



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

MOŽNOSTI TAHOVÉ ZKOUŠKY

POSSIBILITIES OF THE TENSILE TEST

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Nevřivý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Řiháček, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	David Nevřivý
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Jan Řiháček, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

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:

Možnosti tahové zkoušky

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o vypracování aktuální literární rešerše věnující se zkoušení materiálu v tahu, a to zejména se zaměřením na oblasti použití tahové zkoušky, geometrii zkoušených těles, stroje, metodiku vyhodnocení, popř. speciální aplikace užití tahové zkoušky.

Cíle bakalářské práce:

- vypracování literární rešerše se zaměřením na tahovou zkoušku,
- popis geometrických možností zkušebních vzorků,
- vypracování přehledu zkušebních strojů a zařízení,
- popis vyhodnocení,
- popis oblastí použitelnosti.

Seznam doporučené literatury:

ASM INTERNATIONAL. ASM Handbook volume 14: Forming and Forging. Materials Park, Ohio: American Society for Metals, 1996. ISBN 978-0871700209.

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.

GROOVER, Mikell. Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems. Hoboken: JOHN WILEY, 2010. ISBN 978-0470-467002.

HOSFORD, William a Robert CADDEL. Metal Forming: Mechanics and Metalurgy. New York: Cambridge University Press, 2007. ISBN 978-0-521-88121-0.

PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu I. Brno: CERM, 2001. ISBN 80-720-4193-2.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

NEVŘIVÝ David: Možnosti tahové zkoušky.

Předložená bakalářská práce se zabývá možnostmi tahové zkoušky, parametry zkušebních těles, zkušebními stroji a příslušenstvím, které může být při zkoušce využito. Na základě literární rešerše je v práci vysvětlen princip zkoušky, průběh měření a zjišťované deformační a napět'ové charakteristiky. Dále se práce věnuje zkušebním tělesům, jejich geometrii, způsobu odběru a upnutí do stroje. U strojů a příslušenství používaných při zkoušce tahem je vysvětlena funkčnost a jejich různé druhy. V práci jsou dále rozebrány speciální typy tahových zkoušek, a to za zvýšených teplot, rychlostí deformací, cyklického či víceosého namáhání. Na závěr práce je rozebrán současný trend způsobu vyhodnocování tahové zkoušky pomocí 3D optických měřících systémů.

Klíčová slova: Tahový diagram, přetvoření, napětí, zkušební stroj

ABSTRACT

NEVŘIVÝ David: Possibilities of tensile test.

The Bachelor's thesis deals with the possibilities of tensile testing, the parameters of the test specimens, testing machines and the equipment which can be used in this test. Based on the literature review, the thesis explains the test principle, the measurement process and the strain and stress characteristics detected by the test. The thesis then focuses on the test specimens, their geometry, the method of their sampling and gripping into the machine. When describing the machines and equipment used in tensile testing, the thesis explains the functionality of these and their different types. The work also covers special types of tensile tests, namely those using elevated temperature, high-speed deformation, and cyclic or multiaxial stress. The final part of the thesis examines the current trend of evaluating the tensile test using 3D optical measurement systems.

Keywords: Tensile diagram, strain, stress, testing machine

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NEVŘIVÝ, David. *Možnosti tahové zkoušky* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132139>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jan Řiháček.

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 Brně dne 19. 5. 2021

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Janu Řiháčkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům za podporu během studia.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD 9

1 PRINCIP TAHOVÉ ZKOUŠKY 10

1.1 Napět'ové charakteristiky 11

1.2 Deformační charakteristiky 12

1.3 Přepočet smluvního diagramu 13

2 ZKUŠEBNÍ TĚLESA 15

2.1 Upnutí zkušebního tělesa 16

2.1.1 Upnutí tyčí 16

2.1.2 Upnutí drátů 17

2.1.3 Upnutí plechů 18

2.1.4 Upnutí trubek 18

3 ZKUŠEBNÍ STROJE 19

3.1 Mechanický zkušební stroj 19

3.2 Hydraulický zkušební stroj 20

3.3 Příslušenství zkušebních strojů 21

3.3.1 Tlačné a ohybové příslušenství 21

3.3.2 Příslušenství pro ohřev vzorku 22

3.3.3 Extenzometry 23

4 SPECIÁLNÍ TYPY TAHOVÝCH ZKOUŠEK 25

4.1 Cyklická tahová zkouška 25

4.2 Zkouška za vysokých teplot 26

4.3 Zkouška za vysokých rychlostí deformace 26

4.4 Víceosá tahová zkouška 28

5 MODERNÍ ZPŮSOBY VYHODNOCENÍ 31

5.1 Aramis 31

6 ZÁVĚRY 32

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam obrázků

Seznam tabule

ÚVOD [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7]

K výběru správného materiálu je potřeba dobře znát jeho mechanické vlastnosti. Ty slouží jako základní stavební kámen při jeho volbě. Aby bylo možné určit, jaké vlastnosti daný materiál má, je potřeba zjistit jeho materiálové charakteristiky. K tomuto účelu byla vyvinuta řada mechanických zkoušek, a to jak statických, tak dynamických. Mezi základní zkoušky se řadí zkouška tahem (obr.1), tlakem nebo ohybem. Zřejmě nejpoužívanější je zkouška tahová.

Zkouška tahem je experimentální mechanická zkouška, při které je zkušební těleso zatěžováno tahem v jedné nebo více osách. Z tohoto experimentu se dále určuje závislost napětí na deformaci. Vše včetně zkušebních těles a způsobu vyhodnocování je normováno, což zaručuje snadnou možnost reprodukování zkoušky v jiné zkušebně. Hodnoty zaznamenávané během zkoušky slouží k popisu mechanických vlastností daného materiálu a jako ukazatel pro jeho případnou volbu k řešenému problému. Zkoušku tahem lze také využít jako vstup do numerických simulací, pro zjištění materiálového chování a tvorbě materiálových modelů pro teoretické výpočty.



Obr. 1 Zkouška tahem [4], [5], [6], [7]

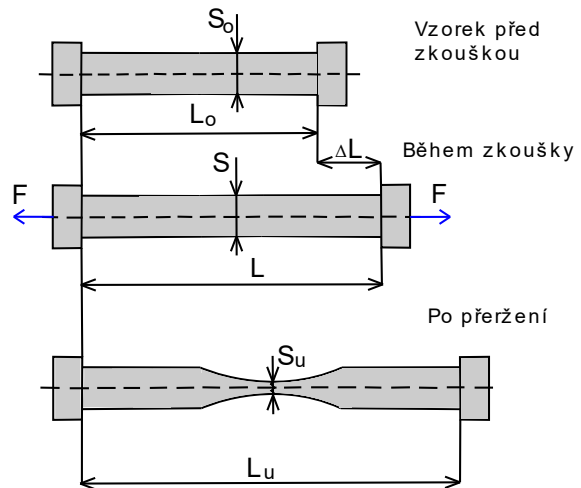
1 PRINCIP TAHOVÉ ZKOUŠKY [1], [2], [3], [8], [9], [10]

Zkouška tahem je zkouška, při které je zkušební těleso namáhané tahem v jedné či více osách. Tímto namáháním dochází k podélnému prodloužení, příčnému zúžení a celkové deformaci vzorku. Princip tahové zkoušky je popsán pomocí zjednodušeného tělesa tvaru válce na obrázku 2. Zkušební vzorek s počáteční tzv. měrnou délkou L_0 a počátečním průřezem S_0 se upne do zkušebního stroje. Poté je na něj působeno tahovou silou F , díky které se vzorek podélně prodlouží o ΔL na konečnou délku L_u , při které dojde k přetržení. Těleso se deformuje i v příčném směru. Nejdříve začne vznikat krček, který se stále zmenšuje až do úplného přetržení, při kterém je velikost průřezu vzorku rovna S_u .

Jako vzorek neboli zkušební těleso se ve většině případů volí tyč s různými průřezy. Vzorek je upínán do zkušebního stroje, který ho působením tahové síly namáhá.

Experiment probíhá za působení tahové rostoucí síly. Toto působení se projeví zvyšující se délkou, kterou zaznamenáme pomocí průtahoměru. Ve většině případů se těleso zatěžuje až do úplného přetržení, kdy dojde k přerušení spojitosti tělesa.

Nejrozšířenější je statická jednoosá tahová zkouška za pokojové teploty, která bude popsána dále v práci.



Obr. 2 Princip tahové zkoušky [10]

Z naměřených hodnot jednoosé tahové zkoušky se získá závislost síly na prodloužení. Z této závislosti se vykresluje tzv. pracovní diagram. Z měření síly na prodloužení se pomocí vzorců (1.1) a (1.2) získají základní veličiny, a to smluvní napětí a poměrná deformace. Toto je smluvní základ a slouží jako závislost pro získání smluvního diagramu. Ten je specifický tím, že se vztahuje k původnímu nedeformovanému průřezu zkušebního tělesa a bude rozebrán dále v práci.

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (1.1)$$

kde: σ – smluvní napětí [MPa],

F – působící síla [N],

S_0 – počáteční průřez tělesa [mm].

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad (1.2)$$

kde: ε – poměrná deformace [%],

ΔL – přírůstek délky [mm],

L_0 – počáteční délka tělesa [mm],

L_u – konečná délka [mm].

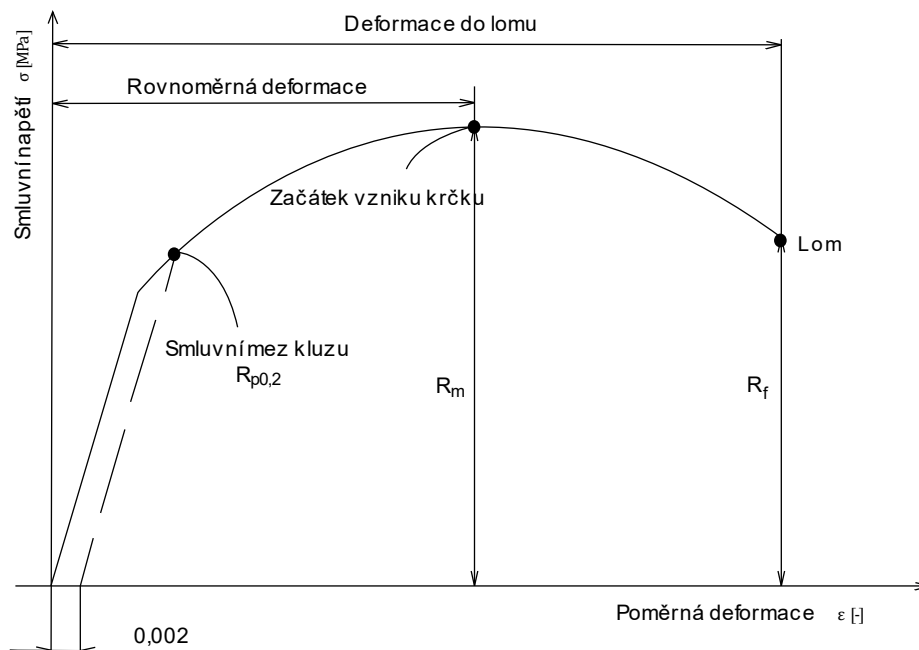
Tahovou zkoušku lze posuzovat z několika hledisek. Podle rychlosti, teploty, materiálu, dle zkušebního tělesa a osového zatížení. Podle rychlosti se zkouška dělí na zkoušku statickou a dynamickou. Podle teploty se dělí na zkoušku za zvýšených či pokojových teplot. Tahovou zkoušku lze posuzovat i podle druhu zkoušeného materiálu. Také lze zkoušku rozdělit na základě použitého zkušebního tělesa, v neposlední řadě na zkoušku jednoosou nebo víceosou, a to dle osového zatížení.

1.1 Napěťové charakteristiky [2], [3], [8], [11], [12]

Veličiny definované v předchozí kapitole, tj. smluvní napětí a poměrná deformace, určují společně tzv. smluvní tahový diagram. Jak lze vidět na obrázku 3, počáteční úsek diagramu je přímkový a těleso je zde namáháno elasticky. Elastická deformace, která je také známá jako pružná, je charakteristická vratnou deformací po odstranění síly. Těleso se tedy vrací do původního tvaru. Vztah mezi napětím a deformací určuje v tomto případě tzv. Hookův zákon, viz vzorec (1.7). Po překročení smluvní meze kluzu elastická deformace končí a těleso se dále deformuje plasticky. Plastická deformace oproti elastické je nehomogenní. Pro plastickou, popřípadě nepružnou deformaci platí, že po ukončení zatížení jsou změny nevratné.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (1.3)$$

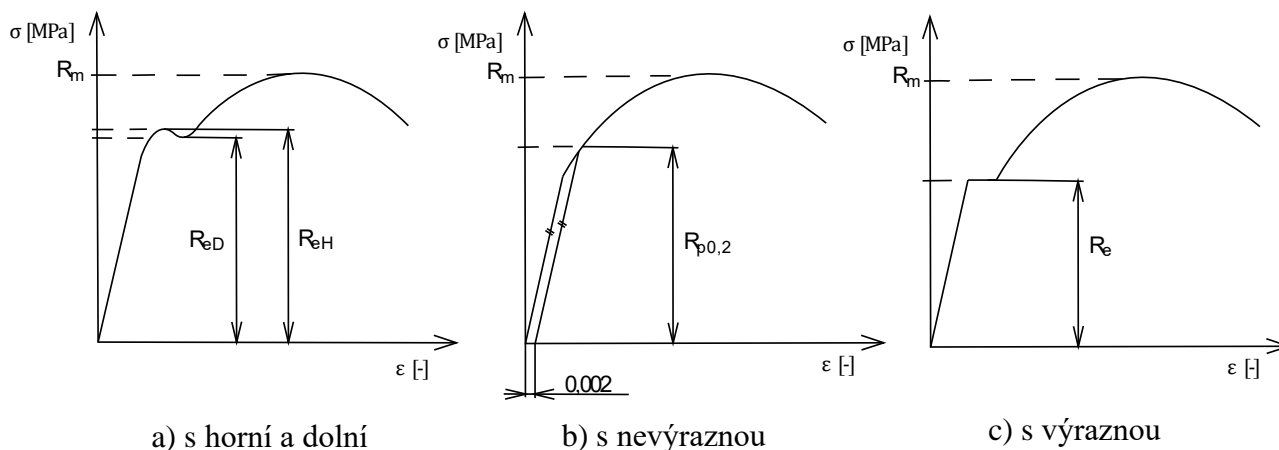
kde: E – modul pružnosti v tahu (Youngův modul) [MPa].



Obr. 3 Smluvní diagram tahové zkoušky [2]

V praxi se diagram využívá pro určení základních materiálových charakteristik jako je tzv. mez pevnosti, mez kluzu a mez porušení:

- Mez kluzu R_e – je napětí, při kterém začíná vznikat plastická deformace. Podle obrázku 3 se uvažuje mez kluzu jako hodnota, při které dochází k odklonu diagramu od přímky. Zavádí se tedy hodnota smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$. Smluvní mez kluzu je napětí, které vyvolá trvalou deformaci o velikosti $\varepsilon_p = 0,002$ (0,2 %). Hodnota R_e se odečítá buď z diagramu, nebo pomocí tzv. průtahoměru, který bude vysvětlen v dalších kapitolách. U materiálů s výraznější mezí kluzu (obr. 4) se vyhodnocuje horní a dolní mez kluzu. Horní mez kluzu R_{eH} odpovídá lokálnímu maximumu na křivce, oproti tomu dolní mez kluzu R_{eL} je definovaná jako lokální minimum.



Obr. 4 Pracovní diagram s mezí kluzu [8]

- Mez pevnosti R_m – je definována jako maximální hodnota napětí v diagramu, při které ještě nedochází ke vzniku krčku. Vypočítá se jako poměr maximální dosažené síly a původního průřezu tělesa, viz rovnice (1.3). Mez pevnosti u tvárných materiálů je definovaná hodnotou smluvního napětí. Při dosažení tohoto napětí se na tělese začíná vytvářet krček, viz obrázek 3. Kdyby k lomu tělesa došlo před vytvořením krčku, tedy že plastická deformace bude nulová, tak mez pevnosti odpovídá napětí v okamžiku lomu R_f . Mez pevnosti se uvádí jako základní charakteristika pro zkoušku tahem. Vyjadřuje ale pouze zatížení, které materiál přenesne při jednoosé napjatosti. Proto tato veličina nevystihuje skutečnou únosnost při působení víceosého zatížení.

$$R_m = \frac{F_{\max}}{S_0} \quad (1.4)$$

kde: R_m – mez pevnosti [MPa],

F_{\max} – maximální síla [N].

- Mez porušení R_f – je napětí, při kterém na tělese nastane lom, tedy dojde k přerušení jeho spojitosti. Mez porušení je také známá pod názvem lomové napětí.

1.2 Deformační charakteristiky [2], [3], [8], [9], [10]

Ze zkoušky se kromě napěťových charakteristik určují i tzv. deformační charakteristiky. Jejich hodnoty jsou získávány z měření zkušební tělesa po konci tahové zkoušky. Díky tomu, že jsou hodnoty získávány až po přetržení tělesa, souvisí pouze s plastickou deformací zkoušeného materiálu. Tyto deformační charakteristiky se nazývají zúžení a tažnost:

- Zúžení – známé také jako kontrakce, je změna příčného průřezu zkušební tělesa. Uvádí se v procentech a k jeho výpočtu je potřeba znát počáteční a konečný průřez tělesa.

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 \quad (1.5)$$

kde: Z – zúžení [%],

S_u – průřez tyče v místě lomu [mm].

- Tažnost – celková tažnost A_c se vypočítá pomocí celkového prodloužení tělesa, viz rovnice (1.5). K největšímu prodloužení na tělese dojde v oblasti vytvoření krčku. Aby získané hodnoty tažnosti vycházely stejně u těles ze stejného materiálu, ale jiného počátečního průřezu, je třeba dodržet geometrickou podmínku. V této podmínce se vypočítá počáteční měřený úsek L_0 pomocí počátečního průřezu S_0 a poměrového čísla. Tažnost se zde značí A_c a za symbol c se dosazuje označení podle toho, jaký vzorek je používán. V praxi se často používá tažnost s označením $A_{5,6}$, $A_{11,3}$, A_{80} a další.

$$A_c = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad (1.6)$$

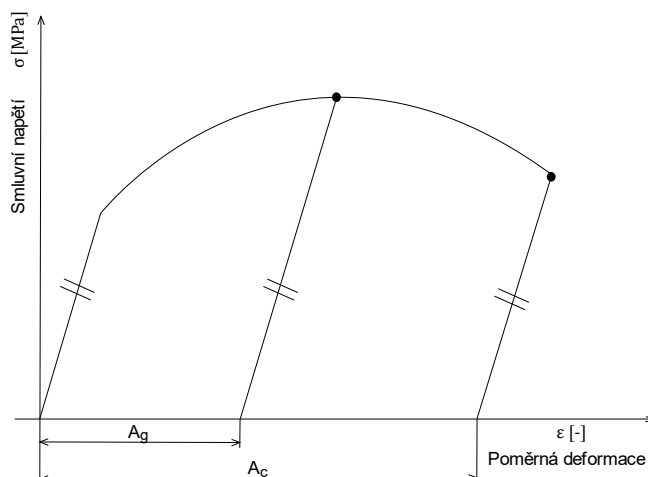
kde: A_c – tažnost [%].

Mimo celkovou tažnost se dá na zkušebním tělese zjistit i tzv. tažnost homogenní viz obrázek 5, která se značí A_g . Tato tažnost je charakterizovaná tím, že je určovaná v okamžiku dosažení meze pevnosti. Tato veličina tedy zahrnuje pouze rovnoměrnou plastickou deformaci. Lze ji vypočítat pomocí rovnice (1.6).

$$A_g = \frac{L_g - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad (1.7)$$

kde: A_g – homogenní tažnost [%],

L_g – vzdálenost do dosažení maximální meze pevnosti [mm].



Obr. 5 Homogenní a celková tažnost [10]

1.3 Přepočet smluvního diagramu [2], [3], [8], [10], [11], [13]

V praxi je používán smluvní tahový diagram pouze pro základní technologické výpočty a obzvláště pro výpočty v elastické oblasti, kde jsou pouze malá přetvoření. Pro přesnější popis je vhodné diagram smluvní přepočítat na diagram skutečný.

Smluvní diagram se většinou používá pro malé přetvoření, protože chyby, které zde nastávají, jsou minimální. V případě překročení elastické deformace, kdy se těleso začne deformovat plasticky, je nutné použít skutečný diagram.

Hlavní rozdíl mezi smluvním a skutečným diagramem (obr. 6) je v tom, k jakému průřezu se vztahují. Smluvní diagram se vztahuje k průřezu původnímu nedeformovanému, kdežto skutečný k průřezu skutečnému okamžitému, viz vzorec (1.7). Okamžitý průřez však není možné v daný moment změřit. Proto je potřeba smluvní diagram přepočítat na skutečný.

$$\bar{\sigma} = \frac{F}{S} = \sigma \cdot \frac{S_0}{S} \quad (1.8)$$

kde: $\bar{\sigma}$ – skutečné napětí [MPa],

S – okamžitý průřez [mm].

Pro přepočet smluvního napětí na napětí skutečné, kdy ještě není dosaženo meze pevnosti a materiál nevykazuje krčkování se využije vzorec:

$$\bar{\sigma} = \sigma \cdot (1 + \epsilon) \quad (1.9)$$

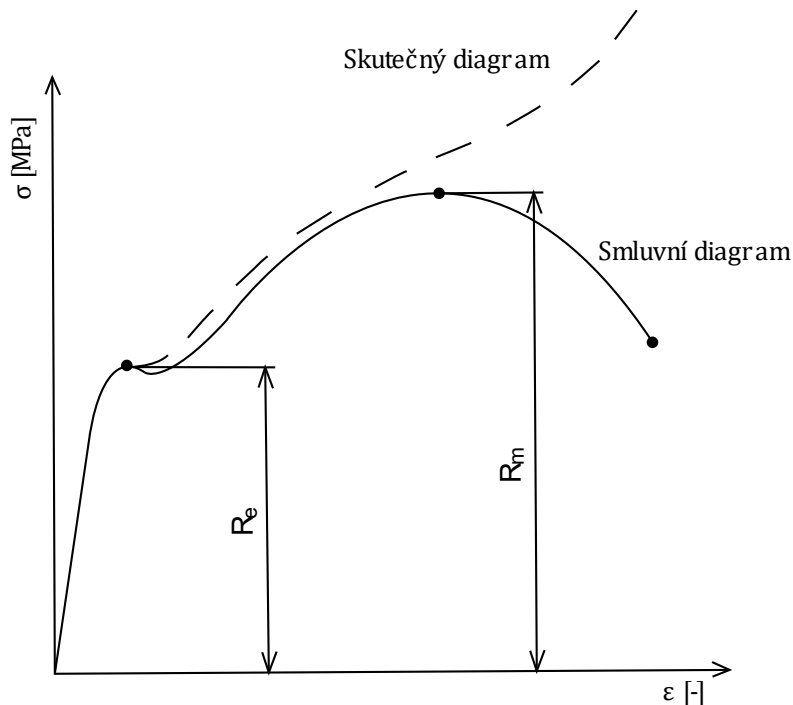
Poměrná deformace je daná dle vzorečku (1.2). Potom platí mezi skutečnou a poměrnou deformací vzorec:

$$\varphi = \ln\left(\frac{L_0 + \Delta L}{L_0}\right) = \ln\left(1 + \frac{\Delta L}{L_0}\right) = \ln(1 + \varepsilon) \quad (1.10)$$

kde: φ – skutečná deformace [-].

Jak již bylo výše zmíněno, tento princip lze použít pouze v oblasti do meze pevnosti. Za meze pevnosti dochází k vytvoření krčku, dále se těleso deformuje nerovnoměrně. Proto je potřeba přistupovat k přepočtu jiným způsobem, například je možno použít níže uvedené postupy:

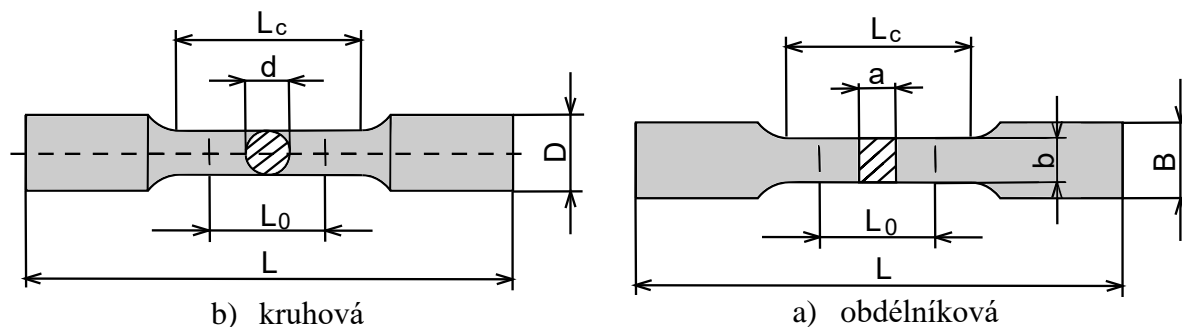
- Analytická metoda – je metoda, která se používá při volbě válcové zkušební tyče. U této metody se používá řada postupů a mezi nejpopulárnější se řadí Bridgmanova korekční formule, která bere v potaz dva předpoklady. První říká, že v blízkosti krčku bude všude stejné napětí a druhý, že v nejmenším průřezu krčku bude mít stejnou geometrii přetvoření. Bridgmanovu metodu však není vhodné použít, jestliže na tělese dochází k příliš velkému napětí.
- Experimentální numerická iterační metoda – je druhý způsob, který se volí při plochém nebo válcovém tvaru zkušební tělesa. Cílem této metody je minimalizovat rozdíly mezi měřeními a předpovídanými fyzikálními veličinami pomocí vhodného kritéria. Často se využívá Misesovo kritérium plasticity.
- Inverzní metoda – slouží jako doplnění analytické a experimentálně numerické metody. U této metody se postupuje od zjištění konečného bodu. Nejprve se provede numerické modelování s předdefinovanou křivkou. Poté se vhodným způsobem zjistí velikost lomové plochy S_u a porovná se skutečné napětí z numerického modelování a vstupní napětí při stejném přetvoření. Nakonec se hledá vztah, který je vhodný a použije se jako korekční funkce.



Obr. 6 Porovnání smluvního a skutečného diagramu [11]

2 ZKUŠEBNÍ TĚLESA [3], [8], [10], [14], [15], [16]

Zkušební tělesa mají různé tvary a rozměry, které mohou být často odvozeny od rozměrů a tvarů zkoušeného výrobku, ze kterého jsou odebrána. Jejich průřez se nejčastěji používá kruhový, ale často se také volí obdélníkový nebo trubkový profil (obr. 7). Ve speciálních případech lze použít i průřez jiného tvaru. Tvar zkušebních těles stanovuje norma ČSN EN 10 002-1. Dle normy je možné využít zkušební tělesa i s průřezem trubky, drátu nebo plechu (tab. 1).

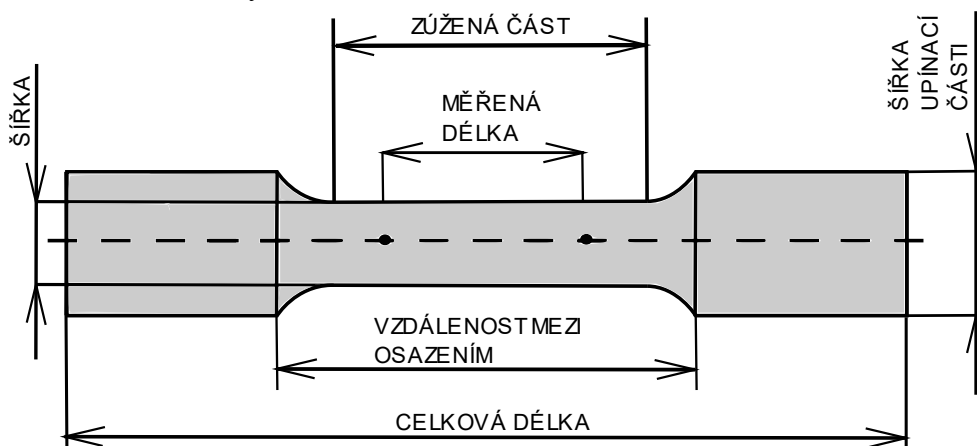


Obr. 7 Zkušební tělesa [8]

Tab. 1 Hlavní druhy zkušebních těles podle typu výrobku [3]

Typ výrobku	
Pásky - Plechy - Ploché výrobky	Dráty - Tyče - Profily
Tloušťka a	Průměr nebo strana r
$0,1 \leq a < 3$	$r < 4$
$a \geq 3$	$r \geq 4$

Každé zkušební těleso, ať se jedná o plech, trubku, drát nebo tyč, má svůj průřez a své charakteristické části. Obecně lze zkušební těleso rozdělit na upínací a měrnou část (obr. 8). Upínací část slouží k uchycení vzorku a má větší průřez než část měrná. Měrná část, na které probíhá měření, je vystředěna v místech s menším průřezem. Osazení a měřicí část musí být v dostatečně velké vzdálenosti, aby konce s větším průřezem neomezovaly deformaci uvnitř a nedošlo k znehodnocení výsledků.



Obr. 8 Měrná a upínací plocha tělesa [10]

Zkušební těleso lze získat obráběním, vypalováním laserem, řezáním vodním paprskem apod. Těleso tedy může být před zkouškou obrobena. V případě, že se před zkouškou obrábět nebude, mluví se o neobrobeném zkušební tělesu. Jedná se o lité zkušební těleso nebo o výrobek konstantního průřezu. Neobrobená tělesa musí mít dostatečnou volnou délku mezi čelistmi. Litá zkušební tělesa musí mít přechodový poloměr. Přechodový poloměr je poloměr mezi upínacími konci a zkoušenou délkou. U neobrobené zkušební tyče musí být zkoušená délka vždy větší než počáteční délka $L_c > L_o$.

Obrobené zkušební těleso se získá obráběním vzorku z výrobku, vylisku nebo odlitku. Těleso je dále obráběno, aby mělo plynulý přechod mezi upínacími konci a zkoušenou délkou. U obrobeného zkušební tělesa musí zkoušená délka L_c vždy převyšovat počáteční délku L_o .

Zkušební tělesa lze také dělit na poměrná a nepoměrná. Aby byl vzorek braný jako poměrný, musí být počáteční měrná délka alespoň 20 mm. Pokud by byla počáteční délka kratší, použijeme vzorek delší, jehož délka se vypočítá výpočtem, nebo se použije nepoměrný vzorek.

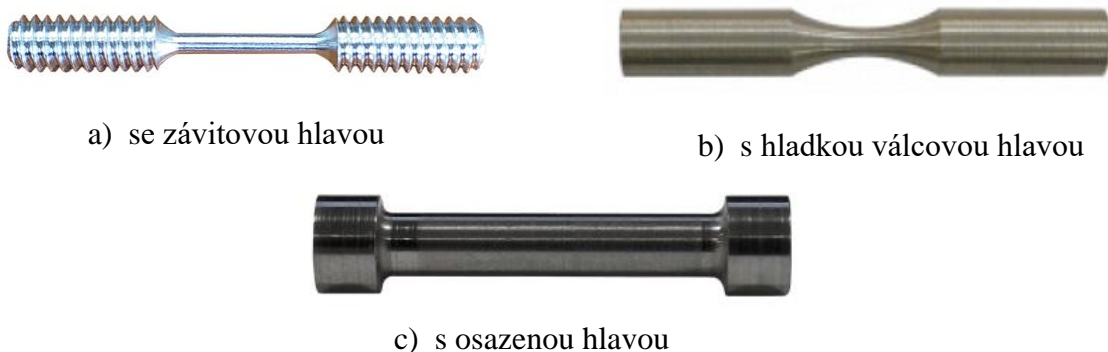
Nepoměrné zkušební tyče jsou ty, u nichž počáteční měřená délka L_o není vázána na počáteční průřez tyče S_o . V praxi se používají délky 50, 80, 100 a 200 mm, není je ale možné volit libovolně. Jejich volba závisí na tvaru a rozměru zkoušených výrobků. Poměrné zkušební tyče bývají často upřednostňovány, protože mají přímý vztah mezi počáteční měřenou délkou a počátečním průřezem.

2.1 Upnutí zkušební tělesa [3], [16], [17],

Tvar zkušební tělesa pro zkoušku tahem se volí dle materiálové charakteristiky, účelu zkoušky a způsobu upnutí. Tvar a rozměry podléhají opět normě ČSN EN 10 002-1. Upnutí zkušebních těles závisí na jejich tvaru.

2.1.1 Upnutí tyčí [4], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23]

Pro upnutí tyčí se většinou rozeznávají vzorky se závitovou hlavou, s osazenou hlavou a s hladkou válcovou hlavou (obr. 9).



Obr. 9 Vzorek [21], [22], [23]

K upnutí zkušební tělesa je nutné zvolit správný prostředek, aby zatížení působilo ve směru osy a nedocházelo ke znehodnocení zkoušky. K zajištění souososti tělesa s upínací soustavou lze těleso předepnout. Toto předpětí však nesmí překročit hranici 5 % očekávané meze kluzu.

K uchycení tělesa se při tahové zkoušce ve většině případů používají čelisti. Všechny čelisti jsou osazeny vyměnitelnými destičkami. Čelisti i destičky musí být vhodně vybrány, aby nedocházelo k prokluzu, zlomení nebo roztržení zkušební vzorku. U destiček se volí vhodný povrch dle typu a materiálu zkoušeného vzorku. Lze zvolit například gumové, zoubkované,

potažené diamantovým prachem, vlnkované, obyčejné nebo speciálně upravené destičky dle žadáných požadavků:

- Mechanické čelisti – jedná se o manuálně ovládané čelisti. U šroubových čelistí vytváří sílu přtlaku obsluha a u samosvorných klínových čelistí platí přímá úměra, kdy se síla upnutí zvyšuje se silou v tlaku.
- Pneumatické čelisti – u tohoto typu čelistí přtlak vzorku vytváří pneumatický válec. Pneumatické čelisti jsou vhodné z hlediska rychlosti a stylu upínání. Dají se kontrolovat jak ručním ovládním, tak nášlapnými pedály. Mezi jejich výhody také patří stálá přtláčná síla v průběhu celé zkoušky.
- Hydraulické čelisti – používají se pro zkoušky s vyšším silovým zatížením. Oproti pneumatickým čelistím zde zajišťuje přtlak hydraulický válec a velikost přtláčné síly lze regulovat pomocí regulačního ventilu. Výhodou těchto čelistí je stálá přtláčná síla a jednoduché upínání vzorku pro obsluhu.

Jak bylo řečeno výše, tělesa se upínají do mechanických, hydraulických či pneumatických čelistí. K tomuto upnutí se používají například: klíny, čepy nebo osazení, závity či tření zkušební tělesa:

- Upínání pomocí klínových čelistí (obr. 10a) se často používá pro tyče s válcovými hlavami a kruhovým průřezem. Tyč se upíná do samosvorných rychloupínacích čelistí. Upínání do čelistí je vhodné pro materiály, které mají pevnost menší než 900 MPa.



a) do klínových čelistí



b) do dvoudílných kroužků

Obr. 10 Upínání [4]

- Upínání pomocí dvoudílných kroužků (obr. 10b) se využívá pro materiály o vyšší pevnosti. Hlava tyče se osadí, a pak se upne do dvoudílných kroužků čelistí.
- Upínání pomocí závitových kroužků je nejpřesnější metodou pro měření. Vylučuje totiž prokluz v uchycení, kdy k uchycení se používají tyče se závitovými hlavami.

2.1.2 Upnutí drátů [3], [4], [25], [26]

Tahová zkouška u drátů není tak běžná a používá se jen zřídka. Drát je definován maximální tloušťkou počátečního průměru 4 mm. Průřez drátu lze určit dle vzorce (2.1).

$$S_0 = \frac{1000 \cdot m}{\rho \cdot L_t} \quad (2.1)$$

kde: m – hmotnost zkušební tělesa [kg],

L_t – celková délka zkušební tělesa [m],

ρ – měrná hmotnost materiálu zkušební tělesa [kg/m^3].

U zkušební tělesa se obvykle použije neobrobená část a zvolí se délka $L_0=200 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ nebo $100 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$. Drát musí být před začátkem zkoušky vyrovnán. K tomu, aby bylo těleso správně upevněno a nedocházelo ke zkreslení, se používá upnutí drátu do čelistí (obr. 11). Drát se nejprve ovine okolo kladky, a poté je jeho konec upnut do čelistí. Aby v čelistech nedocházelo k prokluzu, je nutné zvolit vhodnou sílu nebo povrch. Zvolený povrch se musí lišit od povrchu drátu, aby mezi nimi vzniklo vyšší tření.



Obr. 11 Čelisti používané k uchycení drátu [4]

2.1.3 Upnutí plechů [4], [26], [27]

Plech je kovová deska, která se vyrábí tvářením v různých tloušťkách a využívá se jako polotovary pro další výrobu. Pro tenké plechy platí, že mají tloušťku do 3 mm a při tahové zkoušce se zkušební tělesa odebírají z pásu nebo plechu ve třech směrech.

Lze si zvolit zkušební těleso, které bude odebráno ve stejném směru, kolmo nebo pod úhlem 45° vůči směru válcování. Všechny zkušební tělesa mají obdélníkový počáteční průměr a před samotnou zkouškou se musí připravit. Příprava spočívá v odstranění ploch, které byly zpevněny stříháním nebo lisováním.

Plech může být upnut pomocí dvou způsobů, buď se do zkušební tělesa v upínací části udělá otvor, do kterého se vloží čep, nebo pomocí plochých čelistí (obrázek 12).



Obr. 12 Upnutí plechu do plochých čelistí [4]

2.1.4 Upnutí trubek [5], [28], [29], [30]

U zkoušení trubek tahem (obr. 13) se určují mechanické vlastnosti ve směru rovnoběžném s osou. Pro zkoušku se používají tři základní tvary zkušebních těles; odřezek z trubky plného průřezu, válcová zkušební tyč a podélný či příčný pás segmentového průřezu.

Odřezek trubky plného průřezu se zkouší jako celek. Při samotné zkoušce se do dutiny trubky vkládá trn, který musí mít větší tvrdost než materiál zkoušeného tělesa. Tato tyč se volí v případě, že její průměr dosahuje rozměrů vnějšího okraje menších než 50 mm.

Trubkový zkušební vzorek se vyrábí vyříznutím z trubky kolmo k podélné ose. Tento typ tvaru zkušební tělesa se volí v případě, že tloušťka stěny je větší než 7 mm.

Zkušební těleso jako pás se volí v případě, že jeho průměr bude větší než 50 mm a jeho tloušťka nepřesáhne 7 mm. Podélný či příčný pás segmentového průřezu, který je vyřezán z trubky se nerovná, nechává se mu jeho původní zahnutý tvar, který je daný kruhovitým tvarem trubky.

Trubková zkušební tělesa se upínají v závislosti na jejich tvaru. V případě, že se jedná o výřez z trubky, je těleso upnuto do plochých čelistí. Má-li zkušební těleso plný průřez a je zkoušeno jako celek, volí se upnutí přes otvor ve zkušebním tělese a čep. Při upnutí přes čep lze trubku v upínací části zmáčknout, aby došlo k lepšímu uchycení.



Obr. 13 Zkoušení trubek tahem [5]

3 ZKUŠEBNÍ STROJE [2], [3], [4], [5], [16], [28]

Již od konce 19. století se začaly používat zkušební stroje, které namáhají zkušební těleso tahovou silou. Během let se stroje pozměnily, ale princip zůstal stále stejný. V současné době se pro tahovou zkoušku využívají dva typy zkušebních strojů – jednoúčelový zkušební stroj a univerzální zkušební stroj.

Jednoúčelový zkušební stroj (obr. 14) se využívá pouze k jednomu druhu zkoušky a nedosahuje takových výkonů a uplatnění jako univerzální zkušební stroj. Běžně je jím vybavena většina laboratoří. Lze ho využít i u zkoušek jiných než tahových, například u zkoušky tlakové, nebo ohybové.

Univerzální zkušební stroj se začal používat na konci minulého století. Jeho hlavní charakteristikou je maximální síla, kterou dokáže zatěžovat zkušební těleso. Pracuje na principu zpětné vazby, jinak řečeno reaguje na aktuálně měřené hodnoty.

Univerzální zkušební stroj se skládá ze zátěžového a řídicího systému. Uspořádání zkušebního vzorku a jeho zatěžování se řeší v zátěžové části. V řídicí části se řeší změny v aplikaci a získávají se zde odpovídající výsledky zkoušky.

Zatěžovací systém se skládá z nosného rámu, horního a dolního příčnicku a průtahoměru. Rám může být tvořen jednou nebo dvěma podporami. Dále je v jeho spodní části deska, kam se umísťují vzorky pro zkoušku tlakem. K nosné části patří také horní a dolní příčník, kdy dolní bývá obvykle hybný. Oba mají uprostřed otvor, ve kterém se nachází dvojice čelistí, do kterých se uchycuje zkušební těleso. V nosné části je i průtahoměr, který měří relativní pohyb horního a dolního příčnicku. Dále pak extenzometr, který snímá prodloužení tělesa.

V dnešní době lze rozdělit zkušební stroj dle několika kritérií; zda se jedná o zatěžování statické či dynamické, nebo dle typu pohonu, kterým je stroj poháněn. Stroje lze rozdělit dle pohonu na mechanický nebo hydraulický.



Obr. 14 Jednoúčelový zkušební stroj [4]

3.1 Mechanický zkušební stroj [4], [5], [8], [14], [16]

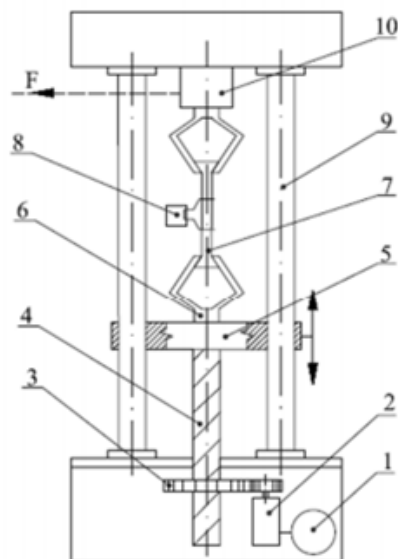
V dnešní době se namísto mechanického stroje spíše využívá elektromechanický zkušební stroj (obr. 15a). Mechanický stroj se oproti hydraulickému liší způsobem měření. U mechanických strojů, které jsou vybaveny dynamometrem se měří síla na principu mechanické váhy.

Síla, kterou stroj působí, je díky pohyblivému šroubu s maticí. Šroub je upevněn k pohyblivé části stroje, to mu umožňuje pohybovat se ve směru tlakového či tahového zatížení. Po upevnění zkušebního tělesa do čelistí trhacího stroje se spustí elektromotor. Točivý moment elektromotoru roztáčí matici pomocí například ozubeného kola. Tím dojde k pohybu příčnicku a následnému zatížení zkušebního tělesa. Popis mechanického stroje je na obrázku 15b.

Využití mechanického zkušebního stroje se v praxi liší dle síly, kterou je daný stroj schopen působit. Může se využít pro testování vysoce pevných kovů, pokročilých kompozitů nebo komponentů a řady dalších.



a) elektromechanický



b) schéma

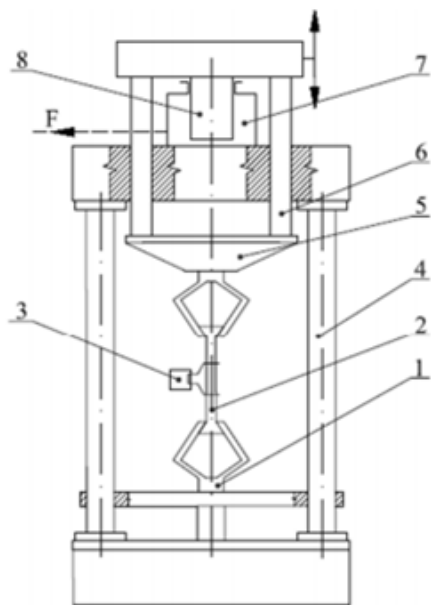
Obr. 15 Univerzální zkušební stroj [4], [8]

Mechanický zkušební stroj pracuje na principu, jehož schéma je na obrázku 15b. Elektromotor (1) přes převodovou skříň (2) a ozubené soukolí (3) ovládá vřeteno (4), které pohybuje pohyblivým příčnickem (5). K pohyblivému a nepohyblivému příčnicku jsou upnuty upínací hlavy (6), které umožňují upnutí zkušební vzorku (7). Během zkoušky je možné měřit deformaci průtahoměrem (8) a sílu pomocí dynamometru (10). Všechno je upevněno do rámu stroje (9).

3.2 Hydraulický zkušební stroj [2], [4], [5], [31]

Univerzální zkušební stroje s hydraulickým pohonem se používají pro zatížení větší než 200 kN. Síla, kterou je stroj schopen vyvinut, je vyvozena z hydraulického válce. Poté, co je zkušební těleso upnuto, začne se za pomoci čerpadla do hydraulického válce přivádět tlakový olej. To způsobí nadzvednutí pohyblivého příčnicku a zatížení zkušební tělesa. Popis hydraulického stroje lze vidět na obrázku 16a.

V praxi se využití hydraulického zkušební stroje (obr. 16b) liší stejně jako u mechanického, tedy v závislosti na jeho síle, kterou může působit. Lze ho využít například k testování ocelových lan, kotvicích a upeňovacích šroubů a mnoha dalších.



a) schéma



b) hydraulický

Obr. 16 Univerzální zkušební stroj [2], [4]

Hydraulický zkušební stroj pracuje na principu, který je znázorněn na obrázku 16b. Do upínací hlavy (1) je upnuto zkušební těleso (2) a jeho prodloužení je měřeno průtahoměrem (3). Vodící lišta (6), která prochází rámem stroje (4), vede pohyblivý příčník (5). V horní části stroje je hydraulický válec (7), ve kterém pracuje hydraulický píst (8).

3.3 Příslušenství zkušebních strojů [4], [30], [31]

K dosažení větší všestrannosti stroje slouží vhodné příslušenství. Mezi tato příslušenství lze zařadit například tlačné a ohybové příslušenství, teplotní komory a pece, extenzometr nebo vhodný typ čelistí. Tato příslušenství nejenom usnadní a zrychlí proces zkoušky, ale také zvýší kvalitu testování.

3.3.1 Tlačné a ohybové příslušenství [4], [19]

Tlačné desky (obr. 17a) patří mezi tlačné příslušenství a využívají se pro kompresní testování na široké škále materiálů a součástí. Tyto desky se nainstalují na univerzální zkušební stroj a umožní provádět testy k určení modulu komprese, pevnosti v tlaku a meze kluzu.



a) tlačné desky



b) tříbodový ohybový přípravek

Obr. 17 Tlačné a ohybové příslušenství [19]

Mezi ohybové příslušenství se řadí tři a čtyř bodové ohybové přípravky (obr. 17b). U těchto přípravků je vzorek nesen na dvou kovadlinách s definovaných poloměrem. Potom je na něj působeno silou, a to buď centrálně nebo v definované vzdálenosti po obou stranách od středu. Toto zatížení se používá pro cyklické nebo statické ohybové zatížení.

3.3.2 Příslušenství pro ohřev vzorku [4], [5], [19], [32]

Vysokoteplotní pece (obr. 18a) se využívají pro určení termoplastického chování, žáruvzdornosti, žaru pevnosti a rekrystalizační teploty materiálu. Pece obvykle pracují v teplotním intervalu od 200 °C do 1600 °C.

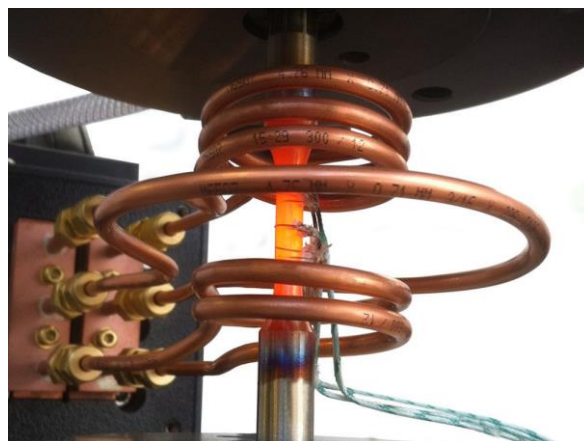
Teplotní komory (obr. 18b) slouží k temperování zkušebních těles v kladných a záporných teplotách v průběhu zkoušky. K výhodám teplotních komor patří široký teplotní rozsah a vyhřívané třívrstvé přední sklo, které umožňuje přesné snímání prodloužení pomocí extenzometru.

K ohřevu se kromě již zmíněné vysokoteplotní pece a teplotní komory používá i metoda indukčního ohřevu (obr. 18c). Jedná se o způsob ohřevu, který poskytuje rychlou možnost změny teploty a jednoduchou obsluhu. U tohoto typu ohřevu se zkušební zařízení skládá z indukčního ohříváče, úchytů vzorků pro vysokou teplotu a řídicího systému.



a) vysokoteplotní pec

b) teplotní komora



c) indukční ohříváč

Obr. 18 Příslušenství pro ohřev vzorku [4], [5], [32]

3.3.3 Extenzometry [4], [32], [33], [34], [35]

Mezi důležitý nástroj, který snímá prodloužení zkušební vzorku, patří extenzometr. Ten snímá prodloužení tělesa. K měření lze využít kontaktní nasazovací, nebo bezkontaktní extenzometr.

Kontaktní extenzometry (obr. 19) se oproti bezkontaktním využívají již mnoho let. Jejich použití spočívá v připnutí ke zkušebnímu vzorku například pomocí spon nebo elastických pásků. Deformace vzorku se pak sleduje pomocí hran nožů extenzometru.

Kontaktní extenzometry se dají podle hlavního účelu použití dělit do několika skupin. Rozlišují se dva základní typy. Připínací Clip-on extenzometry a extenzometry se sensorovými rameny:

- Clip-on extenzometry – pro účely měření se připnou na vzorek za pomoci upevňovacích ramen. Aby nedocházelo k prokluzu extenzometru, musí ramena působit dostatečně velkou přitlačnou silou na vzorek.
- Extenzometry se sensorovými rameny – se mohou na vzorek připnout jak manuálně, tak automaticky pomocí motorizovaného systému. Využívají se především pro plně automatizované testování.



Hlavní předností kontaktních extenzometrů je nízká cena a snadné použití. Mají však i nevýhody, a to že jejich kontaktní body dotyku se zkušebním tělesem mohou vytvářet napětí, čímž zapříčiní předčasný lom vzorku. Časem může také dojít k otupení nože extenzometru, čímž může dojít k jeho skluzu. I přes vývoj kontaktních extenzometrů nelze nechtěným účinkům zcela zabránit, a proto se čím dál více využívá extenzometrů bezkontaktních.

Bezkontaktní extenzometry jsou založeny na digitálních fotoaparátech s vysokým rozlišením a zpracováním obrazu v reálném čase, proto se jim také někdy přezdívá video extenzometry. Fungují na principu sledování reflexních bodů na zkušebním tělese. Před začátkem zkoušky systém vyhledá zaznačené značky a dle jejich středu měří prodloužení.

Mezi výhody patří produktivita, výkon a eliminace chyb způsobená nepřesným značením. Jejich hlavní nevýhodou je pořizovací cena. U zkoušky je též potřeba zajistit vhodné světelné podmínky, aby nedošlo ke špatnému snímání zkušební tělesa.

V dnešní době máme dva hlavní typy bezkontaktních extenzometrů, a to laserové extenzometry (obr. 20a), nebo optické extenzometry (obr. 20b):

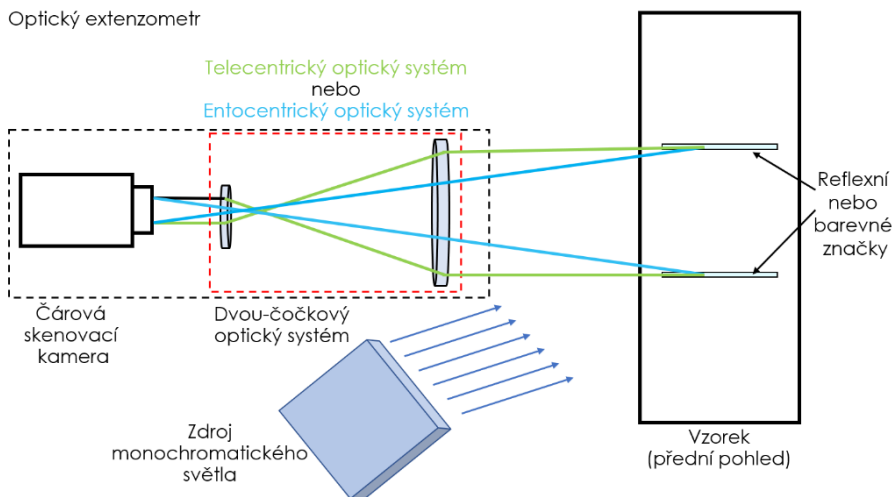


a) laserový

b) optický

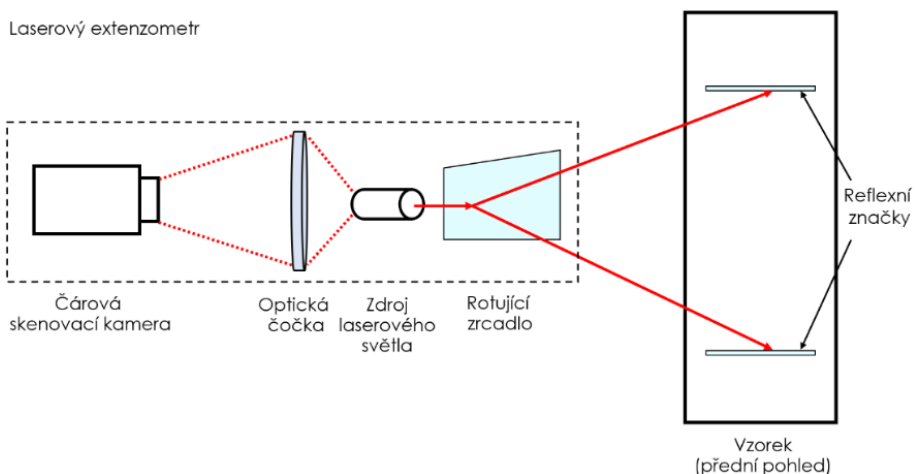
Obr. 20 Extenzometr [4], [35]

- Laserový extenzometr – schéma laserového extenzometru je vidět na obrázku 21. Skládá se z čárové skenující kamery, čočky, zdroje laserového světla a rotujícího zrcadla. Kamera snímá měřenou část tělesa, která je vyznačená reflexními značkami. K tomu, aby bylo možné snímat povrch v měřené oblasti slouží rotující zrcadlo. Samotné měření probíhá tak, že paprsek skenuje povrch zkušební tělesa v oblasti zorného pole a zaznamenává pohyby značek po zatížení. Tato naměřená data systém přepočítá na prodloužení.



Obr. 21 Laserový extenzometr [33]

- Optický extenzometr – schéma optického extenzometru, které je zobrazeno na obrázku 22, využívá namísto laserového zdroje monochromatický zdroj světla. Ten osvětluje měřenou část, která je vyznačena reflexními značkami. Celý extenzometr se skládá z telecentrického nebo entocentrického dvou-čočkového systému. Dále z čárové kamery jako u laserového extenzometru, nebo z kamery snímající stupně šedi. Druhá jmenovaná kamera rozpoznává změny a přechody mezi tmavým a světlým místy.



Obr. 22 Optický extenzometr [33]

4 SPECIÁLNÍ TYPY TAHOVÝCH ZKOUŠEK

Speciální typy tahové zkoušky se používají v případech, kdy je nutné zkoumat tahové zatížení zkušební vzorku za neobvyklých podmínek. Třeba u cyklické tahové zkoušky nebude zkušební těleso zatíženo pouze konstantně v jednom směru, ale bude namáháno opakovaně. U zkoušky dvouosé je těleso namáháno ve více než v jedné ose a u zkoušky za vysokých teplot působí na vzorek jak zatěžovací síla, tak vyšší než pokojová teplota.

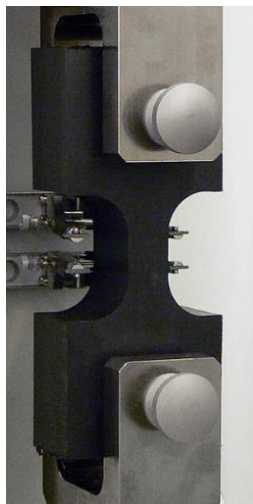
Tyto zkoušky probíhají na zkušebním stroji a zjišťuje se u nich stejná materiálová charakteristika. Oproti používanější jednoosé tahové zkoušce se u nich může lišit druh upnutí tělesa či jeho průběžná deformace.

4.1 Cyklická tahová zkouška [36], [37]

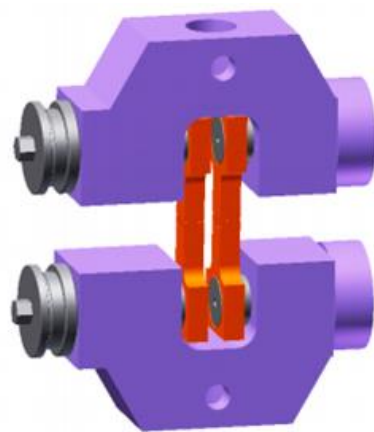
Cyklická tahová zkouška (obr. 23a) se liší v typu namáhání, kterým je zkušební těleso zatěžováno. Zatímco klasická tahová zkouška působí konstantním zatížením pouze tahem v jednom směru, cyklická tahová zkouška periodicky mění směr zatěžování, čímž na těleso působí tahem a tlakem stále dokola. Toto zatěžování je možné díky speciálnímu uchycení zkušební vzorku v čelistech trhacího stroje.

U cyklické zkoušky se používají stejná zkušební tělesa jako u statické tahové zkoušky. Tyto vzorky jsou upnuty do upravených čelistí (obr. 23b), které drží zkušební těleso pomocí opěrných desek, které jsou na obrázku značeny oranžově. Slouží k tomu, aby na tělese nedocházelo k ohybu a bylo namáháno pouze tlakem a tahem. Aby však nedocházelo k velkému tření mezi deskami a vzorkem, vkládají se mezi ně teflonové pásky. Desky také kopírují tvar tělesa a obsahují zámky. Opěrné desky se používají především u tenkostěnných vzorků.

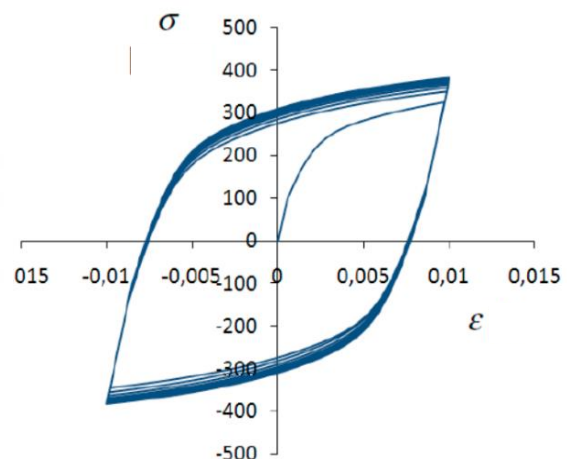
Cyklická zkouška probíhá za konstantní rychlosti a končí při dosažení požadovaného počtu cyklů. Výsledkem tahové cyklické zkoušky je skutečný diagram, tedy skutečná deformace na skutečném napětí. Závislost těchto dvou veličin se do diagramu vykresluje jako tzv. hysterezní smyčky (obr. 23c).



a) upnutí vzorku



b) speciální čelisti



c) tahový diagram

Obr. 23 Cyklická tahová zkouška [36], [37]

4.2 Zkouška za vysokých teplot [32], [38], [39]

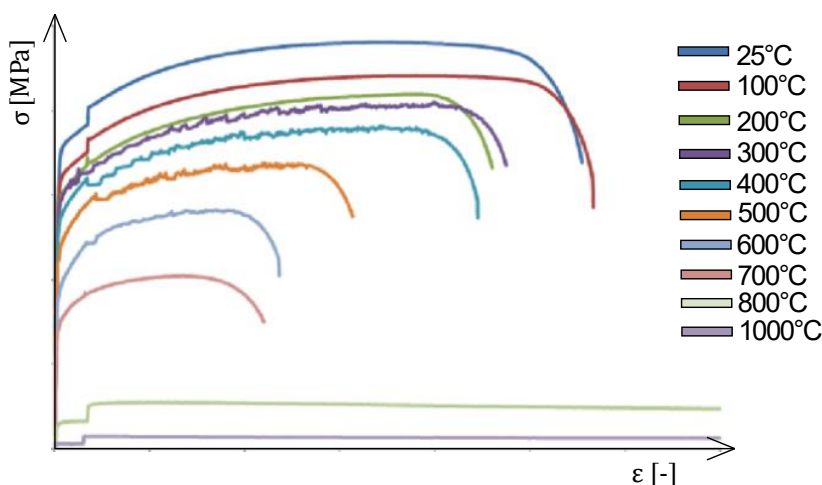
Zkouška za vysokých teplot je popsána normou ČSN EN ISO 6892-2 a provádí se na speciálních strojích, které připomínají trhačí. Stroj zatěžuje zkušební těleso silově a tepelně. Teplota je udržována pomocí výše zmíněného příslušenství pro ohřev (obr. 24), které zajišťuje rovnoměrné zahřátí zkušebního tělesa po celou dobu zkoušky. Doba testování oproti klasické jednoosé zkoušce je značně delší. Může trvat dny, týdny a v některých extrémních případech i měsíce. Z toho plyne, že je zkouška finančně velice náročná.

Ze zkoušky se vykreslují diagramy v závislosti napětí na prodloužení při zvýšené teplotě viz obrázek 25.

Zkouška za vysokých teplot se využívá k zjištění materiálových charakteristik u materiálů, které budou v praxi vystaveny působení vysoké teploty. V praxi se takto například testuje žárupevná ocel parních lopatek a spalovacích turbín. Lze ji též využít pro stanovení mechanických vlastností materiálů tvářených za vyšších teplot (za polohřevu nebo za tepla).



Obr. 24 Pícka pro udržení teploty [32]



Obr. 25 Porovnání zkoušek za různých teplot [39]

4.3 Zkouška za vysokých rychlostí deformace [40], [41], [42], [43]

Krom teploty ovlivňuje mechanické vlastnosti i rychlost zatěžování, ať už při tváření, nebo provozu. Je nutno tedy postihnout tuto zatěžovací rychlost. Rychlost přetvoření, kterým se těleso deformuje, je popsána rovnicí (4.1).

$$\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt} \quad (4.1)$$

kde: $\dot{\varphi}$ – rychlost přetvoření [s^{-1}],

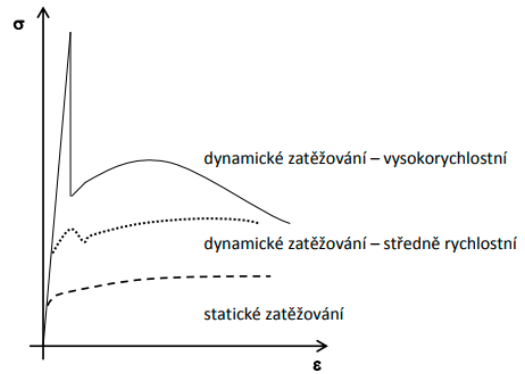
dt – derivace času [s].

Při vysokých rychlostech přetvoření materiál vykazuje jiné zpevnění a jinou křivku deformace (obr. 26). Tyto parametry jsou dále využívány pro simulace havárií.

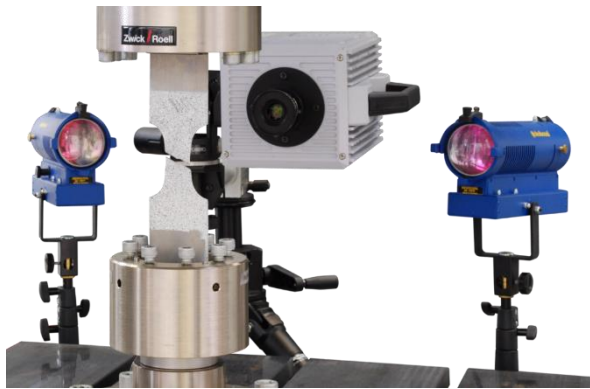
Aby bylo možné zaručit odpovídající bezpečnost materiálu, je nutné zjistit, jak reaguje při vysokých rychlostech. U vysokorychlostní zkoušky tahem se pomocí servo-hydraulického zkušebního zařízení dosahuje požadované rychlosti. Tato rychlost může dosahovat až 72 km/h. K měření se využívá ultra-vysokorychlostní kamera s maximální frekvencí 1 MHz. Tyto kamery jsou schopny pořídit jeden milion obrázků za sekundu (obr.27).

Jak bylo řečeno výše, zkouška slouží především pro simulace havárií, proto se zkouší především na plastických zkušebních vzorcích.

Mezi další často využívanou metodu testování za vysoké rychlosti deformace patří například Hopkinsonův test. Tato metoda je primárně využívána k tlakové zkoušce, ale použitím vhodné modifikace ji lze využít i pro zkoušku tahovou.

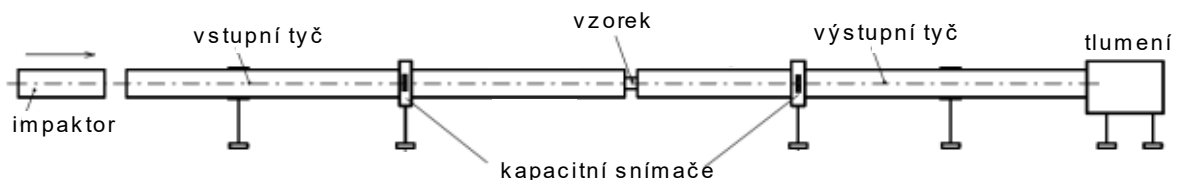


Obr. 26 Srovnání zkoušek za různých rychlostí [42]



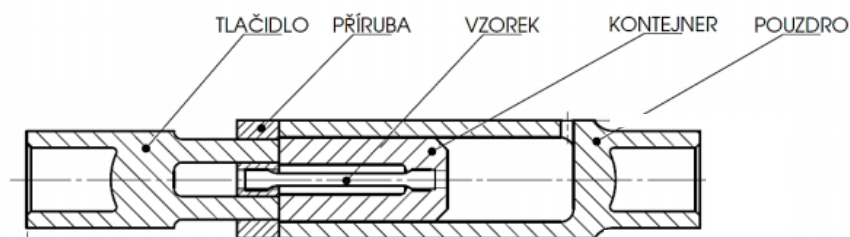
Obr. 27 Zkouška za vysokých rychlostí [43]

K uskutečnění Hopkinsonova testu se využívá zařízení, které je tvořeno vstupní a výstupní tyčí, mezi které se upíná zkušební vzorek. Na vstupní tyč dopadá impaktor, který je vystřelen z pneumatického kanonu a dodává tyči svou kinetickou energii. Tato energie se dále předává výstupní tyči, která je na konci opřena o pružný blok (obr. 28). Pro Hopkinsonův test se dynamické vlastnosti určují z elastických pulzů. Tyto pulzy jsou snímány válcovými kapacitními snímači, které jsou umístěny na měřicích tyčích.



Obr. 28 Schéma zařízení pro Hopkinsonův test [42]

Jeden z možných způsobů modifikace tohoto testu je vidět na obrázku 29. Přípravek je tvořen trubkovým pouzdrem, které je na jednom konci připojeno k výstupní tyči a na druhém konci má odnímatelnou přírubu. V přírubě jsou otvory pro průchod vstupní tyče, ty spolu s kontejnerem, který je suvně uložen v pouzdře, slouží k uchycení zkušebního tělesa.



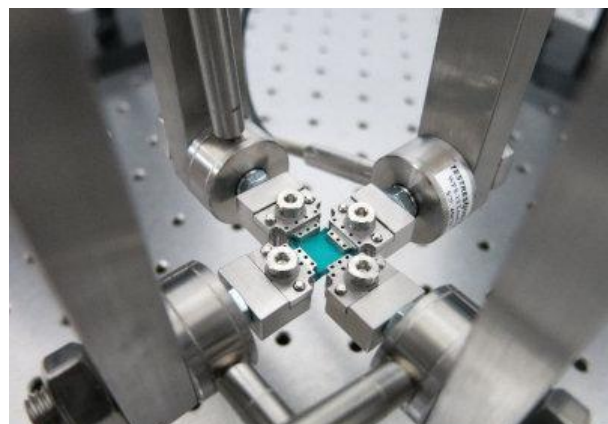
Obr. 29 Přípravek k dynamickému testování [42]

4.4 Víceosá tahová zkouška [17], [36], [44], [45], [46], [47], [48]

I když je jednoosá tahová zkouška nejběžnější a může působit na vzorek největším zatížením, tak se zvyšujícími se požadavky na kvalitu materiálu už není dostatečná pro tahovou zkoušku u elastomerů či plechů, na které jsou kladeny vyšší nároky. Proto se zavedla dvouosá neboli ekvibiaxiální tahová zkouška. Ta nabízí i změnu poměru posunutí mezi dvěma kolmými osami, lze tak ve střední oblasti vzorku získat různá lineární či nelineární biaxiální napětí a napěťové stavy. Zkouška se realizuje na speciálních přístrojích, které působí na vzorek dvouosým rovnoměrným či nerovnoměrným zatížením. U rovnoměrného zatěžování se dají použít dva základní typy zkoušky.

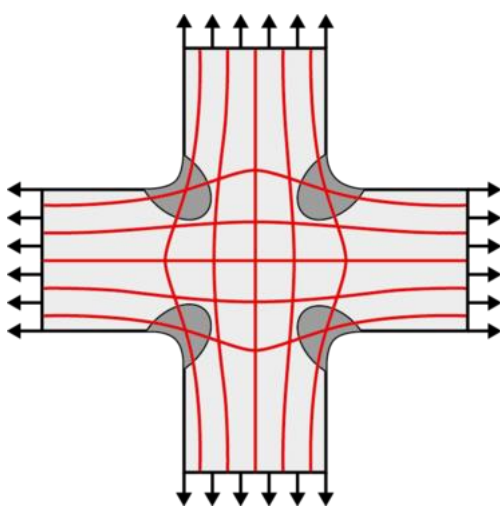
Lze zvolit zkoušku mechanickou, u které se bere čtvercové, kruhové nebo křížové zkušební těleso. Čtvercové a křížové vzorky jsou zatěžovány ve dvou na sobě kolmých směrech, kruhový vzorek je roztahován radiálně od středu. Pro oblast zkoušení kovů existuje návrhová norma ISO-FDIS 16842, která poskytuje návrhy vzorků, uspořádání zkoušky a zkušební postupy.

U dvouosé tahové zkoušky mechanické s čtvercovým zkušebním tělesem (obr. 30) probíhá měření pomocí značek vytvořených na zkušebním tělese. Ty jsou vyznačeny přibližně uprostřed, protože právě v tomto místě je zatěžování nejrovnoměrnější. Vzdálenost těchto značek je v průběhu zkoušky snímána, a to buď kamerou nebo laserovým extenzometrem. Vyhodnocení zkoušky proběhne pomocí speciálního softwaru, který snímá protažení značek. Snímá se tedy zase závislost působící síly na protažení vzorku.

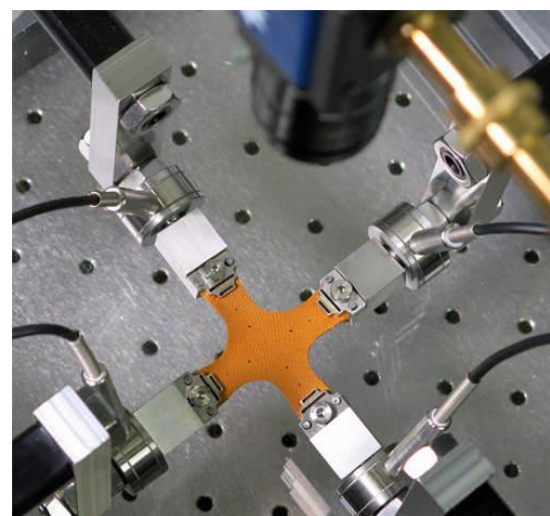


Obr. 30 Mechanická dvouosá zkouška [45]

Dvouosá tahová zkouška mechanická na křížovém tělese je zkouška, která funguje na stejném principu, jako při zatěžování čtvercového tělesa. Křížové zkušební těleso je namáháno pomocí dvou nebo čtyř hnacích os (obr. 31) ve dvou směrech, a to svislém a vodorovném. Toto zatěžování má za důsledek hromadění napětí v rozích křížového vzorku a označuje se jako zářezové napětí.



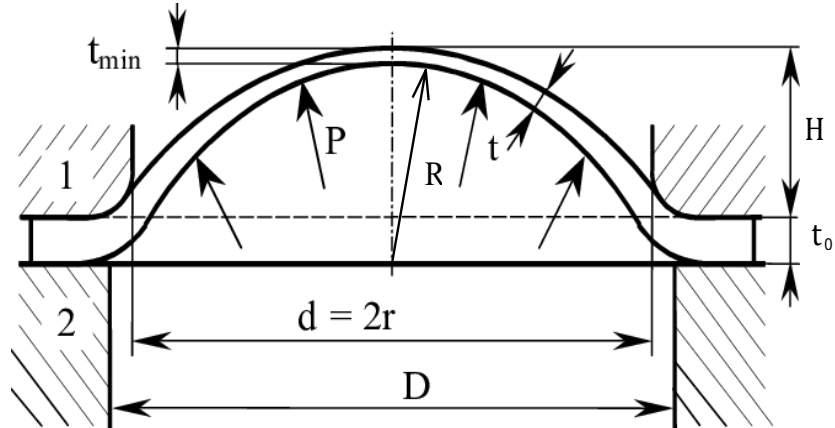
a) schéma



b) upnutí při zkoušce

Obr. 31 Křížové zkušební těleso a jeho namáhání [4], [45]

Druhá varianta je test hydraulického vyboulení neboli tzv. bulge test. Vzorek je po obvodu upnut do speciálního upínacího přípravku, poté se na něj působí tlakovým proudem, u kterého se jako působící tlakový medián ve většině případů používá kapalina, například minerální olej. Tímto působením dochází k pomalému nafukování a celkovému vyboulení vzorku (obr. 32). Je důležité, aby byl vzorek v držácích na obrázku označených čísly 1 a 2 uchycen dostatečně pevně, aby nedocházelo k prokluzu vzorku, nebo úniku kapaliny.



Obr. 32 Schématické znázornění hydraulického vyboulení [46]

Zkoušku lze vyhodnotit několika způsoby. Jedním z nich je zaznačit si body na zkušební tělese, které se analyzují pomocí speciálního softwaru. Ten vyhodnocuje vzdálenost těchto bodů a poloměr zakřivení vybouleného vzorku. Výsledkem zkoušky je pak závislost skutečného napětí na přetvoření.

Dalším způsobem vyhodnocení je použití Laplaceovy rovnice rovnováhy, viz rovnice (4.2). Ta pro kruhovou tažnici uvažuje, že výsledné tahové napětí σ_1 , σ_2 a poloměry R_1 , R_2 budou stejné, a tak může být rovnice zjednodušena do tvaru (4.3). Přetvoření se poté spočítá jako logaritmická změna tloušťky stěny vzorku, viz. rovnice (4.4).

$$\frac{\sigma_1}{R_1} + \frac{\sigma_2}{R_2} = \frac{p}{t} \quad (4.2)$$

kde: σ_1 , σ_2 – tahové napětí [MPa],
 p – tlak [Mpa],
 R_1 , R_2 – poloměry zakřivení [mm],
 t – aktuální tloušťka [mm].

$$\sigma = \frac{p \cdot R}{2 \cdot t_{\min}} \quad (4.3)$$

$$\varphi = \ln\left(\frac{t_0}{t_{\min}}\right) \quad (4.4)$$

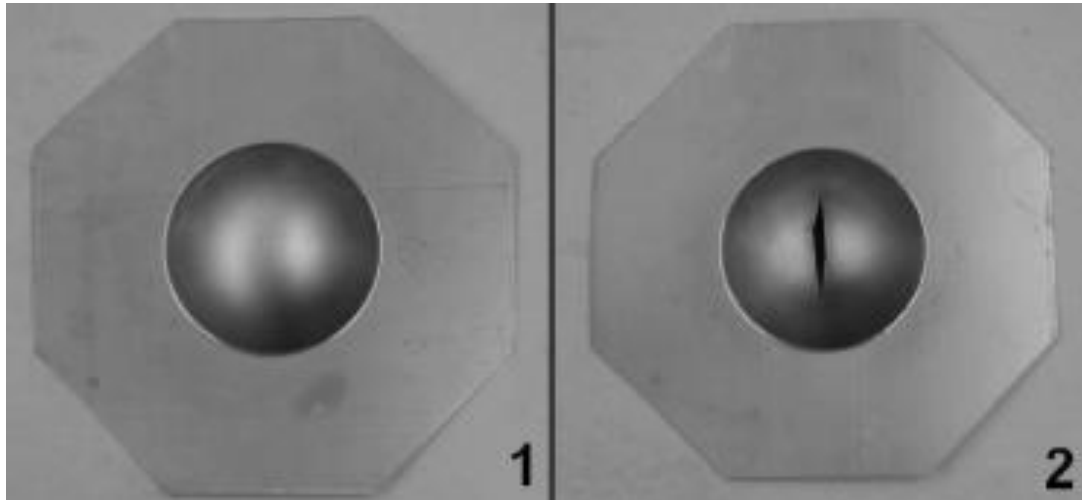
kde: R – poloměr vyboulení [mm],
 t_{\min} – minimální tloušťka plechu [mm],
 t_0 – počáteční tloušťka plechu [mm].

U zkoušky je důležité i odečtení výšky vyboulení zkušební tělesa, které slouží k zjištění poloměru vyboulení.

$$R = \frac{d + 4 \cdot H}{8 \cdot H} \quad (4.5)$$

kde: H – výška vyboulení [mm],
 d – průměr dutiny formy [mm].

U zkoušky se dále zkoumá, zda při tlakovém zatížení vznikla nebo nevznikla na zkušebním tělese trhlinka. Z tohoto zjištění se stanovuje tvařitelnost materiálu. Porovnání dvou zkušebních těles, kdy jedno bez trhliny a druhé s ní, lze vidět na obrázku 33.



a) bez trhliny

b) s trhlinou

Obr. 33 Zkušební vzorky po zkoušce [48]

V dnešní době se dá dvouosá tahová zkouška vyhodnocovat i moderními způsoby. Tyto způsoby budou popsány a vysvětleny v další kapitole.

5 MODERNÍ ZPŮSOBY VYHODNOCENÍ [49], [50], [51]

Vyhodnocování zkoušky je nejdůležitější částí celého experimentu, proto je potřeba zaznamenat výsledek přesně. V dnešní době se dá zkouška vyhodnocovat metodou analýzy obrazu. Tato metoda je vhodná především pro plechové vzorky. Analýza obrazu pracuje na principu digitální korelace obrazu zkráceně DIC (z anglického digital image correlation).

DIC funguje na základě porovnání digitálních fotografií pořízených v různých fázích deformace zkušební tělesa. Systém měří povrchové deformace na základě rozpoznání skvrn, tzv. patternu. Pattern musí mít izotropní charakter a je nanesen na povrch snímaného tělesa. Často používanou možností nanesení patternu na zkušební těleso je nástřik. Pro nástřik se volí barva s matným charakterem, aby nedocházelo k odražení světla. U menších těles o velikosti do 12 mm se nanáší pattern tonerem, u ještě menších zkušebních těles se využívá litografie. Naopak u těles o velikosti až několik metrů se většinou vzor nanáší pomocí terčků a šablon. Tyto nanesené skvrny představují optický otisk, který je identifikován pomocí softwarových algoritmů. Pořízené snímky jsou poté korelovány s referenčním obrazem a je z nich pořízena 2D a 3D deformační mapa zkoušeného objektu.

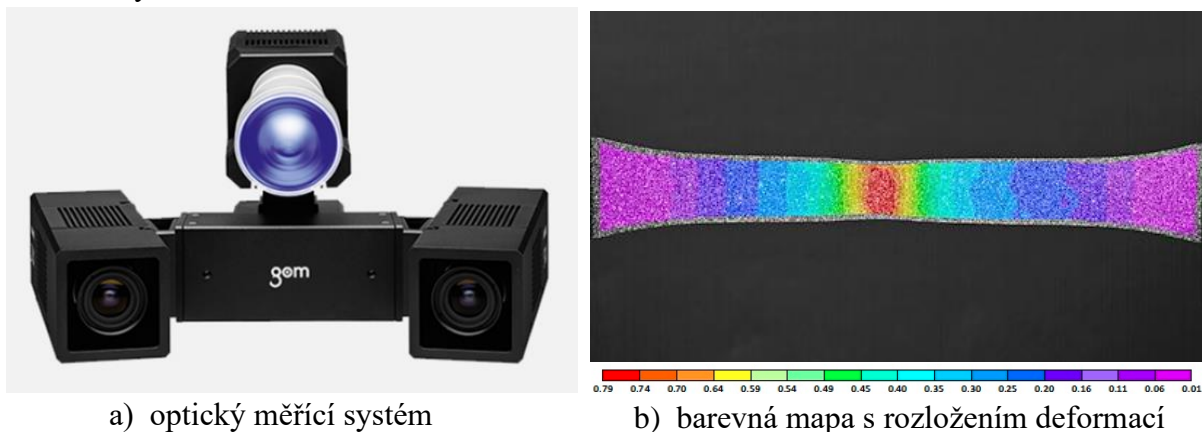
Mezi významné firmy, které se zabývají vytvářením systémů pro optické vyhodnocování velikosti deformace patří například německá firma GOM (Gesellschaft für optische Messtechnik – Společnost pro optickou měřicí techniku) se systémy Argus a Aramis, česká firma Sobriety a jejich měřicí systém Monet 3D, nebo firmy Dantec Dynamics, Gimret, Aicon a jejich optické měřicí systémy. Díky široké použitelnosti, rychlosti a přesnosti se v praxi vyskytují tyto systémy stále častěji. Jejich hlavní nevýhodou však stále zůstává vysoká cena.

5.1 Aramis

Jeden z nevhodnějších měřicích systémů pro tahovou zkoušku je bezkontaktní měřicí optický systém ARAMIS, který k snímání objektu používá dvě kamery, mezi kterými je zářič světla. Kamery i zářič jsou uloženy na jednom rameni (obr. 34a).

Systém dokáže měřit komponenty z jakéhokoliv materiálu. Může měřit deformace na povrchu v konkrétním bodě nebo celoplošně. Systém může provádět měření v rozsahu od několika milimetrů až po několik metrů.

Výsledkem je barevná mapa s rozložením deformací na testovaném objektu (obr. 34b), hodnoty 3D souřadnic, rychlostí, zrychlení, posuvů a povrchových napětí pro zatěžování statické i dynamické.



Obr. 34 ARAMIS [49], [51]

6 ZÁVĚRY

V úvodu práce byl vysvětlen princip tahové zkoušky a základní možnosti vyhodnocení včetně přepočtu tahového diagramu ze smluvních do skutečných souřadnic.

Dále byla v práci provedena rešerše zaměřená na zkušební tělesa, způsob jejich odběru, geometrii a upnutí, které se používá pro jejich uchycení do čelistí. Nejčastěji se volí uchycení do hydraulických, mechanických, nebo pneumatických čelistí.

Další kapitola práce se věnovala zkušebním strojům, které se využívají pro zkoušku tahem. Mezi zkušební stroje se řadí jednoúčelový nebo universální trhací stroj s hydraulickým či mechanickým pohonem. Bylo popsáno i příslušenství zkušebního stroje, tedy tlačné a ohybové příslušenství, příslušenství pro ohřev vzorku a extenzometry.

V práci byl rovněž vysvětlen princip dalších možností a uplatnění tahové zkoušky v praxi. Jedná se především o zatížení vzorku tahem při různé teplotě, rychlosti, cyklickém zatížení, nebo víceosém zatížení. U teplotní zkoušky je potřeba vzorek ohřát, k čemuž se v současné době nejvíce používá vysokoteplotní pec, teplotní komora, nebo indukční ohříváč. Jak z rešerše vyplynulo u vysokorychlostních zkoušek je problém s vyvozením tahového zatížení. Proto byla popsána jedna z možných modifikací tlakové zkoušky za použití Hopkinsonovy metody. U dvouosé tahové zkoušky, která zatěžuje vzorek víceosým zatížením, byla vysvětlena mechanická metoda a metoda hydraulickým vyboulením.

Závěr práce se věnoval současným trendům a způsobům vyhodnocení zkoušky pomocí analýzy obrazu, která se stále více rozšiřuje a využívá 3D optický způsob měření. Pro názornost byl popsán systém ARAMIS.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [52]

1. HOSFORD, William F. *Metal forming*. 4 vydání. Cambridge University Press, 2011. ISBN 1107004527.
2. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálech*. Purkyňova 95 a, 612 00 Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, 2003. ISBN 80–7204 - 283 - 1.
3. *Kovové materiály – zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Český normalizační institut, 2010.
4. *Zwick roell* [online]. Brno, 2015 [cit. 2021-4-19]. Dostupné z: <https://www.zwickroell.com>
5. *Instron* [online]. Norwood [cit. 2021-4-19]. Dostupné z: <https://www.instron.us/en-us/products/testing-systems/universal-testing-systems/low-force-universal-testing-systems>
6. HUNT, Rachel. *Tensile Testing for 3D Printing Materials* [online]. 2020 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.protolabs.com/resources/blog/tensile-testing-for-3d-printing-materials>
7. *SMaRT* [online]. Swansea, 2019 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://smart-swansea.com/>
8. PLUHAŘ, Jaroslav. *Nauka o materiálech*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1989. ISBN 04–205 - 89.
9. LIČKOVÁ, Dagmar. *Vlastnosti a zkoušení materiálu. Vlastnosti a zkoušení materiálu* [online]. Ostava, 2016 [cit. 2021-4-15]. Dostupné z: https://homel.vsb.cz/~lic098/files/3.cviceni_VZM.pdf
10. SMETANOVÁ, Anna. *Statická zkouška tahem*. <https://www.zamekkurim.cz/> [online]. Kuřim [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: http://www.zamekkurim.cz/security/Dum%20-%20Digitalni%20ucebni%20materialy/13_Sada_Materialy_2/VY_32_INOVACE_13_05_Staticka_zkouska_tahem.pdf
11. *Tahový diagram materiálu s výraznou mezí kluzu. Tahový diagram materiálu s výraznou mezí kluzu* [online]. 2020 [cit. 2021-4-15]. Dostupné z: <https://www.spszengrova.cz>
12. DROZD, Zdeněk. *Křivky plastické deformace – technická praxe*. <http://vnuf.cz/> [online]. Praha, 2012 [cit. 2021-4-19]. Dostupné z: http://vnuf.cz/sbornik_old/rozsirene/Drozdkrivky_tehn_praxe.html
13. WILLEY, John. *Stress–strain curves of metallic materials and post-necking strain hardening characterization*. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*. [online]. 2019, 17 [cit. 2021-4-19]. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/ffe.13134>
14. VÁVRA, Pavel a Svatopluk ČERNOCH. *Oceli, značení ocelí, slitiny železa, odlitky, označování ocelí. Strojírenské tabulky* [online]. Praha: Dashöfer Holding, Ltd. a Verlag Dashöfer, 2014 [cit. 2021-4-19]. Dostupné z: www.strojnicketabulkyonline.cz
15. DAVIS, Joseph R. *Introduction to Tensile Testing*. *ASM International* [online]. 2004. Ohio: ASM International, 2004, s. 13 [cit. 2021-4-19]. ISBN 978-0-87170-806-9. Dostupné z: https://www.asminternational.org/documents/10192/3465262/05105G_Chapter_1.pdf/e13396e8-a327-490a-a414-9bd1d2bc2bb8
16. JANDA, Luděk. *Tahová zkouška trubek*. Brno, 2015. Bakalářská práce. VUT. Vedoucí práce Ing. EVA PETERKOVÁ, Ph.D.

17. SKÁLOVÁ, Jana. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 3. Plzeň: Západočeská univerzita, Strojní fakulta, 2000. ISBN 80-7082-623-1.
18. LASOTA, Tomáš. *Návrh testování elastomerů a MKP výpočet koncovky klimatizačního vedení*. Brno, 2007. Diplomová práce. VUT. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Burša, Ph.D.
19. MINAŘÍK, Jaroslav. Mechanické upínací čelisti. *Labormachine* [online]. Otice, 2007 [cit. 2021-4-19]. Dostupné z: https://www.labormachine.cz/mechanicke-upinaci-celisti_pd79
20. Jaw Selection for Tensile Grips. *ADMET* [online]. Norwood, 2003 [cit. 2021-4-19]. Dostupné z: <https://www.admet.com/tensile-grip-jaw-selection/>
21. *Yotta Volt* [online]. Sofia, 2005 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://www.yottavolt.com/about-us>
22. *Modulus and matrix* [online]. 2015 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://modulusandmatrix.co.uk>
23. *Labintercomp* [online]. Gijón, 2018 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://labintercomp.com>
24. OŠTÁDAL, Josef. *Zkoušky tvaritelnosti a jejich uplatnění v praxi*. Brno, 2011. Bakalářská práce. VUT. Vedoucí práce Ing. KAMIL PODANÝ, Ph.D.
25. BAROŇ, Michal. *Konstrukce upínacích čelistí pro zkoušku tahem drátů a kordů*. Zlín, 2008. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. Milan Žaludek, Ph.D.
26. IVANČO, Radek. *Zkoušky plechu ve strojírenské praxi*. Brno, 2017. Bakalářská práce. VUT. Vedoucí práce doc. Ing. Milan Dvořák, CSc.
27. *TestForce* [online]. Praha, 2020 [cit. 2021-4-19]. Dostupné z: <http://www.testforce.cz/>
28. JANDA, Luděk. *Tahová zkouška trubek*. Brno, 2015. Bakalářská práce. VUT. Vedoucí práce Ing. EVA PETERKOVÁ, Ph.D.
29. Zkoušky mechanických a technologických vlastností trubek. *Ocelové trubky* [online]. 2011 [cit. 2021-4-19]. Dostupné z: <https://www.bezesve-trubky.cz/zkousky-vlastnosti-trubek/>
30. *Steeltec* [online]. Třinec, 2003 [cit. 2021-4-19]. Dostupné z: <https://www.steeltec.cz/>
31. JAMES, Neenu. Universal Testing Machine – Components and Functions. *The Constructor* [online]. 2012 [cit. 2021-4-19]. Dostupné z: <https://theconstructor.org/practical-guide/universal-testing-machine-components-functions>
32. *Labortech. Příslušenství pro tahové a tlakové zkoušky* [online]. Opava, 2020 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://www.labortech.cz>
33. DVOŘÁK, Jan. Měření deformace průtažnosti na bezkontaktních technologiích. *Jan Dvořák, s.r.o* [online]. Praha, 2018 [cit. 2021-4-19]. Dostupné z: <https://www.testsysteme.cz/mereni-deformace-prutaznosti-se-zamerenim-na-bezkontaktni-technologie>
34. JINNAPAT, Apichart. Advantages of Video Non-Contact Extensometers. *AZO materials* [online]. 2007 [cit. 2021-4-19]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=3684>
35. *Epsilon* [online]. Jackson, 2011 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://www.epsilontech.com/products/optical-extensometer/>

36. JUPPA, Jan. *Predikce velikosti odpružení pomocí numerické simulace v prostředí PAM STAMP 2G při ohybu tenkých plechů*. 2015. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.
37. HALAMKA, Jiří. *Kalibrace parametrů modelu cyklické plasticity*. Praha, 2019. Bakalářská práce. ČVUT. Vedoucí práce Doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
38. PROCHÁZKA, Karel. Zkoušky za vyšších nebo nízkých teplot. SSPU [online]. 2012 [cit. 2021-4-19]. Dostupné z: https://www.sspu-opava.cz/static/UserFiles/File/sablony/KOM_III/VY_52_INOVACE_J-05-25.pdf
39. CODRINGTON, John. *Induction heating apparatus for high temperature testing of thermo-mechanical properties*. Adelaide, 2009. The University of Adelaide.
40. *Failure mechanisms of carbon nanotube fibers under different strain rates* [online]. Singapore, 2012 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/256677834_Failure_mechanisms_of_carbon_nanotube_fibers_under_different_strain_rates. Nanyang Technological University.
41. *High Strain Rate Tension Tests* [online]. Ohio, 2020 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://dmm.engineering.osu.edu/laboratory-equipment/high-strain-rate-tension-tests>
42. *Ověření možnosti využití tahové deformace při Hopkinsonově testu*. Brno, 2014. Disertační práce. VUT. Vedoucí práce Prof. Ing. MILAN FOREJT, CSc.
43. High speed tensile test. UL LLC [online]. Krefeld, 2011 [cit. 2021-4-19]. Dostupné z: <https://www.ultrac.com/en/solutions/test-methods/mechanical/high-speed-tensile-test.html>
44. NEVRLKA, Pavel. *Modifikace zařízení pro testování dvouosé napjatosti elastomerů*. 2011. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
45. BROSCHE, Bob. Planar biaxial test. TESTRESOURCES [online]. Shakopee, 2008 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://www.testresources.net/applications/test-types/planar-biaxial-test>
46. GAGOV, Valentin, Boris TOMOV a Emil YANKOV. *About the sheet metal testing by hydraulic bulging* [online]. Ruse, 2011 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/236201153_Research_highlights_of_sheet_metal_testing_by_hydraulic_bulging. University of Ruse Angel Kanchev.
47. SIENIAWSKI, Jan a Waldemar ZIAJA. Formability Characterization of Titanium Alloy Sheets. *Titanium Alloys*. Rijeka, 2013, s. 34. ISBN 9781845695866
48. KOÇ, Muammer a Eren BILLUR. *An experimental study on the comparative assessment of hydraulic bulge test analysis methods*. Richmond, 2010. Virginia Commonwealth University.
49. ARAMIS. Trilion [online]. Braunschweig, 2005 [cit. 2021-4-19]. Dostupné z: <https://trilion.com/aramis/>
50. Tensile Test: Comprehensive Materials Testing Especially in Mechanical Engineering. GOM [online]. Rünigen [cit. 2021-4-19]. Dostupné z: <https://www.gom.com/en/topics/tensile-test>
51. Digital Image Correlation. Veryst [online]. Needham, 2016 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://www.veryst.com/services/testing/specialized-tools-and-techniques/digital-image-correlation>
52. CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. 2013 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Název
A_c	[%]	tažnost
A_g	[%]	homogenní tažnost
d	[mm]	průměr dutiny formy
dt	[s]	derivace času
E	[MPa]	modul pružnosti v tahu (Youngův modul)
F	[N]	působící síla
F_{max}	[N]	maximální síla
H	[mm]	výška vyboulení
L_g	[mm]	vzdálenost do dosáhnutí maximální meze pevnosti
L_o	[mm]	počáteční délka tělesa
L_t	[m]	celková délka zkušebního tělesa
L_u	[mm]	konečná délka
m	[kg]	hmotnost zkušebního tělesa
p	[Mpa]	tlak
R	[mm]	poloměr vyboulení
R_1, R_2	[mm]	poloměry zakřivení
R_m	[MPa]	mez pevnosti
S	[mm]	okamžitý průřez
S_o	[mm]	počáteční průřez tělesa
S_u	[mm]	průřez tyče v místě lomu
t	[mm]	aktuální tloušťka
t_{min}	[mm]	minimální tloušťka plechu
t_o	[mm]	počáteční tloušťka plechu
Z	[%]	zúžení
ΔL	[mm]	přírůstek délky
ε	[%]	poměrná deformace
ρ	[kg/m ³]	měrná hmotnost materiálu zkušebního tělesa
σ	[MPa]	smluvní napětí
$\bar{\sigma}$	[MPa]	skutečné napětí
σ_1, σ_2	[Mpa]	tahové napětí
φ	[-]	skutečná deformace
$\bar{\varphi}$	[s ⁻¹]	rychlost přetvoření

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Zkouška tahem.....	9
Obr. 2 Princip tahové zkoušky.....	10
Obr. 3 Smluvní diagram tahové zkoušky.....	11
Obr. 4 Pracovní diagram s mezí kluzu.....	12
Obr. 5 Homogenní a celková tažnost	13
Obr. 6 Porovnání smluvního a skutečného diagramu.....	14
Obr. 7 Zkušební tělesa.....	15
Obr. 8 Měrná a upínací plocha tělesa.....	15
Obr. 9 Vzorek.....	16
Obr. 10 Upínání.....	17
Obr. 11 Čelisti používané k uchycení drátu.....	18
Obr. 12 Upnutí plechu do plochých čelistí.....	18
Obr. 13 Zkoušení trubek tahem.....	18
Obr. 14 Jednoúčelový zkušební stroj.....	19
Obr. 15 Univerzální zkušební stroj.....	20
Obr. 16 Univerzální zkušební stroj.....	21
Obr. 17 Tlačné a ohybové příslušenství.....	21
Obr. 18 Příslušenství pro ohřev vzorku.....	22
Obr. 19 Kontaktní extenzometr.....	23
Obr. 20 Extenzometr.....	23
Obr. 21 Laserový extenzometr.....	24
Obr. 22 Optický extenzometr.....	24
Obr. 23 Cyklická tahová zkouška.....	25
Obr. 24 Píčka pro udržení teploty.....	26
Obr. 25 Porovnání zkoušek za různých teplot.....	26
Obr. 26 Srovnání zkoušek za různých rychlostí.....	27
Obr. 27 Zkouška za vysokých rychlostí.....	27
Obr. 28 Schéma zařízení pro Hopkinsonův test.....	27
Obr. 29 Přípravek k dynamickému testování.....	27
Obr. 30 Mechanická dvouosá zkouška.....	28
Obr. 31 Křížové zkušební těleso a jeho namáhání.....	28
Obr. 32 Schématické znázornění hydraulického vyboulení.....	29
Obr. 33 Zkušební vzorky po zkoušce.....	30
Obr. 34 ARAMIS.....	31

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Hlavní druhy zkušebních těles podle typu výrobku.....	15
--	----