



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TAHOVÁ ZKOUŠKA TRUBEK

THE TENSILE TEST OF TUBES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

LUDEK JANDA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. EVA PETERKOVÁ, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Luděk Janda

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

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

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:

Tahová zkouška trubek

v anglickém jazyce:

The Tensile Test of Tubes

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o provedení a vyhodnocení tahových zkoušek u trubek.

Cíle bakalářské práce:

Provedení literární studie oblasti týkající se tahových zkoušek zejména trubek. Realizace a vyhodnocení experimentálních tahů s důkladnou analýzou procesu vzniku krčku. Zjištění základních materiálových charakteristik. Vyvození závěrů.

Seznam odborné literatury:

1. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
2. MARCINIAK, Z, J.L. DUNCAN a S.J. HU. Mechanics of sheet metal forming. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002, xx, 211 s. ISBN 07-506-5300-0.
3. HOSFORD, William F. a Robert M. CADDEL. Metal Forming: Mechanics and Metalurgy. 4th ed. New York: Cambridge University Press, 2011. ISBN 978-1-107-00452-8.
4. PETRUŽELKA, Jiří. Tvařitelnost a nekonvenční metody ve tváření. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2000, 146 s. ISBN 80-707-8635-3.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Eva Peterková, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 13.11.2014

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

JANDA Luděk: Tahová zkouška trubek

Předložená bakalářská práce se zabývá tahovou zkouškou zkušebních vzorků z trubek a ověřuje možnosti získání odpovídajících materiálových charakteristik. V práci byly zkoumány celkem 3 typy vzorků z trubek zhotovených dle normy ČSN EN 10002-1. Pro experimenty byly vybrány podélně svařované trubky z oceli 17 240. Použitá trubka byla označena jako tenkostěnná. Byly provedeny tahové zkoušky celkem 22 vzorků, a to 8 x ve tvaru odřezku trubky plného průřezu, 10 x ve tvaru pásu segmentového průřezu a 4 x ve tvaru příčného výřezu z trubky. Cílem této bakalářské práce bylo ověření možností získání materiálových charakteristik, hodnoty exponentu deformačního zpevnění „n“ a materiálové konstanty „C“ ze vzorků z trubek. Dále bylo zkoumáno, který tvar vzorků z trubek užívaných pro tahové zkoušky je nejvhodnější a sledováno chování jednotlivých vzorků při tahovém zatížení. Pro tahovou zkoušku byl zvolen hydraulický zkušební stroj ZD40.

Klíčová slova: Tahová zkouška trubek, hodnoty „n“ a „C“, deformační síť, materiálové charakteristiky.

ABSTRACT

JANDA Luděk: The Tensile Test of Tubes

The present thesis deals with the tensile test of tube samples and verifies the possibilities of obtaining the corresponding material characteristics. In this work, a total of 3 types of tube samples made according to ČSN EN 10002-1 were investigated. For the experiments, longitudinally welded tubes made of 17 240 steel were selected. The used tube was marked as a thin-walled one. Tensile tests were performed on 22 the samples, namely 8 samples on samples having a form of a cut-off of a full cross section tube, 10 samples a strip of segment cross section and a 4 samples transverse cut-out of tube. The goal of thesis was to validate options of acquiring material characteristics, value of deformation hardening exponent „n,, and material characteristic „C,, of tube samples. Further examination was aimed at designating which shape of sample tubes used for tension test is most suitable. And behaviour of individual samples was examined with tensile load applied. Tension tests were conducted on hydraulic test machine ZD40.

Keywords: tube tensile test, the value of "n" and "C", deformation grid, material characteristics.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JANDA, Luděk. *Tahová zkouška trubek*. Brno, 2015. 55s, 2 přílohy, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Eva PETERKOVÁ Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 29. 5. 2015

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji paní Ing. Evě Peterkové, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Poděkování

Obsah

ÚVOD

1. ROZBOR ŘEŠENÉHO PROBLÉMU.....	10
1.1 Zkouška tahem.....	10
1.2 Zkušební tyče.....	11
1.2.1 Poměrná zkušební tyč.....	13
1.2.2 Nepoměrná zkušební tyč.....	14
1.3 Zkušební trhací stroj.....	15
1.4 Vyhodnocení tahové zkoušky.....	16
1.4.1 Pracovní diagram.....	17
1.4.2 Smluvní diagram napětí – deformace.....	19
1.4.3 Vyhodnocení základních mechanických vlastností.....	20
2 TAHOVÁ ZKOUŠKA TRUBEK.....	23
2.1 Druhy a rozměry zkušebních tyčí.....	23
2.2 Výpočet plochy průřezu.....	27
3 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE.....	28
4 PŘÍPRAVA EXPERIMENTU.....	29
4.1 Volba materiálu.....	29
4.2 Zkušební vzorky.....	29
4.2.1 Zkušební tyče ve tvaru odřezku trubky plného průřezu.....	30
4.2.2 Zkušební tyč ve tvaru pásu segmentového průřezu.....	31
4.2.3 Zkušební tyč ve tvaru příčného výřezu z trubky.....	32
4.3 Nanášení kružnicové deformační sítě.....	33
4.3.1 Princip nanášení sítě na rovinný vzorek.....	33
4.3.2 Princip nanášení sítě na trubky.....	34
4.3.3 Zhodnocení použité metody.....	34
4.4 Vyhodnocení přetvoření pomocí deformační sítě.....	35
4.5 Trhací stroj.....	36
4.6 Zjištění koeficientů n a C	36
4.6.1 Dvoubodová metoda.....	37
4.6.2 Aproximace křivky.....	37
4.6.3 Určení n z hodnot síly změřené při dané deformaci.....	38
5 PROVEDENÍ A VYHODNOCENÍ EXPERIMENTUů.....	39
5.1 Tahová zkouška celistvých trubek.....	39
5.1.1 Tahová zkouška celistvých trubek do přetržení.....	39
5.1.2 Odstupňovaná tahová zkouška celistvých trubek.....	42
5.2 Tahová zkouška podélných výřezů z trubky.....	47
5.2.1 Tahová zkouška výřezů z trubky do přetržení.....	47
5.2.2 Odstupňovaná tahová zkouška, stanovení hodnot n a C	48
5.3 Tahová zkouška příčného výřezu z trubky.....	51
6 ZÁVĚRY.....	54
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů a zkratk, Seznam příloh	

ÚVOD [27]

Zkoušení mechanických vlastností materiálu je základním hlediskem při rozhodování o technologických postupech. Pro stanovení základních mechanických vlastností (mez kluzu, mez pevnosti, tažnost, kontrakce...) zkoušeného materiálu se často využívá tahová zkouška. Tahová zkouška je základní a nejrozšířenější mechanická zkouška.

Tato zkouška se nejčastěji využívá u vzorků kruhového průřezu nebo vzorků z plechu, kde probíhá v podmínkách jednoosého zatěžování. Potom je metodika zkoušek a zpracování výsledků v zásadě bezproblémovou záležitostí. Tato práce však pojednává o provádění tahových zkoušek na trubkách.

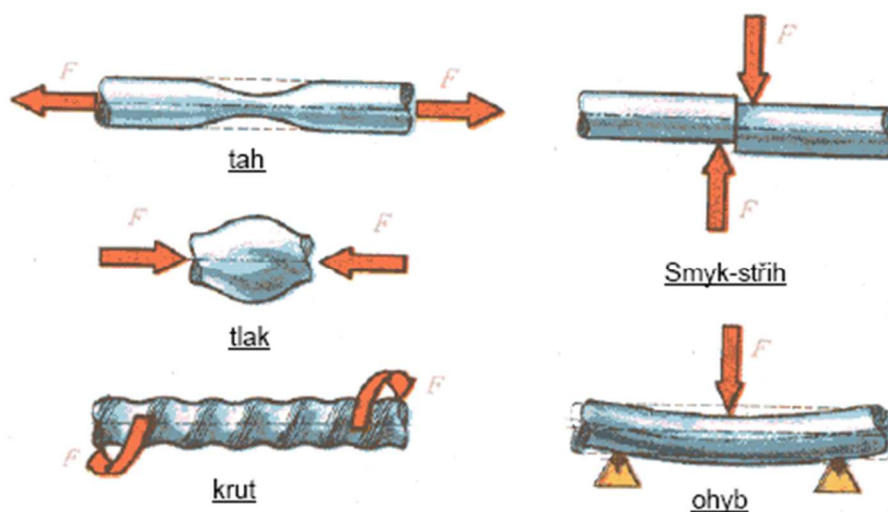
U trubek nastávají problémy související zejména s kruhovým průřezovým tvarem, hodnotou relativní tloušťky a způsobem výroby trubky (podélný svar). U tenkostěnných trubek se deformace vzniklá natažením vzorku nechová rovnoměrně jako u vzorků s plechů, či tyčí, ale „krček“ vzniká od počátku zatížení v celé měřené délce trubky. Deformace je potom nerovnoměrná. Tato práce navazuje na grant 2005 [27] a snaží se potvrdit jeho poznatky pro další materiály.



Obr. 1 Příklady vzorků pro tahovou zkoušku z trubek

1 ROZBOR ŘEŠENÉHO PROBLÉMU [10],[12],[21]

Materiál se definuje podle jeho vlastností. V oblasti tváření jsou důležité zejména mechanické vlastnosti. Ty charakterizují chování a odolnost výrobku při působení vnějších mechanických sil, a to jak statických, tak i dynamických. Pro získání představy o chování materiálu při jeho tváření se užívají mechanické zkoušky. Mezi tzv. základní mechanické zkoušky patří zkouška tahem, tlakem, stříhem a krutem. Zkušební postupy a podmínky těchto zkoušek musí být přesné, a hlavně jednotné, aby výrobci mohli na základě výsledků zaručit požadovanou kvalitu daného materiálu. Proto je většina mechanických zkoušek normalizována a rozdělena podle základních způsobů namáhání, viz obrázek 2. Nejčastěji používaná mechanická zkouška je zkouška tahem.



Obr. 2 Základní způsoby namáhání [9]

1.1 Zkouška tahem [12],[13]

Tato zkouška se provádí podle normy ČSN EN 10 002-1 Zkouška tahem za okolní teploty. Spočívá v deformaci zkušební tyče pomocí postupně rostoucího tahového zatížení až do vzniku lomu. Okolní teplota je stanovena mezi 10 °C až 35 °C, podle potřeby se ale může teplota snížit nebo zvýšit.

Jedná se o nejstarší laboratorní zkoušku. První zmínky jsou datovány do 15. století, kdy Leonardo da Vinci zkoušel pevnost konopných lan jednoduchou tahovou zkouškou. Konstrukční materiály se začaly systematicky testovat až od poloviny 19. století. Tahová zkouška je nejdůležitější a nejrozšířenější mechanickou zkouškou. A to z důvodu její jednoduchosti a přímých výsledků mechanických vlastností.

1.2 Zkušební tyče [12],[13]

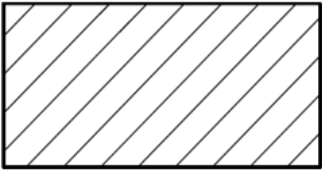
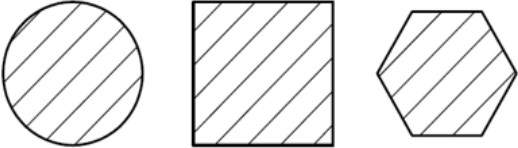
Zkušební tyče mají různé tvary a rozměry, odvozené od rozměrů zkoušeného kovového výrobku, ze kterého jsou odebrány.

Tyče mohou mít nejrůznější průřezy. Je však vhodné volit jednoduchý geometrický tvar vzorku. Většinou se volí průřez kruhový, obdélníkový, čtvercový nebo šestiúhelníkový, viz obr. 3.

Norma ČSN EN 10002-1 rozděluje tyče na 4 základní druhy:

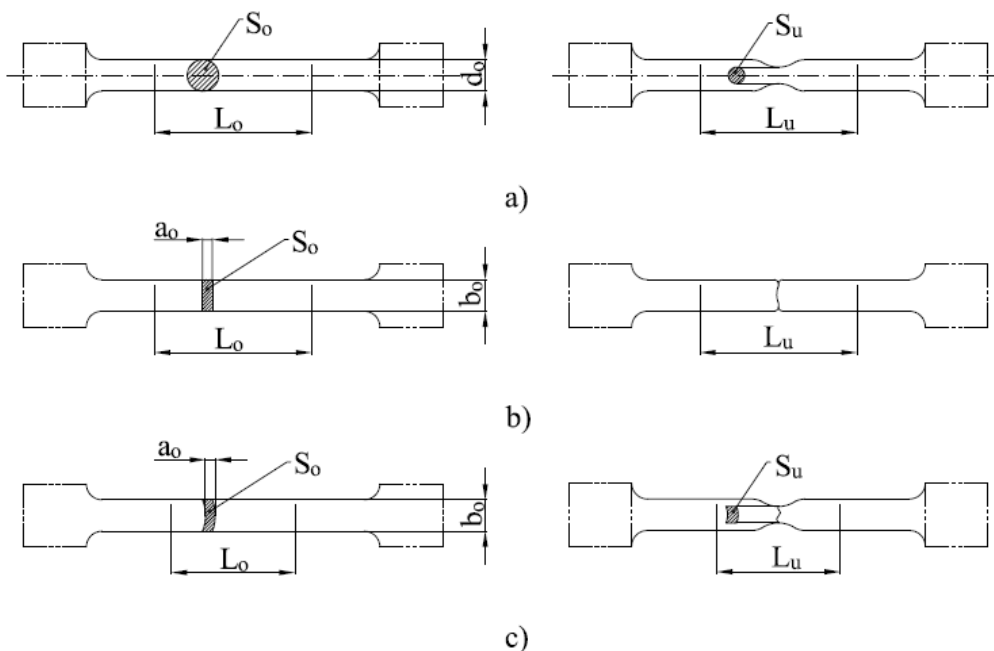
- Zkušební tyče používané pro tenké výrobky, jako jsou plechy pásy a ploché výrobky o tloušťce mezi 0,1 mm a 3 mm.
- Zkušební tyče používané pro dráty, tyče a profily o průměru nebo tloušťce maximálně 4 mm.
- Zkušební tyče používané u plechů a plochých výrobků o tloušťce nejméně 3 mm, a drátů, tyčí a profilů o průměru nebo tloušťce nejméně 4 mm.
- Zkušební tyče používané u trubek.

Druhy tyčí jsou popsány na obrázku 3.

Druh výrobku		Rozdělení podle normy
Pásy - Plechy - Ploché výrobky	Dráty - Tyče - Profily	
		
tloušťka v milimetrech	průměr nebo strana v milimetrech	a
$0,1 \leq \text{tloušťka} < 3$	-	b
-	< 4	c
≥ 3	≥ 4	d

Obr. 3 Hlavní druhy zkušebních tyčí podle typu výrobku [13]

Konce tyčí sloužící k upnutí do čelistí zkušebního stroje, se nazývají hlavy. Tyto hlavy mají zvětšený průřez oproti vnitřní měřené části tyče. Tím se zajistí, že lom proběhne v měřené části tyče L_0 , obrázek 4. Levá část obrázku znázorňuje tyč před zkouškou, pravá část po zkoušce.



Obr. 4 Zkušební tyče [12]: a) kruhová tyč, b) obdélníková tyč, c) tyč vyřezávaná z trubky

- kde: S_0 [mm²] – počáteční plocha příčného průřezu zkoušené délky,
 L_0 [mm] – počáteční měřená délka,
 a_0 [mm] – tloušťka plochých tyčí nebo tloušťka stěny trubky,
 d_0 [mm] – průměr zkoušené délky tyče kruhového průřezu,
 b_0 [mm] – šířka zkoušené délky vzorku,
 S_u [mm²] – nejmenší plocha příčného průřezu po lomu,
 L_u [mm] – konečná měřená délka po lomu.

Měřená tyč může být zkoušena i bez rozšířených upínacích konců, ale pouze je-li tyč nekruhového průřezu a u pásů a tyčí, kde výrobní šířka je menší než 20 mm.

➤ Obrobené zkušební tyče

Obrobění se většinou volí u tyčí kruhového průřezu, a to buď jemné soustružení nebo broušení. Tyče nekruhového průřezu se frézují. Mezi hlavou a měřenou délkou musí být plynulý přechod. Rozměry přechodového poloměru jsou důležité a definované normou, pokud tomu tak není, musí se přechod definovat v materiálovém předpisu. Hlavy tyčí mohou mít libovolný tvar, který se přizpůsobuje čelistem zkušebního stroje.

➤ Neobrobené zkušební tyče

Zkušební tyče vyrobené z pásů nebo plechů se nemusí obrábět, z důvodu finanční úspory. Takové tyče se vyrábí ve střížném nástroji nebo stříhem na kotoučových nůžkách (i bez rozšířených konců). U tohoto druhu výroby musíme brát v úvahu zpevnění střížených hran. Zpevnění zkresluje výstupní hodnoty měření, hlavně mez kluzu, která se tím zvyšuje v průměru asi o 15 MPa.

➤ Počáteční plocha příčného průřezu (S_o) zkušební tyče

Počáteční plocha (S_o) příčného průřezu se vypočítá z naměřených rozměrů zkušební tyče. Přesnost výpočtu tedy závisí na druhu zkušební tyče.

U tenkých výrobků, jako jsou pásy, plechy a ploché výrobky o tloušťce do 3 mm, nesmí chyba přesáhnout ± 2 %. To znamená, že u měření tloušťky zkušební tyče nesmí chyba měření přesáhnout $\pm 0,2$ %, protože nejvyšší podíl na chybě má způsob měření tloušťky dané tyče.

Pro profily, tyče a dráty o tloušťce do 4 mm se plocha musí stanovit s přesností ± 1 %. U tohoto druhu tyčí se počáteční plocha počítá z aritmetického průměru rozměrů měřených ve dvou na sebe kolmých směrech. Nebo může být plocha stanovena z hmotnosti známé délky a její měrné hmotnosti.

Pokud plechy a ploché výrobky přesahují 3 mm a profily 4 mm, stanoví se počáteční plocha pomocí jmenovitého průměru z tabulky D3 v normách [1]. Pro všechny ostatní tvary tyčí se plocha dopočítá z měření vhodných rozměrů s maximální chybou měření $\pm 0,5$ %.

➤ Počáteční měřená délka (L_o) a její značení

Počáteční měřená délka je úsek, na kterém se zjišťují všechny potřebné hodnoty pro zjištění mechanických vlastností zkoušeného materiálu a je zobrazena na obrázku 4. Tato vzdálenost musí být vyznačena jemnými značkami nebo ryskami. Nikdy se délka nesmí značit vruby, které by mohly ovlivnit zkoušku předčasným lomem. Počáteční délka může být závislá na průřezu zkušební tyče, potom se tedy jedná o poměrnou zkušební tyč. Pokud není, nazývá se nepoměrná zkušební tyč.

1.2.1 Poměrná zkušební tyč [12],[13]

Poměrná zkušební tyč má tedy počáteční měřenou délku (L_o) vztaženou k její počáteční ploše (S_o), a to podle rovnice:

$$L_o = k \cdot \sqrt{S_o} \quad (1.1)$$

kde: k [-] – součinitel proporcionality.

Součinitel proporcionality se přednostně volí 5,65. Pro tuto hodnotu součinitele musí být měřená délka minimálně 20 mm. Pokud by vyšla měřená délka menší, může se použít hodnota součinitele 11,3, nebo nepoměrná zkušební tyč. Vypočtená měřená délka se zaokrouhluje na nejbližší násobek 5 mm.

Hodnoty součinitele proporcionality jsou odvozeny od dříve používaných termínů pro kruhové zkušební tyče. Počáteční měřená délka u krátké zkušební tyče byla původně stanovena jako pětina násobek počátečního průměru (1.3). Délka dlouhé zkušební tyče potom jako desetinásobek počátečního průměru (1.4). Odvození hodnot součinitele je popsáno v rovnicích níže.

Průměr kruhu tyče:

$$S_o = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \rightarrow d_o = \sqrt{\frac{4 \cdot S_o}{\pi}} \quad (1.2)$$

Pětinásobek průměru u krátké tyče:

$$5 \cdot d_o = 5 \cdot \sqrt{\frac{4}{\pi}} \cdot \sqrt{S_o} = 5,65 \cdot \sqrt{S_o} \quad (1.3)$$

Desetinásobek průměru u dlouhé tyče:

$$10 \cdot d_o = 10 \cdot \sqrt{\frac{4}{\pi}} \cdot \sqrt{S_o} = 11,3 \cdot \sqrt{S_o} \quad (1.4)$$

1.2.2 Nepoměrná zkušební tyč [12],[13]

V tomto případě nezávisí počáteční měřená délka (L_o) na počáteční ploše příčného průřezu (S_o). Počáteční délka se volí: 50, 80, 100, 200 mm. Šířka potom 12,5, 20, 25, 40 mm.

Pro pásy, plechy a ploché výrobky o tloušťce od 0,1 do 3 mm se používají dva druhy tyčí s rozměry uvedenými v tabulce 1.

Tab. 1 Rozměry zkušebních tyčí [13]

Druh zkušební tyče:	Šířka tyče b_o :	Počáteční měřená délka L_o :
1	12,5 ±1 mm	50 mm
2	20 ±1 mm	80 mm

U drátů, tyčí a profilů o průměru nebo tloušťce do 4 mm se obvykle zkouší celý výrobek, jeho povrch je většinou neobrobený. Počáteční délka těchto tyčí musí být 100 nebo 200 mm.

Pro pásy, plechy a ploché výrobky o tloušťce nejméně 3 mm a drátů, tyčí a profilů o průměru nebo tloušťce nejméně 4 mm se nepoměrné zkušební tyče používají, jestliže tuto možnost uvádí norma na výrobek. V tabulce 2 jsou popsány nejběžnější typické rozměry zkoušených tyčí.

Tab. 2 Rozměry zkušebních tyčí [13]

Jmenovitá šířka b_o :	Počáteční měřená délka L_o :	Přibližná celková délka L_t :
40 mm	200 mm	450 mm
25 mm	200 mm	450 mm
20 mm	80 mm	300 mm

1.3 Zkušební trhací stroj [13],[21]

Tahové zkoušky se obvykle provádí na univerzálním zkušebním stroji, který patří k základnímu vybavení každé laboratoře mechanických zkoušek. Tyto stroje mohou provádět zkoušky také na tlak nebo ohyb. Stroje mohou materiál zatěžovat staticky nebo dynamicky. Jsou vybaveny různými systémy snímání prodloužení tyče a potřebné síly. Celý systém funguje na principu zpětné vazby, to znamená, že stroj přímo reaguje na právě měřené veličiny. Pohon může být mechanický nebo hydraulický. Hydraulický pohon volím, pokud potřebné zatížení překročí 200 kN. U mechanicky poháněných strojů (obrázek 5) se síla měří pomocí dynamometru nebo jiného systému měření síly. Hydraulický stroj snímá sílu z hydrostatického tlaku oleje v pracovním válci a je zobrazen na obrázku 5.

Hlavní charakteristikou zkušebního stroje je maximální dosažitelná síla. Stroje mají různé rozsahy sil uzpůsobené podle velikosti. Pro malé síly vyskytující se na tyčích malých průřezů se používá průtahoměr (extenzometr). Ten se umísťuje na zkušební tyč. Průtahoměr stanovuje smluvní mez kluzu a musí splňovat požadavky na provedení třídy 1 nebo lepší, podle normy EN 10002-4. Zkušební stroj musí být kalibrován podle normy EN ISO 7500-1 a musí vyhovovat požadavkům třídy 1.

Zkušební tyče se do stroje upínají vhodnými prostředky, například klíny, závitovými čelistmi, plochými čelistmi, osazenými čelistmi atd.

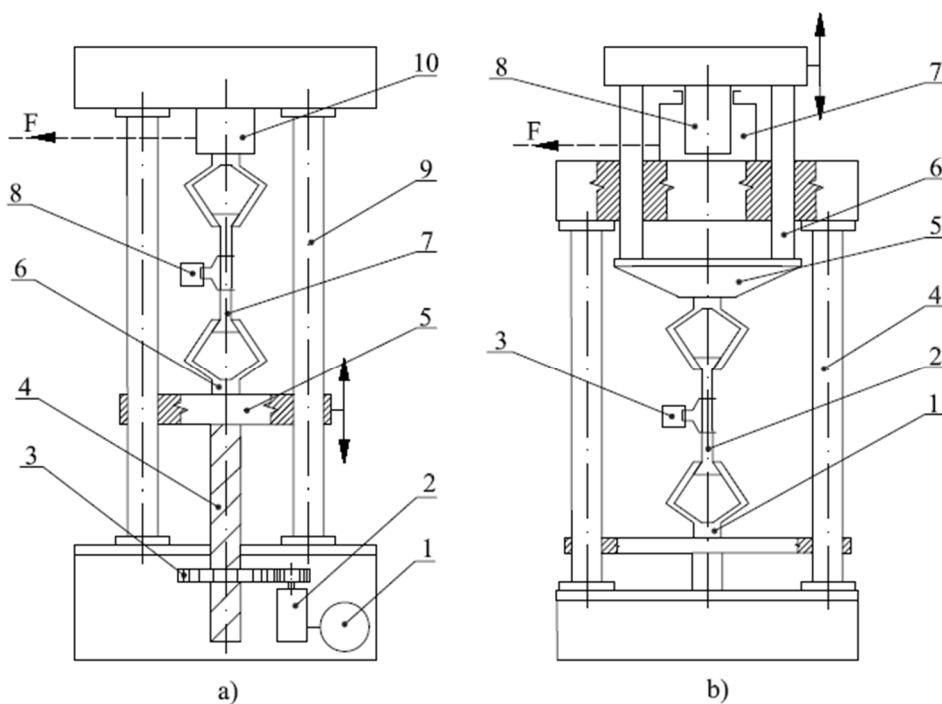
Způsob upnutí je velmi důležitá část tahové zkoušky, které se musí věnovat pozornost. Zkušební tyč se musí upnout tak, aby tahové napětí působilo co nejvíce v ose zkušební tyče a aby případný vzniklý ohyb byl minimální. Obzvláště u zkoušení křehkých materiálů a u zjišťování smluvní meze kluzu. Zkušební tyč se může i předejmut, abychom docílili přímosti tyče a zajistili její dokonalou sousost s upínací soustavou. Předpětí ale nesmí překročit 5 % očekávané meze kluzu.

Zkušební rychlost je rychlost posunu pohyblivého příčnicku stroje a řídí se podle modulu pružnosti materiálu. Je definována v tabulce 3. Tato rychlost může být stanovena v normě na výroby jinak. Potom se budu řídit touto normou.

Napěťová rychlost je definována jako přírůstek napětí za jednotku času. Označuje se normou ISO 6892-1-2009 Bn, kde „n“ nahradím zvolenou napěťovou rychlostí.

Tab. 3 Napěťová rychlost [13]

Modul pružnosti materiálu E [MPa]	Napěťová rychlost [MPa.s ⁻¹]	
	min	max
< 150 000	2	20
≥ 150 000	6	60



Obr. 5 Univerzální zkušební stroj [10]: a) mechanický, b) hydraulický

Za a) 1 – elektromotor, 2 – převodová skříň, 3 – ozubené soukolí, 4 – vřeteno, 5 – pohyblivý příčnick, 6 – upínací hlava, 7 – zkušební tyč, 8 – průtahoměr, 9 – rám stroje, 10 – systém měření síly (dynamometr).

b) 1 – upínací hlava, 2 – zkušební tyč, 3 – průtahoměr, 4 – rám stroje, 5 – pohyblivý příčnick, 6 – vodící lišta, 7 – hydraulický válec, 8 – hydraulický píst.

➤ Princip mechanického zkušebního stroje

Základ stroje tvoří pevný rám. V horní části rámu je umístěno zařízení na měření síly (dynamometr). Zkušební tyč je uchycena do čelistí, jednou stranou k dynamometru a druhou k pohyblivému příčnicku. V dolní části stroje se nachází motor, který přes převodovou skříň uvádí do pohybu vřeteno. Vřeteno posouvá pohyblivý příčnick a tím zatěžuje a deformuje zkušební tyč. Na zkušební tyči může být umístěn průtahoměr. Schéma zkušebního stroje je zobrazeno na obrázku 5.

1.4 Vyhodnocení tahové zkoušky [12],[14]

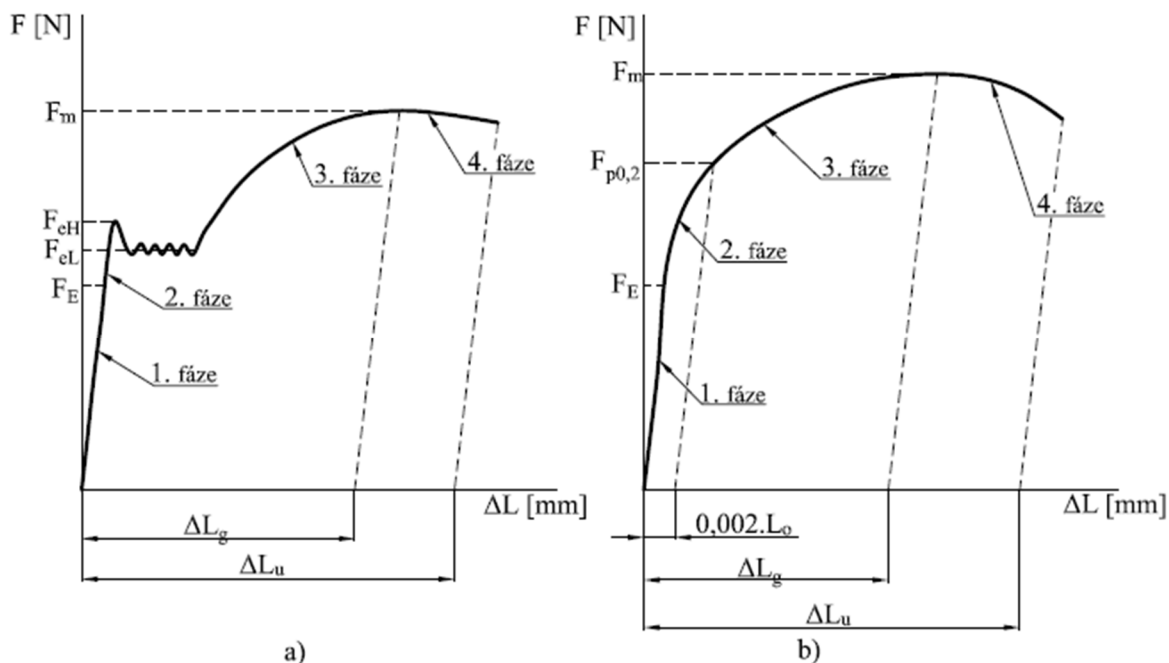
Zkušební stroj deformuje zkušební tyč pomocí síly F . To způsobuje prodloužení celé zkušební tyče. Tím se mění počáteční měřená délka L_0 o prodloužení ΔL na okamžitou délku $L = L_0 + \Delta L$. Závislost prodloužení L na velikosti síly F můžeme graficky znázornit pomocí pracovního diagramu. Trhací stroj zaznamenává pomocí registračního zařízení dvojici hodnot F a L v několikatisícovém množství na jednu zkoušku a vytváří velmi přesný pracovní diagram. V tom samém okamžiku se počáteční plocha příčného průřezu S_0 zmenšuje na okamžitý průřez S , podle zákona zachování objemu.

Hodnoty F a L mohou být zaznamenávány buď z pohybu příčnicku nebo pomocí průtahoměru. Průtahoměr je lepší varianta, protože dokáže přímo zaznamenat prodloužení ΔL k dané síle. Zatímco zaznamenávání délky dráhy příčnicku nedokáže zaznamenat přímo prodloužení, ale musí ho přepočítat přímou úměrou mezi vzdáleností čelistí a počáteční měřenou délkou tyče.

1.4.1 Pracovní diagram [12],[14]

Pracovní diagram kovových materiálů se dělí na dva základní tvary.

- 1) Pracovní diagram s výraznou mezí kluzu – vyjadřuje závislost neuklidněného materiálu, obrázek 6a.
- 2) Pracovní diagram s nevýraznou mezí kluzu – vyjadřuje závislost uklidněného materiálu. Tvoří ho plynulá křivka. Vyskytuje se častěji, protože i uklidněné oceli se dnes vyskytují častěji. Obrázek 6b.



Obr. 6 Pracovní diagram [12]: a) s výraznou mezí kluzu, b) s nevýraznou mezí kluzu

Uklidněný materiál je materiál úplně dezoxidovaný ještě před odlitím. Neuklidněné materiály se nedezoxidují, nebo jen částečně.

Podle tohoto pracovního diagramu můžu rozdělit celou tahovou zkoušku do 4 fází:

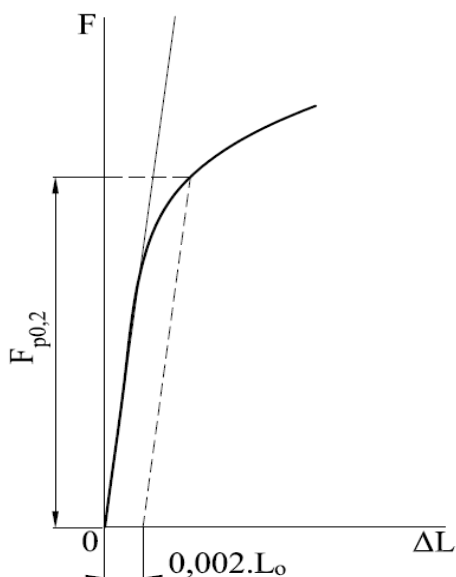
- 1. Fáze – oblast pružných deformací

Prodloužení zkušební tyče je přímo úměrné zatěžující síle, grafickým výstupem proto bude přímka. Zkušební tyč se zatěžuje pouze elasticky. Prodloužení se po uvolnění vrátí do původní délky. Konec této části je určen silou F_E , která se nazývá síla na mezi elasticity. Běžně se tato síla v laboratoři nezjišťuje, slouží pouze k ukázce přechodu mezi pružnými a trvalými deformacemi.

➤ 2. Fáze – oblast od meze úměrnosti do meze kluzu

Zde se objevuje hlavní rozdíl mezi uklidněným a neuklidněným materiálem. Tyč se přestává deformovat elasticky a křivka pokračuje dvěma způsoby.

- a) Zkušební tyč se přestala deformovat lineárně a vzniká prodleva. Grafický záznam pokračuje bez růstu silového zatížení. Zlom křivky může být více, či méně výrazný. Síla, při které dochází k prodlevě nebo zlomu, se nazývá síla na výrazné mezi kluzu a ukončuje druhou fázi. Maximální síla u prodlevy se nazývá síla na horní mezi kluzu a na obrázku 6a je značena jako F_{eH} . Naopak nejnižší hodnotě prodlevy odpovídá síla na dolní mezi kluzu, která se označuje F_{eL} . Tuto změnu elastické deformace charakterizuje obrázek 6a.



- b) Zkušební tyč se přestala deformovat lineárně se silou a plynule přechází do rovnoměrné deformace. Neobjevují se žádné výrazné zlomy. To charakterizuje obrázek 6b.

Tady je druhá fáze ukončena smluvní silou na mezi kluzu. Tato síla se označuje $F_{p0,2}$. Smluvní síla na mezi kluzu se určí z povolené deformace ve velikosti 0,2 % původní měřené délky tyče. To znamená, že rovnoběžka s křivkou v první fázi grafu (přímkou), se posune ve vzdálenosti $0,002.L_0$ od počátku diagramu a průsečík této rovnoběžky s křivkou grafu je smluvní síla na mezi kluzu. Tento úkol blíže popisuje obrázek 7.

Obr. 7 Určení smluvní síly na mezi kluzu [29]

➤ 3. Fáze – oblast rovnoměrných trvalých deformací

Zatížení nad mezí kluzu dále roste a rovnoměrně, trvale deformuje zkušební tyč až do zaškrčení tyče. V tomto momentě končí třetí fáze, která je definována maximální silou dosaženou během zkoušky F_m . Prodloužení vzniklé při maximální síle F_m se nazývá prodloužení při maximálním zatížení a značí se ΔL_g .

➤ 4. Fáze – oblast nerovnoměrných trvalých deformací

Čtvrtá fáze vzniká zaškrčením tyče a vznikem tzv. krčku. To znamená, že zkušební tyč postupně zužuje svůj průřez, až dojde k přetržení tyče. Vznik krčku je vidět na obrázku 8. Tyč už se neprodlužuje nikde jinde než v krčku, ale krček se prodlužuje, i když zatěžující síla klesá. Ve zmenšujícím se průřezu krčku totiž napětí prudce roste. Tvar krčku je různý, podle materiálu tyče. U kruhových tyčí bývá v přetrženém místě kruhový, obrázek 8. U jiných průřezů je však velmi komplikovaný.

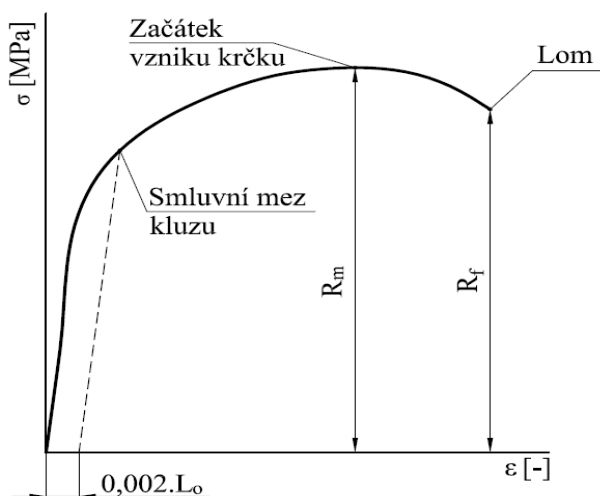


Obr. 8 Přetržení kruhové tyče u houževnatého materiálu [23]

Ruční měření maximálního trvalého prodloužení ΔL_u se provede přiložením obou přetržených částí k sobě a odečte se konečná měřená délka po lomu L_u od počáteční měřené délky L_o .

$$\Delta L_u = L_u - L_o \text{ [mm]} \quad (1.5)$$

1.4.2 Smluvní diagram napětí – deformace [12],[14]



Závislost síly na prodloužení, kterou je možné získat z tahového diagramu, neumožňuje porovnávat mechanické vlastnosti materiálů mezi sebou. Proto je možné přepočítat tuto závislost na závislost smluvního napětí σ a poměrné přetvoření ε pomocí vzorců 1.6 a 1.7. Tato závislost je potom vyjádřena graficky. Nazývá se smluvní diagram napětí a je zobrazen na obrázku 9.

Obr. 9 Smluvní diagram napětí – deformace [21]

$$\sigma = \frac{F}{S_o} \quad (1.6)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_o} = \frac{L - L_o}{L_o} \quad (1.7)$$

kde: σ [MPa] – smluvní napětí,

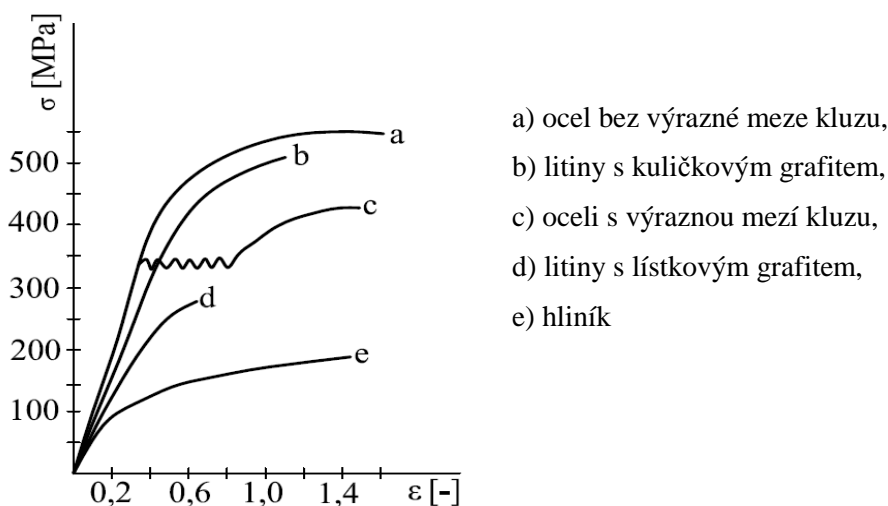
ε [-] – poměrné přetvoření.

Přesnější výsledek je možno získat pomocí skutečného napětí, k vypočítání skutečného napětí je však nutno znát okamžitý průřez zkušební tyče. Ten se během zkoušky zmenšuje a mění se i jeho tvar. Proto se celosvětově používá výhradně smluvní napětí σ , které se dá vypočítat s poměru síly a počáteční plochy příčného průřezu tyče, rovnice (1.6), kde R_m je mez pevnosti v tahu v MPa a R_f je lomové napětí.

Začátek křivky smluvního diagramu napětí – deformace, odpovídající 1. fázi pracovního diagramu, vyjadřuje elastickou deformaci. Tato přímka je popsána tzv. Hookovým zákonem, ale pouze tehdy, je-li prodloužení snímáno snímačem umístěným na zkušební tělese (průtahoměrem). Hookův zákon vyjadřuje vztah mezi napětím a prodloužením a určuje modul pružnosti v tahu E . Na obrázku 10 je pro porovnání zobrazena oblast Hookova zákona různých kovových materiálů.

$$\sigma = \frac{F}{S_0} = E \cdot \frac{\Delta L}{L_0} = E \cdot \varepsilon \quad (1.8)$$

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



Obr. 10 Schématické porovnání Hookovy oblasti různých kovových materiálů [10],[12]

Aby výpočet modulu pružnosti byl spolehlivý, musí být zvětšení snímače (500 až 1000) násobné. Pokud by prodloužení bylo odvozeno z posuvu příčnicku, potom sklon 1. fáze křivky zahrnuje také elastické deformace stroje (rámu, čelistí atd.). Elastická deformace stroje bývá větší, než je deformace zkušební tyče, proto modul pružnosti nemůžeme vyhodnotit. U běžných tahových zkoušek se modul pružnosti nezjišťuje, protože ho můžeme jednoduše vyčíst z materiálového listu.

1.4.3 Vyhodnocení základních mechanických vlastností [12]

Mezi základní mechanické vlastnosti patří napěťové charakteristiky (mez kluzu a smluvní mez pevnosti), které lze určit ze záznamu napětí - deformace. Další charakteristiky jsou deformační a to je tažnost a kontrakce. Tyto charakteristiky se určí pouze na základě rozměrů zkušební tyče před a po zkoušce.

- Mez kluzu

Jako mez kluzu se označuje napětí, při kterém se mění elastická deformace na plastickou. V diagramu na obrázku 9 lze mez kluzu určit jako bod, ve kterém dochází k odklonu křivky od přímkové části grafu (konec Hookova zákona). Tato hodnota by však byla výrazně ovlivňována citlivostí daného snímače prodloužení, proto se v praxi používá tzv. smluvní mez kluzu. Smluvní mez kluzu se označuje jako R_p a je to poměr síly na nevýrazné mezi kluzu k počátečnímu průřezu zkušební tyče. Smluvní hodnota deformace používaná v české a německé normě se označuje $R_{p0,2}$, počítá se z počátečního průřezu S_0 a smluvní síly na mezi kluzu $F_{p0,2}$ podle vzorce 1.9. Určení této síly je popsáno v kapitole 1.4.1.

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} [MPa] \quad (1.9)$$

Smluvní hodnota deformace nemusí být vždy rovna 0,2 % deformace. Norma DIN výjimečně používá i hodnotu 0,1 % deformace. Britské normy používají hodnotu 0,1 % až 0,5 %.

Pokud se pro měření zvolí neuklidněný materiál, výsledný diagram bude vypadat jako na obrázku 6a. Jedná se potom o výraznou mez kluzu, která se značí R_E . Výrazná mez kluzu je poměr síly na mezi elasticity F_e k počátečnímu průřezu zkušební tyče S_0 .

$$R_E = \frac{F_E}{S_0} [MPa] \quad (1.10)$$

- Mez pevnosti

Mez pevnosti je zobrazena na obrázku 9. Označuje se R_m . Je to maximální smluvní napětí dosažené v diagramu napětí – deformace. Vypočte se jako poměr hodnot maximální síly dosažené při zkoušce F_m a počátečního průřezu zkušební tyče S_0 .

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} [MPa] \quad (1.11)$$

Pro tvárné materiály je mez pevnosti definována maximální silou, při které se na zkušební tyči začíná tvořit krček. Pokud by k porušení tělesa došlo po nulové nebo velmi malé plastické deformaci, mez pevnosti by byla určena okamžikem lomu R_f , který je vyznačen na obrázku 9.

Smluvní mez pevnosti bývá označována jako základní zjištěná charakteristika tahové zkoušky. Ve skutečnosti ale nedefinuje skutečnou únosnost materiálu. Pouze vyjadřuje pevnost materiálu za přísně dodržovaných podmínek jednoosé napjatosti. Ve skutečnosti jsou materiály vystaveny víceosé napjatosti.

Hlavní výhodou meze pevnosti je její reprodukovatelnost a možné porovnávání kovových a kompozitních materiálů. Mez pevnosti se dále používá pro kontrolu jakosti materiálu a k počítání dalších vlastností, jako je tvrdost, mez únavy apod., které mají empirické vztahy s touto veličinou.

- Tažnost

Tažnost je trvalé prodloužení měřené délky po lomu zkušební tyče vyjádřené v procentech. U oceli slouží jako ukazatel tvářitelnosti, u litin definuje jejich křehkost.

Celková tažnost při použití poměrové zkušební tyče se součinitelem proporcionality $k = 5,65$ se označuje písmenem A. Pokud se zvolí součinitel proporcionality $k = 11,3$, musí se toto číslo přidat k označení tažnosti jako index $A_{11,3}$. Tažnost se ale měří také na nepoměrných zkušebních tyčích, potom se označuje indexem počáteční měřené délky L_0 (např. A_{80} = tažnost u měřené počáteční délky 80 mm).

Tažnost lze vypočítat ze vzorce 1.12. Pokud se u zkoušky nepoužije průtahoměr, musí se konečná měřená délka po lomu L_u odměřit. Měření konečné délky se provádí přiložením obou částí zkušební tyče lomovými plochami k sobě tak aby jejich osy ležely v přímce a přeměřením nanesených rysek. Hodnota tažnosti se zaokrouhluje na 0,5 %.

$$A = 100 \cdot \frac{L_u - L_0}{L_0} [\%] \quad (1.12)$$

Rozdíl mezi konečnou měřenou délkou L_u a délkou při maximálním zatížení L_g je zobrazen na obrázku 6.

Tažnost se většinou určuje až po odpružení materiálu, tzn., že zkušební tyč není zatížena vnitřním pnutím. Pokud by bylo potřeba měřit tažnost pod napětím, musí se k označení přidat index t (A_t , A_{gt}).

Srovnávat tažnost u stejných materiálů je možné pouze, když měřená délka, tvar a plocha příčného průřezu jsou shodné, nebo je shodný součinitel proporcionality. Stejný materiál má tedy odlišné číselné hodnoty tažnosti. Vždy ale platí $A_g < A_{11,3} < A_{5,65}$.

- Kontrakce

Kontrakce je největší změna plochy příčného průřezu, ke které došlo během zkoušky. Označuje se písmenem Z a vyjadřuje se jako poměr rozdílu počáteční plochy příčného průřezu zkoušené délky S_0 a nejmenší plochy příčného průřezu po lomu S_u k počáteční ploše příčného průřezu, rovnice 1.14.

Obě porušené části zkušební tyče se přiloží k sobě tak, aby jejich osy ležely v přímce. Nejmenší plocha po lomu S_u musí být měřena s přesností ± 2 %. Kontrakce se určuje v technické praxi pouze pro kruhový průřez, protože plocha krčku po lomu zůstává přibližně kruhová. U nekruhových průřezů se průřezová plocha krčku značně odlišuje od původního tvaru průřezu.

$$Z = 100 \cdot \frac{\Delta S}{S_0} = 100 \cdot \frac{S_0 - S_u}{S_0} [\%] \quad (1.14)$$

2 TAHOVÁ ZKOUŠKA TRUBEK [5],[8],[10],[11]

Ocelové trubky tvoří důležitý úsek hutní výroby a mají velký význam pro strojírenský průmysl. Jsou významným konstrukčním prvkem v zařízeních všude kolem nás. Využívají se nejen ve strojírenství, ale také energetice, chemickém průmyslu a dalších odvětvích. Proto je důležité trubky mechanicky zkoušet a zjišťovat jejich vlastnosti.

Základní rozdělení trubek je na trubky bezešvé a švové. Bezešvá trubka je zhotovena z plného materiálu, její stěna je celistvá z jednoho materiálu, bez jakéhokoli švu. Tyto trubky lze bez obav použít pro vedení vody, páry, vzduchu či plynu. Švová trubka je vyrobena svinutím ocelového pásu do tvaru trubky a následným svařením. Ocelové trubky jsou k dispozici ve většině hutních prodejnách, většinou ve velikosti 5 až 7 metrů. U přesných konstrukčních trubek pak šestimetrové.

U běžných profilů a plechů s plným průřezem se používají klasické mechanické zkoušky. Duté profily, tzn. trubky, ať už kruhového nebo jiného průřezu, nelze běžně uplatnit v plném rozsahu kvůli jejich specifickému průřezu. Mezi mechanické zkoušky, které se provádí u dutého průřezu, patří například: tahová zkouška, zkouška rázem v ohybu, zkouška tečením, zkouška krutem, zkoušky tvrdosti a jiné, definované dle evropských norem. V této práci bude podrobně rozebrána tahová zkouška trubek.

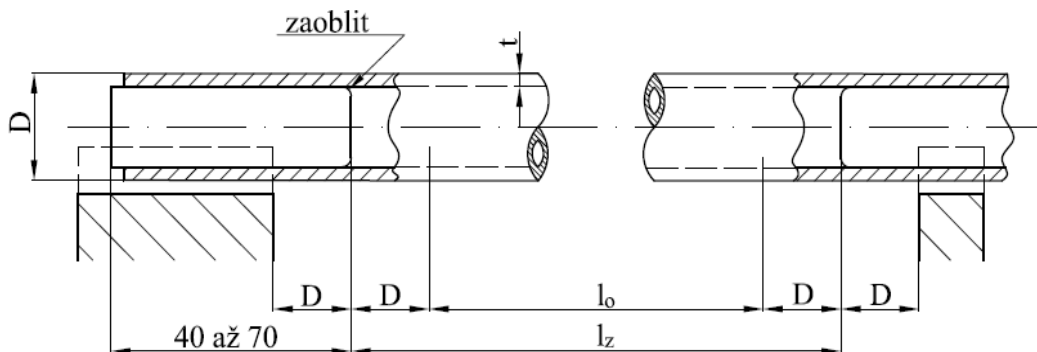
Tahová zkouška trubek se řídí normou ČSN EN 10002-1. Tato norma platí pro tyče z ocelových trubek i z trubek nezelezných kovů. Mechanické vlastnosti trubek se určují v podélném směru, tzn. rovnoběžném s osou trubky, nebo ve směru příčném. Tato zkouška se provádí na běžných trhacích strojích jako ostatní tahové zkoušky.

2.1 Druhy a rozměry zkušebních tyčí [31],[32]

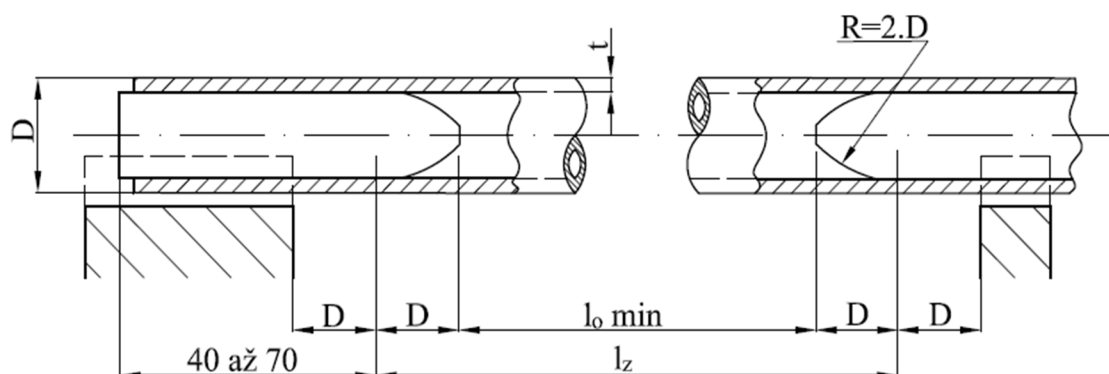
Zkušební tyče a jejich rozměry jsou definované normou ČSN EN 10002-1. U zkoušení trubek se používají 3 základní druhy vzorků:

- Zkušební tyč ve tvaru odřezku trubky plného průřezu

Je to trubka zkoušená jako celek. Tato zkušební tyč se používá u trubek s vnějším průměrem do 50 mm. Obrázek 12 popisuje tvar trnu pro ocelové trubky. Obrázek 13 tvar trnu pro trubky z nezelezných kovů a jejich slitin. Trny u obou případů musí být voleny z materiálu tvrdšího, než je materiál trubky. Když je potřeba, lze zhotovovat různé výřezy zkušebních tyčí i z trubek do 50 mm.



Obr. 12 Ocelová trubka zkoušená jako celek [30]



Obr. 13 Trubka z neželezných kovů zkoušená jako celek [32]

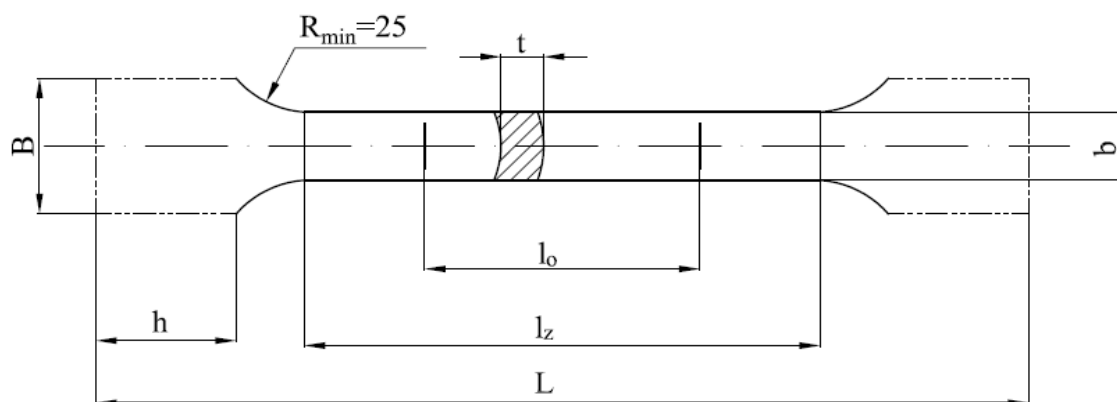
Zkoušená délka l_z se určí ze vzorce 2.1. Jako součet měřené délky l_o a dvojnásobku průměru trubky D . U trubek z neželezných kovů se volí delší trn než pro ocelové trubky o vzdálenost D .

$$l_z = l_o + 2 \cdot D \text{ [mm]} \quad (2.1)$$

- kde: D [mm] – vnější průměr trubky,
 t [mm] – tloušťka stěny trubky,
 l_o [mm] – měřená délka trubky,
 l_z [mm] – zkoušená délka trubky,
 R [mm] – radius trnu.

- Pás segmentového průřezu

Je to výřez z trubky ve tvaru pásů. Výřez se zužuje ve střední části, a je mu ponechán korýtkovitý tvar daný průměrem trubky. Výřez ve tvaru pásu se používá u trubek s vnějším průměrem, větším než 50 mm a s tloušťkou stěny do 7 mm. Vzorový výřez je zobrazen na obrázku 14.



Obr. 14 Výřez trubky ve tvaru pásu [32]

$$l_z \text{ min} = l_o + 5 \cdot b \text{ [mm]} \quad (2.2)$$

$$B \text{ min} = 1,25 \cdot b \text{ [mm]} \quad (2.3)$$

$$h \text{ min} = 1,8 \cdot b \text{ [mm]} \quad (2.4)$$

kde: t [mm] – tloušťka stěny trubky,
 b [mm] – šířka zkušební tyče,
 B [mm] – šířka hlavy,
 h [mm] – výška hlavy,
 L [mm] – celková délka výřezu.

Zkoušená délka trubky, výška a šířka hlavy musí splňovat podmínky závislé na šířce zkušební tyče podle vzorců 2.2 až 2.4. Šířka zkušební tyče se určí v závislosti na vnějším průměru trubky podle tabulky 4. Ve výjimečných případech lze za zkušební tyč považovat i výřez trubky bez rozšířených upínacích hlav.

Tab. 4 Určení šířky zkušební tyče [31]

Vnější průměr trubky D: [mm]	Šířka zkušební tyče b: [mm]
do 75	8
75 až 110	20
nad 110	30

U tlouštěk stěny nad 8 mm můžeme zkušební tyč ve tvaru pásu zhotovit s menší šířkou, než určuje tabulka (např. když nestačí výkon trhačícího stroje). Šířka tyče musí však být vždy nejméně 1/3 tloušťky stěny.

Protože by se hlavy výřezu z důvodu korýtkového tvaru špatně upínaly do čelistí, lze je za studena vyrovnat. V úseku délky l_z se, ale tyče nesmí vyrovnávat. Hrany zkušebních tyčí musí zůstat ostré (nezaobleny), pouze zbaveny otřepů.

- Válcová zkušební tyč

U trubek, které mají tloušťku stěny větší než 7 mm, se může zkušební tyč zhotovit jako běžná válcová zkušební tyč. Podrobně se válcovými zkušebními vzorky z trubek zabývá norma ČSN 42 0314.

Podélné válcové zkušební tyče se vyrábějí vyříznutím vzorku z trubek podél osy. Průměr zkoušené části těchto tyčí musí být:

- 5,0 mm – pro tloušťku stěny trubky od 7 do 10 mm,
- 8,0 mm – pro tloušťku stěny trubky od 10 do 13 mm,
- 10,0 mm – pro tloušťku stěny trubky 13 mm a více.

Příčné válcové zkušební tyče se vyrábějí vyříznutím vzorku z trubky kolmo k podélné ose a jejich rozměry jsou popsány v tabulce 5.

Tab. 5 Rozměry příčných válcových zkušebních tyčí [31]

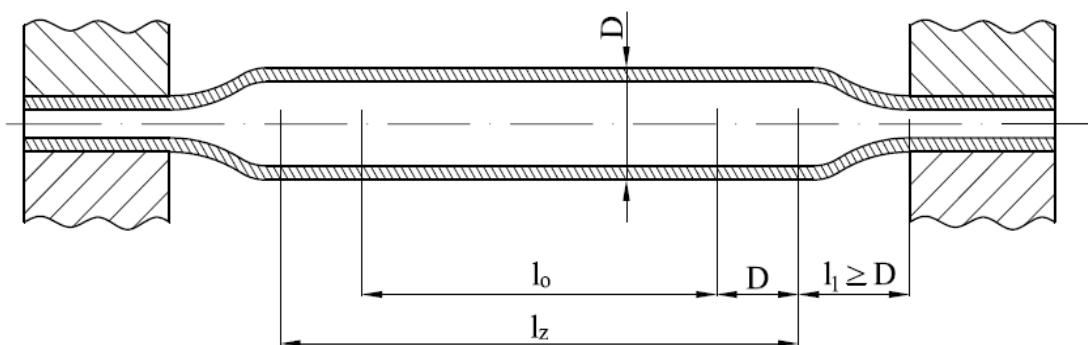
Průměr trubky: D [mm]	Minimální tloušťka stěny trubky: t [mm]	Počáteční průměr zkoušené části zkušební tyče: d [mm]
160 až 250	20	5
250 až 290	17	5
220 až 290	32	8
290 až 320	26	10
nad 320	24	10

Mezní úchytky šířky b zkoušené části l_z zkušební tyče musí odpovídat údajům v tabulce 6. Úchytky šířky se zjišťují jako rozdíl mezi největším a nejmenším naměřeným rozměrem podél zkoušené délky.

Tab. 6 Mezní úchytky šířky zkušební tyče [31].

Šířka zkoušené části zkušební tyče: b [mm]	Mezní úchytky šířky: [mm]
do 10	$\pm 0,2$
10 až 20	$\pm 0,3$
nad 20	$\pm 0,5$

Pokud by tyč kruhového tvaru nešla upnout, je dovoleno použít tyče ve tvaru odřezků trubek plného průřezu se zploštělými konci pro upnutí, obrázek 15.



Obr. 15 Zkušební tyč ze zploštělými konci [31]

V technických podkladech se zkušební tyče označují podle tabulky 7.

Tab. 7 Značení zkušebních tyčí

Druh zkušební tyče:	Obecné označení:	Příklad označení:
Zkušební tyč ve tvaru odřezku trubky plného průřezu.	Tyč $\varnothing D \times t \times l_0$	Tyč $\varnothing 22 \times 3 \times 75$ ČSN 42 0322.1
Pás segmentového průřezu.	Pás $t \times b \times l_0$	Pás $6 \times 8 \times 40$ ČSN 42 0322.2
Válcová zkušební tyč.	Podle příslušné normy ČSN 42 0314 až 17	Tyč 6×30 ČSN 42 0315

2.2 Výpočet plochy průřezu [31],[32]

U zkoušek, kde jsou zkušební tyče ve tvaru odřezků trubek plného průřezu, se do konců trubek vloží těsné válcové trny, obrázek 13 a 14. Konec trnu musí být zaoblen. Trny musí být vyrobeny z kovu s vyšší pevností, než má zkoušená tyč. Je-li zabezpečeno upnutí trubky, aniž by se změnil tvar nebo rozměry trubky, může se zkoušet i bez trnů.

Plocha průřezu zkušební tyče S_0 ve tvaru odřezku trubky plného průřezu se vypočte podle vzorce 2.5.

$$S_0 = \pi \cdot t \cdot (D - t) \text{ [mm}^2\text{]} \quad (2.5)$$

Plocha průřezu zkušební tyče ve tvaru pásu se vypočte podle vzorce (2.6), kde k je koeficient, který se určí pomocí vzorce 2.7, nebo pro usnadnění s nomogramu na šířky tyčí $b = 8 \text{ mm}$, 20 mm , 30 mm . Nomogramy jsou zobrazeny na obrázcích 16, 17, 18. Koeficient k se zaokrouhluje v tisícinách na 5 nebo 0.

$$S_0 = k \cdot t \cdot b \text{ [mm}^2\text{]} \quad (2.6)$$

$$k = 1 + \frac{1}{6} \cdot \frac{b^2}{D \cdot (D - 2 \cdot t)} \text{ [-]} \quad (2.7)$$

U zkušebních tyčí, které mají plochy průřezu nekruhových trubek, se plocha průřezu zjistí zvážením a dopočítá se pomocí vzorce 2.8.

$$S_0 = \frac{m \cdot 1000}{g \cdot L} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (2.8)$$

kde: m [g] – hmotnost zkušební tyče,

g [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$] – měrná hmotnost kovu,

L [mm] – délka zkušební tyče.

3 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Hlavním cílem předkládané bakalářské práce je provedení tahových zkoušek zkušebních vzorků z trubek pro ověření možností získání odpovídajících materiálových charakteristik (R_m , $R_{p0,2}$, A , Z), dále hodnoty exponentu deformačního zpevnění n a materiálové konstanty C . Důvodem této analýzy je fakt, že v současné době se pro teoretické výpočty působících napětí při tváření trubek, například ohybem, či radiálním vypínáním apod., převážně používají hodnoty R_m , $R_{p0,2}$, n a C získané z tahových zkoušek vzorků z plechu stejného materiálu. Vzhledem k odlišnému průřezu vzorků z plechu a trubek, mohou být tyto hodnoty rozdílné a do výpočtů se tak již v samotném počátku mohou vnášet chyby.

V rámci experimentů bude také zkoumáno, který tvar vzorků z trubek užívaných pro tahové zkoušky a definovaných dle normy ČSN EN 10002-1 je nejvhodnější, a to jak po stránce snadné vyrobitelnosti, tak i reálnosti a získaných výsledků. Testovány tak budou tři typy zkušebních vzorků z trubek, a to:

- zkušební tyč ve tvaru odřezku trubky plného průřezu
- pás segmentového průřezu v osové směru
- pás segmentového průřezu ve směru kolmém na osu

Během prováděných experimentů bude také sledováno chování jednotlivých vzorků při tahovém zatížení do meze pevnosti materiálu a také po překročení této mezní hodnoty.

4 PŘÍPRAVA EXPERIMENTU

Tato část práce zahrnuje informace o použitém materiálu, tvarech zkušebních tyčí, trhacím stroji, na kterém byly provedeny zkoušky, způsobu nanášení deformační sítě a výpočtech potřebných k určení napětovo-deformačních stavů a materiálových konstant.

4.1 Volba materiálu [1],[2],[6],[9],[17]

Pro experimenty byl vybrán materiál ocel 17 240, nově značen dle ČSN 10088-1 Jako 1.4301. Materiál byl zvolen z důvodu širokého uplatnění při výrobě různých dílců z trubek ať už v automobilovém průmyslu, chemickém či transportním odvětví. Jedná se o korozivzdornou, legovanou, ušlechtilou ocel. Strukturu této oceli tvoří převážně austenit. Austenitické korozivzdorné oceli jsou nemagnetické, dobře svařitelné a značně houževnaté i při nízkých teplotách. Základními legujícími prvky jsou chrom a nikl. Pro docílení požadované korozní odolnosti a mechanických vlastností, se přisazují další legující prvky, které jsou zobrazeny v tabulce 8. Vliv těchto prvků na vlastnosti této oceli lze schematicky charakterizovat:

- Celková korozní odolnost (chrom, nikl, křemík)
- Mechanické vlastnosti (dusík)
- Obrobitelnost (síra, fosfor)
- Odolnost proti korozi (křemík, dusík)

Tab. 8 Chemické složení tavby v % hmotnosti materiálu 1.4301

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
≤ 0,07	≤ 1,00	≤ 2,00	≤ 0,045	≤ 0,030	17,00÷20,50	9,00÷11,50

Mechanické vlastnosti:

- Pevnost v tahu R_m : 490 – 735 MPa
- Mez kluzu $R_{p0,2}$: 186 MPa
- Tažnost A_5 : min. 40 %

Uvedené hodnoty mechanických vlastností a chemické složení jsou přebrány z materiálového listu ČSN 41 7240 (příloha 2).

Tato ocel je vhodná pro všeobecné použití, například předvýrobky, tyče tvářené za tepla i za studena, válcované dráty, přístroje v potravinářském průmyslu.

4.2 Zkušební vzorky

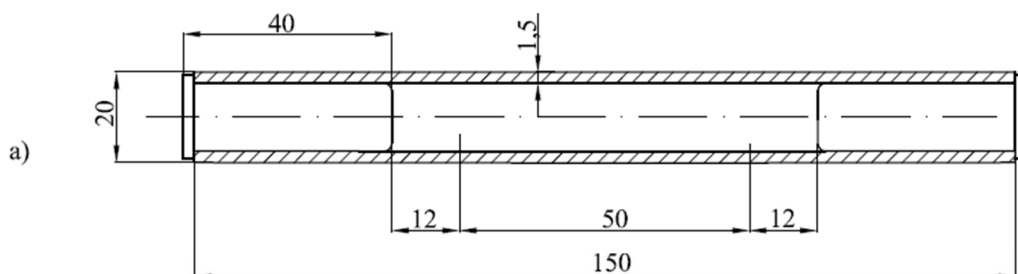
Trubky byly pořízeny od společnosti METAL STEEL s.r.o. sídlící v Brně. Pro zkoušení tyčí ve tvaru odřezku trubky plného průřezu byly zvoleny trubky s vnějším průměrem 20 mm a tloušťkou stěny 1,5 mm. Tato trubka se dodává pouze ve velikosti 6 metrů. Pro zkušební vzorky ve tvaru pásu segmentového průřezu byl zvolen vnější průměr 50 a 70 mm se stejnou tloušťkou stěny 1,5 mm. Tyto trubky již byly dostupné v libovolné velikosti přesahující 1 metr.

Tahovou zkoušku jsem provedl celkem na 22 zkušebních vzorcích z toho:

- 8 x tahovou zkoušku trubky plného průřezu o průměru 20 mm a tloušťce stěny 1,5 mm.
- 10 x tahovou zkoušku pásu segmentového průřezu vyříznutého rovnoběžně s osou trubky, z trubky o průměru 50 mm a tloušťce stěny 1,5 mm.
- 4 x tahovou zkoušku pásu segmentového průřezu vyříznutého kolmo na osu trubky, z trubky o průměru 70 mm a tloušťce stěny 1,5 mm.

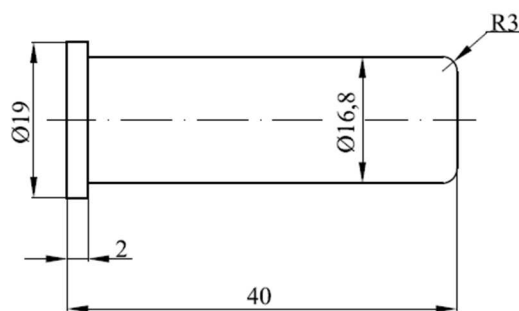
4.2.1 Zkušební tyče ve tvaru odřezku trubky plného průřezu

Zkušební tyče ve tvaru odřezku trubky plného průřezu, dále jen celistvé trubky, byly vyrobeny ze svařované trubky 20 x 1,5 mm. Dle normy ČSN EN 10002-1 byla zvolena délka vzorku 150 mm a vzdálenost rysek vyznačující měrnou délku $l_0 = 50$ mm. Schéma zkušební tyče popisuje obrázek 16.



Obr. 16 Celistvá trubka: a) schéma s rozměry, b) skutečný vzorek

Pro zabránění deformace trubek při sevření vzorku do čelistí trhačského stroje byly zhotoveny čepy, obrázek 17. Průměr osazeného konce čepu musí být menší než vnější průměr trubky, aby čelisti mohly uchytit trubku.



Obr. 17 Čepy: a) schéma s rozměry, b) použité čepy

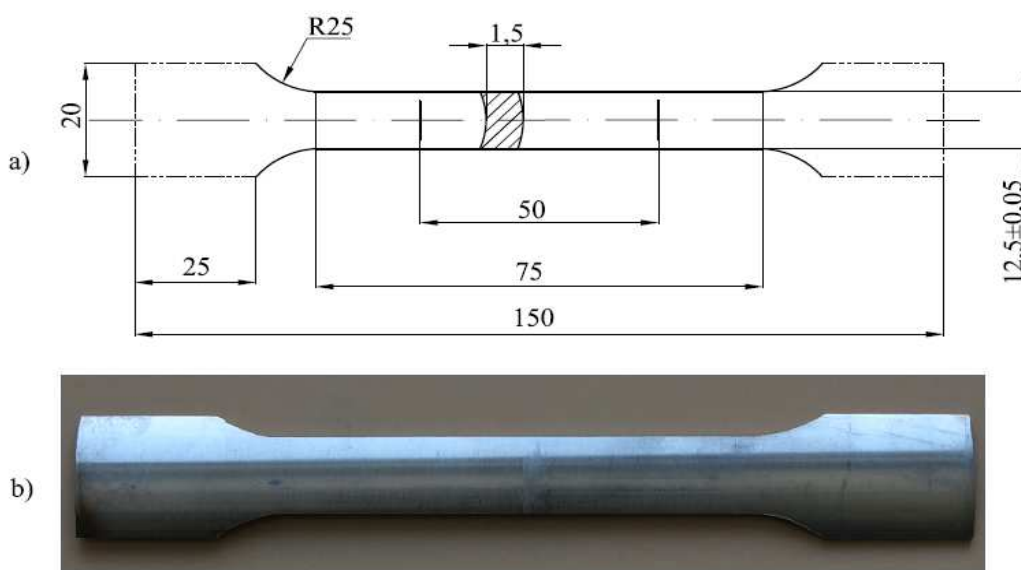
Pro zkoušení vzorků ve tvaru celistvých trubek se používají čelisti s vybráním do tvaru V. Činná plocha čelistí je rýhovaná, což zabraňuje prokluzu vzorku v čelistech. Čelisti jsou zobrazeny na obrázku 18.



Obr. 18 Čelisti použité pro tahovou zkoušku celistvých trubek

4.2.2 Zkušební tyč ve tvaru pásu segmentového průřezu

Zkušební tyče ve tvaru pásu segmentového průřezu, dále jen výřezy z trubky, byly vyrobeny ze svařované trubky průměru 50 mm a tloušťce stěny 1,5 mm. Tvar a velikost zkušební vzorku byly navrženy v souladu s normou ČSN EN 10002-1. Délka vzorku byla opět 150 mm a vzdálenost rysek vyznačující měrnou délku $l_0 = 50$ mm. Výřez z trubky je zobrazen na obrázku 19.



Obr. 19 Výřez z trubky: a) schéma s rozměry, b) skutečný vzorek



Obr. 20 Rozdíl mezi rovnou a segmentovou hlavou

rovinných čelistí trhacího stroje. Vzorek se na lisu může rovnat jen mimo vzdálenost zkoušené délky vzorku $l_z = 75$ mm. Srovnání hlavy je patrné na obrázku 20.

4.2.3 Zkušební tyč ve tvaru příčného výřezu z trubky



Obr. 21 Příčný výřez zkušební tyče

Vzorky byly řezány laserem od výrobce IPG, typ YLS 2000, který je dostupný v laboratořích Ústavu přístrojové techniky AV ČR. Řezná hlava byla použita od výrobce Precitec, typ YRC 100. Použitá řezná rychlost byla 33 mm/s. Během řezání směřovala hubice laseru vždy do osy trubky, čímž bylo docíleno, že vyrobené vzorky měly v každém místě průřezu stejnou tloušťku stěny. Výkon laseru je 1500 W, jako řezný plyn byl použit dusík, tlak 8 baru.

Hlavy vzorků byly vyrovnány pomocí lisu, aby bylo možné je uchytit do

Zkušební tyče byly vyrobeny ze svařované trubky o průměru 70 a tloušťce stěny 1,5 mm. Vzorek byl zhotoven řezáním na prstence o šířce odpovídající zúžené části klasického výřezu z trubky, popsaného v kapitole 3.2.2, tj. $b = 12,5$ mm. Výchozí tvar a narovnaný vzorek je zobrazen na obr. 21 Prstence byly následně rozřezány v místě svaru a pod lisem narovnané, obrázek 22. Dále byly zkráceny na odpovídající délku 150 mm. Měrná délka byla shodná jako u předchozích dílů 50 mm.

Jak bylo popsáno výše a je patrné z obr. 21, vzorky byly zhotoveny ve zjednodušeném tvaru – ve formě pásku. Tento tvar byl zvolen z časových důvodů. Nicméně norma tento tvar také povoluje, i když jen ve výjimečných případech.



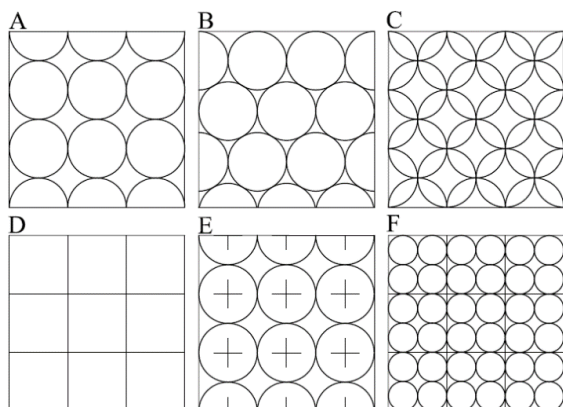
Obr. 22 Rovnění pod lisem

4.3 Nanášení kružnicové deformační sítě [15],[22],[27],[29]

Pro analýzu přetvoření a následného vyhodnocení napětí při procesu tváření se užívá deformačních sítí nanesených na povrch polotovaru. Princip spočívá v nanesení pravidelné sítě určitého vzoru na povrch vzorku. Při tváření se materiál deformuje a s ním i nanesená síť.

Deformační sítě se rozdělují podle tvaru nanášeného elementu (obr. 23)

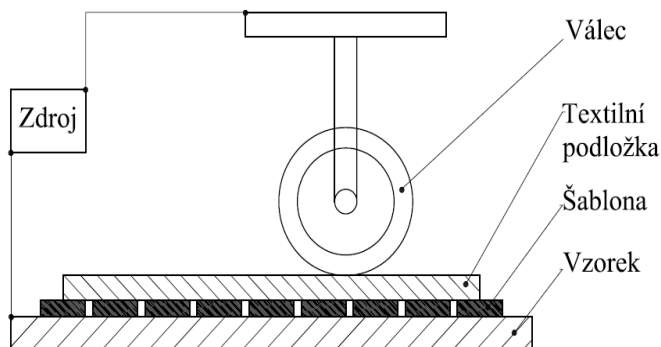
- A. síť s kruhovými elementy, se středy uspořádanými do čtverců,
- B. síť s kruhovými elementy, se středy v rozích rovnostranných trojúhelníků,
- C. síť kruhová s překrytými obrysy jednotlivých elementů,
- D. síť se čtvercovými elementy,
- E. síť kombinovaná, se čtverci vyznačenými pouze průsečíky vrcholů,
- F. síť kombinovaná, s vyznačením čtvercových i kruhových elementů.



Obr. 23 Příklady typů sítí používaných v praxi [28]

Pro experiment byla zvolena metoda elektrochemického leptání, a to z důvodu dostupnosti v laboratořích Odboru technologie tváření kovů a plastů na FSI VUT v Brně. Dalším důvodem byla jednoduchost aplikace, odolnost naleptaného vzoru proti tváření a finanční nenáročnost.

4.3.1 Princip nanášení sítě na rovinný vzorek [15],[22],[27]



Obr. 24 Základní princip elektrochem. leptání [26]

Elektrochemické leptání vyžaduje zdroj stejnosměrného, nebo střídavého proudu. Jeden pól se připojí na připravený vzorek, druhý pól na válec, který se v případě nanášení na ploché vzorky odvaluje po textilní podložce na horní ploše šablony. Textilní podložka je navlhčena speciálním leptacím roztokem (elektrolyt Y1). Pro konkrétní materiál je nutné zvolit správný roztok. Elektrické napětí je

dodáváno přibližně 5 sekund, po tu dobu přechází proud z válce na vzorek. Tlakem válce je leptací roztok vytlačen z textilní podložky skrz obrysy šablony na vzorek a dochází k vyleptání deformační sítě. Princip leptání je zobrazen na obr. 24.

4.3.2 Princip nanášení sítě na trubky [20],[25],[26]



Obr. 25 Přípravek pro nanášení sítě na trubky

Princip nanášení deformační sítě na povrch trubky je obdobný jako v kapitole 4.3.1. Rozdíl spočívá pouze v tom, že sestava přípravku je poskládaná opačně a místo válečku se po šabloně odvaluje trubka upnutá, ve speciálním přípravku, obrázek 25.

Zhotovené vzorky pro experimenty prováděné v rámci řešení této bakalářské práce byly pomocí této metody opatřeny kružnicovou deformační sítí s parametrem 2 mm, tím je myšlen větší průměr kružnice dané sítě. Příklady vzorků s nanesenou sítí jsou uvedeny na obrázku 26.



Obr. 26 Příklady vzorků s nanesenou deformační sítí

4.3.3 Zhodnocení použité metody [27],[29]

Elektrolytické leptání deformační sítě na povrch vzorku se vyznačuje především následujícími výhodami:

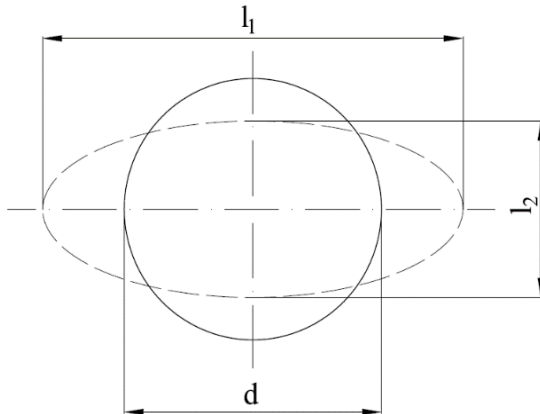
- deformační síť neovlivňuje tření mezi nástrojem a vzorkem,
- nenarušuje povrch vzorku, a nedochází tak ke vzniku vrubového účinku, jako je to u mechanického nanášení sítě,
- dostatečná plasticita sítě, to znamená schopnost velkých plastických přetvoření bez následků na čitelnost,
- rozměrová a tvarová přesnost sítě,

Tato metoda a její praktické využití spočívá především v možnostech:

- zjištění napětového stavu v jakémkoliv místě vzorku,
- zjištění velikosti a směru hlavních napětí ve zkoumaném bodě vzorku prostřednictvím proměření přetvořených elementů deformační sítě,

- vizuální zjištění místa potencionálního vzniku trhliny dle místa s největším přetvořením deformační sítě. Původní kružnice o průměru d se přemění na elipsu, jejíž hlavní osy udávají směr a velikost hlavních deformací

4.4 Vyhodnocení přetvoření pomocí deformační sítě [25],[27],[28]



Obr. 27 Vyhodnocení velikosti deformace [26]

Deformační síť se využívá k vyhodnocení napět'ového stavu a analýze deformačních procesů. Velikost deformace se získá pomocí proměření deformované sítě. Původní tvar sítě (tj. kružnice) se přemění na elipsy, obrázek 27. Obě hlavní osy elipsy potom dávají velikosti hlavních deformací.

Vhodná elipsa pro zjišťování zásoby plasticity se volí nejlépe ve středu místa maximálního přetvoření deformační sítě. V případě porušení vzorku trhlinou či lomem se ideálně volí více kružnic, vzdálených 1,5 násobku parametru kružnice od trhliny.

Délka delší a kratší osy elipsy je označena l_1 a l_2 . Průměr původní kružnice je označen d , potom se poměrné přetvoření ε_1 , ε_2 vypočítá ze vzorců (4.1) pro tahové zatížení a následně pomocí těchto hodnot lze vyhodnotit logaritmické přetvoření φ_1 , φ_2 ze vzorců (4.2). Velikost přetvoření ve směru tloušťky vzorku φ_3 je různé od nuly. Toto přetvoření se vypočítá ze zákona zachování objemu podle vztahu (4.3).

$$\varepsilon_1 = \frac{l_1 - d}{d}, \varepsilon_2 = \frac{l_2 - d}{d} \quad [-] \quad (4.1)$$

$$\varphi_1 = \ln(1 + \varepsilon_1), \varphi_2 = \ln(1 + \varepsilon_2) \quad [-] \quad (4.2)$$

$$\varphi_3 = -\varphi_1 - \varphi_2 \quad [-] \quad (4.3)$$



Obr. 28 Dílenský mikroskop

Měření deformovaných kružnic bylo provedeno na dílenském mikroskopu, zobrazeném na obrázku 28. Okulár mikroskopu je opatřený čočkou s osovým křížem pro přesné měření. Mikroskop je umístěn v laboratořích Odboru technologie tváření kovů a plastů na FSI VUT v Brně.

4.5 Trhací stroj



Obr. 29 Hydraulický zkušební stroj ZD40

Pro tahovou zkoušku byl zvolen hydraulický zkušební stroj ZD40, obrázek 29. Tento stroj může provádět tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálů do 400 kN. Stroj je vybaven snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60. Jednotka je opatřena programem pro zkoušky kovů s možností provádět zkoušky bez PC u jednoduchých aplikací bez použití průtahoměru. Trhací stroj má sériové rozhraní RS 232 pro komunikaci s nadřazeným PC. Počítač je vybaven programem M-TEST v.1.7 pro tahovou, tlakovou a ohybovou zkoušku kovových materiálů dle EN 10001-2 s vyhodnocením výsledků, grafickým zpracováním. Umístěn je v laboratořích Odboru technologie tváření kovů a plastů na FSI VUT v Brně. Technické parametry a další informace o trhacím zařízení jsou uvedeny v příloze č. 1.

4.6 Zjištění koeficientů n a C [25],[27],[28]

Tahovou zkouškou se běžně získávají ukazatele tvárnosti jako tažnost, kontrakce, mez pevnosti a kluzu. Dalším významným ukazatelem tvárnosti, který lze získat z tahové zkoušky, je exponent deformačního zpevnění n a materiálová konstanta C .

Exponent deformačního zpevnění vyjadřuje schopnost a rychlost materiálu zpevňovat se při deformaci. Čím větší je jeho hodnota, tím větší je rychlost zpevňování, tzn. tím větší je odolnost deformovaného materiálu proti místnímu zúžení průřezu. Materiálová konstanta je měřítkem přetvárné pevnosti a přetvárné síly potřebné pro tažení. Konstanta C je numericky shodná s hodnotou napětí při absolutním prodloužení $\varphi=1$.

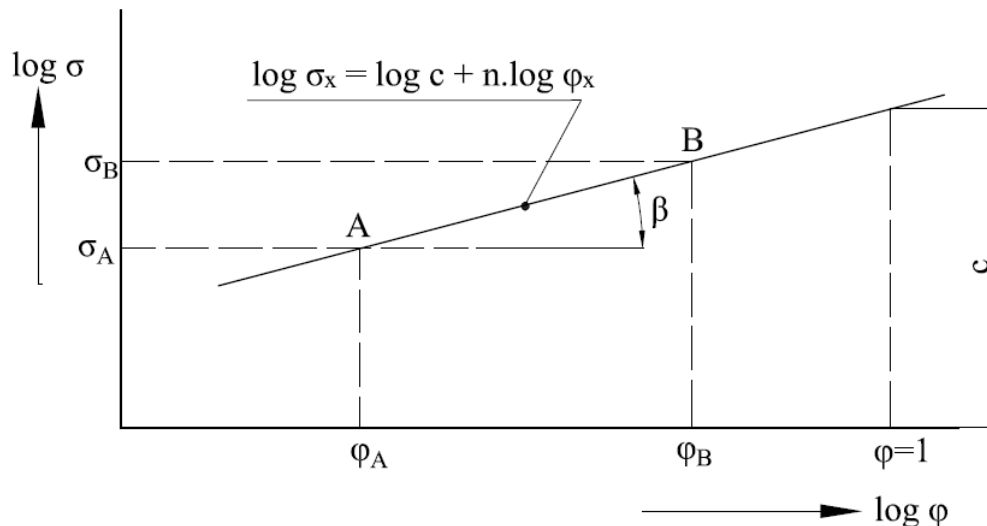
Tyto konstanty se užívají zejména při teoretických výpočtech v tzv. aproximačních rovnicích jako je například Holomonova rovnice (4.9), která definuje chování materiálu v plastické oblasti.

$$\bar{\sigma} = C \cdot \bar{\varphi}^n \quad (4.9)$$

- kde: $\bar{\sigma}$ [MPa] – Skutečné napětí
 $\bar{\varphi}$ [-] – skutečné přetvoření,
 C [MPa] – materiálová konstanta,
 n [-] – exponent deformačního zpevnění.

Existuje několik variant získání těchto hodnot. Například jednobodová, dvoubodová, metoda „full curve“, určení n z hodnot síly změřené při dané deformaci, nebo aproximací křivky.

4.6.1 Dvoubodová metoda [25],[27]



Obr. 30 Princip dvoubodové metody

Tato metoda proměřuje skutečnou křivku vyjadřující závislost $\sigma = f(\varphi)$. Princip spočívá v nalezení alespoň dvou odpovídajících dvojic skutečných hodnot σ a φ v intervalu meze kluzu a meze pevnosti tahového diagramu. Princip určování exponentů je zobrazen na obrázku 30. Konstanta n je velikost napětí při absolutní deformaci rovné jedné. Exponent deformačního zpevnění se určí změřením úhlu β tak, že $n = \text{tg } \beta$, nebo se dá vypočítat analyticky ze vztahu (4.11).

$$\log \sigma_x = \log C \cdot n + \log \varphi_x \quad (4.10)$$

$$n = \frac{\log \sigma_B - \log \sigma_A}{\log \varphi_B - \log \varphi_A} \quad (4.11)$$

4.6.2 Aproximace křivky [16],[23],[24]

Dalším způsobem získání konstant n a c je tzv. aproximace získané skutečné křivky, například pomocí proložení dané křivky grafu regresivní křivkou známou také jako spojnice trendu. Spojnice trendu slouží k popisu trendu ve stávajících datech. Proložení křivky grafu od meze kluzu $R_{p0,2}$ do meze pevnosti R_m mocninou funkcí dostaneme rovnici (4.12). Mocninná funkce je každá funkce f vyjádřená jako rovnice (4.12). Tato rovnice potom odpovídá Holomonově rovnici (4.9).

$$y = X \cdot x^k, \quad \text{kde: } y = \sigma, X = C, x = \varphi, k = n \quad (4.12)$$

4.6.3 Určení n z hodnot síly změřené při dané deformaci

Tato metoda je v podstatě metoda dvoubodová a používá se v případech, kdy nebylo možné během tahové zkoušky měřit aktuální změnu průřezu vzorku v závislosti na délce protažení. Touto metodou se zjišťuje hodnota exponentu deformačního zpevnění ze dvou příslušných dvojic hodnot skutečného napětí a skutečného přetvoření. Pro získání těchto hodnot se provede odstupňovaná tahová zkouška, přičemž v první fázi se zatěžuje vzorek na hodnotu deformace $\varepsilon = 10 \%$ a následně se pokračuje na hodnotu $\varepsilon = 20 \%$.

Při dosažení daného přetvoření se vždy zkouška přeruší a odečte se hodnota tahové síly a změří se změna průřezu. Tímto způsobem se získají hodnoty skutečných napětí a přetvoření ve dvou bodech tahové křivky. Pro jejich vyčíslení se užijí vztahy (4.14) a (4.2). Vypočtené hodnoty skutečných napětí a přetvoření se dosadí do vztahu (4.15) a vypočte se hodnota exponentu deformačního zpevnění n .

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{l_0} \cdot 100[\%] \quad (4.13)$$

$$\overline{\sigma}_{10} = \frac{F_{10}}{S_{10}}, \quad \overline{\sigma}_{20} = \frac{F_{20}}{S_{20}} \quad (4.14)$$

$$n = \frac{\log \overline{\sigma}_{20} - \log \overline{\sigma}_{10}}{\log \overline{\varphi}_{20} - \log \overline{\varphi}_{10}} \quad (4.15)$$

5 PROVEDENÍ A VYHODNOCENÍ EXPERIMENTŮ

Jak bylo popsáno v kapitole 4.2 pro experimenty byly zhotoveny 3 typy vzorků, jejichž rozměry a tvary vychází z normy ČSN EN 10002-1. Všechny vzorky byly zhotoveny z podélně svařovaných trubek materiálu ocel 17 240.

Zkoušeno bylo celkem 22 zkušebních vzorků:

- 3 x byla provedena úplná tahová zkouška celistvé trubky,
- 5 x byla provedena částečná tahová zkouška celistvé trubky,
- 8 x byla provedena tahová zkouška výřezu z trubky,
- 2 x byla provedena odstupňovaná tahová zkouška výřezu z trubky,
- 4 x byla provedena tahová zkouška ve tvaru příčného průřezu z trubky.

5.1 Tahová zkouška celistvých trubek [27]

Analýza chování vzorků trubek při tahové zkoušce byla zkoumána v práci [27], a to pro tenkostěnnou trubku s relativní tloušťkou stěny $t/D = 0,05$, respektive pro trubku o průměru 20 mm a tloušťce stěny 1 mm. V dané práci bylo zjištěno, že vzorky z celistvých trubek při tahové zkoušce vytváří po překročení meze kluzu, oboustranné kuželovité zúžení. To značí nerovnoměrnou deformaci v oblasti rozsahu meze kluzu a meze pevnosti. Zkoušky provedené v rámci bakalářské práce budou zaměřeny na problematiku chování vzorků o vyšší hodnotě t/D . Cílem je zjistit, zda trubka o průměru 20 mm a tloušťce stěny 1,5 mm vykazuje stejné problémy spojené s nerovnoměrnou deformací a v kladném případě provést její analýzu.

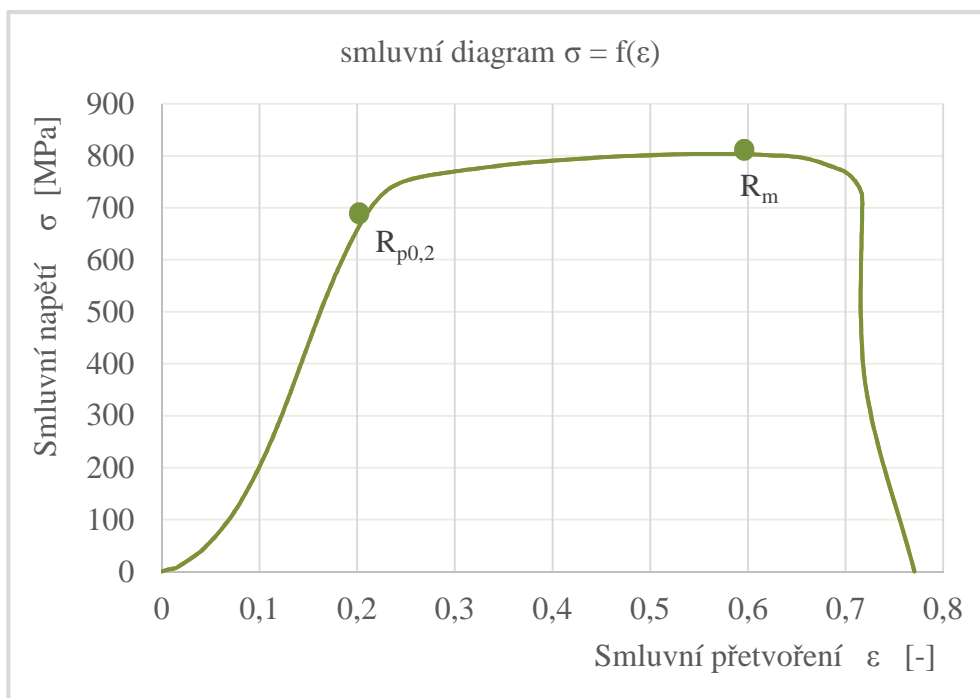
5.1.1 Tahová zkouška celistvých trubek do přetržení [25]

Dle [23] se za tenkostěnnou trubku se berou případy kdy poměr t/D je $1/10$ a menší. Podle vzorce (5.1) tedy můžeme zkoumanou trubku s poměrem $1,5/20$ považovat za tenkostěnnou. Tahová zkouška do přetržení odhalí chování dané trubky při tahovém zatížení a mimo jiné umožní stanovit hodnoty meze kluzu a meze pevnosti.

$$\frac{t}{D} = \frac{1,5}{20} < \frac{1}{10} \quad (5.1)$$

Metodika zkoušky spočívá ve zhotovení vzorků ve tvaru odřezků z trubky o délce 150 mm, a to v souladu s normou ČSN EN 10002-1. Pro bezproblémové upínání vzorků ve stroji byly vyrobené čepy, které zabrání deformaci konců trubek upnutých v čelistech. Tvar a rozměry těchto čepů byly popsány v kapitole 4.2.1. Vzorky se upnuly do Trhacího stroje ZD40 a zatěžovaly tahovou silou. Během zkoušky byla zaznamenávána síla a dráha příčnicku stroje a vykreslena jejich závislost ve formě tzv. pracovní křivky. Pomocí softwaru byl vytvořen protokol o zkoušce, ve kterém byly mimo jiné zaznamenány potřebné hodnoty materiálových charakteristik jako mez kluzu, mez pevnosti a tažnost. Získaná data (síla - dráha) byla pomocí programu Excel přepočítána na hodnoty smluvních napětí a deformací dle vzorců (1.6) a (1.7). Následně byly z přepočítaných hodnot vytvořeny grafy závislosti $\sigma - \epsilon$, které je možno také nazvat jako smluvní tahové diagramy. Smluvní diagram vybraného vzorku je uveden na obr. 31.

Zkouška do přetržení byla provedena celkem pro 3 vzorky celistvých trubek A1 - A3 a získané hodnoty z protokolů jsou uvedeny v tab. 9.



Obr. 31 Smluvní diagram vzorku A1

Tab. 9 Naměřené hodnoty

Vzorek:	Počáteční měřená délka:	Plocha průřezu:	Maximální síla:	Mez kluzu:	Mez pevnosti:	Tažnost:	Čas zkoušky:
	l_0 [mm]	S_0 [mm ²]	F_m [kN]	$R_{p0,2}$ [Mpa]	R_m [Mpa]	A [%]	T [s]
A1	50	87,18	70,06	636,52	803,64	36	84,32
A2	50	87,18	70,45	659,18	808,06	34	120,22
A3	50	87,18	68,98	638,68	791,23	36	83,22
Průměr:	50,00	87,18	69,83	644,79	800,98	35,33	95,92

Hodnoty meze kluzu a meze pevnosti celistvé trubky jsou odlišné od hodnot uvedených v materiálovém listu oceli 17 240, viz Příloha 1. Vyšší hodnoty meze kluzu a meze pevnosti by mohly být způsobeny například odlišným tvarem tahového vzorku z trubky, užitím svařované trubky či jiné hodnoty t/D výchozího polotovaru, stejně tak tu hraje významnou roli i nerovnoměrná deformace vzorku během zatěžování, kdy tuto deformaci lze také chápat jako tvorbu "krčku" již od okamžiku překročení hodnoty meze kluzu.

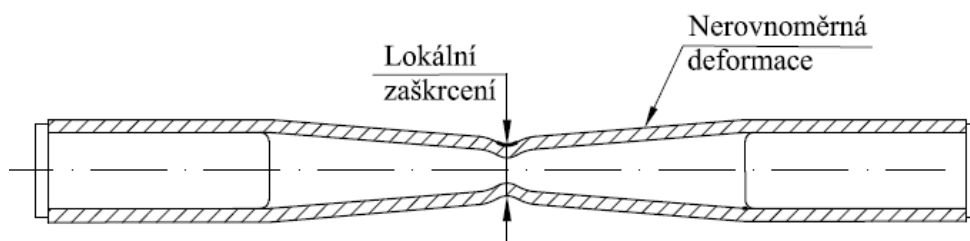
Provedená zkouška ukázala, že zkoumaná trubka o relativní tloušťce stěny $t/D = 0,075$, respektive $D = 20$ mm a $t = 1,5$ mm, vytváří oboustranné kuželovité zúžení stejně tak, jako trubka s nižší hodnotou t/D , kde $D = 20$ mm a $t = 1$ mm, zkoumaná v práci [27]. Dle orientačního vizuálního srovnání (pro představu zobrazeno v obr. 32), lze konstatovat, že kuželovitost u trubky zkoumané v této bakalářské práci je menší než u trubky o tloušťce 1 mm zkoumané v [27]. Toto pouze informativní přiblížení vyvolává myšlenku, že při $D = \text{konst.}$ a se zvětšující se tloušťkou stěny nerovnoměrnost deformace v měrné délce klesá.

Otázkou pak je, v kterém okamžiku, respektive při jakém poměru t/D se už tahový vzorek celistvé trubky začíná deformovat rovnoměrně. Odpovědět na tuto otázku by vyžadovalo provedení mnoha dalších experimentů. Nicméně toto zkoumání není cílem předkládané práce. Naše zkoumání je v této části práce zaměřeno na analýzu nerovnoměrné deformace při jednoosém tahovém zatěžování vzorku vyrobeného jako celistvý vzorek z trubky.



Obr. 32 Přetržená celistvá trubka: a) tloušťka stěny 1,5 mm b) tloušťka stěny 1 mm

Deformace trubky od meze kluzu po mez pevnosti tedy probíhá nerovnoměrně. Lom nastal v místě lokálního zaškrcení, k jehož vzniku došlo po překročení hodnoty napětí na mezi pevnosti. Tento proces je schematicky ztvárněn na obr. 33.



Obr. 33 Nerovnoměrná deformace trubky a vznik zaškrcení na mezi pevnosti

❖ Dílčí závěr

Získané hodnoty meze pevnosti a meze kluzu, potažmo i tažnosti, nelze považovat za reálné, a to z důvodu nerovnoměrné deformace v měřené části vzorku, kdy se vzorek oboustranně zužuje a vytváří jakýsi „krček“. Z toho také vyplývá fakt, že v tomto případě nelze v průběhu tahové zkoušky měřit okamžitý průřez (v každém místě je hodnota průřezu odlišná) a není tedy možné uplatnit metodiku stanovení hodnot n a C (například dvoubodovou metodou), která se běžně užívá u klasických vzorků z plechů či tyčí. Odlišné hodnoty meze kluzu a meze pevnosti od materiálového listu znamenají, že u tahové zkoušky tenkostěnných trubek, by bylo vhodnější použít jiný typ vzorku např. výřez z trubky, u kterého se vzhledem ke tvaru průřezu blízkého klasickému vzorku z plechu předpokládá rovnoměrná deformace.

Na základě zjištěných poznatků bude v následující kapitole 5.1.2 provedena podrobná analýza nerovnoměrné deformace trubky při tahovém zatížení s cílem zjistit, zda tvorba kuželovitého zúžení se děje rovnoměrně a jaké napěťové a deformační stavy zde nastávají. Pro vytvoření představy o postupující deformaci vzorků byly provedeny tahové zkoušky na různé hladiny sil. Jedná se o tzv. odstupňovanou tahovou zkoušku několika vzorků

5.1.2 Odstupňovaná tahová zkouška celistvých trubek

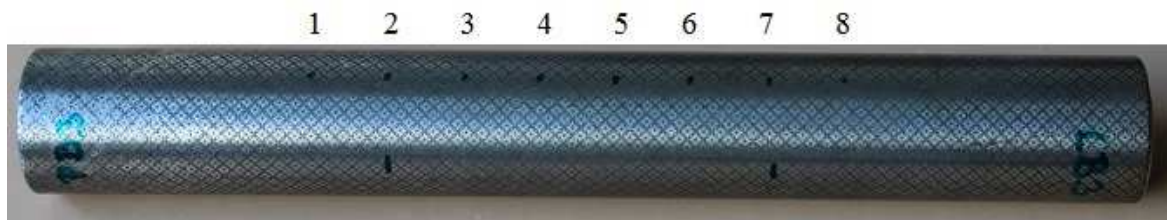
Na základě vykreslené pracovní křivky vzorků namáhaných do přetržení bylo stanoveno celkem 5 hodnot sil, které byly použity jako maximální síly pro zatížení jednotlivých vzorků B1, B2, B2,5, B3 a B4. Tyto síly byly voleny tak, aby co nejlépe vyjadřovaly deformaci vzorků od meze kluzu do meze pevnosti. Nejvyšší síla (vzorek B1) byla volena tak aby odpovídala hodnotě smluvního napětí na mezi pevnosti (tzn. v okamžiku těsně před vznikem lokálního zaškrvení). Nejnižší síla (vzorek B4) byla volena, aby odpovídala hodnotě napětí za smluvní mezi kluzu. Celkem bylo zkoušeno 5 vzorků, příslušné síly a hodnoty smluvních napětí odpovídajících příslušným silám jsou uvedeny v tabulce č. 10.

Tab. 10 Hodnoty sil a smluvních napětí jednotlivých vzorků

Vzorek:	Síla: [kN]	σ : [MPa]	Poznámka:
B1	70	802,94	těsně před R_m
B2	67	768,52	
B2,5	66	757,05	
B3	65	745,58	
B4	62	711,17	těsně za $R_{p0,2}$

❖ Ověření rovnoměrnosti tvorby kuželu

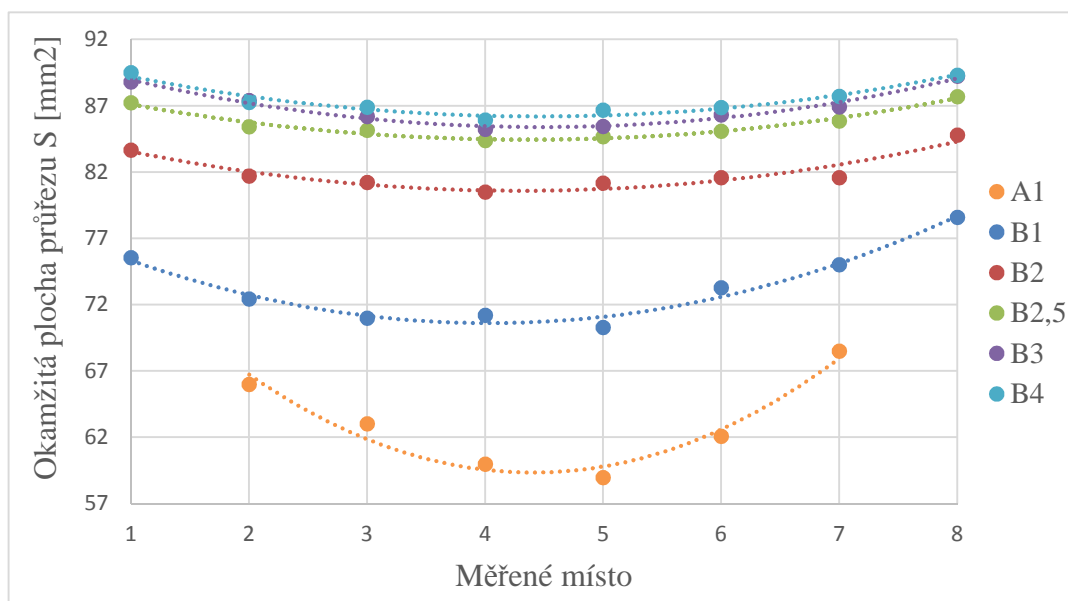
Jak bylo zjištěno v [27] a při tahových zkouškách celistvých trubek do přetržení provedených v rámci řešení této bakalářské práce, dochází při tahové zkoušce celistvé tenkostěnné trubky k tomu, že „krček“ se tvoří od okamžiku překročení meze kluzu (nerovnoměrná deformace, obrázek 33). Pro ověření rovnoměrnosti tvorby kuželů byly vzorky opatřeny ryskami, označující místa, která budou podrobena bližšímu zkoumání. Měřených míst bylo celkem 8, ve vzájemné vzdálenosti 10 mm a jsou zobrazeny na obrázku 34. Místa 2-7 jsou v oblasti měřené délky l_0 .



Obr. 34 Měřená místa na celistvé trubce

Pro provedení tahových zkoušek na dané hladiny sil byly u jednotlivých vzorků proměřeny průměry ve sledovaných místech (v místech označených ryskami, viz obr. 34) a po rozřezání i odpovídající tloušťky stěny. Tímto způsobem byly zjištěny skutečné plochy průřezu v těchto sledovaných místech a to pro všechny zkoušené vzorky B1 až B4. Pro získání lepší představy byl do analýzy zapojen i přetržený vzorek A1. Tyto hodnoty

skutečných průřezů pro každý vzorek byly vyneseny do grafu (obr. 35) pro jednotlivá měřená místa.



Obr. 35 Závislost plochy průřezu na měřeném místě

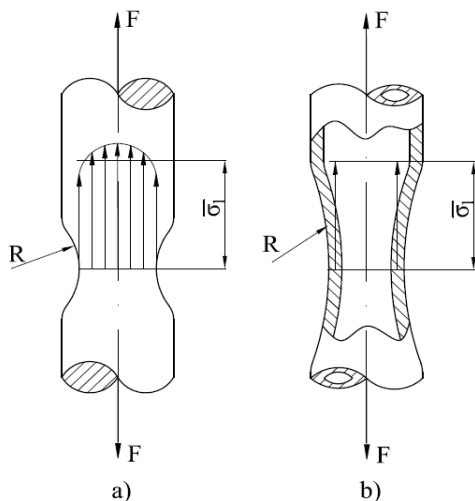
Po proložení daných bodů křivkou se ukázalo, že tvorba oboustranného kuželu probíhá rovnoměrně, přičemž hodnota maximálního zúžení se vyskytuje převážně v prostřední části celkové délky vzorku. Z grafu je také patrné, že po překročení meze kluzu se po jistou dobu průřez v každém místě mění rovnoměrně, přičemž tyto změny jsou nepatrné. To znamená, že úhel kuželu po tuto dobu zůstává téměř konstantní. V určitém okamžiku se průběh zužování zrychlí (viz. Vzorek B2, B1). Lze konstatovat, že v konečné fázi zatěžování s rostoucím prodloužením vzorku roste i úhel kuželovitosti „krčku“ rychleji.

V podstatě to vypadá tak, že trubka s větší tloušťkou se po překročení meze kluzu deformuje nerovnoměrně v menší míře ve srovnání s trubkou o menší tloušťce. Z toho lze nejspíše vyvodit závěr, že u trubky o větší tloušťce než 1,5 mm by výrazná kuželovitost nastávala ještě později a zpočátku by se trubka deformovala rovnoměrně. Přičemž tento proces deformace by se přiblížil k deformaci tyčí plného průřezu. Lze tedy vyjádřit tvrzení, že s narůstající tloušťkou stěny se nerovnoměrnost deformace snižuje, až tento trend dosáhne případu, kdy deformace trubek bude probíhat stejně jako u vzorku plných průřezů. Tento závěr je potvrzen i v [27], kde tlustostěnná trubka o průměru 20 mm a tloušťce stěny 4 mm se chovala stejně jako vzorky s tyčí.

❖ Analýza osového napětí

Pro tohle zkoumání byl vybrán vzorek B1, který nejlépe odpovídá okamžiku těsně před vznikem lokálního zaškrcení a kuželovitost je již výrazná.

Na výchozím vzorku byla vyznačena místa, na kterých bude analýza provedena (obr. 34). Tato místa jsou vzdálená 10 mm. Cílem je zjistit délkové změny v podélném směru osy. Na základě toho budou stanoveny hodnoty přetvoření v osovém směru a odpovídající hodnoty napětí.

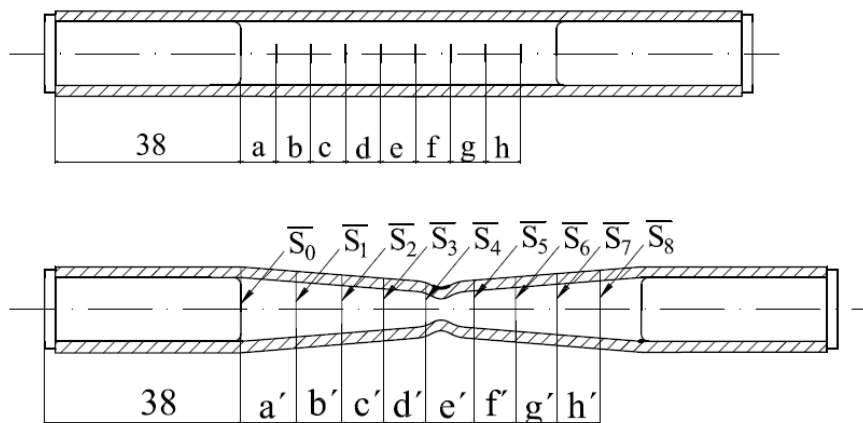


V analýze velikosti a rozložení napětí „krčku“ vzorku z tyčí (plný průřez) je napětí v osové směru rozloženo po průřezu dle obr. 36 [25]. Pro další teoretické výpočty se dále využívá tzv. střední napětí označované $\bar{\sigma}_1$. Na rozdíl od tohoto případu, u trubek je skutečný průřez tvořen pouze stěnou trubky. To znamená, že lze považovat osové napětí za konstantní v každém průřezu sledovaného místa trubky. Rozdíl rozložení napětí v osové směru mezi tyčí plného průřezu a trubkou popisuje obr. 37 Cílem této analýzy je zjistit velikosti a průběh skutečného napětí v jednotlivých průřezích a to:

Obr. 36 Rozložení osového napětí v „krčku“ vzorku [25]

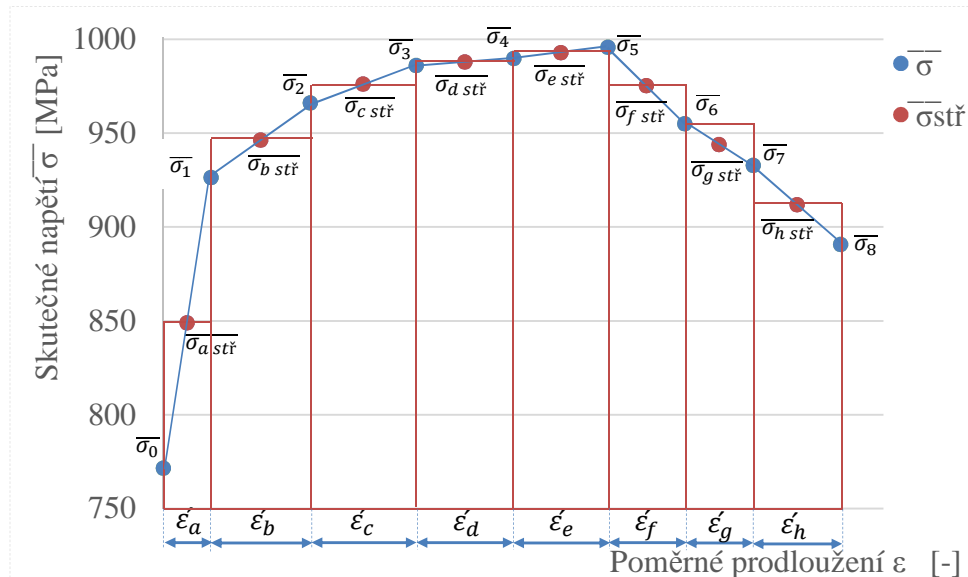
- V závislosti na délkové změně jednotlivých segmentů.
- V závislosti na sledovaném místě vzorku.

Vzorek B1 byl opatřen ryskami, označující místa, která budou podrobena bližšímu zkoumání. Rozsah mezi dvěma ryskami (dále označován jako segment) je schematicky označen a až h, a zobrazen na obr. 37. Na začátku každého segmentu byly proměřeny průměry a délky jednotlivých segmentů daného vzorku. Po odměření byl vzorek rozřezán ve sledovaných místech, aby se mohly získat odpovídající tloušťky stěny a stanovit hodnoty skutečných průřezů. Při znalosti tahové síly, kterou byl vzorek B1 maximálně zatížen, byly následně dopočítány i hodnoty skutečných napětí v počátku každého segmentu s využitím rovnice (1.6) spolu s hodnotami poměrných prodloužení, respektive poměrných deformací v osové směru jednotlivých segmentů, rovnice (4.13).



Obr. 37 Segmenty na vzorku B1

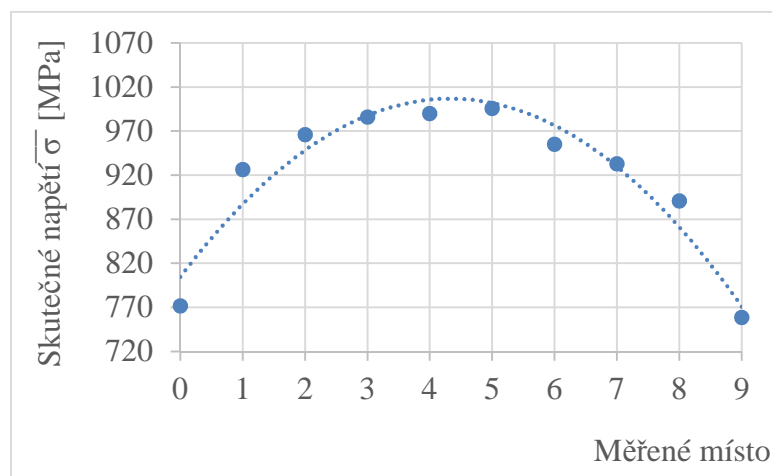
Závislost skutečných napětí na prodloužení jednotlivých segmentů je popsána bodovým grafem, který je zobrazen na obr. 38. Poměrná deformace je konstantní v celé délce daného segmentu a lze uvažovat, že jí také odpovídá hodnota skutečného osového středního napětí pro každý element. Skutečné střední osové napětí bylo vypočteno z aritmetického průměru skutečných napětí působících vždy v místě začátku a konce každého segmentu.



Obr. 38 Graf závislosti skutečných napětí na prodloužení

Z daného grafu vyplývá, že hodnoty osových středních napětí se mění v závislosti na měřeném místě a míře prodloužení každého segmentu. Největší hodnoty je dosaženo v místě minimálního průřezu vzorku, kde je také prodloužení segmentu největší. Po té se napětí opět snižuje v závislosti na rostoucím průřezu vzorku a zkracování délky segmentu.

Závislost skutečného napětí sledovaného průřezu na poloze tohoto místa je popsána v obr. 39.



Obr. 39 Graf změny osového napětí při tahové deformaci

Proložením vhodné křivky body, lze zjistit trend změny napětí v jednotlivých místech trubky.

Předpokládá se, že průběh změny napětí v jednotlivých sledovaných řezech by měl mít stejný charakter jako průběh změny přetvoření. Toto bude zkoumáno v následující Analýze osově deformace vzorku B1.

❖ Analýza osově deformace

Hodnoty osověho přetvoření v jednotlivých sledovaných místech 0 až 9 lze stanovit analýzou deformační sítě nanesené na povrchu vzorku B1. Ve sledovaných místech byly stanoveny hodnoty deformace ε na základě odečtení velikostí hlavní a vedlejší osy deformované elipsy ležící v místě sledovaného průřezu.

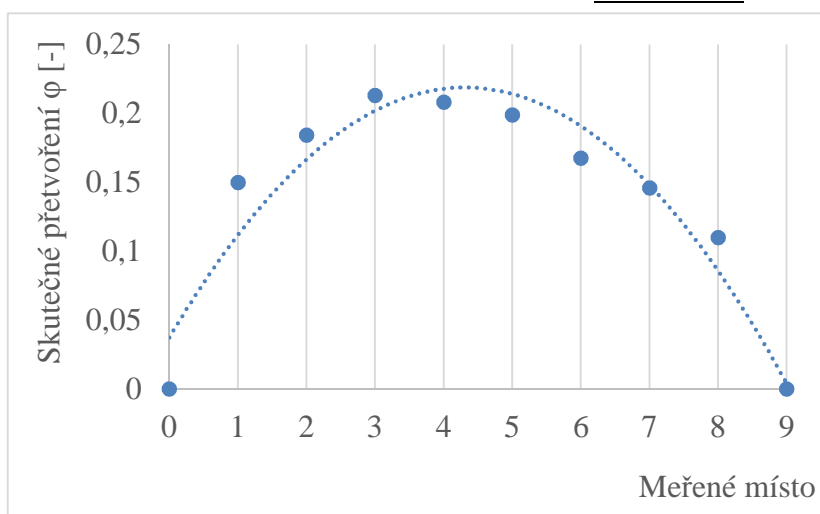
Pro měření byly vybrány 3 elipsy po obvodu a výsledné hodnoty l_1 a l_2 stanoveny jako průměrná hodnota. Hodnoty poměrných deformací ε byly vypočteny ze vztahu (4.1) a z nich přepočítány na hodnoty přetvoření φ dle vztahu (4.2).

Vzhledem k charakteru zatěžování vzorků tahovou silou je pro analýzu velikostí přetvoření v jednotlivých místech stěžejní přetvoření v podélném směru, tedy hodnota φ_1 .

Pro každý sledovaný průřez tak byla stanovena hodnota skutečného přetvoření, která odpovídá skutečnému napětí v daném průřezu (Tab. 11). Předpokládá se, že průběh změny přetvoření v jednotlivých sledovaných řezech by měl mít stejný charakter jako průběh změny napětí. To lze ověřit vynesáním velikosti daných přetvoření do grafu (obr. 41) v závislosti na zkoumaném místě.

Tab. 11 Hodnoty získané z nanesené deformační sítě u vzorku B1

měř. místo	l_1 [mm]	l_2 [mm]	ε_1 [-]	ε_2 [-]	φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_3 [-]
2	2,405	1,82	0,2025	-0,0900	0,1844	-0,0944	-0,0900
3	2,475	1,54	0,2375	-0,2300	0,2131	-0,2758	0,0627
4	2,465	1,775	0,2325	-0,1125	0,2081	-0,1194	-0,0888
5	2,44	1,755	0,2200	-0,1225	0,1988	-0,1308	-0,0680
6	2,365	1,715	0,1825	-0,1425	0,1676	-0,1538	-0,0137
7	2,315	1,77	0,1575	-0,1150	0,1460	-0,1223	-0,0237



Obr. 40 Závislost přetvoření na měřeném místě

Z porovnání grafů na obrázcích 39 a 40 je patrné, že průběh přetvoření v závislosti na měřeném místě se chová stejně jako průběh osového napětí. To znamená, že je ověřena platnost toho, že každému osovému skutečnému napětí musí odpovídat příslušné osově přetvoření a jejich změny při tahovém zatěžování probíhají synchronně.

5.2 Tahová zkouška podélných výřezů z trubky

Vzorky ve tvaru výřezu z trubky byly zhotoveny z trubky o průměru 50 mm a tloušťce $t = 1,5$ mm, materiál – ocel 17 240. Rozměry a tvar daných vzorků byly v souladu s normou ČSN EN 10002-1. Vzorky byly řezány pomocí laseru za provozních podmínek uvedených v kap. 4.2.2. Výřezy na trubce byly zhotoveny v několika místech po obvodu, jak udává obr. 41.



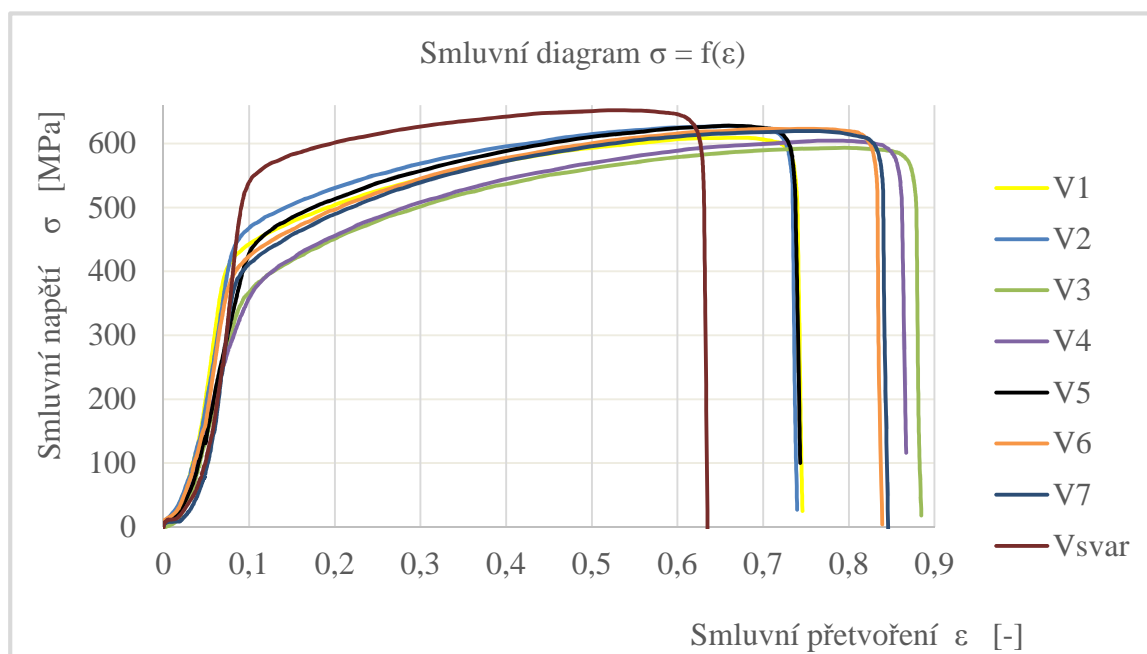
Obr. 41 Trubka po vyřezání vzorků

5.2.1 Tahová zkouška výřezů z trubky do přetržení

Celkem bylo zkoušeno 8 vzorků s označením V1 až V7 a Vsv. Vzorek Vsv byl zhotoven v místě svaru trubky. Pro bezpečné upnutí vzorků v čelistech stroje musely být všem vzorkům vyrovnány hlavy. Vzorky byly podrobeny zatěžování do vzniku lomu (přetržení). Pro jednotlivé zkoušky daných vzorků byla vytvořena pracovní křivka a protokol udávající hodnoty základních materiálových charakteristik. Tyto hodnoty jsou pro přehlednost uvedeny v tabulce 12. Na obr. 42 jsou vykresleny smluvní diagramy pro jednotlivé vzorky vytvořené přepočtem z pracovních křivek. Při vzájemném porovnání hodnot uvedených v tab. 15 bylo shledáno, že vzorky lze rozdělit do několika skupin o přibližně stejných hodnotách meze pevnosti. Jen vzorek se svarem se výrazně liší co do velikosti meze pevnosti, meze kluzu i tažnosti. To potvrzuje, že místo svaru vykazuje výrazně jiné mechanické vlastnosti než ostatní části obvodu trubky.

Odlišné hodnoty meze pevnosti jednotlivých skupin je možné přisoudit tomu, z jaké části obvodu trubky byl daný vzorek odebrán. Ze získaných hodnot lze usoudit, že vzorky neblíže místu svaru mají hodnoty meze pevnosti vyšší nežli vzorky odebrané ve vzdálenějších místech.

Z toho plyne závěr, že reálné hodnoty materiálových charakteristik mohou záviset jak na způsobu výroby trubky, tak i na místě odkud byl vzorek z trubky odebrán, a to v závislosti na poloze svaru.



Obr. 42 Smluvní diagram napětí - deformace

Tab. 12 Naměřené hodnoty

Vzorek:	Počáteční měřená délka:	Plocha průřezu:	Maximální síla:	Mez kluzu:	Mez pevnosti:	Tažnost:	Čas zkoušky:
	l_0 [mm]	S_0 [mm ²]	F_m [kN]	$R_{p0,2}$ [Mpa]	R_m [Mpa]	A [%]	T [s]
V1	50	18,49	11,43	408,87	610,29	40	63,52
V2	50	18,88	11,76	446,03	627,87	42	64,34
V3	50	18,88	11,13	355,63	594,2	48	61,12
V4	50	19,04	11,32	361,14	604,75	46	61,48
V5	50	19,2	11,76	435,99	627,87	40	62,94
V6	50	19,51	11,69	390,79	624,34	48	62,44
V7	50	19,43	11,61	389,79	619,81	48	62,46
Vsvar	50	18,73	12,22	528,41	652,48	38	67,72

5.2.2 Odstupňovaná tahová zkouška, stanovení hodnot n a C

Vzhledem k tomu, že při tahové zkoušce trubek není možné průběžně měřit změnu průřezu, byla pro stanovení hodnoty exponentu deformačního zpevnění a potažmo i materiálové konstanty C použita metoda určení z hodnot síly změřené při dané deformaci, která byla popsána v kapitole 4.6.3.

Jako zkušební vzorky byly použity výřezy z trubky, neboť jak bylo zjištěno zkouškami do přetržení, se tyto vzorky při tahové zkoušce deformují rovnoměrně až do hodnoty meze pevnosti R_m . To umožňuje uplatnit metodiku stanovení hodnoty n platnou pro vzorky z plechu.

Zkoušky byly provedeny tak, že po upnutí vzorku do čelistí stroje byl vzorek zatěžován až na hodnotu deformace 10 %. V tomto okamžiku byl pojezd příčnicku pozastaven a odečetla se hodnota síly a změřila aktuální hodnota šířky a tloušťky vzorku. Měření rozměrů bylo provedeno vždy 3x na třech místech spadajících do oblasti měrné délky. Výsledná velikost průřezu byla stanovena jako průměrná hodnota naměřených a vypočtených hodnot. Po proměření šířky a tloušťky byl stroj znovu spuštěn a příčník popojel na vzdálenost odpovídající dosažení 20% deformace vzorku. V tomto okamžiku byla odečtena síla a vzorek vyjmut ze stroje a opět proměřen stejným způsobem jako v předchozím případě.

V souladu s navrženou měrnou délkou $l_0 = 50$ mm se hodnota posunu příčnicku stroje pro dosažení 10% a 20% deformace vzorku stanovila ze vztahu (4.13). Jak je doloženo výpočtem, příčník stroje se musel pro vyvolání deformace 10 % posunout teoreticky o hodnotu 5 mm a pro dosažení deformace 20 % ještě o dalších 5 mm, tedy celkově o hodnotu 10 mm.

Při zkoumání pracovních křivek z předchozích provedených experimentů (viz kap. 5.2.1) bylo zjištěno, že pracovní křivka v úplném počátku nevykazuje nárůst hodnoty síly. K nárůstu dochází až po ujetí dráhy příčnicku cca 1,5 mm. Toto můžeme přisoudit tomu, že na úplném začátku zkoušky se vzorek v čelistech usazuje (neodborně řečeno se v této fázi zakusují čelisti do vzorku). Proto při určování potřebné vzdálenosti popojetí příčnicku stroje pro dosažení hodnoty deformace 10 %, potažmo 20 %, se tato hodnota 1,5 mm připočetla k teoreticky vypočteným hodnotám delta l. Ve skutečnosti se tak příčník stroje v první fázi zastavil přibližně na hodnotě 6,5 mm a následně na hodnotě 11,5 mm, jak je uvedeno v tab. 13 a 14.

Pro srovnání byla tato odstupňovaná tahová zkouška provedena 2 x, a to na vzorcích označených 1 a 2. Vzorky byly zhotoveny dle normy ČSN EN 10002-1. Během tahové zkoušky byly získány hodnoty sil F_{10} a F_{20} , změřeny a dopočítány průřezy. Tyto a další dopočítané hodnoty jsou uvedeny v tabulce 13 pro vzorek 1 a v tabulce 14 pro vzorek 2.

Tab. 13 Hodnoty pro získání konstant ze vzorku č. 1

vzorek 1	b_1 [mm]	t_1 [mm]	l_0 [mm]	F_1 [N]	ΔL_1 [mm]	S [mm ²]	$\overline{\sigma}_1$ [MPa]	$\overline{\varphi}_1$ [-]	$\log \overline{\sigma}_1$	$\log \overline{\varphi}_1$
výchozí	12,25	1,4	50	0	0	17,15	-	-	-	-
$\varepsilon = 10\%$	12,093	1,37	52	7500	6,65	16,57	452,70	0,10	2,656	-1,021
$\varepsilon = 20\%$	11,77	1,33	54,5	9838	11,46	15,65	628,46	0,18	2,798	-0,739

Tab. 14 Hodnoty pro získání konstant ze vzorku č. 2

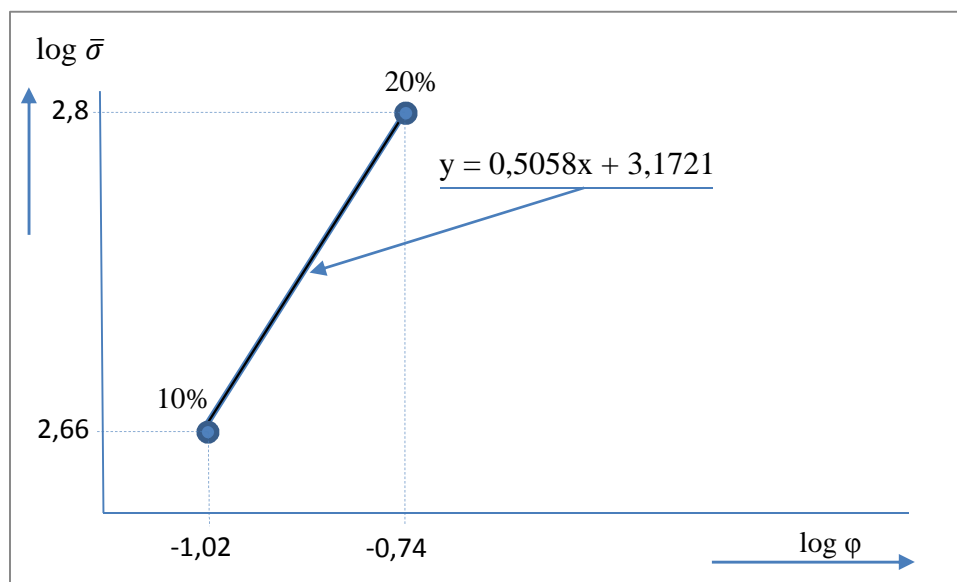
vzorek 2	b_2 [mm]	t_2 [mm]	l_0 [mm]	F_2 [N]	ΔL_2 [mm]	S [mm ²]	$\overline{\sigma}_2$ [MPa]	$\overline{\varphi}_2$ [-]	$\log \overline{\sigma}_2$	$\log \overline{\varphi}_2$
výchozí	12,8	1,394	50	0	0	17,843	-	-	-	-
$\varepsilon = 10\%$	12,59	1,369	52	7580	6,7	17,236	439,78	0,095	2,643	-1,021
$\varepsilon = 20\%$	12,32	1,32	54,5	10007	11,45	16,262	615,35	0,182	2,789	-0,739

Zlogaritmováním a dosazením získaných hodnot do vztahu (4.15) byla stanovena hodnota exponentu deformačního zpevnění n .

$$n_1 = \frac{\log \bar{\sigma}_{1(20)} - \log \bar{\sigma}_{1(10)}}{\log \bar{\varphi}_{1(20)} - \log \bar{\varphi}_{1(10)}} = \frac{2,798 - 2,656}{-0,739 + 1,021} = 0,50576$$

$$n_2 = \frac{\log \bar{\sigma}_{2(20)} - \log \bar{\sigma}_{2(10)}}{\log \bar{\varphi}_{2(20)} - \log \bar{\varphi}_{2(10)}} = \frac{2,789 - 2,643}{-0,739 + 1,021} = 0,51786$$

Hodnotu C lze následně získat vynesetím logaritmických hodnot do grafu závislosti $\log \sigma - \log \varphi$ a pomocí regresivní rovnice spojnice trendu dopočítat tuto hodnotu. Po následném odlogaritmování dostaneme výslednou hodnotu C . Tento postup pro vzorek 1 je zobrazen na obr. 43. Obě hodnoty a jejich celkový průměr jsou uvedeny v tabulce č. 15.

Obr. 43 Graf závislosti $\log \sigma - \log \varphi$ Tab. 15 Konstanty n a C

	vzorek 1	vzorek 2	průměr
$n [-]$	0,5056	0,5179	0,5117
$C [Mpa]$	1482,5	1485,9	1484,2

Hodnoty n a C pro danou ocel 17 240 byly již v minulosti stanoveny. Například v práci [27] byly zjištěny hodnoty n přibližně 0,41 a C v rozsahu 1575 až 1675 MPa, stejně tak autor [19] udává pro tento materiál hodnotu n v rozsahu 0,4 až 0,45. Jak je patrné, tyto hodnoty se poněkud liší od hodnot uvedených v této bakalářské práci. Rozdíl můžeme přisuzovat tomu, že hodnoty získané citovanými autory byly stanoveny tahovými zkouškami vzorků z plechu, kdežto naše hodnoty jsou získané z tahové zkoušky výřezů z trubek. I když se ve skutečnosti průřezy mnoho neliší, jistou roli zde přesto může hrát zakřivení průřezu i odlišný způsob výroby polotovaru. A nelze opomenout, že i tloušťka plechu (stěny) hodnotu n do jisté míry také ovlivňuje.

Vzhledem k tomu, že provedené experimenty byly zaměřeny pouze na jeden materiál a jednu tloušťku, není možné striktně konstatovat, že pro získání odpovídajících hodnot n a C potřebných pro teoretické výpočtové analýzy u dílců vyráběných z trubek, by se měl shodovat typ polotovaru použitý pro tahové zkoušky s polotovarem, z něž je vyráběn skutečný dílec. Pro vyslovení tohoto závěru by bylo zapotřebí provést další srovnávací experimenty. V těchto experimentech by se porovnávaly získané hodnoty n a C z tahové zkoušky vzorků z plechu a ze vzorků ve tvaru výřezu z trubky, a to pro různé tloušťky polotovaru, průměry trubek a materiály.

5.3 Tahová zkouška příčného výřezu z trubky [3],[19],[20]

Vzorky byly vyřezány z trubky o průměru 70 mm a tloušťce stěny 1,5 mm dle ČSN EN 10002-1. Zhotoveny byly řezáním na prstence o šířce odpovídající zúžené části výřezu z trubky 12,5 mm a následně rovnány pod lisem (kapitola 4.2.3). Celkem byly vyrobeny 4 vzorky a označeny N1 až N4.



Obr. 44 Tvrdoměr Zwick

Tahové zkoušky výřezu z trubky orientované kolmo na osu polotovaru byly zkoumány v práci [20]. Zde byl vyvozen závěr, že hodnoty meze pevnosti a meze kluzu není vhodné uvažovat jako reálné, neboť mechanické vlastnosti vzorků jsou pozmeněny vlivem další přidané deformace spočívající v narovnávání vzorků do roviny. Tato deformace způsobuje zpevnování materiálu a tím i pozmeněné hodnoty získané z tahových zkoušek. Cílem zkoušek prováděných v rámci řešení této bakalářské práce bylo ověřit, zda závěry uváděné v práci [20] jsou platné i pro náš materiál a tloušťku stěny.

Jako první bylo prověřeno tvrdosti vzorku po narovnání. Tvrdost byla měřena na tvrdoměru Zwick 3212 (obr. 44). Vyhodnocována byla pomocí programu TestXpert od společnosti Zwick GmbH.

Tvrdost podle Vickerse se měří dle ČSN 42 0374. Do materiálu byl vtlačován diamantový impaktor ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu, a to silou odpovídající zatížení 5 kg. Jehlan má daný vrcholový úhel mezi protilehlými stěnami. Byly provedeny vždy 3 vtisky, a to jak na prstencovém nezdeformovaném vzorku (obr. 45), tak i na narovnaném vzorku (po deformaci). Po odlehčení byla u každého vzorku změřena délka obou vzniklých uhlopříček. Tvrdost je potom dána poměrem zatěžující síly k ploše povrchu vtisku. Plocha je vyjádřena jako aritmetický průměr obou uhlopříček na druhou. Touto zkouškou byly zjištěny hodnoty tvrdosti uvedené v tabulce 16.

Tab. 16 Hodnoty tvrdosti dle Vickerse

Prstenec	Narovnaný vzorek
HV5	HV5
155	155
160	152
161	150



Obr. 45 Vtisky na prstencovém vzorku

Rozdíly mezi naměřenými hodnotami jsou zanedbatelné a zpevnění tu není až tak významné. Z toho lze usoudit, že tahová zkouška narovnaných příčných výřezů z trubky by se mohla využívat, aniž by se skreslily výsledné hodnoty. Tento závěr ovšem není striktní, neboť toto tvrzení by bylo potřeba podložit dalšími experimenty, a to pro různé materiály, tloušťky stěny a průměry trubek.

Co se týká vyhodnocení samotné tahové zkoušky příčných výřezů ve tvaru pásků, hlavním problémem bylo, že k přetržení došlo ve všech případech mimo měrnou délku. Příčinou byl zjednodušený tvar vzorku. Pro vypovídající experimenty je proto opravdu nutné, aby zhotovené vzorky byly opatřeny tzv. hlavou. To by zajistilo, že k přetržení by s velkou pravděpodobností docházelo v zúženém místě, konkrétně mezi vyznačenými ryskami.

Nicméně z provedených zkoušek do přetržení je možné uplatnit hodnoty meze pevnosti a meze kluzu daného materiálu, které jsou pro jednotlivé vzorky uvedené v tab. 17.

Tab. 17 Hodnoty meze kluzu a meze pevnosti vzorků N1 až N4

Vzorek:	Počáteční měřená délka:	Plocha průřezu:	Tloušťka plechu	Šířka plechu	Mez kluzu:	Mez pevnosti:
	l_0 [mm]	S_0 [mm ²]	t [mm]	b [mm]	$R_{p0,2}$ [Mpa]	R_m [Mpa]
N1	50	18,6	1,5	12,4	343,48	582,68
N2	50	18,75	1,5	12,5	361,6	597,8
N3	50	18,75	1,5	12,5	358,08	606,37
N4	50	18,45	1,5	12,3	361,6	591,76
Průměr:		18,64		12,43	356,19	594,65

Pro porovnání hodnot meze pevnosti a meze kluzu vzorků ve tvaru podélného a příčného výřezu z trubky byly brány zprůměrované hodnoty, viz tab. 18.

Tab. 18 Porovnání průměrných hodnot meze kluzu a meze pevnosti

Vzorek:	Mez kluzu:	Mez pevnosti:
	$R_{p0,2}$ [Mpa]	R_m [Mpa]
Příčný výřez z trubky N	343,48	582,68
Podélný výřez z trubky V	398,32	619,81

Průměrné hodnoty podélného výřezu z trubky jsou získány z tabulky 12, a to bez vzorku Vsvar, který by výsledky skresloval.

Z tohoto orientačního porovnání vyplývá, že se hodnoty u obou typů vzorků výrazně neliší, zejména co se týká hodnoty meze pevnosti. Z toho plyne, že tahová zkouška příčných výřezů z trubek by se mohla využívat.

6 ZÁVĚRY

V předkládané bakalářské práci byly provedeny tahové zkoušky zkušebních vzorků z trubek a ověřeny možnosti získání odpovídajících materiálových charakteristik. V současné době se pro teoretické výpočty působících napětí při tváření trubek převážně používají hodnoty získané z tahových zkoušek vzorků z plechu o stejném materiálu. V práci byly zkoumány celkem 3 typy vzorků z trubek zhotovených dle normy ČSN EN 10002-1. Pro experimenty byly vybrány podélně svařované trubky z oceli 17 240, a to z důvodu širokého uplatnění při výrobě dílců z trubek.

Použitá trubka byla označena jako tenkostěnná. V rámci bakalářské práce byly provedeny tahové zkoušky vzorků ve tvaru:

- odřezku trubky plného průřezu, tahová zkouška 3 x do přetržení a 5 x na různou hladinu sil,
- pásu segmentového průřezu, tahová zkouška 8 x do přetržení a 2 x jako odstupňovanou zkoušku,
- příčného výřezu z trubky, tahová zkouška 4 x do přetržení.

Zkouška do přetržení u vzorku celistvé trubky ukázala, že na trubce se po překročení meze kluzu vytváří oboustranné kuželovité zúžení. To lze chápat jako tvorbu „krčku“ již od okamžiku překročení meze kluzu. Z porovnání s jinými experimenty provedenými v [27] vyplývá, že nerovnoměrnost deformace, respektive míra kuželovitosti klesá se zvětšující se hodnotou relativní tloušťky stěny. Výsledné hodnoty meze kluzu a meze pevnosti, potažmo i tažnosti ze vzorků celistvých trubek vyšly rozdílné od hodnot uvedených v materiálovém listu. Tyto hodnoty nelze považovat za reálné, z důvodu nerovnoměrné deformace v měřené části vzorku. Z nerovnoměrné deformace také vyplynulo, že u tohoto tvaru vzorku nelze v průběhu tahové zkoušky měřit okamžitý průřez a není tedy možné uplatnit metodiku stanovení hodnot n a C . Z těchto závěrů je patrné, že pro tenkostěnné trubky, by bylo vhodnější použít jiný typ vzorku, například výřez z trubky.

Odstupňovaná tahová zkouška celistvých trubek provedená na různé hladiny sil ukázala, že samotný kužel se tvoří rovnoměrně. Dále bylo zjištěno, že se zvyšující se hodnotou relativní tloušťky stěny t/D se nerovnoměrnost deformace – tvorba kuželu – po překročení meze kluzu nerozvíjí tak rychle jako u trubek s poměrem t/D nižším. To vede k závěru, že u trubek s vyššími hodnotami t/D , tzn. u trubek tlustostěnných, bude deformace v plastické oblasti s největší pravděpodobností probíhat rovnoměrně.

Z analýzy osových napětí vyplynulo, že hodnoty středních osových napětí se mění v závislosti na velikosti poměrného prodloužení sledovaných segmentů.

U zkoušek vzorků ve tvaru podélného výřezu z trubek provedených až do přetržení se na základě prozkoumání získaných materiálových charakteristik zjistilo, že tyto hodnoty mohou být ovlivněny tím, z jakého místa trubky byly vzorky odebrány.

Z odstupňované zkoušky vzorků podélných výřezů z trubky byly pomocí metodiky určování " n " z hodnot síly změřené při deformaci vzorku 10 % a 20 % stanoveny hodnoty exponentu zpevnění $n = 0,5117$ a materiálové konstanty $C = 1484,2$ MPa.

U vzorků příčných výřezů z trubek byla měřena tvrdost podle Vickerse, a to před a po narovnání prstence. V obou případech se hodnota pohybovala okolo hodnoty $HV5 = 155$. Z toho lze usoudit, že zpevňování vzorku při jeho narovnání není až tak významné, aby výrazně změnilo hodnoty materiálových charakteristik při tahové zkoušce. Kompletní

hodnoty materiálových charakteristik, které se získávají tahovou zkouškou, se v tomto případě nepodařilo získat, neboť všechny vzorky byly přetrženy mimo měřenou délku. Důvodem byl zjednodušený tvar vzorků zhotovený ve tvaru pásku bez rozšířených částí, tzv. hlav. Nicméně z provedených zkoušek do přetržení je možné uplatnit hodnoty meze pevnosti a meze kluzu daného materiálu. Po porovnání těchto hodnot s hodnotami získanými z podélných výřezů z trubek vyplývá, že tahová zkouška příčných výřezů z trubek by se mohla využívat.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Ateam: Charakteristika jednotlivých skupin korozivzdorných ocelí. *Bohdan Bolzano s.r.o.* [online]. 1998 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/charakteristika_korozivzdornych_oceli2.pdf
2. Bohdan Bolzano, s.r.o: X5CrNi18-10. *Bohdan Bolzano, s.r.o* [online]. 2015 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/vyrobky-z-korozivzdornych-a-zaruvzdornych-oceli/vyrobky-z-oceli-korozivzdornych/materialove-listy/x6crni18-10-austeniticke>
3. CONVERTER: Zkouška tvrdosti dle Vickerse. *CONVERTER* [online]. 2002 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/jednotky/tvrdest-vickers.htm>
4. DALY, C.H. Tensile Testing of Tube Materials. *Atlas Note MUON-NO-217* [online]. 1997, (217) [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://inspirehep.net/record/1195898/files/muon-97-217.pdf>
5. DRÁPALA, Miroslav. Výroba a dělení trubek. Brno, 2012. 35 s., CD. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí bakalářské práce Ing. Eva Šmehlíková, Ph.D.
6. Feron a.s.: SORTIMENTNÍ KATALOG. *Feron a.s.* [online]. 2015 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: http://www.ferona.cz/cze/katalog/mat_normy.php
7. Generátor citací Citace.com. *Citace.com* [online]. 2004 [cit. 2014-05-24]. Dostupné z: <http://generator.citace.com/>
8. HORÁK, Michal. *Technologické zkoušky trubek*. Brno, 2014. 30 s., CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí bakalářské práce Ing. Eva Peterková, Ph.D.
9. INOX, spol. s r. o.: NEREZOVÝ HUTNÍ MATERIÁL. *INOX, spol. s r. o.* [online]. 2009 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14301.html>
10. Instron: Tension Testing of Pipe and Tube. *Instron* [online]. 2007 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.instron.us/en/testing-solutions/by-material/metals/tension/astm-a370---pipe-tube>
11. Kondor s. r. o.: Ocelové trubky. *Kondor s. r. o.* [online]. 2013 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.kondor.cz/trubky-ocelove-trubky/c-1425/>
12. MACHEK, Václav. *Kovové materiály 2: vlastnosti a zkoušení kovových materiálů*. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2014, 139 s. ISBN 978-80-01-05527-4.
13. *Kovové materiály-Zkoušení tahem-Část 1: Zkušební metoda za okolní teploty*. Praha: Český normalizační institut, 2002.

14. KRYSTALIZACE OCELI. *KRYSTALIZACE OCELI* [online]. 2015 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://tzs.kmm.zcu.cz/slitiny3.pdf>
15. KUČERA, Radek. Význam deformační sítě v oblasti tváření. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 32 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Eva Šmehlíková, Ph.D.
16. Matematický ústav UK: Mocninné funkce. *Matematický ústav UK* [online]. 2012 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: http://www.karlin.mff.cuni.cz/katedry/kdm/diplomky/jaroslav_richter/kap5/kap5.php?sec=all
17. *Materiálový list: Ocel 17 240 Cr-Ni*. Praha: Ústav pro normalizaci a měření, 1994.
18. Mechanické zkoušení kovů - teoretická část: 2.Zkouška tahem. *Mechanické zkoušení kovů - teoretická část* [online]. 2008 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_mechanicke_zkouseni/
19. Metrotest: zkoušky tvrdosti. *Metrotest* [online]. 2010 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: http://www.metrotest.cz/files/zkousky_tvrlosti.pdf
20. PETRUŽELKA, Jiří. *Tvařitelnost a nekonvenční metody ve tváření*. Ostrava: TU Ostrava, 2000, 179s.
21. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. Brno: CERM, 2001, 505 s. ISBN 80-720-4193-2.
22. Odbor technologie tváření kovů a plastů: P_x0001_ípravek a metodika pro nanášení deformační sítě na trubky. *Ust.fme.vutbr.cz/: Odbor technologie tváření kovů a plastů* [online]. 2005 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/publikace_soubory/pripravek_a_metodika_pro_nanaseni_deformacni_site_na_trubky.pdf
23. Office: Přidání, změna nebo odebrání spojnice trendu v grafu. *Office support* [online]. 2015 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <https://support.office.com/cs-cz/article>
24. Office: Přidání spojnice trendu nebo průměru do grafu. *Office support* [online]. 2015 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: [https://support.office.com/cs-cz/article/P%C5%99id%C3%A1n%C3%AD-spojnice-trendu-nebo-pr%3Dcs-CZ&rs=cs-CZ&ad=CZ](https://support.office.com/cs-cz/article/P%C5%99id%C3%A1n%C3%AD-spojnice-trendu-nebo-pr%C3%AD-Pr%C3%AD-Pr%C3%AD-spojnice-trendu-nebo-pr%3Dcs-CZ&rs=cs-CZ&ad=CZ)
25. SAMEK, Radko a Eva ŠMEHLÍKOVÁ. *Speciální technologie tváření*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2010, 134 s. ISBN 978-80-214-4220-7.
26. SAMEK, Radko, Zdeněk LIDMILA a Eva ŠMEHLÍKOVÁ. *Speciální technologie tváření*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 155 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 978-80-214-4406-5.

27. ŠTRONER, M.-ŠMEHLÍKOVÁ, E.-PODANÝ, K.: Analýza tahové zkoušky celistvých tenkostěnných trubek se vzorky dle ČSN, In. FSI junior konference 2005 Brno. I.Ptáčková. *Proceedings of the FSI junior konference Brno 2005*, 1st ed. Brno, Vysoké učení technické v Brně, fond rozvoje vědy FSI, čís.BD 135 3067
28. LIDMILA, Zdeněk. *Teorie a technologie tváření I*. Vyd. 1. Brno: Univerzita obrany, 2008, 105 s. ISBN 978-80-7231-579-6.
29. ASKELAND, Donald R. *The Science and Engineering of Materials*. 2nd Ed. London: Chapman and Hall, 1990, 880 s. ISBN 04-123-4260-X.
30. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI: Statické zkoušky. *ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI* [online]. 2015 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~dyxon/DATA/Nauka%20o%20M/Zkouska.pdf>
31. *Zkouška trubek tahem*. Praha: ÚNM, 1980.
32. *Zkušební tyče z trubek: pro zkoušku tahem*. Praha: Výzkumný ústav hutnictví železa, 1971.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
a_o	tloušťka plochých tyčí nebo stěny trubky	[mm]
A	tažnost	[%]
A_g	homogenní tažnost	[%]
A_t	tažnost pod napětím	[%]
A_{80}	tažnost u počáteční měřené délky 80 mm	[%]
b	šířka zkušební tyče	[mm]
b_o	šířka zkoušené délky vzorku z trubky	[mm]
B	šířka hlavy výřezu z trubky	[mm]
C	materiálová konstanta	[MPa]
d	parametr deformační sítě	[mm]
d_o	průměr zkoušené délky tyče kruhového průřezu	[mm]
d_v	počáteční průměr zkoušené části zkušební tyče	[mm]
D	vnější průměr trubky	[mm]
E	modul pružnosti materiálu	[MPa]
F	síla	[N]
F_E	síla na mezi elasticity	[N]
F_{eH}	síla na horní mezi kluzu	[N]
F_{eL}	síla na dolní mezi kluzu	[N]
F_m	maximální síla dosažená během zkoušky	[N]
$F_{p0,2}$	smluvní síla na mezi kluzu	[N]
g	měrná hmotnost kovu	[g.cm ⁻³]
h	výška hlavy měřené trubky	[mm]
k	součinitel proporcionality	[-]
l_1	délka delší osy elipsy deformační sítě	[mm]
l_2	délka kratší osy elipsy deformační sítě	[mm]
l_o	měřená délka trubky	[mm]
l_z	zkoušená délka trubky	[mm]
L	celková délka zkušební vzorku	[mm]
L_o	počáteční měřená délka	[mm]
L_t	přibližná celková délka tyče	[mm]
L_u	konečná měřená délka polomu	[mm]
m	hmotnost zkušební tyče	[g]

Označení	Legenda	Jednotka
m	hmotnost zkušební tyče	[g]
n	exponent deformačního zpevnění	[-]
R	rádus trnu	[mm]
R _E	výrazná mez kluzu	[MPa]
R _f	lomové napětí	[MPa]
R _m	mez pevnosti v tahu	[MPa]
R _{p0,2}	mez kluzu	[MPa]
S	okamžitá plocha příčného průřezu zkoušené délky	[mm ²]
S _o	počáteční plocha příčného průřezu zkoušené délky	[mm ²]
S _u	nejmenší plocha příčného průřezu po lomu	[mm ²]
t	tloušťka stěny trubky	[mm]
Z	kontrakce	[%]
α	materiálový koeficient pro výpočet hlavních napětí	[-]
ΔL	délka prodloužení zkušební tyče	[mm]
ΔL_g	prodloužení při maximálním zatížení	[mm]
ΔL_u	maximální trvalé prodloužení	[mm]
ε	poměrné přetvoření	[-]
σ	smluvní napětí	[MPa]
σ_{ef}	efektivní napětí	[MPa]
$\overline{\sigma}$	skutečné napětí	[MPa]
φ	skutečné přetvoření	[-]
φ_{ef}	efektivní přetvoření	[-]

Zkratka	Popis
---------	-------

ČSN	Česká národní norma
-----	---------------------

SEZNAM PŘÍLOH

1. Hydraulický zkušební stroj ZD40
2. Materiálový list ČSN 41 7240

Příloha č.1 Hydraulický zkušební stroj ZD40 /400kN/

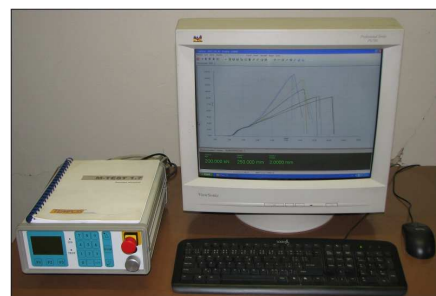
Stroj umožňuje provádět tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálů do 400 kN s řízením rychlosti zatěžování a programovým zpracováním zkoušek. Je vybaven vestavěným inkrementálním délkovým snímačem polohy příčnicku s rozlišením 0,01 mm a snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60.

Řídicí jednotka EDC 60 je vysoce precizní elektronické zařízení speciálně konstruované pro řízení servo-hydraulických zkušebních strojů. Je vyráběna speciálně pro aplikace řízení zkušebních strojů a využívají ji přední evropské výrobci univerzálních zkušebních strojů. Jednotka je opatřena programem pro zkoušky kovů s možností provádět zkoušky bez PC u jednoduchých aplikací bez použití průtahoměru.

Technické parametry:

- Výrobce: HBM /SRN/
- Měřicí rozsah: 8 ÷ 400 kN
- Chyba měření síly: 1/100 jmenovitého rozsahu síly, tj. $\pm 1 \%$ odpovídá třídě přesnosti 1
- Měřicí rozsah měření dráhy: 0 ÷ 280 mm
- Chyba měření dráhy: $\pm 0,01$ mm
- sériové rozhraní RS 232 pro komunikaci s nadřazeným PC COM1 pro PC s FIFO s maximální rychlostí 115 KB
- inkrementální vstup pro napojení snímače dráhy

Počítač je vybaven programem M-TEST v.1.7 pro tahovou, tlakovou a ohybovou zkoušku kovových materiálů dle EN 10001-2 s vyhodnocením výsledků, grafickým zpracováním.



Řídicí jednotka EDC 60

ČSN 41 7240

Korozivzdorná austenitická ocel

OCEL
17 240

Chemické složení [hm. %]

C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S
max 0,07	max 2,0	max 1,0	17,0–20,0	9,0–11,5	max 0,045	max 0,030

Položky

[1] tyče	[3] trubky bezešvé
[2] plechy	[4] tlusté plechy

Mechanické vlastnosti

Položky	[1]	[2]
Rozměr t, d [mm]	< 60	60–100
Slav	4	10–30
Mez kluzu R_p 0,2 [MPa] min	186	4
Mez pevnosti R_m [MPa]	490–686	186
Ťažnost A_5 [%] min	50	490–686
Vrbová houževnatost KCU3 [J.cm ⁻²] min	podél 196	34
	napříč 98	podél 137
		napříč 98

Položky

[3]	[4]
do 89	30–80
4	4
186	181
490–735	481–672
40	37

Vrbová houževnatost KCU3 [J.cm⁻²] min

Modul pružnosti E [GPa]	20 °C	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C
za zvýšených teplot	199	194	186	179	172	164	–

Nejnižší mez kluzu R_p 0,2 [MPa]

za zvýšených teplot	20 °C	50 °C	100 °C	150 °C	200 °C	250 °C	300 °C	400 °C
	186	177	157	142	127	118	109	98

Fyzikální vlastnosti

Hustota ρ [kg.m ⁻³]. 10 ³	Měrná tepelná kapacita							
při 20 °C	Tepelná vodivost							
	λ_1 [W.m.K ⁻¹] při 20 °C							
7,9	500							
	14,7							
	730.10 ⁹							

Tepelní součinitel roztažnosti α [K⁻¹]. 10⁶

100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C
16	17	17	18	18

Odpornost proti degradacím procesům

ODOLNOST PROTI KOROZI

odolnost proti plošné korozi – odolává kyselině dusičné, slabým roztokům organických kyselin; odolnost proti korozi lze zvýšit leštěním; tvářením zastudena se korozivzdornost mírně snižuje

odolnost proti mezikrytalové korozi – ve srovnání s ocelí 17 241 odolává lépe při aplikaci svaru v silném korozivním prostředí, nutno přezkhat celou součást s následujícím ochlazením na vzduchu

ODOLNOST PROTI ŽÁRU

na vzduchu

dq 850 °C

v oxidacním sírném prostředí (obsahujícím SO₂)

dq 750 °C

v redukčním sírném prostředí

dq 600 °C

v páře

dq 750 °C

ve směsných plynech

dq 550 °C

ODOLNOST PROTI TEČENÍ

Mez pevnosti při tečení v tahu [MPa] (sířední hodnoty)

Teplota [°C]	560	580	600	620	640	660	680	700
$R_{mT}/10^4$	163,8	142,2	121,6	104	87,3	72,6	60,8	48,1
$R_{mT}/3.10^4$	135,3	114,7	96,1	80,4	66,7	54,9	44,1	(35,3)
$R_{mT}/5.10^4$	122,6	103,0	85,3	71,6	57,9	47,1	(36,3)	(27,5)
$R_{mT}/10^5$	104,9	89,2	73,5	60,8	50,0	(40,2)	(30,4)	(22,6)

Technologické údaje

TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

ochlazovat podle tloušťky na vzduchu nebo ve vodě

ochlazovat na vzduchu

rozpouštěcí žhání 1020–1080 °C

žhání ke snížení prnutí 850–950 °C

TVARITELNOST

teploty tváření 1150–850 °C

SVAŘITELNOST

ochlazovat na vzduchu

zaručená doporučené přídatné materiály – elektroda VÚS-A3F

OBROBITELNOST soustružení, hoblování

[1][2] 4 9b frézování, vrátání

TECHNOLOGICKÉ ZKOUŠKY

zkouška hloubením podle Erichsena na 1 mm plechu 13

Použití

Austenitická, svařitelná, nestabilizovaná, korozivzdorná ocel vhodná pro chemické zařízení včetně tlakových nádob. Vhodná pro prostředí oxidační povahy pro silné anorganické kyseliny jen při velmi nízkých koncentracích a v oblasti normálních teplot. Lze ji použít též pro prostředí vyžadující vysokou čistotu produktu (farmaceutický a potravinářský průmysl).

Ostatní vlastnosti

Druh oceli podle způsobu výroby Barevné značení podle ČSN 42 0010 Třída odpadu podle ČSN 42 0030 elektroocel červená–černá–železná 026

díl 10, oceli třídy 17

Porovnání se zahraničními materiály			
ISO	EURO	Německo	
Type 11	X5CrNi18-10	EN 10088/1-3,-95	X5CrNi18-10 DIN 17456-85 X5CrNi18-10 DIN 17440-85 X5CrNi18-10 DIN 17441-85 X5CrNi18-10 DIN 17458-85 X5CrNi18-10 DIN EN 10088 1-3-95
Z6CrNi18-09 X5CrNi18-10	X5CrNi18-10 304S31 304S15	Velká Británie BS EN 10088/1-3-95 BS 1501/3-90 BS 1554-90	Rusko 08Ch18N10 GOST 5632-72
Type 304 Type 304F Type 304	SUS304 SUSF304 SUS 304TKA	Japonsko JIS G3448-88 JIS G3214-91 JIS G3446-91	Kanada -
X5CrNi 18-10 X5CrNi18-10 X5CrNi18-10KT X5CrNi18-10KG X5CrNi18-10 KW	UNI 6904-71 UNI EN 10088/1-3-95 UNI 7660-77 UNI 7660-77 UNI 7660-77	Rakousko ONORM M3210-86 ONORM M3121-91	Švédsko 2333-02 2332 SS142333 SS142332
O118N9	PN H86020-71	Maďarsko MSZ 4360-87	Norsko 14350 NS 14350 14355 NS 14355 14360 NS 14360
X4CrNi189	SFS 725	Švýcarsko -	Španělsko X5CrNi1810 UNE 36-087-89 X5CrNi1810 UNE EN 10088/1-3-95
304 304	AS 1449-94 AS 2837-86	Čína GB 4239-91	Rumunsko 5NiCr180 STAS 3583-87
Och18N10	BDS 6738-72	Brazílie E 304 V-304	- -