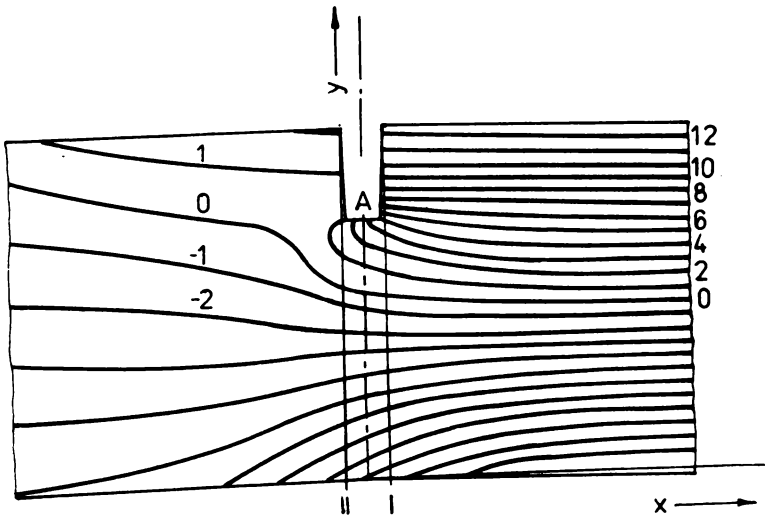
- Obr. 1 Konstrukce křivek posuvů a určení vzájemného posuvu dvou bodů
- Obr. 2 Tvar zkušebního tělesa s jednostranným bočním zářezem
- Obr. 3 Pole interferenčních pruhů při malém úhlu natočení analyzační mřížky (překresleno na pauzovací papír)
- Obr. 4 Pole interferenčních pruhů při rovnoběžných mřížkách (překresleno na pauzovací papír)
- Obr. 5 Křivky posuvů a určení rozevření paty vrubu
- Obr. 6 Fotografie interferenčních pruhů při natočené a rovnoběžné analyzační mřížce
- Obr. 7 Závislost síly na rozevření paty vrubu
- Obr. 8 Pole interferenčních pruhů při kritickém rozevření paty vrubu
- Obr. 9 Konstrukce křivky posuvů v řezu procházejícím patou vrubu a určení poměrného prodloužení



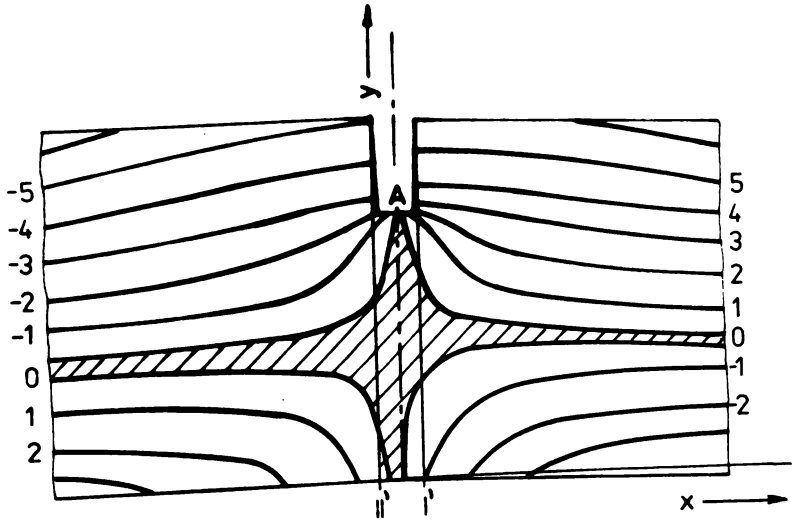
obr. 1



obr. 2



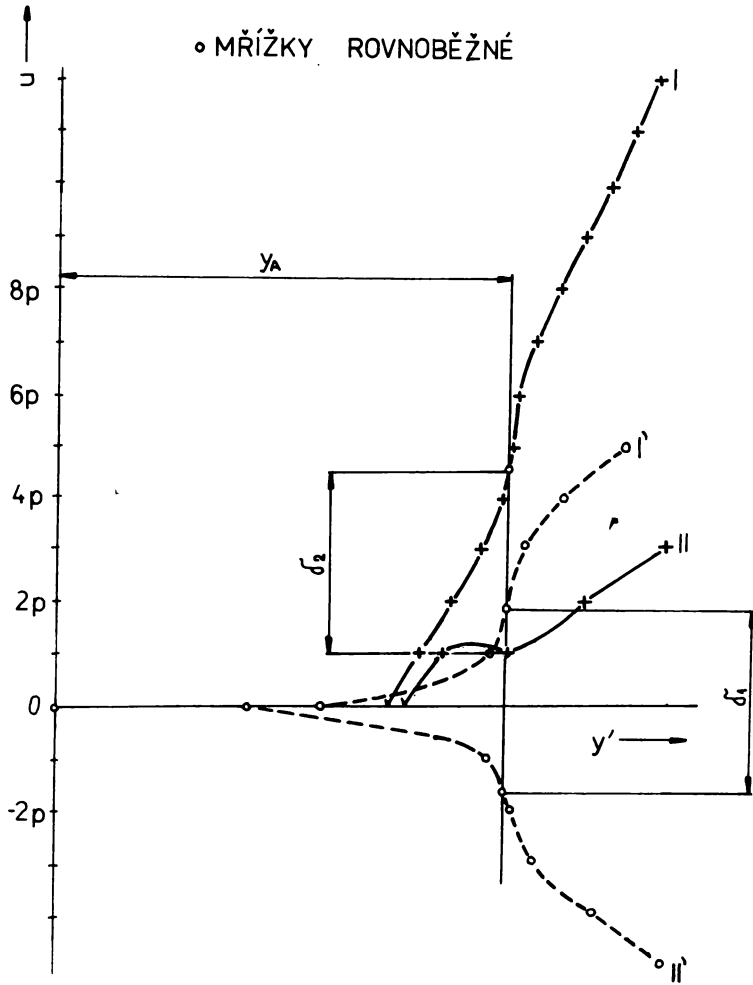
obr. 3



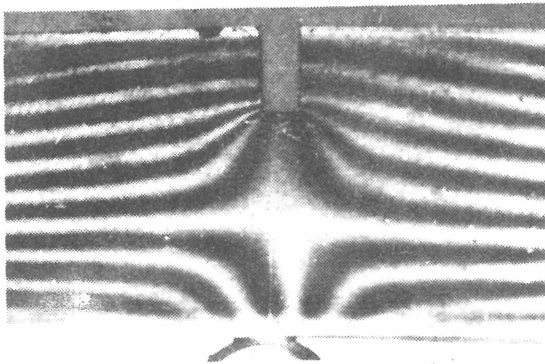
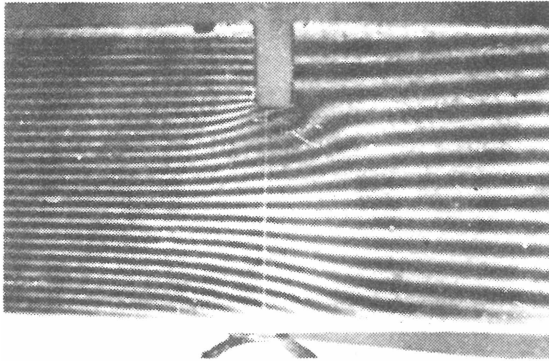
obr. 4

+ NATOČENÁ ANALYZAČNÍ MŘÍŽKA

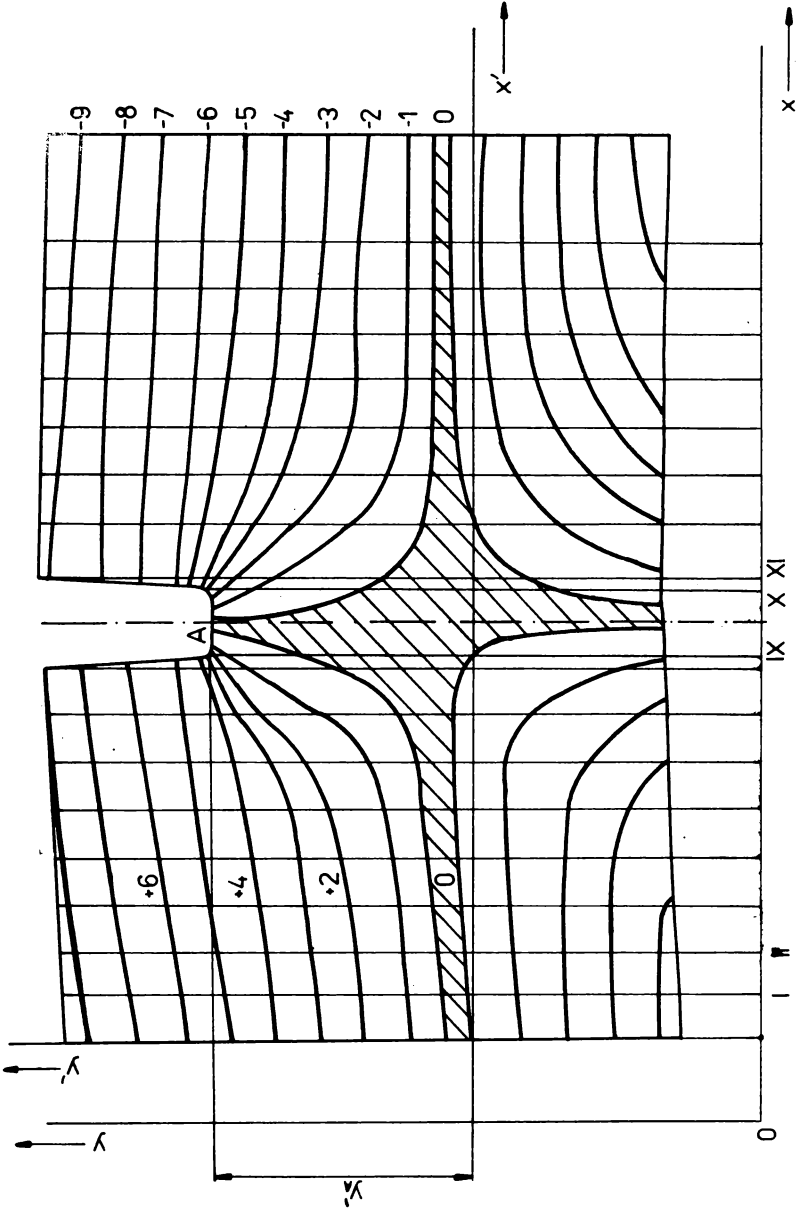
o MŘÍŽKY ROVNOBĚŽNÉ



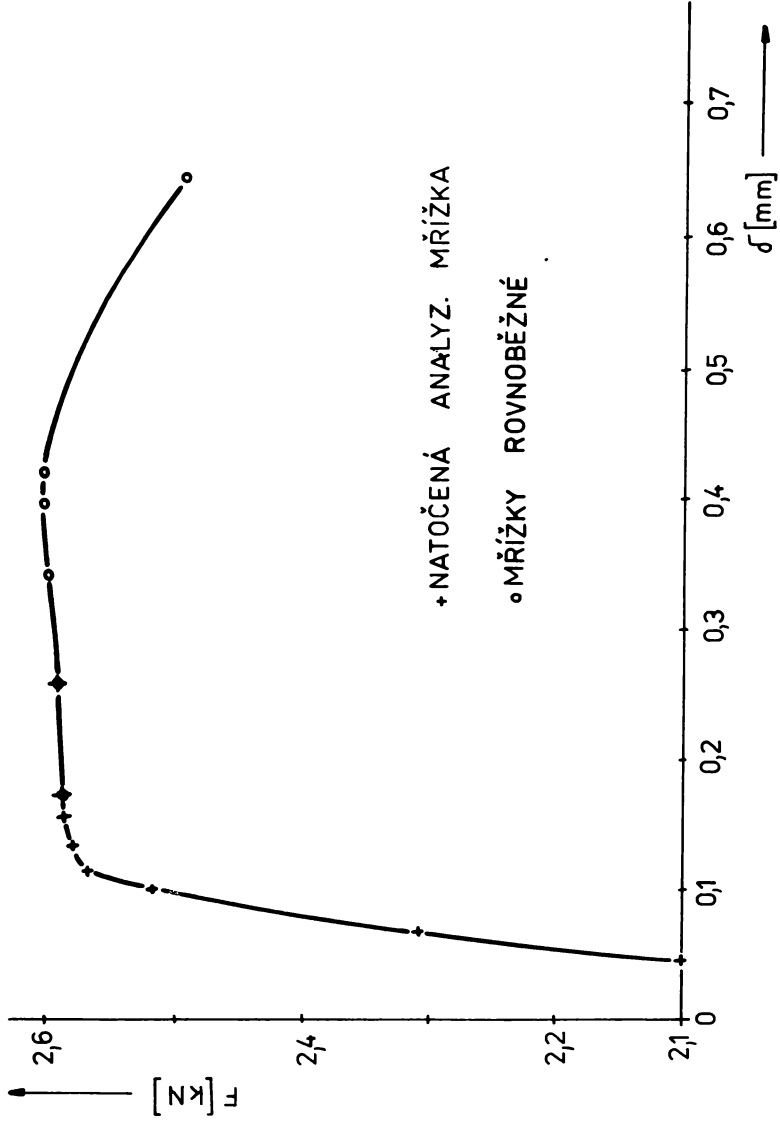
obr.5



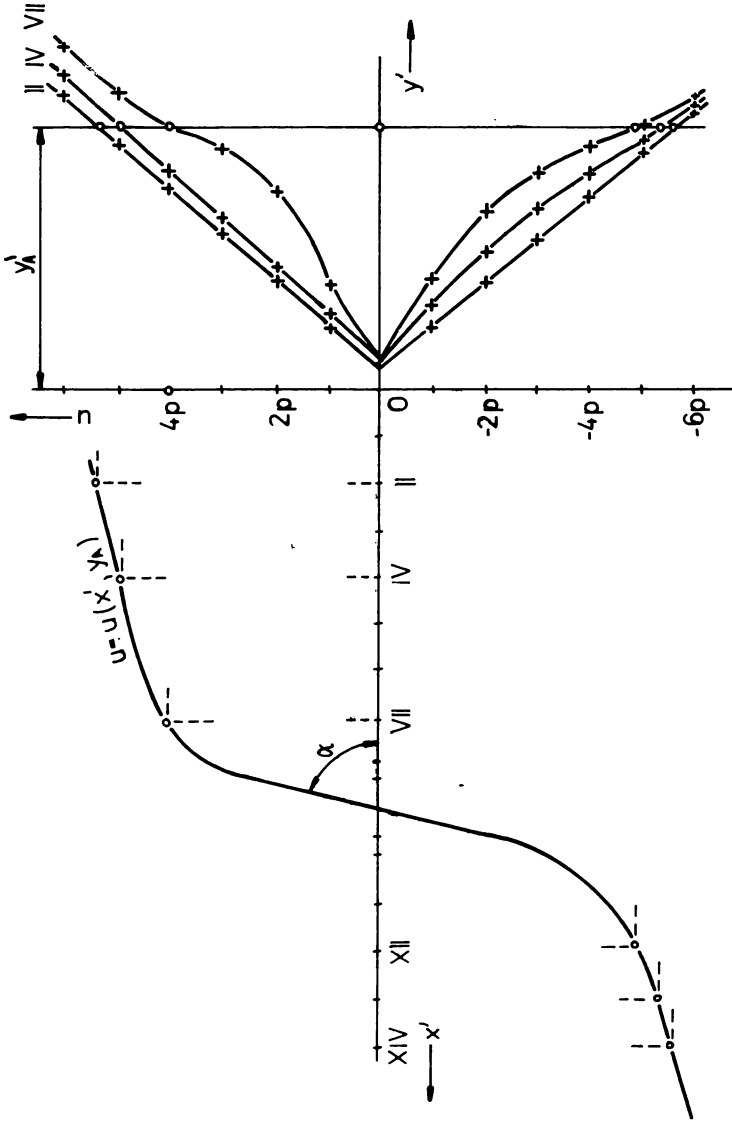
obr. 6



obr. 7



obr.8



obr. 9