D I P L O M O V Á P R Á C E

Hana Berková

Vysoká škola: strojní a textilní Liberec Katedra: materiálu a tváření

Fakulta: strojní Školní rok: 1967/68

DIPLOMNÍ ÚKOL

pro Hanu Berkovou

odbor strojírenská technologie

Protože jste splnil požadavky učebního plánu, zadává Vám vedoucí katedry ve smyslu směrnic ministerstva školství a kultury o státních závěrečných zkouškách tento diplomní úkol:

Název tématu: Hydrostatické zkoušení plechů z hlediska materiálové hodnoty "n".

Pokyny pro vypracování:

1. Materiálová hodnota "n" z hlediska vyjádření mezních hodnot přetvoření a aproximace křivky zpevnění
2. Princip přímé a nepřímé metody stanovení uvedené materiálové hodnoty
3. Návrh doplňkového měřicího zařízení k přípravku na hydrostatické zkoušky plechů pro přímá měření
4. Provedení zkoušek pro vybrané druhy plechů
5. Rozbor a zhodnocení naměřených hodnot

Autorské právo se řídí směrnicemi MŠK pro státní závěrečné zkoušky č. j. 31 727/62-III/2 ze dne 13. listopadu 1962-Věstník MŠK XVIII, sešit 11 ze dne 31. 8. 1962 § 19 autorského zákona č. 115/53 Sb.

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

V 32/1968 S

Rozsah grafických laboratorních prací:

Rozsah průvodní zprávy: 50 stran

Seznam odborné literatury:

1. ŠČEGLOV, B.A.: K vaprosu ob izpytaniji listovoj stali na dvychosnoje rastjaženije metodom gydravličeskoj vytjažki. Sb. "Iseledovanija v oblasti obrabotki metallov davljenijem", AN SSSR 1960.
2. JOHNSON, W. - DUNCAN, J.L.: The Use of the Biaxial Test Extensometer. "Sheet Metal Industries", 42, 1965, č. 456.
3. DUNCAN, J.L.: Measurement of Strain Hardening in Sheet Metals. "Sheet Metal Industries", 44, 1967, č. 483.
4. KOŘÍNEK, M. - MIKEŠ, V.: Příspěvek k problému stanovení lisovatelnosti plechů pro daný tvar výlisku. "Sborník vědeckých prací VŠST v Liberci", 1965.

Vedoucí diplomní práce: Doc. Ing. Miroslav Kořínek CSc

Konsultanti: Ing. Viktor Mikeš

Datum zahájení diplomní práce: 15. prosince 1967

Datum odevzdání diplomní práce: 17. června 1968

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ LIBEREC fakulta strojního inženýrství * 302 *

Doc. Ing. Miroslav Kořínek CSc
Vedoucí katedry

Prof. Ing. Cyril Höschl
Děkan

V Liberci dne 6. prosince 1967

1. ÚVOD

Tažené díly a výlisky z plechu mají v současné době stále větší význam. Nároky na výlisky stále rostou co do množství i co do kvality. Dříve zastávaly především funkci obalu, jako např. víka, kryty, obložení, nádoby, přepážky. Nyní však se výlisky z plechu stávají stále více funkčními elementy. Jsou funkčně namáhány, přenášejí síly např. samonosná karoserie automobilu, kyvná vidlice, výroba letadel, armatur. Nahrazují často díly dříve získávané ze svařenců, výkovků apod. Výlisky mají oproti jiným hodně výhod. Jsou levnější, dají se vyrobit celkem jednoduše, jsou tuhé a velmi lehké. Tyto vlastnosti vedou k jejich rozsáhlému využití.

Například v USA připadá na 1 obyvatele 330,- kg plechu,
v NSR " " 160,- kg "
v ČSSR " " 80,- kg "

Náš plán na rok 1970 představuje 180 kg plechu. Tento vzrůst použití plechu u nás je hlavně podmíněn vybudováním Východoslovenských železáren v Košicích, které začínají vyrábět kvalitní hlubokotažnou ocel včetně její povrchové úpravy. Spotřeba tenkých plechů na výrobu strojírenského spotřebního zboží na výstavbu nových strojírenských a občanských objektů totiž stále vzrůstá. Vhodná kombinace tenkých plechů s umělými hmo-

tami umožňuje jejich uplatnění u strojírenských výrobků hlavně ve stavebnictví.. Vybudování VSŽ bylo nutné, neboť naše hutní výroba má malou kapacitu, a to se u nás projevuje chronickým nedostatkem tenkých plechů,hlavně plechů vyhovující jakosti. Z tohoto důvodu byl brzděn rozvoj výrobků z plechu. Byli jsme odkázáni hlavně na dovoz. Jestliže porovnáme rok 1955 až 65, dovoz plechů vzrostl ze 110 000 na 680 000 tun. V hutním kombinátě VSŽ uvádějí do provozu zařízení vysoké technické úrovně na výrobu pásů válcovaných za tepla i za studena do tloušťky 10 mm. Do roku 1970 budou VSŽ podstatně krýt tuzemskou spotřebu. ČSSR se zařadí v oblasti výroby a spotřeby tenkých plechů mezi přední průmyslové země. S rozvojem výroby ocelových plechů a pásů a umělých hmot se do popředí zájmu dostává zajištění technické přípravy výroby a zpracování lakovaných plechů a pásů potažených umělými hmotami. Je to hlavně na různé dílce ve stavebnictví jako obvodové a střešní panely, příčky, okapy, garáže a další. Další široké uplatnění je při výrobě spotřebního zboží jako ledniček, praček a výroba kancelářského zařízení apod. Z hlediska zpracování většího množství plechů zůstává ve zpracovatelské oblasti vážným problémem rozvoj výroby nástrojů, tvářecích strojů.

Rozsáhlé použití plechu předpokládá dokonalou znalost jeho vlastností. Zjišťování jeho vlastností se věnuje ve světě stále větší pozornost. Na rozdíl od ostatních technologií tváření, kde jsou běžně prováděny teoretické rozbory, se v oblasti tváření plechu vychází především ze zkušeností a z empiricky získaných poznatků. To se projevuje např. tím, že nejsou běžně k dispozici křivky zpevnění plechu, kterých je nutně zapotřebí při jakékoliv početní analýze procesu tažení.

Nyní je tedy asi takováto situace. Byly položeny základy pro výpočetní analýzu, provádějí se nové typy zkoušek, určují se vztahy mezi jednotlivými zkouškami.

Hydrostatická zkouška, které je věnována tato práce, je jednou z těch zkoušek, které svým charakterem umožňují získání takových materiálových charakteristik, kterých je zapotřebí při provádění početní analýzy z teoretických rozborů.

Další postup vychází z definice technologické tvářitelnosti (tj. schopnost materiálu k velkým přetvořením bez porušení) jako funkce materiálových vlastností a stavu napjatosti.

2. MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY

Materiálové charakteristiky se klasickým způsobem nejlépe dají zjistit především použitím zkoušky tahové a kalíškové. Viz literatura / 2 /.

a) Tahová zkouška

Při zkoušce tahem obdržíme čtyři srovnatelné materiálové hodnoty, podle kterých lze hodnotit lisovatelnost:

pevnost v tahu	σ_{pt}	$[kp \cdot mm^{-2}]$
mez kluzu v tahu	σ_{kt}	$[kp \cdot mm^{-2}]$
tažnost	δ	$[\%]$
kontrakce	ψ	$[\%]$

Na lisovatelnost má také vliv anisotropie, která představuje citlivost mechanických vlastností, výše uvedených, na směr.

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100 [\%] \qquad \sigma_{pt} = \frac{P_{max}}{F_0} \qquad \psi = \frac{F_0 - F}{F_0} \cdot 100 [\%]$$

Anisotropií podle / 3 / zjišťujeme jako směrovost vlastností σ_{pt}, σ_{kt}, δ, ψ v různých rovinách plechu (závisí na vlastnostech plechu). V důsledku výroby plechu válcováním v jednom převládajícím směru deformace dochází k směrovému uspořádání jednotlivých krystalů, z kterých se materiál skládá. Toto uspořádání se nazývá texturou. Směrové uspořádání krystalů s převláda-

jícím jedním směrem (délkou) lze měnit tepelným zpracováním (rekrystalizací). Textura i pásmové uspořádání ovlivňuje výsledky mechanických zkoušek v závislosti na směru, ve kterém se zjišťují. Obvykle nejlepší vlastnosti zjišťujeme na plechu ve směru válcování a nejhorší ve směru kolmém.

Tahovou zkouškou získáme:

a) základní mechanické vlastnosti, které charakterizují materiál z hlediska jeho pevnosti a tvárnosti,

b) z průběhu diagramu $\sigma-\varepsilon$ je si možno vytvořit názor na vhodnost materiálu ke tváření,

c) porovnáním mechanických vlastností zkoušeného materiálu ve směru a kolmo na směr válcování, zjistíme jeho anisotropii, která má přímý vliv na vznik cípování po tažení,

d) poměr $\frac{\sigma_{kt}}{\sigma_{pt}}$ ukazuje na to, jaké výsledky můžeme při tažení dosáhnout:

1. má-li plech "velkou" σ_{pt}, pak v průběhu tažení může přenést velkou tažnou sílu (tj. v oblasti přenosu síly - na zaoblení dna nádoby a tvořícím se plášti)

2. má-li také současně "nízkou" σ_{kt}, pak při tažném procesu vznikají menší odpory proti přetváření (tj. v oblasti tvárné deformace, kdy se z pří-

střihu tvoří plášť nádoby).

Z toho plyne, že plechy s nízkou hodnotou $\frac{\sigma_{kt}}{\sigma_{Pt}}$ získanou z tahové zkoušky jsou pro tažení vhodné. To platí ovšem jen přibližně, neboť proces tažení probíhá za jiných vztahů napjatosti než u trhací zkoušky.

B. Kalíšková zkouška podle Erichsena /2/

Vhodnost plechu pro tažení je podle této zkoušky charakterizována mírou prohloubení h.
Mechanismus této zkoušky se přibližuje tažnému procesu podstatně více než u zkoušky tahové. Upnutý zkoušený plech je namáhán tvarovým tažníkem; v plechu vzniká prohloubení, které je vyvoláno vytahováním plechu v radiálním a tangenciálním směru na úkor tloušťky. Působící síla vyvolá dvojosý stav napjatosti - radiální a tangenciální tahové napětí, které je ještě kombinované třením mezi tažníkem a plechem.
Uvedená napjatost vzniká při tažení plechu jen ve speciálních případech, a proto také velikost prohloubení h nám jednoznačně neurčuje vhodnost plechu pro technologii tažení.
Erichsenova zkouška však má určité výhody, je jednoduchá, rychlá, nenáročná na zhotovení vzorků i spotřebu materiálu. Její vhodnost použití podle autorova názoru je omezena na vzájemné porovnání plechů mezi sebou popř. na technologie, u kterých průběh přetvárného pro-

cesu a napjatosti je stejný jako při zkoušce.

2.1. Vliv stavu napjatosti a materiálových charakteristik na mezní hodnoty přetvoření

Tvářitelnosti plechů, jak již bylo řečeno dříve, se v současné době věnuje velká pozornost. Byla vypracována metoda provádění analýzy procesu tažení výlisků z plechu z hlediska mezních hodnot přetvoření. Nyní jsou proto výsledky některých zkoušek tvářitelnosti plechů posuzovány podle jiných hledisek než dříve a také metoda jejich provádění je jiná. To platí pro tahovou a hydrostatickou zkoušku především. Materiálové charakteristiky plechu se budou proto zjišťovat hlavně těmito zkouškami. U tahové zkoušky můžeme považovat za nejdůležitější materiálové charakteristiky: rovnoměrné přetvoření, charakteristiky normálové anisotropie a křivky zpevnění. U hydrostatické zkoušky jsou to mezní hodnoty přetvoření a křivky zpevnění / 4 /. Hydrostatickou zkouškou dosáhneme maximální hodnoty přetvoření při tažení plechu, dostaneme tak křivku zpevnění pro největší rozsah intenzity přetvoření oproti tahové zkoušce, kde mezní hodnota je poloviční.

V průběhu tažení výlisků nepravidelných tvarů může dojít k nestabilnímu stavu. Literatura / 4, 5, 6 / uvádí tři typy porušení stability tvářecího procesu:

a) ztráta stability, ke které dojde při velmi malých přetvořeních v prvé fázi tažení, v okamžiku, který odpovídá vzniku kluzové čáry prodlevy na diagramu tahové zkoušky,

b) ztráta stability v důsledku vzniku vln v rovině plechu

c) ztráta stability v oblasti velkých přetvoření, která odpovídá okamžiku dosažení meze pevnosti tvářeného materiálu. Vyznačuje se místním zmenšením tloušťky plechu (analogie vzniku krčku při tahové zkoušce) a má za následek bezprostřední porušení výlisku.

Ztráta stability se projevuje poklesem tvářecích sil.

Hydrostatická zkouška souvisí se ztrátou stability v oblasti velkých přetvoření, budeme se proto zabývat tímto posledním typem ztraty stability.
Technologická tvářitelnost je dána materiálovými vlastnostmi kovu a stavem napjatosti.
Při tažení plechu je možno předpokládat dvojosou napjatost / 5 /. Z výlisku vyjmeme elementární plošku (obr. 1) a mezi hlavními normálovými napětími zavedeme vztah

$$\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 = 1 : m : 0 \qquad (2.1)$$

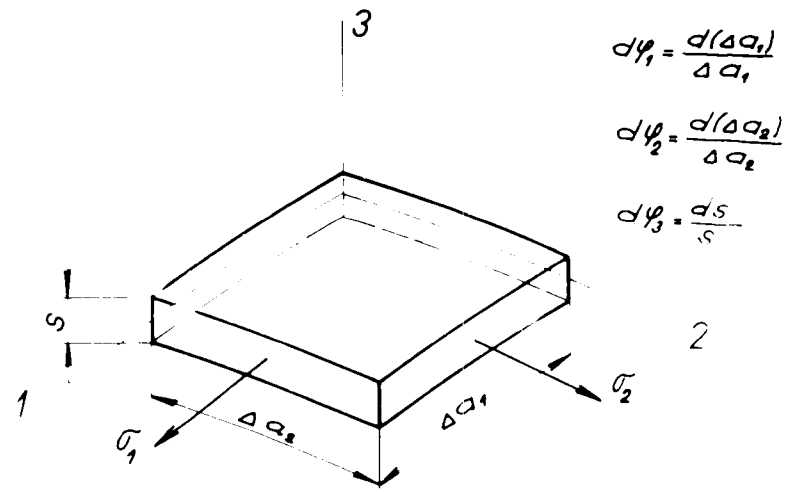
To znamená, předpokládáme, že napětí působící ve

směru tloušťky plechu je rovno nule.

Ze vztahu (2.1) vyplývá, že

$$m = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \qquad (2.2)$$

kde m je veličina charakterizující napjatost ve zvoleném místě.



Obr. č. 1. Hlavní normálová napětí působící na elementární plošku výlisku

Podle obr. 1 můžeme vyjádřit změny po přetvoření ve směrech 1, 3:

$$d\varphi_1 = \frac{d(\Delta a_1)}{\Delta a_1} \qquad d\varphi_2 = \frac{d(\Delta a_2)}{\Delta a_2} \qquad d\varphi_3 = \frac{dS}{S} \qquad (2.3)$$

Dále předpokládáme, že změna objemu dV = 0

$$(d\varphi_1 + d\varphi_2 + d\varphi_3) = 0 \qquad (2.4)$$

$$\varphi_1 = f_1(m)\,\varphi_i \qquad \varphi_2 = f_2(m)\,\varphi_i \qquad \varphi_3 = f_3(m)\,\varphi_i \qquad (2.5)$$

Veličinu m můžeme podle / 4, 5, 6 / vyjádřit takto:

$$m = \frac{2\varphi_2 + \varphi_1}{2\varphi_1 + \varphi_2} \qquad (2.6)$$

φ_1, φ_2 jsou konečné hodnoty hlavních přetvoření

φ_1, φ_2 stanovíme na výlisku použitím deformační sítě a indexy volíme tak, aby $m \in \langle -1, 1 \rangle$

Chceme-li daný materiál charakterizovat křivkou zpevnění, budeme ji zaznamenávat v souřadnicích intenzita napětí σ_i a intenzita přetvoření φ_i. Podle / 5 / platí

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$
$$\varphi_i = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{(\varphi_1 - \varphi_2)^2 + (\varphi_2 - \varphi_3)^2 + (\varphi_3 - \varphi_1)^2} \qquad (2.7)$$

Dosazením (2.2) do (2.7) vyjádříme σ_i vztahem

$$\sigma_i = \sigma_1\sqrt{1 - m + m^2} \qquad (2.7a)$$

Použitím zákona stálosti objemu lze φ_i přepsat

$$\varphi_i = \frac{2}{3}\sqrt{\varphi_1^2 + \varphi_1\varphi_2 + \varphi_2^2} \qquad (2.7b)$$

Z obr. 1 vyplývá velikost tvářecích sil.

$$P_1 = \sigma_1 \Delta a_2 S$$
$$P_2 = \sigma_2 \Delta a_1 S \qquad (2.8)$$

V průběhu tváření P_1, P_2 rostou, materiál se zpevňuje. Chceme-li tvářet, musí platit

$$dP_1 > 0$$
$$dP_2 > 0 \qquad (2.9)$$

Předpokládejme, že $|\sigma_1| > |\sigma_2|$, podle vztahu (2.2) $m \in \langle -1, 1 \rangle$. Pak stačí řešit případ stability ve směru 1.

Ze vztahu (2.8) a (2.9) dostaneme

$$d\sigma_1 \Delta a_2 S + \sigma_1 d(\Delta a_2) S + \sigma_2 \Delta a_2 \cdot dS > 0$$

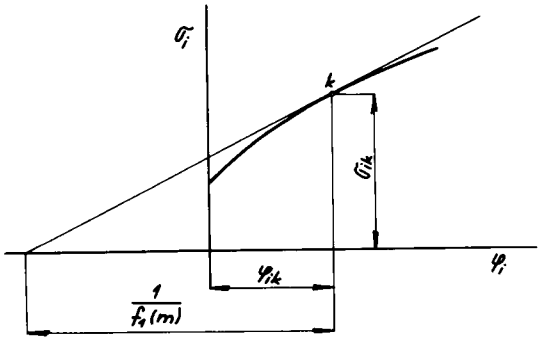
$$\frac{d\sigma_1}{\sigma_1} + \frac{d(\Delta a_2)}{\Delta a_2} + \frac{dS}{S} > 0$$

Podle (2.3) platí $\frac{d\sigma_1}{\sigma_1} + d\varphi_2 + d\varphi_3 > 0$

Předpokládáme dV = 0 $\qquad \frac{d\sigma_1}{\sigma_1} > d\varphi_1 \qquad (2.10)$

užitím (2.5) lze psát $\qquad \frac{d\sigma_i}{d\varphi_i} > f_1(m)\,\sigma_i \qquad (2.11)$

Experimentálně zjištěná závislost $\sigma_i = \sigma_i(\varphi_i)$ je obecně znázorněná na obr. 2.



Obr.č. 2. Obecné znázornění vztahu $\sigma_i = \sigma_i(\varphi_i)$

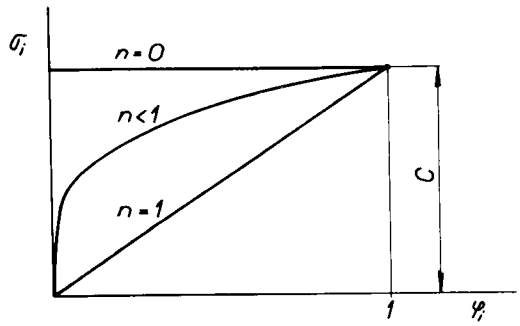
Pro mezní stupeň přetvoření (bod k) přepíšeme (2.11)

$$\left(\frac{d\sigma_i}{d\varphi_i}\right)_k = f_1(m) \cdot \sigma_{ik} \qquad (2.12)$$

Aproximace závislosti $\sigma_i = \sigma_i(\varphi_i)$ se většinou provede tímto způsobem

$$\sigma_i = C \cdot \varphi_i^n \qquad (2.13)$$

Obecná interpretace tohoto vztahu je na obr. 3.



Obr.č. 3. Aproximace závislosti $\sigma_i = \sigma_i(\varphi_i)$

Pro případ aproximace (2.13) ze vztahu (2.12) vyplývá

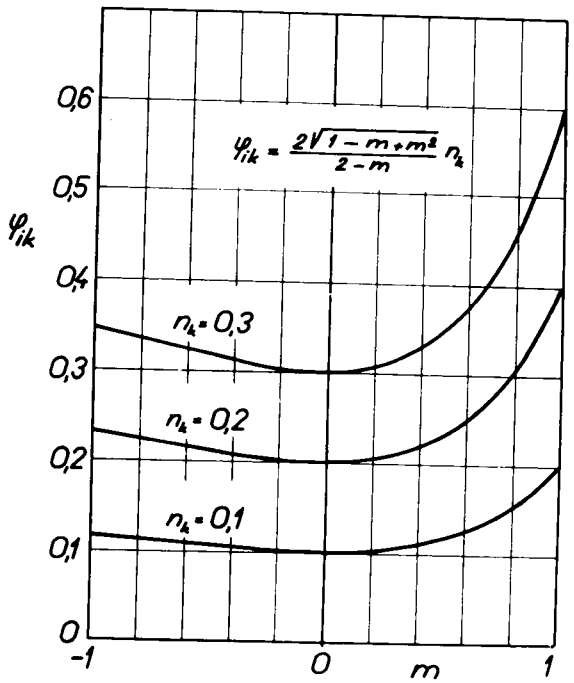
$$\varphi_{ik} = \frac{n}{f_1(m)} \qquad (2.14)$$

dosazením $f_1(m)$ ze vztahu (2.5) vyjádříme φ_{ik} takto

$$\varphi_{ik} = \frac{2\sqrt{1-m+m^2}}{2-m} \cdot n \qquad (2.15)$$

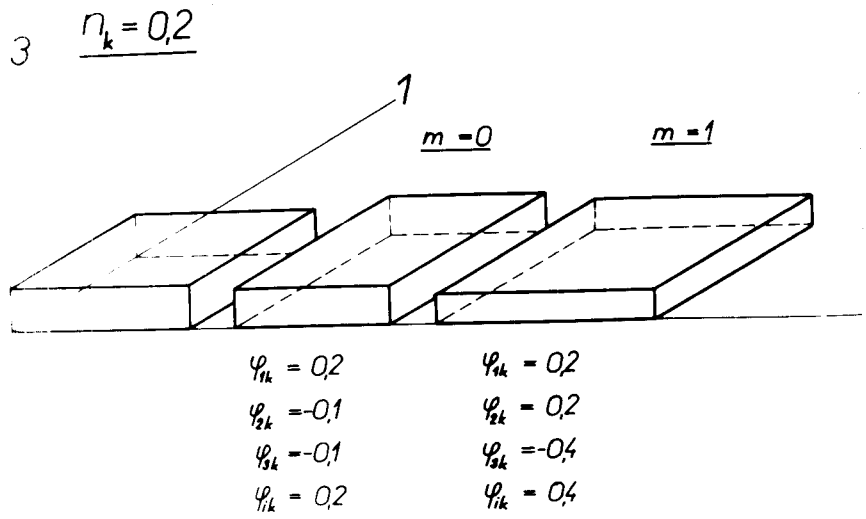
φ_{ik}... mezní hodnota přetvoření jako funkce napjatosti m a materiálové hodnoty n. Mezní hodnoty přetvoření je tedy dosaženo, je-li přírůstek tvářecí síly roven nule.

Křivky mezních hodnot přetvoření φ_{ik} pro n_k = 0,1; 0,2; a 0,3 jsou na obr. 3.a



Obr.č. 3a. Křivky mezních hodnot přetvoření pro různé hodnoty n_k

Názorné zobrazení způsobu přetvoření elementu pro n = 0,2 na mezní hodnoty při m = 0 a m = 1 je na obr. 4.



Obr.č. 4. Přetvoření elementu pro n = 0,2

2.2. Určování materiálových hodnot z hlediska analýzy procesu tažení. Literatura / 6, 7, 8 /

Ze vztahu (2.2) pro $\sigma_2 = 0$ (jednoosá napjatost) vyplývá, že m = 0. Dosazením do vztahu (2.15) pak dostáváme

$$\varphi_{ik} = n \qquad (2.16)$$

Předpokládáme-li v tomto případě izotropní materiál, tj. $\varphi_3 = \varphi_2 = -\frac{\varphi_1}{2}$ dostáváme použitím vztahu (2.7)

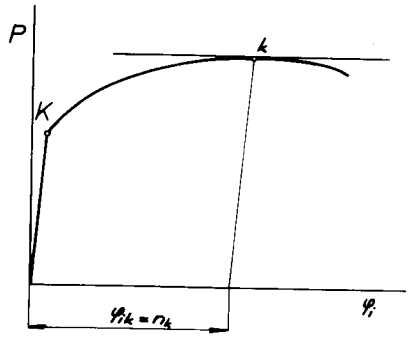
$$\varphi_{1k} = \varphi_{1k} \qquad (2.17)$$

Z porovnání obou vztahů (2.16) a (2.17) vyplývá, že

$$n = \varphi_{1k} \qquad (2.18)$$

kde φ_{1k} představuje maximální rovnoměrné přetvoření. odpovídající mezi pevnosti (dp = 0) ve směru hlavního normálového napětí, tj. v podélném směru zkušebního vzorku.

Materiálovou hodnotu"n"je tedy možné určit provedením a vyhodnocením tahové zkoušky (obr. 5).



Obr.č. 5. Určení materiálové hodnoty "n" vyhodnocením tahové zkoušky.

2.3. Křivky zpevnění podle Kuzdase

Křivkou zpevnění bývá označována závislost přetvárného odporu materiálu na stupni deformace při daných teplotně rychlostních podmínkách a daném hydrostatickém tlaku. (Přetvárný odpor je napětí, které připadá na

jednotku plochy pásma deformace).

Přetvárný odpor se mění s rostoucím stupněm deformace, což je odvislé od postupného stupně zpevnění materiálu. Tato změna je však pouze jedním z možných projevů procesu zpevnění. To znamená, že popisovaná závislost"křivka zpevnění"nemůže být jednoznačným ukazatelem tak složitého procesu jaký představuje deformační zpevnění materiálu.

Křivky zpevnění bývají zaznamenávány zpravidla v těchto souřadnicích:

přetvárný odpor - poměrné prodloužení
přetvárný odpor - poměrné stlačení
přetvárný odpor - poměrné zúžení
přetvárný odpor - logaritmická poměrná deformace
intenzita napětí - intenzita přetvoření (deformace)
oktaedrické napětí - oktaedrický skos (smyk)
maximální smykové napětí - maximální skos (smyk)

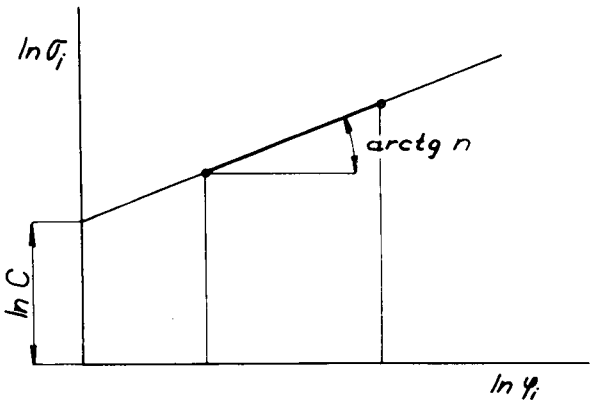
3. ZPŮSOBY URČOVÁNÍ MATERIÁLOVÉ HODNOTY "n"

a) První způsob určení vyplývá ze vztahu (2.18), který říká, že:

Hodnota "n" zde z fyzikálního hlediska představuje uvedené maximální rovnoměrné přetvoření na mezi pevnosti. Tento způsob určování materiálové charakteristiky "n" lze označit jako přímou metodu, protože vychází z rozboru vztahu (2.15).

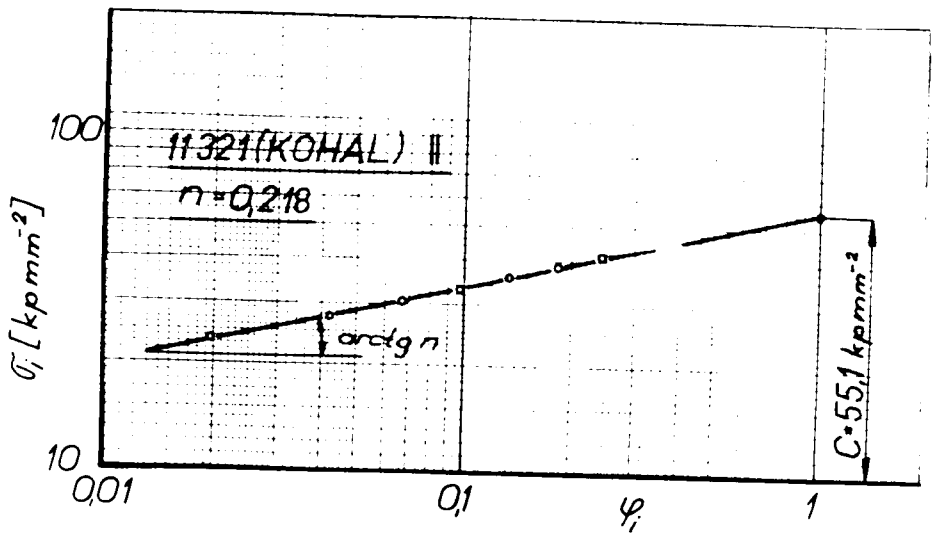
b) Metoda nepřímá určování materiálové hodnoty "n" vychází z hlediska aproximace funkčních hodnot křivky zpevnění. Logaritmováním vztahu (2.13) dostaneme $\lg \sigma_i = \lg C + n \cdot \lg \varphi_i$,

kde "n" představuje směrnici přímky viz obr. 6.



Obr.č. 6. Stanovení materiálové hodnoty "n" nepřímo.

Praktický příklad určení materiálových hodnot "C" a "n" touto metodou je zřejmý z obrázku 7.



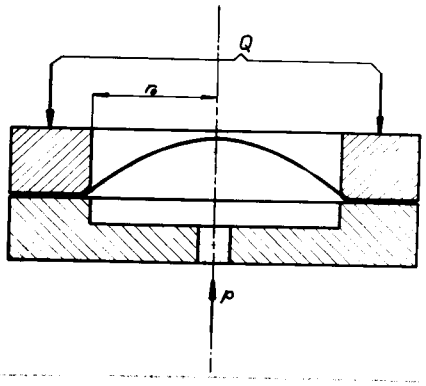
Obr.č. 7. Praktický způsob určení materiálových hodnot

4. HYDROSTATICKÁ ZKOUŠKA

4.1. Princip hydrostatického zkoušení plechů a základní předpoklady

Princip podle /9/.

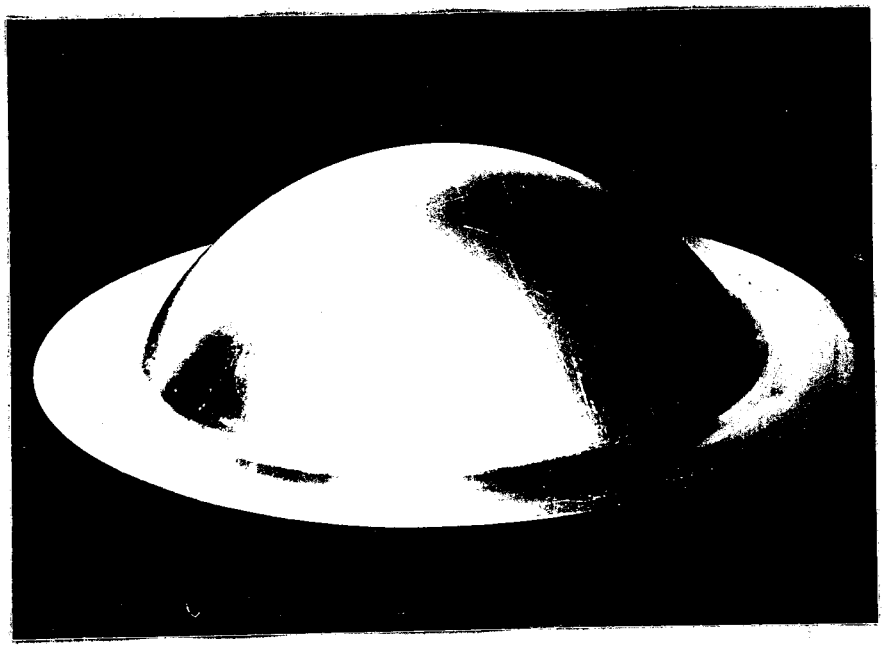
Je to zkouška prohloubením, při které průtažník je nahrazen tlakovou kapalinou (olejem) nebo plastickou hmotou přiváděnými pod tlakem. Zkoušený materiál je během zkoušky pevně upnut po obvodě zkušebního zařízení. Tlakem oleje se plech vyboulí až praskne. Vhodnost plechu pro tažení se posuzuje podle velikosti vyboulení, vzhledu povrchu a tvaru dutiny. Během zkoušky se měří na manometru tlak, který udává sílu potřebnou k prohloubení. Na povrchu membrány vzniká dvojosá napjatost.



Obr.č. 8. Princip hydrostatické zkoušky.

Ščeglov ve své práci uvádí, že pro spolehlivé upnutí vzorku po obvodu příruby je třeba, aby síla Q přidržovače byla aspoň třikrát větší než síla daná vydouvacím tlakem. Platí tedy přibližně :

$$Q \approx 10\, r_0^2 \cdot p_{max}$$



Obr.č. 9. Fotografie deformovaného vzorku

Předpokládáme, že vzorek je deformován za podmínek rovnoměrné dvouosé napjatosti, tj. tvar vzorku je osově symetrický. V pólu membrány pak pro hlavní napětí platí

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_0 \; ; \quad \sigma_3 = 0 \quad \text{čili} \quad m = 1$$

Z podmínky rovnováhy ve vrcholu vzorku pak vyplývá, že

$$\sigma_0 = \frac{R \cdot p}{2 \cdot S} \qquad (4.1)$$

kde **R** ... poloměr křivosti

p ... tlak oleje

s ... okamžitá tloušťka plechu

Fotografie deformovaného vzorku je na obr. 9.

Hlavním napětím odpovídají přetvoření φ ze stálosti zákona objemu (**dV = 0**) platí

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi = -\frac{\varphi_3}{2} \qquad (4.2)$$

$$-\varphi_3 = \lg \frac{s_0}{s} \qquad (4.3)$$

φ_3 ... přetvoření ve směru tloušťky plechu

s_0 ... původní tloušťka

s ... tloušťka po přetvoření

Intenzita napětí σ_i a intenzita přetvoření φ_i budou pak vyjádřeny po dosazení do vztahu (2.7)

$$\sigma_i = \sigma_0 \qquad \varphi_i = \varphi_3 = 2\varphi \qquad (4.4)$$

Použitím vztahu (4.1) a (4.2) je přepíšeme

$$\sigma_i = \frac{R \cdot p}{2 \cdot S} \qquad \varphi_i = -\lg \frac{s_0}{s} \qquad (4.4a)$$

Ze vztahu pro vyjádření mezní hodnoty přetvoření (2.15) vyplývá pro $m = 1$

$$\varphi_{ik} = 2n \tag{4.5}$$

a ze (4.4)

$$\varphi_{ik} = \varphi_{sk} \tag{4.6}$$

Materiálovou hodnotu "n" ze vztahu (4.5) a (4.6) vyjádříme takto

$$n = \frac{\varphi_{sk}}{2} \tag{4.7}$$

U hydrostatické zkoušky, jak již bylo dříve uvedeno jsou nejdůležitějšími materiálovými charakteristikami mezní hodnoty přetvoření a křivky zpevnění.

Mezní hodnoty přetvoření byly určeny v předchozím odstavci. Jestliže chceme z hydrostatické zkoušky získat křivku zpevnění $\sigma_i = \sigma_i(\varphi_i)$ je nutno znát tyto hodnoty **R**, **p**, **s** nebo průměr kruhového elementu **L'** (v oblasti vrchlíku, je to vlastně průměr nanesené deformační sítě), který odpovídá vydutí **H**.

Určování hodnot **R**, **p**, **s**.

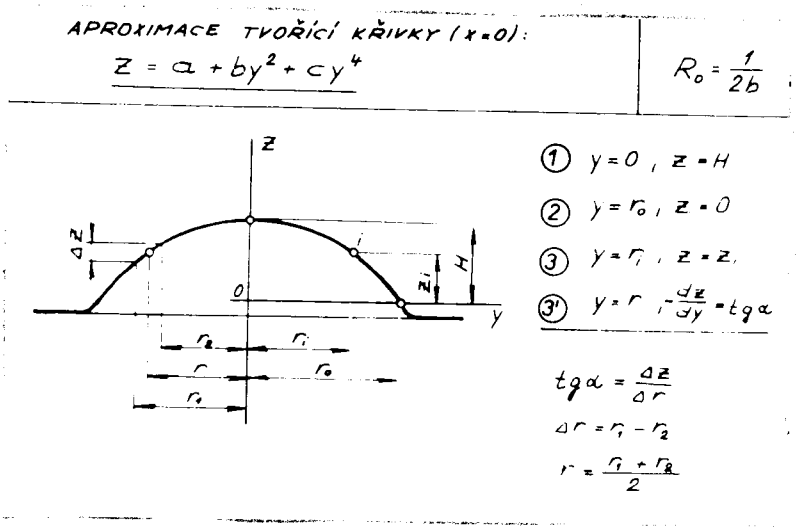
Pro sestrojení křivky zpevnění $\sigma_i = \sigma_i(\varphi_i)$ musíme znát R = R (H), p = p (H), $\varphi_i = \varphi_i(H)$.

Zjištění závislosti p = p (H) je jednoduché. Složitěji určujeme R = R (H) a $\varphi_i = \varphi_i(H)$. Metodika provedení vyhodnocování hydrostatické zkoušky je dána způso-

bem zjišťování uvedených funkčních závislostí. Jedná se především o rozdílnost v určování R = R (H), $\varphi_i = \varphi_i(H)$, R = R (H) a $\varphi = \varphi(H)$ určujeme dvěma způsoby.

4.2. Hydrostatická zkouška podle Tomlenova, Šěeglova, Ruběnkové.

Princip hydrostatické zkoušky podle uvedených autorů je zřejmý z obr. 10.



Obr. 10. Princip hydrostatické zkoušky podle Tomlenova, Ščeglova a Ruběnkové

Předpokládejme, že tvořící křivku membrány lze aproximovat mnohočlenem čtvrtého řádu

$$z = a + by^2 + cy^4 \qquad (4.8)$$

Po vyčíslení koeficientů a, b, c z okrajových podmínek (obr. 10)

$$y = 0 \qquad z = H$$

$$y = r_0 \qquad z = 0$$

$$\frac{dz}{dy} = -tg\alpha$$

Vztah (4.8) má tento tvar

$$z = H + \frac{r_0 \cdot tg\alpha - 4H}{2r_0} \cdot y^2 + \frac{2H - r_0 \cdot tg\alpha}{2r_0^4} \cdot y^4 \qquad (4.9)$$

R_0 ... poloměr křivosti v pólu, stanovíme ho jako poloměr oskulační kružnice v bodě Z = H a y = 0

$$R = \frac{1}{2b} \qquad (4.10)$$

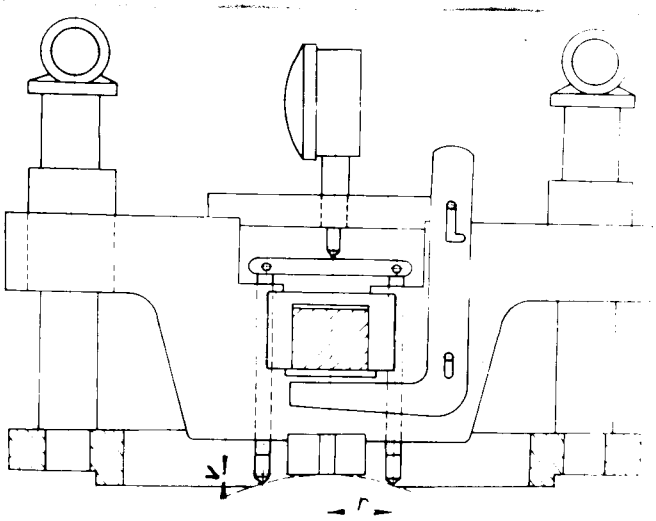
Pro stanovení rozdílu souřadnic Δz, pro určení $tg\alpha$ se používá na levé straně indikátoru. Výška vydutí membrány se měří pravým indikátorem.

Stanovení tloušťky plechu ve vrcholu membrány se provede buď přímo, změřením s po vyjmutí membrány nebo lze s určit nepřímo použitím zákona stálosti objemu ze vztahu (4.1).

Zkouška se prováděla přerušovaně. Zařízení bylo instalováno na 70 - tunovém hydraulickém lise MŠ 70. Přítlačný kryt byl vybaven měřícím zařízením pro měření výšky membrány a tangenty úhlu sklonu tvořící křivky.

4.3. Hydrostatická zkouška podle Johnsona a Duncaba

Zařízení se liší od předchozího, neboť nepoužívá hydraulický lis. Tlak je vyvozen ruční pumpou a čten na manometru. Přidržovač svírá plech silou, která odpovídá tlaku pod membránou. K měření poloměru křivosti v oblasti vrchlíku je použit sférometr viz obr. 11.



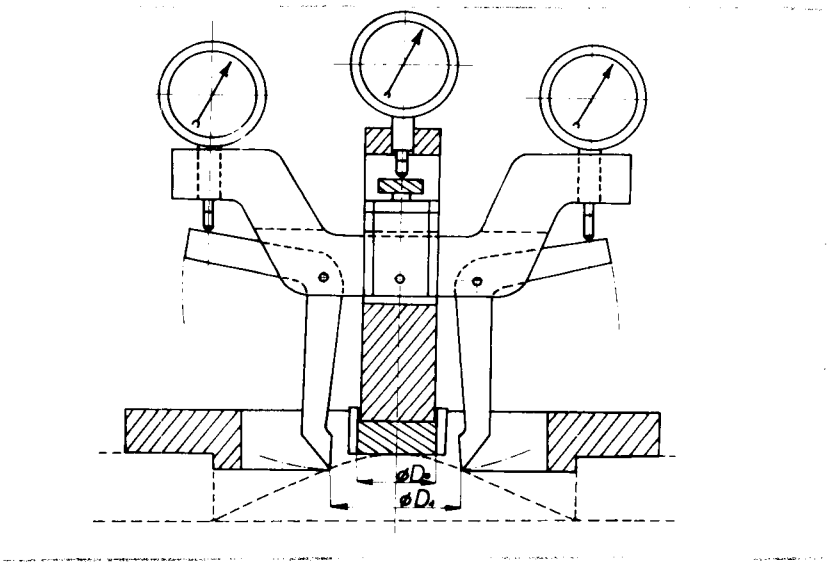
Obr.č. 11. Měření křivosti v pólu membrány podle Johnsona a Duncana

(4.11)

r ... rádius každého měření sférometru

Zařízení na měření prodlužování pracuje v ploše, která je kolmá na rovinu obrázku č. 11.

Toto je zřejmé z obrázku 12.



Obr.č. 12. Měření deformace v pólu membrány podle Johnsona a Duncana

Součtový průměr D_1 ve vztahu k původnímu průměru D_o je dán

$$D_1 = D_o + K\,(a_1 + a_2) \qquad (4.12)$$

k ... převod zařízení

a_1, a_2 ... hodnoty odečtené na indikátoru

Zpracování výsledků.

Přetvoření je získáno ze vztahů (4.4) a (4.12)

$$\varphi_i = 2\lg\left\{1 + \frac{K(a_1 + a_2)}{D_o}\right\} \qquad (4.13)$$

Pro získání představitele přetvoření je nutné odvodit křivku ztenčení v pólu. Poměr

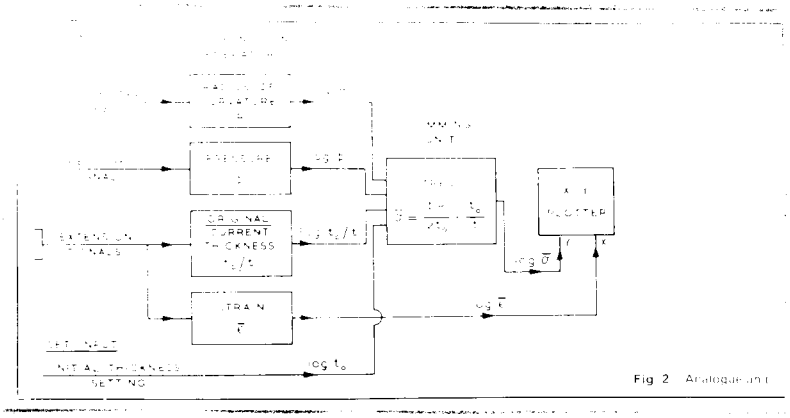
$$\frac{s}{s_0} = \left\{ 1 + \frac{K(a_1 + a_2)}{D_0} \right\} \qquad (4.14)$$

Představitel napětí je pak dán

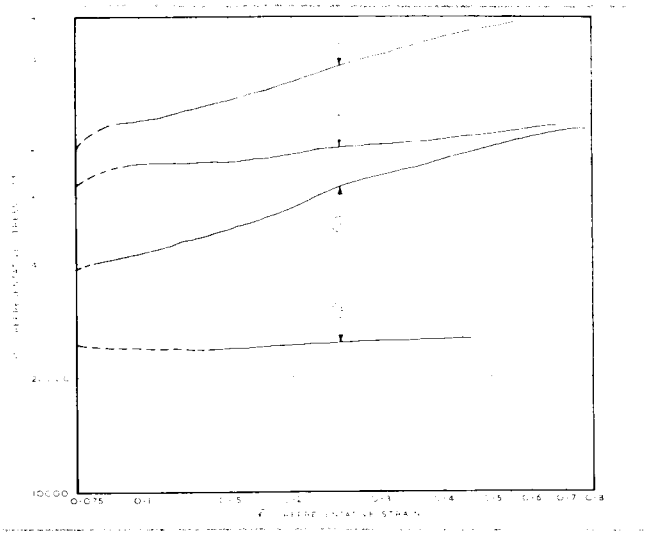
$$\sigma = \frac{R}{2 s_0} \cdot \varphi \cdot \frac{s_0}{s} \qquad (4.15)$$

Zkouška byla prováděna jako přerušovaná.

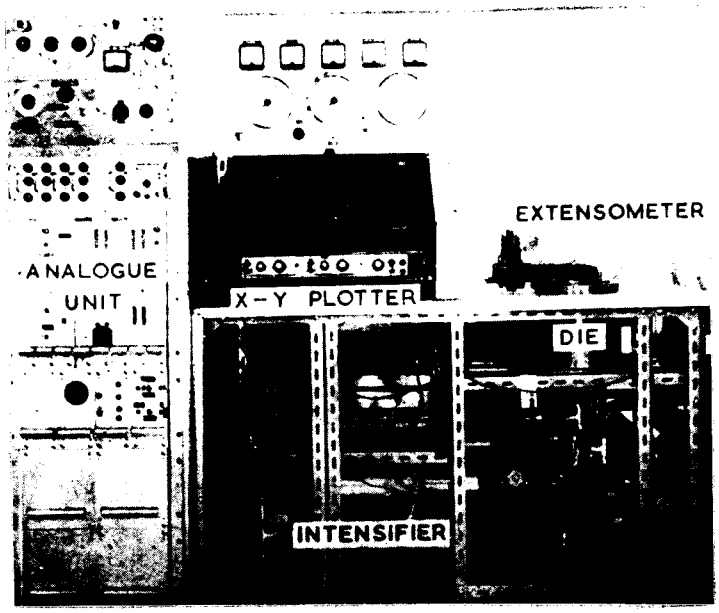
První nepřerušovanou zkoušku provedl r. 1967 Duncan. Použil zařízení, které provedlo přímý zápis závislosti $\sigma_i = \sigma_i(\varphi_i)$ v logaritmických souřadnicích. Směrnice přímky udává "n". Hodnota R se získá stejným způsobem jako na obr. 11 a poměr $\frac{s_0}{s}$ jako na obr. 12. Indikátorové hodinky byly nahrazeny indukčními snímači. K zařízení, které Duncan použil, patří ještě analogová jednotka viz obr. 13 a registrační zařízení viz obr. 14. Celkový pohled na zařízení je na obr. 15.



Obr.č. 13. Analogová jednotka Duncanova zařízení při nepřerušované hydrostatické zkoušce



Obr.č. 14. Registrační zápis Duncanovy nepřerušované hydrostatické zkoušky.



Obr.č. 15. Celkový pohled na zařízení použité při Duncanově nepřerušované hydrostatické zkoušce.

Obě metody vyhodnocování hydrostatické zkoušky umožňují získat křivku zpevnění pro daný materiál. Materiálovou hodnotu "n" lze stanovit nepřímo jako u zkoušky tahem vynesením závislosti $\sigma_i = \sigma_i(\varphi_i)$ v logaritmických souřadnicích; směrnice přímky představuje "n".

Porovnání obou metod podle / 10 /

1. Metoda Johnsona a Duncana.

Použitím sférometru jsou naměřené výsledky značně přesnější v polární oblasti, o kterou nám vlastně jde a navíc tento způsob aproximace je mnohem rychlejší a jednodušší.

2. Metoda Tomlenova, Ščeglova a Ruběnkové

Nespornou výhodou této metody je aproximace tvořící křivky mnohočlenem (4.8), podle kterého je možno vypočíst stav napjatosti i absolutní hodnoty hlavních normálních napětí v libovolném místě na povrchu membrány za předpokladu, že vzorek je opatřen deformační sítí a je tedy možno v daném místě stanovit hodnoty hlavních normálních přetvoření.

5. PŘÍMÁ METODA STANOVENÍ MATERIÁLOVÉ HODNOTY "n" PROVEDENÍM HYDROSTATICKÉ ZKOUŠKY

Ze vztahu (4.3) pro m = 1 vyplývá, že

tedy

$$n = \frac{\varphi_{3k}}{2} \qquad \text{resp. } n = \frac{\varphi_{1k}}{2} \qquad (5.1)$$

Tím je dána přímá metoda provádění hydrostatické zkoušky pro tento případ. Zjistíme hodnotu φ_{3k} dosazení do vztahu (5.1) je nutno provést tím způsobem, že hydrostatická zkouška je přerušena v okamžiku, kdy přírůstek tlaku je roven nule ($\frac{dp}{dH} = 0$). Proměřením tloušťky plechu na vrcholu membrány pak stanovíme uvedenou hodnotu φ_{3k}.

Z uvedeného vyplývá, že zařízení pro hydrostatickou zkoušku plechu je v tomto případě nutno doplnit derivačním zařízením, které nám zaručí přerušení zkoušky v okamžiku $\frac{dp}{dH} = 0$, resp. v okamžiku minimální záporné derivace.

5.1. Návrh měřícího zařízení

Návrh měřícího zařízení je proveden s ohledem na možnost získání registračního záznamu (resp. záznamů) průběhu hydrostatické zkoušky.

Hlavní částí zařízení, které nám umožní stanovení materiálové hodnoty "n" přímo, je pístový manometr s potlačeným rozsahem, se kterým je spojeno zařízení, které přeruší zkoušku v okamžiku $dp = 0$. Zařízením se provede grafické vynesení závislosti p = p (H) přímo, nebo se vynesou závislosti p = p(t) a H = H(t), ze kterých musíme eliminovat čas.

Princip zařízení. Viz obrázek č. 16.

Snímáme 1. výšku vrchlíku H
2. tlak oleje p

1. H_{max} snímáme indikátorem.

Snímaná výška *H* by se převedla mechanickým převodem př. pastorek s ozubeným hřebenem, na odporový vysílač a elektrický výstupní signál bychom převedli na elektrický liniový zapisovač. Zapisovali bychom výšku vrchlíku H v závislosti na čase t.

2. Jako snímače tlaku *p* bychom použili nejlépe pístového manometru s odporovým vysílačem. Výstupní elektrický signál bychom převedli na elektrický liniový zapisovač. Zapisovali bychom závislost tlaku p na čase t.

Z těchto dvou záznamů tj. závislosti H = H(t) a p=p(t) bychom sestrojili závislost p = p(H), tj. eliminovali bychom čas t.

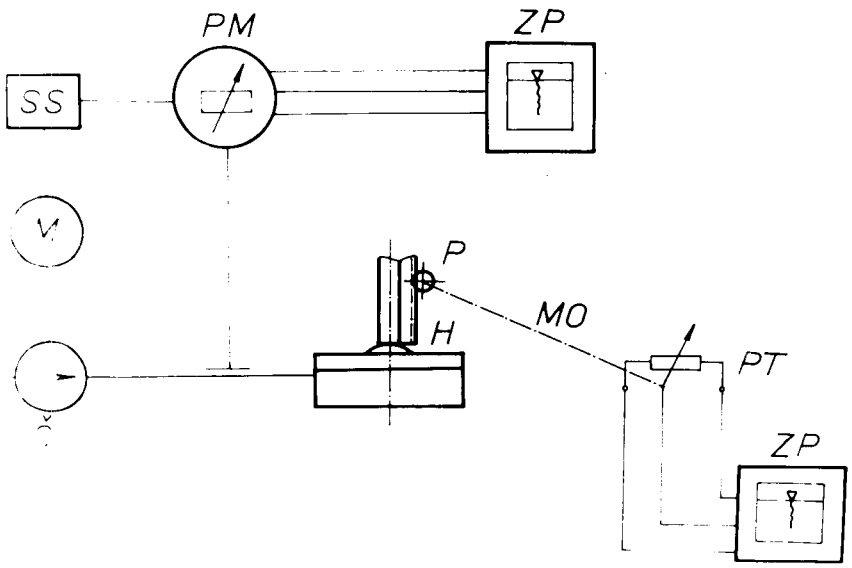
Pokud bychom použili pro záznam liniového zapisovače ZIR, lze rozpojením obvodu pro přívod tlakového oleje při dosažení p_{max} dosáhnout kontaktem, který by byl vlečen ručičkou zapisovače při vzrůstu tlaku p. Vlečný kontakt by rozpojil obvod při poklesu tlaku.

Výhodnější by bylo patrně použití souřadnicového zapisovače, který by zapsal přímo závislost p = p (H). Mechanickou výchylku indikátoru bychom převedli, např. pastorkem s ozubeným hřebenem, na elektrický signál vhodného rozsahu, který bychom použili jako vstupní signál souřadnicového zapisovače. Pro snímání tlaku bychom opět použili pístového manometru s odporovým vysílačem a výstupní elektrický signál z odporového vysílače bychom použili jako vstupní signál souřadnicového zapisovače. Použitím těchto dvou signálů bychom zaznamenali přímo závislost p = p (H). Bylo by možné použít upraveného souřadnicového zapisovače BAK II s maximální citlivostí 10 mV/cm se zápisem na válcovou plochu nebo lépe souřadnicového zapisovače se zápisem na rovinnou plochu. Např. lze použít souřadnicového zapisovače ENDIM 2200 (výrobek NDR).

Souřadnicový zapisovač v blokovém schema pístového manometru na obr. 17.

Pokud by bylo nutné rozpojení obvodu v místě p_{max}, provedli bychom to například tak, že bychom na píst pístového manometru připevnili mechanický jezdec, pomocí kterého bychom kontakty rozpojili.

Na obrázku 16 a 17 jsou bloková schémata zapojení pístového manometru.



Obr.č. 16. Blokové schéma zapojení pístového manometru. Pro grafický záznam p= p(t) a H= H(t) jsou použity zapisovací přístroje typu ZIR.

Podle obrázku značí:

Č ... čerpadlo

M ... motor

SS ... stykačová skříň

PM ... pístový manometr

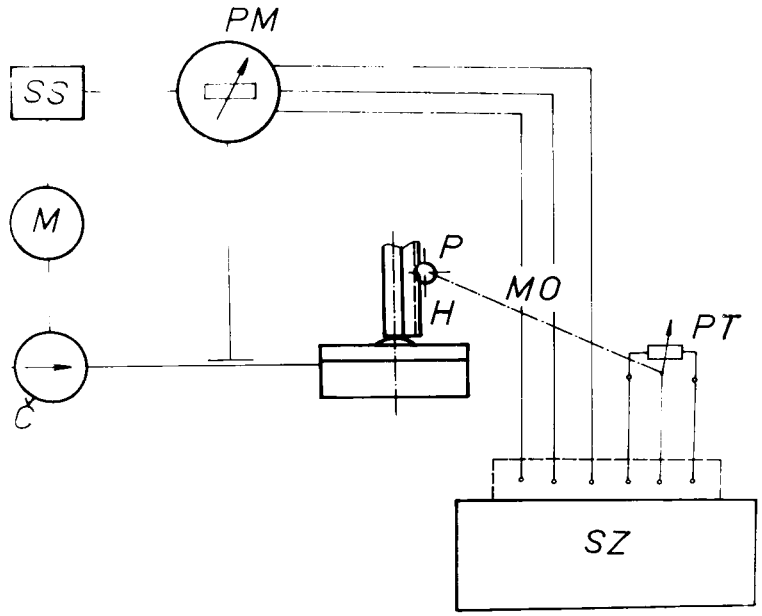
ZP ... zapisovací přístroj ZIR

PT ... potenciometr

H ... ozubený hřeben

P ... pastorek

MO ... mechanická osa



Obr.č. 17. Blokové schéma pístového manometru. Získání zápisu p=p(H) bylo použito souřadnicového zapisovače.

Podle obrázku značí:

Č ... čerpadlo

M ... motor

SS ... stykačová skříň

SZ ... souřadnicový zapisovač

PT ... potenciometr

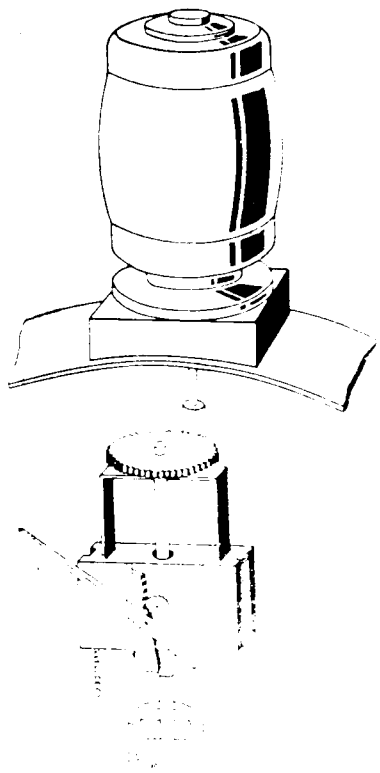
H ... ozubený hřeben

P ... pastorek

MO ... mechanická osa

Použité přístroje

Pístový manometr typ HR 15
potlačený v rozsahu 55 až 100 atp viz obr. č. 18.



Obr.č. 18. Pístový manometr s potlačeným rozsahem

Popis

Hlavní části pístového manometru jsou olejová předloha (tlaková komora s olejovou náplní), píst s převodovým zařízením a pomocným motorkem, závaží pro potlačení nulové hodnoty, rozsahové pružiny a převodový mechanismus ukazovacího zařízení.

Princip. Tlak přiváděný do olejové předlohy působí na plochu pístu a posune jej tak daleko až celková váha pístu, závaží a pružin (určují rozsah přístroje) vyrovná sílu působící na píst. Zdvih pístu se převádí převodovým mechanismem na ukazovací ručku přístroje a hmoty se odečítají na kruhové stupnici. U těsnění pístu v olejové předlože je provedeno pryžovou těsnící ucpávkou. Aby se vyloučil vliv tření, při měření je píst otáčen elektromotorkem. Připojení elektrických přívodů se provede na svorkovnici, která je umístěna v litinové skříni přístroje. Před olejovou předlohou je zamontován uzavírací ventil, který slouží k uzavírání přívodního tlakového potrubí.

Váha bez přídavného závaží 54 - 61 kg.

Přesnost přístroje ± 1,5 % z rozsahu stupnice.

Obsah olejové předlohy cca 1 l.

Motorek přístroje - jednofázový, typ MEZ-FCT 3E 54 D, provedení stejnosměrné pro 220 V, 50 Hz, 40 W, s kondenzátorem 5 μF, 300 V$\sim$.

Zapisovací přístroj ZIR/D

Provedení: s pomocným odporovým vysílačem 100 Ω (100mA)

Použití. K dálkovému přenosu měřených hodnot, např. protékajícího množství, tlaku apod. Připojí se na elektrický odporový vysílač o hodnotě cca 100 Ω, který je zamontován v našem případě v tlakoměru.

Technické údaje:

přesnost 1 %

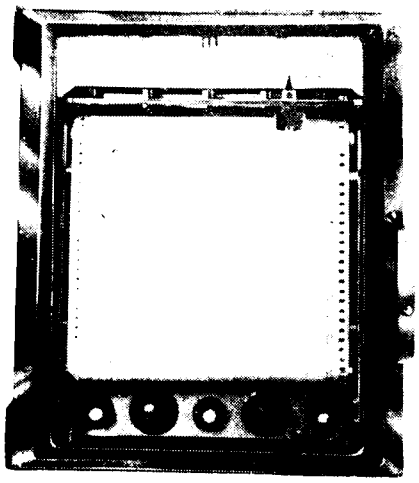
necitlivost 0,2 %

připojovací napětí 220 V, 50 Hz

příkon 16 W ± 2 W nebo 20 A

rychlost posuvu papíru 20, 60, 120 mm/hod.

Obrázek č. 19 ukazuje zapisovací přístroj ZIR.



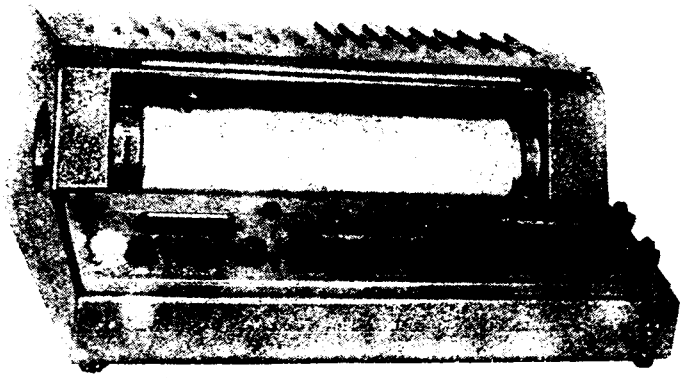
Obr.č. 19. Zapisovací přístroj ZIR

Souřadnicový zapisovač BAK II.

Souřadnicový zapisovač BAK II je přesný laboratorní měřící přístroj, používaný při analogovém výpočtu při grafickém záznamu výsledku řešení.

Popis. Souřadnicový zapisovač BAK II se skládá ze dvou podobných a úplně samostatných servomechanismů. Jeden ze servomechanismů ovládá pohyb válce, druhý pohyb pi-

sátka. Změna okamžité hodnoty napětí, přiváděného na vstupní svorky servosmyčky pisátka působí posuv pisátka, rovnoběžný s osou válce a přímo úměrný velikosti změny přiváděného napětí. Podobně změna napětí přiváděného na vstup servosmyčky válce vyvolá úměrné pootočení válce kolem podélné osy. Pohyb válce a pisátka je vzhledem k povrchu záznamové plochy vzájemně na sebe kolmý. Grafický záznam zakreslený pisátkem, znázorňuje funkční závislost obou vstupních veličin v pravoúhlých souřadnicích.



Obr.č. 20. Souřadnicový zapisovač BAK II

Technické údaje:	pisátko	válec
maximální citlivost	10 mV/cm	10 mV/cm
vstupní odpor	100 kΩ /V	133 kΩ /V

maximální zapisovací rychlost 450 mm/sek 65 mm/sek

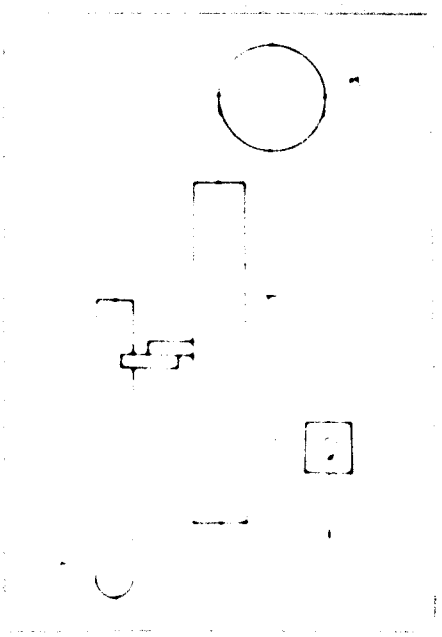
váha 38,5 kg

Zapisovací přístroj xy = Schreiber, Endim 2200.

Zapisovací přístroj Endim 2200 se liší od souřadnicového zapisovače BAK II způsobem záznamu. Endim provádí zápis na plochu.

<u>Princip zařízení, které umožňuje přerušení zkoušky v okamžiku, kdy dP = 0.</u>

Schematický návrh tří způsobů přerušení zkoušky mechanickým způsobem.



Obr.č. 21a. Přerušení zkoušky pomocí tyčky upevněné na kladce.

1. Princip zařízení je na obr. 21 a.

P ... píst pístového manometru s potlačeným rozsahem

T ... tyčka (čtverhranná)

K ... kladka

Q ... závaží

Předpoklady:

a) v pístu je velmi malá, setrvačné síly proto zanedbáváme

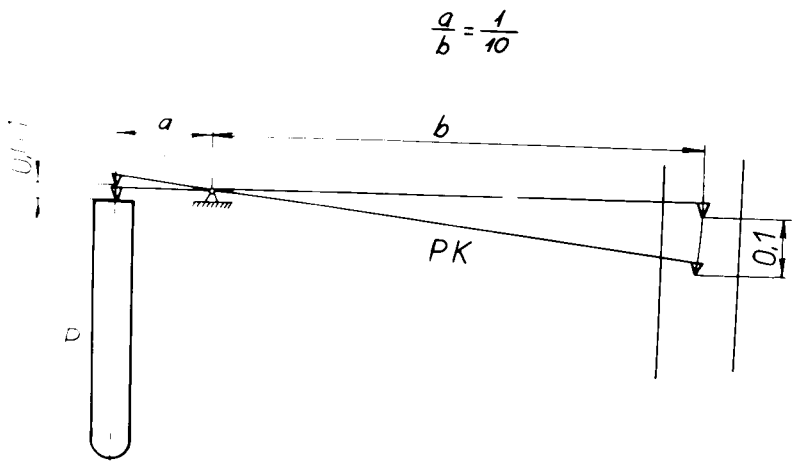
b) tyčka T i závaží Q jsou vyváženy, proto tyčka zůstane stát v kterékoliv poloze, do které ji píst manometru vynese.

Princip:

Tlak na píst roste, píst se pohybuje vzhůru a s ním i tyčka. Tlak dosáhne maxima a nepatrně klesne. Píst klesá, ale tyčka zůstane v poloze p_{max}. Kontakty se rozpojí, zkouška je přerušena.

Toto zařízení je jednoduché, velmi citlivé, a proto je vhodné jej použít.

2. Zařízení je zřejmé z obrázku 21 b.



Obr. 21 b. Přerušení zkoušky pomocí pákového převodu.

P ... píst pístového manometru

P_K ... páka

Princip zařízení:

Pákový převod umožňuje zaznamenat nepatrný vzrůst tlaku (např. výchylku pístu 0,01 převedeme pomocí páky na výchylku 0,1, kterou lze odečíst na zapisovačím zařízení). Toto zařízení je také velmi citlivé a k přerušení zkoušky dojde již při nepatrném poklesu tlaku.

3. Zařízení s ozubeným hřebenem a pastorkem.

Popis zařízení:

Pístový manometr s potlačeným rozsahem a s kontaktem.

Ozubený hřeben s kontaktem.

Pastorek, zabírající s ozubeným hřebenem.

Rohatka se západkou.

(Pastorek a rohatka jsou umístěny na společné hřídeli)

Princip:

Tlak roste, píst stoupá a s ním i ozubený hřeben prostřednictvím kontaktu. Ozubené kolečko a rohatka se volně otáčejí na společném hřídeli. Tlak nepatrně poklesne, píst jde dolů, ale západka rohatku zablokuje, a tím i pastorek a hřeben. Dojde k rozpojení kontaktů, a tím i k přerušení zkoušky. Zuby rohatky musí být velmi jemné, aby zařízení zaznamenalo již nepatrný pokles tlaku.

Toto zařízení je však méně přesné než předchozí.

6. NEPŘÍMÁ METODA STANOVENÍ MATERIÁLOVÉ HODNOTY "n" PROVEDENÍM HYDROSTATICKÉ ZKOUŠKY

Princip nepřímého určování materiálové hodnoty "n" hydrostatickou zkouškou svým principem vyplývá ze skutečností uvedených v kapitole 3.

Hodnoty σ_i a jim odpovídající φ_i je možno získat dvěma způsoby

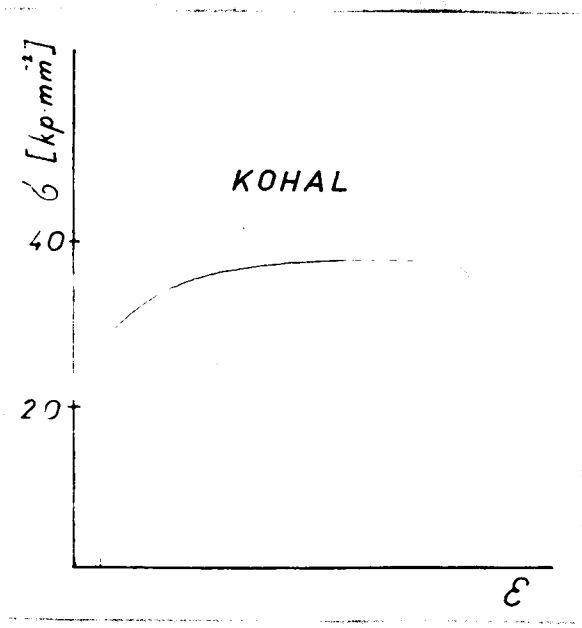
a) provedením přerušované zkoušky

b) provedením zkoušky bez přerušení při současném získání registračního zápisu $\sigma_i = \sigma_i(\varphi)$. Zajímavý způsob řešení podle bodu b) byl popsán Duncanem kapitola 4.

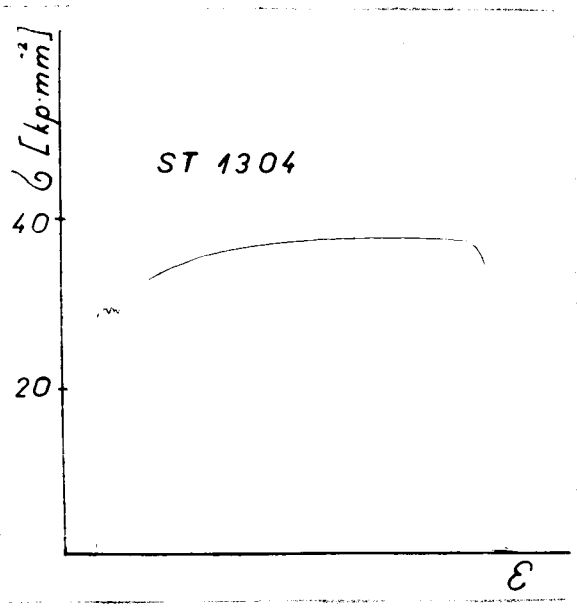
6.1. Experimentální část

Experimentální částí této práce byla určována materiálová hodnota "n" metodou nepřímou, a to provedením přerušované hydrostatické zkoušky, to znamená, byly stanoveny křivky zpevnění v jednotlivých případech. Uvedené materiálové charakteristiky byly stanoveny pro plechy běžně zpracovávané v AZNP Mladá Boleslav. Jedná se o rakouský plech ST 1304 a plech vyráběný ve VSŽ Košice KOHAL EXTRA (návrh označení podle ČSN 11 305). Zkoušky byly prováděny na zařízení VŠST.

Základní vlastnosti používaných plechů byly zjišťovány zkouškou tahem viz obr. 22 a 23.



Obr.č. 22. Zkouška tahem, použitý materiál KOHAL EXTRA



Obr.č. 23. Zkouška tahem, použitý materiál ST 1304.

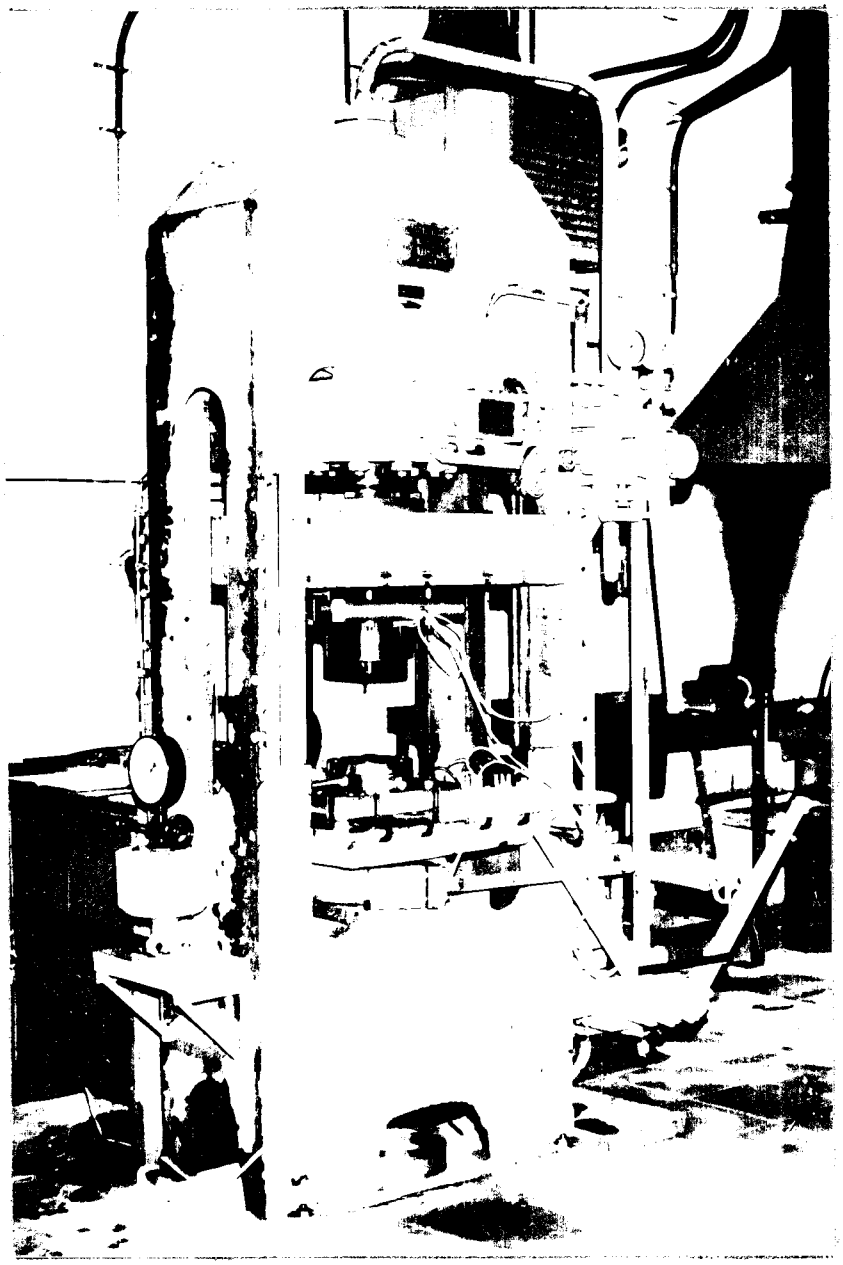
Zjištěné materiálové hodnoty.

KOHAL EXTRA	ST 1304
l_o = 80 mm	l_o = 80 mm
l = 112,3 mm	l = 112,7 mm
s_o = 8,82 mm^2	s_o = 9 mm^2
p_{max} = 328 kp	p_{max} = 333 kp
σ_{Pt} = 37,2 kp/mm^2	σ_{Pt} = 36,62 kp/mm^2
σ_{Kt} = 25,8 kp/mm^2	σ_{Kt} = 30,96 kp/mm^2
δ = 40,3 %	δ = 40,8 %
$\frac{\sigma_{Kt}}{\sigma_{Pt}}$ = 0,693	$\frac{\sigma_{Kt}}{\sigma_{Pt}}$ = 0,845

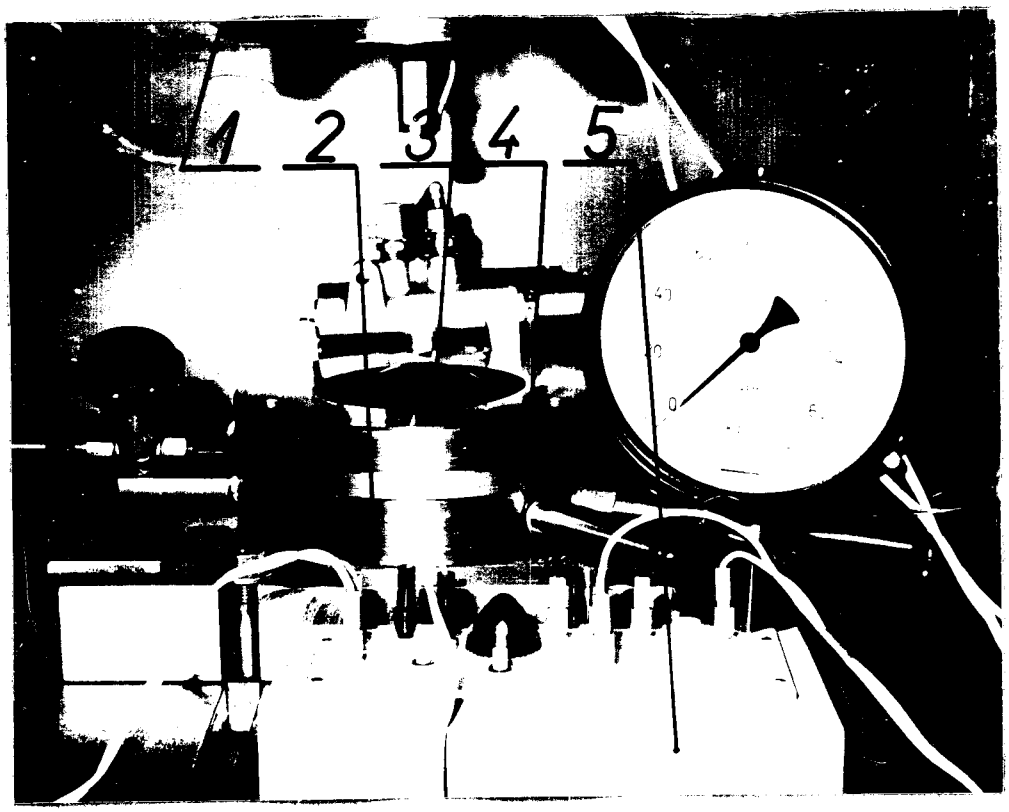
Poměr $\frac{\sigma_{Kt}}{\sigma_{Pt}}$ posuzuje lisovatelnost plechů, je-li tento poměr v rozmězí 0,6 až 0,8 je materiál vhodný pro lisování podle / 3 /. Z výsledků zkoušky tahem je zřejmá podstatně lepší kvalita KOHALU z hlediska uvedeného ukazatele.

Princip laboratorního zařízení používaného na KMT VŠST Liberec.

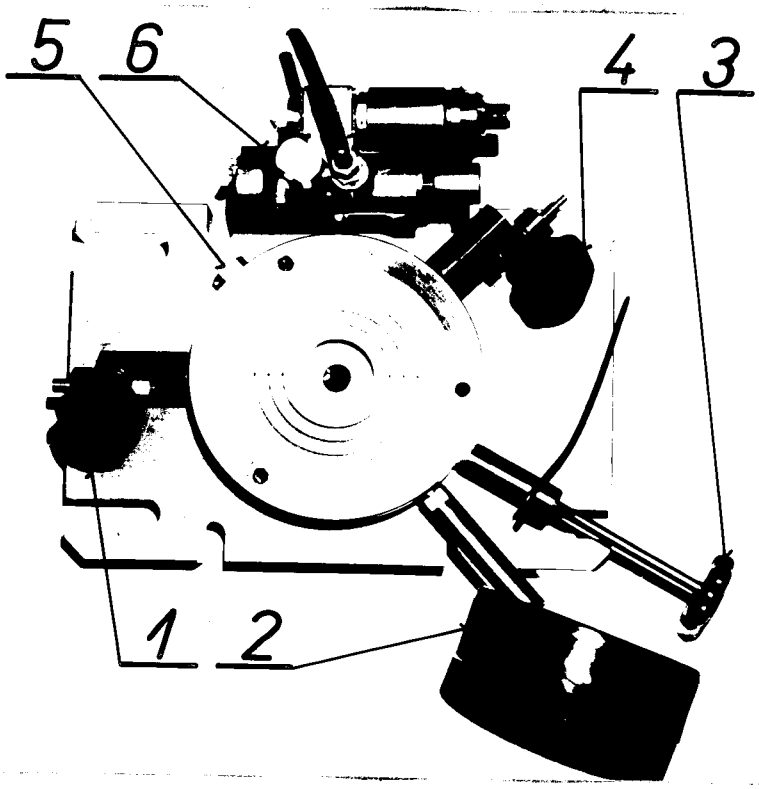
Celkový pohled na zařízení pro hydrostatickou zkoušku plechů, které je instalováno na hydraulickém 100 t lise zn. Reinartz , je na obrázku 24.



Obr.č. 24. Celkový pohled na zařízení pro hydrostatické zkoušení plechů na VŠST Liberec.



Obr.č. 25. Detailní pohled na otevřený přípravek



Obr.č. 26. Spodní část přípravku na hydrostatické zkoušení plechů.

Na obr. 25 je detailní pohled na otevřený přípravek pomocí něhož jsme hydrostatickou zkoušku prováděli. Přípravek se skládá ze dvou částí.
Horní část přípravku 1 je tvořena horní základovou deskou s rozpěrným dutým válcem, který umožňuje sevření vzorku. Ve válci je umístěno zařízení na měření vydutí membrány H, provádí se tyčkou, která je suvně uložena uvnitř dutého válce. Vydutí na měřící tyči lze sledovat průzorem, který je v čelní stěně válce.
Spodní část přípravku 2 se skládá z rovinné desky, kterou je přípravek upnut na stůl lisu. Na této rovinné desce jsou umístěny dvě kruhové desky, mezi nimiž se vydouvá vzorek 3. Na spodní kruhovou desku se po vložení vzorku přišroubuje kruhová deska vrchní - tažnice 4, která má otvor pro vydouvání membrány. Spodní z kruhových desek podle obr. 26 má dvě válcová vybrání.
Do válcového vybrání menšího průměru ústí uzavírací kohout přívodu tlakového oleje 1, přípojka manometru 2, kohout k vypouštění tlakového oleje 3, kohout pro uzavírání přívodu tlakového vzduchu 4, vývod pro připojení pístového manometru s potlačeným rozsahem 5 a elektromagnetický ventil 6. Ovládací panel podle obr. 25 společně s elektromagnetickým ventilem 6 umožňuje přerušení zkoušky v okamžiku, kdy se vydouvaná membrána dotkne tyčky v rozpěrném válci. Jestliže vydutí nenastavujeme, lze pomocí ovládacího panelu přerušit zkoušku v libovolném okamžiku. Ovládací panel je na obr. 25 označený pozicí 5.

Vyhodnocení hydrostatické zkoušky

Při vyhodnocování hydrostatické zkoušky zjišťujeme hodnoty intenzity napětí σ_i a intenzity přetvoření φ_i a materiálovou hodnotu "n". Vztah $\sigma_i = \sigma_i(\varphi_i)$ aproximujeme přímkou a směrnice přímky odpovídá materiálové hodnotě "n". Podle dříve uvedených vztahů platí

$$\sigma_i = \sigma_o = \frac{R \cdot p}{2 s}$$

$$\varphi_i = \lg \frac{s_o}{s}$$

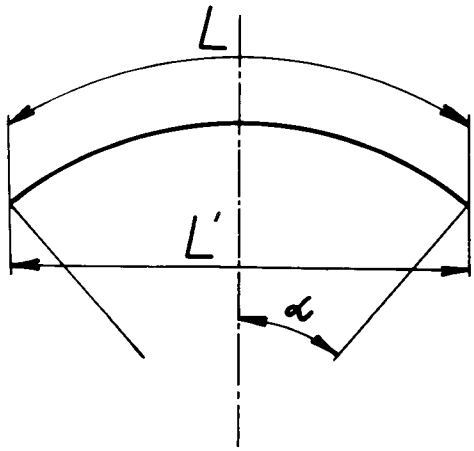
Hodnoty R, p, s a s_o zjišťujeme během hydrostatické zkoušky

R $\qquad R = \frac{r^2 + \Delta z^2}{2 \Delta z} \qquad \Delta z = v$ $\qquad$ podle / 12 /

p ... odečítáme na pístovém manometru

s_o ... tloušťka plechu před hydrostatickou zkouškou, změříme mikrometrem

s ... spočteme nepřímo z průměru kruhového elementu (v oblasti vrchlíku) L jako funkci vydutí H, podle obrázku 27.



Obr.č. 27. Princip vyhodnocování hydrostatické zkoušky.

Princip vyhodnocení hydrostatické zkoušky vyplývá z obr. 27.

Průběh hydrostatické zkoušky, kterou jsme prováděli na zařízení VŠST v Liberci.

Vydouvání vzorku při hydrostatické zkoušce působí tlakový olej (použili jsme motorový olej M 6 A). Zkoušku jsme prováděli přerušovaným způsobem, tzn. nastavovali jsme postupně (např. po 2, 3 nebo 5 mm) jednotlivá vydutí, která chceme dosáhnout. Ovládací panel, jak již bylo dříve uvedeno, umožní po dosažení nastaveného vydutí (vydouvaný vzorek se dotkne tyčky, kterou vydutí nastavujeme), přeruší zkoušku. Zkouška je přerušena a my odečteme pro odpovídající danou hodnotu vydutí H, tlak p na manometru, změříme ΔZ sférometrem a vypočteme R podle / 12 /, vyfotografujeme deformační síť a z filmu změříme průměr L'

deformační sítě podle obr. 27, potřebného pro zjištění skutečné délky L deformační sítě. Tímto končí dílčí část hydrostatické zkoušky. Nastavíme dále větší vydutí a zkouška pokračuje. Hydrostatická zkouška umožní stanovit závislost R, p, φ_i na vydutí a po dosazení do vztahu za σ_i dostáváme jednotlivé body křivky zpevnění $\sigma_i = \sigma_i(\varphi_i)$ a aproximací přímkou dostaneme materiálovou hodnotu "n".

Princip hydrostatické zkoušky podle obr. 27 pro vyjádření hodnot, které jsou uvedeny v tabulkách

$$\sin\alpha = \frac{L'}{2R}$$

z tohoto vztahu spočteme α druhé dvě veličiny známe

$$R \cdot \frac{\pi}{90} \cdot \alpha = L$$

L je skutečná délka průměru deformovaného vzorku

$$\frac{L}{L_0} = \lg \varphi$$

$$2\varphi = \varphi_i$$

$$\varphi_i = \lg \frac{S_0}{S}$$

KOHAL, vzorek č. 10

H	p	Δz	R	L´	L	φ	φ_i	σ_i
10	21,75	22,25	227,4	9,1	9,128	0,0168	0,0337	36,26
14	33	31,25	160,0	9,24	9,31	0,0314	0,0629	39,91
18	44,75	40,0	124	9,43	9,448	0,0525	0,1051	43,69
22	55	48,0	103	9,66	9,646	0,076	0,152	46,81
26	64	56,5	88	10,0	10,0	0,111	0,223	49,86
30	71,25	63,5	78	10,42	10,42	0,151	0,303	53,43
32	74,5	66,5	74,14	10,7	10,709	0,178	0,357	55,99
34	75,5	72,0	71	10,98	10,768	0,204	0,409	57,22
35	75,75	74,0	68	11,13	11,144	0,218	0,436	56,49

L_o = 8,95 mm — původní průměr deformační sítě nedeformovaného vzorku

r^2 = 100,0 mm^2

s_o = 0,705 mm

KOHAL, vzorek č. 13

H	p	Δz	R	L´	L	φ	φ_i	σ_i
10	23	22	227,4	9,1	9,13	0,0019	0,0039	38,62
12	28,5	26,75	187,05	9,15	9,16	0,0227	0,0454	39,6
14	34	31,4	159,4	9,25	9,28	0,036	0,072	41,31
16	40	34,6	140,0	9,4	9,42	0,0516	0,1032	45,45
18	45	38,1	124	9,45	9,48	0,0583	0,1166	47,15
20	49	44,25	113,2	9,55	9,56	0,0658	0,1316	44,82
22	52,5	48,6	100,031	9,68	9,72	0,0825	0,165	45,26
24	59	52,6	95,3	9,85	9,86	0,0971	0,194	48,39
26	64	57,2	87,7	9,95	9,98	0,109	0,218	49,5
28	68,25	60,2	83,4	10,2	10,22	0,133	0,266	52,6
30	71,2	64,2	78,2	10,45	10,46	0,156	0,312	53,99
32	73,5	67,75	74,14	10,75	10,79	0,187	0,374	56,16
34	75,5	72,5	69,8	11,0	11,2	0,224	0,448	58,49
35	75,75	74	67,9	11,25	11,26	0,230	0,46	57,66

l_o = 8,95 mm — původní průměr deformační sítě nedeformovaného vzorku

r^2 = 100 mm^2

s_o = 0,705 mm^2

KOHAL, vzorek č. 15

H	p	Δ z	R	L´	L	φ_i	φ_i	σ_i
5	8	10,5	476,24	9,75	9,73	0,023	0,046	28,26
10	20,25	23	217,5	9,89	9,88	0,0138	0,02762	32,84
13	28,75	30	166,81	10,02	10,02	0,0276	0,0552	35,94
16	36,75	34,75	144,05	10,16	10,16	0,0411	0,0823	40,74
19	45,25	42,5	117,85	10,33	10,33	0,0497	0,0994	41,73
22	53,75	48,75	102,80	10,57	10,57	0,0806	0,161	46,04
25	61	55	91,18	10,85	10,85	0,107	0,214	48,56
28	66,5	60,25	83,28	11,16	11,16	0,135	0,270	51,42
31	69,75	65,75	76,37	11,46	11,47	0,163	0,326	53,01
34	72,0	71	70,77	11,98	11,99	0,207	0,414	54,65
35	71,75	72,5	69,32	12,15	12,16	0,220	0,441	54,82
36	71,5	75	67,04	12,36	12,37	0,238	0,476	56,0
37	72	77,5	64,90	12,53	12,55	0,252	0,504	56,51

L_o = 9,75 mm

r^2 = 100 mm^2

s_o = 0,72 mm

ST 1304, vzorek č. 20

H	p	z	R	L'	L	φ	φ_i	σ_i
13	26,5	31,0	161,4	7,64	7,60	0,019	0,039	30,93
16	34,25	38,0	131,7	7,71	7,70	0,033	0,066	33,52
19	41,5	44,5	112,5	7,90	7,90	0,098	0,116	36,44
22	48,25	51,0	98,29	8,10	8,10	0,069	0,139	37,81
25	54,0	56,5	88,77	8,31	8,27	0,104	0,208	40,96
28	58,75	62,5	80,31	8,60	8,60	0,143	0,286	43,60
31	63,25	75,5	74,41	8,91	8,91	0,179	0,348	46,22
34	65,5	74	67,93	9,34	9,34	0,225	0,450	47,40
36	66,5	77	65,35	9,59	9,60	0,253	0,506	50,05
38	67,75	80	62,51	10,02	10,03	0,297	0,594	52,28

ST 1304, vzorek č. 22

H	p	Δz	R	L´	L	φ	φ_i	σ_i
5	6	11,5	434,8	9,63	9,63	0,0129	0,0258	18,59
10	15,75	23,0	217,5	9,74	9,74	0,0246	0,0493	25,57
15	28,5	34,25	146,1	9,92	9,92	0,0440	0,0880	30,85
20	40,5	45,0	105,4	10,30	10,30	0,0806	0,161	34,84
25	51	54,5	92,01	10,62	10,63	0,112	0,224	40,83
30	60,25	64,0	78,44	11,27	11,28	0,171	0,342	46,26
35	64,75	73,0	68,85	11,97	12,15	0,245	0,490	50,44
36	65,25	75,0	67,04	12,32	12,33	0,260	0,521	51,1
37	65,75	76,75	65,53	12,45	12,47	0,271	0,543	51,48
38	66,0	78,5	64,86	12,61	12,62	0,284	0,568	53,6

L_o = 9,75 mm

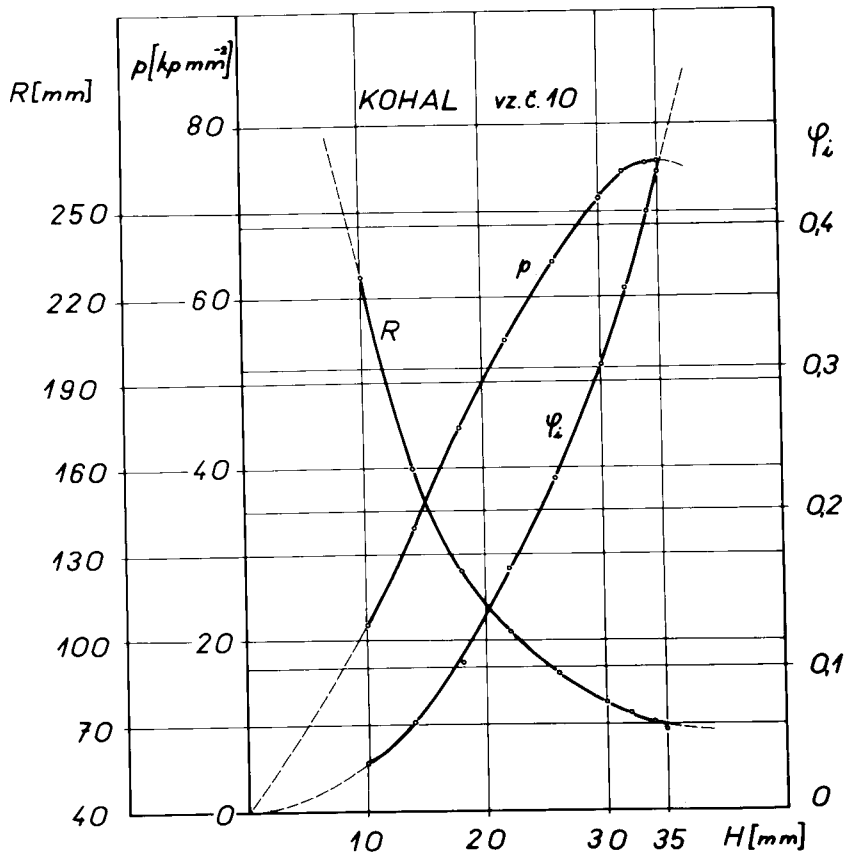
r^2 = 100 mm^2

s_o = 0,72 mm

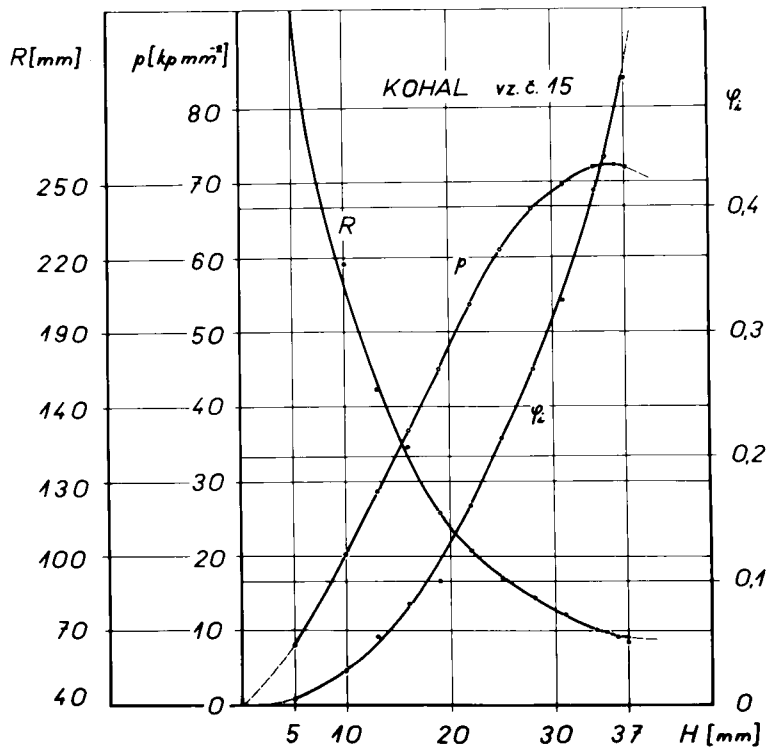
Příklady grafického vyjádření jednotlivých hydrostatických zkoušek, které jsme prováděli na zařízení VŠST, jsou na obrázcích 28 až 33.

Obrázky 28 až 31 znázorňují závislosti R, p, φ_i na vydutí membrány H.

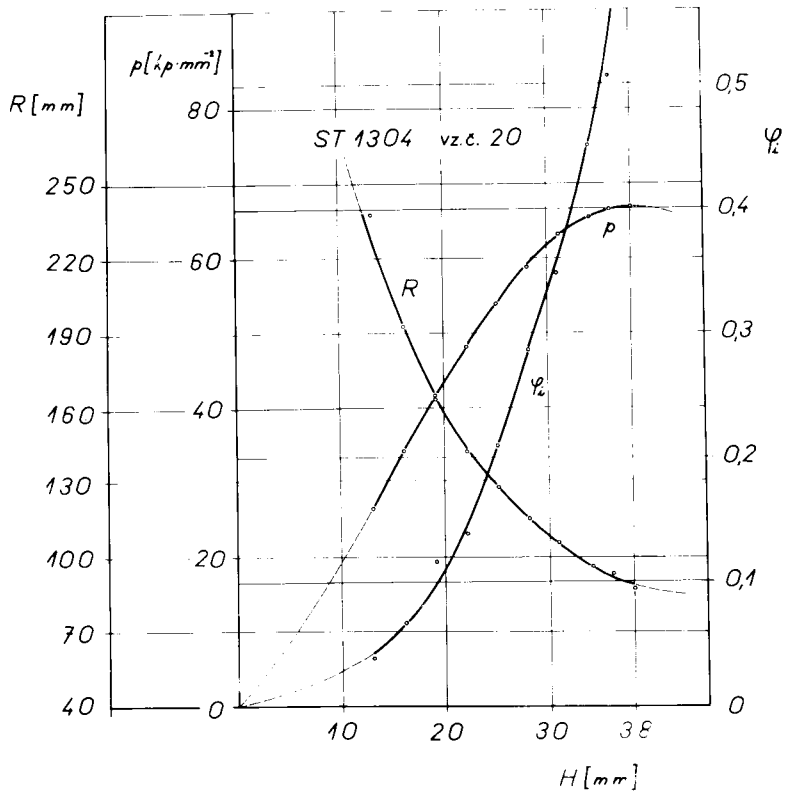
Obrázky 32 a 33 znázorňují aproximaci závislosti $\sigma_i = \sigma_i(\varphi_i)$ přímkou a určení materiálové hodnoty "n".



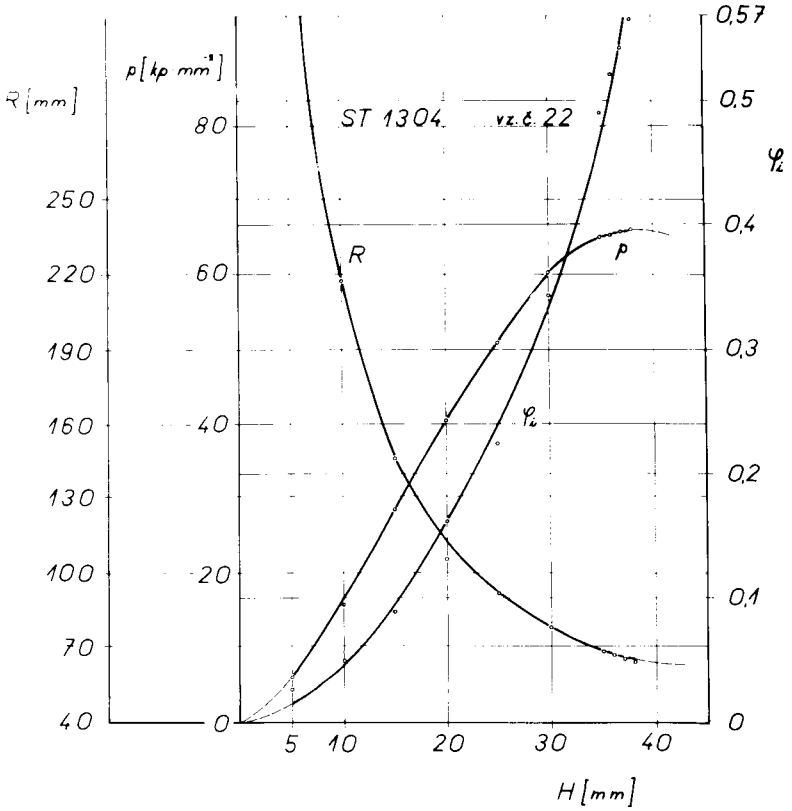
Obr.č. 28. Grafické znázornění závislosti R, p, φ_i na vydutí H



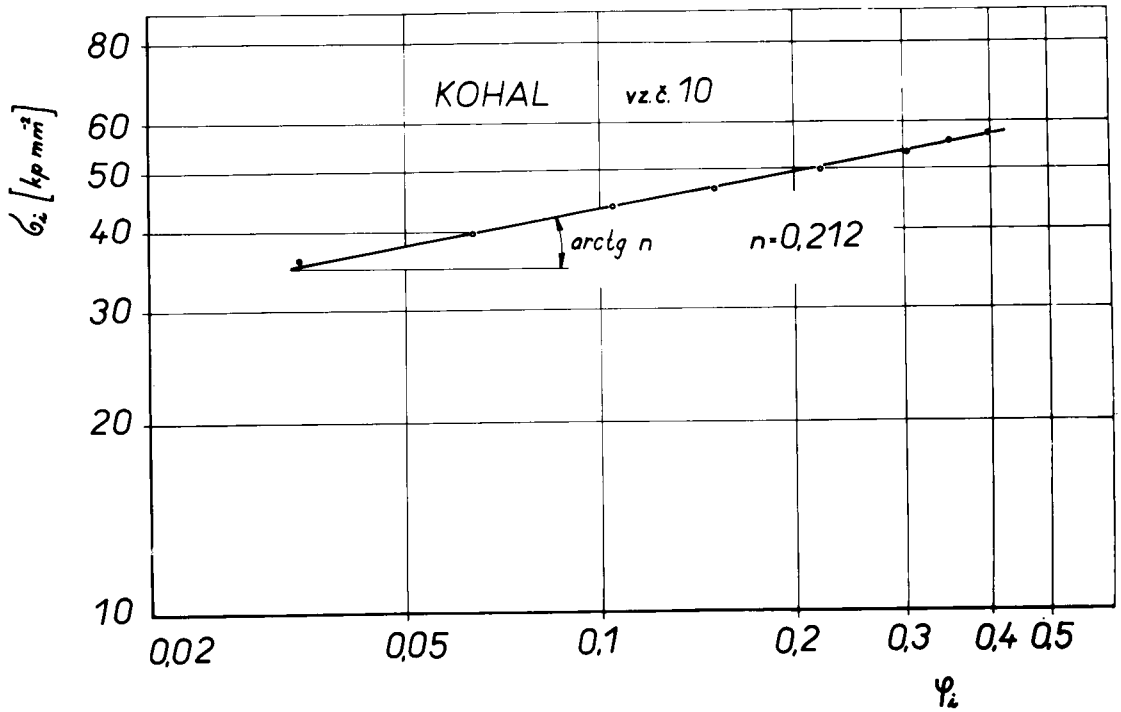
Obr.č. 29. Grafické znázornění závislosti R, p , φ_i na vydutí H.



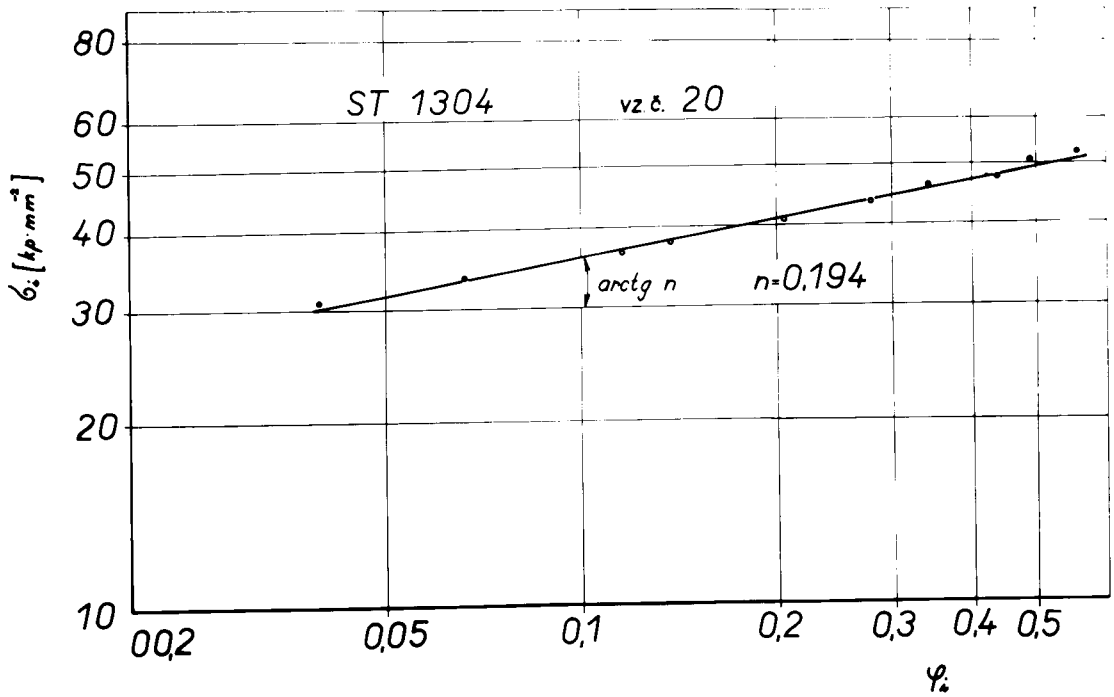
Obr.č. 30. Grafické znázornění závislosti R, p, φ na vydutí H.



Obr.č. 31. Grafické znázornění závislosti R, p, φ na vydutí H.



Obr.č. 32. Určení materiálové hodnoty "n"



Obr.č. 33. Určení materiálové hodnoty "n"

7. ZÁVĚR

Hydrostatická zkouška jak již bylo dříve řečeno, je velmi vhodná pro určování materiálových hodnot plechů z hlediska jejich tvářitelnosti. Její význam spočívá hlavně v tom, že hydrostatickou zkouškou dosáhneme maximálních hodnot přetvoření při tažení plechů, dostaneme tak křivku zpevnění pro největší rozsah intenzity přetvoření, oproti tahové zkoušce, která je prováděna při jiném stavu napjatosti (m = 0), kde mezní hodnota je poloviční.

Výhody hydrostatické zkoušky:

1. Na přípravu zkušebních vzorků není třeba použít speciální zařízení.
2. Vzorek může být tvarován užitím jednoduchého lisovacího nástroje a pumpy.
3. Při hydrostatické zkoušce je zajištěn rovnoměrný tlak oleje na povrch plechu.

Jestliže budeme materiálovou hodnotu "n" zjišťovat metodou přímou, bude to velmi výhodné, neboť při použití přímé metody vycházíme vlastně z jejího fyzikálního významu. Další výhoda stanovení "n" přímo spočívá v tom, že zkouška je rychlejší. Přímou metodu je vhodné použít v případě, že nám nejde o sestrojení křivky zpevnění. Hlavní částí zařízení pro přímou metodu stanovení "n", jak bylo popsáno v kapitole 5, je přesný i finančně dostupný pístový manometr s potlačeným rozsahem.

Přerušení zkoušky lze provést zařízením, které je konstrukčně velmi jednoduché, viz. obr. 21a, 21b. Vzhledem k tomu, že zařízení je v současné době laboratorního charakteru, nelze počítat s tím, že této zkoušky bude v širším měřítku používáno pro posuzování technologické tvářitelnosti ve zpracovatelských podnicích.

V závěru bych chtěla poděkovat Doc. Ing. M. Kořínkovi CSc, vedoucímu diplomové práce a svému konzultantovi Ing. V. Mikešovi za cenné rady při vypracování diplomového úkolu.

V Liberci 17.6.1968

Hana Berková

POUŽITÁ LITERATURA:

/ 1 / VIDETIČ, L.: Poznatky o nových směrech ve využití plechů košického sortimentu. Sborník z celostátní konference o tváření plechů, Liberec 1967.

/ 2 / DOUBRAVSKÝ, M.: Hodnocení hlubokotažnosti plechů. Sborník z celostátní konference o tváření plechů, Liberec1967.

/ 3 / KOŘÍNEK, M.: Hlubokotažné plechy - vlastnosti a požadavky. Sborník z celostátní konference o tváření plechů, Liberec 1967.

/ 4 / MIKEŠ, V.: Hydrostatická zkouška hlubokotažnosti plechů. Sborník z celostátní konference o tváření plechů, Liberec 1967.

/ 5 / TOMLENOV, A.D.: Mechanika processov obrabotki metallov davljenijem. GNTIML, Moskva 1963.

/ 6 / KOŘÍNEK, M. - MIKEŠ, V.: Příspěvek k problému stanovení lisovatelnosti plechů pro daný tvar výlisku. "Sborník vědeckých prací VŠST v Liberci" 1965.

/ 7 / PEŠINA, J.: Základy užité teorie plasticity. SNTL, Praha 1966.

/ 8 / KUZDAS, M. - KONEČNÝ, V.: Zjišťování přetvárné pevnosti u plechů. Sborník z celostátní konference o tváření plechů. Liberec 1967.

/ 9 / HAŠEK, V.: Tváření kovů za studena, SNTL Praha 1958

/ 10 / Výzkumná zpráva státního dílčího úkolu F 3-22-6/1c VŠST Liberec, KMT 1968

/ 11 / ŠČEGLOV, B.A.: K voprosu ob izpytaniji listovoj stali na dvuchosnoje rastjaženije gydravličeskoj vytjažki. S. Issledovanija v oblasti obrabotki metallov davljenijem, AN SSSR 1960.

/ 12 / JOHNSON, V. + DUNCAN, J.L.: The Use of the Biaxial Test Extensometer. "Sheet Metal Industries", 42, 1965, č.456.

/ 13 / DUNCAN, J.L.: Measurement of Strain Hardening in Sheet Metals. "Sheet Metal Industriers", 44, 1967, č. 456.

/ 14 / RUBJENKOVA, L.A. Opredělјenije plastičnosti listovoj stali po rezultatam hydrostatičeskovo ispitanija. "Kuzněčno-štampovočnoje proizvodstvo", 1960, č. 6.

OBSAH:

		str.
1.	ÚVOD	1
2.	MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY	4
2.1.	Vliv napjatosti a materiálových charakteristik na mezní hodnoty přetvoření	7
2.2.	Určování materiálových hodnot z hlediska analyzy procesu tažení	14
2.3.	Křivky zpevnění /zkouška tahem/	15
3.	ZPŮSOBY URČOVÁNÍ MATERIÁLOVÉ HODNOTY "n" OBECNĚ	17
4.	HYDROSTATICKÁ ZKOUŠKA	19
4.1.	Princip hydrostatického zkoušení plechů a základní předpoklady	19
4.2.	Hydrostatická zkouška podle Tomlenova, Ščeglova a Ruběnkové	23
4.3.	Hydrostatická zkouška podle Johnsona a Duncana	25
	Porovnání obou metod	29
5.	PŘÍMÉ STANOVENÍ MATERIÁLOVÉ HODNOTY "n" PROVEDENÍM HYDROSTATICKÉ ZKOUŠKY	30
5.1.	Návrh měřícího zařízení	30
6.	NEPŘÍMÁ METODA STANOVENÍ MATERIÁLOVÉ HODNOTY "n" PROVEDENÍM HYDROSTATICKÉ ZKOUŠKY	43
6.1.	Experimentální část	43
7.	ZÁVĚR	62
	POUŽITÁ LITERATURA	64