

MĚŘENÍ VELEKÝCH PLASTICKÝCH DEFORMACÍ
NA ROTUJÍCÍCH DISCÍCH

Ing. M. Sulek
O.p. ŠKODA PLZEŇ, závod Turbíny

A n o t a c e

Příspěvek je věnován problematice měření deformací v plastické oblasti. Jsou stručně uvedeny hlavní metody měření, podrobně rozebrána tenzometrická metoda a metoda rytých sítí. V závěru je uveden přehled praktické aplikace na měření plastických deformací u rotujících kotoučů.

S rostoucími požadavky na maximální využití strojních částí ve všech odvětvích průmyslu rostou požadavky na měřicí techniku. V oblasti měření deformací se objevuje řada úloh, požadující měření v elasticko-plastické a plně plastické oblasti. Stále více vystupuje do popředí problém mezního stavu součástí, tedy její skutečné pevnosti. Pro jeho vyřešení je často nutné provádět zkoušky až do porušení. Měření deformací při těchto stavech dává cenné podklady pro výpočty v této oblasti.

Pro měření v plastické oblasti existuje řada metod, kromě těch, které budou podrobněji popsány je nutné jmenovat :

- metody založené na mechanicko-optické a optické interferenci (moiré, holografie)
- metoda opticky citlivých vrstev
- metoda " replika " a další

Podrobný popis a možnosti použití jsou uvedeny v literatuře [1,4].

Při volbě metody pro řešení našeho úkolu jsme vycházeli ze specifických podmínek daného úkolu, ze zkušeností na našem pracovišti a konečně z možností závodu.

Byly použity následující metody :

1) Metoda měření tvrdosti .

Protože při plastické deformaci dochází ke zpevnování materiálu, je možné z měření tvrdosti určit stupeň plastické deformace. Při praktickém použití se sestrojí cejchovní diagram materiálu, který je uveden na obr.1. Na osu souřadnic se vynášejí intenzita napjatosti respektive deformace, na osu pořadnic pak tvrdost. Cejchovní diagram je možno stanovit zkouškou v tahu nebo tlaku. Z určených hodnot intenzity napětí a intenzity deformace lze za jistých předpokladů provést separaci napětí. Podrobný popis této metody je v [3] .

2) Měření metodou sítí .

Tento způsob je poměrně jednoduchý. Principem je nanesení vhodné sítě na měřenou součást a změření změny jejích rozměrů po deformaci. Problematika metody spočívá ve vhodném způsobu nanesení sítě a jejím přesném proměření. Je třeba si uvědomit, že

deformace odpovídající mezi kluzu tedy 0,2% poměrného prodloužení představuje na měrné základně 10 mm prodloužení 0,02 mm. Pro nanesení sítí existuje několik způsobů :

- a) fotografická metoda
- b) metoda leptací
- c) metoda napařovací
- d) metoda rytých sítí

Popis jednotlivých metod je uveden v literatuře [2] .

3) Metoda tenzometrická

Tato metoda patří k nejdokonalejším a nejpřesnějším. Předpokladem je použití speciálních tenzometrů pro měření velkých deformací. Pokud je nám známo vyrábí tyto tenzometry fa Baldwin v USA, fa Hottinger v NSR a od roku 1974 SVÚSS Běchovice. Hodnota maximální měřené deformace se pohybuje od 5 do 10% poměrné deformace a závisí na měrné základně.

Metoda sítí .

Pro tuto metodu měření velkých deformací jsme se rozhodli proto, že v době zahájení úkolu byly k dispozici pouze tenzometry s velkou měrnou základnou (~20 mm). V o.p. ŠKODA je k dispozici speciální dělicí stroj švýcarské výroby, dovolující narytí sítě s roztečí řádu tisíciny. Pro ověření této metody byly na plochou zkušební tyč naryty sítě různých roztečí (0,2-1mm). Tyč pak byla plasticky deformována a proměřena. K proměření byl použit optický komparátor ABBE - Zeiss, jehož rozlišovací schopnost je 1×10^{-4} mm (sedminásobné zvětšení).

Pro přesnost měření jsou rozhodující následující vlivy :

- a) rozlišovací schopnost přístroje při odečítání
- b) kvalita rysek, která zásadně ovlivňuje výše uvedený bod ad a) a tím velikost chyby, závisí na technologii rytí, na materiálu (čím vyšší mez kluzu, tím kvalitnější rysky), na stupni deformace (s rostoucí deformací hodnota rysek klesá)
- c) velikost měrné základny, čím větší základna, tím menší chyba v poměrné deformaci

V následující tabulce je pro ilustraci uvedena velikost chyby při proměření jmenovité plastické deformace 4% metodou sítí v závislosti na měrné základně a rozteči sítí.

TAB. I

Základna mm	Maximální chyby %		
	síť 1 mm	síť 0,7 mm	síť 0,4 mm
1	30		
2	15	15	10
3	10		8
5	5	5	3

Výsledky uvedené v tabulce ukazují, že k dosažení přesnosti $\pm 10\%$ stačí vzít průměr ze čtyř až pěti hodnot. Na rozteči nezávisí, ta ovlivní pouze velikost měřené základny. To znamená, že chceme-li měřit deformace s přesností $\pm 10\%$ na základně 2 mm, musíme použít síť o maximální rozteči 0,4 mm. Tyto závěry platí pro sítě naryté výše popsaným dělicím strojem na materiálu o mezi kluzu $\bar{\sigma}_k = 700$ MPa.

Při praktické aplikaci se vyskytly zásadní problémy v tom, že velké součásti nemohou být proměřeny na uvedeném komparátoru, rovněž tak je nelze umístit na dělicí stroj pro narytí.

Proto pro vyhodnocení deformace naryté sítě byla použita fotografická metoda. Vhodně přizpůsobeným fotografickým aparátem je získán negativ o cca 5ti násobném zvětšení. Dalším zvětšením je možno získat pozitiv s výsledným 20 + 40ti násobným, což při dobré kvalitě rysek dovoluje přijatelnou přesnost.

V tabulce II je uveden vliv nesprávného změření vzdálenosti rysek na pozitivu na měřenou hodnotu deformace pro 2 různé měrné základny pro 20ti násobné zvětšení :

TAB. II

Základna (síť na souč.) [mm]	absolutní chyba odečtení na pozitivu [mm]	výsledná chyba v pom. deformaci [%]
5	0,2 ÷ 0,3	0,2 ÷ 0,3
10	0,2 ÷ 0,3	0,1 ÷ 0,15

Z tabulky plyne, že tento způsob vyhodnocení je vhodný pouze pro větší plastické deformace. Při jmenovité deformaci 0,2% může maximální chyba dosáhnout 100%.

Ve skutečnosti však při použití většího počtu měření je chyba menší. V následující tabulce je uvedeno srovnání vyhodnocení deformace fotografickou metodou s tenzometrickým měřením (měrná základna 10 mm, rozteč sítí 0,4 mm, tenzometry Proud C 120).

TAB. III

Číslo fotografie	Deformace z fotografie [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Deformace tenzometru [$\mu\text{m}/\text{m}$]
1	-	-
2	2 500	1 770
3	4 200	3 020
4	4 900	4 670
5	7 100	7 120
6	10 200	9 120
7	11 800	10 970
8	12 700	12 970
9	14 700	14 950
10	16 200	17 150
11	19 600	19 320
12	21 900	-

Výsledky platí pro síť narytou na dělicím stroji. Na obr.2 je fotografie deformované sítě o rozteči 0,2 mm v oblasti koncentrátoru napětí.

Metoda tenzometrická .

Protože v době začátku měření jak bylo již uvedeno nebyly k dispozici vhodné speciální tenzometry pro měření velkých deformací, byla ověřena možnost použití běžných tenzometrů. Výsledky byly publikovány, uvedu pouze nejstručnější závěry.[5].

Tenzometry C 120 - lze měřit do 2% s chybou 10%, do 3% s rizikem poškození a s chybou 25%

M 120 - do 1% s max. chybou 10%, do 2% s rizikem poškození a chybou 25%

SM 120 - spolehlivě nelze, s rizikem poškození a chybou 35% do deformace 0,5%

S 9A - do 1% s chybou 10%, do 1,5% s rizikem poškození a chybou 20%

V roce 1973 byly vyvinuty v SVÜSS Praha tenzometry pro měření velkých deformací.

Jedná se o drátkové snímače na papírové podložce, délka měrné základny je cca 13 mm. Tenzometry jsou provedeny jako samokompensační do 70°C a lepí se běžným lepidlem TM 3. Provedli jsme ověření těchto tenzometrů na zatěžovacím zařízení, kde údaj tenzometrů byl kontrolován opticky katetometrem. Výsledky které jsou uvedeny na obr.3 potvrdily, že tenzometry spolehlivě měří do 4% poměrné deformace, některé měřily až do hodnoty 6%.

Dále byla provedena teplotní charakteristika snímačů. Na obr.4 je vynesena fiktivní deformace snímačů nalepených na oceli v závislosti na teplotě. Z obrázku je zřejmé, že tenzometry jsou v rozsahu použitelné teploty (70°C) kompenzovány. Při přesném měření při nízké hladině poměrné deformace a proměnlivé teplotě je třeba respektovat tuto charakteristiku. Pro velké deformace řádu procent (pro které jsou tyto snímače určeny) je vliv teploty prakticky zanedbatelný. Ize říci, že tyto snímače

jsou na světové úrovni odpovídajících výrobků.

Měření metodou tvrdosti .

Tato metoda byla rovněž použita. V současné době nejsou ještě výsledky zpracovány. Předběžně se dá říci, že její přesnost bude nižší než u metody rytých sítí. Nevýhodou je nutnost použití přenosného přístroje pro měření tvrdosti, jehož přesnost nedosahuje přesnosti laboratorních přístrojů.

Na závěr uvedu několik poznámek k praktické aplikaci popsaných metod.

V našem závodě je řešen úkol stanovení skutečné pevnosti disku do roztržení. Součástí tohoto úkolu je měření deformací v této oblasti. Zkoušky disků (s otvorem i bez otvoru) se provádějí ve speciálním zařízení jehož řez je na obr.5. Je ve vertikálním provedení, poháněno elektromotorem dovolujícím přes převodovku dosáhnout otáčky 21 500 ot/min.

V době zahájení úkolu nebyly k dispozici vhodné tenzometry pro měření velkých deformací. Proto byla použita metoda sítí. To ovšem znamenalo přízpusobené zkušební metodiky. S diskem bylo prováděno stupňovité najíždění a sjíždění. Po každém zastavení bylo provedeno proměření sítě. Na radiálu disku, v šířce 20 mm, byla naryta síť o rozteči 1 mm ručně, s maximální pečlivostí. Vyhodnocení obvodové plastické deformace se provádělo ze základny 15 mm, radiální plastické deformace z 5ti milimetrové základny (kotouče s otvorem mají velký gradient radiální deformace).

Na obr.6 jsou výsledky měření plastické deformace u disku s otvorem pro jednu hladinu otáček (v obrázku současně vyneseny výsledky výpočtu).

Měření plastických deformací na discích bez otvoru bylo provedeno oběma metodami : tenzometrickou a metodou sítí. Byly použity výše popsané tenzometry SVÜSS a tenzometry SR4-PA3 (délka měrné základny ~20 mm). Deformace byly měřeny jednak za rotace (přes rtuťový sběrač Vibrometer), jednak po zastavení kotouče. Na obr.7 jsou výsledky tenzometrického měření deformace

v závislosti na poloměru disku a otáčkách, pro porovnání jsou vyneseny výsledky měření metodou sítí.

Druhé měření plně potvrdilo předpoklady a možnosti použití rytých sítí.

Závěr

Cílem tohoto příspěvku bylo seznámení se s problematikou měření deformací v plastické oblasti a jeho aplikace při řešení problému "Měření plastických deformací rotujících disků". Byly použity v zásadě 2 metody :

- a) metoda tenzometrická
- b) metoda rytých sítí

Výsledky ověřování metod i měření dovolují učinit následující závěry :

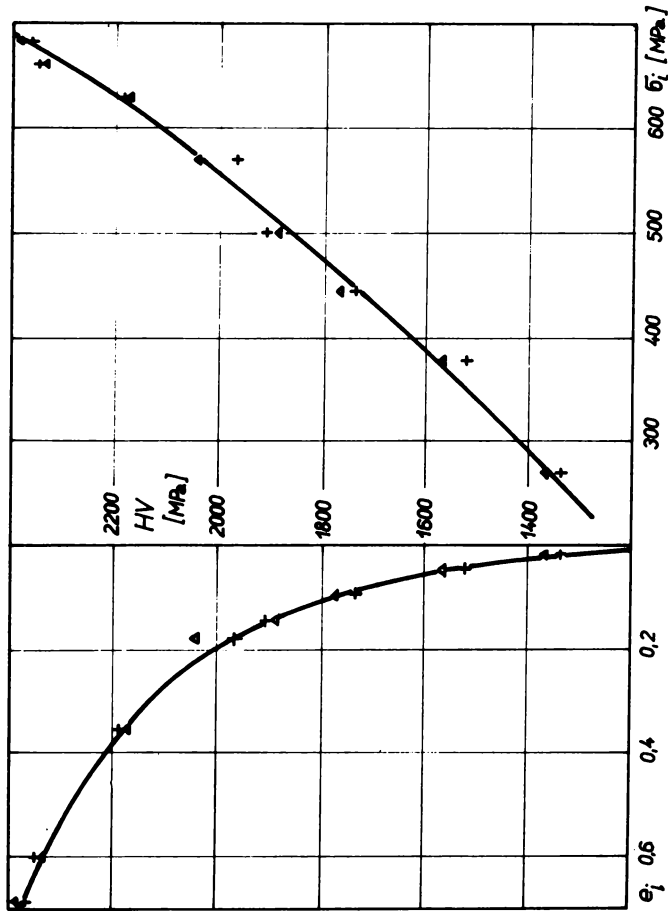
- 1) Tenzometrická metoda je spolehlivá a přesná pracujeme-li v mezích použitelnosti tenzometrů. Předpokládá použití speciálních tenzometrů. V oblasti malých plastických deformací je možné použít běžných tenzometrů s respektováním závěrů uvedených v příspěvku. Jediným omezujícím faktorem v našich podmínkách je měrná základna snímačů. Kvalitní tenzometry vyvinuté v SVŮSS mají tuto základnu ~13 mm, což v některých případech plně nevyhovuje.
- 2) Metoda rytých sítí je méně přesná, hlavně při malých deformacích. Vzhledem k problematice přechodu materiálu z elastické do plastické oblasti, jsou nároky na přesnost značně menší. Nicméně měření potvrdilo, že je možno tuto metodu úspěšně použít. Její velkou výhodou je možnost měření do velkých plastických deformací, často až do mezního stavu. V kombinaci s tenzometrickou metodou, která je vhodná v oblasti pružně-plastických a malých plastických napětí je možno získat cenné výsledky.

L i t e r a t u r a

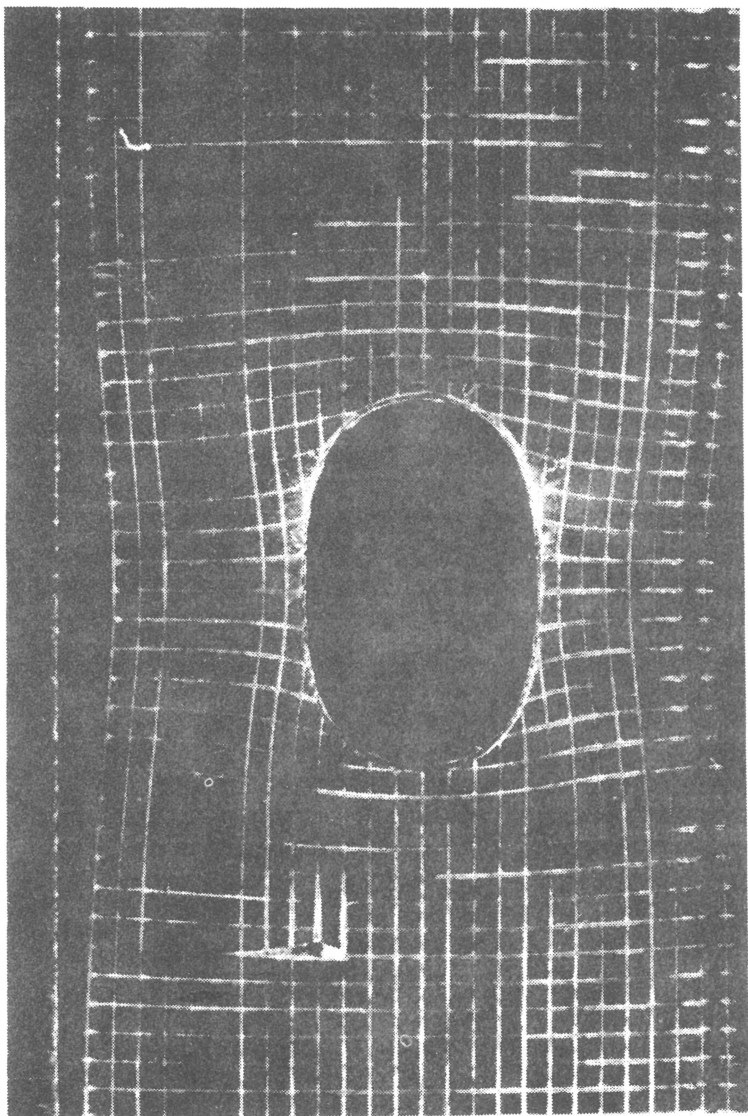
- 1 Klaboch L. : Experimentální analýza napjatosti
ČVUT Praha 1972
- 2 Fridman J.B. : Izučenijsje plastičeskoj deformaciji
i rozrušenijsje metodom nakatannyh
setok
Oborongiz 1962
- 3 Del G.D. : Opredelenijsje naprjaženij v plasti-
českoj oblasti po raspredeleniju
tverdosti
Izd. "Mašinostrojenije" Moskva 1971
- 4 Vísner J. : "Aplikace metody opticky citlivých
vrstev v o.p. ŠKODA Plzeň"- referát
na XI konferenci "Experimentálna
analýza napätia" Vršatec 1973
- 5 Orna M. : "Chování tenzometrů n.p. Mikrotech-
na v oblasti plastických deformací"
- seminář "Pokroky tenzometrických
metod ve strojírenství" Praha 1968

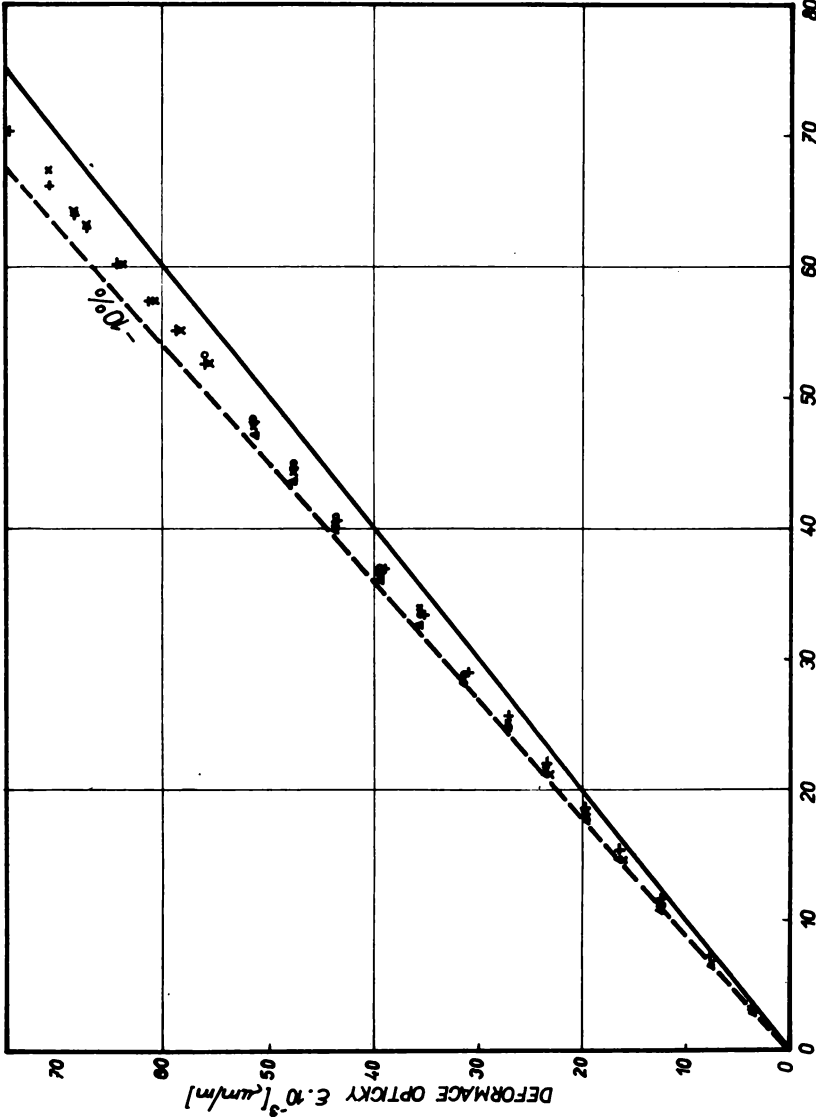
S e z n a m v y o b r a z e n í

- Obr.1 Závislost intenzity napětí a intenzity deformace na tvrdosti materiálu
- Obr.2 Fotografie deformované naryté sítě v oblasti koncentrátoru napětí
- Obr.3 Charakteristika tenzometrů SVÚSS pro velké deformace
- Obr.4 Teplotní charakteristika tenzometrů SVÚSS pro velké deformace a tenzometrů SR4-PA-3
- Obr.5 Řez zařízením na zkoušky disků za rotace
- Obr.6 Výsledky měření plastické deformace metodou rytých sítí u disku s otvorem
- Obr.7 Výsledky měření plastické deformace u kotouče bez otvoru metodou tenzometrickou a metodou rytých sítí

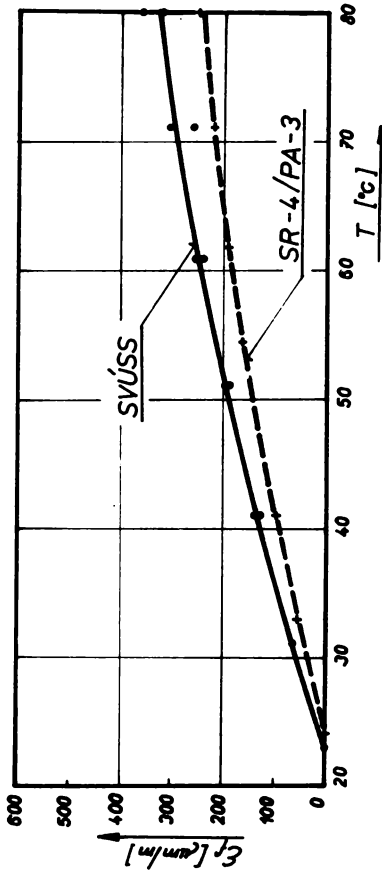


Obr.1 Závislost intenzity napětí a intenzity deformace na tvrdosti materiálu

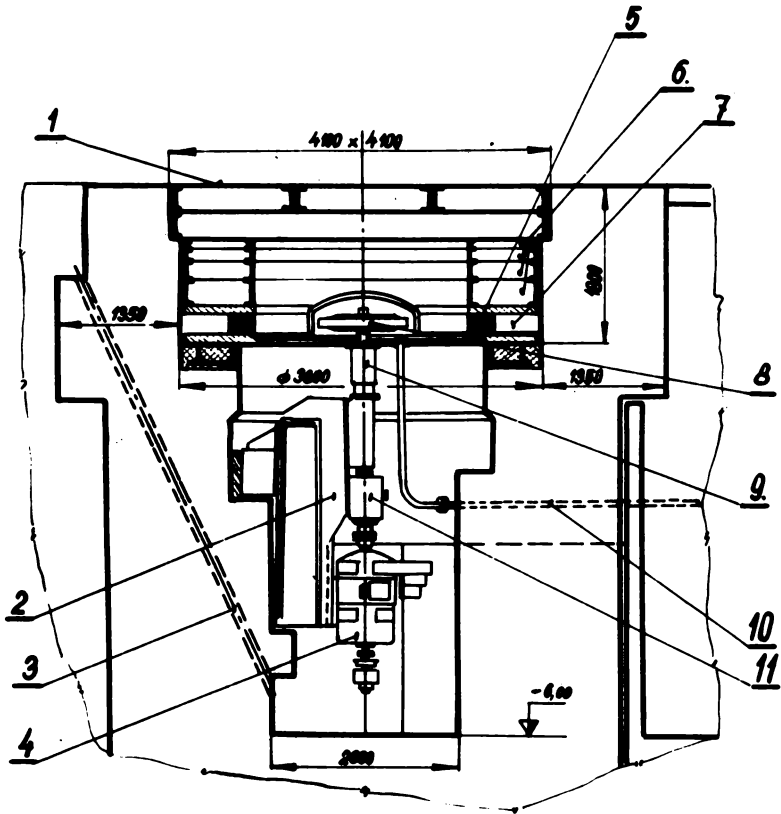




Obz. 3 Charakteristika tensometrů SVÚSS pro velké deformace

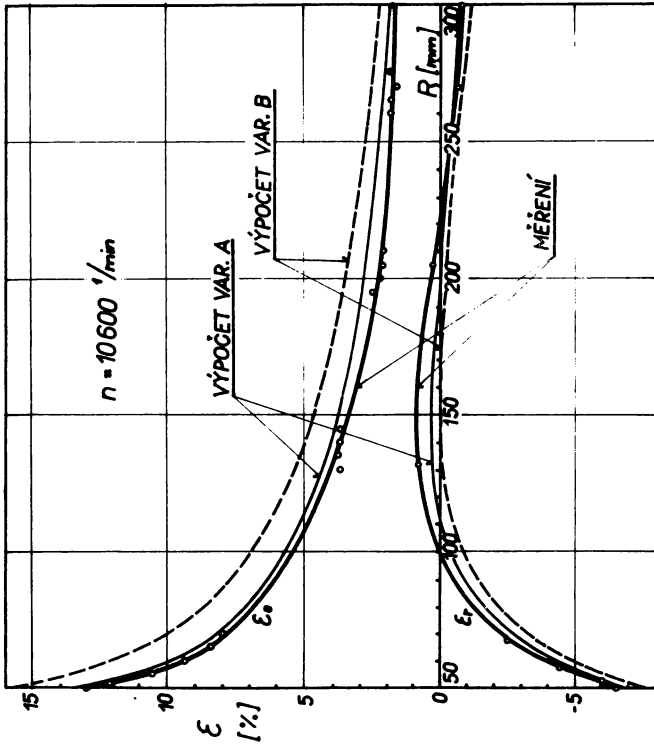


Obr.4 Tepelná charakteristika tensometrů SVÚSS pro velké deformace a tensometrů SR4-PA-3.

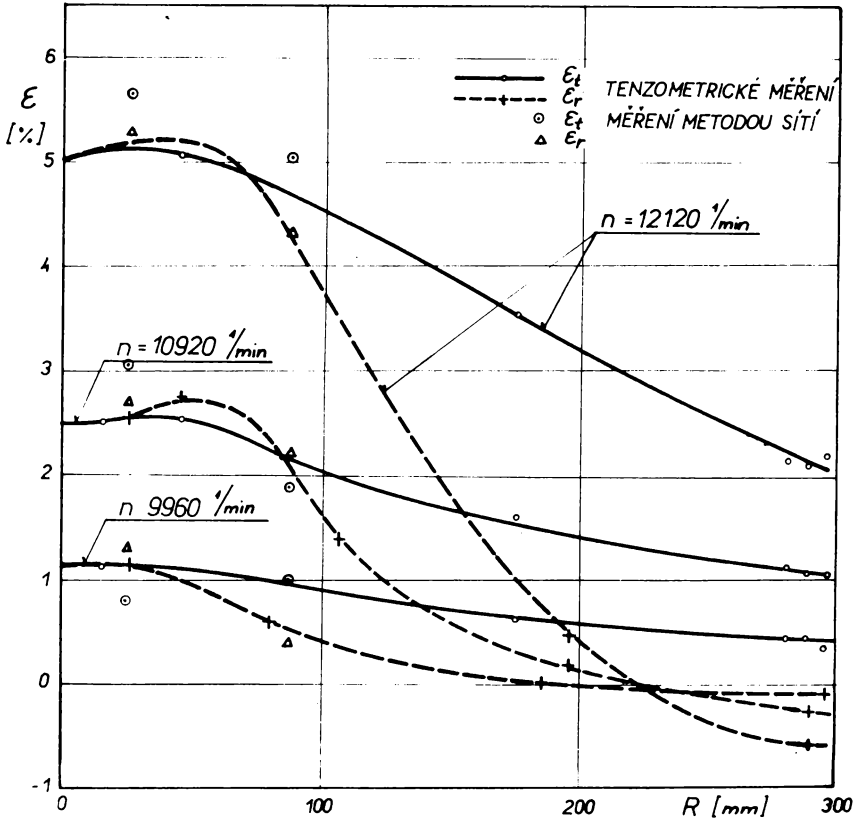


Obr. 5. Trhací jáma

- | | |
|----------------------|-----------------------|
| 1. Krycí deska | 6. Distanční vložky |
| 2. Nosný ráj | 7. Ocelový přetěsac |
| 3. Kabelový kandi | 8. Pevný disk |
| 4. Reg. komut. motor | 9. Olejový tlumič |
| 5. Olověný přetěsac | 10. Odesávání vzduchu |
| | 11. Převodovka |



Obr. 6 Výsledky měření plastické deformace metodou rytých sítí u disku s otvorem



Obr.7 Výsledky měření plastické deformace u kotouče bez otvoru metodou tenzometrickou a metodou rytých sítí