

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**Fakulta strojní**

**Katedra tváření a plastů**

**Miroslav Baše**

**ROZŠIŘOVÁNÍ A PROTAHOVÁNÍ  
PŘI ZPRACOVÁNÍ PLECHŮ  
LISOVÁNÍM**

**Diplomová práce**

**1997**

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Obor 23-07-08

Strojírenská technologie

Zaměření: tváření kovů a plastů

Katedra tváření kovů a plastů

**Rozšiřování a protahování při zpracování plechů lisováním**

Miroslav Baše

KPT-625

Vedoucí diplomové práce: Prof. Ing. Viktor Mikeš, CSc., TU v Liberci

Konzultant: Ing. Michaela Kolnerová, TU v Liberci

Rozsah práce a příloh

Počet stran:.....43

Počet stran příloh:.....11

Počet obrázků:.....19

Počet výkresů:.....0

Počet modelů nebo jiných příloh:.....0

Datum: 14.5.1997

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra : tváření a plastů

Školní rok : 1995/96

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro **Miroslava B a š e**

obor **strojírenská technologie**

Vedoucí katedry Vám ve smyslu zákona č.172/1990 Sb. o vysokých školách určuje tuto diplomovou práci :

Název tématu : Rozšiřování a protahování při zpracování plechů lisováním.

### Zásady pro vypracování :

1. Seznámení se zadanou problematikou.
2. Analýza napjatosti a přetvoření.
3. Stanovení výchozích rozměrů polotovarů.
4. Mezní přetvoření při realizaci uvedených operací tváření plechů.
5. Rozbor získaných poznatků a závěr.

Rozsah grafických prací :

Rozsah průvodní zprávy : 50 stran

Seznam odborné literatury :

- /1/ GUBKIN, S.I. a kol.: Osnovy teorii obrabotky metallov davlenijem. GNTIML Moskva 1959
- /2/ KOL.: Lisování. SNTL Praha 1970
- /3/ TOMÁŠEK, J.: Směrnice pro stanovení mezních stupňů přetvoření pravidelných tvarů součástí z plechu. VUTS Brno 1975

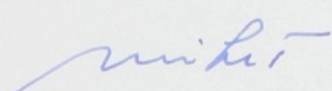
Vedoucí diplomové práce : Prof. Ing. Viktor Mikeš, CSc.

Konzultant : Ing. Michaela Kolnerová

Zadání diplomové práce : 19.2.1996

Termín odevzdání diplomové práce : 31.12.1996



  
Prof. Ing. Viktor Mikeš, CSc.

Vedoucí katedry

  
Prof. Ing. Jaroslav Exner, CSc.

Děkan

# ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra tváření a plastů

Obor: Strojírenská technologie

Diplomant: Miroslav Baše

Téma práce: Rozšiřování a protahování při zpracování plechů lisováním

Číslo diplomové práce: 625

Vedoucí diplomové práce: Prof. Ing. Viktor Mikeš, CSc., TU v Liberci

Konzultant: Ing. Michaela Kolnerová

Předmětem práce je analýza technologie rozšiřování a lemování otvorů v plechu. Analýza napjatosti v tvářenci je zpracována formou rešerše, analýza přetvoření je i experimentálně ověřena. Zabývá se též problematikou mezních stupňů deformace a jejich závislostí na způsobu zhotovení otvoru. Experimentálně jsou zjištěny vazby geometrických rozměrů výtažku a polotovaru. Ty jsou pak porovnány se vztahy uváděnými v odborné literatuře.

Pro experimenty byly použity kruhové přístřihy ocelového plechu FeP05 tloušťky 0,8 mm a Kohal 260 S tloušťky 2,0 mm. Průměry protahovaných otvorů byly voleny v rozmezí 20 až 60 mm, průměr tažníku byl konstantní, 100 mm.

Většina zjištěných závislostí je vyjádřena graficky v Přílohách 1-7.

### Poděkování

Na začátku této práce bych rád poděkoval Prof. Ing. V. Mikešovi, CSc. a ostatním členům Katedry tváření a plastů za pomoc při vypracování této diplomové práce.

*Bazr Miroslav*

# Obsah

|                                                         |   |
|---------------------------------------------------------|---|
| 1. Úvod .....                                           | 1 |
| 2. Základní charakteristiky .....                       | 2 |
| 3. Napětí deformace .....                               | 3 |
| 3.1 Anizotropie .....                                   | 3 |
| 3.2 Anizotropie deformace .....                         | 3 |
| 4. Statistická hodnota .....                            | 4 |
| 5. Experiment .....                                     | 5 |
| 5.1 Příprava vzorků .....                               | 5 |
| 5.2 Zkouška vzorků .....                                | 5 |
| 5.3 Popis experimentu .....                             | 5 |
| 6. Deformace vzorků .....                               | 6 |
| 6.1 Maximální dosažitelné hodnoty extenze .....         | 6 |
| 6.2 Měrná stopa protažení .....                         | 6 |
| 6.3 Průběh logaritmu lineární deformace ve vzorku ..... | 6 |
| 6.4 Maximální logaritmus deformace .....                | 6 |
| 7. Závěr .....                                          | 7 |
| 8. Literatura .....                                     | 8 |

"Místopřisažně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury."

V Liberci, 14.5.1997

Miroslav Baše

*Miroslav Baše*

# OBSAH

|                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Úvod .....</b>                                      | <b>9</b>  |
| <b>2. Základní charakteristiky technologie .....</b>      | <b>11</b> |
| <b>3. Napětí a deformace při protahování .....</b>        | <b>13</b> |
| 3.1 Analýza napětí .....                                  | 14        |
| 3.2 Analýza deformace .....                               | 17        |
| <b>5. Stanovení rozměrů polotovaru .....</b>              | <b>21</b> |
| <b>7. Experimentální část .....</b>                       | <b>25</b> |
| 7.1. Příprava vzorků .....                                | 25        |
| 7.2. Zkušební zařízení .....                              | 26        |
| 7.3. Popis experimentů .....                              | 28        |
| <b>8. Diskuse výsledků .....</b>                          | <b>34</b> |
| 8.1. Vliv hloubky výtažku na průměr otvoru .....          | 34        |
| 8.2. Určování výšky lemu .....                            | 35        |
| 8.3. Maximální dosažitelné hloubky výtažků .....          | 35        |
| 8.4. Mezní stupeň protahování .....                       | 36        |
| 8.5. Průběh logaritmických deformací ve výtažku .....     | 37        |
| 8.6. Maximální logaritmické deformace .....               | 38        |
| 8.7. Naměřený a vypočtený průběh radiální deformace ..... | 39        |
| <b>9. Závěr .....</b>                                     | <b>40</b> |
| <b>10. Literatura .....</b>                               | <b>42</b> |

## Seznam použitých zkratk a symbolů

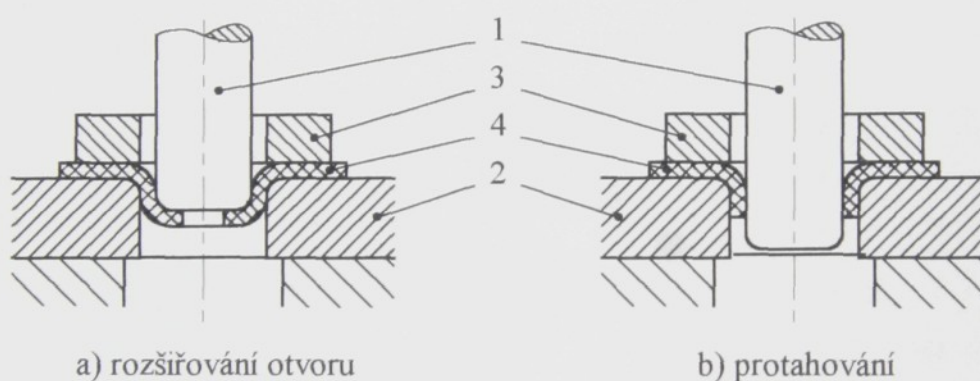
|                  |                                         |
|------------------|-----------------------------------------|
| $R_m$ [MPa]      | mez pevnosti v tahu                     |
| $R_{p0.2}$ [MPa] | nevýrazná mez kluzu                     |
| $A_{80}$ [%]     | celková tažnost určovaná na úseku 80 mm |
| $A_H$ [%]        | homogenní tažnost                       |
| $\sigma_t$ [MPa] | tangenciální napětí                     |
| $\sigma_r$ [MPa] | radiální napětí                         |
| $\sigma_k$ [MPa] | napětí na mezi kluzu                    |
| $\varphi_t$ [-]  | tangenciální přetvoření                 |
| $\varphi_r$ [-]  | radiální přetvoření                     |
| $\varphi_s$ [-]  | přetvoření ve směru tloušťky            |
| $\mu$ [-]        | koeficient tření                        |
| $k$ [-]          | koeficient protahování                  |
| $m_s$ [mm]       | střižná mezera                          |
| $m_t$ [mm]       | tažná mezera                            |
| $s$ [mm]         | tloušťka materiálu                      |

Význam ostatních symbolů je zřejmý z rozměrových nákresů.

Obecně platí:  $D_x^* = 2R_x^*$

# 1. ÚVOD

Rozšiřování a protahování otvorů je jedním ze způsobů plošného tváření plechů. Provádí se za účelem získání zaobleného otvoru s hrdlem (např. vypouštěcí otvory v lisovaných nádobách), nebo pro vytvoření dna s rozšířeným otvorem, zpravidla v ose (viz obr.1). Otvor, většinou kruhový, je vždy zhotoven již v polotovaru před lisováním, buď prostřížením, nebo obráběním. Nejčastěji se používají plechy ocelové, ocelové hlubokotažné, z korozivzdorné oceli a plechy hliníkové.



1-tažník, 2-tažnice, 3-přidržovač, 4-tvářený plech

Obr.1 Schema technologie

Čelo tažníku může být ploché s přechodovým rádiusem (obr.1), nebo kulové.

Vyjímečně lze tlusté ocelové plechy protahovat za tepla (700-800°C).

Rozšiřovat, resp. lemovat lze i otvory nekruhové, např. u výrobků typu obdélníkového víčka se zaoblenými rohy.

## Výhody technologie:

1. Zhotovení dna s otvorem, nebo lemu, vystouplého z roviny plechu, na jeden zdvih beranu lisu, při nízké spotřebě materiálu.
2. Relativně jednoduchý nástroj.
3. Jednoduché ustředění polotovaru (za vnější obvod nebo za otvor).

4. Nedochází ke zvlnění příruby.

5. Malé tvářecí síly.

Nevýhody technologie:

1. Omezená hloubka prolisu, resp. výška lemu, vlivem velkých tahových napětí na hraně otvoru a vyčerpání plastičnosti.
2. Nedodržení přesné kruhovitosti rozšířeného otvoru, resp. konstantní výšky lemu vlivem plošné anizotropie.
3. Ztenčení stěny na okraji otvoru (lemu).
4. Nepřesnosti v navrhování rozměrů polotovaru (např. průměru otvoru v přístřihu pro dosažení potřebné výšky lemu).

## 2. ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY TECHNOLOGIE

[1]

Pro vytvoření válcové stěny lemu se materiál nevtahuje z obvodu přístřihu, jako u hlubokého tažení, neboť příruba je pevně sevřena přidržovačem. Zásobu materiálu zde tedy tvoří mezikruží ohraničené otvorem v přístřihu a stěnou tažnice. Čím širší bude toto mezikruží, tím vyšší lem lze protáhnout. Při daném průměru tažníku, tj. průměru budoucího lemu, však nelze bez omezení zmenšovat otvor v přístřihu. Při protahování přístřihu s příliš malým výchozím otvorem dojde ke vzniku trhlinek, ev. k úplnému roztržení plechu na čele tažníku, a válcový lem potom nelze vytvořit. Maximální výška lemu je tedy omezena tvárností materiálu.

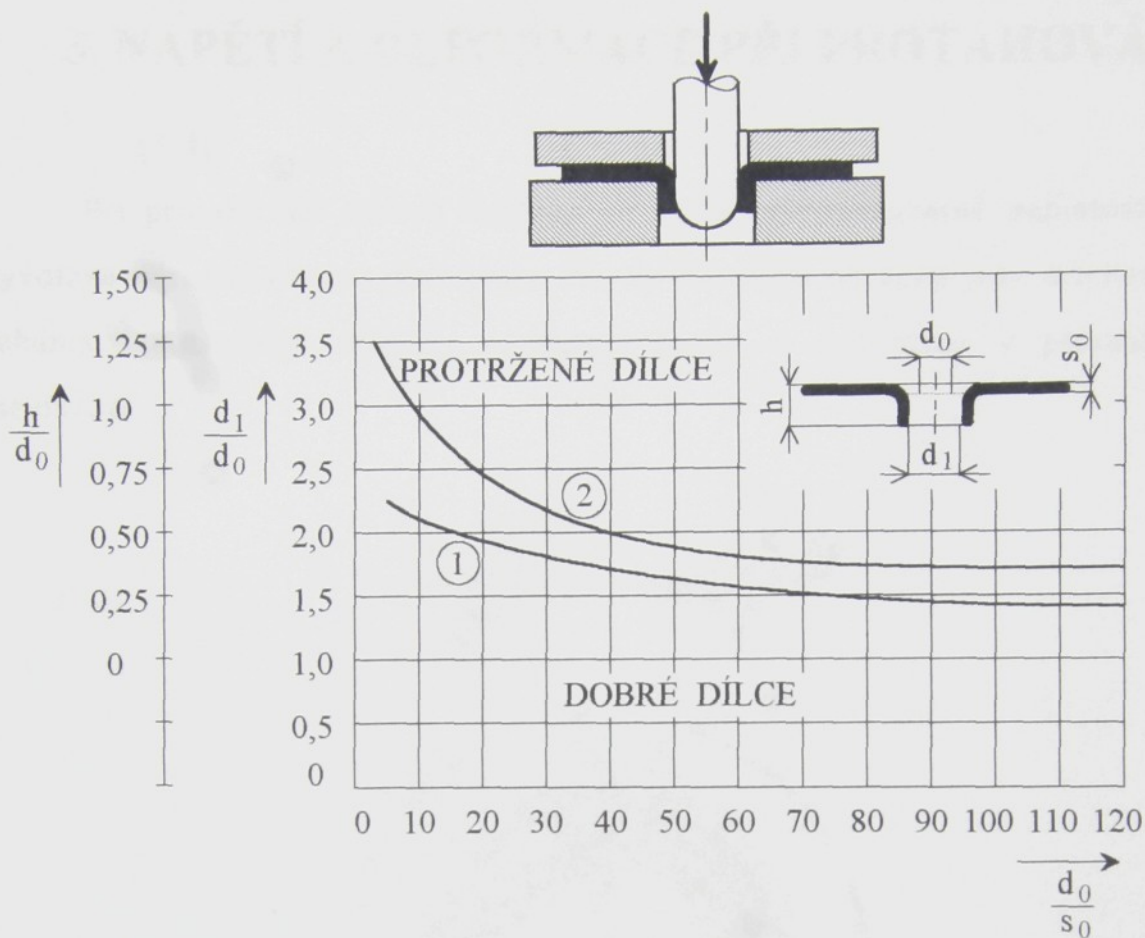
Parametr, charakterizující náročnost technologie na plastičnost materiálu, se nazývá koeficient rozšiřování a je definován:

$$k = \frac{r_0}{r_1} \quad (1)$$

kde  $r_0$ ...poloměr otvoru polotovaru

$r_1$  ...poloměr otvoru po protažení, resp. střední poloměr hrdla

Mezní hodnota  $k_m$  závisí na plastičnosti materiálu, způsobu zhotovení otvoru, teplotě při tváření, a na relativní tloušťce plechu polotovaru  $s_0/2r_0$ . Česká literatura [2] používá i převrácených hodnot těchto parametrů, viz obr.2.



STANOVENO ZA PODMÍNEK :

MATERIÁL : HLUBOKOTAŽNÝ OCELOVÝ PLECH TYPU ČSN 11320 A POD.

① ..... LEMOVANÝ OTVOR VYSTŘÍŽEN

② ..... LEMOVANÝ OTVOR VRTANÝ A ZAČIŠTĚNÝ

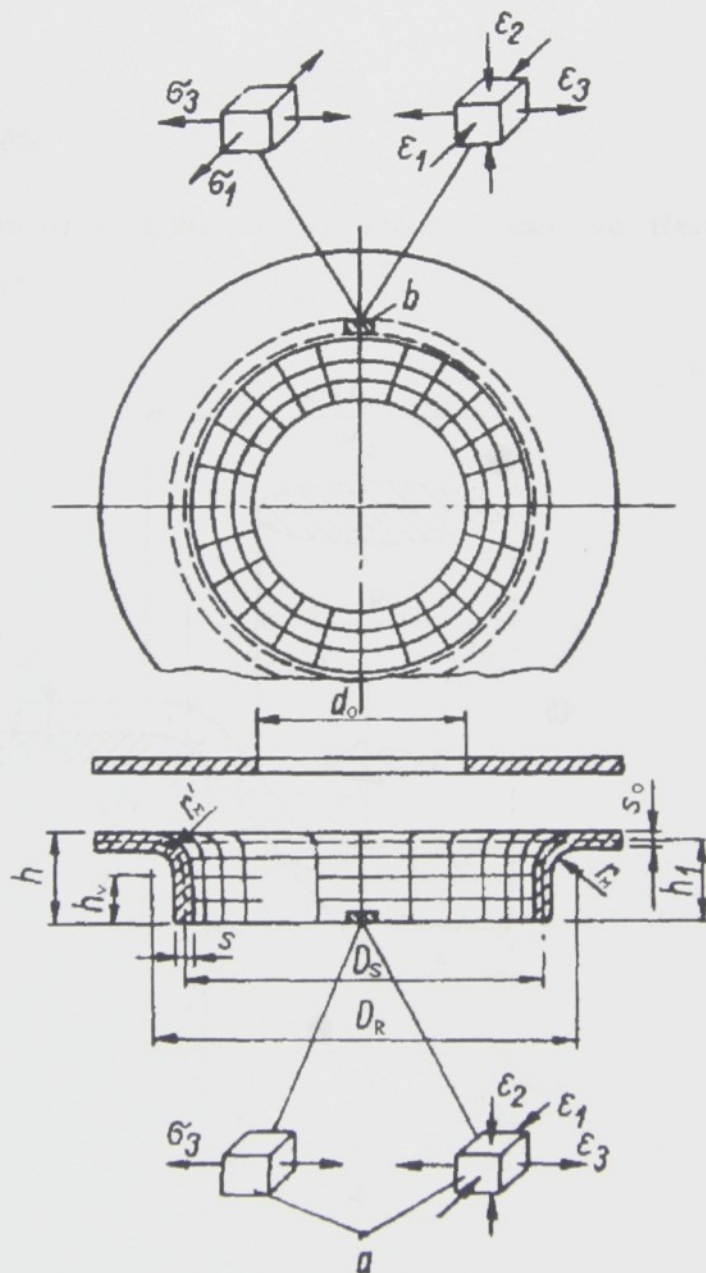
Obr.2 Mezní stupeň deformace

Ze vzájemné polohy křivek je vidět negativní vliv prostřihování otvoru v polotovaru na plasticitu. Vyčerpání plasticity v okolí střižné hrany a přítomnost ostřiny je totiž právě na průměru, který je vystaven maximálnímu přetvoření. Ohřevem nízkouhlikové oceli na teplotu 700 - 850°C dochází k posuvu křivky k vyšším hodnotám  $d_1/d_0$  až o 20% oproti křivce 1.

### 3. NAPĚTÍ A DEFORMACE PŘI PROTAHOVÁNÍ

[3,4]

Při protahování otvorů dochází ke složité nerovnoměrné napjatosti, která vyvolává nerovnoměrnou deformaci. Na následujícím obrázku jsou mechanickými schématy naznačeny průběhy a směry napětí a deformace v protahovaném mezikruží.



Obr.3 Schemata napjatosti a přetvoření

### 3.1 Analýza napětí

The diagram illustrates a curved pipe bend with the following labeled parameters:

- $\varnothing D_R$ : Outer diameter of the pipe.
- $R_2$ : Radius of the bend.
- $R_N$ : Radius of the bend.
- $r_N$ : Radius of the bend.
- $r_0$ : Radius of the bend.
- $90 - \alpha_1$ : Angle of the bend.
- $r'_M$ : Radius of the bend.
- $r'_N$ : Radius of the bend.
- $r_M$ : Radius of the bend.
- $r_l$ : Radius of the bend.
- $a$ : Distance from the center of the bend to the center of the pipe.
- $R_1$ : Radius of the bend.
- $R_S$ : Radius of the bend.
- $R_V$ : Radius of the bend.
- $R_M$ : Radius of the bend.
- $\alpha_1$ : Angle of the bend.
- $s_0$ : Thickness of the pipe wall.
- $III$ ,  $II$ ,  $I$ : Labels for different regions of the bend.

14

První část ohniska deformace I, přiléhající k rovině čela tažníku, není ovlivněna ohybovým momentem na zaoblené hraně a také lze zanedbat působení vnějších sil na povrch plechu (např. třecích).

Velikost radiálního napětí na daném poloměru  $r$  zde bude dána vztahem

$$\sigma_r^I = \sigma_k \left( 1 - \frac{r_1}{r} \right) \quad (2)$$

$\sigma_k$  ... napětí na mezi kluzu

$r_1 < r < a$ ,  $a = R_1 - r_N$

$r_1$  ... poloměr zvětšeného otvoru

$R_1$  ... poloměr posledního místa dotyku plechu s tažníkem

$r_N$  ... poloměr zaoblení hrany tažníku

Druhá část ohniska deformace II je ve styku se zaoblenou částí tažníku, a je vymezena úhlem opásání  $90^\circ - \alpha_1$ . Pro součinitel tření  $\mu \leq 0,2$  platí pro  $\sigma_r$  vztah

$$\begin{aligned} \sigma_r = \frac{\sigma_k}{\cos \alpha - b} [\cos \alpha - 2\mu \sin \alpha - (\cos \alpha_0 - 2\mu \sin \alpha_0) e^{\mu(\alpha_0 - \alpha)} + \\ + B_1 (\cos \alpha_0 - b) e^{\mu(\alpha_0 - \alpha)}] \end{aligned} \quad (3)$$

Na hranici II. a III. oblasti, kde  $r = R_1$  a  $\alpha = \alpha_1$ , má rovnice pro  $\sigma_r$  (po rozložení exponenciální funkce v řadu) tvar

$$\begin{aligned} \sigma_r^{II} = \sigma_k \left[ \frac{R_1 - r_1}{R_1} + 2\mu \frac{r'_N}{R_1} (1 - \sin \alpha_1) + \right. \\ \left. + \mu \left( \frac{\pi}{2} - \alpha_1 \right) \left( 1 - \frac{r_1}{a} + \frac{s_0}{4r'_N} \right) \frac{a}{R_1} + \frac{s_0}{4r'_N} \cdot \frac{a}{R_1} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

kde  $r'_N = r_N + s_0/2$  ... poloměr ohybu neutrální vrstvy materiálu o tloušťce  $s_0$  na tažníku

Část III ohniska deformace se deformuje opět bez působení vnějších sil na povrch a rozložení napětí je zde dáno

$$\sigma_r^{III} = \sigma_k \left( 1 - \frac{R_1}{r} \right) + B_2 \frac{R_1}{r} \quad (5)$$

kde konstantu  $B_2$  určíme z okrajových podmínek na hranici II. a III. úseku:  $r=R_1$ ,  $\sigma_m^{III} = \sigma_m^{II} + (\sigma_k \cdot s_0) / 4r'_N$ . Po dosazení dostaneme

$$\begin{aligned} \sigma_r^{III} = \sigma_k & \left[ \frac{R_2 - r_1}{R_2} + 2\mu \frac{r'_N}{R_2} (1 - \sin \alpha_1) + \right. \\ & \left. + \mu \left( \frac{\pi}{2} - \alpha_1 \right) \left( 1 - \frac{r_1}{a} + \frac{s_0}{4r'_N} \right) \frac{a}{R_2} + \frac{s_0}{4r'_N} \left( \frac{a + R_1}{R_2} \right) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

Maximální hodnota napětí je rovna

$$\begin{aligned} \sigma_{r_{\max}} = \sigma_k & \left[ 1 - \frac{r_1}{R_2} + 2\mu \frac{r'_N}{R_2} (1 - \sin \alpha_1) + \right. \\ & \left. + \mu \left( \frac{\pi}{2} - \alpha_1 \right) \left( 1 - \frac{r_1}{a} + \frac{s_0}{4r'_N} \right) \frac{a}{R_2} + \frac{s_0(a + R_1)}{4r'_N R_2} + \frac{s_0}{4r'_M} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

kde  $R_2$ ... poloměr posledního místa dotyku plechu s tažnicí

$r'_M$ ... poloměr ohybu neutrální vrstvy materiálu o tloušťce  $s_0$  na hraně

tažnice  $r'_M = r_M + s_0/2$ .

Úhel  $\alpha_1$  se mění od  $\alpha_1 = \pi/2$  na počátku deformace do  $\alpha_1 = 0$ , kdy vznikne válcová plocha (při vniknutí čela tažníku do hloubky  $r_N + r_M + s$  od počátku deformace).

Za předpokladu, že se délka radiální přímky polotovaru během deformace nemění a tažná mezera je přibližně rovna tloušťce plechu, platí následující vztah mezi okamžitým poloměrem rozšířeného otvoru  $r_1$  a úhlem  $\alpha_1$ :

$$r_1 = r_0 + (r_N + r_M + s_0) \left( 0,57 + tg \frac{\alpha_1}{2} - \alpha_1 \right) \quad (8)$$

Na začátku deformace ( $\alpha_1 = \pi/2$ ) je

$$r_1 = r_0$$

a v pozdější fázi, kdy  $\alpha_1$  dosáhne nulové hodnoty, je

$$r_1 = r_0 + 0,57(r_N + r_M + s_0) \quad (9)$$

pokud platí  $r_{0m} \leq a$  (okraj rozšiřovaného otvoru se ještě nedostal na zaoblenou hranu tažníku).

Ze vztahů 7 a 8 vyplývá, že  $\sigma_m$  dosáhne maxima hned v počátku deformace, kdy  $\alpha_1 \cong \pi/2$  a  $r_1 \cong r_0$ .

### 3.2 Analýza deformace

Pro popis přetvoření je třeba zavést dílčí logaritmické deformace v jednotlivých směrech:

tangenciálním (obvodovém)

$$\varphi_t = \ln \frac{r_i}{r_{i0}} \quad (10)$$

radiálním

$$\varphi_r = -\frac{2r_0 - r_{i0}}{r_{i0} + r_0} \varphi_t = \ln \frac{l_i}{l_{i0}} \quad (11)$$

a ve směru tloušťky

$$\varphi_s = -\frac{2r_{i0} - r_0}{r_{i0} + r_0} \varphi_t = \ln \frac{s}{s_0} \quad (12)$$

kde  $r_{i0}$  ... vzdálenost i-tého elementu od osy otvoru v přístřihu

$r_i$  ... vzdálenost i-tého elementu od osy výtažku (středu křivosti obvodu)

$R_v$  ... poloměr vnější válcové plochy lemu, v případě úplného protažení

$$r_i = R_v$$

$l_{i0}, s_0$  ... počáteční délka, tloušťka zvoleného elementu

$l_i, s$  ... deformovaná délka, tloušťka zvoleného elementu

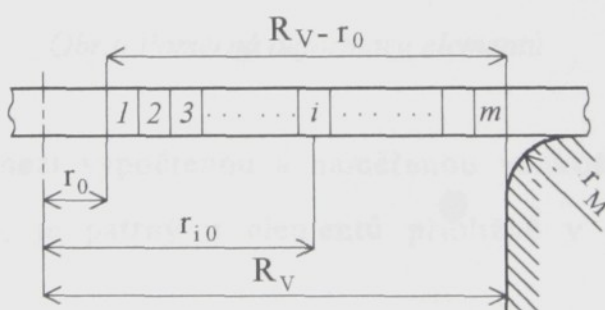
Vztah (11) bude později prověřen experimentem na vzorcích s deformační sítí.

Ze vztahu (11) je vidět, že pro  $r_{i0} < 2r_0$  bude radiální deformace elementu záporná - stlačení, pro  $r_{i0} = 2r_0$  nulová a pro  $r_{i0} > 2r_0$  dojde k protažení. Po úpravě vztahů (11), (12) dostáváme

$$l_i = l_{i0} \left( \frac{r_{i0}}{r_i} \right)^{\frac{2r_0 - r_{i0}}{r_0 + r_{i0}}} \quad (13)$$

$$s = s_0 \left( \frac{r_{i0}}{r_i} \right)^{\frac{2r_{i0} - r_0}{r_{i0} + r_0}} \quad (14)$$

Provedením experimentů s použitím deformačních sítí, při zanedbatelně malé tažné mezeře, byly zjištěny průběhy deformací v radiálním směru (obr.6). Číslování elementů je patrné z obr.5.



Obr.5 Rozdělení deformované části přístřihu

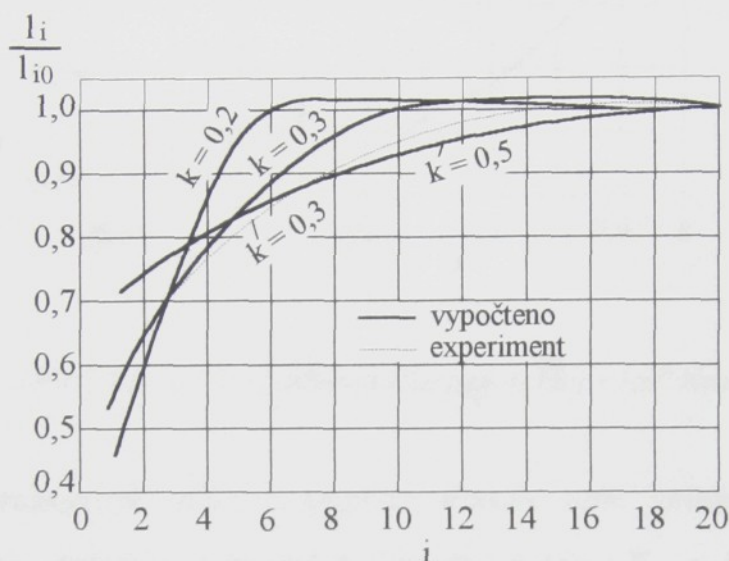
Vzdálenost i-tého elementu od osy ( $i=1 \dots m$ ) je dána

$$r_{i0} = r_0 + \frac{R_V - r_0}{m} (i - 1) \quad (15)$$

kde  $m$  ... celkový počet elementů od hrany otvoru po stěnu tažnice

$$\frac{R_V - r_0}{m} = l_{i0} \quad \dots \text{původní délka elementu}$$

Obr.6 zachycuje závislost poměrné deformace elementu v radiálním směru na vzdálenosti od osy [3]. Byla použita nízkouhlíková ocel  $s_0=2,95$  mm,  $d_0=2r_0=10$  mm,  $m=20$  a sférický tažník ( $r_N=R_N$ ), aby se zmenšil vliv ohybu a narovnání elementů při přechodu přes jeho hranu.



Obr.6 Poměrná deformace elementů

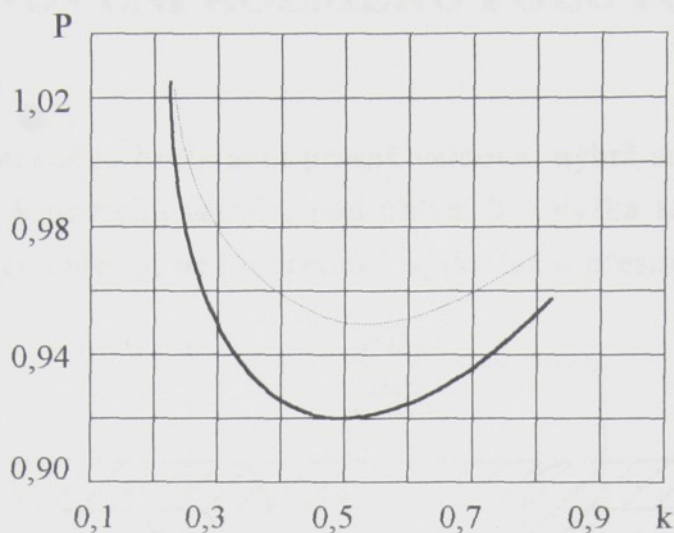
Největší rozdíl mezi vypočtenou a naměřenou velikostí deformace, který však nepřevyšuje 10%, je patrný u elementů přibližně v polovině tvářeného mezikruží .

Pro element na hraně otvoru po úplném protažení,  $r_{i0}=r_0$ ,  $r_i \cong R_v$ ,  $i=1$ , platí podle [3]

$$\frac{l_i}{l_{i0}} = \frac{s}{s_0} = \sqrt{\frac{r_0}{R_v}} \quad (16)$$

Sečtením délek všech deformovaných elementů  $l_i$  dostaneme rozvinutou délku profilu v radiálním řezu  $L_r$ . Obr.7 ukazuje poměr této délky ku původní šířce mezikruží  $L_r/(R_v - r_0)=P$  v závislosti na koeficientu rozšiřování  $k=r_0/R_v$  .

## 5. STANOVENÍ ROZMĚRU POLOTOVARU



Obr. 7 Vliv koef. rozšiřování na deformaci v radiálním směru

Změna rozvinuté délky radiálního vlákna není velká: 92-102% původní délky. Plná čára představuje případ deformace v délce  $R_v - r_0$  (fiktivní případ ostré hrany tažnice). Skutečná délka deformované oblasti je však  $R_v + r_M - r_0$ . Tuto skutečnost respektuje čárkovaná křivka, pro rádius zaoblení tažnice  $r_M = 0,2R_v$ .

Analýzou procesu přechodu materiálu přes hranu tažníku a ohybu na hraně tažnice byl sestaven vzorec pro výpočet rozvinuté délky  $L_r$

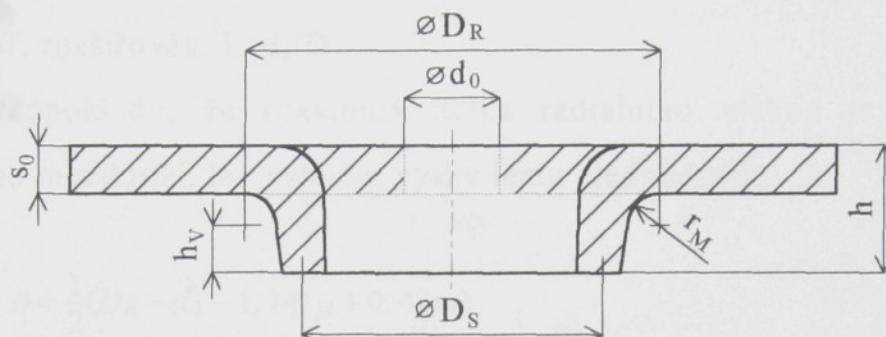
$$L_r = P(R_1 - r_0) + 0,4s_0 \left(1 - \frac{r_0}{r_M}\right) + \frac{0,25s_0r_N}{r_N + 0,5s_0} \left(1 - \frac{r_0}{r_N}\right)^2 \quad (17)$$

kde  $P$  ... viz obr. 7, ostatní symboly odpovídají obr. 4

## 5. STANOVENÍ ROZMĚRŮ POLOTOVARU

[1,3,4,5]

Stěna vytaženého hrdla není přesně válcová, nýbrž směrem k okraji lemu se zužuje, přimyká k povrchu tažníku pod úhlem  $\beta$ . Výška tohoto mírně kónického lemu je tedy o něco menší, než teoretická výška lemu přesně válcového.



Obr.8 Rozměry lemovaného přístřihu

Zmenšení výšky lemu způsobené tažnou mezerou  $m_t$  je dáno :

$$\Delta h_v = (m_t - s_0) \left( \frac{1}{\sin \beta} - \cot g \beta \right) \approx 0,3(m_t - s_0) \quad (18)$$

Výška hrdla vytvořeného lemováním je podle [3] dána :

$$h = \frac{a}{2}(D_R - d_0) + s_0 \left( 1 - \frac{d_0}{D_S} \right) \left[ 0,4 + \frac{0,125(D_S - d_0)}{r_N + 0,5s_0} \right] + 0,22s_0 - 0,57r_M - 0,3(m_t - s_0) \quad (19)$$

$D_R$ ... vzdálenost středů poloměrů zaoblení tažnice

Ostatní použité symboly korespondují s obr.4 a 8.

Ze vztahu (19) lze vyjádřit potřebný průměr otvoru v přístřihu  $d_0$  pro vytažení lemu o výšce  $h$ :

$$d_0 = \frac{2h - aD_R - s_0 \left[ 0,8 + \frac{0,25(D_s - d_0)}{r_N + 0,5s_0} \right] - 0,44s_0 + 1,14r_M + 0,6(m_t - s_0)}{a + \frac{s_0}{D_s} \left[ 0,8 + \frac{0,25(D_s - d_0)}{r_N + 0,5s_0} \right]} \quad (20)$$

kde  $D_s$  ... střední průměr válcové části hrdla.

Vztah 20 je sice implicitní, řešení lze však nalézt při znalosti přibližné velikosti koef. rozšiřování  $k = d_0/D$ .

Za předpokladu, že rozvinutá délka radiálního vlákna je rovna šířce rozšiřovaného mezikruží, lze výpočet výšky lemu zjednodušit:

$$h = \frac{1}{2}(D_R - d_0 - 1,14r_M + 0,43s_0) \quad (21)$$

$$h = \frac{1}{2}(D_N - d_0 + 0,9r_M + 2,4s_0) \quad (22)$$

Vztah 20 je poněkud přesnější a lépe zachycuje vliv zaoblení nástroje.

Podle [1] lze výšku lemu vypočítat podle empirického vztahu

$$h = R_S - r_0 - 0,43r_M + 0,72s_0 \quad (23)$$

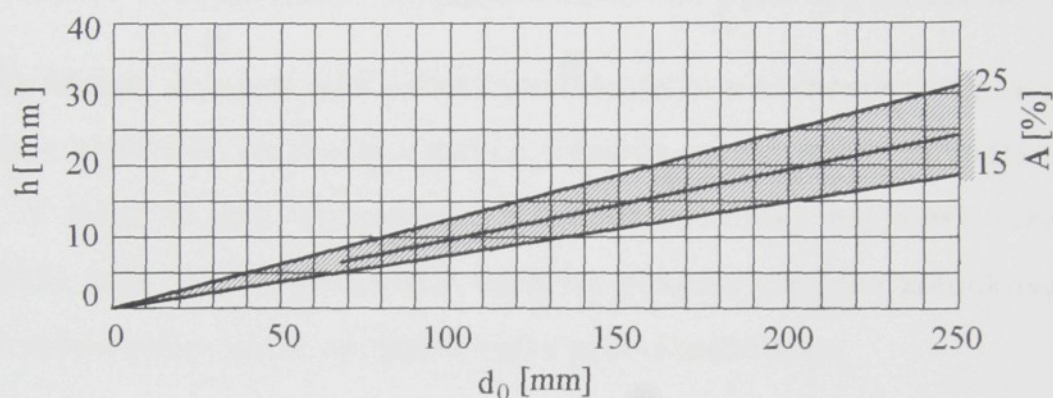
Pro přibližný výpočet velikosti otvoru v přístřihu uvádí česká literatura [5] relativně jednoduchý vztah, neuvažující zaoblení přechodu válcové části do roviny příruby  $r_M$ .

$$d_0 = \sqrt{D_S^2 - 4D_S h} \quad (24)$$

Ten je platný při zanedbatelné změně tloušťky plechu během protahování. Za téhož předpokladu uvádí [4] empirický vztah

$$d_0 = D_S + 0,86 \left( r_M + \frac{s_0}{2} \right) - 2h \quad (25)$$

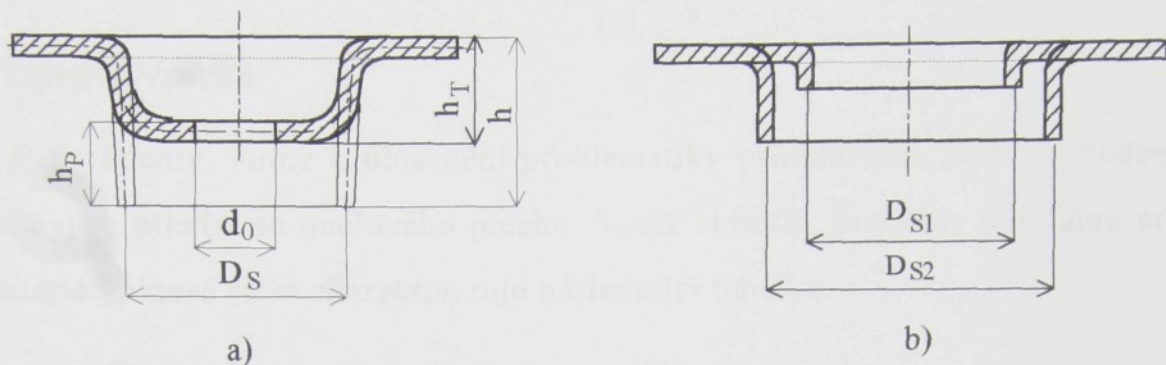
S rostoucí výškou lemu je nutné zmenšovat průměr otvoru v přístřihu. Maximální výška lemu je však omezena tažností materiálu, neboť při protahování přístřihu s příliš malým otvorem dojde ke vzniku radiálních trhlin u okraje otvoru, a to ještě před úplným protažením. Následující obrázek ukazuje vliv tažnosti na maximální dosažitelnou výšku lemu. Jako nezávisle proměnná je zvolen průměr otvoru v přístřihu  $d_0$ . Přitom předpokladem k dosažení maximální výšky lemu  $h_{\max}$  je volba optimálního průměru lemu  $D_s$ .



Obr. 9 Nomogram k určení dosažitelné výšky protažení

#### Možnosti zvětšení výšky lemu při protahování [4]

Je-li třeba dosáhnout větší výšky lemu  $h$ , než lze vyrobit jednou operací protahování, zařadí se před protahování hluboké tažení. Nejprve se z plechu vytáhne kalíšek o hloubce, která se rovná rozdílu požadované a protahováním dosažitelné hloubky, a pak se ve dně prostřihne otvor průměru  $d_0$ . Následuje jeho protažení, přičemž lze použít tentýž tažný nástroj. Jinou cestou je postupné protahování na více průměrů lemu. Mezi jednotlivé operace protahování se zařadí rekrytalizační žihání.



Obr. 10 Protahování s předcházejícím tažením (a) a postupné protahování (b)

Za účelem dosažení lepší jakosti povrchu lemu a rovnoměrné tloušťky stěny ve válcové ploše lze protahovat s tažnou mezerou menší, než je původní tloušťka plechu. V tažné mezeře tím vzniknou výhodné podmínky napjatosti (všestranný tlak), takže např. u nízkouhlíkových ocelí lze původní tloušťku zredukovat až na 50%. Ztenčení stěny odpovídá nárůst výšky protaženého lemu.

## 7. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 7.1. Příprava vzorků

Experimenty, nutné k objasnění problematiky protahování, byly provedeny na kruhových přístřizích ocelového plechu. Tytéž zkoušky proběhly paralelně pro dva materiály, které blíže charakterizuje následující tabulka.

*Tab.1 Zkoušené materiály*

| Název       | Výrobce      | Tloušťka [mm] | $R_{p0,2}$ [MPa] | $R_m$ [MPa] | $A_{80}$ [%] | $A_H$ [%] |
|-------------|--------------|---------------|------------------|-------------|--------------|-----------|
| FeP05       | Voest Alpine | 0,8           | 152              | 269         | 47,8         | 25,6      |
| Kohal 260 S | VSŽ Košice   | 2             | 280              | 395         | 34,7         | 16,5      |

Vnější obvod přístřihů byl v případě tenčího plechu FeP05 vystřižen ve střižném nástroji na excentrickém lisu, tlustší Kohal nejprve předstřižen na tabulových nůžkách na přibližný tvar kruhu a potom soustružen v sevření mezi přírubami na čistou míru vnějšího průměru (210 mm).

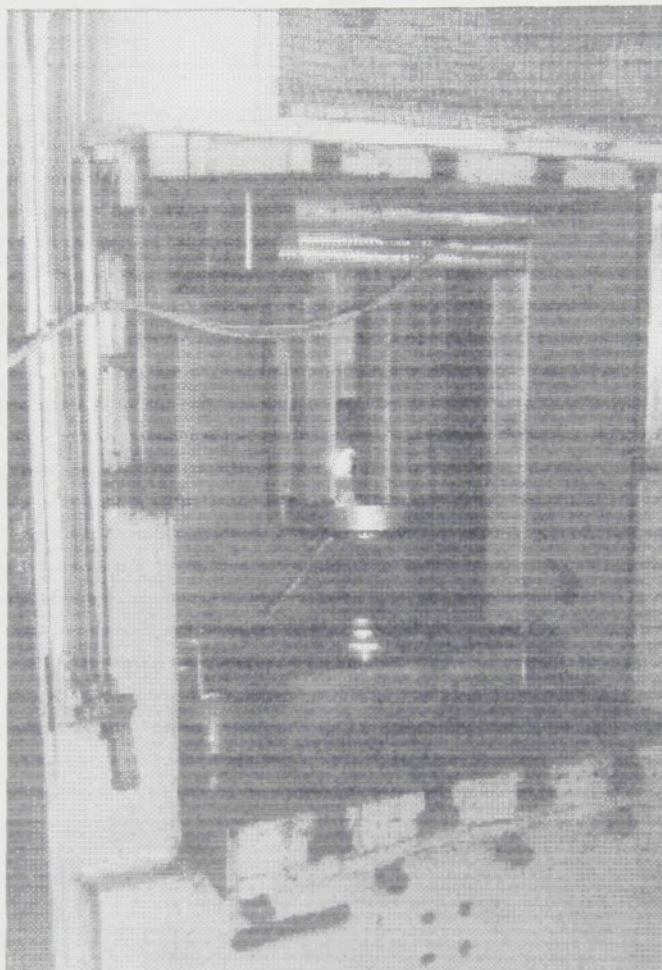
Otvory ve vzorcích byly nejprve předstřiženy ve střižném nástroji nebo předvrtány na soustruhu a následně přesoustruženy na požadovaný průměr  $d_0$ . V případě dvou průměrů  $d_0$ , u kterých byl sledován vliv stříhání na plastičnost, byly otvory pouze prostřiženy. Střižná mezera byla u obou průměrů stejná, 0,25 mm.

Na vzorky, na kterých byl zkoumán průběh deformací v celém tvářeném pásmu, byla ještě před zhotovením otvoru vyryta deformační síť soustředných kružnic.

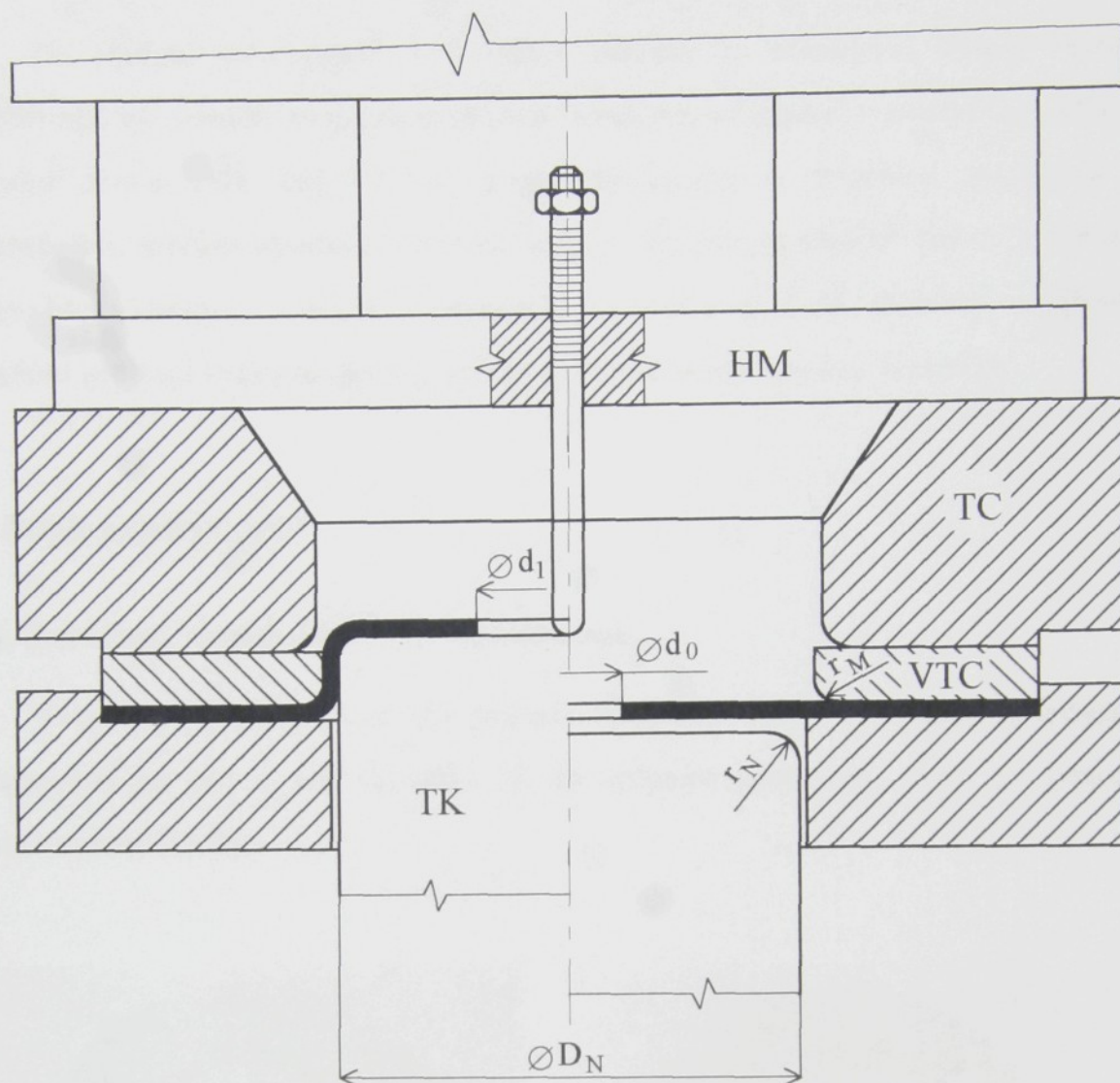
I při maximálním využití vzorků z hlediska jejich vypovídací hodnoty při deformaci a po ní, bylo třeba připravit pro každý plech 36 vzorků, z toho 12 orýsovaných deformační sítí.

## 7.2. Zkušební zařízení

K protažení vzorků byl použit hydraulický lis CBA 300/63 (obr.11), osazený protahovacím nástrojem (obr.12).



*Obr.11 Hydraulický lis CBA 300/63*



TK-tažník, TC-tažnice, VTC-vložka tažnice, HM-hloubkoměr

Obr.12 Schema zkušebního protahovacího nástroje

K dosažení optimální tažné mezery pro oba materiály bylo nutno vybavit původní nástroj tažnou vložkou, centrovanou společně s přístřihem v zahloubení základové desky. Přesné rozměry funkčních částí nástroje uvádí následující tabulka.

Tab.2 Rozměry protahovacího nástroje [mm]

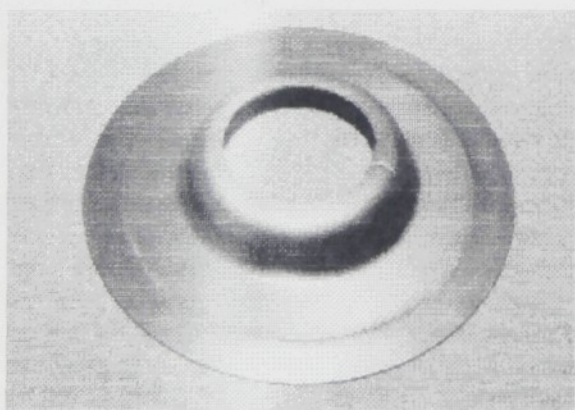
|                               |        |        |
|-------------------------------|--------|--------|
| Jmen. tloušťka plechu vzorku  | 0,8    | 2      |
| Průměr tažníku $D_N$          | 99,85  |        |
| Zaoblení tažníku $r_N$        | R10,5  |        |
| Průměr vložky tažnice $D_M$   | 101,45 | 103,85 |
| Zaoblení vložky tažnice $r_M$ | R5     | R10    |
| Tažná mezera $m_t$            | 0,8    | 2      |

Po sevření polotovaru s vložkou tažnice k základové desce beranem přidržovače byl vzorek zespoda protažen tažníkem do úplného protažení, nebo do mezního stavu (viz kap.7.3.2.), popř. na zvolenou hloubku protažení. K orientačnímu měření hloubky vniknutí tažníku do plechu sloužil hloubkoměr HM. Tyčka hloubkoměru, vedená hranolkem, se opírá o čelo tažníku, a hloubku protažení indikují rysky na tyčce, vystupující nad horní plochu hranolku.

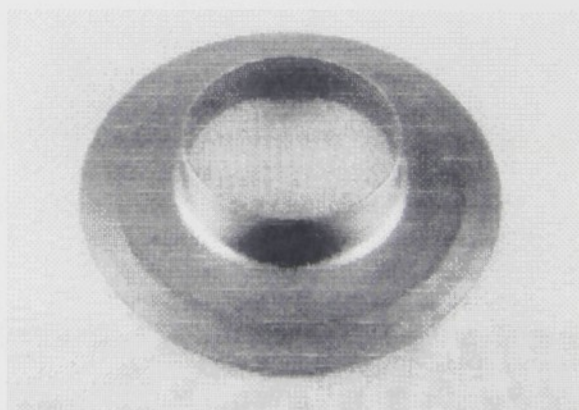
### 7.3. Popis experimentů

#### 7.3.1. Závislosti rozměrů výtažku a polotovaru

Vzorky s obráběnými otvory průměru 20, 25,...po 5...60 mm byly postupně protahovány po cca 5 mm hloubky až do úplného protažení, nebo do mezního stavu (viz kap.7.3.2).



a) do mezního stavu



b) úplně protažen

*Obr.13 Protažené vzorky*

Po každém dílčím protažení byl vzorek vyjmut z nástroje, posuvkou změřen průměr rozšířeného otvoru a dílenským hloubkoměrem změřena hloubka výtažku. Pro každý průměr  $d_0$  byly protaženy dva vzorky. Výsledkem je závislost průměru rozšířeného otvoru na hloubce výtažku (Příloha 1), pro úplně protažené vzorky závislost výšky lemu na průměru otvoru v přístřihu (Příloha 2). Do téhož obrázku

byly zaneseny i výšky lemu vypočtené pomocí teoretických i empirických vztahů převzatých z odborné literatury. Navíc byla sledována maximální dosažená hloubka protažení (tj. hloubka na mezním stavu), resp. výška lemu závislosti na průměru otvoru v přístřihu (Příloha 3).

### 7.3.2. Mezní přetvoření

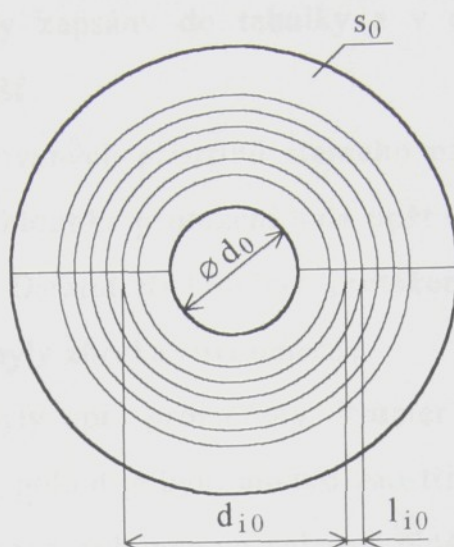
Výsledky měření z kap. 7.3.1. byly použity pro sestrojení grafu mezních stupňů rozšiřování. Jako parametr stupně přetvoření byl zvolen poměr  $h_{\max} / d_0$ , tedy hloubka výtažku na mezním stavu k počátečnímu průměru otvoru v přístřihu. Za mezní stav při rozšiřování se považoval okamžik, kdy u rozšiřovaného otvoru na čele tažníku vznikla první trhlinka (viz. obr.13a). Lokální ztenčení a vznik trhlinky byl pozorován shora mezi rozpěrnými sloupky nástroje. Po protažení obráběných vzorků z kap. 7.3.1. byly do mezního stavu protaženy ještě vzorky s prostřiženými otvory průměru 25 a 35 mm (3 vzorky od každého průměru). Jejich hodnoty  $h_{\max} / d_0$  byly pro porovnání zaneseny do téhož grafu.

### 7.3.3. Analýza přetvoření

U tří vybraných průměrů obrobených otvorů  $d_0$  20, 40 a 60 mm byl sledován průběh radiální a tangenciální (obvodové) deformace.

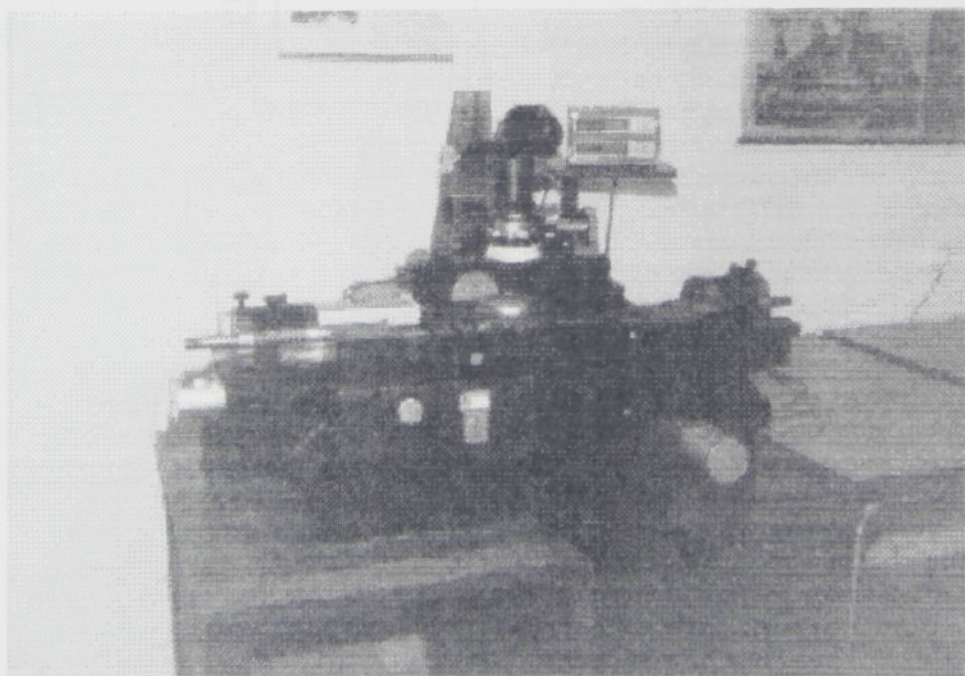
Příprava vzorků:

- Ve sklíčidle soustruhu se navrtávačkem lehce naznačil střed kruhového přístřihu.
- Ostrým důlčíkem s vrcholovým úhlem cca  $60^\circ$  se střed zvýraznil.
- Přes střed byla vyryta přímá ryska, určující místo měření průměrů budoucích kružnic.
- Dílenským kružítkem byla do vzorku vyryta síť soustředných kružnic s konstantním odstupem  $l_{i0}=2,5$  mm až do průměru 85 mm.
- Běžným postupem (viz kap.7.1.) byl ve vzorku zhotoven otvor průměru  $d_0$ .



*Obr. 14 Orýsovaný vzorek*

Pro každý průměr  $d_0$  byly takto zhotoveny 4 vzorky, které se po označení číselným kódem proměřily na univerzálním měřícím mikroskopu s přesností na 0,01 mm.

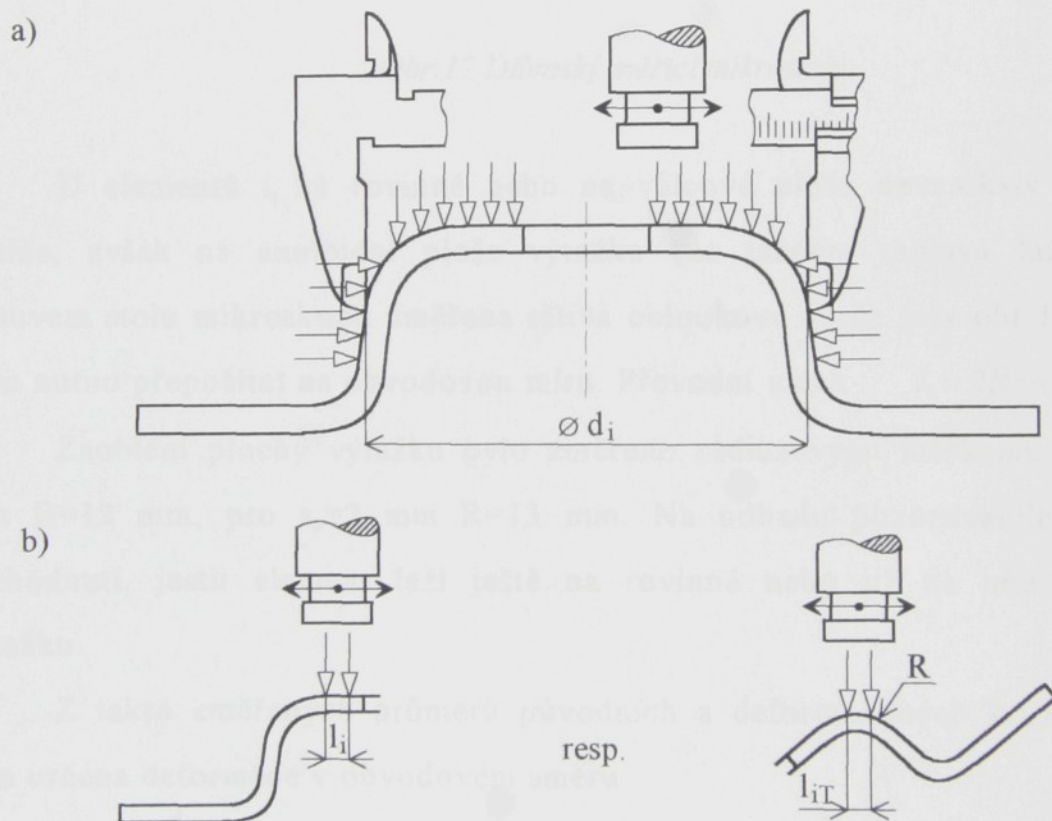


*Obr.15 Univerzální měřící mikroskop Zeiss*

Hodnoty  $d_{i0}$ ,  $l_{i0}$  byly zapsány do tabulky a v dalším postupu byl každý vzorek vyhodnocován zvlášť.

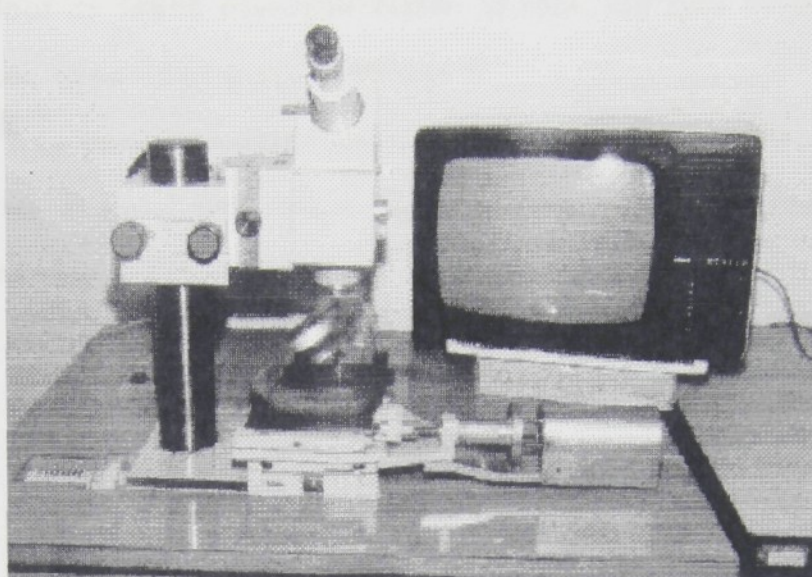
Každý ze čtyř orýsovaných přístřihů stejného průměru  $d_0$  byl protažen na jinou hloubku. Maximální hloubka protažení byla opět dána buď mezním stavem, nebo úplným protažením. Ostatní tři hloubky protažení byly rozvrženy tak, aby rozdíly deformací vzorků byly zhruba rovnoměrné.

Protažené vzorky byly opět proměřeny. Průměr protažených kružnic  $d_i$  se měřil opět na mikroskopu, pokud je bylo možno zaostřit. Kružnice, nacházející se na strmé anuloidní ploše nebo dokonce na válcové ploše, byly změřeny posuvkou se 0,02 mm noniem (viz. obr. 16a).



Obr. 16 Měření protažených vzorků

Pro měření diferencí poloměrů  $l_i$  byl použit dílenský měřicí mikroskop s naklápěcím stojánkem (obr. 17). Pro usnadnění polohování bylo v některých případech nutno vyříznout ze vzorku pouze měřenou část deformované plochy.



*Obr.17 Dilenský měřicí mikroskop*

U elementů  $l_i$  na rovinné nebo na válcové ploše nevznikaly při měření potíže, avšak na anuloidní ploše výtažku (na tažném rádiu tažníku) byla posuvem stolu mikroskopu změřena tětiva obloukové úseče (viz obr.16b), kterou bylo nutno přepočítat na obvodovou míru. Převodní vztah :  $l_i = 2R \arcsin \frac{l_{iT}}{2r}$

Zaoblení plochy výtažku bylo změřeno radiusovými měrkami: pro  $s_0=0,8$  mm  $R=12$  mm, pro  $s_0=2$  mm  $R=13$  mm. Na odhadu pozorovatele však bylo rozhodnutí, jestli element leží ještě na rovinné nebo již na anuloidní ploše výtažku.

Z takto změřených průměrů původních a deformovaných kružnic  $d_{i0}$  a  $d_i$  byla určena deformace v obvodovém směru:

$$\varphi_t = \ln \frac{d_i}{d_{i0}}$$

Obdobně bylo možno s odpovídajícími hodnot  $l_i$ ,  $l_{i0}$  spočítat v daném místě výtažku radiální deformaci:

$$\varphi_r = \ln \frac{l_i}{l_{i0}}$$

Velikosti logaritmických deformací  $\varphi_t$ ,  $\varphi_r$  v závislosti na poloze daného elementu od osy vzorku, je zobrazeno v Příloze 5. Číslo jednotlivých křivek určují hloubku v mm, na kterou byl vzorek protažen. Deformace  $\varphi_t$ ,  $\varphi_r$  nabývají

maximálních hodnot na hraně otvoru výtažku. O tom, jak tyto deformace rostou během protahování, vypovídají grafy v Příloze 6.

V Příloze 7 je porovnán skutečný naměřený průběh radiální deformace ve vzorku s průběhem radiální deformace podle Gubkinovy teorie [3]. Jedná se v podstatě o ověření vztahu (11).

Skutečnými zprávy, měření, bylo provedeno protažení vzorku 1.

Protahování bylo provedeno na vzorku 1, který byl v předstihu naměřen.

Protahování bylo provedeno na vzorku 1, který byl v předstihu naměřen.

Protahování bylo provedeno na vzorku 1, který byl v předstihu naměřen.

Protahování bylo provedeno na vzorku 1, který byl v předstihu naměřen.

Protahování bylo provedeno na vzorku 1, který byl v předstihu naměřen.

Protahování bylo provedeno na vzorku 1, který byl v předstihu naměřen.

Protahování bylo provedeno na vzorku 1, který byl v předstihu naměřen.

Protahování bylo provedeno na vzorku 1, který byl v předstihu naměřen.

Protahování bylo provedeno na vzorku 1, který byl v předstihu naměřen.

Protahování bylo provedeno na vzorku 1, který byl v předstihu naměřen.

Protahování bylo provedeno na vzorku 1, který byl v předstihu naměřen.

Protahování bylo provedeno na vzorku 1, který byl v předstihu naměřen.



Obr. 13 Ověření vztahu (11) pro vzorek 1. (R=10, k=0,0001, E=210000)

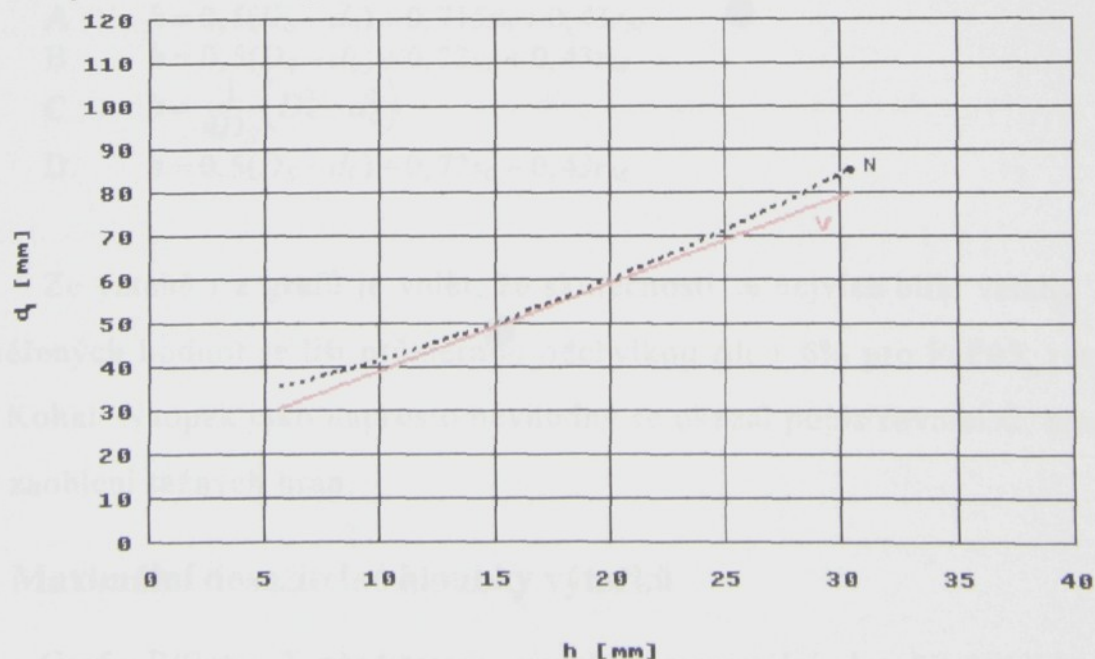
## 8. DISKUSE VÝSLEDKŮ

Většina experimentálně zjištěných skutečností je graficky vyjádřena v Přílohách 1-7.

### 8.1. Vliv hloubky výtažku na průměr otvoru

Sledujeme-li závislost rozšíření otvoru na hloubce protažení (Příloha 1), zjišťujeme, že materiál Kohal byl schopen úplného protažení (plné čáry) pro menší průměry otvorů  $d_0$  (až 35 mm) a vytvářel tedy vyšší lemy, než FeP05, u kterého ještě vzorky s průměrem  $d_0=40$  mm dosahovaly mezního stavu (čárkované čáry). Nelinearita křivek roste s průměrem otvoru v přístřihu  $d_0$ . Je to způsobeno zvýšeným podílem tažného radiusu tažnice u vzorků se zmenšenou šířkou tvářeného mezikruží, tj. u vzorků s větším průměrem  $d_0$ . Za předpokladu, že by průměrná radiální deformace byla nulová (délka radiálního vlákna konstantní), a poloměr zaoblení tažné hrany byl roven nule, byla by výška lemu rovna šířce tvářeného mezikruží  $h=R_v-r_0$ . Pak by byla výše uvedená závislost lineární.

Na obr.18 je porovnání naměřené (N) a vypočtené (V) závislosti roztažení otvoru na hloubce protažení. Křivka V je grafem funkce  $d_1=2h+18,8$ , vycházející z Gubkinovy teorie.



Obr. 18 Ověření teorie zachování konst. délky radiálního vlákna  
(FeP05,  $s_0=0,8$  mm,  $d_0=35$  mm)

## 8.2. Určování výšky lemu

Vliv průměru otvoru v přístřihu  $d_0$  na výšku vytaženého lemu  $h$  ukazují grafy Přílohy 2. Maximální výšky lemu bylo dosaženo u vzorků s průměrem  $d_0=40$  mm blízkým již meznímu přetvoření. S rostoucím průměrem otvoru  $d_0$ , tedy s klesající zásobou tvářeného materiálu úměrně klesá i výška vytaženého hrdla. Křivka M představuje naměřenou závislost, křivky A,B,C,D jsou grafy matematických funkcí popisující tuto závislost podle různých autorů odborné literatury.

A. Literatura [3], str.451, uvádí :

$$h = \frac{1}{2}(D_R - d_0 - 1,14r_M + 0,43s_0) \quad , \text{ viz. též vztah (21)}$$

B. Literatura [4], str.171, uvádí :

$$d_0 = D_S + 0,86\left(r_M + \frac{s_0}{2}\right) - 2h \quad , \text{ viz. též vztah (25)}$$

C. Literatura [5], str.97, uvádí :

$$d_0 = \sqrt{D_S^2 - 4D_S h} \quad , \text{ viz. též vztah (24)}$$

D. Literatura [1], str.244, uvádí :

$$h = R_S - r_0 + 0,72s_0 - 0,43r_M \quad , \text{ viz. též vztah (23)}$$

Po úpravě mají výše uvedené funkce tvar :

A.  $h = 0,5(D_S - d_0) + 0,715s_0 + 0,43r_M$

B.  $h = 0,5(D_S - d_0) + 0,22s_0 + 0,43r_M$

C.  $h = \frac{1}{4D_S}(D_S^2 - d_0^2)$

D.  $h = 0,5(D_S - d_0) + 0,72s_0 - 0,43r_M$

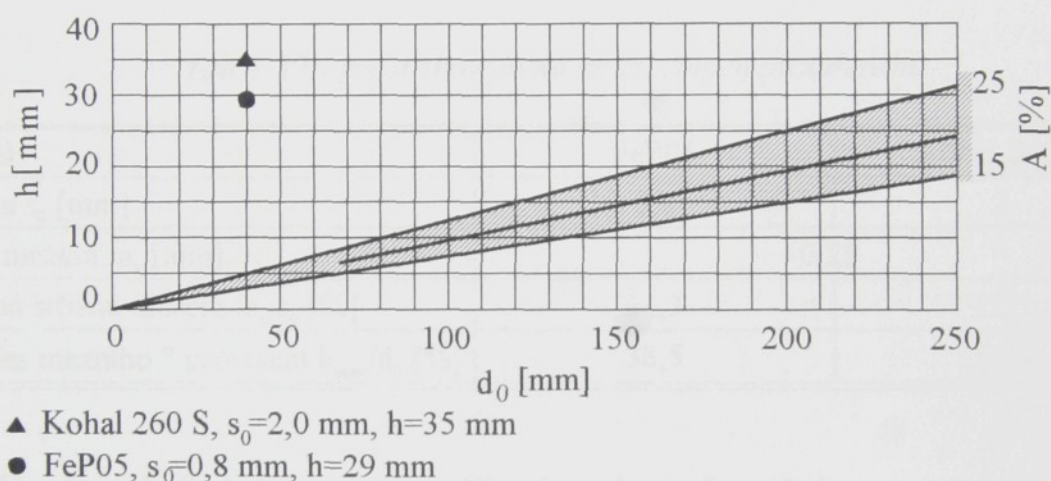
Ze vztahů i z grafů je vidět, že skutečnosti se nejvíce blíží vztahy A,B. Od naměřených hodnot se liší průměrnou odchylkou  $\Delta h + 6\%$  pro FeP05, resp.  $+ 5\%$  pro Kohal. Naopak jako naprosto nevhodný se ukázal popis rovnicí C, neuvažující vliv zaoblení tažných hran.

## 8.3. Maximální dosažitelné hloubky výtažků

Grafy Přílohy 3 představují závislost maximální dosažitelné hloubky při protahování, resp. lemování na průměru otvoru  $d_0$ . Křivky logicky nabývají

maxima kolem průměru  $d_0=40$  mm. Vlevo od něj je maximální výška omezená mezním přetvořením materiálu při rozšiřování, vpravo je dána výškou lemu, tj. "zásobou materiálu" pro tváření. Za povšimnutí stojí symetrie křivek podle svislé osy procházející maximem. Pro určení hloubky protažení (levá část křivky) by se tedy dal použít některý ze vztahů kap.8, např.B, platný pro pravou část křivky, pokud bychom znali hraniční průměr  $d_0$  (průměr s max. výškou lemu).

Maximální dosažitelné výšky lemu, naměřené u obou zkoumaných materiálů, jsou pro porovnání zaneseny do obr.9, převzatého z lit.[4].



Obr.19 Nomogram k určení dosažitelné výšky lemu

Porovnání s uvedeným šrafovaným pásmem je však problematické, protože autor neuvádí, zda se v nomogramu jedná o tažnost homogenní nebo celkovou. Mezi nimi je totiž u hlubokotažných plechů značný rozdíl (viz. tab.1).

#### 8.4. Mezní stupeň protahování

Příloha 4 znázorňuje působení charakteristických parametrů protahování na mezní stav přetvoření výlisků. Plná čára představuje hranici mezi oblastí porušených výlisků (nad čarou) a bezvadných výlisků (pod čarou), byl-li otvor  $d_0$  v přístříhu zhotoven obráběním. Pro srovnání byly do mezního stavu protaženy ještě vzorky s prostřihovanými otvory dvou průměrů  $d_0$ . Vzhledem k tak omezenému statistickému souboru je výsledek zakreslen jako dva izolované body. Posun

hranice mezního přetvoření oproti obráběným vzorkům je však přesto jasné patrný.

U tenkých plechů převažuje negativní vliv ostřiny a mikrotrhlin na okraji střižné plochy, u tlustých plechů je snížení mezních stupňů přetvoření způsobeno hlavně vyčerpáním plasticity v oblasti plastického stříhu.

Daleko citlivější na prostřihování otvoru je FeP05 oproti Kohalu. Všechny vzorky byly prostřihovány s konstantní střižnou mezerou 0.25 mm, relativní střižná mezera  $m_s/s_0$  byla tudíž menší pro tlustší Kohal. To je příčinou menšího vlivu prostřihování na mezní přetvoření. Celkový přehled poskytuje Tab.3 .

*Tab.3 Vliv prostřihování na mezní stupeň protahování*

| materiál                                                    | FeP05 | Kohal 260 S |
|-------------------------------------------------------------|-------|-------------|
| tloušťka $s_0$ [mm]                                         | 0,8   | 2           |
| střižná mezera $m_s$ [mm]                                   | 0,25  |             |
| poměrná střižná mezera $m_s/s_0$ [%]                        | 31,3  | 12,5        |
| $\varnothing$ pokles mezního ° protažení $h_{\max}/d_0$ [%] | 38,5  | 16,5        |

V případě Kohalu se vliv stříhání podstatně snižuje s rostoucí relativní tloušťkou, tedy s klesajícím poměrem  $d_0/s_0$ .

Do jisté míry jsou tyto grafy analogií obr.2, převzatého z lit.[2], s tím, že se týkají pouze vzorků protahovaných do mezního stavu. S jedním průměrem tažníku / tažnice totiž nelze docílit mezních stavů lemovaných, tedy úplně protažených otvorů. Prodloužená křivka nad hraniční průměr prvního úplného protažení by byla dána geometrickou vazbou výšky lemu na šířce tvářeného mezikruží (viz. kap.8.2.), a nikoli již křivkou mezních stavů.

## 8.5. Průběh logaritmických deformací ve výtažku

V grafech Přílohy 5 je vynesena logaritmická obvodová ( $\varphi_l$ ) a logaritmická radiální ( $\varphi_r$ ) deformace podle polohy elementu v tvářeném mezikruží. Pro popis polohy elementu byla zvolena jeho vzdálenost od osy otvoru v přístřihu  $r_{i0}$ . Úměrně rostoucí hloubce protažení roste i obvodová deformace, která stále

nabývá kladných hodnot a maximum má vždy na okraji otvoru. O něco složitější průběh vykazuje radiální deformace : na okraji otvoru je záporná a během protahování roste (do záporných hodnot). U elementů na rádiu zaoblení tažnice však radiální deformace přechází ze záporných do kladných hodnot, takže dochází k jejich protažení. Tyto elementy jsou totiž vystaveny radiálním tahovým silám, které jsou reakcí na osovou tvářecí sílu tažníku, a přitom jsou jen minimálně přetvořeny v obvodovém směru. Postupným "naléháním" materiálu na rádiu tažnice se místo s nulovou radiální deformací přesouvá směrem od osy ke stěně tažnice a zároveň klesá radiální protažení elementů na úkor obvodového protažení. Průběhy deformací mají velmi podobný charakter pro všechny zkoušené vzorky.

Porovnáme-li křivky naměřených radiálních logaritmických deformací úplně protažených vzorků s obr.6, kap.3.2., zjistíme po logaritmování poměru  $l_i/l_{i0}$  v podstatě stejný tvar křivek s odpovídajícím koeficientem protahování  $k$ .

Po porovnání jednotlivých grafů Přílohy 5 je zřejmé, že poloha místa s nulovou radiální deformací je silně ovlivněna šířkou tvářeného mezikruží, pro úplně protažené vzorky v podstatě koeficientem protahování, a okamžitou hloubkou protažení. Gubkinův závěr plynoucí z rovnice (11), že poloměr nulové radiální deformace  $r_{i0} = 2r_o$ , tedy neplatí všeobecně.

## 8.6. Maximální logaritmické deformace

Příloha 6 ukazuje, jak během protahování rostla obvodová a radiální logaritmická deformace u okraje otvoru (tedy v místě nejvíce deformovaném). Kohal 260 S vytvářel ve všech případech vyšší lemy nebo byl hlouběji protažen, než FeP05, ačkoli má nižší tažnost. Snížená tažnost Kohalu je totiž plně kompenzována jeho více než dvojnásobnou tloušťkou oproti FeP05, takže za předpokladu srovnatelných hodnot normálové anizotropie má tlustší plech možnost větší radiální deformace na úkor tloušťky. Dokazuje to i skutečnost, že průběhy i maximální hodnoty obvodových deformací jsou u obou materiálů stejné. Zajímavé je, že úplně protažené vzorky průměru 40 mm byly schopny snést větší

deformace, než vzorky průměru 20 mm, rozšiřované do mezního stavu. Souvisí to s různým gradientem deformace u vzorků s různou šířkou tvářeného mezikruží. Gradient deformace má nepříznivý vliv na velikost mezního přetvoření, a je tím větší, čím je širší tvářené mezikruží, tedy čím menší je průměr  $d_0$ . Blíže se touto problematikou zabývá lit.[6].

## 8.7. Naměřený a vypočtený průběh radiální deformace

Grafy Přílohy 7 porovnávají průběhy naměřených a vypočtených radiálních deformací v tvářeném mezikruží.

Křivky M vycházejí ze změny vzdáleností protahovaných kružnic :

$$\varphi_r = \ln \frac{l_i}{l_{i0}}$$

Křivky V vycházejí ze závislosti radiální a obvodové deformace, uvedené v lit. [3]:

$$\varphi_r = -\frac{2r_0 - r_{i0}}{r_{i0} + r_0} \cdot \varphi_t$$

Pro porovnání byly vybrány vzorky protažené na druhou největší hloubku (viz. Příloha 5), jedná se tedy o rozšiřování bez dosažení mezního stavu.

Vypočtený průběh se více blíží měřenému pro vzorky z FeP05, z čehož lze usoudit, že rovnice (11) platí spíše pro měkčí a tenčí materiály.

## 9. ZÁVĚR

Ačkoli je technologie rozšiřování a protahování otvorů méně frekventovaná ve srovnání s ostatními technologiemi tváření plechu, jako např. ohýbání či hluboké tažení, byla jí v minulosti věnována pozornost po teoretické i praktické stránce. Analýzou napětí a přetvoření se zabývali hlavně toho času sovětští autoři, určité informace z oblasti mezních stupňů přetvoření a návrhu rozměrů polotovaru předkládá i česká literatura. Tato práce měla shrnout a prověřit poznatky z jednotlivých zdrojů informací a zjistit jejich praktickou využitelnost. Po provedení experimentů rozšiřováním otvorů kruhových přístřihů u dvou druhů ocelového hlubokotažného plechu docházíme k následujícím závěrům:

1. Závislost rozšíření otvoru na hloubce protažení přibližně odpovídá Gubkinově teorii přetvoření: průměrná odchylka vypočtených a naměřených hodnot průměru rozšířeného otvoru činí jen cca 6,5% (obr.18). Předpoklad zachování délky radiálního vlákna při rozšiřování je tedy správný.
2. Pro strojírenskou praxi má značný význam výpočet průměru otvoru v přístřihu pro dosažení potřebné výšky lemu. Z ověřovaných vztahů lze doporučit vztah B kap. 8.2.:

$$d_0 = K \left[ D_S + 0,86 \left( r_M + \frac{s_0}{2} \right) - 2h \right]$$

s korekcí  $K \approx 0,95$  pro rozměrově a materiálově blízké případy.

3. Mezní stupeň přetvoření je značně závislý na poměrné tloušťce materiálu. U relativně tlustšího materiálu lze podle očekávání dosáhnout vyššího stupně protahování. Prostřihování lemovaného otvoru má za následek předčasné vyčerpání plasticity v okolí střižné hrany a vznik trhlin při menším stupni protahování oproti případu, kdy je otvor obráběn (viz. Příloha 4). Čím je materiál tenčí, tím je citlivější na způsob zhotovení otvoru.
4. Na mezní stupeň deformace má vliv též gradient deformace. Větších plastických deformací lze v materiálu dosáhnout, zmenší-li se šířka tvářeného mezikruží a tím i gradient deformace (viz. Příloha 6). Výhodnější jsou tedy relativně velké otvory v přístřihu vzhledem k průměru budoucího výtažku.

5. Deformace plechu jsou podle očekávání v obvodovém i v radiálním směru maximální u okraje otvoru a směrem od osy se zmenšují. Obvodová vlákna jsou protahována, radiální vlákna jsou u otvoru zkrácena, avšak ve vzdálenějších místech od osy může dojít podle celkového stupně deformace až k jejich výraznému protažení (viz. Příloha 5).
6. Výsledky analýzy deformace a vazby některých geometrických rozměrů lze zobecnit na celou technologii protahování a rozšiřování. Určování výchozích rozměrů polotovaru, dosažitelných hloubek protahování a mezních stupňů přetvoření je však do značné míry závislé na druhu materiálu a na rozměrech protahovaného lemu, resp. rozšiřovaného otvoru. Pro komplexní prostudování této problematiky by bylo třeba provést tytéž experimenty pro několik výrazně odlišných průměrů lemu, popř. měnit i tloušťku a materiál použitého plechu.

## 10. LITERATURA

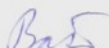
- [1] ŠOFMAN, L., A. : Teoria i rasčety processov chłodnoj šampovki. Mašinostroenie Moskva. 1964. (str.244-245)
- [2] TOMÁŠEK, J. : Směrnice pro stanovení mezních stupňů přetvoření pravidelných tvarů součástí z plechu. VÚTS Brno. 1975. (tab.10)
- [3] GUBKIN, S., I. : Osnovy teorii obrabotky metallov davleniem. MAŠGIZ Moskva. 1959. (str.441-451)
- [4] KOL.: Lisování. SNTL Praha. 1970. (str.170-174)
- [5] TIŠNOVSKÝ, M. - MÁDLE, L. : Hluboké tažení plechu na lisech. SNTL Praha. 1990. (str.96-98)
- [6] SOLFRONK, P. : Mezní přetvoření v okrajových oblastech výlisků. [Diplomová práce]. Liberec. 1995. TU Liberec.
- [7] ČSN 22 6001

## Prohlášení

Souhlasím, aby moje diplomová práce byla podle směrnice, uveřejněné v Pokynech a inf. VŠST 1/1975, zapůjčena nebo odprodána za účelem využití jejího obsahu.

Jsem si vědom toho, že práce je majetkem školy a že s ní nemohu sám disponovat.

Souhlasím, aby po pěti letech byla diplomová práce vrácena na níže uvedenou adresu, nebo v případě nedoručitelnosti skartována.

  
.....

Podpis

Jméno a příjmení : Miroslav Baše

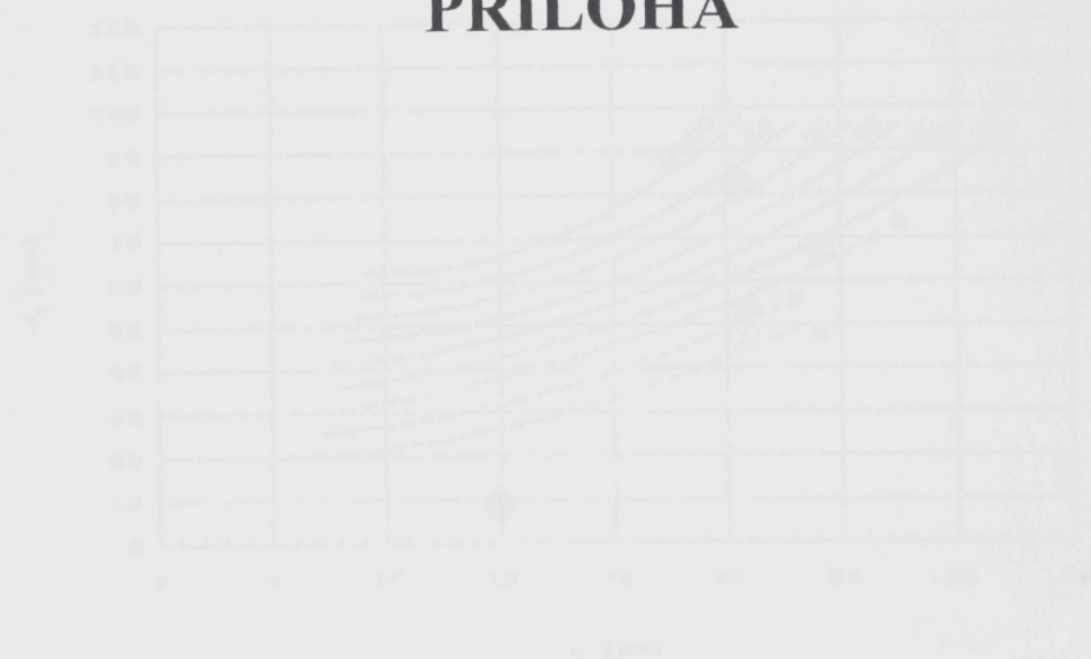
Adresa : Zlatý kopec 59, 463 03 Stráž nad Nisou

Průměr  $d = 0,3 \text{ mm}$



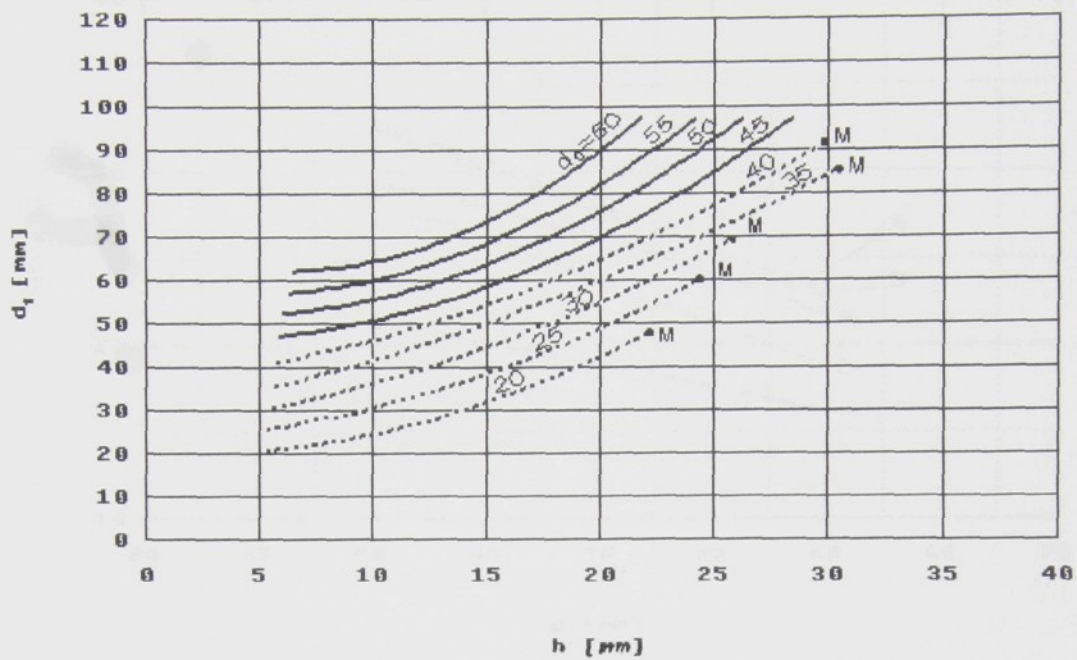
Kabel 26/3 J s  $d = 0,3 \text{ mm}$

## PŘÍLOHA

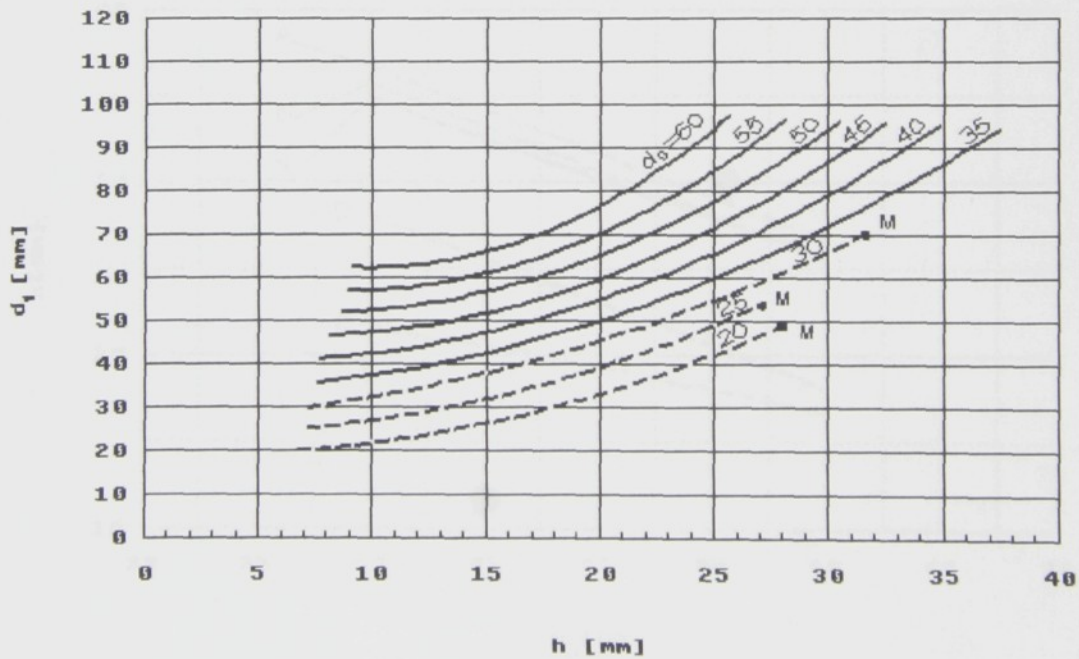


Residuální útlak v závislosti na tlaku prouždi  
M. zkouška ukoučat na sporné čísel

FeP05,  $s_0 = 0.8 \text{ mm}$

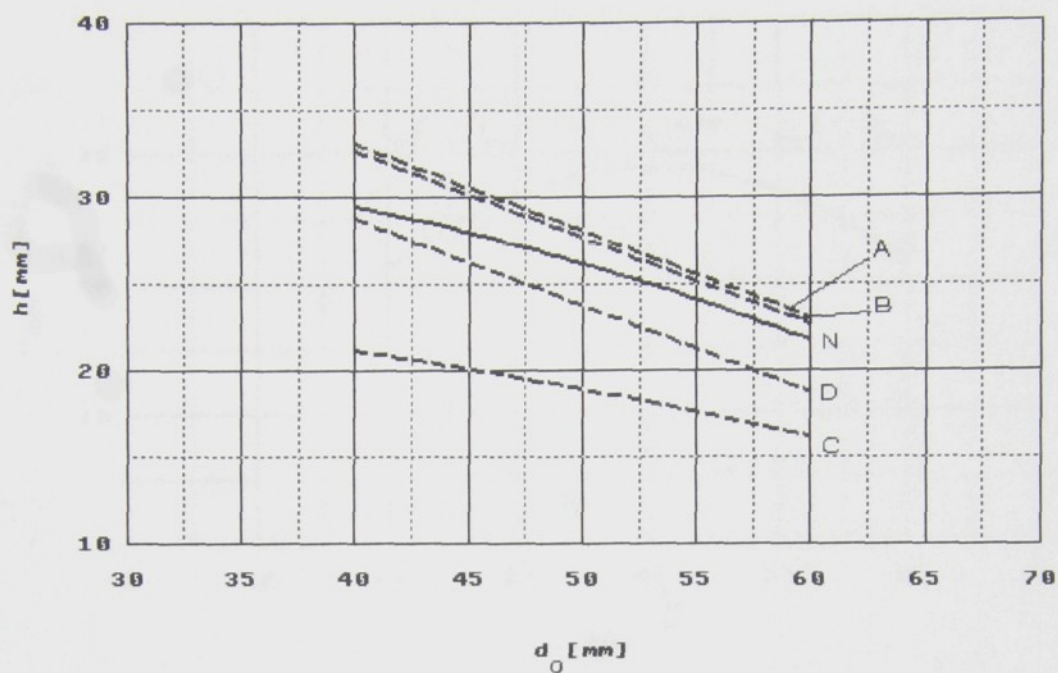


Kohal 260 S,  $s_0 = 2.0 \text{ mm}$

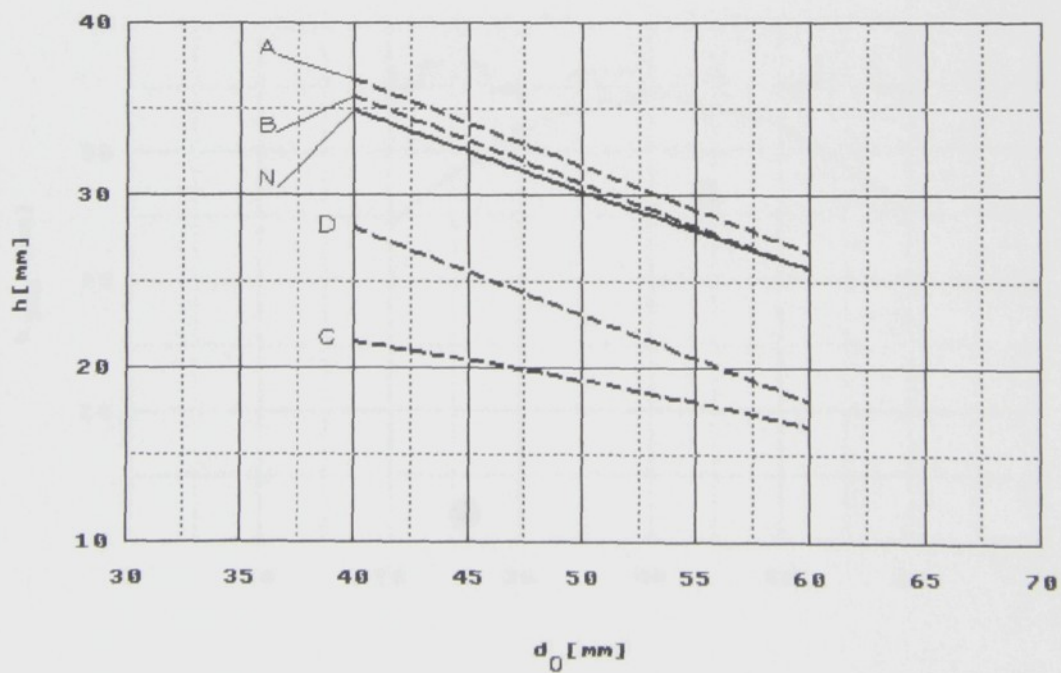


Rozšíření otvoru v závislosti na hloubce protažení  
M...zkouška ukončena na mezním stavu

FeP05,  $s_0 = 0.8 \text{ mm}$



Kohal 260 S,  $s_0 = 2.0 \text{ mm}$

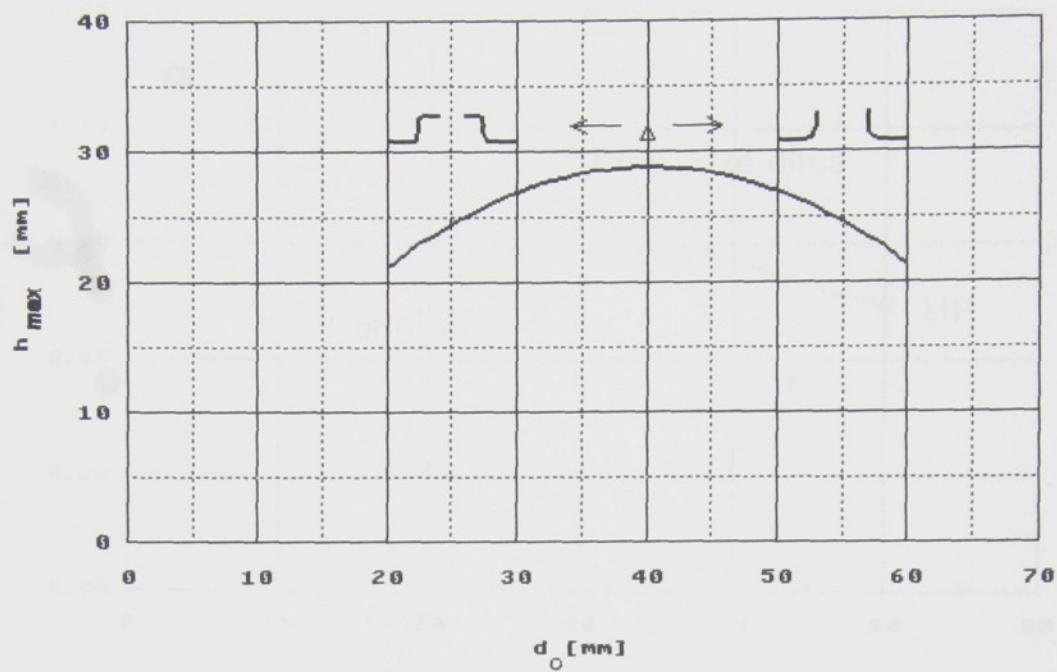


**Závislost výšky lemu na průměru otvoru v přístřihu**

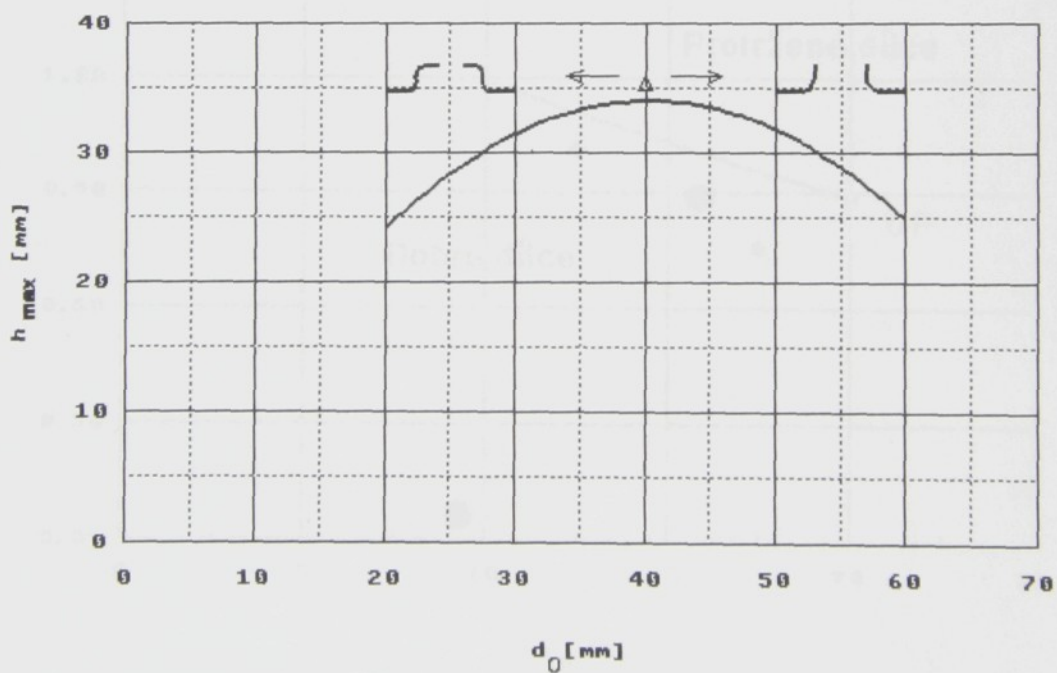
(průměr tažníku konstantní, 100 mm)

A,B,C,D...vypočtené průběhy, N...naměřeno

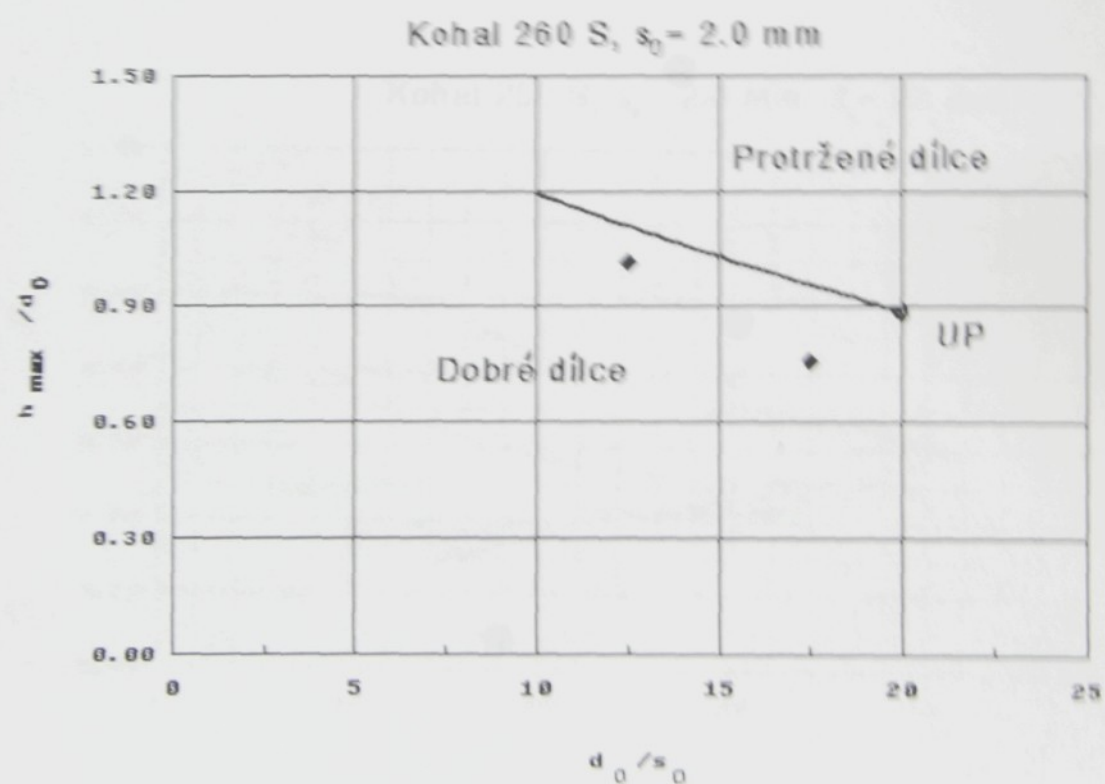
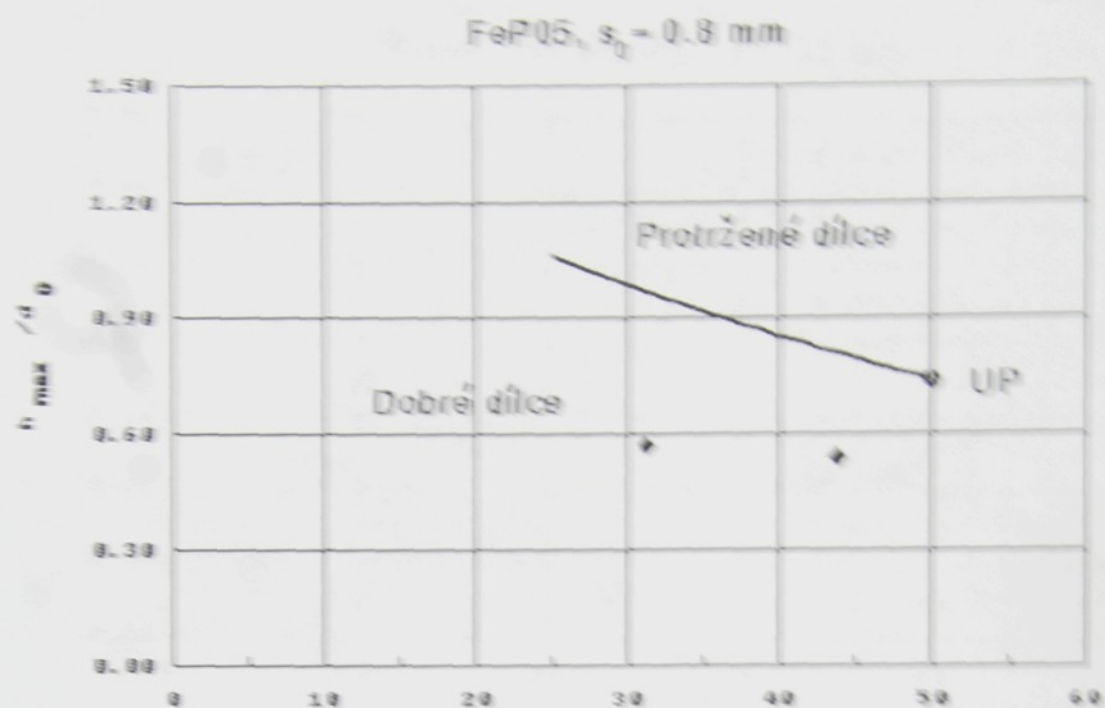
FeP05,  $s_0 = 0.8 \text{ mm}$



Kohal 260 S,  $s_0 = 2.0 \text{ mm}$



Maximální dosažitelná hloubka protažení, resp. výška lemu  
v závislosti na průměru otvoru v přístřihu

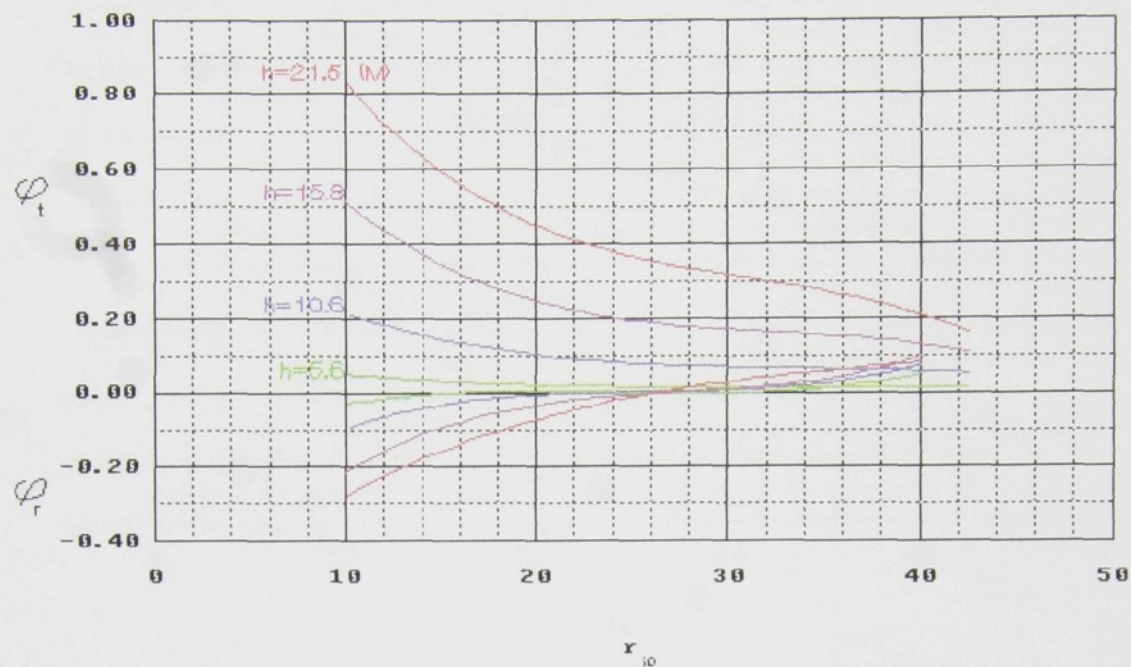


**Mezní stupně deformace při rozšiřování**

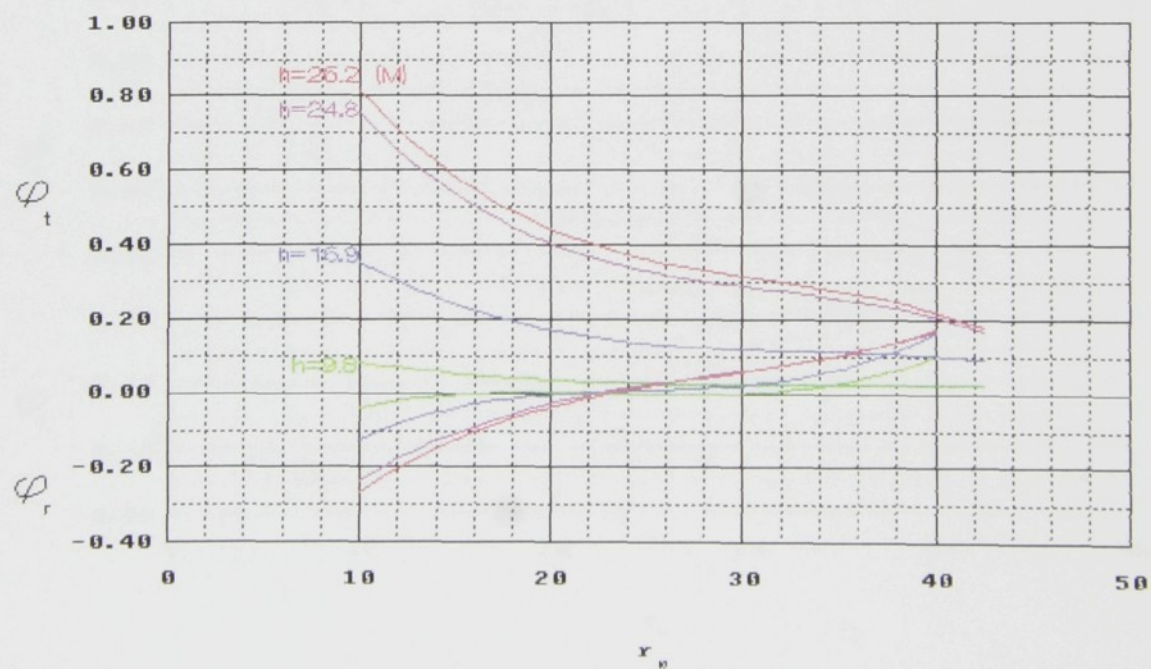
UP...otvor úplně protažen (vznik lemu)

◆...otvor v přístřihu ( $d_0$ ) protřihován

FeP05,  $s_0 = 0.8 \text{ mm}$ ,  $d_0 = 20 \text{ mm}$



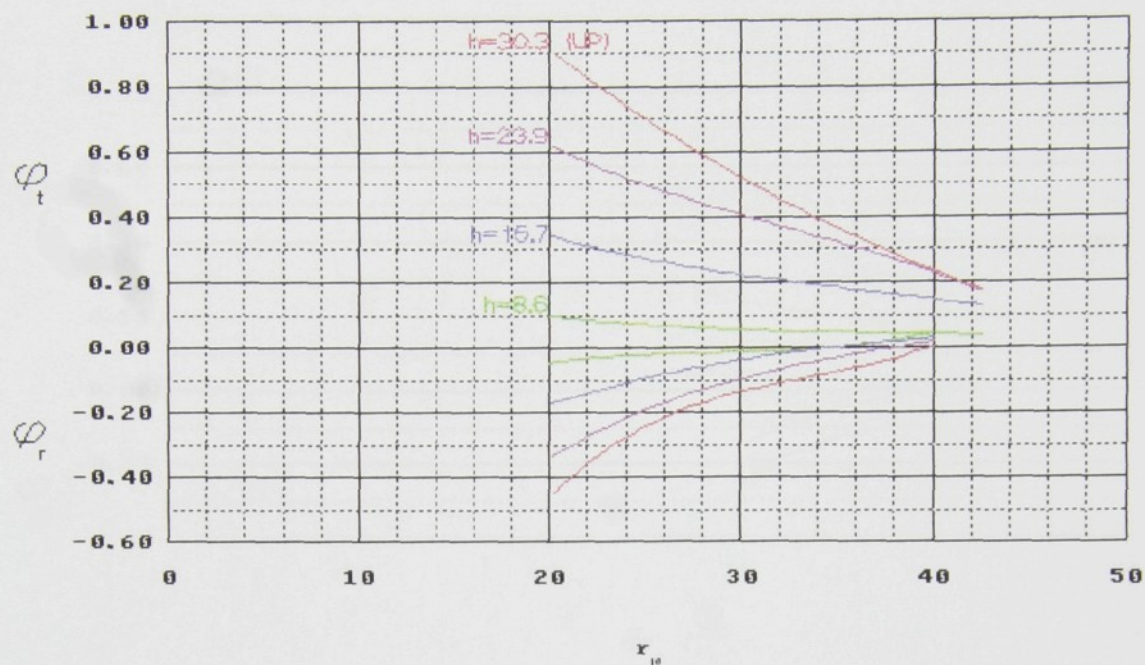
Kohal 260 S,  $s_0 = 2.0 \text{ mm}$ ,  $d_0 = 20 \text{ mm}$



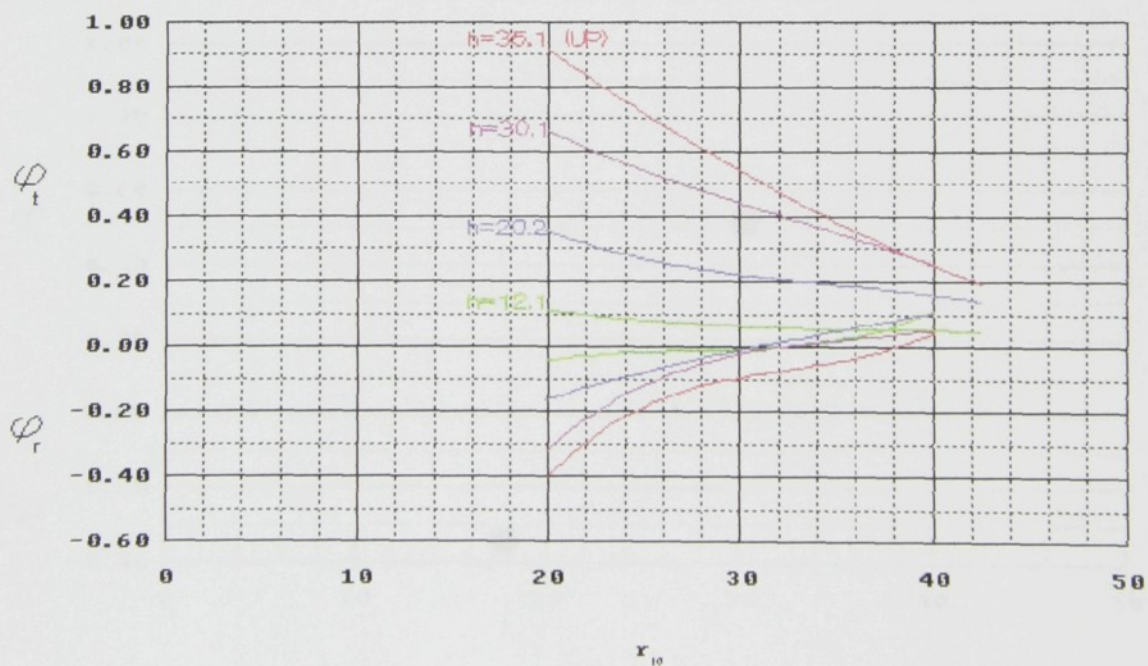
Průběh skutečné tangenciální ( $\phi_t$ ) a radiální ( $\phi_r$ ) deformace  
v tvářeném mezikruží

M...průběh deformací ve vzorku na mezním stavu

FeP05,  $s_0 = 0.8 \text{ mm}$ ,  $d_0 = 40 \text{ mm}$



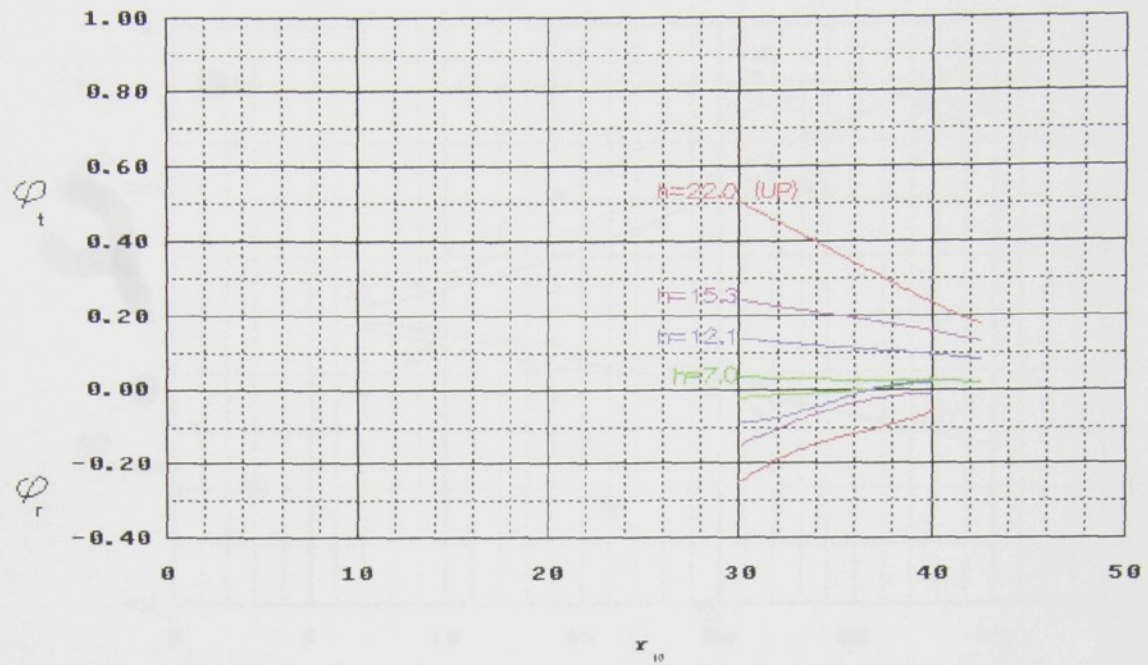
Kohal 260 S,  $s_0 = 2.0 \text{ mm}$ ,  $d_0 = 40 \text{ mm}$



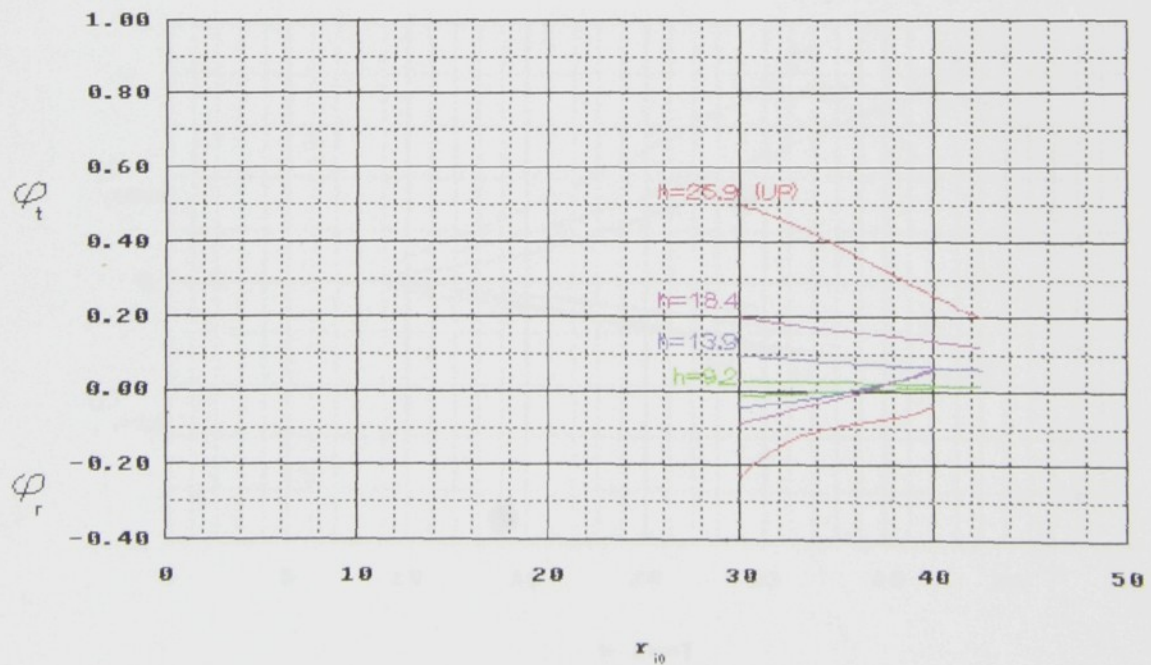
Průběh skutečné tangenciální ( $\phi_t$ ) a radiální ( $\phi_r$ ) deformace  
v tváření mezikruží

UP...průběh deformací v úplně protaženém vzorku

FeP05,  $s_0 = 0.8 \text{ mm}$ ,  $d_0 = 60 \text{ mm}$



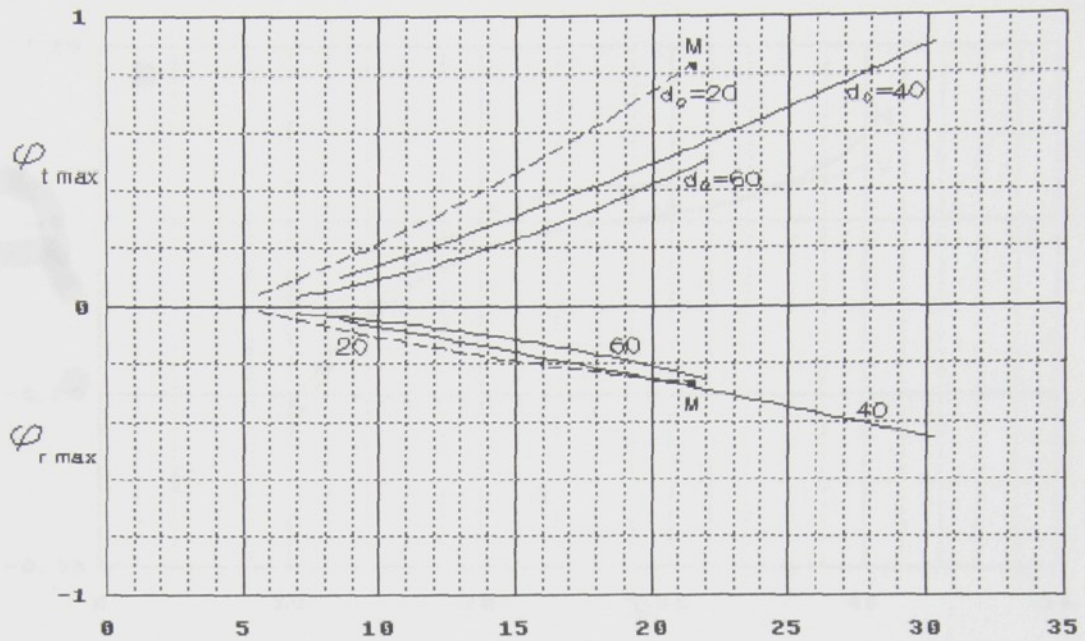
Kohal 260 S,  $s_0 = 2.0 \text{ mm}$ ,  $d_0 = 60 \text{ mm}$



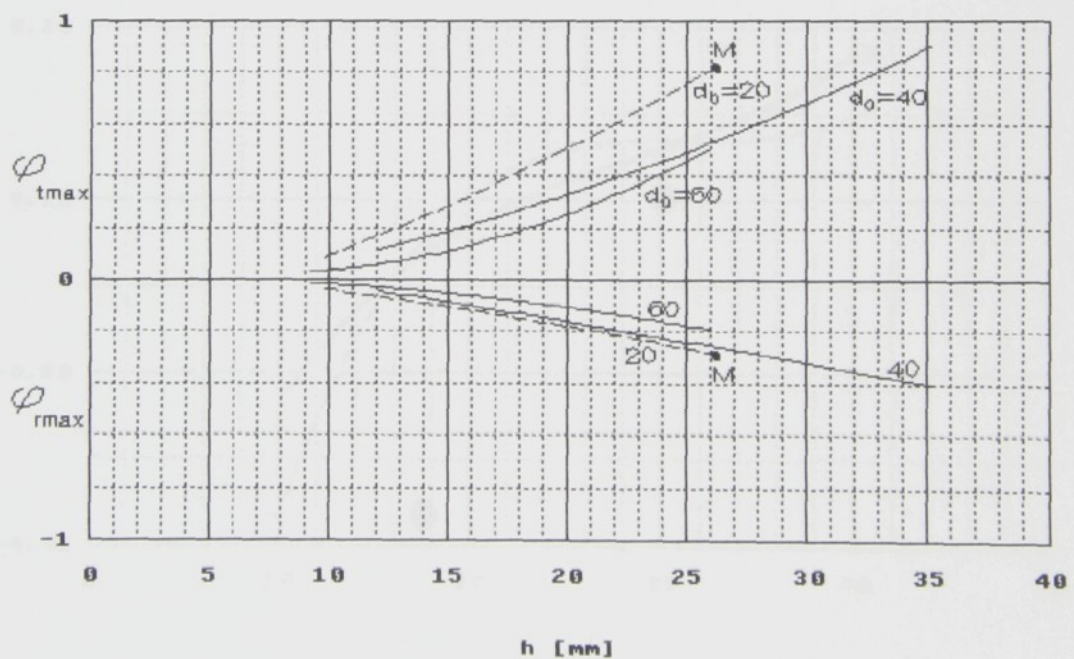
**Průběh skutečné tangenciální ( $\varphi_t$ ) a radiální ( $\varphi_r$ ) deformace  
v tvářeném mezikruží**

UP...průběh deformací v úplně protaženém vzorku

FeP05,  $s_0 = 0.8 \text{ mm}$

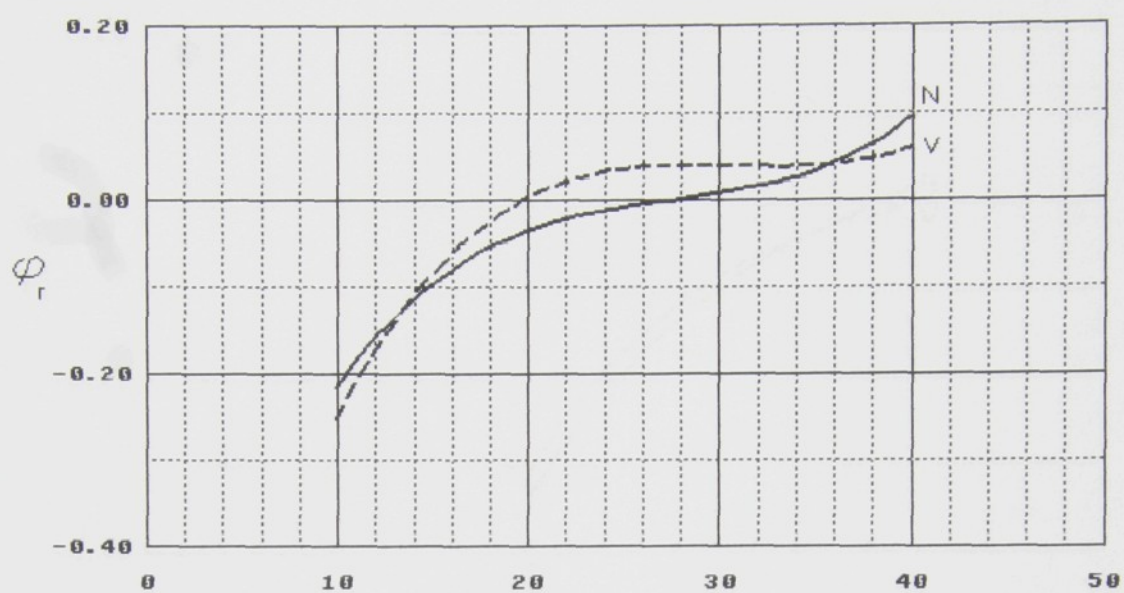


Kohal 260 S,  $s_0 = 2.0 \text{ mm}$

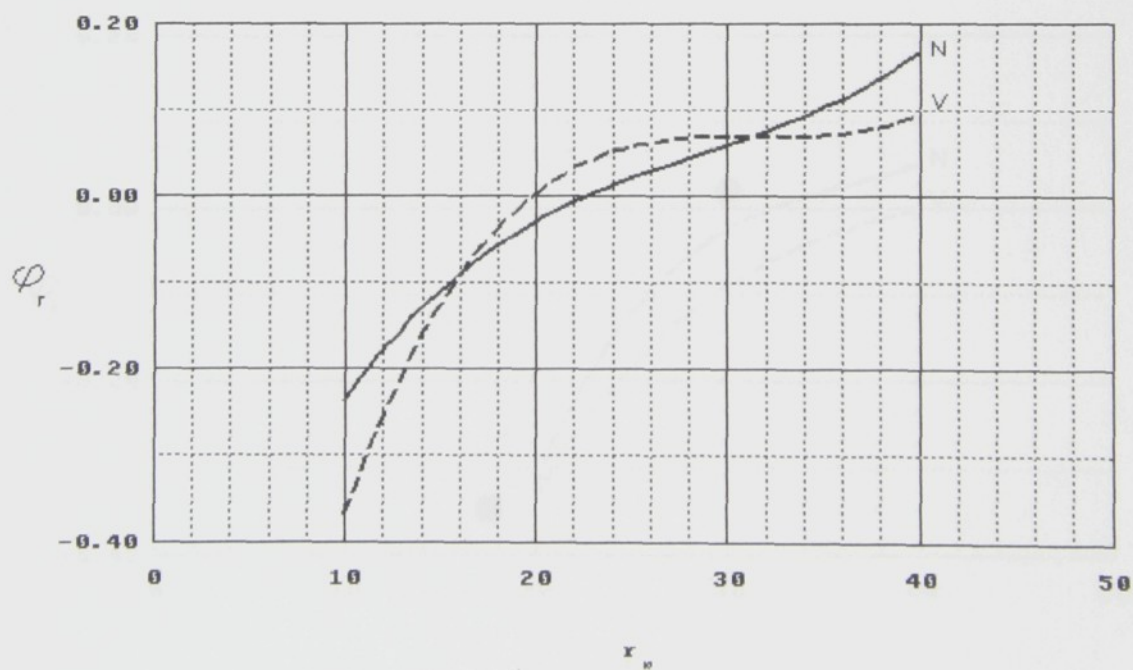


Vliv hloubky protažení na deformace u okraje rozšiřovaného otvoru  
M...zkouška ukončena na mezním stavu

FeP05,  $s_0 = 0.8 \text{ mm}$ ,  $d_0 = 20 \text{ mm}$ ,  $h = 15.8 \text{ mm}$

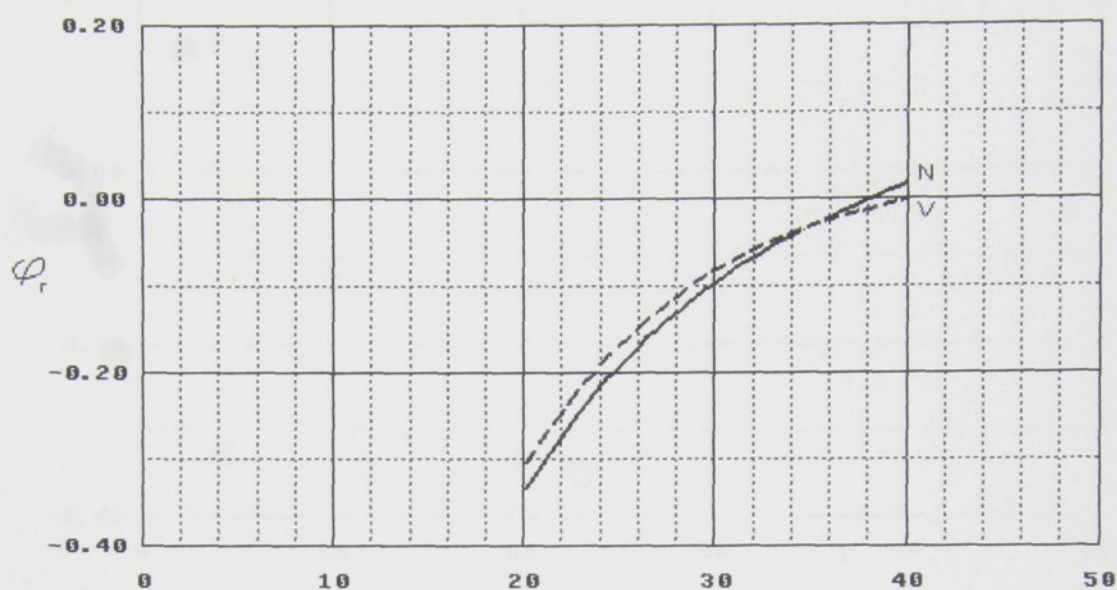


Kohal 260 S,  $s_0 = 2.0 \text{ mm}$ ,  $d_0 = 20 \text{ mm}$ ,  $h = 24.8 \text{ mm}$

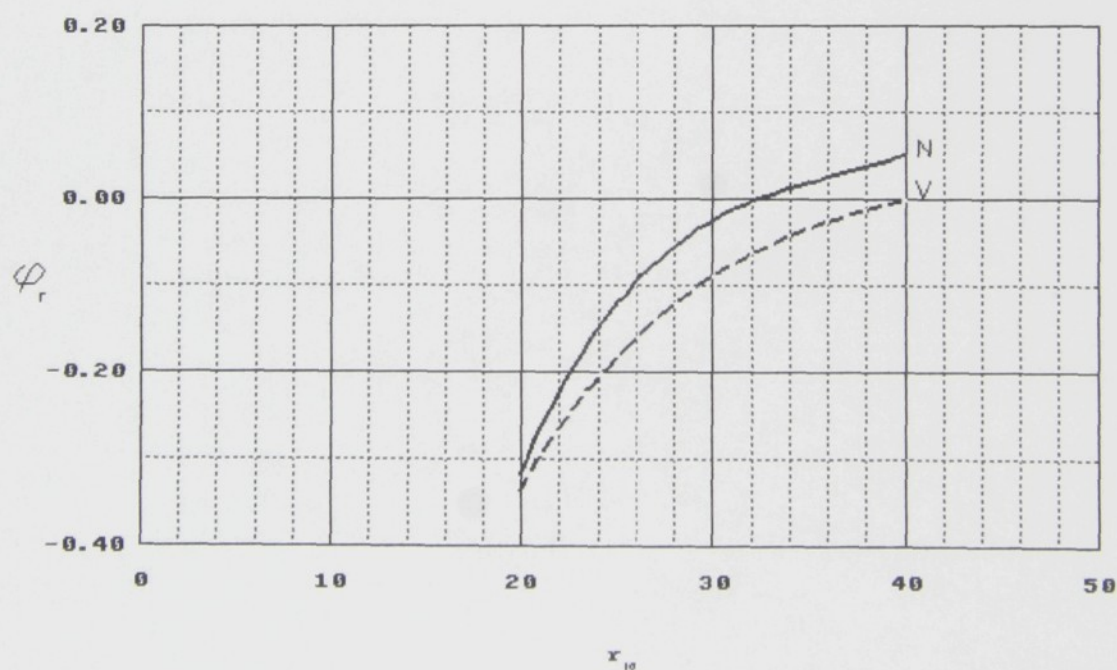


Průběh naměřené (N) a vypočtené (V) radiální deformace v tvářeném mezikruží

FeP05,  $s_s = 0.8 \text{ mm}$ ,  $d_s = 40 \text{ mm}$ ,  $h = 23.9 \text{ mm}$

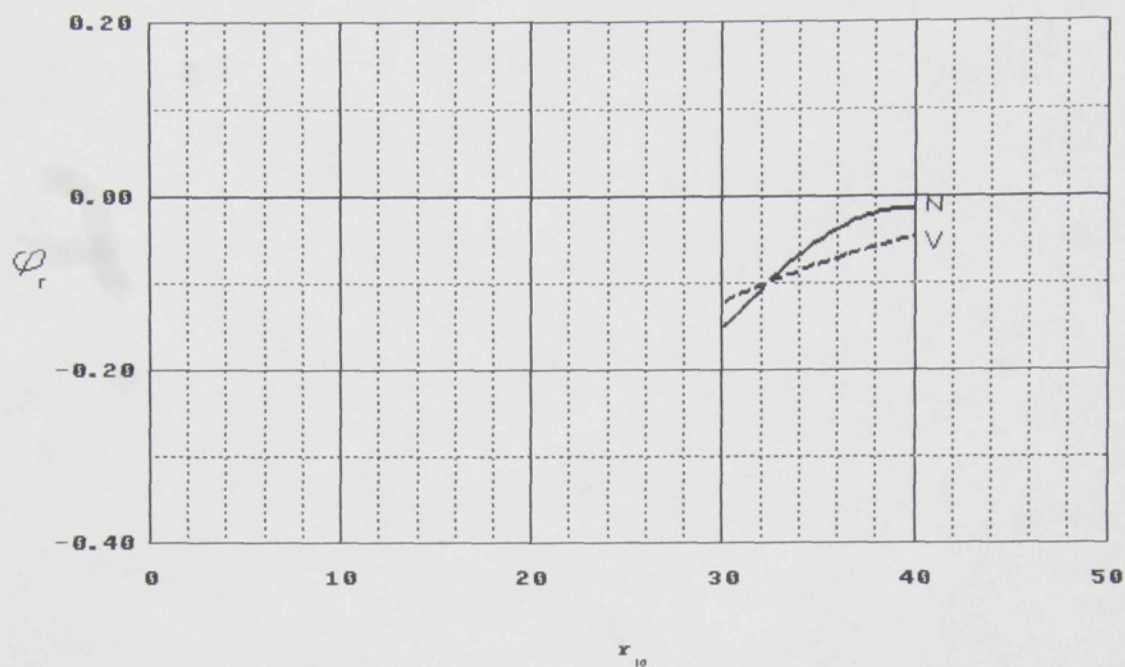


Kohal 260 S,  $s_s = 2.0 \text{ mm}$ ,  $d_s = 40 \text{ mm}$ ,  $h = 30.1 \text{ mm}$

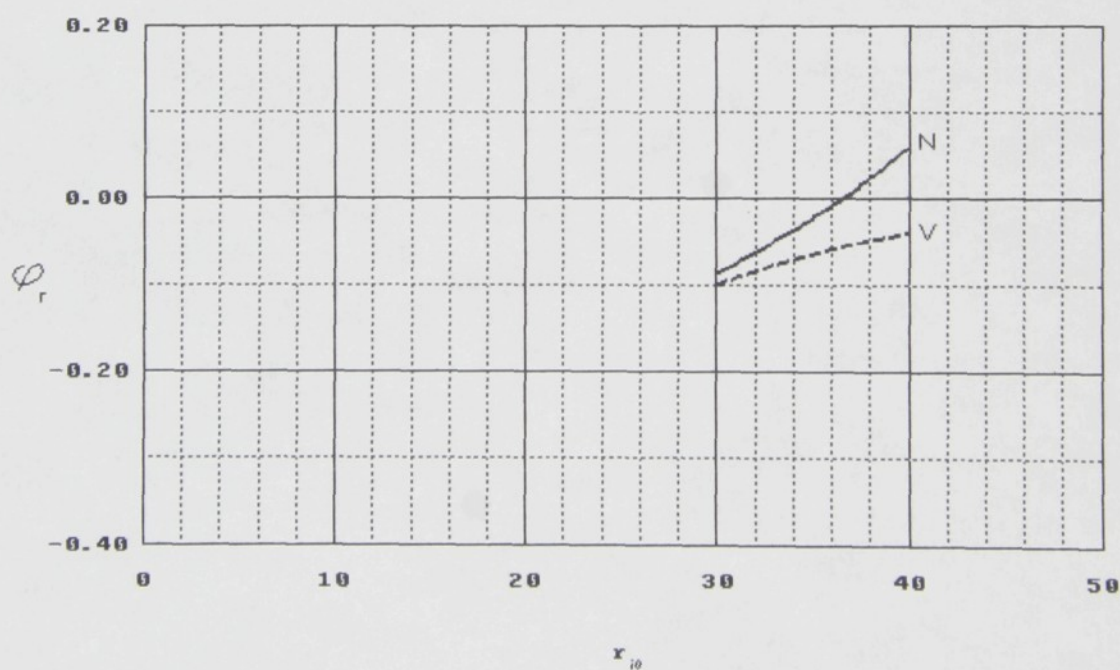


Průběh naměřené (N) a vypočtené (V) radiální deformace v tvářeném mezikruží

FeP05,  $s_o = 0.8 \text{ mm}$ ,  $d_o = 60 \text{ mm}$ ,  $h = 15.3 \text{ mm}$



Kohal 260 S,  $s_s = 2.0 \text{ mm}$ ,  $d_s = 60 \text{ mm}$ ,  $h = 18.4 \text{ mm}$



Průběh naměřené (N) a vypočtené (V) radiální deformace v tvářeném mezikruží