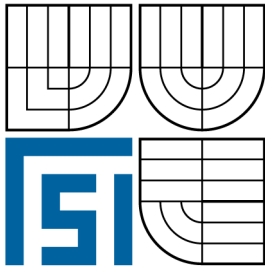


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

PĚCHOVACÍ ZKOUŠKY A JEJICH VÝZNAM

A STUDY OF UPSETTING TESTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ONDŘEJ SEDLÁK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. KAMIL PODANÝ, Ph.D

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Ondřej Sedlák

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:

Pěchovací zkoušky a jejich význam

v anglickém jazyce:

A study of upsetting tests

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o zpracování literární studie týkající se pěchovacích zkoušek s rozбором jejich významu pro strojírenskou praxi.

Cíle bakalářské práce:

Aktuální literární studie se zaměřením na pěchovací zkoušky materiálů se zhodnocením jejich výhod a nevýhod.

Seznam odborné literatury:

1. DRASTÍK, F., ELFMARK, J. Plastomery a tvařitelnost kovů. Praha: SNTL, 1977. 392 s. DT 539.214.07.
2. PRIMUS, F. Tvařitelnost hlubokotažných plechů. Strojírenství. 1976, roč. 26, č. 8, s. 472-484.
3. 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.
4. SAMEK, Radko. Analýza mezního stavu plastičnosti a technologické tvařitelnosti. 1. vyd. Brno: VA, 1988. 88 s.
5. MARCINIAK, Zdzislaw. Teorie tváření plechů. Vševlad 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 2008/2009.

V Brně, dne 4.11.2008

L.S.

doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

SEDLÁK Ondřej: Pěchovací zkoušky a jejich význam.

Bakalářská práce je vypracována v rámci studia oboru Strojní inženýrství (2301R016), pod záštitou Ústavu strojírenské technologie, Fakulty strojního inženýrství, Vysokého učení technického v Brně. Práce se zabývá zpracováním studie na téma pěchovací zkoušky a jejich význam pro strojírenskou praxi.

Cílem této literární studie je zhodnocení pěchovacích – tlakových zkoušek zejména pro ocelové materiály, které jsou nejvíce používány ve strojírenství. Dále se práce zaměřuje na porovnání různých druhů pěchovacích zkoušek, těles a strojů, u kterých jsou srovnány jejich výhody a nevýhody pro použití v praxi.

Klíčová slova: Pěchovací zkoušky, pěchování, tělesa, stroje, výhody, nevýhody

Abstract

SEDLÁK Ondřej: A study of upsetting tests and their importance.

This bachelor thesis has been written as part of the studies in the field of Mechanical Engineering (2301R016) under the aegis of the Institute of Manufacturing Technology of the Faculty of Mechanical Engineering at the Brno University of Technology. This work deals with the study on the subject of upsetting tests and their importance in the engineering practice.

The aim of this literary study is to evaluate upsetting – compression tests, especially in steel materials that are most widely used in the field of engineering. Then the work focuses on the comparison of the various types of upsetting tests, workpieces and machines, and their advantages and disadvantages for the practical use are compared.

Keywords: upsettings tests, upsetting, workpieces, machines, advantages, disadvantages

Bibliografická citace

SEDLÁK, O. *Pěchovací zkoušky a jejich význam*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 38 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Kamil Podaný, Ph.D.

Čestné prohlášení

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Senetářově dne 10.5.2009

.....

Podpis

Poděkování

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

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

1. ÚVOD	11
2. PĚCHOVÁNÍ	12
2.1. Rozdělení deformace	12
2.2. Materiály k pěchování	13
2.3. Přístupy řešení	13
2.3.1. Podle Siebela	14
2.3.2. Podle Unksova	15
2.4. Tvary zkušebních těles	15
2.4.1. Válcová tělesa	18
2.4.2. Čtvercová tělesa	19
2.4.3. Tělesa upravená	20
2.4.4. Tělesa plochá	20
2.5. Zkoušky mezi rovnoběžnými rovinami	20
2.5.1. Pěchovací zkouška rovnými kovadly	21
2.5.2. Pěchovací zkouška kuželovými kovadly	22
2.5.3. Pěchovací zkouška ploché tyče	22
2.5.4. Pěchovací zkouška tvařitelnosti na zkušebních tělesech s vrubem	22
2.5.5. Pěchovací zkouška s omezeným šířením	23
2.5.6. Pěchovací zkouška za hydrostatického tlaku	24
2.6. Tření a maziva	24
2.7. Vyhodnocování pěchovacích zkoušek	25
2.7.1. Přetvárný odpor	26
2.7.2. Křivky zpevnění	26
2.7.3. Limitní diagramy – FLD	27
2.8. Stroje pro pěchovací zkoušky	27
2.9. Experiment	28
3. ZÁVĚR	31

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam obrázků

1. ÚVOD [1], [8], [9], [20]

Tváření, je jeden z nejdůležitějších výrobních procesů, při kterém působením vnější síly na polotovar, vzniká výsledný výrobek bez úběru třísek. V jeho průběhu je na materiál vyvozoována již zmíněná síla, která po překročení meze kluzu vyvolá nevratné plastické deformace. Tváření lze rozdělit na dva druhy: plošné a objemové. Oba tyto druhy se používají v moderních metodách výroby součástí. Mezi hlavní výhody tohoto zpracování materiálu patří vysoká produktivita výroby, úspora materiálu, rozměrová přesnost a rozsah použití. Nevýhodou je zejména vysoká pořizovací cena strojů a nástrojů.

V praxi se pro zjišťování vhodnosti materiálů k tváření využívají stanovené zkoušky, ze kterých získáváme mechanické a strukturní materiálové charakteristiky.

Nejvíce používané zkoušky tvařitelnosti jsou:

- tahová zkouška – nejpoužívanější deformačně mechanická zkouška (obr. 1). Při jednoduchém provedení je zkoušený vzorek namáhán tahovou silou. Tato síla se úměrně zvětšuje do přetržení vzorku. Pomocí diagnostiky zkušebního stroje získáváme výsledný tahový diagram, ze kterého určujeme základní materiálové charakteristiky jako jsou mez kluzu, mez pevnosti a tažnost materiálu.
- krutová zkouška – další z často používaných deformačně mechanických zkoušek (obr. 2). Zkoušený vzorek je namáhán krutícím momentem. Moment působí úměrně až do úplného překroučení. Základním výstupem zkoušky je počet otáček, které zkoušený vzorek snese do přetržení. Mezi další zjišťované údaje patří velikost momentu potřebného k deformaci vzorku a tvařitelnost materiálu.
- tlaková zkouška – jedna z posledních nejvíce používaných deformačně mechanických zkoušek. Na zkoušený vzorek působí tlaková síla, která vzorek stlačuje a deformuje. Zkouška končí pokud je vzorek stlačen o stanovenou výšku, nebo se na vzorku projeví trhlinka. Výsledkem tlakové zkoušky je pracovní diagram, ze kterého stanovujeme materiálové deformační charakteristiky, jako je například charakteristika přetvárného odporu a křivky zpevnění.



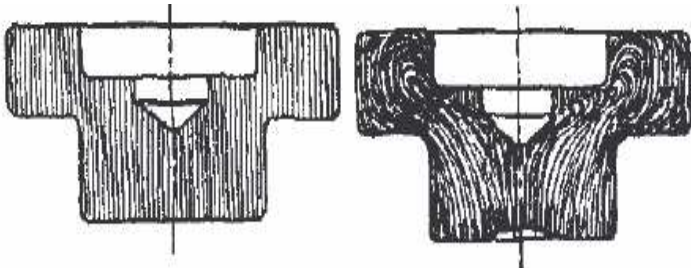
Obr. 1 Průběh tahové zkoušky [16]



Obr. 2 Univerzální torzní stroj pro zkoušku krutem [18]

2. PĚCHOVÁNÍ [7], [9], [10], [15]

Pěchování, je jednou ze základních kovářských operací objemového tváření za tepla nebo za studena, při které zmenšujeme výšku výchozího polotovaru a zvětšujeme jeho příčný průřez. V průběhu pěchování vznikají v celém objemu tvářeného tělesa nerovnoměrné deformace důsledkem tření. Tření vzniká jak mezi nástrojem a tělesem, tak i uvnitř v tělese. Pěchování se používá v rámci zjišťování mechanických vlastností materiálu, jako pomocná kovářská operace (kalibrace průměrů a délek, zarovnání čel) a jako samostatná kovářská operace k výrobě polotovarů (hlav šroubů, čepů a tvarového osazení), (obr.3).



Obr. 3 Soustružená a pěchovaná součást [10]



Jedním druhem výroby, kde je pěchování používáno, je výroba šroubů. Hlavní výhodou výroby vysocepevnostních šroubů pěchováním, je průběh vláken součásti. Pěchovaná součást má vlákna nepřerušená, narozdíl od součásti vyráběné obráběním, která má vlákna přerušovaná obrobem (obr. 3). Tento efekt průběhu vláken zvyšuje mechanické vlastnosti materiálu.

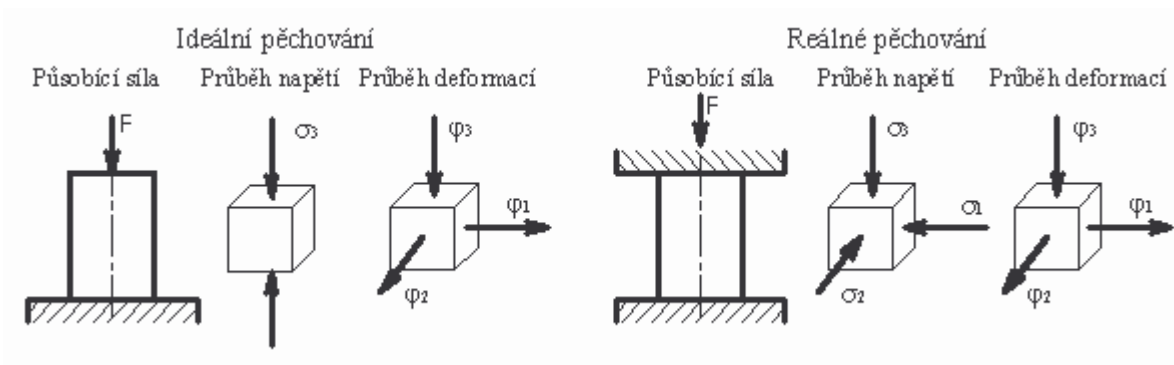
Šroub je vyroben na čtyři operace. První operace je srovnání čel - není zobrazena. Druhá a třetí znázorňuje předpěchování hlavy šrouby. Čtvrtou operací se hlava šroubu zkalibruje na konečný tvar.

Obr. 4 Postupná výroba šroubu pěchováním [15]

- Znaky pěchování:
- na celé těleso silou působí nástroj
 - v tělese vzniká nerovnoměrná deformace a tření
 - největší napětí působí mezi nástrojem a pěchovaným tělesem
 - zmenšení výšky tělesa
 - zvětšení příčného průřezu

2.1. Rozdělení deformace [2], [3]

Deformaci při pěchování lze rozdělit na dva základní stavy. První je stav ideální, u kterého je přetvoření ve všech místech tělesa stejné. Při tomto stavu ovšem zanedbáváme tření, proto je v praxi nedosažitelný a používáme ho jen jako modelový (obr. 5). Charakterizuje ho jednoosé napětí tělesa a prostorový průběh deformace. Druhý stav je reálný, nastává důsledkem působení tření. U tělesa se vyskytují nerovnoměrné deformace v celém jeho objemu. V praxi je dosažen při pěchování (obr. 5). Charakterizuje ho víceosé napětí a prostorový stav deformace.



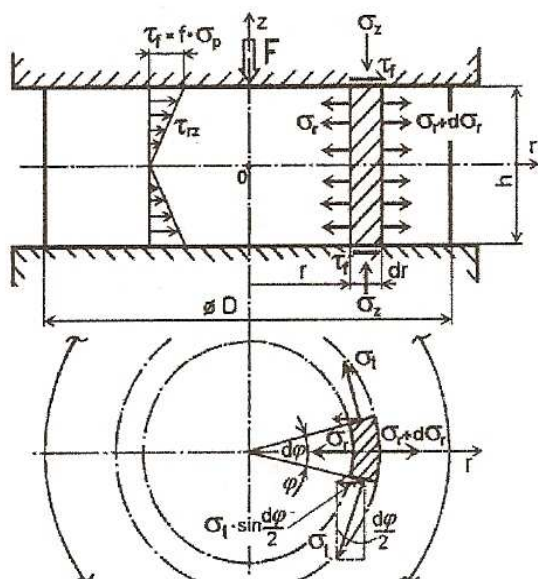
Obr. 5 Stavby napjatosti při pěchování [2]

2.2. Materiály k pěchování [9]

Při pěchování ocelového materiálu klademe vysoké požadavky na tažnost. Tažnost materiálu má být co největší a jeho mez kluzu co nejmenší. Dále by materiál neměl obsahovat žádné vměstky a nečistoty. Je důležité, aby obsahoval co nejméně prvků uhlíku, fosforu a síry. Důsledkem nadměrné koncentrace těchto prvků je křehkost, která je nežádoucí. Neoptimálnější tepelné zpracování je ve stavu žíhaném na měkko, nebo normalizačně žíhaném. Chemické složení oceli je nejvhodnější feriticko-perlitické s globulárním perlitem. Strukturu oceli je dobré dodržet jemnozrnnou.

Neželezné kovy je nejlépe pěchovat jako čisté, protože vykazují dobré přetvárné vlastnosti. Například hliník může dosáhnout poměrného přetvoření, až 90% svého objemu. Slitiny neželezných kovů nevykazují tak dobré tvárné vlastnosti. Před pěchováním slitin je důležité tepelné zpracování. Nejvhodnější zpracování je ve stavu žíhaném na měkko, nebo normalizačně žíhaném.

2.3. Přístupy řešení [2], [3], [11]



Při řešení pěchování mezi dvěma rovnoběžnými rovinami a rotačně symetrického tělesa se vychází ze základní rovnice (2.1). Tento vztah je vyjádřen ze základních podmínek pěchování a diferenciální rovnice rovnováhy sil pro radiální osu (obr. 6).

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2\tau_f}{h} = 0 \quad (2.1)$$

kde σ_r ...radiální napětí [Mpa]
 rpoloměr [mm]
 τ_fsmykové kontaktní napětí [MPa]
 haktuální výška vzorku [mm]

Obr. 6 Schéma napjatosti v pěchovaném válcovém tělese [2]

Po derivaci podmínky maximálních smykových napětí - τ_{\max} (2.2) dle poloměru “r“ a za předpokladu, že válcové těleso je deformováno a plasticky přetvářeno v celém jeho objemu, je obdržen vztah (2.3).

$$\sigma_p = \sigma_r - \sigma_z \quad (2.2)$$

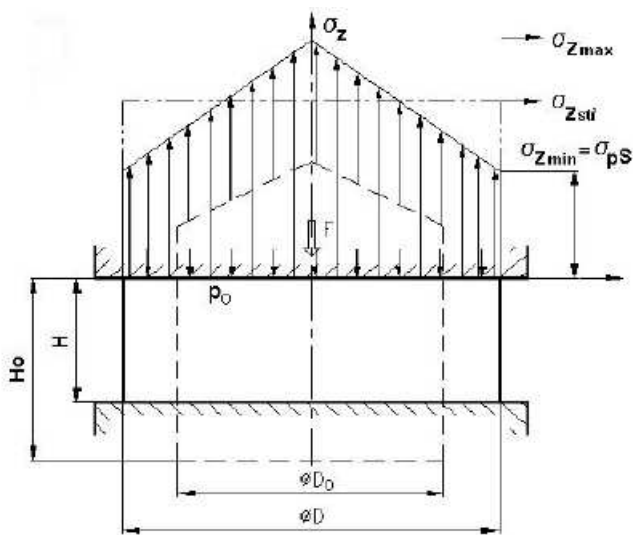
kde σ_zosové napětí [MPa]
 σ_p pčhovací napětí [MPa]

$$\frac{d\sigma_z}{dr} = \frac{d\sigma_r}{dr} = 0 \quad (2.3)$$

Po dosazení vztahu (2.3) do rovnice (2.1), je obdržen obdobný vztah jako (2.1) s jinými proměnnými (2.4).

$$\frac{d\sigma_z}{dr} + \frac{2\tau_f}{h} = 0 \quad (2.4)$$

2.3.1. Podle Siebela [2], [11]



Siebel u odvozování deformačního odporu při pčhování a pčhovací síly vycházel z výrazu (2.4) a Coulombova zákona smykových kontaktních napětí (2.5), kde σ_z je konstantní.

Obr. 7 Geometrický model řešení dle Siebela [11]

$$\tau_f = f \cdot \sigma_z = -f \cdot \sigma_p \text{ [MPa]} \quad (2.5)$$

kde f.....součinitel tření [-]
 σ_ppčhovací napětí [MPa]
 σ_zosové napětí [MPa]

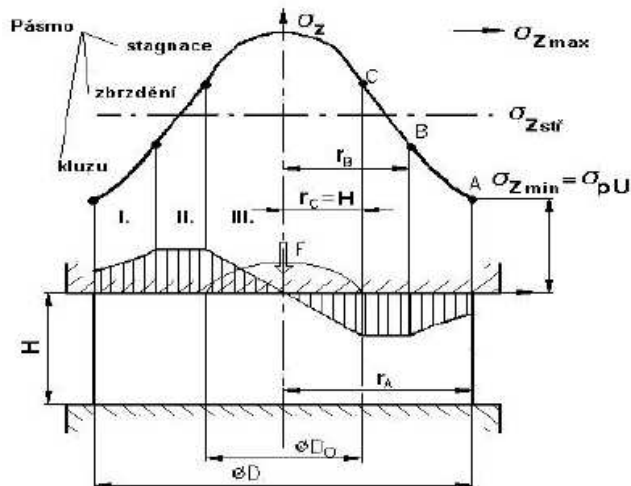
Při řešení došel k závěru, že deformační odpor σ_d v jednotlivých místech vzorku je lineárně závislý na poloměru ($\sigma_d = \sigma_z$). Pčhovací sílu lze vypočítat dle vztahu (2.6).

$$F_p = \sigma_d \cdot S \text{ [N]} \quad (2.6)$$

kde σ_ddeformační odpor [MPa]
 S.....průmět čelní plochy pčhovaného válce [mm²]

2.3.2. Podle Unksova [2], [11]

Unksov při zkoumání pēchovací zkoušky zjistil, že smyková napětí působící mezi činnou plochou nástroje a plochou pēchovaného tělesa, nejsou ve všech místech stejná. Tyto plochy (mezikruží) rozdělil na tři základní pásma (obr. 8):



I. pásmo kluzu – $r \in (r_B; r_A)$, vyznačuje se rostoucím smykovým napětím

II. pásmo zbrždění – $r \in (r_B; r_C)$, smykové napětí je konstantní

III. pásmo stagnace – $r \in (r_C; 0)$, smykové napětí klesá, při nulovém poloměru je i smykové napětí rovno nule

Výskyt pásem je závislý na třecí funkci a na okamžitém poměru D/h . Proto při průběhu pēchování nastává zvětšování, zmenšování nebo úplné zanikání pásem.

Obr. 8 Geometrický model řešení dle Unksova [11]

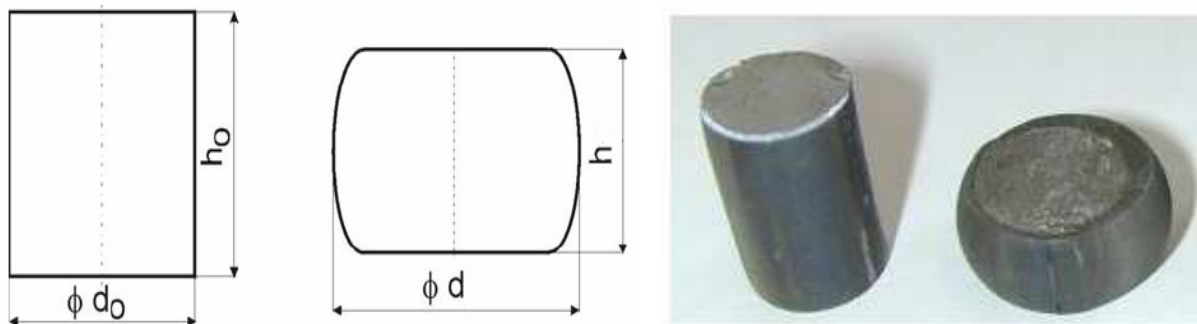
Unksov pro každé pásmo pomocí Coulombova zákona $\tau_f = f \cdot \sigma_z$ a výrazu (2.4) odvodil osové napětí σ_z , které v něm působí. Pēchovací sílu vyjádřil jako součin středního osového napětí a příčné plochy pēchovaného vzorku (2.7).

$$F_p = \sigma_z \cdot S \text{ [N]} \tag{2.7}$$

kde σ_z střední osové napětí [MPa]

2.4. Tvary zkušebních těles [1], [2], [4], [6], [7], [10]

Zkoušené těleso je v nejčastějším případě válcového tvaru s počáteční výškou h_0 a průměrem d_0 . Poměr mezi výškou a průměrem nedeformovaného tělesa D_R , je dodržován dle obrázku 9 a vztahu 2.8, aby nedošlo k ohnutí při jeho pēchování.

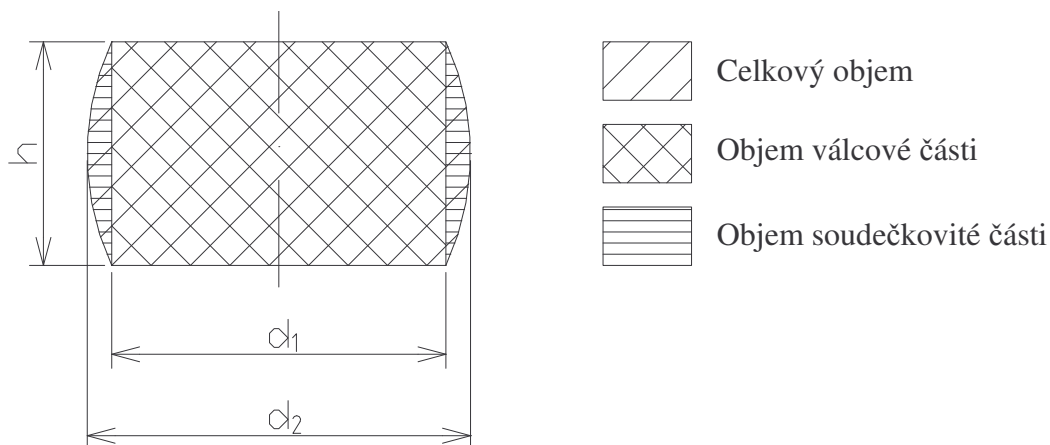


Obr. 9 Rozměry zkušebního tělesa před zkouškou a po provedení zkoušky [6], [19]

$$D_R = \frac{h_0}{d_0} [-] \quad (2.8)$$

Hodnota poměru polotovaru má ležet v intervalu 1,25 až 2,5.

Pěchováním zkušebního vzorku vzniká soudečkovité těleso. Tento stav je zapříčiněn důsledkem nerovnoměrné deformace. Proto určujeme koeficient soudečkovitosti B_S , který charakterizuje stupeň přetvoření tělesa. Koeficient se mění s poměrným stlačením výšky h_0 a dále je závislý na štíhlosti zkoušeného tělesa. Pokud je označen objem tělesa jako V_c , objem soudečkovité části jako V_s a objem válcové části jako V_v (obr. 10), tak je možno vypočítat koeficient soudečkovitosti dle výrazů (2.9, 2.10).



Obr. 10 Soudečkovitý tvar tělesa a jeho objemové části

Platí

$$V_c = V_v + V_s [m^3] \quad (2.9)$$

Koeficient soudečkovitosti B_S

$$B_S = \frac{V_s}{V_c} = \frac{V_c - V_v}{V_c} [-]$$

zjednodušeně

$$B_S = \frac{d_1}{d_2} [-] \quad (2.10)$$

procentuálně

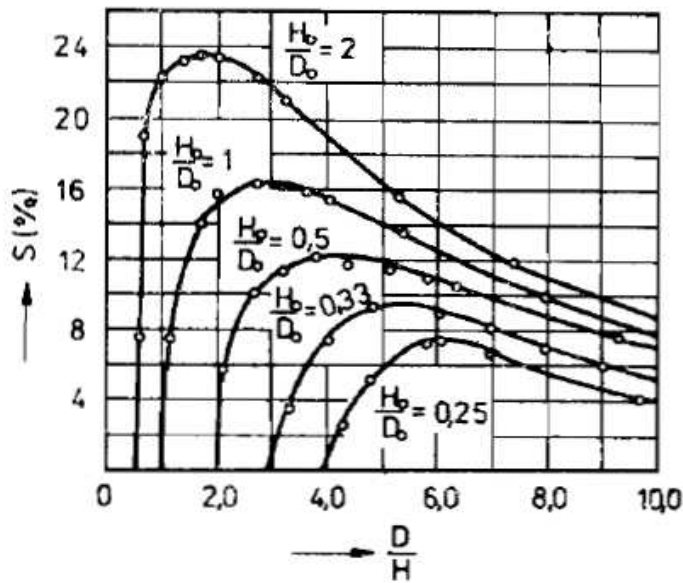
$$B_S = \frac{V_s}{V_c} \cdot 100 [\%]$$

kde d_1 ...průměr válcové části [mm]

d_2 ...průměr soudečkovitého tělesa [mm]

Koeficient soudečkovitosti B_S se pohybuje v intervalu 0 až 1. Při překročení horní meze je test neplatný a musí se opakovat. Pokud je deformace rovnoměrná (stav ideální), tak je objem V_s nulový a zároveň koeficient B_S nulový. V průběhu nerovnoměrné deformace vzniká objem V_s a tím se rovněž zvětšuje koeficient B_S . Soudečkovitost je způsobena třením mezi

tělesem a nástrojem. Lze ji snížit pomocí vhodné volby tělesa o co nejmenší štíhlosti, nebo



Obr. 11 Graf závislosti soudečkovitosti na poměrné štíhlosti vzorku [4]

Velikost přetvoření je definována pomocí poměrného stlačení "ε", nebo logaritmického stačení "φ", a to podle vztahů (2.11, 2.12).

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h}{h_0} [-] \quad (2.11)$$

$$\varphi = \ln \frac{h_0}{h} [-] \quad (2.12)$$

- kde ε.....poměrné přetvoření [-]
 φ....logaritmické přetvoření [-]
 h₀...počáteční výška zkoušeného tělesa [mm]
 h.....konečná výška zkoušeného tělesa [mm]

Další možný způsob výpočtu logaritmického přetvoření "φ", je z průřezů tělesa před a po stlačení (2.13).

$$\varphi = \ln \frac{S_0 - S}{S_0} [-] \quad (2.13)$$

- kde S₀...počáteční průřez zkoušeného tělesa [mm]
 S....konečný průřez zkoušeného tělesa [mm]

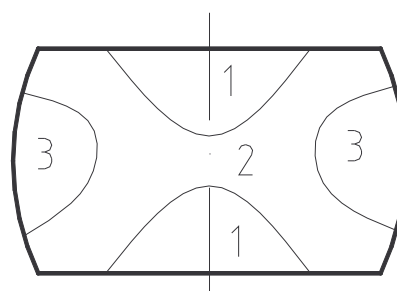
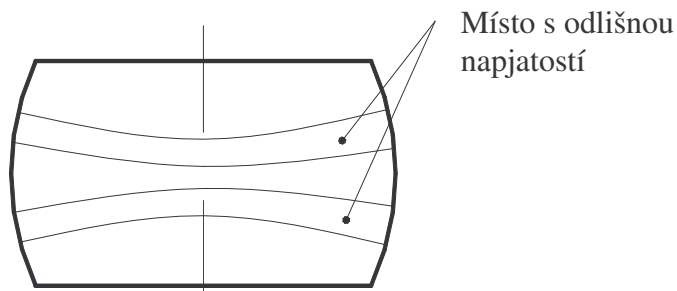
Vztah mezi poměrným a logaritmickým stlačením (2.14).

Poznámka: ve vzorci "+“ pro tahové namáhání, "-“ pro tlakové namáhání

$$\varphi = \ln(1 \pm \varepsilon) [-] \quad (2.14)$$

Průběh deformace v pěchovaném tělese je v určitých místech tělesa velmi odlišný. Tuto odlišnost je možno rozdělit podle stupňů deformace do tří jednoduchých oblastí, které se vyskytují v jednotlivých místech tělesa (obr. 13). Prostorové napětí ve vzorku je velmi složité a v odlišných tělesech se jeho členitost značně mění. Napjatost v tělese závisí jak na průměru

a výšce zkušební vzorku, tak i na stupni zpěchování. Při pěchování se napjatost v tělese neustále mění, není v celém objemu stejná. Odlišnost v napjatosti může být jiná až do 50% v jednotlivých místech (obr. 12).



Obr.12 Místa s rozdílným přetvořením [1]

Obr. 13 Oblasti s různou napjatostí [1]

Oblast 1: Vytvoří se uprostřed pod plochou, kde na těleso působí, jak na horní, tak na dolní straně deformační síla. Tvar této oblasti je kuželovitý a nevznikají v ní žádné deformace. To je způsobeno tím, že materiál při stlačení přilne k nástroji. Oblast se označuje jako *pásmo přilnutí*.

Oblast 2: Nachází se ve střední části tělesa a prostupuje jím až k vnějšímu okraji. Vyznačuje se velkou deformací a smykovým napětím, které působí pod úhlem 45° k ose vzorku. Na styčných plochách mezi nástrojem a tělesem nastává skluz, proto se tato oblast označuje *pásmo skluzu*.

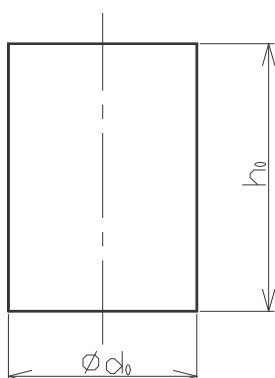
Oblast 3: Má tvar prstence eliptického průřezu a je rozmístěna po obvodu. V této oblasti probíhá střední tahové napětí, které směrem k vnějšku narůstá

Tvary zkušebních těles lze rozdělit do čtyř skupin podle geometrie těles, a to na: válcová, čtvercová, plochá a upravená zkušební tělesa. Přesné rozměrové provedení těles upravuje pro pěchovací zkoušky norma ČSN 42 0426 a další: ČSN 42 0305/ST SEV 2859-81 pro ocelové zkušební vzorky, ČSN 42 0306/ST SEV 457-77 pro vzorky z neželezných kovů.

2.4.1. Válcová tělesa [1], [8]

Pro pěchovací zkoušky jsou nejvíce využívána válcová tělesa. Jejich použití pramení z jednoduché výroby a relativně jednoduchého výpočtu sil a napětí při pěchování. Vzorky těchto válcových typů se vyrábí formou ústřížků z drátů nebo přířezů z tyčí. Poté se dále opracovávají jejich čelní plochy obráběním, nebo se provede tzv. kalibrační pěchování, které čela zarovná. Po provedení těchto úprav je vzorek připraven ke zkoušce.

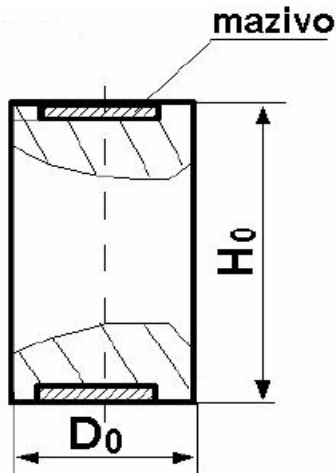
a) s hladkou dosedací plochou



Tyto vzorky jsou nejsnáze vyrobitelné, ovšem jejich nevýhoda je v tom, že leštěné stykové plochy vytlačují mazivo a křivka přetvárného odporu se zkresluje (obr. 14). Na alternativu pro pěchování tohoto vzorku přišel Šofman, který mezi stykové plochy vložil plech olova nebo hliníku o tloušťce 0,5 mm. Vložením plechu se sníží tření mezi stykovými plochami a křivka přetvárného odporu získá na přesnosti, která je vyžadována.

Obr. 14 Vzorek s rovnými čely [1]

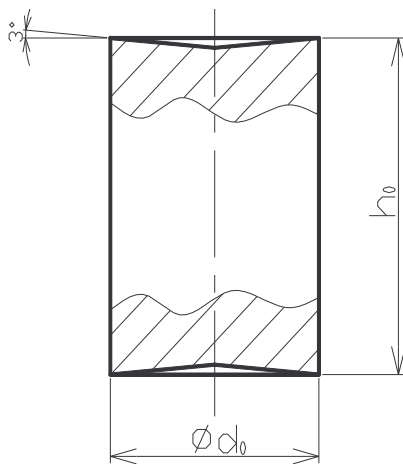
b) s vybranou plochou pro mazivo



Poprvé tento vzorek odzkoušel Raštagajev, který vytvořil čelní vybrání na zkušebním vzorku. Průměr vybrání činil 12 mm, hloubka 0,5 mm a okraje vytvořil o tloušťce totožné s hloubkou vybrání (obr. 15). Vybrání vyplnil kyselinou palmitou. Toto provedení vzorku později zkoušeli Ondráček a Mika. Došli k závěru, že při porovnání zkoušky vzorku s rovnými čely a nemazanou styčnou plochou a zkoušky vzorku dle Raštagajeva, je potřebná síla pro stlačení stejného vzorku o stejné Δh u zkoušky podle Raštagajeva o 13 % menší.

Obr. 15 Vzorek dle Raštagajeva [8]

c) s kuželovým vybráním

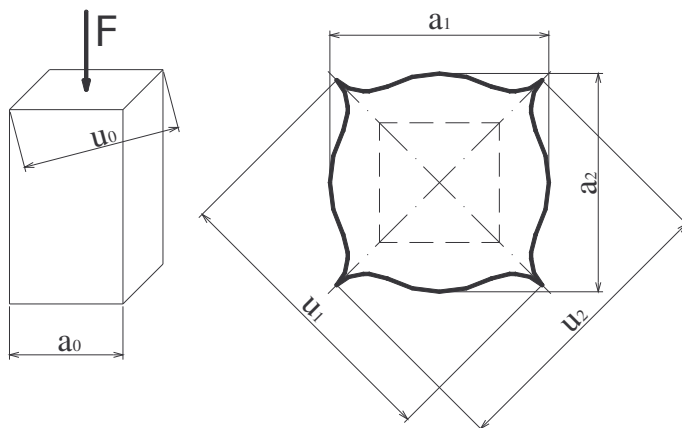


Další válcový zkušební vzorek se zahloubení čelní plochy provedli Siebel a Pomp (obr. 16). Zahloubení provedli kuželové pod úhlem $\alpha = 3^\circ$, což odpovídá součiniteli tření ($\text{tg } \alpha = \mu$) $\mu = 0,0524$. Tření je možno dále zmenšit vhodnou volbou mazání. S tímto vybráním ovšem přichází i úprava stykových ploch nástroje, která se promítne do pracnosti zkoušky. Tento vzorek se nejvíce využívá při přesných testech, protože u něho vzniká nejmenší tření mezi stykovými plochami. Důsledkem toho se zkouška nejvíce blíží rovnoměrné deformaci. To dokládá i nejmeně zkreslená křivka přetvárného odporu.

Obr. 16 Vzorek dle Siebela a Pompa [1]

2.4.2. Čtvercová tělesa [1], [10]

Vzorky čtvercového průřezu nejsou rozšířené tak, jako vzorky průřezu válcového, a to zejména z důvodu nerovnoměrného přemísťování materiálu při pěchování (obr. 17). Tento efekt může být ovšem i výhodou. Výpočet vzorku čtvercového průřezu je oproti výpočtu vzorku válcového průřezu značně složitější. Jejich hlavní využití je při zhodnocování směru maximálního a minimálního přemístění materiálu po pěchování vzorku. Po zkoušce je dosaženo charakteristického půdorysu vzorku (obr. 17).



Vzorky čtvercového průřezu nejsou rozšířené tak, jako vzorky průřezu válcového, a to zejména z důvodu nerovnoměrného přemísťování materiálu při pěchování (obr. 17). Tento efekt může být ovšem i výhodou. Výpočet vzorku čtvercového průřezu je oproti výpočtu vzorku válcového průřezu značně složitější. Jejich hlavní využití je při zhodnocování směru maximálního a minimálního přemístění materiálu po pěchování vzorku. Po zkoušce je dosaženo charakteristického půdorysu vzorku (obr. 17).

Obr. 17 Vzorek čtvercového průřezu před a po zatížení [10]

Výrazy pro vyhodnocování maximální (2.15) a minimální (2.16) poměrné deformace průřezu:

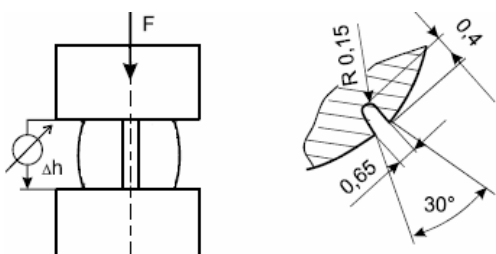
$$\varepsilon_{\min} = \frac{\frac{a_1 + a_2}{2} - a_0}{a_0} [-] \quad (2.15)$$

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\frac{u_1 + u_2}{2} - u_0}{u_0} [-] \quad (2.16)$$

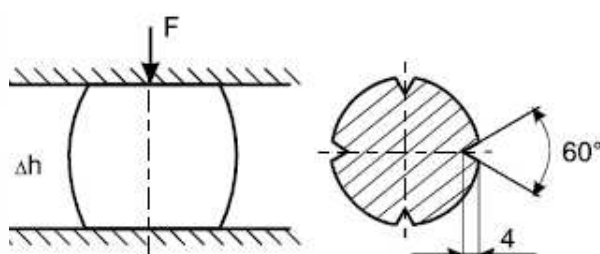
kde a_1, a_2, \dots šířky vzorku po stlačení [mm]
 u_1, u_2, \dots úhlopříčky vzorku po stlačení [mm]
 a_0, \dots počáteční šířka vzorku [mm]
 u_0, \dots počáteční úhlopříčka vzorku [mm]

2.4.3. Tělesa upravená [1], [5], [8]

Upravená tělesa specifikuje úprava pomocí vrubu a to podélného nebo příčného. Častěji se však užívají podélné. Vrub vytvořený na tělese má nezanedbatelný vliv při pěchování, jelikož se v okolí vrubu koncentruje napětí. Následkem vysokého napětí vznikne ve vrubu trhlinka, podle které posuzujeme vhodnost materiálu k tváření. Tvary těles a jejich vruby se liší provedením podle autorů. Jednou z nejvíce používaných zkoušek, je zkouška tělesa s vrubem podle Kuda (obr. 18). Další známá zkouška pro těleso s vrubem je podle českého autora Žídka (obr.19). Tvary vrubu jsou jednoznačně rozlišitelné na obrázcích. Tyto vzorky se používají pro rychle stanovení tvárnosti zkoušeného materiálu.



Obr. 18 Vzorek podle Kuda [5]



Obr. 19 Vzorek podle Žídka [5]

2.4.4. Tělesa plochá [1]

Mají tvar plochého kvádrů o výšce h , délce l a šířce b . Poměr délky a šířky musí být alespoň šestinásobný, aby se těleso dalo použít pro pěchovací zkoušku. Pro zkoušení těchto těles se musí použít upravená kovádla, která by neměla mít šířku menší než 3 mm.

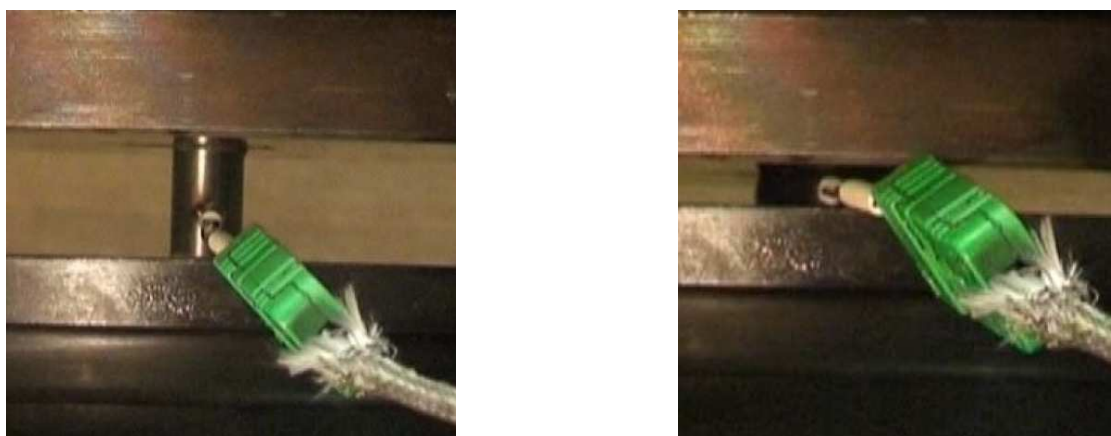
2.5. Zkoušky mezi rovnoběžnými rovinami [1]

Jak už bylo dříve zmíněno, při pěchovací zkoušce se zmenšuje výška výchozího polotovaru a zvětšuje se jeho příčný průřez. Dále zkouška může probíhat jak za tepla, tak i za studena. Pokud probíhá zkouška za studena je teplota zkoušeného vzorku totožná s teplotou prostředí asi 20°C (dovolené odchylky teploty pro zkoušku jsou -10°C a +15°C). U zkoušky pěchováním za tepla se zvětšuje teplota zkoušeného vzorku indukčním nebo elektrickým ohřevem. Teplota ohřevu nesmí překročit teplotu solidu. Další upřesnění a specifikace udává

norma ČSN 42 0426, která je stanovena pro pēchování vřech kovovřch materiřlř. Pēchovací zkouřky jsou statickř a deformační. Při pēchování dolnř střl pēchovacího stroje je nepohyblivř a hornř vyvozuje sřlu a pohybuje se smřrem dolř. U každř z provřdřenřch pēchovacřch zkouřek, jak za tepla, tak i za studena, je třeba zajistit vhodnř mazřnř stykovřch ploch.

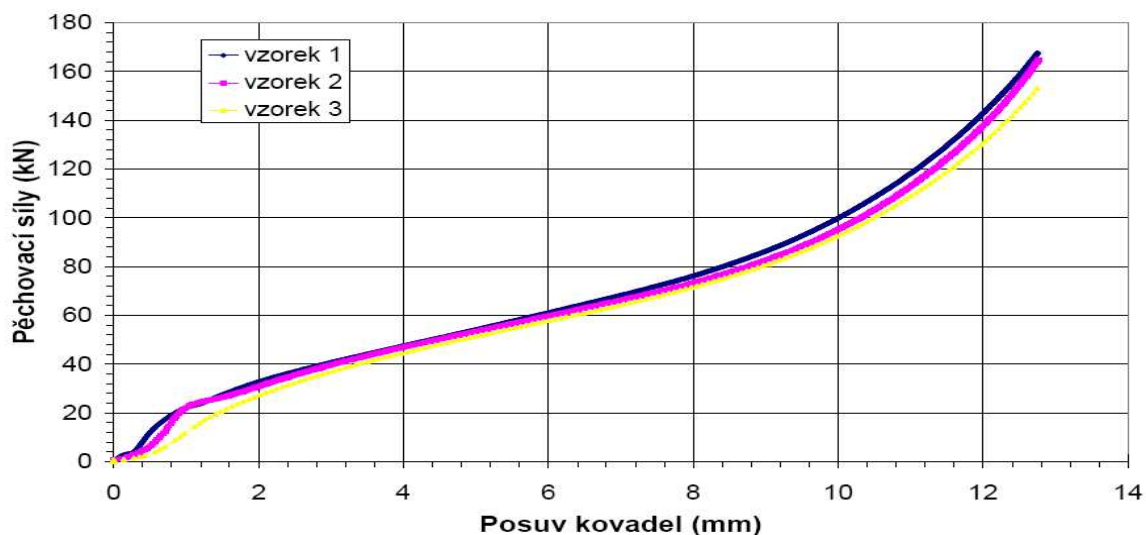
2.5.1. Pēchovací zkouřka rovnřmi kovadly [1], [6]

Jsou nejpouřivřnřjř z vřech pēchovacřch testř kterř se provřdř. Častř vyuřivřnř pramenř z jejich jednoduchosti a univerzřlnosti. Zkouřky se provřdř ve dvou zřkladnřch variantřch, a to za tepla nebo za studena. Nejčastřji pēchovanř třlesa jsou hladkř vřlcovř z dřvodu jednoduchř vřroby. Mezi dalř pōuřivřnř třlesa se řadř vřlcovř třlesa s vybranou plochou pro mazivo a třlesa čtvercovř. Tyto testy se provřdř na hydraulickřch lisech nebo na univerzřlnřch pēchovacřch strojřch. Zkouřka pēchovřnřm končř dosařenřm potřebnřho stlačenř Δh nebo vznikem trhliny. Pokud zkouřka končř bez mechanickřho poruřenř, jen v soudečkovitřm tvaru vzorku, je mořnř usoudit, ře materiřl je mřkkř a tvřrnř - konstrukční ocel (obr. 20).



Obr. 20 Pēchovací zkouřka tlakem pro ocel 12 013 [6]

Ze zkouřek pro tvřrnř materiřl se určřje pouze vřraznř mez kluzu. Pokud zkouřka končř vznikem trhliny, lze stanovit i dalř mechanickř vlastnosti, jako je mez pevnosti a mez přetvořenř. Vřstupem zkouřky je diagram zřvislosti pēchovacř sřly na stlačenř Δh , třř



Obr. 21 Zřvislosti pēchovacř sřly na posuvu kovadla pro třř vzorky z materiřlu 12 013

nazývají pracovní diagram (obr. 21). Naměřené hodnoty se dále zpracovávají a získává se z nich například závislost přetvárného odporu. Univerzální pēchovací stroje dokáží vykreslit tyto křivky ihned po zkoušce.

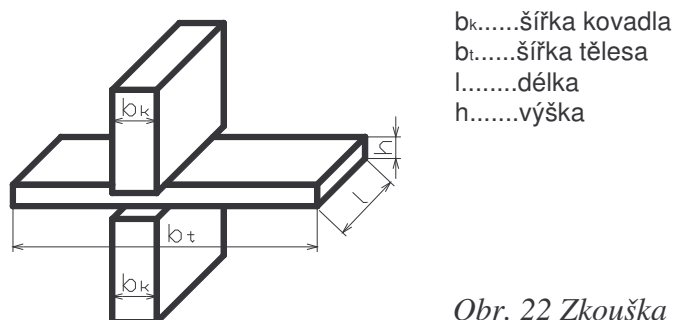
2.5.2. Pēchovací zkouška kuželovými kovadly [1], [4], [8]

Zkoušky kuželovými kovadly nejsou tak rozšířené jako zkoušky s rovnými kovadly, z důvodu úpravy kovadla do kužele. Tvary kovadel můžeme rozdělit na dva druhy - vyduté a vypuklé. Vydutá kovadla, tzn. kovadla s kuželem vnitřním, se nepoužívají z důvodu negativně působící normálové složky síly, která nerovnoměrnost deformace zvětšuje. Ovšem to neplatí u druhého typu kovadel s vnějším kuželem. U tohoto druhu kovadla má normálová složka pozitivní směr a nerovnoměrnost deformace se snižuje, což je pro přesnost zkoušky důležité.

Při pēchovací zkoušce podle Siebela a Pompa je použit zkušební vzorek o průměru 20 mm, výšce 40 mm a úhlu vybrání $\alpha = 3^\circ$, kde ($\text{tg } \alpha = \mu$) μ je součinitel tření. Úhel α musí být stejný jak pro kovadlo, tak i pro vzorek, aby zůstal zachován válcový tvar vzorku. Zkouška se skládá z několika částí. Nejdříve se spēchuje vzorek na 45% původní výšky, dále se přesoustruží na průměr 14 mm a výšku 21 mm a opět se pēchuje o 50 až 60% výšky. Pro tvárné materiály lze použít i třetí zpēchování, kdy jsou na sebe postaveny dva zkušební vzorky náležitě osoustružené, které tvoří nové zkoušené těleso. Pēchování probíhá při malých rychlostech do $0,05\% \text{ s}^{-1}$. Při zkoušce se stanovuje z působící síly a tlačné plochy průřezu tlakové napětí, které odpovídá přetvárnému odporu.

2.5.3. Pēchovací zkouška ploché tyče [1]

Zkoušku pēchování ploché tyče zavedli dva spolupracovníci A. Nadai a E. Orowan. Zjišťovali při ní přetvárný odpor materiálu. Zkouška spočívá ve vtlačování úzkého kovadla do zkušební vzorku (obr. 22). Pro tuto zkoušku platí, že přetvárný odpor při pēchování ploché tyče je značně větší, než při pēchování klasického válcového hladkého tělesa. Zkouška pēchování ploché tyče se provádí jak za studena, tak i za tepla.



Obr. 22 Zkouška pēchování ploché tyče [1]

2.5.4. Pēchovací zkouška tvařitelnosti na zkušebních tělesech s vrubem [1], [4], [5], [8]

Tyto zkoušky se nejvíce využívají u dobře tvárných materiálu, které se pēchují za tepla, protože u nich lze těžce dosáhnout mechanického poškození. Používaná tělesa jsou nejčastěji válcová. Cílem zkoušky je rychlé získání ukazatelů tvařitelnosti podle výrazů (2.17). Zkouška končí vznikem první trhliny, která se objeví ve vrubu. Vzorky s vrubem jsou obtížněji vyrobitelné než hladké, ale oproti hladkým vzorkům trhlina vzniká již při malé deformaci, což je žádoucí.

Součinitel zpevnění:

$$n = \frac{h_1}{h_0} [-]$$

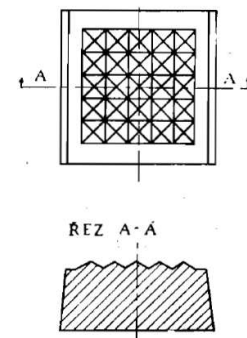
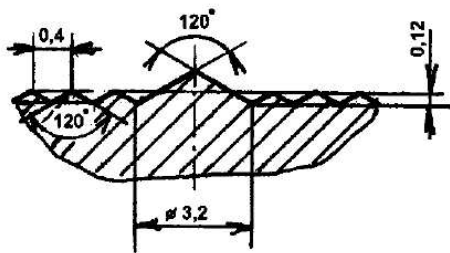
Ukazatel deformační schopnosti:

(2.17)

$$D_{sn} = \frac{d_1}{d_0} - 1 [-]$$

kde h_0, d_0, \dots rozměry tělesa před zkouškou [mm]
 h_1, d_1, \dots rozměry tělesa při vzniku trhliny [mm]

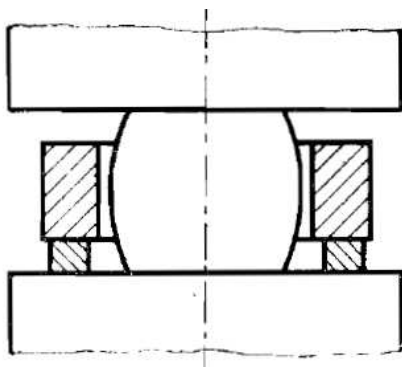
Jedna z nejnámějších a nejdůležitějších zkoušek s vrubem je zkouška podle Kudo. Kudo použil k pěchování válcové těleso s vrubem (obr. 18). Pěchovací kovadla použil speciální, která mají malé soustředné výstupky a ve středu středící kužel (obr. 23). Na tento vzorek je třeba vytvořit totožný středící důlek s kovadlem. U těchto kovadel lze najít různé druhy provedení. Další používané jsou například s jehlanovitými výstupky (obr. 24). Zavedením těchto kovadel se značně snížila nerovnoměrnost deformace a tím se stala tato zkouška velmi přesná. Test končí vznikem trhliny ve vrubu a určujeme z něho tvařitelnost materiálu.



Obr. 23 Řez kovadlem se středícím kuželem [8] Obr. 24 Kovadlo s jehlanovitými výstupky [4]

2.5.5. Pěchovací zkouška s omezeným šířením [1], [8]

Test má poměrně jednoduché provedení. Zkoušený vzorek se vkládá do objímky, která má výšku a vnitřní rozměr odpovídající zpěchovanému tělesu. Kovadla pěchují materiál ve směru osy vzorku a zároveň objímka klade odpor vůči toku materiálu do příčného směru. Efekt kdy na vzorek působí tlakové síly zrovnoměňuje deformaci a zvětšuje tvařitelnost materiálu.

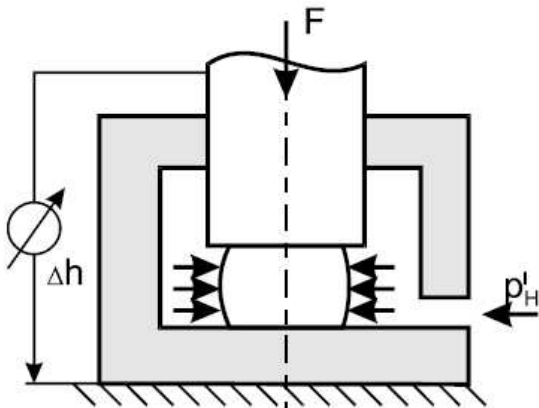


Proto se tento test užívá pro těžkotvařitelné materiály. Zkoušku vyhodnocujeme pomocí poměrné délky stlačení, ze které určujeme tvárnost materiálu. Tento druh zkoušky může být použit jako test, který napodobuje kování do zápustky.

Obr. 25 Pěchování s omezeným šířením [8]

2.5.6. Pěchovací zkouška za hydrostatického tlaku [1], [5]

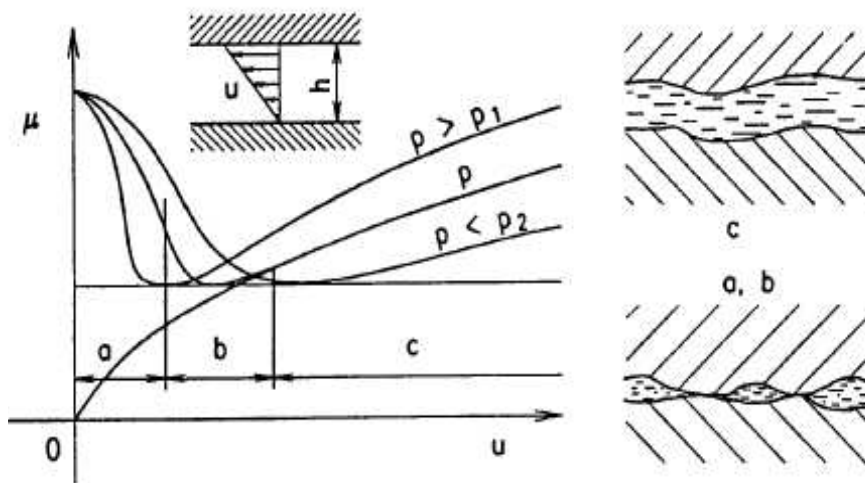
Je obdobou testu s omezeným šířením. Její použití je taktéž pro materiály s nízkou tvařitelností. Kapalina o vysokém tlaku způsobuje rovnoměrnou prostorovou napjatost, proto zkoušený materiál odolá větší plastické deformaci. Průběh zkoušky začíná vložením zkušební vzorku do tlakové komory, kde na vzorek působí silou kovádko lisu. Lis zároveň stlačuje kapalinu, která působí na zkoušený vzorek. Tímto způsobem je zajištěn rovnoměrný tlak na vzorek (obr. 26). Zkouškou vyhodnocujeme tvařitelnost materiálu.



Obr. 26 Schéma zkoušky za hydrostatického tlaku [5]

2.6. Tření a maziva [1],[12]

Důsledkem deformace vzorku, vzniká při pěchování mezi vzorkem a kovádkem, pohyb materiálu určitou rychlostí. To má za následek vznik tření mezi kovádkem a čelní plochou vzorku. Tření má ovšem při zkoušce negativní vliv na rovnoměrnost deformace, proto je snaha co nejvíce ho snížit. Závislost součinitele tření μ na rychlosti toku materiálu zobrazuje



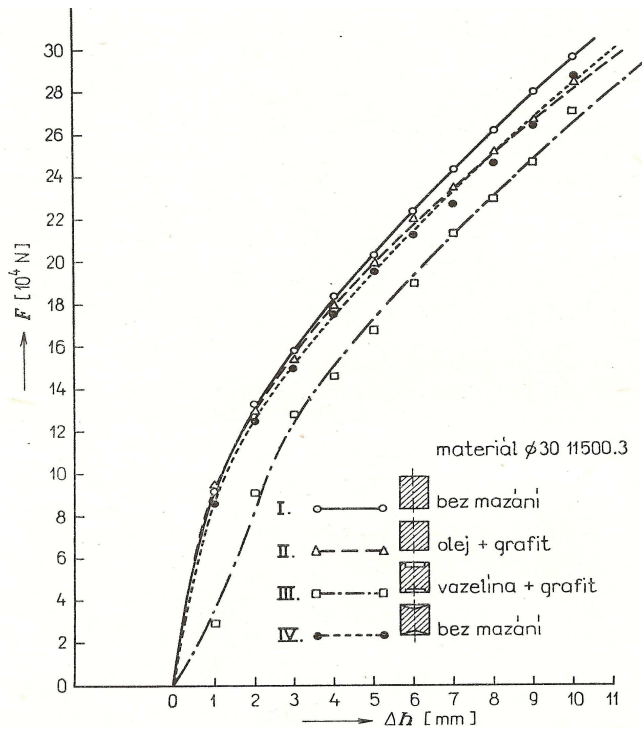
Stribeckův diagram (obr. 27). Z tohoto diagramu podle tlaku, který vzniká mezi styčnou plochou kovádku a vzorku určujeme druh tření:

- suché tření
- smíšené tření
- kapalinné tření

Obr. 27 Stribeckovy křivky závislosti součinitele tření μ na rychlosti u [12]

V praxi při pěchování vzniká nejčastěji tření smíšené. Tento druh tření je specifický tím, že mezi plochami je nesouvislá vrstva maziva, u které dochází k častým dotykům stýkajících se mikronerovností.

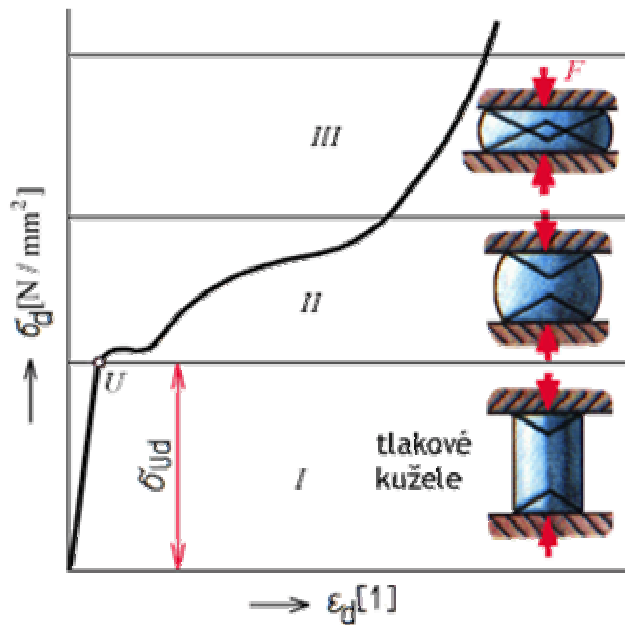
Aby bylo dosaženo co nejmenšího tření mezi nástrojem a pěchovaným tělesem používají se při zkoušce různé druhy maziv. Další variantou jak snížit tření mezi tělesem a nástrojem, je vhodná úprava zkušebních vzorků. V neposlední řadě je důležité opracování styčných ploch vzorku, broušením a leštěním. V dnešní době je používání maziv velmi rozmanité. Použité mazivo závisí nejvíce na teplotě, při které zkouška probíhá a mechanických vlastnostech zkoušeného materiálu. Pro zkoušky za studena se používají např. fólie teflonu, zinku, hliníku nebo vhodné slitiny, popřípadě grafit. Při zkoušce za tepla se používají různé druhy olejů, kyselina palmitá popřípadě směsi skla s příměsí metanolu a grafitu. Vhodnou volbou mazání



a dobrou povrchovou úpravou, (vhodným zkušebním vzorkem) můžeme snížit pěchovací sílu o 10 až 20 % (obr. 28).

Obr. 28 Vliv mazání na stlačovací sílu pro materiál 11 500.3 [1]

2.7. Vyhodnocování pěchovacích zkoušek [1], [3], [21]



U pěchovacích zkoušek se vyhodnocuje zejména tvařitelnost železných i neželezných kovů. Další aspekty které jsou vyhodnocovány jsou například mez pevnosti v tlaku, horní a dolní mez kluzu v tlaku, přetvárný odpor při pěchování a křivky zpevnění. Stejně jako u tahové zkoušky je výsledkem pracovní diagram pro tlakovou zkoušku (obr. 29).

Obr. 29 Pracovní diagram tlakové zkoušky pro tvárný materiál [21]

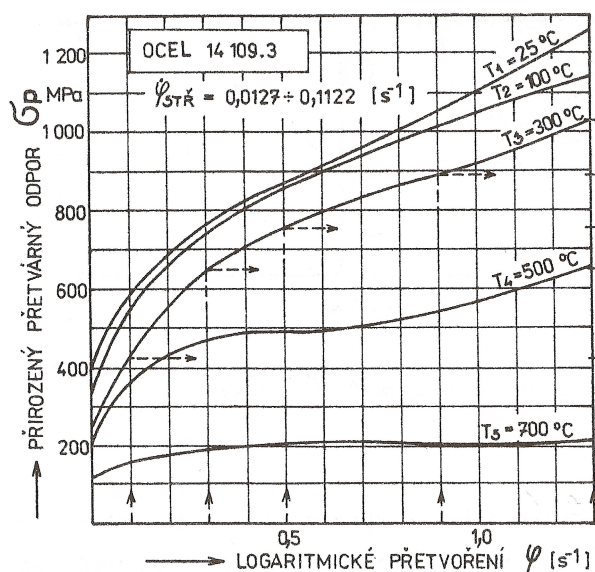
Pracovní diagram má tři fáze. První je lineární, kdy materiál odolává tlaku a tvoří se tzv. tlakové kužely. Ve druhé fázi se materiál začíná smýkat po kovadle, a to má za následek menší vzrůst deformačního napětí. V poslední třetí fázi, se k sobě přiblíží tlakové kužely, a tím začíná strmě stoupat napětí. Této fáze se dosahuje jen u dobře tvárných materiálů. U křehkých materiálů nastává lom bez plastické deformace - pouze fáze I.

Z pracovního diagramu můžeme určit následující vlastnosti materiálu:

- mez kluzu v tlaku σ_{Ud} [MPa]
- mez pevnosti v tlaku σ_{Pd} [MPa]
- stlačení Δh [mm]
- poměrné stlačení ε [-]
- logaritmické stlačení φ

2.7.1. Přetvárný odpor [3], [6]

Jednou z důležitých materiálových vlastností, která se při petchování určuje, je přetvárný odpor. Přetvárný odpor σ_p je odolnost materiálu vůči plastickým deformacím. Lze ho rozdělit



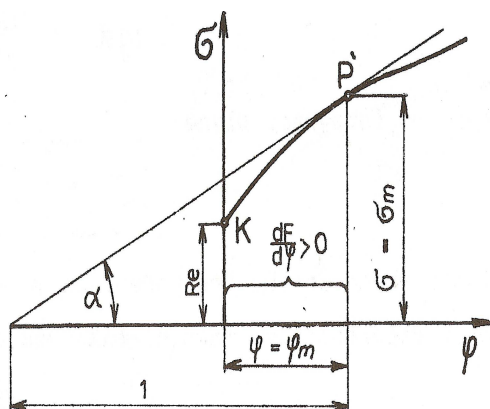
na přirozený a celkový. Přirozený odpor se určuje pro přesně stanovené podmínky, jako jsou konstantní teplota, rychlost přetvoření, chemické složení. Celkový odpor navíc zahrnuje vliv vnějšího tření a rozdíly teplot při zkoušce. Příklady křivek přetvárných odporů pro určitý materiál, teplotu a rychlost přetvoření, v závislosti na logaritmickém přetvoření, jsou vidět na obr. 30.

Obr. 30 Křivky přirozených přetvárných odporů v závislosti na logaritmickém přetvoření [2]

2.7.2. Křivky zpevnění [2]

Vyjadřují závislost skutečného přetvoření pro dané podmínky (teplota, rychlost přetvoření chemické složení) na přetvoření (obr. 31).

Zpevnění vzniká při plastických deformacích. Z toho tedy plyne, že křivky zpevnění se konstruují od meze kluzu R_e po mez pevnosti P' . Před mezí kluzu vznikají jen elastické deformace, které nemají vliv na zpevnění.

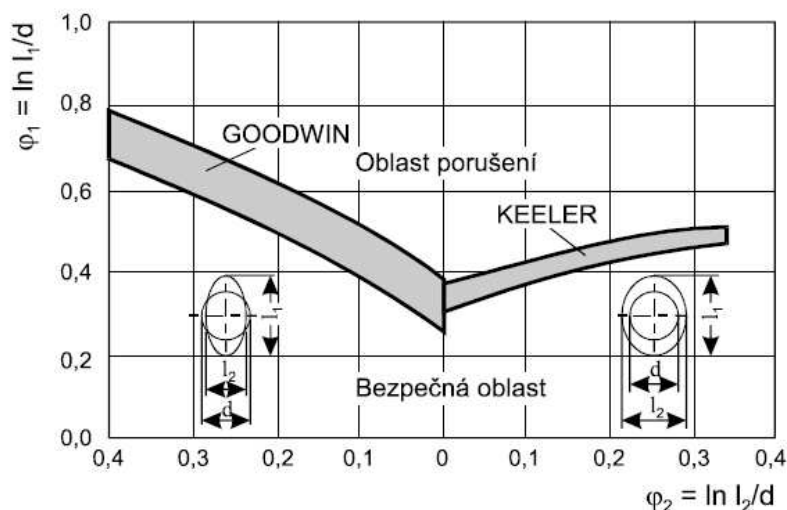


Následně za mezí pevnosti končí rovnoměrná deformace důsledkem vzniku trhliny na zkoušeném vzorku.

Obr. 31 Křivka zpevnění [2]

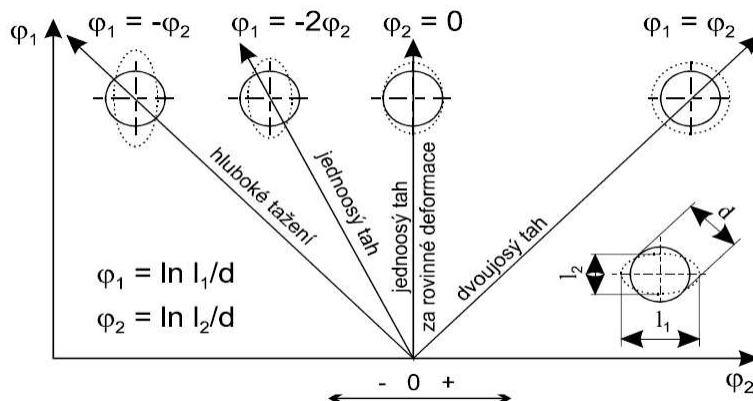
2.7.3. Limitní diagramy – FLD [5]

Tlakovou zkoušku je možné popsat dvěma způsoby. První způsob je kvalitativní (zda došlo k trhlině nebo ne). Druhý možný způsob popsání je kvantitativní pomocí limitních diagramů. Limitní diagramy začaly vznikat na začátku 60. let. Nejznámější mezní limitní diagram, v současnosti nejvíce používaný, je Keeler-Goodwinův (obr. 32). Diagram se skládá z pravé a levé části. Na osách jsou vyneseny hlavní deformace (φ_1 , φ_2). Diagram dělí Keeler-Goodwinovo pásmo na bezpečnou oblast (trhlinka při tváření nevznikne) a oblast porušení (vznik trhliny).



Do diagramu se vynášejí tzv. paprsky, které vycházejí z počátku souřadného systému. Jejich deformační cestu charakterizuje deformační napětí, které působí v tvářeném tělese (obr. 33).

Obr. 32 Keeler-Goodwinův diagram ve skutečných deformacích [5]



Obr. 33 Názorné příklady vynášení deformačních stop pro druhy plošné tváření [5]

2.8. Stroje pro pýchovací zkoušky [1], [17]

Pro pýchovací zkoušky se používají různé typy strojů s klidným statickým zatížením. Základní používané pýchovací stroje jsou mechanické a hydraulické lisy nebo jednoúčelové a univerzální pýchovací stroje (obr. 34a, b). Lisy se používají pro jednodušší zkoušky, kdy je potřebné zjistit základní údaje, a to zda je materiál vhodný k tváření. Speciální pýchovací stroje se nejvíce užívají v odborných laboratořích, kdy se shromažďuje co nejvíce informací o procesu a zkoušeném materiálu. Výhodou těchto strojů je zabudovaný software, který po zkoušce zpracuje a zobrazí potřebné informace o zkoušeném materiálu. Jednoznačná nevýhoda těchto strojů je jejich vysoká cena oproti lisům.

Ukázka univerzálních zkušebních strojů od firmy Tempos. Firma se zabývá prodejem a modernizací zkušebních strojů. Na obrázku jsou dva modernizované stroje, které se skládají ze dvou částí. První část je mechanická - lis a druhá elektronická - měřící software. O měření potřebných veličin, jako je síla a dráha se stará program M-TEST. Údaje získané ze snímačů jsou zpracovány externí měřící a řídicí jednotkou a zaslány k zaznamenání a vyhodnocení na osobní počítač. Program umožňuje v reálném čase graficky zobrazit průběh zatěžování materiálu ve zvolených osách.



Obr. 34a Modernizovaný stroj ZD 40 [17] Obr. 34b Modernizovaný stroj TIRAtest 2300 [17]

Hydraulický univerzální zkušební stroj s maximálním zatížením 400 kN. Je vhodný pro tahové, tlakové a ohybové zkoušky všech materiálů, vybaven řídicí jednotkou a softwarem pro záznam a vyhodnocení zkušebního procesu.

Elektromechanický univerzální zkušební stroj s maximálním zatížením 100 kN. Je vhodný pro tahové, tlakové a ohybové zkoušky všech materiálů, vybaven řídicí jednotkou a softwarem pro záznam a vyhodnocení zkušebního procesu.

2.9. Experiment

Na základě shromážděných teoretických poznatků, je pro ukázkou provedena praktická přechovací zkouška. Experiment je proveden na vzorku válcovém hladkém o průměru $d_0 = 14$ mm a výšce $h_0 = 22$ mm. Vzorek je připraven jako ústřížek drátu z oceli 8Mn2Si. Pro zkoušku je použit hydraulický lis CZR 600 (obr. 35) o maximální síle 6000 kN. K měření síly je použit tlakový dynamometr firmy HBM o jmenovité síle 1000 kN. K měření délky stlačení je využito indukčního snímače dráhy. Zesílení signálu od dynamometru provádí zesilovač KWS 6A-5 (obr. 36) od firmy HBM. Grafickým výstupem zkoušky je pracovní diagram tlakové zkoušky, který vykreslil liniový zapisovač (obr. 37).



Obr. 36 Zesilovač KWS 6A-5



Obr. 35 Hydraulický lis CZR 600



Obr. 37 Měřící prvky

Před začátkem testu je nejdříve nutné ocejchovat osy. Osa posunutí beranu lisu “ Δh ” je ocejchována pomocí nonius indukčního snímače a liniového zapisovače. Na obrázku 37 je snímač označen pozicí 1. Osa přechovací síly “ F ” je ocejchována dynamometrem - pozice 2. Uprostřed obrázku je vidět přechovací nástroj, do kterého se vkládá přechované těleso - pozice 3.

Při testu byly provedeny základní výpočty zkoušeného vzorku: výpočet soudečkovitosti B_s dle výrazu (2.10), poměrného přetvoření ε dle výrazu (2.11) a logaritmického přetvoření φ dle výrazu (2.12).

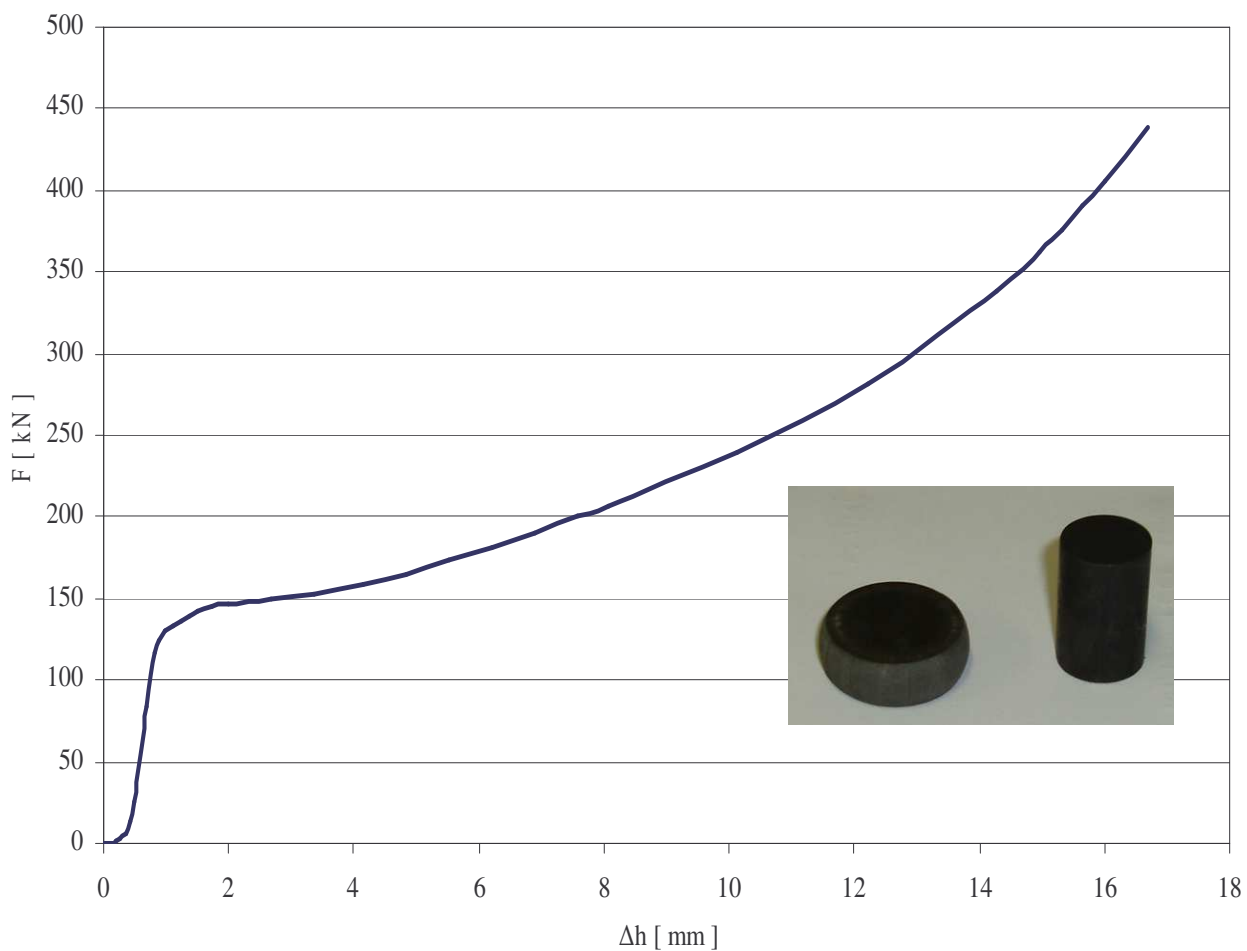
Odměřeno: $d_1 = 21,5$ mm, $d_2 = 23,5$ mm, $h_0 = 22$ mm, $h = 8,2$ mm.

$$B_s = \frac{d_1}{d_2} [-] = \frac{21,5}{23,5} = 0,915$$

$$\varphi = \ln \frac{h_0}{h} [-] = \ln \frac{22}{8,2} = 0,987$$

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h}{h_0} [-] = \frac{22 - 8,2}{22} = 0,627$$

Výsledkem experimentu je pracovní diagram tlakové zkoušky (obr. 38) vykreslený na milimetrový papír lineárním zapisovačem. Zkouška je ukončena při stlačení vzorku $\Delta h = 15$ mm. Při testu se na zkoušeném vzorku nevytvořily žádné trhliny.



Obr. 38 Pracovní diagram tlakové zkoušky

3. ZÁVĚR

Cílem práce bylo zhodnotit pēchovací zkoušky a zabývat se jejich významem pro strojírenskou praxi. Vzhledem k rozmanitosti a možnostem použití patří tlakové – pēchovací zkoušky k základním a nejvíce používaným zkouškám tvařitelnosti materiálů.

Největší vliv na zkoušku má materiál, který je pēchován. V nejčastějším případě se pēchuje ocel, a dále pak různé neželezné kovy a slitiny. Dalším důležitým faktorem je volba zkušebního tělesa. Tělesa lze rozdělit na tři základní typy: válcová, čtvercová a upravená. Pro zkoušku se volí podle druhu pēchovaného materiálu a potřebné přesnosti zkoušky. Nejčastěji se pro pēchování ocelí používají válcová hladká tělesa, a to hlavně pro jednoduchou výrobu a relativně přesný výsledek zkoušky. Pro přesné zkoušky se používají například tělesa s kuželovým vybráním na čelní ploše. Pro tvárné materiály se využívají tělesa s vrubem, z důvodu snížení houževnatosti tvářeného materiálu a taktěž snížení pracnosti při zkoušce.

Pēchovací zkoušky probíhají mezi dvěma rovnoběžnými rovinami a můžeme je rozčlenit dle jednotlivých provedení např.: zkoušky rovnými nebo kuželovými kovádky a speciální zkoušky (s omezeným šířením, za hydrostatického tlaku). Při zkoušce musí být zajištěno správné mazání stykových ploch, aby zkouška neztrácela na přesnosti.

Stroje k pēchování lze rozdělit na dva druhy: univerzální lisy a pēchovací stroje. Nejvíce používané jsou z hlediska ceny a dostupnosti univerzální hydraulické lisy, které jsou vybaveny měřicím softwarem.

Při vyhodnocování zkoušky jsou získávány potřebné informace pomocí měřicího softwaru. Tyto informace jsou konečné (mez pevnosti v tlaku, stlačení, příčné rozšíření...) nebo jsou z nich zpracovány diagramy (pracovní diagramy, křivky přetvárného odporu, limitní diagramy...).

Pro strojírenskou praxi se používají nejvíce zkoušky rovnými kovádky se vzorkem válcovým hladkým. Tato zkouška patří mezi méně náročné, jak na výrobu vzorku, tak na přípravu a provedení zkoušky. Udává základní informace o pēchovatelnosti zkoušeného materiálu, ze kterých posléze lze materiál posoudit, jestli je vhodný například pro kování, protlačování nebo výrobu součástí pēchováním. Při pēchování málo nebo špatně tvárných materiálů používáme speciální zkoušky např. s omezeným šířením nebo za hydrostatického tlaku. Tyto zkoušky napodobují v určité míře kování do zápustky a z toho vyplývá i jejich užívání.

Seznam použitých zdrojů

- [1] DRASTÍK, F., ELFMARK, J. *Plastometry a tvářitelnost kovů*. 1. vyd. Praha : SNTL, 1977. 392 s.
- [2] FOREJT, Milan, PÍŠKA, Miroslav. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vysoké učení technické v Brně. Brno : Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
- [3] FOREJT, Milan. *Teorie tváření*. 2. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2004. 167 s. ISBN 80-214-2764-7.
- [4] SOMMER, Boris. TVAŘITELNOST A NEROVNOUJEDNÁKOST DEFORMACE PŘI PĚCHOVÁNÍ. In *Sborník vědeckých prací Vysoké školy Báňské v Ostarvě*. 1. vyd. [s.l.] : [s.n.], 1979. řada hutnická. s. 189-207. Dostupný z WWW: <<https://dspace.vsb.cz/dspace/handle/10084/34280>>.
- [5] PETRUŽELKA, Jiří, SONNEK, Pavel. *Tvařitelnost kovových materiálů* [online]. 3 Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2006 , poslední aktualizace 9.1.2007 [cit. 2009-04-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.345.vsb.cz/jiripetruzelka/Texty/TvCELEupr.pdf>>.
- [6] TOMČÍK, P, TROJAN, R. *Laboratorní cvičení pro předmět Teorie tváření* [online]. 1 Ostrava : Katedra mechanické technologie, VŠB – TU Ostrava, 2007 [cit. 2009-04-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Texty/Skripta-Teorie%20Tv%E1%F8en%ED.pdf>>. ISBN 978–80–248–13.
- [7] ELFMARK, Jiří. *Tváření kovů*. 1. vyd. Praha : SNLT, 1992. 528 s. ISBN 80-03-00651-1.
- [8] FOREJT , M, HUMÁR, A, PÍŠKA, M, JANÍČEK, L. *EXPERIMENTÁLNÍ METODY* [online]. Brno. 2003 [cit. 2009-04-12]. Dostupný z WWW: <http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/experimentalni_metody__cviceni__forejt_piska_humar_janicek.pdf>.
- [9] DVOŘÁK, Milan, MAREČKOVÁ, Michaela . *Technologie tváření : Studijní opory pro kombinované studium I. stupeň, 2. ročník* [online]. Brno : 2006 [cit. 2009-04-10]. Dostupný z WWW: <http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/technologie_tvareni/index.htm>.
- [10] GAJDOŠ, František. *Technologie výroby I. - tváření* [online]. [2002] [cit. 2009-03-25]. Dostupný z WWW: <http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/technologie_vyroby_I__tvareni__gajdos.pdf>.
- [11] FOREJT , Milan. *Teorie tváření návody do cvičení* [online]. 1 Brno : 2002 [cit. 2009-04-28]. Dostupný z WWW: <http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/teorie_tvareni__navody_do_cviceni__forejt.pdf>.
- [12] KRAUS, V. *Povrchy a jejich úpravy* [online]. [2005] [cit. 2009-04-05]. Dostupný z WWW: <<http://tzs.kmm.zcu.cz/POUcelk.pdf>>.
- [13] 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.
- [14] POČTA, B. *Základy teorie tváření kovů*. 1. vyd. Praha : SNLT, 1966. 328 s.

- [15] JÍLEK, Ladislav, HOREČKA, Pavel. TVAŘITELNOST OCELI NA ŠROUBY A LOŽISKA ZA STUDENA. In *Metal 2008*. [s.l.] : [s.n.], 2008. s. 1-8. Dostupný z WWW: <<http://www.metal2009.com/sbornik/Lists/Papers/178.pdf>>.
- [16] *CZ FERMET prezentace : Materiálová zkušebna* [online]. c2008 [cit. 2009-04-04]. Dostupný z WWW: <<http://www.czfermet.cz/prezentace.pdf>>.
- [17] Tempos [online]. 2002-2007 , aktualizace 17.08.2005 [cit. 2009-04-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.tempos.cz/> >.
- [18] *Affri* [online]. Affri, [2000] [cit. 2009-04-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.affri.com/hardness-testers/TM500.asp?id=121>>.
- [19] *Informations about steel for metallographer* [online]. c2002 , Last modification : 26.11.2007 [cit. 209-04-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.metallograf.de/start-eng.htm?untersuchungen-eng/staucherprobung/staucherprobung.htm>>.
- [20] LENFELD, P. *Technologie II*. [online]. 2005 [cit. 2009-04-01]. Dostupný z WWW: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/index.htm>.
- [21] *Nauka o materiálu : Základní vlastnosti materiálů a jejich zkoušení* [online]. [2002] [cit. 2009-04-18]. Dostupný z WWW: <http://mujweb.atlas.cz/www/pk80/pub/st/data/st1/zk3_1.htm>.

Seznam použitých symbolů a zkratek

Označení	Legenda	Jednotka
a_0	Počáteční šířka vzorku	[mm]
a_1	Šířka vzorku po stačení	[mm]
a_2	Šířka vzorku po stačení	[mm]
b_t	Šířka plochého tělesa	[mm]
b_k	Šířka kovádky	[mm]
B_S	Koeficient soudečkovitosti	[-]
D	Aktuální průměr vzorku	[mm]
d_0	Počáteční průměr vzorku	[mm]
d_1	Průměr válcové části	[mm]
d_1	Průměr tělesa při vzniku trhliny	[mm]
d_2	Průměr soudečkovitého tělesa	[mm]
D_R	Poměr počáteční výšky a průměru	[-]
F	Síla	[N]
f	Součinitel tření	[-]
F_p	Pěchovací síla	[N]
h	Výška vzorku	[mm]
h	Výška plochého tělesa	[mm]
h_0	Počáteční výška vzorku	[mm]
h_1	Výška tělesa při vzniku trhliny	[mm]
l	Délka plochého tělesa	[mm]
n	Součinitel zpevnění	[-]
p	Tlak mezi styčnými plochami	[MPa]
p_H	Hydrostatický tlak	[MPa]
p_1	Mezní tlak pro suché tření	[MPa]
p_2	Mezní tlak pro kapalinné tření	[MPa]
r	Poloměr	[mm]
r_A	Poloměr r_A	[mm]
r_B	Poloměr r_B	[mm]
r_C	Poloměr r_C	[mm]
S	Průmět čelní plochy pěchovaného válce	[mm ²]
S	Konečný průřez zkoušeného tělesa	[mm ²]
S_0	Počáteční průřez zkoušeného tělesa	[mm ²]
u	Rychlost tření	[m·s ⁻¹]
u_0	Počáteční úhlopříčka vzorku	[mm]
u_1	Úhlopříčka vzorku po stačení	[mm]
u_2	Úhlopříčka vzorku po stačení	[mm]
V_c	Celkový objem	[m ³]
V_s	Objem soudečkovité části	[m ³]
V_v	Objem válcové části	[m ³]
α	Úhel zahloubení	[°]
Δh	Stlačení	[mm]
ε	Poměrné stačení	[-]
ε_{\max}	Maximální poměrná deformace průřezu	[-]
ε_{\min}	Minimální poměrná deformace průřezu	[-]
μ	Součinitel tření	[-]
σ_1	Napětí v ose x	[MPa]
σ_2	Napětí v ose y	[MPa]

σ_3	Napětí v ose z	[MPa]
σ_d	Deformační odpor	[MPa]
σ_p	Pěchovací napětí	[MPa]
σ_P	Přirozený přetvárný odpor	[MPa]
σ_P	Mez pevnosti v tlaku	[MPa]
σ_r	Radiální napětí	[MPa]
σ_t	Tečné napětí	[MPa]
σ_U	Mez kluzu v tlaku	[MPa]
σ_z	Osové napětí	[MPa]
σ_z	Střední osové napětí	[MPa]
τ_f	Smykové kontaktní napětí	[MPa]
φ	Logaritmické stalčení	[-]
φ_1	Deformace v ose x	[-]
φ_2	Deformace v ose y	[-]
φ_3	Deformace v ose z	[-]

Seznam obrázků

- Obr. 1 Průběh tahové zkoušky*
- Obr. 2 Univerzální torzní stroj pro zkoušku krutem*
- Obr. 3 Soustružená a pýchovaná součást*
- Obr. 4 Postupná výroba šroubu pýchováním*
- Obr. 5 Stav napjatosti při pýchování*
- Obr. 6 Schéma napjatosti v pýchovaném válcovém tělese*
- Obr. 7 Geometrický model řešení dle Siebela*
- Obr. 8 Geometrický model řešení dle Unksova*
- Obr. 9 Rozměry zkušebního tělesa před zkouškou a po provedení zkoušky*
- Obr. 10 Soudečkovitý tvar tělesa a jeho objemové části*
- Obr. 11 Graf závislosti soudečkovitosti na poměrné štíhlosti vzorku*
- Obr. 12 Místa s rozdílným přetvořením*
- Obr. 13 Oblasti s různou napjatostí*
- Obr. 14 Vzorek s rovnými čely*
- Obr. 15 Vzorek dle Rasťagajeva*
- Obr. 16 Vzorek dle Siebela a Pompa*
- Obr. 17 Vzorek čtvercového průřezu před a po zatížení*
- Obr. 18 Vzorek podle Kuda*
- Obr. 19 Vzorek podle Žídka*
- Obr. 20 Pýchovací zkouška tlakem pro ocel 12 013*
- Obr. 21 Závislosti pýchovací síly na posuvu kovadla pro tři vzorky z materiálu 12 013*
- Obr. 22 Zkouška pýchování ploché tyče*
- Obr. 23 Řez kovadlem se středícím kuželem*
- Obr. 24 Kovadlo s jehlanovitými výstupky*
- Obr. 25 Pýchování s omezeným šířením*
- Obr. 26 Schéma zkoušky za hydrostatického tlaku*
- Obr. 27 Stribeckovy křivky závislosti součinitele tření μ na rychlosti u*
- Obr. 28 Vliv mazání na stlačovací sílu pro materiál 11 500.3*
- Obr. 29 Pracovní diagram tlakové zkoušky pro tvárný materiál*
- Obr. 30 Křivky přirozených přetvárných odporů v závislosti na logaritmickém přetvoření*
- Obr. 31 Křivky zpevnění*
- Obr. 32 Keeler-Goodwinův diagram ve skutečných deformacích*
- Obr. 33 Názorné příklady vynášení deformačních stop pro druhy plošné tváření*
- Obr. 34a Modernizovaný stroj ZD 40*
- Obr. 34b Modernizovaný stroj TIRAtest 2300*
- Obr. 35 Hydraulický lis CZR 600*
- Obr. 36 Zesilovač KWS 6A-5*
- Obr. 37 Měřící prvky*
- Obr. 38 Pracovní diagram tlakové zkoušky*