

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ V LIBERCI  
nositelka Řádu práce

Fakulta strojní  
Obor 23 - 07 - 8  
strojírenská technologie  
zaměření

tváření kovů a plastických hmot

Katedra tváření a plastů

METODIKA STANOVENÍ MEZNÍHO STAVU PŘETVOŘENÍ

Iva Hromádková

KPT 383

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Buchar, CSc. VŠST Liberec

Rozsah práce a příloh

Počet stran	78
Počet příloh a tabulek	6/3
Počet obrázků	31
Počet modelů nebo jiných příloh - orig.kopíí	16

Vysoká škola: strojní a textilní      Fakulta: strojní  
Katedra: tváření a plastů      Školní rok: 1987/88

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMELECKÉHO DÍLA, UMELECKÉHO VYKONU)

pro Ivu Hromádkovou  
obor 23 07 - 8 Strojírenská technologie

Vedoucí katedry Vám ve smyslu nařízení vlády ČSSR č. 90/1980 Sb., o státních závěrečných zkouškách a státních rigorózních zkouškách, určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu: Metodika stanovení mezního stavu přetvoření

## Zásady pro vypracování:

- 1) Seznámit se s metodikou experimentálního určení diagramů mezních přetvoření /DMP/
- 2) Zpracovat problematiku určování mezních hodnot přetvoření pro mezní stav daný počátkem lokálního ztenčení.
- 3) Prakticky ověřit vliv gradientu přetvoření a způsobu určování mezních přetvoření na jejich polohu v DMP.
- 4) Získané výsledky zpracovat formou tabulek a grafů.

V 139/89 S

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ  
Ústřední knihovna  
LIBEREC 1, STUDENTSKÁ 5  
PŠČ 461 17

Pos  
- předání - *[signature]*

TP/LPT

Rozsah grafických prací: 40 - 50 stran

Rozsah průvodní zprávy:

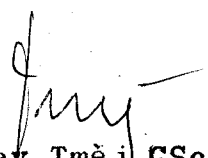
Seznam odborné literatury: SH. METAL IND.:, 1971, č.9

Vedoucí diplomové práce: Ing. Zdeněk Buchar


Datum zadání diplomové práce: 11. 9. 1987

Termín odevzdání diplomové práce: 2. 6. 1989

L.S.

  
Doc. Ing. Jaroslav Tměj, CSc

Vedoucí katedry

  
Prof. Ing. Vladimír Prášil, DrSc

Děkan

v Liberci dne 12. 9. 1987

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně, na základě vlastního sledování a uvedené literatury a pramenů.

V Liberci . . . 16. 1949 . . . . .

*Jar. Hrosová* . . . . .

# O B S A H

Seznam zkratek a symbolů	5
1. Úvod	6
2. Hodnocení tvařitelnosti tenkých plechů	8
2.1 Základní pojmy tvařitelnosti tenkých plechů	8
2.2 Proces plastického přetvoření	10
2.3 Rozbor stavů napjatosti a přetvoření při lisování plechu	13
2.4. Analýza stavu napjatosti a stavu přetvoření metodou deformačních sítí	14
2.5 Diagramy mezních přetvoření	17
2.6 Metody zjišťování křivek mezních přetvoření	19
2.6.1 Některé mechanické zkoušky umožňující modelování mezních stavů ve zkušebních tělesech	20
3. Mezní stav	23
3.1 Vliv různě definovaného mezního stavu na hodnoty mezních přetvoření	23
3.2 Vliv gradientu přetvoření na mezní stav	26
3.3 Přehled některých metod určování mezního přetvoření	32
4. Experimentální část	33
4.1 Volba vhodné metodiky vedoucí ke stanovení DMP	33
4.2 Zkouška vypínáním tvarově upravených zkušebních těles proměnné šíře	33
4.3 Zkušební vzorky	34
4.4 Tažení zkušebních vzorků	35
5. Praktické ověření způsobu určování mezních přetvoření na jejich polohu v DMP	37

5.1 Rozložení gradientu přetvoření	37
5.2 Grafická metoda	45
5.3 Interpolační metoda	48
5.3.1 Volba metody výběru elementů	49
5.4 Rozbor výsledků a diskuse	56
6. Závěr	58
7. Seznam použité literatury	59
8. Přílohy	60

## SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

- osy: 1 - osa rovnoběžná se směrem válcování plechu  
2 - osa kolmá na směr válcování plechu  
3 - osa kolmá na rovinu plechu
- $\varphi_{1,2}$  - hlavní přetvoření ve směru osy 1,2  
 $\sigma_{1,2,3}$  - hlavní napětí ve směru osy 1,2,3  
 $\varphi_i$  - intenzita přetvoření  
 $m_\sigma$  - konstanta charakterizující stav napjatosti  
 $m_\varphi$  - konstanta charakterizující stav přetvoření  
 $\varphi_{1K,2K}$  - mezní hodnota přetvoření ve směru osy 1,2  
 $\varphi_{iK}$  - mezní hodnota intenzity přetvoření  
 $s$  /mm/ - tloušťka plechu  
 $L_0$  /mm/ - původní průměr deformační sítě  
 $L_1, L_2$  /mm/ - rozměr elipsy po vytažení vzorku ve směru 1,2  
 $n$  - počet měření  
 $b$  /mm/ - šířka vzorku  
 $c$  /mm/ - měřítko povrchy vytaženého vzorku ve směru osy 1  
 $n$  - exponent deformačního zpevnění  
 $r$  - normálová anizotropie  
 $s$  - směrodatná odchylka  
 $A, B, M$  - mezní stavy přetvoření  
 $L$  - šířka lokálního ztenčení  
 $P$  - lom  
 $V$  - vrchol vzorku  
DMP - diagram mezních přetvoření  
KMP - křivka mezních přetvoření  
LIP - Lagrangeův interpolační polynom

## 1. Ú V O D

Jedním ze základních předpokladů zvyšování úrovně společnosti je neustálé zvyšování objemu a úrovně materiální výroby. V první polovině osmdesát let je však tato skutečnost ovlivněna progresivním růstem cen energií, surovin a materiálů. V celosvětové ekonomice se tedy jasně ukazuje, že se zásoby surovin ztenčují rychleji než se předpokládalo. Pro československou ekonomiku a především strojírenství z tohoto vývoje vyplývá nutnost klást stále větší důraz na zavádění, zdokonalování a co nejefektivnější využívání produktivních technologií. Zároveň s tím je kladen požadavek na pronikavé snižování surovinových, energetických, materiálových a dalších nároků na strojírenskou výrobu. Z toho vyplývá, že nesporně velký význam má postupná orientace na technologické postupy s menším kovovým výrobním odpadem. Proto tvářecí technologie nabývají v současné době stále většího významu. Je to dáno tím, že odpad materiálu při tváření je minimální a poskytují možnost výroby součástí, které by jinými způsoby byly jen těžko dosažitelné. V neposlední řadě vykazují specifické mechanické vlastnosti tvářenců v důsledku zpevnění.

Tažení tenkých plechů zaujímá mezi těmito technologiemi významné postavení. Je jedním ze základních způsobů zpracování plechů pro celou řadu spotřebních předmětů a v oblasti výroby dopravních prostředků.

Správné ovládání toku materiálu, určení vhodného tvaru polotovaru a znalost mezních stavů, které nesmějí být překročeny - to vše nelze vyřešit jen na základě praktických zkušeností. I když se teoretickým otázkám v oblasti tváření tenkých plechů věnuje velká pozornost, k vysvětlení některých problémů



bude potřeba ještě mnoho výzkumů.

V posledních letech je věnována velká pozornost stanovení přesných kritérií pro optimální využití tenkých plechů. Je tedy nutno věnovat pozornost problematice určování mezních hodnot přetvoření při velkých plastických přetvořeních, především ve vztahu k tažení výlisků nepravidelných tvarů. Překročení určitých mezních hodnot vede k porušení soudržnosti materiálu, což v praktické výrobě přináší značnou zmetkovitost.

V souvislosti s výše uvedenými problémy se jeví velkým přínosem při určování tvářitelnosti tenkých plechů diagramy mezních přetvoření (DMP). Mezní přetvoření v DMP ovlivňuje celá řada faktorů, které vyplývají mimo jiné ze samé technologické podstaty experimentů. Mezi důležité faktory, které mezní přetvoření ovlivňují, patří i GRADIENT PŘETVOŘENÍ A ZPŮSOB URČOVÁNÍ MEZNÍCH PŘETVOŘENÍ. Předložená práce je příspěvkem k řešení výše uvedené problematiky.

## 2. HODNOCENÍ TVAŘITELNOSTI TENKÝCH PLECHŮ

### 2.1 ZÁKLANÍ POJMY TVAŘITELNOSTI TENKÝCH PLECHŮ /1/

Tváření kovů je výrobní postup, který dává kovu požadovaný tvar tím, že tvářecím nástrojem přemísťujeme jeho části převážně tlakem, řidčeji smykem, kroucením a tahem. Tváření kovů je podmíněno jejich tvařitelností. Tvařitelnost kovů je založena na plasticitě, tj. na schopnosti snést určité trvalé přemístění svých částí bez porušení soudržnosti. V této souvislosti se vyskytují pojmy jako deformační schopnost, plasticita a tvařitelnost.

K ujasnění otázek tvařitelnosti kovů jakožto kritéria jejich použitelnosti pro zpracování různými technologickými postupy je nutné tyto pojmy vymežit.

**D e f o r m a č n í s c h o p n o s t** je pojem všeobecný a lze jej definovat tak, že těleso může měnit pod účinkem vnějších sil svůj tvar a rozměry. Je to vlastně definice reálných těles a vztahuje se na celkové, tj. pružné i plastické deformace. Proto pod tímto pojmem je nutno rozeznávat pružnou deformační schopnost, tvárnost a technologickou tvařitelnost.

**P l a s t i č n o s t / t v á r n o s t /** je deformační schopnost, která se vztahuje na plastická, tj. nevratná přetvoření. Chápeme je jako určitý fyzikální stav látky, tedy jako podmíněnou vlastnost, závislou na mnoha faktorech / na chemickém složení, struktuře látky, teplotě, rychlosti deformace a stavu napjatosti/. Je možné je definovat jako schopnost k trvalým změnám tvaru tělesa pod účinkem vnějších sil.

**T e c h n o l o g i c k o u t v a ř i t e l n o s t** je nutno chápat jako způsobilost k velkým plastickým přetvo-

řením bez porušení soudržnosti. V technické praxi se tvařitelnost kovů spojuje s jejich upotřebitelností pro zpracování určitými technologickými tvářecími pochody. Proto je správnější nehovořit obecně o tvařitelnosti kovů, kterou se pak rozumí plastičnost, ale o technologické tvařitelnosti, kterou je nutno chápat podle uvedené definice tak, že se od kovu vyžadují za daných podmínek tvářecího pochodu takové plastické vlastnosti, že snese bez porušení soudržnosti tvarové a rozměrové změny vyvolané specifickými podmínkami technologického tvářecího pochodu. Různé materiály mají různou tvařitelnost při tomtéž zpracování a naopak stejný materiál se jeví různě při různé technologii zpracování. U plošného tváření, jež je charakterizováno lisováním tenkých plechů a které v sobě zahrnuje celou řadu nejrůznějších operací, můžeme technologickou tvařitelnost vyjádřit obecným pojmem **l i s o v a t e l n o s t**.

## 2.2 PROCES PLASTICKÉHO PŘETVOŘENÍ /1/

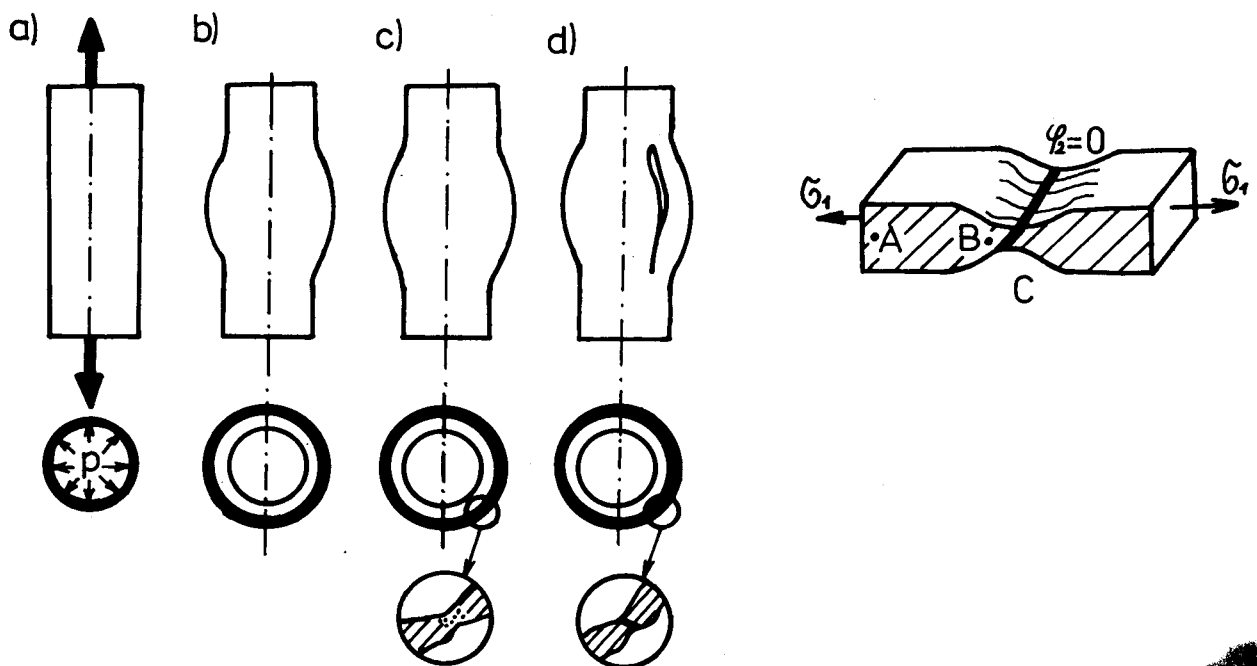
Plasticita je základní vlastnost kovů podmíněna atomovou stavbou. Plastické těleso se po deformaci nevrací do původního stavu, to znamená, že deformace jsou trvalé. Změny přetvárné pevnosti materiálu jsou způsobeny v podstatě dvěma protichůdnými ději. První je zpevňování proti němuž působí odpevňování způsobené růstem a spojováním vnitřních necelistvostí. Jeho velikost je závislá především na poměru působících tlakových a tahových napětí. Průběh přetvárné pevnosti závisí na vlastnostech materiálu, ale i na podmínkách přetvoření.

Proces plastického přetvoření lze charakterizovat na modelu tlustostěnné trubky namáhané vnitřním přetlakem a axiální tahovou silou. Ta je volena tak, aby prodloužení trubky bylo nulové, tedy jedná se o rovinné přetvoření při

Charakteristické fáze procesu plastického přetvoření:

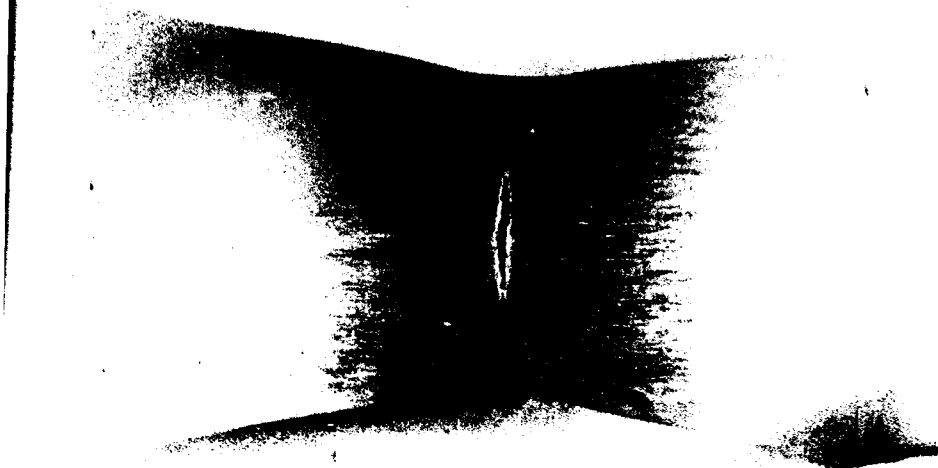
- a) rovnoměrné přetvoření je zabezpečeno intenzivním zpevňováním, jež kompenzuje zmenšující se tloušťku stěny;
- b) vznik vyboulení znamená ztrátu stability trubky a vede k nerovnoměrnému rozlišení přetvoření. Délka vyboulení závisí na průměru trubky, nikoli na tloušťce stěny;
- c) při dalším přetváření na vyboulené části se objeví lokalizované ztenčení, tzv. krček ve směru tloušťky. To znamená zvětšení nerovnoměrnosti rozložení deformace, při čemž šířka krčku závisí na tloušťce plechu. Tento okamžik představuje počátek ztráty stability plechu, viz obr. 1 bod A.
- d) pokračující přetvoření je soustředěno do lokalizované oblasti a vyvolá vznik pásu lokalizovaných smykových deformací ( obr.2), vedoucích napříč tloušťkou plechu, což před-

stavuje ztrátu stability materiálu. Dochází k ní v důsledku ztráty schopnosti materiálu k deformačnímu zpevnění. Tloušťka vrstvy do níž je přetvoření soustředěno nezávisí ani na průměru trubky, ani na tloušťce její stěny (viz. obr. 1 bod B). Přetvoření v této fázi je doprovázeno nekontrolovatelným růstem a spojováním vnitřních dutin, jež ve svých důsledcích vede k porušení soudržnosti materiálu ( obr. 1 bod C).



Obr. 1 : Model zobrazující různé typy ztrát stability. 12.17.13

- a) - rovnoměrné přetvoření
- b) - vznik vyboulení
- c) - vznik lokalizovaného ztenčení
- d) - vznik smykových pásů



Obr. 2 : Lokální ztenčení zkušební vzorku. 11/21

## 2.3 ROZBOR STAVŮ NAPJATOSTI A PŘETVOŘENÍ PŘI LISOVÁNÍ PLECHU / 1, 2, /

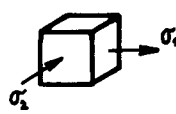
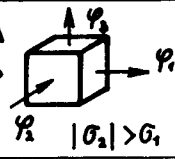
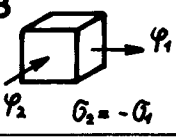
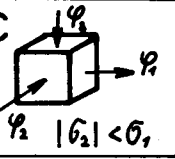
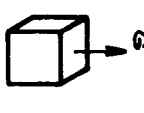
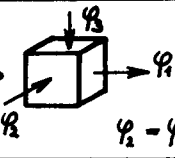
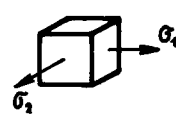
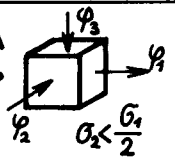
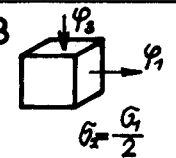
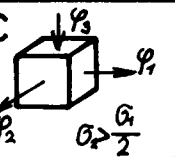
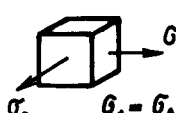
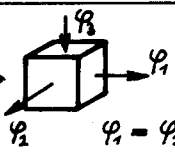
Složitost problematiky přetvoření při lisování spočívá v tom, že na výliscích nepravidelných tvarů se vyskytuje velmi různorodá skladba stavů napjatosti a přetvoření. Stav napjatosti v krychlovém elementu tělesa je obecně určen třemi normálovými a šesti smykovými napjetími. Při vhodně zvolené poloze hlavních os elementu se smyková napjetí navzájem vyruší a stav napjatosti je popsán třemi hlavními napjetími  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  přičemž platí:  $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$

Pomocí tohoto souřadného systému můžeme popsat i přetvoření. Mluvíme o tak zvaných schemech hlavních přetvoření, která velmi názorně ilustrují podmínku stálosti objemu při plastickém přetvoření:

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0 \quad (1)$$

Při tažení výlisků z plechu se obecně uplatňují rovinné stavy napjatosti ( $\sigma_3 = 0$ ) podle obr. 3. Jednotlivým přípádům je možno přiřadit následující oblasti:

- 1) - oblast přidržovače, v omezené míře i okrajové části výlisku mezi tažnými hranami tažníku a tažnice ( tento stav může být nebezpečný z hlediska vzniku vln);
- 2) - okrajové oblasti výlisků, kde se mohou vyskytovat stavy napjatosti blízké jednoosému tahu;
- 3) - na převážné části povrchu výlisku včetně místních prolisů;
- 4) - zvláštní (hraniční) případ stavů napjatosti 3).

	napjatost	přetvoření
1		<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>A <math>\sigma_2 &gt; \sigma_1</math></p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>B <math>\sigma_2 = -\sigma_1</math></p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>C <math>\sigma_2 &lt; -\sigma_1</math></p> </div> </div>
2		 <p><math>\sigma_2 = -\frac{\sigma_1}{2}</math></p>
3		<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>A <math>\sigma_2 &lt; \frac{\sigma_1}{2}</math></p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>B <math>\sigma_2 = \frac{\sigma_1}{2}</math></p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>C <math>\sigma_2 &gt; \frac{\sigma_1}{2}</math></p> </div> </div>
4		 <p><math>\sigma_2 = \sigma_1</math></p>

Obr. 3: Stavy napjatosti, které se vyskytují při tažení výlisků. 12.11.

#### 2. 4 ANALÝZA STAVU NAPJATOSTI A STAVU PŘETVOŘENÍ METODOU DEFORMAČNÍCH SÍTÍ /1/

Ze stálosti objemu při plastických deformacích (viz.kap. 2.3) plyne, že pro určení stavu přetvoření při lisování stačí určit jeho dvě hodnoty v rovině plechu. K tomuto účelu se s výhodou používá metody povrchových deformačních sítí.

Vezměme elementární plošku na povrchu výlisku (obr.4), na kterou působí hlavní normálová napětí, pro něž platí:

$$\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 = 1 : m_f : 0 \quad (2)$$

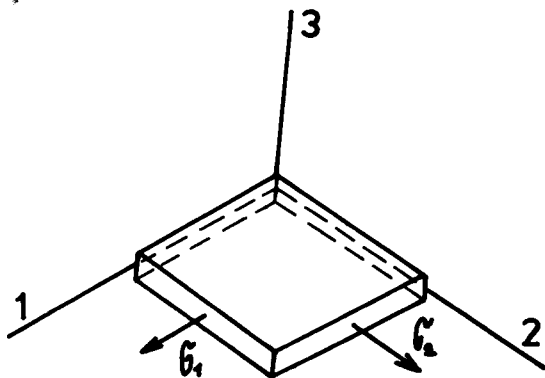
Předpokládejme tedy, že napětí působící ve směru tloušťky plechu  $\sigma_3$  je rovno 0.



Z předešlého vztahu vyplývá, že

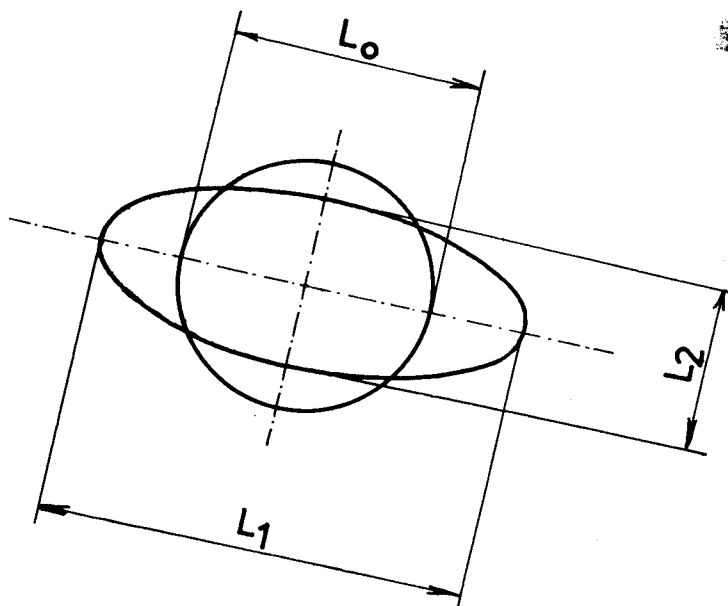
$$m_r = \frac{\tilde{\sigma}_2}{\tilde{\sigma}_1} \quad (3)$$

kde  $m_r$  je veličina charakterizující stav napjatosti.



Obr. 4 Elementární ploška povrchu výlisku

Nyní předpokládejme, že elementární ploška na výtažku představuje základní kruhový element deformační sítě, který se deformuje podle obrázku 5.



Obr. 5 Charakteristické rozměry deformovaného kruhového elementu povrchové deformační sítě

Na základě změny délek hlavních os elementu lze určit hlavní (logaritmická) přetvoření v rovině plechu:

$$\varphi_1 = \ln \frac{L_1}{L_0} \quad (4)$$

$$\varphi_2 = \ln \frac{L_2}{L_0} \quad (5)$$

Současně je třeba si uvědomit, že napětí, která způsobují přetvoření, působí sice pouze v rovině plechu ( $\sigma_3 = 0$ ), avšak k deformaci plechu dochází obecně i ve směru jeho tloušťky. Přetvoření v tomto směru vyplývá ze zákona stálosti objemu, tedy:

$$\varphi_3 = -\varphi_1 - \varphi_2 \quad (6)$$

Na tomto základě je možno provádět nejjednodušší analýzu poměrů při tažení, která spočívá ve zjišťování změn tloušťky plechu v různých místech výtažku, aniž bychom prováděli přímá měření. U rozměrných výtažků by totiž přímé proměřování tloušťky plechu bylo velmi obtížné. Stav přetvoření v daném místě výtažku je tedy možno vyjádřit pomocí hodnot  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  a  $\varphi_3$ , tedy 3 čísla. Chceme-li jej však vyjádřit pouze jedinou hodnotou, musíme zavést tzv. intenzitu přetvoření, která je dána eliptickou rovnicí:

$$\varphi_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varphi_1^2 + \varphi_1 \varphi_2 + \varphi_2^2} \quad (7)$$

Stav napjatosti je možno vyjádřit následujícím způsobem:

$$m_\sigma = \frac{2\varphi_2 + \varphi_1}{2\varphi_1 + \varphi_2} \quad (8)$$

To znamená, že použitím metody deformačních sítí lze poměrně snadno stanovit stav přetvoření a stav napjatosti v libovolném

místě výlisku tím, že určíme hlavní přetvoření  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$ .  
Předcházející vztahy (7) a (8) však vycházejí z těchto předpokladů:

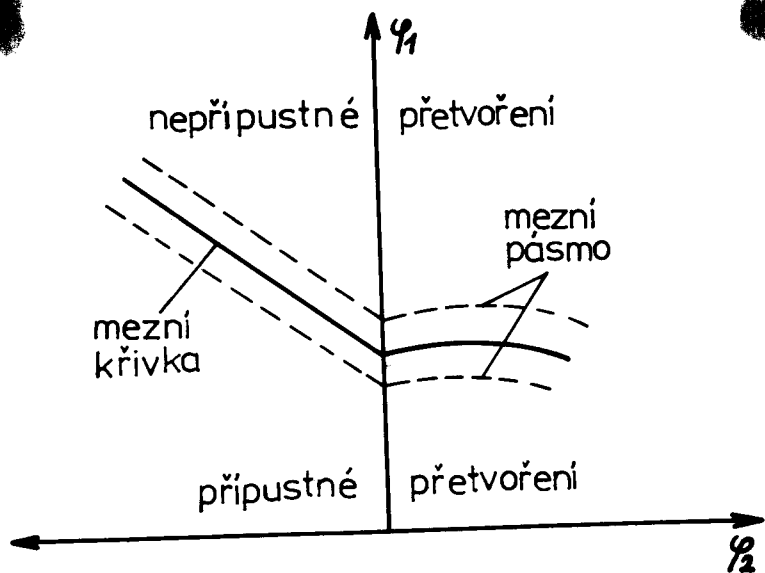
- a) materiál je izotropní, tj. bez směrově rozdílných mechanických vlastností;
- b) v rozmezí elementu je rovnoměrná napjatost, tedy  $m_\varphi = \text{konst.}$   
Výchozí rozměr elementů deformační sítě volíme tak, aby tento předpoklad byl splněn.

## 2. 5 DIAGRAMY MEZNÍCH PŘETVOŘENÍ (DMP) /1/

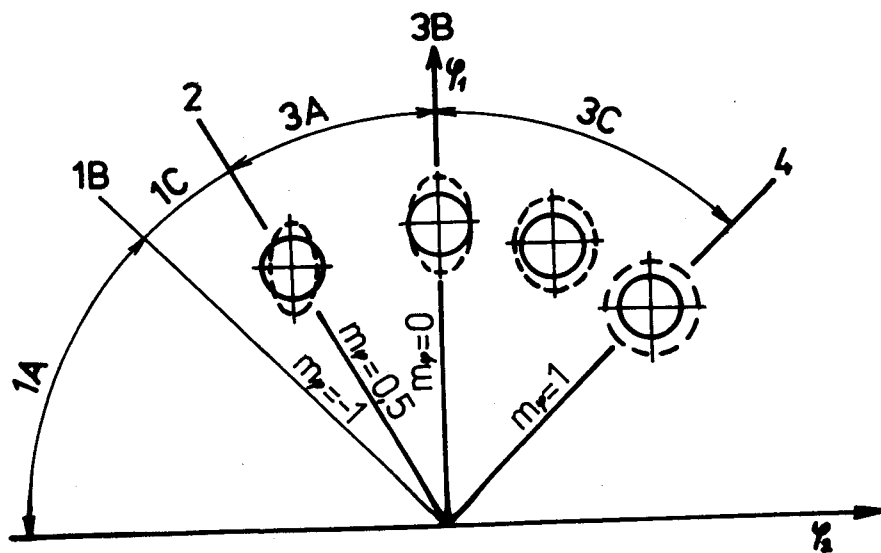
Napjatost u výlisků karosářského typu je velice složitá a v důsledku toho jsou v jednotlivých místech výlisku velmi rozdílná přetvoření. Pro sledování a posouzení těchto rozmanitých stavů přetvoření navrhl Keeler v polovině 60 let tzv. diagram mezních přetvoření (DMP), který lze vyjádřit buďto v souřadnicích "intenzita přetvoření"  $\varphi_k$  v závislosti na "charakteristice stavu napjatosti"  $m_\varphi$ . Tento typ DMP nám ovšem neukáže přímo velikost mezního stavu, proto je výhodnější druhý způsob kreslení DMP, který je v souřadnicích "větší mezní přetvoření"  $\varphi_1$  v závislosti na "menším mezním přetvoření"  $\varphi_2$ . Hodnoty mezních přetvoření  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$ , které určují KMP - křivku mezních přetvoření respektive pásmo mezních přetvoření, se vypočtou dle dříve uvedených vztahů (4) a (5), (viz obr. 6).

Ke vzniku trhlin na výliscích dochází při stavech přetvoření, ohraničených hodnotami  $m_\varphi = -0,5$  (jednoosý tah) a  $m_\varphi = 1$  (rovnoměrné dvojosé vypínání). Tzn., že hledaná KMP bude ležet v sektorech 3A a 3C na obr. 7. Veličina  $m_\varphi$  je charakteristika stavu přetvoření definované dle vztahu (9) a nazývá se ukazatel přetvoření.

$$m_\varphi = \frac{\varphi_2}{\varphi_1} \quad (9)$$



Obr. 6 Diagram mezních přetvoření. Křivka, respektive pásmo zachycující mezní přetvoření pro rozsah stavů napjatosti, které u výlisků mohou nastat. 124-1



Obr. 7 Stavů přetvoření na výliscích charakterizované ukazatelem  $m_y$ . 124-1

Praktické využití DMP tkví v tom, že je možné určit "jak daleko" je stav přetvoření v daném místě výlisku od mezního stavu, který je prakticky představován KMP ( resp. mezním pásmem). Pokud některé z bodů, daných hlavními normálovými přetvořeními na výlisku, leží v blízkosti spodní hranice pásma nebo dokonce v pásmu mezních přetvoření, hrozí v odpovídajícím místě výlisku s příslušnou pravděpodobností nebezpečí vzniku trhliny a tím i vznik neopravitelných zmetků.

## 2. 6 METODY ZJIŠŤOVÁNÍ KŘIVEK MEZNÍCH PŘETVOŘENÍ /6/

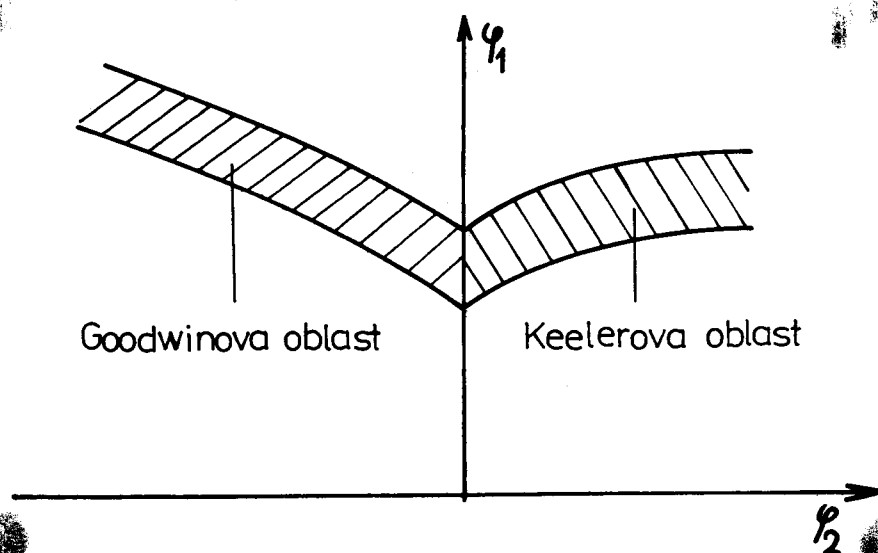
Mezní křivky lze získat:

- 1) zjišťováním mezních hodnot  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$  přímo na výliscích užitím metody deformačních sítí. Tento postup se jeví vzhledem k výrobním podmínkám lisoven jako komplikovaný.
- 2) experimentálně-početní metodou, při níž lze průběh MKP předpovědět teoreticky, pomocí matematických vztahů odvozených na základě teorie plasticity a uvažujících různá kritéria ztráty stability tvářecího procesu. Vlastnosti materiálu jsou v těchto kritériích reprezentovány obvykle parametry  $n$  a  $r$  zjištěnými experimentálně.
- 3) experimentální metodou, která umožňuje sestavení DMP na základě mechanických zkoušek. Zkoušky musí namodelovat mezní stavy napjatosti. Přetvoření  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$  určíme použitím metody deformačních sítí v oblasti lomu zkušebních vzorků. V těchto případech však nezískáme v DMP mezní křivku přetvoření, ale mezní pásmo (viz obr.6), jehož šířka je závislá na přesnosti měření a rozptylu mechanických vlastností plechu.

Hlavní pozornost v této práci je zaměřena na experimentální metody určování KMP.

## 2.6.1 NĚKTERÉ MECHANICKÉ ZKOUŠKY UMOŽŇUJÍCÍ MODELOVÁNÍ MEZNÍCH STAVŮ VE ZKUŠEBNÍCH TĚLESECH

K modelování mezních stavů se používá různých postupů, které se liší složitostí, nároky na zkušební zařízení, tvarem a provedením zkušebních těles a úplností výsledků, které poskytují. Nejvýhodnější je metoda umožňující získat celou oblast DMP (obr. 8).



Obr. 8: Goodwin-Kellerův diagram

Tahová zkouška s tělesy s různými vruby

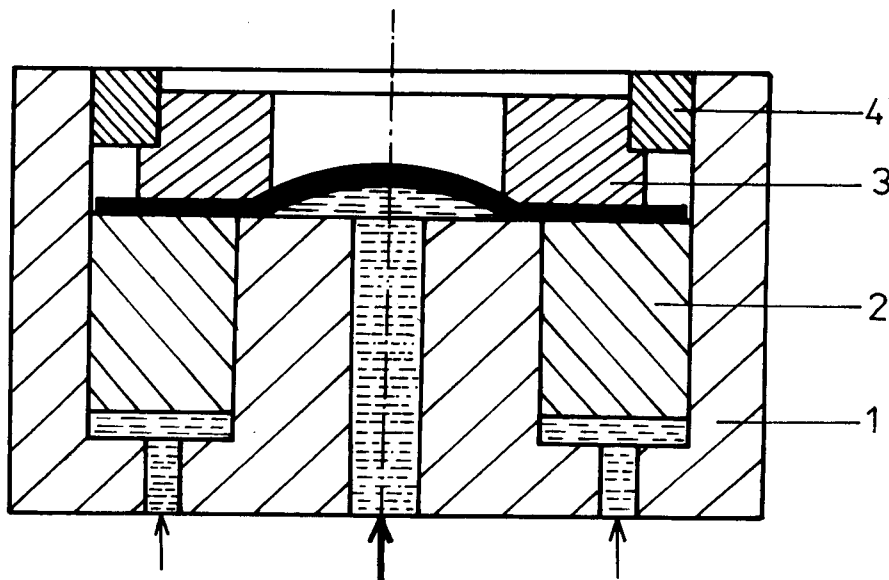
Pro tuto zkoušku se používají tělesa s různými tvary vrubu, které vyvolávají různé stavy napjatosti. Stav přetvoření je závislý na poloměru vrubu a jeho šířce (obr.8). Při tomto postupu se neprojevuje vliv tření.

Obr. 8: Zkušební těleso pro zkoušku tahem. | Lit |

Nevýhodou zkoušky je možnost sestavení pouze Goodwinovy oblasti mezního pásma ( $-\gamma_2$ ).

Z k o u š k a h y d r a u l i c k ý m h l o u b e n í m

Podstatou zkoušky je tažení plechu v tažnici do volného prostoru působením hydrostatického tlaku. Zkouška se provádí pomocí hydraulického vypínacího přípravku s výměnými tažnicemi různých tvarů ( obr.9).



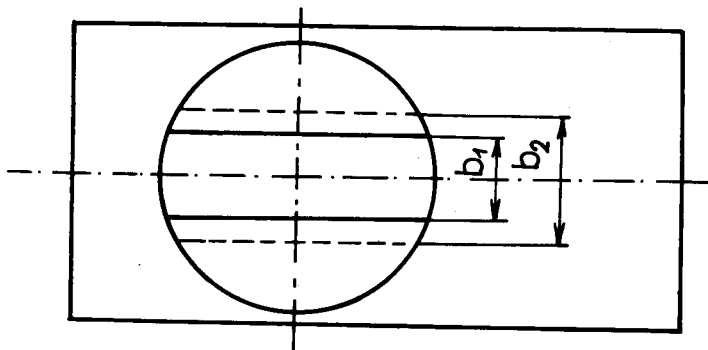
Obr. 9: Princip zkoušky hydraulickým hloubením

- 1 - těleso
- 2 - přídržovač
- 3 - tažnice
- 4 - upínací kroužek

Nevýhodou tohoto způsobu tažení je, že zahrnuje jen Keelerovu oblast mezního pásma ( $+\gamma_2$ ), a je náročný na nástrojové vybavení.

Z k o u š k a v y p í n á n í m p l e c h o v ý c h  
p á s k ů p o l o k u l o v í t ý m t a ž n í k e m

Na tuto zkoušku jsou použity plechové pásy o různých šířkách a plného kruhového nástřihu pro modelování různých stavů napjatosti ( obr. 10). Pásy jsou taženy polokulovitým tažníkem až do vzniku trhliny.



Obr. 10 : Tvary zkušebních těles pro zkoušku vypínáním plechových pásků.

Výhodou této metody je získání celého Goodwin-Keelerova pásma ( $-\varphi_2, +\varphi_2$ ), tedy sestavení celého DMP. Nevýhodou je časté vznikání trhlin mimo tvar tažníku, a to hlavně poblíž tažné hrany.

Z k o u š k a v y p í n á n í m t v a r o v ě u p r a v e -  
n ý c h z k u š e b n í c h t ě l e s p r o m ě n n ě  
š í ř e

Oboustranné vybrání těles odstraňuje nedostatek předchozí metody. Přetvoření  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$  se mění v širokém rozsahu, proto je tato zkouška velmi vhodná pro sestavení celého DMP.

Podrobnější popis této metody je v kap. 4. 2.

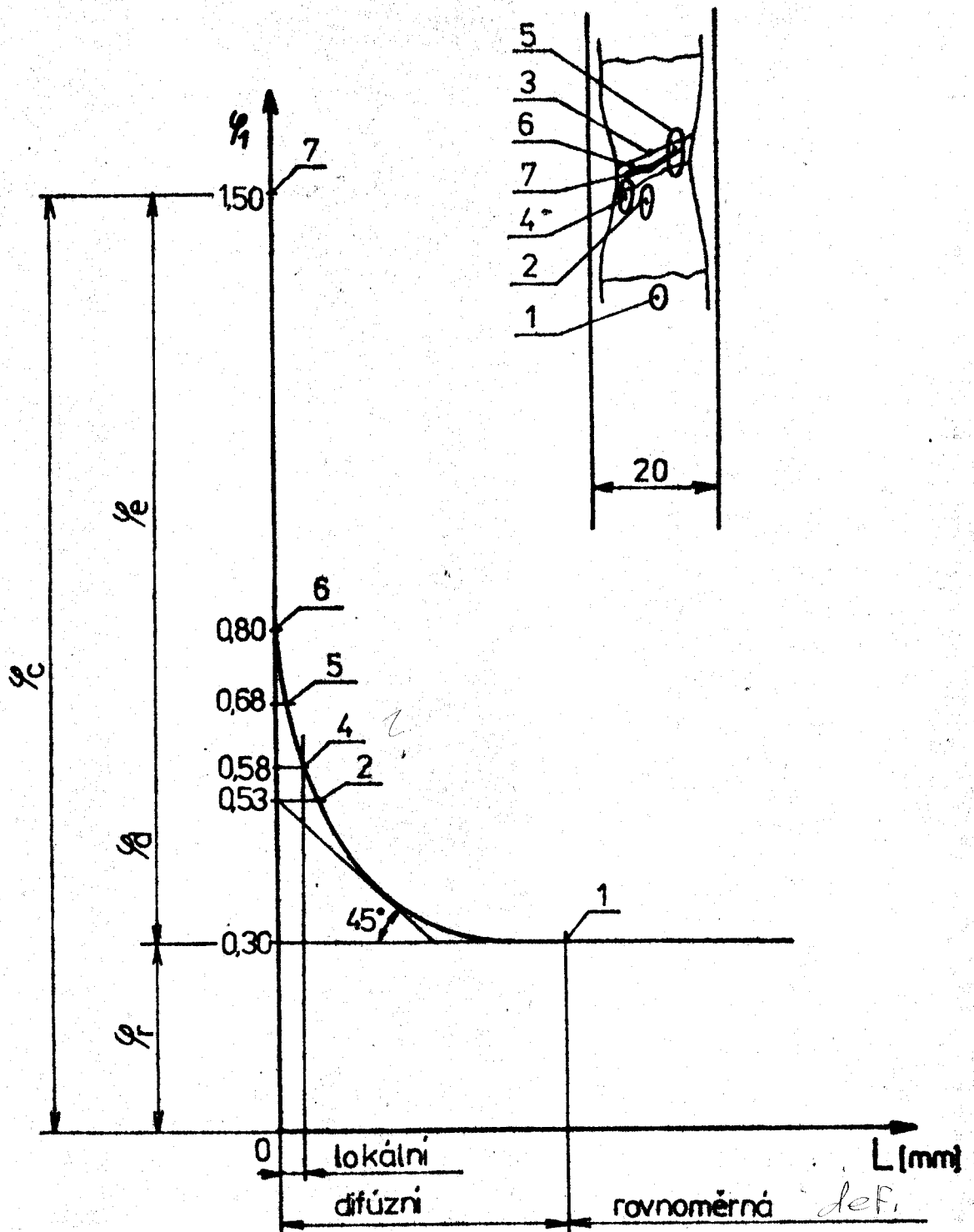


### 3. MEZNÍ STAV

#### 3.1 VLIV RŮZNĚ DEFINOVANÉHO MEZNÍHO STAVU NA HODNOTY MEZNÍCH PŘETVOŘENÍ / 1,8 /

Pro názornou představu vlivu uvažovaného mezního stavu na hodnoty mezních přetvoření byl vytvořen "model", který tuto skutečnost znázorňuje. "Model" představuje zkušební vzorek šířky 20 mm, který byl podroben zkoušce tahem až do vzniku trhliny. Na tomto "modelu" lze rozlišit 7 různých mezních stavů ( viz obr. 11). Na obr. 11 představuje pozice:

- 1 - elipsu, která leží v oblasti rovnoměrného rozložení deformace a mezní stav je pak definován pro hodnotu přetvoření odpovídající dosažené meze pevnosti materiálu;
- 2 - elipsu v oblasti difúzního ztenčení, tzv. oblast kvazi-stabilního plastického toku materiálu;
- 3 - teoretickou definici mezního stavu pro experimentální vyhodnocení, při čemž mezní stav je dán hodnotou přetvoření v oblasti bezprostředně přiléhající k zóně lokálního ztenčení (toto přetvoření nelze prakticky zjistit);
- 4 - elipsu, která je částečně zasažena lokálním ztenčením; tato definice mezního stavu je v praxi nejrozšířenější a je současně nejbližší teoretické definici;
- 5 - elipsu, která je plně zasažena lokálním ztenčením a začíná se již objevovat trhlina ( toto mezní přetvoření již není prakticky využitelné);
- 6 - přetvoření aproximované do místa lomu z průběhu gradientu přetvoření;
- 7 - přetvoření zjištěné z měření tloušťky plechu v místě lomu ( tuto definici mezního stavu uvažuje Ghosh).



Obr. 11: "Model" znázorňující vliv definice mezního stavu na hodnoty mezního přetvoření.

Jestliže jednotlivým mezním stavům daných přetvoření 1 - 7 přiřadíme hodnoty odlehlosti získáme diagram průběhu gradientu přetvoření, který je rovněž znázorněn na obr.11. Tyto orientační hodnoty přetvoření jsou postačující pro názorné porovnání vlivu mezního stavu. Z tohoto diagramu je zřejmé, že celkové přetvoření, které je materiál schopen snést, lze vyjádřit jako

$$\varphi_c = \varphi_r + \varphi_d + \varphi_e \quad (10)$$

přičemž prakticky využitelná jsou pouze přetvoření v oblasti rovnoměrné deformace a difúzního ztenčení. Dále je z obr.11 vidět prudký nárůst gradientu přetvoření v oblasti lokálního ztenčení, zvláště v místě vznikajícího lomu. Je tedy nutné jednoznačně definovat mezní stav přetvoření a způsob jeho určování, neboť to jsou faktory silně ovlivňující polohu a tvar KMP.

Z těchto různě definovaných mezních stavů je nejlépe využitelné přetvoření realizované do okamžiku vzniku lokálního ztenčení. Pak se přetvoření lokalizuje pouze do úzkého krčku, kdy za stavu rovinného přetvoření dochází k prodloužení na úkor tloušťky plechu. V okolí krčku k přetvoření prakticky nedochází. Z těchto důvodů je obecně přijato za **m e z n í** **p ř e t v o ř e n í** to, které je dosaženo v okamžiku **v z n i -**  
**k u l o k á l n í h o z t e n ě n í .**

### 3. 2 Vliv gradientu přetvoření na mezní stav /3/

Z mnoha dosud publikovaných a dosažitelných prací vyplývá, že různými metodami sestrojování DMP se získají i různé KMP. To plyne z toho, že na mezní stavy, které tvoří KMP má vliv celá řada různých faktorů. Ty lze rozdělit do dvou skupin:

#### 1. Vlivy plynoucí z materiálu výtažku:

- a) chemické složení
- b) mikrostruktura plechu
- c) koeficient normálové anizotropie
- d) drsnost povrchu plechu
- e) plošná anizotropie materiálových vlastností
- f) exponent deformačního zpevnění
- g) geometrický tvar

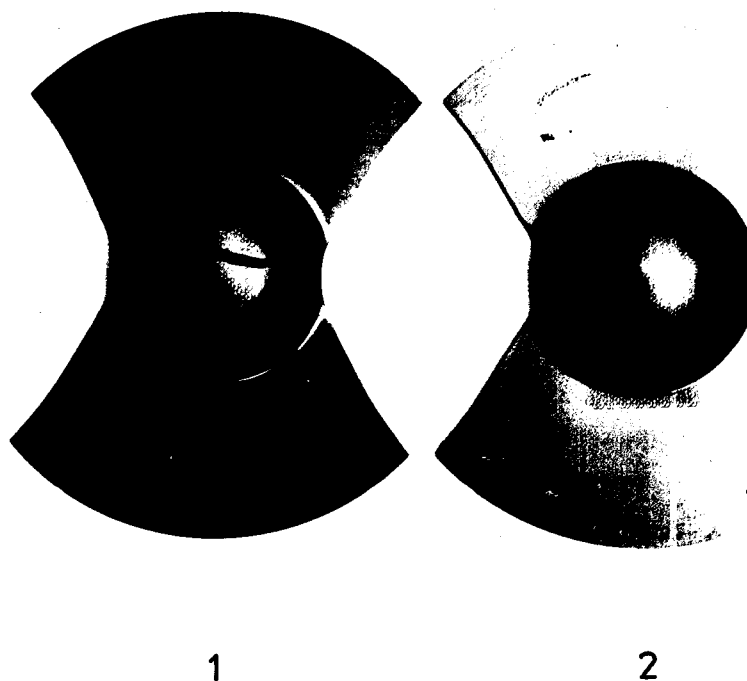
#### 2. Vlivy dané vlastní experimentální metodou:

- a) tření
- b) rychlost přetvoření
- c) gradient přetvoření
- d) historie přetvoření
- e) velikost výchozího parametru deformační sítě
- f) definice mezního stavu
- g) výběr mezního elementu

Jak je z přehledu patrné, tak jedním z vlivů na mezní stav přetvoření a tím na polohu a tvar KMP je gradient přetvoření, což je vlastně rozložení přetvoření od lomu k okraji vzorku. Lze ho graficky znázornit v souřadnicích přetvoření  $\varphi$  v závislosti na vzdálenosti od středu zkušebního tělesa - c. Čím je gradient strmější, tím hůře se stanoví mezní přetvoření.

Stačí malá odchylka vzdálenosti a mezní stav určíme zcela nesprávně. Na obr. 12 je zobrazen gradient přetvoření získaný zkouškou vypínáním nástřihů s použitím sférického tažníku. Je velmi strmý. Naproti tomu je na obr. 13 gradient přetvoření získaný hydraulickou zkouškou. Tento je mnohem pozvolnější a jeho rozložení je naprosto odlišné. Zde je tedy odečítání mezního stavu jednodušší a přesnější než u předchozího případu. Z těchto dvou příkladů je zřejmé, že na gradient přetvoření má vliv tření, tedy mazání resp. nemazání vzorků.

Při tažení je nemazaný plech v kulovité oblasti zbržděn, a tedy se táhne na rozhraní kulovité a kuželovité části vytažku. Z toho také vyplývá, že tyto vzorky budou na rozdíl od mazaných plechů praskat mimo vrchol vytaženého plechu, (Obr.14).



Obr. 14: Srovnání vytaženého mazaného a nemazaného vzorku

1 - mazaný vzorek

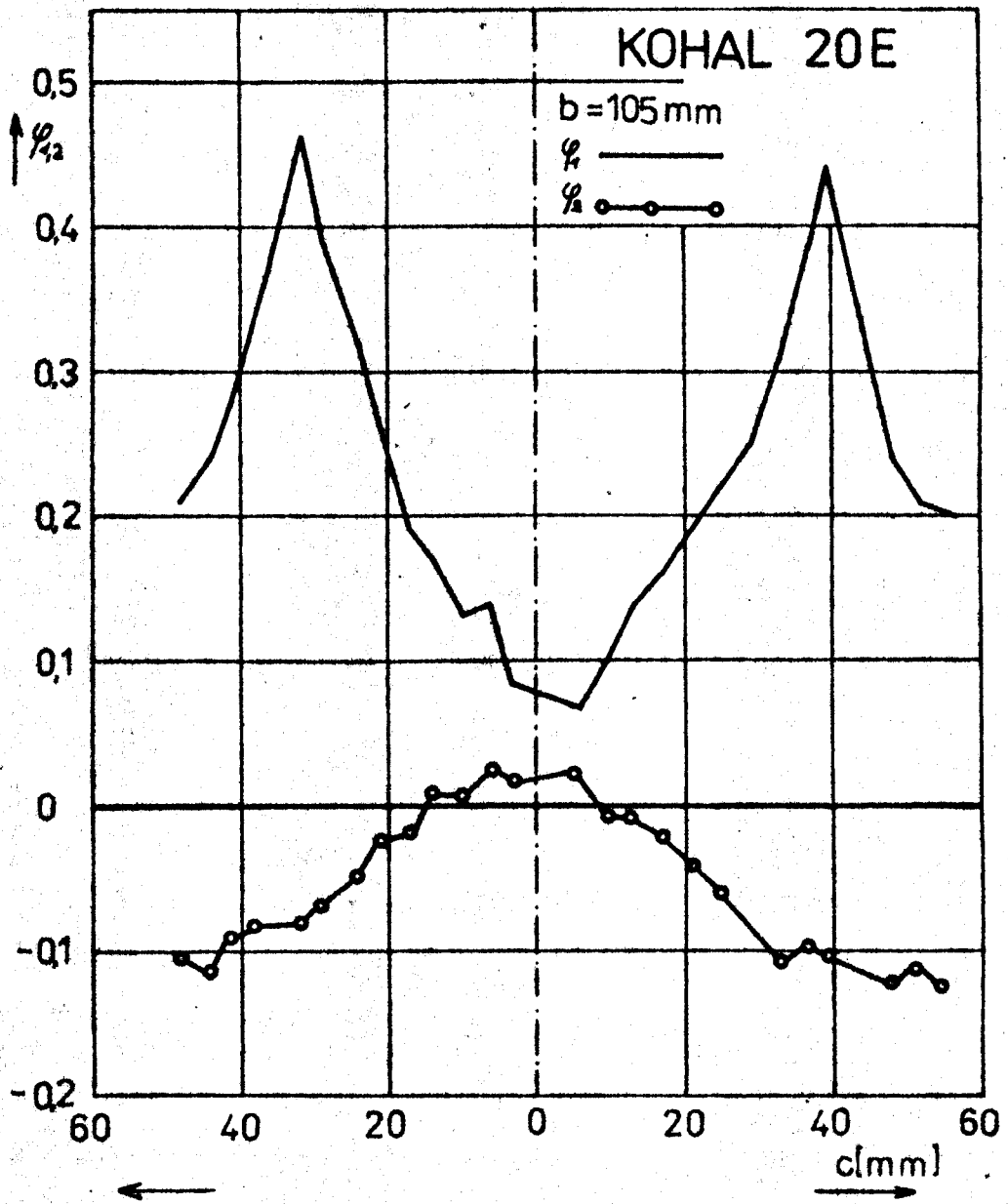
2 - nemazaný vzorek

Z DMP není možné určit v kterých místech vznikne trhli-  
na v tvářenci. Z těchto důvodů byly sestaveny diagramy gra-  
dientu přetvoření, tedy závislost  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$ , naměřené ve směru  
působení hlavního normálního napětí  $\sigma_1$ , na vzdálenosti od vr-  
cholu výtažku - c. Na obr. 21, 22, 23, 24, je vidět rozdílné  
rozložení gradientů přetvoření mazaných a nemazaných vzorků  
( viz.kap. 5.1).

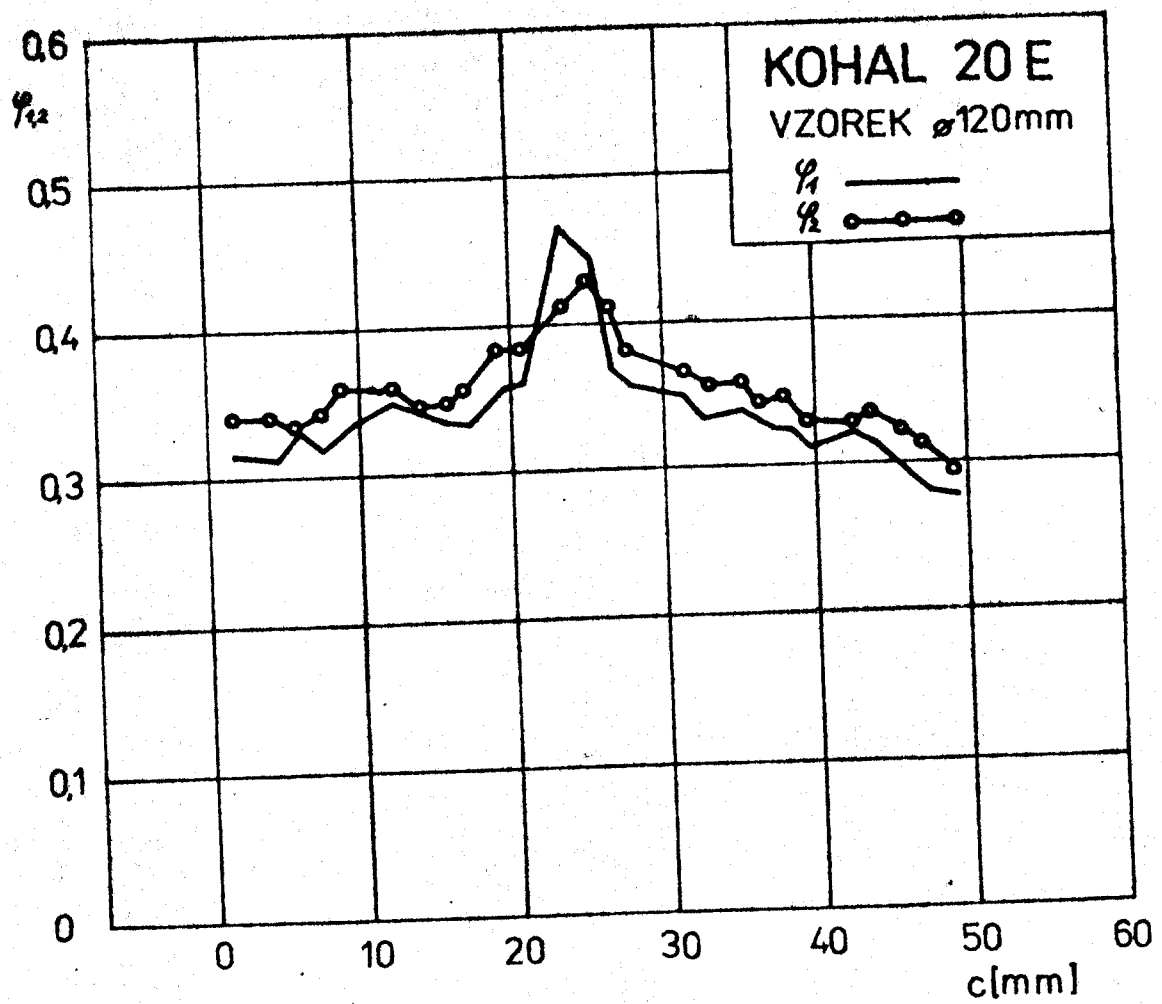
Na obr. 15 jsou KMP v DMP získané z experimentální části  
předložené práce ( kap.4) a z výsledků jiných autorů zabýva-  
jících se problematikou mazaných vzorků. Z tohoto diagramu  
plyne, že hodnoty mezních přetvoření nemazaných vzorků ( při  
vlivu tření) se posouvají v pravé větvi výše k hodnotám  $\varphi_1$  a  
v levé větvi naopak k nižším hodnotám. Toto však není zcela  
směrodatné určení, protože šířky  $b$  u nemazaných vzorků nena-  
bývají takové hodnoty  $\varphi_2$  jako u vzorků mazaných z důvodu vel-  
mi malého tažení nemazaných vzorků na vrcholu vzorku. V DMP  
je tento jev znázorněn posunutím deformačních stop např. u  
šířek  $b = 30\text{mm}$ ,  $b = 105\text{mm}$ ,  $b = 210\text{mm}$ .

Z důvodu naprosto rozdílného rozložení gradientu přetvo-  
ření na vzorcích mazaných a nemazaných bude vliv způsobu určo-  
vání mezních přetvoření na jejich polohu v DMP posuzován pouze  
na nemazaných vzorcích.

Porovnání rozložení gradientů přetvoření odpovídající  
různým hloubkám tažení vzorků mazaných a nemazaných je v pří-  
loze č.1.



Obr. 12: Gradient přetvoření získaný zkouškou vypínáním nástřihů s použitím sférického tažníku



Obr. 13: Gradient přetvoření získaný hydraulickou zkouškou



### 3. 3 PŘEHLED NĚKTERÝCH METOD URČOVÁNÍ MEZNÍHO PŘETVOŘENÍ / 1,4/

Všechny experimentální metody jsou založeny na navození mezního stavu ve zkušebních tělesech. Je nutné vycházet ze skutečnosti, že vzhledem k původnímu využití DMP v návaznosti na analýzu přetvoření, je nutno používat deformační sítě a to i v určování mezních přetvoření. Základní podmínkou pro určení mezního přetvoření je počátek vzniku lomu v oblasti lokálního ztenčení. Metody určování mezního přetvoření:

1) Mezní přetvoření určené z jednoho mezního elementu. Je nutné použít element v místě prvního vzniku lomu. Za mezní element je považovaná elipsa, která těsně sousedí s místem porušení a je zasažena lokálním ztenčením. Mezní přetvoření  $\varphi_{1K}$  a  $\varphi_{2K}$  jsou vypočtena dle vztahů (4) a (5).

Tato metoda vychází pouze z jednoho - mezního elementu.

Neuvažuje rozložení přetvoření vykazující různě velký gradient přetvoření. Tento faktor uvažují Veermanovy metody, určené zejména pro stanovení mezního přetvoření  $\varphi_{1K}$  :

2) Grafická metoda

3) Interpolační metoda

Jejich bližší popis je v kapitole 5.2 a 5.3.

#### 4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

##### 4.1 VOLBA VHODNÉ METODIKY VEDOUCÍ KE STANOVENÍ DMP /1,6/

Cílem této práce je prakticky ověřit vliv gradientu přetvoření a způsobu určování mezních přetvoření na jejich polohu v DMP. Je tedy nutné z faktorů ovlivňujících KMP vybrat takový faktor u kterého je jednoznačně zřejmý vliv gradientu přetvoření na polohu mezního přetvoření v DMP. Dále je nutné zvolit metodu, která vede při co nejjednodušším provedení k co nejúplnějším výsledkům a která pokryje celý rozsah stavů napjatosti, jež mohou na výliscích nepravidelných tvarů vznikat (obr. 7). Metodiku je rovněž nutno přizpůsobit zkušebnímu zařízení a laboratornímu vybavení, které je na VŠST k dispozici. Zkoušky byly prováděny na mechanickém lisu LU - 160/630 univerzálním tažným nástrojem. Pro přípravu zkušebních těles byl k dispozici výstředníkový lis LENP 40 a jeden střižní nástroj umožňující stříhat kruhové nástřihy o průměru 210mm. Pro nanášení deformační sítě na zkušební tělesa byla použita fotografická metoda kombinovaná s elektrochemickým leptáním. Vybrán byl kruhový element sítě s vysokou těsností uspořádání elementů. Zkušební tělesa byla vyrobena z ocelového hlubokotažného plechu KOHAL 20 EXTRA.

##### 4.2 ZKOUŠKA VYPÍNÁNÍM TVAROVĚ UPRAVENÝCH ZKUŠEBNÍCH TĚLES PROMĚNNÉ ŠÍŘE /1,6/

Tato zkouška byla vybrána s přihlédnutím k možnostem zařízení na KTP. Metoda je náročná na nástrojové vybavení a na přípravu vzorků (např. nanášení deformačních sítí). Vzorků je potřeba velké množství a to tedy vyžaduje i poměrně značný počet střižných nástrojů. Na KTP byl navržen značně jednodušší

postup přípravy zkušebních těles. Vybrání na vzorcích má stejný poloměr ( $R = 105\text{mm}$ ). Je tak možno štříhat zkušební tělesa na stejném nástroji jako výchozí kruhové nástřihy, které mají průměr  $210\text{mm}$ . K celé přípravě všech vzorků tedy stačí jediný střižný nástroj. Různé šířky vzorků mají za následek vznik různých stavů napjatosti. Mezní stavy přetvoření, získané tímto způsobem, pokryjí celý rozsah přetvoření která se vyskytují na výliscích obecného tvaru.

#### 4.3 ZKUŠEBNÍ VZORKY

Jako zkušební tělesa byly navrženy kruhové nástřihy průměru  $D = 210\text{mm}$  s oboustrannými kruhovými vybráními o poloměru  $R = \frac{D}{2} = 105\text{mm}$ . Z toho vyplývá, že všechna zkušební tělesa mají konstantní poloměr vybrání, ale různou šířku ve střední části zkušebního vzorku. Tím jsme namodelovali různé stavy a tím i různé stavy mezního přetvoření. Pro sestavení DMP, který pokrývá celý rozsah přetvoření vyskytující se na výliscích obecného tvaru, bylo zvoleno 12 šířek zkušebních těles (viz. tabulka č.1).

č.	1	2	3	4	5	6
b /mm/	30	45	60	75	90	105
č.	7	8	9	10	11	12
b /mm/	120	140	150	160	170	210

Tab. 1

Takto upravené nástřihy jsou připravené k tažení.

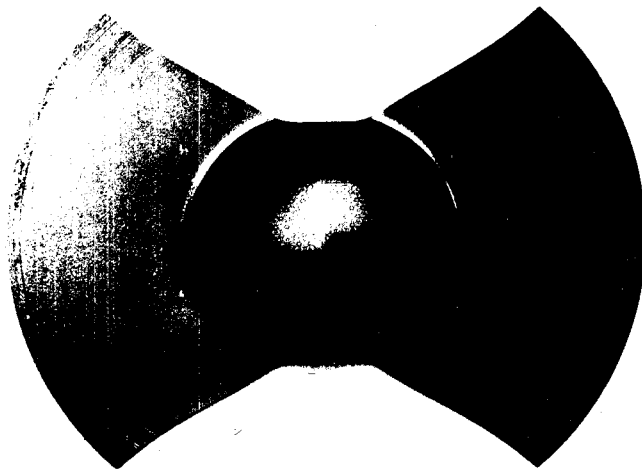
#### 4.4 TAŽENÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ /1,6/

Vlastní tažení vzorků bylo prováděno na hydraulickém lisu LU - 160. Zkušební tělesa byla tažena v nástroji spokulovitým tažníkem. Tažnice měla otvor o průměru 90mm. Vzorky byly pevně sevřeny přidržovačem pomocí tří šroubů. U každé šířky  $b$  byla hloubka tažení jiná. Určena byla podle dosažené okamžiku ztráty stability procesu plastického přetvoření individuálně u každé šířky. Za ten byl považován vznik lokálního ztenčení, přesněji okamžik vzniku první trhliny (obr.16).

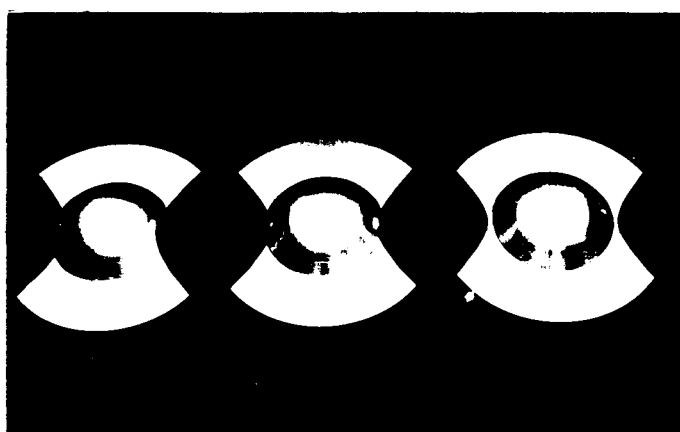
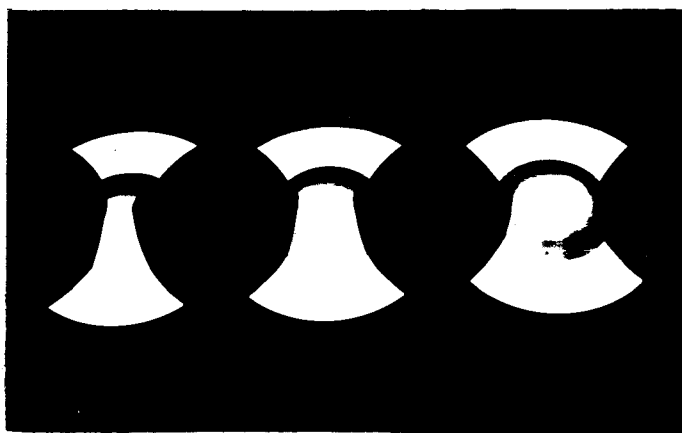


LBA 300 ?  
0

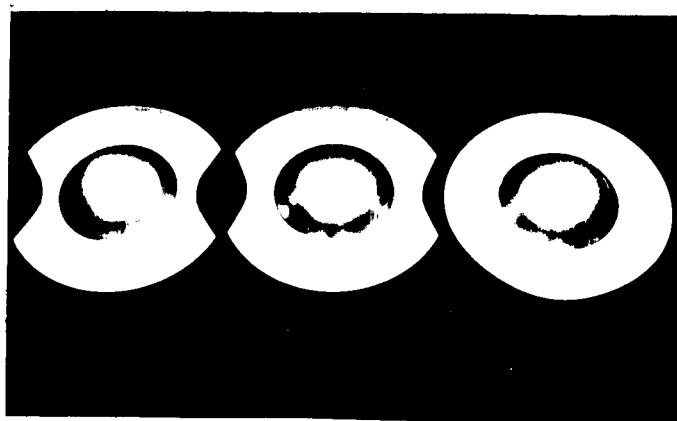
Obr. 16 : Pohled do otevřeného nástroje těsně před vyjmutím deformovaného vzorku na jehož vrcholu je začínající trhlina.



Obr.17 : Vytažený vzorek s trhlinami.



0132 3003



Obr. 18 : Vytažené zkušební vzorky o různých šířkách  $b$  .

## 5. PRAKTICKÉ OVĚŘENÍ ZPŮSOBU URČOVÁNÍ MEZNÍCH PŘETVOŘENÍ NA JEJICH POLOHU V DMP

### 5.1 ROZLOŽENÍ GRADIENTU PŘETVOŘENÍ

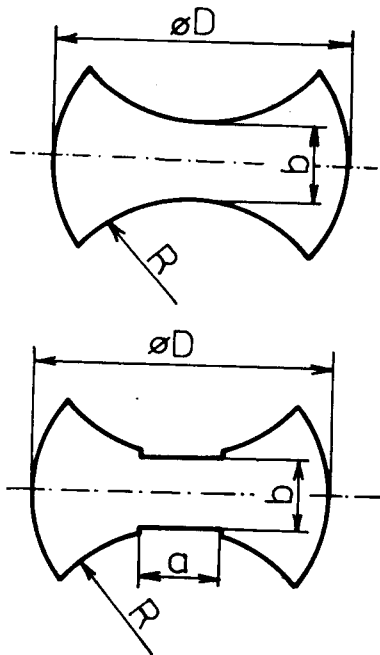
Z důvodu posouzení vlivů gradientu přetvoření a způsobu určování mezních přetvoření na jejich polohu v DMP byly porovnány metody zjišťování mezních přetvoření z rozvoje přetvoření a z jednoho mezního elementu. Pro určení mezního stavu z rozvoje přetvoření je nutno znát rozložení gradientu přetvoření na vzorku.

Na obr. 19 je vzorek šířky  $b = 30\text{mm}$ , na kterém je znázorněn výběr a označení elementů na nichž byl proměřován gradient přetvoření. Označení jednotlivých elementů bylo provedeno po vytažení vzorků. Číslem 1 byly označeny elementy nejbližší k vrcholu vzorku s následným označením zbývajících elementů. Vzdáleností  $g$  se rozumí vzdálenost elementu od středu vzorku v podélném směru. Vynesením přetvoření  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$  v závislosti na  $g$  byl získán diagram gradientu přetvoření. Příklady rozložení gradientů přetvoření šířek  $b = 30\text{mm}$ ,  $b = 75\text{mm}$ ,  $b = 105\text{mm}$ ,  $b = 210\text{mm}$  jsou na obr. 21, 22, 23, 24.

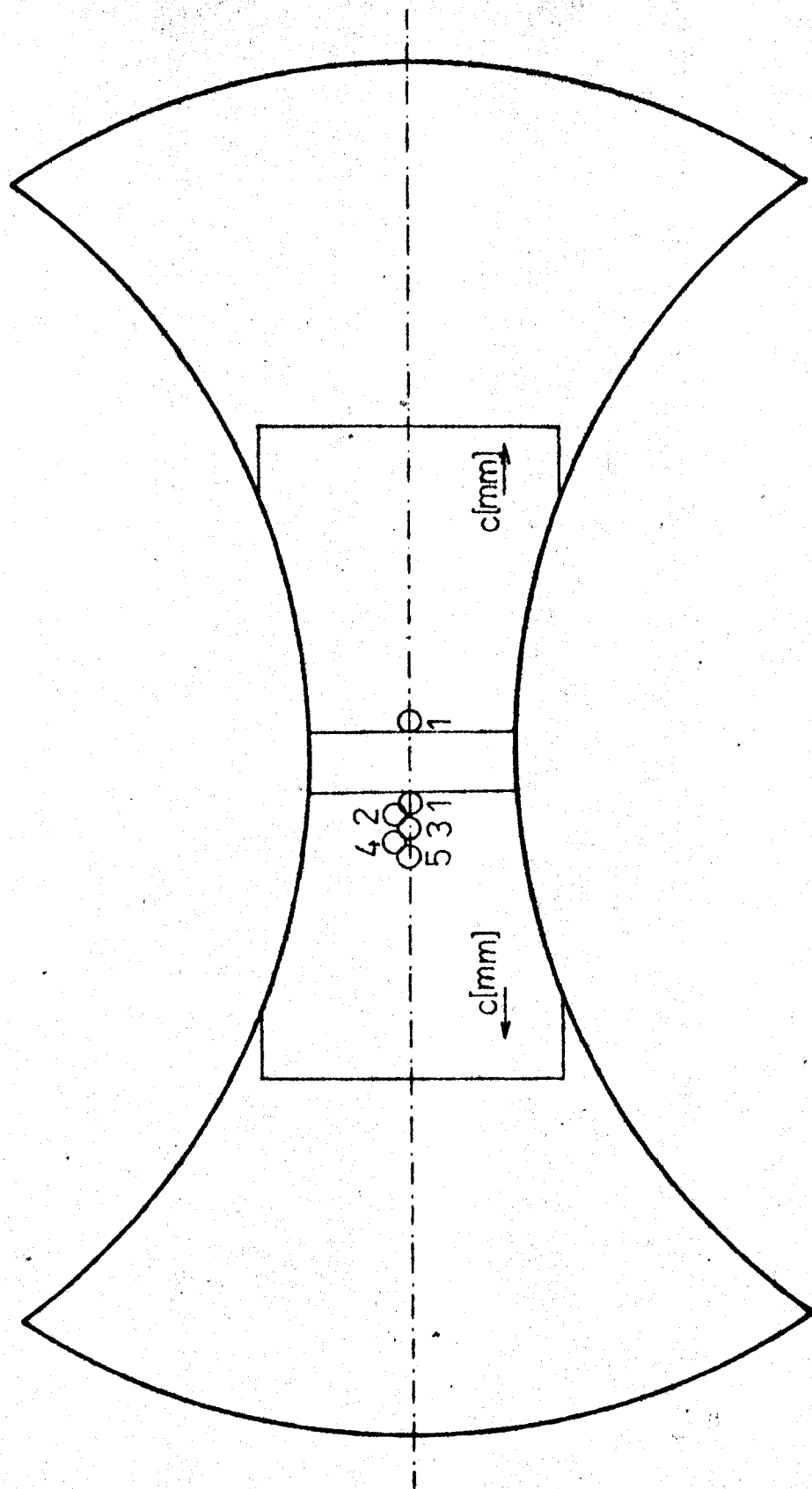
Z důvodu působením velké síly od tažníku a velké třecí síly mezi tažníkem a zkušebním vzorkem na vrcholu vrchlíku u šířky  $b = 30\text{mm}$  vzniká lokální ztenčení (případně lom) ve středu dutiny či velmi blízko něho. Proto je u této šířky provedena tvarová úprava nástřihu frézováním na nástřih s prizmaticky rozšířenou oblastí  $h$  (viz. obr. 25). Tím se zmenší síly působící na vrcholu dutiny, zmírní se gradient přetvoření a trhliny vzniknou dále od středu vrchlíku. Charakter průběhu přetvoření je tedy obdobný jako u dalších šířek zkušebních

vzorků používaných u této metody.

Průběh gradientu přetvoření u šířky  $b = 30\text{mm}$  u vzorků před úpravou frézováním a po úpravě frézováním je na obr.20.

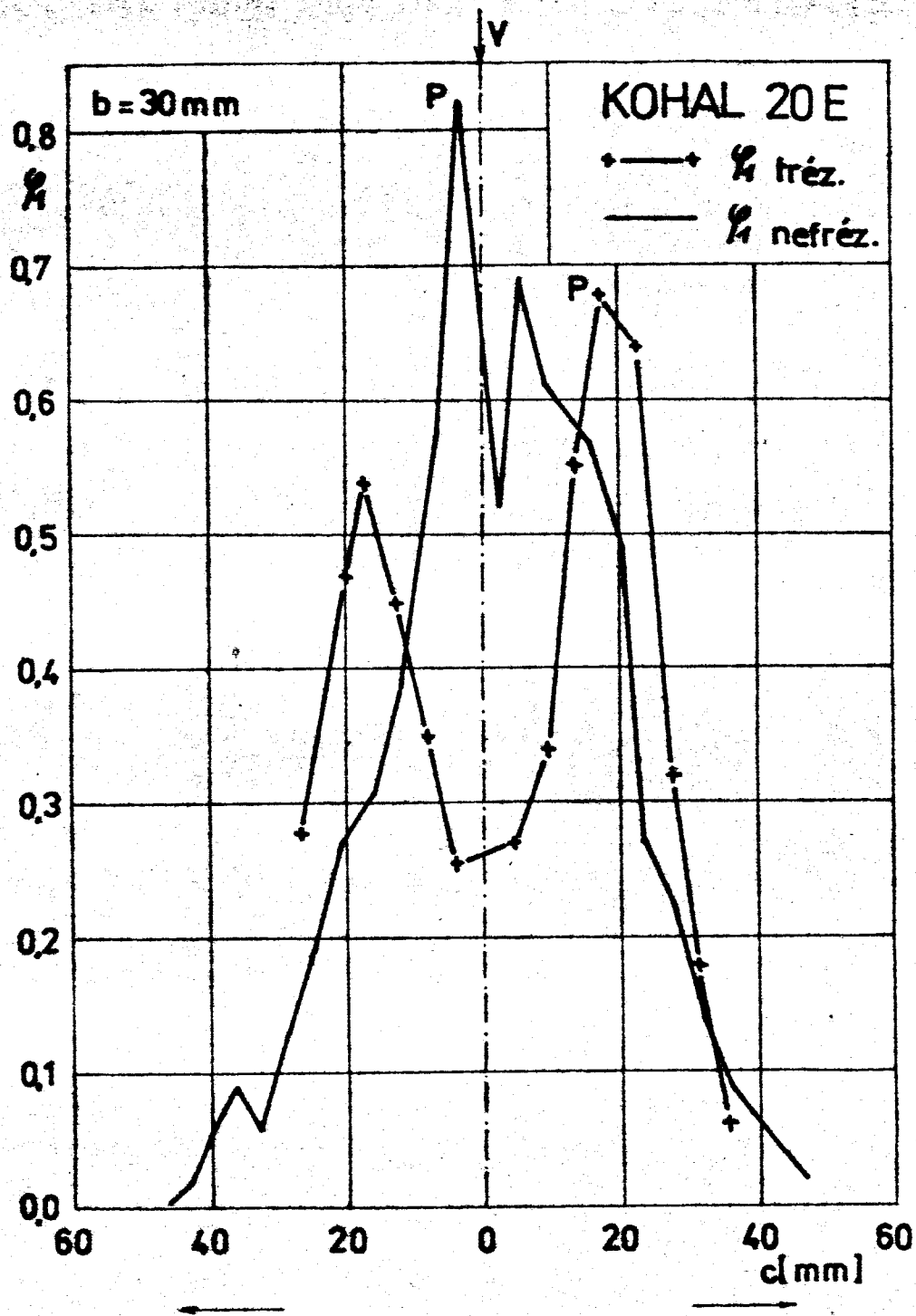


Obr. 25 : Tvarová úprava vzorků šířky  $b = 30\text{mm}$  frézováním.



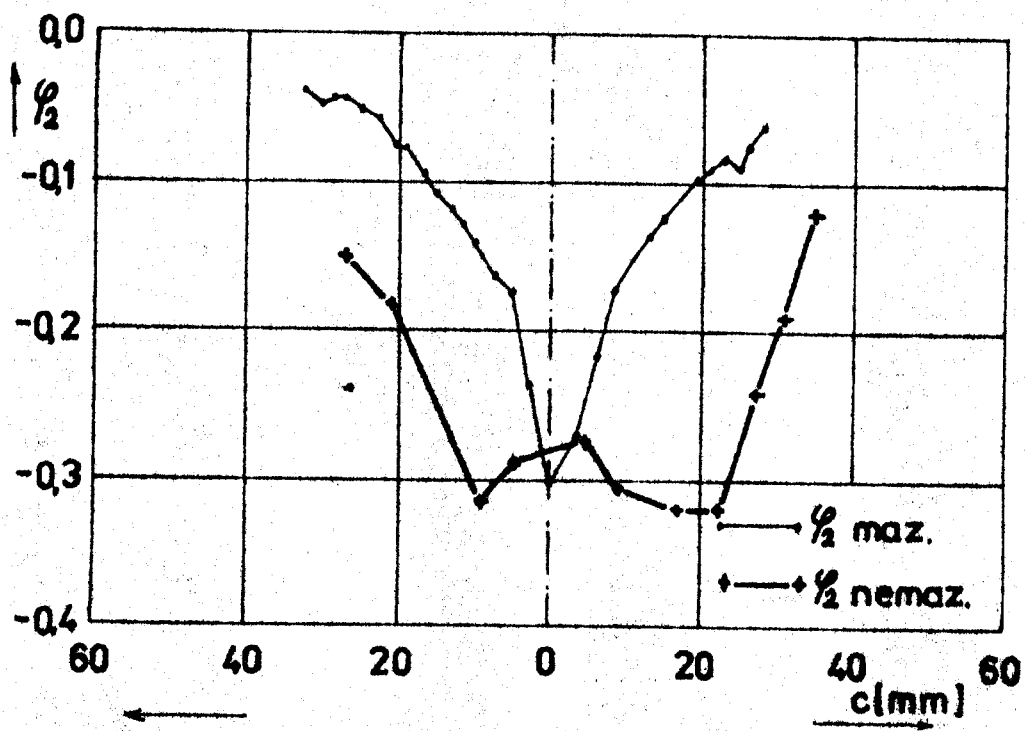
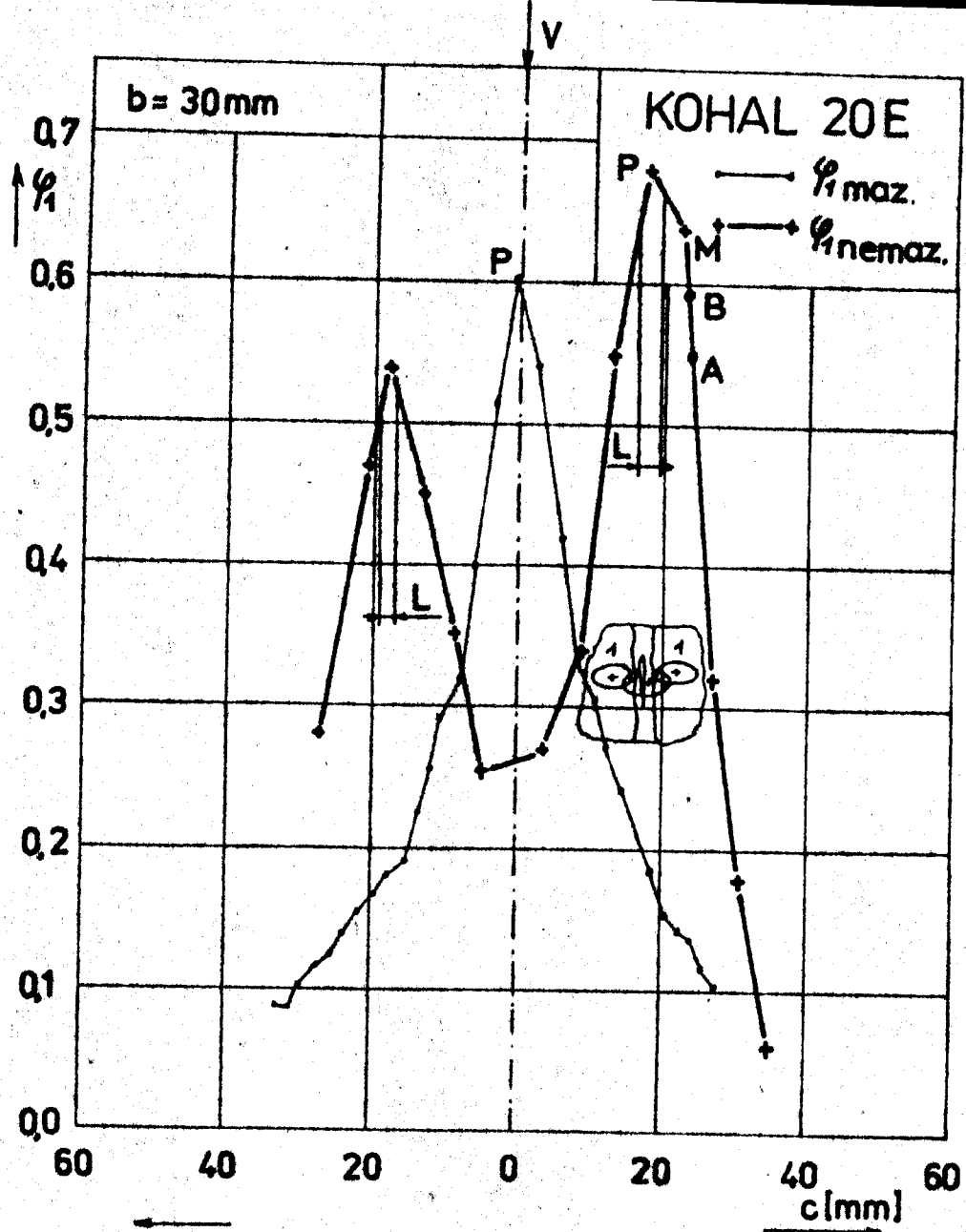
Obr. 19: Výběr a označení elementů povrchové deformační sítě pro proměření gradientu přetvoření



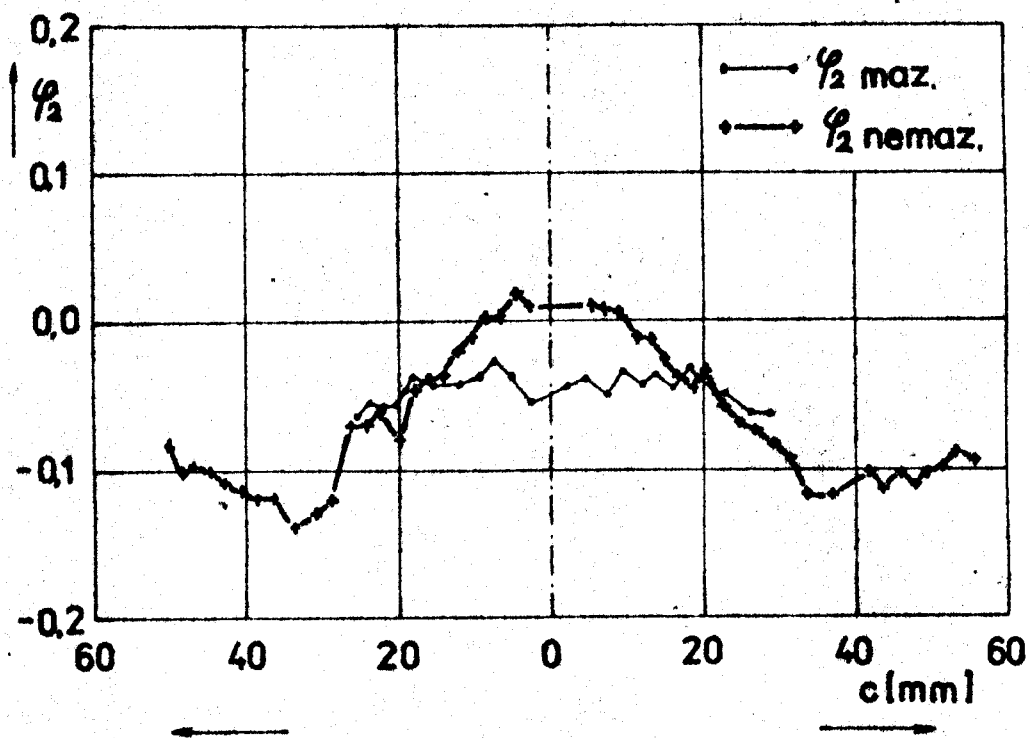
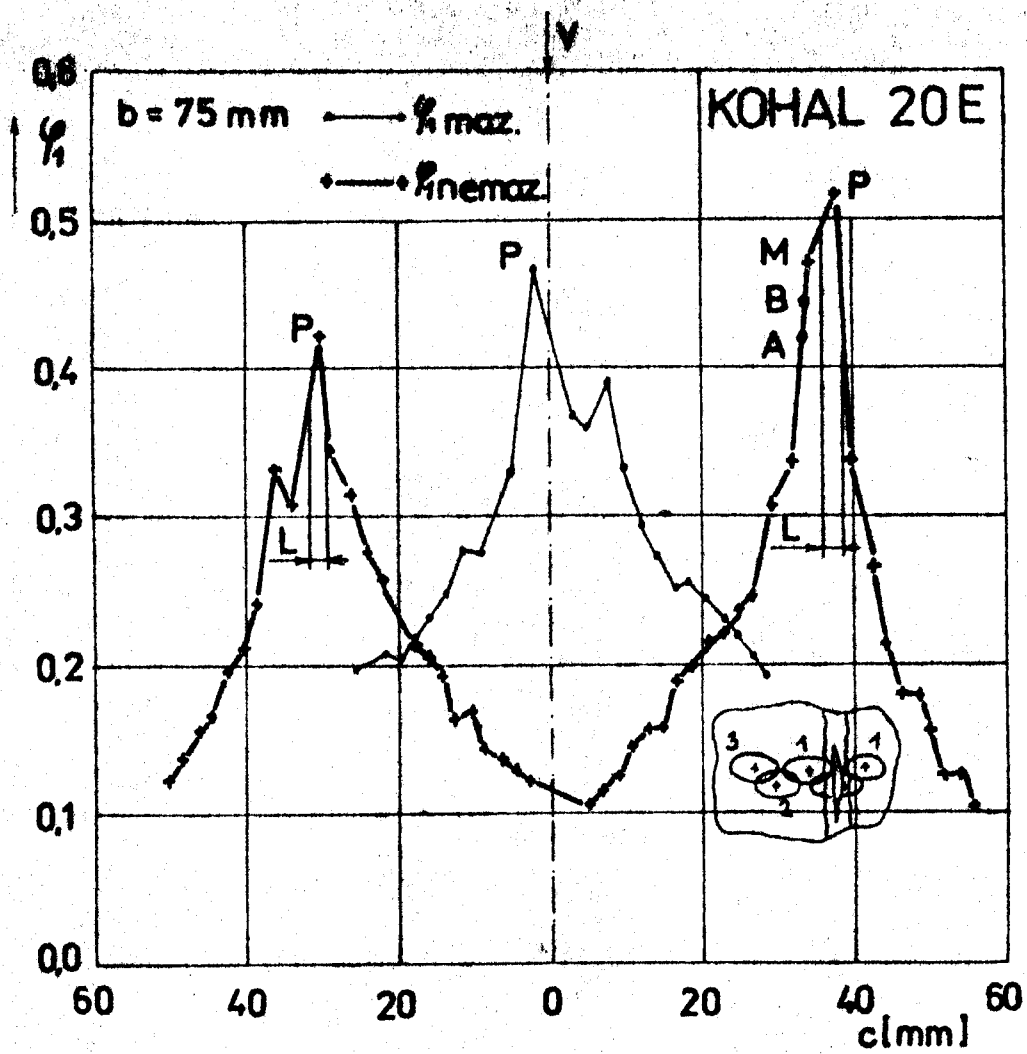


V - vrchol vzorku  
 P - lom  
 t - šířka lokálního střežení

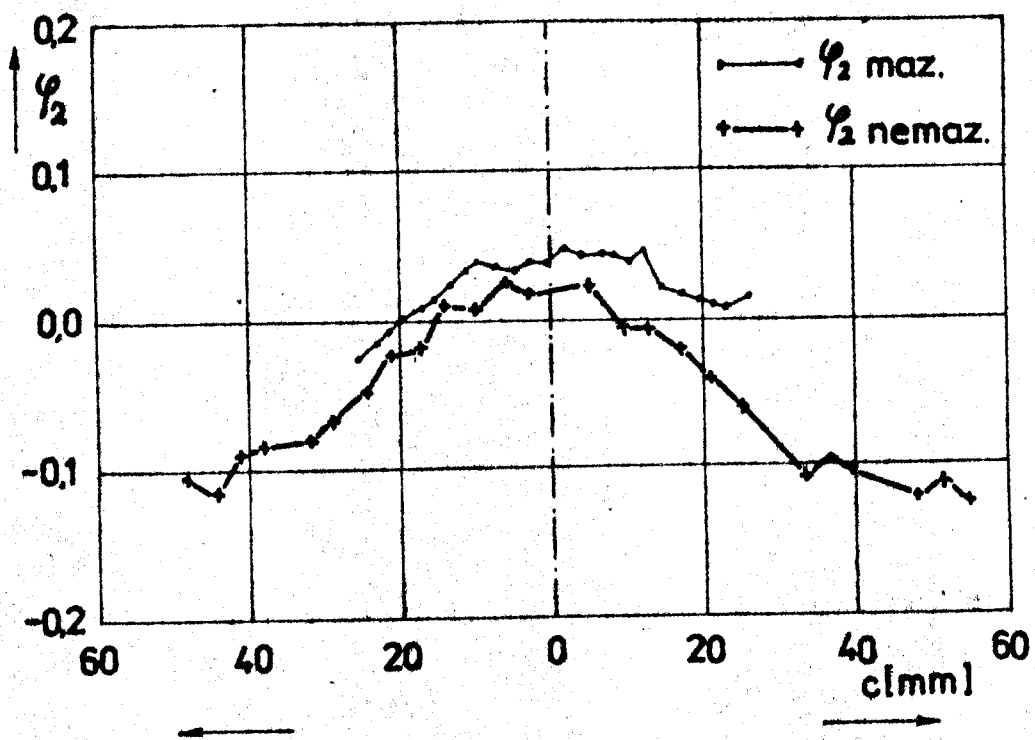
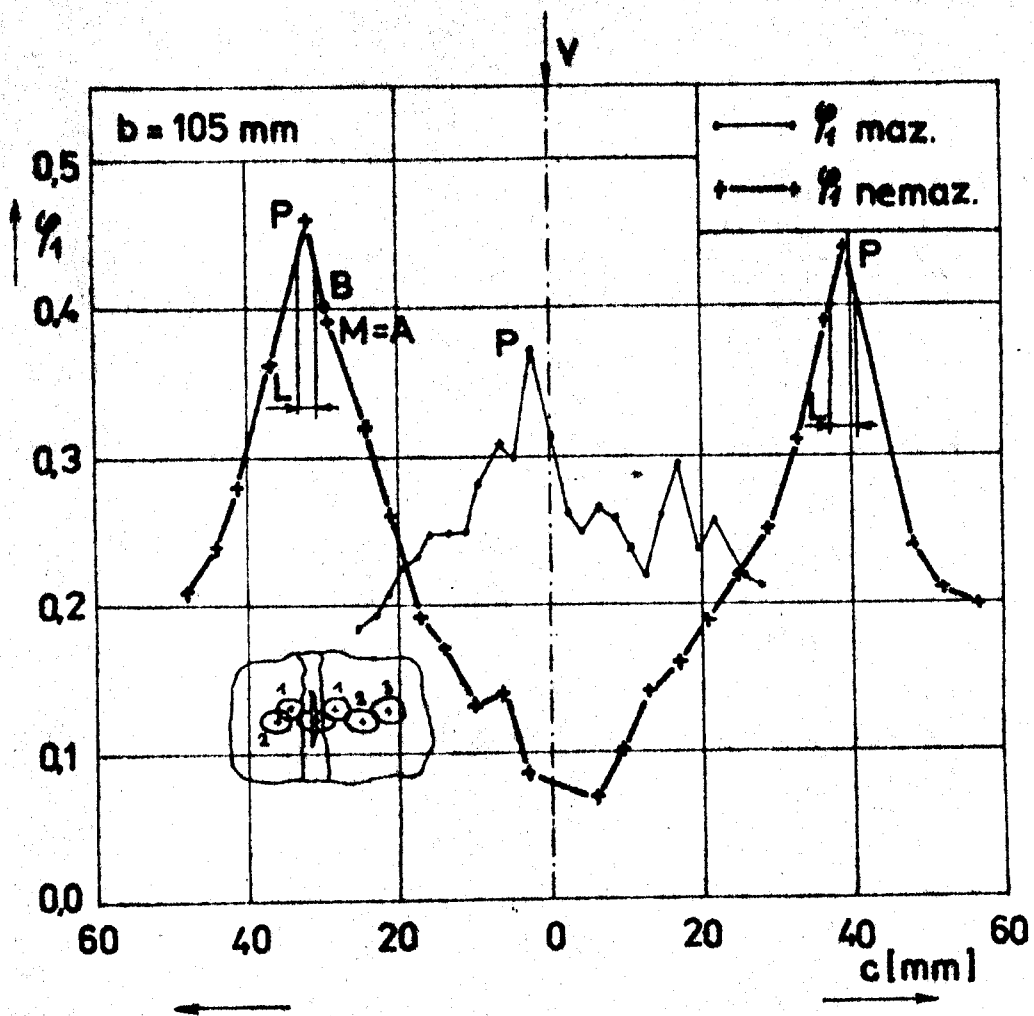
Obr. 20: Průběh gradientu přetvoření před a po úpravě frézováním u šířky  $b = 30\text{mm}$ .



Obr. 21: Gradient přetvoření masného a nemasného vzorku o šířce  $b = 30\text{mm}$  s vymezením menších stavů A, B a M.



Obr. 22: Gradient přetvoření mazaného a nemazaného vzorku o šířce  $b = 75 \text{ mm}$  s vypočtením mezních stavů A, B a M.



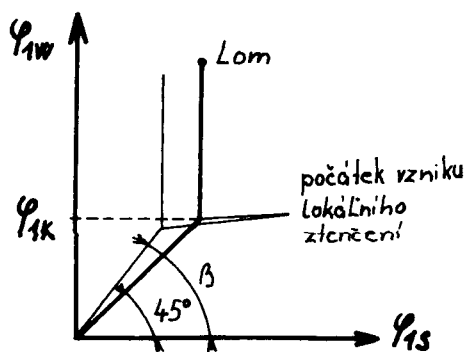
Obr. 23: Gradient přetvoření masaného a nemasaného vzorku o šířce  $b = 105 \text{ mm}$  s vyznačením mezních stavů A, B a N.

## 5.2 GRAFICKÁ METODA /1,7/

Tato metoda spočívá ve zjišťování gradientu přetvoření. Změřením  $\varphi_1$  na třech sousedních elipsách LL, W, LP lze zjistit průběh přetvoření, gradient jeho nárůstu a tedy tím i rozdělení hlavního přetvoření  $\varphi_1$  na elipse. Několik po sobě následujících přetvoření v kritických oblastech je schematicky zakresleno na obr. 26. Před vznikem lokálního ztenčení je gradient přetvoření velmi malý a přetvoření ve středu elipsy W odpovídá průměrnému přetvoření celé této elipsy. S rostoucím přetvořením roste rozdíl mezi přetvořením ve středu elementu W a průměrným přetvořením v celém elementu W.

Vlastní metoda je založena na vynášení grafické závislosti  $\varphi_{1W}$  v elipse W, která se poruší, na průměrných přetvořeních  $\varphi_{1V}$  v obou elipsách LL a LP, které bezprostředně souvisejí s elipsou W. Elipsa W musí ležet blízko počátku trhliny, pokud možno ta elipsa v níž porušení začalo.

Jestliže je gradient napětí před začátkem vzniku lokálního ztenčení malý (aproximuje kolem nuly) získáme přibližně přímkou pod úhlem  $\beta = 45^\circ$ . V momentě vzniku lokálního ztenčení se úhel  $\beta = 45^\circ$  skokem přesune na úhel  $\beta = 90^\circ$ . Z grafické závislosti lze pak odečíst  $\varphi_{1K}$ , tj. přetvoření odpovídající počátku lokálního ztenčení ( obr. 27).



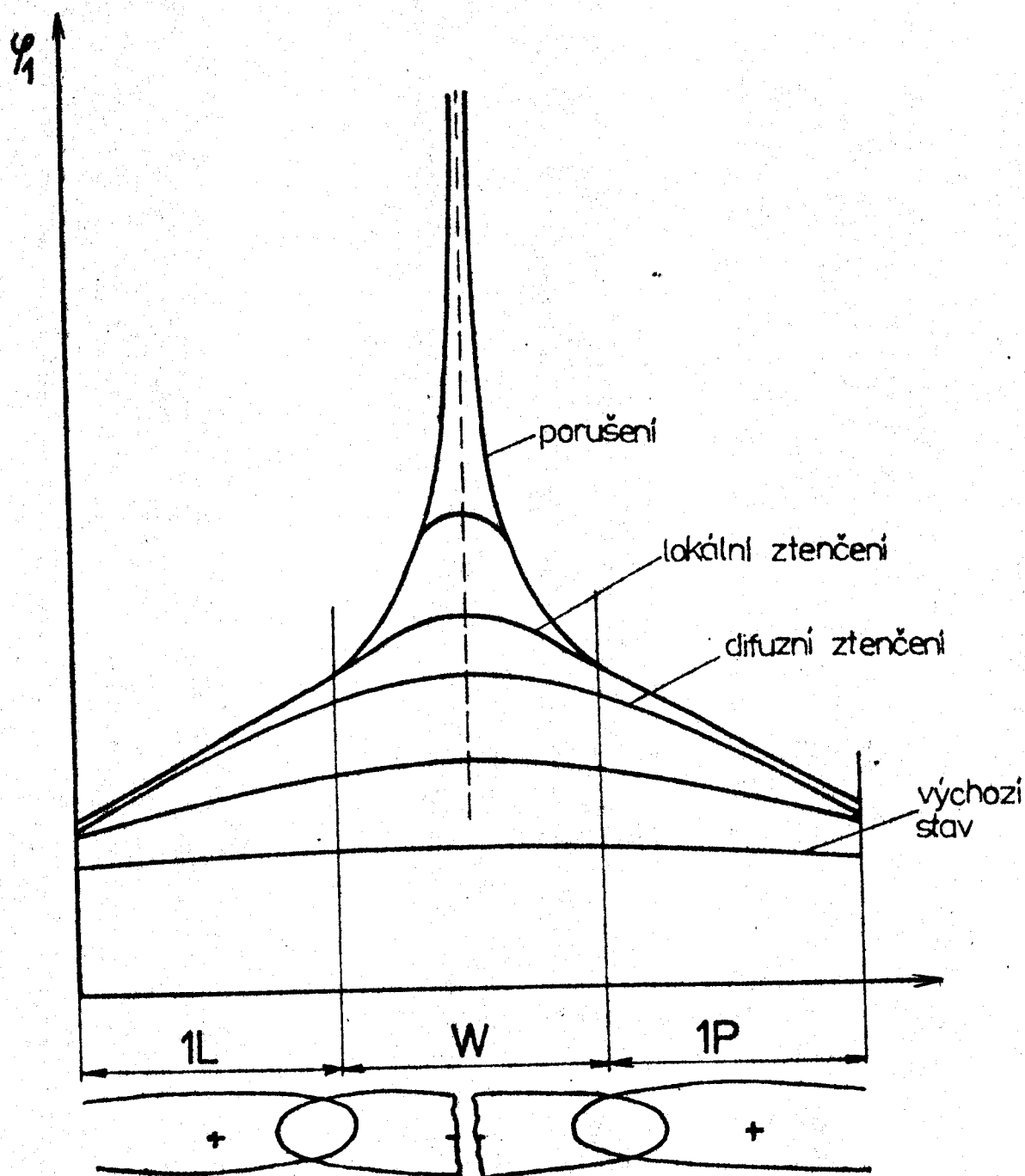
Obr. 27: Určení počátku lokálního ztenčení grafickou metodou.

Vynáší se grafická závislost  $\varphi_{1W}$  na průměrných hodnotách  $\varphi_{1S}$  obou sousedních elips 1L a 1P s použitím vztahu (11).

$$\varphi_{1S} = \frac{\varphi_{1L} + \varphi_{1P}}{2} \quad (11)$$

Není-li gradient přetvoření nulový, úhel  $\beta$  bude větší než  $45^\circ$  a dosažené hodnoty mezních přetvoření poklesnou. Úhel  $\beta$  též závisí na druhu použitého mazadla.

Tato metoda je velmi přesná, ale zdlouhavá neboť pro zjištění uvedené závislosti je nutné tažení odstupňovat a po každém tahu provést měření vytipovaných elips. Také výběr elipsy v níž dojde k porušení je obtížný.

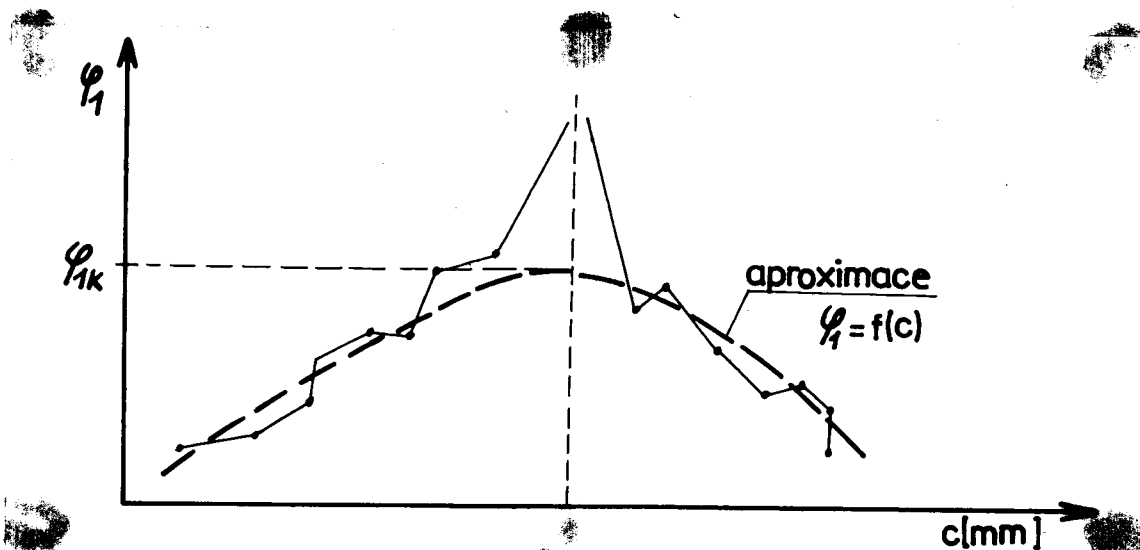


Obr. 26: Gradient přetvoření změřený v okolí porušení  
zkušebního tělesa přes tři elementy.

### 5.3 INTERPOLAČNÍ METODA /1,7/

Tato metoda je jednodušší a udává stejné výsledky jako grafická metoda. Mezní přetvoření při ztrátě stability určíme z vývoje přetvoření v elipsách po obou stranách trhliny v různé vzdálenosti  $c$  od ní. Získáme křivku udávající závislost přetvoření na odlehlosti od trhliny, tedy gradient přetvoření. Body této křivky proložíme parabolou. Přetvoření odpovídající meznímu stavu získáme pomocí aproximované křivky ( obr. 28).

Příklad grafického a početního řešení je ukázáno na vzorku šířky  $b = 105\text{mm}$  v příloze 2 a tab. 2,3.



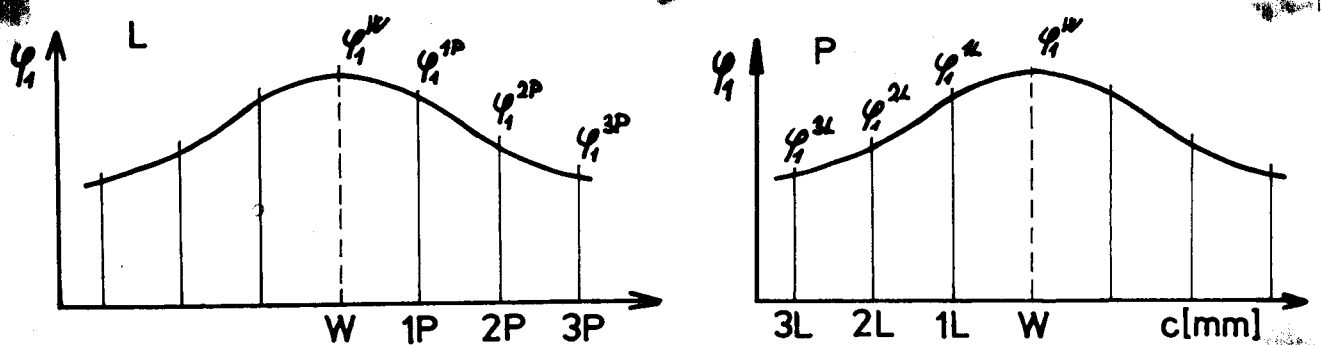
Obr. 28: Aproximace naměřených bodů parabolou.

Rychleji hodnoty mezního stavu přetvoření získáme použitím Lagrangeova interpolačního polynomu z vývoje přetvoření:

$$\varphi_{1K} = 3/4 (\varphi_1^{1L} + \varphi_1^{1P}) - 3/10 (\varphi_1^{2L} + \varphi_1^{2P}) + 1/20 (\varphi_1^{3L} + \varphi_1^{3P}) \quad (12)$$



Vývoj přetvoření těsně před vznikem lokálního ztenčení je na obr. 29.



Obr. 29: Rozložení napětí těsně před vznikem lokálního zúžení v levé (L) i v pravé (P) části zkušební vzorku.

### 5.3.1 VOLBA METODY VÝBĚRU ELEMENTŮ

Vzhledem k uvedené definici mezního přetvoření budeme vybírat elipsy, které těsně sousedí s místem porušení ale nevykazují ani lom ani lokální ztenčení a elipsy, které jsou lokálním ztenčením zasaženy (obr. 30).

Obr. 30: Výběr vhodných elips pro určení mezního přetvoření.

Křivka mezních přetvoření je sestrojena tak, aby ležela v DMP nad body, které představují přetvoření získané z elips ležících mimo oblast lokálního ztenčení a pod body získanými z elips jež byly touto oblastí zasaženy. Elipsy zasažené lomem vykazují nejvyšší mezní přetvoření a tedy i KMP je výše než uvedená předchozí KMP. Z důvodu nesouladu s uvedenou definicí mezního přetvoření nemají praktický smysl a proto od měření těchto elips bude nadále upuštěno.

Z rozložení přetvoření (obr. 21,22,23,24,) u nemazaných vzorků je patrný výskyt lokálního ztenčení (respektive lomu) po obou stranách od osy vrchlíku, v určité vzdálenosti ve směru  $\underline{c}$ . Přetvoření v blízkosti okraje vrchlíku je ovlivněno působením přidržovače a proto byly proměřeny elipsy od lokálního ztenčení ( resp.lomu) směrem ke středu zkušební vzorku ( $\underline{c}$ ).

Z vývoje přetvoření v elipsách od trhliny bylo třeba vybrat tři elipsy, jejíž hodnoty přetvoření by se dosadily do Lagrangeova interpolačního polynomu (LIP) (12), s následným získáním mezních hodnot.

Přistoupilo se k volbě ze dvou variant měření elementů:

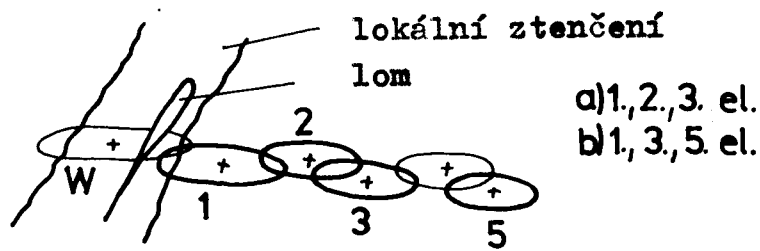
a) metoda výběru 1., 2. a 3. elementu.

Při této metodě určujeme mezní stav pomocí tří bezprostředně za sebou jdoucích elementů, částečně se překrývajících, první je brán element který těsně sousedí s lomem. Vypočtený mezní stav je označen v obr. 21,22,23,24, písmenem A.

b) metoda výběru 1., 3. a 5. elementu.

Mezní stav je určen ze tří elementů vedle sebe, které se nepřekrývají. V obr. 21,22,23,24 je označen písmenem B.

(viz. obr. 31)



Obr. 31: Výběr elementů do LIP

V konečné fázi tvorby lokálního ztenčení před vznikem lomu je největší přetvoření ve směru působení hlavního normálního napětí  $\sigma_1$ , tedy přetvoření  $\varphi_1$ . Je daleko větší než přetvoření  $\varphi_2$ , a proto byl výpočet mezní hodnoty přetvoření  $\varphi_{2K}$  zjednodušen. Přetvoření  $\varphi_2$  proměřené na mezní elipse (1.) bylo považováno za mezní přetvoření  $\varphi_{2K}$ . Ze vztahu (5) (viz.kap. 2.4) plyne:

$$\varphi_{2K} = \varphi_2 = \ln \frac{L_2}{L_0} \quad (13)$$

Mezní stavy  $\varphi_{1K}$  byly spočteny podle LIP (12).

Varianta:

$$a) A = 3/4 (\varphi_1^{1L} + \varphi_1^{1P}) - 3/10 (\varphi_1^{2L} + \varphi_1^{2P}) + 1/20 (\varphi_1^{3L} + \varphi_1^{3P}) \quad (14)$$

$$b) B = 3/4 (\varphi_1^{1L} + \varphi_1^{1P}) - 3/10 (\varphi_1^{3L} + \varphi_1^{3P}) + 1/20 (\varphi_1^{5L} + \varphi_1^{5P}) \quad (15)$$

Dvojice hodnot mezních přetvoření všech vzorků byly vynešeny do DMP a použitím regresní analýzy byly proloženy regresní křivkou, která zobrazuje průběh mezních přetvoření. Popis matematického řešení a programu je v příloze 3 a 4. (obr.32)

Rozdílné hodnoty mezních stavů A a B vyplývají z úvahy nad LIP - rovnice (14) (15). Hodnota  $3/10 (\varphi_1^{3L} + \varphi_1^{3P})$  je daleko menší než hodnota  $3/10 (\varphi_1^{2L} + \varphi_1^{2P})$ . Odečtením této hodnoty

od hodnoty  $3/4 (\varphi_1^{LL} + \varphi_1^{LP})$  získáme větší hodnoty mezního stavu B než-li mezního stavu A. Třetí hodnota LIP výsledný mezní stav ovlivní již jen nepatrně, zdůvodu velmi malé hodnoty. Hodnota mezního stavu B má vyšší hodnotu než-li A. Při použití metody výběru 1., 3. a 5. elementu velikost mezního přetvoření B dosáhla hodnot, které se přiblížily k oblasti lokálního ztenčení, což je v souladu s přijatou definicí mezního stavu ( obr. 21,22,23,24).

V příloze 5 jsou uvedeny vypočtené hodnoty  $\varphi_{1K}$  a  $\varphi_{2K}$ , jejich funkční hodnoty proloženého polynomu a odhady regresních koeficientů  $A(0)$ ,  $A(1)$ ,  $A(2)$  obou metod.

#### 5.4 ROZBOR VÝSLEDKŮ A DISKUSE /4,9/

Na základě výsledků matematického zpracování naměřených hodnot interpolační metodou (výběru 1., 3. a 5. elementu) byla sestrojena KMP obr. 33. Tato křivka je na obr. 34 porovnána s KMP sestrojených na základě hodnot přetvoření, které byly získány pouze z jednoho mezního elementu (viz. kap. 3.2).

Z obr. 21,22,23,24 je patrné, že s růstem šířky vzorků se zmenšuje strmost gradientu přetvořením, což má vliv na mezní stav získaný interpolační metodou (B).

U vzorků šířek  $b = 30\text{mm}$  až  $b = 90\text{mm}$  z důvodu velké strmosti gradientu přetvoření získáme mezní stav B o nižší hodnotě než-li u mezního stavu M (získaný z jednoho mezního elementu). Nižší hodnota mezního stavu B plyne opět z použití LIP (15), odečtením velké hodnoty  $3/10 (\varphi_1^{3L} + \varphi_1^{3P})$  od hodnoty  $3/4 (\varphi_1^{1L} + \varphi_1^{1P})$ . Srovnání mezních stavů B a M je patrné z obr. 21,22,23,24. K vyznačené oblasti lokálního ztenčení se více blíží mezní přetvoření M.

Průnik obou KMP je mezi mezním stavem šířek  $b = 105\text{mm}$  a  $b = 120\text{mm}$ . Gradient přetvoření je méně strmý než u předešlých šířek (viz obr. 21,22) a mezní stavy B a M vykazují stejnou hodnotu.

U vzorků šířek  $b = 120\text{mm}$  až  $b = 210\text{mm}$  je strmost gradientu malá (viz. obr. 24). Odečtením malé hodnoty  $3/10 (\varphi_1^{3L} + \varphi_1^{3P})$  od hodnoty  $3/4 (\varphi_1^{1L} + \varphi_1^{1P})$  v rovnici (15), vypočtená hodnota mezního stavu B je vyšší než-li hodnota mezního stavu M. K vyznačené oblasti lokálního ztenčení se více blíží mezní přetvoření B.

Před konečnými závěry posuzování obou metod je nutné zjistit přesnost výsledků. Jelikož naměřené hodnoty  $L_1$ ,  $L_2$  jsou zatíženy náhodnými chybami, budou tedy i vypočteny hodnoty hlavních normálních přetvoření  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$  zatíženy náhodnou chybou, které přísluší směrodatná odchylka  $s$ , jejichž přibližnou hodnotu lze získat ze vztahu

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\varphi_{1i} - \varphi_{1S})^2} \quad (16)$$

$n$  - počet měření

$\varphi_{1i}$  - jmenovité přetvoření

$\varphi_{1S}$  - aritmetický průměr

Skutečná hodnota měřeného mezního stavu bude téměř s jistotou ležet v konfidenčním intervalu

$$\varphi_{1S} \pm \frac{t_v \cdot s}{\sqrt{n}}$$

$t_v$  - kritická hodnota (Studentova) rozdělení

Tabulka vypočteného konfidenčního intervalu je v příloze 6, tab. 4.

$\varphi_{1S} \pm \frac{t_v \cdot s}{\sqrt{n}}$  je hodnota regresní funkce pro pří-

slušné  $\varphi_{2K}$ . Šířka konfidenčního intervalu je závislá na počtu měření vzorků  $n$ . Velmi velká šíře konfidenčního intervalu je v našem případě způsobena malým počtem vzorků - 60 vzorků při 12ti deformačních stopách. Zkušenosti získané na VŠST ukazují, že jako optimální pro získání úplného DMP se jeví použití 130 vzorků při 13ti deformačních stopách.

## 6. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo praktické ověření vlivu gradientu přetvoření a způsobu určování mezních přetvoření na jejich polohu v DMP. K posouzení těchto vlivů byly vybrány dvě metody zjišťování mezního stavu přetvoření:

- 1) interpolační metoda
- 2) metoda výpočtu mezního stavu z jednoho mezního elementu.

Interpolační metoda vypočítává použitím LIP (12) resp. (15) z rozvoje přetvoření mezní stav (B). Tedy na tento výpočet má vliv gradient přetvoření. Druhá metoda výpočtu mezního stavu (M) z jednoho mezního elementu tento vliv neuvažuje. Vypočtené mezní stavy proložené aproximačními křivkami (KMP) obou metod jsou porovnány na obr. 34.

Pro KMP vypočtenou interpolační metodou byl vypočten konfidenční interval (viz příloha 6). Z důvodu malého počtu vzorků byla šířka konfidenčního intervalu velká. KMP získaná z druhé metody se nachází v tomto konfidenčním intervalu a proto odchylka těchto dvou KMP je statisticky nevýznamná. Je tedy vhodné provést pouze úvahu nad výsledky obou metod.

KMP se protínají mezi šířkami vzorků  $b = 105\text{mm}$  a  $b = 120\text{mm}$  a tedy získané mezní stavy u těchto šířek jsou shodné. U menších šířek vykazuje druhá metoda (z jednoho mezního elementu) mezní stav (M) o vyšších hodnotách  $\varphi_1$  než-li mezní stav B, a jak je patrné z obr. 21, 22 je blíže k lokálnímu ztenčení. U šířek větších než  $b = 120\text{mm}$  je tomu naopak (viz obr. 24). Proto se nabízí při zjišťování mezního přetvoření kombinace obou metod. Pro vzorky menších šířek (do  $b = 120\text{mm}$ ) použít metodu zjišťování mezního stavu z jednoho elementu a pro větší šířky vzorků

(od  $b = 120\text{mm}$ ) použít interpolační metodu. Tato úvaha je ovšem opodstatněna v případě získání KMP z většího počtu vzorků, která by měla stejnou polohu jako uvedená KMP z interpolační metody, ale s daleko větší přesností.

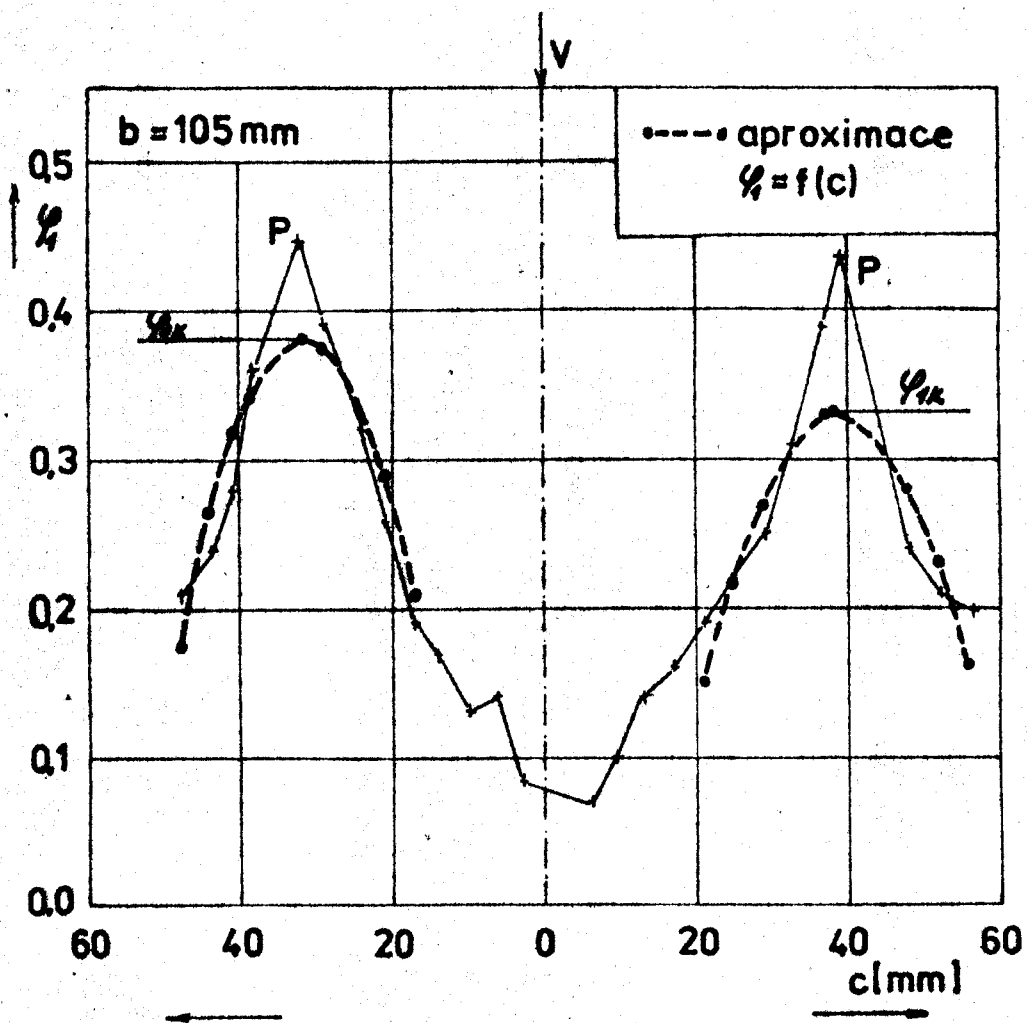


## 7. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- 1/ BUCAR, Z. : Diagramy mezních přetvoření tenkých hlubokotažných plechů, Kandidátská dizertační práce, Liberec, 1987
- 2/ TMĚJ, J. - MIKEŠ, V. : Teorie tváření, skripta, Liberec, VŠST, 1981
- 3/ NĚMEC, M. : Vliv tvaru vzorku na křivku mezních přetvoření, Diplomová práce, Liberec, VŠST, 1987
- 4/ VÁCLAVŮ, V. : Vliv tření na mezní hodnoty přetvoření při experimentálním stanovení diagramu mezních přetvoření, Diplomová práce, Liberec, VŠST, 1986
- 5/ ŠNEIBERG, P. : Vliv metodiky určování mezního stavu na hodnoty mezních přetvoření, Diplomová práce, Liberec, VŠST, 1988
- 6/ HOLAS, P. : Metodika experimentálního určování mezních přetvoření plechů, Diplomová práce, Liberec, VŠST, 1982
- 7/ VEERMAN, C. Chr. : The determination and application of the FLC - onset of localised necking
- 8/ SVOBODA, J. : Křivky mezních přetvoření dle Ghose, Diplomová práce, Liberec, VŠST, 1984
- 9/ DRÁB, V. - MOC, L. : Teorie spolehlivosti a řízení jakosti, skripta, Liberec, VŠST, 1984

Děkuji s. Ing. Zdeňku Bucharovi CSc za cenné rady,  
náměty a připomínky, které mi poskytl. Dále děkuji všem  
pracovníkům KPT, kteří přispěli k vytvoření této práce.

8. PŘÍLOHY



Příloha 2: Gradient přetvoření vzorku o šířce  $b = 105$  mm a proložení získaných bodů z řešení parabolou pomocí aproximace.

APROXIMACE ALGEBRAICKYM POLYNOMEM  
 =====

N = STUPEN POLYNOMU  
 X(I) = EXPERIMENTALNI NAMERENE HODNOTY  
 Y(I) = EXPERIMENTALNI NAMERENE HODNOTY  
 F(I) = FUNKCNI HODNOTY PROLOZENEOHO POLYNOMU V BODE X(I)  
 A(I) = REGRESNI KOEFICIENTY  
 CHI = SUMA KVADRATICKYCH ODCHYLEK RESENEHO POLYNOMU  
 CKRIT, FKRIT = FUNKCNI HODNOTY ZJISTENEHO EXTREMU

X(I)	Y(I)	F(I)
25,00000	,22000	,21987
29,00000	,25000	,27474
33,00000	,31000	,31128
37,00000	,39000	,32947
48,00000	,24000	,28492
52,00000	,21000	,23433
56,00000	,20000	,16539

```

I N      | 2      | I
I-----+-----I
I A(0)   | ,53870 | I
I-----+-----I
I A(1)   | ,04467 | I
I-----+-----I
I A(2)   | ,00057 | I
I-----+-----I
I CHI    | ,00809 | I
I-----+-----I
I CKRIT  | 38,96719 | I
I-----+-----I
I FKRIT  | ,33169 | I
I-----+-----I
  
```

Tabulka 2

APROXIMACE ALGEBRAICKYM POLYNOMEM  
 =====

N = STUPEN POLYNOMU  
 X(I) = EXPERIMENTALNI NAMERENE HODNOTY  
 Y(I) = EXPERIMENTALNI NAMERENE HODNOTY  
 F(I) = FUNKCNI HODNOTY PROLOZENEOHO POLYNOMU V BODE X(I)  
 A(I) = REGRESNI KOEFICIENTY  
 CHI = SUMA KVADRATICKYCH ODCHYLEK RESENEHO POLYNOMU  
 CKRIT, FKRIT = FUNKCNI HODNOTY ZJISTENEHO EXTREMU

X(I)	Y(I)	F(I)
-48,00000	,21000	,17835
-44,00000	,24000	,26696
-41,00000	,28000	,31707
-39,00000	,36000	,34271
-29,00000	,39000	,37754
-21,00000	,32000	,29339
-17,00000	,19000	,21398

```

I N      1      2      I
I-----+-----I
I A(0)  1      =,40118 I
I-----+-----I
I A(1)  1      =,04941 I
I-----+-----I
I A(2)  1      =,00078 I
I-----+-----I
I CHI   1      ,00484 I
I-----+-----I
I CKRIT 1      =31,76112 I
I-----+-----I
I FKRIT 1      ,38347 I
I-----+-----I
  
```

Tabulka 3

### Příloha 3

## Matematické řešení

### 1) Aproximační metody

Pro matematické řešení problému jsem použila aproximační metodu patřící mezi numerické metody, které jsou využívány pro řešení problému prostřednictvím výpočetní techniky. Tuto metodu jsem zvolila proto, že funkční hodnoty aproximované funkce stanovené pouze aritmetickými operacemi by byly zatíženy příliš velkou chybou v dalším výpočtu, čímž by se výrazně snížila kvalita výsledků celého experimentálního měření.

Z aproximačních metod jsou nejužívanější tyto dvě metody:

- a) metoda interpolace
- b) metoda nejmenších čtverců

Metoda interpolace umožňuje snadnou konstrukci interpolační funkce a možnost odhadu chyby. Pro úspěšné použití této metody je však nutné, aby hodnoty byly zadány s velmi vysokou přesností.

Metoda nejmenších čtverců. Pro zpracování jsem využila tuto metodu, protože hodnoty byly získány experimentálním měřením a jsou proto zatíženy mnohem většími chybami než chybami zaokrouhlováním. Tato metoda je jednou z nejužívanějších pro a-proximaci funkce, která využívá výpočetní techniky z důvodu provedení velkého počtu aritmetických operací.

- ### 2) Aproximace metodou nejmenších čtverců algebraickým polynomem.

$$\text{Polynom } P(x) = a_{(0)} + a_{(1)} x^1 + \dots + a_{(n-1)} x^{n-1} + a_{(n)} x^n$$

Ve smyslu metody nejmenších čtverců a hledáme

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k (F(x_i) - y_i)^2,$$

kde  $k$  je počet experimentálních bodů  $x_i, y_i$ , které je minimální, tj. potřebujeme takovou sadu odhadů koeficientů regrese  $a_j$  ( $j = 1, n$ ) aby  $\chi^2$  bylo minimální.

V mém případě provádím aproximaci polynomem 2 stupně.

$$y = a_{(0)} + a_{(1)}x + a_{(2)}x^2$$

Pro stupeň polynomu 2 je nutné spočítat soustavu tří lineárních rovnic. Tuto soustavu řeším pomocí Gaussovy eliminační metody, z které vyplynou odhady hodnot koeficientů  $a_{(j)}$  pro výpočet funkčních hodnot funkce v bodech  $x_i$  ve smyslu metody nejmenších čtverců.

### 3) Program REGRES

Tento program lze použít buď na počítači ADT 4500 pod operačním systémem DOS V nebo na počítači HP 1000 pod operačním systémem RTE - 6VM.

Data pro zpracování byly připraveny samostatně jako datový soubor na disketě pomocí programu EDITR. Struktura datového souboru je taková, že 1. hodnota je počet experimentálních bodů, 2. hodnota je požadovaný stupeň polynomu a dále následují naměřené hodnoty. Data lze umístit i na disk - program si je podle zadaného jména nalezne sám.



```

2 3 FILES 0,1
3     PROGRAM REGRES
4 *****
5 *
6 * REGRES:  APROXIMACE FUNKCE ALGEBRAICKYM POLYNOMEM
7 *          - PRO APROXIMACI POUZITA METODA NEJMENSICH CTVERCU
8 *          - PRO RESENI MATICE SOUSTAVY POUZITA GAUSSOVA ELIMINACE
9 *
10 * VOLANE PODPROGRAMY: POLRE, GAUSS, PCHI, KURZOR
11 *
12 * DATOVY SOUBOR: XXXXXX (FLOPPY DISK/DISK)
13 *
14 * POCITAC: ADI4500 / HP1000
15 *
16 * OPERACNI SYSTEM: DOS V / RTE-6VM
17 *
18 * PGM JAZYK: FORTRAN 77
19 *
20 * AUTOR: IVA HROMADKOVA <1989>
21 *       ING. MILAN NIDL
22 *
23 *****
24     INTEGER*2 IND,S,NAME(3)
25     REAL*8 X(150),Y(150),A2,A3,A4,A5,A6,A7,A8,A9
26     REAL*8 A(0:2),CHI
27     DATA IER/-1/
28     WRITE(1)16437B
29     WRITE(1,1("POLYNOMICKA REGRESE"/80(="=")))1
30     DO WHILE(IER.NE.0)
31     CALL KURZOR(4,1)
32     WRITE(1,1("ZADEJ NAZEV SOUBORU S DATY:"))1
33     CALL KURZOR(4,28)
34     CALL EXEC(1,401B,NAME,-6,0,0)
35     OPEN(52,FILE=NAME,IOSTAT=IER,STATUS='OLD')
36 *
37 *.....TEST PRITOMNOSTI DATOVEHO SOUBORU NEBO CHYBY PRI OTEVRENI
38 *
39     IF(IER.EQ.-6)THEN
40         CALL KURZOR(5,1)
41         WRITE(1,1("DATOVY SOUBOR SE JMENEM ",3A2,
42 *              " NENALEZEN 1"))1(NAME(I),I=1,3)
43         WRITE(1)3407B
44         CALL WAIT(3000)
45         CALL KURZOR(5,1)
46         WRITE(1)17437B
47     ELSE
48         CALL KURZOR(5,1)
49         WRITE(1,1("PROGRAM UKONCEN PRO CHYBU CIS.:",I3)1)IER
50         STOP
51     END IF
52     END DO
53     CALL KURZOR(5,1)
54     WRITE(1,1("ZADEJ VARIANTU LAGRANGEOVA POLYNOMU <1/2>:"))1
55     CALL EXEC(1,401B,IPP,-1,0,0)
56     CALL CODE
57     READ(IPP,1(I1)1)IP
58 *
59 *.....ZACATEK CTENI DATOVEHO SOUBORU
60 *
61     READ(52,1(I5)1)IND  ! IND = POCET MERENI
62     READ(52,1(I1)1)S    ! S  = STUPEN POLYNOMU
63 *

```

```

64 *.....NACTENI VSTURNICH DAT A VYPOCET FI1 A FI2 KRITICKYCH
65 *
66     DO I=1,IND
67     READ(52,'(9(F10.5))')K,L,M,N,O,P,Q,R,T
68     X(I)=ALOG(K/2.646)
69     A2=ALOG(L/2.646)
70     A3=ALOG(M/2.646)
71     A4=ALOG(N/2.646)
72     A5=ALOG(O/2.646)
73     A6=ALOG(P/2.646)
74     A7=ALOG(Q/2.646)
75     A8=ALOG(R/2.646)
76     A9=ALOG(T/2.646)
77 *
78 *.....LAGRANGEUV POLYNOM ( VEERMANUV VZOREC "SHEET METAL IND.")
79 *
80     IF(IP,EQ.1)THEN
81         Y(I)=(3/4)*(A2+A6)-(3/10)*(A3+A7)+(1/20)*(A4+A8)
82     ELSE
83         Y(I)=(3/4)*(A2+A6)-(3/10)*(A4+A8)+(1/20)*(A5+A9)
84     END IF
85     END DO
86     CLOSE(52) ! SOUROR UZAVREN
87     WRITE(6,'(5(/),22X,"APROXIMACE ALGEBRAICKYM POLYNOMEM"/
88 *22X,33("=")///20X,"N      = STUPEN POLYNOMU"/20X,
89 *"X(I) = EXPERIMENTALNI NAMERENE HODNOTY"/20X,
90 *"Y(I) = EXPERIMENTALNI NAMERENE HODNOTY"/20X,
91 *"F(I) = FUNKCNI HODNOTY PROLOZENEOHO POLYNOMU V BODE X(I)"/
92 *20X,"A(I) = REGRESNI KOEFICIENTY"/20X,
93 *"CHI  = SUMA KVADRATICKYCH ODCHYLEK RESENEHO POLYNOMU"////
94 *20X,"X(I)",18X,"Y(I)",14X,"F(I)"/18X,47("=")!)
95 *
96 *.....PROLOZENI POLYNOMU
97 *
98 * A = REGR.KOEF. CHI = SUMA KVADR.ODCHYLEK IND = POCET EXP.BODU
99 * S = STUPEN POLYNOMU
100 *
101     CALL POLRE(X,Y,IND,A,S,CHI)
102     DO I=1,IND
103     POM=A(0)+A(1)*X(I)+A(2)*X(I)*X(I)
104     WRITE(6,'(17X,F10.5,9X,F10.5,9X,F10.5)')X(I),Y(I),POM
105     END DO
106     WRITE(6,'(18X,47("=")///)')
107     POM=(-A(1))/2/A(2)
108     FI=A(0)+A(1)*POM+A(2)*POM*POM
109     WRITE(6,'(2(/),30X,22("=")/30X,"I N",5X,"I      ",11,8X,"I"/
110 *30X,"I",7("="),"+",12("="),"I"/30X,"I A(0)  1 ",F10.5," I"/
111 *30X,"I",7("="),"+",12("="),"I"/30X,"I A(1)  1 ",F10.5," I"/
112 *30X,"I",7("="),"+",12("="),"I"/30X,"I A(2)  1 ",F10.5," I"/
113 *30X,"I",7("="),"+",12("="),"I"/30X,"I CHI   1 ",F10.5," I"/
114 *30X,22("=")!)S,A,CHI
115     END

```

MODULE REGRES  
FTN7X REV. 8617

NO ERRORS  
NO WARNINGS

PROG: 2562  
SAVE: NONE

BLANK COMMON: NONE  
LOCAL EMA: NONE

```

116     SUBROUTINE POLRE(X,Y,P,A,S,CHI)
117 *
118 *>>> POLRE = POLYNOM,REGRESE <<<
119 *
120 * DO STUPNE POLYNOMU 24
121 * P = POCET EXP,BODU
122 *
123     INTEGER*2 P,S,RA,SL,I
124     REAL*8 X,Y,A,CHI,M,SUM,CPOM
125     DIMENSION M(25,26),X(P),Y(P),A(0:S)
126 *
127 *.....POCET RADKU MAT. M
128 *
129     IM1=25
130 *
131 *.....SPOCTENI MATICE M
132 *
133     DO RA=1,S+1
134         DO SL=1,S+1
135             SUM=0
136             DO I=1,P ! PO EXPERIMENTALNICH BODECH
137                 IF((SL.EQ.1).AND.(RA.EQ.1))THEN
138                     SUM=0 ! ELIMINUJE MOCNENI NA NULTOU
139                 ELSE
140                     CPOM=1
141                     IZZ=RA+SL-2
142                     DO IU=1,IZZ
143                         CPOM=CPOM*X(I)
144                     END DO
145                     SUM=SUM+CPOM
146                 ENDIF
147             END DO
148             M(RA,SL)=SUM ! UKLADAM DO M
149         END DO
150     END DO
151     M(1,1)=P
152 *
153 *.....POCITAM VEKTOR PRAVYCH STRAN
154 *
155     DO RA=1,S+1
156         SUM=0
157         DO I=1,P
158             IF(RA.EQ.1)THEN ! ABYCHOM NEUMOCNOVALI NA NULTOU,
159                 SUM=SUM+Y(I) ! POSCITAME Y(I),NAME M(1,S+2)
160             ELSE ! -----
161 *
162 *.....VETEV RA>1
163 *
164                 CPOM=1 ! SPOCTEME MOCNINU
165                 DO IU=1,RA-1 ! X(I)**(RA-1)
166                     CPOM=CPOM*X(I) !
167                 END DO !
168 *
169 *.....NASOBIM JI Y(I)
170 *
171                 CPOM=CPOM*Y(I) ! A VYNAS, Y(I)
172                 SUM=SUM+CPOM !
173             ENDIF ! -----
174             ! SECIST PREZ I
175         END DO !
176         M(RA,S+2)=SUM ! A NAME MATIC,ELEMENT PRAVYCH STRAN
177     END DO

```

178 CALL GAUSS(M,IM1,S,A)  
179 CALL PCHI(X,Y,P,A,S,CHI)  
180 RETURN  
181 END

MODULE POLRE  
PTN7X REV. 8617

NO ERRORS  
NO WARNINGS

PROG: 2865  
SAVE: NONE

BLANK COMMON: NONE  
LOCAL EMA: NONE

```

182      SUBROUTINE GAUSS(M,IM1,S,A)
183 *
184 *>>> GAUSS - GAUSSOVA ELIMINACNI METODA RESENI SOUSTAVY LINEARNICH
185 *      ROVNIC <<<
186 *
187      INTEGER*2 S,L,RA,SL,J,IN,IM1
188      REAL*8 M,A,SUM
189      DIMENSION M(IM1,IM1+1),A(0:S)
190      J=S+1
191      DO L=1,J-1
192 *
193 *..... ZDE BY MEL BYT TEST NENULOVOSTI M(RA,L) PRO VSECHNA RA
194 *      U NAS VSAK NEMAME NULOVE PRVKY
195 *
196          DO RA=L,J
197              DO SL=J+1,L,-1
198                  M(RA,SL)=M(RA,SL)/M(RA,L)
199              END DO
200          END DO
201          DO RA=L+1,J
202              DO SL=L,J+1
203                  M(RA,SL)=M(RA,SL)-M(L,SL)
204              END DO
205          END DO
206      END DO
207      M(J,J+1)=M(J,J+1)/M(J,J)
208      M(J,J)=1
209      DO IR=1,J
210          END DO
211 *
212 *..... ZDE SE POCITA RESENI
213 *
214      A(J-1)=M(J,J+1)
215      DO L=2,J
216          SUM=0
217          DO IN=1,L-1
218              SUM=SUM+A(J-IN)*M(J-L+1,J-IN+1)
219          END DO
220          A(J-L)=M(J-L+1,J+1)-SUM
221      END DO
222      RETURN
223      END

```

MODULE GAUSS  
FTN7X REV. 8617

NO ERRORS  
NO WARNINGS

PROG: 322  
SAVE: NONE

BLANK COMMON: NONE  
LOCAL EMA: NONE

```
224      SUBROUTINE PCHI(X,Y,P,A,S,CHI)
225 *
226 * >>> PCHI = VYPOCET SUMY KVADRATICKYCH ODCHYLEK VE SMYSLU METODY
227 *      NEJMENSICH CTVERCU <<<
228 *
229      INTEGER*2 P,S,I,U,J
230      REAL*8 X,Y,A,CHI,POL,CIS
231      DIMENSION X(P),Y(P),A(0:S)
232      CHI=0
233      DO I=1,P
234          POL=0
235          DO J=1,S
236              CIS=1
237              DO U=1,J
238                  CIS=CIS*X(I)
239              END DO
240              POL=POL+A(J)*CIS
241          END DO
242          POL=POL+A(0)
243          CHI=CHI+(POL-Y(I))*(POL-Y(I))
244      END DO
245      RETURN
246      END
```

MODULE PCHI  
FTN7X REV. 8617

NO ERRORS  
NO WARNINGS

PROG: 146  
SAVE: NONE

BLANK COMMON: NONE  
LOCAL EMA: NONE

```
247      SUBROUTINE KURZOR(RADEK,SLOUPEC)
248 *
249 *>>> OVLADANI POZICE KURZORU NA TERMINALU <<<
250 *
251      INTEGER*2 RADEK SLOUPEC
252      DATA IRADEK, ISLOUPEC/2*0/
253      IRADEK=RADEK+154378
254      ISLOUPEC=(SLOUPEC+378)*4008
255      WRITE(1) IRADEK,ISLOUPEC
256      RETURN
257      END
```

MODULE KURZOR  
FTN7X REV. 8617

NO ERRORS  
NO WARNINGS

PROG: 46  
SAVE: NONE

BLANK COMMON: NONE  
LOCAL EMA: NONE

Příloha 5

APROXIMACE ALGEBRAICKYM POLYNOMEM  
 =====

N = STUPEN POLYNOMU  
 X(I) = EXPERIMENTALNI NAMERENE HODNOTY  
 Y(I) = EXPERIMENTALNI NAMERENE HODNOTY  
 F(I) = FUNKCNI HODNOTY PROLOZENEOHO POLYNOMU V BODE X(I)  
 A(I) = REGRESNI KOEFICIENTY  
 CHI = SUMA KVADRATICKYCH ODCHYLEK RESENEHO POLYNOMU

Výběr 1.,2.,3. elementu

X(I)	Y(I)	F(I)	b
.29760	.57600	.59685	30
.26500	.49500	.55645	
.24550	.53900	.53412	
.29000	.58100	.58709	
.26750	.67500	.55942	
.31290	.51800	.61713	45
.20760	.48000	.49462	
.25520	.56200	.54506	
.33120	.69600	.64250	
.27000	.60000	.56240	
.15770	.49100	.45050	60
.14670	.43700	.44198	
.15550	.43200	.44876	
.20530	.45200	.49239	
.14010	.42700	.43708	
.13360	.42400	.43240	75
.13800	.42700	.43555	
.13580	.43200	.43397	
.12720	.41600	.42795	
.14010	.39800	.43708	
.09550	.59900	.40806	90
.10180	.41000	.41172	
.12720	.35200	.42795	
.12930	.57900	.42939	
.11650	.38400	.42083	
.08930	.42600	.40459	105
.08520	.41500	.40238	
.06880	.38400	.39411	
.09130	.40200	.40570	
.10180	.35200	.41172	
.06080	.39900	.39044	120
.05080	.32700	.38616	
.09130	.39400	.40570	
.06680	.34100	.39317	
.06280	.37200	.39133	
.00230	.31200	.37054	140
.00230	.36500	.37054	
.02530	.40800	.37689	
.00150	.35300	.36967	
.00150	.34400	.36967	
.02390	.37600	.36562	150
.03130	.52600	.36468	
.02020	.34500	.36616	
.01240	.32100	.36747	
.02390	.36700	.36562	



.03130	.35200	.36468
.04040	.38000	.36379
.02570	.40000	.36537
.02210	.40500	.36588
.02570	.32400	.36537
.02940	.34900	.36490
.05160	.32900	.36311
.03670	.38000	.36412
.04760	.31500	.36330
.03100	.39100	.36471
.05120	.37600	.36313
.06190	.38900	.36288
.06720	.33800	.36291
.03860	.38900	.36394
.08130	.33700	.36349

160  
  
170  
  
210

-----

```

-----
I N      1      2      I
I-----+-----I
I A(0)  1      ,37001 I
I-----+-----I
I A(1)  1      ,22655 I
I-----+-----I
I A(2)  1      1,80007 I
I-----+-----I
I CHI   1      ,16127 I
-----

```

APROXIMACE ALGEBRAICKYM POLYNOMEM

=====

N = STUPEN POLYNOMU  
 X(I) = EXPERIMENTALNI NAMERENE HODNOTY  
 Y(I) = EXPERIMENTALNI NAMERENE HODNOTY  
 F(I) = FUNKCNI HODNOTY PROLOZENEHOO POLYNOMU V BODE X(I)  
 A(I) = REGRESNI KOEFICIENTY  
 CHI = SUMA KVADRATICKYCH ODCHYLEK RESENEHO POLYNOMU

Výběr 1., 2., 5. elementu

X(I)	Y(I)	F(I)	b
,29760	,61100	,64135	30
,26500	,52900	,58854	
,24550	,57600	,55981	
,29000	,60800	,62850	
,26750	,69900	,59238	
,31290	,62000	,66819	45
,20760	,49500	,51009	
,25520	,56900	,57383	
,33120	,73000	,70204	
,27000	,63600	,59625	
,15770	,50500	,45695	60
,14670	,45500	,44713	
,15550	,56100	,45493	
,20530	,46400	,50733	
,14010	,43000	,44156	
,13360	,43900	,43631	75
,13800	,45200	,43983	
,13580	,45800	,43806	
,12720	,43900	,43138	
,14010	,40600	,44156	
,09550	,41300	,41034	90
,10180	,42000	,41407	
,12720	,37100	,43138	
,12930	,39500	,43297	
,11650	,39900	,42364	
,08930	,44700	,40689	105
,08520	,44300	,40472	
,06880	,40500	,39701	
,09130	,42600	,40798	
,10180	,33800	,41407	
,06080	,41700	,39380	120
,05080	,33100	,39029	
,09130	,41000	,40798	
,06680	,34900	,39617	
,06280	,38500	,39457	
,00230	,33200	,38125	140
,00230	,37200	,38125	
,02530	,42600	,38388	
,00150	,36900	,38110	
,00150	,39700	,38110	150
,02390	,54100	,38187	
,03130	,36100	,38275	
,02020	,34800	,38155	
,01240	,40000	,38112	
,02390	,37000	,38187	

.03130	.39700	.38275
.04040	.43200	.38425
.02570	.44500	.38206
.02210	.34700	.38171
.02570	.36200	.38206
.02940	.33600	.38249
.05160	.40600	.38673
.03670	.33500	.38358
.04760	.39600	.38576
.03100	.38600	.38271
.05120	.41400	.38663
.06190	.35900	.38964
.06720	.41800	.39137
.03860	.34300	.38391
.08130	.35900	.39674

160  
170  
210

```

-----
I N      | 2      | I
I-----+-----I
I A(0)   |      .38115 | I
I-----+-----I
I A(1)   |      -.03698 | I
I-----+-----I
I A(2)   |      2.81367 | I
I-----+-----I
I CHI    |      .11098 | I
-----

```

URCENI HODNOT SMERODATNE ODCHYLKY A MEZI KONFIDENCNIHO INTERVALU

PRO PRUBEH KMP

SMERODATNA ODCHYLKA:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{I=1}^N (F_{1I} - F_{1S})^2} \quad F_{1S} = \frac{1}{N} \sum_{I=1}^N F_{1I}$$

KONFIDENCNI INTERVAL:

$$F_{1S} (+/-) \frac{TV * S}{\sqrt{N}} = \begin{matrix} F_{1SH} \\ F_{1SD} \end{matrix} \quad \text{PRO } N=1=4 \implies TV=2,776$$

- S = SMERODATNA ODCHYLKA
- N = POCET MERENI
- F<sub>1I</sub> = JMENOVITE PRETVORENI ( F<sub>11</sub>, ..., F<sub>15</sub> )
- F<sub>1S</sub> = STREDNI HODNOTA
- F<sub>1SH</sub> = HORNI MEZ KONFIDENCNIHO INTERVALU
- F<sub>1SD</sub> = DOLNI MEZ KONFIDENCNIHO INTERVALU

I	B	S	F <sub>1SH</sub>	F <sub>1SD</sub>			
I 30	!	,0334	!	,62026	!	,53734	I
I 45	!	,05514	!	,646	!	,51	I
I 60	!	,05128	!	,5467	!	,4193	I
I 75	!	,02011	!	,46337	!	,41383	I
I 90	!	,01894	!	,4331	!	,3661	I
I 105	!	,02513	!	,453	!	,3906	I
I 120	!	,03756	!	,425	!	,3318	I
I 140	!	,03354	!	,4156	!	,3324	I
I 150	!	,02268	!	,4062	!	,3498	I
I 160	!	,04108	!	,449	!	,347	I
I 170	!	,03306	!	,409	!	,325	I
I 210	!	,03304	!	,425	!	,343	I