

UNIVERZITA PARDUBICE

Dopravní fakulta Jana Pernera

Metodika měření zkoušky tlakem kovových materiálů

Milan Kubiš

Bakalářská práce

2010

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera  
Akademický rok: 2009/2010

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Milan KUBIŠ**  
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**  
Studijní obor: **Dopravní prostředky-Silniční vozidla**  
Název tématu: **Metodika měření zkoušky tlakem kovových materiálů**  
Zadávací katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Metody charakterizace kovových materiálů
2. Vliv mikrostruktury oceli na mechanické vlastnosti
3. Metodika měření zkoušky tlakem
4. Vyhodnocení měření

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

**Ptáček, L. a kol.: Nauka o materiálu I.-II. CERM, s.r.o. Brno 1999**  
**Příslušné normy pro zkoušky tlakem (tahem)**

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Pavel Švanda, Ph.D.**

Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů

Datum zadání bakalářské práce: **26. února 2010**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31. května 2010**



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.



doc. Ing. Miroslav Tesař, CSc.

vedoucí katedry

dne

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu literatury. Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/200 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše. Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 28.5.2010

Milan Kubiš

## Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu během studia na této škole a také vedoucímu mé bakalářské práce za cenné rady a konzultace, které byly přínosem pro mou práci.

## ANOTACE

Práce se zabývá metodikou měření tlakových zkoušek pro kovové materiály kruhového průřezu. Zahrnuje stanovení rozměrů vzorku a způsob jeho uchycení. Výsledky měření jsou statisticky zpracovány.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Tlaková zkouška, tahová zkouška, mez kluzu, mez pevnosti, smluvní diagram

## TITLE

Methodology of measuring of compression test for metallic materials

## ANNOTATION

The work is devoted to the methodology of measuring of compression test for metallic materials of circular cut. The work includes assessment of dimensions of sample and method of his mounting. Results of measurement are processed by statistical method.

## KEYWORDS

Compression test, tensile test, yield strength, ultimate strength, stress-strain diagram

## Obsah

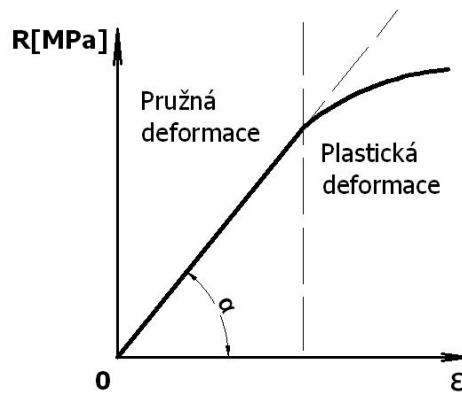
<b>1</b>	<b>Úvod .....</b>	<b>8</b>
1.1	Metody charakterizace kovových materiálů .....	8
1.1.1	Pružná deformace.....	9
1.1.2	Plastická deformace.....	11
<b>2</b>	<b>Mechanické zkoušky kovových materiálů.....</b>	<b>15</b>
2.1	Tahová zkouška kovových materiálů .....	16
2.2	Tlaková zkouška křehkých materiálů [3] .....	18
2.2.1	Stanovení smluvní meze kluzu [3].....	20
2.2.2	Stanovení mezní pevnosti v tlaku [3] .....	21
2.3	Tlaková zkouška kovových materiálů .....	22
<b>3</b>	<b>Statistické zpracování .....</b>	<b>25</b>
3.1	Popisná statistika ... ..	26
3.2	Prezentace hodnot číselného znaku.....	26
3.3	Statistické charakteristiky – Míry polohy .....	28
3.4	Statistické charakteristiky – Míry rozptýlenosti .....	29
<b>4</b>	<b>Metodika měření zkoušky tlakem .....</b>	<b>30</b>
4.1	Popis měřicího stanoviště .....	31
4.2	Vlastní měření .....	33
4.3	Statistické zpracování naměřených hodnot .....	38
4.3.1	Statistické zpracování naměřených hodnot $R_{p02}$ .....	41
4.3.2	Statistické zpracování naměřených hodnot $R_m$ .....	42
<b>5</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>45</b>

# 1 Úvod

Cílem mé bakalářské práce je stanovení postupu měření tlakové zkoušky kovových materiálů. Správnost naměřených hodnot bude porovnána s tahovou zkouškou kovových materiálů, která se pro stanovení hodnot meze kluzu a celkové pevnosti u kovů používána přednostně. Jedná se o normu ČSN 42 0310. Tlaková zkouška se používá především pro křehké materiály jako je beton, zdivo a litina. Příbuzná norma zabývající se metodikou tlakové zkoušky pro tvrdokovy je zpracována v normě ČSN EN 24506. Na tuto normu se budu během své práce odkazovat. Bohužel pro tlakovou zkoušku kovových materiálů nebyla vydána příslušná ČSN či ISO norma. Proto se budu v mé práci věnovat stanovení metodiky měření této zkoušky. Například ve Spojených státech amerických byla příslušná norma vydána. Jedná se o normu ASTM E9 – 09 Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature.

## 1.1 Metody charakterizace kovových materiálů

Vzhledem k tématu mé práce uvedu především ty charakteristické vlastnosti, které budou přínosem pro pochopení dané problematiky. Každá strojní součást (těleso) může být namáháno vnější silou na tah, tlak, smyk, ohyb nebo na krut. Ve skutečnosti je většinou namáhána kombinací těchto druhů sil. Je-li materiál vystaven působení tohoto zatížení (vnějších sil) dochází u něho k deformacím. Jelikož neexistuje dokonale tuhé těleso pak k deformacím dochází vždy. Deformace nastane pokud těleso vlivem působení vnějších sil změni své rozměrové parametry. Během působení vnějších sil na těleso zároveň působí síly vnitřní, které se snaží udržet atomy v původních polohách. Touto reakcí se těleso snaží zabránit deformaci. Deformace dělíme na pružné a plastické. Pružná deformace nastane v případě kdy se rozměry a tvar tělesa po skončení namáhání vrátí do původního stavu. Plastická deformace nastane naopak když se rozměry a tvar tělesa trvale změni. Při překročení mezních podmínek může dojít k lomu.



**Obr.1** Závislost mezi napětím R a deformací ε

### 1.1.1 Pružná deformace

Tato deformace nastane, pokud se těleso po skončení namáhání vrátí do původního stavu. Podstatou pružné deformace je vratná distorze mřížky. Na **Obr.1** je zobrazený průběh pružné deformace. Zde je patrné, že průběh napětí „R“ a poměrného prodloužení „ε“ je lineární. Tato lineární (přímková) závislost je popsána pomocí Hookeova zákona:

$$R = E \cdot \varepsilon \quad [\text{MPa}] \quad (1)$$

E ..... modul pružnosti v tahu [MPa]

ε ..... poměrné prodloužení [bezrozměrná veličina]

Počátkem 18.století tento vztah výstižněji popsal Thomas Young vztahem:

$$E = \frac{R}{\varepsilon} \quad [\text{MPa}] \quad (2)$$

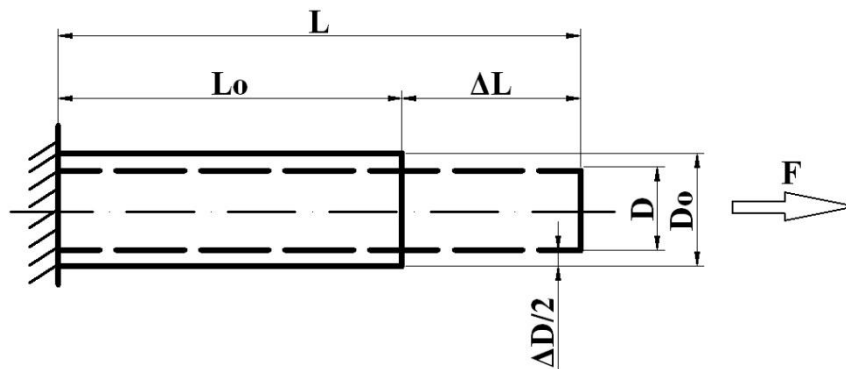
Youngův modul „E“ [MPa]

Odpovídá směrnici přímkové části (tangenta úhlu α). Obecně mají tuhé a tvrdé materiály vysokou hodnotu Youngova modulu, naopak nízkou hodnotu mají materiály měkké a poddajné. Youngův modul „E“ je důležitou materiálovou charakteristikou, mírou tuhosti materiálu. Podobnou veličinou popisující pružné vlastnosti materiálu je modul pružnosti ve smyku G. Youngův modul a modul pružnosti ve smyku jsou funkcí meziatomové vzdálenosti, teploty a u kovových slitin se mění jejich hodnoty v závislosti na složení. Jejich hodnoty klesají s rostoucí vzdáleností a vyšší teplotou.

Poissonovo číslo „ $\mu$ “ [bezrozm.]

Vyjadřuje poměr mezi poměrným příčným zkrácením a poměrným podélným prodloužením v oblasti pružných deformací. Je to schopnost zmenšovat (při působení tlaku) nebo naopak zvětšovat (při namáhání tahem) svůj objem a to v oblasti pružného namáhání. Tato veličina nachází své uplatnění v konstrukčních výpočtech na stanovení velikosti objemových změn při pružné deformaci. Pro kovy nabývá hodnota Poissonova čísla rozmezí  $0,25 \leq \mu \leq 0,35$ . Při popisu změn rozměrů tělesa kruhového průřezu při tahovém namáhání vycházíme z Poissonova čísla a tedy ze známého vztahu:

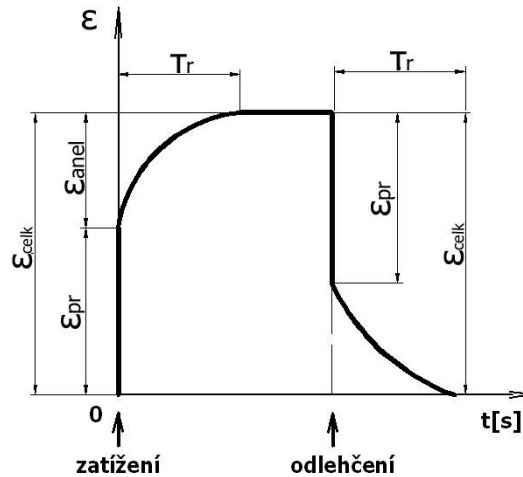
$$\mu = - \frac{\frac{\Delta D}{D_0}}{\frac{\Delta L}{L_0}} \quad [\text{bezrozm.}] \quad (3)$$



**Obr.2** Tahové namáhání tělesa kruhového průřezu

### Anelastický jev

Za běžných okolností lze považovat pružnou deformaci za časově nezávislou. To znamená, že sleduje deformaci bez zpoždění. Pokud však zvýšíme citlivost měření pak zachytíme v krátkém časovém rozmezí projev časově závislých (relaxačních) procesů v oblasti pružného namáhání. Jedná se o anelastickou deformaci neboli vnitřní útlum (vnitřní tření). Anelastický jev nastává například při pružné deformaci železa, kdy dochází k redistribuci intersticiálních atomů (příměsi uhlíku, dusíku) z náhodně obsazených poloh do poloh energeticky výhodnějších. Viz **Obr.3**.



**Obr.3** Schéma anelastického jevu při zatížení konstantní silou a po odlehčení

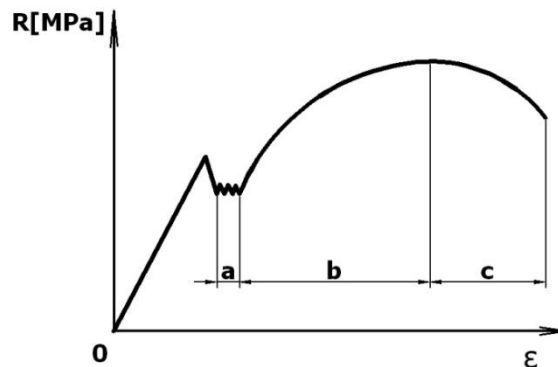
- $\epsilon_{\text{celk}}$  ..... celková deformace [bezrozm.]
- $\epsilon_{\text{pr}}$  ..... pružná deformace [bezrozm.]
- $\epsilon_{\text{anel}}$  ..... anelastické prodloužení [bezrozm.]
- $\tau_r$  ..... relaxační čas  $t$  [s]

Během působení vnější síly (zatížení) dochází k postupnému přemístění atomů. To má za následek vznik dodatečného anelastického prodloužení. Tato deformace je časově závislá a přičítá se k okamžité pružné deformaci. Časový úsek během kterého dochází k nárůstu anelastické deformace nebo naopak při odlehčení k vymizení této deformace se nazývá relaxační čas. Hodnota relaxačního času je závislá na difúzním součiniteli intersticiálních atomů. Celková anelastická deformace se zvětšuje s rostoucí koncentrací intersticiálů až do určité mezní koncentrace (do nasycení). Při statickém zatěžování jako je tlaková či tahová zkouška anelastickou deformaci zanedbáváme.

### 1.1.2 Plastická deformace

Tato deformace nastane pokud budeme těleso zatěžovat nad mez kluzu. V této oblasti grafu zatížení (viz **Obr.1**) již neplatí přímá úměrnost mezi napětím „ $R$ “ a poměrným prodloužením „ $\epsilon$ “. Tento průběh je způsobený mnoha faktory jako je druh mřížky a typ jejího poškození či vnější faktory jako je teplota a rychlost deformace. Po odlehčení deformace nevymizí a způsobí trvalou změnu rozměrů tělesa. Tato trvalá

změna je způsobena pohybem dislokací. Nejčastější příčinou plastické deformace je skluz, často doprovázený jevem označovaným jako dvojčatění.



**Obr.4** Oblast plastických deformací

- a) oblast vzniku skluzových pásů
- b) oblast rovnoměrné plastické deformace
- c) oblast nerovnoměrné plastické deformace

Poruchy mřížky:

- a) Dislokace

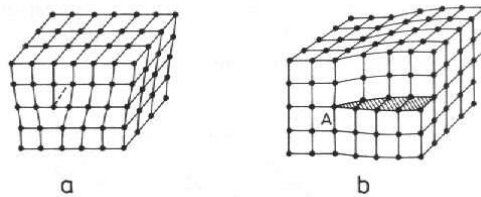
Tento druh poruchy krystalové struktury je typický tím, že k porušení struktury dochází podél určité čáry. Dislokace se často nazývá též jako čárová porucha. Délka této poruchy podél dislokační čáry může dosahovat až rozměru krystalu.

- b) hranová dislokace

Jde o typ poruchy, při které chybí v krystalové struktuře část atomů. Tím dochází k deformaci mřížky v jejím okolí. Vlivem této poruchy dojde v daném místě k deformaci posunem okolních atomů směrem do mezery. Podobný typ poruchy bychom obdrželi, kdybychom v dolní části krystalu jednu atomovou polovinu odstranili. Okraj vložené poloviny je čárová porucha. Hranová dislokace je zobrazena na **Obr.5**.

c) Šroubová dislokace

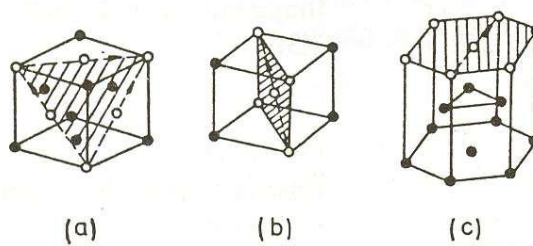
Vznik této poruchy si můžeme představit tak, že krystal rozřízneme v rovině, která je na **Obr.5** vyšrafována až k přímce procházející bodem A kolmo na čelní stěnu. Horní část krystalu poté pootočíme a jednu meziatomovou vzdálenost. K maximálnímu porušení dojde podél přímky procházející bodem A.



**Obr.5** a) hranová dislokace b) šroubová dislokace [5]

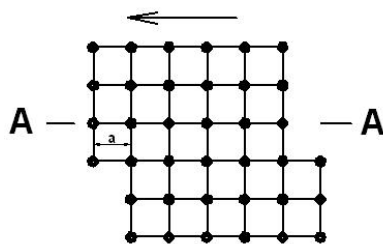
Skluz

Plastická deformace kovů a slitin probíhá dvěma základními mechanismy a to skluzem dislokací nebo dvojčatěním. Skluz se uskutečňuje při vzájemném prokluzu krystalografických rovin. Tyto roviny nazýváme skluzové. Orientace této skluzové roviny je vyjádřena v tzv. skluzovém systému. Na **Obr.6** jsou znázorněny orientace skluzových rovin pro nejběžnější kovy K12 {1 1 1}, K8 {1 1 0} a H12 {0 0 0 1}.

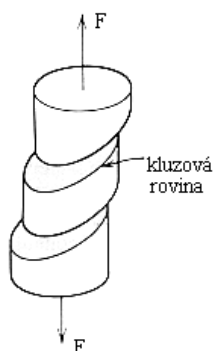


**Obr.6** a) krychlová plošně středěná b) krych. prostorově středěná c) šesterečná [5]

Pro lepší pochopení této deformace je možné si představit ideální případ porušení dokonalé mřížky, která je zobrazena na **Obr.7**. V tomto případě dojde ke skluzu při působení dostatečně velkého skluzového napětí. Při skluzu se atomy posunují ve skluzových rovinách o celé násobky meziatomových vzdáleností. Nejmenší napětí při kterém dojde ke skluzu krystalografických rovin se nazývá kritické skluzové napětí. Tato hodnota se liší od typu krystalové mřížky a je funkcí teploty a čistoty.



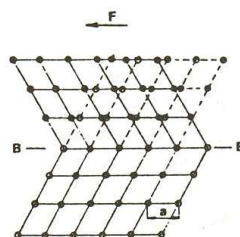
**Obr.7** Teoretická představa skluzu v dokonalé mřížce



**Obr.8** kluzová rovina [5]

### Dvojčatění

Jedná se o deformační mechanismus, který se uskutečňuje průchodem parciálních (neúplných) dislokací\* krystalem. Při průchodu parciálních dislokací se část krystalové mřížky posune. Tím se vytvoří zrcadlový obraz neposunuté části mřížky. Výsledkem dvojčatění je, že obě části mřížky jsou zrcadlově symetrické vzhledem k rovině dvojčatění B-B. Jde v podstatě o koordinovaný případ skluzu. Atomy se však posunují pouze o zlomky meziatomové vzdálenosti. Při deformaci dochází v největší míře k deformaci skluzem. Ke dvojčatění dochází v mnohem menší míře a jedná se spíše o doplňující deformační mechanismus. Vznik dvojčatění podporuje nízká teplota a vysoká deformační rychlost.



**Obr.9** dvojčatění [5]

\* Parciální dislokace [5]

Tato deformace mřížky je charakterizována Burgersovým vektorem. Tento vektor je menší než translační mřížkový vektor, který spojuje uzlové body mřížky, které mají totožné okolí. Parciální dislokace není izolovanou mřížkovou poruchou. Je spojena s existencí vrstevné chyby. Konstrukční materiál je zpravidla polykrystal (velikost krystalů 0,05 až 0,005 mm). Přítomnost zrn vede k vyšší odolnosti materiálu vůči plastické deformaci, příp. plastickou deformaci vylučuje. Důvod – u monokrystalů se dislokace během deformace dostávají na povrch. V případě polykrystalického materiálu je tomu tak jen u velice malého procenta zrn, které jsou na povrchu tělesa. Hranice zrn jsou pro dislokace nepřekonatelné překážky. Aby se během plastické deformace netvořily díry na hranicích zrn, ale jednotlivá zrna se tvarově navzájem přizpůsobila, musí, existovat v materiálu pět nezávislých kluzových systémů (Von Missessova podmínka, nebo Taylorův princip).

## **2 Mechanické zkoušky kovových materiálů**

Rozdělení mechanických zkoušek kovových materiálů vychází z podstaty působení vnější síly na zkušební vzorek. Základní rozdělení je následující:

### a) Statické zkoušky

Tyto zkoušky jsou charakteristické pozvolným působením zatěžující síly.

Zatěžující síly působí běžně v řádech minut a u dlouhodobých zkoušek nejsou výjimkou zkoušky trvající dny až roky.

### b) Dynamické zkoušky rázové a cyklické

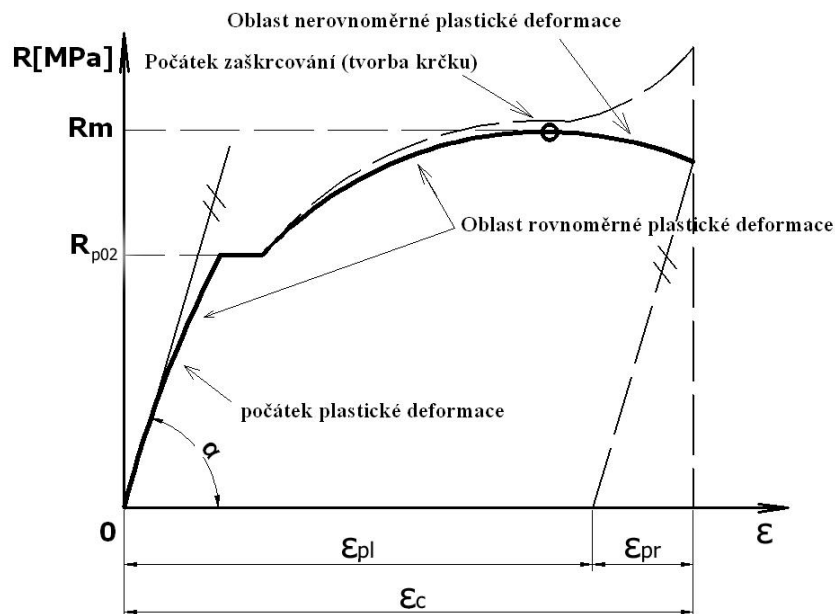
U dynamických zkoušek se vystaví zkušební vzorek působení vnější síly po krátkou dobu řádově zlomky sekundy. Cyklické zkoušky jsou typické pro posuzování únavy materiálu. V tomto případě se toto krátké zatížení opakuje i mnoha cykly za sekundu. Po dokončení zkoušky je pak vzorek vystaven až mnoha milionům krátkodobých zatížení.

### c) Zvláštní technické zkoušky

Jsou typické především tím, že výsledky těchto zkoušek jsou závislé na mnoha vedlejších činitelích. Hlavní skupinou těchto zkoušek jsou zkoušky tvrdosti. Zkoušky tvrdosti se dále dělí podle teplot, při kterých bylo realizováno dané měření. Dělíme je tedy na zkoušky za normálních, vysokých a nízkých teplot.

## 2.1 Tahová zkouška kovových materiálů

Tato zkouška spadá do skupiny statických zkoušek. Metodika provedení této zkoušky je normalizována podle ČSN 42 0310. Norma popisuje metodiku stanovení smluvní meze kluzu  $R_{p0.2}$  a celkové pevnosti  $R_m$  pro kovové materiály. Zkušební vzorek se vystavuje tahové síle až do okamžiku jeho přetržení. Délka vzorku se obvykle volí  $5d$  nebo  $10d$  ( $d$ =průměr tyče [mm]). Výsledný průběh napětí „ $R$ “ a deformace „ $\epsilon$ “, který obdržíme tímto testem se označuje jako smluvní diagram. Toto označení má své opodstatnění a je to způsobeno skutečností, že u většiny kovů a slitin dochází během této zkoušky v poslední fázi testu k charakteristickému zúžení vzorku v lokalitě s největší koncentrací napětí. V této oblasti dojde nakonec k samotnému přetržení vzorku. Proto hodnota  $R_m$ , kterou odečteme ze smluvního diagramu neodpovídá skutečnému max. napětí, protože síla se vztahuje na počáteční hodnotu průřezu.



**Obr.10** Smluvní diagram měkké uhlíkové tyčky s výraznou mezí kluzu

kde je:

$R_m$  ..... celková pevnost [MPa]

$R_{p0,2}$  ..... smluvní mez kluzu [MPa]

$\varepsilon_c$  ..... celková deformace [bezrozm.]

$\varepsilon_{pl}$  ..... plastická deformace [bezrozm.]

$\varepsilon_{pr}$  ..... pružná deformace [bezrozm.]

Na **Obr.10** je zobrazen skutečný průběh napětí, který odpovídá měnicímu se průřezu a je vyznačen čárkovanou čarou. Z grafu lze dále určit jak celkovou deformaci  $\varepsilon_c$  tak poměr pružné deformace  $\varepsilon_{pr}$  a plastické deformace  $\varepsilon_{pl}$ . V oblasti plastické deformace je nárůst deformace materiálu rychlejší než v první části. Křivka plastické deformace se tedy odchyluje od přímkového průběhu pružné deformace. Problém nastává pokud chceme určit přesnou hodnotu meze kluzu. Tuto mez neuvádí ani samotná norma ČSN. Z tohoto důvodu se zavedla smluvní (technická) mez kluzu  $R_{p0,2}$ . Toto napětí je vyvolané trvalým prodloužením 0,2%. Samotné zjištění této meze je značně náročné na přesnost měřících zařízení. Plocha pod diagramem odpovídá práci vynaložené na změnu tvaru zkušební tyče a udává zároveň houževnatost materiálu. Houževnatost pokládáme jako protiklad křehkosti, která je popisována jako odpor materiálu proti porušení křehkým lomem ještě před dosažením meze kluzu. Proto pokládáme houževnatost rovnou maximální energii nárazu, který těleso může snést aniž by se porušilo. Jemnost krystalizace je důležitým faktorem ovlivňujícím chování kovů. Pokud se kov vyznačuje hrubou krystalizací pak u něj nastávají plastické deformace mnohem dříve. Mez kluzu je také nižší než u jemnozrnných struktur. Pokud napětí narůstá nad mez kluzu začne se zkušební tyč deformovat po celé délce. V grafu je to oblast stoupající větve , která dosáhne svého vrcholu v oblasti meze pevnosti (  $R_m$  – celková pevnost ).

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (4)$$

Do okamžiku dosažení meze pevnosti byla deformace rovnoměrná po celé délce zatěžované zkušební tyče. Po dosažení meze pevnosti se deformace soustřeďuje do

oblasti s nejvyšší koncentrací napětí. To má za následek lokální zmenšování průřezu zkušební tyče a pokles křivky grafu až do okamžiku jejího přetržení. U kovů lze tuto nelinearitu v oblasti plastických deformací popsat Ramberg – Osgoodovým zákonem zpevnění :

$$\bar{R} = K \cdot (\bar{\epsilon})^n \quad [\text{MPa}] \quad (5)$$

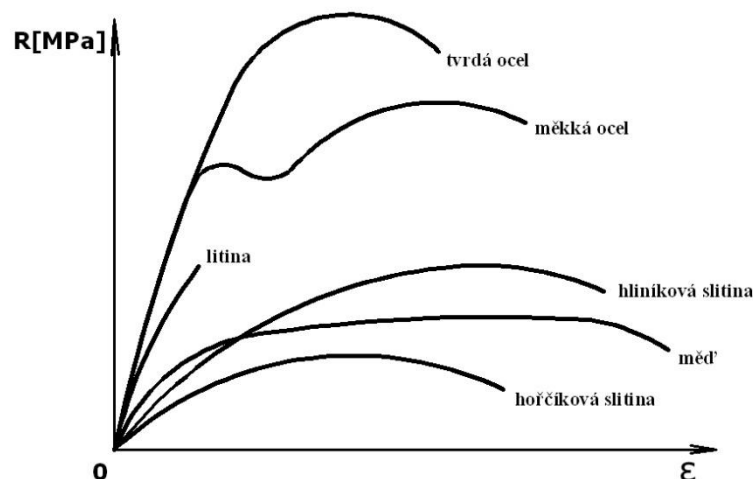
$\bar{R}$  .... skutečné napětí [MPa]

$\bar{\epsilon}$  .... skutečná plastická deformace [bezrozm.]

$n$  .... exponent deformačního zpevnění [bezrozm.]

$K \approx E$  .... materiálový ( pevnostní) součinitel [MPa]

(Materiálový součinitel „K“ u kovů odpovídá hodnotě Youngovu modulu „E“.)

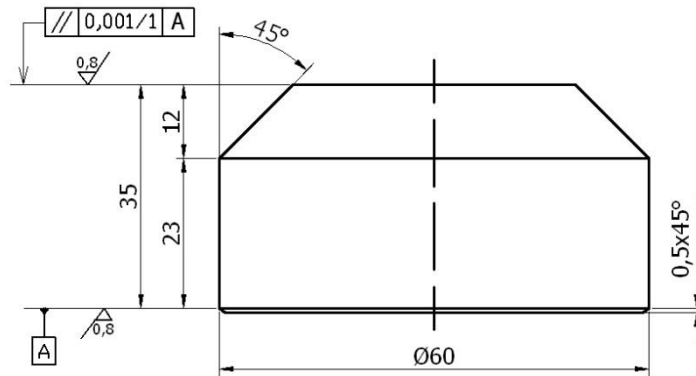


**Obr.11** Smluvní diagramy zkoušky tahem pro různé kovy

## 2.2 Tlaková zkouška křehkých materiálů [3]

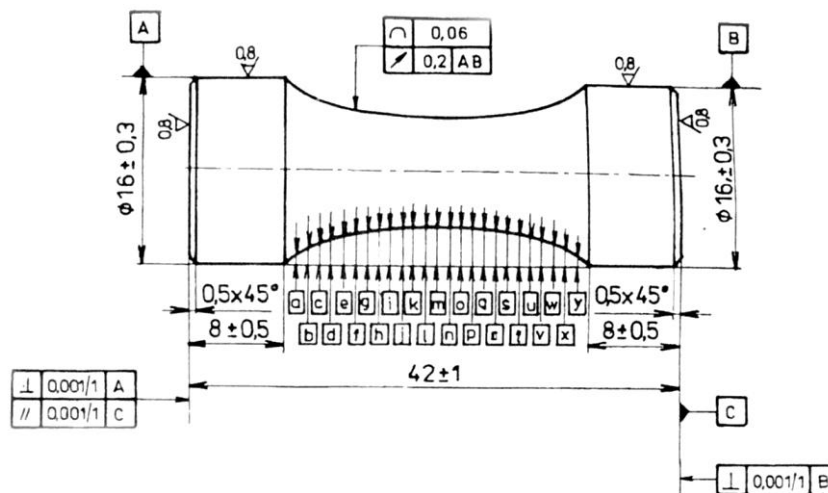
Provedení této zkoušky podléhá národní normě ČSN EN 24506 vydané v listopadě 1995. Přesný název normy : TVRDOKOVY Zkouška tlakem. Mezinárodní označení ISO 4506:1979 Hardmetals. Compression test. Tato mezinárodní norma předepisuje metodu stanovení mezní pevnosti a smluvní meze kluzu tvrdokovů za působení jednoosého tlakového zatížení. Zkušební těleso se vloží mezi dvě desky z tvrdokovu a vystaví se působení osové síly. Norma předepisuje rozměry této podložky

podle **Obr.12**. Je potřeba dodržet podmínku aby styčné plochy desek byly navzájem rovnoběžné ( planolární ). Podložka musí být z materiálu jehož tvrdost není menší než 1600 HV.



**Obr.12** Rozměry podložky [3]

Zkušební těleso a jeho rozměry jsou také normalizovány. Výkres zkušebního vzorku je na **Obr.13**. Koncové plochy a válcové povrchy rozšířených konců musí být broušeny. Ostatní povrchy broušeny být nemusí. ( Broušení nebo leštění může ovlivnit výsledek zkoušky ). Zkušební těleso musí být v místě jeho nejmenšího průměru měřeno s přesností  $\pm 0,02$  mm. Profil vzorku je popsán 25 pořadnicemi, které jsou od sebe vzdáleny o 1 mm.



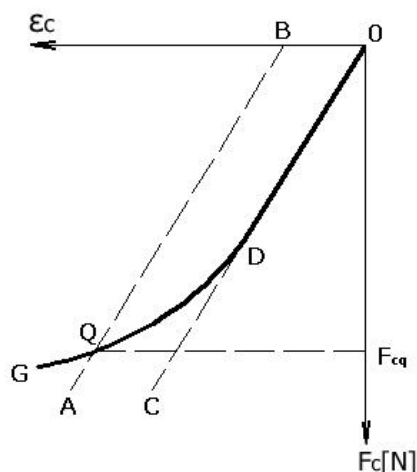
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	
1,21	1,90	2,29	2,54	2,69	2,79	2,86	2,91	2,94	2,96	2,98	2,99	
m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y
3,00	2,99	2,98	2,96	2,94	2,91	2,86	2,79	2,69	2,54	2,29	1,90	1,21

**Obr.13** Rozměry zkušebního tělesa [3]

Zkušební zařízení musí být navrženo a konstruováno tak, aby zatížení mohlo být vyvoláno rovnoměrnou rychlostí a v uvažované měřicí oblasti byla maximální chyba zatěžování  $\pm 1 \%$ . Zkušební těleso musí být upevněno mezi dvě dobře středěné, tuhé a bezpečně zajištěné podložky z tvrdokovu. Stykové plochy musí být kolmé na osu zatěžování a vzájemně rovnoběžné (planolární) v rozsahu do  $0,5 \mu\text{m}/\text{mm}$ . Podmínkou pro správný průběh zkoušky je aby rychlost přírůstku zatěžování byla pokud možno rovnoměrná. Každá změna této rychlosti musí být provedena postupně a bez rázů. Rychlost nesmí převýšit  $8000 \text{ N/s}$ , což odpovídá přibližně  $100 \text{ N}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ .

### 2.2.1 Stanovení smluvní meze kluzu [3]

Smluvní mez kluzu  $R_{c02}$  se stanovuje podle **Obr.14**. Tato metoda je založena na skutečnosti platné pro většinu kovů, pokud je zatížení odlehčeno za elastickou mezí. Křivka zatížení „D“ bude sledovat lineární směr, který je přibližně rovnoběžný s křivkou zatížení pod elastickou mezí. Smluvní mez kluzu se stanoví průsečíkovou metodou.



**Obr.14** Křivka zatížení-deformace

Na vzorek se působí předběžným zatížením ne větším než je požadováno pro udržení zkušební tělesa ve správné poloze ve stroji. Následně zatěžujeme zkoušený vzorek. Poté stanovíme křivku napětí – deformace. Na získaném grafu vyneseme vzdálenost OB, která odpovídá požadované zbytkové deformaci (trvalá odchylka) a sestrojíme přímkou BA od bodu B, rovnoběžnou s přímkou OC. Průsečík na ose pořadnic  $F_C$  přímky vedené z bodu Q je hodnota  $F_{CQ}$  a představuje zatížení, které odpovídá smluvní mezi kluzu  $R_{c02}$ . Někdy je neseadné stanovit směr přímky OC z grafu. V takovém případě tato přímka může být narýsována na základě dohodnuté hodnoty Youngova modulu pružnosti.

Smluvní mez kluzu  $R_{c02}$  v [MPa] je dána rovnicí:

$$R_{c02} = \frac{F_{c02}}{S_0} \quad [\text{N/mm}^2], [\text{MPa}] \quad (6)$$

kde je:

$F_{c02}$  ..... Zatížení při 0,2 % smluvní meze kluzu [N]

$S_0$  ... Minimální počáteční plocha příčného průřezu [ $\text{mm}^2$ ]

Poznámka:

Z důvodu krátké zkušební oblasti a tvrdosti materiálu mohou vzniknout nesnáze při měření změny délky použitím upínacího typu (průtahoměry). Je doporučováno, aby změny délky byly měřeny použitím odporového tenzometru. Dva nebo čtyři tenzometry by měly být použity symetricky uprostřed zkoušené oblasti. Jejich aktivní délka by neměla přesáhnout 8 mm. Získané výsledky představují průměrnou změnu délky zkoušené oblasti.

### 2.2.2 Stanovení mezní pevnosti v tlaku [3]

Pro stanovení mezní pevnosti tlaku je nutné zatěžovat zkušební vzorek do jeho porušení. Mezní pevnost v tlaku  $R_{cm}$  je dána rovnicí:

$$R_{cm} = \frac{F_{cu}}{S_0} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (7)$$

kde je:

$F_{cu}$  ..... Mezní zatížení, tj. zatížení v okamžiku porušení [N]

$S_0$  ... Minimální počáteční plocha příčného průřezu [ $mm^2$ ]

Jako výsledek tlakové zkoušky křehkých materiálů se pro smluvní mez kluzu a mezní pevnosti v tlaku vypočítá aritmetický průměr z alespoň pěti zkoušek. Hodnoty se zaokrouhlují na nejbližších 10 N/ $mm^2$ . Výsledky zkoušky jsou zaznamenány ve zkušebním protokolu, který musí obsahovat následující informace:

- a) Odkaz na tuto mezinárodní normu
- b) Všechny podrobnosti nutné pro identifikaci zkušebního tělesa
- c) Výsledek zkoušky
- d) Všechny postupy, které nejsou uvedeny v této mezinárodní normě a nebo postupy zvolené
- e) Podrobnosti, které mohly ovlivnit výsledek zkoušky

### **2.3 Tlaková zkouška kovových materiálů**

Tato zkouška patří opět do skupiny zkoušek statických. Podstata zkoušky samotné je opačná oproti tahové zkoušce. Avšak výsledky získané oběma metodami jsou pro kovové materiály srovnatelné. Tlaková zkouška se pro houževnaté materiály jako jsou kovy v praxi nepoužívá a je nahrazována tahovou zkouškou. Pro houževnatý a tvárný materiál má tato zkouška jen velmi omezený význam, většinou se provádí jako zkouška technologická. Tlaková zkouška se nejvíce užívá pro křehké materiály. Je to způsobeno především skutečností, že křehké materiály (tvrdokovy, sklo, beton) mají vynikající odolnost proti tlakovému zatížení a naopak velice nízké hodnoty odolnosti při tahovém zatížení. S ohledem na tuto skutečnost se křehké materiály užívají nejvíce v oblastech kde panují velká tlaková zatížení. Například u betonu je nepříjemné, aby byl namáhán na tah. V situacích kdy by mohlo dojít k tahovému zatížení ( i když jen na krátký okamžik ) je nutné beton vyztužit a docílit jeho odolnost vůči tomuto zatížení. Této odolnosti se ve stavebnictví dosahuje kovovými výztužemi. Do betonové formy se vkládají kovové pruty ,tyče a sítě. K docílení vyšší pevnosti se někdy beton zalévá do

formy s železnými tyčemi jež jsou předepjaté na vhodnou míru, která po vytvrzení betonu zaručuje vyšší odolnost zvláště vůči silám, jež nepůsobí čistě tlakové namáhání. Z tohoto důvodu jsou tlakové zkoušky u křehkých materiálů dobře zpracovány a popsány v příslušných normách. Uvedl bych například normu pro zkoušení ztvrdlého betonu ČSN EN 12390-3. Pro tlakovou zkoušku kovových materiálů nebyla dosud vydána příslušná norma. Je to především způsobeno faktem, jež jsem uvedl výše a zároveň skutečností, že tahová zkouška a její realizace je méně náročná na přípravu a její přesnost není závislá na rozměrech vzorku.

Princip tlakové zkoušky je v zásadě jednoduchý ale přípravě vzorku a jeho uchycení je třeba věnovat velkou péči. Zkoušený vzorek musí mít zcela rovné, spolu souběžné (planpolární) styčné plochy na něž budeme působit tlakovou silou. To je důležité pro rovnoměrné rozložení působícího zatížení. Pro křehké materiály jako je kámen, zdivo či beton má zkoušený vzorek tvar krychle. Pro kovy a slitiny se používá vzorek ve tvaru válce. Tlaková zkouška se u křehkého materiálu provádí do okamžiku, než dojde k jeho rozdrčení. Toto rozdrčení nastane náhle, téměř bez předchozí deformace a to v rovinách, kde tangenciální napětí dosáhne maximální hodnoty, tj. pod úhlem 45°. V tomto případě odpovídá smluvní napětí při lomu (porušení) pevnosti materiálu v tlaku  $R_m$ :

$$R_m = \frac{F_{\max}}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (8)$$

Naopak u houževnatých materiálů jako jsou kovy a slitiny nedochází k tomuto viditelnému rozdrčení jako například u betonu. Houževnatý materiál se při tlakovém zatížení deformuje soudkovitě. Smáčkne se, avšak nerozdrtí. Měřítkem odolnosti vůči tlaku je u houževnatých materiálů napětí, při němž se zkoušený vzorek začne náhle stlačovat. Tomuto napětí říkáme mez kluzu v tlaku. Tlaková zkouška pro tvrdokovy značí smluvní mez kluzu v tlaku symbolem  $R_{c0,2}$ . Pro potřeby srovnání s tahovou zkouškou a pro snazší přehlednost bylo v této práci použito pro označení smluvní meze kluzu v tlaku označení  $R_{p0,2}$ . Proto v dalším textu bude hodnota  $R_{c0,2}$  značena symbolem  $R_{p0,2}$ . V praxi se obdobně jako u tlakové zkoušky tvrdokovů stanoví smluvní mez kluzu v tlaku  $R_{p0,2}$  podle vztahu :

$$R_{p0,2} = \frac{F_{c0,2}}{S_0} \dots \text{smluvní mez kluzu v tlaku } [N/mm^2] \text{ nebo } [\text{MPa}] \quad (9)$$

kde je:

$F_{c02}$  ..... Zatížení při 0,2 % smluvní meze kluzu [N]

$S_0$  ..... příčného průřez vzorku [ $mm^2$ ]

- U houževnatých materiálů se také určuje poměrné stlačení:

$$\varepsilon_d = \frac{L_0 - L}{L_0} * 100 \quad [\%] \quad (10)$$

$L_0$  ..... délka vzorku před zatížením [mm]

$L$  ..... délka vzorku po dokončení testu [mm]

- Obdobně lze stanovit příčné rozšíření průřezu :

$$\psi_d = \frac{S - S_0}{S_0} * 100 \quad [\%] \quad (11)$$

$S_0$  ..... Příčný průřez vzorku před zatížením [ $mm^2$ ]

$S$  ..... Příčný průřez po dokončení testu [ $mm^2$ ]



**Obr.15** Zkušební těleso pro zkoušku tlakem – ocel 11373 [4]



**Obr.16** Zkušební těleso pro zkoušku tlakem – šedá litina [4]



**Obr.17** Zkušební těleso pro zkoušku tlakem – hliníková slitina [4]

### 3 Statistické zpracování

Již v dávných dobách před několika tisíci lety se lidé setkávali s problematikou, která se podobala statistickému zkoumání. Například sčítání lidí ve starověkém Egyptě a v Číně. Samotný název „statistika“ byl odvozen od latinského slova „status“ = „stav“. Překlad slovního spojení „status rei publicae“ = „stav věci veřejné“, jinak řečeno stát. Později se v 16. a 17. století začalo používat v souvislosti se souhrnem znalostí o státních záležitostech označení „statistica“. Tento termín se časem ujal v mezinárodním měřítku a používá se dodnes. V jejím počátku se jednalo o vědu zabývající se shromažďováním, tříděním a tabelováním nashromážděných dat. Postupem času však statistika jako vědní obor začala pronikat do více oborů lidské činnosti a s nástupem výpočetní techniky se její postavení čím dál více projevuje jako nezbytný nástroj pro analýzu nesčetného množství dat.

Statistiku lze chápat v zásadě ve třech pojetích:

1. Sloužící k vyjádření souhrnu dat o hromadných jevech
2. Praktická činnost spočívající ve sběru, zpracování a vyhodnocování dat o hromadných jevech
3. Jako metodologickou vědu, která zkoumá statistické zákonitosti hromadných jevů a kterou tvoří metodologie zjišťování, zpracování a analýzy dat.

Pro potřeby statistického zpracování naměřených dat tlakové zkoušky bylo využito statistiky v jejím třetím významu, tedy jako metodologickou vědu. Předmětem zkoumání této vědy není konkrétní jedinec (předmět, objekt, událost) sám o sobě. Předmětem zkoumání je soubor těchto statistických jedinců (veličin). Soubor těchto poznatků o hromadných jevech vyjadřuje statistickými daty.

### 3.1 Popisná statistika

Pro potřeby statistického zkoumání je potřeba definovat množinu objektů, prvků zkoumání neboli statistický soubor dat. Jednotlivé objekty, prvky označujeme jako statistické jednotky. Tyto statistické jednotky jsou nositeli vlastností daného souboru. Počet těchto jednotek se nazývá rozsah souboru. V praxi se často nepracuje s celým rozsahem souboru ale pouze s jeho částí neboli výběrovým souborem. Příčinou tohoto postupu je především pracnost, časová náročnost a nákladnost zpracování celého souboru. Vlastnosti statistického souboru sleduje statistika prostřednictvím měřitelných vlastností statistických jednotek, které vyjadřuje tzv. statistickými znaky. Statistický znak může nabývat jak číselných hodnot, tak i slovních variant. Číselné statistické znaky dále dělíme na znaky spojité a nespojité. Spojité znaky mohou nabývat libovolné číselné hodnoty v určitém intervalu (výška člověka, průtok vody). Nespojité znaky mohou nabývat pouze určité číselné hodnoty v oboru reálných čísel (počet zaměstnanců, počet zastavení na křižovatce na červenou). Jestliže ve statistickém souboru pracujeme s jedním znakem (s jednou proměnnou) nazýváme tento soubor jednorozměrným. Máme-li současně více znaků, jde o dvou-, tří-, resp. obecně o vícerozměrný soubor.

### 3.2 Prezentace hodnot číselného znaku

Při statistickém šetření máme k dispozici soubor s určitým počtem statistických znaků. Pro lepší orientaci ve velkém počtu dat je výhodné napozorované hodnoty utřídit podle velikosti a současně je účelné zjistit, s jakou četností se jednotlivé varianty hodnoty vyskytují. Výsledkem tohoto uspořádání vstupních dat je tabulka rozdělení četností.

**Tab.1** Tabulka rozdělení četností

<b>Obměna hodnoty znaku</b>	<b>Četnost</b>
$X_i$	$n_i$
$X_1$	$n_1$
$X_2$	$n_2$
.	.
.	.
$X_k$	$n_k$
<b>Celkem</b>	<b>n</b>

Pracujeme-li se statistickým znakem s velkým počtem obměn, pak tento způsob prezentace statistického šetření by nepřinesl žádoucí zpřehlednění statistických dat. V tomto případě se přechází od obměn jednotlivých číselných hodnot na intervaly hodnot. Přehlednost výsledků regulujeme šířkou a počtem zvolených intervalů. Tato tabulka je označována jako intervalové rozdělení četností. Při jejím sestrojení musíme řešit otázku počtu a šířky intervalů. Příliš široké intervaly snižují kvalitu prezentace naopak příliš úzké intervaly zhoršují přehlednost a mohou neúměrně zvýšit rozsah tabulky. Pro stanovení počtu intervalů se často používá tzv. „Sturgesovo pravidlo“. Počet intervalů „k“ je poté určen vztahem:

$$k \approx 1 + 3,3 \cdot \log_{10} n \quad (12)$$

k ... počet tříd

n ... rozsah souboru

Stanovení šířky intervalu „h“ je pak dáno vztahem: (zaokrouhlíme na celé číslo)

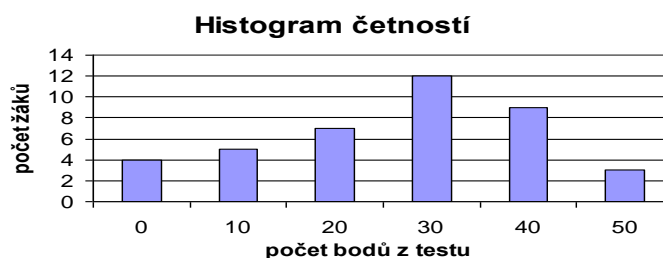
$$h = \frac{R}{k} \quad (13)$$

kde je:

$$R = X_{max} - X_{min} \quad \dots \text{ variační rozpětí} \quad (14)$$

k ..... počet tříd

Tabulku rozdělení četností můžeme pro větší přehlednost doplnit grafickou prezentací ve formě grafu rozdělení četností. Z grafického vyjádření je snazší rozpoznat s jakou pravidelností jsou četnosti rozloženy, zda jde o rozložení symetrické nebo které obměny hodnot v souboru dominují apod.



**Graf.1** Histogram četností

Další možností prezentace hodnot číselného znaku je kvantil. Je to hodnota proměnné určená tak, že odděluje určitý podíl jednotek, které jsou menší než tato hodnota. Např. dvacetipětiprocentní kvantil  $\tilde{X}_{25}$  odděluje 25% menších hodnot a současně 75% větších hodnot. V praxi se nejčastěji používají tyto typy kvantilů:

- Kvartily ( $\tilde{X}_{25}, \tilde{X}_{50}, \tilde{X}_{75}$ )
- Decily ( $\tilde{X}_{10}, \tilde{X}_{20}, \tilde{X}_{30} \dots \tilde{X}_{90}$ )
- Centily resp. Percentily ( $\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \tilde{X}_3 \dots \tilde{X}_{99}$ )

V praxi je nejčastěji používaným kvantilem  $\tilde{X}_{50}$  (Medián), který představuje prostřední hodnotu souboru a je tedy svou vypovídací hodnotou blízký aritmetickému průměru. Medián je imunní vůči extrémním hodnotám. Proto mu dáváme přednost před aritmetickým průměrem v souborech s extrémními hodnotami.

### 3.3 Statistické charakteristiky – Míry polohy

Popisné míry, které ukazují, kde leží střed nebo nejtypičtější hodnota datového souboru, se nazývají míry polohy nebo míry úrovně. Mezi nejdůležitější míry polohy patří aritmetický průměr  $\bar{X}$ , medián  $\tilde{X}$  a modus  $\hat{X}$ .

- Aritmetický průměr „ $\bar{X}$ “  
Je nejčastěji používanou mírou polohy a je definován jako podíl součtu hodnot datového souboru a počtu jednotlivých hodnot datového souboru.
- Medián „ $\tilde{X}$ “  
Je to padesátiprocentní kvantil a v praxi je nejčastěji používaným kvantilem, který představuje prostřední hodnotu souboru a je tedy svou vypovídací hodnotou blízký aritmetickému průměru. Medián je imunní vůči extrémním hodnotám. Proto mu dáváme přednost před aritmetickým průměrem v souborech s extrémními hodnotami.
- Modus „ $\hat{X}$ “  
Modus datového souboru je každá hodnota, jejíž četnost výskytu je větší než 1 a je stejná nebo větší než četnost kterékoliv jiné hodnoty.

### 3.4 Statistické charakteristiky – Míry rozptýlenosti

Při sledování hodnot dvou souborů o stejné hodnotě polohy (aritmetický průměr, medián či modus) můžeme v některých případech pozorovat, že se tyto soubory navzájem výrazně liší. Nejčastěji používaným zástupcem míry polohy je aritmetický průměr. Ten nám však nedokáže popsat jak rozdělení kolem průměru kolísá. Obecně je možno říci, že vypovídací schopnost průměru je tím větší, čím je rozptýlenost nebo variabilita sledované veličiny menší. Pro popis variability se používá mnoho měr. Tyto míry dělíme do dvou skupin a to na absolutní míry rozptýlenosti a relativní míry rozptýlenosti. Zde uvedu nejčastěji používané:

#### a) Míry absolutní rozptýlenosti

Jsou to míry, které charakterizují měnlivost statistického souboru v absolutní velikosti. Měří rozptýlenost ve stejných měrných jednotkách, ve kterých je vyjadřována měřená veličina. Nejčastěji používané míry absolutní rozptýlenosti:

- **Variační rozpětí „R“**

Jedná se o nejjednodušší míru rozptýlenosti a je definováno jako rozdíl mezi největší a nejmenší hodnotou v datovém souboru. Tato veličina ale není imunní vůči extrémním hodnotám v datovém souboru. Proto se použití této míry rozptýlenosti pro většinu datových souborů nedoporučuje.

- **Výběrový rozptyl „ $s^2$ “**

Tato míra rozptýlenosti zahrnuje všechny hodnoty datového souboru a je tedy více imunní vůči extrémním hodnotám. Dává se jí přednost v případě, kdy je jako míra polohy použit aritmetický průměr. Měří rozptýlenost souboru tím, že zjišťuje jak daleko jsou v průměru hodnoty datového souboru od aritmetického průměru. Výběrový rozptyl je vyjádřen v jednotkách, které jsou čtvercem původních jednotek a proto se častěji používá tzv. směrodatná odchylka „ $s$ “, která je odmocninou z výběrového rozptylu.

## b) Míry relativní rozptýlenosti

Pomocí měr relativní rozptýlenosti je možná porovnat variabilitu statistického znaku u dvou nebo více souborů, které se výrazně liší mírou polohy ( např. aritmetický průměr ). Dále umožňují porovnávat variabilitu několika statistických veličin, které jsou vyjádřeny v různých měrných jednotkách. Vliv měřicí jednotky vylučují tím, že charakteristiky variability poměrují k průměru nebo k mediánu. Nejznámější míra relativní variability:

- Variační koeficient „ $V_x$ “

Je určen poměrem mezi výběrovou směrodatnou odchylkou „ $s$ “ a aritmetickým průměrem „ $\bar{X}$ “. Je to bezrozměrné číslo a jeho stonásobek udává rozptýlenost v procentech. Pokud je variační koeficient vyšší než 0,5 pak statistický soubor vykazuje značnou nesourodost.

## 4 **Metodika měření zkoušky tlakem**

Jelikož nebyla vydána příslušná Česká státní norma předepisující metodu stanovení celkové pevnosti  $R_m$  a smluvní meze kluzu  $R_{p02}$  pro kovy za působení jednoosého tlakového zatížení, bylo nutné tuto metodu stanovit. Například ve Spojených státech amerických je tato metoda popsána v normě ASTM E9 – 09 Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature. Dále tuto metodu popisuje například ISO norma 14317:2006 - Sintered metal materials excluding hardmetals -- Determination of compressive yield strength. Vhodnost námi zvoleného postupu byla následně ověřena pomocí tahové zkoušky, která také umožňuje stanovení celkové pevnosti  $R_m$  a smluvní meze kluzu  $R_{p02}$ . Samotné měření probíhalo v prostorách laboratoře Univerzity Pardubice. Všechna měření proběhla na univerzálním měřicím přístroji pro měření tahových a tlakových zkoušek ZDP 10/90. Výsledky měření byly během zkoušky online zaznamenávány přes rozhraní RS232 do počítače. Výstupem dat z měřicího přístroje byla síla  $F$  [N] , hodnota posunutí  $s$  [mm] a časový průběh  $t$  [s]. Časový průběh jsem ve své práci nevedl, jelikož tato veličina je pro naše potřeby měření postradatelná. Naměřené hodnoty byly v měřicím a

vyhodnocovacím programu zkušebního stroje dále zpracovány. Program z naměřeného smluvního diagramu vyhodnotil hodnotu  $R_{p0.2}$  a hodnotu  $R_m$ . Pro potřeby porovnání jednotlivých smluvních diagramů bylo nutné hodnoty vyexportovat a dále zpracovat v programu Microsoft Excel. Naměřená síla  $F$  [N] byla převedena na napětí „ $R$ “ [MPa] podle vztahu:

$$R = \frac{F}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (15)$$

kde je:

$F$  ... síla [N]

$S_0$  ... průřez tyče [ $\text{mm}^2$ ]

Stejně tak byla upravena i hodnota posuvu „ $s$ “ [mm] na relativní prodloužení  $|\varepsilon|$  [%]. Absolutní hodnota relativního prodloužení byla nutná pro potřeby porovnání tlakové a tahové zkoušky, jelikož pro tahovou zkoušku vychází relativní prodloužení kladné a pro tlakovou zkoušku záporné. Zde je uveden vztah pro výpočet „ $|\varepsilon|$ “ :

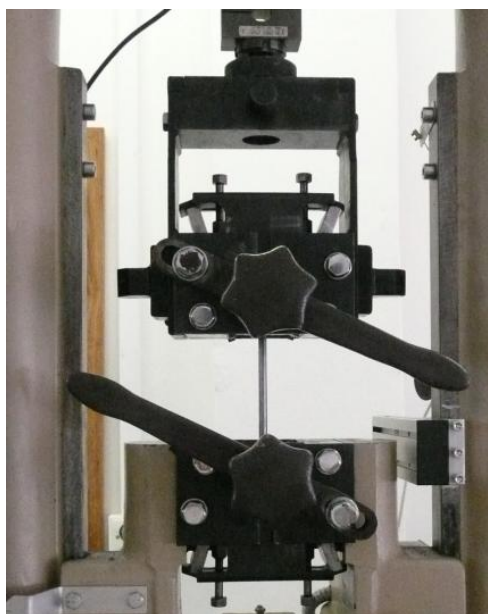
$$|\varepsilon| = \left( \frac{\Delta L}{L} \right) * 100 \quad [\%] \quad (16)$$

$\Delta L$  ... zkrácení [mm]

$L$  ... délka vzorku [mm]

#### 4.1 Popis měřicího stanoviště

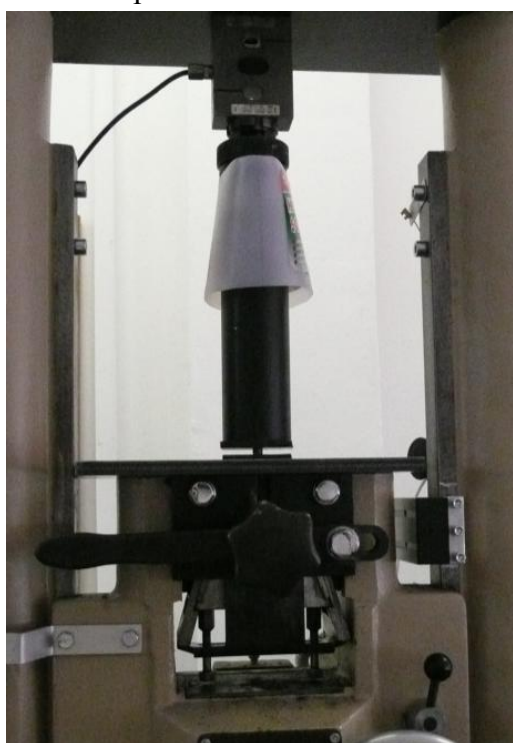
Samotné měření probíhalo na univerzálním měřicím přístroji pro tlakovou a tahovou zkoušku. Materiál a rozměry vzorků pro měření bylo nutné vybírat s ohledem na maximální přípustné zatížení přístroje, které bylo limitováno maximálním zatížením snímací tenzometrické části. Tenzometrická snímací část je výrobkem firmy Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH. Maximální hodnota zatížení je podle výrobce 7,5 t. Přístroj je vybaven digitálním převodníkem, který umožňuje zaznamenávání a další zpracování naměřených hodnot v digitální podobě a jeho následné vyhodnocení. Jak jsem již zmínil, přístroj je schopen měřit jak tahovou tak tlakovou zkoušku.



**Obr.18** Svěrací čelisti pro tahovou zkoušku

Pro tahovou zkoušku je nutné na přístroj aplikovat svěrací čelisti pro uchycení zkoušeného vzorku zajišťující přesné a především souosé uchycení. Toto uchycení musí zároveň zajistit, aby se zkoušený vzorek během namáhání nesmýkal z tohoto sevření a neovlivňoval tím výsledek zkoušky, která by v případě prosmeknutí vzorku byla neplatná. Samotná zkouška je ukončena v okamžiku přetržení vzorku, v našem případě ocelové tyče.

Pro tlakovou zkoušku bylo nutné navrhnout a zhotovit potřebný nástavec, který by bylo možné aplikovat na tenzometrickou hlavici. Především bylo nutné vyrobit tento nástavec z dostatečně odolné oceli, zamezující vzniku pružných deformací, které by ovlivňovaly výsledky měření. Nástavec je vyrobený z oceli třídy 11 373. Zkoušený vzorek je umístěn mezi dva ocelové pláty s hladkým povrchem. Nejspodnější částí je ocelová deska položená na svěrných čelistech pro tahovou zkoušku. V horní části nástavce je provizorní zábrana zhotovená z plastové lahve, která v případě vysmeknutí vzorku během zkoušky zamezí jeho nekontrolovanému pohybu po laboratoři. K tomu během našeho měření nedošlo.



**Obr.19** Nástavec pro tlakovou zkoušku



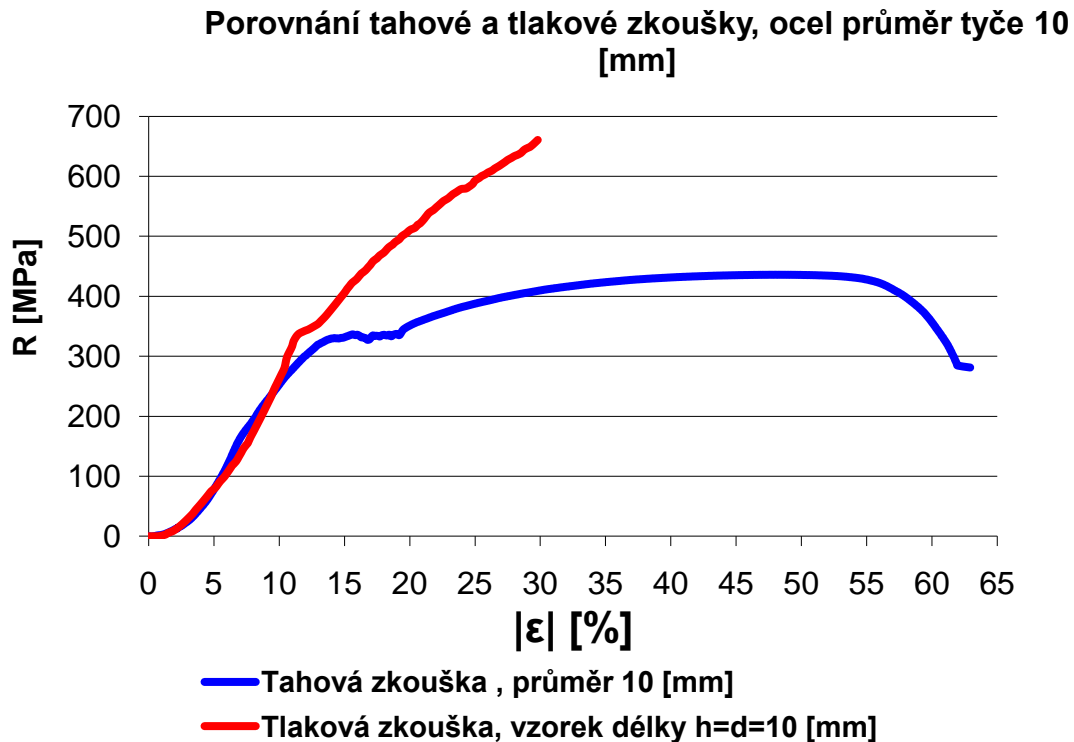
**Obr.20** Univerzální měřicí přístroj

Všechny vzorky byly řezány na přesné metalografické pile Mikron 110 a styčné plochy byly zabroušeny pro dosažení minimálního tření a přesnosti dosednutí mezi vzorkem a kovovými destičkami. Rozměry vzorků byly měřeny na posuvném měřidle. Na **Obr.20** je zobrazen celý měřicí přístroj. Vidíme zde tenzometrickou hlavici, nástavec pro tlakovou zkoušku, posuvnou základnu a nalevo vidíme digitální převaděč pro zpracování hodnot pomocí PC.

## 4.2 Vlastní měření

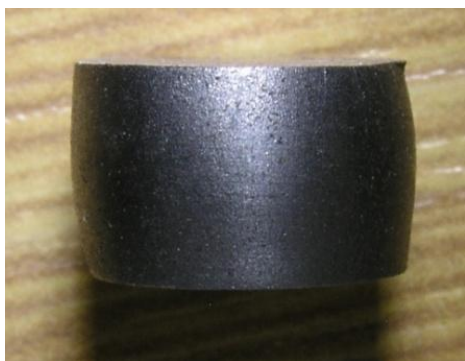
První kroky samotného měření vedly ke stanovení délky zkušební vzorku. V našem případě byla zkušebním vzorkem ocelová tyč a bylo nutné určit poměr mezi průměrem tyče „ $d$ “ a jeho délkou „ $l$ “. Tyto dvě hodnoty jsou spolu spjaty ve vztahu ,který jsme museli stanovit. Délka vzorku byla limitující také z bezpečnostního hlediska. Obávali jsme se totiž nekontrolovatelného vysmeknutí tyče během zkoušky. Při prvním měření ocelové popuštěné tyče o průměru 14 mm došlo během tahové zkoušky k přetížení zkušební stroje a zkouška byla automaticky ukončena. Jelikož nebyl měřicí přístroj schopen dokončit tahovou zkoušku pro ocelovou tyč tohoto průměru a my neměli k dispozici potřebné hodnoty pro porovnání obou zkoušek, bylo nutné zvolit ocel menšího průměru. Pro další tahovou zkoušku jsme tedy zvolili ocel o průměru 10 mm. Tahová zkouška proběhla bez problémů a zbývalo tedy naměřit samotnou tlakovou zkoušku. Délku prvního vzorku jsme volili  $l=d=10$  [mm]. Výsledný diagram tlakové zkoušky nám správně určil hodnotu meze kluzu. Avšak celkovou pevnost v tlaku nebylo u tak krátkého vzorku možné naměřit. To bylo způsobeno soudečkovou deformací, při níž dochází k rychlému zvětšení průměru vzorku a měřicí přístroj není schopen s narůstající styčnou plochou úměrně zvyšovat zatížení. Průběh

tahové a tlakové zkoušky je zobrazen na **Graf.2**. Pro potřeby porovnání tahové a tlakové zkoušky a pro lepší přehlednost je hodnota relativního prodloužení u tlakové zkoušky v absolutní hodnotě.



**Graf.2** Porovnání tahové a tlakové zkoušky, vzorek délky 10 mm

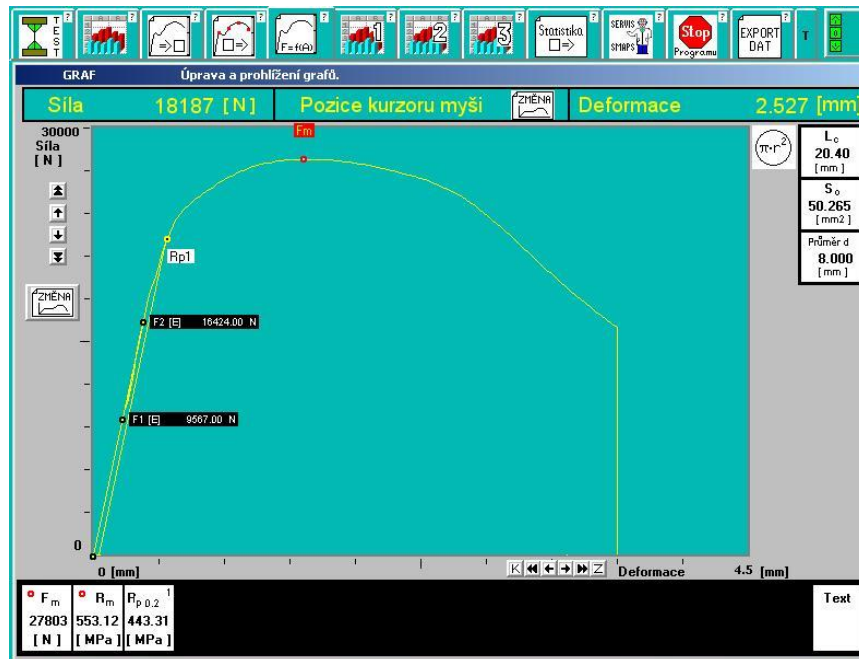
V tomto grafu je dobře patrná oblast meze kluzu, která má hodnotu 340 [MPa] pro oba typy zkoušek. Jedná se o typické zvlnění grafu a lokální pokles napětí na hranici přechodu pružné deformace na plastickou deformaci, který je způsoben skluzem atomových rovin. Jedná-li se o mez kluzu, pak nám výsledky prvního měření tlakové zkoušky vyšly shodné s tahovou zkouškou. Zbývalo nám tedy určit správnou délku



vzorku u kterého by se nám vykreslil celý průběh pracovního diagramu. Z grafu je také patrné, že ve skutečnosti není v oblasti pružných deformací závislost mezi „ $R$ “ a „ $\epsilon$ “ čistě lineární a grafem není přímka. Na **Obr.21** můžeme pozorovat soudkovou deformaci , která je pro tlakovou zkoušku kovových materiálů typická.

**Obr.21** Soudková deformace

Pro ilustraci jsem vložil ukázkou smluvního diagramu pro tlakovou zkoušku oceli o průměru 8mm jak jej interpretuje vyhodnocovací program měřícího zařízení.



**Obr.22** Průběh smluvního diagramu tlakové zkoušky

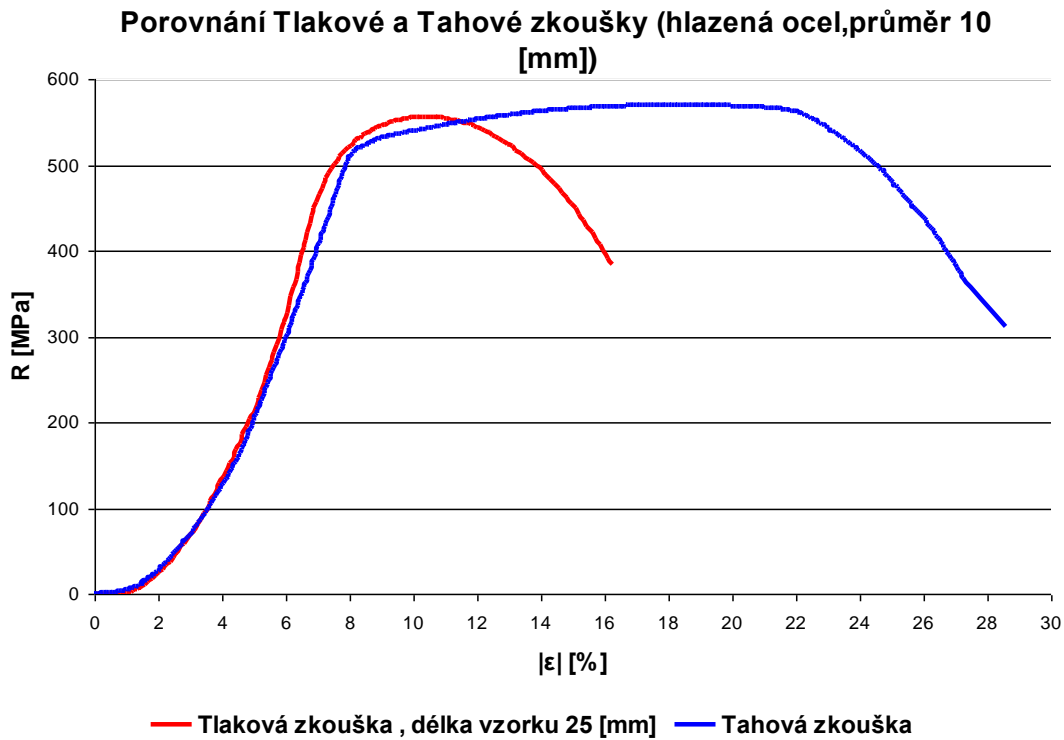
Jako druhý vzorek pro tlakovou zkoušku jsme použili opět stejnou ocel o průměru 10 mm. Délku vzorku jsme volili  $l=2d=20$  mm. Výsledek zkoušky byl obdobný jako u předchozího vzorku s délkou  $l=d=10$ mm. Mez kluzu vyšla opět stejná a to 340 MPa avšak celkovou mez pevnosti v tlaku jsme opět neobdrželi. Na **Obr.23** jsou zachycené vzorky o délce  $l > d$ . Pro tyto vzorky nastala deformace dle fotografie.



**Obr.23** Deformace vzorků – délky větší než průměr vzorků

Pro následující tlakovou zkoušku jsme zvolili délku vzorku  $l=2,5d=25$  mm. Tato zkouška již proběhla podle našeho očekávání v pořádku a k dispozici jsme měli kompletní průběh smluvního diagramu pro tlakovou zkoušku. Hodnota meze kluzu

vyšla opět takřka shodně s tahovou zkouškou. Hodnota celkové pevnosti byla v porovnání s celkovou pevností v tahu získanou během tahové zkoušky nepatrně menší. Rozdíl byl okolo 5% což je pro naše podmínky velmi dobrá hodnota. V příloženém **Graf.3** je zanesen průběh tahové a tlakové zkoušky pro vzorek délky  $l=2,5D=25\text{mm}$ .



**Graf.3** Porovnání Tlakové a tahové zkoušky

Na ose x je vyneseno relativní prodloužení v absolutní hodnotě abychom mohli porovnat protnutí meze kluzu, které byly naměřeny rozdílnými typy zkoušek. V grafu je patrné, že pro hodnotu meze kluzu  $R_{p02}=520$  [MPa] vychází poměrné prodloužení jak pro tahovou tak pro tlakovou zkoušku shodně 8% původní délky zkoumaného vzorku. Pro orientaci: Při tahové zkoušce byla délka vzorku  $l=70$  [mm],  $8\%=5,6$  [mm]. Z toho plyne, že vzorek ocelové tyče o průměru  $d=10$  [mm] a délce  $l=70$  [mm] lze při tahové zkoušce maximálně prodloužit o 5,6 [mm] aniž by ještě došlo k plastické deformaci. Při tlakové zkoušce shodně oceli stejného průměru a délce vzorku  $l=2,5d=25$  [mm] lze vzorek stlačit maximálně o hodnotu 2 [mm] aniž by došlo k plastické deformaci.

Během dalšího měření jsme se zaměřili na tyče menšího průměru. Dalším limitujícím faktorem byla stabilita tenké tyče během stlačování a její případné vysmeknutí. Proto jsme jako nejmenší hodnotu měřili ocelové tyčky o průměru 6mm.

Délky vzorků jsme volili  $l=d$  a  $l=2,5d$ . Hodnotu délky  $l=d$  jsme zvolili čistě z experimentálních důvodů, abychom se utvrdili v našem přesvědčení a správnosti použití délky vzorku  $h=2,5d$ . Meze kluzu vycházely podle předpokladu v rámci tolerance u obou zkoušek shodně. Pevnost v tlaku u kratších vzorků nebylo možné naměřit s čímž jsme předem počítali. Museli jsme však zohlednit skutečnost, že zvolená ocel o průměru 6mm vykazovala mez pevnosti zhruba 670 [MPa]. Do dalšího měření ocelové tyče o průměru 8 [mm] s mezí pevnosti 560 [MPa] jsme proto opět zkusili zahrnout i délku vzorku  $l=d=8$  [mm]. V tomto měření jsme se nadobro utvrdili ve správnosti zvolení délky měřeného vzorku  $h=2,5d$ . Samozřejmě i v tomto měření vyšla mez kluzu jak pro krátké ( $l=d$ ) tak pro dlouhé ( $l=2,5d$ ) vzorky v rámci tolerance shodná. V prvních měřeních se prováděly zkoušky pro jednotlivé průměry následujícím postupem:

1. Pro zvolený průměr vzorku se provedly 2x tahové zkoušky
2. Pro vzorek délky  $l=d$  se naměřily 2x tlakové zkoušky
3. Pro vzorek délky  $l=2,5d$  se naměřily 3x tlakové zkoušky
4. Následovalo porovnání statistické zpracování

Tento postup se opakoval pro zkušební vzorky o průměru 6, 8 a 10 [mm]. S tím, že pro vzorky o průměru  $d=10$  [mm] byla uskutečněna měření pro 3x druhy ocelí. Poslední měření bylo podkladem pro statistické zpracování. V tomto měření se naměřily 2x tahové zkoušky a poté následovaly zkoušky tlakové s délkou vzorku  $l=2,5d=25$  [mm]. Aby bylo možné popsat naměřená data pomocí popisné statistiky bylo nutné naměřit alespoň 20 vzorků. Konečný počet naměřených tlakových zkoušek byl 23x měření. Musím zde upozornit na skutečnost, která se nám přihodila během přípravy vzorků na měření. Při řezání na stojanové pile došlo zřejmě během řezání k vyosení čelistí přidržujících řezaný materiál. Výsledkem toho byly řezné plochy o toto vyosení natočené a nebyly pod úhlem  $90^\circ$  k ose tyčky. Řezné plochy byly sice pod jiným úhlem než  $90^\circ$  avšak opačné konce vzorku byly spolu více méně rovnoběžné. Nejprve jsme měřili správně nařezané vzorky a poté jsme naměřili zbylé nepřesné. Výsledky obou skupin vzorků byly překvapivě shodné. Proto se do statistického zpracování zahrnuly všechny naměřené hodnoty.

**Tab.2** Naměřené hodnoty tlakové a tahové zkoušky

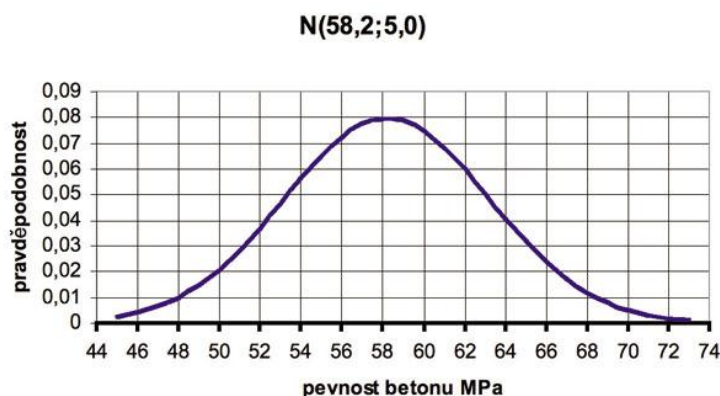
Typ zkoušky	$\varnothing$	l	průměrná hodnota $R_{p02}$	Odchylka od tahové zkoušky	průměrná hodnota $R_m$	Odchylka od tahové zkoušky
	[mm]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]
Tahová	6	60	623		688,5	
Tlaková	6	6	694,5	11,5	X	X
Tlaková	6	15	556	10,75	655	4,9
Tahová	8	60	433		547	
Tlaková	8	8	563	30	X	X
Tlaková	8	20	464,7	7,3	559	2,2
Tahová	10	60	332		436	
Tlaková	10	20	337,5	1,7	X	X
Tahová	10	60	342		442,7	
Tlaková	10	10	375	9,7	X	X
Tlaková	10	25	346	1,2	484,7	9,5
Tahová	10	70	519,6		570	
Tlaková	10	25	468	9,9	555	3,5

V **Tab.2** jsou uvedeny průměrné hodnoty všech měření pro mez kluzu a mez pevnosti stanovené pomocí tahové a tlakové zkoušky. Zároveň je v tabulce uvedena odchylka hodnot tlakové zkoušky od výsledků tahové zkoušky v procentech. Pro délky vzorků shodné s jeho průměrem ( $l=d$ ) nebylo možné naměřit maximální pevnost a hodnoty meze kluzu mají odchylku nad 10%. Pro ocelovou tyč o průměru 8 mm a délce 8 mm vyšla odchylka 30% což je nepřijatelné. V tabulce je patrné, že pro délky vzorku  $l=2,5d$  (2,5x násobek průměru vzorku) se odchylka hodnot pohybuje do 10%.

### 4.3 Statistické zpracování naměřených hodnot

Pro statistické zpracování bylo naměřeno 23 tlakových zkoušek oceli o průměru 10 [mm] a délce vzorku  $l=25$  [mm]. Tyto hodnoty budou porovnány s tahovou zkouškou, která byla provedena na vzorku tyče o stejném průměru a shodné celkové pevnosti. Cílem tohoto statistického šetření je ověřit zdali je možné za průměrnou hodnotu naměřených dat tlakové zkoušky použít aritmetický průměr či zvolit hodnotu s nejvyšší četností. Výsledná reprezentativní hodnota smluvní meze kluzu a celkové

pevnosti bude doplněna směrodatnou odchylkou. Pro použití aritmetického průměru bude nutné určit, zda-li mají naměřené hodnoty Normální (Gaussovo) rozdělení. Toto rozdělení se vyznačuje tím, že pravděpodobnost nastoupení určitého jevu je spjata s velkým množstvím navzájem nezávislých faktorů.



**Graf.4** Normální (Gaussovo) rozdělení pravděpodobnosti [6]

**Tab.3** Zdrojová data pro statistické zpracování

	Typ zkoušky	Ø [mm]	l [mm]	Rpo02 [MPa]	Rm [MPa]
1	tahová	10	70	519,4	570,1
2	tahová	10	70	519,7	571,4
-	-	-	-	-	-
1	tlaková	10	24,9	454,1	546
2	tlaková	10	24,9	454,4	564,9
3	tlaková	10	24,7	467,6	559,1
4	tlaková	10	25,7	445,8	555,2
5	tlaková	10	25,1	487,3	572
6	tlaková	10	25,2	471,2	551,6
7	tlaková	10	25	461,2	555,48
8	tlaková	10	24,6	492,7	556
9	tlaková	10	25,1	485,5	572,8
10	tlaková	10	25	462	559,5
11	tlaková	10	25,1	474	552,5
12	tlaková	10	25,3	502,4	572,5
13	tlaková	10	25,3	499	572,6
14	tlaková	10	25	484,2	554,8
15	tlaková	10	25,8	429,6	508
16	tlaková	10	25,3	473	554,3
17	tlaková	10	25,4	503	572
18	tlaková	10	25,1	458,5	564,2
19	tlaková	10	24,9	472,5	545,3
20	tlaková	10	25	458,8	564
21	tlaková	10	25	444,2	530,8
22	tlaková	10	25	456,3	548,1
23	tlaková	10	24,9	429,3	533,7

- Počet tříd „k“ pro hodnoty  $R_{p02}$  a  $R_m$ :

$$k = 1 + 3,32 \cdot \log n = k = 5,52 \dots\dots(\text{volím } k = 6) \quad (17)$$

- Variační rozpětí „R“ pro hodnotu  $R_{p02}$ :

$$R_{R_{p02}} = x_{max} - x_{min} = 73,7 \quad (18)$$

- Variační rozpětí „R“ pro hodnotu  $R_m$ :

$$R_{R_m} = x_{max} - x_{min} = 572,8 - 508 = 64,8 \quad (19)$$

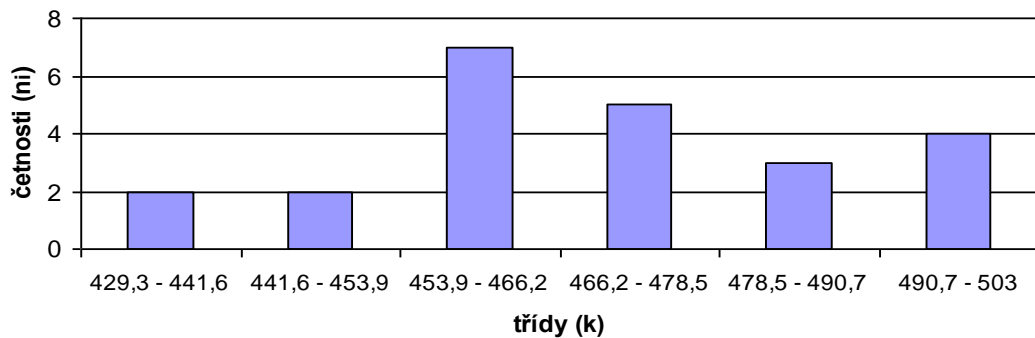
- Šířka třídního intervalu „h“ pro hodnotu  $R_{p02}$ :

$$h = \frac{R_{R_{p02}}}{k} = \frac{73,7}{6} = 12,283 \quad (20)$$

- Šířka třídního intervalu „h“ pro hodnotu  $R_m$ :

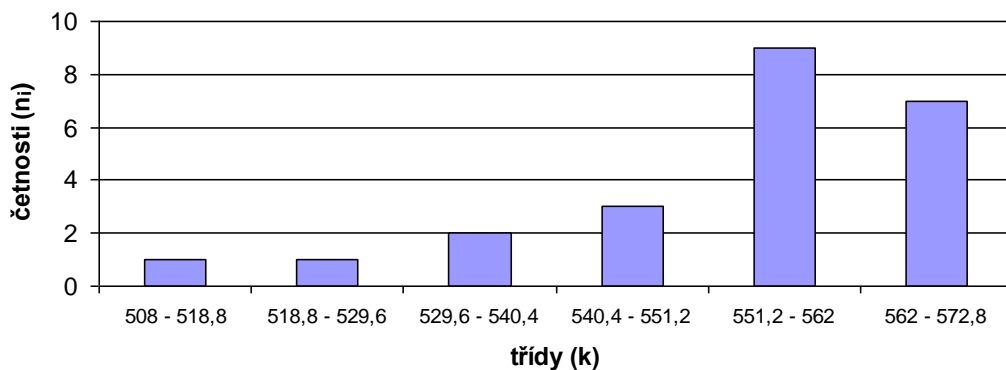
$$h = \frac{R_m}{k} = \frac{64,8}{6} = 10,8 \quad (21)$$

**Histogram četností pro hodnotu  $R_{p02}$  [MPa]**



**Graf.5** Histogram četností pro hodnotu  $R_{p02}$

**Histogram četností pro hodnotu  $R_m$  [MPa]**



**Graf.6** Histogram četností pro hodnotu  $R_m$

### 4.3.1 Statistické zpracování naměřených hodnot $R_{p02}$

Na základě sestrojeného histogramu pro hodnotu  $R_{p02}$  v **Graf.5** vyslovují hypotézu, že naměřená data mají Normální (Gaussovo) rozdělení hodnot s parametry  $N(\mu, \sigma)$ .

- $\mu$  ... střední hodnota Gaussova rozdělení
- $\sigma$  ... směrodatná odchylka Gaussova rozdělení

Množství naměřených dat, která máme k dispozici umožňuje určit hodnotu „ $\mu$ “ z aritmetického průměru naměřených hodnot :

$$\mu \approx \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} = \frac{10766,78}{23} = 468,1 \quad (22)$$

Hodnotu „ $\sigma$ “ v našem případě stanovíme ze směrodatné odchylky :

$$S_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} = 445,97 \quad (23)$$

$$S_x = \sqrt{S_x^2} = \sqrt{445,97} = 21,1 \quad (24)$$

$$\sigma \approx S_x = 21,1 \quad (25)$$

Předpokládáme, že naměřená data pocházejí z Normálního rozdělení pravděpodobností s parametry  $N(468,1 ; 21,1)$ .

**Tab.4** Výpočet testovacího kritéria pro hodnotu  $R_{p02}$

$x_i$	429,3 - 441,6	441,6 - 453,9	453,9 - 466,2	466,2 - 478,5	478,5 - 490,7	490,7 - 503
$n_i$	2	2	7	5	3	4
$p_i$	0,071	0,146	0,213	0,225	0,170	0,093
$n \cdot p_i$	1,6	3,3	4,9	5,2	3,9	2,1
$(n_i - n \cdot p_i)^2 / n \cdot p_i$	0,1	0,5	0,9	0,0	0,2	1,6

Hodnota testového kritéria pro hodnotu  $R_{p02}$  :

$$R_{R_{p02}} = \sum_i \frac{(n_i - n \cdot p_i)^2}{n \cdot p_i} = 3,4 \quad (26)$$

Kritická hodnota pro hladinu spolehlivosti  $\alpha=0,05$  je  $X_{0,95;(3)}^2 = 7,815$ , hodnota testového kritéria se tedy nenachází v kritické oblasti a proto přijímáme tvrzení, že naměřené hodnoty pocházejí z Normálního rozdělení pravděpodobnosti. Hodnotu „ $\mu$ “  $\approx R_{p02} = 468,1$  [MPa] můžeme tedy považovat za střední hodnotu naměřených dat.

- Intervalový odhad parametru „ $\mu$ “ =  $R_{p02}$  pro Normální rozdělení pravděpodobnosti s hladinou spolehlivosti  $\alpha=0,05$  :

$$\mu \in \left( 468,1 - 2,074 \cdot \frac{21,1}{\sqrt{23}}; 468,1 + 2,074 \cdot \frac{21,1}{\sqrt{23}} \right) \quad (27)$$

$$\mu \approx R_{p02} \in (459; 477,3)$$

Na intervalu  $R_{p02}=459$  [MPa] až  $R_{p02}=477,3$  [MPa] lze tvrdit s 95%-ní pravděpodobností, že naměřená data pocházejí z Normálního (Gaussova) rozdělení pravděpodobnosti.

#### Závěr

Na základě statistického zpracování 23 hodnot získaných tlakovou zkouškou byla určena průměrná hodnota meze kluzu  $R_{p02} = 468$  [MPa]. Tato hodnota spolu s průměrnou hodnotou meze kluzu získanou při tahové zkoušce je zobrazena v **Tab.5**.

**Tab.5** Statistické vyhodnocení pro hodnotu  $R_{p02}$

Typ zkoušky	$\varnothing$ [mm]	l [mm]	průměrná hodnota $R_{p02}$ [MPa]
tahová	10	70	519,6
tlaková	10	25	<b>468±21</b>

### 4.3.2 Statistické zpracování naměřených hodnot $R_m$

Testuji hypotézu o typu rozdělení naměřených hodnot  $R_m$  [MPa]. Tvrdím, že naměřená data mají Normální (Gaussovo) rozdělení hodnot s parametry  $N(\mu, \sigma)$ . Množství naměřených dat, která máme k dispozici umožňuje určit hodnotu „ $\mu$ “ z aritmetického průměru naměřených hodnot :

$$\mu \approx \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} = \frac{12765,4}{23} = 555,017 \approx 555 \quad (28)$$

Hodnotu „ $\sigma$ “ stanovíme ze směrodatné odchylky :

$$S_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} = 241,18 \quad (29)$$

$$S_x = \sqrt{S_x^2} = \sqrt{241,18} = 15,52 \approx 15,5 \quad (30)$$

$$\sigma \approx S_x = 15,5$$

Předpokládáme, že naměřená data pocházejí z Normálního rozdělení pravděpodobností s parametry N (555 ; 15,5).

**Tab.6** Výpočet testovacího kritéria pro hodnotu  $R_m$

$x_i$	508 - 529,6	529,6 - 540,4	540,4 - 551,2	551,2 - 562	562 - 572,8
$n_i$	2	2	3	9	7
$p_i$	0,05	0,122	0,23	0,271	0,2
$n \cdot p_i$	1,17	2,8	5,3	6,2	4,6
$(n_i - n \cdot p_i)^2 / n \cdot p_i$	0,6	0,2	1	1,2	1,2

Hodnota testového kritéria pro hodnotu  $R_m$  :

$$R_{R_m} = \sum_i \frac{(n_i - n \cdot p_i)^2}{n \cdot p_i} = 4,19 \quad (31)$$

Kritická hodnota pro hladinu spolehlivosti  $\alpha=0,05$  je  $X_{0,95;(3)}^2 = 5,99$  , hodnota testového kritéria se tedy nenachází v kritické oblasti a proto přijímáme tvrzení, že naměřené hodnoty pocházejí z Normálního rozdělení pravděpodobností. Hodnotu „ $\mu$ “  $\approx R_m = 555$  [MPa] můžeme tedy považovat za střední hodnotu naměřených dat.

- Intervalový odhad parametru „ $\mu$ “  $\approx R_m$  pro Normální rozdělení pravděpodobnosti s hladinou spolehlivosti  $\alpha=0,05$ :

$$\mu \in \left( 555 - 2,074 \cdot \frac{15,5}{\sqrt{23}} ; 555 + 2,074 \cdot \frac{15,5}{\sqrt{23}} \right) \quad (32)$$

$$\mu \approx R_m \in (548,3 ; 561,7)$$

Na intervalu  $R_m=548,3$  [MPa] až  $R_m=561,7$  [MPa] lze tvrdit s 95%-ní pravděpodobností, že naměřená data pocházejí z Normálního (Gaussova) rozdělení pravděpodobnosti.

Závěr:

Na základě statistického zpracování 23 hodnot získaných tlakovou zkouškou byla určena průměrná hodnota celkové pevnosti  $R_m = 555$  [MPa]. Tato hodnota spolu s průměrnou hodnotou celkové pevnosti získanou při tahové zkoušce je zobrazena v **Tab.7**.

**Tab.7** Statistické vyhodnocení pro hodnotu  $R_m$

Typ zkoušky	Ø [mm]	l [mm]	průměrná hodnota $R_m$ [MPa]
tahová	10	70	<b>570</b>
tlaková	10	25	<b>555±15,5</b>

## 5 Závěr

Cílem mé bakalářské práce bylo stanovit metodiku měření tlakové zkoušky pro kovové materiály. S ohledem na to, že pro tlakovou zkoušku kovových materiálů nebyla vydána příslušná ČSN ani ISO norma, bylo nutné tuto metodiku stanovit na základě měření vzorků různých rozměrů. Důležité bylo určit vztah pro délku měřeného vzorku, která je spjata s jeho průměrem. Zároveň bylo nutné ověřit pravdivost výsledků této zkoušky. K ověření výsledků měření nám posloužila tahová zkouška podle ČSN 42 0310. Měření pro jednotlivé rozměry vzorků se prováděla opakovaně pro vyloučení chyb. Po naměření a porovnání hodnot meze kluzu a maximální pevnosti pro vzorky o délkách  $l=d$ ,  $l=2d$  a  $l=2,5d$  bylo zřejmé, že délka vzorku  $l=2,5d$  bude pro naměření tlakové zkoušky plně dostačující. Pro délky vzorků  $l=d$  a  $l=2d$  nebyl měřicí přístroj schopen stanovit hodnotu maximální pevnosti, jelikož došlo k jeho přetížení a automatickému přerušení testu. Délku vzorku větší než  $l=2,5d$  jsme z bezpečnostních důvodů neměřili. Delší vzorek zejména pro ocelové tyče menšího průměru by byl při testu nestabilní a mohlo by dojít k jeho vysmeknutí a ohrožení obsluhy. Tlakové zkoušky vzorků o délce  $l=2,5d$  nám ale poskytovaly výsledky s dostatečnou přesností a proto nebylo nutné volit vzorky o větší délce. Po naměření tlakových zkoušek pro různé délky vzorků byla provedena série 23x měření pro vzorek ocelové tyče o průměru  $d=10\text{mm}$  a délce  $l=2,5d=25\text{mm}$ . Tato série měření byla zdrojem pro statistické zpracování a její výsledky jsou následující:

- Mez kluzu  $R_{p02}[\text{MPa}]$

$R_{p02} = 468 [\text{MPa}]$  ... průměrná hodnota meze kluzu naměřená tlakovou zkouškou

$R_{p02} = 519,6 [\text{MPa}]$  ... mez kluzu naměřená pomocí tahové zkoušky

Výsledky tlakové zkoušky od tahové se v průměru lišily o 9,9%. Rozptyl hodnot tlakové zkoušky pro hodnotu meze kluzu byl  $\pm 21 [\text{MPa}]$ .

- Celková pevnost  $R_m[\text{MPa}]$

$R_m = 555 [\text{MPa}]$  ... průměrná hodnota celkové pevnosti naměřená tlakovou zkouškou

$R_m = 570 [\text{MPa}]$  ... celková pevnost naměřená pomocí tahové zkoušky

Výsledky tlakové zkoušky od tahové se v průměru lišily o 3,5%. Rozptyl hodnot tlakové zkoušky pro hodnotu celkové pevnosti byl  $\pm 15,5$  [MPa].

Z výsledků poslední série měření plyne, že hodnota meze kluzu  $R_{p02}$  naměřená pomocí tlakové zkoušky se od tahové zkoušky liší maximálně o 10% a hodnota celkové pevnosti  $R_m$  je téměř srovnatelná. Tuto hodnotu přesnosti měření bych hodnotil jako velmi dobrou. V závěru této práce mohu tedy potvrdit shodnost výsledků tahové a tlakové zkoušky.

## Použitá literatura

[1] Ptáček, Luděk. Nauka o materiálu I. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, c2003. 516 s. ISBN: 80-7204-283-1.

[2] doc. Ing Eduard Souček, CSc. Základy pravděpodobnosti a statistiky. vyd. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2003.170s. ISBN: 80-7194-611-7.

[3] ČSN EN 24506 (42 0873). TVRDOKOVY Zkouška tlakem (ISO 4506:1979). 8s. 1995

[4] Mechanické vlastnosti kovových materiálů [ online ]. c2007 [ cit 2010-05-12]  
Dostupné z [http://www.ateam.zcu.cz/mechanicke\\_vlastnosti.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/mechanicke_vlastnosti.pdf)

[5] Tahová zkouška [ online ]. c2007 [ cit 2010-05-16 ] Dostupné z  
[http://www.ateam.zcu.cz/staticke\\_zkouseni\\_cviceni.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/staticke_zkouseni_cviceni.pdf)

[6] Necharakteristická hodnota [ online ]. c2004 [ cit 2010-05-16 ] Dostupné z  
<http://casopisstavebnictvi.cz/tisk.php?ID=2225>

## Seznam obrázků

<b>Obr.1</b> Závislost mezi napětím $R$ a deformací $\epsilon$ [vlastní].....	9
<b>Obr.2</b> Tahové namáhání tělesa kruhového průřezu [vlastní].....	10
<b>Obr.3</b> Schéma anelastického jevu při zatížení konstantní silou a po odlehčení [vl.]....	11
<b>Obr.4</b> Oblast plastických deformací [vlastní].....	12
<b>Obr.5</b> a) hranová dislokace b) šroubová dislokace [5] .....	13
<b>Obr.6</b> a) krychlová plošně středěná b) krychl. prostorově středěná c) šesterečná [5] ...	13
<b>Obr.7</b> Teoretická představa skluzu v dokonalé mřížce [vlastní] .....	14
<b>Obr.8</b> kluzová rovina [5] .....	14
<b>Obr.9</b> dvojčatění [5] .....	14
<b>Obr.10</b> Smluvní diagram měkké uhlíkové tyčky s výraznou mezí kluzu [vlastní].....	16
<b>Obr.11</b> Smluvní diagramy zkoušky tahem pro různé kovy [vlastní] .....	18
<b>Obr.12</b> Rozměry podložky [3] .....	19
<b>Obr.13</b> Rozměry zkušebního tělesa [3] .....	19
<b>Obr.14</b> Křivka zatížení-deformace [3] .....	20
<b>Obr.15</b> Zkušební těleso pro zkoušku tlakem – ocel 11373 [4] .....	24
<b>Obr.16</b> Zkušební těleso pro zkoušku tlakem – šedá litina [4] .....	24
<b>Obr.17</b> Zkušební těleso pro zkoušku tlakem – hliníková slitina [4] .....	25
<b>Obr.18</b> Svěrací čelisti pro tahovou zkoušku [vlastní] .....	32
<b>Obr.19</b> Nástavec pro tlakovou zkoušku [vlastní] .....	32
<b>Obr.20</b> Univerzální měřicí přístroj [vlastní] .....	33
<b>Obr.21</b> Soudková deformace .....	34
<b>Obr.22</b> Průběh smluvního diagramu tlakové zkoušky [vlastní] .....	35
<b>Obr.23</b> Deformace vzorků – délky větší než průměr vzorků [vlastní] .....	35

## Seznam tabulek

<b>Tab.1</b> Tabulka rozdělení četností [vlastní] .....	26
<b>Tab.2</b> Naměřené hodnoty tlakové a tahové zkoušky [vlastní] .....	38
<b>Tab.3</b> Zdrojová data pro statistické zpracování [vlastní] .....	39
<b>Tab.4</b> Výpočet testovacího kritéria pro hodnotu $R_{p02}$ [vlastní] .....	41
<b>Tab.5</b> Statistické vyhodnocení pro hodnotu $R_{p02}$ [vlastní] .....	42
<b>Tab.6</b> Výpočet testovacího kritéria pro hodnotu $R_m$ [vlastní] .....	43
<b>Tab.7</b> Statistické vyhodnocení pro hodnotu $R_m$ [vlastní] .....	44

## Seznam grafů

<b>Graf.1</b> Histogram četností [vlastní] .....	27
<b>Graf.2</b> Porovnání tahové a tlakové zkoušky, vzorek délky 10 mm [vlastní] .....	34
<b>Graf.3</b> Porovnání Tlakové a tahové zkoušky [vlastní] .....	36
<b>Graf.4</b> Normální (Gaussovo) rozdělení pravděpodobnosti [6] .....	39
<b>Graf.5</b> Histogram četností pro hodnotu $R_{p02}$ [vlastní] .....	40
<b>Graf.6</b> Histogram četností pro hodnotu $R_m$ [vlastní] .....	40

## Seznam použitých symbolů a značek

ASTM	American Society for Testing and Materials
ČSN	Česká státní norma
E	modul pružnosti
$F_{\max}$	maximální zatížení
$F_{c02}$	Zatížení při 0,2 % smluvní meze kluzu v tlaku
$F_{cu}$	mezní zatížení v tlaku
G	modul pružnosti ve smyku
HV	Tvrдость podle Vickerse
h	šířka třídního intervalu
ISO	International Organization for Standardization
k	počet tříd
K	součinitel zpevnění
L	délka vzorku
$L_0$	výchozí hodnota délky vzorku
n	exponent deformačního zpevnění
n	rozsah souboru
$n_i$	četnost
$p_i$	pravděpodobnost
R	napětí
$R_m$	celková pevnost
$R_{p02}$	smluvní mez kluzu
$\bar{R}$	skutečná hodnota napětí (Ramberg – Osgodův zákon)
S	hodnota příčného průřezu
$S_0$	výchozí hodnota příčného průřezu
$S_x$	směrodatná odchylka
t	čas
$X_{0,95;(3)}^2$	kritická hodnota
$\alpha$	úhel
$\alpha$	hladina spolehlivosti

$\Delta$	delta
$\sigma$	směrodatná odchylka
$\varepsilon$	poměrné prodloužení
$\bar{\varepsilon}$	skutečná plastická deformace
$\varepsilon_c$	celkové prodloužení
$\varepsilon_{pr}$	pružná deformace
$\varepsilon_{pl}$	plastická deformace
$\varepsilon_{anel}$	anelastická deformace
$\mu$	střední hodnota Gaussova rozdělení pravděpodobnosti
$\mu$	Poissonův poměr
$\psi_d$	příčné rozšíření průřezu
$\tau_r$	relaxační čas
$\emptyset$	průměr