

Modul praktických cvičení z predmetu TEÓRIA TVÁRNENIA

Prerekvizity

Na absolvovanie predmetu Teória tvárnenia sa predpokladá absolvovanie predmetov Základy výrobných technológií I. a Technológia tvárnenia.

Cieľ

Cieľom učebného materiálu je podpora pri štúdiu problematiky hodnotenia základných a technologických vlastností materiálov, ktoré determinujú ich aplikáciu v procesoch plošného a objemového tvárnenia.

Po absolvovaní problematiky predmetu Teória tvárnenia študent by mal byť schopný aplikovať a prehĺbiť si ich v oblasti Experimentálnych metód hodnotenia vlastností materiálov a aj v oblasti Progresívnych metód tvárnenia a Modelovania a simulácií procesov tvárnenia.

Pre koho je predmet určený

Modul praktických cvičení z predmetu TEÓRIA TVÁRNENIA je určený pre študentov inžinierskeho štúdia študijného programu Výrobné technológie a výrobný manažment, ale aj pre študentov príbuzných študijných programov, pokiaľ spĺňajú požadované prerekvizity.

Modul je členený na 6 odborných oblastí, a to na:

- 1 Plasticita a tvárniteľnosť materiálov v plošnom a objemovom tvárnení.
- 2 Hodnotenie technologických vlastností materiálov.
- 3 Deformačné starnutie materiálov.
- 4 Hodnotenie pretvorenia materiálu.
- 5 Plošná a normálová anizotropia materiálov.
- 6 Deformačné odpory materiálov.

1 Plasticita a tvárniteľnosť materiálov v plošnom a objemovom tvárnení

	ČAS NA ŠTÚDIUM	2 h 45 min
	CIEĽ	Po preštudovaní problematiky budete mať vedomosti a znalosti z oblasti hodnotenia plasticity a tvárniteľnosti materiálov pre plošné a objemové tvárnenie.

Budete vedieť experimentálne vyhodnotiť:

- charakteristiky pevnosti materiálu (R_e ; R_m),
- charakteristiky húževnatosti materiálov (A , Z),
- vybrané ukazovatele plasticity (R_e/R_m ; A_{sh}).

	INFORMÁCIE	
---	------------	--

1.1 Hodnotenie vlastností materiálov skúškou jednoosovým ťahom

Materiály majú vlastnosti, ktoré rozhodujú o ich použití v rôznych aplikáciách. Mechanické vlastnosti opisujú správanie sa materiálu pri mechanickom zaťažovaní. Sú determinované najmä chemickým zložením a mikroštruktúrou materiálu. Tieto vlastnosti je možno zistiť mechanickými skúškami. Tie sa vykonávajú v laboratórnych podmienkach a simulujú namáhanie materiálu pri jeho bežnom používaní. Skúšky zahŕňajú rôzne vplyvy, či už premenlivé zaťažovanie, zvýšenú prevádzkovú teplotu a pod. Skúška jednoosovým ťahom sa realizuje pri malých deformačných rýchlostiach ($2 \text{ až } 20 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$), pričom veľkosť zaťažujúcej sily pomaly, spojitاً narastá. Skúša sa najčastejšie vykonáva pri teplote v rozsahu teplôt od 10 do 35°C , ale v prípade potreby, je možné skúšať materiály aj pri vyšších (podľa normy STN EN ISO 6892-2) alebo nižších teplotách (podľa normy STN EN ISO 6892-3). Princíp skúšky spočíva v meraní deformácie vzorky zaťažovanej jednoosovou napätosťou. Zvyčajne skúška trvá do okamihu, kedy dôjde k pretrhnutiu vzorky. Skúšobné teleso je jedným koncom pripevnené k zariadeniu, snímajúcemu pôsobiacu silu. Druhý koniec je spojený s pohyblivou časťou stroja (Obr. 1).



Obrázok 1 Skúšobné zariadenie na skúšku jednoosovým ťahom

Výstupom skúšky sú tri druhy informácií:

- a) hodnoty mechanických vlastností (charakteristik pevnosti (R_e , R_m) a húževnatosti (A , Z)),
- b) diagram, opisujúci závislosť meraných parametrov (diagram $F/\Delta l$ alebo σ/ϵ),
- c) údaje o lome.

1.1.1 Tvary a rozmery skúšobných vzoriek

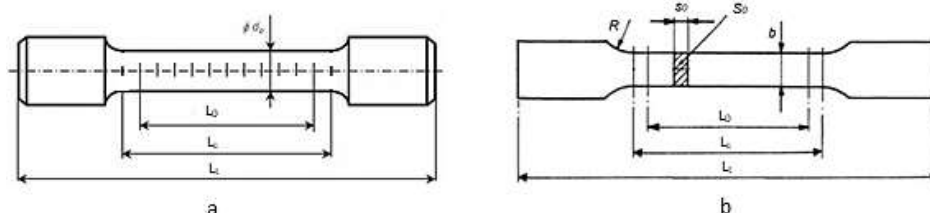
Bežne vyrábané materiály nemajú v dôsledku technologických procesov homogénne zloženie a sú anizotropné. To znamená, že telesá odobraté z rôznych miest výrobku majú odlišné vlastnosti. Z toho dôvodu je dôležité klásť dôraz na to, aby skúšobné telesá vhodne reprezentovali vlastnosti vzorky. Tá musí byť dosť veľká na to aby poskytla dostatočné skúšobné teleso, požadované na vykonanie skúšok a ich opakovanie. Skúšobné telesá môžu mať rôzne prierezy. Výhodné je však používať také, ktoré majú

jednoduchý geometrický tvar. Najčastejšie používané sú s prierezom kruhovým, štvorcovým a prstencovým. Vo zvláštnych prípadoch je možné použiť aj iné typy prierezov.

Klasifikácia skúšobných vzoriek/tyčí je:

- a) skúšobné telesá používané pre tenké výrobky: plechy, pásy a ploché výrobky s hrúbkou od 0,1 mm do 3 mm,
- b) skúšobné telesá používané pre drôty, tyče a profily s priemerom alebo hrúbkou nepresahujúcou 4 mm,
- c) skúšobné telesá používané pre plechy a ploché výrobky s hrúbkou najmenej 3 mm, a drôtov, tyčí a profilov s priemerom alebo hrúbkou najmenej 4 mm,
- d) skúšobné telesá používané pre rúry.

Celková dĺžka skúšobných telies (Obr. 2) L_t závisí najmä na veľkosti výrobku. Na skúšobnom telese sa jemnými značkami alebo ryskou označuje začiatočná meraná dĺžka L_0 . Ide o časť skúšobného telesa, na ktorej sa robia merania pre charakteristiky húževnatosti. Norma stanovuje jej minimálnu hodnotu na 15 mm. Pri skúšobných telesách s prechodovými polomerami sa zavádza pojem skúšaná dĺžka L_c . Pri vzorkách bez prechodových polomerov táto dĺžka označuje vzdialenosť medzi upínacími koncami.



Obrázok 2 Skúšobná vzorka/tyč na skúšku jednoosovým ťahom
 a – pre hodnotenie objemovej tvárnosti (vzorka s kruhovým prierezom),
 b – pre hodnotenie plošnej tvárnosti (plochá skúšobná vzorka)

Podľa toho, či existuje závislosť medzi parametrami skúšobných telies sa rozlišujú **telesá pomerné** a **telesá nepomerné**.

• Pomerné skúšobné telesá

Pomerné skúšobné telesá sú prednostne používané, nakoľko ich rozmery majú zhodný pomer medzi začiatočnou meranou dĺžkou L_0 a začiatočným prierezom S_0 . Táto závislosť je definovaná vzťahom:

$$L_0 = k \cdot \sqrt{S_0} \quad (1.1)$$

kde L_0 – začiatočná meraná dĺžka (mm),
 k – súčiniteľ proporcionality (-),
 S_0 – začiatočný meraný prierez (mm²).

Veľkosť súčiniteľa k je medzinárodne používaná a stanovená na hodnotu $k = 5,65$. Pre prípady, kde je začiatočný prierez príliš malý a veľkosť meranej dĺžky by bola menšia ako minimálna normou stanovená hodnota je možné použiť $k = 11,3$ alebo nepomerné skúšobné telesá.

Hodnoty súčiniteľa proporcionality vychádzajú z výpočtu začiatočnej meranej dĺžky pre tyč kruhového prierezu, pričom sú definované tyče krátke ($L_0 = 5 \cdot d_0$) a tyče dlhé ($L_0 = 10 \cdot d_0$). Začiatočná meraná dĺžka môže byť zaokrúhlená na najbližší násobok 5 mm. Zaokrúhlenie by však nemalo byť väčšie ako 10 % L_0 . Pre skúšobné telesá kruhového prierezu, ktoré sú vyrobené z drôtov a tyčí s priemerom minimálne 4 mm sa odporúča voľiť priemer telesa d_0 20, 14, 10 alebo 5 mm. Prípadne zvoliť hodnoty dĺžky L_0 100,

70, 50 alebo 25 mm, ktoré odpovedajú príslušným hodnotám priemeru telesa d_0 a pre súčiniteľ proporcionality $k = 5,65$. Podobne možno získať aj rozmery pre súčiniteľ $k = 11,3$ zo vzťahu (1.1).

▪ **Nepomerné skúšobné telesá**

Pre nepomerné skúšobné telesá neplatí závislosť medzi začiatočnou meranou dĺžkou a začiatočným prierezom. Začiatočná meraná dĺžka L_0 sa často označuje radou prekrývajúcich sa meraných dĺžok.

Pri skúšobných telesách, používaných pre tenké výrobky s hrúbkou od 0,1 mm do 3 mm sa používajú 3 druhy geometrie nepomerného skúšobného telesa, ktoré sú uvedené v tabuľke 1.

Tabuľka 1 Rozmery skúšobných telies od 0,1 mm do 3 mm

Druh skúšobného telesa	Šírka b_0 (mm)	Začiatočná meraná dĺžka L_0 (mm)	Minimálna skúšaná dĺžka L_{cmin} (mm)
1	12,5 ±1	50	57
2	20 ±1	80	90
3	25 ±1	50	60

Pre skúšobné telesá používané pre plechy a ploché výrobky s hrúbkou nad 3 mm sú rozmery uvedené v tabuľke 2.

Tabuľka 2 Rozmery skúšobných telies s hrúbkou nad 3 mm

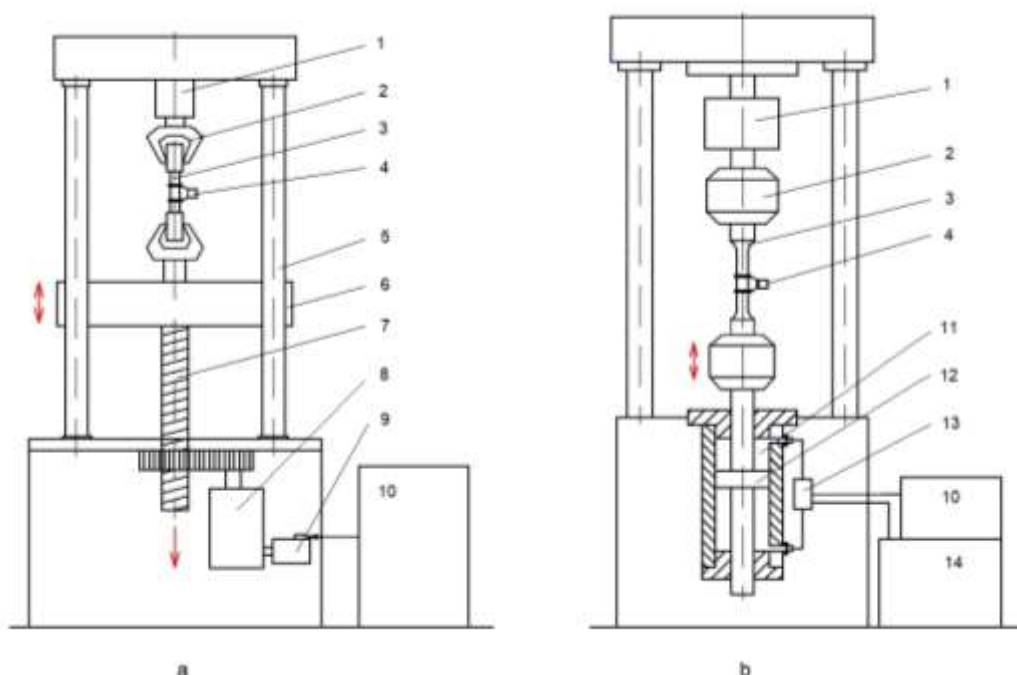
Šírka b_0 (mm)	Začiatočná meraná dĺžka L_0 (mm)	Minimálna skúšaná dĺžka L_{cmin} (mm)
40	200	220
25	200	215
20	80	90

1.1.2 Skúšobné stroje

Skúška jednoosovým ťahom sa realizuje na špeciálnych alebo univerzálnych zariadeniach. Na univerzálnych je možné vykonávať aj skúšky tlakom, krutom, ohybom a ďalšie. Väčšina týchto strojov taktiež poskytuje tiež vykonávanie statických aj dynamických skúšok. Všeobecne skúšobné stroje pre ťahovú skúšku pracujú na elektromechanickom princípe (Obr. 3a) alebo princípe hydraulickom (Obr. 3b). Základné časti skúšobných zariadení sú uvedené na Obr. 3.

Elektromechanické a hydraulické stroje majú rôzny rozsah aplikovaného zaťaženia. Elektromechanické stroje sa zvyčajne používajú pre menšie zaťaženia, kde sa mení rotačný pohyb produkovaný elektromotorom na lineárny posuvný pohyb. Hydraulické zariadenia sú tvorené obvodom, ktorý obsahuje čerpadlo a valec s piestom. Čerpadlo vytvára tlakovú kvapalinu, ktorej účinok spôsobuje pohyb piestu vo valci. Tento typ zaťažovania umožňuje pracovať s vyššími silami a rýchlosťami a má aj hladký chod stroja. Prenos zaťaženia na skúšobné teleso je realizovaný pomocou rámu cez upínacie zariadenie. Často je tvorený dvomi alebo štyrmi stĺpmi. Tie sú spojené priečnikmi, pričom jeden z priečnikov je pevne uchytený a druhý sa môže pohybovať. Pri hydraulických strojoch je možné využívať stĺpy aj ako vretená a umožňujú tiež prestavenie priečnika.

Na meranie sily pri ťahovej skúške sa využívajú dynamometre, prípadne snímače sily. Prístroje na meranie deformácie zvyčajne získajú hodnoty merania z posuvov priečnika, čo nemusí poskytovať dostatočnú presnosť pri meraní niektorých charakteristík.



Obrázok 3 Skúšobné zariadenie na skúšku jednoosovým ťahom

a – elektromechanické skúšobné zariadenie, b – hydraulické skúšobné zariadenie

1 – zariadenie na meranie sily, 2 – upínacie zariadenie, 3 – skúšobná vzorka, 4 – prietahomer, 5 – rám stroja, 6 – pohyblivý priečník, 7 – vreteno, 8 – prevodovka, 9 – elektromotor, 10 – ovládanie, 11 – valec, 12 – piest, 13 – ventil, 14 – hydraulický agregát

Na meranie modulu pružnosti v ťahu E , zmluvnej medze skľuzu R_e a ďalších veličín je potreba merať malé deformácie. K tomuto účelu slúžia prietahomery (extenzometre). Tie bývajú často v priamom kontakte so skúšobným telesom počas zaťažovania. Podľa princípu merania sa rozdeľujú na:

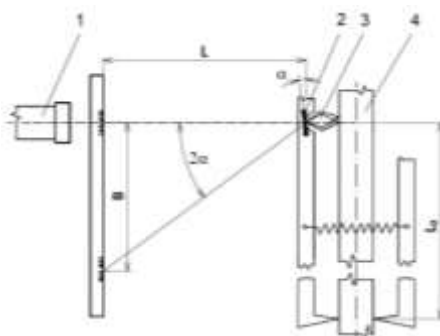
- Mechanické prietahomery.
- Opticko-mechanické prietahomery.
- Elektrické prietahomery.
- Laserové prietahomery.
- Video prietahomery.

a) Mechanické prietahomery

Zvyčajne mechanické prietahomery fungujú na pákovom princípe. Na skúšobnej tyči sú pripevnené kolmo na meraciu dĺžku dve ramená. Jedno z ramien je pevné a druhé tvorí páku, ktorej koniec je spojený s indikátorom prístroja. Pri zaťažení telesa indikátor zobrazuje odchýlku úmernú reálnej deformácii telesa.

b) Opticko-mechanické prietahomery

Najznámejším opticko-mechanickým prietahomerom je Martensov zrkadlový prietahomer (Obr. 4). Princíp spočíva v natáčaní zrkadla, ktoré reflektuje dve stupnice. Tie sú od zrkadla vzdialené o dĺžku L . V nezaťaženom stave je zrkadlo rovnobežné s osou skúšobného telesa. Pri jeho deformácii sa natáča hranol kosodĺžnikového prierezu, čo spôsobuje natočenie zrkadla o uhol α voči osi vzorky. Odraz zrkadla zvierá s osou ďalekohľadu uhol 2α . Rozdiel pred a po zaťažení vymedzuje vzdialenosť B . Následne sa dopočíta dĺžka ΔL . Okrem spomínaného prietahomeru sa tiež používa Tuckermannov, ktorý funguje na podobnom princípe.

**Obrázok 4** Princíp Martensovho prietáhomeru

1 – optické zariadenie, 2 – zrkadlo, 3 – hranol, 4 – skúšobné teleso

c) Elektrické prietáhomery

Elektrické prietáhomery pracujú na tenzometrickom, indukčnom alebo kapacitnom princípe.

- Tenzometre pracujú na princípe zmeny odporu pri ich deformácii. Môžu byť v drôtikovom, fóliovom alebo polovodičovom prevedení. Tenzometre taktiež umožňujú meranie pôsobiaceho zaťaženia.
- Indukčné snímače využívajú zmenu magnetických vlastností. K tej môže dôjsť pohybom magnetického jadra alebo vzduchovej medzere.
- Kapacitné snímače (Obr. 5), fungujú na základe zmeny kapacity v závislosti na vzdialenosti vodivých plôch.

**Obrázok 5** Kapacitný extenzometer**d) Laserové prietáhomery**

Laserové prietáhomery umožňujú bezkontaktné meranie deformácii. Sú vhodné aj pre prácu pri vyšších teplotách okolia. Prevažne sú tvorené laserovou diódou a otočným zrkadlom. Lúč prechádza zrkadlom a láme sa. Na skúšobnom telese sú reflektujúce body, ktoré vymedzujú dĺžku L_0 . Potom ako lúč narazí na tieto body, vracia sa do detektora. Tento cyklus sa opakuje počas celého priebehu skúšky.

e) Video prietáhomery

Video prietáhomery sa radia medzi bezkontaktné prietáhomery. Hlavnou časťou je vysokorýchlostný fotoaparát (Obr. 6). Snímky sa prenášajú do počítača, kde sa ďalej vyhodnocujú. Deformácia sa určí zo zmeny vzdialenosti značiek, vymedzujúcich začiatočnú meranú dĺžku.



Obrázok 6 Video extenzometer

1.1.3 Vyhodnocovanie skúšky jednoosovým ťahom

Pri hodnotení skúšky jednoosovým ťahom sa vychádza zo zmluvnej (dohovorenej) závislosti napätia a deformácie (Obr. 7), ktoré sa získava výpočtom podľa:

$$R = \frac{F}{S_0} \quad (1.2)$$

kde R – dohovorené napätie (MPa),
 F – okamžitá sila (kN),
 S_0 – začiatkový meraný prierez skúšobnej vzorky (mm²).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (1.3)$$

kde ε – pomerné pretvorenie (predĺženie) (-),
 ΔL – absolútna zmena (predĺženie skúšobného telesa ($L - L_0$)) (mm),
 L – meraná dĺžka tyče v danom okamihu zaťažovania (mm).

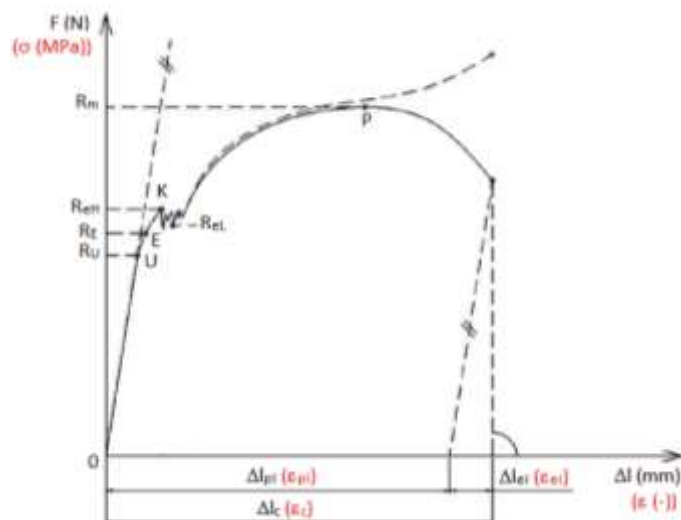
Lineárna časť diagramu predstavuje oblasť, v ktorej dochádza k elastickej deformácii materiálu. Meraním predĺženia telesa snímačom, umiestneným na povrchu telesa je táto priamka opísaná Hookeovým zákonom, ktorý je definovaný vzťahom:

$$R = E \cdot \varepsilon \quad (1.4)$$

kde E – modul pružnosti v ťahu (MPa).

V ďalšej časti diagramu dochádza ku vzniku plastickej deformácie. Materiál sa v tejto oblasti deformuje rovnomerne. Uplatňuje sa zákon zachovania objemu. Deformačné spevnenie materiálu spôsobuje nárast pôsobiaceho napätia. Táto oblasť končí, keď začne dochádzať k tvorbe krčku.

Ďalšia časť diagramu je charakterizovaná až do okamihu pretrhnutia skúšobnej tyče a je sprevádzaná poklesom pôsobiaceho napätia. Nastáva po prekročení medzného stavu plastickej nestability. Deformácia vzniká len v mieste krčku. V tomto mieste dochádza k nárastu počtu a veľkosti porúch do okamihu, kedy sa vytvorí trhlinka, ktorá sa šíri pokiaľ nevzniknú vhodné podmienky pre lom skúšobného telesa. Vyhodnotením zmluvnej závislosti sa získavajú zmluvné napäťové a deformačné charakteristiky. Z napäťových zmluvných charakteristík alebo tiež nazývaných charakteristík pevnosti sa využívajú najmä medza sklzu R_e a pevnosť v ťahu R_m . Medzi deformačné zmluvné charakteristiky alebo tiež nazývané charakteristiky húževnatosti patrí ťažnosť A , zúženie Z a ďalšie.



Obrázok 7 Záznam zo skúšky jednoosovým ťahom
(—) zmluvný (dohovorený) priebeh, (- - -) skutočný priebeh

▪ Dohovorené charakteristiky pevnosti

a) Medza sklzu

Medza sklzu R_e je hodnota napätia, pri ktorej dochádza k vzniku plastickej deformácie. U kovových materiálov táto hodnota predstavuje veľkosť napätia, ktoré je potrebné pre pohyb alebo sklz dislokácií. V závislosti na tvare diagramu v oblasti prechodu medzi elastickou a plastickou deformáciou sa rozlišuje výrazná medza sklzu R_e , alebo dohovorená nevýrazná medza sklzu R_p . Medzu sklzu R_e je možno určiť zo závislosti pôsobiacej sily na predĺžení. Pri niektorých materiáloch, akými sú napr. nízkouhlíkové ocele, sú identifikované dolná medza sklzu R_{eL} a horná medza sklzu R_{eH} , čo je najvyššie napätie na konci elastickej deformácie. Možno ich získať výpočtom zo vzťahov (1.5) a (1.6):

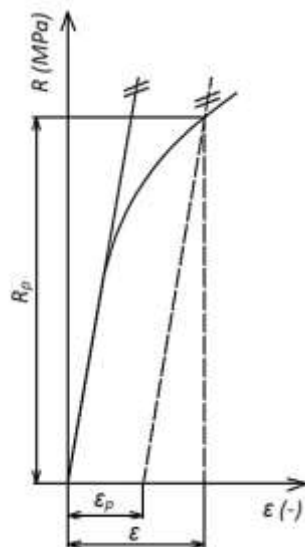
$$R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_0} \quad (1.5)$$

$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0} \quad (1.6)$$

kde R_{eH} – horná medza sklzu (MPa),
 R_{eL} – dolná medza sklzu (MPa),
 F_{eH} – maximálna sila, predchádzajúca prvému poklesu zaťaženia (kN),
 F_{eL} – najnižšia sila pri plastickom sklze (kN),
 S_0 – začiatočný meraný prierez skúšobnej vzorky (mm²).

V mnohých prípadoch dochádza k tomu, že pri poklese napätia z hornej medze sklzu je napätie takmer konštantné. Deformácia v tejto oblasti sa nazýva Lüdersova deformácia. Tento jav nastáva v dôsledku silného uchytenia dislokácií v materiály. Intersticiálne atómy sa zhromažďujú okolo dislokácií, čo spôsobuje, že pre ich sklz je nutné na teleso pôsobiť napätím o veľkosti R_{eH} . Až potom ako napätie dosiahne túto hodnotu sa dislokácie začnú pohybovať, čím dochádza k rýchlemu poklesu napätia na dolnú medzu sklzu. Lüdersova deformácia je nežiadúca pri hlbokom ťahaní plechu, pretože je sprevádzaná zvýšením drsnosti povrchu súčiastky. U materiálov s nevýraznou

medzu sklzu sa určuje dohovorená medza sklzu R_p . Vo väčšine prípadov sa táto medza vyjadří ako napätie, pri ktorom trvalá plastická deformácia dosiahne hodnotu $\varepsilon_p = 0,002$. Rovnako ako pri zisťovaní modulu pružnosti E sa odporúča použiť na meranie snímač predĺženia. Veľkosť plastickej deformácie sa zapisuje ako index, ku označeniu danej zmluvnej medze napr. $R_{p0,2}$. Túto hodnotu je možné získať zo závislosti napätie – deformácia (σ - ε) alebo sila – predĺženie, vynesení priamky, ktorá je rovnobežná s lineárnou časťou závislosti (Obr. 8). Na určenie zo závislosti napätie – deformácia je priamka vo vzdialenosti, pri ktorej veľkosť pomerného predĺženia odpovedá stanovenej hodnote plastickej deformácie ε_p . Celkové pomerné predĺženie ε je dané súčtom elastickej ε_e a plastickej deformácie ε_p . Hodnota napätia, pri ktorej priamka pretne závislosť ťahového diagramu odpovedá zmluvnej medze sklzu R_p . Pri jej výpočte sa postupuje podľa vzťahu:



Obrázok 8 Určenie zmluvnej nevýraznej medze sklzu

b) Pevnosť v ťahu

Pevnosť v ťahu R_m je maximálna hodnota napätia v ťahovom diagrame. Pre tvárne materiály je rovná napätiu v okamihu vytvorenia krčku. Následne dochádza k porušeniu súdržnosti materiálu, resp. lomu telesa, keď napätie dosiahne hodnoty lomového napätia R_f . U materiálov, v ktorých dochádza k lomu bez toho, aby sa vytvoril krčok je hodnota lomového napätia R_f rovná hodnote pevnosti v ťahu. Pevnosť v ťahu sa vypočíta ako podiel maximálnej sily F_m a začiatočného prierezu S_0 :

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (1.7)$$

kde R_m – pevnosť v ťahu (MPa),
 F_m – maximálna zaťažovacia sila (kN),
 S_0 – začiatočný meraný prierez skúšobnej vzorky (mm²).

▪ Dohovorené charakteristiky húževnatosti

a) Ťažnosť

Ťažnosť A je zmluvná deformačná charakteristika. Kvantitatívne vyjadruje hodnotu tvárnosti. Súvisí s plastickou deformáciou telesa. Materiál, ktorý sa deformuje elasticky veľmi málo alebo vôbec, je krehký. Tvárny materiál sa pred porušením deformuje plasticky a až po prekonaní určitej hodnoty napätia dochádza ku plastickému porušovaniu. Ťažnosť sa zisťuje zo začiatočnej meranej dĺžky L_0 a dĺžky tyče po pretrhnutí L_u . Hodnota ťažnosti teda závisí na začiatočnej meranej dĺžke.

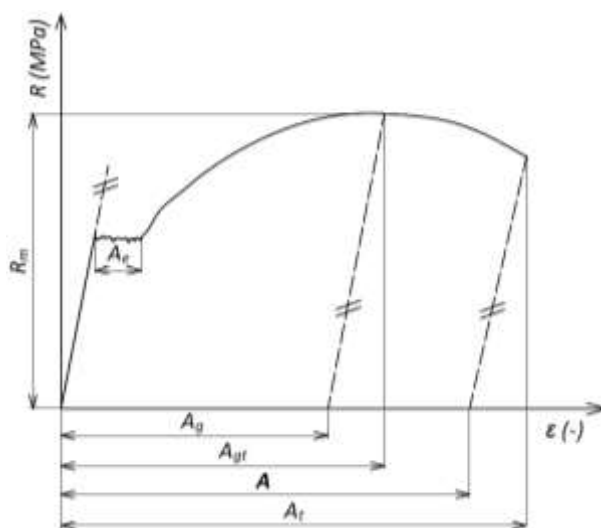
Dĺžka L_u sa určí tak, že pretrhnuté časti sa dajú k sebe, aby ich osi ležali na jednej priamke a zmeria sa dĺžka vymedzená označením dĺžky L_0 . Ťažnosť v percentách sa potom vypočíta podľa vzťahu:

$$A = \frac{L_R - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad (1.8)$$

kde A – ťažnosť (%),
 L_R – meraná dĺžka po pretrhnutí (mm).

Jednou z možností je merať ťažnosť prietahomerom. Vtedy je ale nutné odčítať od hodnoty celkového predĺženia elastickú deformáciu. Pre pomerné telesá, u ktorých hodnota súčiniteľa k nie je 5,65, sa odporúča, aby sa značka ťažnosti doplnila dolným indexom, ktorý vyjadruje hodnotu súčiniteľa k . Pre nepomerné telesá by sa mala značka ťažnosti doplniť indexom, udávajúcim začiatočnú meranú dĺžku v milimetroch napr. A_{80} . S ťažnosťou A súvisia ďalšie deformačné charakteristiky (Obr. 9), a to:

- a) predĺženie na výraznej medzi sklzu A_e ,
- b) plastické predĺženie pri maximálnom zaťažení A_g ,
- c) celkové predĺženie pri maximálnom zaťažení A_{gt} ,
- d) celková ťažnosť A_t .



Obrázok 9 Klasifikácia ťažnosti

b) Zúženie

Ďalšou deformačnou charakteristikou je zúženie, taktiež označované ako kontrakcia. Vyjadruje zúženie prierezu skúšobného telesa. Zúženie sa počíta zo začiatočného prierezu S_0 a z prierezu po pretrhnutí telesa S_u , podľa vzťahu:

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 \quad (1.9)$$

kde Z – zúženie (%),
 S_u – najmenší prierez telesa po pretrhnutí (mm²).

Zúženie u skúšobných telies kruhového prierezu je možné vypočítať vzťahom (1.10), ktorý vznikol úpravou vzťahu (1.9).

$$Z = \frac{d_0^2 - d_{u0}^2}{d_0^2} \cdot 100 \quad (1.10)$$

kde d_u – najmenší priemer telesa po pretrhnutí (mm),
 d_0 – začiatočný priemer telesa (mm).

1.1.4 Ukazovatele plasticity za studena

Súčasťou hodnotenia vlastností materiálov a ich odporúčenia pre procesy tvárnenia, okrem vyššie uvedených parametrov, je aj hodnotenie ukazovateľov plasticity.

K ukazovateľom plasticity možno zaradiť: $R_{p0,2}/R_m$ (pomer pevnostných charakteristík); n (exponent spevnenia), $\varphi_{krč}$ (pretvorenie v krčku); A_{sh} (statická húževnatosť), A_H (súčiniteľ plošnej anizotropie); Δr (stupeň plošnej anizotropie); r (súčiniteľ normálovej anizotropie); r_s (stredná hodnota normálovej anizotropie); **tvar a rozmer krčka po lome; veľkosť zrna; nevýrazná medza sklzu**; $\dot{n}$ (exponent citlivosti na spevnenie); i (intenzita spevnenia materiálu); s (stupeň spevnenia materiálu); φ_{max} (maximálna intenzita plastickej deformácie); $\Delta\sigma$ (starnutie materiálu).

A. Pomer pevnostných charakteristík

Veľmi dobrým ukazovateľom plasticity je pomer medze sklzu R_e a pevnosti v ťahu R_m (1.11). Tento pomer pri dobrých plastických vlastnostiach materiálu dosahuje hodnoty do 0,7. Kovové materiály s veľmi dobrou plasticitou dosahujú hodnoty 0,65.

$$\frac{R_e}{R_m} \leq 0,7 \quad (1.11)$$

B. Exponent spevnenia

$$n = \varphi_{krč} \quad (1.12)$$

C. Pretvorenie v krčku

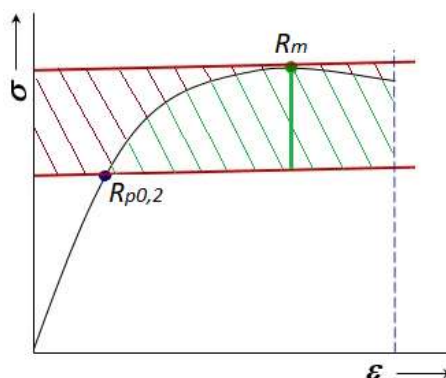
$$\varphi_{krč} = \ln \frac{S_{krč}}{S_0} \quad (1.13)$$

kde $S_{krč}$ – najmenší prierez telesa po pretrhnutí (mm²),
 S_0 – začiatočný prierez telesa (mm²).

D. Statická húževnatosť

Ukazovateľ statickú húževnatosť A_{sh} (Obr.10) je možno zadefinovať ako oblasť, kde sa realizuje plastické pretvorenie materiálu. Jej hodnota sa vypočíta podľa vzťahu (1.14).

$$A_{sh} = (R_m - R_e) \cdot A \quad (1.14)$$



Obrázok 10 Grafické znázornenie statickej húževnatosti

E. Súčiniteľ plošnej anizotropie

Súčiniteľ plošnej anizotropie sa vyhodnocuje z charakteristík pevnosti alebo húževnatosti, vyhodnotených na vzorkách odobratých z rôznych smerov valcovania východiskového polotovaru. Je to ukazovateľ, ktorý sa počíta, napr. pri plechoch valcovaných za studena, pričom referenčná hodnota je hodnota zo smeru valcovania polotovaru (smer 0°). Príklad výpočtu súčiniteľa plošnej anizotropie z hodnôt ťažnosti je definovaný vzťahom (1.15). Tento parameter je možno vyhodnocovať aj z iných vlastností materiálu.

$$A_A = \frac{A_{(\alpha^\circ)} - A_{(0^\circ)}}{A_{(0^\circ)}} \cdot 100 \quad (1.15)$$

F. Stupeň plošnej anizotropie

Príklad výpočtu stupňa plošnej anizotropie Δr_{Re} , z hodnôt medze sklu R_e vyhodnotených zo smerov 0° (smer valcovanie polotovaru), zo smeru 45° vzhľadom na smer valcovania polotovaru a v smere 90° (smer kolmo na smer valcovania polotovaru), je definovaný vzťahom (1.16). Tento parameter je možno vyhodnocovať aj z iných vlastností materiálu.

$$\Delta r_{Re} = \frac{1}{2} (R_{e0^\circ} - 2 \cdot R_{e45^\circ} + R_{e90^\circ}) \quad (1.16)$$

G. Súčiniteľ normálovej anizotropie

Súčiniteľ normálovej anizotropie sa hlavne počíta pre ploché skúšobné vzorky. Príklad výpočtu súčiniteľa normálovej anizotropie r , z nameraných rozmerov vzorky (šírky (b , b_0) a hrúbky (s , s_0)) pred a po pretvorení materiálu, v smere valcovania polotovaru (0°) je definovaný vzťahom (1.17).

$$r_{(0^\circ)} = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{s}{s_0}} \quad (1.17)$$

H. Stredná hodnota normálovej anizotropie

Na presnejšiu charakteristiku normálovej anizotropie sa vyhodnocuje stredná hodnota normálovej anizotropie r_s podľa vzťahu (1.18). Pri výpočte sa vychádza zo súčiniteľov normálovej anizotropie, ktoré boli počítané pre všetky smery valcovania polotovaru (0° , 45° a 90°).

$$r_s = \frac{1}{4}(r_{0^\circ} + 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ}) \quad (1.18)$$

I. Tvar a rozmer krčka po lome

Tvar krčka sa posudzuje polomerom zaoblenia v pozdĺžnom reze po roztrhnutí r_R a najmenším priemerom v priečnom reze v krčku d_R . Rozmery krčka sa tiež posudzuje minimálnym priečnym rezom v krčku S_R , ktorý sa vypočíta podľa vzťahu (1.19).

$$S_R = \frac{\pi \cdot d_R^2}{4} \quad (1.19)$$

J. Veľkosť zrna

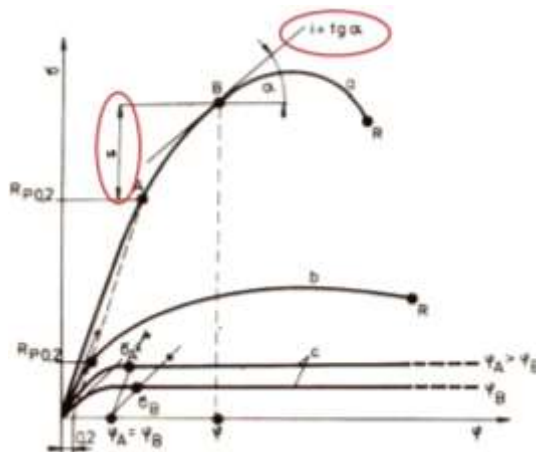
Veľkosť zrna významne ovplyvňuje proces tvárnenia a má zásadný vplyv aj na výslednú morfológiu povrchu výtvaru. Optimálna veľkosť zrna pre náročné požiadavky je 5. až 7. stupeň a pre menej náročné požiadavky je vhodná veľkosť zrna 8. stupeň a viac. Hrubšie zrno, veľkosti 1. až 4. stupňa, spôsobuje vznik drsného povrchu.

K. Nevýrazná medza sklzu

Dobрым ukazovateľom na klasifikáciu dobrej plasticity materiálov je aj nevýrazná medza sklzu ($R_{p0,2}$), pri ktorej nedochádza k oscilácii na dolnej hranici plastickej deformácie, t. j. je hladký začiatok trvalého pretvorenia materiálu.

L. Intenzita spevnenia a stupeň spevnenia materiálu

Intenzita spevnenia i a stupeň spevnenia s sú matematicky a graficky definované na Obr. 11. Tieto hodnoty sú determinované veľkosťou deformácie materiálu φ .



Obrázok 11 Intenzita spevnenia materiálu (i) a stupeň spevnenia materiálu (s)

M. Maximálna intenzita plastickej deformácie

Dobрым ukazovateľom na klasifikáciu dobrej plasticity materiálov je aj maximálna intenzita rovnomernej plastickej deformácie do krčka φ_{max} , čo je možno chápať ako sumárny účinok jednotlivých plastických pretvorení, hodnotený z rozmerov pred a po deformácii plochej vzorky. Maximálna intenzita plastickej deformácie sa počíta podľa vzťahu (1.20).

$$\varphi_{i\max} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varphi_1 - \varphi_2)^2 + (\varphi_2 - \varphi_3)^2 + (\varphi_3 - \varphi_1)^2} \quad (1.20)$$

kde φ_1 – skutočné (logaritmické) pretvorenie v smere dĺžky (-),
 φ_2 – skutočné (logaritmické) pretvorenie v smere šírky (-),
 φ_3 – skutočné (logaritmické) pretvorenie v smere hrúbky (-).

N. Starnutie materiálu

Pri hodnotení nízkouhlíkových ocelí sa hodnotí aj náchylnosť na starnutie materiálu. Starnutie materiálu je súhrn zmien vlastností, prebiehajúcich v závislosti na čase pri prechode z nerovnovážneho stavu do rovnovážneho stavu materiálu pri rôznych podmienkach (teplota, rýchlosť pretvorenia materiálu, pretvorenie materiálu, ...). Pri oceliach starnutie materiálu môže nastať *po tepelnom spracovaní alebo po plastickej deformácii*.

Najčastejšie pri analýze starnutia materiálu, sa aplikujú metódy, kde sa vyhodnocuje zmena veličín, zistených zo skúšky jednoosovým ťahom alebo zo skúšok tvrdosti, či z technologických skúšok. Vyjadruje sa indexom starnutia $\Delta\sigma_A$, ktorý charakterizuje nárast napätia, v porovnaní s nevystárnutým materiálom, potrebného na vyvolanie plastickej deformácie na materiály, kde prebehlo starnutie. Ocele náchylné na starnutie majú index starnutia od 40 do 80 MPa.

Vonkajším prejavom starnutia materiálu je zmena jeho mechanických, technologických a fyzikálnych vlastností. Znižujú sa hodnoty ťažnosti, kontrakcie a zvyšujú sa hodnoty medze skľuzu, pevnosti v ťahu a tvrdosti.

	ZHRNUTIE POJMOV	Princíp skúšky jednoosovým ťahom, rozmery skúšobných telies pre objemovú tvárniteľnosť, medza skľuzu, pevnosť v ťahu, ťažnosť, kontrakcia. Ukazovatele plasticity za studena.
--	------------------------	--

	OTÁZKY	10
--	---------------	----

1. Vysvetlite princíp skúšky jednoosovým ťahom.
2. Aké skúšobné telesá sa používajú na skúšku jednoosovým ťahom na analýzu objemovej tvárniteľnosti?
3. Aké skúšobné telesá sa používajú na skúšku jednoosovým ťahom na analýzu plošnej tvárniteľnosti?
4. Aké charakteristiky pevnosti vyhodnocujeme zo skúšky jednoosovým ťahom?
5. Aké deformačné charakteristiky vyhodnocujeme zo skúšky jednoosovým ťahom?
6. Ako sa vypočíta medza skľuzu?
7. Ako sa vypočíta pevnosť v ťahu?
8. Ako sa vypočíta ťažnosť?
9. Ako sa vypočíta zúženie?
10. Aké ukazovatele plasticity za studena charakterizujú vhodnosť materiálu pre procesy tvárnenia?

	ÚLOHA	Realizujte hodnotenie charakteristík pevnosti (R_e , R_m), charakteristík húževnatosti (A , Z) a vybraných ukazovateľov plasticity za studena (R_e/R_m , A_{sh}).
---	--------------	---

A) Metodické pokyny pre hodnotenie plasticity a tváriteľnosti materiálov **v objemovom tvárnení**:

- Skupinu študentov rozdeliť na 5 pracovných skupín, ktoré budú tvoriť 2 alebo 3 študenti, a ktoré kooperatívnym i kolaboratívnym prístupom budú riešiť čiastkové úlohy, súvisiace s hodnotením vlastností materiálu skúškou jednoosovým ťahom.
 1. *tím* – identifikácia hodnoteného materiálu, príprava skúšobného telesa (vyznačenie východiskovej dĺžky, definovanie rozmerov skúšobnej vzorky (L_0 , d_0) a po roztrhnutí (L_R , d_R)).
 2. *tím* – hodnotenie záznamu z ťahovej skúšky (grafická identifikácia sila na medzi sklzu F_{Re} a sily na pevnosti v ťahu F_{Rm}).
 3. *tím* – hodnotenie charakteristík pevnosti (R_e , R_m) (nutný je výpočet východiskového prierezu vzorky S_0 a 2. tím poskytne údaje o silách F_{Re} a F_{Rm}).
 4. *tím* – hodnotenie charakteristík húževnatosti (A , Z) (1. tím poskytne rozmery vzorky pred a po roztrhnutí (L_0 , L_R , d_0 a d_R), nutný je výpočet východiskového prierezu vzorky S_0 a prierezu vzorky v krčku S_R).
 5. *tím* – hodnotenie ukazovateľov plasticity za studena (R_e/R_m , A_{sh}) (3. tím poskytne hodnoty charakteristík pevnosti a 4. tím poskytne hodnoty charakteristík húževnatosti).
- V skupine vypracuje referát každý študent samostatne.

	ZADANIE 1	Plasticita a tváriteľnosť materiálov v objemovom tvárnení
---	------------------	---

Pre daný materiál vypočítajte charakteristiky pevnosti (R_e , R_m), charakteristiky húževnatosti (A , Z) a ukazovatele plasticity za studena (R_e/R_m , A_{sh}).

Materiál: STN 41 1375

Rozmery skúšobnej vzorky: L_0 , d_0 (Obr. 2a)

Skúšobné zariadenia, prístroje a pomôcky: univerzálne skúšobné zariadenia EU 40, posuvné meradlo, permanentný popisovač, 2 pravítka, kalkulačka.

Postup a princíp merania:

1. Odmerať východiskové rozmery skúšobnej vzorky L_0 , d_0 .
2. Upnúť vzorku do čeľustí skúšobného zariadenia a zaťažiť jednoosovou ťahovou silou do porušenia súdržnosti materiálu.
3. Odmerať rozmery skúšobnej vzorky po roztrhnutí L_R , d_R .
4. Vyhodnotiť záznam zo skúšky F_{Re} a F_{Rm} .
5. Vypočítať charakteristiky pevnosti (R_e , R_m), charakteristiky húževnatosti (A , Z) a ukazovatele plasticity za studena (R_e/R_m , A_{sh}).

Tabuľky nameraných a vypočítaných hodnôt:

L_0 (mm)	d_0 (mm)	L_R (mm)	d_R (mm)

S_0 (mm ²)	S_R (mm ²)	$F_{Rp0,2}$ (kN)	F_{Rm} (kN)

$\Delta L_{Rp0,2}$ (mm)	ΔL_R (mm)	$L_{Rp0,2}$ (mm)	L_R (mm)	S_R (mm ²)

$R_{p0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A (%)	Z (%)	$R_{p0,2}/R_m$	A_{sh}

Výpočet:

- Medze sklzu: podľa vzťahu: $R_{p0,2} = \frac{F_{Rp0,2}}{S_0}$ (1.21)
- Pevnosti v ťahu: podľa vzťahu (1.7)
- Ťažnosti: podľa vzťahu (1.8)
- Zúženia (kontrakcie): podľa vzťahu (1.9)
- Pomeru pevnostných charakteristík: podľa vzťahu (1.11)
- Statickej húževnatosti: podľa vzťahu (1.14)

Záver: Na základe materiálového listu porovnať výsledky skúšky jednoosovým ťahom.

B) Metodické pokyny pre hodnotenie plasticity a tvárnosti materiálov v plošnom tvárnení:

- Skupinu študentov rozdeliť na 5 pracovných skupín, ktoré budú tvoriť 2 alebo 3 študenti, a ktoré kooperatívnym i kolaboratívnym prístupom budú riešiť čiastkové úlohy, súvisiace s hodnotením vlastností materiálu skúškou jednoosovým ťahom.
 1. *tím* – identifikácia hodnoteného materiálu, príprava skúšobného telesa (vyznačenie východiskovej dĺžky, definovanie rozmerov skúšobnej vzorky (L_0 , b_0 , s_0) a po roztrhnutí (L_R , b_R , s_R).
 2. *tím* – hodnotenie záznamu z ťahovej skúšky (grafická identifikácia sila na medzi sklzu F_{Re} a sily na pevnosti v ťahu F_{Rm}).
 3. *tím* – hodnotenie charakteristík pevnosti (R_e , R_m) (nutný je výpočet východiskového prierezu vzorky S_0 a 2. tím poskytne údaje o silách F_{Re} a F_{Rm}).
 4. *tím* – hodnotenie charakteristík húževnatosti (A , Z) (1. tím poskytne rozmery vzorky pred a po roztrhnutí (L_0 , L_R , b_0 , b_R , s_0 a s_R), nutný je výpočet východiskového prierezu vzorky S_0 a prierezu vzorky v krčku S_R).
 5. *tím* – hodnotenie ukazovateľov plasticity za studena (R_e/R_m , A_{sh}) (3. tím poskytne hodnoty charakteristík pevnosti a 4. tím poskytne hodnoty charakteristík húževnatosti).
- V skupine vypracuje referát každý študent samostatne.

	ZADANIE 2	Plasticita a tvárniteľnosť materiálov v plošnom tvárnení
---	------------------	--

Pre daný materiál vypočítajte charakteristiky pevnosti (R_e , R_m), charakteristiky húževnatosti (A , Z) a ukazovatele plasticity za studena (R_e/R_m , A_{sh}).

Materiál: STN 41 1321

Rozmery skúšobnej vzorky: L_0 , b_0 , s_0 (Obr. 2b)

Skúšobné zariadenia, prístroje a pomôcky: univerzálne skúšobné zariadenia EU 40, posuvné meradlo, permanentný popisovač, 2 pravítka, kalkulačka.

Postup a princíp merania:

1. Odmerať východiskové rozmery skúšobnej vzorky L_0 , b_0 , s_0 .
2. Upnúť vzorku do čeľustí skúšobného zariadenia a zaťažiť jednoosovou ťahovou silou do porušenia súdržnosti materiálu.
3. Odmerať rozmery skúšobnej vzorky po roztrhnutí L_R , b_R , s_R .
4. Vyhodnotiť záznam zo skúšky F_{Re} a F_{Rm}
5. Vypočítať charakteristiky pevnosti (R_e , R_m), charakteristiky húževnatosti (A , Z) a ukazovatele plasticity za studena (R_e/R_m , A_{sh}).

Tabuľky nameraných a vypočítaných hodnôt:

L_0 (mm)	b_0 (mm)	s_0 (mm)	L_R (mm)	b_R (mm)	s_R (mm)

S_0 (mm ²)	S_R (mm ²)	$F_{Rp0,2}$ (kN)	F_{Rm} (kN)

$\Delta L_{Rp0,2}$ (mm)	ΔL_R (mm)	$L_{Rp0,2}$ (mm)	L_R (mm)	S_R (mm ²)

$R_{p0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A (%)	Z (%)	$R_{p0,2}/R_m$	A_{sh}

Výpočet:

- Medze sklzu: podľa vzťahu (1.21)
- Pevnosti v ťahu: podľa vzťahu (1.7)
- Ťažnosti: podľa vzťahu (1.8)
- Zúženia (kontrakcie): podľa vzťahu (1.9)
- Pomeru pevnostných charakteristík: podľa vzťahu (1.11)
- Statickej húževnatosti: podľa vzťahu (1.14)

Záver: Na základe materiálového listu porovnať výsledky skúšky jednoosovým ťahom.

	LITERATÚRA	15
---	-------------------	----

1. A Users Guide to Video Extensometers. Ametektest.com [online]. AMETEK Sensors, est & Calibration, 2015. Dostupné na: <http://www.ametektest.com/learningzone/library/articles/a-users-guide-to-videoextensometers>.
2. BÍLIK, J., KAPUSTOVÁ, M. a RIDZOŇ M.: Teória tvárnenia. Trnava : Alumni Press, 2015. 262 s., ISBN 978-80-8096-215-9.
3. BLAŠČÍK, F. POLÁK, K.: Teória tvárnenia. Alfa, Bratislava 1987.
4. BLAŠČÍK, F. et al. Technológia tvárnenia, zlievarenstva a zvárania. Bratislava: Alfa Bratislava, 1988.
5. CALLISTER, W. D. Materials science and engineering: an introduction. 6th ed. New York, NY: John Wiley, c2003. ISBN 04-711-3576-3.
6. Capacitive sensor. Directindustry.com 2017. Dostupné na: <http://www.directindustry.com/prod/epsilon-technology/product-33099-658567.html>.
7. FOREJT, M., PÍŠKA M.: Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno: VUT Brno, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
8. KALPAKJIAN, S. Manufacturing Engineering and Technology. Massachusetts: PE-USR, 2006.
9. KOSTKA, P. A kol.: Technológia tvárnenia. Vydavateľstvo STU, Bratislava 1995.
10. MOLLIKOVÁ, E.: ZKOUŠENÍ MATERIÁLŮ A VÝROBKŮ. Ústav materiálových věd a inženýrství [online]. Brno: FSI VUT v Brně, 2012. Dostupné na: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/zmv/Index.html>
11. PLUHAŘ, J.: Náuka o materiálech. Praha: SNTL, 1989, 549 s.
12. Produkty. Testsysteme.cz D. Dvořák 2019. Dostupné na: <http://www.testsysteme.cz/sk/produkty/>.
13. PTÁČEK, L.: Nauka o materiálu I. 2., vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-7204-283-1.
14. STN EN ISO 6892-1 (420310) Kovové materiály. Skúška ťahom. Časť 1: Skúška ťahom pri teplote okolia. Bratislava: Slovenský ústav technickej normalizácie, 2010.
15. VELES, P.: Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov. Bratislava: Alfa, 1985, 401 s.