

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

HLUBOKOTAŽNOST TENKÝCH PLECHŮ SE ZVÝŠENOU

PEVNOSTÍ

Jana Cikánková

KPT - 273

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Buchar

VŠST Liberec

Rozsah práce a příloh:

Počet stran	58
Počet příloh a tabulek	4 /7
Počet obrázků	29

Vysoká škola: strojní a textilní

Fakulta: strojní

Katedra: tváření a plastů

Školní rok: 1986/87

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

pro Janu C i k á n k o v o u

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: Hlubokotažnost tenkých plechů se zvýšenou
pevností

Zásady pro vypracování:

1. Hodnocení tvárných vlastností tenkých plechů.
2. Seznamte se s nově vyvíjenými druhy tenkých plechů - nízkolegovaných se zvýšenými pevnostními vlastnostmi.
3. Porovnejte hlubokotažnost nízkolegovaných a klasických nízkouhlíkových plechů.
4. Charakterizujte zvolené materiály některými dalšími zkouškami.
5. Proveďte diskusi získaných výsledků.
6. Výsledky zpracujte formou přehledných tabulek a grafů.

V 207/P75

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

Rozsah grafických prací:

Rozsah průvodní zprávy:

40 - 50 stran

Seznam odborné literatury:

1. POLIÁK, L. : Anizotropia a hlbokotážnosť ocelových plechov.
2. DUDA, M. : Vliv chemického složení na vlastnosti plechů.
Diplomová práce, VŠST, Liberec, 1985

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Zdeněk Buchar

Datum zadání diplomové práce:

25. 9. 1986

Termín odevzdání diplomové práce:

11. 5. 1987



Jaroslav Tmáj
Doc. Ing. Jaroslav Tmáj, CSc.

Vedoucí katedry

Ján Alaxin
Doc. Ing. Ján Alaxin, CSc.

Děkan

Liberci

25. 9.

86

V dne 19.....

P R O H L Á Š E N Í

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

Jana Chrástová

V Liberci 10.5.1987

O B S A H

1. ÚVOD	7
2. POSUZOVÁNÍ VHODNOSTI PLECHŮ K HLUBOKÉMU TAŽENÍ ...	9
2.1. Zkouška tahem	13
2.1.1. Mez kluzu	15
2.1.2. Mez pevnosti	16
2.1.3. Tažnost	17
2.1.4. Kontrakce	18
2.1.5. Koeficient normálové anizotropie	18
2.1.6. Exponent zpevnění	20
2.2. Technologické zkoušky	22
2.2.1. Zkouška hloubením plechů a pásů podle Erichsena	22
2.2.2. Zkouška hlubokým tahem a přetržením podle Engelhardta a Grosse (TZP)	24
2.2.3. Kalíškovací zkouška	25
2.3. Nová kritéria hlubokotažnosti	26
2.3.1. Koeficient normálové anizotropie	27
2.3.2. Exponent zpevnění	28
2.3.3. Komplexní hodnocení hlubokotažnosti novými kritérii	29
2.4. Diagramy mezních přetvoření	31

3.	PLECHY PRO AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL	35
3.1.	Procesy zpevňování ocelí	35
3.1.1.	Oceli legované fosforem	39
3.1.2.	Oceli s vytvrzováním při vypalování laků	39
3.1.3.	Nízkolegované oceli	39
3.1.4.	Dvojfázové oceli	40
3.2.	Výroba vysokopevných plechů v ČSSR	41
4.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	43
5.	DISKUSE	54
6.	ZÁVĚR	56
7.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	57
8.	SEZNAM PŘÍLOH	58

S E Z N A M S Y M B O L Ů A Z K R A T E K

- $\sigma_{1,2,3}$ - Hlavní normální napětí
- $\varphi_{1,2,3}$ - Hlavní směry přetvoření
- τ - Smyková napětí
- φ_i - Intenzita deformace
- σ_i - Intenzita napětí
- L_1 - Délka hlavní osy elipsy přetvořeného elementu deformační sítě
- L_2 - Délka vedlejší osy elipsa přetvořeného elementu deformační sítě
- L_0 - Výchozí průměr elementu deformační sítě
- l - Vzdálenost středů elementů povytažení
- D - Průměr nástřihu
- d - Průměr tažníku
- k - Stupeň tažení
- R_e - Mez kluzu
- R_m - Mez pevnosti
- A - Tažnost
- ϵ - Poměrná deformace
- r - Koeficient normálové anizotropie
- n - Exponent zpevnění
- r_s - Střední hodnota normálové anizotropie
- n_s - Průměrná hodnota exponentu zpevnění
- r - Stupeň plošné anizotropie
- UV - Ultrafialové
- DMP - Diagram mezních přetvoření
- KPT - Katedra tváření a plastů

1. Ú_V_O_D

Mezi hlavní požadavky kladené na strojírenskou výrobu patří snížení palivoenergetické náročnosti a celkové spotřeby kovů, zlepšování kvality, struktury a sortimentu hutní výroby cestou lepšího využití kapacit a modernizací výrobní základny a to při postupném snižování výroby surového železa a oceli. Do popředí vystupuje potřeba takových zpracovatelských metod, které s dostatečnou jistotou dovolí využívat materiál a jeho vlastnosti v co největší míře, ale zabrání vzniku velké zmetkovitosti.

Velký význam má postupná orientace na technologické postupy s menším kovovým výrobním odpadem. Proto v současné době nabývají stále většího významu technologie tvářecí. 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. V neposlední řadě pak patří mezi výhody i specifické mechanické vlastnosti tvářenců v důsledku jejich zpevnění. Podíl tvářecích technologií ve strojírenské výrobě je proto jedním z měřítek průmyslové vyspělosti státu.

Z tvářecích technologií pak nejvýznamnější postavení zaujímá tažení tenkých plechů. Vyplývá to ze skutečnosti, že plechová součást dnes představuje nejdokonalejší využití materiálu, jeho mechanických vlastností a současně umožňuje výrobu s vysokou produktivitou práce.

Hluboké tažení je základním způsobem zpracování plechů pro výrobu celé škály spotřebních předmětů, hlavně v automobilovém průmyslu pro výlisky nepravidelných tvarů, jako např. karoserie aut. Postupným zaváděním stále větších a tvarově složitějších výlisků, jako i přechodem na zdokonalené postupy lisování, na plynulou a automatizovanou výrobu výlisků, se zvyšují požadavky na zpracovatelské a užitné vlastnosti hlubokotažných plechů.

Tyto požadavky jsou opodstatnělé, protože jednou z cest zvyšování produktivity práce a úspor materiálu je zvyšování užitečných vlastností plechů.

Poptávka po lepších mechanických vlastnostech a kvalitě povrchu plechů prohlubuje zájem o dokonalejší poznání fyzikálně metalurgických vztahů v oceli a o zdokonalení podmínek výroby. Výroba plechů se stává složitou a náročnou na znalost materiálových procesů a výrobní technologie, dobrou kvalitu výrobního zařízení a měřicí techniky.

Při zhodnocování tvárných vlastností plechů, které je třeba pro maximální efektivnost využít až k mezním hodnotám, vyvstává problém zjišťování těchto tvárných vlastností. K tomuto se používá řada dílčích zkoušek.

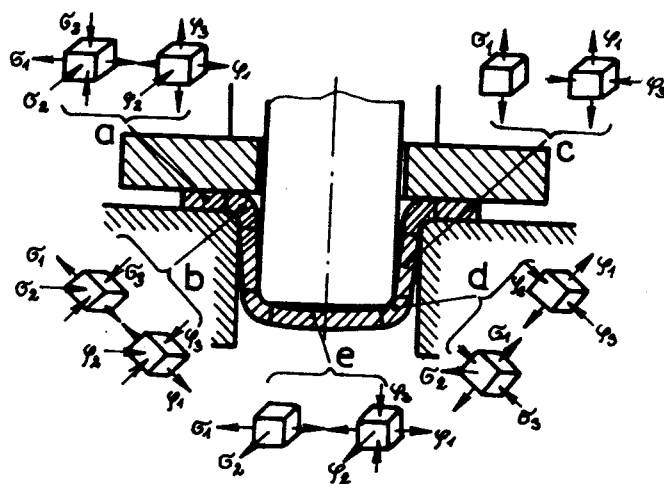
Jedna z nich, zkouška kalíškovací, je aplikována v této práci v souvislosti se studiem hlubokotažnosti tenkých plechů se zvýšenou pevností.

2. P O S U Z O V Á N Í V H O D N O S T I P L E C H Ů K H L U B O K É M U T A Ž E N Í

Již dlouhou dobu věnuje světový výzkum velkou pozornost zkouškám, které určují vhodnost plechů pro lisování. Vzniklo mnoho zkušebních metod, cílem kterých je co nejpřesněji předpovědět chování plechů při lisování. Jedním z kritérií se stala vhodnost plechu na hluboké tažení.

Pojem hlubokotažnosti není v ČSN definován, i když je ho běžně používáno. Je to vlastnost plechu, která dovolí plech přetvořit hlubokým tažením. Z takových plechů lze poměrně snadno vyrobit hluboké nádoby bez porušení jejich soudržnosti.

Tažení je trvalé přetvoření rovinné plochy (plechu) v plochu dutou - prostorovou - duté těleso. Je to proces, kterým se dosahuje požadovaného tvaru výlisku bez podstatné změny tloušťky výchozího materiálu. Schéma tažení válcové nádoby v tažidle s přidržovačem a s příslušnými mechanickými schémata přetvoření je na obr.1.



Obr.1 Mechanická schémata přetvoření při tažení

Mechanická schemata přetvoření se mění v různých částech výtažku, přičemž se mění současně i velikost napětí a deformace.

V přírubě (část a) vzniká vlivem tlaku přidržovače prostorová napjatost i deformace. V ploše příruby vznikají radiální tahová napětí σ_1 a tečná tlaková napětí σ_2 a k nim v kolmém směru osová tlaková napětí σ_3 . Při tažení bez přidržovače se mění schema napětí v přírubě se zřetelem na nepřítomnost tlakového napětí σ_3 .

Na poloměru tažnice (část b) vzniká složitá deformace způsobená prostorovým ohybem za současného působení největšího radiálního tahového napětí σ_1 a malého tečného tlakového napětí σ_2 .

Válcová část výtažku (část c) je podrobena jednoosé tahové napjatosti σ_1 a rovinné deformaci. Část výtažku, nacházející se v zaoblení, kterým přechází válcová část ve dno, je podrobena prostorové nestejnorodé napjatosti, která způsobuje značné prodloužení a ztenčení jeho tloušťky v tomto místě. V důsledku toho je tato oblast výtažku nejchoulostivějším místem, ve kterém se nejčastěji výtažek poruší.

Ve dně výtažku (část e) vzniká během tažení rovinná tahová napjatost a prostorová deformace. Při jednonásobném tažení je zeslabení dna zanedbatelné, ale při postupovém (vícenásobném) tažení dochází k jeho intenzivnějšímu zeslabení [1].

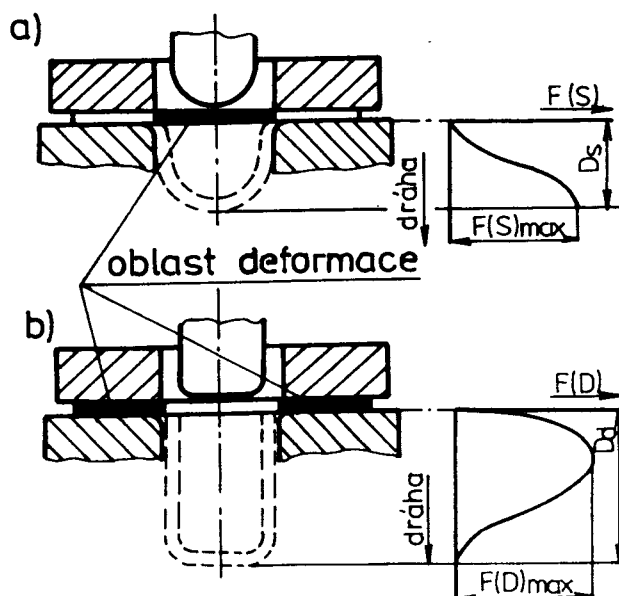
Na základě výzkumu je možné konstatovat, že se při hlubokém tažení vyskytují dva hlavní druhy rovinných deformací:

- dvojosý tah (vypínání)
- tah a tlak (vlastní tažení)

Rozdílné charakteristiky obou mezních případů hlubokého tažení názorně ilustruje obr.2, který znázorňuje průběh tažné síly v závislosti na dráze tažníku pro oba dva mezní

případy hlubokého tažení.

Při tažení se ztenčením tloušťky, obr.2a, dosáhne tažná síla $F(S)$ maximální hodnoty na konci tažení mezního průměru D_s , který odpovídá maximální výšce výtažku $H(S)_{max}$. Poměry v tomto případě hlubokého tažení je možné porovnávat s maximální rovnoměrnou deformací a s maximálním zatížením při zkoušce jednoosým tahem.

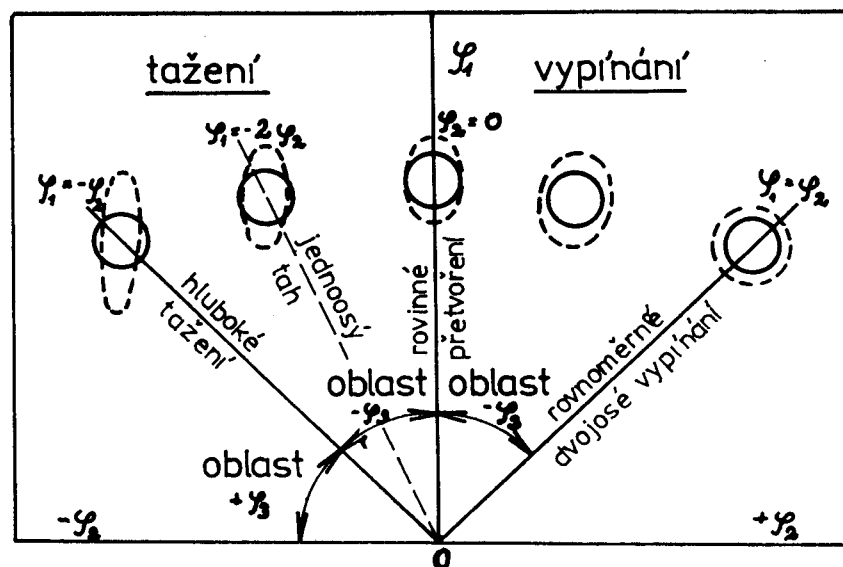


Obr.2 Průběh tažné síly v závislosti na dráze tažníku [2]
a - tažení se ztenčením stěny
b - vlastní hluboké tažení

Při vlastním hlubokém tažení, obr.2b, nastane maximální hodnota tažné síly $F(D)_{max}$ v průběhu hlubokého tažení při určitém poměrném zmenšení příruby vzhledem k meznímu průměru D_d , který odpovídá maximální výšce výtažku $H(D)_{max}$.

Tyto dva základní druhy deformací mohou při hlubokém tažení probíhat současně, nebo může být jeden z nich dominující. Z toho plyne, že proces hlubokého tažení je kombinací rovinné deformace při dvojosém tahu a rovinné deformace při tlaku, které existují současně [2].

Vzájemný vztah těchto stavů je zřejmý i z obr.3, kde je naznačena rozdílnost deformace kruhového elementu nanesené deformační sítě na povrchu výtažku.



Obr.3 Stavy přetvoření na výliscích

Stejný plech se chová při různých stavech napjatosti různě, což je také hlavní důvod, proč při zkouškách hlubokotahnosti nebylo dosaženo jednotnosti.

V současné době existuje řada zkoušek, které mají umožnit posouzení hlubokotahnosti plechů. Dosud však není stanovena zkouška, která by dala objektivní jednoznačné výsledky pro posouzení vhodnosti plechu pro všechny způsoby lisování. Odborníci dosud nezjistili, která veličina je pro posouzení hlubokotahnosti rozhodující a jaké podmínky musí zkouška splňovat, aby dala jednoznačný údaj o hlubokotahnosti plechu.

V zásadě je možné zkoušky hlubokotahnosti rozdělit do dvou základních skupin:

- zkoušky základní
- zkoušky napodobující (technologické)

Mezi základní zkoušky patří především zkouška tahem, zkouška

tvrdosti, zkouška velikosti a tvaru zrna, chemický rozbor, rentgenová difrakce, apod. Mezi napodobující patří zkouška Erichsenova, kalíškovací, TZP, Fukuiho a další.

Technologické zkoušky hlubokotažnosti podle toho, jak mechanické schéma napětí a přetvoření při dané zkoušce odpovídá mechanickému schématu deformace při hlubokém tažení konkrétního výlisku, je možné rozdělit do dvou skupin:

- pro tahové namáhání (mělké neválcované výlisky) -
 - zkoušky vtlačováním, hloubením, apod.
- pro namáhání tah - tlak (válcové výlisky) - zkoušky kalíškovací

Cílem zkoušek je ověřit, zda z plechu určité kvality lze zhotovit danou součást bez závad [4/.

2.1. Z_k_o_u_š_k_a_ _t_a_h_e_m [3/ , [5/

Zkouška jednoosým tahem je základní mechanická zkouška, která svým principem, jednoduchostí a účelností byla od počátku předurčena k tomu, aby se stala nejrozšířenější a nejuznávanější zkušební metodou na hodnocení mechanických vlastností kovových materiálů.

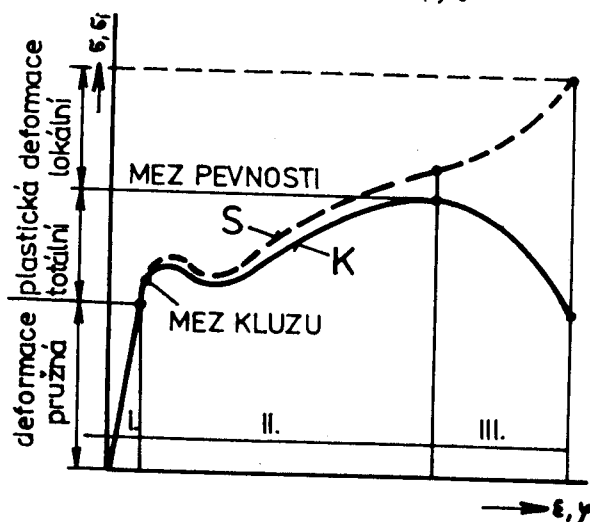
Použití této zkoušky je opodstatněné i tím, že tahovým namáháním lze porušit každý materiál, kdežto při namáhání tlakem nebo ohybem dochází k porušení jen u křehkých materiálů.

Princip zkoušky spočívá v natahování zkušební tyče předepsanou rychlostí, zpravidla do porušení, aby se stanovila jedna, nebo několik charakteristických mechanických vlastností.

Zkušební tyč je upnuta do čelistí trhacího stroje, ve kterých je namáhána a přetržena. Ve zkušební tyči vzniká normálové napětí σ ve směru síly F a smykové napětí τ .

Maximální smykové napětí je v rovině, jejíž normála svírá se silou F úhel $\pi/4$. Tento případ se nazývá lineární (jednoduchá) napjatost.

Závislost mezi napětím a deformací zkušební tyče je znázorněna v tahovém diagramu (obr.4).



Obr.4 Tahový diagram

K - konvenční (smluvní) závislost
S - skutečná závislost

Z hlediska tváření je vhodné používat místo tahového diagramu, získaného tahovou zkouškou, tahový diagram skutečného průběhu závislosti napětí - deformace. Vedou k tomu tyto důvody:

- V průběhu deformace nastává změna výchozího průřezu S_0 na okamžitý průřez S . Výpočet napětí se však v celém průběhu deformace vztahuje na průřez S_0 .
- Při výpočtu poměrné deformace ϵ se používá vztah:

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

Δl - změna měřené délky

l_0 - původní délka

Protože v průběhu zatěžování výchozí délka l_0 se mění na okamžitou délku l , je pro deformaci správnější

používat vztah:

$$d\varphi = \frac{dl}{l}$$

po integraci tohoto vztahu v mezích l_0 a l se získá pro skutečnou deformaci vztah:

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

z toho vyplývá

$$\varphi = \ln (1 + \epsilon)$$

Z uvedeného plyne, že v oblasti plastických deformací je nutno namísto konvenční závislosti $\sigma - \epsilon$ (obr.4 - křivka K) používat závislost $\sigma - \varphi$ (obr.4 - křivka S). V druhém případě jde o hodnoty skutečných napětí vycházejících z okamžitého zatížení průřezu. [2]

Z hlediska zpracování plechů hlubokým tažením je přípustná jen oblast totálních plastických deformací (obr.4 - obl.II). Zde ještě nevzniká místní ztenčení tloušťky plechu.

Na jedné zkušební tyči lze zjistit normované základní mechanické vlastnosti:

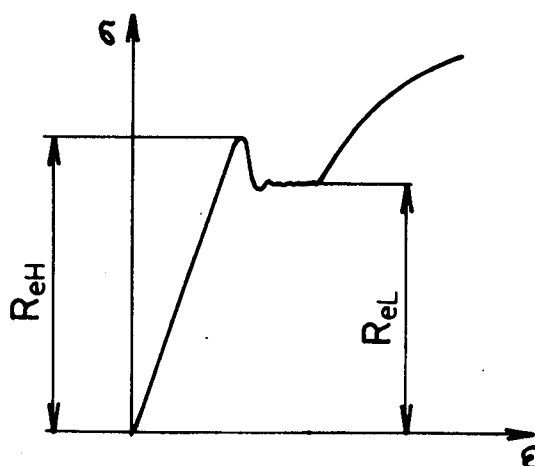
- pevnost v tahu
- mez kluzu
- tažnost
- kontrakci
- koeficient normálové anizotropie
- exponent zpevnění

2.1.1. Mez kluzu

Mez kluzu charakterizuje přechod mezi elastickou a elasticko - plastickou oblastí zatěžovací křivky. Fyzikálně se mez kluzu charakterizuje jako nejmenší napětí, při kterém začíná výrazná plastická deformace.

U nízkouhlíkových ocelí vzniká výrazná mez kluzu,

která se vykazuje průběhem, znázorněným na obr.5. Při dosažení určitého napětí - horní meze kluzu R_{eH} dochází k prudkému poklesu napětí na dolní mez kluzu R_{eL} , při které se tyč dále deformuje už při konstantním, nebo mírně kmitajícím napětí. Existence horní a dolní meze kluzu má fyzikální podstatu v ukotvení dislokací atomy příměsí a v jejich lavinovitém pohybu při dosažení kritického napětí. Její tvar a velikost výrazně závisí na tuhosti zatěžovacího mechanismu trhacího stroje, na rychlosti zatěžování a na teplotě. [3/



Obr.5 Průběh zatížení při výrazné mezi kluzu [3/

2.1.2. Mez_pevnosti

V [5/ se mez pevnosti definuje jako smluvní napětí odpovídající největšímu zatížení F_m , které předchází porušení zkušební tyče. Vyjadřuje se vztahem:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad \text{/MPa/}$$

F_m je maximální síla v tahovém diagramu

S_0 je původní plocha průřezu zkušební tyče

Hodnota R_m je důležitá základní materiálová vlastnost, podle které se klasifikují a porovnávají materiály, je však málo vhodná pro konstrukční výpočty. Její předností je, že se dá lehce změřit, neboť F_m může na klasických trhacích strojích automaticky zaregistrovat vlečná ručička siloměru a S_0 lze přesně odměřit na zkušební tyči před zkouškou.

Velikost R_m je daná chemickým složením a typem struktury kovu. Její hodnota na rozdíl od R_e je ovlivněna vnitřními procesy, které ve struktuře probíhají při plastické deformaci, a to především deformačním zpevněním.

2.1.3. Tažnost

Charakteristikou plastických vlastností materiálu ve směru zatížení je tažnost. Tato charakteristika je definována jako poměrné podélné trvalé prodloužení zkušební tyče po roztrhnutí. Tažnost je charakterizovaná vztahem:

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 = \epsilon_u \cdot 100 \quad [\%]$$

L_0 je původní měřená délka zkušební tyče

L_u je délka tyče po přetržení

Plastické materiály mají deformaci po přetržení rozloženou nerovnoměrně. Největší nerovnoměrnost je v oblasti lokálního zúžení, kde při zužování průřezu nastává současně místní prodlužování.

Tažnost materiálů, u kterých se při tahové zkoušce vytváří krček, závisí na poměru délky a průřezu zkušební tyče. V technické praxi se používají normalizované zkušební tyče s různými průměry a délkami. Aby tažnosti těchto tyčí byly navzájem porovnatelné, musí se na nich zachovat geometrická podobnost.

2.1.4. Kontrakce

Druhou charakteristikou plastických vlastností materiálu při zkoušce tahem je kontrakce, která je definovaná jako největší poměrné trvalé zúžení průřezu zkušební tyče, změřené po jejím přetržení v místě lomu. Vyjadřuje se jako poměrná trvalá deformace ψ_u vyjádřená v procentech.

$$Z = \frac{S_o - S_u}{S_o} \cdot 100 = \frac{\Delta S}{S_o} \cdot 100 = \psi_u \cdot 100 \quad [\%]$$

S_o je plocha původního průřezu zkušební tyče v mm^2

S_u je plocha nejmenšího průřezu zkušební tyče po přetržení v místě lomu v mm^2

Kontrakce je poměrně spolehlivým měřidlem plastičnosti kovu. Se stoupající pevností její hodnota klesá. Zvláště citlivým kritériem je hodnota kontrakce při hodnocení čistoty kovových materiálů. Čím kov obsahuje více nečistot a jiných příměsí takového charakteru, že při plastické deformaci v krčku způsobují vznik dutin, tím je kontrakce menší.

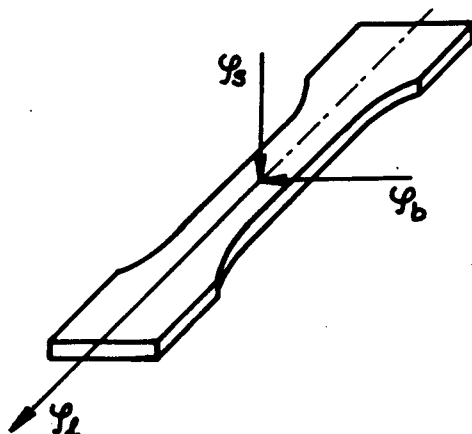
2.1.5. Koeficient normálové anizotropie [2]

Je to hodnota, která není udávaná normou, ale která má podstatný vliv při určování lisovatelnosti výlisku.

Normálová anizotropie vyjadřuje nerovnoměrnost mechanických vlastností zjištěných v rovině plechu vzhledem na mechanické vlastnosti ve směru kolmém na rovinu plechu (ve směru tloušťky). Vyjadřuje se koeficientem normálové anizotropie, což je poměr skutečné deformace šířky a tloušťky zkušební vzorku. Matematicky je definovaný vztahem:

$$r = \frac{\varphi_s}{\varphi_b} ; \quad \varphi_b = \ln \frac{b_o}{b_l} ; \quad \varphi_s = \ln \frac{s_o}{s_l} \quad (2.1)$$

r je koeficient normálové anizotropie
 b_0, s_0 - původní šířka a tloušťka vzorku
 b, s - šířka a tloušťka vzorku po maximální rovnoměrné deformaci



Obr.6 Princip vyhodnocování normálové anizotropie

Při určování normálové anizotropie se vychází ze zákona stálosti objemů před a po plastické deformaci při zkoušce jednoosým tahem:

$$l_1 \cdot b_1 \cdot s_1 = l_0 \cdot b_0 \cdot s_0$$

po dosazení do vztahu (2.1):

$$r = \frac{\ln \frac{b_0}{b_1}}{\ln \frac{b_1 \cdot l_1}{b_0 \cdot l_0}} \quad (2.2)$$

pro $r < 1$ prodloužení vzniká hlavně deformací tloušťky
 pro $r > 1$ prodloužení vzniká hlavně deformací šířky

Za směrodatný koeficient normálové anizotropie se pokládá střední hodnota normálové anizotropie r_s , která se získá měřením jednotlivých koeficientů r v různých směrech ke směru válcování.

Pro směry 0° , 45° , 90° platí:

$$r_s = \frac{1}{4} (r_0 + 2r_{45} + r_{90}) \quad (2.3)$$

Při měření hodnot r v různých směrech ke směru válcování je možné zjistit i plošnou anizotropii mechanických vlastností (= směrová závislost mechanických a fyzikálních vlastností v rovině plechu vzhledem ke směru válcování).

Stupeň plošné anizotropie koeficientu normálové anizotropie se vypočte dle vztahu:

$$\Delta r = \frac{1}{2} (r_0 - 2r_{45} + r_{90}) \quad (2.4)$$

2.1.6. Exponent zpevnění [2]

Tato veličina vyjadřuje intenzitu zpevnění materiálu v průběhu plastické deformace při zkoušce jednoosým tahem. Při jeho měření lze definovat i skutečnou závislost "intenzita napětí - intenzita deformace", což má z hlediska matematického řešení procesu hlubokého tažení plechu velký význam.

Pro nízkouhlíkové oceli a pro mnohé technicky používané kovy je možné, dle praktických zkušeností závislost mezi intenzitou napětí σ_i a intenzitou deformace φ_i při jednoosém tahovém zatížení, definovat exponenciální závislost vztahem:

$$\sigma_i = C \cdot \varphi_i^n \quad (2.5)$$

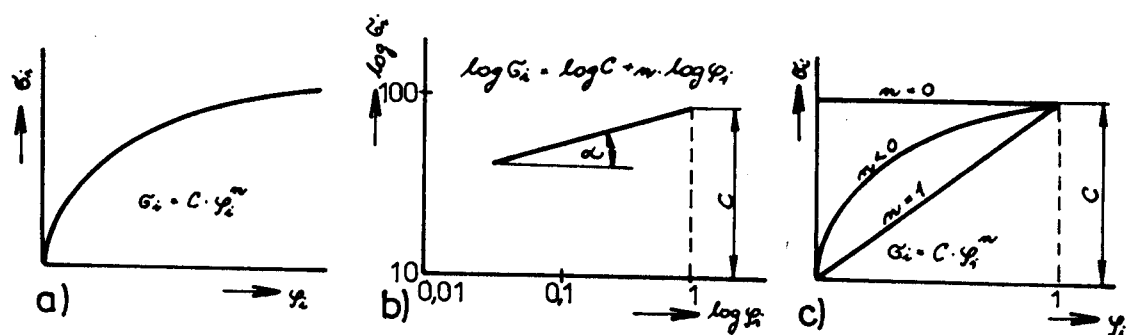
Po zlogaritmování vztahu (2.5) dostaneme rovnici přímky:

$$\log \bar{\sigma}_i = \log C + n \log \varphi_i \quad (2.6)$$

Exponent zpevnění lze definovat:

$$n = \operatorname{tg} \alpha$$

Výše uvedené vztahy jsou graficky vyjádřeny na obr.7.



Obr.7 Grafické vyjádření závislostí:

- a) - exponenciální
- b) - logaritmické
- c) - pro různé hodnoty exponentu zpevnění

Exponent zpevnění lze použít jako všeobecného kritéria lisovatelnosti ve všech případech tváření za studena, je-li určujícím faktorem tahové namáhání. Platí, že čím vyšší jsou hodnoty exponentu zpevnění, tím je plech vhodnější pro hluboké tažení. Plech s vyšší hodnotou n má rovnoměrnější rozložení deformací a je menší nebezpečí porušení celistvosti nebo sekundárního zvlnění výtažku.

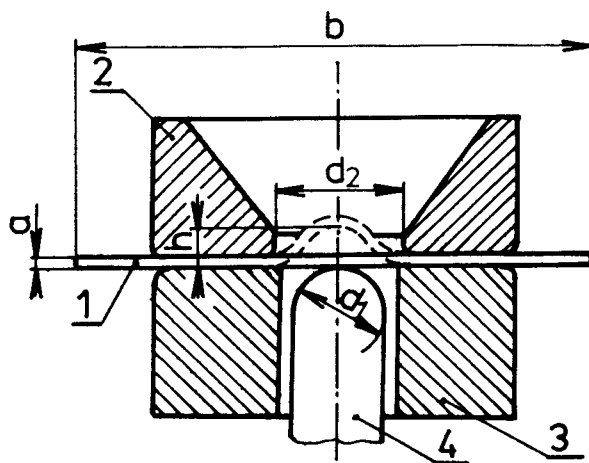
Pro hodnocení hlubokotažnosti se používá průměrná hodnota exponentu zpevnění:

$$n_s = \frac{1}{4} (n_0 + 2n_{45} + n_{90}) \quad (2.7)$$

2.2. T e c h n o l o g i c k é z k o u š k y

2.2.1. Zkouška hloubením plechů a pásů podle Erichsena [6], [4]

Tato zkouška platí pro zkoušení plechů a pásů ocelových i z neželezných kovů tloušťky od 0,5mm do 2mm. Provádí se na tzv. Erichsenově přístroji (obr.8).



Obr.8 Zkušební zařízení pro zkoušku hloubením podle Erichsena [6]

1 - zkušební těleso

2 - raznice

3 - přidržovač

4 - razník

d_1 - průměr kulového zakončení razníku

d_2 - vnitřní průměr raznice

a - tloušťka zkušebního tělesa

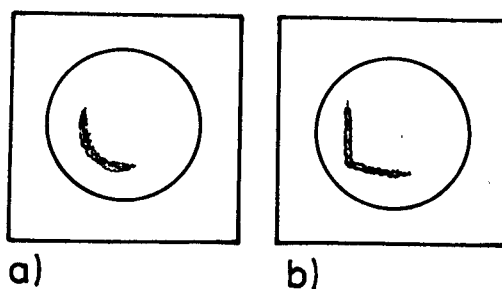
b - šířka zkušebního tělesa

h - hloubka prohloubení

Zkouška je velmi výhodná v tom, že ji lze provést velmi rychle a je možné při ní získat i informace o velikosti zrna a anizotropii mechanických vlastností zkoušeného plechu.

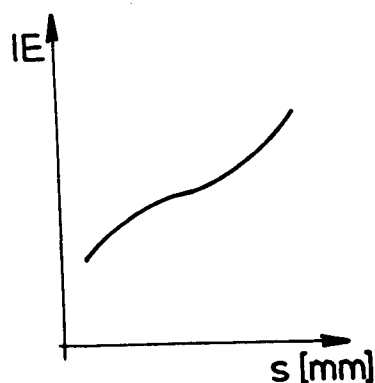
Zkouška spočívá v zatlačování razníku s kulovým zakončením do zkušebního tělesa, stlačeného mezi raznicí a při-
držovačem do počátku objevení průchozí trhliny a ze změření
hloubky vzniklého prohloubení. Tato hodnota je charakteristi-
kou materiálu při zkoušce metodou Erichsena a označuje se IE.

Prohloubení h se zjistí změřením dráhy razníku z nulové
polohy do polohy ve které vznikla trhlina. Za trhlinu se
považuje natrhnutí plechu v celé jeho tloušťce. Při zkoušce
se posuzuje nejen hloubka vtlačení kulového razníku do vzorku,
ale i tvar trhliny a vzhled povrchu vytlačeného kulového
vrchlíku. Objeví-li se trhlina ve vrstevnicích okrouhlého
tvaru, jedná se o materiál izotropní a dobře hlubokotažný
(obr.9a). Objeví-li se trhlina ve vrstevnicích v radiálním
směru, prozrazují materiál anizotropní, nevhodný pro hluboké
tažení (obr.9b).



Obr.9 Tvar trhlin vzniklých při hloubení podle Erichsena

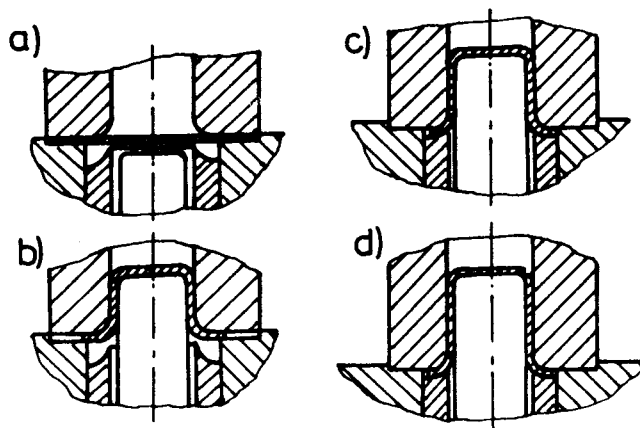
Při zkoušce hloubením podle Erichsena lze pozorovat závislost
IE na tloušťce plechu. Tato závislost se vynáší do grafu,
z kterého vyplývá, že s rostoucí tloušťkou plechu roste hloub-
ka vtlačení. To platí pro všechny materiály. Graf závislosti
IE na tloušťce materiálu je na obr.10.



Obr.10 Graf závislosti Erichsenova čísla IE na tloušťce materiálu

2.2.2. Zkouška hlubokým tahem a přetržením podle Engelhardta a Grosse (TZP) [1/]

Principem této zkoušky je měření a záznam tažné síly F_t při tažení kalíšku. Zařízení pro tažení je uzpůsobeno tak, že si z vloženého plechu samo vystřihne potřebný nástřih (obr. 11a). Ve druhé fázi probíhá tažení s přidržovačem (obr. 11b), a to až do překročení maximální tažné síly. Potom přidržovač sevře zbývající část lemu a tažník se pohybuje dále až do úplného utržení dna (obr. 11 c,d).



Obr.11 Princip zkoušky TZP

Tím dostaneme dvě maxima měřené síly:

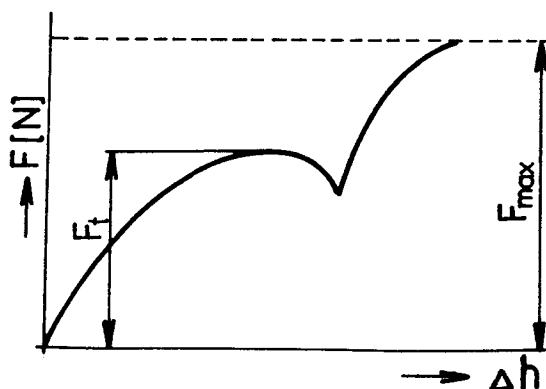
- F_t - maximální tažná síla
- $F_{\max}$ - síla potřebná k utržení dna

Kvalita plechu se posuzuje přirozeným stupněm hlubokotažnosti, který se vyhodnocuje podle vztahu:

$$T = \frac{F_{\max} - F_t}{F_{\max}} \cdot 100 \quad [\%]$$

Když T dosahuje vyšších hodnot než 40%, je plech vhodný pro hluboké tažení.

Na obr.12 je diagram průběhu zatěžovací síly při zkoušce.



Obr.12 Průběh zatěžovací síly při zkoušce TZP

2.2.3. Zkouška kalíškovací [1]

Zkouška navozuje stejné poměry, jaké vznikají v nástroji na tažení nádoby rotačního tvaru. Jejím úkolem je nalézt maximální hodnotu stupně tažení k , které se vypočítá podle vztahu:

$$k = \frac{D}{d} \quad (2.8)$$

Je to převrácená hodnota koeficientu tažení

$$m = \frac{1}{k} = \frac{d}{D} \quad (2.9)$$

D je průměr nástřihu, který lze vytáhnout bez porušení

d je průměr vylisovaného kalíšku (tažníku)

Maximální hodnota stupně tažení k , při které dochází k porušení plechu, je mírou hlubokotažnosti při kalíškovací zkoušce. Hodnota $k_{\max}$ se zjišťuje dvěma způsoby:

- Grafickou metodou ze závislosti $F - k$, kde F je síla potřebná k tažení. Hodnota $k_{\max}$ odpovídá síle $F_{\max}$, která se zjistí při zkoušce, při níž se výrobek porušil.
- Experimentální metodou - když není zařízení pro zjištění $F_{\max}$, zvětšujeme postupně průměr přístřihu o určitou hodnotu tak dlouho, až dojde k porušení výlisku.

Výhodou této zkoušky je, že přímo napodobuje proces hlubokého tažení, že se svým charakterem blíží podmínkám, které vznikají v provozních tažných nástrojích.

2.3. N o v á k r i t é r i a h l u b o k o t a ž n o s t i

Na základě poznatků se dospělo, vycházejíc z diagramu skutečné napětí - skutečná deformace, ke dvěma novým kritériím pro posuzování vhodnosti plechů na hluboké tažení:

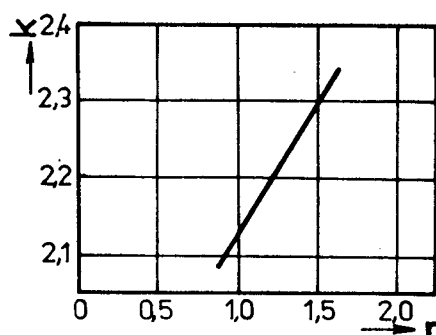
- koeficientu normálové anizotropie
- exponentu zpevnění

Koeficient normálové anizotropie je charakteristický pro hluboké tažení, vyjadřuje odolnost proti ztenčování tloušťky materiálu při hlubokém tažení a exponent zpevnění je rozhodujícím kritériem pro tažení se ztenčením tloušťky.

2.3.1. Koeficient normálové anizotropie [2]

Význam a smysl koeficientu normálové anizotropie jako kritéria vhodnosti plechu k hlubokému tažení je v tom, že vyjadřuje odolnost plechu proti ztenčování jeho tloušťky v průběhu hlubokého tažení. Jako kritérium hlubokotažnosti se používá hodnota průměrného koeficientu normálové anizotropie r_s , která je určena vztahem (2.3); cípatost výlisku se hodnotí (2.4). Platí, že čím vyšší jsou hodnoty Δr , tím je plech vhodnější k hlubokému tažení.

Bylo zjištěno, že mezní hodnoty stupně tažení válcových výlisků s plochým dnem, stoupají prakticky lineárně se vzrůstajícím koeficientem normálové anizotropie r_s (obr.13).



Obr.13 Závislost koeficientu normálové anizotropie r_s a stupně tažení k při tažení válcových výlisků s plochým dnem z hlubokotažného plechu

Experimentálně i teoreticky bylo zjištěno, že koeficient normálové anizotropie jako kritérium hlubokotažnosti plechů je směrodatný při hlubokém tažení válcových nádob s plochým dnem, které jsou charakterizovány napětím "tah-tlak". Je to důležitý poznatek, protože současně znamená, že koeficient tažení výlisků s plochým dnem nezávisí na exponentu zpevnění. Při hlubokém tažení, s uvažováním čistě radiálního tahového napětí, vzniká síla při deformacích v oblasti příruby a musí

se přenést přes dolní část stěny výlisku, která se normálně nedeformuje a proto je slabým článkem systému. Zvýšení pevnosti stěny výlisku použitím materiálu s vyšší hodnotou exponentu zpevnění nepřinese žádný účinek, protože se zvýší i síla na deformaci v oblasti příruby. Jedná se tedy o vzájemně se vylučující faktory.

Z hlediska použití koeficientu normálové anizotropie jako kritéria hlubokotažnosti je důležité jeho hodnoty přiřadit k jednotlivým jakostním třídám hlubokého tažení.

Jakostní zařazení hlubokotažných ocelí podle ČSN 42 0127 použitím kritéria normálové anizotropie bylo navrženo takto:

- | | | |
|-----------------|-----------------------------|-------------------|
| - jakost MT, ST | (nízká hlubokotažnost) | $r < 1,25$ |
| - jakost HT | (dobrá hlubokotažnost) | $1,25 < r < 1,60$ |
| - jakost VT | (vynikající hlubokotažnost) | $r > 1,60$ |

2.3.2. Exponent zpevnění

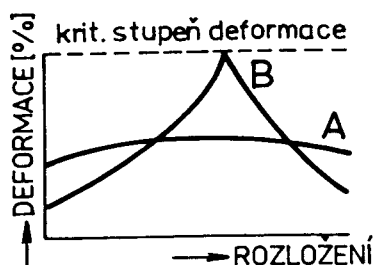
Význam a smysl exponentu zpevnění jako kritéria vhodnosti plechů k hlubokému tažení je v tom, že vyjadřuje schopnost plechu k plastické deformaci při zkoušce jednoosým tahem. Teoreticky se rovná rovnoměrné plastické deformaci při zkoušce jednoosým tahem.

Jako kritérium hlubokotažnosti se používá průměrná hodnota exponentu zpevnění n_s definovaná vztahem (2.7). Platí, že čím vyšší jsou hodnoty exponentu zpevnění, tím je plech vhodnější pro hluboké tažení.

Bylo zjištěno, že mezní stupeň tažení při hlubokém tažení válcových výlisků s plochým dnem nezávisí na exponentu zpevnění. Vykazuje ale korelaci při tažení výlisků, které jsou charakterizovány dvojosým stavem napjatosti (tah-tah).

Exponent zpevnění má důležitý význam z hlediska rovnoměrnosti rozložení deformací při hlubokém tažení se zten-

čením stěny. Rozložení deformací pro tažení stejné hloubky výlisku ze dvou různých plechů A,B je schematicky znázorněno na obr.14.



Obr.14 Rozložení deformací pro různé druhy plechů

V tomto případě je plocha pod oběma křivkami stejná, ale rovnoměrnější rozdělení deformací pro plech A způsobuje nižší maximum v průběhu rozložení deformací. Rozdíl mezi kritickým stupněm deformace a maximem v průběhu deformací tvoří hranici bezpečnosti. Proto je z hlediska hlubokotažnosti vhodnější plech A.

Plech který má vyšší hodnotu exponentu zpevnění má rovnoměrnější rozdělení deformací, a proto je menší nebezpečí porušení celistvosti, nebo sekundárního zvlnění výlisku.

Kvalitativní zatřídění jednotlivých jakostí hlubokotažných ocelí podle průměrného exponentu zpevnění je následující:

- | | | |
|----------------|-----------------------------|-----------------------|
| - jakost MT,ST | (nízká hlubokotažnost) | $n_s < 0,215$ |
| - jakost HT | (dobrá hlubokotažnost) | $0,215 < n_s < 0,250$ |
| - jakost VT | (vynikající hlubokotažnost) | $n_s > 0,250$ |

2.3.3. Komplexní hodnocení hlubokotažnosti novými kritérii

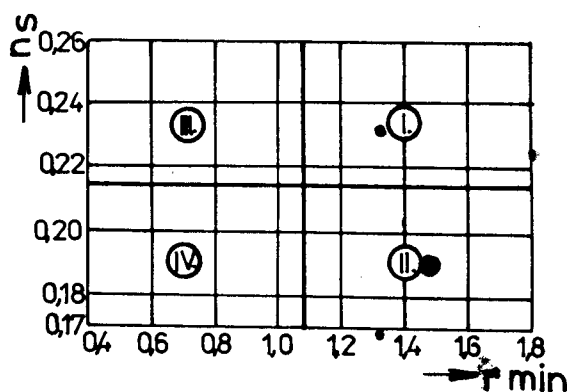
Z předešlých dvou kapitol je zřejmé, že na výliscích různých tvarů se projevuje n_s a r_s různými způsoby. V podmínkách hlubokého tažení se projevuje tato závislost ve třech

variantách:

- 1) převládající vliv koeficientu normálové anizotropie
- 2) převládající vliv exponentu zpevnění
- 3) vliv součinu koeficientu normálové anizotropie a exponentu zpevnění

O tom, který z uvedených vlivů je určující, rozhoduje stav napjatostí a deformací při hlubokém tažení konkrétního výlisku. Z předchozího textu je zřejmé, že exponent zpevnění je rozhodující u tažení se ztenčením tloušťky materiálu a koeficient normálové anizotropie rozhodující u vlastního hlubokého tažení.

V praxi se většinou vyskytují výlisky, kde obě kritéria působí současně. Proto pro tyto typy výlisků, kde je deformace při tažení smíšená, je doporučeno kritérium ad)3. Čím je vyšší součin $r_s \times n_s$, tím je plech kvalitnější. Tato závislost je graficky vyjádřena na obr.15.



Obr.15 Hodnocení vhodnosti plechů k hlubokému tažení koeficientem normálové anizotropie r_s a exponentem zpevnění n_s

Grafickou závislost můžeme rozdělit do čtyř oblastí:

- I ocelové plechy vhodné pro nejsložitější operace tažení
- II ocelové plechy vhodné tam, kde dominující deformací je tlak

III ocelové plechy vhodné tam, kde dominující deformací je dvojosý tah

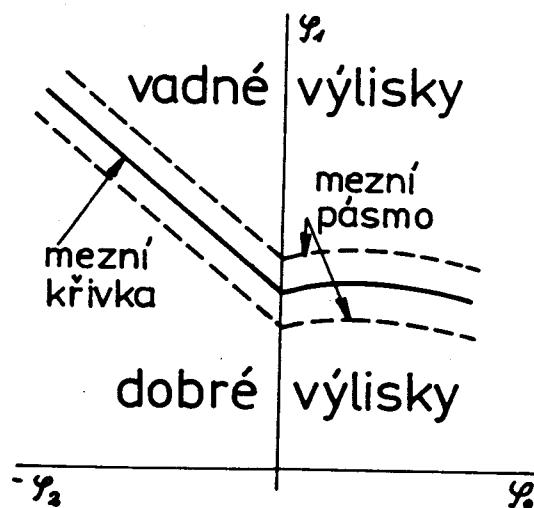
IV ocelové plechy z hlediska hlubokého tažení nevhodné

Nová kritéria hlubokotažnosti jsou výhodné v tom, že je podle nich možné předpovídat hlubokotažnost plechu pro konkrétní tvar výtažku charakterizovaný určitým mechanickým schematem deformací a že zahrnují i anizotropii vlastností hlubokotažných plechů, což umožňuje volbu nástřihových plánů, tvarů výchozích polovýrobků, využití plastických vlastností plechů a kladné ovlivnění konstrukce tvářecích nástrojů.

2.4. D_i_a_g_r_a_m_y_m_e_z_n_í_c_h_p_ř_e_t_v_o_ř_e_n_í

Složitost teoretické analýzy procesu tažení spočívá v tom, že se na jednotlivých místech výlisku vlivem složitého stavu napjatosti vyskytují i velmi rozdílná přetvoření. K tomu, abychom zajistili kvalitní výlisek při maximálním využití plastických vlastností plechů, potřebujeme znát pro jednotlivé materiály kvantitativní mezní přetvoření v celém rozsahu stavů napjatosti, které při tažení obvykle vznikají. Tento požadavek však nemůže splnit žádná zkouška tvařitelnosti. To je důvod, který vedl k sestavení diagramů mezních přetvoření (DMP).

DMP je jedním z moderních přístupů hodnocení tvařitelnosti tenkých plechů. Umožňují určit kvantitativně pro jednotlivé stavy napjatosti a konkrétní materiál mezní přetvoření φ_1 a φ_2 , které ještě nezpůsobí vznik vadných výlisků (obr.16). DMP vycházejí z předpokladu, že deformační schopnost materiálu lze definovat na hranici plastické nestability. Průběh mezní křivky, která představuje mez tvařitelnosti daného materiálu závisí na tom, jak byla definovaná ztráta stability procesu tváření.



Obr.16 DMP s pásmem zachycujícím mezní přetvoření pro celý rozsah stavů napjatosti, které se mohou u výlisků nepravidelných tvarů vyskytovat

V zásadě lze v oblasti velkých plastických přetvoření rozlišovat tři typy ztráty stability:

- ztrátu stability v oblasti rovnoměrných přetvoření, které nastane v okamžiku dosažení meze pevnosti materiálu
- ztrátu stability v oblasti přetvoření při difuzním ztenčení, kdy dojde u některých materiálů vlivem dodatečného zpevnění k dočasnému obnovení stability tvářecího procesu
- ztrátu stability v oblasti přetvoření při lokálním ztenčení, která vede bezprostředně k porušení materiálu

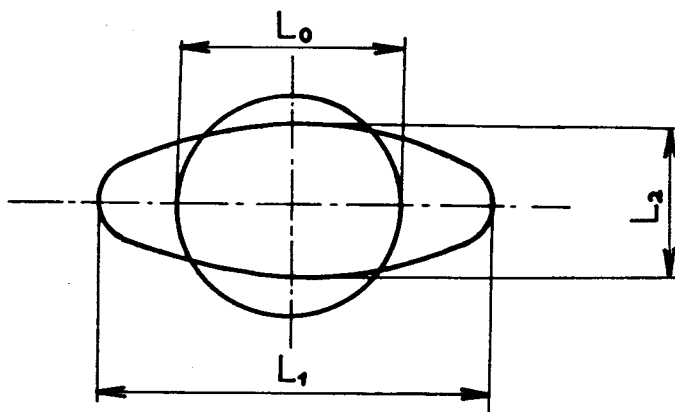
Zatímco první dva typy ztráty stability jsou prakticky využitelné, třetí typ nemá pro praktické lisování význam.

Prostřednictvím DMP můžeme tedy odhalit ta místa, kde na výlisku hrozí buď nebezpečí vyčerpání schopnosti materiálu k rovnoměrnému plastickému přetvoření, nebo lokalizace přetvoření a vznik trhlin. Vhodným technologickým zásahem, který vede ke změně stavu napjatosti, je pak možné odstranit v těchto místech výlisku příčiny vyčerpání zásoby plasticity bez nutnosti použití kvalitnějšího materiálu. Při tom je však třeba počítat s tím, že kvalita plechu kolísá v určitém rozmezí.

Pro sestrojení křivky mezních přetvoření potřebujeme znát množství dvojic skutečných přetvoření φ_1 a φ_2 v rovině plechu pro okamžik dané ztráty stability tak, aby rovnoměrně pokryly celou oblast stavu napjatosti, počínaje jednoosým tahem a konče rovnoměrným dvojosým tahem.

Mezní křivky lze získat:

- 1) Zjišťováním hodnot φ_1 a φ_2 přímo na výliscích užitím metody deformačních sítí. Hodnoty φ_1 a φ_2 představují přirozené (logaritmické) přetvoření, které získáme na základě změn délek os kruhového elementu povrchové deformační sítě (obr.17).



Obr.17 Charakteristické rozměry kruhového elementu před a po deformaci

Pro hlavní normálná přetvoření platí:

$$\varphi_1 = \ln \frac{L_1}{L_0} \quad ; \quad \varphi_2 = \ln \frac{L_2}{L_0} \quad (2.10)$$

- 2) Laboratorně, použitím experimentální metody založené na modelování stavů napjatosti, což se provádí:
 - a) řadou různých zkoušek za použití množství různých typů vzorků

b) vypínáním nástřihů ve tvaru různě širokých pruhů
v tažném nástroji

Přetvoření φ_1 a φ_2 určíme opět použitím metody deformačních sítí v oblasti lomu zkušebních vzorků. V těchto případech však nezískáme v DMP mezní křivku, ale pásmo (obr.16), jehož šířka je závislá na přesnosti měření rozptylu mechanických vlastností plechu.

- 3) Experimentálně - početní metodou, při níž lze průběh mezních křivek předpovědět teoreticky pomocí matematických vztahů odvozených na základě teorie plasticity a uvažujících různá kritéria ztráty stability tvářecího procesu. Vlastnosti materiálu jsou v těchto kritériích reprezentovány obvykle parametry n a r zjištěnými experimentálně.

3. P L E C H Y P R O A U T O M O B I L O V Ý P R Ů M Y S L

Koncem 70.let byl zaznamenán progresivní růst cen energií, surovin a materiálů. V celosvětové ekonomice se jasně ukazuje, že se zásoby surovin ztenčují rychleji, než bylo předpokládáno. Proto se problém surovin a energie stal klíčovým.

Z pohledu celospolečenských potřeb byly určeny směry inovačních procesů, navazující na domácí a zahraniční trhy. Vycházejíc z toho, se stanovila současná i perspektivní technická politika, která má zabezpečovat:

- vysokou efektivnost využívání surovinových a energetických zdrojů
- exportní charakter strojírenství a hutnictví za účelem získání maximálních devizových příjmů pro další rozvoj ekonomiky

Proto je prvořadou úlohou hutního výzkumu inovace výrobků, která je častokrát spojena s aplikací nových technologických postupů i modernizací výrobního zařízení a bezprostředně navazuje na inovaci strojírenských výrobků.

Pro větší efektivnost výrobků je nutné zajistit vyšší užité vlastnosti. Zvyšování pevnostních parametrů šetří kovovou substancí u výrobku a současně umožňuje prostřednictvím zmenšování tloušťky plechů snižovat hmotnost strojů a zařízení. Hlavně u silničních a železničních vozidel se tento trend vývoje markantně projevuje nejenom ve snížení hmotnosti, ale i ve spotřebě pohonných hmot a ve zvýšení bezpečnosti vozidla.

3.1. P r o c e s y z p e v ň o v á n í o c e l í

Jeden ze směrů vývoje nových druhů ocelí se ubírá zvyšováním pevnosti při zachování dobrých tvářecích vlastností.

Tabulka č.1 ukazuje rozdíly možnostech zpevňování ocelí, jak uvedl Grumbach v článku [7].

Tab.1 Rozdíly v procesech zpevňování

principy zpevňování	legující prvky	tepelné zpracování
deformační stárnutí po zpracování za studena	intersticiální N ₂ C	R + A C - T + A
tuhý roztok	Mn-Si-P	R C
precipitace a zjemňování struktury	N Nb-V-Ti	R C
precipitace	Cu Mo-V	RR + A
struktura dvojí fáze	Mn-Si Mo-V	R RR + A C

R.....žihání po sériích

C.....kontinuální žihání

RR....dvojí žihání nebo popouštění

T.....kalení

A.....stárnutí

Z tab.1 vyplývá, že použití mikrolegujících prvků je všeobecné. Vysokopevné charakteristiky se dosahuje kombinací různých karbidů během válcování za tepla. Pro nízkolegované za tepla válcované oceli se běžně používá niob, titan, vanad, případně jejich kombinace. Tyto karbidy omezují

rekrytalizaci a růst zrn při austenitizaci, čímž vzniká transformací jemná rovnoměrná feritická matrice, která je předpokladem pro vysokopevný materiál.

Při procesu tváření zrn může být rovněž využíváno efektu precipitačního vytvrzování. Tažnost je zvyšována pomocí regulace vměstků a válcovacích parametrů na kontinuální válcovací plechy. Finální mechanické vlastnosti mají velký rozsah vymezený podle relativního vytvrzování, které zpětně závisí na chemickém složení oceli a válcovacím procesu.

Jedním z problémů, které brání obecnému rozšíření a převzetí vysokopevných nízkolegovaných ocelí válcovaných za tepla do automobilového průmyslu je jejich relativně silný minimální rozměr (2 až 3mm). Tato nevýhoda je nyní překonána zavedením nového druhu vysokopevných ocelí, ocelí válcovaných za studena. Menší tloušťky může být dosaženo pomocí manipulace se čtyřmi základními výrobními parametry:

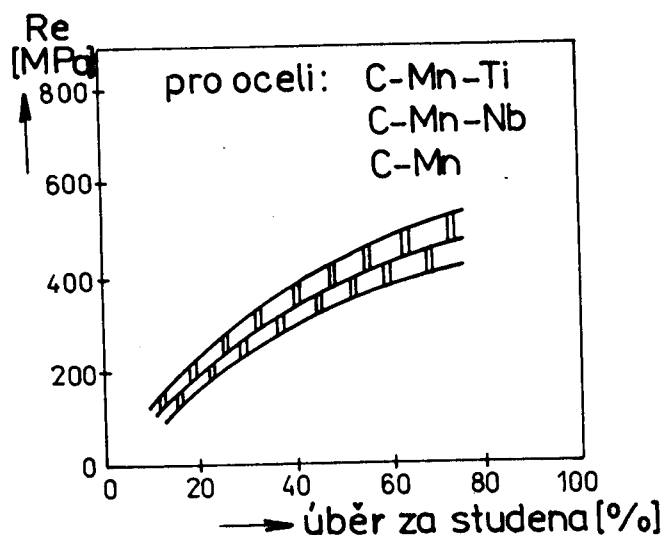
- konvenční mezí kluzu ohřátého pásu
- procentem úběru při válcování za studena (úběr 30 až 60%)
- žíhacím cyklem
- snížením teploty chlazení

Variací těchto parametrů můžeme získat široké rozmezí ocelí s rozsahem meze kluzu od 270 do 965MPa. Stejně přesně jako u ocelí válcovaných za tepla mohou být užívány procesy vytvrzování tuhého roztoku, precipitační vytvrzování a zjemňování zrna u horkého pásu s mezí kluzu v rozsahu 200 až 700MPa vystavenému později úběru při válcování za studena.

Obr.18 ukazuje vzrůst meze kluzu jako funkci úběru při válcování za studena. Kombinací meze kluzu výchozího horkého pásu a procentem úběru válcováním za studena lze dosáhnout výsledné meze kluzu v rozsahu 500 až 1 100MPa ve válcovaném stavu bez dalšího tepelného zpracování.

Žíhání na odstranění vnitřního pnutí nebo úplná rekrytalizace jsou způsoby, kterými dosahujeme kovů s hodnotou

meze kluzu oceli ve válcovaném stavu bez dalšího tepelného zpracování. Žíhání se může provádět buď vsázkami po dlouhých časových periodách, nebo kontinuálním žíháním.



Obr.18 Závislost meze kluzu na úběru při válcování za studena [8/]

Effektu precipitace a zjemňování struktury se využívá k získání dobrých vlastností ocelí válcovaných za studena mikrolegovaných Nb, Ti, V. Patří k ocelím, které dosahují podstatné materiálové úspory při výrobě součástí lisovaných za studena a splňují požadavky na ně kladené, tzn. např. mají nižší hodnotu poměru meze kluzu a meze pevnosti, jsou odolné proti stárnutí při pokojových teplotách, mají vyšší hodnotu rovnoměrného prodloužení.

Lze je rozdělit do čtyř základních skupin:

- oceli legované fosforem
- oceli s vytvrzováním při vypalování laků
- oceli nízkolegované
- oceli dvoufázové feriticko-martenzitické

Mechanické vlastnosti těchto ocelí jsou uvedeny v příloze 1.

3.1.1. Oceli legované fosforem

[9]

Vyrábějí se zejména v pevnostních stupních 350, 400 a 450MPa. Vysoké pevnostní vlastnosti se dosahují substitučním zpevněním tuhého roztoku fosforem.

U svitků žíhaných v poklopových pecích se fosfor pohybuje do max. 0,10%. Mají velmi dobrou tvažitelnost s hodnotami normálové anizotropie $r = 1,4 - 1,7$ a exponentu zpevnění $n_s = 0,18 - 0,2$. Aplikují se na vnější a vnitřní panely (velkoplošné výlisky), jako kapotu, kryt kufru, dveře, apod. Jejich používání se neustále objemově zvyšuje.

3.1.2. Oceli s vytvrzováním při vypalování laků

[9]

Tyto oceli se vyznačují nižší mezí kluzu před lisováním, a tím i lepší tvažitelností.

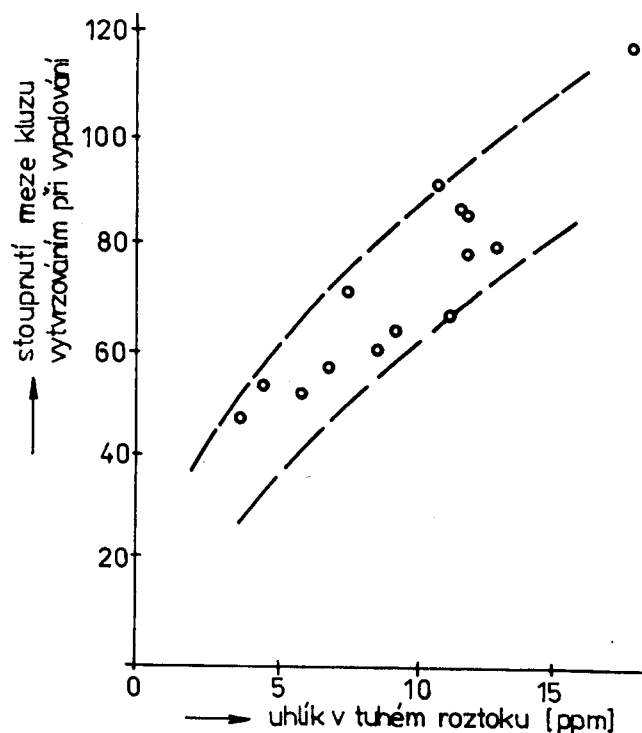
Vytvrzování při vypalování je definované jako stoupnutí napětí nad mez 0,2 po předběžné 2% deformaci za studena, vlivem vypalování při 170°C po dobu 20min.

Vytvrzování je důležité hlavně u vnějších panelů (dveře, kapota, střecha,...), kde plastické deformace plechů ve středních plochách výlisků jsou menší než 5%. Vytvrzovací mechanismy jsou založeny na kontrolované precipitaci uhlíku po deformaci za studena a následném vypalovacím žíhání. Závislost účinku vytvrzování na obsahu uhlíku v tuhém roztoku ukazuje obr.19. Je samozřejmé, že intenzita vytvrzování závisí na rychlosti ochlazování při žíhání svitků.

3.1.3. Nízkolegované oceli

[9]

Vysokopevné nízkolegované oceli bývají legované Mn do 2,3% a Si do 1,5% za použití mikrolegur Ti, Nb, V. Obsah uhlíku je max. do 0,12%. Po válcování za studena se svitky žíhají v poklopových pecích, nebo v průběžných žíhacích



Obr.19 Závislost mezi obsahem uhlíku v tuhém roztoku a vytvrzováním při vypalování

linkách. Jsou odstupňované podle minimální meze kluzu od 235 do 500MPa. Se zvyšováním pevnosti klesá tažnost a tím i tvařitelnost za studena. Používají se především na konstrukční nosné části automobilu a dynamicky namáhané části podvozku.

3.1.4. Dvoufázové oceli

[9]

Feriticko-martenzitické oceli se vyznačují plynulou deformací na mezi kluzu, vysokou rychlostí deformačního zpevnování, nízkým poměrem meze kluzu k mezi pevnosti a podstatně vyšší rovnoměrnou i celkovou deformací při dané pevnostní úrovni (dané hodnotou meze pevnosti). Jejich největší výhodou je, že zabezpečují nejvyšší tažnost při dané pevnosti. Používají se pro lisování velkoplošných výlisků, částí podvozků a bezpečnostních částí automobilu.

3.2. V ý r o b a v y s o k o p e v n ý c h p l e c h ů v Č S S R

V ČSSR dosud není vytvořena a normována ucelená řada konstrukčních ocelí se zaručenou lisovatelností. Tím dochází i nadále k nadměrné spotřebě materiálu a vysoké hmotnosti vozidel. K výraznějšímu použití pevnostních ocelí v ČSSR došlo v roce 1964 s vývojem vozu Š 100 MB. Tehdy byl použit materiál z dovozu typu ALTANK 36-42 na dynamicky namáhané podvozkové díly. Jako tuzemská náhrada byl ve VP Frýdek Místek vyvinut v roce 1969 materiál pod označením 36-42 MB 10. Později byl zahájen rozvoj pevnostních KOHALŮ, jež byl prováděn v rámci výrobního programu n.p.VSŽ Košice.

KOHAL je nestárnoucí hliníkem stabilizovaná ocel se zaručenými mechanickými vlastnostmi na delší dobu. Vývoj pevnostních plechů pro tváření za studena se ve VSŽ Košice ubíral cestou mikrolegování ocelí Ti, Mo, V, Zr, Nb pro plechy válcované za tepla. Pro plechy válcované za studena byl použit jako mikrolegující prvek Ti. Pevnostní plechy mikrolegované Ti, pod označením KH 25E, KH 30E a KH 36E, se vyznačují vysokou pevností a dobrou lisovatelností.

Ve snaze použít pevnostní plechy z oceli mikrolegované Ti na povrchové díly automobilů se vyskytly problémy nevzhledující jakostí jejich povrchu. Povrch plechů válcovaných za studena neodpovídal jakostnímu stupni 4 dle ČSN, tj. povrch bez povrchových chyb. Tento nedostatek se operativně řešil vývojem oceli KH 24 bez mikrolegur se zaručenou mezí kluzu a vyšší pevností plechů válcovaných za studena. Toto řešení se ukázalo jako výhodné z hlediska úspor mikrolegujících prvků, jejíž cena stále roste. Nově vyvinutá ocel KH 24 prakticky nahradila mikrolegovanou ocel KH 25E.

Přehled mechanických vlastností vybraných pevnostních KOHALŮ je uveden v přílohách č.2 a 3. Z nich je zřejmé,

že hlubokotažné vlastnosti plechů KH 24 se přibližují vlastnostem plechů KH 20 s tím rozdílem, že pevnost je vyšší o 20 až 40MPa. Zvýšených pevnostních vlastností bylo dosaženo zvýšením obsahu uhlíku na maximum 0,11% a manganu na 0,6%, bylo dosaženo dobré tvařitelnosti regulovaným režimem při rekrytalizačním žíhání.

Ve VSŽ Košice se kromě uvedených značek ocelových plechů válcovaných za tepla vyrábějí ještě tři druhy plechů, které jsou válcované za studena. Jsou to plechy o jakosti 341 (KOHAL 25.21E), 401 (KOHAL 30.21E) a 362 (KOHAL 36.21E). Tím jsou ve výrobním programu VSŽ obsaženy oceli s mezí kluzu od 250 do 420MPa a v tloušťce od 0,7 do 10mm.

Základním směrem technického rozvoje ve výrobě plechů je zvládnutí kvalitativních požadavků v tvarové dokonalosti, dobré tvařitelnosti a vysoké povrchové jakosti.

Nově vyvinuté oceli řady KOHAL o vysokých tvářecích vlastnostech, jako i perspektivní záměry jejich vylepšování, dávají předpoklady splnění náročných požadavků odběratelů.

4. E X P E R I M E N T Á L N Í Č Á S T

Cílem této diplomové práce je posoudit hlubokotažnost nově vyvíjených plechů se zvýšenou pevností, a to KOHALU 23P a KOHALU 21N, porovnáním s klasickými plechy, KOHALEM 20E a KOHALEM 20E konti. Pro posouzení vlastností materiálu a jejich vhodnosti k hlubokému tažení byla provedena zkouška kalíškovací a zkouška tahem.

Kalíškovací zkouškou byl zjištěn maximální stupeň tažení k . Byla provedena na lise LU 160 a spočívala v nalezení mezního průměru nástřihu (Dkrit), při kterém dojde k utržení dna kalíšku. Nástřihy byly připraveny nástřiháním na pákových nůžkách a na soustruhu byly obrobeny na požadovaný průměr. Pro tloušťky plechů 0,7 a 0,8 mm bylo použito shodného nástroje, pouze rozpírací kroužky se lišily. Vymezují totiž vůli mezi tažnicí a přidržovačem, která je potřebná k tomu, aby materiál nebyl zablokován a aby nedocházelo k jeho zvlnění v oblasti příruby.



Obr.20 Nástřih, kalíšek s utrženým dnem, vytažený kalíšek bez porušení

Na výsledek zkoušky mají vliv tyto faktory:

- větší vůle mezi přidržovačem a tažnicí (nedokonalé dotažení

- matic přidržovače způsobí zvlnění materiálu)
- mazání (mažeme pouze v oblasti příruby); nedostatečné mazání může způsobit zablokování materiálu mezi tažnicí a přidržovačem předběžné utržení dna výlisku

Hodnoty $\underline{k}$ a $\underline{m}$ jsou vypočteny podle vztahů (2.8) a (2.9) a jsou seřazeny do tabulky č.5. Graficky je znázorněno ve sloupcovém diagramu na obr.29.

Průměr tažníku je 78mm, kritické průměry nástřihů jsou:
 KOHAL 20E - 180mm, KOHAL 20E konti - 170mm, KOHAL 23P - 183mm
 a KOHAL 21N - 177,5mm.

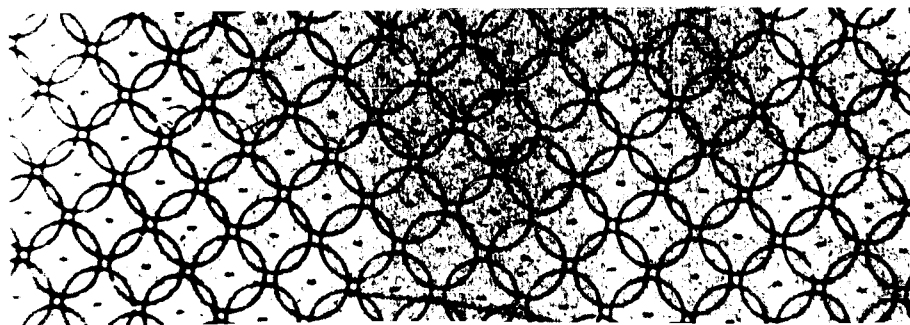
Tabulka č.5 Naměřené hodnoty stupně tažení

materiál	$\underline{k}$	$\underline{m}$
KOHAL 20E	2,308	0,433
KOHAL 20E konti	2,179	0,459
KOHAL 23P	2,345	0,427
KOHAL 21N	2,276	0,439

Vytažené kalíšky, u kterých nedošlo ke ztrátě stability, byly použity pro zjištění plasticity zkoumaných materiálů, a to tak, že na nástřihy, ještě před vytažením, byly nanесeny deformační sítě.

Na KPT se ke zhotovení deformačních sítí používá metoda rytí a fotografická metoda kombinovaná s elektrochemickým leptáním. Obě tyto metody byly použity.

Při fotografické metodě kombinované s elektrochemickým leptáním byly vytvořeny kruhové elementy o průměru 2,55mm, které jsou vidět i na obr.21. Tato metoda je dosti pracná, ale dosahuje výsledků, které zcela vyhovují kladeným požadavkům. Její postup je shrnut v následujících bodech:

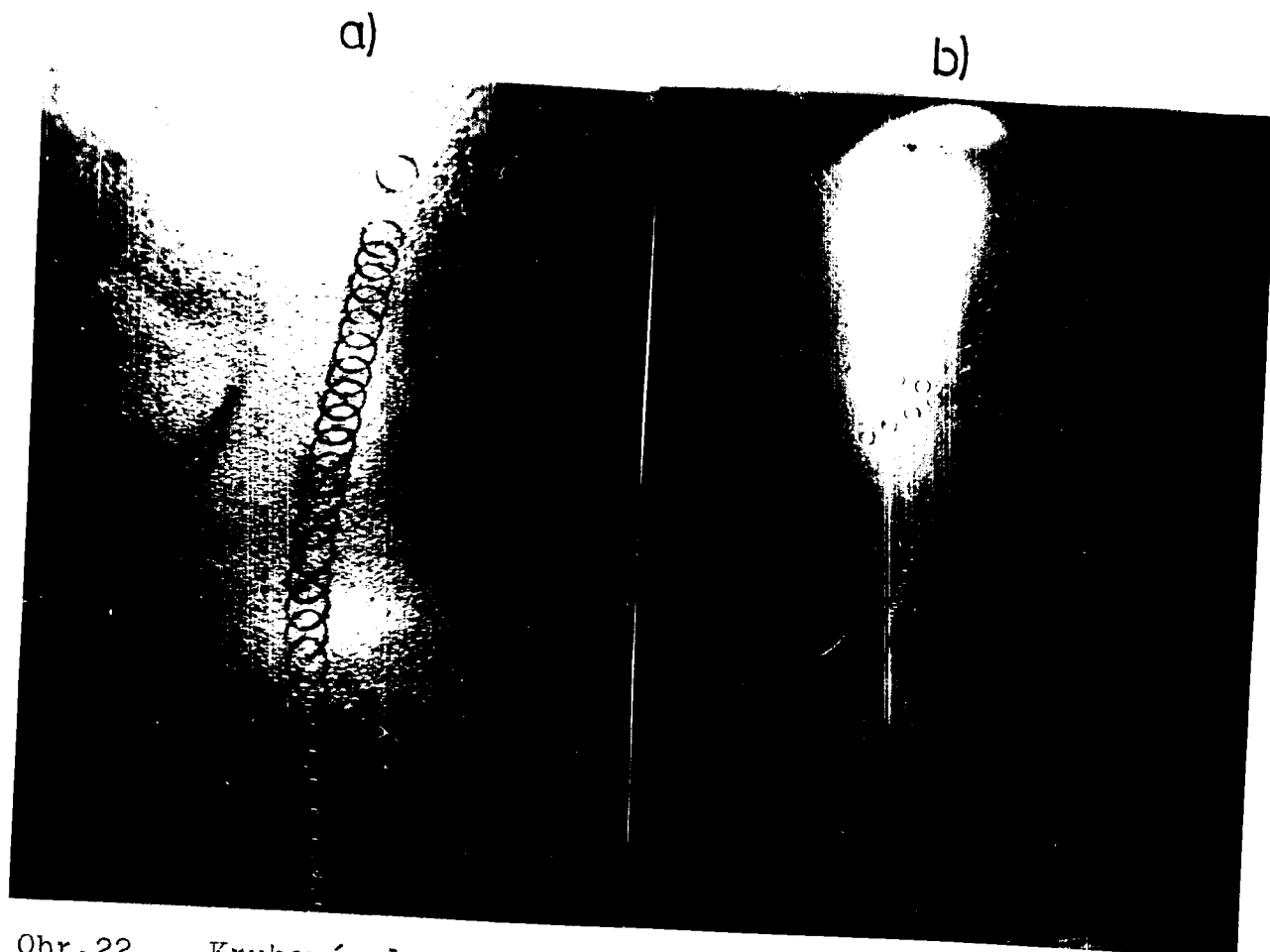


Obr.21 Kruhové elementy deformační sítě nanesené fotografickou metodou kombinovanou s elektrochemickým leptáním

1. Nástřihy se dokonale odmastí. K tomu se používá benzín, kterým nejprve nahrubo za pomoci kartáče a potom načisto hadříkem očistíme místo předpokládané sítě. Pro dočištění se používá ještě líh.
2. Na dobře odmaštěné vzorky se štětečkem nanese světlocitlivá emulze SCR-5. Pro docílení rovného povrchu vrstvy emulze se vzorky fixují ve svislé poloze, aby mohla emulze volně po jejich povrchu stékat. Sušení potom probíhá v peci po dobu 10-ti minut při teplotě 60-80°C.
3. Vzorky s vysušenou emulzí se založí do vakuového rámu a přikryjí se fotografickou předlohou s nakreslenou sítí. Po odčerpání vzduchu vývěvou dojde k dokonalému přilnutí předlohy na vzorek. Takto jsou vzorky osvětlovány UV výbojkami. Ultrafialové světlo vyvolá v osvětlených místech kyselou chemickou reakci. Osvětlování se provádí 3 minuty.
4. Po expozici je provedeno vyvolání, tj. že osvětlená místa se odleptají 1% roztokem NaOH a na neosvětlených místech zůstává povlak emulze. Potom následuje opláchnutí vodou a sušení vzorků proudem teplého vzduchu.
5. Na takto připravených vzorcích se uskuteční vlastní elektrochemické leptání pomocí laboratorního zařízení, které je k dispozici na KPT.

6. Po elektrochemickém leptání se provede zásaditým roztokem neutralizace a zbylá emulze se z povrchu vzorků odstraní lihem. Nakonec se vzorky opláchnou vodou, osuší a nakonzervují minerálním olejem.

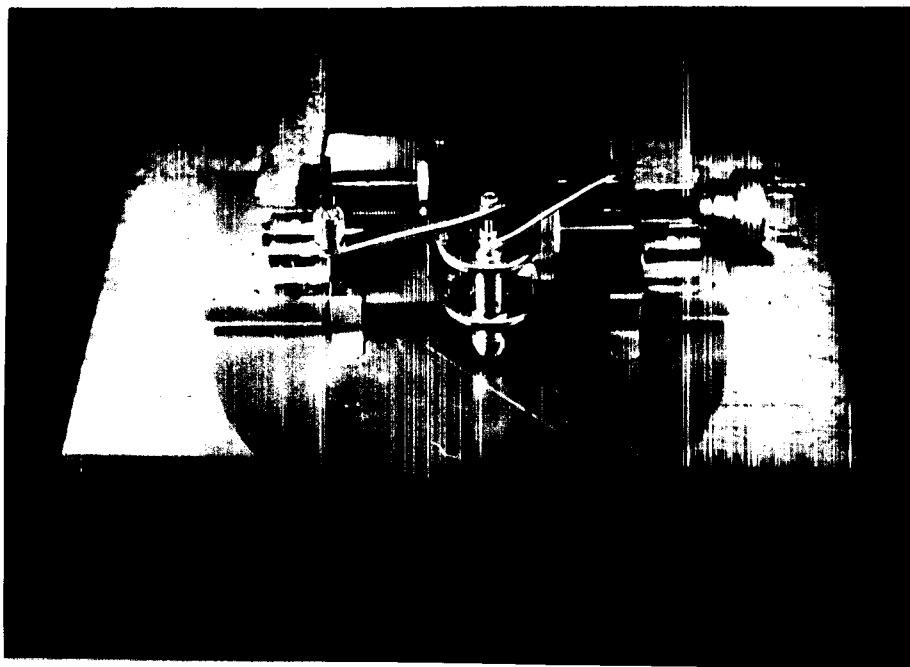
Metoda rytí se užívá na vytváření deformačních sítí malých rozměrů. Tvoří se tzv. řetízky. Detail řetízku na již vytaženém kalíšku je na obr.22a. Umístění tohoto detailu je zřejmé z obr.22b, kde je vidět i způsob nanesení sítě na povrch kalíšku.



Obr.22 Kruhové elementy deformační sítě nanesené metodou rytí

Princip této metody spočívá v přemisťování materiálu z povrchu vzorku. Sítě lze zhotovit buď kružítkem s hrotem,

nebo speciálním přípravkem (obr.23). Tato metoda je velmi pracná, lze jí však vynést sítě s velmi malými kroužky (až 1mm).

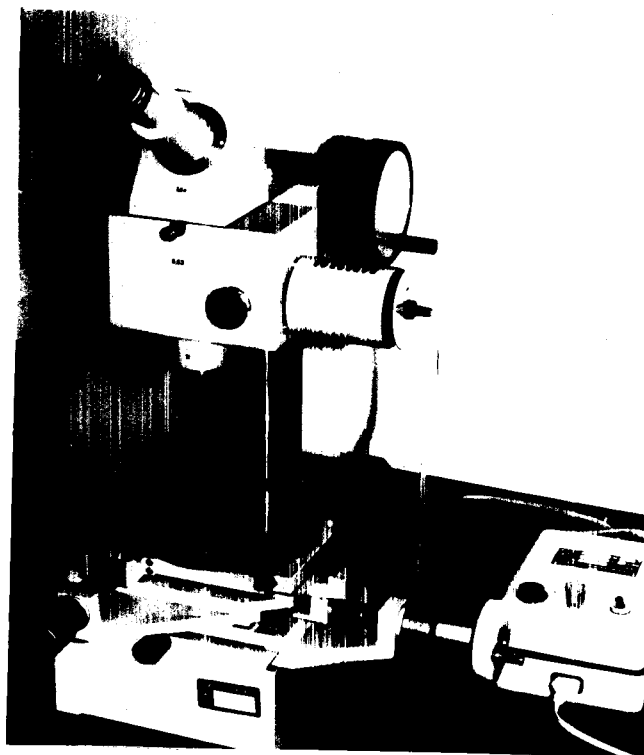


Obr.23 Přípravek k rytí sítí

Nanesené sítě touto metodou mají kruhové elementy o průměru 1,52mm, protože nebyl k dispozici na KPT přípravek jiný, tvořící menší elementy. Této síti bylo použito z toho důvodu, že je velmi dobře čitelná i po krajním plastickém přetvoření.

Po vytažení nástřihů se, ze změny kruhového elementu deformační sítě, změřily na dílenském mikroskopu (obr.24) charakteristické délky L_1 a L_2 a pomocí vztahů (2.10) byly vypočteny hodnoty φ_1 a φ_2 , které jsou uvedeny v tabulce č.6 (příloha č.4). Graficky jsou tyto hodnoty zaneseny pro každý materiál do obr.25 a obr.26 v závislosti na vzdálenosti středů elementů po vytažení. Zároveň byl sestrojen DMP, který je na obr.27.

DMP pro materiály KH 20E, KH 20E konti a KH 21W se



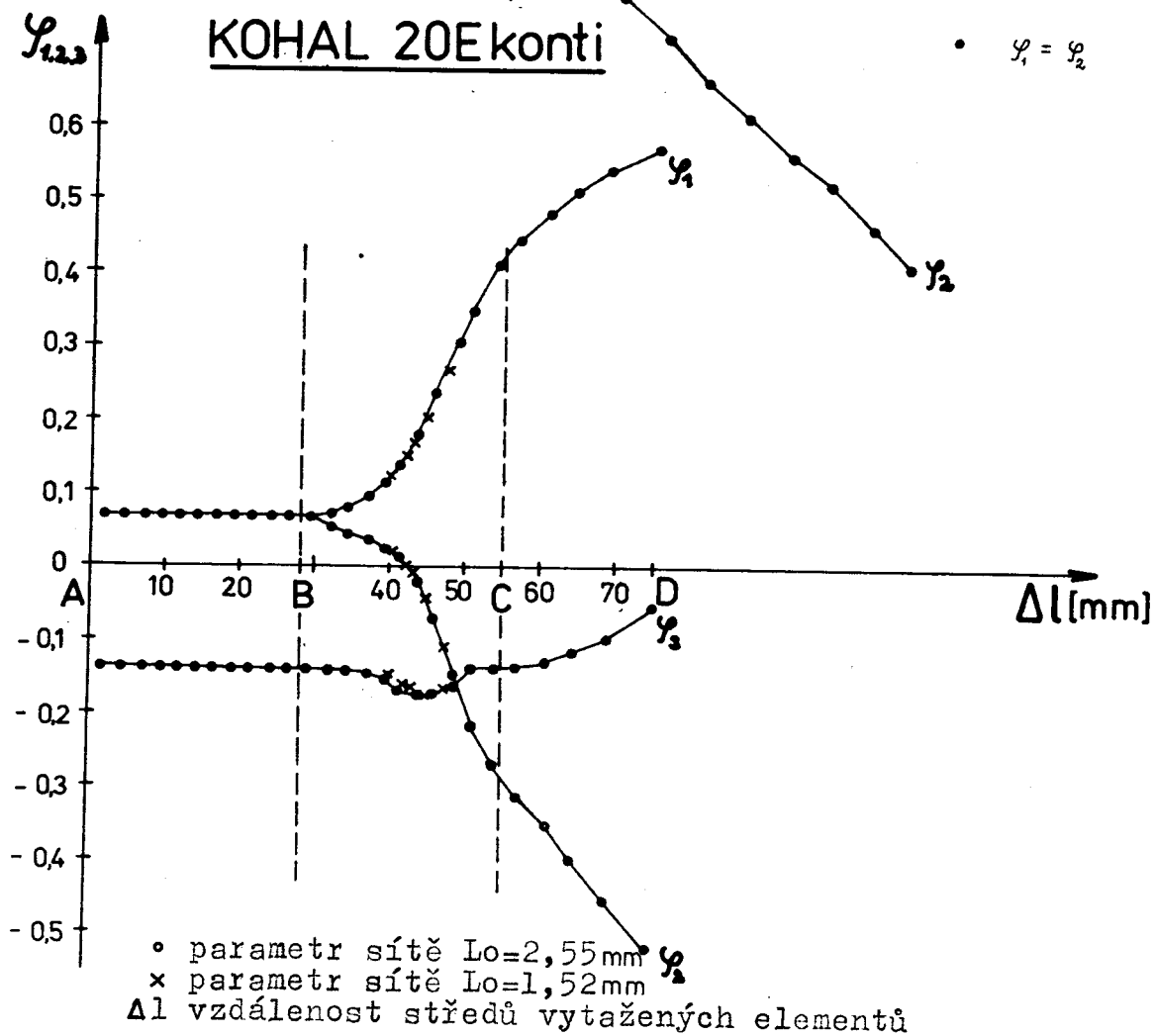
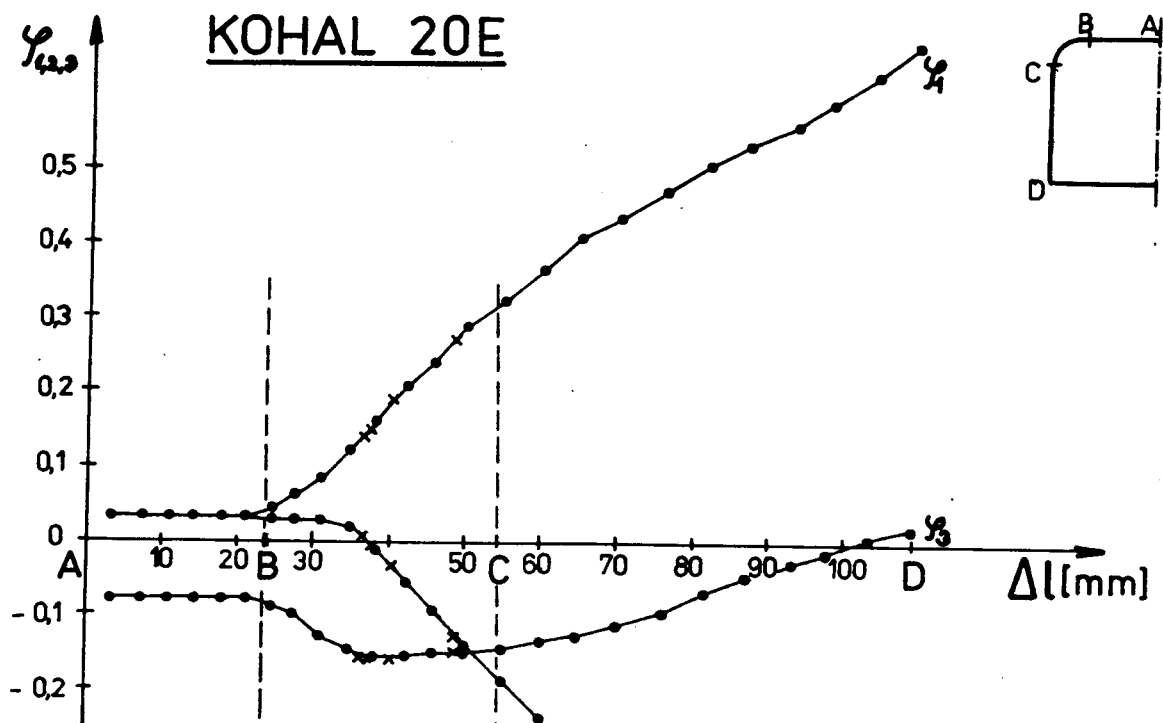
Obr.24 Dílenský mikroskop

zabývá /10/ a KH 23P /11/. Jejich výsledky jsou znázorněny na obr.28. Pro plech KH 23P byla zjišťována mezní přetvoření pouze orientačně na několika vzorcích, proto jsou vyřešené body spojeny lineárně a není jimi proložena křivka.

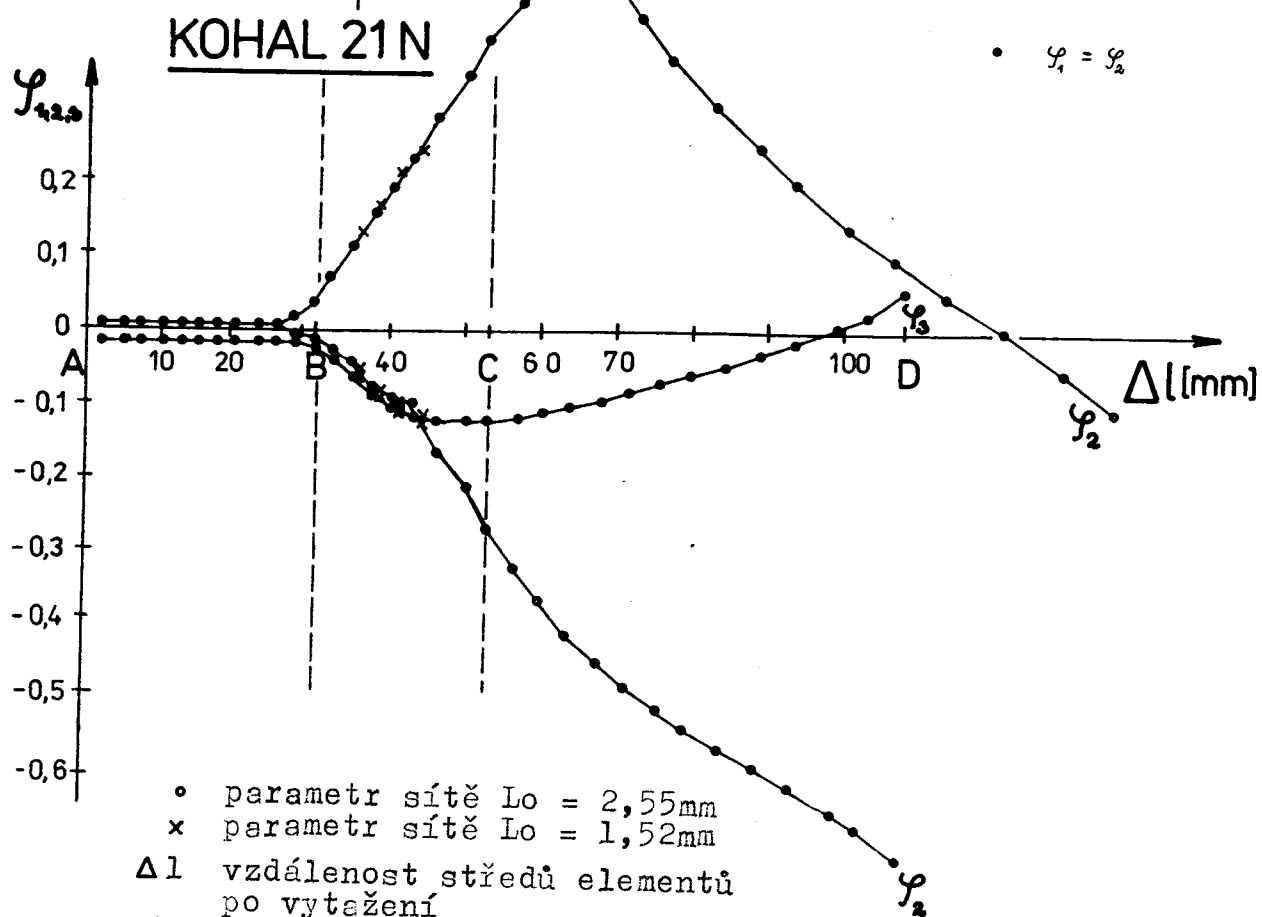
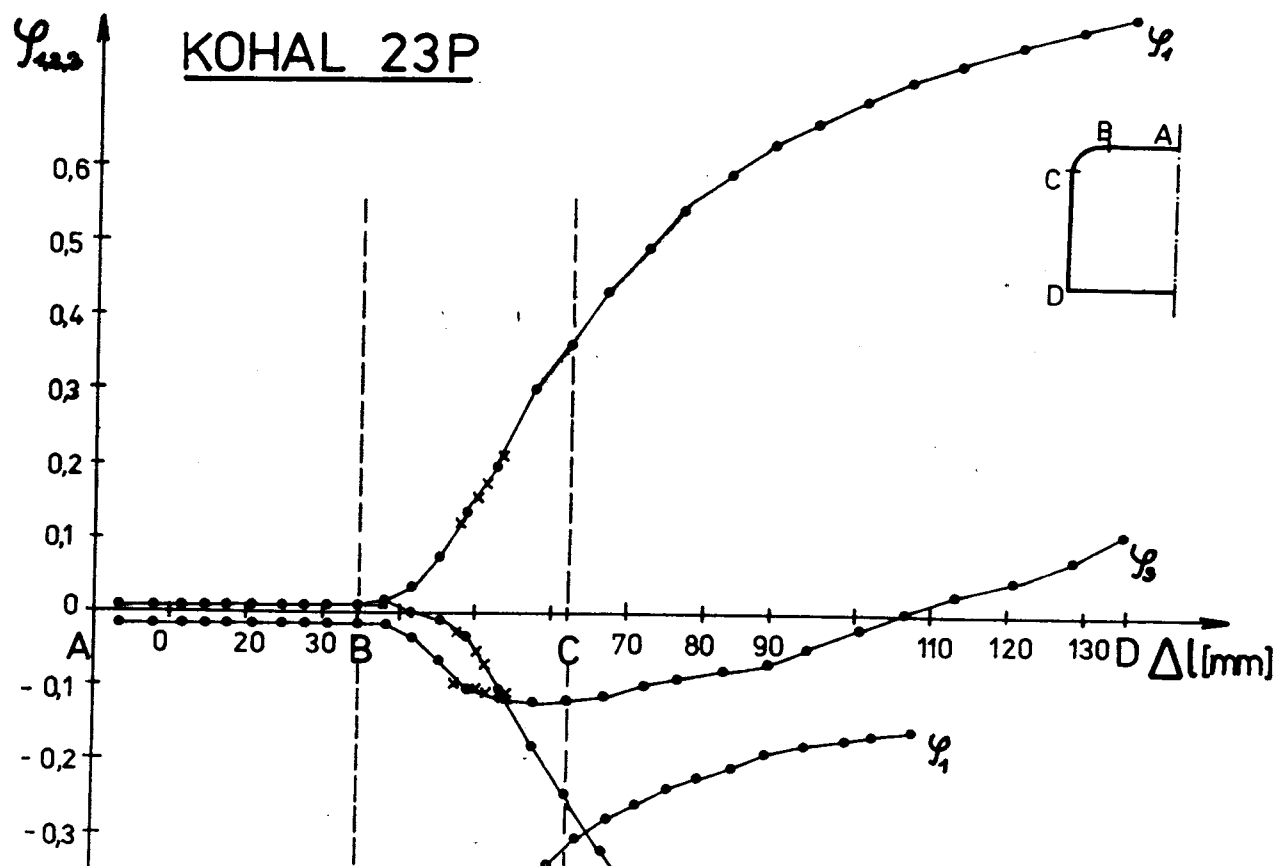
Mechanické vlastnosti zkoumaných materiálů jsou řešeny v pracích /12/ a /13/. Vyřešené hodnoty jsou uvedeny v tabulce č.7 a graficky znázorněné v sloupcovém diagramu na obr.29.

Tabulka č.7 Průměrné hodnoty zkoušených materiálů /13/

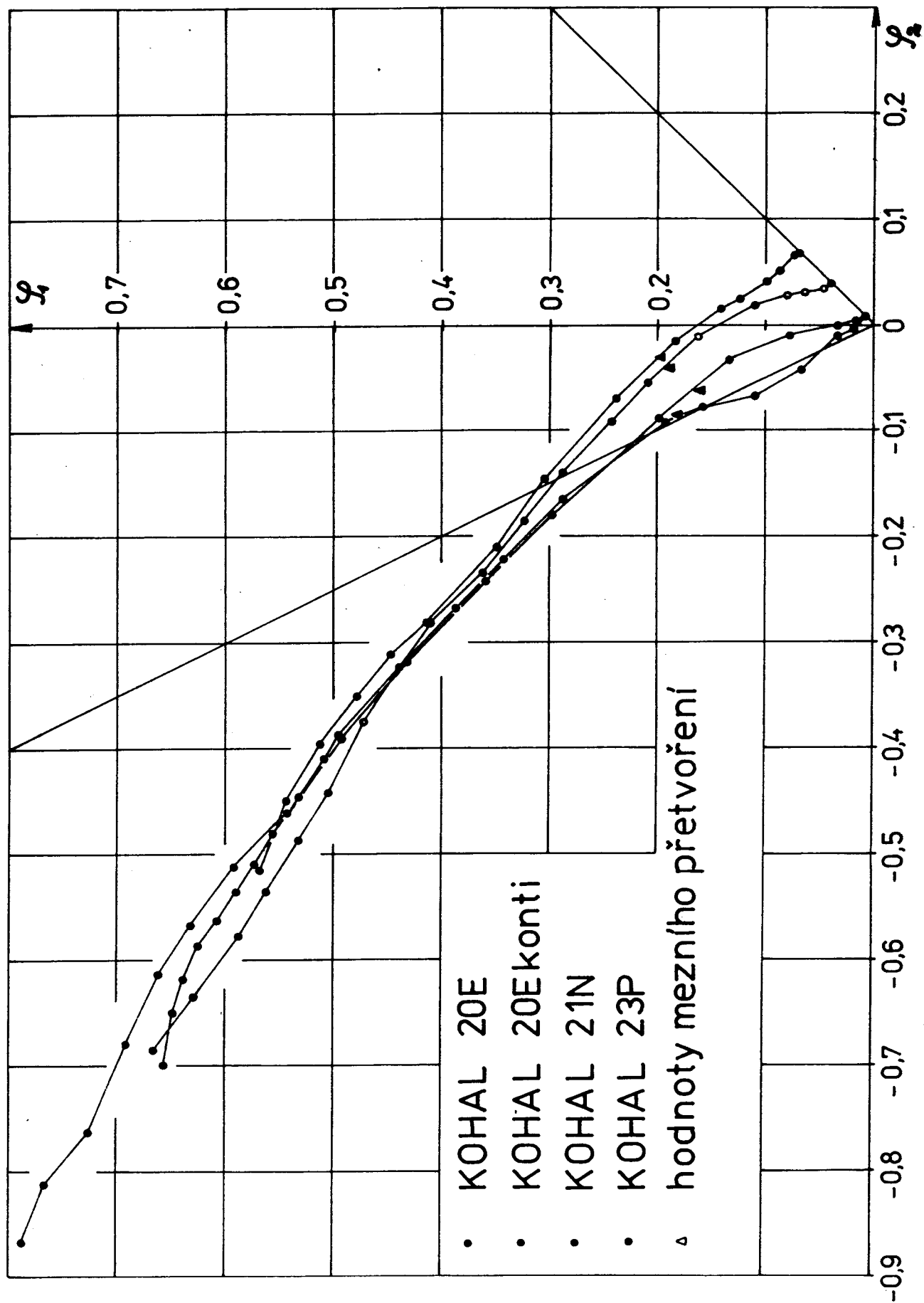
	R_e [MPa/	R_m [MPa/	A_{80} [%]	r_s	n_s
KOHAL 20E	186,7	319,3	40,65	1,326	0,229
KOHAL 20E konti	189,2	315,6	34,46	1,808	0,226
KOHAL 23P	256,1	391,2	32,55	1,266	0,168
KOHAL 21N	324,0	359,6	30,61	1,438	0,192



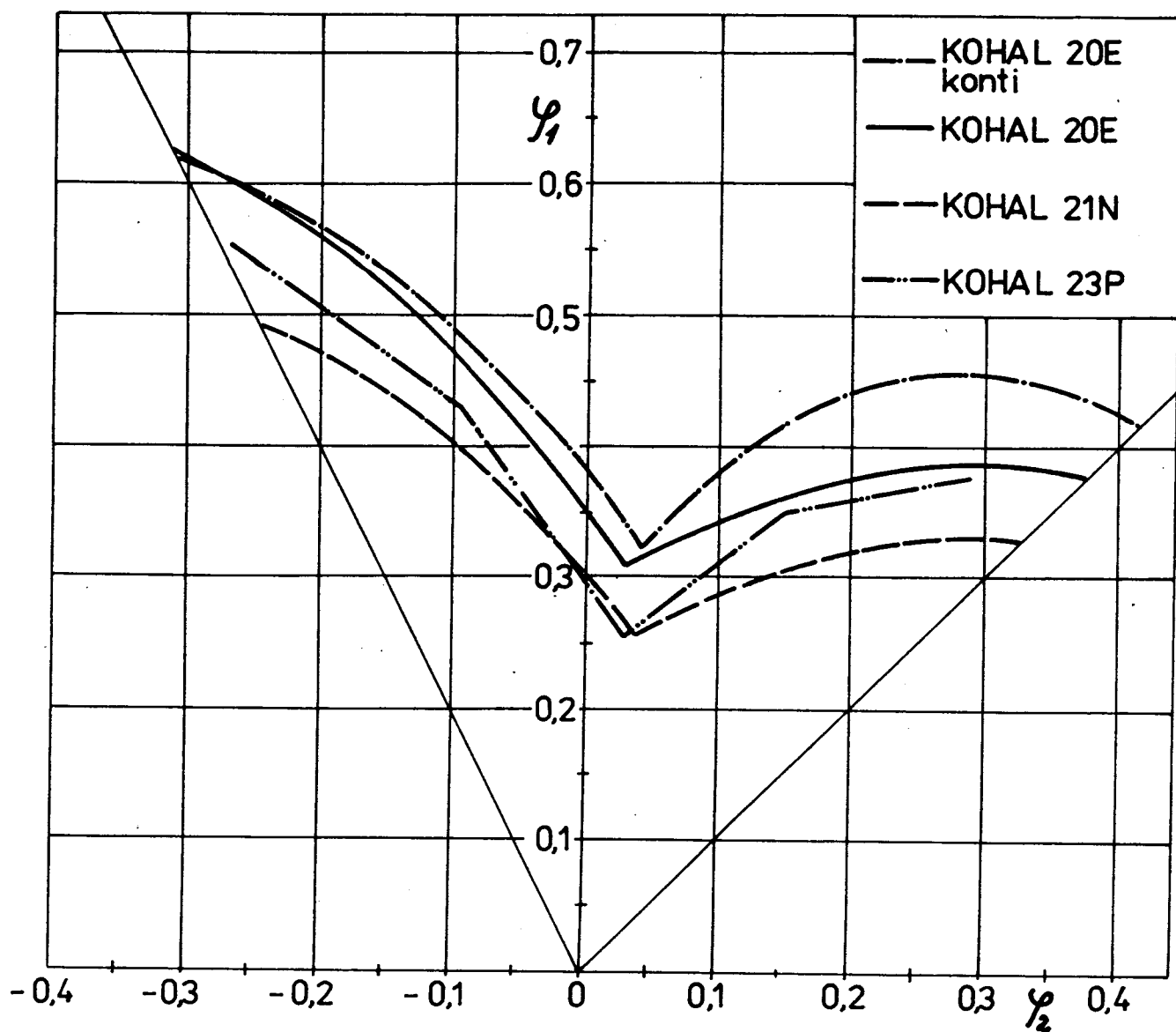
Obr.25 Rozložení přetvoření na vytažených válcových nádobách



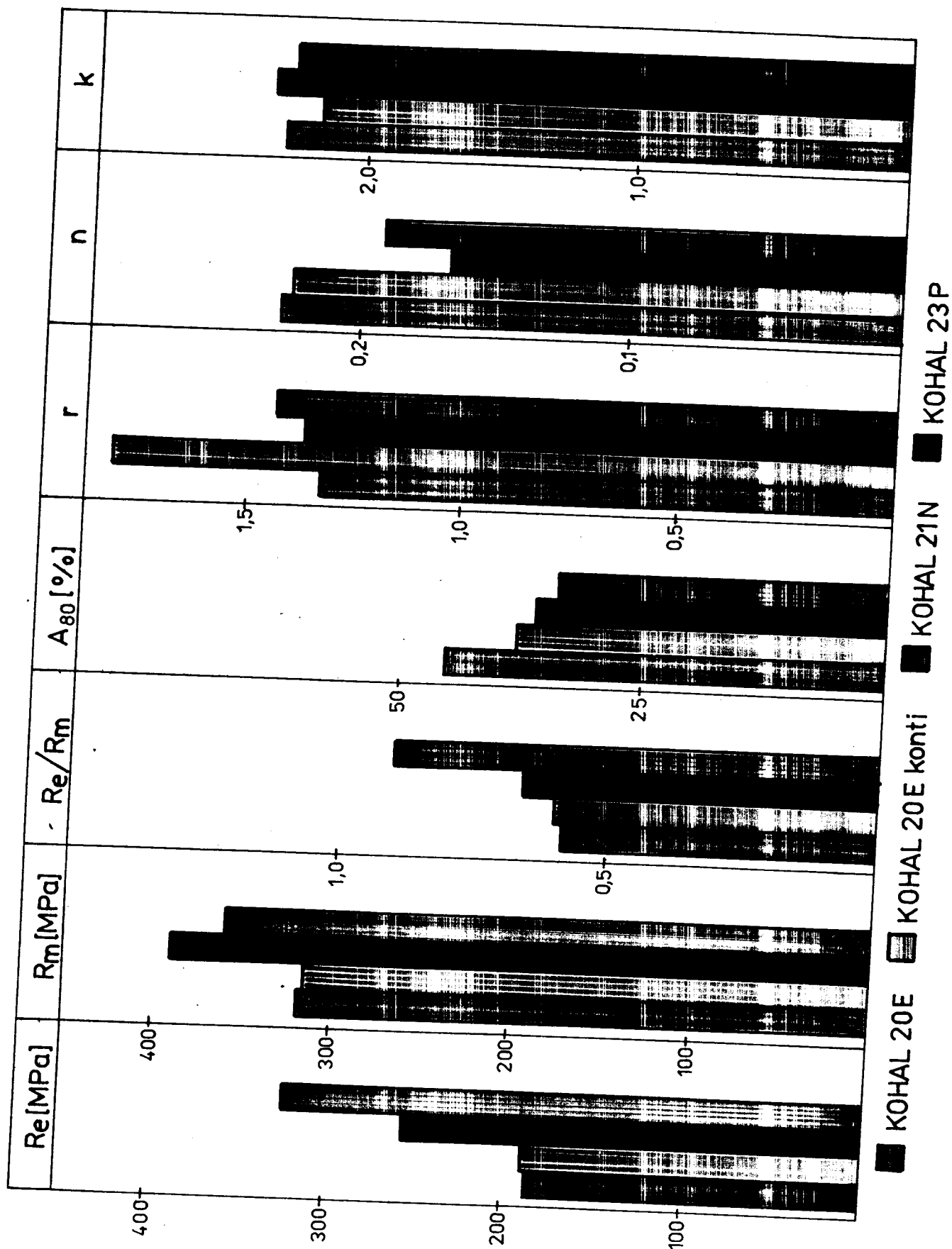
Obr.26 Rozložení přetvoření na vytažených válcových nádobách



Obr.27 DMP sestavený z hodnot zjištěných kalíškovací zkouškou



Obr.28 Diagram mezních přetvoření zkoušených materiálů /10-11/



Obr.29 Sloupcový diagram vlastností zkoušených materiálů

5. D I S K U S E

Pro zjištění vhodnosti materiálů k hlubokému tažení byla provedena zkouška kalíškovací a k posouzení jejich dalších vlastností bylo využito prací [10], [11], [13].

Pomocí zkoušky kalíškovací se vypočítal stupeň tažení, který jak je vidět na obr.29 byl nejvyšší u KOHALU 23P, což znamená, že tento materiál prokázal největší schopnost hlubokého tažení. Zároveň, pomocí této zkoušky, byly sestaveny grafy závislostí φ , φ_2 , φ_3 na vzdálenosti středů deformovaných elementů (obr.25,26). Oblast nejnáchylnější pro vznik lomu byla ověřena dvěma druhy deformačních sítí o různých průměrech, přičemž lze tvrdit, že oběma způsoby byly získány tytéž hodnoty z čehož vyplývá, že rozdílné průměry elementů sítě se na výsledcích neprojevíly.

Z velikostí naměřených hodnot φ a φ_2 v oblasti A-B (dno kalíšku) lze usoudit mez pevnosti materiálů. Čím jsou hodnoty φ a φ_2 v této oblasti nižší, tím je vyšší pevnost materiálu. S pomocí této závislosti byla zjištěna vyšší pevnost u KOHALU 23P a KOHALU 21N v porovnání s KOHALEM 20E a KOHALEM 20E konti. Správnost tohoto úsudku potvrzuje i sloupcový diagram na obr.29.

Hodnoty r a n získané tahovou zkouškou [13], byly zakresleny v obr.15, z kterého je zřejmé, že KOHAL 23P a KOHAL 21N se hodí pro tažení s převládajícím tlakem = vlastní hluboké tažení bez ztenčení stěny.

Z obr.28 vyplývá, že nejlepší tvařitelnost jednoznačně vykazuje KOHAL 20E konti a to především v pravé větvi, kde jsou hodnoty mezních přetvoření oproti KOHALU 20E vyšší až o 18%. KOHAL 23P je horší než KOHAL 20E a v případě KOHALU 21N se jedná o nejhorší tvařitelnost z uvedených materiálů. V porovnání s KOHALEM 20E je to až 20%.

I DMP na obr.27 sestavený z hodnot zjištěných kalíškovou zkouškou ukazuje nejlepší tvařitelnost KOHALU 20E konti

a nejhorší KOHALU 21W.

Špatnou plastičnost obou zkoumaných plechů potvrzuje i vysoký poměr meze kluzu a meze pevnosti. Ukazuje, že KOHAL 21W ji má velmi špatnou, KOHAL 23P dobrou a KOHAL 20E velmi dobrou (z obr.29).

6. Z Á V Ě R

Práce byla zaměřena na posouzení vhodnosti pevnostních plechů KOHAL 23P a KOHAL 21N k hlubokému tažení v porovnání s klasickými plechy (KOHAL 20E, KOHAL 20E konti). K tomuto účelu byla použita zkouška kalíškovací, jejíž výsledkem byl zjištěný stupeň tažení.

Zkoušky bylo využito také k určení tvažitelnosti materiálu. Za tímto účelem byly na nástřihy nanесeny dva druhy deformačních sítí. Jedna byla zhotovena fotografickou metodou kombinovanou s elektrochemickým leptáním, druhá byla rytá. Ze zkušeností při proměřování hodnot L_1 a L_2 na dílenském mikroskopu je možné tvrdit, že síť vyrobená rytím je lépe čitelná, což bylo oceněno hlavně při zjišťování deformací v bezprostřední blízkosti lomu. Z naměřených hodnot L_1 a L_2 byly vypočteny hodnoty přetvoření φ_1 a φ_2 a z nich byl sestaven diagram mezních přetvoření. Při porovnání tohoto diagramu (obr.27) a diagramu na obr.28 je vidět rozpor. Jak to, že hodnoty určené při kalíškovací zkoušce jsou tak rozdílné od hodnot, které byly změřeny při vypínání kruhových nástřihů s různým kruhovým vybráním, přičemž se jedná o stejné materiály. Vyřešení tohoto problému by mohlo být zajímavým tématem pro další práce.

Pro komplexnější porovnání zkoušených plechů s klasickými byly uvedeny i další mechanické vlastnosti. Bylo zjištěno, že nové plechy jsou vhodné tam, kde dominující deformací je tlak, že jsou pevnější než klasické a jejich nevýhodou je horší plasticita. Pro automobilový průmysl však mohou mít, hlavně KOHAL 23P, velké uplatnění vzhledem ke své pevnosti, která dovolí použít menší tloušťku plechu, tím zmenší celkovou hmotnost vozidla a zvýší jeho bezpečnost.

7. S E Z N A M P O U Ž I T É L I T E R A T U R Y

- /1/ BENEŠ, K. a kol.: Lisování. 1.vyd. Praha 1971.
- /2/ POLLÁK, L.: Anizotropia a hlbokoťažnosť ocelových plechov.
1.vyd. Bratislava 1978.
- /3/ VELES, P.: Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov.
1.vyd. Bratislava 1985.
- /4/ DRASTÍK, F. - ELFMARK, J. a kol.: Plastometry a tvažiteľ-
nosť kovů. 1.vyd. Praha 1958.
- /5/ ČSN 42 0310
- /6/ ČSN 42 0406
- /7/ DUDA, M.: Vliv chemického složení na vlastnosti plechů.
[Diplomová práce], VŠST, Liberec, 1985.
- /8/ PAINTER, M.J. - PEARCE R.: Saving money with high strenght
formable steels - part 1. Sheet Metal Industries
1978.
- /9/ BACHORÍK, L.: Plechy pre automobilový priemysel.
1.vydání. Mladá Boleslav 1986.
- /10/ BUCAR, Z.: Diagramy mezních přetvoření.
[Písenná část k odborné kandidátské zkoušce.]
VŠST. Liberec. 1982.
- /11/ NĚMEC, M.: Hodnocení tvažitelnosti tenkých plechů.
[SVOČ.] VŠST. Liberec. 1986.
- /12/ ŠTOREK, P.: Materiálové charakteristiky plechu MM 20E.
[Diplomová práce] VŠST. Liberec. 1987.
- /13/ TAKÁČOVÁ, J.: Vliv chemického složení na vlastnosti plechů.
[Diplomová práce.] VŠST. Liberec. 1987.

8. S E Z N A M P ř í l o h

Příloha č.1: Plechy válcované za studena.

Příloha č.2: Přehled hlubokotažných ocelí.

Příloha č.3: Přehled průměrných vlastností plechů válcovaných za studena.

Příloha č.4: Hodnoty φ a φ_2 vytažených kalíšků.

P O D Ě K O V Á N Í

Závěrem chci poděkovat s. ing. Zdeňku Bucharovi
za pomoc a odborné rady v průběhu řešení diplomové práce
a hlavně pak při rozboru získaných výsledků.

Tabulka č.2 Plechy válcované ze studena [9]

počet výrobků	základní technické parametry typické hodnoty					rozměry		
	R_e [MPa]	R_m [MPa]	A_{50} [%]	r	n_s	tloušťka [mm]	šířka [mm]	délka [mm]
1. legované fosforem 1	225 nebo min 260	355 360 460	40 A_{80} min 28	1,4-1,7 1,4-1,9	0,18-0,20 0,18-0,20	0,50-2,0	750-1500	1200-4000
2. s vytvrzováním při vypalování 1	200	350	39	1,5-1,9	0,18-0,20	0,50-2,0	750-1500	1200-4000
3. pro hluboké tažení 1	160	320	44	2,0	0,22	0,50-1,70	750-1500	1200-4000
4. z nízkolegovaných ocelí 1 - 2	min 380 420	440 - 580 470 620	A_{80} min 20 18			0,7 - 2,0	800 - 1400	1600 - 4000

Tabulka č.3 Přehled hlubokotežných ocelí [9]

označení ocelí	chemické složení - obsah prvků [%]							mechanické vlastnosti		
	C	Mn	Si	P	S	Al	Ti	R _e [MPa]	R _m [MPa]	A ₈₀ [%]
	max	max	max	max	max	max	max			
KH 180E	0,07	0,04	-	0,025	0,025	0,025	-	180	294 - 353	38
KH 20E	0,07	0,04	-	0,025	0,025	0,025	-	196	294 - 353	36
KH 24	0,11	0,50	-	0,025	0,025	0,030 0,080	-	230	340 - 400	32
KH 25E	0,10	0,45	0,15	0,030	0,025	-	0,20	250	340 - 400	29
KH 30E	0,10	0,60	0,15	0,030	0,025	-	0,20	300	400 - 510	26
KH 36E	0,14	0,80	0,25	0,030	0,025	-	0,20	360	450 - 580	22
KH 23P	0,07	0,60	0,10	0,070	0,020	0,030	-	280	330 - 410	29
11 305	0,07	0,40	-	0,025	0,025	0,025	-	216	294 - 353	36
11 342.21	0,10	0,50	0,15	0,025	0,025	-	0,13	250	340 - 460	29
11 402.21	0,10	0,50	0,25	0,025	0,025	0,080	-	280	380 - 500	28

niob = 0,01 - 0,04

Tabulka č.4 Přehled průměrných vlastností plechů
válcovaných za studena [9]

označení oceli	R_e [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]	HRB	R_e/R_m [%]	r	n
KH 180E	170 174	360 308	42,0 40,1	33	55,5 56,5	1,67	0,221
KH 20E	186 191	312 320	39,2 38,0	36,5	59,6 59,9	1,73	0,218
11 305	210 231	320 355	40,0 38,4	39,5	64,5 65,2	1,52	0,220
KH 24	223 231	347 355	35,5 36,0	48,4	64,2 65,0	1,48	0,210
KH 25E	276 288	400 416	31,6 31,1	53,0	69,0 69,2	1,30	0,197
KH 30E	311 325	430 442	28,3 28,0	55,5	72,3 73,5	1,28	0,173
KH 36E	368 376	471 480	23,1 23,4	68,0	78,1 78,3	1,18	0,162

Příloha č.4

Tabulka č.6 Hodnoty γ a φ vytaženého kalíšku bez porušení
+ Hodnoty γ a φ porušeného kalíšku (změřeno v okolí místa ztráty stability)

KOHAL 20E		KOHAL 20E konti		KOHAL 23P		KOHAL 21N	
0,038	0,038	0,068	0,068	0,007	0,007	0,008	0,008
0,038	0,038	0,068	0,068	0,007	0,007	0,008	0,008
0,038	0,038	0,068	0,068	0,007	0,007	0,008	0,008
0,038	0,038	0,068	0,068	0,007	0,007	0,008	0,008
0,038	0,038	0,068	0,068	0,007	0,007	0,008	0,008
0,038	0,038	0,068	0,068	0,007	0,007	0,008	0,008
0,038	0,038	0,068	0,068	0,007	0,007	0,008	0,008
0,049	0,035	0,068	0,068	0,007	0,007	0,008	0,008
0,065	0,031	0,068	0,068	0,007	0,007	0,008	0,008
0,078	0,029	0,068	0,068	0,007	0,007	0,008	0,008
0,121	0,019	0,068	0,068	0,007	0,007	0,008	0,008
0,163	-0,013	0,068	0,068	0,009	0,005	0,019	-0,003
0,209	-0,055	0,068	0,068	0,015	0,003	0,035	-0,012
0,241	-0,093	0,072	0,065	0,035	-0,001	0,068	-0,025
0,288	-0,141	0,083	0,047	0,077	-0,012	0,110	-0,042
0,324	-0,185	0,100	0,041	0,138	-0,033	0,159	-0,078
0,367	-0,234	0,119	0,024	0,199	-0,090	0,192	-0,089
0,410	-0,283	0,142	0,015	0,298	-0,179	0,231	-0,095
0,434	-0,321	0,183	-0,015	0,360	-0,243	0,286	-0,165
0,471	-0,378	0,238	-0,072	0,433	-0,319	0,342	-0,220
0,508	-0,442	0,309	-0,146	0,492	-0,394	0,389	-0,268
0,533	-0,486	0,349	-0,211	0,540	-0,451	0,438	-0,321
0,561	-0,536	0,412	-0,278	0,591	-0,512	0,472	-0,362
0,589	-0,577	0,443	-0,312	0,633	-0,568	0,511	-0,412
0,630	-0,635	0,479	-0,350	0,660	-0,615	0,536	-0,445
0,668	-0,686	0,516	-0,395	0,691	-0,676	0,557	-0,480
		0,542	-0,450	0,718	-0,719	0,579	-0,507
		0,568	-0,515	0,741	-0,766	0,591	-0,535
				0,767	-0,814	0,608	-0,562
				0,787	-0,869	0,626	-0,586
				0,809	-0,918	0,635	-0,617
						0,649	-0,650
						0,650	-0,671
						0,656	-0,712
+		+		+		+	
0,141	0,011	0,126	0,026	0,110	-0,025	0,121	-0,055
0,158	-0,005	0,159	0,005	0,156	-0,053	0,165	-0,079
0,192	-0,036	0,178	-0,007	0,172	-0,070	0,213	-0,095
0,273	-0,125	0,209	-0,041	0,213	-0,105	0,239	-0,121
		0,276	-0,109				
Δ		Δ		Δ		Δ	
0,191	-0,039	0,190	-0,025	0,163	-0,063	0,185	-0,088

Δ Průměrné hodnoty "+", vynesené na obr.27