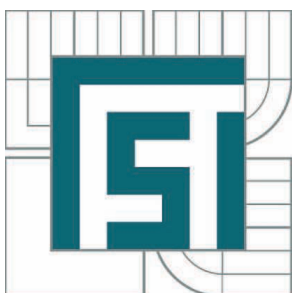


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## ZKOUŠKY TVAŘITELNOSTI A JEJICH UPLATNĚNÍ V PRAXI

FORMABILITY TESTS AND THEIR USE IN ENGINEERING PRACTICE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JOSEF OŠŤÁDAL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. KAMIL PODANÝ, Ph.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2010/2011

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Josef Ošťádal

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Zkoušky tvařitelnosti a jejich uplatnění v praxi**

v anglickém jazyce:

### **Formability tests and their use in engineering practice**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o zpracování literární studie zkoušek tvařitelnosti se zaměřením na zkoušky technologické.

Cíle bakalářské práce:

Aktuální literární studie se zaměřením na zjišťování tvařitelnosti materiálů s vyhodnocením jejich výhod a nevýhod a s příklady použití.

Seznam odborné literatury:

1. DRASTÍK, F., ELFMARK, J. Plastomery a tvařitelnost kovů. Praha: SNTL, 1977. 392 s. DT 539.214.07.
2. DVOŘÁK, Milan, GAJDOŠ, František, NOVOTNÝ, Karel. Technologie tváření: plošné a objemové tváření. 2. vyd. Brno: CERM, 2007. 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.
3. PRIMUS, F. Tvařitelnost hlubokotažných plechů. Strojírenství. 1976, roč. 26, č. 8, s. 472-484.
4. FOREJT, Milan. Teorie tváření a nástroje. 1. vyd. Nakladatelství VUT v Brně. Brno: Rekrorát Vysokého učení technického v Brně, 1991. 187 s. Edit.. ISBN 80-214-0294-6.
5. SAMEK, Radko. Analýza mezního stavu plastičnosti a technologické tvařitelnosti. 1. vyd. Brno: VA, 1988. 88 s.
6. MARCINIAK, Zdzislaw. Teorie tváření plechů. Vše Vlad Jandura. 1. vyd. Praha: SNTL, 1964. 260 s. DT 621.777.001.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Kamil Podaný, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

OŠŤÁDAL Josef : Zkoušky tvařitelnosti a jejich uplatnění v praxi

---

Bakalářská práce obsahuje stručný přehled zkoušek tvařitelnosti a to jak základních, tak i některých vybraných technologických. Vysvětleny jsou základní principy, použitelnost, způsoby vyhodnocování a případné využití v praxi.

Klíčová slova : tvařitelnost, limitní diagramy, zkoušky

## **ABSTRACT**

OŠŤÁDAL Josef : Formability tests and their use in engineering practice

---

Bachelor thesis provides a brief overview of tests and formability of both primary and some of the selected technology. Explained the basic principles, usability, and possible ways of evaluation use in practice.

Keywords: formability, limit diagrams, test

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

OŠŤÁDAL J. *Zkoušky tvařitelnosti a jejich uplatnění v praxi*. Brno, 2011. 34 s. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Kamil Podaný, Ph.D.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně,  
s využitím literatury a zdrojů uvedených v seznamu přiloženém k této práci.

V Brně dne 27.5.2011

.....  
**Josef Ošťádal**

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji panu Ing. Kamilu Podanému, Ph.D. za cenné rady a připomínky týkající se zpracování bakalářské práce.

# OBSAH

**Titulní list**

**Zadání**

**Bibliografická citace**

**Čestné prohlášení**

**Poděkování**

**Obsah**

**1 ÚVOD** 10.

**2 ZKOUŠKY TVAŘITELNOSTI A VYHODNOCOVÁNÍ** 11.

## **2.1 Základní zkoušky**

2.1.1 Tahová zkouška 13.

2.1.2 Pěchovací zkouška 15.

2.1.3 Zkouška ohybem 16.

2.1.4 Zkouška krutem 17.

## **2.2 Technologické zkoušky**

2.2.1 Zkoušky plechů a pásů 19.

2.2.2 Zkoušky drátů 24.

2.2.3 Zkoušky trubek 25.

**3 ZÁVĚR** 27.

**Seznam použitých zdrojů**

**Seznam použitých symbolů a zkratk**

**Seznam příloh**

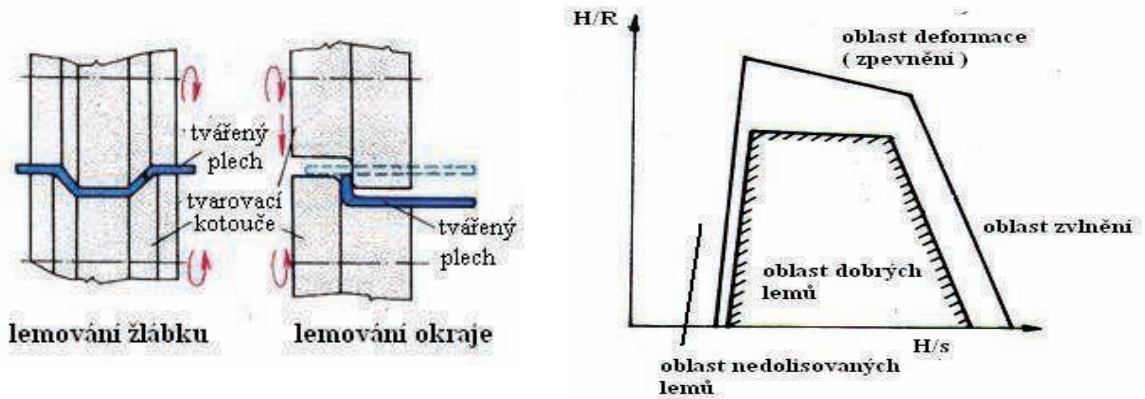


# 1 ÚVOD

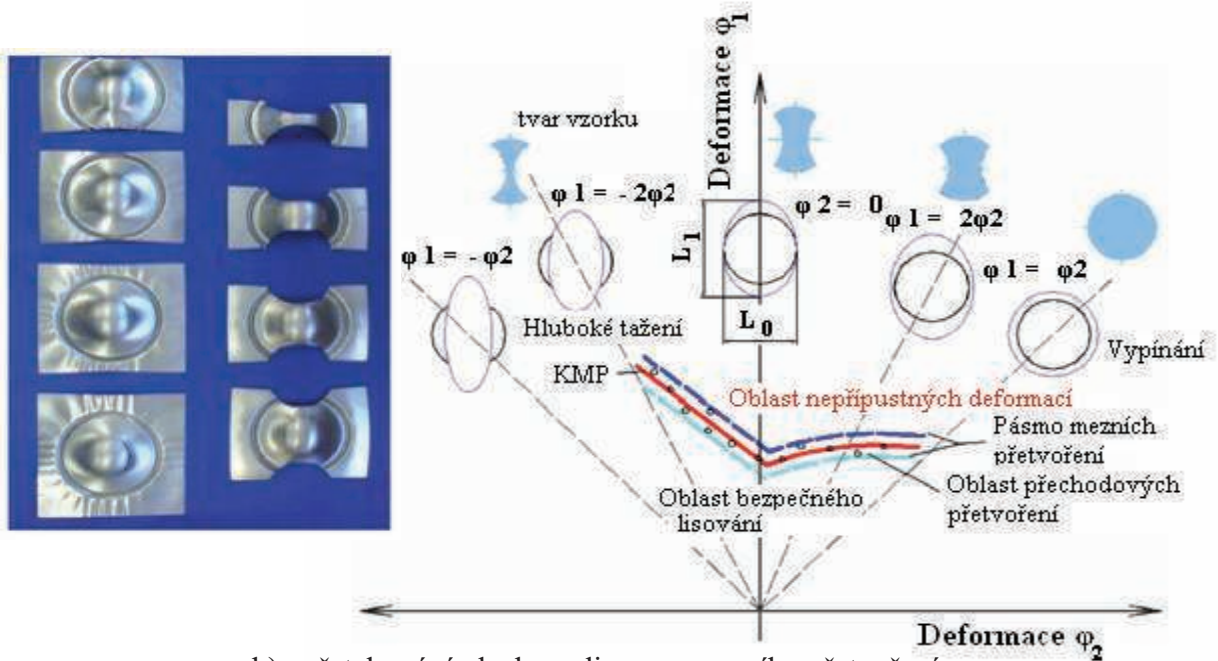
Ve strojírenském průmyslu je důležitá kvalita a produktivita v souladu s výrobními náklady. Proto byla vyvinuta celá řada zkoušek, které mají buď zkoumat nebo napodobovat možné stavy materiálu, předcházet vadám nebo optimalizovat výrobu. Výstupem těchto zkoušek jsou diagramy sloužící k vyhodnocování parametrů. Příklady diagramů jsou uvedeny na obr.1.

Spektrum zkoušek je široké z důvodu využití mnoha metod při výrobě dílů. Jednou z technologií je tváření. Tento technologický proces lze rozdělit dle několika parametrů (teploty, tepelného efektu, stupně dosažené deformace nebo působení vnějších sil). Nejdůležitějšími charakteristikami jsou působení vnějších sil a teplota. Je možnou variantou působení sil ve dvou nebo třech osách souřadného systému, přičemž zatížení ve dvou osách je nazýváno plošné tváření a silový účinek ve třech osách objemové tváření. Při rozdělení podle teploty je důležité pásmo rekrytalizačních teplot. Vzhledem k tomu je využíváno tvářecích procesů probíhajících za ohřevu, poloohřevu nebo za studena.

Danou technologii lze najít například v leteckém či automobilovém průmyslu a dalších oblastech, kde je třeba dílů s určitými specifickými vlastnosti. Proto se jedná o skloubení nauky o materiálech, technologie výroby a konstrukce.



a) lemování součásti a Woodův diagram



b) přetahování plechu a diagram mezního přetvoření

Obr.1 Příklady limitních diagramů [ 4,6,8,13 ]

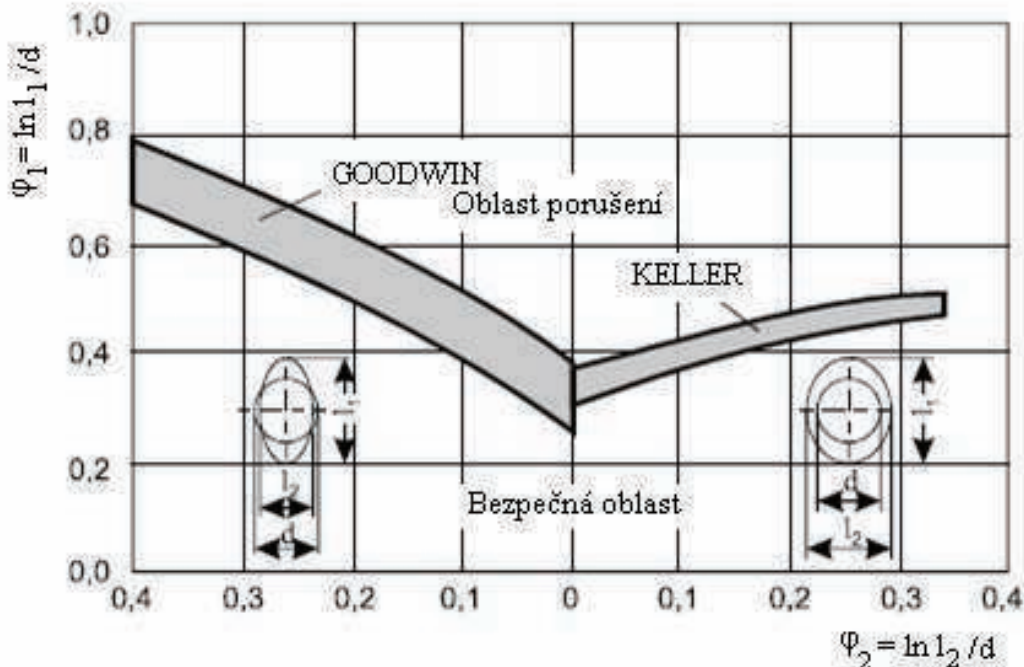
## 2 ZKOUŠKY TVAŘITELNOSTI A JEJICH VYHODNOCOVÁNÍ

Tváření je technologický proces, při kterém dochází ke změně tvaru součásti působením vnějších sil bez odběru třísky. Tento děj probíhá za vzniku plastických deformací a dochází k ovlivnění mechanických vlastností materiálu. Při probíhající deformaci vzrůstá odpor materiálu tzv. přetvárný odpor. Další vliv na tvařitelnost mají charakteristika materiálu (struktura materiálu, teplota, chemické složení atp.) a technologické podmínky (nástroj, tření, mazání, atp.).

U tvářecích procesů vystupují základní druhy namáhání (viz. příloha) a jejich kombinace. Každé z těchto namáhání klade určité nároky na materiálové charakteristiky (mez kluzu, mez pevnosti, aj.). Proto byly vyvinuty zkoušky, které napodobují reálné zatížení součásti a udávají charakteristiky materiálu. Dále se zaměřují na analýzu výrobků a vyhodnocování jejich parametrů, slouží ke kontrole, výzkumné činnosti nebo prověření technologie výroby. Základem bývají buď zkušební kus nebo vzorek, který je podroben zvolené zkoušce.

Rozdělovány jsou podle charakteru silového působení na statické či dynamické, dle teploty materiálu při zkoušce nebo podle typu na základní, technologické a speciální. Jejich postupy, průběh, podmínky a další podobné věci jsou předepsány v normách. Výstupem jsou diagramy (viz obr.2), nebo mohou být reprodukovány jiným způsobem.

Tyto získané hodnoty bývají ohraničeny mezemi, které zajišťují správnou funkčnost součásti a pro jejich popis se využívá kriterií nebo ukazatelů. Kritéria zjišťujeme zkouškami jednoduchými a speciálními, ukazatele technologickými a jednoduchými. Bezpečnost výrobků jako taková se odvíjí od mnoha různých faktorů. Například ocelová lana výtahu a střižné čepy mají odlišné hodnoty.



Obr.2 Schéma Keller - Goodwinova diagramu [19]

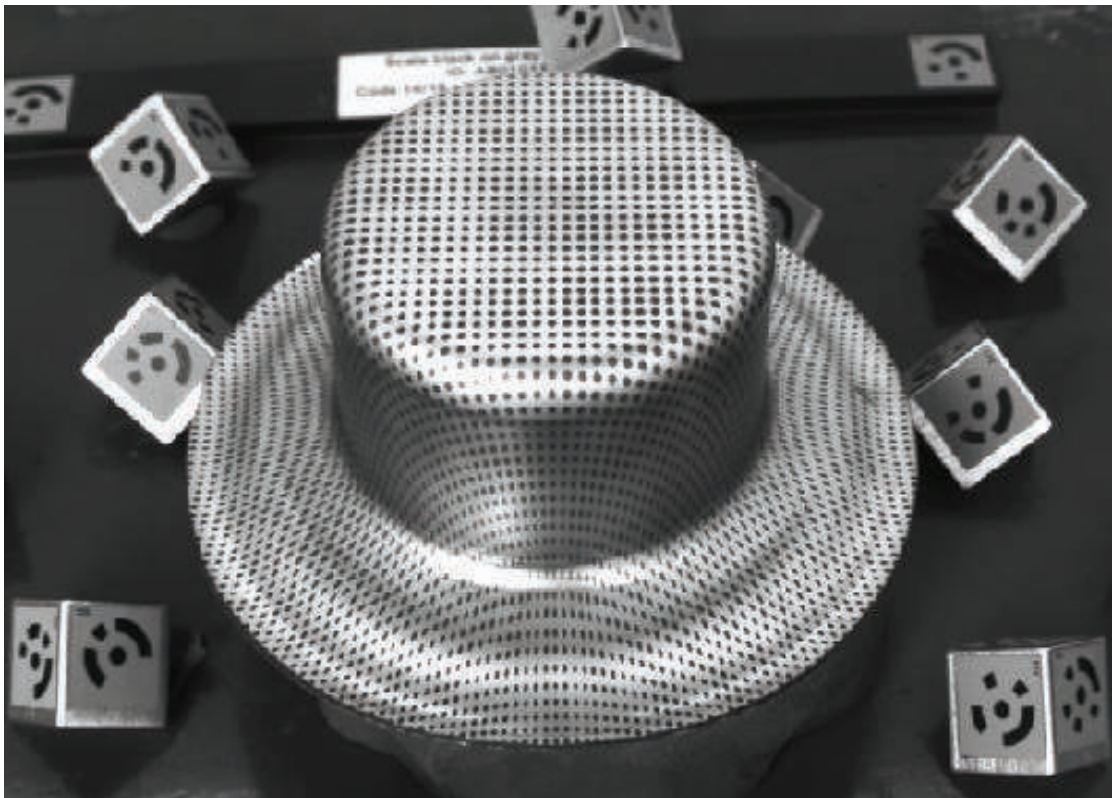
Při konstrukci diagramů je snahou matematicky popsat daný proces, což je někdy velmi složité. Proto se využívá experimentální metodika a jako výstup slouží tzv. Limitní diagramy

(příklad viz. obr.3) , jimiž se popisuje deformace a napjatost ve vzorku. Vychází se z rovnic, kterými lze dané procesy popsat.

Jsou to rovnice rovnováhy sil, rovnice kontinuity toku (geometrické, kompatibility, zákon o zachování objemu), podmínky plasticity, konstitutivní rovnice a okrajové podmínky (statické, geometrické, speciální). Tyto diagramy rozdělují experimentální hodnoty na oblasti odpovídající porušení nebo bezpečné.

U experimentální metodiky je využíváno metodiky sítě, kdy se na plech nanese síť (př. viz obr.3). Nanášení je prováděno různými způsoby například mechanicky nebo elektrochemicky. U této sítě je po provedení operace vyhodnocována deformace jednotlivých elementů (nejčastěji kruhových). A to takových, které jsou blízké elementům na kterých došlo k výskytu krčku nebo porušení.

Tyto experimentální výsledky jsou považovány za poruchové, ostatní jako bezpečné a vynášejí se do limitních diagramů. Nejpoužívanějším typem je Keller – Goodwinův diagram, u kterého se jednotlivé stavy napjatosti vyjadřují poměrem a předpokladem je, že se jedná o prosté zatěžování. Dalšími základními jsou diagramy mezní deformace, mezní plasticity a procesní mapy.



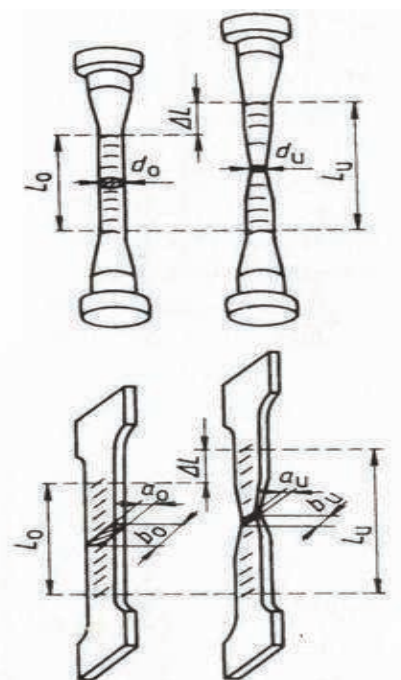
Obr.3 Příklad počítačového snímání sítě na tvářené součásti [20]

## 2.1 Základní zkoušky

### 2.1.1 Zkouška tahová

Jedná se o jednu z nejzákladnějších zkoušek. Principem je zjišťování závislosti síly na prodloužení. Průběh zkoušky spočívá v pozorování chování vzorku (obr.4) o počátečním průřezu  $S_0$  a délce  $L_0$ . Tento podléhá zatížení plynule se měnící síly  $F$ , čímž dochází k deformaci až do přetržení kusu. V důsledku toho silového působení vzniká v materiálu napětí, které je charakterizováno základním vztahem popisujícím závislost síly a deformace. Tento vztah se nazývá Hookův zákon a jeho tvar je uveden ve vzorečku 1.

Při průběhu zkoušky dochází k zaznamenávání veličin do grafu. Z nichž lze vyčíst důležité charakteristiky daného materiálu, jako jsou mez pevnosti, mez kluzu, tažnost a kontrakce atd.



(1) Obr.4 Tvar vzorků [27]

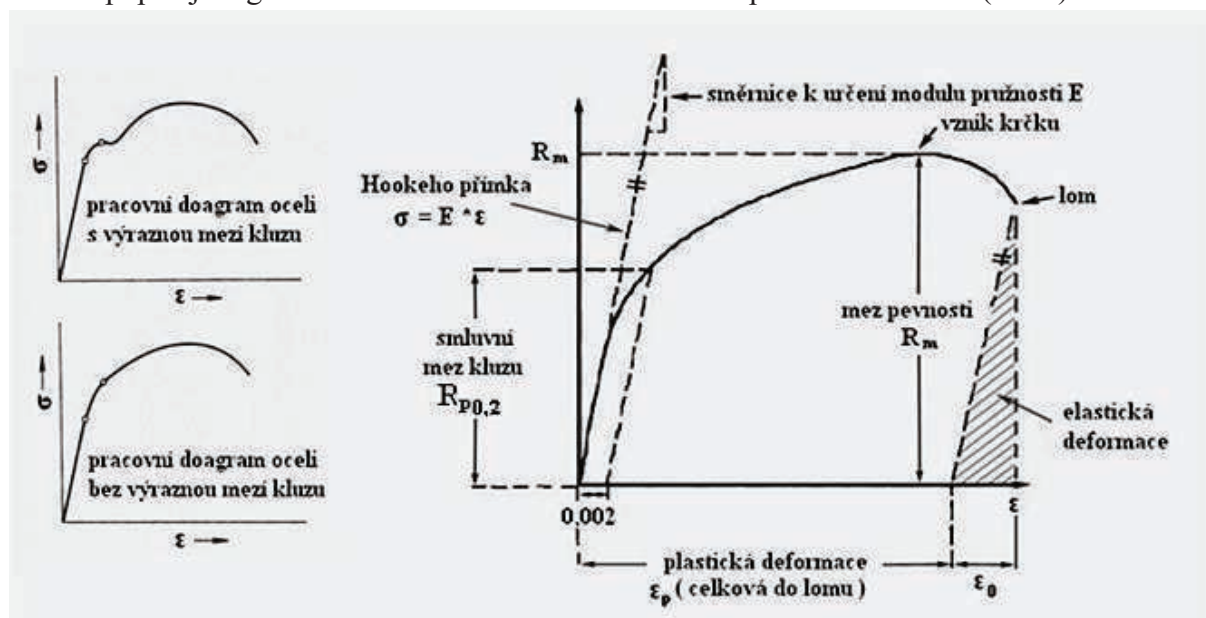
$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$\sigma$  - napětí

$E$  – modul pružnosti v tahu (Youngův modul)

$\varepsilon$  – poměrné prodloužení

Vzorec popisuje v grafu znázorněnou lineární závislost napětí na deformaci (obr.4).



Obr. 5 Srovnání tahových diagramů s výraznou a nevýraznou mezí kluzu [ 27 ]

Tahový diagram na obr.5 je rozdělen na pásma elastické a plastické deformace. Dalším důležitým rozdílem mezi jednotlivými materiály je mez kluzu. Zkoušený vzorek může mít buď výraznou, nebo nevýraznou mez. U diagramů s nevýraznou mezí kluzu používáme tzv. smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$ . Této mezi odpovídá 0,2 % trvalého prodloužení a určuje se buď graficky, nebo průtahoměry.

Při průběhu této zkoušky působí na vzorek napětí. Skutečné napětí  $\sigma$  je vztaženo na plochu v daný okamžik zkoušky. Ovšem také je zaváděn se pojem Smluvní napětí  $\sigma_0$ , které se vyjadřuje pomocí počátečního průřezu. Výpočet  $\sigma$  je uveden ve vztahu 2 a vztah pro  $\sigma_0$  je analogický.

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (2)$$

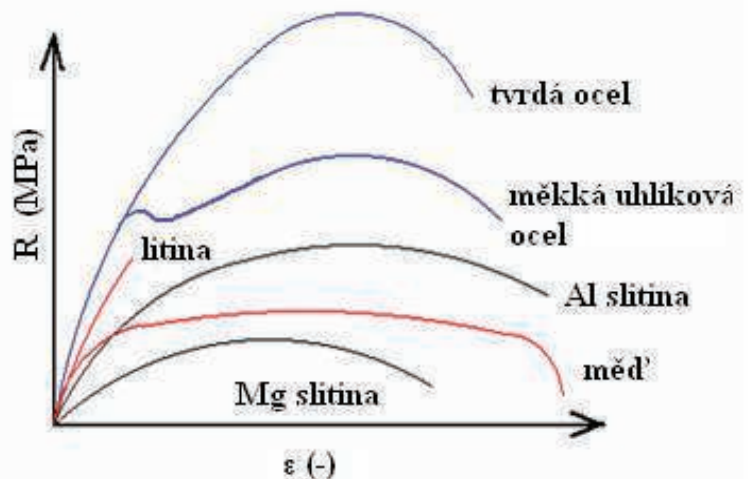
F – zatěžující síla

S – plocha průřezu v daný okamžik zkoušky

Dalšími důležitými informacemi, se kterými u této zkoušky pracujeme jsou pevnost v tahu, poměrné prodloužení, tažnost a kontrakce. Pevnost v tahu je hodnota napětí, které odpovídá největšímu zatížení. Vypočítá se jako podíl maximální zatěžující síly  $F_{max}$  (do přetržení) a původního průřezu  $S_0$ , jak je uvedeno ve vztahu 3

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} \quad [ \text{MPa} ] \quad (3)$$

Poměrné prodloužení vyjádříme ze změny délky  $\Delta L$  ku původní délce  $L_0$ . Tažnost je poměrné prodloužení v procentech vztažených na původní délku. Kontrakce porovnává změnu průřezu  $\Delta S$  ku průřezu původnímu  $S_0$  a vyjadřuje se v procentech. Mez kluzu je bod, kde prodloužení nastává při nerostoucí nebo klesající síle a vypočte se jako podíl síly na mezi kluzu  $F_e$  ku původnímu průřezu  $S_0$ . Odlišné materiály mají různé diagramy (obr.6). Toto ovlivňuje především krystalografie jednotlivých materiálů.

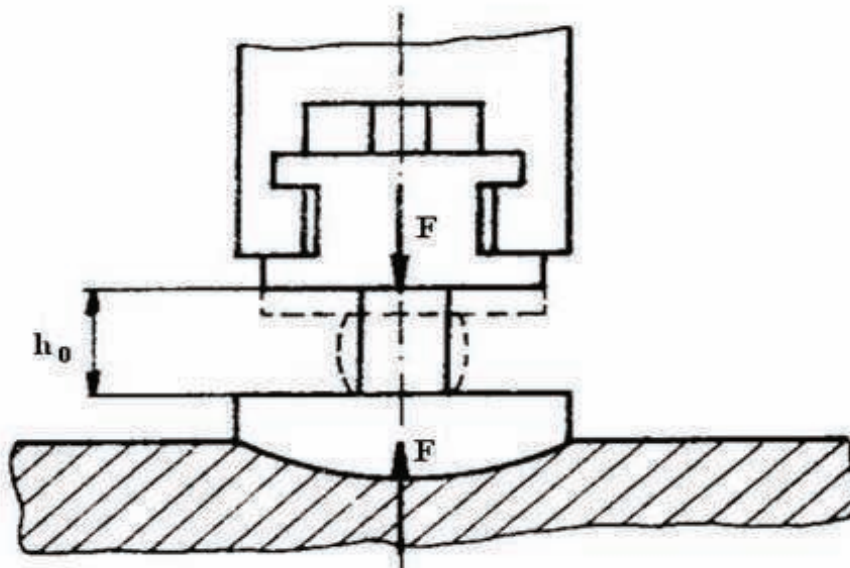


Obr. 6 Příklady diagramů pro různé materiály [8]

Tato zkouška je jednoduchá, rychlá a průkazná, proto patří mezi nejpoužívanější. Typickým příkladem součástí namáhaných na tah jsou různá táhla, přesné šrouby, lana, atp.

### 2.1.2 Zkouška pěchovací (tlakem)

Postup zkoušky je takový, že vzorek je namáhán na tlak až do vzniku prvních trhlin. Při zatížení dochází ke změně tvaru (snížení výšky a nárůstu šířky) tzv. soudečkovitosti (obr 9.). Důležitým poznatkem je, že deformace působí nerovnoměrně a v některých případech by mohlo dojít ke ztrátě vzpěrné stability. Tomu lze zamezit větším počtem operací. Vzorky vyrobené z kovu mají tvar válečku, kde se jeho výška pohybuje v řádu 1,5÷2,5 násobku šířky. Polotovary z jiných materiálů mají tvar krychle (beton, aj.). U houževnatých materiálů dochází k deformaci a je možné zkonstruovat tlakový diagram obdobný jako pro zkoušku tahem. U křehkých materiálů dochází k porušení náhle. Zjišťovanými veličinami jsou poměrné zkrácení, rozšíření, mez kluzu v tlaku a mez pevnosti v tlaku. Například litina má několikanásobně vyšší odolnost v tlaku, než v tahu.



Obr. 7 Schéma zkoušky pěchováním [26]

Pevnost v tlaku je podíl maximální síly ku ploše průřezu vzorku.

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

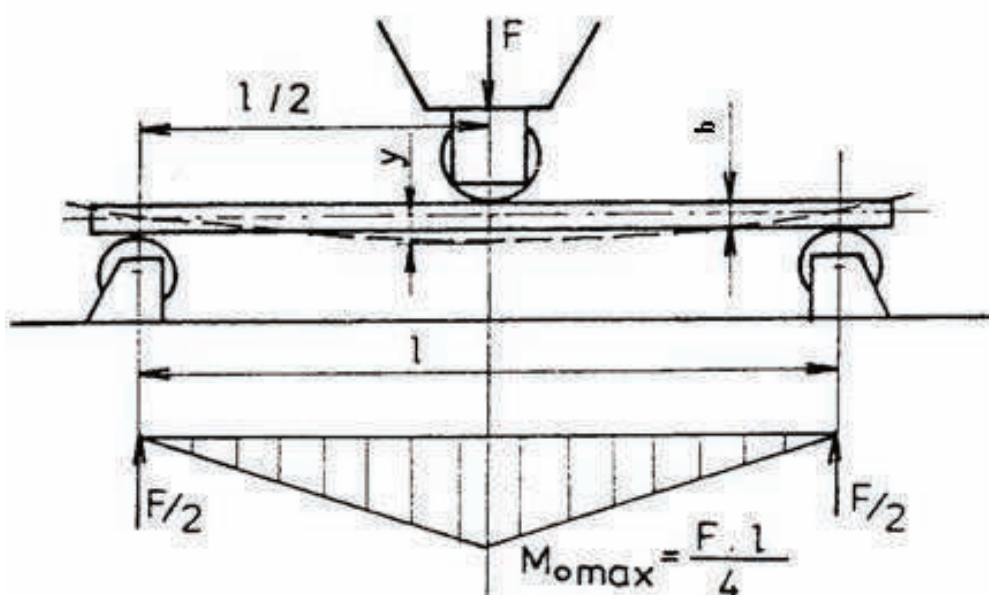
Poměrné stlačení se vyjádří jako změna konečné výšky ku původní v procentech.

$$A_t = \frac{h_0 - h}{h_0} \times 100 \quad [ \% ] \quad (5)$$

Dalšími veličinami jsou mez kluzu v tlaku, což je závislost síly na mezi kluzu a plochy a poměrné rozšíření, které je vyjadřováno poměrem průřezu konečného ku původnímu v procentech. Tato zkouška ukazuje především vhodnost pro strojní kování. Proto je také poměrně často využívána.

### 2.1.3 Zkouška ohybem

Tato zkouška patří mezi statické destruktivní, jejím cílem je stanovit průhyb  $y_{\max}$  daného materiálu. Principem zkoušky je, že zkušební kus je položen na podporách a působí na něj ohybová síla (viz obr.8). Tato síla působí deformaci, kterou analyzujeme až do porušení materiálu. Zkouška má význam jsk u materiálů křehkých (dochází u nich k lomu), tak i tvárných. U tvárných materiálů se používá jako zkouška technologická, kterou zjišťujeme charakteristiky materiálu při ohybu (viz obr.9) Někdy se využívá i případného dolisování ohnutých konců, které má za následek zvětšení napětí v materiálu (zvětší se tím poloměr ohybu). Speciálními případy této zkoušky jsou vzorky s vruby. Vruby mohou mít různé tvary a výrazně ovlivňují výsledné hodnoty, protože je narušena celistvost materiálu a změní se průběh napětí v součásti.



Obr.8 Schéma zkoušky ohybem a znázornění ohybového momentu [7]

Při této zkoušce se vyhodnocují veličiny jako Pevnost v ohybu, což je napětí které je ještě schopen materiál vydržet a vypočítá se ze vztahu 6. Další důležitou charakteristikou této zkoušky je maximální ohybový moment, který je vyjádřen ze vztahu 7 :

$$R_{mo} = \frac{M_{o \max}}{W_o} \quad [\text{MPa}] \quad (6)$$

$W_o$  - průřezový modul v ohybu

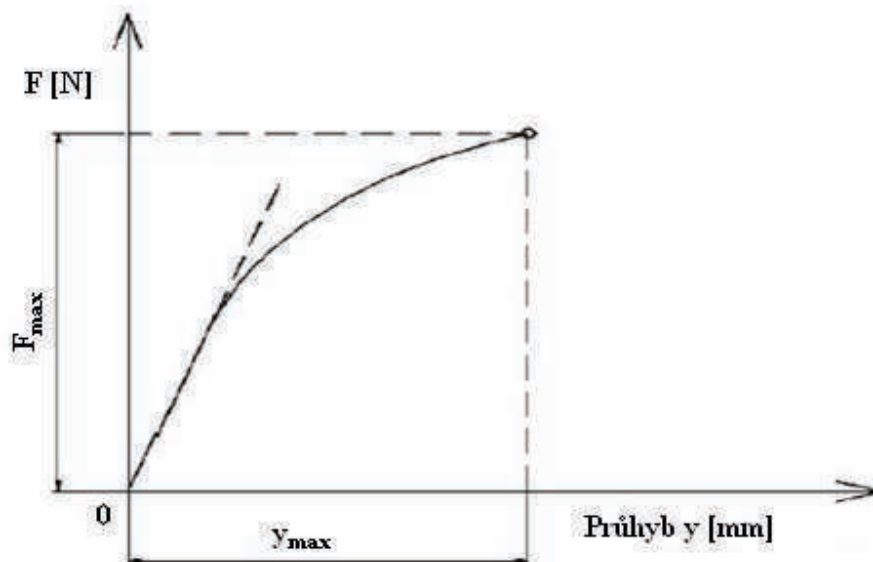
$M_{o \max}$  – maximální ohybový moment

$$M_{o \max} = \frac{F_{\max} \times l}{4} \quad [\text{N} \times \text{m}^{-1}] \quad (7)$$

$F_{\max}$  - maximální ohybová síla

$l$  - vzdálenost podpor

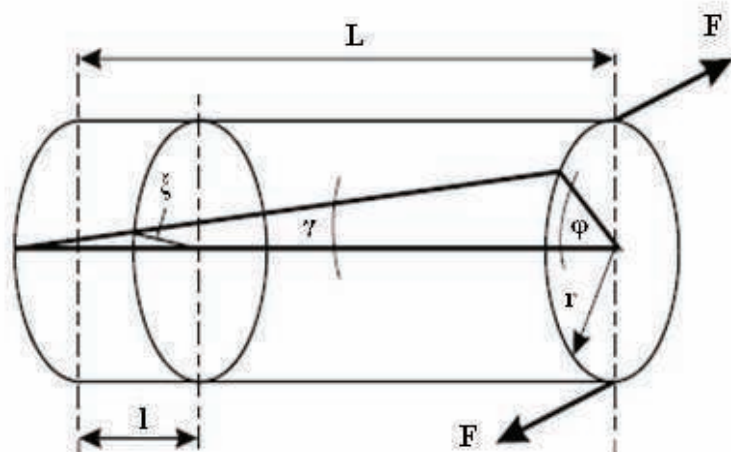
Průběhy normálových, tečných sil a ohybových momentů se zakreslují do diagramů jak je vidět na obr.8. Z těchto veličin lze pak dopočítat samotný průhyb a natočení.



Obr.9 Diagram závislosti zatěžující síly na průhybu [7]

#### 2.1.4 Zkouška krutem

Zkouška se provádí tak, že jeden konec analyzovaného vzorku je nepohyblivě upnut a druhý konec je zatěžován kroutícím momentem o určité velikosti (obr.10). Konečným bodem je vznik porušení ke kterému dojde při překročení maximálního napětí v krutu. Při této zkoušce je využíváno vzorků kruhových průřezů, avšak lze testovat i různé jiné typy průřezů. Cílem je stanovení úhlu zkroucení za působení určitého kroutícího momentu na daný materiál (počet otáček). Definice kroutícího momentu je popsána vztahem 8. Závislost kroutícího momentu na deformaci může být zaznamenána do grafu, jak je možné vidět na obr.11. Dalšími důležitými veličinami jsou velikost síly působící silové dvojice a úhel zkroucení.



Obr.10 Schéma zkoušky krutem [19]

$$M_k = F \times l \quad [\text{N} \times \text{m}] \quad (8)$$

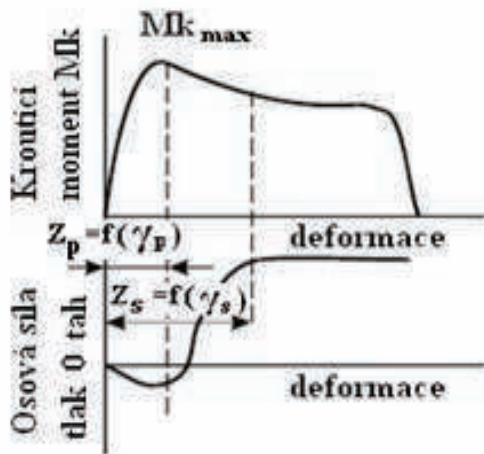
F - síla

l – rameno (v našem případě je tímto ramenem poloměr zkušební tyče)

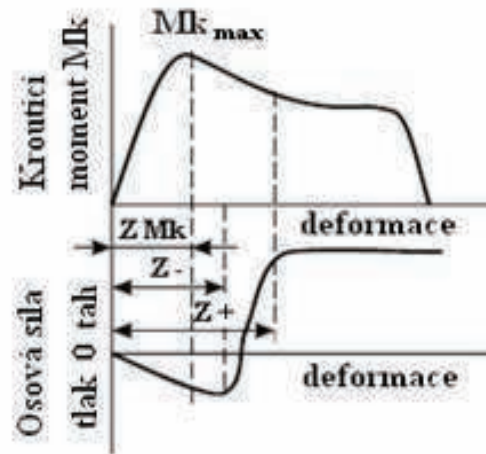
Ze známých údajů lze získat další informace. Například maximálním napětím v krutu, poměrné zkroucení nebo zkos. Maximální napětí v krutu je podíl maximálního zatěžujícího momentu  $M_{kmax}$  a průřezové charakteristiky  $W_k$  v krutu. Zkouška v krutu příliš využívána není, avšak využívá se například k simulaci zatížení hřídelů a atd.

$$R_{mk} = \frac{M_{kmax}}{W_k} \quad [\text{MPa}] \quad (9)$$





a) Ocel s vysokou tvařitelností



b) Ocel s nízkou tvařitelností

Obr.11 Diagram závislosti kroucího momentu a deformace [19]

Pro základní zkoušky je využíváno speciálních strojů, které většinou slouží pouze pro daný účel. Příklady zařízení sloužících pro zkoušku ohybem a tahem jsou uvedeny na obr.12.



a) stroj pro zkoušku ohybem



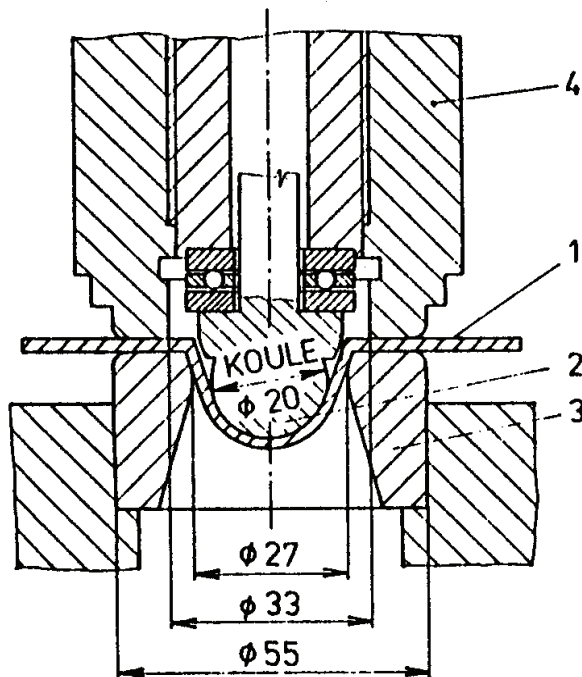
b) stroj pro zkoušku tahem

Obr.12 stroje používané při základních zkouškách [11,16]

## 2.2 Technologické zkoušky

### 2.2.1 Zkoušky plechů a pásů

- Zkouška hloubením dle Erichsena

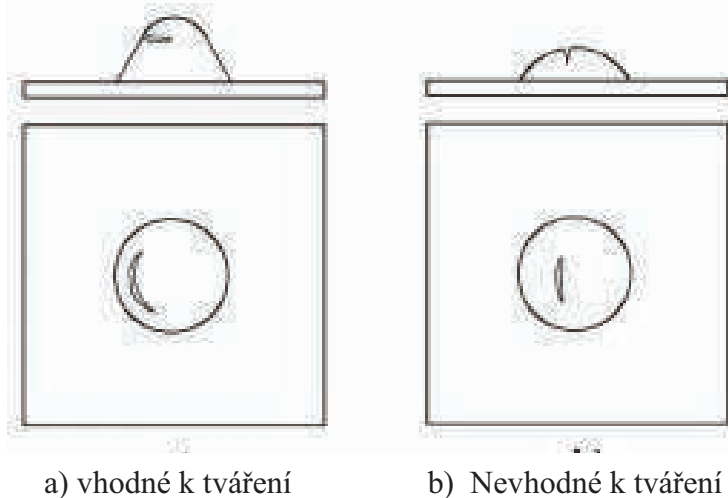


Obr.13 Schéma zkoušky hloubení dle Erichsena [29]

(u nehomogenních materiálů není příliš kvalitně dodržen tvar vtisku). Rychlost plynulého vtlačování kuličky nezmění hodnotu prohloubení. V praxi je zkouška hloubením velmi oblíbená především pro svou rychlost a hospodárnost, ale také je velmi průkazná. Jako příklad z praxe lze uvést výrobu hrnců a jiných dutých součástí. Dalšími variantami jsou zkouška kalíškovací, hloubením-hydraulická nebo kombinovaná kalíškovací-hloubením

Při této zkoušce je cílem zjistit schopnost plechu deformovat se do určitého tvaru pomocí plastické deformace. Měří se hloubka vtisku do iniciace prvních trhlin. Zkouška se provádí tak (obr.13), že do rovinného plechu upnutého přidržovačem (jinak by mohlo dojít ke zvlnění) se vtlačuje tažník (leštěná ocelová kulička o průměru 20mm).

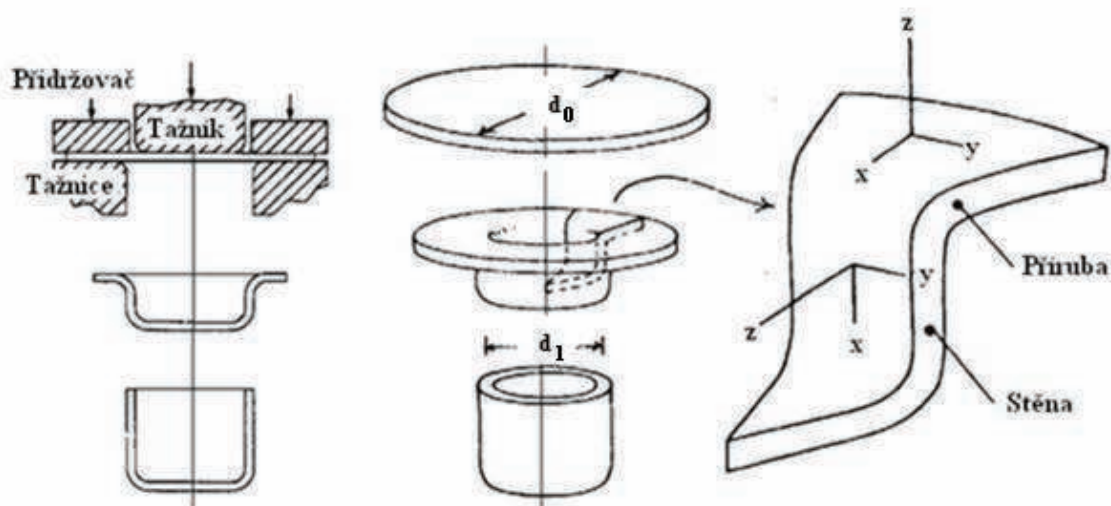
Při posuzování vhodnosti plechů k tažení se nevyhodnocuje pouze prohloubení (mm), ale také se sleduje průběh šíření trhliny(obr.14). Tvar a umístění trhlin má vliv na vyhodnocení zkoušky. Dále záleží také na tom, zda je materiál homogenní či nikoliv



Obr.14 Typy trhlin při zkoušce hloubením [9]

➤ Zkouška kalíškovací

Tato zkouška slouží k analýze vhodnosti pro hluboké tažení. Při této zatěžování je nutno použít přidržovače a samotná součást se dělí na dvě základní části (obr.15). První nazýváme příruba, což je část materiálu upnutá přidržovačem. Druhou částí je stěna, přes kterou prochází síla a v důsledku jejího působení dochází ke ztenčování průřezu. Proot se zde setkáváme s tzv. součinitelem tažení  $m$ , nebo též stupněm tažení  $K$ , což je obrácená hodnota  $m$  jak je uvedeno ve vztahu .

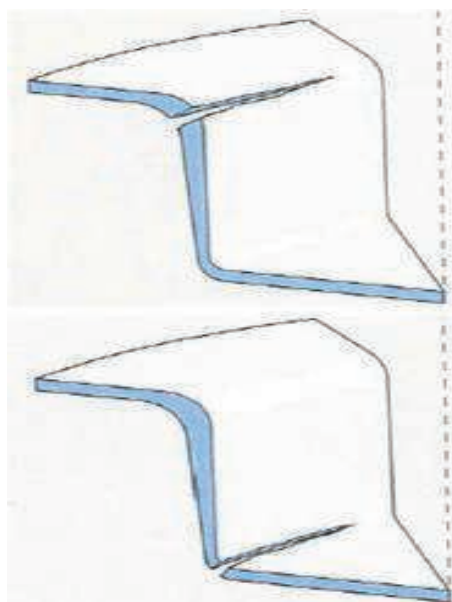


Obr.15 Schéma průběhu kalíškovací zkoušky a tvar výtažku [15]

$$K = 1/m = \frac{d_0}{d_1} \quad (10)$$

$d_0$  - průměr plechu před tažením  
 $d_1$  - průměr výtažku

V případech velkého poměru průměrů výchzího a konečného výrobku je třeba přenést stěnou velkou sílu, což vede k plastické deformaci stěny a může dojít k prasknutí (obr.16). Právě nutnost přenášet velké síly ovlivňuje přírubovou část, na které by došlo ke zvlnění.

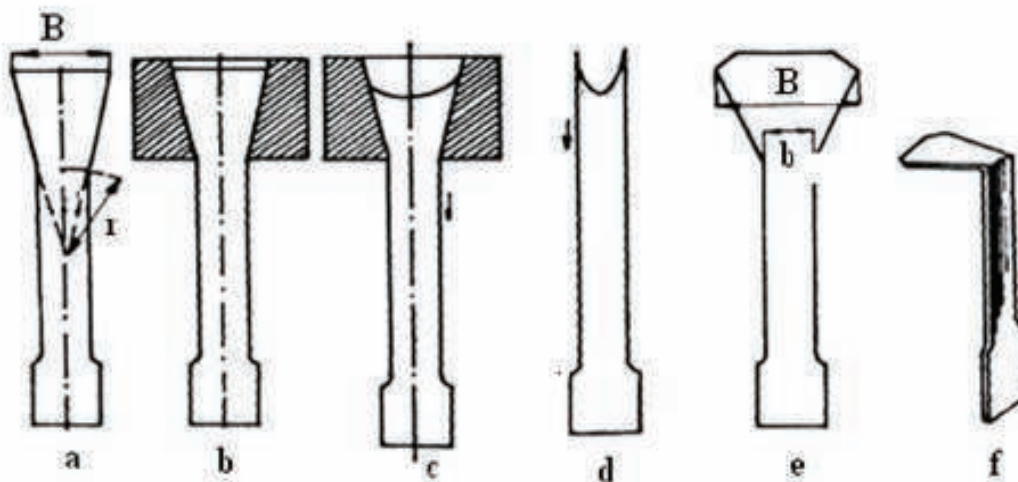


Obr.16 Příklady vad [23]

➤ Zkouška tahová klínová

Hlavním úkolem této tahové klínové zkoušky je simulovat chování příruby kalíšku při hlubokém tažení (obr.17). Vzorek je vyroben z plechu a je protahován kuželovým otvorem. Tvar vzorků je různý, záleží na tom, o jaký typ se jedná. Příkladem může být vzorek u zkoušek dle Sachse (obr.17a), Kayselera (obr.17e) nebo konečné ohnutí vzorku u Ohlera (obr.17f).

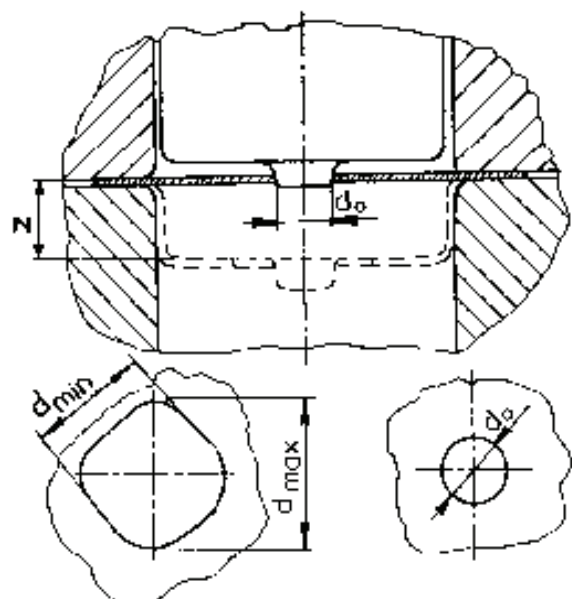
Vyhodnocován je poměr šířek (největší ku nejmenší), který je ukazatelem hlubokotažnosti. Obměnou této zkoušky lze zjistit náchylnost tenkého plechu ke zhrubnutí zrna. Tato zkouška je speciální a proto se příliš nevyužívá.



Obr.17 Princip klínové zkoušky a tvar vzorku [19]

➤ Zkouška rozšiřováním otvoru

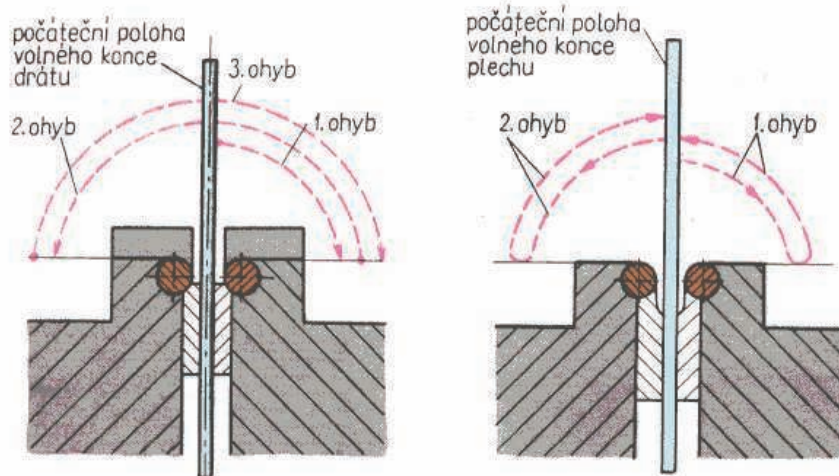
Postup zkoušky je takový, že vzorek upnutý přídržovačem a opatřený kruhovým otvorem je vytahován tažníkem (obr.18). Vyhodnocuje se hloubka tahu, rozšíření a plošná anizotropie. Hlavním ukazatelem bývá veličina vypočtená z poměru konečných hodnot popisujících změnu tvaru otvoru. Tato zkouška není v praxi příliš využívána.



Obr.18 Schéma rozšiřování otvoru [32]

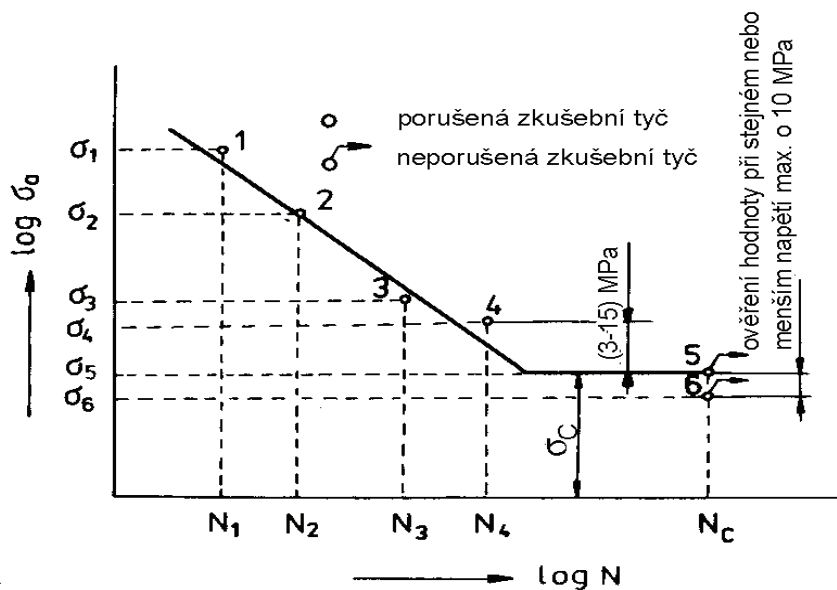
➤ Zkouška střídavým ohýbáním

Provádí se jak u drátů, tak i u pásů z plechu a řadí se mezi destruktivní zkoušky. Obě tyto alternativy mají podobný průběh. Principem je, že vzorek je pevně upnut a cyklicky namáhán až do prasknutí. Za první ohyb považujeme i prvotní o  $90^\circ$  z výchozí polohy (obr.19). Lom nastává po překročení meze únavy materiálu. Hodnotí se počet úplných ohybů. Při porušení materiálu se již další ohyby neprovádějí, zkouška se ukončí a vyhodnocuje se. Mez únavy je ovlivňována několika činiteli. Především způsobem zatěžování, dále na velikosti součásti, vrubech a též na povrchu.



Obr.19 Schéma zkoušky střídavým ohybem [14]

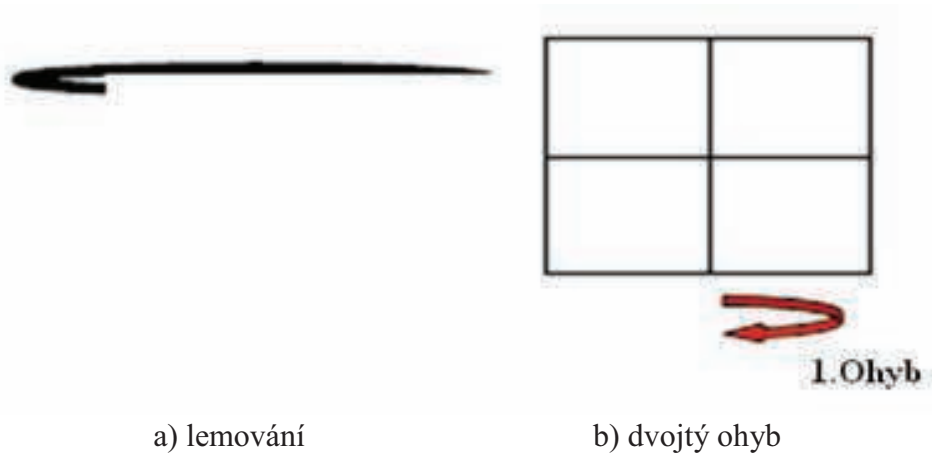
S tímto způsobem zatěžování jsou spjaty Wöhlerova křivka (obr.20) a Smithův diagram. Wöhlerova křivka udává závislost napětí na počtu cyklů a Smithův diagram je mírně složitější a vyhodnocuje amplitudu zátěžných cyklů. Zátěžné cykly napodobují podmínky v praxi a mají různé alternativní tvary. Mohou být trojúhelníkové, obdelníkové, sinusové. Dále také záleží na oblasti v které se tyto hodnoty objevují (tah, tlak,...).



Obr.20 Wöhlerova křivka [30]

➤ Zkoušky lemováním a kapesníčková

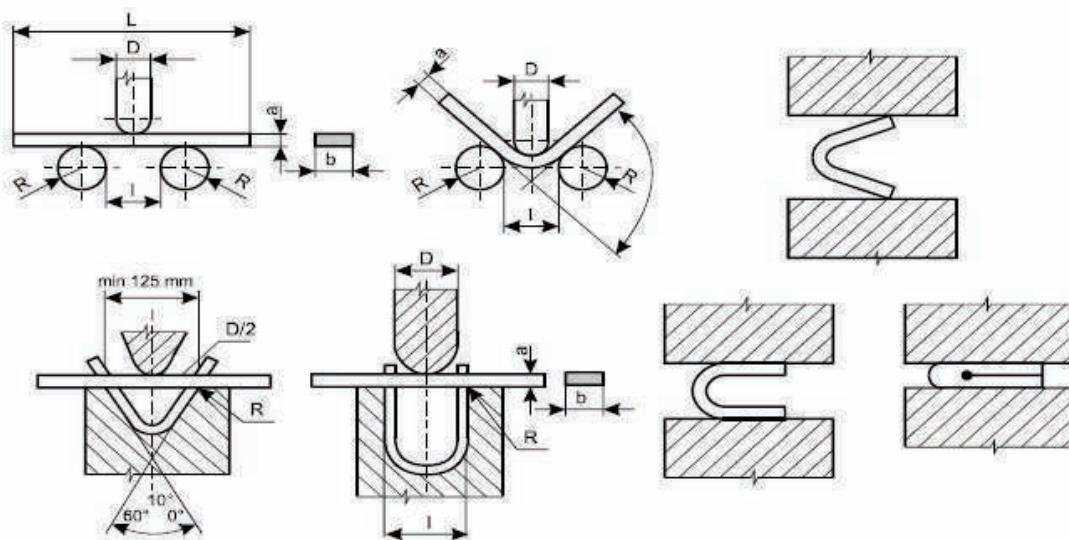
Kapesníčková zkouška je někdy nazývána zkouškou dvojným ohybem. Tyto zkoušky (obr.21) mají princip takový, že u vzorku se simuluje zatížení kterému bude polotovar podléhat při skutečném tváření. U lemovací je vytvořen zkušební lem a při kapesníčkové je plech nadvakrát přehnut. Vyhodnocují se lomy, napětí a struktura materiálu po dokončení těchto operací. Avšak tyto zkoušky nejsou příliš využívány.



Obr.21 Schéma zkoušky lemováním a kapesníčkové [10]

➤ Zkouška lámavosti

Analogie zkoušky ohybem s rozdílem, že se provádí u křehkých materiálů nebo taktéž u svarů a to jak za tepla, tak i za studena. Posuzován je úhel do kterého je materiál schopen se deformovat bez vzniku lomu. Schéma průběhu je uvedeno na obr.22.

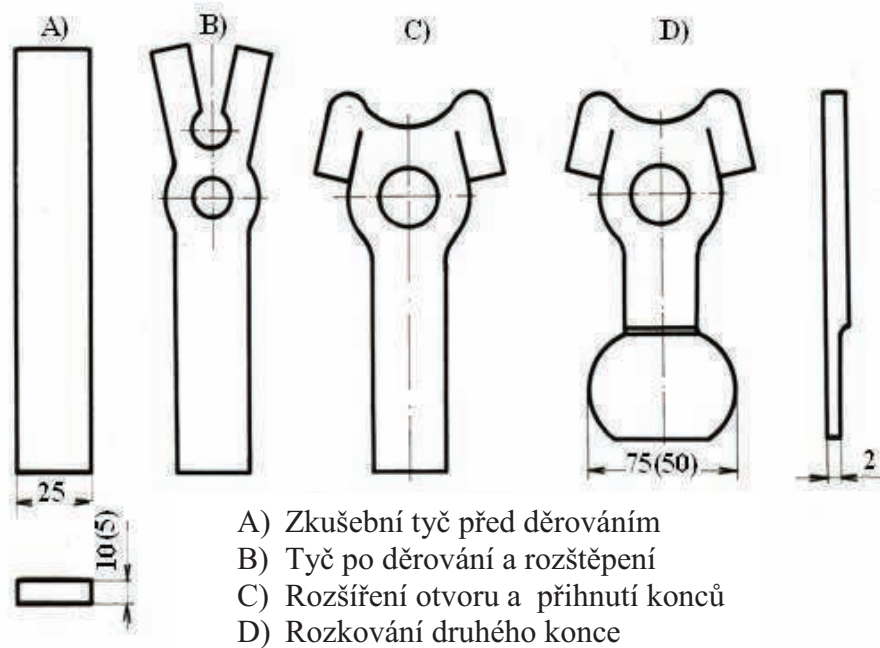


Obr.22 Schéma zkoušky ohybem a její speciální případ zkouška lámavosti [32]

## ➤ Zkouška kovatelnosti

Kování je tváření materiálu za tepla. Samotná zkouška má více částí a zkoumá vhodnost materiálu ke kování (obr. mezi částí této zkoušky patří především děrování, rozštěpení a rozkování). Vzorkem bývá plochá tyč o stanovených rozměrech (šířka 25mm, tloušťka 5-10 mm a délce 200 - 300 mm). Postup je uveden na obrázku.

Jako první je provedeno děrování rozštěpení, následuje rozšíření otvoru a ohnutí konců. Posledním úkonem zkoušky je rozkování konce na tloušťku zhruba 2 mm. Hodnocena deformace, kterých lze dosáhnout do inicializace prvních trhlin. V praxi se příliš nepoužívá především pro svou zdlouhavost.

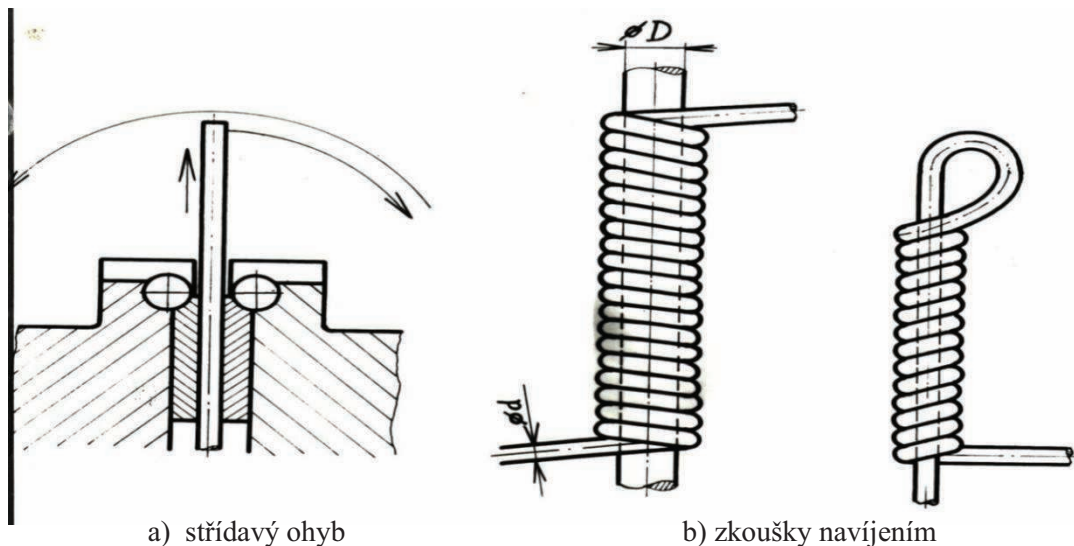


Obr.23 Schéma zkoušky kovatelnosti [14]

### 2.2.2 Zkoušky drátů

U drátů jsou důležité mechanické vlastnosti, proto jsou prováděné zkoušky zaměřené právě na ně. Mezi nejpoužívanější patří zkoušky střídavým ohybem, kroucením nebo navíjením. Jedná se o analogie již dříve zmíněných.

Při střídavém ohýbání je drát upnut do čelistí a dochází k jeho cyklickému namáhání, přičemž je vyhodnocován počet ohybů do porušení materiálu (meze únavy). Dalším typem je zkouška kroucením, která má princip podobný jako u krutu, dále jsou možné i její alternativy, jako například střídavé kroucení. Vyhodnocován je zde počet otáček (úhel zkroucení). Zatěžování drátů navíjením je již poněkud rafinovanější a může být provedeno více způsoby (obr.24). Výstupy bývají závislé na materiálu a především na průměru. V praxi mohou být na dráty kladeny různé nároky. Z drátů je vyráběno například pletivo u kterého není charakteristika drátu příliš důležitá, nebo naopak menší pružiny a porobně, které vyžadují přesný popis materiálu. Proto je zkoušení drátů celkem využíváno.



Obr.24 Schéma zkoušek střídavým ohybem a navíjením [3]

### 2.2.3 Zkoušky trubek

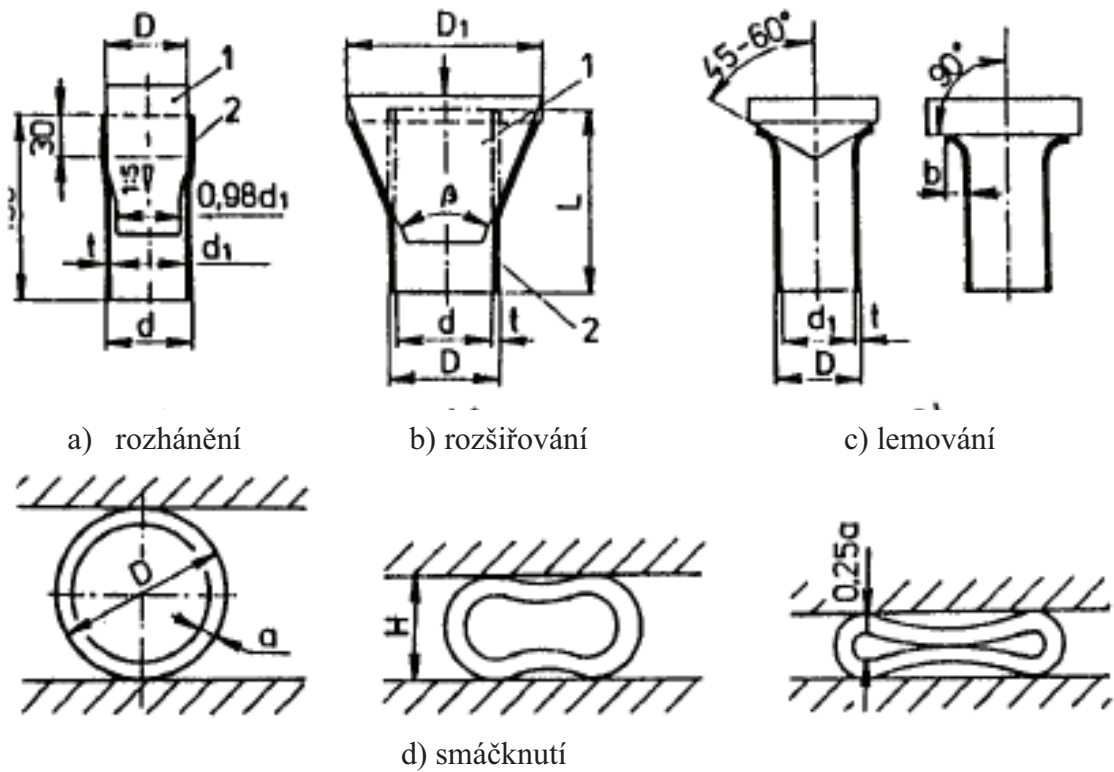
Trubky jsou normalizované duté profily a jsou vyráběny z hutnických polotovarů některou z mnoha metod. Základní rozdělení z hlediska jejich výroby je na švové (svařované) a bezešvé (hladké). Jak již plyne z rozdělení, způsoby výroby jsou svařování, válcování, vytlačování a tažení. V závislosti na jejich využití a bezpečnosti se provádí různé analýzy vlastností. Samotné zkoušení je prováděno lemováním, rozšiřováním, zmáčknutím, ohýbáním, atd.. Důležitá je také schopnost odolávat tlakům. Proto jsou prováděny analýzy vlivu přetlaku na vnitřní, případně i vnější prstenec. Klasickým příkladem využití trubek v praxi je například výroba rámu kola s ohledem na jeho vlastnosti (odolnost rázům, hmotnost, aj.), dalšími příklady mohou být využití v topenářství a vodárenství, atd. Nyní následuje popis některých zmíněných zkoušek trubek.

U zkoušky lemováním je principem vtlačení kuželového trnu o vrcholovém úhlu mezi  $90^\circ$  až  $120^\circ$  a následné dotlačení přítlačnou deskou, kterou se vytvoří příslušný lem. Vyhovující trubky nesmí v průběhu, ani na konci zkoušky jevit známky trhlin. Další následují zkoušky rozháněním a rozšiřováním. Spojuje je analogický postup. Do trubek je vtlačován kuželový trn a tím rozšiřován jejich průměr. V literatuře je uvedeno rozšiřování do vzdálenosti o 30mm od konce trubky a změna vnitřního průměru o 10%. U vyhovujícího vzorku nesmí dojít k tvorbě trhlin případně lomu. V dnešní době je rozšiřování nahrazováno rozháněním. Jako další je využívána zkouška smáčknutím. Při této zkoušce je trubka umístěna do lisu, kde deformována mačkáním a to buď do určité výšky nebo do dosednutí. Opět se vyhodnocují trhliny a lom na místech podléhajících největšímu ohybu.

Trubky bývají někdy podrobeny i ohybu. Avšak u dutých profilů by mohlo dojít k promáčknutí, tomu lze zamezit naplněním trubek pískem. Postup je takový, že se polotovar ohýbá o určitý úhel a nemá dojít k lomu, ani ke vzniku trhlin. Dále mohou být trubky zkoušeny tlakem (na vnitřní prstenec), alternativou s využitím kapaliny a mnoho dalších již úzce specifikovaných. Tyto metody jsou poměrně



využívány především kvůli specifickým požadavkům na trubky. Příkladem mohou být například polotovary na které bývají vyvinuty velké tlaky nebo jsou provozovány v různých chemických prostředích atp.



Obr.25 Schéma některých zkoušek trubek [29]

### 3 ZÁVĚRY

V praxi je zapotřebí mít doloženy garantované vlastnosti součásti (pružnost, pevnost, atd.). Proto je využíváno výše uvedených zkoušek, kterými jsou garantovány specifické vlastnosti materiálu. Z důvodu rozmanitosti technologií tváření musí být různé součásti kontrolovány odlišnými způsoby. Vzhledem k tomuto faktu existuje obrovské množství speciálních zkoušek sloužících například pouze na úzké spektrum nebo jeden typ výrobku.

Proto si firmy většinou pro kontrolu výroby vybírají specializované metrologické laboratoře, které bývají opatřeny kvalitním vybavením, různými certifikáty a také nezbytnými zkušenostmi. Na základě výsledků zkoušek je možné přistupovat k různým změnám, alternativním řešením, atp. Tím pádem většinou lze formou kompromisů dosáhnout optimálních parametrů součásti.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [1]

1. *Citace 2.0 : Generátor citací* [online]. 2004 [cit. 2010-05-29]. Citace.com. Dostupné z WWW: <<http://citace.com>>.
2. Concordia.ca [online]. 2006 [cit. 2011-05-4]. Users.ence.concordia.ca. Dostupné z WWW: <<http://users.ence.concordia.ca/~mmedraj/mech421/lecture%209%20sheet%20metal%20working%202.pdf>>.
3. DRASTÍK,F.; ELFMARK,J.. *Plastomery a tvařitelnost kovů*. Praha: SNTL, 1977. 392 s.
4. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ, Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. 1. vyd. Brno : WELCO, spol. s.r.o., 1996. 169 s.
5. FOREJT,Milan. *Teorie tváření a nástroje*. Brno: VUT v Brně, 1991. 187 s.
6. Forming and Impact Mechanics Research [online]. 2010 [cit. 2011-04-06]. Uwaterloo.ca. Dostupné z WWW: <<http://www.me.uwaterloo.ca/~worswick/Research/alloy.html>>.
7. Home.zcu.cz [online]. 2009 [cit. 2011-04-06]. Statické zkoušky. Dostupné z WWW: <<http://home.zcu.cz/~dyxon/DATA/Nauka%20o%20M/Zkouska.pdf>>..
8. Home.zcu.cz [online]. 2009 [cit. 2011-04-06]. Tváření. Dostupné z WWW: <<http://home.zcu.cz/~mkuzel/public2/PNT2.pdf>>..
9. HRIVŇÁK, A., E. EVIN, E. SPIŇÁK: *Technológia plošného tvarnenia*. Vydání druhé, Bratislava: Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry Alfa, 1990, 264 s. ISBN 80-05-00439-7
10. Chemikalie.upol.cz [online]. 2010 [cit. 2011-04-06]. ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ A JEJICH ZKOUŠENÍ. Dostupné z WWW: <[http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky\\_mat.pdf](http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky_mat.pdf)>.
11. Instron [online]. 2005 [cit. 2011-04-06]. Instron.com. Dostupné z WWW: <<http://www.instron.com/wa/library/StreamFile.aspx?doc=1517>>.
12. Katedra materiálů, Fakulta strojů Liberec [online]. 2008 [cit. 2011-04-06]. Kmt.tul.cz. Dostupné z WWW: <[http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_bakalari/NOM1/Vlastnosti\\_podklady.pdf](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/NOM1/Vlastnosti_podklady.pdf)>.
13. Katedra strojírenské technologie, Fakulta strojů Liberec [online]. 2008 [cit. 2011-04-06]. Ksp.tul.cz. Dostupné z WWW: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud\\_materialy/spt/fld.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/spt/fld.pdf)

14. Katedra technologie obrábění, Fakulta strojní, Západočeská univerzita [online]. 2006 [cit. 2011-05-4]. [Http://ateam.zcu.cz/](http://ateam.zcu.cz/). Dostupné z WWW: <[http://ateam.zcu.cz/zkousky\\_mat.pdf](http://ateam.zcu.cz/zkousky_mat.pdf)>.
15. MARCINIÁK, Zdzislaw. Teorie tváření plechů. Věslav Jandura. 1. vyd. Praha : SNTL, 1964. 260 s.
16. Mecalux logismarket [online]. 2000-2011 [cit. 2011-05-4]. [Http://www.logismarket.cz/](http://www.logismarket.cz/). Dostupné z WWW: <<http://www.logismarket.cz/ip/anamet-trhaci-stroj-stolni-trhacka-tinius-olsen-model-h1k-s-608759-FGR.jpg>>.
17. MOLLIKOVÁ, E., et al. ZKOUŠKA RÁZEM V OHYBU [online]. [s.l.] : [s.n.], [cit. 2011-05-04]. Dostupné z WWW: <<http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/umvi/zk.raz.ohybu.pdf>>.
18. PETRUŽELKA, J. Tvařitelnost a nekonvenční metody ve tváření. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2000, 148 s. ISBN 80 – 7078 - 635 – 3
19. PETRUŽELKA, Jiří a Richard, BŘEZINA. TVAŘITELNOST KOVOVÝCH MATERIÁLŮ [online]. Ostrava : [s.n.], 2001 [cit. 2011-05-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.345.vsb.cz/jiripetruzelka/Texty/TVARITELNOST.pdf>>.
20. PETRUŽELKA, Jiří a Pavel, SONNEK. TVAŘITELNOST KOVOVÝCH MATERIÁLŮ [online]. Ostrava : [s.n.], 2009 [cit. 2011-05-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.345.vsb.cz/jiripetruzelka/TNMTV/TvCELEupr2009prosinec.pdf>>.
21. PRIMUS,F. Tvařitelnost hlubokotažných plechů. [s.l.] : [s.n.], 1976. 472-484 s.
22. SOLFRONK, Pavel aTomáš JÍRA . VYPÍNÁNÍ TVAROVÝCH TĚLES S PROMĚNOU ŠÍRKOU. In VYUŽITÍ OPTICKÉHO SYSTÉMU ARGUS 4M V KRITICKÝCH OBLASTECH KAROSÁŘSKÉHO VÝLISKU [online]. [s.l.] : [s.n.], 2010 [cit. 2011-04-11]. Dostupné z WWW: <<http://www.metal2011.com/data/metal2010/sbornik/lists/papers/150.pdf>>.
23. Sheet-metal forming [online]. [s.l.] : [s.n.], 2007 [cit. 2011-05-04]. Dostupné z WWW: <[http://www.sut.ac.th/engineering/metal/pdf/MetForm/06\\_Sheet-metal%20forming.pdf](http://www.sut.ac.th/engineering/metal/pdf/MetForm/06_Sheet-metal%20forming.pdf)>.
24. Schuetz-Licht [online]. 2010 [cit. 2011-05-4]. [Http://www.schuetz-licht.de](http://www.schuetz-licht.de) Dostupné z WWW: <<http://www.schuetz-licht.de/UTM-Galdabini-English.htm> >.
25. Spš Karviná [online]. 2006 [cit. 2011-05-12]. [Www.sps-karvina.cz](http://www.sps-karvina.cz). Dostupné z WWW: < [http://www.sps-karvina.cz/www/Ict2005/manual/data/odborne/mereni/Strojni\\_a\\_technologicka\\_mereni.pdf](http://www.sps-karvina.cz/www/Ict2005/manual/data/odborne/mereni/Strojni_a_technologicka_mereni.pdf) >.

26. Statické zkoušky [online]. [s.l.] : [s.n.], 2009 [cit. 2011-05-04]. Dostupné z WWW: <<http://home.zcu.cz/~dyxon/DATA/Nauka%20o%20M/Zkouska.pdf>>.
27. Strojirenstvi.wz.cz [online]. 2005-2007 [cit. 2011-04-11]. Vlastnosti materiálů. Dostupné z WWW: <[http://www.strojirenstvi.wz.cz/stt/rocnik1/06a\\_pruznost\\_pevnost.php](http://www.strojirenstvi.wz.cz/stt/rocnik1/06a_pruznost_pevnost.php)>.
28. Tvárnost za studena. In Tvárnost za studena [online]. [s.l.] : [s.n.], 2010 [cit. 2011-04-11]. Dostupné z WWW: <[http://1pajda1.borec.cz/Download/Tvarnost\\_za\\_studena.doc](http://1pajda1.borec.cz/Download/Tvarnost_za_studena.doc)>.
29. Tzs.kmm.zcu.cz [online]. 2010 [cit. 2011-04-06]. Tepelné zpracování a slinování. Dostupné z WWW: <<http://tzs.kmm.zcu.cz/material2.pdf>>.
30. VĚCHET, Stanislav a Petr KRÁL. Únava materiálu: Únava materiálu-úvod. In Únava materiálu. [s.l.] : [s.n.], 2007. s. 2-7.
31. VŠB, Fakulta strojní, katedra mechanické technologie [online]. 2001 [cit. 2011-04-06]. Www.345.vsb.cz. Dostupné z WWW: <[http://www.345.vsb.cz/jiripetruzelka/Texty/Uvod\\_TV1.pdf](http://www.345.vsb.cz/jiripetruzelka/Texty/Uvod_TV1.pdf)>.
32. VŠB, Fakulta strojní, katedra mechanické technologie [online]. 2003 [cit. 2011-05-04]. Www.345.vsb.cz. Dostupné z WWW: <<http://www.345.vsb.cz/jiripetruzelka/TNMTV/8TvZkPlosna.pdf>>.
33. ŽÍDEK M., V. DĚDEK a B. SOMMER. Tváření oceli. Praha : SNTL/ALFA, 1988.

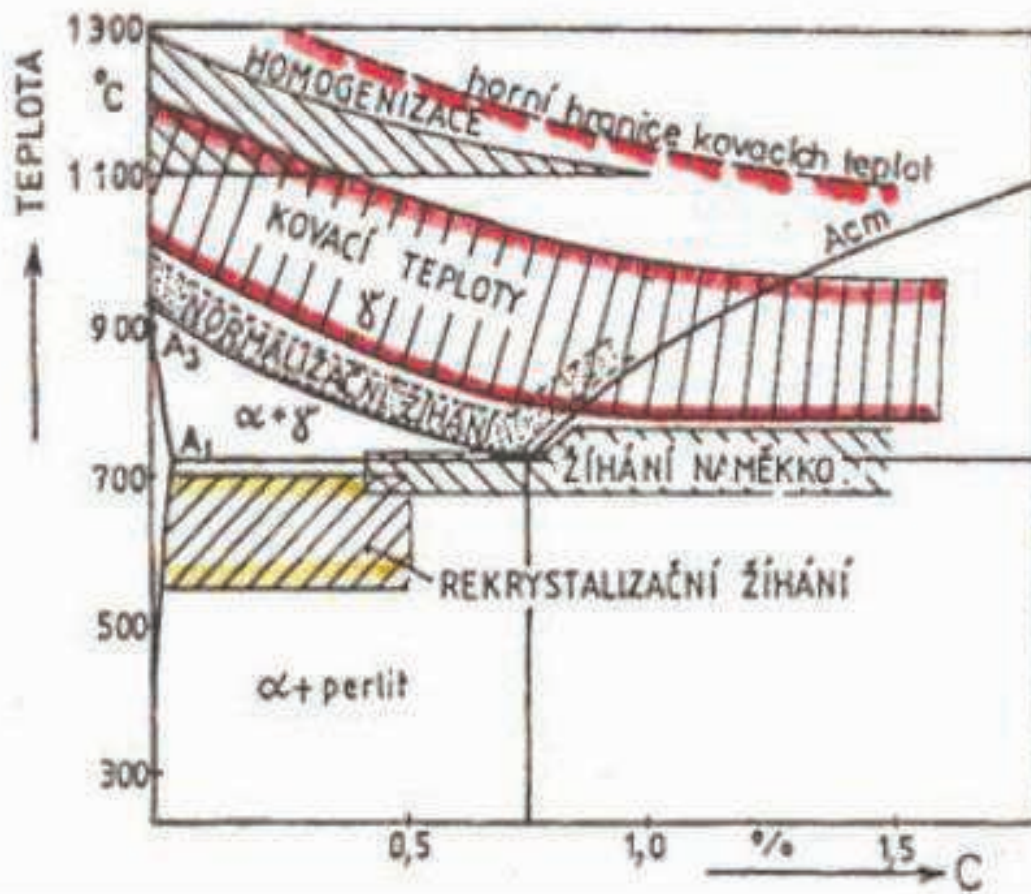
## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
$A_T$	poměrné stlačení	[%]
$d$	průměr vzorku	[mm]
$E$	Youngův modul pružnosti v tahu	[MPa]
$F$	zatěžující síla	[N]
$F_{maxT}$	maximální zatěžující síla v otlaku	[N]
$F_{maxO}$	maximální zatěžující síla v otlaku	[N]
$h_0$	původní výška vzorku	[mm]
$K$	stupeň tažení	[-]
$L_0$	původní délka	[mm]
$\Delta L$	změna délky	[mm]
$m$	součinitel tažení	[-]
$M_{kmax}$	maximální kroutící moment	[Nm <sup>-1</sup> ]
$M_{omax}$	maximální ohybový moment	[Nm <sup>-1</sup> ]
$N$	počet cyklů	[-]
$R_m$	pevnost v tahu	[MPa]
$R_{mo}$	pevnost v ohybu	[MPa]
$R_{mk}$	pevnost v krutu	[MPa]
$R_{mT}$	pevnost v tlaku	[MPa]
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu	[MPa]
$S$	plocha průřezu vzorku	[m <sup>2</sup> ]
$S_0$	původní plocha průřezu vzorku	[m <sup>2</sup> ]
$W_o$	průřezový modul v ohybu	[mm <sup>3</sup> ]
$W_k$	průřezový modul v krutu	[mm <sup>3</sup> ]
$y$	průhyb	[mm]
$\gamma$	úhel zkosu	[rad]
$\varepsilon$	poměrné prodloužení	[-]
$\sigma$	mechanické napětí	[MPa]
$\varphi$	úhel zkroucení	[rad]
$\varphi_1, \varphi_2$	deformace vzorku	[-]

## **SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1: Digram Fe-Fe<sub>3</sub>C s vyznačeným pásmem kovacíh teplot

Příloha 2: Tahový diagram u oceli 10 002

Kovací teploty v diagramu Fe – Fe<sub>3</sub>C



