

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ V LIBERCI
nositelka Řádu práce

Obor 23 - 07 - 8

strojírenská technologie

zaměření

tváření kovů a plastických hmot

Katedra tváření a plastů

Experimentální zjišťování mezních hodnot přetvoření u plechů

Jindřich Henych

KPT - 051

vedoucí práce : Ing. Zdena Moravcová

VŠST Liberec

konzultant : Ing. Zdeněk Buchar

VŠST Liberec

Rozsah práce a počet příloh

Počet stran : 53

Počet příloh a tabulek : 2

Počet obrázků : 17

Počet výkresů : 1

Počet modelů nebo

jiných příloh : - - -

1. 10. 1932



Spil

Ing. MUDr. Bohuslav Spilz CSc.

Děkan

Vysoká škola: strojní a textilní
Katedra: tváření a plastů

Fakulta: strojní
Školní rok: 1982/83

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

pro s. Jindřicha H e n y c h a
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: Experimentální zjišťování mezních hodnot
přetvoření u plechů

Zásady pro vypracování:

1. Teoretické zpracování problematiky zjišťování mezních hodnot přetvoření tenkých plechů.
2. Volba metodiky experimentu.
3. Návrh úpravy zkušebního nástroje včetně zpracování výkresové dokumentace a funkčního ověření.
4. Rozbor a zhodnocení získaných výsledků a závěr.

Autorské právo se řídí směrnice
MŠK pro státní záv. zkoušky / č. 51
727/62-III/2 ze dne 13. července
1962-Věstník MŠK XVIII, část 24 ze
dne 21.8.1962 § 19 odst. 2 č. 115/53 Sb.

439
VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ
Ústřední knihovna
LIBEREC I, STUDENTSKÁ 6
PSC 461 17

Rozsah grafických prací:

Rozsah průvodní zprávy: 40 - 50 stran + výkresová dokumentace

Seznam odborné literatury:

1. Hasek, V. : Untersuchung und theoretische Beschreibung wichtiger Einflussgrößen auf das Grenzformänderungsschaubild
"Blech, Rohre, Profile" 1978, seš. 5
2. Holas, P. : Metodika stanovení diagramů mezních přetvoření plechů
DP, VŠST Liberec 1982
3. Mlynářčík, J. : DP, VŠST Liberec 1981

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Zdena Moravcová

Konzultant

Ing. Zdeněk Buchar

Datum zadání diplomové práce:

konečné zadání 1. 10. 1982

Termín odevzdání diplomové práce:

27. 5. 1983

L. S.

Doc. Ing. Jaroslav Trnka CSc.

Vedoucí katedry

Doc. RNDr. Bohuslav Stráž CSc.

Děkan

V Liberci 29. 9. 82
..... dne 19.....

PROHLÁŠENÍ

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

V Liberci, dne 27.5.1983

J. Hrych

O B S A H

1.	ÚVOD	5
2.	TEORETICKÁ ČÁST	
2.1	Definice podmínek plasticity	7
2.2	Faktory ovlivňující tvářitelnost plechu	11
2.3	Ztráty stability při procesu tažení výlisků nepravidelných tvarů	14
2.4	Metody zjišťování mezních hodnot plastických přetvoření	17
2.5	Určování mezních hodnot při tažení plechů	24
2.6	Využití metody deformačních sítí při analýze tažení výlisků z plechu	30
2.7	Metody vyhodnocování deformačních sítí umožňující sestavení Goodwin-Keelerova diagramu	33
3.	EXPERIMENTÁLNÍ METODA	34
3.1	Specifické podmínky zkoušky při použití hydraulického lisu pro tažení zkušebních těles	38
3.2	Vytváření deformačních sítí na zkušebních tělesech	39
3.3	Postup tažení vzorků	42
4.	ROZBOR VÝSLEDKŮ	45
5.	ZÁVĚR	49
	Použitá literatura	52

S E Z N A M P Ř Í L O H

- Příloha 1 : regresní křivka získaná na počítači na základě statistických metod a body získané tažením vzorků na hydraulickém lise CBA 300
- Příloha 2 : srovnání regresní křivky a mezního pásma určeného ze zkoušek na klikovém lise

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

osy :	1 ...	osa rovnoběžná se směrem válcování plechu
	2 ...	osa kolmá ke směru válcování plechu
	3 ...	osa kolmá na rovinu plechu
D_{σ}		deviátor tenzoru napětí
σ		napětí / MPa /
σ_i		intenzita napětí / MPa /
$\bar{\sigma}$		střední napětí /MPa /
τ		smykové napětí / MPa /
R_p		smluvní mez kluzu / MPa /
R_m		mez pevnosti / MPa /
m		konstanta charakterizující stav napjatosti
F		přetvárná síla / N /
R_{α}		koeficient normálové anizotropie pro směr odebrání zkušební tyče svírající úhel se směrem válcování plechu
R_s		střední koeficient normálové anizotropie
ΔR		stupeň plošné anizotropie
n		koeficient zpevnění materiálu
$D_{\dot{\varphi}}$		deviátor tenzoru rychlosti přetvoření
$\dot{\varphi}$		rychlost přetvoření
φ		skutečné (logaritmické) přetvoření
ϵ		poměrné přetvoření
ϵ_0, ϵ_1		skutečná přetvoření ve směru šířky resp. ve směru tloušťky zkušební tyče
v		rychlost pohybu tažníku / mm/s /
L_0		původní průměr elementu deformační sítě / mm /
L_1, L_2		rozměry os deformovaných elementů sítě ve směrech 1,2
s		tloušťka plechu
HNO_3		kyselina dusičná
$NaOH$		hydroxid sodný
IDDRG (		International Deep Drawing Research Group)
.....		Mezinárodní sdružení pro otázky hlubokého tažení

1. Ú v o d

Tvářecí technologie nabývají v současné době stále většího významu. Je to dáno tím, že umožňují dosažení vysoké produktivity práce, odpad materiálu je minimální, poskytují možnost výroby součástí, které by jinými způsoby byly jen těžko dosažitelné a v neposlední řadě patří mezi výhody i specifické mechanické vlastnosti tvářenců v důsledku zpevnění.

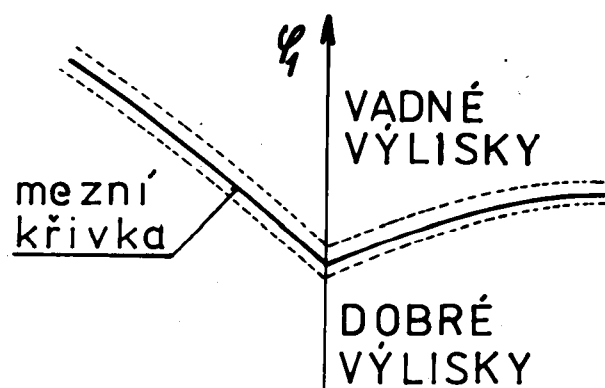
Tažení plechu zaujímá mezi těmito technologiemi významné postavení. Je základním způsobem zpracování plechu pro celou škálu spotřebních předmětů a v oblasti výroby dopravních prostředků.

Správné ovládání toku materiálu, určení vhodného tvaru polotovaru, znalost mezních stavů, které nesmějí být překročeny - to vše nelze vyřešit jen na základě praktických zkušeností. I když se teoretickým otázkám tváření plechu věnuje v průmyslově vyspělých zemích velká pozornost, vysvětlení některých problémů bude potřeba dalších výzkumů.

V posledních letech je věnována velká pozornost stanovení přesných kritérií pro optimální využití plechu. Tato otázka je velmi složitá u výlisků nepravidelných tvarů, kde nelze provést analýzu stavu napjatosti analytickým řešením. V tomto případě využíváme skutečnosti, že existuje vztah mezi napětím a přetvořením vyplývající např. z teorie plastického tečení. Nestanovujeme tedy maximální napětí, ale mezní přetvoření, která nesmějí být překročena.

Z tohoto hlediska jsou velmi praktická tzv. diagramy mezních přetvoření / obr. 1/. Práce s těmito diagramy je velmi jednoduchá. S využitím metody deformačních sítí zjistíme hlavní přetvoření ϵ_1 a ϵ_2 na výlisku. Tato přetvoření znázorníme odpovídajícími body diagramu podle obr. 1. Pokud některé z bodů leží v blízkosti mezní křivky, hrozí v odpovídajícím místě výlisku nebezpečí výskytu trhlin. To však znamená nebezpečí výskytu neopravitelných zmetků. V takovém případě lze řešení provést změnou materiálu / s křivkou mezních hodnot posunutou k vyšším hodnotám / nebo změnou hlavních normálních přetvoření ϵ_1 , ϵ_2 . Z uvedeného vyplývá význam těchto diagramů z hlediska snižování zmetkovitosti v lisovnách.

** efektivita výroby a technologií je větší*



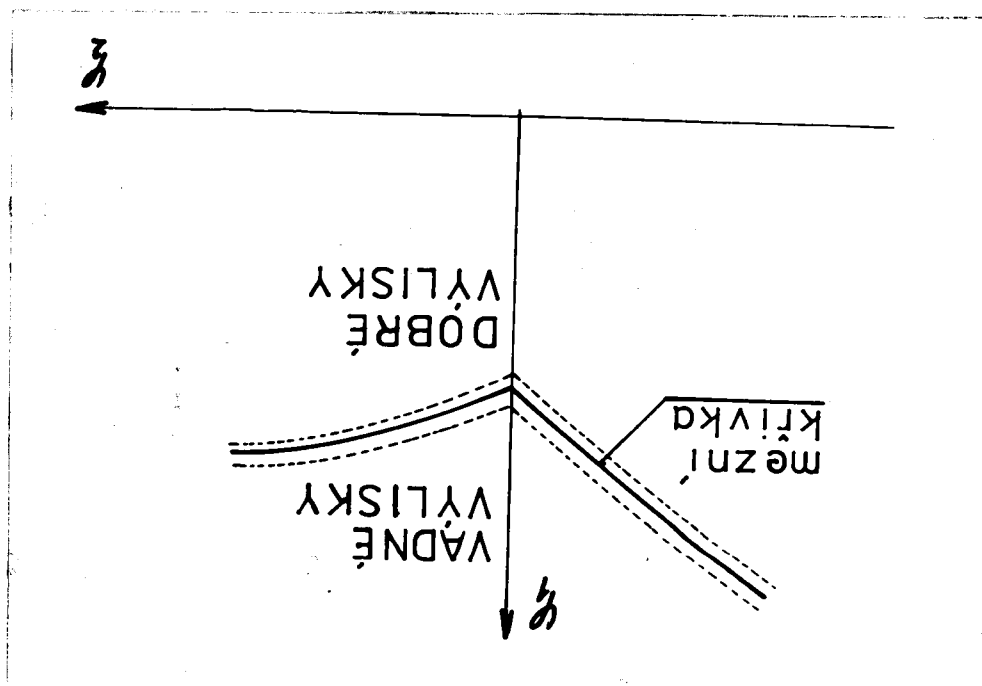
uvedených metod. Předložena práce je příspěvkem k řešení této problematiky.

Pro hlubší rozbor a ověřování platnosti analytický odvozených vztahů bude potřeba věnovat prováděnou pozornost druhé z

presnosti měření a rozptylu mechanických vlastností plechu.

staváme mezi čáry, ale pásma, jejichž šířka je závislá na se vyskytují při praktickém lisování. Při tomto postupu nedo- ziku vzniku lomu, a to při modelování stavu napjatosti, které normálních přetvoření ϵ a γ na kusebních vzorcích v okam- na základě experimentální metody, a to stanovením hlavních 2. Hranici oblastí mezi přetvoření je možné určit pouze rovinném stavu napjatosti.

krivka mezi přetvoření definována pro mez pevnosti při teristikami normálové anizotropie "r". V tomto případě je v nich reprezentovány koeficientem zpevnění "n" a charak- analytický odvozenými vztahy a vlastností materiálů jsou 1. Experimentálně početní metodou, kdy mezi křivky jsou dány ření hlubokotahového plechu. Řešení lze provádět dvěma způsoby: cílem této práce bylo zjišťování mezních hodnot přeto- Obr. 1. Diagram mezních přetvoření.



2. T e o r e t i c k á č á s t

2.1 Definice podmínek plasticity /1/

V podstatě je možno konstatovat, že pevnostní podmínky definované v pružnosti a pevnosti vztažené při prvotním zatěžování k mezi kluzu σ_k , jsou totožné s podmínkami plasticity. Rozdíl je v tom, že v pružnosti a pevnosti představují maximální hranici dovoleného zatížení, v tváření naopak minimální zatížení, nutné k realizaci plastického přetvoření. Úkolem podmínek plasticity je stanovit, kdy při obecném stavu napjatosti dojde udaného materiálu k přechodu z oblasti pružných deformací do oblastí plastických přetvoření. Znamená to najít takovou funkci $f / T_\sigma, m$ / tenzoru napětí T_σ a mechanických vlastností materiálu m , pro kterou platí:

1/ je-li materiál v pružném stavu

$$f / T_\sigma, m / = 0 \quad / 2.1 /$$

2/ je-li dosaženo mezního stavu, tj. počátku plastického přetvoření

$$f / T_\sigma, m / = 0 \quad / 2.2 /$$

V takovém případě je / 2.2 / podmínkou plasticity. Tenzor napětí je jednoznačně určen hlavními normálními napětími. Podmínku / 2.2 / lze tedy přepsat na :

$$f / \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, m / = 0$$

Podmínka maximálního smykového napětí

Tuto podmínku plasticity formuloval na základě pokusů s protlačováním kovů Tresca. Pro řešení problémů plasticity ji poprvé matematicky formuloval a použil Saint Venant. Podle k této podmínky dochází k prvním plastickým přetvořením tehdy, když maximální smykové napětí dosáhne mezní hodnoty, nezávislé na napjatosti. Matematicky lze tuto podmínku zapsat

$$\tau_{max} = \tau_{krit} \quad / 2.3 /$$

Označíme-li $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, pak platí

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad / 2.4 /$$

a dosazením do / 2.3 / dostaneme

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \tau_{krit}$$

/ 2.5 /

Napětí τ_{krit} , charakterizující mechanické vlastnosti tvářeného materiálu, můžeme určit např. zkouškou tahem. V takovém případě $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ a $\sigma_1 = \sigma_k$. Dosazením do /2.5/ dostáváme, že

$$\frac{\sigma_k}{2} = \tau_{krit}$$

/ 2.6 /

tzn., že podmínku maximálního smykového napětí / 2.5 / můžeme přepsat na

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_k$$

/ 2.7 /

Pro libovolná označení hlavních normálních napětí vyjádříme / 2.7 / vztahem

$$|\sigma_i - \sigma_j| \leq \sigma_k$$

pro $i \neq j$

/ 2.8 /

K plastickému přetvoření dojde, je-li alespoň u jednoho vztahu z šesti, které / 2.8 / představuje, splněno znaménko rovnosti. Vztah / 2.8 / lze rozepsat na

$$|\sigma_1 - \sigma_2| \leq \sigma_k$$

$$|\sigma_2 - \sigma_3| \leq \sigma_k$$

$$|\sigma_1 - \sigma_3| \leq \sigma_k$$

/ 2.9 /

Znaménko rovnosti může být splněno maximálně u dvou ze vztahů / 2.9 /. Umocněním a úpravou dostaneme

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 - \sigma_k^2 \leq 0$$

$$(\sigma_2 - \sigma_3)^2 - \sigma_k^2 \leq 0$$

/ 2.10 /

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 - \sigma_k^2 \leq 0$$

a součinem z těchto vztahů vyjádříme funkci

$$[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 - \sigma_k^2][(\sigma_2 - \sigma_3)^2 - \sigma_k^2][(\sigma_1 - \sigma_3)^2 - \sigma_k^2] = 0$$

/ 2.11 /

Podmínka intenzity napětí / HMM / 1 /

Podle Hubera, Misese a Henckyho dochází k prvnímu plastickému přetvoření v okamžiku, kdy intenzita napětí dosáhne meze kluzu

$$\sigma_i = \sigma_k \quad / 2.12 /$$

Vzhledem k definici intenzity napětí je při jednoosém stavu napjatosti podmínka / 2.12 / identická s podmínkou

$$\sigma = \sigma_k \quad / 2.13 /$$

Pro obecný stav napjatosti platí

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 2 \sigma_k^2 \quad / 2.14 /$$

resp.

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 - 2 \sigma_k^2 = 0 \quad / 2.15 /$$

Výraz pro intenzitu napětí je až na konstantu shodný s výrazem pro tečné napětí oktaedrické. To však znamená, že k plastickému přetvoření dojde v okamžiku, kdy

$$\tau_{okt} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sigma_k \quad / 2.16 /$$

Z uvedeného vyplývá, že i tato podmínka respektuje rozhodující význam smykových napětí pro plastické přetvoření. Protože potenciální energie změny tvaru je přímo úměrná čtverci intenzity napětí, bývá tato podmínka někdy nazývána energetickou.

Pro vzájemné porovnání a zejména experimentální ověřování podmínek plasticity je vhodné do základních vztahů / 2.7 / a / 2.14 / zavést ukazatel stavu napjatosti ν_f /tzv. Loňeho parametr /. Vzhledem k úmluvě $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ se hodnota ν_f pohybuje v rozmezí

$$\underline{-1 \leq \nu_f \leq 1} \quad / 2.17 /$$

Střední napětí lze vyjádřit vztahem

$$\sigma_2 = \nu \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad / 2.18 /$$

Z podmínky maximálního smykového napětí / 2.7 / je ihned zřejmé, že přechod do oblasti plastického přetvoření je nezávislý na středním napětí σ_2 a lze ji tedy při respektování / 2.18 / upravit na

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_k} = 1 \quad / 2.19 /$$

Dosazením / 2.18 / do podmínky intenzity napětí / 2.14 / a po úpravě dostaneme

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_k} = \frac{2}{\sqrt{3 + \nu^2}} \quad / 2.20 /$$

Vezmeme-li v úvahu, že maximální rozdíl je pouze 15%, je možno konstatovat, že obě podmínky celkem dobře vystihují skutečnost. Při praktickém použití bude tedy rozhodovat jednoduchost řešení okolnost, zda předem známe, které z hlavních napětí bude největší a které nejmenší.

2.2 Faktory ovlivňující tvářitelnost plechu

Obecně je tvářitelnost chápána jako způsobilost k velkým plastickým přetvořením bez porušení soudržnosti tvářeného materiálu. Schopnost k trvalým změnám tvaru a rozměrů pod působením vnějších sil je označována jako plastičnost.

Z hlediska praktické potřeby bude vhodné hodnotit plastičnost ve vztahu k daným podmínkám tváření / technologii /. Pak hovoříme o tzv. technologické tvářitelnosti, která je určující pro stanovení mezních stavů přetvoření při dané operaci. Důležitým kritériem hodnocení plastičnosti a tím i technologické tvářitelnosti je charakter lomových ploch. Lze je popsat tzv. koeficientem lomové plochy /1/

$$\omega = \frac{S_c - S_{pl}}{S_c} \quad / 2.21 /$$

kde S_c je celková lomová plocha a S_{pl} je podíl lomové plochy s plastickým přetvořením. Je zřejmé, že koeficientem ω je možno vyjádřit míru plastičnosti určitého materiálu.

Nebezpečí vzniku a šíření lomu / porušení soudržnosti / bude tím větší, čím více se při plastickém přetvoření budou uplatňovat tahová napětí. Účinkem uvedených tahových napětí dojde v určitých případech k porušení dříve, než příslušná smyková napětí dosáhnou hodnoty nutné k realizaci kluzu. Ke zlepšení plastických vlastností dojde při zmenšujícím se vlivu tahových napětí a uplatňování napětí tlakových. Tím se omezuje možnost vzniku trhlin / i jejich šíření / vyvolaných nejen tahovými napětími, ale i při translaci. Je potlačován vznik poruch uvnitř krystalových zrn, které mají za následek vyčerpání plastičnosti.

Obecně je možno konstatovat, že tvářitelnost daného materiálu je při určitých teplotně rychlostních podmínkách určována kolovým tenzorem napětí, tzn. "hydrostatickým tlakem" vyjádřeným středním normálním napětím. Z hlediska tvářitelnosti je žádoucí, aby hodnota K_σ , tj. hodnota jeho komponentů σ_i / tím i oktaedrického normálního napětí / byla co nejmenší / absolutní hodnota co největší při záporném znaménku /.

U plechů obvykle nahrazujeme pojem plastičnost pojmem lisovatelnost / technologická lisovatelnost, tj. lisovatelnost vztažená k daným podmínkám procesu tažení / Tažení výlisků z plechu patří mezi operace tváření za studena, dochází k němu při běžných teplotách prostředí, rovněž je dána rychlost přetvoření, která je určena rychlostí, kterou mechanismus stroje uděluje tažníku. Vliv stavu napjatosti na lisovatelnost je vlastně určen diagramem mezních přetvoření, který zachycuje mezní přetvoření φ_1 a φ_2 v širokém rozsahu stavů napjatosti.

Charakteristiky mechanických vlastností materiálu se nejčastěji zjišťují zkouškou tahem. Vychází se ze závislosti v souřadnicích - zatěžovací síla F - prodloužení měřeného úseku Δl . Obvykle se zavádějí :

smluvní napětí

$$R = \frac{F}{S_0}$$

poměrné prodloužení

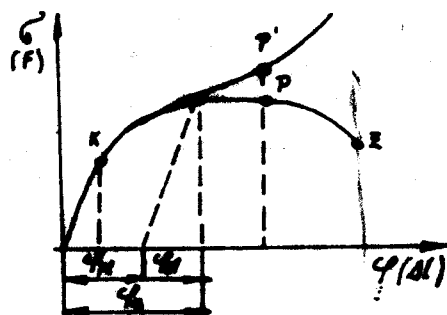
$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0}$$

skutečné napětí $\sigma = \frac{F}{S}$

skutečné přetvoření $\varphi = \ln \frac{l}{l_0}$

V oblasti rovnoměrných plastických přetvoření platí zákon stálosti objemu

$$S_0 \cdot l_0 = S \cdot l$$



Obr. 2.1. Pracovní diagram pro izotropní materiál.

$$\sigma = R \frac{1}{1-\epsilon} \quad \text{resp.} \quad \sigma = R \cdot e^{\varphi} = R \cdot / 1+\epsilon /$$

Uvedený skutečný pracovní diagram / obr.2 / je pro izotropní materiál totožný s diagramem $\sigma_i - \varphi_i$. Vyplyvá to z definice

σ_i, φ_i :

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad / 2.22 /$$

$$\varphi_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varphi_1 - \varphi_2)^2 + (\varphi_2 - \varphi_3)^2 + (\varphi_3 - \varphi_1)^2} \quad / 2.23 /$$

Pro snadnější matematický popis se užívají pro charakteristiku $\sigma_i = \sigma_i(\varphi_i)$ aproximace:

$$\sigma_i = C \varphi_i^n \quad / 2.24 /$$

C - napětí odpovídající přetvoření $\varphi_i = 1$

Koeficient zpevnění "n" určuje tvar křivky diagramu a její strmost v oblasti rozvinutých plastických přetvoření.

V okamžiku dosažení meze pevnosti platí

$$d\sigma_i S + \sigma_i dS = 0 \quad / 2.25 /$$

upraveno na tvar

$$\frac{d\sigma_i}{d\varphi_i} = \sigma_i \quad \checkmark$$

pak platí

$$C n \varphi_i^{n-1} = C \varphi_i^n$$

/ 2.26 /

odtud

$$n = \varphi_i$$

- "n" zde představuje mezní rovnoměrné přetvoření odpovídající mezi pevnosti.

Anizotropie vlastností materiálu

Reálné kovy dělíme do dvou skupin: izotropní / reálné kovy - kvaziizotropní / a anizotropní. Hlubokotažné ocelové plechy patří do druhé skupiny.

Rozlišujeme anizotropii plošnou a normálovou. Plošná anizotropie je závislost vlastností v rovině plechu na směru válcování. Je způsobena orientovanou makrostrukturou vzniklou při válcování za tepla v důsledku prodloužení neclistvostí nekovových vměstků a oblastí s různým chemickým složením ve směru válcování. Plošná anizotropie se zjišťuje zkouškou tahem na tyčích odebraných pod různými úhly ke směru válcování.

Normálová anizotropie

Normálová anizotropie je rozdílnost mechanických vlastností v rovině plechu a ve směru kolmém na rovinu plechu. Vzniká v důsledku orientace mikrostruktury materiálu při válcování za studena a lze ji odstranit vyžeháním nebo rekrytalizační teplotou. V jejím důsledku se plech přetváří více na úkor šířky než tloušťky a je tedy odolnější vůči lokalizovanému ztenčení. Koeficient normálové anizotropie definujeme vztahem :

$$R_{\alpha} = \frac{\epsilon_b}{\epsilon_s}$$

ϵ_b, ϵ_s - přetvoření ve směru šířky a tloušťky

Koeficient α značí úhel, který svírá směr odebrání tyče se směrem válcování plechu. Obvykle se používá střední hodnota koeficientu normálové anizotropie :

$$R_s = \frac{1}{4} / R_0 + 2 R_{45} + R_{90}$$

stupeň plošné anizotropie :

$$\Delta R = \frac{1}{2} / R_0 - 2 R_{45} + R_{90}$$

2.3 Ztráty stability při procesu tažení výlisků nepravidelných tvarů /2/, /3/

Podmínkou získání kvalitních výlisků je, aby přírůstky přetvárných sil způsobujících žádané tvarové a rozměrové změny polotovaru, byly kladné. Pokud tato podmínka není splněna, dochází ke ztrátám stability procesu tažení a na výliscích se objevují vzhledové nebo funkční vady. Tomlenov rozlišuje tři typy ztrát stability :

1. Ztráta stability v oblasti malých plastických přetvoření. Projevuje se při použití stárnoucích materiálů, vznikem tzv. vrásek /Lüdersových čar/ na povrchu výlisku.

také *divokých* čar
14

Nastává v okamžiku, který odpovídá dosažení ostré meze kluzu v diagramu zkoušky tahem.

2. Ztráta stability v důsledku vybočení plechu vyvolaného působením tlakových napětí. Má za následek zvlnění plechu, a to v oblasti přidržovače a jednak v místech, kde polotovar není seřazen mezi tažníkem, tažnicí a přidržovačem.
3. Ztráta stability v oblasti velkých plastických přetvoření. Nastává v okamžiku, kdy je dosažena mez pevnosti materiálu. Přetvoření se stává nerovnoměrným, rychle se vyčerpává schopnost k plastickému přetvoření a proces končí trhlinou ve výlisku. Tato ztráta stability je nejvýznamnější a k jejímu zabránění mají sloužit diagramy mezních přetvoření.

Nejobecnější definice ztráty stability vychází z předpokladu, že proces tažení je stabilní tehdy, platí-li pro všechna místa na výlisku podmínka :

$$dF_1 > 0$$

$$F_1 = \sigma_1 a_1 s$$

$$dF_2 > 0$$

$$F_2 = \sigma_2 a_2 s$$

dojde-li k porušení jedné nebo obou podmínek, dochází ke ztrátě stability.

Základní určující faktory pro ztráty stability jsou :

a/ stupeň přetvoření

b/ stav napjatosti

c/ vlastnosti zpracovávaného plachu /

Lokální a difuzní nestabilita v oblasti velkých plastických přetvoření

K lokálnímu nestabilnímu stavu dochází, je-li přírůstek přetvárné síly ve směru algebraicky největší deformace roven nule, tedy :

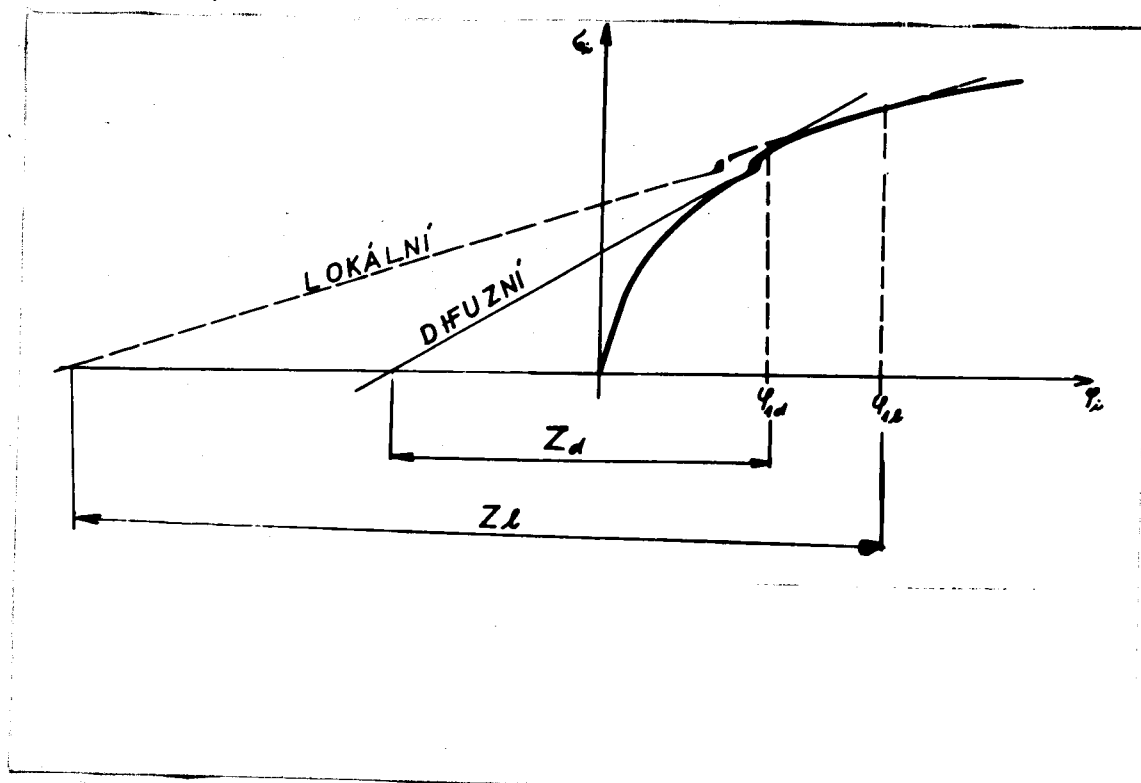
$$dF_1 = 0$$

to lze vyjádřit pomocí přírůstku intenzity napětí a deformace

a pomocí intenzity napětí :

$$\frac{d\sigma_i}{d\varphi_i} = \frac{\sigma_i}{\bar{\epsilon}}$$

/ 2.27 /



Obr.2. Grafická interpretace vztahu / 2.27 /

Lokální nestabilní stav začínající při hodnotě ϵ_d zahrnuje tenký pruh tekoucího materiálu skloněného pod určitým úhlem napříč rovinou plechu.

Nezbytnými podmínkami k tomu jsou :

1. Materiál bezprostředně přilehlý k oblasti tečení není deformován.
2. V podélném směru oblast lokálního ztenčení nedochází k prodloužení.

Z druhé podmínky plyne, že podmínce lokálního tečení je vyhověno při větší deformaci nebo při menší rychlosti deformačního zpevnění, tj. platí $Z_u > Z_d$. Mezní deformace je možné teoreticky stanovit pro plech charakterizovaný exponentem deformačního zpevnění a koeficienty normálové anizotropie pomocí vztahů, které vyplývají z Hillovy teorie plasticity anizotropního tělesa.

K difuznímu nestabilnímu stavu dochází tehdy, jsou-li přírůstky přetvárných sil ve směru maximální a minimální deformace rovny nule, t.j. platí :

$$dF_1 = 0, dF_2 = 0$$

Difuzní nestabilní stav začíná při hodnotě φ_{ld} /substangenta Z/ K tomuto typu ztráty stability dochází v těch případech, nejsou-li splněny podmínky pro vznik lokálního tečení, a obě hlavní deformace jsou kladné. Tento nestabilní tok je široce asymetricky rozložen podél směrů zatěžování.

Praxe ukazuje, že vývoj deformací je téměř vždy omezen lokálním ztenčením, a to i při čistém vypínání, kdy nejsou splněny uvedené podmínky. Tento nesoulad je zapříčiněn hlavně rozdílem mezi ideálním homogením materiálem / který předpokládají teoretické úvahy / a reálným materiálem, který obsahuje vnitřní nehomogenity, jež jsou zdrojem místních poruch, které nakonec obvykle vyústí v lokální ztenčení.

Základem pro všechny známé teorie stanovení mezních hodnot velkých plastických přetvoření je řešení vycházející z předpokladů :

- a/ izotropního materiálu
- b/ lokální ztráty stability
- c/ rovinného stavu napjatosti, tzn.

2.4 Metody zjišťování mezních hodnot plastických přetvoření

K zjišťování mezních hodnot plastických přetvoření existuje několik kritérií lišících se svými předpoklady a použitelností :

Kritérium podle Goodwin-Keelera

Kritérium vychází z těchto předpokladů

- a/ materiál je izotropní

- b/ je respektován zákon stálosti objemu
 c/ platí podmínka proporcionálních deformací

$$\varphi_{1k} = \left(\frac{2-m}{2\sqrt{1-m+m^2}} \right) \varphi_{ik}$$

$$\varphi_{2k} = \left(\frac{2m-1}{2\sqrt{1-m+m^2}} \right) \varphi_{ik}$$

/ 2.28 /

$$\varphi_{3k} = - \left(\frac{1+m}{2\sqrt{1-m+m^2}} \right) \varphi_{ik}$$

Znázorněním v souřadnicích získáme Goodwin-Keelerovy mezní křivky. Podle nich jsou experimentálně stanoveny tzv. kritické pásy mezních deformací.

Z uvedených podmínek jsou odvozeny podmínky protzv. difuzní nestabilní stav. Lokální nestabilní stav vzniká, je-li přírůstek přetvárné síly ve směru φ_{max} roven 0. Platí :

$$\left(\frac{d\sigma_i}{d\varphi_i} \right)_k = \sigma_{ik} \frac{1+m}{2\sqrt{1-m+m^2}}$$

/ 2.29 /

pro kritické přetvoření dostaneme :

$$\varphi_{ik} = \left(\frac{2\sqrt{1-m+m^2}}{1+m} \right) n$$

/ 2.30 /

tedy

$$\varphi_{1k} = \left(\frac{2-m}{1+m} \right) n$$

$$\varphi_{2k} = \left(\frac{2m-1}{1+m} \right) n$$

/ 2.31 /

$$\varphi_{3k} = -n$$

difuzní nestabilní stav vzniká, jsou přírůstky přetvárných sil ve směrech φ_1 , φ_2 rovny nule.

$$\left(\frac{d\sigma_i}{d\varphi_i} \right)_k = \left[\frac{(2-m)^2 + m(2m-1)^2}{4(1-m+m^2)^{\frac{3}{2}}} \right] \sigma_{ik} \quad / 2.32 /$$

odtud platí :

$$\varphi_{ik} = \left[\frac{4(1-m+m^2)^{\frac{3}{2}}}{(1+m)(4m^2-7m+4)} \right] n \quad / 2.33 /$$

Kritérium podle Tomlenova

Tomlenov definuje tři druhy ztráty stability během přetvárného procesu. Přetvárný proces považuje za stabilní, pokud s rostoucí deformací stoupá i odpor proti ní.

1. ztráta stability. Dochází ke snížení odporu proti deformaci na mezi kluzu / vznik Lüdersových čar /.
2. ztráta stability. Tato ztráta stability je provázána snížením odporu při vybočení plechu z roviny deformace v důsledku působení tlakových napětí / vyvolávající vznik vln /.
3. ztráta stability. Dochází ke snížení odporu proti deformaci vyčerpáním zpevňovací schopnosti materiálu. Tato ztráta stability odpovídá vzniku lokální nestability podle Goodwin-Keelera.

Použitím Lüdersovy teorie plasticity :

$$\left(\frac{d\sigma_i}{d\varphi_i} \right)_k = \left(\frac{2-m}{2\sqrt{1-m+m^2}} \right) \sigma_{ik} \quad / 2.34 /$$

Odtud plyne

$$\varphi_{ik} = \left(\frac{2\sqrt{1-m+m^2}}{2-m} \right) n \quad / 2.35 /$$

$$\varphi_{1k} = n$$

$$\varphi_{2k} = \left(\frac{2m-1}{2-m} \right) n$$

$$\varphi_{3k} = \left(\frac{m+1}{2-m} \right) n \quad / 2.36 /$$

Pro případ třetího typu ztráty stability v blízkosti tažné hrany nebo přidržovače :

platí navíc okrajová podmínka pro tok materiálu $d\varphi_2 = 0$
podmínka ztráty stability

$$\left(\frac{d\sigma_i}{d\varphi_i} \right)_k = \left(\frac{1+m}{2\sqrt{1-m+m^2}} \right) \sigma_{ik} \quad / 2.37 /$$

pro kritické přetvoření platí :

$$\varphi_{ik} = \left(\frac{2\sqrt{1-m+m^2}}{m+1} \right) n \quad / 2.38 /$$

$$\varphi_{1k} = \frac{n}{2} + \sqrt{12 \left(1 - \frac{3m}{m^2+2m+1} \right) - 3n^2}$$

$$\varphi_{2k} = \frac{n}{2} - \sqrt{12 \left(1 - \frac{3m}{m^2+2m+1} \right) - 3n^2}$$

/ 2.39/

$$\varphi_{3k} = -n$$

Pro $m = 0,25$ dochází prakticky vždy ke ztrátě stability pod přidržovačem. V oblasti $m > 0,5$ dochází téměř vždy ke ztrátě stability mimo oblast přidržovače.

Kritérium podle Kaspera

Uvedené způsoby nelze použít na příklad pro přejímku plechů. V praxi se stále používá materiálových hodnot daných materiálovými listy. Pro účely přejímky vypracoval Kasper ukazatele vycházející z běžně používaných zkoušek plechů. Definiuje dvě kritéria :

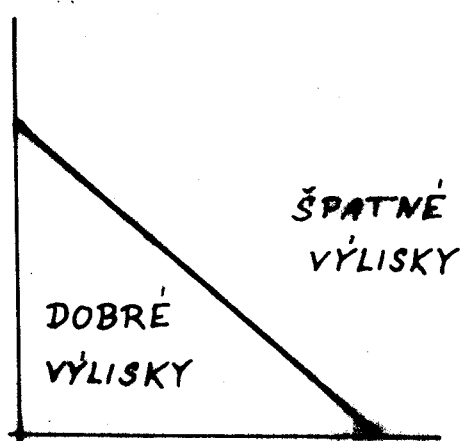
1. Hlubokotažnost - D
2. Roztažnost - S

Hlubokotažnost / D / zhruba odpovídá zavedenému pojmu " normálová anizotropie " R. Roztažnost / S / odpovídá pojmu " tažnost " δ .

Protože na jednotlivých případech praktického tažení plechu se obě vlastnosti podílejí současně a různě, definuje dvě složky přetvoření :

- a/ přetvoření posuvem φ_s , které se dá výhodně stanovit kalíškovou zkouškou
- b/ přetvoření vytažením φ_t , které lze výhodně stanovit při zkoušce hloubením.

Kasper uvažuje pásmo tvařitelnosti jako lineární závislost / viz.obr.3 /.



Obr.3. Pásmo tvařitelnosti podle Kaspera.

Kritéria vycházející z teorie tvárného lomu

Kritéria ztráty stability jsou odvozována z teorie plasticity a jejich platnost je omezena předpoklady, které z teorie plasticity vycházejí :

- a/ deformace se realizují bez posuvu, ve volném prostoru
- b/ deformace je až do ztráty stability homogenní

Ghoseho kritérium vyplývá z následujících předpokladů, většinou experimentálně ověřených :

- 1/ nukleace mikrotrhlin nastává na pevných inkluzích
- 2/ největší význam mají mikrotrhliny vzniklé na největších inkluzích

- 3/ počet největších inkluzí v jednotkovém objemu je konstantní
 - 4/ inkluze mají sférický tvar
 - 5/ všechny inkluze mají stejnou vzdálenost a stejnou velikost
 - 6/ v každém okamžiku mají všechny mikrotrhliny stejnou průměrnou rychlost růstu úměrnou plastickému toku $\frac{d\epsilon}{dt}$ a intenzitě napjatosti / σ_i /
 - 7/ napjatost je rovinná a leží mezi jednoosým tahem a rovnoměrným dvojosým tahem
 - 8/ křivka zpevnění a plastická anizotropie materiálu nejsou ovlivněny růstem mikrotrhlin
 - 9/ jestliže mikrotrhliny dostatečně vzrostou, nastává jejich spojování pod úhlem 45° ke směru největšího napětí
 - 10/ smykové napětí mikrotrhlin může nastat pouze na povrchu mikrotrhlin. Jeho pravděpodobnost v každém okamžiku je proto úměrná rychlosti růstu povrchu mikrotrhlin
- Z těchto předpokladů je odvozeno kritérium tvárného lomu :

$$/ 1+m / \sigma_i^2 = k$$

Použitím zákonů Hillovy teorie anizotropické plasticity a zákona parabolického zpevnění $\sigma_i = C \varphi_i^m$ lze kritérium přepsat do tvaru :

$$\varphi_{II} = \frac{\left[\frac{3+3r}{4+2r} k (1+m) - \frac{2r}{1+r} m \right]^{\frac{1}{2m}}}{\sqrt{\frac{(2+3r)(2+r)}{6r+3}} \sqrt{1+\bar{\rho}^2 + \frac{2r}{1+r} \bar{\rho}} [c^2(1+m)]^{\frac{1}{2m}}} \quad / 2.40 /$$

kde φ_{II} je největší hlavní přetvoření v okamžiku lomu. Pro určení konstanty k se používá zkouška tahem. Z ní je určeno podélné a příčné přetvoření v místě lomu $\bar{\varphi}_r, \bar{\varphi}_c$ a poměr $\bar{\rho} = \frac{\bar{\varphi}_c}{\bar{\varphi}_r}$

$$k = \frac{c^2(1+m)(\varphi_{II})^{2m} \left[\frac{(2+3r)(2+r)}{6r+3} (1+\bar{\rho}^2) + \frac{2r}{1+r} \bar{\rho} \right]^n}{\frac{3+3r}{4+2r} \left[1+\bar{\rho}^2 - \frac{2r}{1+r} \bar{\rho} \right]} \quad / 2.41 /$$

v důsledku ztráty stability při $\varphi > n$ platí empirický vztah :

$$m = \frac{(1+r)\bar{\rho} + 2r}{2+2r+r\bar{\rho}} \quad / 2.42 /$$

Kritérium lze zjednodušit zavedeme-li konstantu f :

$$f = \frac{\left[\frac{3+2r}{4+2r} k \right]^{\frac{1}{2n}}}{C^{\frac{1}{n}} \sqrt{\frac{(2+2r)(2+r)}{6r+3}}} \quad / 2.43/$$

získáme jednodušší vztah :

$$\varphi_{ii} = \frac{f}{\sqrt{1+\rho^2 + \frac{2r}{1+r} \rho}} \left[\frac{1+m^2 - \frac{2r}{1+r} m}{1+m} \right]^{\frac{1}{2n}} \quad / 2.44/$$

k jeho použití stačí veličiny : n, r, ρ, f

konstantu f lze určit z přetvoření při zkoušce tahem :

$$f = \bar{\varphi}_{ii} \sqrt{1+\bar{\rho}^2 + \frac{2r}{1+r} \bar{\rho}} \left[\frac{1+m}{1+\bar{m}^2 - \frac{2r}{1+r} \bar{m}} \right]^{\frac{1}{2n}} \quad / 2.45 /$$

Zákon stálosti objemu při plastické deformaci :

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0$$

pro materiál bez normálové anizotropie platí, že $\varphi_2 = \varphi_3$

$$\varphi_2 = -\frac{\varphi_1}{2}$$

Má-li materiál koeficient " normálové anizotropie " R , platí:

$$\varphi_2 = -\frac{\varphi_1}{1+r} \quad \bar{\rho} = -0,5$$

pak $m = \frac{3r-1}{3r+1}$

po dosazení získáme :

$$f = \frac{\bar{\varphi}_{ii}}{2} \sqrt{\frac{5+r}{1+r}} \left[\frac{(6r+3)(3r+4)(r+1)}{18r^2+43r+17} \right]^{\frac{1}{2n}} \quad / 2.46 /$$

Pro izotropní materiál s $R = 1$ platí :

$$f = \frac{\bar{\varphi}_{ii}}{2} \sqrt{3} \left[\frac{21}{13} \right]^{\frac{1}{2n}} \quad / 2.47 /$$

2.5 Určování mezních hodnot při tažení plechů

Diagramy mezních přetvoření lze získat několika způsoby :

- 1/ početní metodou, na základě teoreticky odvozených vztahů
- 2/ experimentálně početní metodou, kdy mezní křivky jsou dány analyticky odvozenými vztahy a vlastnosti materiálu jsou v nich reprezentovány koeficientem zpevnění " n " a charakteristikami normálové anizotropie " R ". Křivka mezních přetvoření je definována pro mez pevnosti při rovinném stavu napjatosti.

Stanovení diagramu vychází z předpokladu, že mezní přetvoření jsou totožná s přetvořeními v okamžiku ztráty stability. Teorii mezních stavů pro izotropní materiály rozpracovával Tomlenov. Vychází ze vztahu $dF_1 = 0$.

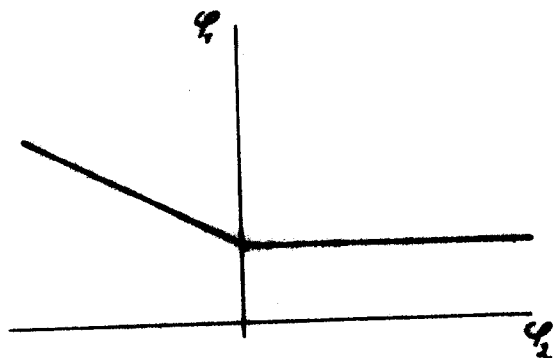
Vztahy pro mezní přetvoření :

$$\varphi_{1R}^v = \frac{(1 + R_x) - R_x m}{(1 + \frac{R_x}{R_r}) m} n$$

/ 2.48 /

$$\varphi_{2R}^v = \frac{(R_x + \frac{R_x}{R_r}) m - R_x}{(1 + \frac{R_x}{R_r}) m} n$$

Ruzanovem odvozené vztahy platí pro levou část diagramu. Vycházejí z lokální nestability. V oblasti kladných přetvoření skutečný průběh lépe vystihují vztahy odvozené Keelerem za předpokladu difuzní nestability.



Obr.4. Diagram mezních přetvoření podle Tomlenova.

Do odvozených vztahů se dosadí experimentálně zjištěné hodnoty anizotropie a koeficientu zpevnění. Normálová anizotropie je definována vztahem :

$$R_{\alpha} = \frac{\varphi_{\alpha}}{\varphi_0}$$

Ke stanovení koeficientu zpevnění " n " pro dosazení do vztahů pro mezní přetvoření je vhodnější přímá metoda, která vychází z fyzikálního významu této veličiny jako mezního rovnoměrného přetvoření.

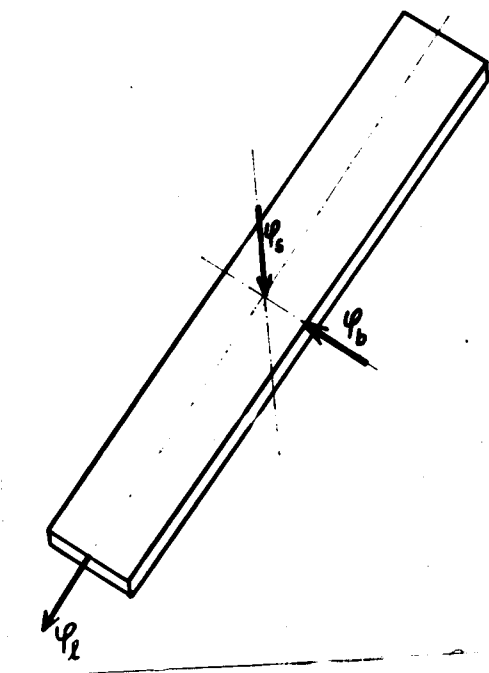
Stanovení materiálových charakteristik " n " a " R " /2/, /3/

Anizotropii materiálu dělíme na plošnou a normálovou. Významná je hlavně normálová, což je nestejnorodost mechanických vlastností plechu v rovině plechu a ve směru tloušťky. V jejím důsledku se plech ztenčuje méně ve směru tloušťky než ve směru šířky. Je definována vztahem

$$R_{\alpha} = \frac{\varphi_{\alpha}}{\varphi_0}$$

/ 2.49 /

Index α znamená, že koeficient normálové anizotropie R_{α} závisí na úhlu, pod nímž je odebrána zkušební tyč pro zkoušku tahem, na níž se zjišťuje / obr.5 /, vzhledem ke směru válcování plechu. Obvykle se zkušební tělesa odebírají pod úhly 0° , 45° , 90° pro stanovení R_0 , R_{45} , R_{90} .



Obr.5. Určování koeficientu normálové anizotropie

Koeficienty anizotropie se stanovují při podélném přetvoření zkušební tyče $\varepsilon = 20\%$.
Platí Heyerův vztah :

$$R_d = \frac{\ln \frac{b_0}{b}}{\ln \frac{b_1}{b_1}} \quad / 2.50 /$$

Koeficient zpevnění n je exponentem v Ludwikově vztahu
/ 3 / :

$$\sigma_i = C \varphi_i^n \quad / 2.51 /$$

Na základě uvedené definice se určuje tzv. nepřímým způsobem, kdy vztah / 2.51 / logaritmujeme a n je roven tangente přímky znázorňující závislost $\log \sigma_i - \log \varphi_i$. Druhý způsob - přímý - vychází z dalšího významu n jako maximálního rovnoměrného přetvoření. Používá se na př. Ruzanova metoda, podle níž je n roven přetvoření na neovlivněném úseku pro těleso tahové zkoušky.

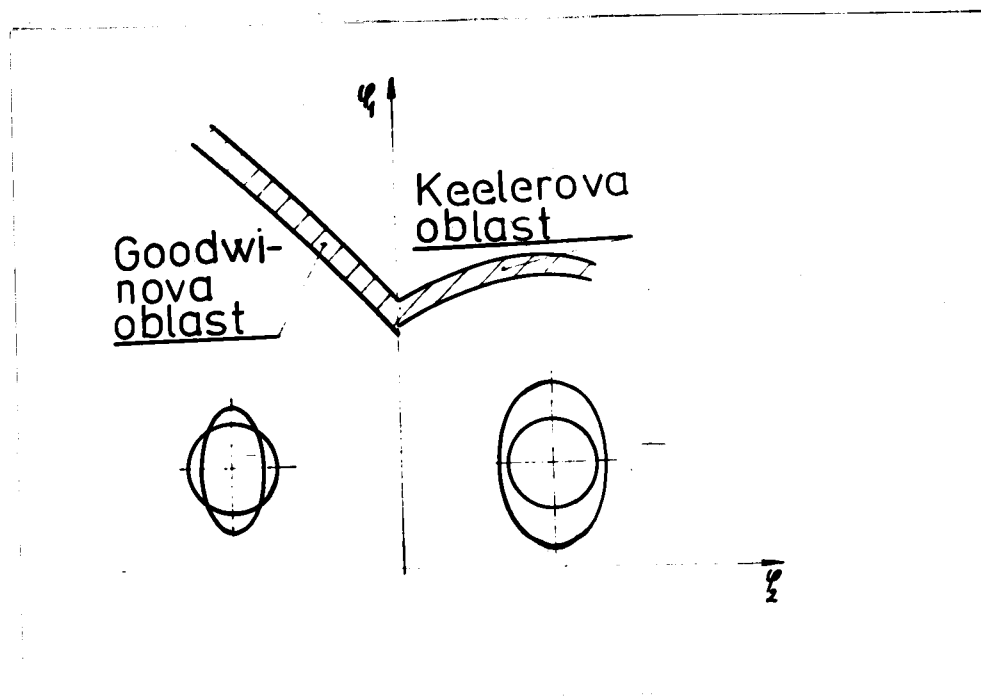
Do vztahů pro mezní přetvoření dosazujeme koeficient n_s

$$n_s = \frac{1}{4} - n_0 + 2n_{45} + n_{90} \quad / 2.52 /$$

3/ další metodou zjišťování mezních hodnot plastických přetvoření plechů je experimentální metoda. /2/
Tato metoda navržená Goodwinem a Keelerem spočívá v navození mezního stavu ve zkušebních tělesech a vyhodnocení příslušných přetvoření pomocí deformačních sítí. Takto je tedy možné stanovit mezní přetvoření v širokém rozsahu stavů napjatosti. Vzhledem k určitému rozptylu materiálových hodnot, nepřesnosti deformační sítě, vzniká příslušný rozptyl hodnot mezních přetvoření, na který má dále vliv chyba vznikající při odečítání deformovaných elementů sítě. Tento rozptyl se projeví v tom, že místo mezní křivky získáme mezní pásmo. Hecker /4/ doporučuje pásmo o šířce $\pm 2\%$ přetvoření /obr.6/.

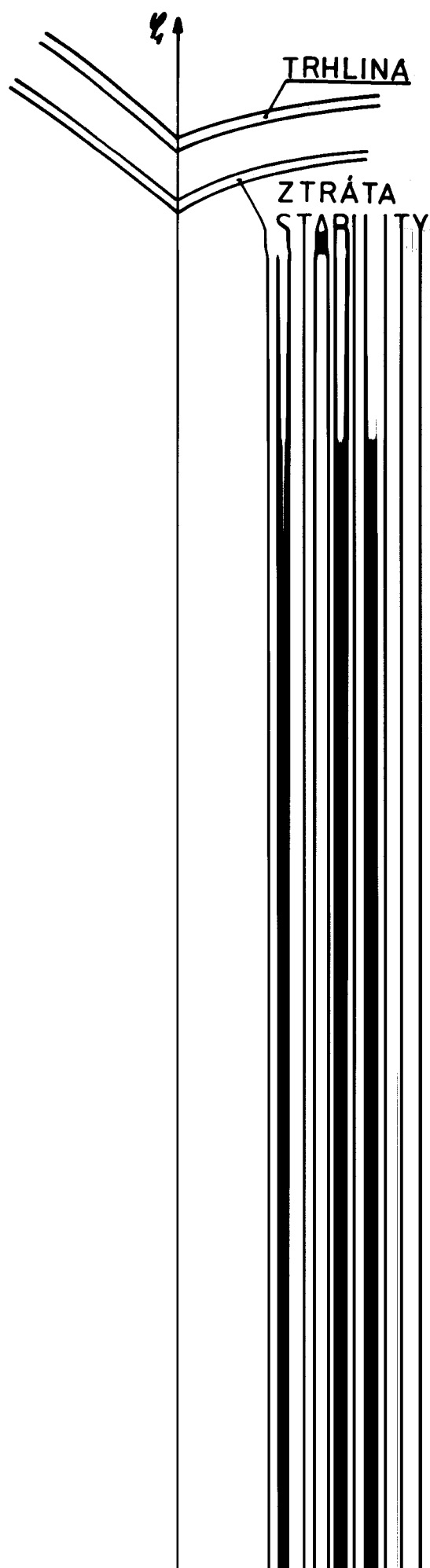
Důležitá je otázka, jaké mezní hodnoty přetvoření mezní pásmo zobrazuje. Jsou to buď hodnoty, při nichž se očekává ztráta stability tažení nebo porušení plechu.

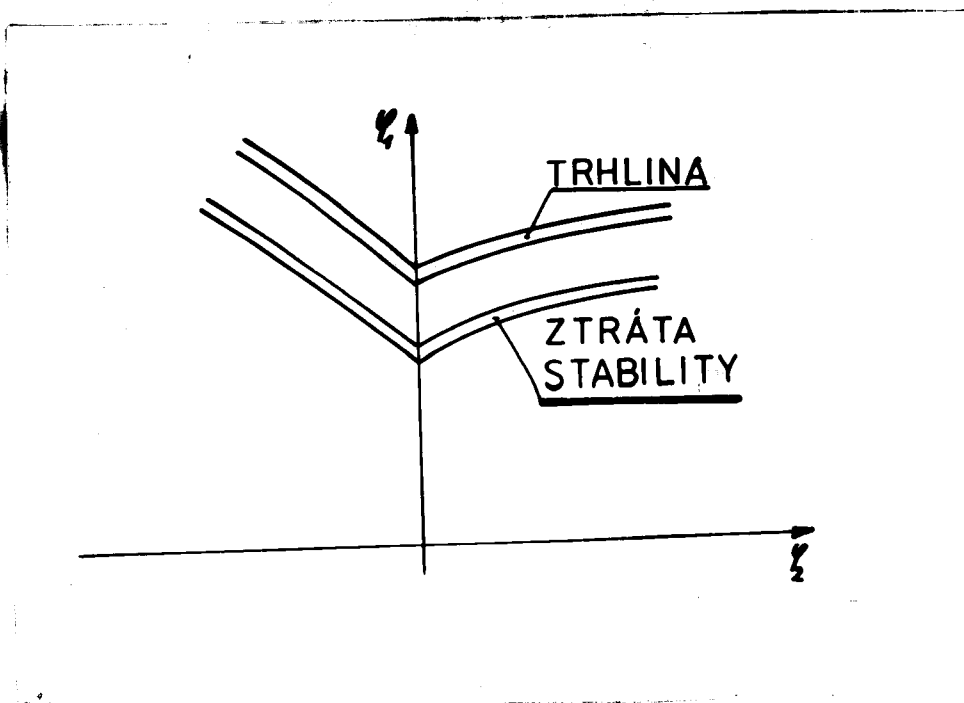
Vznik trhliny jako kritérium porušení plechu připouští lokální ztenčení materiálu. Z hlediska srovnání s mezními křivkami získanými experimentální metodou je však zřejmě nejvýhodnější laboratorní kritérium, které uvažuje jako mezní ta přetvoření, která vyhodnotíme v okamžiku počátku tzv. difuzní nestability nebo na základě gradientu přetvoření /8/.



Obr.6. Goodwin - Keelerův diagram

Pro praktické účely lze učinit závěr, že při posuzování vzniku trhliny jako kritéria pro mezní přetvoření umožňuje lokální ztenčení materiálu a v blízkosti mezního pásma hrozí bezprostřední nebezpečí trhliny. Kritérium vycházející z předpokladu, že mezní přetvoření jsou taková, která nastanou v okamžiku dosažení meze pevnosti, tj. ztráty stability, je z tohoto hlediska bezpečnější, protože v materiálu je ještě určitá zásoba plasticity. Je zřejmé, že pro uvedené případy budou mít mezní pásma různou polohu /obr.7/. O tom, které z pásem podle obr.7 získáme, rozhoduje použitá metoda mechanické zkoušky a metoda vyhodnocování deformační sítě.





Obr.7. Diagram mezních přetvoření pro různá kritéria porušení materiálu. Dolní pásmo znázorňuje případ, kdy za porušení považujeme místní ztenčení plechu, horní zobrazuje oblast, kdy v materiálu vznikají trhliny

Existuje řada postupů k experimentálnímu určení diagramů mezních přetvoření. Různé metody zkoušení se liší v podstatě formami zkoušek, jakož i druhem námáhání materiálu. Na podkladě různých metod a rozdílných podmínek zkoušení lze pouze jen ve vzácných případech počítat se zcela souhlasnými diagramy mezního přetvoření. Použité zkoušky a nářadí při různých metodách nejsou geometricky stejné, také podmínky přetváření nestačí zákonům podobnosti.

Při sestavování křivky mezního přetvoření je nutné získat modelováním různých stavů napjatosti množství dvojic přetvoření ϵ , ζ pro okamžik dané definované ztráty stability tak, aby přetvoření ζ byla v požadovaném rozsahu hodnot od $-\epsilon$ do $+\epsilon$. Toho lze dosáhnout různými způsoby, které lze v podstatě rozdělit do dvou skupin :

a/ získat potřebné hodnoty ϵ a ζ řadou různých zkoušek s různými tvary zkušebních vzorků

b/ pro modelování stavu napjatosti a jím odpovídajících přetvoření použít tažný nástroj, v němž se vypínají nástřihy ve tvaru různě širokých pruhů

Z nejrozšířenějších zkoušek jsou to / ze skupiny "a" / :

1. Hydraulická zkouška, při níž je možné měnit stav napjatosti jednak použitím kruhové tažnice, jednak tažnic eliptických. Nevýhodou tohoto způsobu je, že získáme pouze Keelerovu oblast /kladné hodnoty ϵ /.
2. Zkouška tahem těles s různými vruby, při níž se mění stav napjatosti ve vzorcích rozličnými tvary vrubů ve střední části těles. Tato zkouška není náročná na strojní zařízení, ale umožňuje získat pouze Goodwinovu oblast /záporné hodnoty ϵ /.
3. Zkouška hloubením s různými tvary tažníku. Vzorky kruhového tvaru jsou při ní pevně sevřeny přidržovačem a vypínány kruhovým tažníkem s vyměnitelnými hlavami různého tvaru. Při konstantním průměru a výšce hlavy tažníku se mění poloměr jejího zakřivení, a tím lze dosáhnout změny stavu napjatosti. Pomocí této metody stanovíme však pouze Keelerovu oblast.

Pro pokrytí celého potřebného rozsahu ϵ jsou nejvhodnější zkoušky zeskupiny "b" :

4. Vypínání upravených nástřihů s použitím sférického tažníku. Vzorky se získají z kruhových nástřihů odstřižením úsečí. Získaná přetvoření ϵ pokryjí celý potřebný rozsah, ale nevýhoda metody spočívá v tom, že k porušení dochází v okrajových částech zkušebních vzorků, kde je obtížné měřit mezní přetvoření.
5. Tažení zkušebních vzorků, které jsou ze dvou stran kruhově vystřiženy, polokulovitým tažníkem. Úpravou tvaru vzorků je dosaženo stavu, kdy k porušení dochází v oblasti vrcholu. Nevýhodou je nutnost vyrobit sadu střižných nástrojů se střižníkem různého průměru.

Na KPT byl v rámci řešení rezortního úkolu vědy a výzkumu pro přípravu zkušebních vzorků navržen značně jednodušší postup /viz. Zpráva 82/. Vybrání na všech zkušebních vzorcích má poloměr $r=105$ mm. To umožňuje stříhat zkušební tělesa na stejném stroji jako výchozí kruhové nástřihy.

Z hlediska naší práce bylo možno jako vzorků pro tažení použít rovných pásků. To teoreticky umožňuje stanovit celý diagram mezních přetvoření. Trhliny, jejichž pokolí je třeba vyhodnotit, by však vznikaly v nežádoucích místech zkušebních těles. Proto byla aplikována metoda s použitím vzorků s vybráním. Vzorky byly připraveny již popsanou zjednodušenou metodou /2/ pomocí jednoho střižného nástroje. V takto připravených zkušebních vzorcích lze modelovat různé stavy napjatosti a je možné s nimi stanovit celý diagram mezních přetvoření.

2.6 Využití metody deformačních sítí při analýze tažení výlisků z plechu

Odvození souvislosti mezi stavem napjatosti a přetvořením :

Ve výlisku nepravidelného tvaru je velmi složitá napjatost. Není možno přímo určit velikost jednotlivých složek napětí v jednotlivých místech výlisku. Proto při analýze tažení výlisků nepravidelných tvarů využíváme skutečnosti, že existuje vztah mezi tenzorem napětí a tenzorem přetvoření. Toho využívá metoda deformačních sítí.

Souvislost mezi stavem napětí a stavem přetvoření vyplývá např. z teorie plastického tečení. Je charakterizována vztahem :

$$D\epsilon_i = \frac{3\epsilon_i}{2\epsilon_i} D\epsilon \quad / 2.53/$$

Jeho rozepsáním získáme vztah :

$$\frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\frac{d\epsilon_1}{dt}} = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_3}{\frac{d\epsilon_2}{dt}} = \frac{\epsilon_3 - \epsilon_1}{\frac{d\epsilon_3}{dt}} = \frac{2\epsilon_i}{3 \frac{d\epsilon_i}{dt}} \quad / 2.54 /$$

Za předpokladu rovinné napjatosti platí poměr :

/ 2.55 /

$\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 = 1 : m : 0 ; \sigma_1 \geq \sigma_2 ; \sigma_3 = 0$
po dosazení za

/ 2.56 /

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

lze upravit na vztah :

/ 2.57 /

$$\frac{2\sigma_1 m \sigma_1}{\frac{d\sigma_1}{d\epsilon}} = \frac{2m\sigma_1 - \sigma_1}{\frac{d\sigma_2}{d\epsilon}} = \frac{-\sigma_1 - m\sigma_1}{\frac{d\sigma_3}{d\epsilon}} = \frac{2\sigma_1}{3 \frac{d\sigma_1}{d\epsilon}}$$

Pro σ_1 lze z uvedeného poměru odvodit vztah :

/ 2.58 /

$$\sigma_1 = \sigma_2 \sqrt{1-m+m^2}$$

Po dosazení vztahu do rovnice / 2.57 / a její integraci platí :

$$\underbrace{\frac{1-m}{\sigma_1} = \frac{2m-1}{\sigma_2} = \frac{-m-1}{\sigma_3}}_A = \frac{2\sqrt{1-m+m^2}}{\sigma_1}$$

/ 2.59 /

Z části " A " vyplývá, že

$$m = \frac{2\epsilon_2 + \epsilon_1}{2\epsilon_1 + \epsilon_2}$$

/ 2.60 /

Odvození pro koeficient m bylo provedeno pro izotropní materiál, pro anizotropní plech platí :

je-li $\sigma_1 = \sigma_x$, $\sigma_2 = \sigma_y$, $R_0 = R_x$, $R_{90} = R_y$

$$m = \frac{\epsilon_2 + \epsilon_1 + \frac{\epsilon_1}{R_0}}{\epsilon_1 + \epsilon_2 + \frac{\epsilon_2}{R_{90}}}$$

/ 2.61 /

Princip metody spočívá v tom, že se na plech před tažením nanese síť čar, která je tvořena pravidelnými geometrickými obrazci. Pro nanášení deformačních sítí se používají, kromě jiných, např. tyto způsoby :

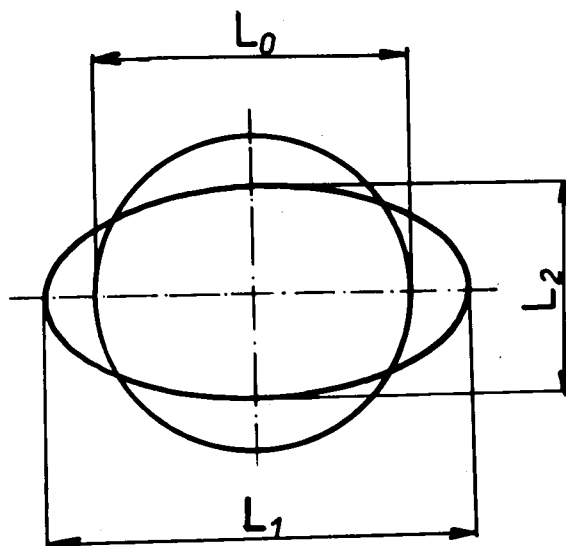
- potiskováním - sítotisk
- gumostereotypie
- metoda suchého offsetu

rytí

fotografické nanášení sítí

fotografická metoda kombinovaná s chemickým leptáním
vyjiskřování

V našem případě byla použita kombinace fotografické metody
a chemického leptání.



Obr.8. Přetvoření elementu kruhové sítě

Obrazce se při tvářecím procesu deformují a na základě změn jejich rozměrů lze stanovit poměrná nebo skutečná přetvoření. Vychází se z rovinného stavu napjatosti. Dále musí platit, že rozměry elementů sítě jsou takové, že v elementu nastane homogení přetvoření. Pka platí výraz

$$m = \frac{L}{L_0} = \text{konst.}$$

Elementy mohou být kruhové, čtvercové nebo jejich kombinace. Z elementu kruhové sítě - kružnice - vzniká po deformaci elypsa /obr.8/.

Skutečná přetvoření φ_1, φ_2 jsou :

$$\varphi_1 = \ln \frac{L_1}{L_0}$$

/ 2.62 /

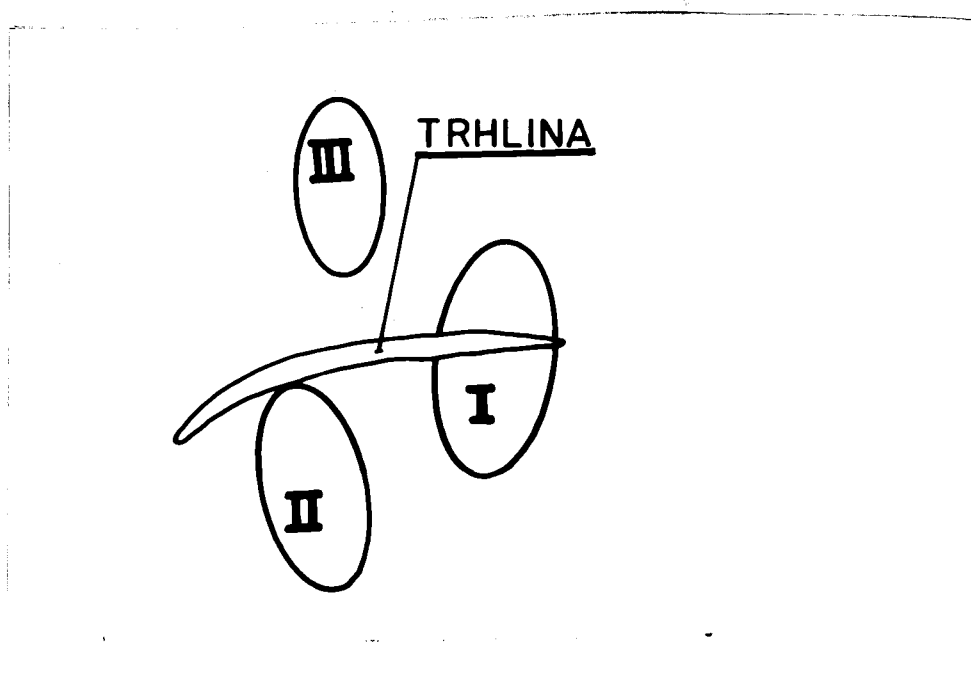
$$\varphi_2 = \ln \frac{L_2}{L_0}$$

2.7 Metody vyhodnocování deformačních sítí umožňující sestavení Goodwin-Keelerova diagramu

Princip použití deformačních sítí na zkušebních tělesech spočívá v navození mezních stavů ve zkušebních tělesech a vyhodnocení odpovídajících přetvoření. K tomu lze v podstatě použít těchto metod :

- a/ Heckerova metoda
- b/ metoda použitá Šanovcem a Čermákem
- c/ Veermanova grafická metoda
- d/ Vermanova interpolační metoda

Heckerova metoda definuje diagramy mezních přetvoření na základě přetvoření $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{2}$ těsně před počátkem viditelného lokálního ztenčení. Proměřují se tři typy elips v porušené nebo zeslabené oblasti a blízko ní :



Obr.9. Výběr elips pro Heckerovu metodu

I - elipsy, kterými prochází trhлина

II -s " krčkem " ležící buď v zeslabené oblasti nebo
v oblasti ovlivněné porušením

III-ležící mimo oblast ztenčení nebo porušení. Křivka mezních přetvoření je pak vedena nad body získanými z elips III a pod body z elips II, I.

Metoda použitá Šanovcem a Čermákem je způsob podobný Heckerově metodě. Elipsy jsou rozděleny do čtyř skupin :

1/ zcela porušené trhlinou

2/ částečně porušené

3/ neporušené ležící těsně vedle trhliny

4/ ležící v dostatečné vzdálenosti od trhliny

Křivka mezních přetvoření je vedena nad body získanými z elips "3" a pod body z elips "2".

3. E x p e r i m e n t á l n í m e t o d a

Metodika vychází z těchto základních faktorů :

1. Je potřeba stanovit mezní přetvoření pro celý rozsah stavů napjatostí, které ve výlisku mohou nastat, přitom by takto získané diagramy měly co nejlépe vystihovat mezní stavy, aby se mohly stát účinnou pomůckou pro praxi.
2. Také metodika zkoušek, příprava zkušebních vzorků, nároky na zkušební zařízení i vyhodnocování sítí by měly být co nejjednodušší, aby diagramy byly pokud možno snadno získatelné.
3. Metodika byla přizpůsobena laboratornímu vybavení, které je k dispozici na VŠST. Zkoušky se provádějí na hydraulickém lisé CBA 300a nástrojem s polokulovitým tažníkem a mechanickým přidržovačem. Pro přípravu vzorků byly k dispozici střížné nástroje umožňující stříhat kruhové nástřihy o průměru 165mm a 210mm. Pro nanášení sítě byla použita fotografická metoda kombinovaná s chemickým leptáním.

Volba druhu mechanické zkoušky, rozměrů a tvaru zkušebních těles /2/, /3/

Optimální metoda je taková, která při co nejjednodušším provedení dává co nejúplnější výsledky. Bylo rozhodnuto použít těles s vybráním protažení polokulovitým tažníkem. Popsaná metoda v kapitole 2.5 je však příliš náročná na nástrojové vybavení, protože vyžaduje větší počet nástrojů pro přípravu zkušebních vzorků. Každé vybrání má jiný poloměr a vyžaduje zvláštní nástroj.

Proto bylo třeba navrhnout tvar zkušebních těles tak, aby byly odstraněny tyto nedostatky :

- a/ trhliny, jejichž okolí je třeba vyhodnotit musí vznikat v oblasti polokulovitého zakončení tažníku, ne blízko příruby, kde je zcela jiný stav napjatosti
- b/ nesmí se projevit nežádoucí zvlnění okrajů v důsledku " přebytečného " materiálu, který u širších vzorků může nedokonale přilnout k tažníku

Zároveň musí být umožněno, aby tato tělesa bylo možné připravovat na dvou střižných nástrojích, které jsou k dispozici. Proto byl odvozen takový tvar zkušebních těles, který odstranil nedostatky rovných pásků.

Teoretické odvození tvaru zkušebního tělesa vychází z předpokladu, že aby docházelo ke vzniku trhlin na vrchlíku vytvořeném polokulovitým zakončením tažníku, je třeba zvětšit nosný průřez tělesa v oblasti dotyku s tažnou hranou tažníku. Velikost rozšíření v této oblasti se stanoví na základě rozboru stavu napětí ve vrchlíku zkušebního tělesa a v oblasti vzniku trhlin u rovných pásků.

Pro stanovení potřebného rozšíření pásku v oblasti stgku s tažnou hranou lze provést následující rozbor : Budeme uvažovat tenký pásek a předpokládat, že v něm je napětí σ , působící ve směru podélné osy konstantní. Dále se vychází z faktu, že zpracováváme ocelový anizotropní plech. Pro takový materiál je dokázáno, že závislost $\sigma_x - \sigma_y$ je různá při jednoosém tahu a při dvojosém rovnoměrném tahu.

je zřejmé, že ve druhém případě vydrží plech při stejné intenzitě přetvoření ϵ stav napětí o větší intenzitě σ . Z vyhodnocení přetvoření na vrchlíku a v oblasti vznikání trhlin je zřejmé /2/, že napjatost v oblasti příruby se více blíží jednoosému tahu, kdežto napjatost na vrchlíku napjatosti při rovnoměrném dvojosém tahu. U pásků širších než průměr otvoru tažnice, tj. 90mm, jsou zcela jiné na-
 řetěvové podmínky. Tato tělesa jsou vlastně držena ze všech stran a praskání v oblasti blízko přírubové části se zde již neprojevuje.

Aby u těles užších než je průměr otvoru tažnice, vznikaly trhliny na vrchlíku, je třeba v místě styku s tažnou hranou zvětšit jejich nosný průřez. Stanovíme o kolik procent minimálně by měl být pásek v tomto místě širší. Pro anizotropní plech platí :

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{3}{2}} \left[\frac{(1+R_0)\sigma_i^2 - 2R_0\sigma_i\sigma_{ii} + (R_0 + \frac{R_0}{R_{ii}})\sigma_{ii}^2}{1+R_0 + \frac{R_0}{R_{ii}}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad / 3.1 /$$

Pro různé stavy napjatosti je σ_i různé. Protože je zřejmé

σ_i v blízkosti tažné hrany menší než na vrchlíku, je nutné zvětšit minimálně průřez pásku úměrně poměru intenzit napětí v obou sledovaných místech. Vzhledem k tomu, že tloušťka plechu je dána, budeme určovat zvětšení šířky b . Označíme-li šířku pásku b_0 a potřebnou šířku v oblasti tažné hrany b_1 , platí :

$$\frac{b_1}{b_0} = \frac{\sigma_{ii}}{\sigma_i} \quad / 3.2 /$$

$$b_1 = \frac{\sigma_{ii}}{\sigma_i} b_0 \quad / 3.3 /$$

šířka b , se bude volit o něco větší než vyplývá ze vztahu / 3.3 /, aby bylo zaručeno, že trhliny budou vznikat ve vrchlíku a také s ohledem na to, že by navržený tvar měl vyhovovat i pro jiné materiály s jinými vlastnostmi, než má KOHAL 20.

Ve vztahu / 3.1 / neznáme hodnoty σ_1, σ_2 . σ_1 budeme považovat za konstantní v celém tělese a σ_2 určíme ze vztahu $m = -\frac{\sigma_2}{\sigma_1}$

Konstantu m určíme dle vztahu

$$m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1}}{\sigma_1 + \sigma_2 + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1}}$$

Výraz / 3.1 / lze pak upravit na tvar :

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{3}{4} \frac{[(1+R_0) - 2R_{0,m} + (R_0 + \frac{R_0^2}{R_{00}})m^2]}{1 + R_0 + \frac{R_0^2}{R_{00}}}} \sigma_2 \quad / 3.4 /$$

Hodnoty $R_{0,m}, R_{00}$ jsou materiálové konstanty / pro plech KOHAL 20 /.

Ze závislosti šířky b_1 na průměru 90mm a odpovídajícího rozšíření oproti výchozí šířce b_0 v procentech /2/ vyplývá, že se poloměry vybrání liší pro každou šířku tělesa. To je velice nevýhodné z hlediska přípravy vzorků. Teoreticky odvozený tvar lze však zjednodušit a přizpůsobit nástrojovému vybavení, které je k dispozici na KPT. Je třeba však respektovat :

- 1/ v oblasti styku s tažnou hranou musí být zachováno minimální odvozené zvětšení šířky
- 2/ okraje těles by se neměly při tažení zvlnit

Na základě srovnání teoreticky odvozených a skutečných tvarů těles byl navržen značně jednodušší způsob přípravy vzorků :

vybrání všech zkušebních těles se stříhá na tom nástroji, na němž se připravují i základní kruhové nástřihy. Poloměr vybrání je pro všechna tělesa roven 105mm a různých stavů napjatosti je dosaženo různými šířkami b_0 . K celé přípravě zkušebních těles tak stačí jediný nástroj.

Vybrání má své opodstatnění i u těles s šířkou b_0 větší, než je průměr otvoru tažnice. Ovlivňuje velikost plochy sevřené mezi tažnicí a přidržovačem a tím je umožněno získávat různé velikosti napětí σ_2 . To je nezbytné pro získání Keele-rových oblastí /mezního pásma/.

Pro sestavení diagramu mezních přetvoření je potřeba

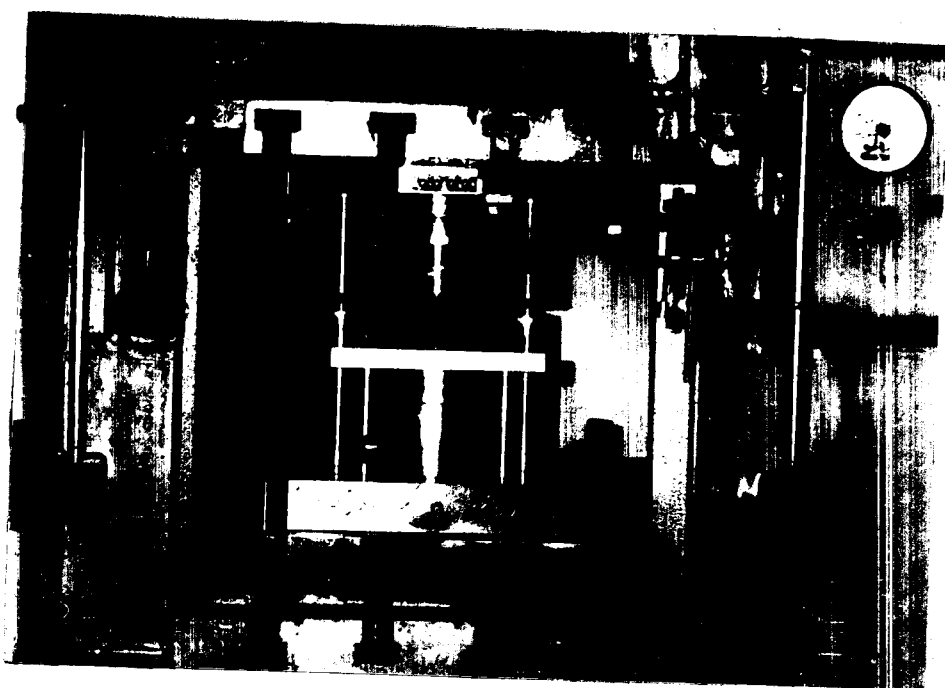
určit takový počet zkušebních těles, který umožňuje sestavení celého diagramu. Zkušební tělesa by měla umožnit pokrýt celý rozsah stavů napjatosti, které mohou nastat ve výliscích nepravidelných tvarů.

Bylo rozhodnuto použít tělesa o 11 různých šířkách s podélnou osou rovnoběžnou se směrem válcování.

3.1 Specifické podmínky zkoušky při použití hydraulického lisu pro tažení zkušebních těles

Navržená metodika byla aplikována při tažení zkušebních těles z materiálu KOHAL 20 o tloušťce 0,8mm. Porušení plechu mělo být při zkoušce pokud možno minimální. Při použití hydraulického lisu, je možné při objevení se trhliny nebo ztenčení materiálu zkoušku přerušit a uvedenou podmínku tak splnit. To není umožněno např. u mechanického lisu, kde je nutno postupovat jinak.

*analýza
zářím*



Obr.10. Hydraulický lis a tažný nástroj.

Ještě před vlastními experimenty na ověřovacích tělesech se hledala optimální hloubka tažení vzorku na lise, která by zaručovala co nejmenší porušení materiálu. U použitého lisu CBA 300 byla k tomuto účelu použita stupnice, která udávala hloubku tažení. Taková hloubka tažení, která by zajistila vznik co nejmenší trhliny byla určena pro každou šířku zkušebního tělesa. Zároveň se hledal způsob, jak zabránit přejetí tažného nástroje z výsledné polohy / která odpovídá zvolené hloubce tažení / při zapnutí zpětného chodu. To bylo odstraněno pomocí pryžových podložek vložených mezi beran a tažnic~~ě~~. Během zkoušek se zjistilo, že ani tento způsob není optimální. Dokazují to i zkušební tělesa po tažení. Některá tělesa mají trhliny příliš velké. Mohlo to být způsobeno i jinými faktory, např. vnitřními nehomogenitami materiálu.

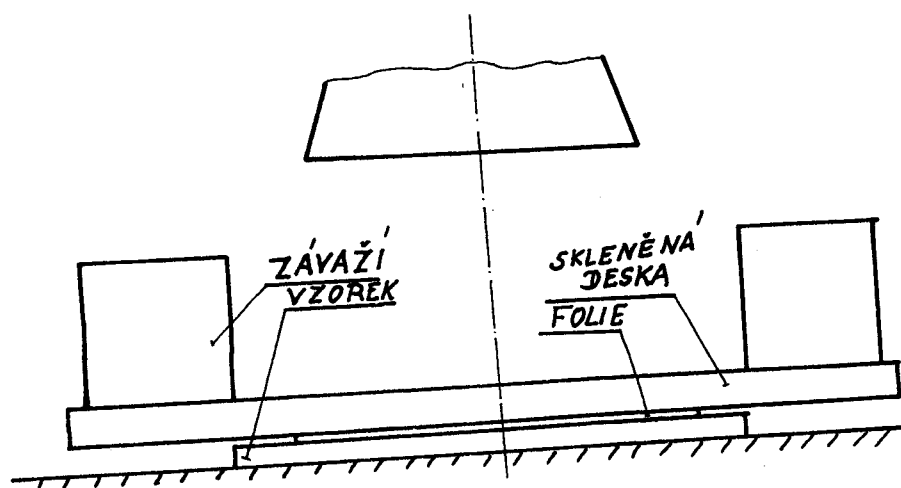
3.2 Vytváření deformačních sítí na zkušebních tělesech

Sítě byly nanášeny fotografickou metodou kombinovanou s chemickým leptáním. Tato metoda může při vhodném postupu poskytnout velmi přesné sítě s dobrou čitelností a odolností vůči otěru.

Postup nanášení sítí :

- 1/ plech dokonale odmastíme benzinem nebo trⁱchloretylenem
- 2/ nanese emulzi. Byla použita světlocitlivá emulze /výrobce LACHEMA Brno/. Zředěná emulze se nanášela štětcem.
- 3/ emulze byla vysušena v elektrické peci při teplotách 60 až 80°C po dobu 10 minut
- 4/ po vysušení byla na vzorky přiložena fólie s deformační sítí. Vzorek se po dobu 6 minut ozářil ultrafialovým zářičem. Ultrafialové světlo vyvolá v osvětlených místech chemickou reakci, která způsobí kyselou povahu naneseného povlaku
- 5/ po ozáření byly vzorky ponořeny do vývojky /do vaničky s 1% roztokem NaOH/. Smyjí se v něm osvětlené čáry. Na neosvětlených místech povlak emulze zůstává

- 6/ takto připravené vzorky se leptaly 10% roztokem HNO_3 po dobu 15 sekund
- 7/ leptaný povrch je o něco světlejší než okolní plech. Při osvětlení na dílenském mikroskopu je tento rozdíl málo patrný a síť je obtížně čitelná. Proto je výhodné vyleptané kroužky obarvit na tmavší odstín, než je okolní plech. Jako nejjednodušší prostředek se k tomuto účelu zatím nejlépe osvědčil bezoplachový odrezovač.



Obr.11. Vytváření deformačních sítí fotografickou metodou.

Protože metoda deformačních sítí vychází z předpokladu homogení deformace v elementu sítě, měly by být elementy co nejmenší. Zároveň jejich velikost ovlivňuje polohu mezních pásem v diagramech mezních přetvoření. Při stanovení diagramů by měly proto být používány stejné velikosti elementu sítě, jako u sítí nanášených pak v lisovnách na skutečné výlisky při analýze procesu tažení. Nejmenší průměr kružnice sítě běžně dosahovaný v lisovnách je cca 2,5mm. Z tohoto hlediska byl volen i průměr elementů sítě nanášené na zkušební těleso. Průměrná hodnota průměru kroužků sítě na zkušebních tělesech byla 2,465 mm. Kroužky, z nichž byla tato hodnota stanovena, byly proměřeny na dílenském mikroskopu Zeiss.

Jako základní byl brán vnitřní obrys kruhových elementů. Zkušební tělesa byla tažena nástrojem s polokulovitým tažníkem. Tažnice má otvor o průměru 90 mm. Od každé šířky byly taženy tři vzorky. U všech těles se nepodařilo zajistit minimální trhlinu. Jedním z důvodů může být právě nedokonalost deformační sítě / síť nesmí ovlivňovat výsledek zkoušek /.

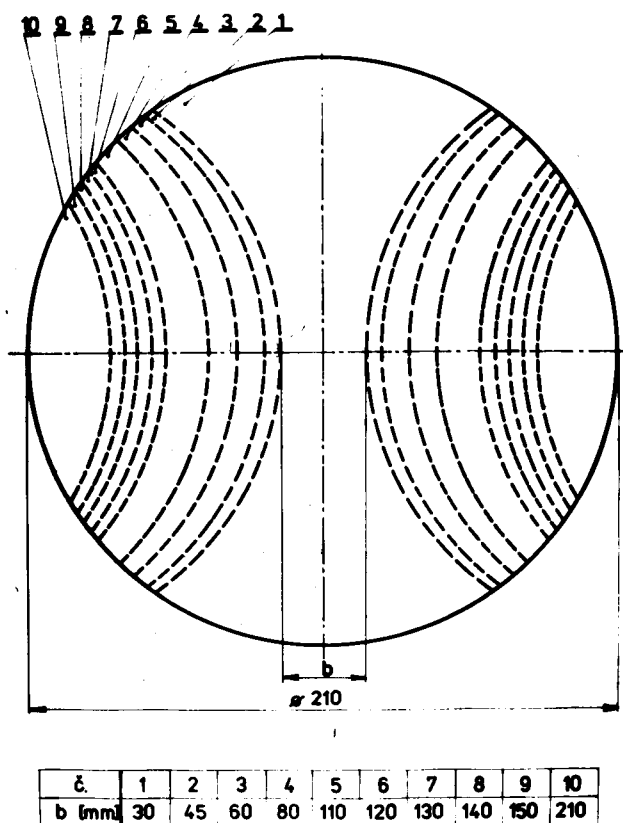


Obr.12. Mikroskop Zeiss.

Tvařitelnost plechu závisí na vnějších podmínkách / stav napjatosti, teplota, rychlost přetvoření /. Vliv napjatosti udává diagram mezních přetvoření. Tento diagram však závisí na rychlosti přetvoření plechu. Proto je třeba udat rychlost nástroje, která určuje rychlost přetvoření.

3.3 Postup tažení vzorků

K modelování mezních stavů bylo použito hydraulického lisu CBA 300. Zpracováván byl materiál KOHAL 20 /tloušťka plechu 0,8mm/. Použity byly nástřihy o 11 různých šířkách s podélnou osou rovnoběžnou se směrem válcování. Z kruhového tělesa o průměru 210mm byly po stranách, kolmo ke směru válcování, vystřiženy kruhové části. Tím jsme získali různé šířky těles od 30 do 150 mm a plný průřez.



Obr.13.1. Výběr vzorků pro tažení a tabulka šířek použitých vzorků.

Vzorky byly upnuty pevným přidržovačem pomocí tří šroubů. Na plochu vzorku byla nanесena vrstvička oleje a mezi tažník

a vzorek byla vložena fólie polyetylenu, která bránila vzniku přímého suchého tření mezi nástrojem a plechem. Tím by mohlo dojít k silnému ovlivnění tváření a také polohy trhliny. Při suchém tření mezi nástrojem a plechem by byla více brzděna ta část plechu, která je v přímém dotyku s nástrojem. Projevovála by se více deformace ve volné části nástřihu, kde je pouze jednoosé namáhání.

Pak proběhlo tažení polokulovitým tažníkem. Před vlastním tažením byla na vzorky nanesena kruhová deformační síť. Byly změřeny výchozí rozměry elementů. Výchozí průměr kružnice byl $L_0 = 2,465$ mm. Po tažení byly pak deformační sítě proměřeny na dílenském mikroskopu Zeiss s přesností na 0,01 mm. Byla použita Heckerova metoda. Byly proměřovány v podélném a v příčném směru elipsy typu II a III. Vzorky byly umístěny na stojánek tak, aby střed proměřované elipsy ležel v ose stojánku. Tak se u něho omezila optická chyba při odečítání rozměrů.

Z naměřených hodnot rozměrů přetvořených elementů deformační sítě v podélném a v příčném směru / z elips typu II a III / $L_1^I, L_1^I, L_2^I, L_2^I$ / ~~viz. tab. 1~~ / byla spočtena skutečná přetvoření :

$$\begin{aligned} \varphi_1^I &= \ln \frac{L_1^I}{L_0} & \varphi_1^{II} &= \ln \frac{L_1^{II}}{L_0} \\ \varphi_2^I &= \ln \frac{L_2^I}{L_0} & \varphi_2^{II} &= \ln \frac{L_2^{II}}{L_0} \end{aligned}$$

Z odpovídajících přetvoření získaných z elips typu II a III byly pak určeny střední hodnoty :

$$\varphi_1 = \frac{1}{2} (\varphi_1^{II} + \varphi_1^{III}) \quad , \quad \varphi_2 = \frac{1}{2} (\varphi_2^{II} + \varphi_2^{III})$$

Z takto získaných hodnot byl sestrojen diagram mezních přetvoření. Výsledky jsou uvedeny v příloze 1.

Původně mělo být k ověřování popsané metodiky použito nástroje s takovou úpravou, aby bylo vidět do místa výskytu trhliny. Po objevení se trhliny nebo viditelného lokálního ztenčení by pak bylo možno tažení zastavit. Zkoušky byly však nakonec provedeny na tažném nástroji / obr.10 /, kde se hloubka tažení v podstatě předem určila. Hloubka tažení se určovala pomocí ukazatele pevně spojeného s beranem lisu a stupnice, na které byla hloubka tažení vyznačena / hloubka tažení při níž by již došlo k porušení vzorku /. Tato hloubka byla určena ještě před vlastními experimenty na ověřovacích tělesech ze stejného materiálu jako byla tělesa zkušební.

Pro exaktní zkoumání byl na KPT navržen nástroj, kde vznik trhliny bude zjišťován pomocí televizní kamery.

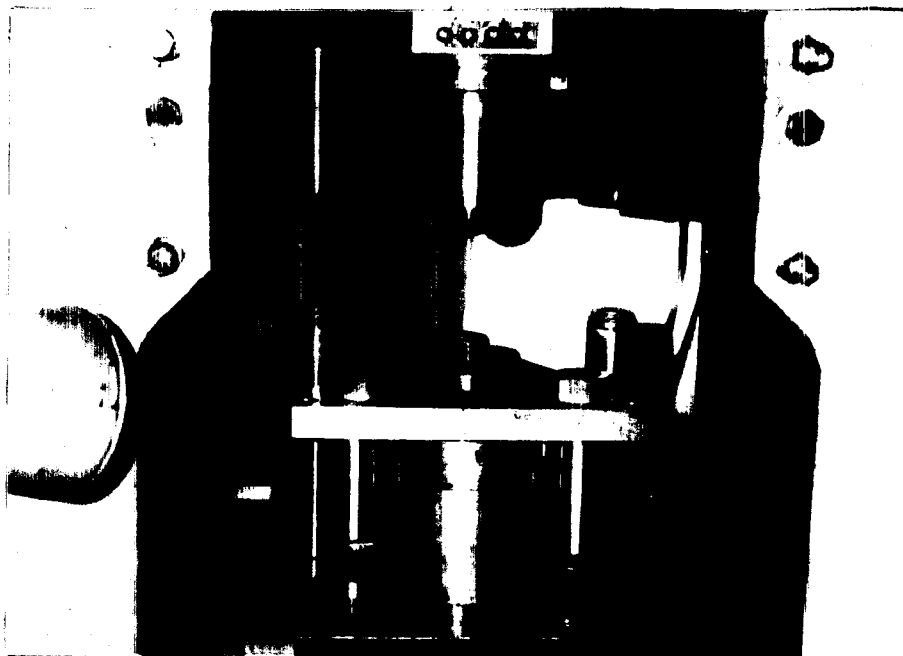
Nástroj, na němž byly provedeny zkoušky, bude používán pro běžná dílenská měření. V tomto případě je však práce na něm spojena s námahou při zvedání a opětném nasazování přidržovače. Proto byl navržen způsob zvedání tohoto přidržovače pomocí hydraulického válce a pístu s využitím hydraulického agregátu / viz.výkres hydraulického přidržovače /.

V příloze 1 je uvedena regresní křivka získaná na počítači na základě statistických metod a body získané z těchto hodnot způsobem již uvedeným.

Příloha 2 obsahuje srovnání regresní křivky získané ze zkoušek na hydraulickém lise CBA 300 a mezní pásma určeného ze zkoušek na lise klikovém / 2 /. Regresní křivka získaná na lise CBA 300 končí v hodnotě $\epsilon_2 = 0,2$. Naproti tomu mezní pásmo získané na lise LU - 160 pokrývá celý požadovaný rozsah přetvoření ϵ_2 .

4. R o z b o r v ý s l e d k ů

Obdobným způsobem byly na KPT modelovány mezní stavy při tažení výlisků z plechu na klikovém lise LU - 160/630.



Obr.13. Tažný nástroj na klikovém lise

Z charakteristiky klikového lisu / 2 / vyplývá, že rychlost tažení je funkcí natočení kliky. Minimální rychlost je v dolní úvrati, tj. v poslední fázi zkoušky. Naproti tomu u hydraulického lisu je možné zajistit konstantní rychlost po celou dobu tažení. Proto bylo přistoupeno ke zkouškám na hydraulickém lise CBA 300, kde je rychlost pohybu tažníku konstantní, lze regulovat a měřit hloubku tažení. Lze tedy předpokládat, že tak můžeme zpřesnit zachycení počátku lokálního ztenčení.

Podmínky zkoušky byly zvoleny v podstatě stejné jako na klikovém lise. Na hydraulickém lise se projevil nepříznivě vliv konstrukce hydraulického tlakového systému. Při dojetí tažníku do potřebné polohy je nutné lis zastavit, přepnout ventil tlakového oleje a beran zvednout. při přepnutí se stávalo, že beran poklesl ještě asi o 2 až 3 mm v důsledku

nedostatečného tlaku v systému. Tím mohlo dojít k ovlivnění tvaru trhliny. / Samotné tažení má klidný průběh, následné poklesnutí má však charakter spíše rázový. / Tento nedostatek lisu bylo nutné kompenzovat. Není možné nechat beran dojet na pevný doraz. Mohlo by dojít k poškození celého zařízení. Proto byly nařezány pružné dorazy z pryže ve tvaru mezikruží. Ty byly vloženy mezi vzorek na tažnici a beran. Tím bylo možné částečně eliminovat vliv poklesu beranu. Tento způsob však také není optimální. Vzorky mají různé šířky i různé mezní stupně tažení. Potom také beran vyvolá různý tlak na pryžový doraz. Při malém protažení nedosedne beran dostatečně pevně na dorazy a při přepnutí na zdvih dojde k poklesu. Další nevýhodou je, že pryžová mezikruží vydrží jen určitý počet dosednutí beranu, pak se začnou trhat, až se rozpadnou. Přitom mezikruží je nutno řezat ručně, jelikož v dílnách VŠST není k dispozici potřebný nástroj pro strojní řezání.



Obr.14. Střížný nástroj pro stříhání kruhových nástřihů

Z uvedených příloh 1, 2 vyplývají následující skutečnosti :

1. Regresní křivka získaná na počítači z hodnot daných zkouškami na hydraulickém lise CBA 300 leží v levé i pravé části diagramu závislosti ϵ na ϵ výše než celé mezní pásmo získané při tažení vzorků na klikovém lise LU-160.
2. Za nevýhodu použité metody tažení plechů lze považovat také to, že stav napjatosti ve vzorcích je takový, že nedovoluje sestrojení celého diagramu mezních přetvoření v požadovaném rozsahu ϵ . Jak vyplývá z výsledků uvedených v příloze 1 zkouškami na hydraulickém lise lze získat diagram mezních přetvoření v rozsahu do $\epsilon = 0,2$. Naproti tomu na klikovém lise lze získat celý rozsah stavů napjatosti .
3. Rozptyl v hodnotách přetvoření je zřejmě způsoben použitou metodou vyhodnocování sítí, a to hlavně v důsledku subjektivního výběru vhodných elips. (Kritérium přesnosti by měla být šířka mezního pásma.)



Obr.15. Zkušební vzorky po tažení

4. Při tažení vzorků s oboustranným vybráním polokulovitým tažníkem se projevil vliv šířky vzorku na polohu trhliny. U vzorků s menší šířkou vznikala trhlina v oblasti vrcholu, zatímco se zvětšující se šířkou vzorků se trhlina posouvala stále více mimo vrchol. To je způsobeno tím, že vzorky větší šíře jsou ovlivněny přidržovačem ve větší části obvodu a stav napjatosti se pak v nich blíží více rovnoosému stavu napjatosti / viz. obr. 15 /.

Zpracováván byl materiál KOHAL 20 s těmito charakteristikami :

Koeficient zpevnění n byl určen přímo^u metodou, jeho hodnota je $n = 0,2313$. Hodnota koeficientu normálové anizotropie R zjištěná zkouškou tahem je

$$R_0 = 1,14$$

$$R_{45} = 1,00$$

$$R_{90} = 1,51$$

$$C = 558,355 \text{ MPa}$$

5. Z á v ě r

Cílem této práce bylo zjišťování mezních hodnot přetvoření hlubokotažného plechu za podmínek tažení na hydraulickém lise CBA 300 a posouzení vlivu těchto podmínek na výsledky experimentálního určování křivek mezních přetvoření. Zvolený postup vycházel z dosud známých metod používaných na KPT. Na hydraulickém lise CBA 300 odpadá pracné nastavování polohy beranu klikového lisu. Hydraulický lis umožňuje přerušení tažení v okamžiku, kdy se na vzorku objeví lokální ztenčení resp. tehdy, když poklesne tažná síla a tak je zajištěno značné přiblížení podmínkám ztráty stability materiálu.

V našem případě byla však hloubka tažení pro vzorky předem určena na základě tažení ověřovacích těles ještě před vlastními experimenty. Z tohoto důvodu se také u všech vzorků nepodařilo přesně vystihnout počátek lokálního ztenčení a u některých těles došlo k jejich porušení / viz. příloha 1 a obr. 16 /.

Nevýhodou této metody však je, že rozložení napětí je takové, že neumožňuje sestavení celého diagramu mezních přetvoření / pouze do $\epsilon_2 = 0,2$, viz. příloha 1 /, což je na klikovém lise možné / viz. příloha 2 /.

Z tohoto vyplývá, že tažením na hydraulickém lise nelze získat diagram mezních přetvoření v celém požadovaném rozsahu.

ϵ_2 . K získání celého diagramu mezních přetvoření bude tedy třeba zkoušek na hydraulickém i klikovém lise a porovnání výsledků získaných z obou lisů. Přičemž pro oblast přetvoření ϵ_2 do $\epsilon_2 = 0,2$ považujeme část diagramu získanou zkouškami na hydraulickém lise za lépe odpovídající skutečnosti. Zbývající část diagramu by odpovídala výsledkům získaným na klikovém lise.

Další možností k doplnění diagramu mezních přetvoření získaného na hydraulickém lise je provedení hydrostatické zkoušky, kterou lze získat pravou část diagramu. Pro stanovení celého diagramu mezních přetvoření by byla

ze zkoušky hydrostatické použita oblast diagramu odpovídající přetvoření od $\varphi = 0,2$.

K dalšímu zdokonalení metodiky stanovení diagramů mezních přetvoření je třeba zdokonalit nanášení deformačních sítí na zkušební tělesa a především eliminovat některé nedostatky hydraulického lisu, které se projevíly při tažení zkušebních těles. Bude třeba vytvořit takový doraz, který by byl výrobně jednoduchý, zajišťoval pružné dosednutí beranu v jistém rozmezí jeho posuvu a zamezil poskočení tažníku v okamžiku přepínání hydraulického systému. Přitom by měl vydržet neporušen několik dosednutí.

Je nutno zdůraznit, že podmínky tažení zkušebních těles na hydraulickém lise jsou blízké podmínkám reálného procesu tažení výlisků nepravidelných tvarů. Výhodou při popsaných zkouškách byl i fakt, že použitý nástroj byl původně určen pro jiné účely a byla na něm potřeba pouze vyměnit tažník. Nebylo nutné vyrábět speciální tažný nástroj.

Pro další výzkum by bylo třeba zlehčit namáhavou práci při ustavování těžkého přídržovače a dále pak používat nástroj, kde bude vidět do kritického místa na nástřihu a pak podle velikosti trhliny včas stroj vypnout. Ke zvedání přídržovače byl navržen hydraulický válec / viz. výkres hydraulického přídržovače/. Nástroj, na němž bude vidět do kritického místa na nástřihu, bude používán na KPT pro exaktní zkoumání. Vznik trhliny na nástřihu bude sledován pomocí televizní kamery.

Dále je třeba uvážit, zda Heckerova metoda je optimální, nebo zda by jiný způsob vyhodnocování sítí nebyl vhodnější.

Pro modelování mezních stavů lze použít také různých způsobů mazání. Při experimentech popsaných v této práci byl používán jediný způsob mazání podle kap.3.3. Vyzkoušení i jiných způsobů by mohlo vést k získání více bodů v diagramu mezních přetvoření při stávajícím počtu zkušebních těles, pokud by se v důsledku různých způsobů mazání



ulohy

podařilo dosáhnout u těles stejné šíře různých stavů napjatosti.

Co nejširší používání výlisků z plechu v sériové a hromadné výrobě vede ke snižování výrobních nákladů a zvyšování produktivity práce. Zvyšování efektivnosti této technologie znamená zvyšování kvality výlisků a co největší omezení zmetkovitosti, která činí často i přes 10% / 12 /. Příspěvkem k omezení faktorů způsobující zmetkovitost je i předložená práce.

+ zvýšení technologické jistoty a bezpečnosti

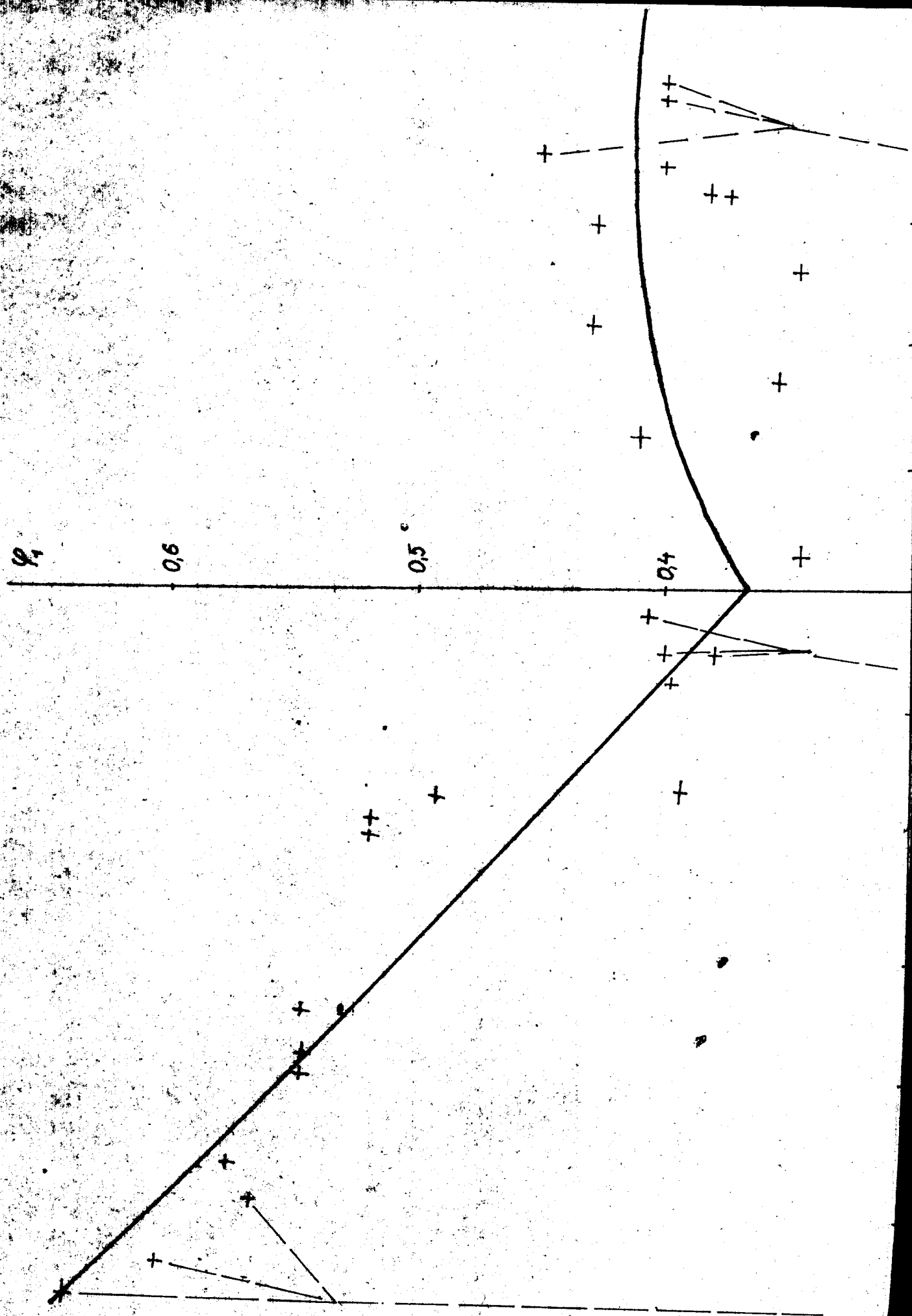
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- / 1 / Tměj, J., Mikeš, V. : Teorie tváření, skripta, VŠST Liberec, 1981
- / 2 / Holas, P. : Metodika experimentálního určování mezních přetvoření plechů, diplomová práce, VŠST Liberec, 1982
- / 3 / Tměj, J. a kolektiv : Metodika experimentálního hodnocení plechů z hlediska mezních hodnot velkých plastických přetvoření, výzkumná zpráva, 1982
- / 4 / Mikeš, V. : Příspěvek k problematice určení mezních hodnot velkých plastických přetvoření při tažení výlisků karosářského typu. Kandidátská dizertační práce, Liberec 1969
- / 5 / Hecker, S. : Simple technique for determining forming limit curves, Sheet Metal Industries, listopad 1975, s. 671
- / 6 / Šanovec, J. - Čermák, J. : Experimentální zjišťování Goodwin-Keelerových křivek mezních deformací. Strojírenská výroba č.3, březen 1981
- / 7 / Hasek, V. : Untersuchung und theoretische Beschreibung wichtiger Einflussgrößen auf das Grenzformänderungsbild. 1.díl. Blech, Rohre, Profile 25/1978, sešit 5
- / 8 / Sanz, G. : Graniczne krzywe tloczności. Obróbka plastyczna, XIV, sešit I, 1975, s.35-54
- / 9 / Kainlis, G. Entringer, M. Calas, J. : Drawability of tinplate Forming limit diagrams and industrial application. 1st. Int. Tinplate Conf., London 1976, s. 215-226
- / 10 / Haberfield, A.B.- Boyles, M. W. : Sovremennyye predstavleniya o štampujemosti listovogo metalla, EI-TOKŠP, 1976, č.18, s.13-20
- / 11 / Veerman, C. : The determination and application of the FLC- auset of localised necking, IDDRG, 1972

- / 12 / Tměj, J., Mikeš, V. : Rozbor podmínek lisovatelnosti tenkých plechů, Strojírenství 24/1974, č.6
- / 13 / Kolektiv : Lisování, SNTL, Praha 1971
- / 14 / Tměj, J. - Rataj, J. : Kontrola jakosti hlubokotažných plechů v AZNP Ml.Boleslav.Strojírenství 28/1978, č.5
- /15 / Primus, F.- Čermák, J. : Nomogramy pro určení zásoby plasticity anizotropních hlubokotažných plechů, Strojírenská výroba, č.2, únor 1970
- / 16 / Počta, B. : Základy teorie tváření kovů, SNTL, Praha 1976
- / 17 / Siebel, E. - Beisswänger, H. : Hluboké tažení, SNTL Praha 1958
- / 18 / Primus, F. : Tvářitelnost hlubokotažných plechů, Strojírenství 26/1976, č.8
- / 19 / Pollák, L. : Anizotropia a hlubokotažnosť ocelových plechův, Alfa, Bratislava 1978
- / 20 / Tomlenov, A. D. : Mechanika processov obrobтки metallov davlenijem, MAŠGIZ Moskva 1963
- / 21 / Živný, J. : Zkušební tažný nástroj pro lis CBA 300, diplomová práce č. KPT- 015, Liberec 1981
- / 22 / Kolektiv : Rozbor metod určování mezních hodnot velkých plastických přetvoření při tažení výlisků z plechu, zpráva o plnění rezortního úkolu R 57-124-006 na KPT, Liberec 1981
- / 23 / Blaščík, F. - Kušaník, S. : Vplyv rýchlosti deformácie na medzný súčiniteľ ťahania, Strojírenství 31/1981 č.11
- (24 / Technický pasport lisu CBA 300

Děkuji s. Ing. Zdeně Moravcové a s. Ing. Zdeňku Bucharovi
za odborné vedení v průběhu experimentů a za pomoc při
teoretickém studiu dané problematiky. Dále děkuji všem
pracovníkům KPT, kteří přispěli k vytvoření této práce.

J. Hanych



0,1 0,2 0,3 0,4 0,5

0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 0,6

REGRESNI KRIVKA (CBA 300)

MEZNI PASMO ZISKANE
NA LU-160

