

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Obor 21-07-08

Fakulta strojní

Katedra tváření kovů a plastů

Katedra tváření kovů a plastů

Katedra tváření kovů a plastů



Monika Vacková

KPT-060

Monika Vacková

Vedoucí diplomové práce: Prof. Ing. Václav ... v Liberci

MEZNÍ PŘETVOŘENÍ PŘI LEMOVÁNÍ A OHÝBÁNÍ PROFILŮ Z PLECHU

Seznam stránek a příloh

Seznam stránek

Seznam příloh a tabulek

Seznam obrázků

Seznam výkazů

Seznam použitých zdrojů

Diplomová práce

1998

TECHNICKÁ UNIVERSITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Obor 23-07-08

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Strojírenská technologie

Zaměření: tváření kovů a plastů

Katedra tváření kovů a plastů

Mezní přetvoření při lemování a ohýbání profilů z plechu

Monika Vacková

KPT-660

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

Konzultant: Ing. Pavel Solfronk, TU v Liberci

Rozsah práce a příloh

Počet stran	50
Počet příloh a tabulek	2
Počet obrázků	43
Počet výkresů	12
Počet modelů nebo jiných příloh	0

Datum: 27.5.1998

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra: tváření a plastů

Školní rok : 1997/98

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro **Moniku V a c k o v o u**

obor strojírenská technologie

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

Název tématu : Mezní přetvoření při lemování a ohýbání profilů z plechu.

Zásady pro vypracování :

1. Seznámení s problematikou vlivu gradientů deformace na mezní přetvoření v okrajových oblastech výlisků.
2. Návrh technologie přípravy zkušebních vzorků a metodiky experimentálního určování mezních stavů.
3. Konstrukční návrh zkušebních přípravků.
4. Experimentální ověření navrženého řešení ve vztahu k operaci lemování.
5. Rozbor získaných poznatků a návrh dalšího postupu řešení.

Rozsah grafických prací : 2x A1

Rozsah průvodní zprávy : 50 stran

Seznam odborné literatury :

- /1/ SOLFRONK, P.: Diplomová práce. TU v Liberci 1995.
- /2/ MIKEŠ, V.: Zakružování členitých plechů profilů válcováním.
Výzkumná zpráva státního úkolu P 15-124-010-01-01. VŠST
Liberec, 1973.
- /3/ LYSOV, M. J.: Teoriya i rasčet processov izgotovleniya dėtalej
metodami gibbi. "Mašinostroenie", Moskva 1966.
- /4/ MARCINIÁK, Z.: Teorie tváření plechů. SNTL Praha, 1964.

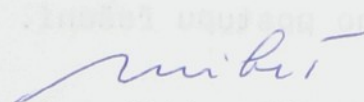
Vedoucí diplomové práce : Prof. Ing. Viktor Mikeš, CSc.

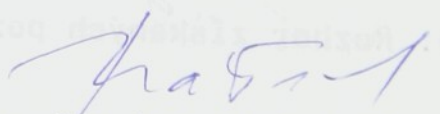
Konzultant : Ing. Pavel Solfronk

Zadání diplomové práce : 31.10.1997

Termín odevzdání diplomové práce : 29.5.1998




Prof. Ing. Viktor Mikeš, CSc.
Vedoucí katedry


Doc. Ing. Ludvík Prášil, CSc.
Děkan

V Liberci dne 30.10.1997

Anotace

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra tváření a plastů

Obor : Strojírenská technologie

Školní rok : 1997 - 1998

Diplomant : Vacková Monika

Téma práce : Mezní přetvoření při lemování a ohýbání profilů z plechu

Číslo DP : 660

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

Konzultant : Ing. Pavel Solfronk

Práce se zabývá mezním přetvořením při lemování a ohýbání profilů z plechu. Byla navržena metodika ke zjištění mezního stavu při ohýbání (zakružování) profilů z plechu. Navržen byl též nástroj, který umožňuje zakružovat "U" profily s různou výškou stojiny. Jeho výkresová dokumentace je přiložena. Pro zjištění mezního stavu při lemování byla navržena metodika lemování kruhových přístřihů s různými průměry výchozích otvorů. Výsledky experimentu jsou na obr. 5.10 až 5.13.

Annotation

Topic : The limiting deformation at the flanging and bending of metal plate profiles

This work deals with the limiting deformation at the flanging and bending of metal plate profiles. Methodology, which was proposed here, finds out the limiting state at the flanging of metal plate profiles. The work also contains a proposal of the tool which enables bending of "U" profiles with different web height; its plan is enclosed. Then, methodology of cyclic cutting flanging with different initial apertures average was proposed to learn the limiting state at the flanging. The results of the experiment are described in pictures 5.10 to 5.16.

Poděkování

Na začátku této práce bych ráda poděkovala Prof. Ing. V. Mikešovi, CSc. a Ing. P. Solfronkovi i ostatním členům Katedry tváření a plastů za pomoc při vypracování této diplomové práce.

Václava Moruka

berci, 27.3.1998

Obsah

1. ÚVOD

2. ÚVOD

2.1 Úvodní kapitola



2.3 Číslo je součástí úvodu

3. ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTICKÉ TECHNOLOGIE

PROTAKOVÁNÍ/DEMONTÁŽNÍ OTVOR

3.1 Úvodní kapitola

" Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury. "

3.2 Úvodní kapitola

3.3 Úvodní kapitola

3.4 Úvodní kapitola

V Liberci, 27.5.1998

Monika Vacková
Monika Vacková

3.5 Úvodní kapitola

3.6 Úvodní kapitola

3.7 Úvodní kapitola

3.8 Úvodní kapitola

3.9 Úvodní kapitola

4. ZÁVĚR

5. LITERATURA



OBSAH

1. ÚVOD	8
2. OHÝBÁNÍ	9
2.1 Ohýbání se zpevněním	12
2.1.1 Tvar ohybové čáry	13
2.1.2 Zpětná pružná deformace - dopružování	14
2.1.3 Zbytková pnutí	16
2.2 Ohyb profilů při zakružování válcováním	17
2.2.1 Válcování plošiny	18
2.2.2 Zakružování válcováním profilů	20
2.3 Činitelé omezující ohýbání	20
3. ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY TECHNOLOGIE PROTAHOVÁNÍ S LEMOVÁNÍM OTVORŮ	25
3.1 Napětí a deformace při protahování	26
3.2 Tangenciální deformace	28
4. NÁVRH METODIKY ZJIŠŤOVÁNÍ MEZNÍHO PŘETVOŘENÍ PŘI OHÝBÁNÍ PROFILŮ Z PLECHU	29
4.1 Popis nástroje a jeho funkce	29
4.2 Příprava zkušebních vzorků	30
5. NÁVRH METODIKY ZJIŠŤOVÁNÍ MEZNÍHO PŘETVOŘENÍ PŘI LEMOVÁNÍ	35
5.1 Příprava vzorků	35
5.2 Zkušební nástroj	36
5.3 Popis experimentu	36
5.4 Mezní přetvoření	37
6. ZÁVĚR	49
7. LITERATURA	50

Seznam použitých zkratek a symbolů

R_m [MPa]	mez pevnosti v tahu
$R_{p0,2}$ [MPa]	smluvní mez kluzu
A_{80} [%]	celková tažnost určovaná na úseku 80 mm
A_H [%]	homogenní tažnost
n [-]	exponent deformačního zpevnění
r [-]	součinitel normálové anizotropie
E [MPa]	modul pružnosti v tahu
J [mm ⁴]	kvadratický moment průřezu
μ [-]	Poissonova konstanta
k [-]	koeficient protahování
φ_{tl} [-]	lomová tangenciální deformace
$GradO$ [mm ⁻¹]	obvodový gradient lomové tangenciální deformace

1. Relativně jednoduchý nástroj

2. Jednoduché nastavení polohyvaru (za vzniku obrysu)

3. Nedeformuje se vzduchová

4. Malé tvářecí síly

Nevýhody technologie laminování

1. Omezená hloubka potisku, resp. výška potisku (vzhledem k tlaku)

2. Nedeformuje se vzduchová

3. Nedeformuje se vzduchová

4. Nedeformuje se vzduchová

5. Nedeformuje se vzduchová



1. Úvod

Vliv na mezní deformaci má tvar a rozměry výlisku. V mnoha případech se kvalitního výrobku dosáhne úpravou tvaru nebo rozměrů výchozího nástřihu. Změnou tvaru nebo rozměru polotovaru se mění velikost deformace v jednotlivých místech, tzn. mění se velikost gradientů deformace. Obvodové gradienty mají zásadní vliv na velikost mezní deformace při ohýbání i lemování dílů z plechu.

Ohýbání materiálu je často používanou technologií při zpracování plechů. Ohýbáním lze vyrábět hlavně profily na ohraňovacích lisech, na profilovacích válcích či zakružovat pomocí tří válců nebo lisu. Ohýbají se (zakružují) také profily vyrobené z plechu. Záleží však na poměru výšky profilu k poloměru ohybu. Profily se používají například při výrobě automobilů, při stavbě hal z ocelových konstrukcí atd.

Lemování je spojování tvářením. V některých případech se používá v kombinaci s lepením. Je jedním ze způsobů plošného tváření plechů. Lemuje-li se otvor, je většinou kruhový a bývá v polotovaru zhotoven již před lisováním, buď prostřižením nebo obráběním. Čelo tažníku, kterým se otvor nejprve protáhne může být ploché s přechodovým rádiusem, nebo kulové. Tak vznikne otvor s hrdlem, který se dále lemuje. Lemovat lze i otvory nekruhové.

Nejčastěji se používají plechy ocelové, ocelové hlubokotažné, z korozivzdorné oceli a plechy hliníkové.

Výhody technologie lemování :

1. Relativně jednoduchý nástroj.
2. Jednoduché ustředění polotovaru (za vnější obvod).
3. Nedochozí ke zvlnění příruby.
4. Malé tvářecí síly.

Nevýhody technologie lemování :

1. Omezená hloubka prolisu, resp. výška hrdla, vlivem velkých tahových napětí na hraně otvoru a vyčerpání plastičnosti.
2. Nedodržení přesné kruhovitosti lemovaného otvoru vlivem plošné anizotropie.
3. Ztenčení stěny na okraji otvoru (lemu).



2. Ohýbání

[1]

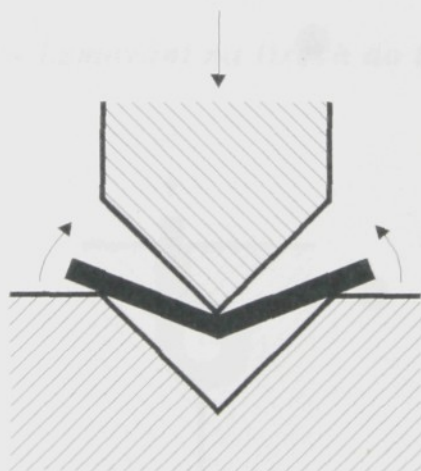
Charakteristickým znakem ohýbání je změna tvaru osy tvářené součásti. Je-li účelem ohýbání dát výchozímu plochému materiálu požadované zakřivení - mluvíme o ohýbání.

Podle způsobu pohybu nástroje vzhledem k tvářenému materiálu lze metody ohýbání rozdělit do dvou základních skupin :

1. Ohýbání na lisech, kdy materiál je tvářen v nástroji - ohýbadle, jehož pohyblivá čelist koná přímočaré vratné pohyby.
2. Ohýbání ve válcích, kdy nástroje konají otáčiví pohyb.

Ohýbání na lisech lze provádět různými způsoby, a to :

a) ohýbáním, kdy směr pohyblivé čelisti je přibližně shodný se směrem osy úhlu tvořeného rameny ohnutého předmětu (*obr. 2.1*), resp. ohýbání do tvaru "V";



Obr. 2.1 - Ohýbání na lisech do tvaru "V"

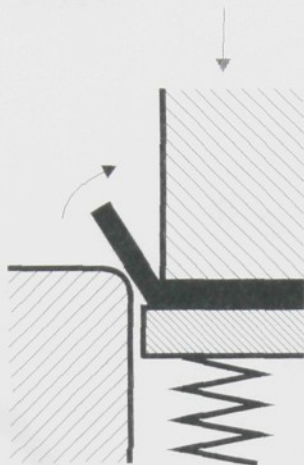
b) lemováním resp. ohýbání do tvaru "U", kdy směr pohybu pohyblivé čelisti je totožný se směrem ohnutého ramena (*obr. 2.2*);

c) zakružováním, kdy na tvářený materiál je vyvíjen tlak vyvolávající posouvání plechu po zakřiveném povrchu pevné čelisti (*obr. 2.3*).



Při ohýbání ve válcích se rozeznávají podle polohy roviny ohybu vzhledem k ose válců tyto metody :

1. válcování příčné, kdy rovina ohýbání je kolmá k ose válců;
2. válcování podélné resp. plynulé ohýbání, kdy rovina ohýbání prochází osami dvou válců s příslušným profilem (*obr. 2.4d*).



Obr. 2.2 - Lemování na lisech do tvaru "U"



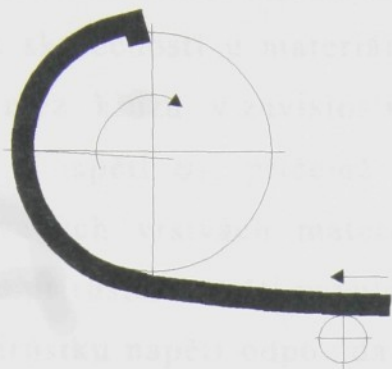
Obr. 2.3 - Zakružování na lisech

Z metod příčného válcování jsou nejdůležitější :

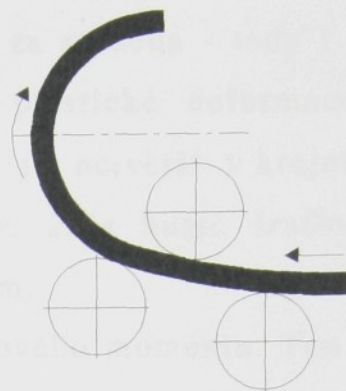
- a) navíjení, během něhož tvářený materiál přiléhá stále větší délkou k válci a získává jeho profil (*obr. 2.4a*);



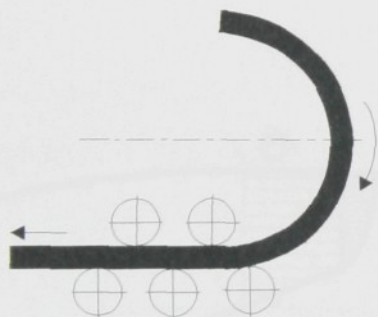
a)



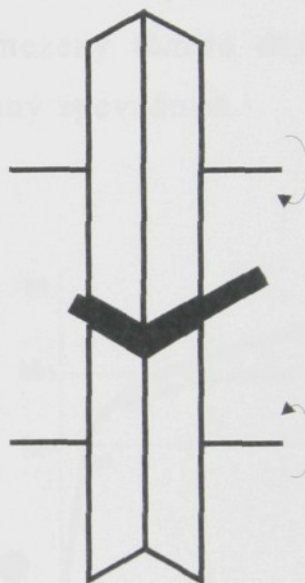
b)



c)



d)



Obr. 2.4 - Příčné válcování : a) navíjení, b) zakružování pomocí tří válců,

c) vyrovnávání válcí

Podélné válcování - d

b) ohýbání (zakružování) pomocí tří válců, kdy materiál se každého ze tří válců dotýká pouze v určitých povrchových přímkách (obr. 2.4b);

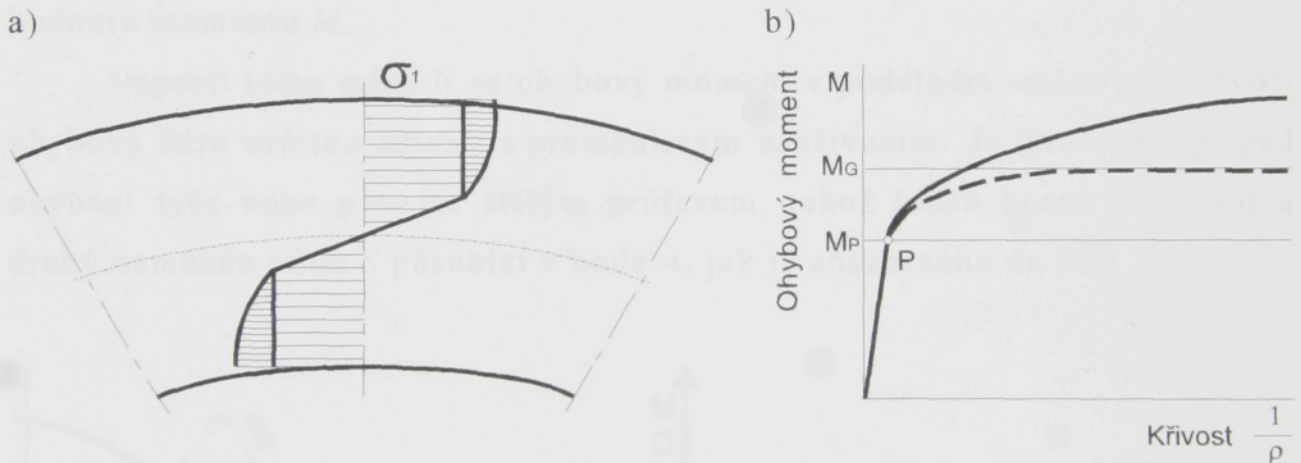
c) vyrovnávání válcí (obr. 2.4c).



2.1 Ohýbání se zpevněním

Ve skutečnosti u materiálů tvářených za studena - tedy i při ohýbání vzrůstá mez kluzu v závislosti na stupni plastické deformace. Proto se zvětšuje i napětí σ_1 , přičemž tento vzrůst je největší v krajních, nejvíce deformovaných vrstvách materiálu. Na *obr. 2.5a* hustě šrafovaná plocha vyjadřuje přírůstek napětí vyvolaný zpevněním.

Přírůstku napětí odpovídá vzrůst ohybového momentu. Ten vzrůstá tím více, čím větší je plastická deformace materiálu a tedy čím menší je poloměr jeho zakřivení. Plná čára na *obr. 2.5b* představuje závislost mezi momentem M a zakřivením $1/\rho$ materiálu, u kterého dochází k zpevnění, čárkovaná křivka materiálu ideálně plastického. Úsek vymezený těmito dvěma čarami znázorňuje přírůstek ohybového momentu vyvolaný zpevněním.



Obr. 2.5 - Vliv zpevňování tvářeného materiálu: a) na rozložení napětí, b) na velikosti ohybového momentu

V průběhu ohýbání dochází k složitým jevům, jako např. k zmenšování tloušťky plechu, radiálnímu přesunu materiálu, odlehčování některých vrstev nebo dokonce k změně smyslu jejich plastické deformace vznikající během procesu. Z uvedeného důvodu lze zpevnění materiálu při ohýbání aplikovat na zobecnění křivky diagramů zpevnění vyjádřené v souřadnicích $\sigma_K - \varphi$ i pouze s velmi značnými obtížemi. Je možno se vyhnout těmto obtížím, určuje-li se základní fyzikální závislost mezi deformací a napětím nikoliv z jednoosé



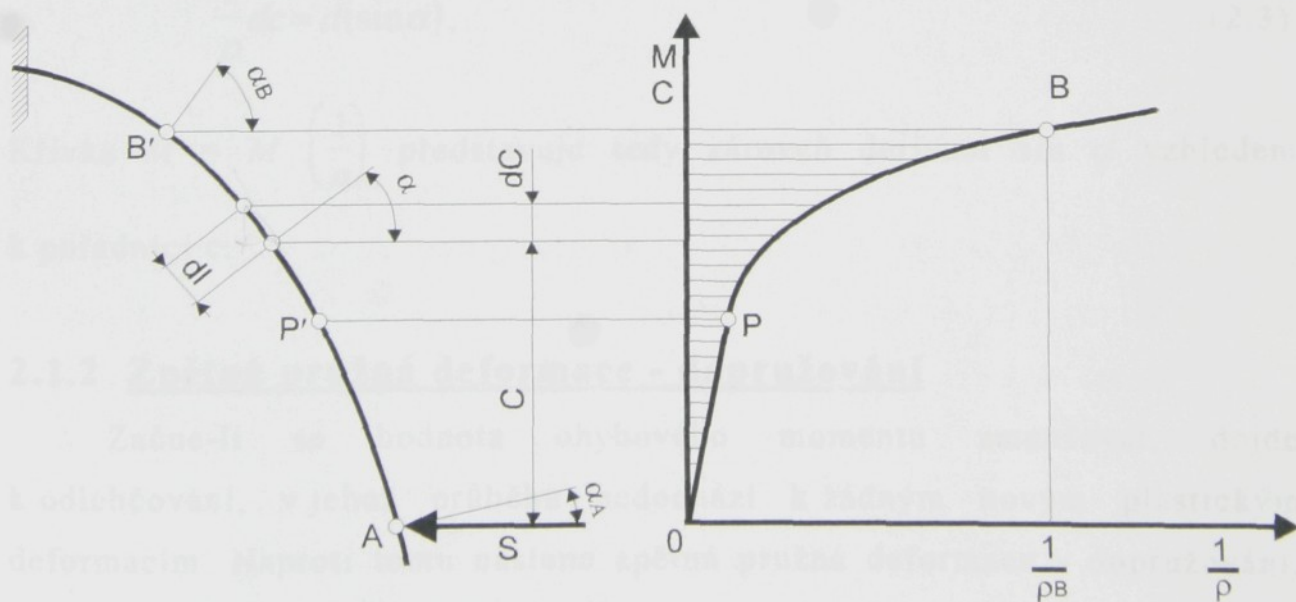
tahové deformace, nýbrž přímo z procesu ohýbání. Místo souřadnic napětí deformace dostaneme v tomto případě diagram o souřadnicích ohybový moment - zakřivení (nebo úhel ohybu), kde jsou respektovány specifické podmínky procesu ohýbání.

2.1.1 Tvar ohybové čáry

Důležitý je tvar, který bude mít osa ohýbané tyče nebo pásu s konstantním průřezem při daném rozložení ohybového momentu. Dojde k omezení na případy, kde složka síly směřující podél tyče je velmi malá a nemá vliv na ohyb její osy.

Velikost ohybu. Má-li ohybový moment v určitém úseku ohýbaného pásu stálou hodnotu, pak tento pás nabývá tvaru kruhového oblouku o poloměru ρ , jehož hodnotu lze přímo určit z diagramu ohýbání pro danou hodnotu momentu M .

Naproti tomu mění-li se ohybový moment v podélném směru pásu, tvoří ohybová čára určitou křivku s proměnlivým zakřivením. Je uvažován případ ohýbání tyče nebo pásu se stálým průřezem, jehož jeden konec je upnut a druhý namáhán silou S působící v bodě A , jak je znázorněno na *obr. 2.6*.



Obr.2.6 - Ohýbání tyče nebo pásu se stálým průřezem



Poněvadž ohybový moment je úměrný ramenu c síly S , lze měřítko obou diagramů na obrázku zvolit tak, aby rameno c i jemu odpovídající moment M byly vyjádřeny stejnou úsečkou. Ohyb tyče v libovolném bodě B' je pak možno odečíst přímo z obrázku, vede-li se z uvažovaného bodu tyče B' přímka rovnoběžná s osou úseček až k protnutí v bodě B s křivkou momentů. Úsečka průsečíku vyjadřuje hledané zakřivení tyče v bodě B' . Na úseku AP' se tyč deformuje pružně, neboť hodnota ohybového momentu je zde menší než mezní hodnota M_p , při které dochází k prvním plastickým deformacím. Nad bodem P nastává trvalá ohybová deformace tyče.

Úhel sklonu. Symbolem α je označen úhel, který v daném bodě svírá kolmice k čáře ohybu se směrem působení síly S . Mezi přírůstkem dc ramena síly a přírůstkem dl délky tyče platí vztah

$$dc = dl \cos \alpha \quad (2.1)$$

S použitím tohoto vztahu lze zakřivení $1/\rho = dx/dl$ v daném bodě, které je derivací úhlu α vzhledem k délce l , vyjádřit

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\cos \alpha d\alpha}{dc}, \text{ popřípadě } \frac{1}{\rho} = \frac{d}{dc}(\sin \alpha) \quad (2.2)$$

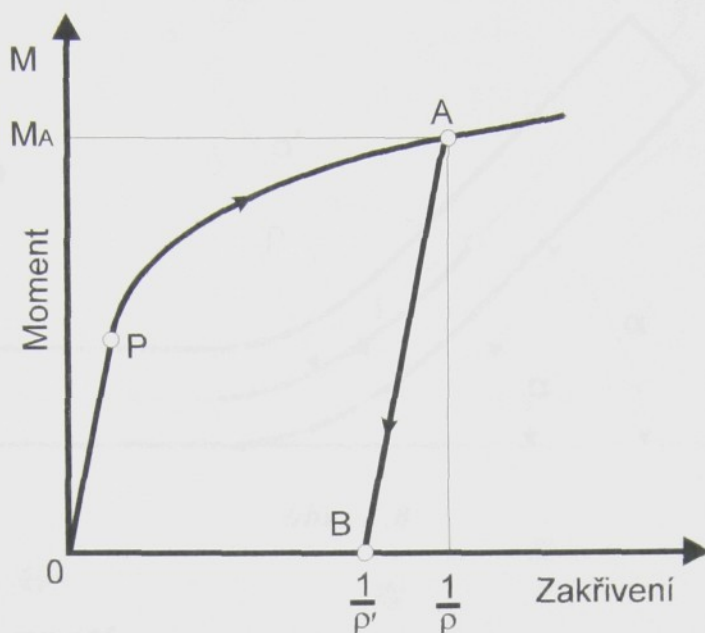
a na základě toho

$$\frac{1}{\rho} dc = d(\sin \alpha). \quad (2.3)$$

Křivka $M = M \left(\frac{1}{\rho} \right)$ představuje tedy zároveň derivaci $\sin \alpha$ vzhledem k pořadnici c .

2.1.2 Zpětná pružná deformace - dopružování

Začne-li se hodnota ohybového momentu zmenšovat, dojde k odlehčování, v jehož průběhu nedochází k žádným novým plastickým deformacím. Naproti tomu nastane zpětná pružná deformace - dopružování, kterou představuje v diagramu na *obr. 2.7* přímka AB , probíhající rovnoběžně s přímkou OP , vyjadřující pružnou fázi procesu zatěžování.



Obr. 2.7 - Vztah mezi ohybovým momentem a zakřivením při zatěžování (čára OPA) a při odlehčování (čára AB)

Jakmile ohybový moment klesne na nulu, zmenší se ohyb materiálu z $1 / \rho$ na hodnotu $1 / \rho'$, kterou lze určit podle vzorce

$$\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho'} = \frac{M}{EJ} \quad (2.4)$$

Tento vzorec představuje základní závislost mezi ohybovým momentem a přírůstkem zakřivení úzkých pásů při dopružování.

U pásů o velké šířce změní se vztah (2.4) na tvar

$$\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho'} = \frac{M(1 - \mu^2)}{EJ} \quad (2.5)$$

kde μ označuje Poissonovo číslo.

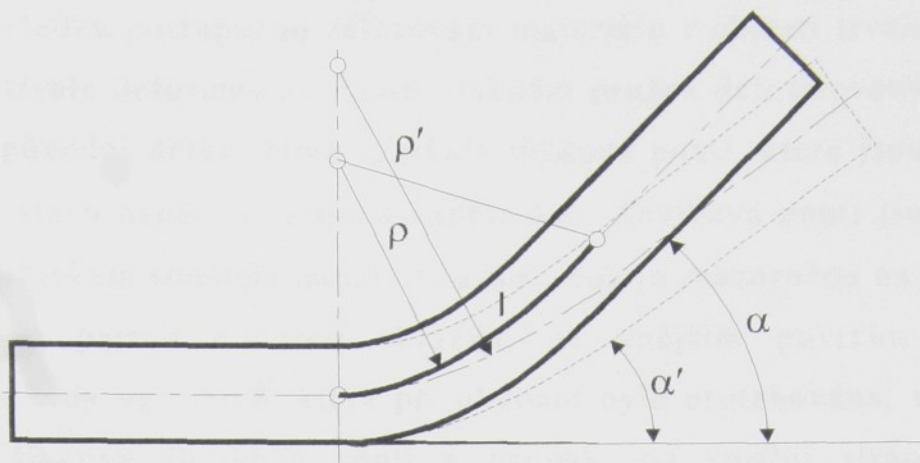
Vyjádří-li se poloměry ohybu ρ a ρ' ve vzorcích (2.4) a (2.5) příslušnými úhly ohybu α a α' ramen tvářeného předmětu (obr. 2.8) s využitím vztahu $\alpha\rho = \alpha'\rho' = l$, kde l je délka oblouku, vznikne vztah

$$\alpha - \alpha' = \frac{Ml}{EJ} \quad (2.6)$$

popřípadě pro široké pásy

$$\alpha - \alpha' = \frac{Ml(1 - \mu^2)}{EJ} \quad (2.7)$$

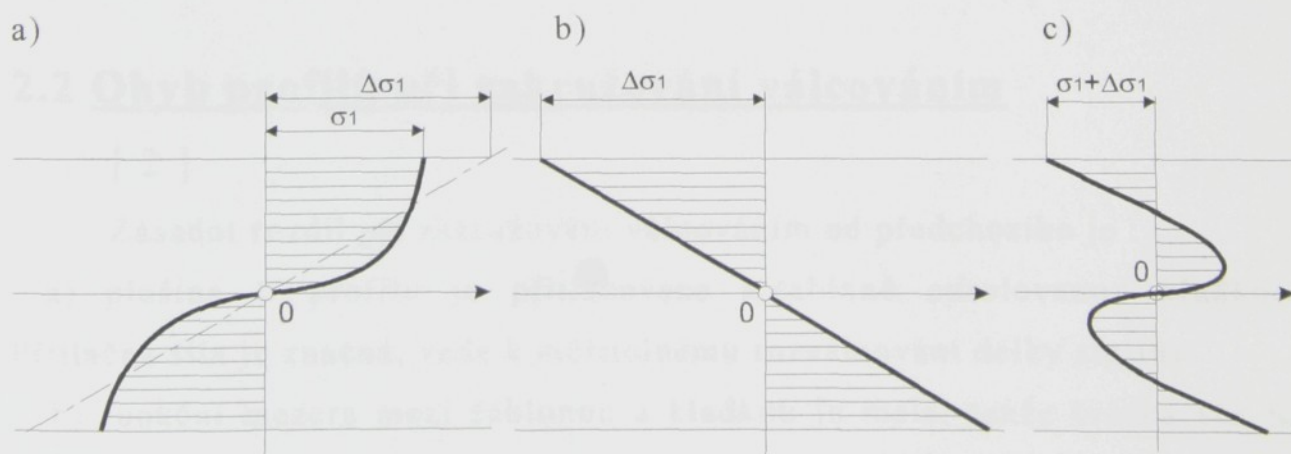
Je-li tedy účelem získat součást s poloměrem ρ' při úhlu ohybu α' , je nutno během ohýbání součást ohnout více, tj. do poloměru ρ a úhlu α .



obr. 2.8

2.1.3 Zbytková pnutí

V průřezu ohýbaného pásu vznikají podélná napětí σ_1 , jejichž rozložení je vyjádřeno křivkou geometricky podobnou křivce na diagramu zpevnění, jak je znázorněno na obr. 2.9a. Proces odlehčování je doprovázen přírůstkem napětí $\Delta\sigma_1$ s opačným znaménkem, jejichž rozložení v průřezu tyče je lineární vzhledem pružnému charakteru procesu odlehčení (obr. 2.9b). Skutečná napětí podle obr. 2.9a a přírůstek napětí $\Delta\sigma_1$ vznikající v průběhu odlehčování (obr. 2.9b) dávají stejnou absolutní hodnotu ohybového momentu vzhledem ke středu průřezu O .



Obr. 2.9 - Rozložení napětí v průřezu ohýbané tyče : a) napětí vzniklá v průběhu plastické deformace při zatěžování, b) napětí během odlehčování, c) zbytková napětí, která zůstávají v materiálu po odlehčení



V důsledku postupného zatěžování materiálu v oblasti trvalé deformace vlákna již trvale deformovaná brání vláknům pružně deformovaným nabýt po odlehčení původní délky, čímž vznikají zbytková pnutí, která jsou výsledkem překrývání stavu napětí σ_1 stavem napětí $\Delta\sigma_1$. Zbytková pnutí jsou v každém bodě algebraickým součtem napětí σ_1 a $\Delta\sigma_1$, což je znázorněno na *obr. 2.9c*.

Jak je patrné z tohoto obrázku, na vnějším povrchu ohýbaného materiálu a tedy ve vrstvě, která při ohýbání byla protahována, vzniknou po odlehčení tlaková zbytková pnutí a naopak; na vnitřní straně vzniknou zbytková pnutí tahová.

Existence zbytkových pnutí má značný vliv na pevnost ohnuté součásti. Je-li zatížena momentem působícím ve stejném směru jako při ohýbání, nastane plastická deformace teprve až hodnota momentu M překročí hodnotu původního momentu M_A , což znázorňuje *obr. 2.10*.

Zatíží-li se naproti tomu ohnutá součást momentem opačného směru, vznikne plastická deformace při značně nižší hodnotě tohoto momentu M_C . Příčinou rozdílu v chování materiálu jsou zbytková pnutí, která se u krajních vláken v prvním případě odečítají od napětí vyvolaných opětovným zatížením a v druhém případě se sčítají (Bauschingerův jev). Proto součásti vyráběné ohýbáním, jako např. pružiny, mají být při své funkci namáhány ve směru shodném se směrem jejich plastické ohybové deformace.

2.2 Ohyb profilů při zakružování válcováním

[2]

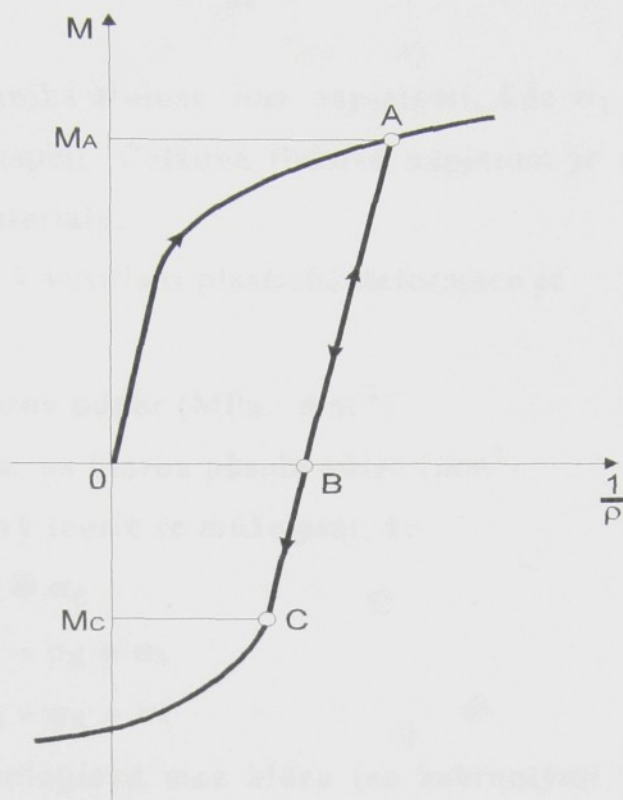
Zásadní rozdíl při zakružování válcováním od předchozího je :

a) plošina U profilu je přitlačována k šabloně odrolovanou kladkou. Přítlačná síla je značná, vede k měřitelnému rozválcování délky stojiny.

b) funkční mezera mezi šablonou a kladkou je malá, takže tvorba vln na stojinách je tím značně omezena. Často dochází k okamžitému rozžehlení právě vzniklých vln.

c) tváření plošiny a stojin se vzájemně ovlivňuje.

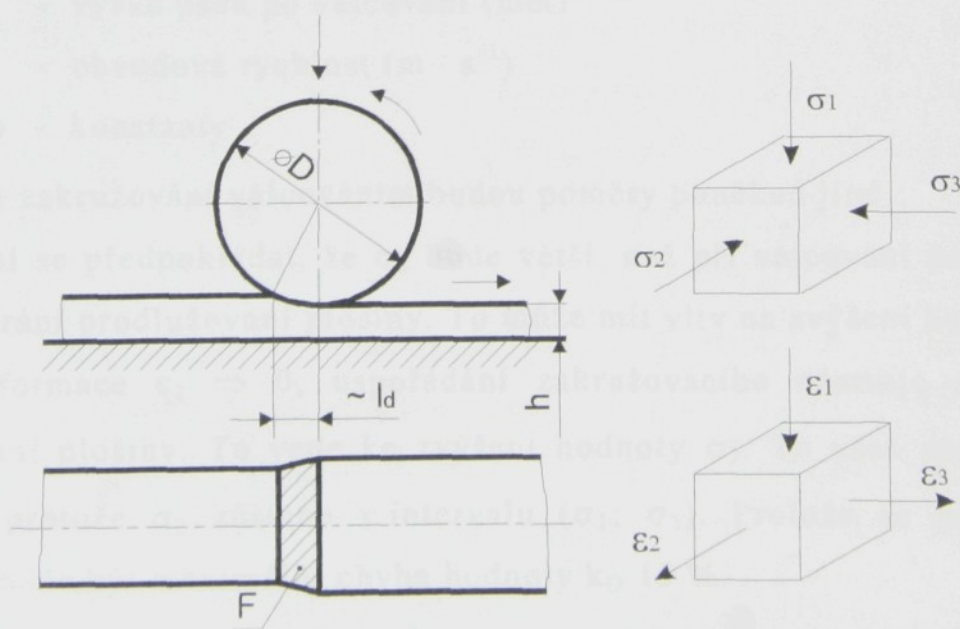
Obr. 2.11



Obr. 2.10 - Vliv napětí na pevnost ohnuté součásti : M_B - mezní moment při namáhání shodném se směrem ohýbání, M_C - při namáhání v opačném směru

2.2.1 Válcování plošiny

Podle obr. 2.11 se uvažuje nejprve válcování pásu na desce (či válci s ∞ velkým poloměrem).



Obr. 2.11



2.2.2 Zakružování válcováním plošiny

V tvářenci vzniká trojosý stav napjatosti, kde $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. Jedná se vesměs o tlaková napětí. Celková tlaková napjatost je pro tváření výhodná, zvyšuje tvárnost materiálu.

Síla potřebná k vyvolání plastické deformace je

$$P_K = k_O \cdot F \quad (2.8)$$

kde k_O - je přetvárný odpor ($\text{MPa} \cdot \text{mm}^{-2}$)

F - je plocha, na kterou působí válec (mm^2).

Podle Trescovy teorie se může psát, že

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_K$$

$$\sigma_1 = \sigma_K + \sigma_3$$

$$k_O = \sigma_K + \sigma_3$$

kde σ_K - je technologická mez kluzu (se zahrnutými vlivy rychlosti, tření eventuelně teploty).

Napětí σ_3 se získá podle Gelejiho ze vztahu

$$\sigma_3 = C \cdot \sigma_K \cdot \mu \cdot \frac{l_d}{h} \cdot \sqrt[n]{v_K} \quad (2.9)$$

μ - je součinitel tření na tlačné ploše

l_d - je délka záběrového oblouku (mm) - je funkcí poloměru válce, výšky pásu a válcovací mezery

h - výška pásu po válcování (mm)

v_K - obvodová rychlost ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

C, n - konstanty

Při zakružování válcováním budou poměry poněkud jiné :

a) Musí se předpokládat, že σ_3 bude větší, než při válcování pásu, protože stojiny brání prodlužování plošiny. To může mít vliv na zvýšení hodnoty k_O .

b) Deformace $\varepsilon_2 \Rightarrow 0$, uspořádání zakružovacího nástroje neumožňuje rozšiřování plošiny. To vede ke zvýšení hodnoty σ_2 . To však není příliš na závadu, protože σ_2 zůstane v intervalu ($\sigma_1; \sigma_3$). Protože se počítá podle Trescy, může být maximální chyba hodnoty k_O 15 %.



2.2.2 Zakružování válcováním profilů

Vedle plastického ohybu plošiny, dochází ještě k tváření plošiny hlazením kladkou. Styk plošiny s kladkou je dán plochou F (obr. 2.11). Velikost přetvárného tlaku na plošinu je dána velikostí mezery mezi kladkou a šablonou. Dochází-li k odvalování kladky po předechnutém nástřihu (obr. 2.12a), dochází k dotyku v bodě A, kde mají kladka a nástřih stejnou rychlost. Obvodová rychlost na přímce AB se zvětšuje se vzdáleností od středu kladky, takže v bodě B dochází k prokluzování o hodnotu hustě šrafovanou v obr. 2.12b. V případě, V profilu jsou poměry jiné. K dotyku mezi kladkou a profilem dochází pouze na přímce AB (obr. 2.13). Nepřesnosti v tloušťce plechu pak umožňují dosednutí např. i v bodě B, a tím i vyrovnání obvodových rychlostí v tomto bodě. Potom ovšem dojde k prosmykávání kladky po plošině profilu (obr. 2.12c).

Při uspořádání podle obr. 2.13 se získá ještě tlaková složka P_{kp} , která přitlačuje stojinu na šablonu, a tím celkem příznivě ovlivňuje napjatost v ní.

Ve všech případech rozválcování plošiny předává tahové napětí do tažených vláken ohýbaných stojin.

2.3 Činitelé omezující ohýbání

[1]

Získání požadovaného zakřivení součástí ohýbáním není vždy možné. Překážkou může být např. praskání materiálu na natahované straně, vznikání vln na stlačované straně a deformace příčného průřezu během ohýbání.

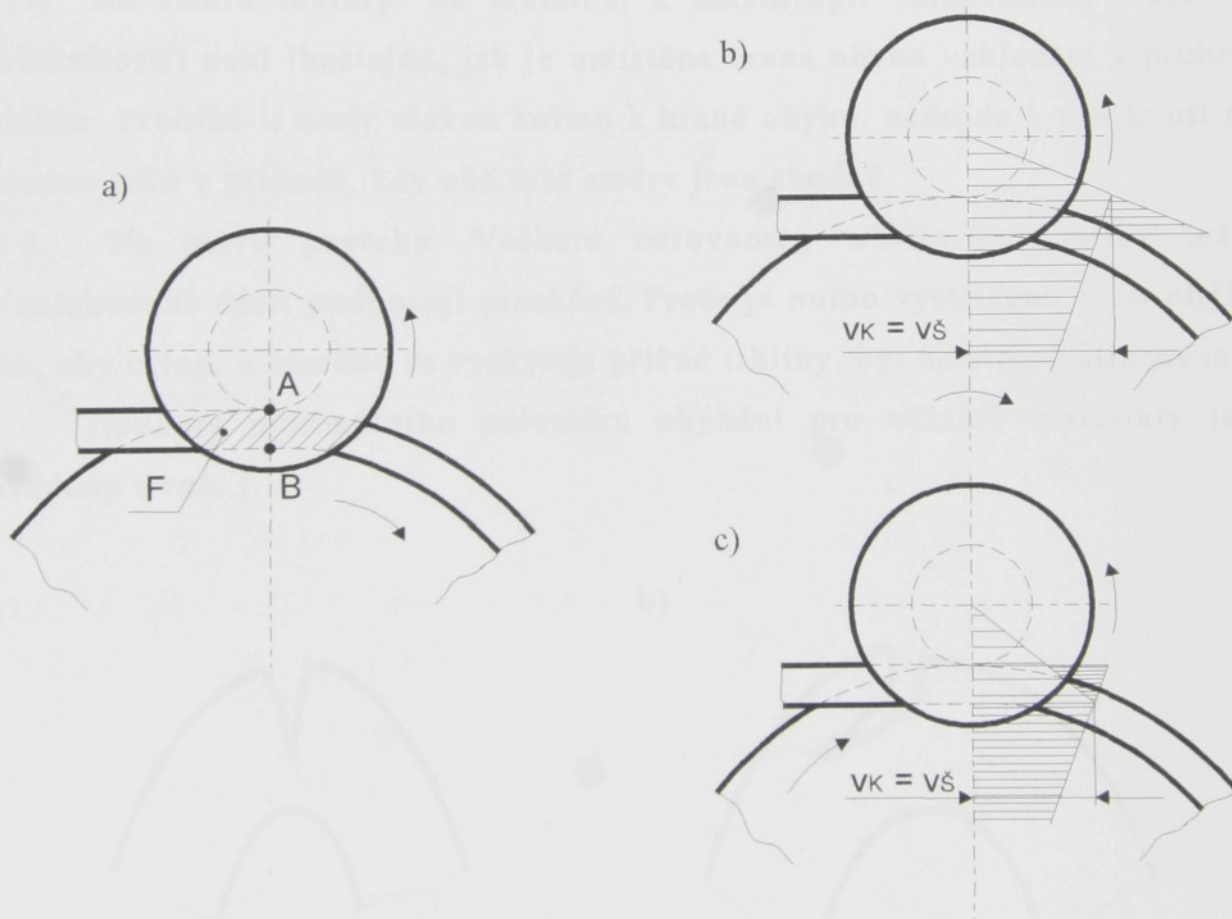
Praskání materiálu. Vlivem zpevňování materiálu vzrůstají na vnější vrstvě tahová napětí spolu se zvětšováním ohybu. Při určité kritické hodnotě poloměru ohybu $R_{\min}$ se soudržnost materiálu poruší a vzniknou trhliny probíhající od vnějšího povrchu součásti materiálu (obr. 2.14a). Většinou jsou trhliny kolmé k povrchu součásti. Za určitých podmínek mohou rovněž vzniknout trhliny, probíhající rovnoběžně s osou ohýbaného předmětu (obr. 2.14b), a vedoucí k odlupování vrstev.



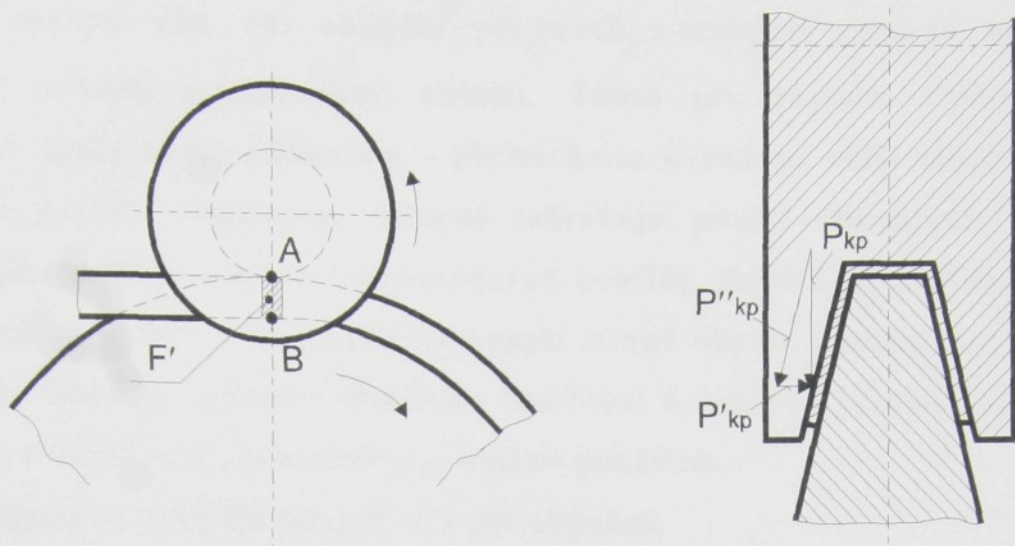
Mezní hodnota poměru $R_{\min} / s$, při kterém dochází k praskání, je závislá na mnoha činitelích, především :

1. Na druhu materiálu. Velmi tvárné materiály, jako měkká ocel, měď, hliník, lze ohýbat velmi malými poloměry; naproti tomu je nutno ohýbání tvrdých materiálů přerušit při poměrně velkých hodnotách vztahu $R_{\min} / s$.

2. Na stavu materiálu. U materiálů za studena deformovaných (např. válcováním) dojde k porušení při větším poloměru ohybu než u materiálů žháných. Je nutno uvážit, že rovněž během stříhání dochází k zpevnění materiálu, které omezuje možnosti jeho ohýbání.



Obr. 2.12



Obr. 2.13

3. Na směru textury. Se zřetelem k anizotropii válcovaného materiálu (vláknitosti) není lhostejné, jak je umístěna hrana ohybu vzhledem k průběhu vláken. Probíhá-li směr vláken kolmo k hraně ohybu, nedojde k prasknutí tak snadno jako v případě, kdy oba tyto směry jsou shodné.

4. Na stavu povrchu. Veškeré nerovnosti, trhliny a pukliny ležící v natahované části podporují praskání. Proto je nutno vystřižené části ohýbat tak, aby otřep, u kterého se vyskytují příčné trhliny, byl na straně stlačování.

Hodnoty minimálního poloměru ohýbání pro některé materiály jsou uvedeny v tab. I.

a)



b)



Obr. 2.14 - Porušení materiálu během ohýbání



Tvoření vln. Při ohýbání předmětů s tenkými stěnami může dojít k jejich zvlnění v stlačované oblasti. Tento jev nastane v případě, kdy zkrácení délky stěny stlačením - pěchováním vyžaduje větší množství práce než její zvlnění. Možnosti zvlnění zabraňuje použití obvyklých ohýbacích metod při ohýbání mnoha tenkostěnných profilů. Například profily *U* mohou být volně ohýbány se stojinami na vnější straně ohybu, naproti tomu ohýbání opačným směrem vyžaduje značnou opatrnost a mnohdy je neuskutečnitelné. Především tvoření vln u materiálu je možno použitím

- dodatečné podélné tahové síly při ohýbání,
- bočního přitlačování materiálu v nástroji.

Druhého způsobu se někdy používá při ohýbání plochých profilů na výšku; tvářený materiál je při tomto ohýbání omezován ze všech stran plochami nástroje.

Tab. I. - Minimální hodnoty poloměru $R_{\min}$ / s při ohýbání

Materiál	Žíhaný		Zpevněný	
	napříč vláken	podél vláken	napříč vláken	podél vláken
Hliník	0	0,2	0,3	0,8
Měď	0	0,2	1,0	2,0
Mosaz 68 (42 32 13)	0	0,2	0,4	0,8
Ocelový hlubokotažný plech	0	0,2	0,2	0,5
Ocelový plech St. 1, St. 2 (11 340)	0	0,4	0,4	0,8
Ocelový plech St. 3 (11 370)	0,1	0,5	0,5	1,0
Ocelový plech St. 4 (11 420)	0,2	0,6	0,6	1,2
Ocel St. 5 (11 500)	0,3	0,8	0,8	1,5
Ocel St. 6 (11 600)	0,5	1,0	1,0	1,7
Ocel St. 7 (11 700)	0,7	1,3	1,3	2,0
Dural měkký	1,0	1,5	1,5	2,5
Dural tvrdý	2,0	3,0	3,0	4,0



Deformace příčného průřezu. Zvětšování příčných rozměrů stlačovaných vrstev a zmenšování těchto rozměrů na straně tahového namáhání vyvolává změnu tvaru příčného průřezu ohýbaného materiálu. Při ohýbání úzkých tyčí o průřezu pravoúhlého čtyřúhelníku se zvětšuje šířka materiálu na straně stlačování a zmenšuje na straně protahování. Původní pravoúhlý tvar průřezu se mění na tvar přibližně lichoběžníkový, přičemž dochází k dodatečnému zakřivení materiálu v příčném směru.

K největším změnám tvaru dochází při ohýbání tenkostěnných profilů. Zároveň se změnou tloušťky stěn dochází k jejich vybočení tak, že ohybový moment se zmenšuje. Zvlášť velká deformace nastává při volném ohybu trubek, jejichž průřez se při ohýbání zplošťuje.



3. Základní charakteristiky technologie protahování s lemováním otvorů

[3]

Pro vytvoření válcové stěny hrdla 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 hrdlo lze protáhnout. Při daném průměru tažníku, tj. průměru budoucího hrdla, však nelze bez omezení zmenšovat otvor v přístřihu. Při protahování otvorů s příliš malým výchozím průměrem dojde ke vzniku trhlinek (meznímu stavu), eventuálně k úplnému roztržení plechu a válcové hrdlo potom nelze vytvořit. Úkolem je však dosáhnout mezního stavu (tj. vzniku trhlinek) až při konečném lemování a ne již při protahování hrdla. Proto se při tomto experimentu vychází z již známých závislostí a podle toho je volen i výchozí otvor. Maximální šířka lemu je tedy omezena tvárností materiálu.

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

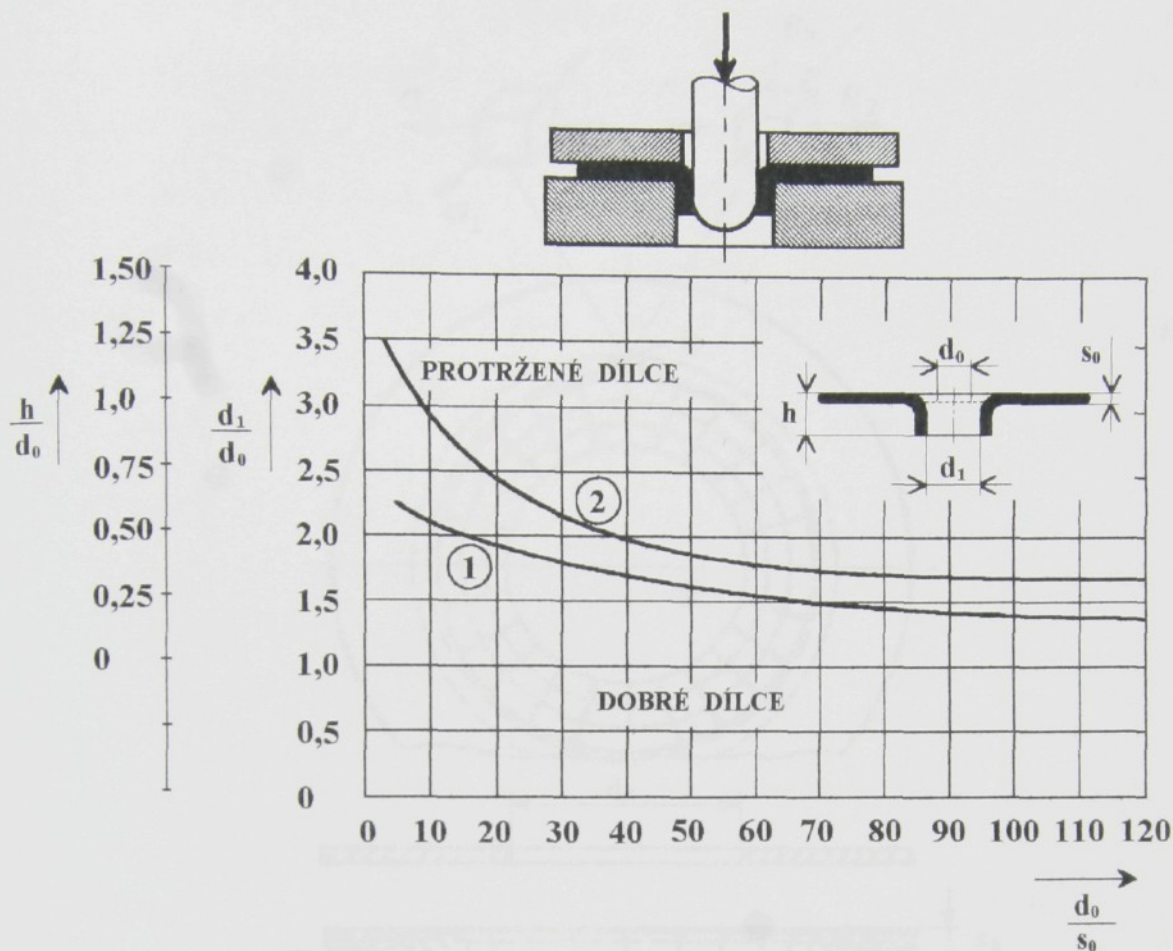
$$k=r_0/ r_1 \quad (3.1)$$

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 [4] používá i převrácených hodnot těchto parametrů, viz. Obr. 3.1.

Ze vzájemné polohy křivek je vidět negativní vliv prostřihování otvoru v polotovaru na plastičnost. Vyčerpání plasticity v okolí střižné hrany a přítomnost ostřiny je totiž právě na průměru, který je vystaven maximálnímu přetvoření. Ohřevem nízkouhlíkové oceli na teplotu 700°-850°C dochází k posuvu křivky k vyšším hodnotám d_1/d_0 až o 20% oproti křivce 1. Tento diagram však popisuje pouze mezní stupeň deformace pro protahování hrdla. Pro technologii lemování bude diagram experimentálně zjištěn.

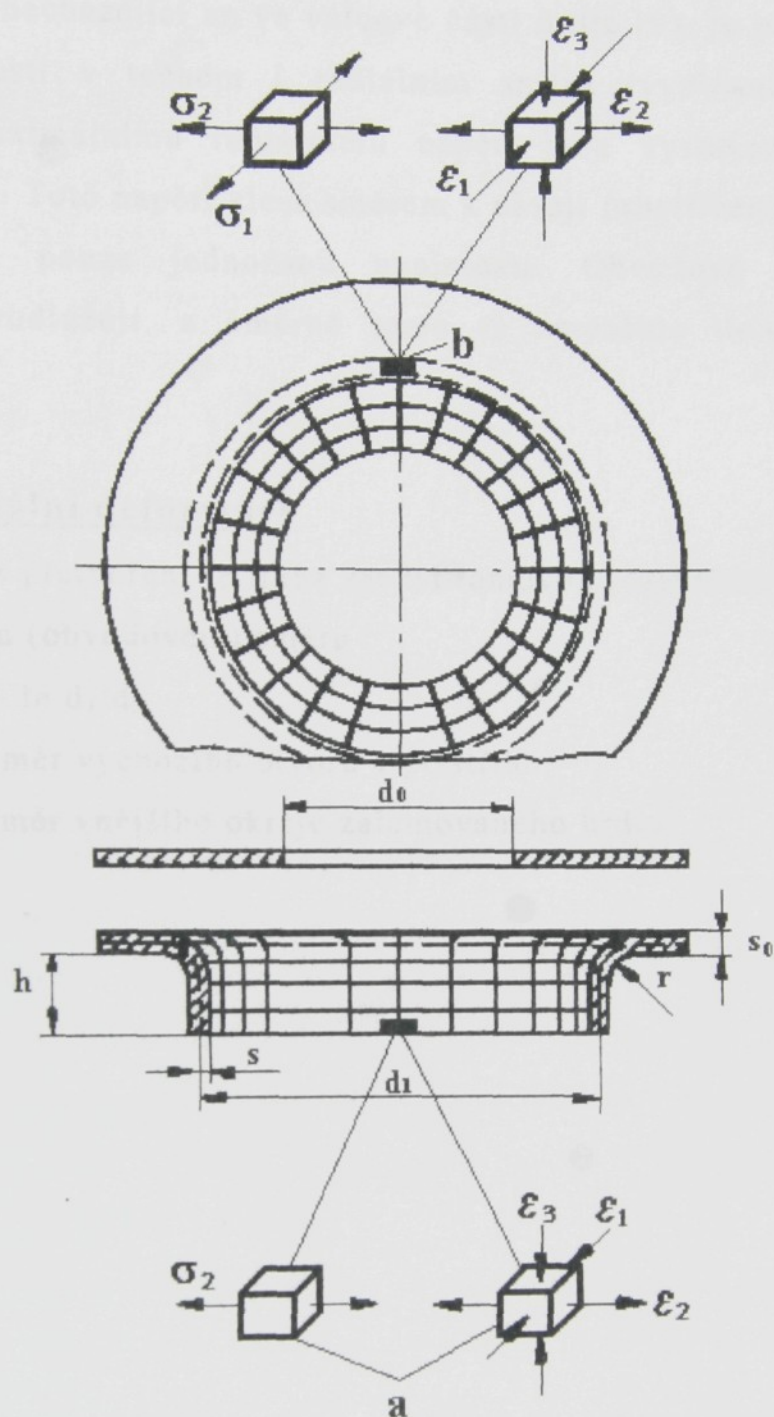


Obr. 3.1 - Mezní stupeň deformace při protahování

3.1 Napětí a deformace při protahování

[3]

Při protahování otvorů dochází ke složité nerovnoměrné napjatosti, která vyvolává nerovnoměrnou deformaci. Na následujícím obr.3.2 jsou mechanickými schématy naznačeny průběhy a směry napětí a deformace v protahovaném mezikruží.



Obr. 3.2 - Schémata napjatosti a přetvoření při protahování



Element nacházející se ve válcové části hrdla (b), je podroben rovinné tahové napjatosti v tečném i radiálním směru (vypínání) a prostorové deformaci. Maximálnímu radiálnímu napětí jsou vystaveny elementy na rádiusu tažnice. Toto napětí klesá směrem k okraji prostřiženého otvoru (a) je tedy namáhán pouze jednoosou napjatostí. Obvodová vlákna se při protahování prodlužují, a úměrně tomu se zmenšuje tloušťka výchozího materiálu.

3.2 Tangenciální deformace

Pro popis přetvoření je třeba zavést lomovou (logaritmickou) deformaci v tangenciálním (obvodovém) směru :

$$\varphi_t = \ln d_1/d_0 \quad (3.2)$$

kde d_0 průměr výchozího otvoru v přístřihu,

d_1 průměr vnějšího okraje zalemovaného hrdla



4. Návrh metodiky zjišťování mezního přetvoření při ohýbání profilů z plechu

Pro zjištění mezního přetvoření při ohýbání profilů z plechu byla zvolena metodika zakružování U profilů s různou výškou stojiny. Pro vyhodnocení vlivu gradientů deformace na mezní přetvoření by bylo nutné na vzorky nanést deformační síť. Dostatečná hustota elementů by zaručila poměrně přesné měření konečné deformace, resp. velikost obvodového gradientů deformace.

4.1 Popis nástroje a jeho funkce

Mimo rámec zadání byl zkušební přípravek (zakružovací nástroj) vyroben dle konstrukčního návrhu na KTP TU v Liberci. Na zakružovacím nástroji byly zkušebně zakrouženy vzorky zhotovené postupem uvedeným v následující kapitole 4.2.

Zkušební vzorek byl navlečen na kladku (pozice č.1), která umožňuje pouze rotační pohyb na čepu 1 (pozice č.4). Poloha rolny (pozice č.2) se vymezení vzhledem ke vzorku navlečenému na kladce pomocí kamenů (pozice č.5) a stavěcích šroubů (pozice č.13) tak, aby se rolna vzorku dotýkala. Rolny jsou výměnné, voleny o průměrech 40, 50, 60, 70 mm viz. *obr. 4.5*.

Protože bylo nutné profil na jednom konci v nástroji zajistit proti pohybu, byl vzorek konstrukčně upraven (*obr. 4.3*). Dále byl vzorek v nástroji upevněn šrouby na základové desce (pozice č.9), jak je zřejmé z *obr. 4.4*. Nástroj je konstruován tak, že i při největším průměru rolny bude profil stále veden mezi postraními kotouči (pozice č.3) a nebude docházet k jeho uzavírání. Nástroj také umožňuje zakroužení o více než 180° .

Po upevnění vzorku a vymezení polohy rolny byl nástroj připraven k zakružování (*obr. 4.6*). Na stopku (pozice č.8) byla nasunuta páka a vyvozením síly na tuto páku byl profil zakroužen. Nástroj se zkušebním vzorkem po zakroužení je na *obr. 4.7*. Samotný vzorek po zakroužení je na *obr. 4.8*.



Sestava a výrobní výkresy jednotlivých součástí zakružovacího nástroje jsou přiloženy.

4.2 Příprava zkušebních vzorků

Zkušebním materiálem byl ocelový plech elektrolyticky pozinkovaný FeP05 ZE 75/75 PH o tloušťce 0,9 mm. Výrobce tohoto plechu je firma Voest Alpine, Linz - Rakousko.

Ke zkoušce byly použity vzorky zhotovené rozstřížením tabule plechu na pruhy o různých šířkách. Následně byly pruhy dané šířky ohnuty na ohýbačce tak, aby byla zachována konstantní šířka plošiny profilu (35 mm). Z toho vyplývá, že u vzorků vyráběných z jednotlivých šířek pruhů se mění pouze výška stojiny (*obr. 4.2*). To je důležité, protože nástroj má výměnné rolny o různých průměrech což znamená, že pro každý průměr rolny musí být použit profil o jiné výšce stojiny, aby nastal mezní stav. Délka zkušebních vzorků byla zvolena 500 mm, aby bylo možné profil zakroužit o 180°.

Cílem experimentu bylo zjistit při jakém poloměru ohýbání (poloměru rolny) a výšce stojiny mezní stav nastane. Získá se vlastně závislost deformace na poloměru ohybu, při kterém vzniká mezní stav.

Pro logaritmickou deformaci platí vztah

$$\varphi = \ln \frac{R+h}{R} \quad (4.1)$$

kde R poloměr ohybu (resp. poloměr rolny)

h výška stojiny.

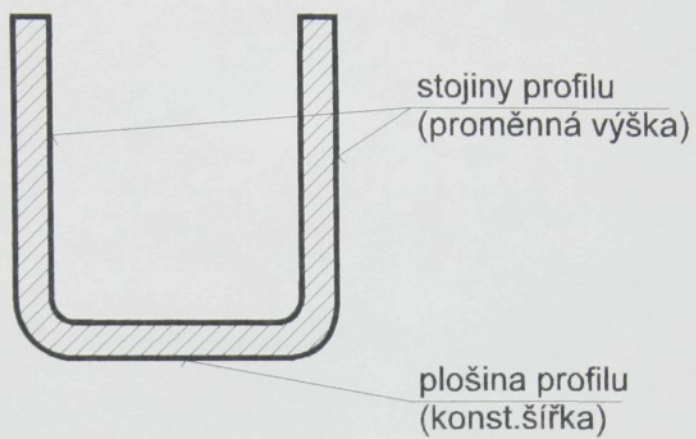
Velikost obvodového gradientu deformace je dána vztahem

$$GradO = \frac{\varphi_{II} - \varphi_I}{L} \quad (4.2)$$

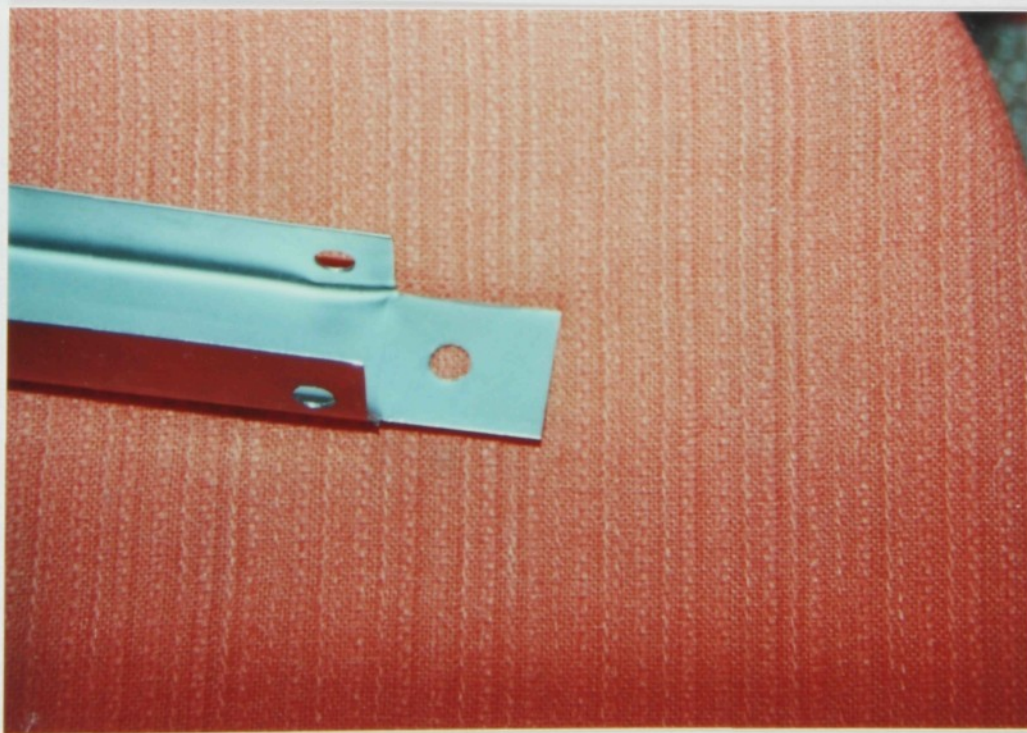
kde φ_{II} lomová tangenciální deformace

φ_I velikost tangenciální deformace ve vzdálenosti L od φ_{II}

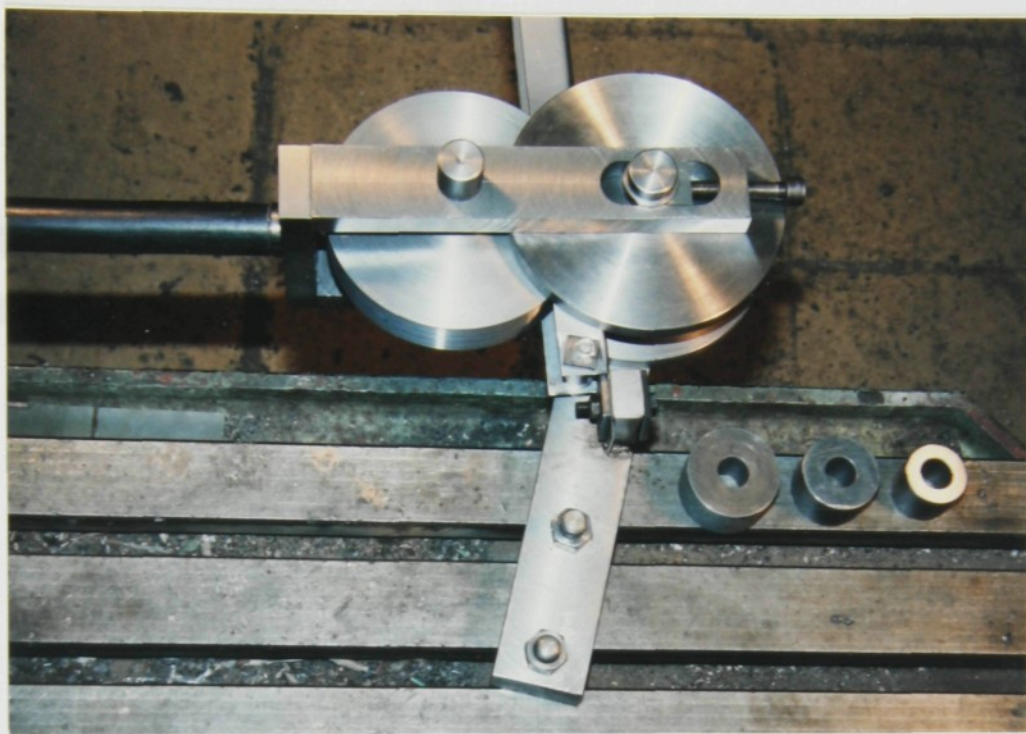
L obvodová vzdálenost měřených elementů.



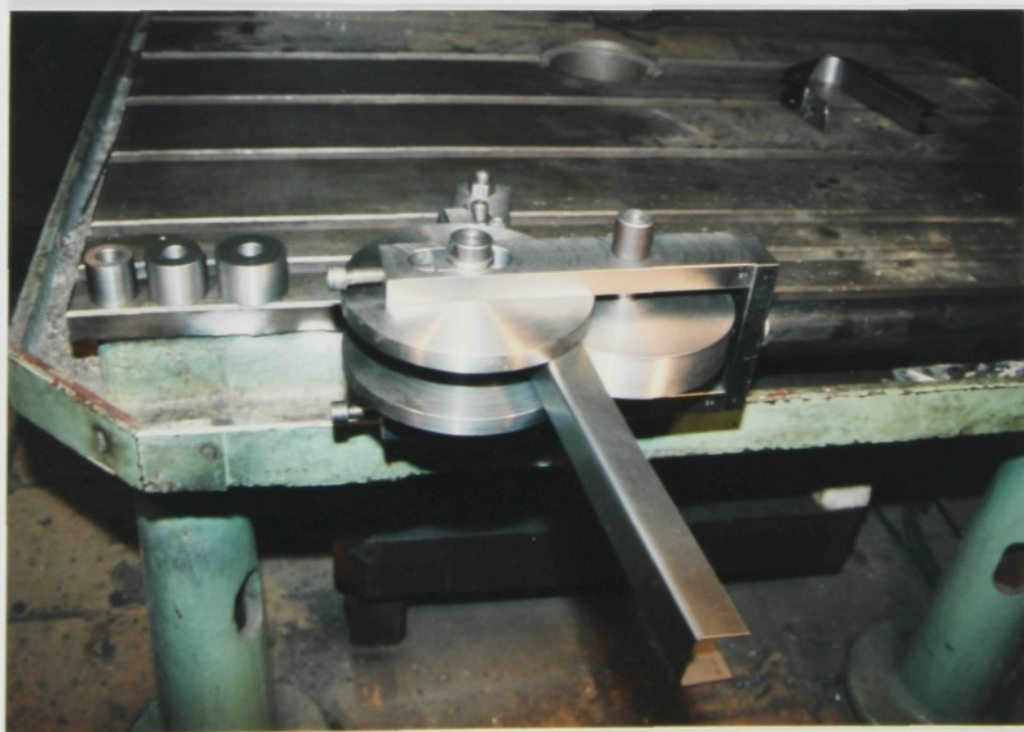
Obr. 4.2 - Zkušební vzorek



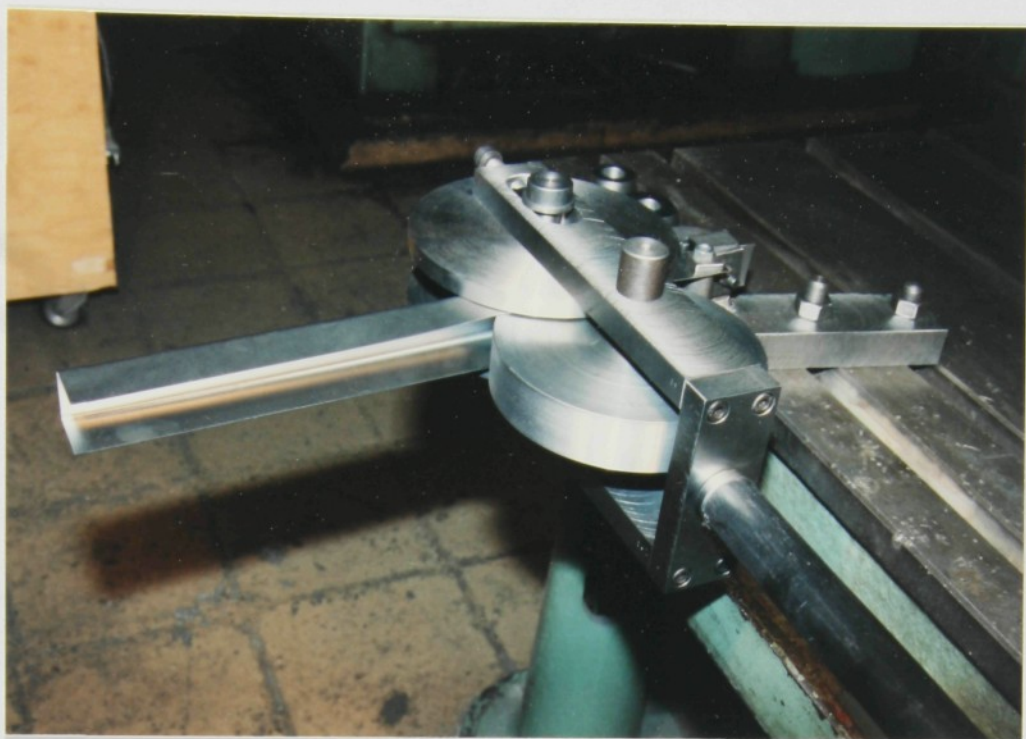
Obr. 4.3 - Upravený zkušební vzorek proti pohybu



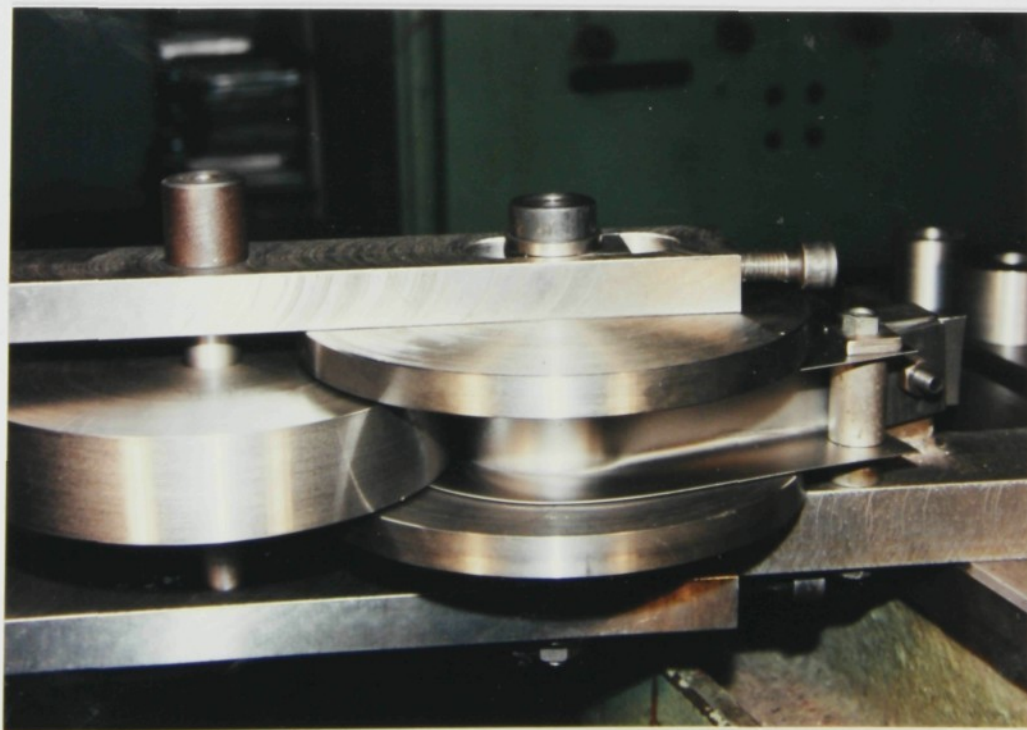
Obr. 4.4



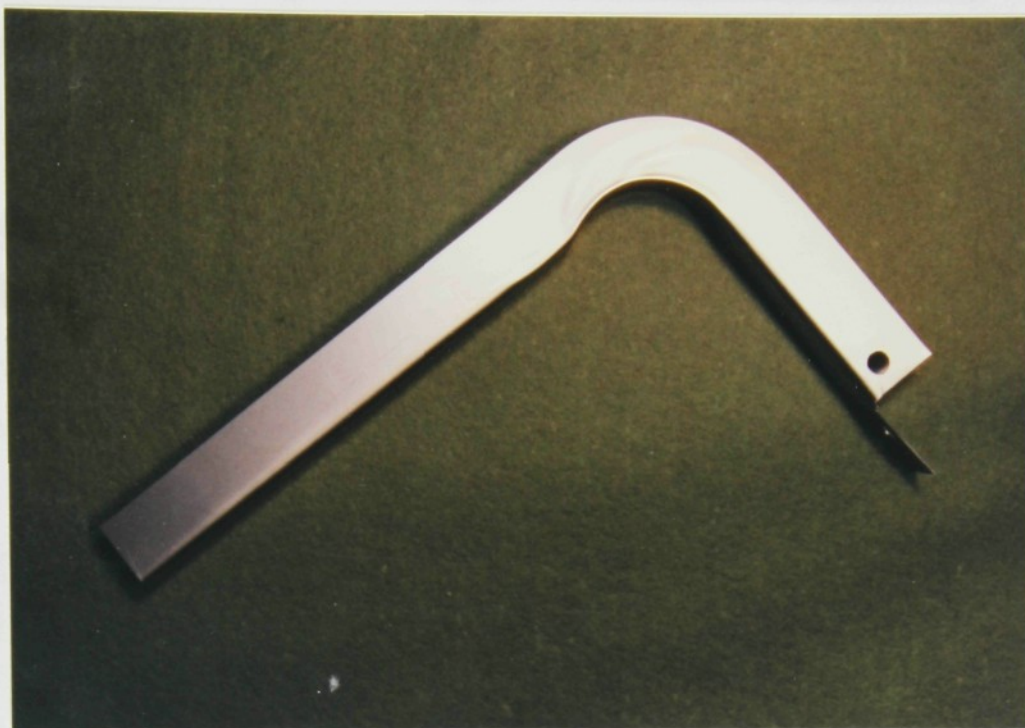
Obr. 4.5 - Zakružovací nástroj s výměnnými rolnami



Obr. 4.6 - Zakružovací nástroj se zkušebním vzorkem před zakroužením



Obr. 4.7 - Zakružovací nástroj se zkušebním vzorkem po zakroužení



Obr. 4.8 - Zkušební vzorek po zakroužení



5. Návrh metodiky zjišťování mezního přetvoření při lemování

Pro zjištění mezního přetvoření při lemování dílů z plechu byla zvolena metodika lemování kruhových přístřihů s různými otvory. Experiment byl proveden nástrojem navrženým a vyrobeným na KTP TU v Liberci. Pro zjištění vlivu obvodového gradientu deformace na mezní přetvoření byly zvoleny čtyři různé průměry výchozích otvorů, které modelují čtyři velikosti obvodových gradientů deformace.

5.1 Příprava vzorků

Zkušebním materiálem byl ocelový plech elektrolyticky pozinkovaný FeP05 ZE 75/75 PH. Výrobcem tohoto plechu je firma Voest Alpine, Linz - Rakousko. Mechanické hodnoty plechu byly zjištěny zkouškou tahem na zkušebních normalizovaných tyčkách o tloušťce 0,9 mm, šířce 20,5 mm a délce zkušebního úseku 80 mm. Zkušební tělesa byla z plechu odebrána jednak ve směru válcování 0° a též kolmo na směr válcování 90°. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tab. II. a graf zkoušky tahem je na *obr. 5.1*.

Tab. II. - Materiálové hodnoty plechu FeP05 ZE 75/75 PH

směr odebrání	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_H [%]	A_{80} [%]	n [-]	r [-]
0°	154	277,7	24,88	43,92	0,227	1,589
90°	157,9	274,1	23,77	43,72	0,223	2,047

Experiment byl proveden na kruhových přístřizích. Vnější obvod přístřihu byl vystřižen ve střižném nástroji na excentrickém lisu. Otvory ve vzorcích byly předvrtány na soustruhu a následně přesoustruženy na požadovaný průměr d_0 . V tomto případě šlo o to, aby byly dodrženy stejné podmínky při lemování všech výchozích průměrů. Při stříhání otvorů různých průměrů by se stejné podmínky nemusely dodržet (např. velikost střižné mezery). Pro výpočet velikosti obvodového gradientu deformace byl použit



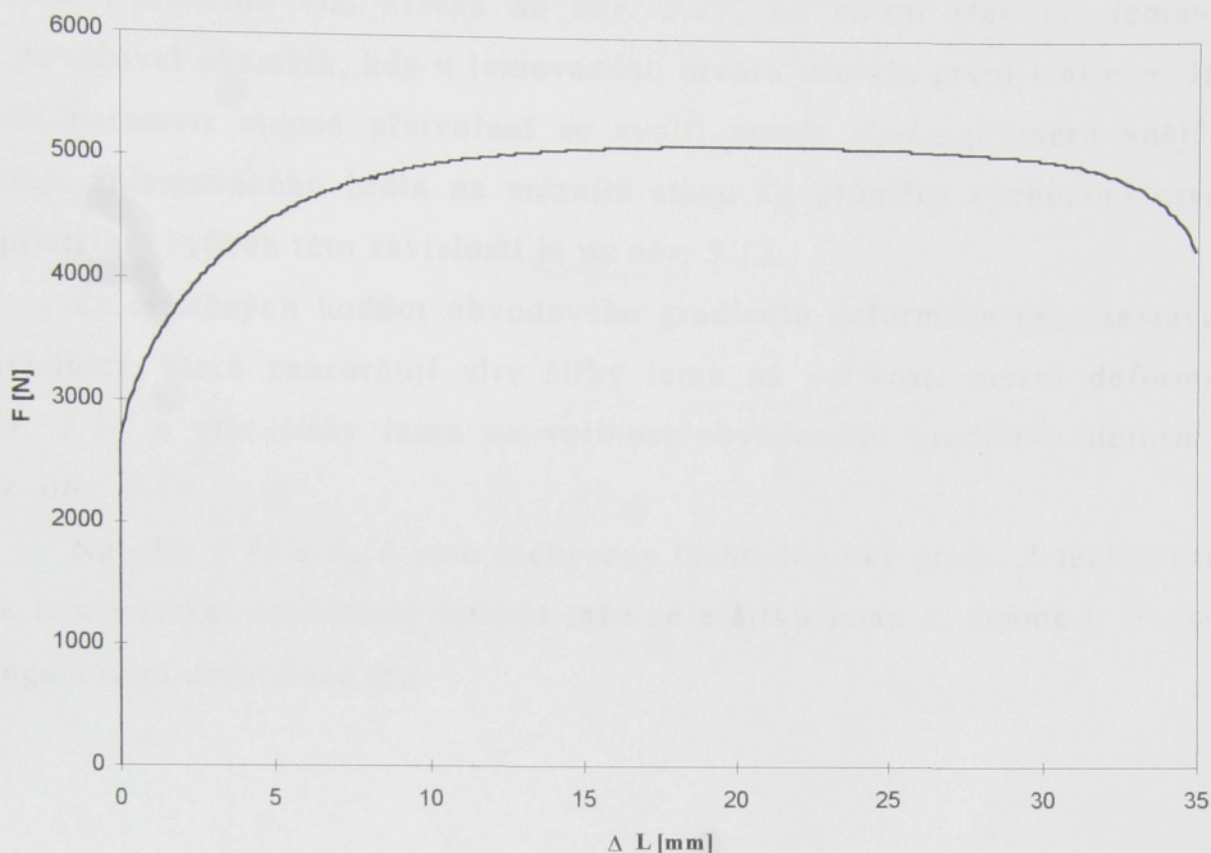
vztah 4.2, kdy velikost lomové tangenciální deformace je dána vztahem 3.2. Velikost tangenciální deformace na vnitřním okraji hrdla (ve vzdálenosti h od Φ_{tl}) je nulová. Obvodová vzdálenost míst, na kterých byla deformace měřena je rovna šířce lemu h .

5.2 Zkušební nástroj

K protažení vzorků a jejich následnému lemování bylo použito nástroje s výměnným tažníkem a tažnicí, který umožňuje protahovat kruhové přístřihy s různým výchozím otvorem. Průměry tažnic byly voleny 40, 50, 60, 70 mm. K postupnému rozšiřování hrdla byly zhotoveny dva kužele univerzální pro všechny průměry protažených otvorů. Tyto kužele se liší pouze kuželovitostí. Kuželovitost prvního kužele byla 60° a druhého 120° jak je patrné z *obr. 5.4* a *5.6*. První s menší kuželovitostí protažené hrdlo sice rozšíří (největší průměr je na okraji hrdla), ale kdyby se následně lemovalo, okraj hrdla by měl snahu se předčasně uzavřít. Okraj lemu by se vlastně přehrnoval na vnější stranu hrdla. Mezní stav by potom nenastal ve stejném okamžiku jako kdyby se lem předčasně neuzavřel. Proto byl použit ještě druhý kužel s větší kuželovitostí, který hrdlo ještě více rozšířil (hlavně jeho okraj) a při konečném lemování nedošlo k předčasnému uzavření lemu.

5.3 Popis experimentu

Na vzorcích s určitým výchozím průměrem bylo nejprve pomocí tažníku a tažnice (*obr. 5.2*) protaženo hrdlo. Protažený vzorek je na *obr. 5.3*. Při protahování byl tažník mazán olejem. Dále byl vzorek z tažnice opatrně vyjmut a pomocí kruhového přípravku a upínek upnut, aby vzorek zůstal rovný. Potom bylo hrdlo rozšiřováno nejprve jedním kuželem (*obr. 5.4*) a následně druhým (*obr. 5.6*), ale již bez upnutí. Na *obr. 5.5* a *obr. 5.7* jsou vzorky po rozšíření. Nakonec bylo rozšířené hrdlo zalemováno pomocí lisovadla s rovným čelem (*obr. 5.8*). Výsledek je na *obr. 5.9*.



Obr. 5.1 - Závislost získaná zkouškou tahem

5.4 Mezní přetvoření

Mezní stav při lemování nastal se vnikem prvních trhlinek. Detail vzorku, u kterého bylo dosaženo mezního stavu je na obr. 5.17. K tomu, aby bylo mezního stavu dosaženo, musí být vhodně zvolen průměr výchozího otvoru.

Pro každý průměr tažníku a tažnice bylo celkem u tří vzorků dosaženo mezního stavu. U těchto vzorků byl znám průměr výchozího otvoru a změřen průměr vnějšího okraje zalemovaného hrdla. Z takto získaných hodnot se spočítal aritmetický průměr a tangenciální lomová (obvodová) deformace podle vztahu (3.2). A dále byl sestrojen graf závislosti lomové tangenciální deformace φ_{tl} na průměru tažnice d_0 (obr. 5.10).

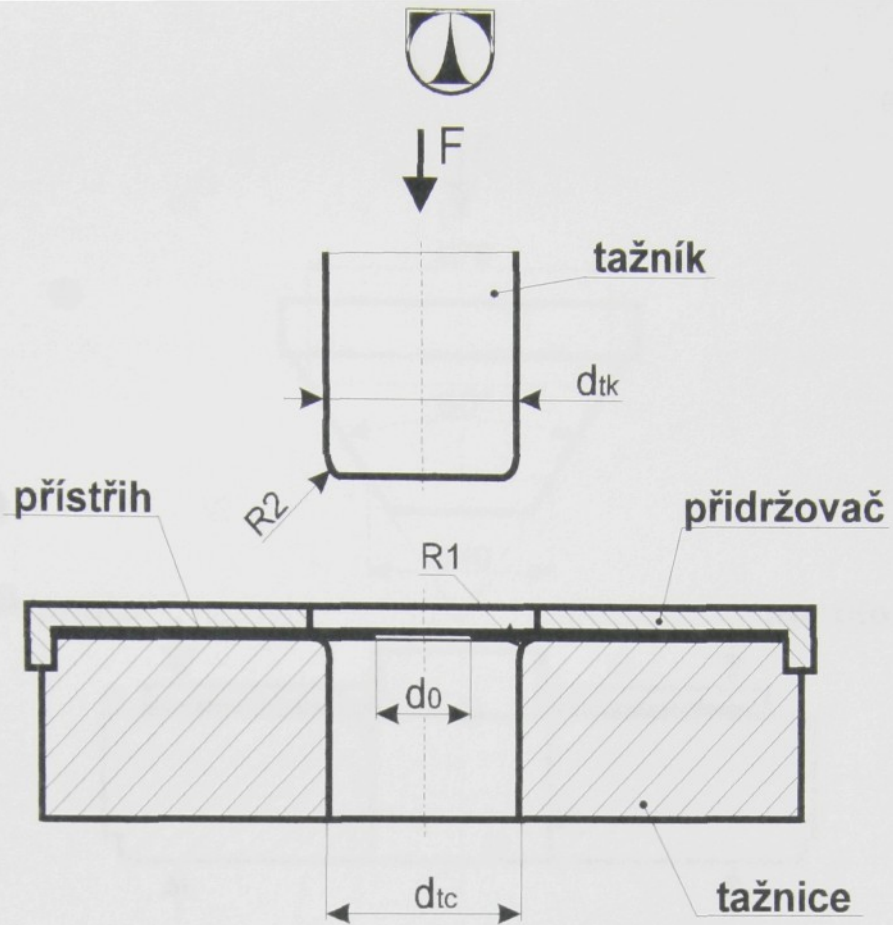
Výsledky byly též použity pro sestrojení grafu mezních stupňů deformace při lemování. Jako parametr stupně přetvoření byl zvolen jednak



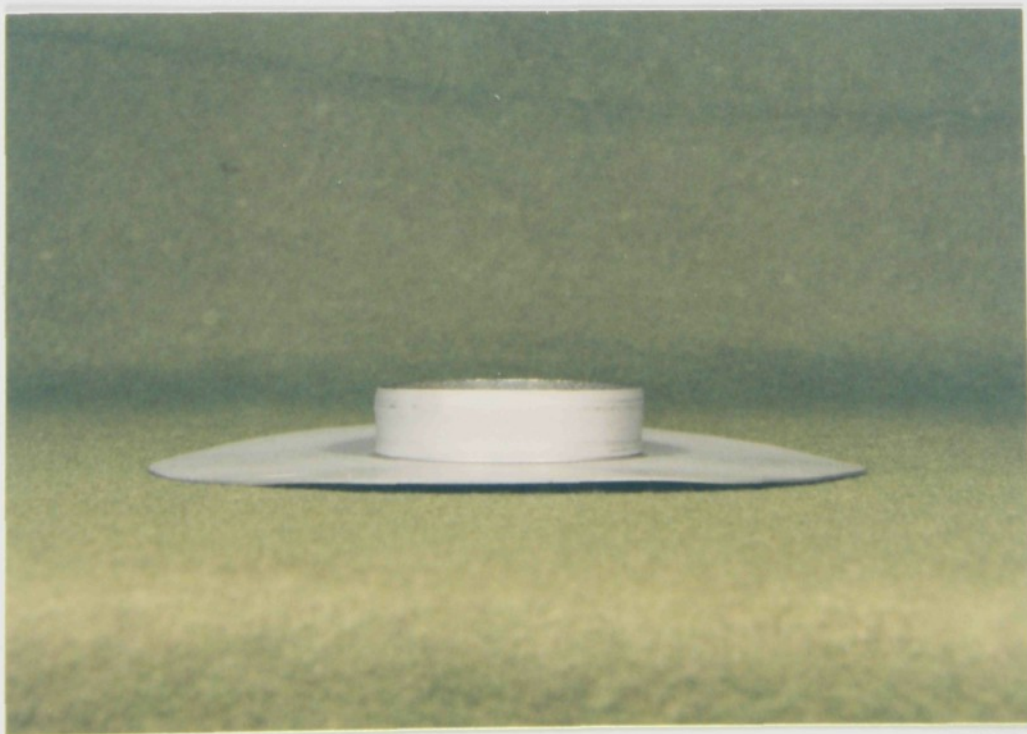
poměr h/d_0 , tedy šířka lemu vzorku na mezním stavu k počátečnímu průměru otvoru v přístřihu viz. křivka na *obr. 5.11*. Za mezní stav při lemování se považoval okamžik, kdy u lemovaného otvoru vznikla první trhlina. Jako další parametr stupně přetvoření se zvolil poměr d_1/d_0 , průměru vnějšího okraje zalemovaného hrdla na mezním stavu ku průměru výchozího otvoru v přístřihu. Průběh této závislosti je na *obr. 5.12*.

Ze zjištěných hodnot obvodového gradientu deformace byly sestaveny závislosti, které znázorňují vliv šířky lemu na velikosti mezní deformace *obr. 5.13* a vliv šířky lemu na velikost obvodového gradientu deformace viz. *obr. 5.14*.

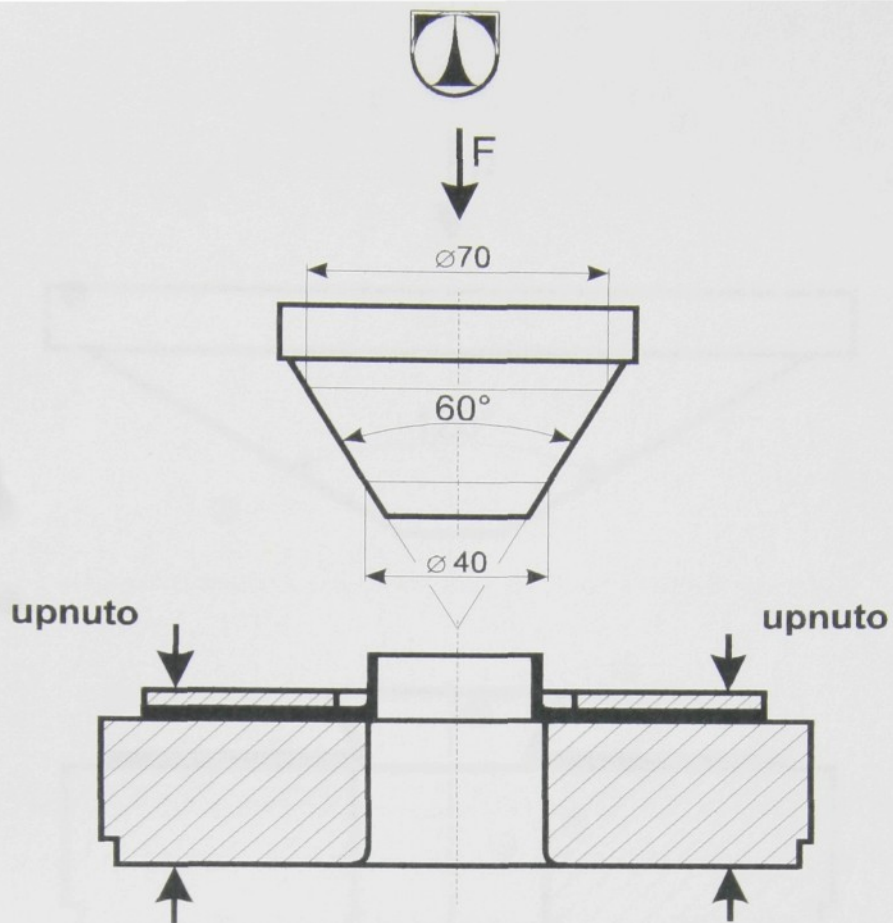
Na *obr. 5.15* a *5.16* jsou zachyceny technologické grafy. Z těchto grafů lze lehce získat odečtením průměr tažnice a šířku lemu h , známe-li hodnotu tangenciální deformace φ_{II} .



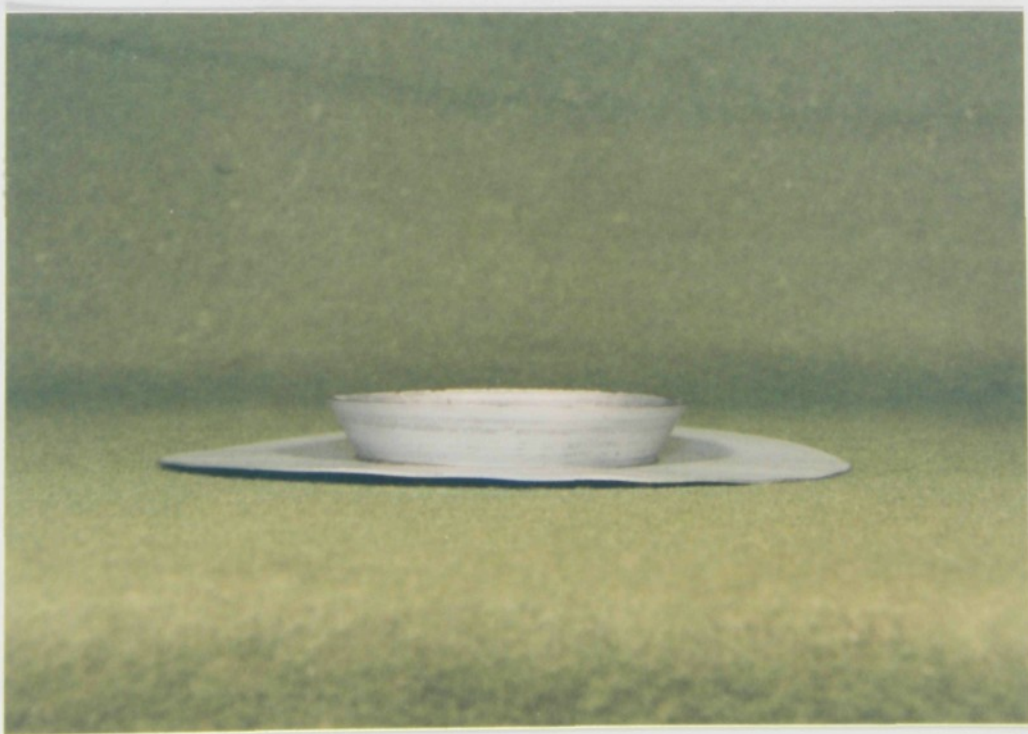
Obr. 5.2 - Tažný nástroj



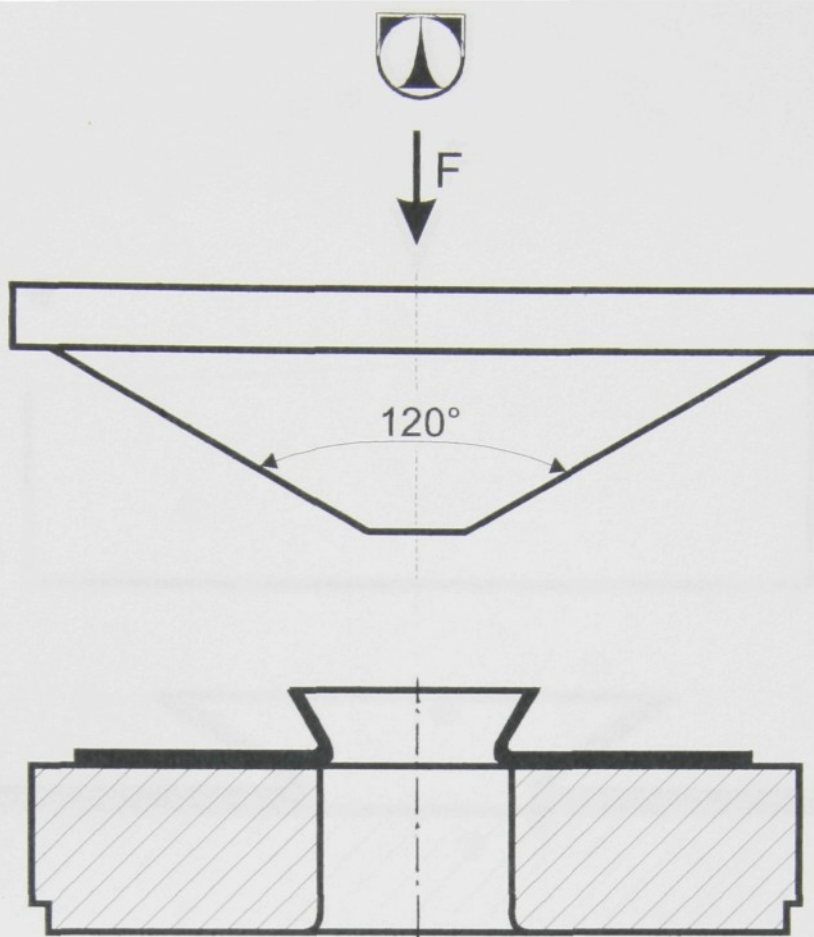
Obr. 5.3 - Vzorek po protažení hrdla



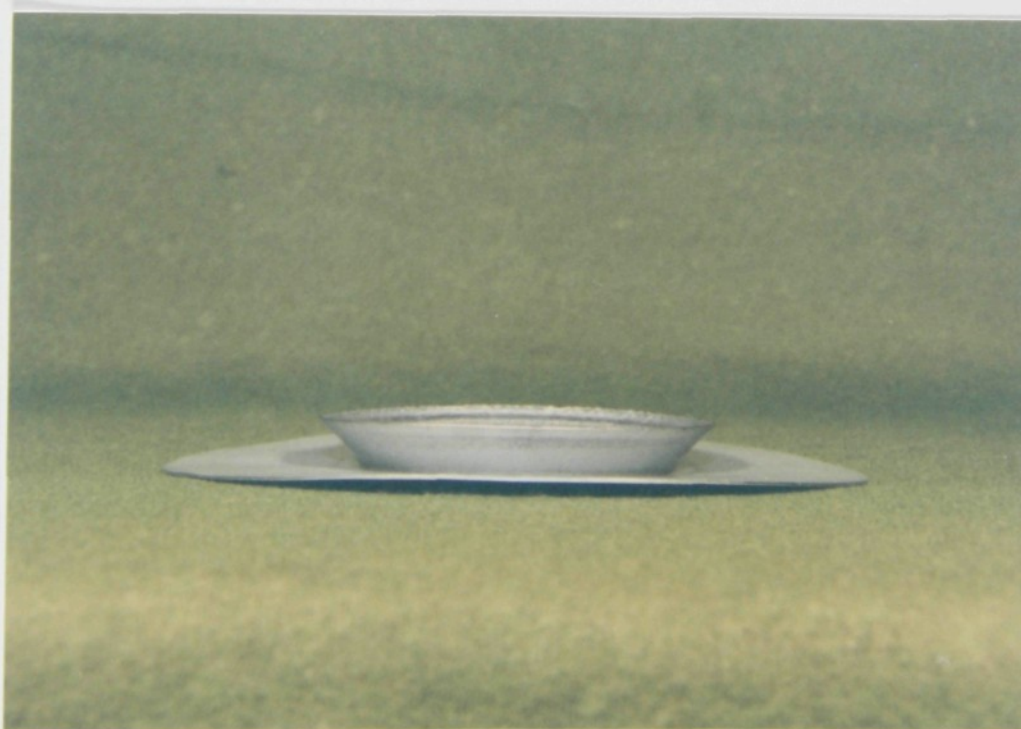
Obr. 5.4 - Rozšiřování hrdla prvním kuželem



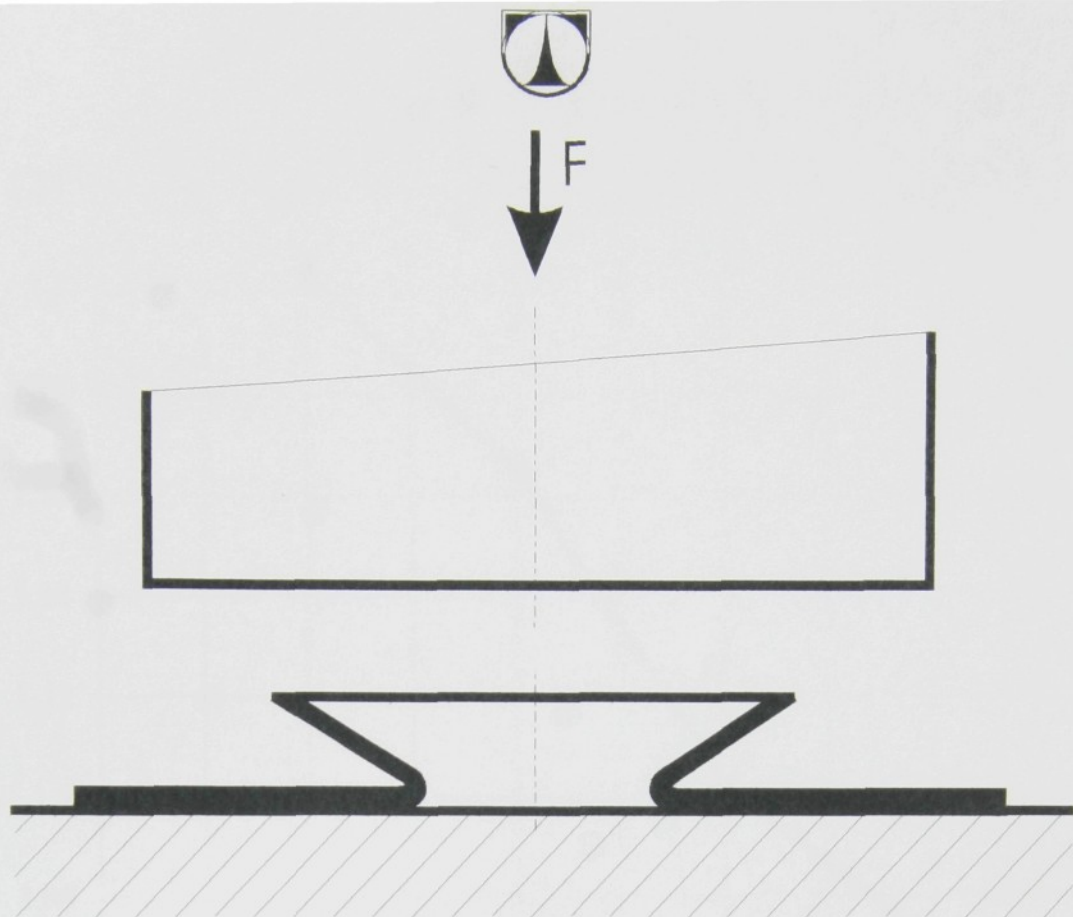
Obr. 5.5 - Vzorek po prvním rozšíření



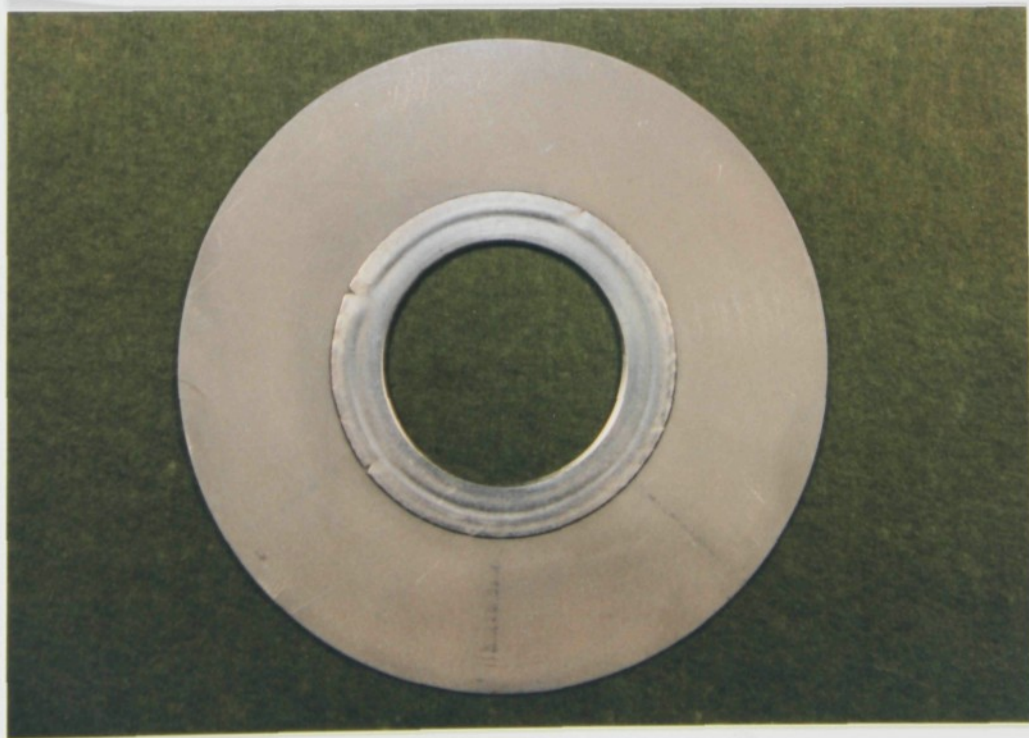
Obr. 5.6 - Rozšiřování hrdla druhým kuželem



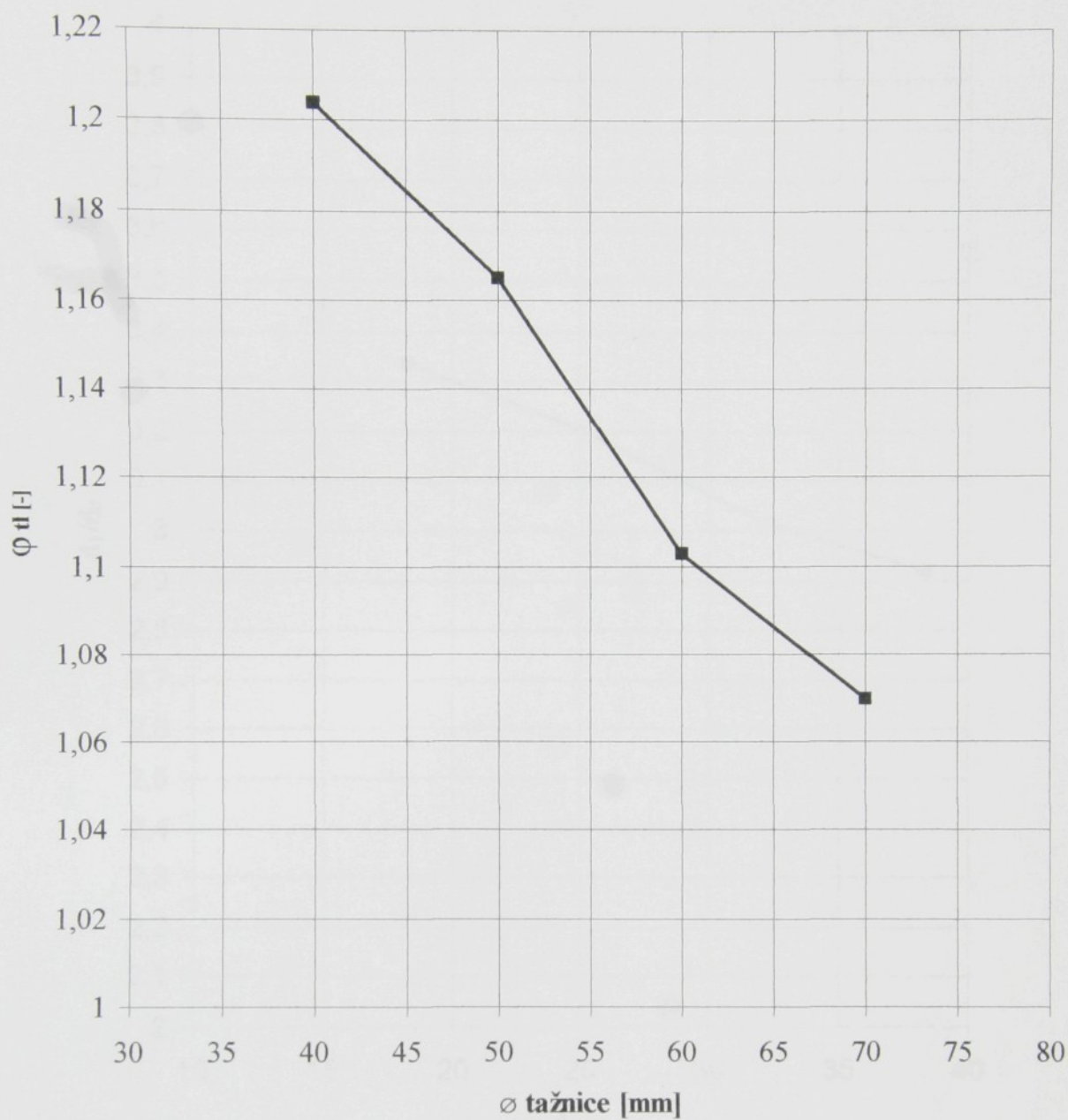
Obr. 5.7 - Vzorek po druhém rozšíření



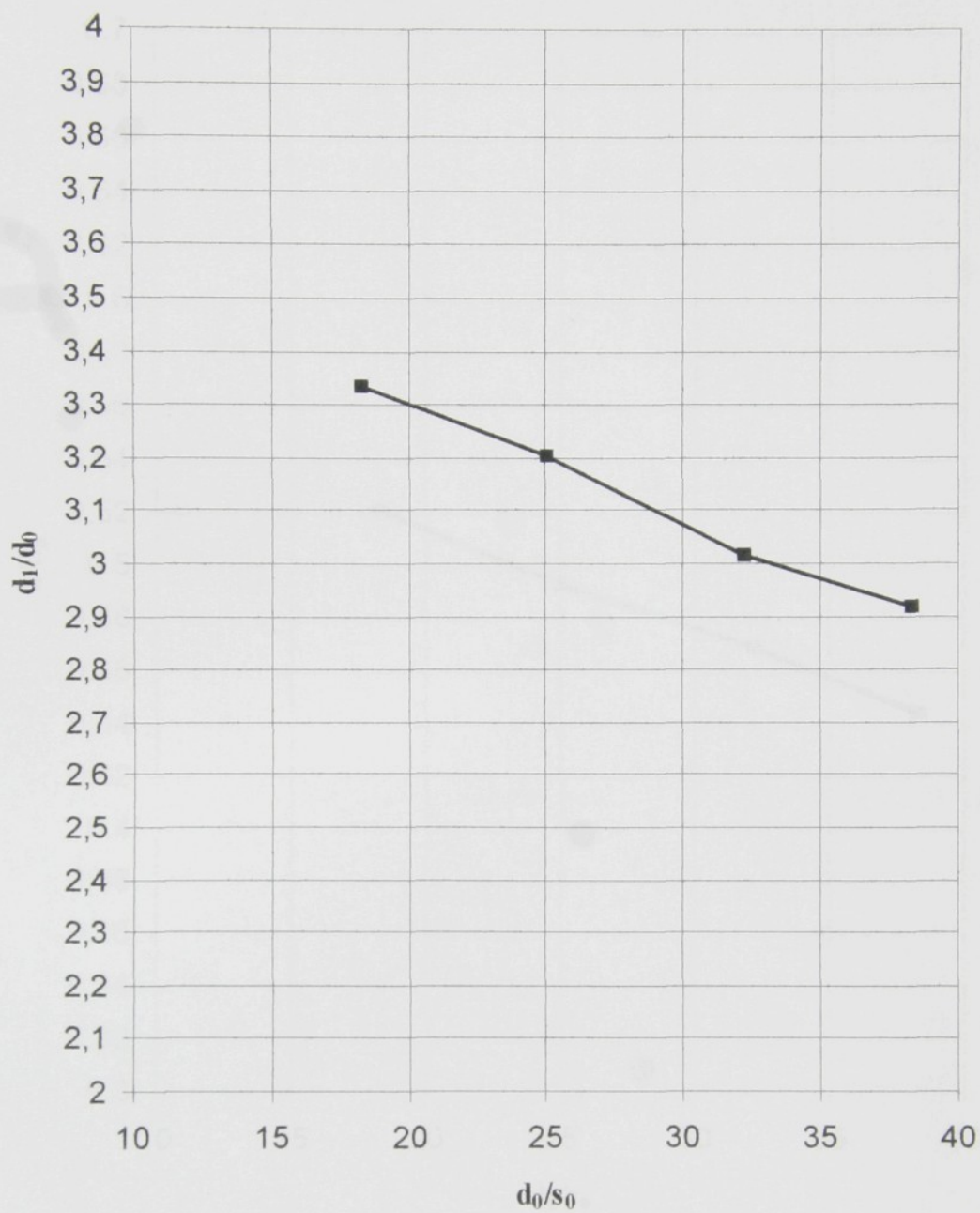
Obr. 5.8 - Lemování pomocí lisovadla s rovným čelem



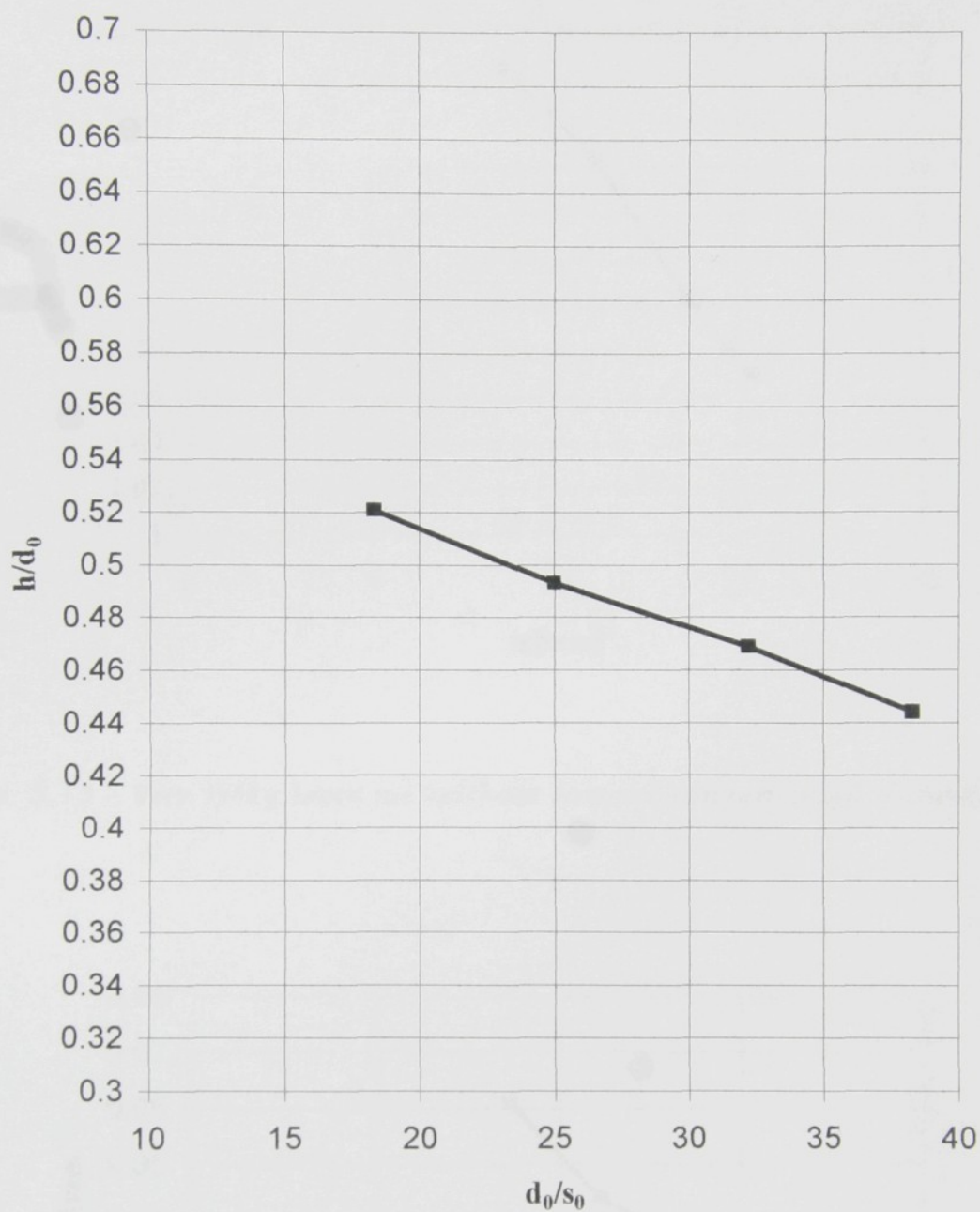
Obr. 5.9 - Vzorek po lemování



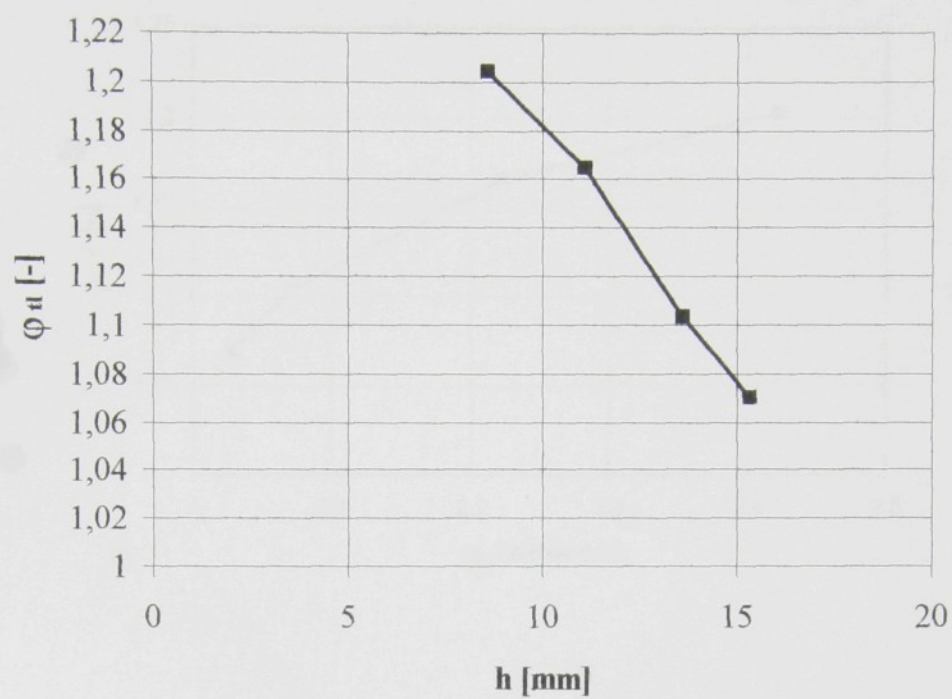
Obr. 5.10 - Průběh závislosti tangenciální lomové deformace na výchozím průměru



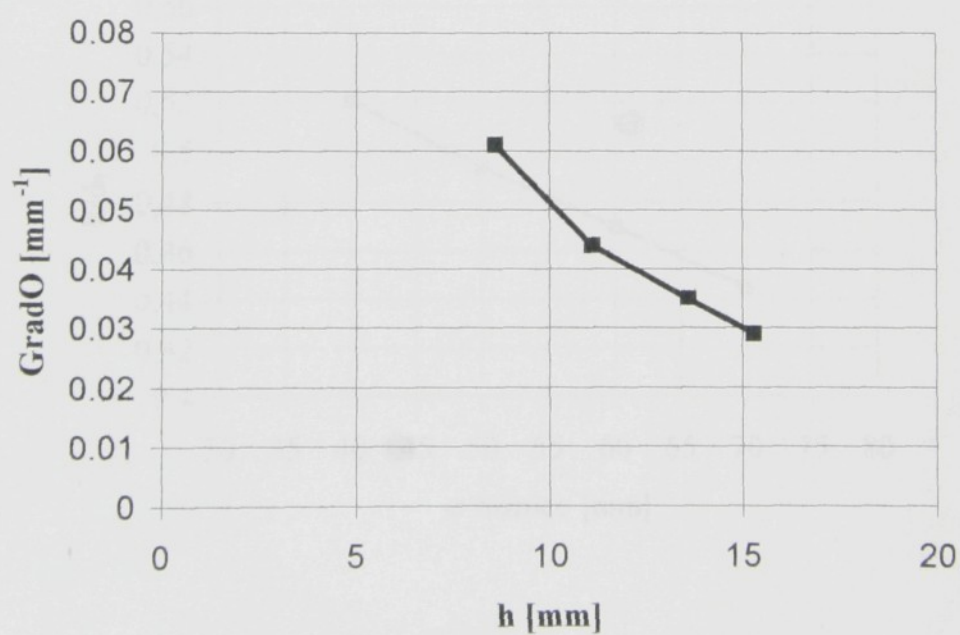
Obr. 5.11 - Mezní stupeň deformace při lemování



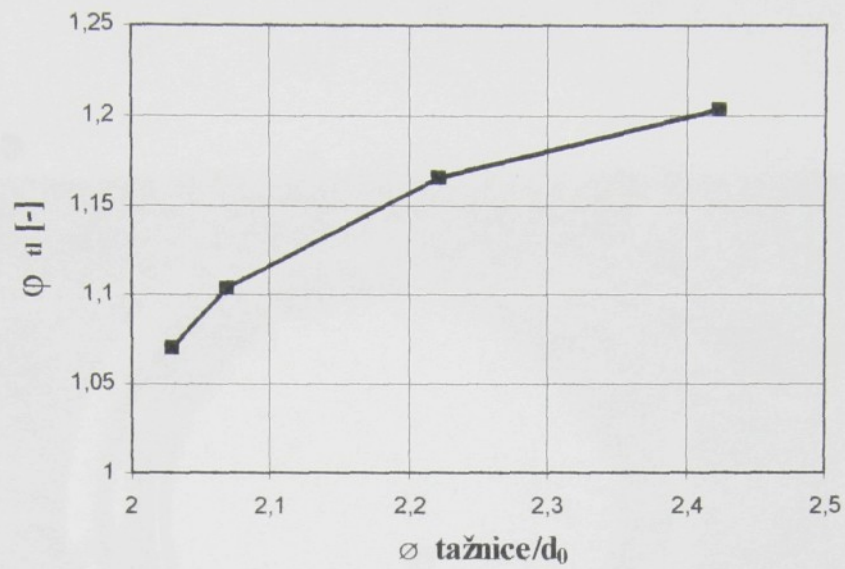
Obr. 5.12 - Mezní stupeň deformace při lemování



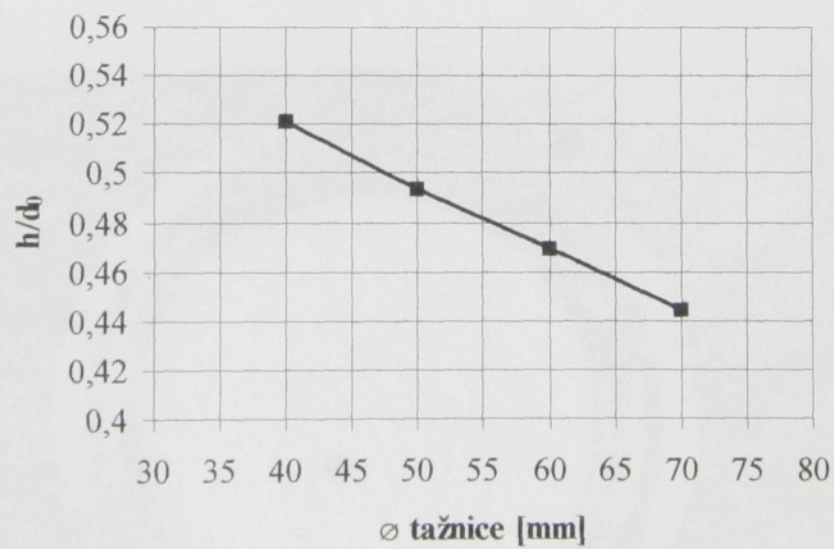
Obr. 5.13 - Vliv šířky lemu na velikost lomové tangenciální deformace



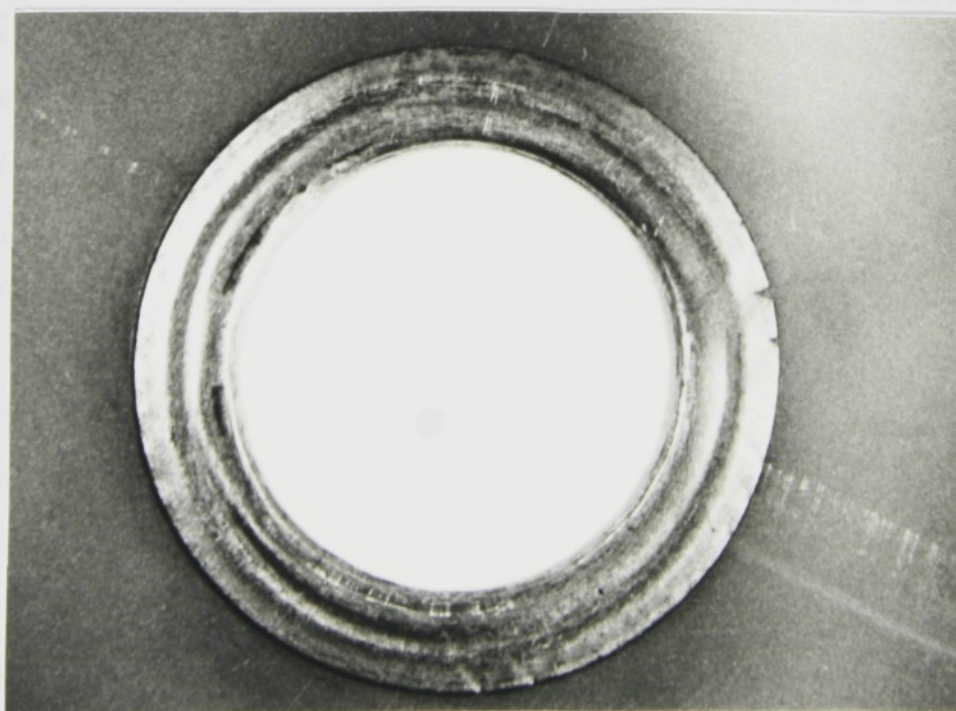
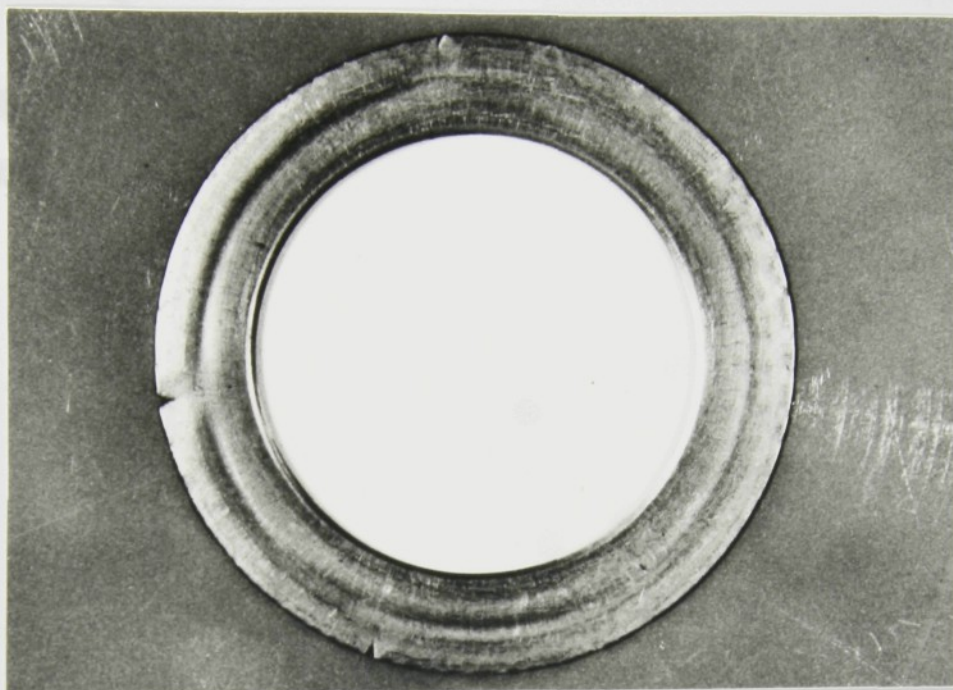
Obr. 5.14 - Vliv šířky lemu na velikost GradO



Obr. 5.15



Obr. 5.16



Obr. 5.17 - Detail vzorku na mezním stavu;



6. Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout metodiku experimentálního určování mezních stavů při lemování a ohýbání profilů z plechu. Pro případ ohýbání profilů byla navržena technologie přípravy zkušebních vzorků a metodika experimentálního určování mezních stavů. Profily byly mimo rámec zadání zkušebně ohýbány (zakružovány) v nástroji, který umožňuje zakružovat U profily a jehož výkresová dokumentace je přiložena.

Také pro případ lemování byla navržena technologie přípravy zkušebních vzorků a metodika experimentálního určování mezních stavů. Po provedení experimentu lemováním kruhových přístřihů s různými průměry výchozích otvorů se došlo k následujícím závěrům :

- 1) Se zvětšujícím se $\varnothing$ tažnice se lomová tangenciální (obvodová) deformace snižuje. Průběh závislosti φ_t na $\varnothing$ tažnice je na *obr. 5.10*.
- 2) Čím větší je průměr výchozího otvoru, tím menší je šířka lemu zkušebního vzorku. Průběh závislosti šířky lemu h na průměru výchozího otvoru d_0 je na *obr. 5.11*.
- 3) Také platí, že se zvyšujícím se průměrem výchozího otvoru d_0 se snižuje průměr okraje zalemovaného hrdla d_1 . Závislost těchto parametrů je na *obr. 5.12*.
- 4) Z *obr. 5.13* je vidět vliv šířky lemu na velikosti mezní deformace. Se zvětšující se šířkou lemu h mezní deformace φ_{tl} klesá.
- 5) Z *obr. 5.14* je zřejmí negativní vliv obvodového gradientu deformace na šířku lemu. Platí, že čím je větší šířka lemu h , tím menší je pokles obvodového gradientu deformace $\text{Grad}O$
- 6) Z grafů na *obr. 5.15* a *5.16* lze pro danou obvodovou deformaci určit jaká bude šířka budoucího lemu h a jaký $\varnothing$ tažnice bude nutno použít.

Pro kompletní prostudování této problematiky by bylo třeba provést tento experiment pro několik dalších průměrů výchozích otvorů, popřípadě změnit materiál použitého plechu, aby výsledek byl srovnatelný s křivkami podle literatury [4]. U takovýchto jednoduchých operací tváření lze vliv gradientů deformace odvozovat z rozměrových poměrů.



7. Literatura

- [1] MARCINIAK, Z. : Teorie tváření plechů. SNTL Praha, 1964.
- [2] KOŘÍNEK, M. : Studium technologie zakružování členitých plechových profilů válcováním. Výzkumná zpráva státního úkolu P15-124-010. VŠST Liberec. 1972.
- [3] BAŠE, M. : Rozšiřování a protahování při zpracování plechů lisováním. [Diplomová práce]. Liberec. 1997. TU Liberec.
- [4] TOMÁŠEK, J. : Směrnice pro stanovení mezních stupňů přetvoření pravidelných tvarů součástí z plechu. VÚTS Brno. 1975.
- [5] SOLFRONK, P. : Mezní přetvoření v okrajových oblastech výlisků. [Diplomová práce]. Liberec. 1995. TU Liberec.
- [6] ČSN 42 0310 Zkouška tahem
- [7] ČSN 42 0435 Skúška súčiniteľa normálovej anizotropie
- [8] ČSN 42 0436 Skúška exponenta deformačného spevnenia

Prohlášení

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

Jsem si vědoma toho, že práce je majetkem školy a že s ní nemohu sama disponovat.

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

Vacková Monika
.....

Podpis

Jméno a příjmení : **Monika Vacková**

Adresa : **Antonína Sovy 1715, 470 01 Česká Lípa**