

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ V LIBERCI

nositelka řádu práce

Fakulta strojní

Obor 23-07-8

strojírenská technologie

zaměření

tváření kovů a plastických hmot

Katedra tváření a plastů

Analýza přetvoření při tažení výlisku z plechu

Petr Novák

KTP-267

Vedoucí práce: ing Mikeš Viktor CSc (KTP-VŠST Liberec)

Konzultant: ing Mikeš V. CSc

Rozsah práce a příloh

Počet stran: 63

Počet příloh a tabulek: -

Počet obrázků: 36

Počet výkresů: 8

Počet modelů nebo jiných příloh: -

Datum: 5. 5. 1987

Vysoká škola: **strojní a textilní** Fakulta: **strojní**
Katedra: **tváření a plastů** Školní rok: **1986/87**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

pro **Petra Nováka**
obor **strojírenská technologie**

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

Název tématu: **Analýza přetvoření při tažení výlisku z plechu**

Zásady pro vypracování:

1. Seznámení s principy analýzy přetvoření metodou deformačních sítí ve vztahu k tažení výlisků z plechu.
2. Přehled metod vytváření deformačních sítí a vymezení jejich použitelnosti.
3. Návrh řešení pro realizaci elektrochemického leptání deformačních sítí v podmínkách KPT VŠST a pro aplikaci v podmínkách výroby /lisovny/.
4. Aplikace vybraných metod vytváření sítí při modelování rovinných stavů napjatosti.
5. Doporučení pro další výzkum.

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

Rozsah grafických prací: 1 x A2

Rozsah průvodní zprávy: 40 stran

Seznam odborné literatury:

1. Podklady pro přípravu výroby AZNP Mladá Boleslav
2. Výzkumné zprávy úkolů N 194, N 195 a N 196, VŠST, Liberec

Vedoucí diplomové práce: Ing. Viktor Mikeš, CSc.

Datum zadání diplomové práce: 25. 9. 1986

Termín odevzdání diplomové práce: 11. 5. 1987

L.S.


Doc. Ing. Jaroslav Tmáj, CSc.

Vedoucí katedry


Doc. Ing. Ján Alaxin, CSc.

Děkan

V Liberci dne 7. 10. 1986

PROHLÁŠENÍ

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

V Liberci,dne 5.5. 1987

*Morav's
20h*

PODĚKOVÁNÍ

"Děkuji s. ing V. Mikešovi CSc a s. B. Kodejšskovi pracovníkům
KTP a dále děkuji soudružkám Havlákové a Peštové laborantkám
KTP za pomoc při vypracování diplomové práce."

Seznam použitých zkratk a symbolů	7
1. Úvod	8
2. Metody analýzy tvářecích procesů	11
2.1 Analýza přetvoření	11
2.2 Analýza napjatosti	15
2.3 Měření sil při tvářecích procesech	17
2.3.1 Stanovení tvářecí síly z kontaktních tlaků ...	17
2.3.2 Stanovení tvářecích sil metodou energetické rovnováhy.....	18
2.3.3 Stanovení tvářecích sil metodou rovinných řezů	20
3. Metoda deformačních sítí	21
3.1 Tvar elementů deformační sítě	21
3.1.1 Síť s kruhovými elementy se středy uspořádanými do čtverců	21
3.1.2 Síť s kruhovými elementy se středy uspořádanými v rozích rovnostranných trojúhelníků	21
3.1.3 Síť kruhová s překrytím	22
3.1.4 Síť čtvercová	22
3.1.5 Síť kombinovaná - kruhové elementy s vyznačenými průsečíky čtvercových elementů	23
3.1.6 Síť kombinovaná - kruhové a čtvercové elementy	23
3.2 Způsob nanášení deformační sítě	24
3.2.1 Sítetisk	24
3.2.2 Ofsetový tisk	26
3.2.3 Gumostereotypie	27
3.2.4 Fotografická metoda	29
3.2.5 Rytí deformačních sítí	30
3.2.6 Metoda chemického leptání	32
3.2.7 Metoda elektrochemického leptání se síťovou	

šablonou	34
3.2.8 Metoda vyjiskřovací	35
3.3 Vytváření deformačních sítí s ohledem na charakter tváření	37
4. Použití deformačních sítí pro analýzu procesu tažení výlisků	38
4.1 Studium změn tloušťky plechu v jednotlivých místech výlisku	38
4.2 Zjištění stavu napjatosti a stupně přetvoření na výlisku mimo oblast přidržovače	39
4.3 Analýza procesu tažení výlisků pomocí metody kluzo- vých čar	43
5. Vytváření deformačních sítí rytím	46
6. Návrh a realizace přípravku pro elektrochemické leptání deformačních sítí	48
6.1 Popis přípravku	48
7. Experimentální část	51
7.1 Rytá deformační síť	51
7.2 Elektrochemicky leptaná deformační síť v kombinaci s fotografickou metodou	54
7.3 Srovnání obou souborů	55
7.4 Zásady pro volbu rozměru elementu	57
7.5 Analýza procesu tažení výlisku blatníku osobního automobilu Š 742 M	59
7.6 Zhodnocení	60
8. Závěr	62
Seznam použité literatury	63

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	hlavní normální napětí v osách 1,2,3 [MPa]
m	koeficient napjatosti
σ_i	intenzita napětí [MPa]
S	tloušťka elementu [mm]
ψ	skutečné logaritmické přetvoření
ϵ	poměrné přetvoření
e	základ přirozených logaritmů
r_0, r_{90}	charakteristiky normálové anizotropie ve směru válcování a ve směru kolmém k válcování
F_n	normální síla [N]
p	tlak [MPa]
F	tvářecí síla [N]
S	činná plocha nástroje [mm ²]
S_n	normální činná plocha nástroje [mm ²]
A_p	práce potřebná k plastickému přetvoření [J]
A_a	práce aktivní tvářecí síly [J]
A_t	práce vnější povrchové síly [J]
X, Y, Z	průměty sil působící na elementární plošku dS do os souřadného Kartézského systému [N]
U_x, U_y, U_z	posuvy v osách x,y,z [mm]
S_0	původní tloušťka plechu v místě elementu [mm]
$L_{1,2}$	délka hlavní a vedlejší osy elipsy [mm]
F_0	výchozí plocha kruhového elementu [mm ²]
L_0	původní průměr kruhového elementu [mm]
$\bar{n}$	skutečná hodnota přetvoření
ψ_k	skutečné přetvoření v okamžiku dosažení smluv- ní meze pevnosti
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	hlavní normální napětí v osách x,y,z [MPa]
τ_z	tečné napětí v ose z [MPa]

-8-

1. ÚVOD

Zvýšení kvality a technické úrovně naší výroby je v současných podmínkách nejen ekonomickou, ale i výsostně politickou otázkou. Rozhoduje o efektivnosti naší práce, dynamice ekonomického růstu a koneckonců o dalším rozvoji životní úrovně. Urychlení sociálně ekonomického rozvoje vyžaduje výrazněji pokročit v mezinárodní dělbě práce a socialistické ekonomické integraci. Její těžiště musíme přenést na progresivní intenzifikační formy pronikající hluboko do struktury jednotlivých odvětví a oborů.

Ve srovnání se světem pomalu postupujeme např. při rozšiřování progresivních technologií (tváření, přesné odlévání apod.), které významně snižují spotřebu kovu. Například podíl obrábění se u nás stále udržuje na 30% z celkové pračnosti a výrobky našeho strojírenství jsou stále o 20 až 30% hmotnější než srovnatelné přední výrobky zahraniční konstrukce. Jednou z cest, jak docílit vyššího zhodnocování materiálu, je nahradit některé strojírenské součástky zpracovávané třískovou technologií z plného kusu součástkami získanými tvářecími postupy, což umožňuje značnou úsporu nejen materiálu samotného, ale i úsporu práce, času a energie.

Tváření za studena je technologií, která se má rozhodujícím způsobem podílet na rozvoji našeho strojírenství. Velmi výhodným výchozím polotovarem pro výrobu strojírenských výrobků, ať už se jedná o součástky pro strojírenskou výrobu nebo o výrobky spotřebního průmyslu, je beze sporu plech. Československo je zemí, která je schopna pokrýt svou výrobou poptávku plechů. Vyrábíme kvalitní stroje pro zpracování plechů a i výzkum a vývoj v oblasti technologií je u nás na výši. Výlisky dnes nahrazují řadu klasických výrobků, jako jsou výkovky a obrobky. Svými vlastnostmi je dokáží plně nahradit.

Úkolem této diplomové práce je přispět rozbořem tvářecího procesu a návodem na sestavení přípravku pro elektrochemické leptání deformačních sítí k bližšímu poznání technologie tažení výlisků. Hlubší poznatky by měly dále zlepšit využívání výchozího pelotovaru a zmenšit zmetkovitost výroby.

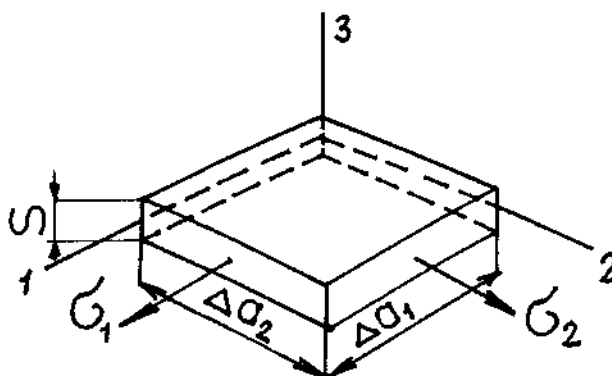
2 METODY ANALÝZY TVÁŘECÍCH PROCESŮ

2.1 Analýza přetvoření

V případě tažení výlisku z plechu můžeme předpokládat podmínky rovinného stavu napjatosti.

Pro zvolený element výlisku (obr.1) můžeme zavést vztah mezi hlavními normálovými napětími:

$$\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 = 1 : m_6 : 0 \quad (1)$$



Ze vztahu (1) plyne:

obr. 1 Zvolený element na výlisku.

$$m_6 = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad (2)$$

Veličina m_6 je materiálovou charakteristikou. Udává nám stav napjatosti v rámci daného elementu výlisku.

Z obrázku 1 vyjádříme změnu přetvoření ve směrech hlavních normálních napětí 1-3:

$$\begin{aligned} d\psi_1 &= \frac{d(\Delta a_1)}{\Delta a_1} \\ d\psi_2 &= \frac{d(\Delta a_2)}{\Delta a_2} \\ d\psi_3 &= \frac{ds}{s} \end{aligned} \quad (3)$$

Protože vyjadřujeme skutečné logaritmické přetvoření (a jeho přírůstky) musíme zákon stálosti objemu vyjádřit vztahem:

$$d\psi_1 + d\psi_2 + d\psi_3 = 0 \quad (4)$$

Integraci vztahů (3) pro získání konečných hodnot hlavních přetvoření ψ_1 a ψ_2 je možno provést pouze za předpokladu, že je splněna během tváření podmínka "proporcionálního přetvoření" /1/, kterou lze vyjádřit vztahem:

$$\frac{d\psi_1}{\psi_1} = \frac{d\psi_2}{\psi_2} = \frac{d\psi_3}{\psi_3} \quad (5)$$

Přírůstek intenzity přetvoření v daném místě je možné vyjádřit /1/:

$$d\psi_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(d\psi_1 - d\psi_2)^2 + (d\psi_2 - d\psi_3)^2 + (d\psi_3 - d\psi_1)^2} \quad (6)$$

Při použití zákona stálosti objemu (4) lze vztah (6) upravit a napsat jako:

$$d\psi_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{d\psi_1^2 + d\psi_1 d\psi_2 + d\psi_2^2} \quad (7)$$

$d\psi_1$..přírůstek hlavního přetvoření ve směru hlavního napětí σ_1
 $d\psi_2$..přírůstek hlavního přetvoření ve směru hlavního napětí σ_2

Integraci vztahu (7) pro získání ψ_i je možno provést opět pouze za předpokladu, že je během tváření splněna podmínka "proporcionálního přetvoření" /1/.

Pak můžeme vztah (7) přepsat na:

$$\varphi_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varphi_1^2 + \varphi_1 \varphi_2 + \varphi_2^2} \quad (8)$$

$$\varphi_1 = \ln \frac{L_1}{L_0} \quad \varphi_2 = \ln \frac{L_2}{L_0}$$

L_0 ... rozměr elementu před tvářením ve směrech 1 a 2

L_1 ... rozměr elementu po tváření ve směru 1

L_2 ... rozměr elementu po tváření ve směru 2

Z výše uvedeného vyplývá, že skutečné logaritmické přetvoření φ lze určit:

$$\varphi_{1,2} = \ln \frac{L_{1,2}}{L_0} \quad (9)$$

L ... okamžitý rozměr měřeného úseku

L_0 ... výchozí délka měřeného úseku

Zákon stálosti objemu je tedy možno přepsat:

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (10)$$

Pro oblast malé deformace materiálu (pružnosti a pevnosti) a oblast zkoušení materiálu (smluvní podmínky) lze použít místo skutečného logaritmického přetvoření poměrné přetvoření:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (11)$$

$L=L-L_0$ kde: ΔL ... absolutní změna výchozího rozměru

L ... výsledný rozměr elementu v daném směru

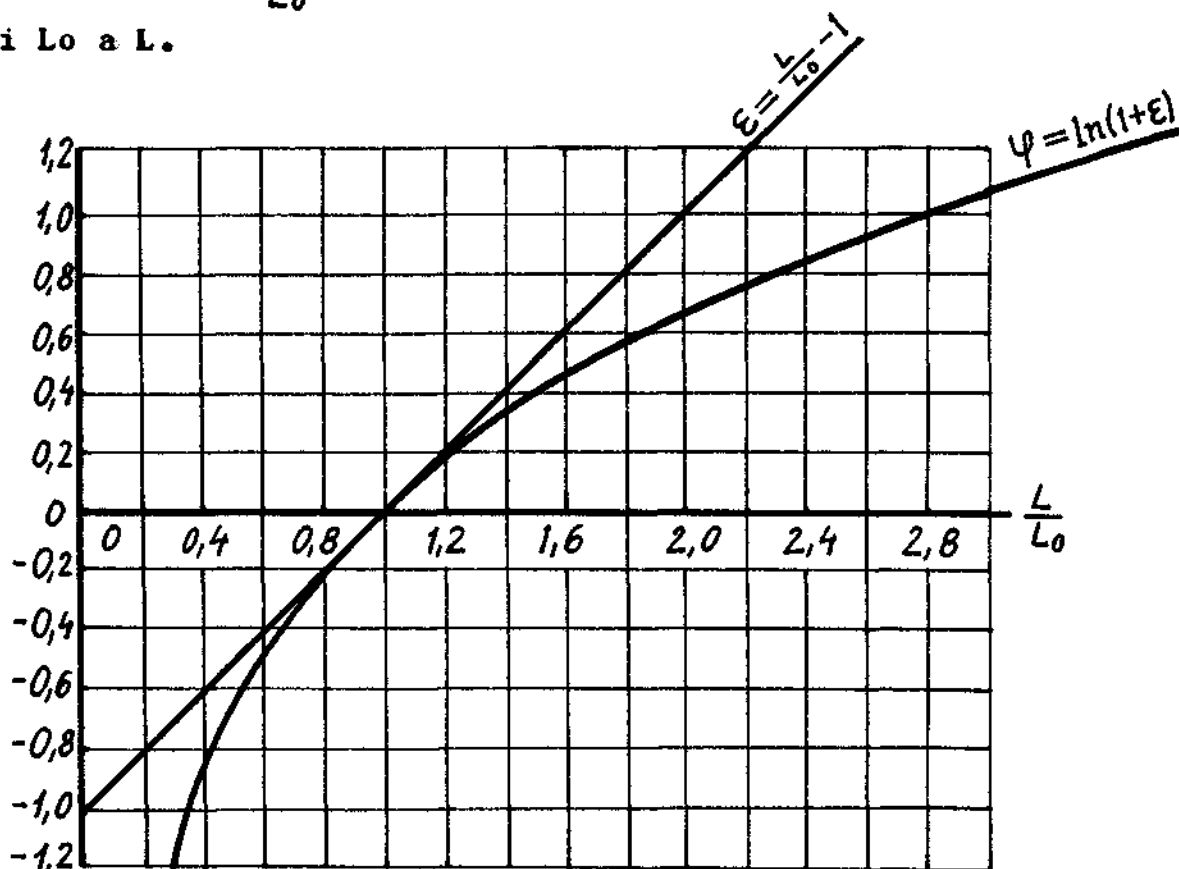
L_0 ... výchozí rozměr elementu v daném směru

V případě velkých plastických přetvoření však poměrné přetvoření nevyjadřuje skutečnost. Proto tedy vyjádření zákona stálosti objemu vztahem:

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \quad (12)$$

považujeme pouze za přibližné.

Na obrázku je grafické znázornění závislosti $\varepsilon = \varepsilon(\frac{L}{L_0})$ a $\varphi = \varphi(\frac{L}{L_0})$. Je vidět, že rozdíl mezi hodnotami ε a φ při daném poměru $\frac{L}{L_0}$, se výrazně zvětšuje s rostoucím rozdílem mezi L_0 a L .



obr. 2 Grafické znázornění závislosti $\varepsilon = \varepsilon(\frac{L}{L_0})$ a $\varphi = \varphi(\frac{L}{L_0})$.

Vzájemný vztah mezi poměrným přetvořením ε (11) a skutečným logaritmickým přetvořením ψ (9) je:

$$\psi = \ln \frac{L}{L_0} = \ln \frac{\Delta L + L_0}{L_0} = \ln(\varepsilon + 1) \quad (13)$$

po odlogaritmování:

$$\varepsilon = e^\psi - 1 \quad (14)$$

e ... základ přirozených logaritmů

V daném místě výlisku je možno stanovit hlavní přetvoření ψ_1 a ψ_2 a intenzitu přetvoření ψ_i za podmínek

- a) známe směry působení hlavních napětí σ_1 a σ_2
- b) je-li na povrchu plechu element, jehož výchozí rozměry můžeme změřit
- c) je splněna podmínka "proporcionálního přetvoření" (5)

2.2 Analýza napjatosti

Stav napjatosti na výlisku s hlavními normálními napětími σ_1 , σ_2 je dán vztahem (2). Je možno odvodit /6/, že pro $m = \text{konstante}$ (je splněn vztah (5)), lze stav napjatosti charakterizovat pomocí hodnot hlavních přetvoření ψ_1 a ψ_2 způsobem:

$$m_\sigma = \frac{2\psi_2 + \psi_1}{2\psi_1 + \psi_2} \quad (15)$$

Toto vyjádření platí pro izotropní materiál. Je-li materiál anizotropní je nutno stanovit charakteristiky normálové anizotropie /2,7/ a vztah (15) upravit na :

$$\bar{m}_6 = \frac{\psi_2 + \psi_1 + \frac{\psi_2}{r_0}}{\psi_1 + \psi_2 + \frac{\psi_1}{r_{90}}} \quad (16)$$

r_0, r_{90} ... charakteristiky normálové anizotropie stanovené zkouškou tahem na vzorcích odebraných ve směru válcování (r_0) a ve směru kolmém na směr válcování (r_{90})

ψ_1 ... přetvoření ve směru válcování

ψ_2 ... přetvoření ve směru kolmém na směr válcování /11/

Jestliže jsou směry hlavních napětí σ_1 a σ_2 a tím i směry hlavních přetvoření ψ_1 a ψ_2 různé od směru x (směr válcování) a směru y (směr kolmý na směr válcování) je nutno:

1. Stanovit hodnoty přetvoření ψ_x a ψ_y (přetvoření ve směrech x a y).
2. Určit charakteristiky normálové anizotropie r_0 a r_{90} .
3. Vypočíst hodnotu $\bar{m}$:

$$\bar{m} = \frac{\psi_y + \psi_x + \frac{\psi_y}{r_0}}{\psi_x + \psi_y + \frac{\psi_x}{r_{90}}} \quad (17)$$

4. Stanovit úhel α , který svírá směr hlavního přetvoření ψ_1 se směrem x.

5. Vypočíst stav napjatosti:

$$m_a = \frac{\bar{m} - \tan^2 \alpha}{1 - \bar{m} \tan^2 \alpha} \quad (18)$$

2.3 Měření sil při tvářecích procesech

Tvářecí síly působí na tvářené těleso prostřednictvím činných částí stroje, a to buď bezprostředním kontaktem (objemové tváření), nebo prostřednictvím okolních, plasticky nedeformovaných částí tvářeného tělesa.

Znalost tvářecích sil je nutná k tomu, abychom mohli správně volit potřebný stroj a dimenzovat tvářecí nástroj.

Abychom mohli tvářecí síly stanovit, musíme v prvním případě (působení tvářecí síly bezprostředním kontaktem činné části stroje) znát rozložení kontaktních napětí mezi tvářencem a nástrojem, v druhém případě (působení tvářecí síly prostřednictvím okolních částí tvářeného tělesa) pak rozložení napětí na "povrchu" ohraničujícím oblast plastického přetvoření.

2.3.1 Stanovení tvářecí síly z kontaktních tlaků

Aktivní tvářecí síla F působí ve směru pohybu nástroje N a ve stykové ploše s tvářeným materiálem T vzniká v důsledku odporu proti přetvoření konstantní napětí (tlak) p .

Potom normální síla:

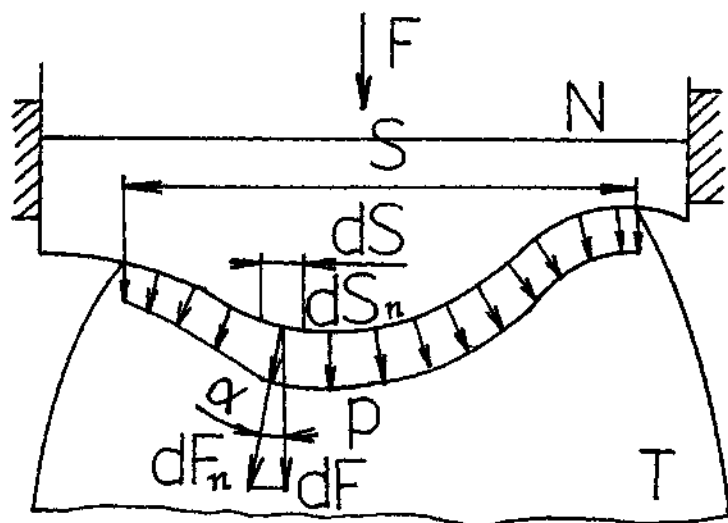
$$dF_n = p dS_n \quad (19)$$

Složka ve směru pohybu nástroje:

$$dF = dF_n \cos \alpha = p dS_n \cos \alpha \quad (20)$$

Pro průmět plošky dS_n do roviny kolmé na směr pohybu nástroje platí:

$$dS = dS_n \cos \alpha \quad (21)$$



obr. 3 Princip stanovení tvářecí síly z kontaktních tlaků.

Potom můžeme vztah (20) zapsat:

$$dF = p dS \quad (22)$$

Integrací přes celou plochu průmětu kontaktní plochy do roviny kolmé ke směru pohybu nástroje:

$$F = \int_S p dS \quad (23)$$

Princip této metody výpočtu tvářecích sil formuloval Pavlov a zobecnil Gubkin.

2.3.2 Stanovení tvářecích sil metodou energetické rovnováhy

Metoda vychází ze zákona o zachování energieave vztahu k řešené problematice z rovnosti práce vnějších a vnitřních sil.

$$A_a - A_t = A_p \quad (24)$$

A_p ... práce potřebná k plastickému přetvoření

A_a ... práce aktivních tvářecích sil

A_t ... práce vnějších povrchových sil

Po dosazení a úpravách /7/ je:

$$dA_p = \zeta_i \psi_i dV \quad (25)$$

Přetvárná práce pro celý objem V je pak:

$$A_p = \iiint_V \zeta_i \psi_i dV \quad (26)$$

V souladu s podmínkou plasticity:

$$A_p = \zeta_K \iiint_V \psi_i dV \quad (27)$$

Práci vnějších povrchových sil můžeme určit v obecném případě:

$$A_t = \iint_S (XU_x + YU_y + ZU_z) dS \quad (28)$$

X, Y, Z ... průměty sil, působící na elementární plošku dS , do os souřadného systému.

U_x, U_y, U_z ... posuvy ve směru os x, y, z

Na počátku možných posuvů je součet práce všech vnějších a vnitřních sil roven nule:

$$\iiint_V \zeta_i d\psi_i dV - \iint_S (XdU_x + YdU_y + ZdU_z) dS = 0 \quad (29)$$

$\delta U_x, \delta U_y, \delta U_z$... společné, nekonečně malé, spojité a kinematicky možné posuvy bodů tvářeného tělesa, vyhovující okrajovým podmínkám

Vztah (29) můžeme zapsat:

$$d \left[\iiint_V \zeta_i \psi_i dV - \iint_S (XU_x + YU_y + ZU_z) dS \right] = 0 \quad (30)$$

veličina uvnitř hranatých závorek je celkovou energií A_c a tedy:

$$dA_c = 0 \quad (31)$$

2.3.3 Stanovení tvářecích sil metodou rovinných řezů

Charakteristické pro tuto metodu je, že provádíme společné řešení systému diferenciálních rovnic rovnováhy /7/ po přetvoření a podmínek plasticity při respektování okrajových podmínek včetně popisu podmínek tření na kontaktních plochách.

Jedná-li se o řešení staticky neurčité úlohy je nutno použít doplňkové rovnice vyjadřující vztahy mezi tenzorem napětí a tenzorem přetvoření /7/ (kap.9) a podmínek kompatibility (spojitosti) přetvoření.

Určíme velikost a rozložení napětí v celém objemu tvářeného tělesa, z hlediska výpočtu tvářecí síly pak v bodech povrchu tvařence, který bezprostředně přenáší aktivní vnější sílu na tvářený objem.

Toto řešení můžeme použít pouze předpokládáme-li nulové tření v kontaktních plochách.

Prostorová úloha v nejobecnějším tvaru (6 složek napětí je funkcí tří souřadnic) je neřešitelná.

Pro praktické řešení technologických úloh byly zavedeny Sachsem, Gubkinem a Unksovem a upřesněny Storoževem tyto zásady:

- 1) Úlohu je nutno převést na osově symetrický nebo rovinný případ. Je-li tvar tělesa složitý, rozdělíme jej na objemy, v rámci kterých to je možné.
- 2) Rozložení normálních napětí určujeme pouze pro kontaktní povrchy, abychom mohli stanovit tvářecí tlaky a tím i síly.
- 3) Diferenciální rovnice rovnováhy /7/ zjednodušujeme s ohledem na charakter úlohy.
- 4) Podmínky plasticity používáme podle potřeby i v přibližném tvaru. /7/

Stanovení tvářecích sil metodou kluzových čar

Metoda popsána v kapitole 4.

3. METODA DEFORMAČNÍCH SÍTÍ

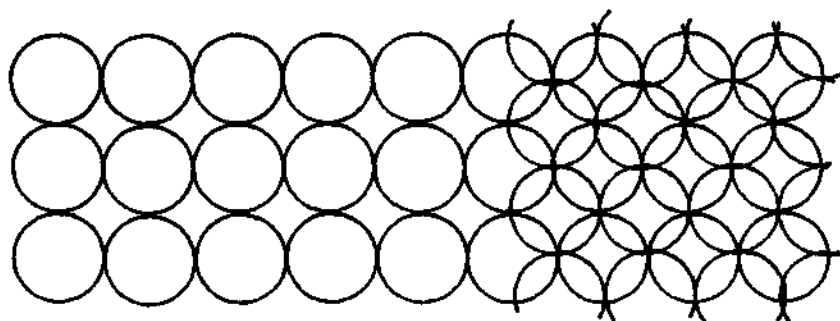
Smyslem postupu nanášení deformačních sítí je určit stav plastického přetvoření a podmínky které tento stav způsobily. Znalost výše uvedeného nám umožní:

- volbu optimálních technologických podmínek tažení
- zobecnění získaných poznatků a jejich aplikaci v oblasti konstrukce vylisku

Deformačních sítí je více druhů. Jejich rozdělení můžeme provést podle různých hledisek:

3.1 Tvar elementů deformační sítě

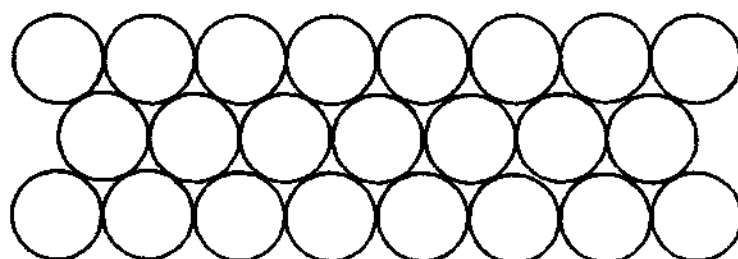
3.1.1 Síť s kruhovými elementy se středy uspořádanými do čtverců



obr. 4 Uspořádání sítě s kruhovými elementy a se středy rozmístěnými do čtverců. obr. 5 Síť kruhová s překrytím.

3.1.2 Síť s kruhovými elementy se středy uspořádanými v rozích rovnostranných trojúhelníků

Umožňuje husté pokrytí sledované oblasti jednotlivými kruhovými elementy a umožňuje i přesné proměřování. Použití je vhodné v případech kdy se stupeň přetvoření místo od místa výrazněji liší. Element v tomto typu deformační sítě mívá obvykle menší rozměr. Orientace v tomto druhu deformační sítě je zajištěna písmeny v krajním řádku deformačního pole.

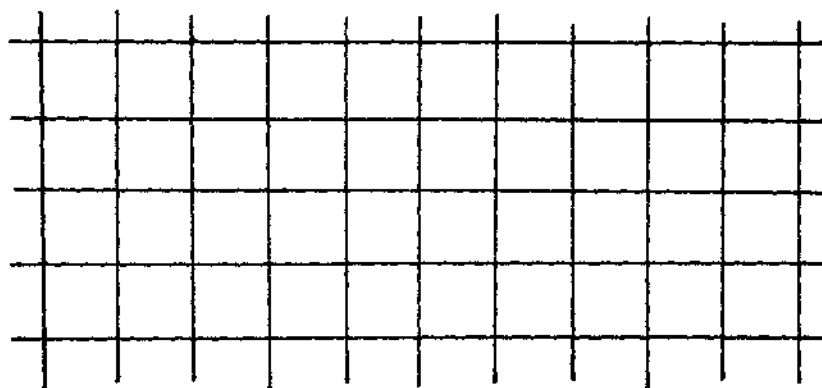


obr. 6 Uspořádání kruhových elementů se středy v rozích rovnostranných trojúhelníků.

3.1.3 Síť kruhová s překrytím.

3.1.4 Síť čtvercová

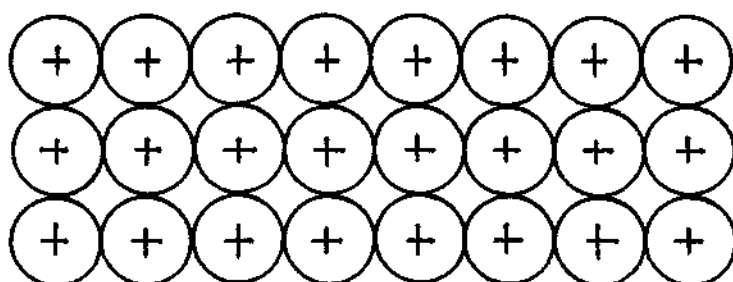
Tato síť umožňuje stanovit, zda nedochází v průběhu tažení ke změnám směrů hlavních přetvoření a zda existují rozdíly v rámci daného elementu. Pomocí této deformační sítě získáváme rychlou orientační představu o přemisťování materiálu vzorku (ze zakřivení původních přímek sítě).



obr.7 Čtvercová deformační síť.

3.1.5 Síť kombinovaná - kruhové elementy s vyznačenými průsečíky čtvercových elementů

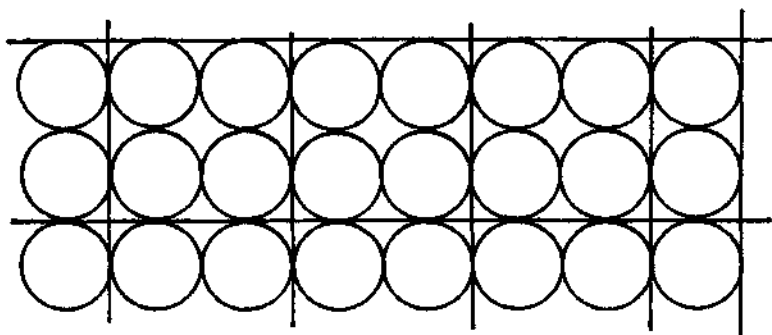
Toto uspořádání je velmi často používané pro svou přehlednost. Kruhové elementy zajišťují přehled o směrech hlavních přetvoření. Čtvercová síť umožňuje rychlou představu o přemísťování materiálu. Nevýhody jsou řídké pokrytí plochy elementy a pracné proměřování rozměrů v místech kde se čáry protínají.



obr.8 Kombinovaná síť kruhových elementů s průsečíky čtvercových elementů.

3.1.6 Síť kombinovaná - kruhové a čtvercové elementy

Tento způsob uspořádání čtvercových a kruhových elementů odstraní pracné proměřování v místech překrytí, ale také zmenší již tak malou hustotu pokrytí napěťového pole deformační sítí. Toto uspořádání je vhodné zvláště tam, kde se stupeň přetvoření v rámci sledované oblasti příliš výrazně nemění.



obr.9 kombinovaná síť s kruhovými a čtvercovými elementy.

3.2 Způsob nanášení deformační sítě

Volba způsobu nanášení deformační sítě je závislá na těchto požadavcích:

- 1) Deformační síť na nástřihu musí co nejméně ovlivňovat podmínky tváření mezi plechem a nástrojem.
- 2) Síť nesmí způsobovat na povrchu vzorku změny vlastností tohoto povrchu. Nesmí se projevit vrubový účinek, který by ovlivňoval hodnoty přetvoření.
- 3) Síť musí být schopná dosahovat velkých plastických přetvoření spoju s tělesem. Splnění tohoto požadavku je dáno maximálním stupněm přetvoření dosaženým ve vzorku.
- 4) Deformační síť musí být odolná proti otěru a mazivům používaným při tváření.
- 5) Pro jednotlivé elementy i celek sítě je důležitá rozměrová i tvarová přesnost.
- 6) Způsob nanášení sítě by měl být jednoduchý a málo pracný.

3.2.1 Sítotisk

Pomůckami pro tento způsob nanášení sítě jsou průhledná folie s přesně narýsovanou sítí zvoleného typu a velikosti, rámeček (dřevěný nebo hliníkový) s jemnou sítkou (například polyamidová tkanina NYBOLT -33124 ok/cm²), miska na barvu se stěrkou na míchání a tření barvy s tužidlem, barva pro tisk 10-9-20 nebo 28-8-90.

Na svařený nebo sešroubovaný rámeček se napne tkanina a oka tkaniny se slepí 8% roztokem kyseliny mravenčí (HCOOH) a fotograficky se kresba sítě přenesse na emulsi sítky. V neosvětlených místech se citlivá vrstva sítky fotochemicky

zpracuje tak, aby obrysy kresby propouštěly barvu roztíranou na rubu sítky.

Před samostatným nanášením deformační sítě je třeba povrch vzorku důkladně očistit a odmastit běžnými rozpouštědly.

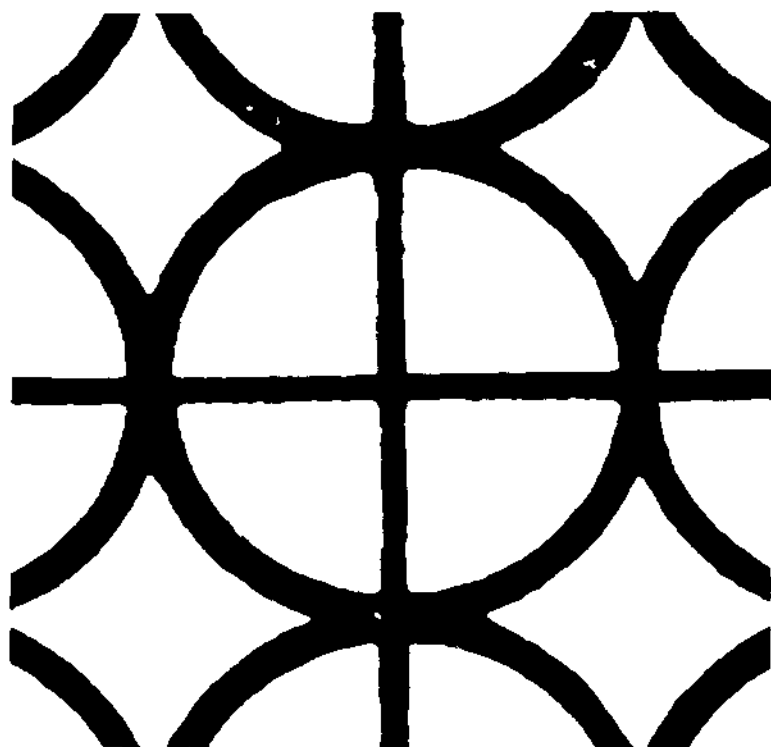
Nedostatky deformační sítě:

- 1) Nedotisk - způsobený nedostatkem barvy.
- 2) Přetisk a rozdvojeniny - způsobené nadbytkem barvy nebo znečištěním síta.

Přednosti této metody:

- 1) Nanášené čáry mají stejnoměrnou šířku a jsou dobře čitelné.
- 2) Neprojevuje se výrazněji vliv na koeficient tření a je tedy možno zanedbat vliv deformační sítě na podmínky tažení.
- 3) Je vyloučen vliv vrubového účinku (platí pro všechny metody potiskování).
- 4) Plastičnost sítě při velkých přetvořeních je dobrá.
- 5) Při použití barev 10-9-20 nebo 28-8-90 je odolnost proti běžným mazadlům velmi dobrá.
- 6) Geometrická nepřesnost $\pm 0,1$ mm je při přenosu kresby na síto zvětšována o 200 až 400%.

Pro popsany způsob nanášení deformační sítě je charakteristické, že čitelnost a přesnost je přímo závislá na technologii zředěné barvy.



obr. 10 Deformační síť zhotovená metodou sítotisku.

3.2.2 Ofsetový tisk

Zařízení pro ruční manipulaci pro tento způsob nanášení deformační sítě se skládá ze zinkové matrice, tiskařského válečku, barev 10-9-20 nebo 28-7-30, benzínu, benzenu nebo trichlóretyleny. Tiskařský váleček může být odlit z hmoty obsahující 40% fotografické želatiny a 60% chemicky čistého glycerínu (s pigmentovým plnivem).

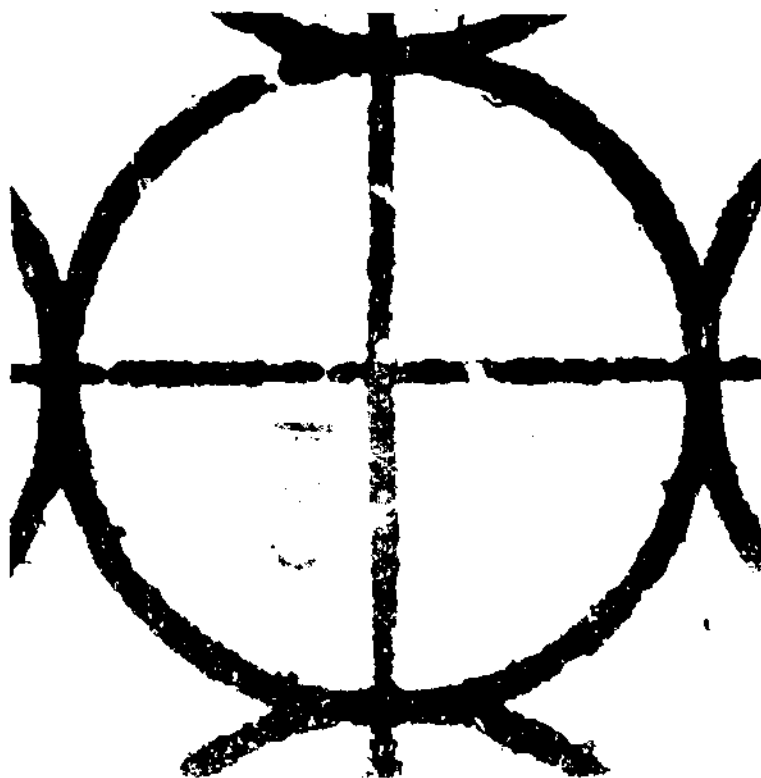
Nejdříve vytvoříme na rovné ploše stejnoměrný film barvy. Válečkem tuto barvu přeneseme na vyvýšeniny matrice. Váleček pečlivě vyčistíme (odmastíme). Barvu z matrice sejmem vyčištěným válečkem a přetiskneme ji na zkušební těleso.

Takto nášená deformační síť je:

- 1) Dobře čitelná bez rozdvojenin a nenabarvených míst. (Proti sítotisku je šířka čar rovnoměrnější).

- 2) Bez vlivu na koeficient tření při tváření.
- 3) Dobře plastická bez odlupování barvy.
- 4) Velmi dobře otěru vzdorná (více než síťotisková deformační síť) a odolná proti mazadlům.
- 5) Dvojnásobně přesnější než síťotisk s odchylkou od jmenovitého rozměru $\pm 0,05$ mm.

Pro vyhotovení vyhovující deformační sítě je nutný rovnoměrný přítlak válečku na matrici především na potiskovaný povrch.



obr. 11 Deformační síť zhotovená metodou ofsetového tisku.

3.2.3 Gumostereotypie

Pro nanesení sítě je potřebné: pryžové razítko nalepené na desku s válcovým povrchem malého zakřivení, tiskařský váleček, barva 10-9-20, odmašťovací prostředek (benzín, benzen).

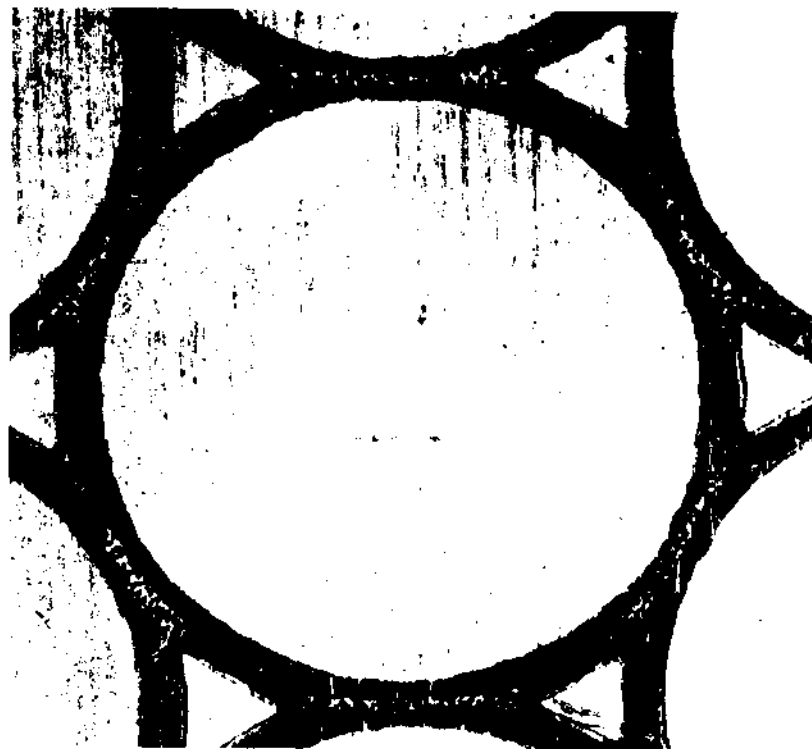
Při práci se na razítko přenesení tenká vrstva barvy připraveným válečkem. Z razítka se barva přetiskem přenesení na

plech, jehož povrch byl předem očištěn a odmaštěn.

Razítkování lze hodnotit:

- 1) Nanášené čáry jsou dobře čitelné, ale tloušťka čar značně kolísá (možnost vady zdvojení čar).
- 2) Neprojevuje se vlivna technologické podmínky tažení.
- 3) Povrch plechu zůstává po nanesení barvy nepoškozen.
- 4) Deformační síť je stálá i při velkých přetvořeních (má dobrou plastičnost).
- 5) Odolnost proti otěru je výborná stejně jako odolnost proti mazadlům.
- 6) Odchyłky od jmenovitého rozměru jsou v rozmezí $\pm 0,1$ mm.

Tato metoda je vhodná pro malé plochy bez větší náročnosti na přesnost deformační sítě.



obr. 12 Gumostereotypická deformační síť.

3.2.4 Fotografická metoda

Pro tuto metodu nanesení deformační sítě potřebujeme emulsi GRAFOTECHNA, žluté ochranné světlo, průhledný originál s elementy sítě, obloukovou lampu nebo výbojku.

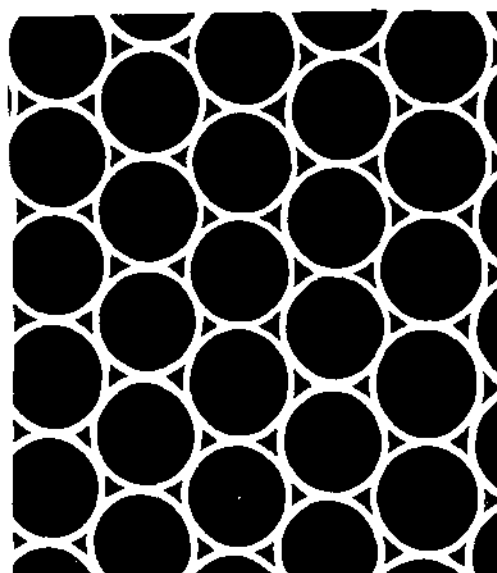
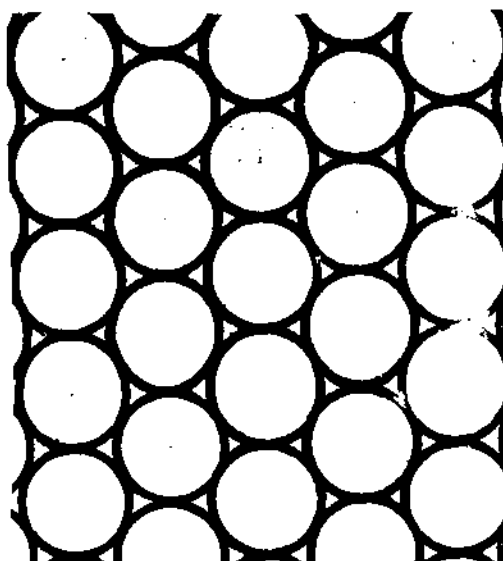
Na povrch tělesa nanese se světlocitlivou emulsi při ochranném žlutém světle. Síť se dostává na emulsi kopírováním z průhledného originálu po osvětlení obloukovou lampou nebo výbojkou.

Podle druhu zaplněných ploch na průhledném originálu se může získat pozitivní nebo negativní obraz.

Síť je možné charakterisovat:

- 1) Je velmi dobře čitelná (s ostrou konturou).
- 2) Pro pozitivní síť je vliv na koeficient tření téměř zanedbatelný.
- 3) Povrch zůstává po tažení neporušen.
- 4) Plasticita deformační sítě je podmíněna velmi malou tloušťkou nanesené emulse. (možné odlupování sítě)
- 5) Odolnost proti otěru je opět závislá na tloušťce nanesené emulse. U vrstvy emulse do 0,01 mm je odolnost velmi dobrá.
- 6) Běžná mazadla značně zhoršují čitelnost a celistvost.
- 7) Odchyłky rozměru elementu od jmenovitého rozměru jsou: $\pm 0,05$ mm.

Vybavení pro tuto metodu je velmi nákladné. Značnou nevýhodou pro praktické zkoušky na vzorcích s těmito druhy deformačních sítí je nestálost při působení mazadel.



obr. 13 Fotograf. pozitivní metoda obr. 14 Fotograf. negativní metoda

3.2.5 Rytí deformačních sítí

K realizaci ryté sítě je potřeba rycí jehla (kružítko) nebo speciální přípravek, šablona středů případně pravítko.

Vyrytá čára se zhotovuje principem odebírání třísky a ne pouhým vtlačováním jehly do povrchu vzorku.

Pro kruhové elementy sítě vyznačíme podle šablony středy elementů. Rytí prvků provedeme ze středů kružítkem.

Pro zhotovení čtvercových elementů můžeme použít pravítka a rycí jehly nebo speciálního nebo obráběcího stroje, jehož translační jednotky se mohou pohybovat ve dvou směrech na sebe kolmých.

Pro výrobu ryté sítě lze také použít speciálního přípravku viz kapitola 5.

V základních bodech lze metodu zhodnotit:

- 1) Při vhodném osvětlení je síť velmi dobře čitelná.
- 2) Vrubový účinek se na vzorku neprojevil ani v případě extrémně vysokých plastických přetvoření (hydrostatická

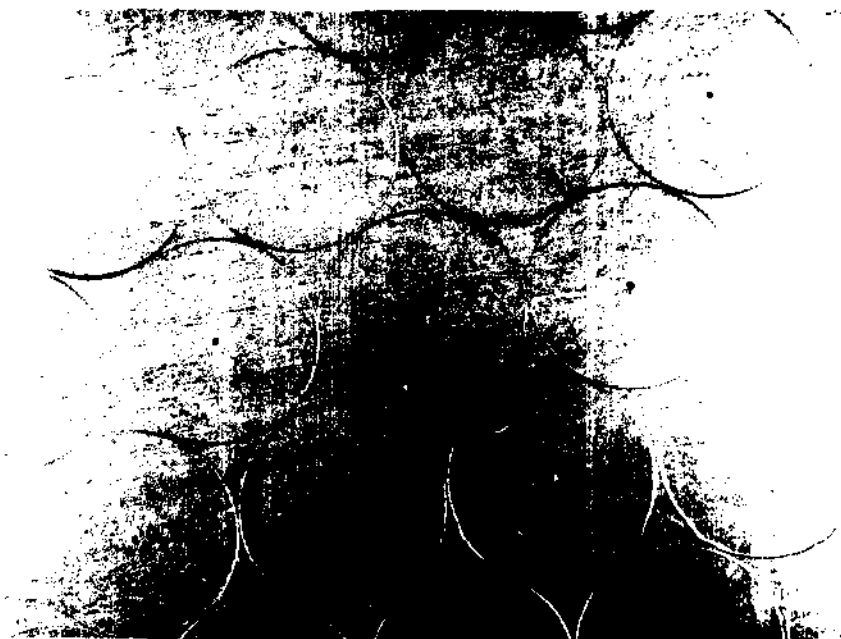
zkouška). Kontrolní testy byly prováděny na plechu KOHAL 20.

3) Vryp se tvaruje podle přetvoření materiálu vzorku. Jeho čitelnost se výrazně nezhoršuje.

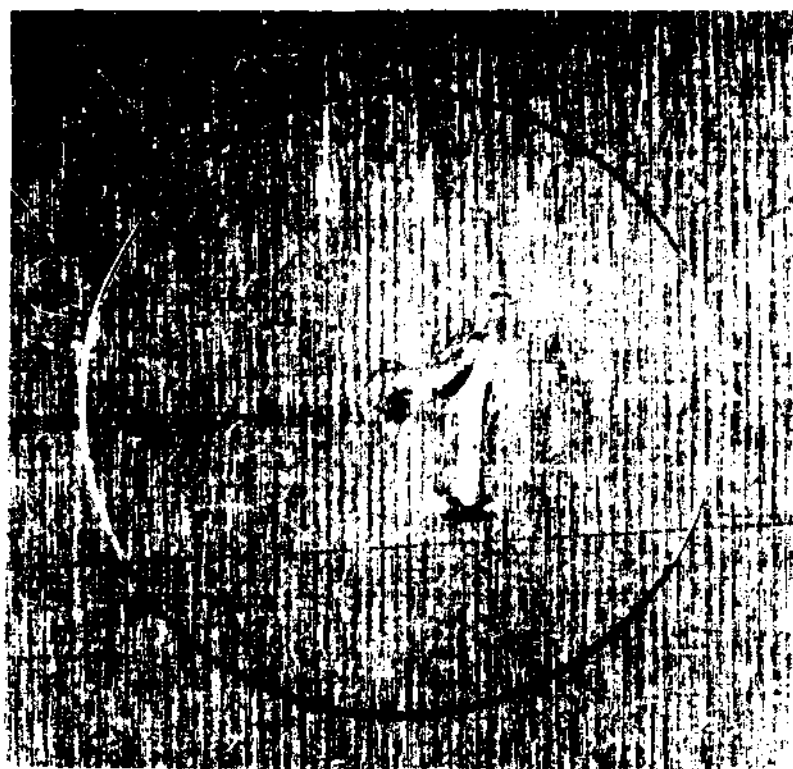
4) Odolnost proti mazadlům a otěru je dokonalá.

5) Odchyłky od jmenovitého rozměru jsou při použití běžného nástrojařského kružidla do 0,07 mm (u přípravku je přesnost ještě vyšší viz kapitola 5).

Je to metoda velmi jednoduchá, ale náročná na čas a přesnost provedení.



obr. 15 Deformační síť rytá kružidlem.



obr. 16 Detail deformační sítě ryté kružidlem.

3.2.6 Metoda chemického leptání

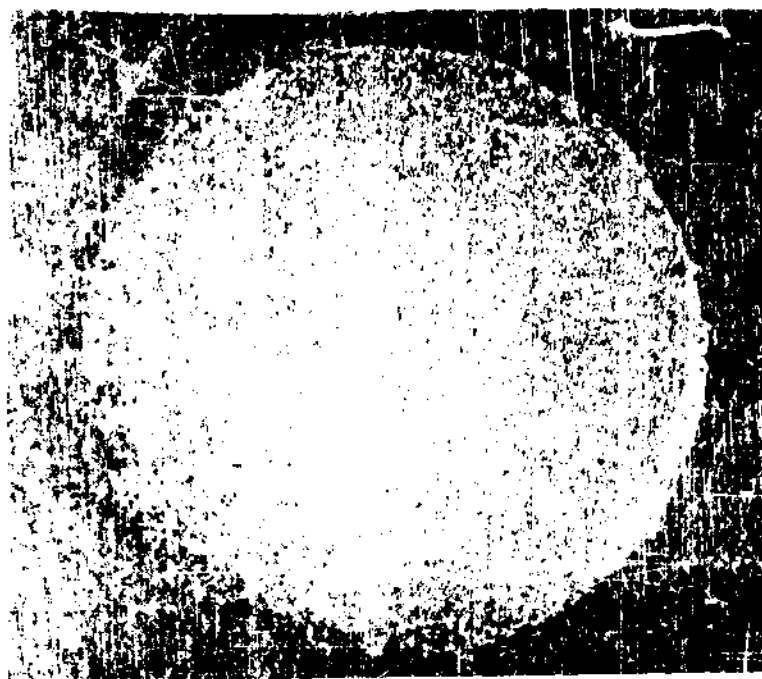
Jako pomůcky pro nanesení sítě slouží: 50% roztok kyseliny dusičné, tampóny z buničité vaty, roztok louhu sodného. V kombinaci s fotografickým způsobem přenášení obrazu deformační sítě na vzorek, s kterým se tato metoda nejčastěji používá, jsou dalšími pomůckami: průsvítka (astralon) s kresbou sítě, želatina.

Čistý odmaštěný povrch vzorku pokryjeme tenkou vrstvou želatiny. Síť přeneseme z přiložené průsvítky na povrch osvětlením obloukovou lampou nebo výbojkou. Obraz vznikne obnaženým povrchem v místě čar kresby. Potom obnažený povrch vzorku leptáme 50% roztokem kyseliny dusičné. Nanesení leptadla provedeme tampóny. Zbytky leptadla a želatiny smyjeme louhem sodným.

Pro chemické leptání kombinované s fotografickou metodou platí:

- 1) Síť je dobře čitelná (možnost barevného tónování leptaného povrchu).
- 2) Vliv na koeficient tření je zanedbatelný.
- 3) Pro běžnou hloubku naleptané vrstvy 4 μ m se vrubový účinek neprojevuje.
- 4) Plasticita sítě je totožná s plasticitou základního materiálu. Čitelnost sítě je i po velkém přetvoření dobrá.
- 5) Odolnost proti otěru a mazadlům je výborná.
- 6) Odchylky od jmenovitého rozměru jsou $\pm 0,05$ mm

Metoda je velmi pracná a speciální. Pro praktickou aplikaci se zatím používá pouze v případech, kdy požadujeme velkou odolnost proti otěru a velkou přesnost jednotlivých elementů.



obr. 17 Deformační síť leptaná patronou.

3.2.7 Metoda Elektrochemického leptání se síťovou šablonou

Pro vytváření deformační sítě elektrochemickým leptáním je potřeba: rámeček ze svařených hliníkových profilů s napnutou polyamidovou tkaninou (NYBOLT 33124 ok/cm²), elektrolyt, filcová podložka, leptací válečky, zdroj stejnosměrného proudu.

Na vzorek plechu přiložíme rámeček se šablonou. Na šablonu umístíme filcovou podložku nasátou elektrolytem. Jeden pól zdroje spojíme se vzorkem, druhý pól připojíme na válečkový přípravek. Při přejíždění válečky po filcové podložce dojde k tomu, že vytlačený elektrolyt z filcu propojí v místech mezer na šabloně obvod: válečky - elektrolyt - vzorek - zdroj a tím dochází v místech, kde nejsou ve tkanině zalepena očka emulsi k leptání povrchu vzorku.

Metoda elektrochemického leptání se s výhodou může také kombinovat s metodou fotografickou. K tomu je potřeba dále kromě výše uvedených pomůcek: emulze GRAFOTECHNA, žluté ochranné světlo, průhledný originál s elementy sítě, oblouková lampa nebo výbojka.

Síť přeneseme na plech tak, že nejprve plech potáhneme tenkým filmem emulsa (při ochranném žlutém světle) a potom na něj přiložíme průhledný originál, který osvětlíme obloukovou lampou.

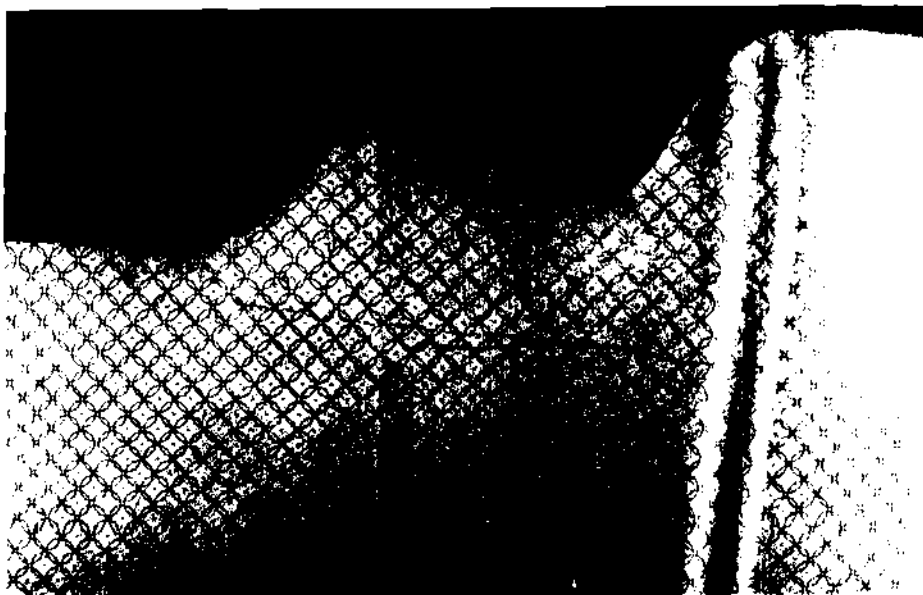
Podle druhu zaplněných ploch na průhledném originálu získáme buď síť pozitivní nebo negativní.

Fotografická emulze deformační fotografické sítě chrání plech před nežadoucím odleptáním elektrickým proudem. Naopak na místa obnaženého plechu se elektrolyt rozlije a za pomoci

elektrického proudu se vytváří deformační síť. Vlastnosti takto nanesené sítě se shodují s vlastnostmi níže uvedenými. Pro tuto metodu nanášení deformační sítě bylo zjištěno:

- 1) Čitelnost sítě je při rovnoměrném přitlaku na válečky dobrá.
- 2) Vliv na koeficient tření je zanedbatelný.
- 3) Vrubový účinek sítě nebyl zjištěn.
- 4) Plasticita sítě je závislá na plasticitě vzorku.
- 5) Odolnost proti mazadlům a otěru je velmi dobrá.
- 6) Chyba stanovených rozměrů se může přiblížit podle pečlivosti prováděných prací hodnotám $\pm 0,01$ mm.

Je to metoda přesná, ale materiálově a finančně náročná. Pro tuto metodu byl ve spolupráci katedry a diplomanta vyvinut a odzkoušen válečkový přípravek viz kap. 6.



obr. 18 Elektrochemicky leptaná deformační síť.

3.2.8 Metoda vyjiskřovací

Tyto druhy deformačních sítí jsou zhotoveny pomocí: vyjiskřo-

vacího stroje AGIPULS (výrobce fa AGIE, Švýcarsko) jehož součástí je přípravek pro upnutí vzorku (kvůli konstantní mezeře mezi vzorkem a elektrodou). Dalšími pomůckami jsou: elektrody ve tvaru mezikružích (pro kruhové elementy).

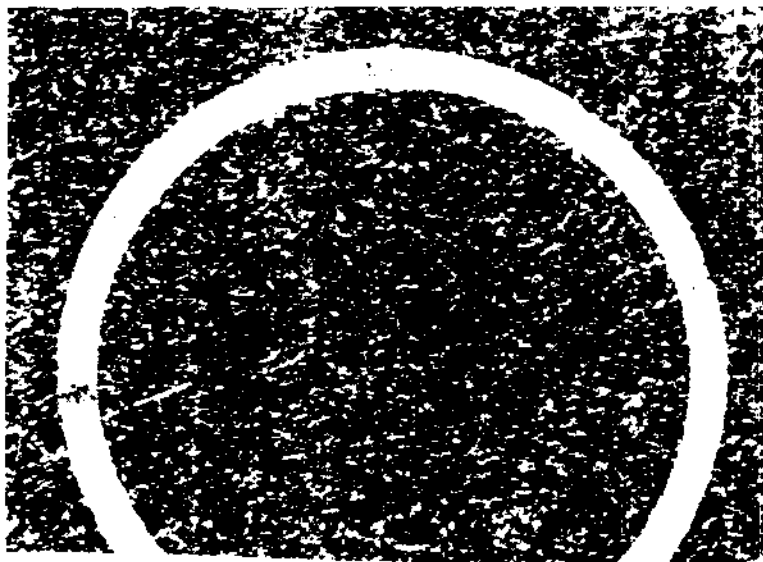
Vyjiskřování probíhá ve vaně s petrolejem, posunutí je zajištěno ve dvou na sobě kolmých směrech s přesností 0,01 mm.

Parametry vyjiskřování jsou: kmitočet, pracovní napětí, proud.

Hodnocení metody:

- 1) Čitelnost sítě je díky ostrým obrysům a malé drsnosti vyjiskřené plochy velmi dobrá.
- 2) Vliv na koeficient tření je nepatrný.
- 3) Vrubový účinek lze zanedbat
- 4) Plasticita sítě je dána plasticitou základního materiálu.
- 5) Odolnost proti mazadlům a otěru je výborná.
- 6) Odchyłky od jmenovitého rozměru nepřesahují 0,02 mm.

Je to metoda ze všech používaných nejpresnější, ale je také nejnákladnější a velmi pracná při vytváření většího počtu elementů.



obr. 19 deformační síť zhotovená vyjiskřováním.

3.3. Vytváření deformačních sítí s ohledem na charakter tváření Deformační sítě pro plošné tváření

Síť se aplikuje na povrchu vzorku. Používají se různé tvary elementů sítě různých rozměrů, a způsobů rozmístění. Síť musíme vytvořit tak, aby si v průběhu tvářecí operace zachovala čitelnost. V libovolném okamžiku (přerušení tváření) nebo po provedení operace můžeme provést porovnání deformované sítě s výchozí a vyčíslit dosažené přetvoření.

Pro vytváření tohoto druhu sítě můžeme použít všech metod obsažených v kapitole 3.2.

Deformační sítě pro objemové tváření

Tato deformační síť se zásadně liší od deformační sítě pro plošné tváření, že je nanesena v osovém řezu na děleném výchozím polotovaru. Při tváření převážně tlakovými napětími (protlačování) neovlivní řez technologické podmínky tváření. Ale například při přechování je nutno vzorek umístit do zděře a tím modelovat kompaktnost materiálu.

4 POUŽITÍ DEFORMAČNÍCH SÍTÍ PRO ANALÝZU PROCESU TAŽENÍ VÝLISKU

Pro tuto analýzu se používají téměř výhradně sítě s kruhovými elementy. Použitelnost sítí se čtvercovými elementy je v podstatě omezena na případy, kdy můžeme předem stanovit směry hlavních přetvoření, to znamená nanést síť tak, aby směry stran nebo úhlopříček byly s těmito směry totožné. Požadujeme to proto, protože v případě kdy směry stran nebo úhlopříček nejsou totožné se směry hlavních přetvoření je proměřování elementů a výpočet požadovaných hodnot po tváření obtížné.

Celkově je možno říci, že obecně lze analýzu procesu tažení výlisku provádět užitím metody deformačních sítí těmito způsoby:

4.1 Studium změn tloušťky plechu v jednotlivých místech výlisku /4/

Ze zákona stálosti objemu vyplývá:

(V =konstanta)

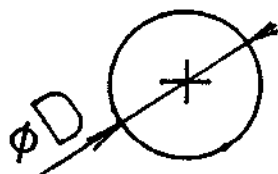
$$F_0 S_0 = F S \quad (32)$$

S_0 ... původní tloušťka plechu v místě elementu

S ... okamžitá tloušťka plechu v místě elementu

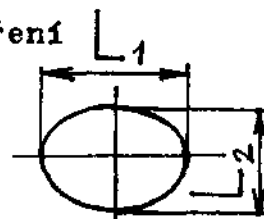
element deformační sítě

před tvářením



element deformační sítě

po tváření



obr. 20.

kde:

$$F_0 = \frac{\pi D^2}{4} \quad (33)$$

F_0 ...výchozí plocha kruhového elementu

$$F = \frac{\pi L_1 L_2}{4} \quad (34)$$

F ...konečná plocha přetvořeného elementu

změna tloušťky ΔS plechu:

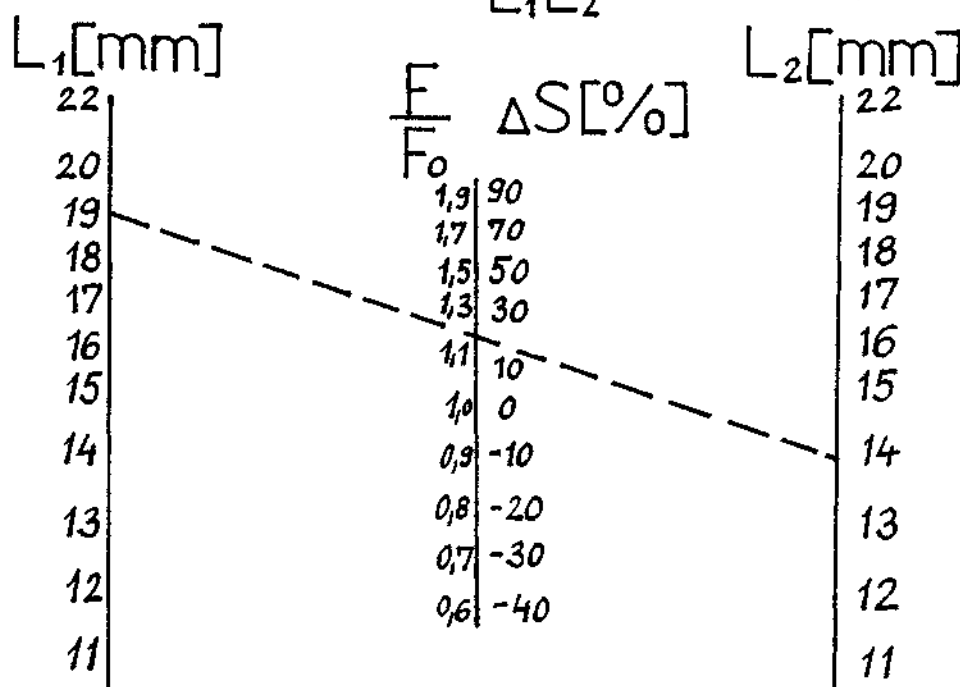
$$\Delta S = S_0 - S \quad (35)$$

po dosazení (32) do (35)

$$\Delta S = S_0 \left(1 - \frac{F_0}{F}\right) \quad (36)$$

po dosazení (33), (34) do (36):

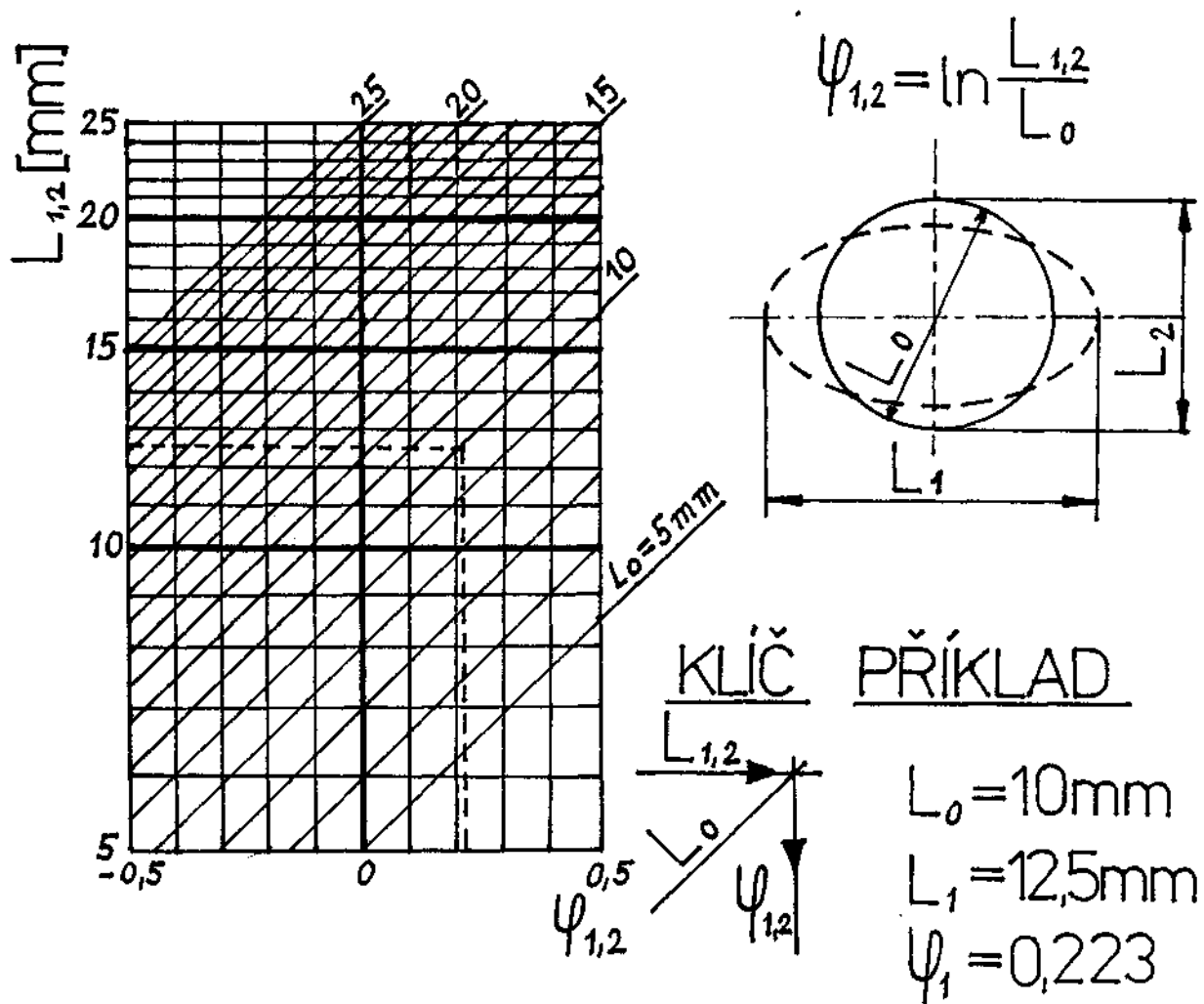
$$\Delta S = S_0 \left(1 - \frac{D^2}{L_1 L_2}\right) \quad (37)$$



obr. 21 Nomogram pro stanovení změn tloušťky plechu při použití elementů o průměru 15 mm.

4.2 Zjištění stavu napjatosti a stupně přetvoření na výlisku mimo oblast přidržovače

Př. vylišování vzorku stanovíme φ_1 a φ_2 z obrázku 22.



obr. 22 Princip stanovení hlavních přetvoření ψ_1 a ψ_2 doplněný nomogramem.

Z hodnot ψ_1 a ψ_2 určíme hodnoty m podle

$$m = \frac{2\psi_2 + \psi_1}{2\psi_1 + \psi_2} \quad (38)$$

a hodnoty $\bar{p}$ podle:

$$\bar{p} = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \sqrt{\psi_1^2 + \psi_1\psi_2 + \psi_2^2} \quad (39)$$

$\bar{p}$... skutečná hodnota přetvoření

Vyhodnocením diagramu trhací zkoušky zjistíme hodnotu exponentu n jakožto materiálové hodnoty podle vztahu:

$$n = \psi_K \quad (40)$$

ψ_K ... skutečné poměrné přetvoření v okamžiku dosažení smluvní meze pevnosti /6/.

Použitím vztahu:

$$\bar{\eta}_K = \frac{n}{f_1(m)} = \frac{2[2 \sqrt{1-m+m^2}]}{2-m} n \quad (41)$$

zjistíme kritický stupeň přetvoření $\bar{\eta}_K$ ve zkoumaných místech výlisku.

Porovnáním $\bar{\eta}$ a $\bar{\eta}_K$ ve zkoumaném místě zjistíme, jak materiál při lisování využíváme (je-li $\bar{\eta} < \bar{\eta}_K$ materiál není dostatečně využíván).

Zjištění intenzity přetvoření ψ_i z hodnot hlavních normálních přetvoření ψ_1 a ψ_2 můžeme provést z nomogramu:

4.3 Analýza procesu tažení výlisků pomocí metody kluzových čar

Předpokladem je pracovní diagram ideálně pružně plastického materiálu, jeho nezávislost na čase a statické zatěžování.

Metoda se používá pro řešení stavu napjatosti rovinných a osově symetrických úloh.

V případě rovinného přetvoření jsou všechny posuvy rovnoběžné s určitou rovinou a jsou nezávislé na vzdálenosti od ní.

Souřadný systém je možno volit tak, že nenulové posuvy leží v rovině x, y [$u_x = u_x(x, y)$, $u_y = u_y(x, y)$].

Hlavní normální napětí v rovině určíme ze vztahu /8/:

$$\sigma_{1,3} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_z^2} \quad (42)$$

σ_x, σ_y ... hlavní normální napětí v osách x, y

τ_z ... tečné napětí v ose z

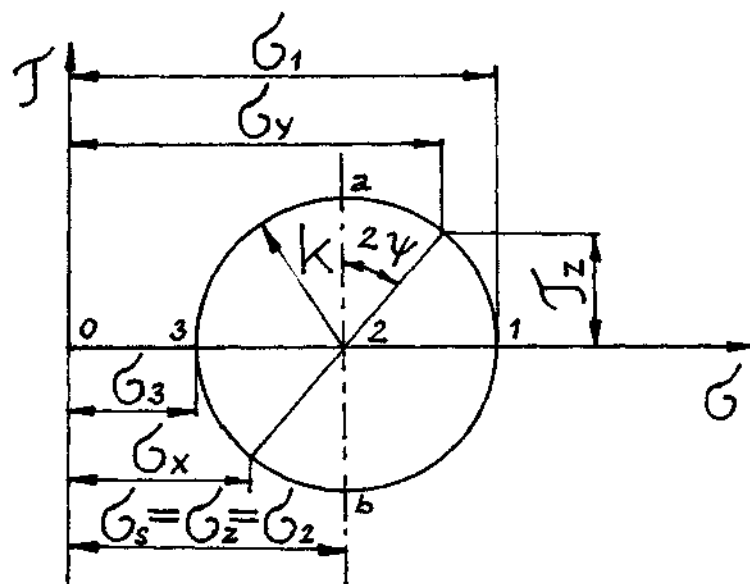
dále platí /8/:

$$\begin{aligned} \sigma_z &= \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) \\ \tau_x &= 0 \\ \tau_y &= 0 \end{aligned} \quad (43)$$

s ohledem na (43) můžeme (42) přepsat na:

$$\sigma_{1,3} = \sigma_z \pm k$$

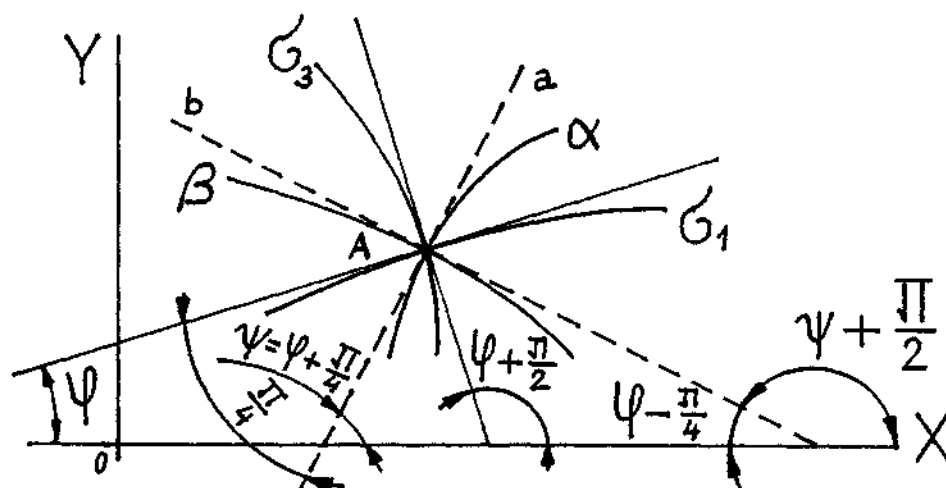
kde pro podmínku "maximálního smyčkového napětí" ($\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_K$) je $k = \frac{\sigma_K}{2}$ a pro podmínku "intenzity napětí" (HMH) je $k = \frac{\sigma_K}{\sqrt{3}}$



obr. 24 Mohrův diagram pro plastický stav.

Z obrázku 24 vyplývá:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sigma_s - k \sin 2\psi \\ \sigma_y &= \sigma_s + k \sin 2\psi \\ \tau_z &= k \cos 2\psi\end{aligned}\quad (44)$$



obr. 25 Trajektorie hlavních normálních a hlavních smykových napětí.

Trajektorie hlavních (maximálních) smykových napětí nazýváme kluzovými čarami.

Z obrázku 25 vyplývají diferenciální rovnice kluzových čar α

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg} \psi \quad (45)$$

α/β

$$\frac{dy}{dx} = -\cotg \psi \quad (46)$$

Trajektorie α/β tvoří síť skládající se ze dvou ortogonálních svazků. Tuto síť lze za příznivých podmínek pozorovat na povrchu tvářeného tělesa ve formě Lüdersových - Černovových čar /8/.

Z uvedeného vyplývají následující vlastnosti kluzových čar:

- 1) Kluzové čáry jsou spojitě.
- 2) Oba svazky kluzových čar ($\propto \alpha/\beta$) jsou navzájem ortogonální.
- 3) Protínají směry hlavních normálních napětí pod úhlem $\frac{\pi}{4}$.
- 4) Odpovídají okrajovým podmínkám.

Pro řešení konkrétních úloh za pomoci sítí kluzových čar je dále důležité provést transformaci souřadnic tak, že osy x, y splynou se směry a, b (obr. 23), potom $\psi = 0$ a rovnice [11.109) /8/ nabudou tvaru:

$$\begin{aligned} \frac{\partial G_s}{\partial x} - 2k \frac{\partial \psi}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial G_s}{\partial y} + 2k \frac{\partial \psi}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \quad (47)$$

Při splnutí os x, y se směry a, b derivujeme vlastně podle oblouků kluzových čar $\propto \alpha/\beta$.

Po provedené integraci platí:

a) podél čáry α

$$G_s - 2k\psi = \xi = \text{konst.} \quad (48)$$

b) podél čáry β

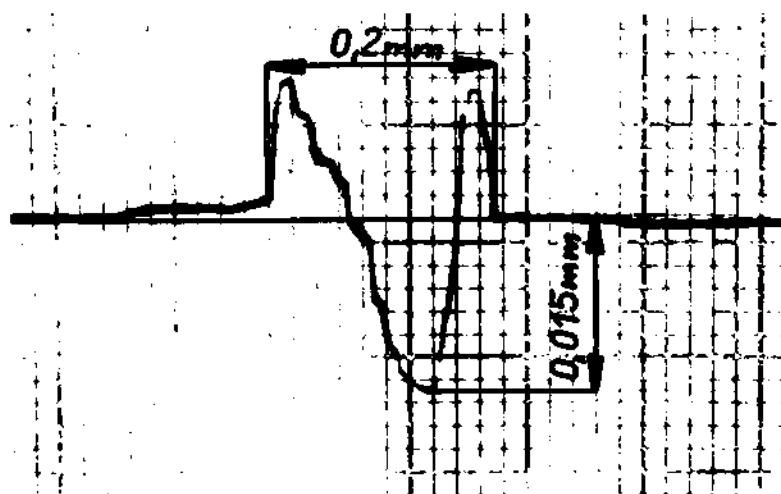
$$G_s + 2k\psi = \eta = \text{konst.} \quad (49)$$

Takto popsaná teorie kluzových čar slouží pro výpočet napjatosti v okrajových částech výlisku (přírubě) pro případ rovinného přetvoření (např. rovinný prstenec zatížený rovnoměrným tvářecím tlakem na vnitřním obvodě).

5 VYTVÁŘENÍ DEFORMAČNÍCH SÍTÍ RYTÍM

Deformační ryté sítě lze vytvářet s elementy kruhovými nebo čtvercovými. Rovnoběžníkové tvary lze vyznačovat na běžných dělicích strojích, na orýsovacích přípravcích nebo lze též improvizovat na zařízení mikrotvrdoměru /PMT 3/.

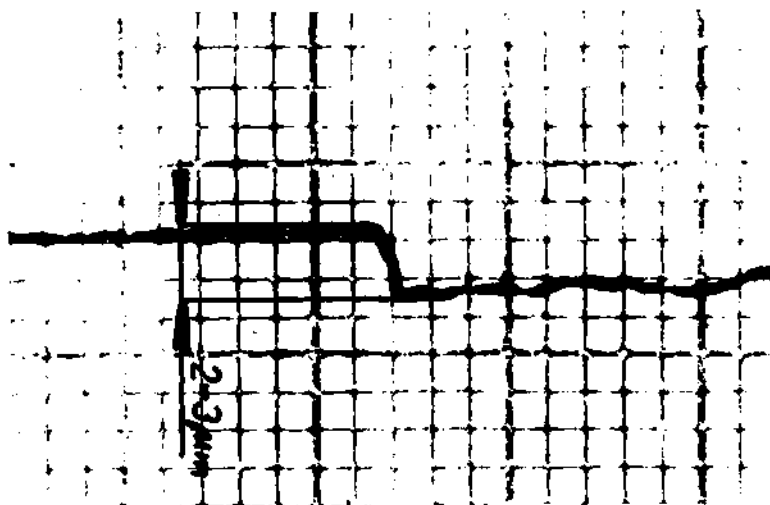
Je nutno dbát na dodržení vyhovující přesnosti rozložení středů kruhových elementů v případě použití kružidla. S běžně nabroušeným kružidlem docílíme vrypu, jehož profil je na obr. 26



obr. 26 Vryp získaný kružidlem, které je nabroušeno běžným způsobem.

Takto vytvořený vryp je velmi dobře čitelný i když zasahuje do malé hloubky. Velkou nevýhodou je rychlé snižování čitelnosti sítě při velkém plastickém přetvoření spojeným s namáháním na otěr.

Výborné vlastnosti co se týče čitelnosti a otěruvzdornosti vykazuje profil vrypu sítě na obr. 27.



obr.27 Vryp vytvořený vhodně nabroušeným kružidlem.

Abychom získali vryp podobný svým charakterem vrypu na obr.27, je nutno kružidlo vhodným způsobem nabrousit tak, aby byl materiál odebírán, nikoliv vytlačován.

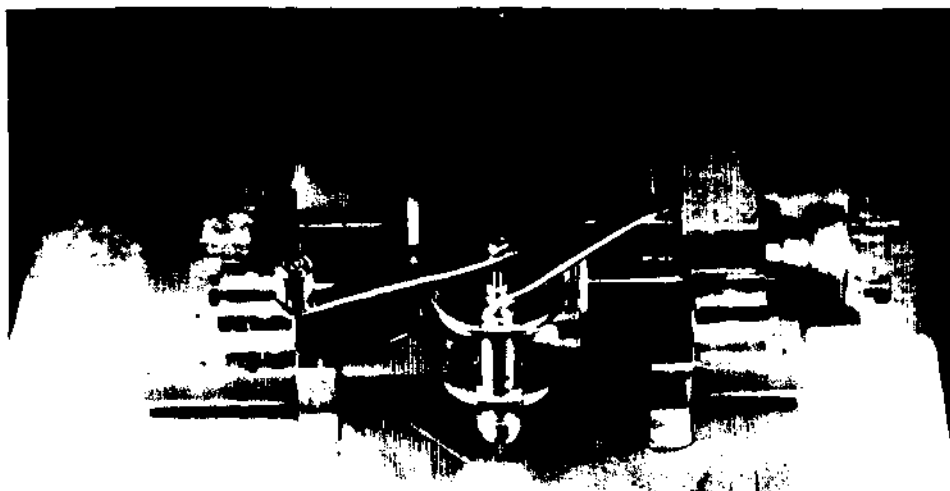
Při ručním rytí deformační sítě je stopa na vzorku plechu plynulá s pravidelnou šířkou asi 0,05 mm. Vzhledem k povrchovým mikronerovnostem ocelového plechu musí být rytí prováděno tak, aby vyznačení nevytvářelo škodlivé vruby.

Nové možnosti využití ryté sítě pro analýzu tvářecích operací skýtá rycí přípravek ing. Berana z KTP VŠST v Liberci. Tento přípravek /9/ umožňuje rytí deformačních sítí malých parametrů (rozměrů), což umožňuje získat velmi dobré výsledky studia deformací i v místech nadkritických stavů v oblastech dosahu kontraktce, protože deformační síť může být složena

z většího počtu elementů v příslušné oblasti.

Tento rycí přípravek je velmi dobře přenosný a proto může být využit pro okamžité vyznačení sítě v provozu lisovny.

V neposlední řadě může být využito pohotovosti zařízení pro přesné rytí deformačních sítí i pro účely tak zvaného oživování lisovacích nástrojů pro zpracování plechů.



obr. 28 Rycí přípravek.

6 NÁVRH A REALIZACE PŘÍPRAVKU PRO ELEKTROCHEMICKÉ LEPTÁNÍ DEFORMAČNÍCH SÍTÍ

Provedení zařízení pro elektrochemické leptání deformačních sítí je patrné z výkresové dokumentace přiložené k diplomové práci.

6.1. Popis přípravku

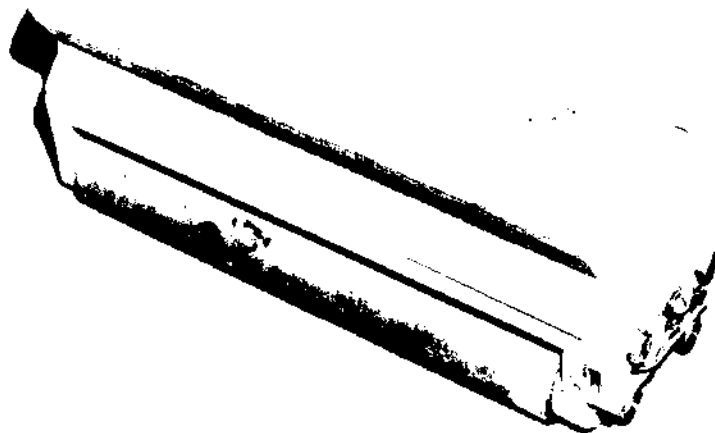
Přípravek se skládá ze tří hlavních částí:

- rámu
- leptacích válečků
- elektrického příslušenství

Rám je sestaven z příčnicku a dvou bočnic spojených s příčnickem vždy dvěma šrouby. Pro přesně ustavení polohy bočnic a příčnicku byly oba díly svrtány a skolíkovány. V obou bočnicích jsou vmáčknuta teflonová pouzdra pro izolované uložení osiček válečků. Další součástí rámu přípravku je plastové držadlo, které je k příčnicku přichyceno dvěma šrouby se zapuštěnou hlavou.

Druhou částí přípravku jsou válečky $\varnothing 34,8 \times 190$ mm s otvory na obou koncích, v nichž jsou nalisovány osičky. Pro celkovou funkci zařízení je důležité jemné soustružení povrchu válečku na drsnost $R_a = 0,8$. Úprava povrchu je důležitá pro rovnoměrný a nepřetržitý styk válečků s filcové podložky (rovnoměrné leptání).

Elektrické příslušenství obsahuje plastový kryt s profrézovaným vedením pro uhlíky, který je přichycen šrouby k bočnicím. Kabely z obou uhlíků jsou vyvedeny na centrální šroubek. Ke šroubku je přiveden třetím kabelem el. proud ze zdroje.



obr. 29 Válečkový leptací přípravek.

Zdokonalení přípravku ve srovnání s přípravkem firmy ERICHSEN
používaném v n.p. Žďas Žďár nad Sázavou

Zásadním zlepšením je to, že pro přenos elektrického proudu bylo použito uhlíků s dotykem na pevně nalisované osičky válečků. U původního zařízení byl přenos elektrického proudu realizován přes rám přípravku ve kterém byly pevně našroubovány osičky (válečky měly vzhledem k těmto pevným osičkám otáčivé uložení). V průběhu leptání často docházelo k zanesení uložení osiček a válečků a bylo nutno velmi často přípravek rozebírat a čistit.

U původního zařízení bylo držadlo umístěno poměrně vysoko. Při vyvození přitlaku rukou byly válečky značně nestabilní. U nového přípravku je držadlo řešeno "razítkovým" způsobem z čehož vyplývá rovnoměrnější rozložení přitlaku na oba válečky.

U nového přípravku byla také zvýšena hmotnost. To umožňuje opět rovnoměrnější přitlak při samostatném leptání.

Přípravek je velmi dobře použitelný jak pro potřeby laboratorního modelování tak pro samotné vytváření deformačních sítí v provozu lisovny. Většímu rozšíření praktického použití zabráňuje značná pracnost metody a při kombinaci elektrochemického leptání se síťovou šablonou velká praskavost síta.

7 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

7.1 Rytá deformační síť

Tabulka 1

Průměry náhodně vybraných kruhových elementů deformační ryté sítě na vzorcích různých šířek

šířka [mm] vzorku b	směr	číslo elementu				
		1	2	3	4	5
30	L ₁	3,36	3,41	3,32	3,36	3,41
	L ₂	3,41	3,36	3,38	3,37	3,44
45	L ₁	3,35	3,44	3,44	3,39	3,43
	L ₂	3,43	3,45	3,42	3,42	3,43
60	L ₁	3,44	3,44	3,41	3,44	3,45
	L ₂	3,44	3,43	3,44	3,41	3,43
75	L ₁	3,43	3,45	3,43	3,44	3,39
	L ₂	3,43	3,43	3,39	3,42	3,41
90	L ₁	3,42	3,41	3,44	3,44	3,45
	L ₂	3,44	3,43	3,44	3,43	3,43
105	L ₁	3,43	3,42	3,41	3,44	3,46
	L ₂	3,44	3,43	3,44	3,44	3,43
120	L ₁	3,42	3,43	3,44	3,43	3,45
	L ₂	3,43	3,43	3,44	3,42	3,44
140	L ₁	3,43	3,41	3,43	3,42	3,44
	L ₂	3,44	3,41	3,44	3,42	3,42
150	L ₁	3,43	3,45	3,43	3,45	3,45
	L ₂	3,45	3,44	3,44	3,44	3,44
160	L ₁	3,43	3,44	3,44	3,45	3,43
	L ₂	3,44	3,43	3,43	3,44	3,42
170	L ₁	3,43	3,46	3,43	3,44	3,42
	L ₂	3,44	3,44	3,43	3,43	3,43
210	L ₁	3,44	3,43	3,45	3,42	3,44
	L ₂	3,44	3,42	3,44	3,44	3,44

materiál: hlubokotažný plech KOHAL EXTRA

11 305

Vyhodnocení rozměrů souboru náhodně vybraných rozměrů kruhový
elementů deformační sítě ryté přípravkem

$$n = 120$$

$$\bar{x}_r = 3,428 \text{ mm}$$

$$\sigma_{L0_r} = 0,022 \text{ mm}$$

Hodnoty $L_{1,2}$ na vzorcích plechu byly měřeny na dílenském mikroskopu.

Přesnost proměřování elementů na tomto zařízení byla hodnocena prostřednictvím směrodatné odchylky stanovené ze 30ti měření kalibračního kroužku $\phi 2$ mm pro cejchování mikroskopu, $\sigma_p = 0,0052 \text{ mm}$. Celkovou chybu při určování délkových rozměrů lze vyjádřit pomocí směrodatné odchylky.

$$\sigma_r = \sqrt{\sigma_{L0}^2 + \sigma_p^2}$$

$$\sigma_r = 0,023 \text{ mm}$$

$$v_r = 0,674 \sigma_r$$

$$v_r = 0,016 \text{ mm}$$

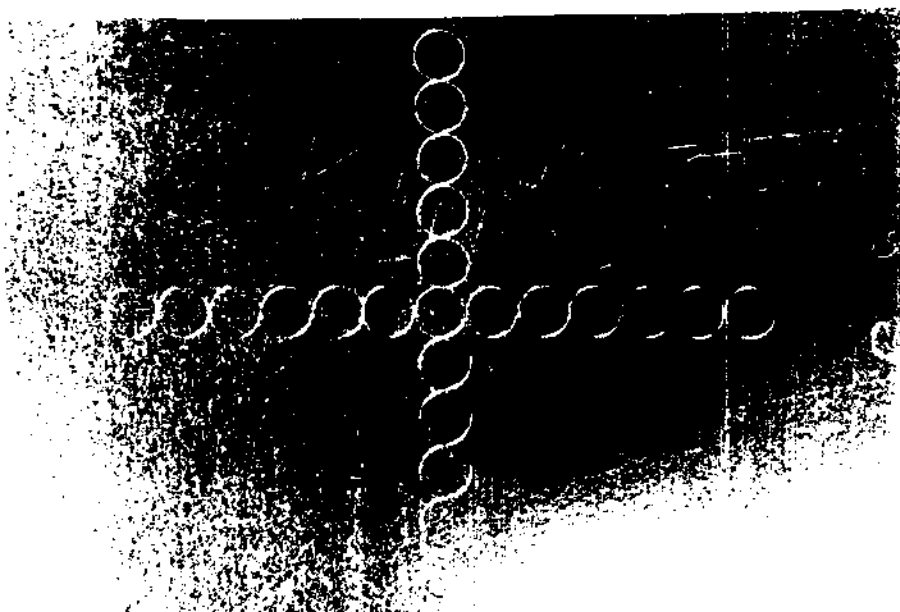
$$L_{1,2} = (3,428 \pm 0,016) \text{ mm}$$

kde: σ_p ...směrodatná odchylka přístroje

σ_{L0_r} ...směrodatná odchylka měření

Pravděpodobnost, že naměřené hodnoty budou ležet v intervalu

$\langle 3,412; 3,444 \rangle$ je 50%.



obr. 30 Kříž rytých elementů.

Z proměřených hodnot rytých deformačních sítí uvedených v tabulce 1 bylo v rámci státního úkolu III. -1-6/4 "Mezní stavy při zpracování povrchově upravených tenkých ocelových plechů tažením" řešenému na katedře Tváření a plastů dále zjišťováno:

$$\sigma_1; \sigma_2; m_\varphi = \frac{\varphi_2}{\varphi_1} ; m_\sigma; \varphi_i.$$

**7.2 Elektrochemicky leptaná deformační síť v kombinaci s foto
grafickou metodou**

Tabulka 2

Průměry náhodně vybraných elementů deformační sítě elektroche
micky leptané v kombinaci s fotografickou metodou na vzorcích
ø 210 mm.

Šířka [mm] vzorku b	směr	číslo elementu				
		1	2	3	4	5
210	L ₁	2,73	2,67	2,62	2,69	2,68
	L ₂	2,70	2,68	2,69	2,69	2,69
210	L ₁	2,73	2,64	2,73	2,69	2,68
	L ₂	2,70	2,68	2,68	2,70	2,61
210	L ₁	2,69	2,71	2,66	2,65	2,68
	L ₂	2,65	2,60	2,67	2,71	2,69
210	L ₁	2,66	2,64	2,73	2,67	2,68
	L ₂	2,65	2,71	2,68	2,67	2,62
210	L ₁	2,67	2,67	2,69	2,67	2,67
	L ₂	2,67	2,66	2,68	2,69	2,70
210	L ₁	2,69	2,69	2,68	2,72	2,66
	L ₂	2,69	2,66	2,71	2,67	2,67
210	L ₁	2,74	2,66	2,66	2,54	2,68
	L ₂	2,67	2,69	2,69	2,71	2,67
210	L ₁	2,72	2,66	2,69	2,68	2,65
	L ₂	2,67	2,68	2,67	2,68	2,66
210	L ₁	2,71	2,68	2,69	2,65	2,69
	L ₂	2,66	2,68	2,68	2,67	2,63
210	L ₁	2,66	2,71	2,68	2,69	2,71
	L ₂	2,66	2,66	2,67	2,69	2,70
210	L ₁	2,66	2,67	2,68	2,66	2,67
	L ₂	2,68	2,67	2,72	2,66	2,67
210	L ₁	2,68	2,69	2,66	2,68	2,66
	L ₂	2,67	2,69	2,67	2,66	2,67

materiál: hlubokotahný plech KOHAL EXTRA
11305

Vyhodnocení rozměrů souboru náhodně vybraných kruhových elementů
deformační sítě elektrochemicky leptané v kombinaci s fotografi-
ckou metodou.

$$n = 120$$

$$\bar{x}_L = 2,677 \text{ mm}$$

$$\sigma_{L_0} = 0,027 \text{ mm}$$

$$\sigma_L = 0,027 \text{ mm}$$

$$\sigma_L = 0,018 \text{ mm}$$

$$L_{1,2} = (2,677 \pm 0,018) \text{ mm}$$

Pravděpodobnost, že naměřené hodnoty budou ležet v intervalu
 $\langle 2,659; 2,695 \rangle$ je 50%.

7.3. Srovnání obou souborů

1) Protože parametry obou sítí nejsou stejné provedeme procentu-
ální vyjádření pravděpodobné chyby σ vzhledem ke střední hodno-
tě souboru:

a) Deformační síť rytá přípravkem

$$\bar{x}_r = 3,428 \text{ mm} \dots\dots\dots 100\%$$

pravděpodobnostní interval

$$\langle \bar{x}_r - \sigma; \bar{x}_r + \sigma \rangle \dots\dots \langle 3,412; 3,444 \rangle \dots\dots 0,93\%$$

b) Deformační síť elektrochemicky leptaná

$$\bar{x}_L = 2,677 \text{ mm} \dots\dots\dots 100\%$$

pravděpodobnostní interval

$$\langle \bar{x}_L - \sigma; \bar{x}_L + \sigma \rangle \dots\dots \langle 2,659; 2,695 \rangle \dots\dots 1,35\%$$

Z tohoto srovnání vyplývá, že přesnější je síť rytá přípra-
 vkem.

2) Testování velikosti σ^2

$$a) H_0: \sigma_L^2 = \sigma_r^2 \quad H_1: \sigma_L^2 \neq \sigma_r^2$$

hladina významnosti zvolena 5 %

$$b) F_p = \frac{\sigma_L^2}{\sigma_r^2} = 1,378$$

c) stanovení kritické hodnoty (z tab.)

$$F_{0,95;K_1,K_2} = 1,380$$

Platí nulová hypotéza o tom, že kvadráty směrodatných odchylek jsou souměřitelné.

Tedy můžeme říci, že obě metody nanášení deformačních sítí jsou co do přesnosti stejné.

3) Testování pomocí variačního koeficientu

$$V_r = \frac{\sigma_r}{\bar{x}_r} = 6,709 \cdot 10^{-3}$$

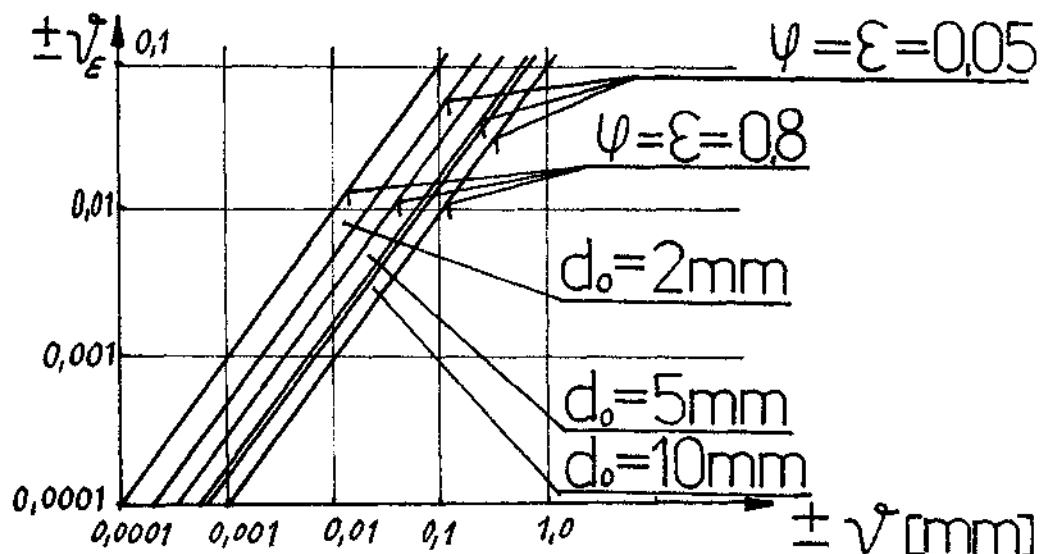
$$V_L = \frac{\sigma_L}{\bar{x}_L} = 1 \cdot 10^{-2} \quad V_r < V_L$$

Přesnější je deformační síť nanášená na vzorek rycím přípravkem.

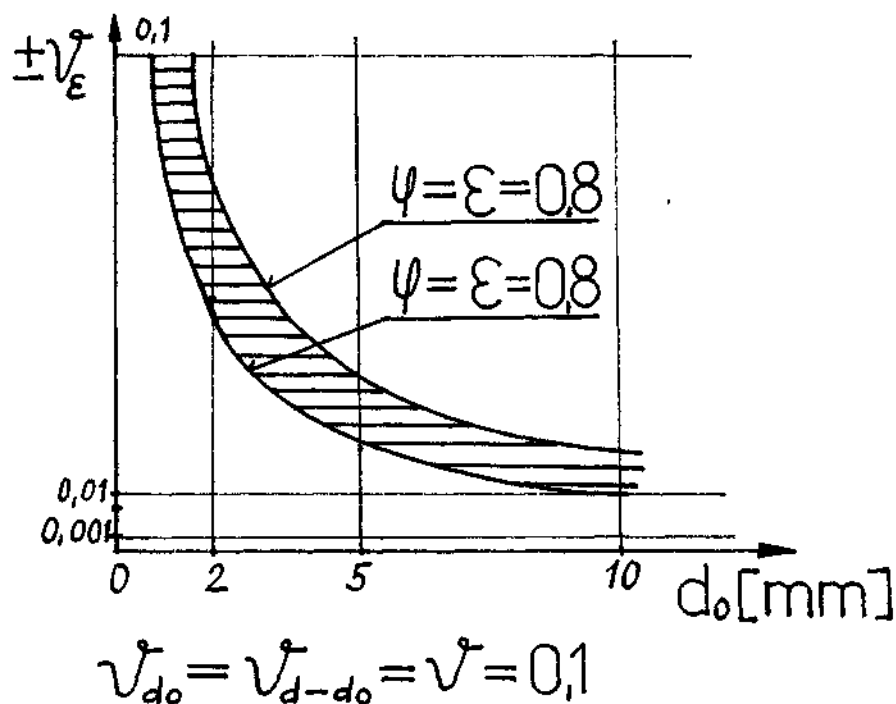
Testováním jsem zjistil, že podle bodů 1) a 3) je přesnější síť nanášená na vzorek rycím přípravkem. Bod 2) nám potvrdil, že obě metody nanášení deformačních sítí jsou při praktické aplikaci stejně přesné.

7.4 Zásady pro volbu rozměru elementu

Podle požadavku přesnosti výsledku měření deformací musíme volit nejen přiměřenou metodu vyznačování sítí, ale i přiměřený rozměr elementů jak je zřejmé z obrázku 31.

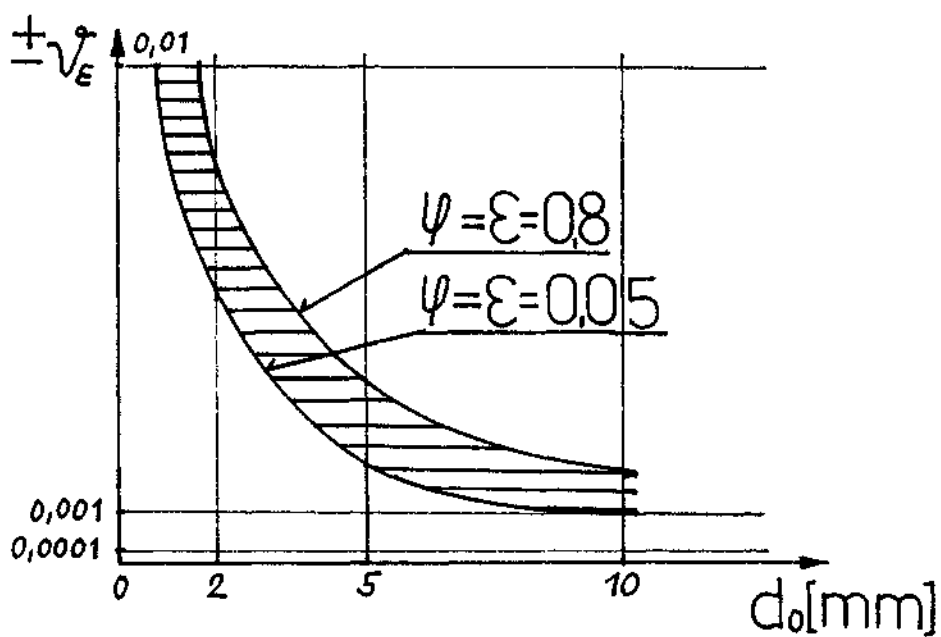


obr. 31 Diagram závislosti chyby výsledku na dílčích parametrech



obr. 32 Vlastnosti deformačních sítí při chybách proměření

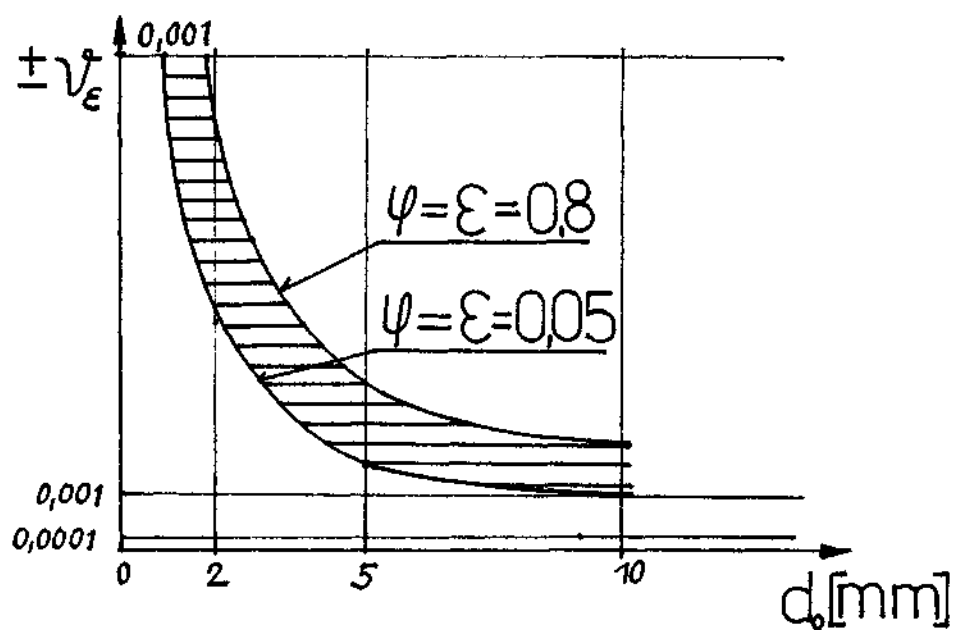
$v = \pm 0.1$ mm.



$$\nu_{d_0} = \nu_{d-d_0} = \nu = 0,01$$

obr. 33 Vlastnosti deformačních sítí při chybách proměření

$$\nu = \pm 0,01 \text{ mm.}$$



$$\nu_{d_0} = \nu_{d-d_0} = \nu = 0,001$$

obr. 34 Vlastnosti deformačních sítí při chybách proměření

$$\nu = \pm 0,001 \text{ mm.}$$

Diagram studovaných závislostí může mít i jinou formu. Na obr. 32,33,34 jsou diagramy zpracované pro základní hodnoty chyby měření $\sqrt{\sigma} = 0,1; 0,01; 0,001$. Je zřejmé, že použití menších parametrů sítí vyžaduje vysokou přesnost proměřování, tedy jsou upotřebitelné jediné sítě ryté přípravkem a sítě elektrochemicky leptané zajišťující maximální přesnost proměřování.

Měření malých deformací metodou deformačních sítí je vždy problematické, protože při malých hodnotách rychle roste zejména relativní hodnota chyby výsledku. Velikost parametru elementu d_0 by neměla být nikdy menší než 2 mm bez ohledu na přesnost proměřování.

7.5. Analýza procesu tažení výlisku blatníku osobního automobilu Š 742 M

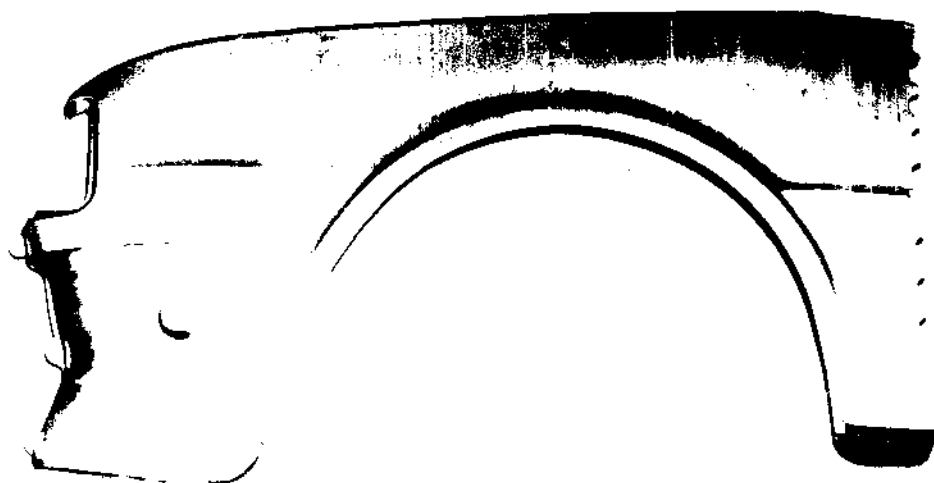
V průběhu řešení diplomového úkolu byla provedena s využitím elektrochemicky leptané deformační sítě o parametru 2,5 mm analýza podmínek procesu plastického přetvoření na výlisku předního blatníku osobního vozu Š 472 M (na základě požadavků AZNP Mladá Boleslav). Kritickými místy jsou: oblast lemu přední části blatníku a přechodová část do prahu. K elektrochemickému leptání bylo použito kombinace fotografické metody a vlastní leptání bylo prováděno s využitím vyvinutého a navrženého přípravku.

Na základě tohoto praktického ověření je možno konstatovat, že přípravek splňuje stanovené požadavky, plně se osvědčil a bude využitelný i pro elektrochemické leptání prováděné se sítím.

7.6 Zhodnocení

Při porovnání ryté a leptané sítě je možno předpokládat, na základě zkušeností a zkoušek prováděných s koncernem Vítkovické železářny a národním podnikem Žďas Žďár nad Sázavou, že se přesnost deformační sítě poněkud zmenší a to v závislosti na hustotě použitého síta a kvalitě jeho provedení a na vypnutí síta v rámu.

Proto doporučuji, aby této otázce byla při praktické aplikaci věnována zvýšená pozornost. Je nutné kontrolovat rozměr elementů metodou náhodného výběru a dále ověřit ostrost kontury sítě.



obr. 35 Blatník automobilu ŠKODA 742 M .



obr.36 Detail blatníku Š742M s elektrochemicky leptanou de-
formační sítí.

8. ZÁVĚR

Rychlý vývoj v oblasti vytváření deformačních sítí na nástřihu pro analýzu procesu tažení výlisků z plechů je možno zaznamenat zhruba od roku 1960 a to přechodem od rytých deformačních sítí k sítím tištěným. Potiskování bylo v 70. letech metodou v široké míře s úspěchem používanou. Později došlo k výraznému odklonu od potiskování k elektrochemickému leptání.

Důvodem této nynější tendence je:

- potřeba užívání deformačních sítí s elementy o malých parametrech
- snaha o zkvalitnění sítí z hlediska geometrické a rozměrové přesnosti
- možnost okamžitého tváření po nanesení sítě
- velmi dobrá odolnost proti otěru a čitelnost

Elektrochemicky nanášeným deformačním sítím může (jak vyplývá z experimentální části diplomové práce) konkurovat pouze síť rytá speciálním přípravkem.

Vzhledem k uvedeným skutečnostem můžeme říci, že elektrochemické leptání deformačních sítí při tažení výlisků z plechů je nejperspektivnější z uvedených metod.

LITERATURA

- /1/ Hoffman O. - Sachs G.: Introduction to the Theory of Plasticity for Engineers (Vvedenijs v teoriju plastičnosti dlja inženěrov, Moskva GNTIML 1957)
- /2/ Tomlenov A. D.: Mechanika processov obrabotky metallov davljenijem, Moskva GNTIML 1963.
- /3/ Lisování SNTL Praha 1971
- /4/ Kořínek M.-Tměj J.-Sommer F.:K problematice lisovatelnosti kovových výtažků nepravidelných tvarů. "Strojírenství" 16, 1966č.1, s. 59-61
- /5/Komplexní zpráva o metodách vytváření a možnostech použití deformačních sítí pro analýzu procesu tažení výlisků z plechů. VŠST Liberec 1970
- /6/ Kořínek M. - Mikeš V.: Zjišťování napjatosti a přetvoření na výliscích nepravidelných tvarů "Strojírenství" 16, 1966 čl, s.59-62.
- /7/ Mikeš V.: Příspěvek k problematice určení mezních hodnot velkých plastických přetvoření při tažení výlisků karosářského typu. "Kandidátská disertační práce" Liberec, červen 1969
- /8/ Mikeš V. - Tměj J.:Teorie tváření , Liberec 1981
- /9/ Tměj J. a kol. zpráva-část fakultního výzkumného úkolu N 195 "Metodika aplikace kritérií lisovatelnosti" Liberec, listopad 1983