

Vysoká škola strojní a textilní v Liberci
nositelka Řádu práce

Fakulta strojní

obor: 23 - C7 - 8

Strojírenská technologie

Katedra tváření kovů a plastů

Zařízení na hydrostatické zkoušení plechů

Dušek Ivo

DP - ST 1766/81

Vedoucí práce: Ing. Viktor Mikeš CSc, KPT VŠST Liberec

Konzultant: Ing. F. Beran, KPT VŠST Liberec

Rozsah práce a příloh

Počet stran: 40

Počet příloh: 4

Počet obrázků: 10

Počet výkresů: 1

22. května 1981

Vysoká škola:

Katedra:

Fakulta:

Školní rok:

DIPLOMOVÝ ÚKOL

pro

obor

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

Název tématu:

Pokyny pro vypracování:

Rozsah grafických prací:

Rozsah průvodní zprávy:

Seznam odborné literatury:

Vedoucí diplomové práce:

Konsultanti:

Datum zadání diplomového úkolu:

Termín odevzdání diplomové práce:

L.S.

Vedoucí katedry

Děkan

Místopřísežné prohlášení:

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

V Liberci 22. května 1981

Obsah

<u>1. Úvod</u>	7
<u>2. Hydrostatické zkoušení plechů</u>	9
2. 1. Princip hydrostatické zkoušky	9
2.2. Způsoby určování potřebných veličin	11
2. 2. 1. Způsoby určování veličin podle sovětských autorů	11
2. 2. 2. Způsoby určování veličin podle Johnsona a Duncana	12
<u>3. Popis zařízení pro hydrostatickou zkoušku používané na KPT VŠST v Liberci</u>	14
3. 1. Poznatky získané při provádění hydrostatických zkoušek plechu na zařízení KPT	16
<u>4. Vlastní řešení</u>	17
4. 1. Vlastní upínací a tažná část	17
4. 1. 1. Popis zařízení	17
4. 1. 2. Kontrola závitu tažnice	18
4. 1. 3. Kontrola šroubu přidržovače	19
4. 1. 4. Síla přidržovače	21
4. 2. Snímací část	22
4. 3. Elektronická část	23

4. 3. 1. Měření a zpracování výsledků v analogové formě	23
4. 3. 2. Měření a zpracování výsledků pomocí číslicového počítače	23
4. 3. 3. Návrh konverze posuv - napětí	25
4. 4. Hydraulický obvod	28
<u>5. Vymezení použitelnosti navrhovaného zařízení</u>	30
5.1. Vymezení použitelnosti navrhovaného zařízení z hlediska zkoušených materiálů	30
5. 2. Vymezení použitelnosti navrhovaného zařízení z hlediska použitelných variant v metodice měření	30
<u>6. Závěr</u>	32
<u>7. Seznam literatury</u>	39

Seznam zkratek a symbolů

Q	síla působící na přidržovač	[MN]
R_0	poloměr křivosti	[mm]
s	tloušťka plechu	[mm]
r_0	poloměr tažnice	[mm]
p	tlak	[MPa]
H	vydutí tvořící křivky membrány	[mm]
K	převod průtahoměru	
a_1, a_2	hodnoty odečtené na indikátorech	[mm]
σ	napětí	[MPa]
σ_i	intenzita napětí	[MPa]
φ	stupeň přetvoření	
φ_i	intenzita přetvoření	
τ	napětí ve smyku	[MPa]
m	charakteristika stavu napjatosti	
n	exponent zpevnění	
(A/D)	analogo - digitální převodník	

1. ÚVOD

Technologie tváření plechů je výrobní metoda, která uspoří materiál a čas, tedy metoda vysoce efektivní. Kromě typických součástí vyráběných z plechu, jako např. karosářské díly, které ani jinými technologiemi nelze vyrábět, stále častěji výlisky nahrazují součástky vyráběné z plného materiálu obráběním, odléváním, dokonce i plné součástky vyráběné tvářením, např. výkovky.

Technologie tváření plechu umožňuje vyrobit součásti, které vykazují nejlepší využití materiálu, t.j. o nejmenší váze. Plech vyráběný ve svitcích je zvláště vhodný k hromadné výrobě lisovaných součástek při úplném využití mechanizace a automatizace. Podíl součástek vyrobených z plechu na konstrukci stroje je proto dobrým ukazatelem úrovně strojírenství.

Pomineme-li vliv rychlosti deformace a předpokládáme-li, že tváření probíhá za konstantní teploty, je tvařitelnost dána stavem napjatosti a materiálovými vlastnostmi tvářeného kovu.

Vzhledem k tomu, že stejný plech se chová při různých stavech napjatosti různě, nebyla dosud stanovena jednoznačná metodika pro určení tvařitelnosti plechu /7/, a proto je této problematice věnována stále větší pozornost. K tomuto účelu byla vyvinuta celá řada zkoušek a zkušebních zařízení a současně s tím byla vypracována metoda provádění analýzy procesu tažení výlisku z plechu z hlediska tzv. mezních hodnot přetvoření.

Ke zjišťování materiálových charakteristik plechů z hlediska jejich tvařitelnosti se používá zejména tahová a hydrostatická zkouška. Nejdůležitějšími charakteristikami jsou maximální rovnoměrné přetvoření, charakteristiky normálové anizotropie a křivky zpevnění u zkoušky tahové. U zkoušky hydrostatické jsou to mezní hodnoty přetvoření a křivky zpevnění.

Dosavadní zařízení pro hydrostatickou zkoušku, používané na VŠST v Liberci je instalováno na hydraulickém lisu zn. Reinartz, který v podstatě zajišťuje pouze přidržovací sílu Q . Vzhledem k tomu, že tento lis je potřebný pro jiné zkoušky je nutno navrhnout nové zařízení pro hydrostatické zkoušení plechů. Jedná se o takové, kde by nebylo nutné použití tohoto lisu.

2. Hydrostatické zkoušení plechů.

2. 1. Princip hydrostatické zkoušky.

Princip této zkoušky je zřejmý z obr. 4. /příloha 1./
V podstatě se jedná o tažení plechu v kruhové tažnici do volného prostoru působením hydrostatického tlaku p . Předpokladem ovšem je, aby nedocházelo k odebírání materiálu z oblasti přídržovače do volného prostoru tažnice. Sílu Q , kterou je plech v oblasti příruby sevřen, je možné přibližně stanovit podle Ščeglova /4/ použitím vztahu:

$$Q \approx 10 r_o^2 p_{\max} \quad (1)$$

Výtažek takto vzniklý je osově symetrický / v dostatečné vzdálenosti od hrany tažnice je tvar vzorku tvořen částí kulové plochy / a můžeme tedy na jeho vrcholu předpokládat rovnoměrnou dvouosou napjatost. Napětí působící ve směru tloušťky zanedbáváme.

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma, \quad \sigma_3 = 0$$

Z podmínky rovnováhy plyne:

$$\sigma = \frac{R_o p}{2 s}$$

S ohledem na osovou symetrii vzorku budou také hlavní přetvoření v rovině plechu stejná a lze psát:

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi \quad (4)$$

Ze zákona stálosti objemu ($\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0$):

$$\varphi = -\frac{\varphi_3}{2} = \frac{1}{2} \ln \frac{s_o}{s}$$

Při zjišťování křivek zpevnění $\sigma_i = \sigma_i(\varphi_i)$

bude tedy intenzita napětí dána obecným vztahem:

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

a intenzita přetvoření dána obecným vztahem:

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

V uvedeném případě kruhové tažnice můžeme vyjádřit intenzitu napětí vztahem

$$\sigma_i = \sigma = \frac{R_0 \cdot p}{2s}$$

a intenzitu přetvoření vztahem

$$\varphi_i = 2\varphi = \ln \frac{s_0}{s}$$

Tímto je v podstatě dán způsob provádění a vyhodnocování hydrostatické zkoušky. Je zapotřebí znát závislosti poloměru křivosti $R_0 = R_0/H$, tloušťky plechu $s = s/H$, nebo stupeň přetvoření $\varphi = \varphi(H)$ a tlaku $p = p/H$ jako funkci vydutí H . Při provádění zkoušky bez přerušování je možné tyto závislosti zaznamenávat jako funkci času τ a velikost vydutí H není nutno zaznamenávat.

V případě použití kruhové tažnice pro hydrostatickou zkoušku probíhá tváření plechu za podmínek rovnoměrné dvouosé napjatosti, čili $m = 1$. To znamená, že tato zkouška umožňuje dosáhnout těch největších přetvoření, k jakým může při dvouosé napjatosti dojít, a tím získat křivku zpevnění pro dvojnásobný rozsah přetvoření oproti tahové zkoušce. Uvedené vyplývá ze vztahu pro vyjádření mezních hodnot intenzity přetvoření [9]

$$\varphi_{ik} = \frac{2\sqrt{1 - m + m^2}}{2 - m}$$

Kruhovou tažnici lze považovat za speciální případ tažnice obecně eliptické. Použitím eliptických tažnic u hydrostatické zkoušky docílíme tváření plechu za podmínek obecné rovinné napjatosti. Hodnotu charakteristiky stavu napjatosti m lze měnit poměrem velikosti os elipsy. Tímto se můžeme přiblížit skutečnému stavu napjatosti při vlastním technologickém procesu, přičemž hydrostatická zkouška bude, vzhledem ke svému charakteru, patřit především mezi zkoušky laboratorní. Například v porovnání se zkouškou hloubením podle Erichsena, použitím tlakové kapaliny či plastogelů, se u hydrostatické zkoušky odstraní tření mezi zkoušeným plechem a trnem. Dobrým provedením tlakového obvodu se vyloučí vliv obsluhy. Toto umožňuje dosažení přesnějších výsledků.

Použití zařízení na hydrostatické zkoušení plechů se neomezuje jen na zjišťování křivek zpevnění. Je na něm možno provádět celou řadu dalších užitečných měření jako např. experimentální ověřování platnosti vztahů odvozených použitím teorie plasticity, experimentální zjišťování Keeler - Goodwinových křivek mezních deformací apod.

2. 2. Způsoby určování potřebných veličin.

Hydrostatickou zkoušku lze provádět jako přerušovanou, nebo jako kontinuální / nepřerušovanou /. Pro určení potřebných veličin k získání křivek zpevnění je měření možné provést také dvojím způsobem.

2. 2. 1. Způsoby určování veličin podle sovětských autorů.

Autoři Tomlenov, Ščeglov, Rubenkova / 5, 4, 6 / publikovali způsob získávání jednotlivých hodnot pro přerušovanou zkoušku. Při určování poloměru křivosti R_0 vycházejí z předpokladu, že tvořící křivku deformované membrány je možno aproximovat:

$$Z = a + by^2 + cy^4 \quad (2)$$

Koeficienty a , b , c , lze určit dvojím způsobem z okrajových podmínek viz. obr. 2 / příloha 2 /. Poloměr křivosti R_0 v oblasti vrchlíku se potom stanoví jako poloměr osculační kružnice v bodě $z = H$ a $y = 0$. Pro uvedený případ je poloměr křivosti dán vztahem:

$$R_0 = \frac{1}{2b}$$

Ke stanovení souřadnic ve směru osy z / nebo jejich rozdílu / je použito indikačních hřodin, doplněných případně pákovým převodem ke zvětšení rozsahu.

O způsobu $s = s / H$ se autoři podrobně nezmiňují. Stanovení tloušťky plechu ve vrcholu membrány bylo zřejmě provedeno přímým měřením / tzn., že vzorek byl z přípravku vyjmut /, nebo nepřímo proměřováním deformační sítě s použitím zákona stálosti objemu.

Zjišťování závislosti $p = p / H$ nečiní v praxi potíže a autoři se o této problematice nezmiňují.

2. 2. 2. Způsoby určování veličin podle Johnsona a Duncana.

Tito autoři vyvinuli zařízení takové, že k provádění zkoušky není potřeba hydraulického lisu. Z tohoto řešení jsem vycházel při konstrukci upínací části. Pro měření poloměru křivosti a stupně přetvoření navrhli uvedení autoři měřicí stojánek, viz. obr. 3 / příloha 3 /. Poloměr křivosti se měří zařízením na principu sférometru a vypočteme jej dosazením do vztahu:

$$R_0 = \frac{r^2 + v^2}{2v} \quad (3)$$

Stanovení stupně přetvoření je prováděno nepřímo, použitím speciálního průtahoměru. Průměr D_1 lze vyjádřit vztahem:

$$D_1 = D_0 + K / a_1 + a_2 /$$

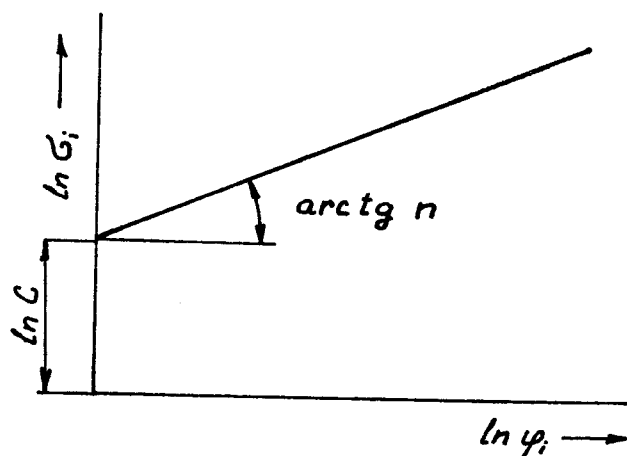
a poměr $\frac{s_0}{s}$ pro vyjádření φ_3 , pak vyjádříme vztahem:

$$\frac{s_0}{s} = \left[1 + \frac{K(a_1 + a_2)}{D_0} \right]^2$$

Zkouška byla rovněž prováděna jako přerušovaná.

V další práci Duncana /3/ je popisován způsob provádění zkoušky bez přerušení. V měřicím zařízení viz. obr. 3 / příloha 3 / byly indikační hodinky nahrazeny snímači / pravděpodobně indukčními /. Princip stanovení hodnot R_0 a $\frac{s_0}{s}$ zůstává stejný. Signály od jednotlivých snímačů jsou převedeny do logaritmického tvaru a zpracovány analogovou jednotkou viz. obr. 4 / příloha 4 /. Výsledkem je registrační zápis křivky zpevnění $G_i = G_i(\varphi_i)$ v logaritmických souřadnicích, který zaznamená souřadnicový zapisovač.

Obě popsané metody vyhodnocování hydrostatické zkoušky tedy umožňují získání křivky zpevnění pro daný materiál. Důležitou materiálovou hodnotu n je nutno stanovit nepřímým způsobem viz. obr. I., provedením grafické interpolace přímkou.



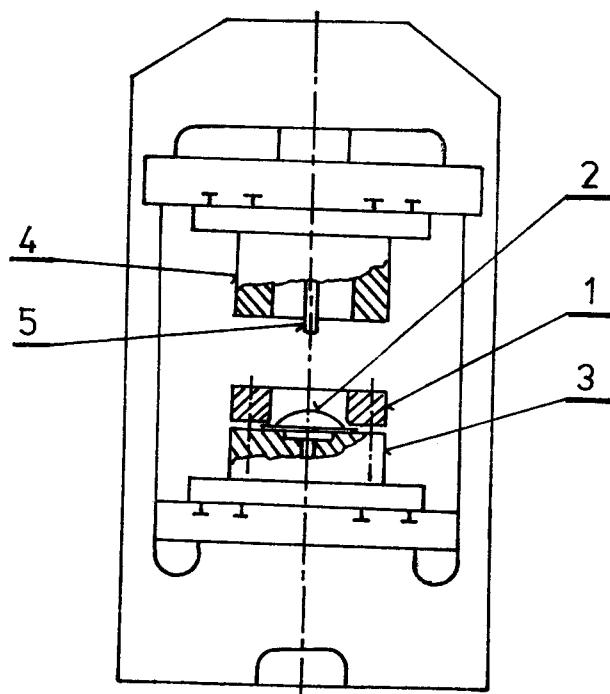
$$G_i = C \varphi_i^n$$

$$\ln G_i = \ln C + n \ln \varphi_i$$

obr. I.

3. Popis zařízení pro hydrostatickou zkoušku používané na KPT, VŠST v Liberci.

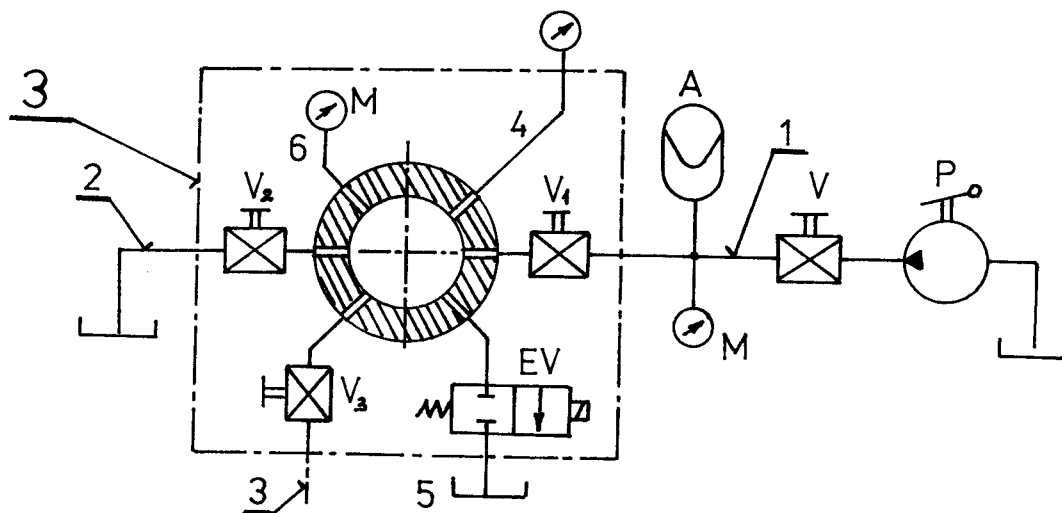
Zařízení bylo konstruováno jako univerzální, pro laboratorní měření a výzkum. Na obr. II. je znázorněno schéma dosavadního zařízení, které je instalováno na hydraulickém lisu zn. Reinatz. Hydraulický lis je v podstatě využit pro vyvození síly Q .



obr. II.

Horní část vlastního přípravku umožňuje pomocí dutého rozpěrného válce 4 sevření vzorku 2 mezi tažnicí 1 a spodní část nástroje 3. V rozpěrném válci je zabudováno zařízení 5 na měření vydutí. Toto zařízení je zkonstruováno tak, že doraz / kontakt / lze buď předem nastavit na zvolenou velikost vydutí, nebo doraz sleduje průběh tváření vzorku. To umožňuje více alternativ v provádění měření, jak bude uvedeno dále. Spodní část nástroje 3 je opatřena měřícím a ovládacím zařízením tlakového systému viz. obr. III.

Zdrojem tlakového oleje je ruční pumpa P, původně určená pro zkoušení trysek spalovacích motorů, která může vyvodit tlak až 60 MPa. Akumulátor je plynový z letounu MIG 21 pro $p_{\max} \approx 18$ MPa. Přívod tlakového oleje pod zkušební vzorek uzavírá jehlový ventil V_1 a ventil V_2 je určen k vypouštění tohoto oleje. Ventil V_3 uzavírá větev přívodu tlakového vzduchu, který slouží k vyprazdňování oleje z pracovního prostoru pod membránou. Větev 4 je určena pro připojení pístového manometru s potlačeným rozsahem, nebo pneumatického snímače tlaku. M jsou kontrolní manometry pro průběžnou kontrolu funkce tlakového obvodu. Elektromagnetický přepouštěcí ventil EV je řízen pomocí ovládacího panelu. To znamená, že můžeme zkoušku přerušit v libovolném okamžiku, nebo se průběh tlakování v prostoru pod membránou automaticky zastaví při dosažení nastaveného vydatí. Činná plocha spodní části přípravku 3 je uzpůsobena tak, že umožňuje provádění zkoušek s použitím tažnic o průměru 40 - 120 mm a tažnic eliptických o různém poměru velikosti os.



obr. III.

Křivky zpevnění jsou zjišťovány zásadně provedením přerušované zkoušky pro předem nastavené vydatí. Připojení zmíněného pístového manometru, nebo pneumatického snímače tlaku umožňuje

přerušeni zkoušky v okamžiku, kdy $\frac{dp}{dH} = 0$, to znamená přímé stanovení hodnoty $\underline{n}$ použitím vztahu: / 1 /

$$n = \frac{\varphi_{3k}}{2}$$

Poloměr křivosti R_0 je měřen sférometrem, tedy přímo. Stupeň deformace je zjišťován nepřímo z deformace elementu kruhové sítě na vrcholu membrány. Síť je v průběhu zkoušky fotografována společně s odpovídajícími hodnotami tlaku, vydutí a poloměru křivosti. Po skončení zkoušky je pochopitelně nutné ze záznamu na filmu provést přepočet z ohledem na změnu poloměru křivosti. Vzdálenost objektivu od vrcholu membrány je v průběhu zkoušky konstantní.

3. 1. Poznatky získané při provádění hydrostatických zkoušek plechu na zařízení KPT na VŠST.

1. Porovnávací měření / pokud jde o stanovení poloměru křivosti / vedla k závěru, že vzhledem k jednoduchosti je rozhodně výhodnější provádět přímá měření sférometrem. Z hlediska přesnosti získaných výsledků jsou pak přímá tak i nepřímá metoda srovnatelné.
2. Mezi zdroj tlaku a vlastní zařízení je nutno zařadit akumulátor. Vyvarujeme se tím eventuálního pulzování tlaku, které by ne jen zkreslilo průběh zkoušky, ale znemožnilo by i přímé stanovení hodnoty $\underline{n}$ z podmínky $\frac{dp}{dH} = 0$.
3. Nepřímým měřením tloušťky stěny se dopustíme určité chyby, protože tloušťka stěny je nejmenší v ose vzorku a průtahoměr nebo deformační síť nám zahrnuje určitou část vrchlíku. Hodnota $\underline{n}$ takto stanovená vyjde o několik procent nižší a tedy materiál nepatrně podceníme. Toto můžeme pojmout jako určitou bezpečnost kvůli případným výkyvům v kvalitě plechu.

4. VLASTNÍ ŘEŠENÍ

Na navrhované zařízení v souladu s požadavky zadání diplomového projektu jsou kladeny tyto nároky:

1. Zařízení nesmí být vázano na použití lisu.
2. Zařízení musí umožnit kontinuální měření jednotlivých veličin, popřípadě jejich současné zpracování.

Jednotlivé části zařízení lze rozčlenit na:

- a/ vlastní upínací a tažnou část
- b/ snímací část
- c/ elektronickou část
- d/ hydraulický obvod

4. 1. Vlastní upínací a tažná část.

Vlastní upínací a tažná část zajišťuje:

- a/ Upnutí plechu takovou silou, že nedojde k proklouznutí materiálu z prostoru tažnice.
- b/ Tažení plechu pomocí tlakového oleje.

Při svém návrhu jsem po prostudování literatury a po úvaze vycházel z řešení autorů Johnsona a Duncana /2/. Jejich řešení se jeví jako nejjednodušší a nejspolehlivější. Dále jsem předpokládal využití již existujícího stříhacího nástroje na kruhový přístřih $\varnothing 165$ mm.

4. 1. 1. Popis zařízení / viz. výkres /.

Zkoušený plech je sevřen mezi tažnicí / pos. 2. / a přidržovačem / pos. 3. /. U vzorku je v oblasti příruby prolis, který snižuje nárok na přidržovací sílu Q. Tento prolis může být vytvořen dvěma způsoby:

1. Přímou brzdící hranou přidržovače při upínání přístřihu.
Tvářecí síla pro vytvoření prolisu je vyvozována pomocí šroubů / pos. 7. /, rovnoměrně dotahovaných po obvodu tažnice.

2. Pomocí tažného nástroje / při upínání vzorku je již prolis vytvořen /.

Návrh je proveden pro druhou alternativu tzn., že vzorek je při zakládání středěn na již vytvořený prolis. Materiál tažnice a přídržovače / 11 700 / by pro první alternativu musel být navržen kvalitnější, např. 14 260.4. Síla přídržovače Q je vyvozena dotažením šesti šroubů M 16 a dále sálou, která je dána velikostí plochy přídržovače a tlaku v prostoru pod vzorkem:

$$Q = 6Q_{\text{š}} + p \cdot S_{\text{př.}} \quad (5)$$

Při upínání vzorku se postupuje takto:

- a/ Vyšroubujeme tažnici a na přídržovač založíme přístřih, který se vystředí pomocí prolisu na brzdící hranu.
- b/ Zašroubujeme tažnici téměř na doraz tak, aby její otvory pro šrouby a závitové otvory v přídržovači byly proti sobě.
- c/ Našroubujeme a dotáhneme šrouby.
- d/ Dotáhneme tažnici na doraz.

Nyní můžeme přistoupit k naplnění prostoru pod vzorkem olejem a provádět tlakování.

4. 1. 2. Kontrola závitu tažnice.

Kontrolu jsem provedl pro maximální tvářecí tlak $p_{\text{max}} = 20 \text{ MPa}$, což je hodnota, která nebyla překročena ani při zkoušení vzorků malého průměru / např. pro plech KOHAL tl. 0,8mm průměr tažnice 60mm, maximální tvářecí tlak dosáhl 16 MPa./ Závit tažnice je navržen M 230x6, materiál tělesa zařízení 42 2640.2 má zaručenou mez průtažnosti 240MPa. Materiál tažnice 11 700.1 má zaručenou mez průtažnosti 370 MPa.

Střední průměr závitu šroubů	$d_2 = 226,103 \text{ mm}$
Malý průměr závitu šroubů	$d_3 = 222,639 \text{ mm}$
Nosná hloubka závitu	$H_1 = 3,248 \text{ mm}$

Výška matice / tažnice / $h = 50 \text{ mm}$

Rozteč $t = s = 6 \text{ mm}$

Síla, která se snaží tažnici vytrhnout z tělesa:

$$F = p_{\max} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 20 \cdot \frac{\pi \cdot 0,22^2}{4} = 0,76 \text{ MN}$$

d - $\varnothing$ přídržovače

Otlačení:

$$p = \frac{F}{\pi \cdot d_2 \cdot H_1 \cdot \frac{h}{s}} = \frac{0,76 \cdot 10^6}{\pi \cdot 226,1 \cdot 3,248 \cdot \frac{50}{6}} = 39,5 \text{ MPa}$$

Ohyb:

$$\sigma_o = \frac{F \cdot \frac{H_1}{2}}{\frac{1}{6} \pi \cdot \frac{h}{s} \cdot d_3 \cdot (0,8s)^2} = \frac{0,76 \cdot 10^6 \cdot \frac{3,248}{2}}{\frac{1}{6} \pi \cdot \frac{50}{6} \cdot 222,64 \cdot (0,8 \cdot 6)^2} = 55,1 \text{ MPa}$$

Střih:

$$\tau = \frac{F}{\pi \cdot 0,8 \cdot s \cdot \frac{h}{s} \cdot d_3} = \frac{0,76 \cdot 10^6}{\pi \cdot 0,8 \cdot 6 \cdot \frac{50}{6} \cdot 222,64} = 27,2 \text{ MPa}$$

Z vypočtených hodnot je zřejmé, že závit s velkou bezpečností vyhovuje.

4. 1. 3. Kontrola šroubů přídržovače.

Jsou navrženy šrouby M 16, materiál 8G / 12 042 minimální mez průtažnosti 640 MPa/, osová síla v jednom šroubu $Q_g = 40 \text{ kN}$.

Střední průměr závitu šroubů $d_2 = 14,701 \text{ mm}$

Malý průměr závitu šroubů $d_3 = 13,546 \text{ mm}$

Nosná hloubka závitu $H_1 = 1,083 \text{ mm}$

Stoupání $s = 2 \text{ mm}$

Průřez jádra šroubu $S = 157 \text{ mm}$

Utahovací moment:

$$M_K = \frac{1}{2} Q_s \cdot d_2 \cdot t_g (\gamma + \varphi) = \frac{1}{2} 4 \cdot 10^4 \cdot 14,7 \cdot 10^{-3} t_g (2,48 + 9,83) = 64,2 \text{ Nm}$$

Namáhání na krut:

$$\tau = \frac{M_K}{\frac{\pi \cdot d_3^3}{16}} = \frac{64,2}{\frac{\pi \cdot (13,546 \cdot 10^{-3})^3}{16}} = 131,6 \text{ MPa}$$

Napětí v tahu:

$$\sigma = \frac{Q_s}{S} = \frac{4 \cdot 10^4}{157} = 254,8 \text{ MPa}$$

Bezpečnost v krutu:

$$b_\tau = \frac{\tau_K}{\tau} = \frac{640 \cdot 0,6}{131,6} = 2,92$$

Bezpečnost v tahu:

$$b_\sigma = \frac{\sigma_K}{\sigma} = \frac{640}{254,8} = 2,51$$

Výsledná bezpečnost:

$$b = \frac{b_\sigma \cdot b_\tau}{\sqrt{b_\sigma^2 + b_\tau^2}} = \frac{2,51 \cdot 2,92}{\sqrt{2,51^2 + 2,92^2}} = 1,9$$

Vzhledem k tomu, že přidržovač je navržen z jiného materiálu než šrouby, provedl jsem kontrolu namáhání závitu.

Namáhání na otlačení:

$$p = \frac{Q_s}{\pi \cdot d_2 \cdot H_1 \cdot \frac{h}{S}} = \frac{4 \cdot 10^4}{\pi \cdot 14,7 \cdot 1,083 \cdot \frac{16}{2}} = 100 \text{ MPa}$$

Namáhání na ohyb:

$$\sigma_o = \frac{Q_s \cdot \frac{H_1}{2}}{\frac{1}{6} \pi \cdot \frac{h}{S} \cdot d_3 \cdot (0,8 \cdot S)^2} = \frac{4 \cdot 10^4 \cdot \frac{1,083}{2}}{\frac{1}{6} \pi \cdot \frac{16}{2} \cdot 13,546 \cdot (0,8 \cdot 2)^2} = 148,9 \text{ MPa}$$

Namáhání na stříh:

$$\tau = \frac{Q_s}{0,8 \cdot s \cdot \pi \cdot \frac{h}{3} \cdot d_3} = \frac{4 \cdot 10^4}{0,8 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{16}{2} \cdot 13,546} = 73,4 \text{ MPa}$$

Vypočtené hodnoty jsou pro navržený materiál vyhovující.

4. 1. 4. Síla přidržovače.

Vzorek je mezi tažnicí a přidržovačem svírán silou, která je součtem síly vyvozené šrouby a síly, která je přímo úměrná tlaku v prostoru pod přidržovačem a je dána vztahem (5).

Síla od tlakové kapaliny :

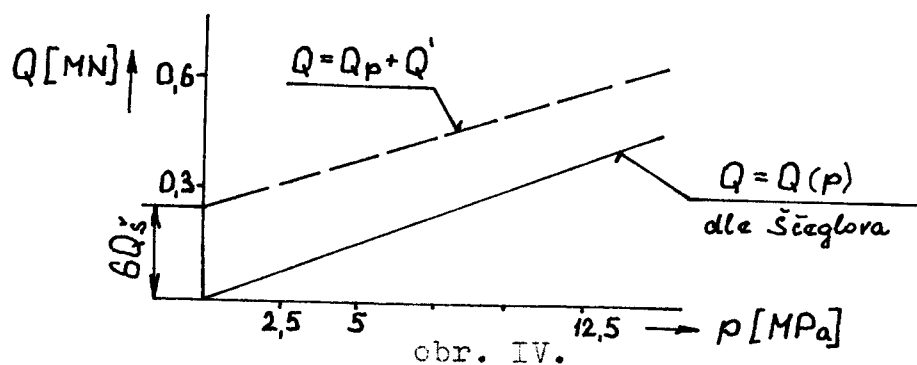
$$Q_p = p \cdot S_{pr} = p \cdot \frac{\pi}{4} (0,22^2 - 0,12^2) = 0,0267 \cdot p$$

Síla vyvozená šrouby:

$$Q' = 6Q_s = 6 \cdot 0,04 = 0,24 \text{ MN}$$

Na obr. IV. je porovnána potřebná síla dle Ščeglova (4)/tato je však uváděna pro hladký přidržovač/ se silou dosahovanou navrženým zařízením.

Z obrázku je patrné, že síla přidržovače u zařízení mnou navrženého je vyšší než teoretická síla uváděná Ščeglovem. To znamená, že bychom mohli vystačit s hladkým přidržovačem. Po dohodě s konzultantem byla brzdící hrana ponechána, protože vyztužuje zkoušený vzorek a dále se na tuto hranu provádí středění zakládáního přístřihu, opatřeného již prolisem.



4. 2. Snímací část.

K vyhodnocení hydrostatické zkoušky je nutné znát okamžité hodnoty tlaku, tloušťky plechu v ose vzorku a poloměru křivosti tvořící křivky v oblasti vrchlíku vzorku. Pro kontinuální měření nepřipadá v úvahu přímé stanovení změny tloušťky v průběhu tažení vzorku a stupeň deformace je nutno stanovit nepřímo z deformace v rovině plechu. Je tedy nutné použití průtahoměru / viz. obr. 3., příloha 3 /, jehož ramena sledují protahování určité části vrchlíku a spolu s odpovídajícím poloměrem křivosti / který je nutný pro přepočet s ohledem na jeho změnu / můžeme zjistit logaritmický stupeň přetvoření měřené části vrchlíku. Při tom dochází k určité chybě /1/, protože toto měření zahrnuje deformaci určité oblasti, ale tloušťka plechu je nejmenší v ose vzorku. Je proto třeba nalézt optimální průměr na kterém by se měřila deformace, protože na druhé straně se zmenšováním tohoto průměru klesá přesnost měření.

Poloměr křivosti lze stanovit v zásadě oběma metodami viz. kap. 2. 2. 1 a 2. 2. 2, tzn. snímáním potřebných okrajových podmínek pro koeficienty ve vztahu (2), nebo zařízením na principu sférometru a poloměr křivosti je pak dán vztahem (3).

Měřicí stojánek, jaký navrhli Johnson a Duncan /2/, umožňuje proměřování kruhových vzorků. Nabízí se řešení použití dvou průtahoměrů, které by měřili deformace ve směrech vzájemně kolmých, a také dvou sférometrů / nebo snímačů hodnot pro okrajové podmínky /, které by měřili hodnoty pro zjištění poloměru křivosti ve stejných směrech. Takováto "univerzální měřicí hlava" by umožnila proměřování vzorků tvářených v eliptické tažnici. U kruhové tažnice by toto zařízení mohlo být využito pro ověření platnosti vztahu (4).

K měření tlaku je vhodnější membránový tlakoměr, protože u pístového tlakoměru je potřeba zajistit rotaci pístu pro zajištění kapalinného tření a to jeho konstrukci komplikuje. Dalším řešením by mohlo být zabudování kompaktního snímače / např. kapacitního / přímo do používaného pístového tlakoměru.

4. 3. Elektronická část.

Pro umožnění kontinuálního měření mechanických charakteristik je nutno provést převod mechanických veličin, na elektrické např. na změnu odporu, kapacity, indukčnosti, nebo napětí. Tím získáme možnost záznamu jednotlivých veličin pomocí smyčkového oscilografu, nebo možnost přímého a operativního zpracování buď:

1. V analogové formě na analogovém počítači, nebo
2. v číslicové formě na číslicovém počítači, po převodu analogových údajů do číslicové formy analogo - digitálními převodníky.

Druhá forma sleduje současný světový vývoj v měřicí a výpočtové technice a dává jednak možnost uchování experimentálně zjištěných dat v paměti aparatury, či počítače, jednak zpracování experimentálních výsledků v libovolných relacích.

4. 3. 1. Měření a zpracování výsledků v analogové formě.

Blokové schéma této varianty je uvedeno na obr.4 /příloha 4/. Okamžité hodnoty měřených veličin se převádějí do logaritmického tvaru a jsou zpracovány analogovým počítačem na potřebnou závislost / v tomto případě závislost intenzita napětí - intenzita přetvoření. Tato závislost se graficky znázorňuje na $X = Y$ zapisovači.

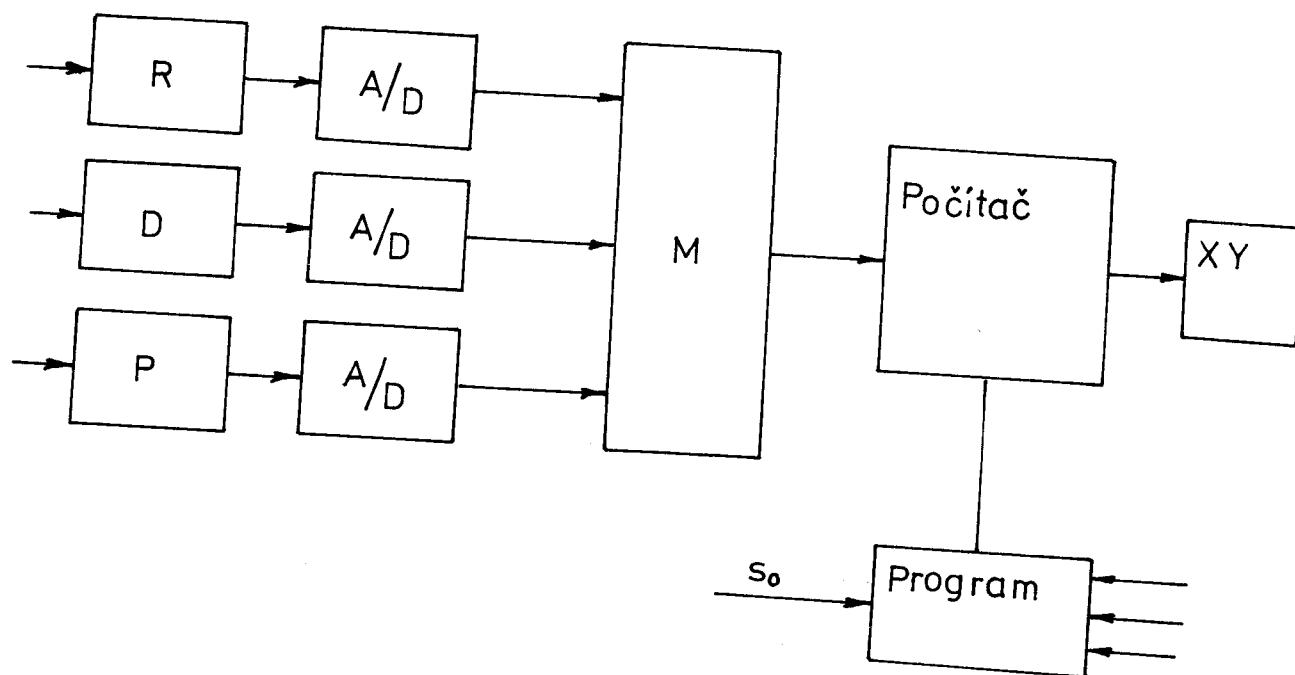
4. 3. 2 Měření a zpracování výsledků pomocí číslicového počítače.

Na obr. V. je uvedeno blokové schéma této varianty. V uvedeném schématu, jsou naznačeny bloky R, P, D, které představují konvertory $R - U$, $p - U$, $D - U$, které převádí průběhy daných mechanických veličin na časové změny napětí $U //$.

Způsob konverze bude podrobněji popsán dále. V blocích A/D se analogové změny napětí U převádí do číslicové formy. Z tuzemské produkce by bylo možno použít převodník Tesla BM 480, BM 445 E, jenž je popsán /11/. Eventuálně použít A/D převodník vysoké přesnosti z číslicového voltmetru Metra. Nejvhodnějším řešením by ale bylo zakoupení A/D převodníku v integrované formě, protože řada zahraničních firem vyrábí tyto v různém provedení podle rozlišovací schopnosti a různé konverzní rychlosti. Uvedené A/D převodníky jsou monolitického typu vyrobené na jednom čipu, a je možné je zakoupit přes "Službu výzkumu". To by byla neoptimálnější možnost, zařízení by bylo velmi spolehlivé, malé a energeticky nenáročné.

Dalším prvkem elektronického řetězce je paměť M, v níž by byly uchovány experimentálně získané informace. Nejjednodušší formou takové paměti by byla paměť zhotovená z logických prvků TTL MSI, dodávaných n. p. Tesla Rožnov. Takto získaná data lze snadno přehrát do paměti počítače a zpracovat pomocí vhodného programu pro daný záměr. Mezi paměť a číslicový počítač /vyhoví malý stolní počítač např. Hewlet - Packard/ je vhodné zařadit děrovačku. Tímto se trvale uchovají naměřené hodnoty a umožní se tak zpracování výsledků pomocí číslicového počítače i když tento není na katedře přímo. Součástí dané varianty je samozřejmě i v tomto případě X - Y zapisovač a vyhoví BAK 4T resp. BAK 5T.

Výhledově se počítá s vybudováním terminálového pracoviště, které by umožňovalo takovéto zpracování hodnot, získaných při provádění hydrostatické zkoušky, na centrálním školním počítači. I v tomto případě by po převodu analogových veličin na číslicové bylo vhodné tyto zaznamenávat na děrnou pásku. V případě poruchy při přenášení údajů na centrální počítač by se experiment nemusel opakovat.

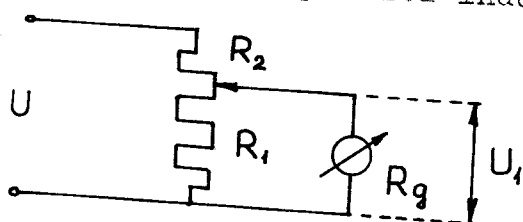


obr. V.

4. 3. 3. Návrh konverze - posuv napětí.

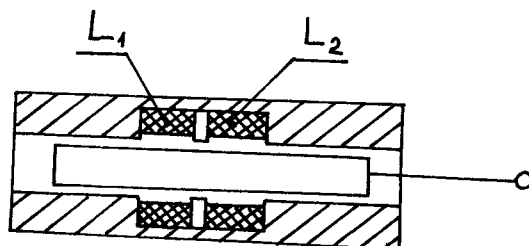
Základním článkem elektronického řetězce jsou převodníky mechanických veličin na elektrické. Aby bylo možno měřit a zpracovávat výsledky s dostatečnou přesností, a také aby výsledky byly reprodukovatelné, je velmi důležitá volba typu snímačů [11].

Nejjednodušší zpracování elektrického signálu vychází u odporových snímačů. Změna odporu je docílena přestavením polohy běžce reostatu a u např. potenciometrického zapojení viz. obr. VI. získáme přímo změnu napětí U_1 , která bude za předpokladu $R_g \ll R$; $R = R_1 + R_2$ bude prakticky lineární. U odporových čidel je však nutno počítat s nestálostí běžce a dráhy, případně i se skokovou změnou funkce a velkým vlastním šumem. Další možností je použití indukčních snímačů.



obr. VI.

Pro měření změn délkových rozměrů v našem případě je vhodná konstrukce snímače viz. obr. VII.

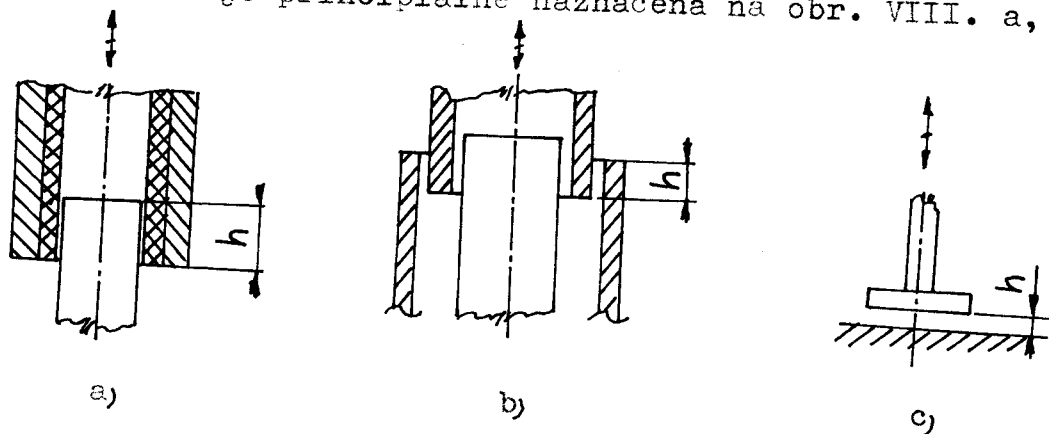


obr. VII.

Obě cívky L_1 , L_2 jsou zapojeny diferenciálně, což je výhodné pro mostovou metodu vyhodnocování změny indukčnosti. Změnu indukčnosti lze samozřejmě vyhodnocovat i v rezonančních obvodech. Výroba těchto snímačů je obtížná a vyžaduje zkušenosti i speciální materiály pro magnetické obvody. Vinutí musí být provedeno velmi pečlivě, aby bylo dosaženo přesné symetrie. Problémem je materiál jádra, protože pro kmitočet napájecího proudu větší než 5 kHz nelze použít jen měkké železo./7/

Pro ideový návrh a popis jednotlivých článků elektronického řetězce pro provedení konverze posuv - napětí, jsem na základě rozvahy s použitím literatury /7, 11,/ volil jako základní článek kapacitní snímač, i když kapacitní systém je dosti dražší než indukční systém. Umožňuje totiž nejvyšší možnou věrnost přenosu a minimální zkreslení.

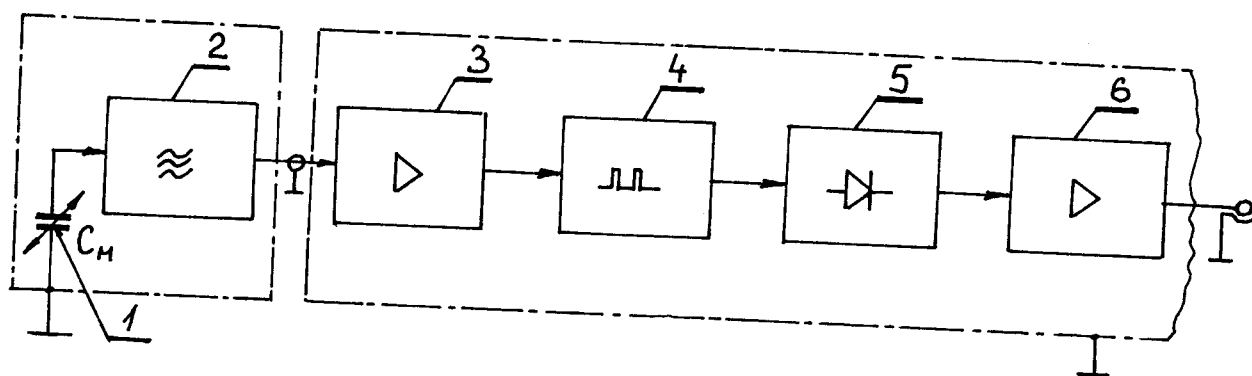
Konstrukce kapacitního čidla je oproti indukčnímu velmi jednoduchá a je principiálně naznačena na obr. VIII. a, b, c.



obr. VIII.

Na obr. VIII. a, je kapacitní snímač koaxiálního typu, který má v celém rozsahu lineární charakteristiku. Materiál dielektrika musí vyhovovat požadavkům pro jeho použití ve vysokofrekvenčním poli. Vhodné je použití polystyrénu nebo teflonu, které mají nejmenší ztráty. Materiál elektrod je ocel s malou tepelnou roztažností. Snímač podle obr. VIII. b se liší od snímače na obr. VIII. a tím, že obě elektrody kondenzátoru jsou pevné a mění se dielektrikum. Snímač naznačený na obr. VIII. c. je vhodný pro malé změny posuvu /řádu 0,1 mm/, poněvadž má ne-lineární /hyperbolickou/ charakteristiku.

Blokové schéma převodníku posuv - napětí /libovolného bloku, např. bloku P v obr. V. / je uvedeno na obr. IX. Na tomto obrázku značí 1 - kapacitní snímač, 2 - oscilátor, 3 - širokopásmový zesilovač, 4 - převodník na pravouhlé uniformní impulzy, 5 - počítačový detektor, 6 - přesný operační zesilovač.



obr. IX.

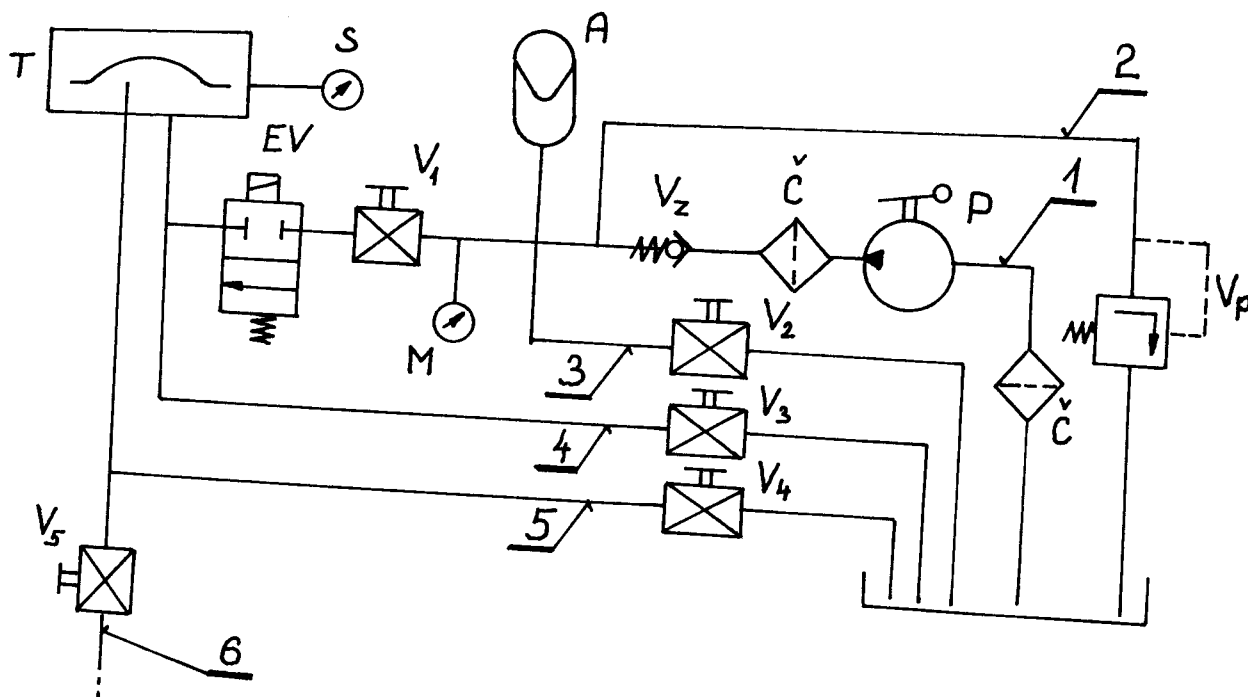
Funkce daného zapojení je následující:
Měrný kondenzátor C_M je součástí vysokofrekvenčního oscilátoru, který v závislosti na změnách kapacity C_M mění frekvenci, takže výsledek je frekvenčně modulovaný vysokofrekvenční signál: $f_0 \pm \Delta f$. Základní frekvence oscilátoru musí být zvolena vzhledem k aplikaci použitých polovodičových prvků.

Vf. oscilátor je nutno umístit co nejblíže k měrnému kondenzátoru C_M . Výstup je koaxiálním kabelem, kterým se vf. oscilátor spojí s ostatními elektronickými obvody. Dále je frekvenčně modulovaný signál zesílen širokopásmovým zesilovačem s oboustrannou amplitúdovou limitací a v následujícím stupni je pomocí logických obvodů upraven na uniformní pravouhlý průběh /pulzy/ o stejné ploše a střídě, která je závislá na frekvenci $f_0 \pm \Delta f$. Další stupeň převodníku je detektor, který v podstatě sečte plochu uniformních pulzů. V posledním stupni, což je lineární operační zesilovač, který signál zesílí na potřebnou velikost.

Hodnotu takto vzniklého lze již jednoduše měřit, nebo zaznamenat na světlocitlivou pásku smyčkového oscilografu.

4. 4. Hydraulický obvod.

Tuto část je nutno konstruovat v souladu s částí upínací a tažné. Na obr. X. je schéma tohoto obvodu.



obr. X.

Jednotlivé části jsou tyto:

1 - tlaková větev, 2 - přepouštěcí /pojistná/ větev, 3 - větev k vypouštění akumulátoru, 4 - větev vypouštění tlakového oleje z prostoru pod vzorkem, 5 - odvzdušňovací větev, 6 - přívod tlakového vzduchu k vyprázdnění prostoru pod vzorkem. Pro navrhované zařízení je možné beze zbytku využít prvků hydraulického obvodu již stávajícího zařízení. Objem akumulátoru vyhoví i pro nepřerušovanou zkoušku. Rovněž je použita ruční pumpa P a elektromagnetický ventil EV. VP je pojistný tlakový ventil, který při překročení nastaveného tlaku přepustí část oleje zpět do nádrže. VZ znamená zpětný ventil, který drží tlak v akumulátoru. V_1 až V_5 jsou uzavírací ventily jednotlivých větví. Takový obvod umožní nahradit ruční pumpu hydrogenerátorem poháněným elektromotorem /hydrogenerátor axiální nebo radiální pístový p_{max} minimálně 25 MPa/. Další vývoj hydraulického obvodu by mohl směřovat k zajištění konstantní rychlosti deformace vzorku. Pouhým použitím škrtícího ventilu se stabilizací, který zajišťuje konstantní dodávané množství tlakového oleje v celém rozsahu tlaku, toho nedocílíme, protože prostor /jeho objem/ pod membránou se mění nelineárně.

5. Vymezení použitelnosti navrhovaného zařízení

5. 1. Vymezení použitelnosti navrhovaného zařízení z hlediska zkoušených materiálů

Brzdící hrana tažnice omezuje použitelnost zařízení z hlediska zkoušeného plechu, protože tento musí být schopen plastické deformace při vytváření prolisu. Brzdící hrana byla navržena na základě ústně zadaného materiálu / ocel tř. 11 500, maximální tloušťka plechu $t_{\max} = 1 \text{ mm}$ /, který z hlediska tváření má nejméně výhodné vlastnosti ze zkoušených plechů. Hydrostatická zkouška byla vypracována zejména pro posuzování lisovatelnosti hlubokotažných plechů.

Při použití měřicího zařízení viz. 4. 2. bude pravděpodobně nutné pro průtahoměr vytvořit důlčíkem dva /čtyři/ velmi jemné důlky, aby bylo zaručeno unášení ramen snímače. Toto je možné připustit s ohledem na to, že tato zkouška je málo citlivá na vnitřní a povrchové vady materiálu a na rozdíly v tloušťce plechu. Trhlina po porušení vzorku prochází téměř vždy osou vzorku. /1/

5. 2. Vymezení použitelnosti navrhovaného zařízení z hlediska použitelných variant v metodice měření.

Po zhotovení upínací a tažné části viz. výkres, lze provádět přerušovanou hydrostatickou zkoušku metodikou používanou na existujícím zařízení VŠST v Liberci. Je ovšem ještě nutné zhotovit stojánek pro kontakt/viz. kap. 3./ kterým se nastavuje vydatí H, při kterém se zkouška přeruší a odečtou se jednotlivé veličiny.

Pro provádění nepřerušované zkoušky je nutno zhotovit měřicí stojánek /viz. kap. 2. 2. 2 a 4. 2/ se snímači / indukčními, kapacitními, odporovými apod./ a elektronické zařízení

pro konverzi změny elektrické veličiny na snímači na změnu napětí. Takto zpracovaný signál již lze zaznamenávat na smyčkovém oscilografu. Takovéto zařízení velmi usnadní a urychlí provádění zkoušky. Vyhodnocování by po odečtení hodnot z pásy smyčkového oscilografu bylo obdobné.

Měřicí stojánek /viz. kap. 2. 2. 2/ umožňuje proměřování kruhových vzorků různých průměrů. Zkoušení eliptických vzorků by však bylo nutno provádět přerušovaně / stupeň deformace ve směrech os elipsy pomocí deformační sítě a poloměr křivosti ve stejných směrech pomocí sférometru /.

Zpracování hodnot v digitální formě má oproti analogové tu výhodu, že umožňuje tyto zpracovat a vyhodnocovat v libovolných relacích dle vypracovaného programu pro počítač. Navíc nám tato metoda umožňuje získávat okamžité rychlosti změn jednotlivých veličin, protože analogo - digitální převodník A/D dodává do počítače diskrétní hodnoty jednotlivých veličin v přesných v přesných časových intervalech / tak můžeme získat např. $\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \dot{\varphi}$ /.

6. ZÁVĚR

V diplomové práci jsem v souladu se zadáním a po seznámení se s problematikou hydrostatického zkoušení plechů, přistoupil k navržení upínací části takové, aby nemuselo být použito hydraulického lisu. Tento byl využit pouze pro vyvození přidržovací síly Q .

V kap. 4. 2. bylo navrženo rozšířit konstrukci Johnsona a Duncana o snímače poloměru křivosti a snímače protažení, které by proměřovali vzorek v dalších řezech, čímž by byla k dispozici univerzální měřicí hlava, která by umožňovala proměřování jak kruhových, tak i eliptických vzorků.

V elektronické části byl kladen důraz na číslicové zpracování výsledků pomocí počítače.

Hydraulický obvod v podstatě vyhoví již existující, který je na zařízení používaném na KPT. Navrhovaný hydraulický obvod případně umožní nahrazení ruční pumpy za hydrogenerátor poháněný hydrogenerátorem.

Po zhotovení upínacího a tažného přípravku a jeho napojení na hydraulický obvod lze přistoupit k provádění přerušované hydrostatické zkoušky a hydraulický lis bude volný pro jinou experimentální činnost.

Poděkování

Děkuji s. Ing. Viktorovi Mikešovi CSc a s. Ing. F. Beranovi za metodické vedení při vypracování mé diplomové práce a za poskytnuté informace.

Seznam příloh

Příloha 1:	Princip hydrostatické zkoušky
Příloha 2:	Okrajové podmínky pro určení koeficientů
Příloha 3:	Měřicí stojánek
Příloha 4:	Schema zpracování výsledků v analogové formě
Výkres A ₁ :	DP - ST 1766/81 - 01

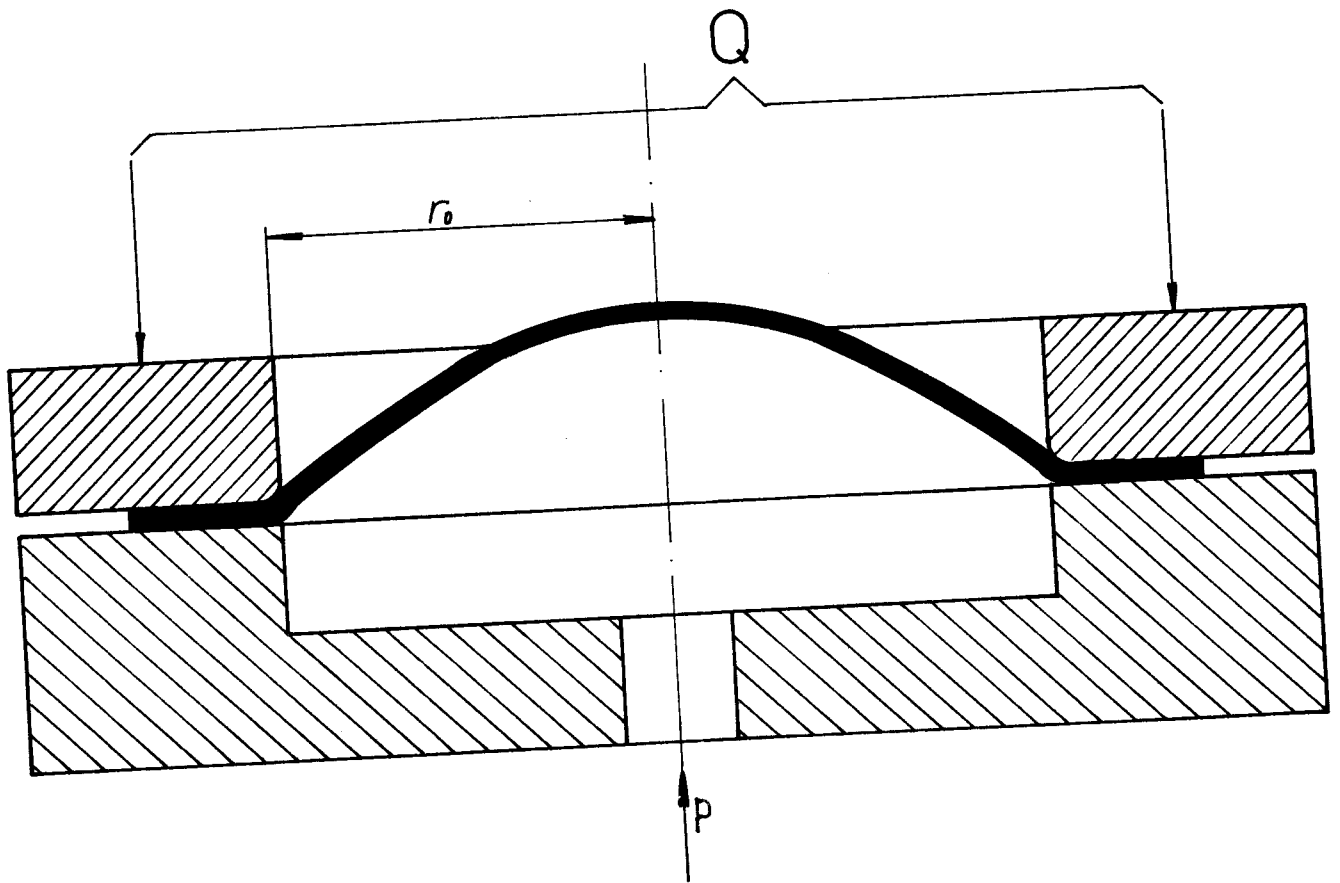


Fig. 1

Рисунок 2

- ① $y=0 ; z = H$
- ② $y=r_0 ; z = 0$
- ③ $y=r_i ; z = z_i$
- ③' $y=r ; -\frac{dz}{dy} = \operatorname{tg} \alpha$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta z}{\Delta r}$$

$$\Delta r = r_1 - r_2$$

$$r = \frac{r_1 + r_2}{2}$$

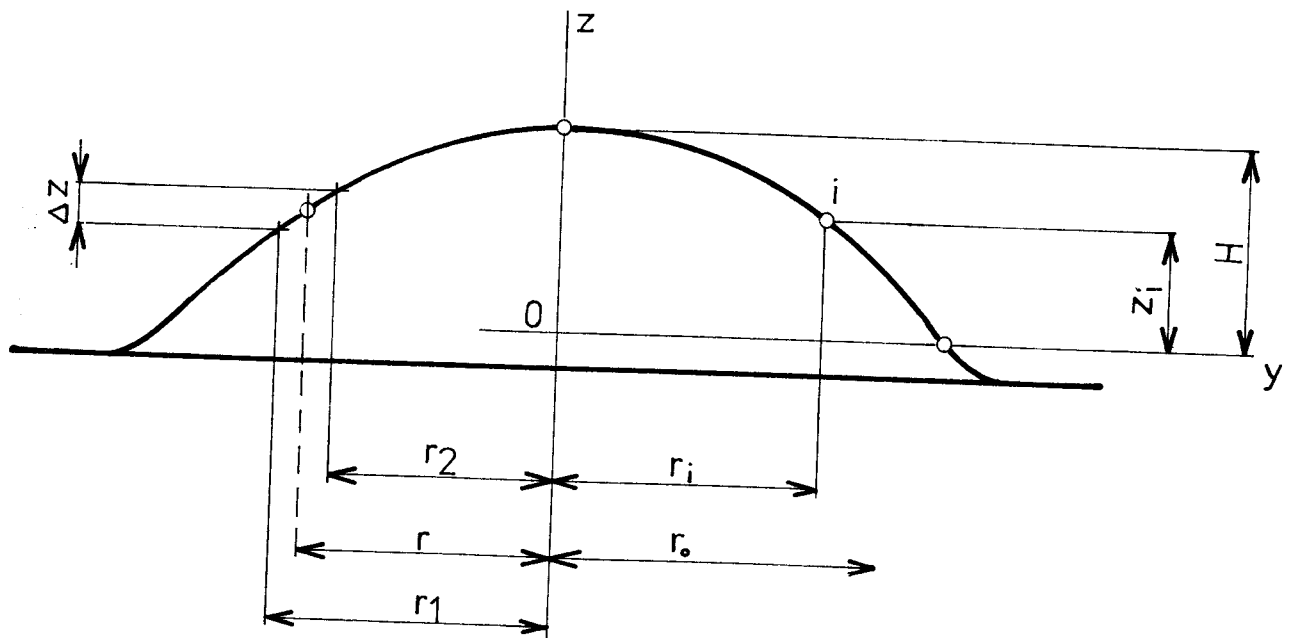
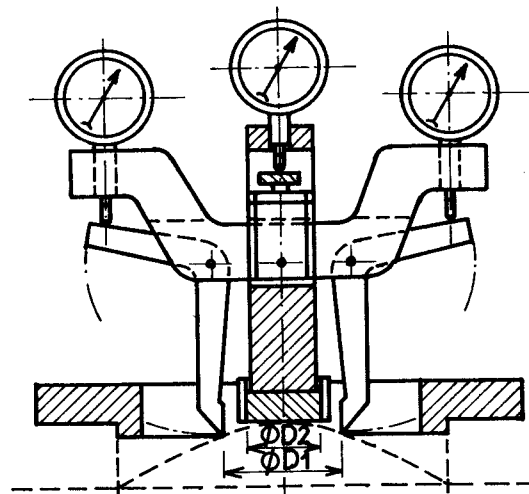
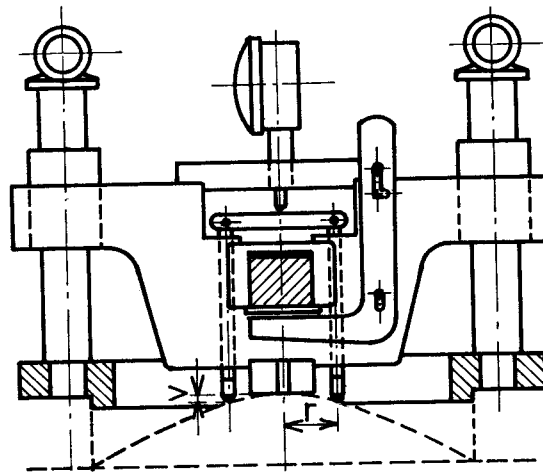


рис. 2



сбр. 3

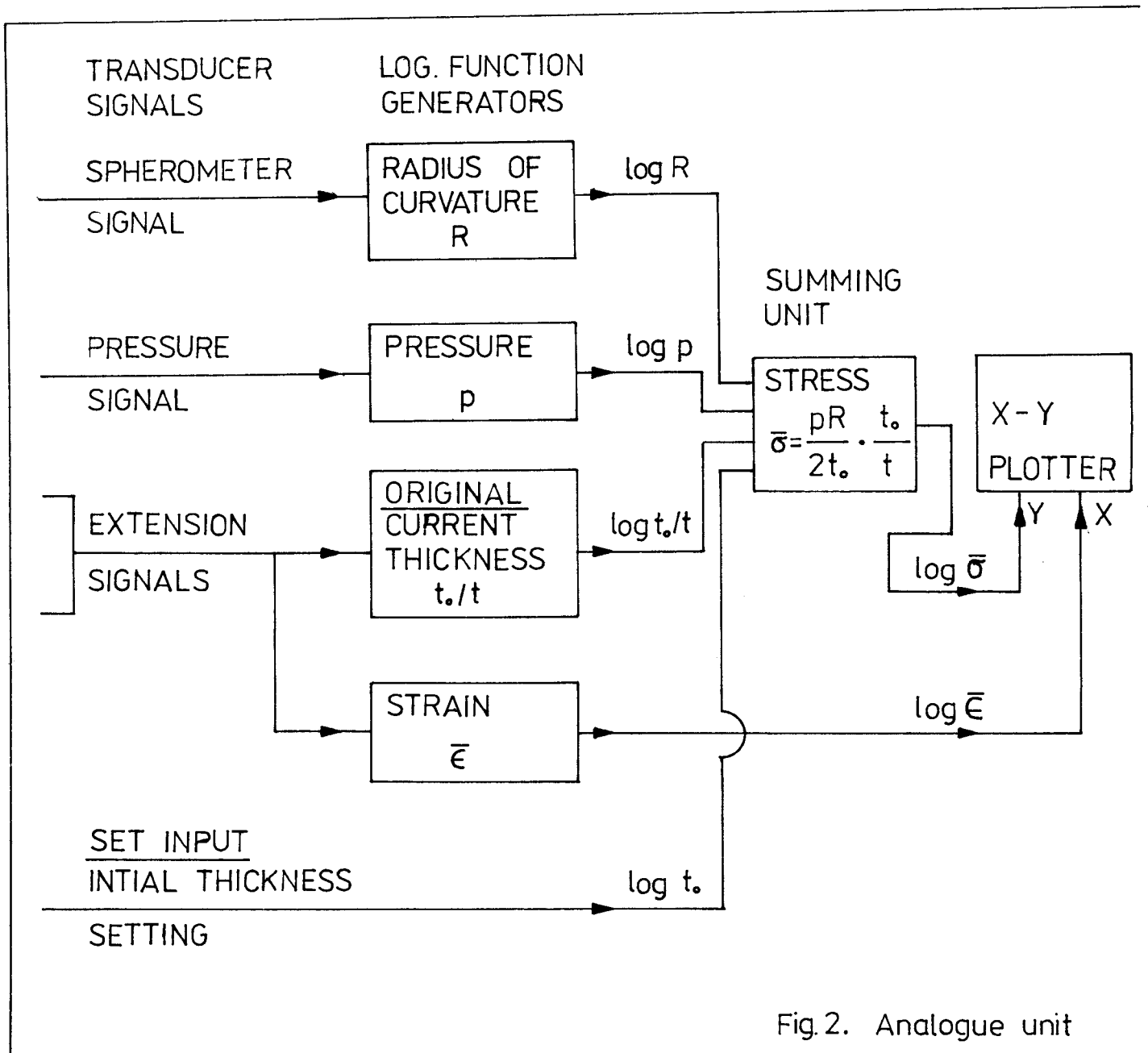


Fig. 2. Analogue unit

obr. 4

7. SEZNAM LITERATURY

- /1/ Mikeš V. : Hydrostatická zkouška hlubokotažnosti plechů.
"Sborník z celostátní konference
o tváření plechů", Liberec 1967
- /2/ Johnson W. - Duncan J. L. : The use of Biaxial Test Extensometer. "Sheet Metal Industries"
duben 1965
- /3/ Duncan J. L. : Measurement of Strain Hardening in Sheet Metals. "Sheet Metal Industries"
červenec 1967
- /4/ Ščeglov B. A. : K voprosu ob izpitanii listovoj stali na dvuchosnoje rastjaženie metodom gydravličeskoj vytjažki.
Sb. "Isledovanija v oblasti obrabotki metallov dovlenijem", AN SSSR, 1960
- /5/ Tomlenov A. D. : Mechanika processov obrabotki metallov dovlenijem, Moskva, GNTIML 1963
- /6/ Rubjenkova L. A. : Opredelenije plastičnosti listovoj stali po rezultatam gydrostatičeskovo izpitanija
Sb. "Kuzněčno - štampevočnoje proizvodstvo" 1960
- /7/ Drastík F. Elfmark J. : Plastomery a tvařitelnost kovů
Praha, SNTL 1977

/8/ Tměj J. - Mikeš V. : Teorie Tváření
VŠST Liberec 1981

/9/ Mikeš V. : Některé poznatky získané při hydrostatickém
zkoušení tenkých hlubokotažných plechů
Sborník vědeckých prací VŠST Liberec 1972

/10/ Kolektiv autorů: Lisování Praha, SNTL 1971

/11/ Zelenka J. : Elektrotechnika a průmyslová elektronika
část elektrické měření neelektrických
veličin
VŠST Liberec 1980

/12/ Pivoňka J. a kol. : Příručka hydraulických pohonů
Praha SNTL 1969

VŠST LIBEREC	Typ	Skupina	Starý včkres	Nový včkres
	Název UPINACÍ a TAŽNÉ ZAŘIZENÍ		DP - ST - 1766/81 - 01 Počet listů 2	
			List	2