



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

ANALÝZA VÝSLEDKŮ ZKOUŠEK VYKONANÝCH NA MINIATURNÍCH ZKUŠEBNÍCH TĚLESECH S RŮZNOU GEOMETRIÍ

ANALYSIS OF THE MINIATURE TEST SPECIMEN RESULTS WITH VARIABLE GEOMETRIES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matúš Kašuba

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Igor Moravčík

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav materiálových věd a inženýrství
Student:	Matůš Kašuba
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Materiálové inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Igor Moravčík
Akademický rok:	2016/17

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:

Analýza výsledků zkoušek vykonaných na miniaturních zkušebních tělesech s různou geometrií

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Miniaturní zkušební tělesa pro zkoušku tahem jsou využívána zejména v případech, kdy není k dispozici dostatek experimentálního materiálu pro výrobu klasických (standardizovaných) zkušebních těles. Příkladem mohou být materiály vyrobené metodami práškové metalurgie ve formě různě velkých polotovarů, např. tablet, s typickými rozměry nepřevyšujícími několik desítek milimetrů.

Cíle bakalářské práce:

Náplní a cílem bakalářské práce bude porovnat mechanické a lomové vlastnosti materiálu zjištěné na rozměrově nestandardních zkušebních tělesech pro zkoušku tahem, kvantifikovat zjištěné rozdíly a doporučit nejvhodnější tvar (geometrii) miniaturního tahového zkušebního tělesa pro měření mechanických charakteristik výše uvedené skupiny materiálů.

Seznam doporučené literatury:

ASTM E8/E8M-13: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.

ISO 6892-1: Metallic materials. Tensile testing. Method of test at ambient temperature.

KUMAR, K. Optimisation of thickness of miniature tensile specimens for evaluation of mechanical properties. Materials Science and Engineering: A, 2016, vol 675 p. 32-43.

OLBRICHT, J. Characterization of the creep properties of heat resistant 9–12% chromium steels by miniature specimen testing. Materials Science and Engineering: A 2013, vol. 585 p. 335-342.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

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

Abstrakt

Cieľom bakalárskej práce je analyzovať a zhodnotiť výsledky skúšky ťahom vykonanej na miniatúrnych skúšobných telesách, a tieto výsledky porovnať s hodnotami mechanických charakteristík získanými z ťahovej skúšky štandardných skúšobných telies. V prvej časti je priblížená samotná skúška ťahom a jej výstupy v podobe ťahových diagramov a napätových a deformačných charakteristík. Ďalej sa práca zaoberá problematikou testovania miniatúrnych skúšobných telies a teoretickým vplyvom ich veľkosti na výsledky skúšky ťahom. Experimentálna časť práce je zameraná na porovnanie a vyhodnotenie zhodnosti alebo rozdielnosti výsledkov získaných z ťahových skúšok štandardných a miniatúrnych skúšobných telies.

Abstract

The aim of this bachelor thesis is to analyze and evaluate results of the tensile test carried out by using miniature test specimens, and compare these results with values of mechanical properties obtained by tensile testing of standardized test specimens. The tensile test itself is presented in the first part, along with its outputs including stress-strain diagrams and tensile characteristics. Further, issues of testing of miniature test specimens are described and theoretical effect of size of miniature test specimens on tensile test results is mentioned. The experimental part of this thesis deals with comparison and evaluation of conformity or difference of results obtained by tensile testing of standardized and miniature test specimens.

Kľúčové slová

skúška ťahom, ťahový diagram, mechanická charakteristika, miniatúrne skúšobné teleso

Key words

tensile test, stress-strain diagram, mechanical property, miniature test specimen

Bibliografická citácia

KAŠUBA, M. *Analýza výsledků zkoušek vykonaných na miniaturních zkušebních tělesech s různou geometrií*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 57 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Igor Moravčík.

Prehlásenie

Prehlasujem, že som predkladanú bakalársku prácu vypracoval samostatne s použitím uvedenej odbornej literatúry a na základe pripomienok vedúceho práce.

V Brne, dňa 26.5.2017

.....

Matúš Kašuba

Pod'akovanie

Rád by som sa v prvom rade pod'akoval môjmu vedúcemu bakalárskej práce Ing. Igorovi Moravčíkovi za cenné rady a pripomienky počas celého vypracovávania tejto práce. Taktiež by som sa chcel pod'akovať Ing. Liborovi Válkovi, CSc. najmä za potrebnú motiváciu k dokončeniu práce. V neposlednom rade ďakujem mojej rodine a priateľom za podporu počas celej doby štúdia.

Obsah

Úvod	2
1 Úvod do mechanického testovania	3
1.1 História	3
1.2 Metódy a rozdelenie	6
2 Skúška ťahom	7
2.1 Skúšobné stroje	7
2.2 Materiály pre skúšku ťahom	9
2.3 Diagramy a charakteristiky	10
2.3.1 Ťahové diagramy kovových materiálov	10
2.3.2 Napät'ové charakteristiky	14
2.3.3 Deformačné charakteristiky	17
2.3.4 Deformačné spevnenie	19
2.3.5 Výpočet rýchlosti deformácie	20
2.4 Normy	21
2.5 Skúšobné tyče	22
3 Miniaturne vzorky	24
3.1 Teoretický vplyv veľkosti vzoriek na výsledky skúšky ťahom	24
4 Experimentálna časť	29
4.1 Charakteristika experimentálneho materiálu	29
4.2 Použité metódy a prístroje	29
4.1.1 Metalografia	29
4.1.2 Fraktografická analýza lomových plôch	31
4.1.3 Skúška ťahom	31
4.3 Výsledky	33
4.3.1 Metalografia	33
4.3.2 Fraktografická analýza lomových plôch	35
4.3.3 Skúška ťahom a porovnanie charakteristík	36
5 Diskusia výsledkov	39
Záver	41
Zoznam použitej literatúry	42
Zoznam použitých skratiek a symbolov	45
Zoznam obrázkov a tabuliek	48

Úvod

Záujem o skúšanie materiálov v rámci zisťovania ich mechanických vlastností je prítomný od nepamäti. Od obdobia starovekého Egypta sa postupom času jednotlivé techniky, postupy a prístroje zdokonaľovali až do podoby, v akej sú známe dnes. Tento vývoj si vyžiadal určitú štandardizáciu mechanických skúšok materiálov, medzi ktoré patrí aj jedna z tých najzákladnejších – skúška ťahom.

Skúška jednoosovým ťahom sa vykonáva pomocou skúšobných strojov pri určitých vonkajších podmienkach, ktoré sú predom definované. Skúšobným telesom, ktoré je vyrobené z testovaného materiálu, sa rozumie skúšobná tyč obvykle kruhového alebo obdĺžnikového prierezu, ktorej konce sú špeciálne upravené pre uchytenie do stroja. Tieto tzv. štandardné skúšobné tyče majú normami predpísané rozmery a geometriu.

Existujú ale prípady, kedy z rozličných dôvodov nie je možné vyrobiť štandardnú skúšobnú tyč pre ťahovú skúšku. Vtedy sa pristupuje k zmenšovaniu rozmerov a zmenám geometrie skúšobných tyčí, ktoré už ale nie sú normované. Vznikajú tzv. miniatúrne skúšobné telesá.

Problematikou miniatúrnych skúšobných tyčí je možný vplyv ich veľkosti na výsledky ťahovej skúšky vzhľadom na to, že ich rozmery sa pohybujú na hranici minimálneho objemu materiálu. Z toho dôvodu vzniká veľké množstvo otázok pri skúškach takýchto skúšobných tyčí. Je otázne, či sú výsledky ťahových skúšok vykonaných na miniatúrnych skúšobných telesách dostatočne dôveryhodné a prípadne či je takéto testovanie reprodukovateľné. Ďalšou otázkou je, či sú výsledné hodnoty získané pomocou miniatúrnych skúšobných telies porovnateľné s tými, ktoré boli získané zo skúšobných telies štandardných. Práve týmito otázkami sa bude zaoberať predkladaná bakalárska práca.

1 Úvod do mechanického testovania

1.1 História

História mechanického skúšania materiálov, najmä rôznych druhov kovových materiálov, siaha do veľmi dávnej minulosti. Podľa [1] by sa dala história skúšania materiálov datovať do obdobia Egyptanov a ich stavebných zručností v podobe rôznych monumentov, chrámov, pyramíd a obeliskov, z ktorých niektoré stoja ešte aj dnes. O ďalší rozvoj sa postarali Gréci (vrátane Archimeda) a Rimania. Vtedy však boli všetky znalosti sústredené len na akýsi odhad pevnosti stavebných materiálov [1].

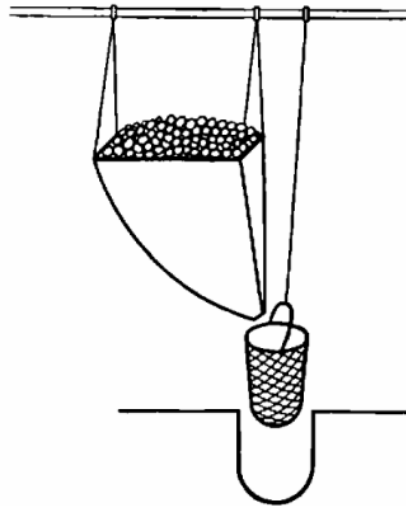
Známym faktom je, že ešte v starovekom Ríme sa mosty stavali tak, že konštruktér most navrhoval, potom bol skonštruovaný podľa jeho pokynov, a keď bola stavba dokončená prišlo na rad testovanie požadovanej únosnosti mostu. V tej chvíli, kedy testovanie prebiehalo - prejdením ťažkých bojových mechanizmov po moste - stál konštruktér pod mostom. Ak by most nebol dobre navrhnutý alebo postavený, zrútil by sa a konštruktéra by to stálo život. Takto bola podnietená snaha o spoľahlivosť a bezpečnosť konštrukcií [1, 2].



Obr. 1.1 Známy akvadukt Pont du Gard postavený za čias starovekého Ríma na území dnešného Francúzska [1]

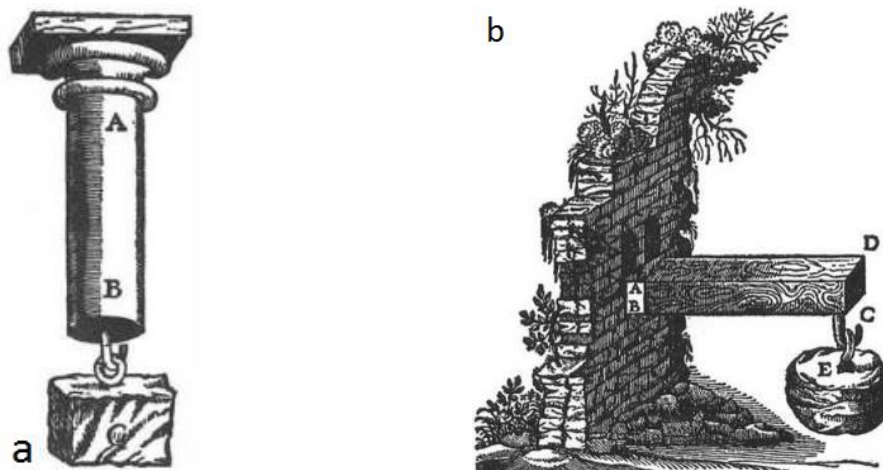
Následne ubehli stovky rokov, za ktoré rozmanitosť a množstvo použiteľných materiálov enormne vzrástlo, takisto aj znalosti inžinierov a vedcov sa časom posúvali smerom vpred. Avšak potreba skúšať a testovať používané materiály kvôli zisteniu ich mechanických vlastností a následnému vyhodnoteniu vhodnosti ich použitia stále pretrvávala. Záujem o túto vednú disciplínu teda neútlchal a časom sa začali skúmať rôzne metódy skúšania materiálov, navrhovať stroje pre takéto testovanie a v neposlednej rade tieto stroje aj vyrábať a patentovať [1, 3].

V období renesancie bola prelomová štúdia talianskeho umelca, vedca a inžiniera Leonarda da Vinciho, ktorá nesie názov „*Testing the Strength of Iron Wires of Various Lengths*“, nájdená v jednom z jeho notesov. Tá pojednáva o experimentálnom zisťovaní pevnosti konštrukčného materiálu v závislosti od jeho dĺžky, konkrétne o tom, akú veľkú váhu alebo záťaž dokáže uniesť kus ocelového drôtu [1].



Obr. 1.2 Da Vinciho ťahová skúška ocelového drôtu [1]

Prvé pokusy o analytické riešenie bezpečných rozmerov materiálov prišli až v 17. storočí s príchodom Galilea. Jeho známa kniha „*Two New Sciences*“ vykresľuje snahu o zaradenie metód použiteľných pri napätvej analýze do určitého logického poradia a pokladá sa za začiatok vedného odboru o pevnosti materiálov ako takého [1].



Obr. 1.3 Galileove ilustrácie a) skúšky ťahom b) skúšky ohybom [1]

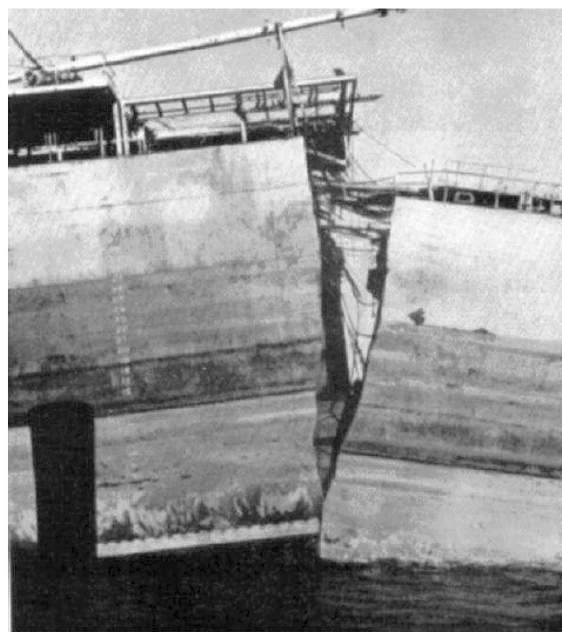
V 17. storočí prispel Robert Hooke svojim výskumom v oblasti elastických deformácií a dôležitý bol aj prínos Thomasa Younga a Poissona z 18. storočia. Nemenej podstatný bol príspevok Augusta Wöhlera v oblasti únavy materiálov. Neskôr do roku 1900 vznikli prvé laboratória na mechanické testovanie, kde bol kladený dôraz hlavne na vlastnosti materiálov v elastickej oblasti, lom krehkých materiálov, testovanie húževnatých materiálov, creep kovov za zvýšených teplôt, únavu kovov a experimentálnu napätovú analýzu [1].

Je ale potrebné poznamenať, že optimalizácia funkcie a merania rôznych strojov v rámci reprodukovateľnosti výsledkov jednotlivých mechanických vlastností zostala ešte na dlhú dobu jednou z otázok a problémov vedeckých skupín a inžinierov (dalo by sa povedať, že v istej miere pretrváva dodnes). Z hľadiska vzniku porúch v konštrukčných materiáloch, predovšetkým u ocelí, je obdobie 20. storočia pre túto prácu relevantnejšie. Išlo o poruchy v rôznych častiach oceľových konštrukcií (napr. mosty alebo trupy lodí a lietadiel), ktoré vyvolali haváriu a podstatné boli následné vyšetrovania, ktoré viedli k prevenčným riešeniam, aby sa podobné havárie v budúcnosti neopakovali. Išlo v prvom rade o náhle krehké alebo únavové lomy materiálu stroja alebo konštrukcie [3].

Ako uvádza Veles [3], tieto zlyhania sa začali objavovať koncom 19. storočia napriek tomu, že použité konštrukčné materiály spĺňali požadované vlastnosti, ktoré boli zistené pri ťahovej skúške. Väčšina z týchto havárií sa odohrala v čase, keď sa od nitovaných konštrukcií začalo prechádzať na tie zvarané. Neskoršia materiálová analýza potvrdila, že zlyhania boli spôsobené trhlinami, ktoré boli iniciované z defektov vo zvaroch a taktiež nebola často splnená vrubová húževnatosť konštrukčných ocelí pri prevádzkových teplotách [3].

Zlomovými prípadmi sa stali havárie zvaraných konštrukcií amerických lodí počas 2. svetovej vojny, ktorých sa za tri a pol roka používania týchto plavidiel vyskytlo 1442 v rozličných rozsahoch. Najznámejšími sú zlyhania lodí Liberty, ktoré sa priečne rozlomili na 2 časti v dôsledku trhliny. Z týchto havárií je odvodená limitná teplota pri porušení materiálu pre nárazovú prácu aspoň 27 J pri tranzitnom chovaní ocelí [2, 3].

Je teda vidieť, že z historického hľadiska je vývoj skúšania mechanických vlastností materiálov úzko spätý s priemyselnou revolúciou, ako aj so začiatkom používania ocelí a iných materiálov ako základných stavebných a konštrukčných prvkov. Rozvoj rozličných metód, prístrojov a teórií mechanického testovania je dnes žiadaný takisto ako bol aj v minulosti. Dnes však musí byť samozrejme oveľa intenzívnejší. Podrobná história mechanického testovania ako aj pevnosti materiálov by mohla byť témou samostatnej práce v dôsledku toho, že je skutočne obsiahla [1, 3].



Obr. 1.4 Havária lode Liberty po krehkom porušení [3]

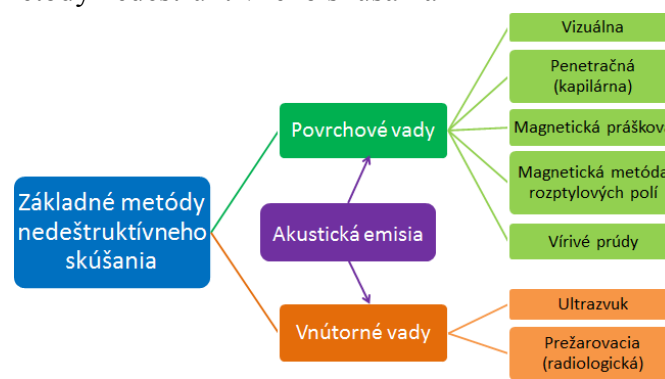
1.2 Metódy a rozdelenie

Mechanické skúšky sa dajú rozdeliť viacerými spôsobmi podľa toho, z akého hľadiska sa na ne pozeráme. Jedno z možných rozdelení je založené na otázke, či je teleso pri skúšaní trvalo deformované alebo nie. Takéto rozdelenie aj s jeho ďalšími podskupinami má nasledujúcu podobu [2, 3, 4]:

V prípade, že v skúšanom materiáli dochádza k plastickej deformácii, iniciácii trhliny a následnému lomu alebo inému porušeniu súdržnosti, či k zmene tvaru, rozmerov, štruktúry, chemického zloženia alebo k inej trvalej nevratnej zmene, hovoríme o takzvanom deštruktívnom skúšaní materiálu [3, 4].

V opačnom prípade sa jedná o nedeštruktívne skúšanie materiálu, ktoré tvorí samostatný vedný odbor nazývaný defektoskopia [2].

Tab. 1.1 Základné metódy nedeštruktívneho skúšania



Skupina deštruktívnych skúšok sa delí podľa rýchlosti zaťažovania telesa na statické a dynamické a obidve skupiny sa ďalej delia ešte podľa dĺžky trvania zaťažovania na krátkodobé a dlhodobé. Jednotlivé skúšky sa do týchto skupín zaraďujú podľa tab. 1.2 [4]:

Tab. 1.2 Rozdelenie deštruktívnych skúšok [4]

Zaťaženie	Krátkodobé	Dlhodobé
Statické	<ul style="list-style-type: none"> • skúška ťahom • tlakom • ohybom • krutom • strihom • skúšky tvrdosti 	<ul style="list-style-type: none"> • skúška tečenia (creepu)
Dynamické	<ul style="list-style-type: none"> • skúšky tvrdosti • skúška rázom v ohybe • skúšky nízkokycklovej únavy 	<ul style="list-style-type: none"> • skúšky vysokocycklovej únavy

Je potrebné poznamenať, že skúšok mechanických vlastností materiálov je naozaj mnoho, avšak medzi základné mechanické skúšky patria skúška ťahom, skúška rázom v ohybe a skúška tvrdosti. Predmetom tejto práce je v prvom rade skúška ťahom, z toho dôvodu nebudú ostatné metódy popísané a detailnejšie bude priblížená len ťahová skúška [2].

2 Skúška ťahom

Skúška ťahom je jedna zo základných mechanických skúšok, ktorá je vďaka svojmu princípu, jednoduchosti a účelnosti najrozšírenejšou a najuznávanejšou skúšobnou metódou na hodnotenie mechanických vlastností prevažne kovových materiálov. Jej výhodou je, že dokáže porušiť každý materiál pri zachovaní zákona geometrickej podobnosti [3].

Spočíva v tom, že hladké skúšobné teleso jednoduchého tvaru (prevažne kruhového alebo obdĺžnikového prierezu) sa uchyťí do čeľustí skúšobného stroja, následne je pomocou prietáhomeru nasadenom na telese experimentálne zisťovaná závislosť pôsobiacej sily F na predĺžení skúšobnej tyče alebo závislosť napätia na deformácii až do porušenia. Výstupom je teda graf tejto závislosti a taktiež hodnoty napätových a deformačných charakteristík skúšaného materiálu [2, 3].

2.1 Skúšobné stroje [2, 3]

Skúšobné stroje pre ťahovú skúšku, nazývané tiež aj trhacie stroje, sú spolu s ďalšími prídavnými a pomocnými zariadeniami základnou výbavou každej mechanickej skúšobne. Sú konštruované tak, aby sa dali do nich upínať rôzne skúšobné telesá, či už veľkosťou alebo spôsobom upnutia.

Okrem základného vyhotovenia sa vyrábajú aj ako univerzálne, ktoré sú svojou konštrukciou prispôsobené aj pre skúšku tlakom a skúšku ohybom. Napriek tomu, že so sériovou výrobou týchto strojov sa začalo už na konci minulého storočia, princíp stroja zostal zachovaný dodnes. Existujú 2 varianty týchto strojov – vertikálne a horizontálne, podľa polohy osi namáhania skúšobnej tyče. Z dôvodu využitia podlahy ako pevnej časti stroja sú preferované práve vertikálne. Ďalej sa dajú podľa spôsobu zaťažovania a pohonu rozdeliť na mechanické (vretenové) a hydraulické. V 50-tych rokoch počas obdobia rozvoja elektroniky vznikajú elektronické skúšobné stroje, ktoré umožňujú presné meranie sily a taktiež meranie malých deformácií. Vyvinutie elektronického servohydraulického skúšobného stroja v 60-tych rokoch umožňuje reguláciu časového priebehu jednej z troch snímaných veličín priamo počas skúšky – predĺženie skúšobného telesa, pohyb priečnika alebo sily. Dnes je tento spôsob riadenia chodu skúšobného stroja bežný u všetkých typov strojov [2].

Základné časti trhacieho stroja sú:

- 1) vlastný rám stroja, ktorý sprostredkováva prenos zaťažujúcej sily zo zaťažovacieho zariadenia na skúšobné teleso
- 2) zaťažovacie zariadenie, ktoré mení privedenú elektrickú energiu na mechanickú, a tá sa využíva na zaťaženie a deformáciu skúšobnej tyče
- 3) zariadenie na meranie a záznam sily
- 4) zariadenie na meranie a záznam deformácie
- 5) ovládacie prvky
- 6) prietáhomer (extenzometer)

Úlohou stojanu (rámu stroja) je prenášať zaťažujúce sily prostredníctvom upínacieho zariadenia na skúšobné teleso. Pri menších trhacích strojoch sa využívajú otvorené rámy, ktoré sú síce pri danej hmotnosti stroja menej tuhé a pevné, na druhej strane však umožňujú praktický prístup do upínacieho priestoru. Pre väčšie zaťaženia dominujú v modernejších

trhacích strojoch rámy uzavreté, ktoré sú pri menších hmotnostiach pevnejšie. Tieto rámy sú tvorené 2 alebo 4 stĺpmi spojenými v hornej a dolnej časti priečnikmi. Pre čo najpresnejšie meranie a dobré ovládanie zaťažovania je požadovaná čo najvyššia tuhosť stojana.

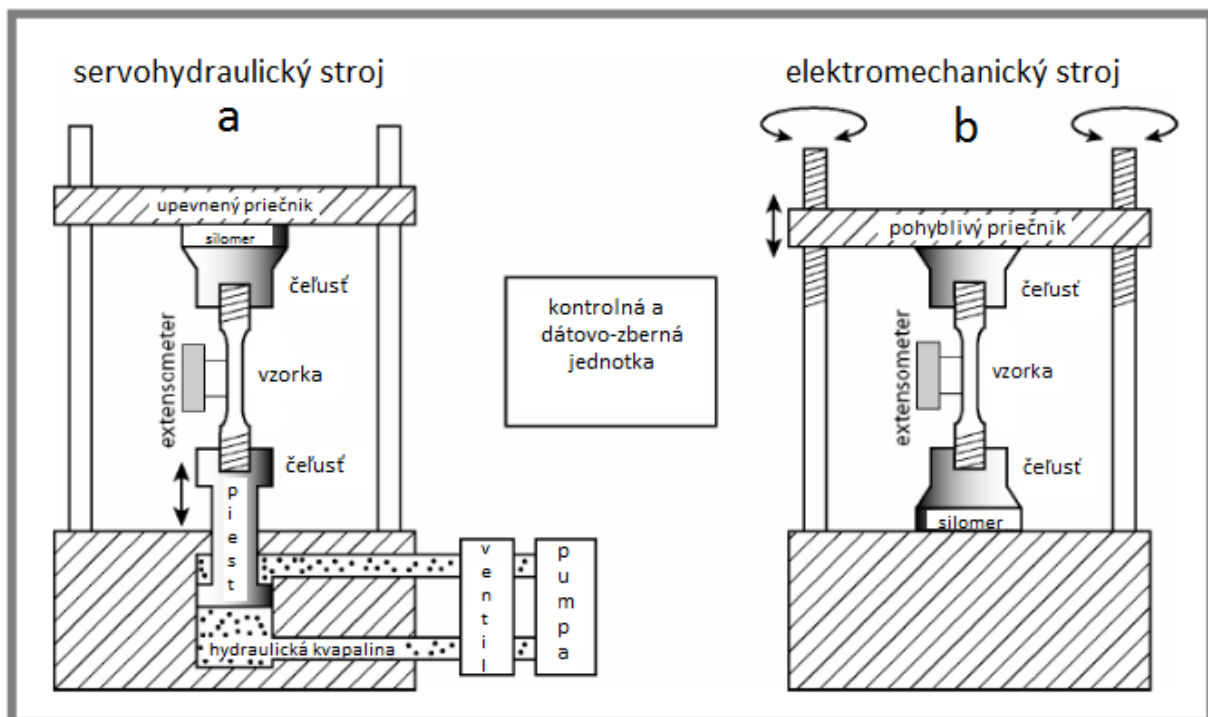
Zaťažovacie zariadenia sú buď mechanické (vretenové/pákové) alebo hydraulické. Medzi hlavné výhody mechanického zariadenia patria samosvornosť, väčšia tuhosť a možnosť udržiavania konštantnej polohy, zaťaženia alebo rýchlosti pohybu priečnika. Naopak nevýhodou je zotrvačnosť, ktorá znemožňuje rýchle zmeny zaťaženia alebo striedavé zaťažovanie. Hydraulické zariadenia nachádzajú výhody v možnosti aplikovania väčších síl vďaka hydraulickému prevodu, väčšie rýchlosti zaťažovania a takisto hladký chod. Medzi ich nevýhody patria netesnosti v hydraulickom systéme, pružnosť oleja a náročnosť údržby.

Zariadenia na meranie sily (silomery, dynamometre) sa vyrábajú v 4 vyhotoveniach: mechanické, mechanicko-elektrické, hydraulicko-mechanické a hydraulicko-elektrické. Presnosť meracích systémov je predpísaná a pravidelne kontrolovaná, pričom by mala byť lepšia ako $\pm 1\%$.

Nedostatky mechanických silomerov kompenzujú mechanicko-elektrické zariadenia. Z toho dôvodu sa tieto silomery používajú vo väčšine statických a staticko-dynamických trhacích strojov.

Obr. 2.1a znázorňuje schému hydraulického trhacieho stroja s uzavretým rámom a dvoma stĺpmi. Nastavenie počiatočnej polohy priečnika a následné uzamknutie v skúšobnej polohe je hydraulické. Ventil slúži na privedenie tlakového oleja do valca s piestom [2, 5].

Na obr. 2.1b je znázornená schéma mechanického trhacieho stroja, opäť s uzavretým rámom a dvoma stĺpmi. Rýchlosť posuvu priečnika sa dá meniť zmenou prevodu alebo zmenou otáčok motora [5].



Obr. 2.1 Schéma trhacieho stroja a) hydraulického b) mechanického [5]

2.2 Materiály pre skúšku ťahom

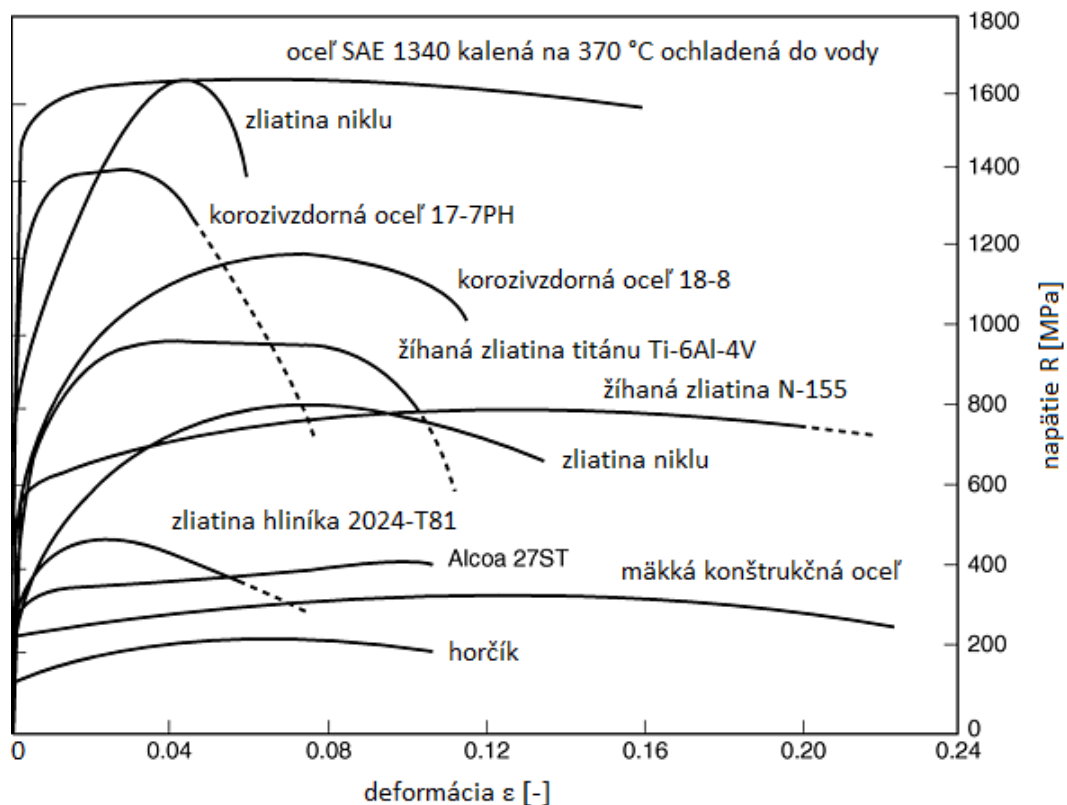
Vzhľadom na to, aká je ťahová skúška všestranná a univerzálna, všeobecne platí, že testovať môžeme skúšobné telesá vyrobené z akéhokoľvek materiálu pod podmienkou, že je možné vyrobiť vzorku tak, aby sa dala upnúť do čeľustí ťhacieho stroja a lom nenastal v týchto miestach. Je zrejmé, že každý materiál bude vykazovať inú závislosť napätia na deformácii a taktiež iné hodnoty napät'ových a deformačných charakteristík, v závislosti na vopred zvolených podmienkach zaťažovania. Výroba určitého typu skúšobného telesa s požadovaným spôsobom upnutia, vrátane jeho rozmerov a celkovej geometrie, je podriadená zavedeným normám pre jednotlivé materiály.

Nasledujúca tabuľka prehľadne zobrazuje prevládajúce typy väzieb a mikroštruktúry, a taktiež hlavné prednosti jednotlivých technických materiálov [6].

Tab. 2.1 Všeobecné charakteristiky hlavných skupín technických materiálov [6]

SKUPINA MATERIÁLOV	PREVLÁDAJÚCI TYP VÄZBY	MIKROŠTRUKTÚRA	VÝHODY
kovy a zliatiny	kovová	<ul style="list-style-type: none"> • kryštalická • amorfná 	<ul style="list-style-type: none"> • pevné • húževnaté • vodivé
polyméry	zmiešané kovalentná a sekundárna	<ul style="list-style-type: none"> • reťazce molekúl • sieťovitá • amorfná 	<ul style="list-style-type: none"> • lacné • ľahké • odolné voči korózii
keramiky a sklá	iontová, kovalentná alebo zmiešaná iontovo-kovalentná	<ul style="list-style-type: none"> • kryštalická • amorfná 	<ul style="list-style-type: none"> • pevné, tuhé, tvrdé • odolné voči creepu • odolné voči korózii
intermetaliká	zmiešaná kovová s iontovým a kovalentným charakterom	<ul style="list-style-type: none"> • kryštalická • amorfná 	<ul style="list-style-type: none"> • pevné, tuhé, tvrdé, ľahké • odolné voči creepu • odolné voči korózii
kompozity	rôzne	<ul style="list-style-type: none"> • matrica+vlákna • matrica+častice • atď. 	<ul style="list-style-type: none"> • pevné, tuhé • ľahké

Jednotlivé napät'ové a deformačné charakteristiky pre rôzne materiály sa dajú dohľadať v príslušnej literatúre, ale pre porovnanie a predstavu ako sa správajú rozličné materiály pri ťahovej skúške je uvedených niekoľko napät'ovo-deformačných závislostí [6].



Obr. 2.2 Príklad vlastností rôznych kovových materiálov stanovených pomocou skúšky ťahom, prevzaté a upravené z [6]

Na obr. 2.2 je vyobrazená závislosť napätia na deformácii pre vybrané kovové materiály, pričom je vidieť, že horčík vo forme čistého kovu má značne nižšie pevnostné charakteristiky v porovnaní s oceľami alebo zliatinami neželezných kovov. To platí vo všeobecnosti aj pre iné čisté kovy. Z dôvodu dosiahnutia čo najlepších mechanických vlastností pre danú konštrukčnú aplikáciu sa zavádzajú, skúšajú a používajú rôzne zliatiny, kde sú tieto mechanické vlastnosti zaručené kombináciou dvoch alebo viacerých prvkov v určitom pomere. Taktiež sa kladie dôraz na optimalizáciu chemického zloženia pre dané použitie [2, 3, 6].

Je zrejmé, že skúšku ťahom môžeme vykonávať na rôznych druhoch materiálov, avšak výsledky sa budú značne líšiť. Získané napätovo-deformačné závislosti sú závislé na podmienkach skúšky – teplote a deformačnej rýchlosti. Spomínané závislosti vytvárajú obraz o materiáli a jeho správaní pri zaťažovaní jednoosovým ťahom, pričom výrazne uľahčujú rozhodovanie pri použití daných materiálov v praxi (zistením ich napätových a deformačných charakteristík) [6].

2.3 Diagramy a charakteristiky

2.3.1 Ťahové diagramy kovových materiálov

Trhacie stroje zaznamenávajú zaťažovací diagram ako funkciu odporu testovaného materiálu voči deformácii a porušeniu, pričom existujú 4 druhy súradnicových systémov hodnôt, do ktorých môže byť vykresľovaný [3]:

- absolútne veličiny $F - \Delta L$
- pomerné zmluvné veličiny $R - \varepsilon$ (najbežnejšie, rovnaký tvar diagramu ako v absolútnych hodnotách, charakterizovaný zmenou pomeru dF/dL)
- pomerné skutočné veličiny $\sigma - \bar{\varepsilon}$

V rámci tvarovej totožnosti diagramov v absolútnych a zmluvných veličinách sa dá získaná závislosť $F - \Delta L$ (sila – predĺženie) prepočítať na závislosť $R - \varepsilon$ (zmluvné napätie – pomerná deformácia) podľa nasledujúcich vzťahov:

$$R = \frac{F}{S_0} \text{ [MPa] ,} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{L-L_0}{L_0} \text{ [-] alebo } \varepsilon = \frac{L-L_0}{L_0} \cdot 100 \text{ [%] ,} \quad (2)$$

kde F je zaťažujúca sila, S_0 je plocha pôvodného prierezu skúšobného telesa, L je konečná merná dĺžka skúšobnej tyče, L_0 je pôvodná merná dĺžka a výraz $L-L_0$ vyjadruje prírastok dĺžky L_0 (často sa označuje ako ΔL) [2].

Vzťahy na prepočet zmluvných hodnôt na skutočné napätie a skutočnú deformáciu sú nasledovné:

$$\sigma = \frac{F}{S} = R \cdot \frac{S_0}{S} = R \cdot (1 + \varepsilon) \text{ [MPa] ,} \quad (3)$$

$$\bar{\varepsilon} = \ln \frac{L}{L_0} = \ln \frac{S_0}{S} = \ln(1 + \varepsilon) \text{ [-] ,} \quad (4)$$

kde S je plocha okamžitého prierezu skúšobného telesa [2, 3].

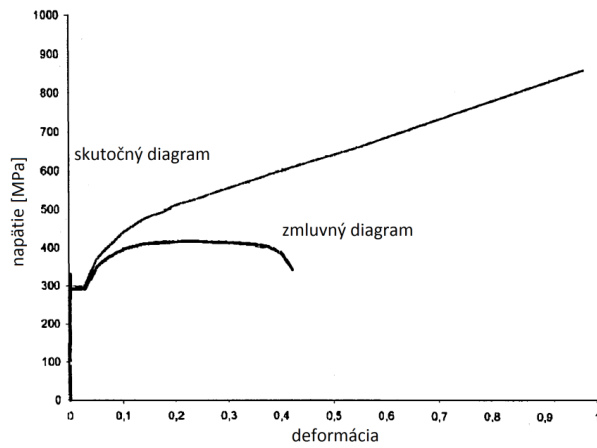
Pre všeobecný popis samotného ťahového diagramu skutočné napätie – skutočná deformácia slúžia nasledujúce vzťahy (Hollomonov (5) a Ramberg-Osgoodov (6) vzťah):

$$\sigma = K \cdot \bar{\varepsilon}_{pl}^n \text{ [MPa] ,} \quad (5)$$

$$\bar{\varepsilon}_c = \bar{\varepsilon}_{el} + \bar{\varepsilon}_{pl} = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K}\right)^{\frac{1}{n}} \text{ [-] ,} \quad (6)$$

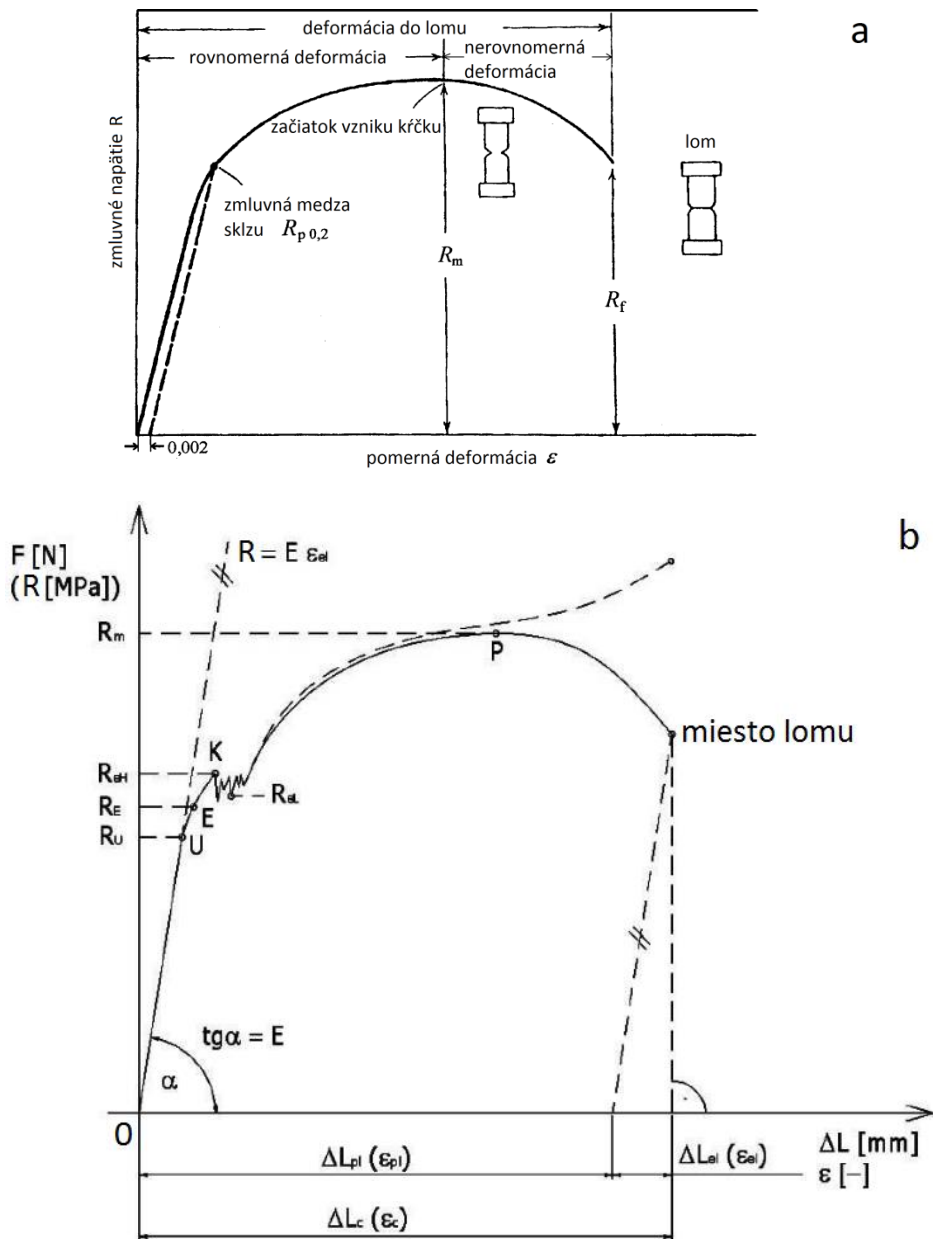
kde K je súčiniteľ deformačného spevnenia, $\bar{\varepsilon}_{pl}$ je skutočná plastická deformácia, n je exponent deformačného spevnenia, $\bar{\varepsilon}_c$ je skutočná celková deformácia, $\bar{\varepsilon}_{el}$ je skutočná elastická deformácia a E je modul pružnosti v ťahu materiálu skúšobného telesa [2, 6].

Zmluvný ťahový diagram je prostriedkom tzv. „inžinierskeho prístupu“. Slúži na odhad chovania materiálu pri jeho aplikáciách a na zisťovanie napät'ových a deformačných charakteristík materiálov. Dôležité je, že je použiteľný iba pri malých deformáciách a malých zmenách tvaru skúšobnej vzorky. Diagram skutočné napätie – skutočná deformácia sa používa napríklad pri pevnostných výpočtoch súčiastok, pri tvárnitelnosti plechov a v množstve iných analýz. Pre porovnanie týchto dvoch diagramov je uvedený obr. 2.3 [2, 3].



Obr. 2.3 Porovnanie zmluvného a skutočného ťahového diagramu [2]

Príklady zmluvných diagramov pre polykrystalický materiál sú na obr. 2.4 [2, 7].



Obr. 2.4 Zmluvný diagram napätie-deformácia z hľadiska a) etáp [2] b) charakteristík [7]

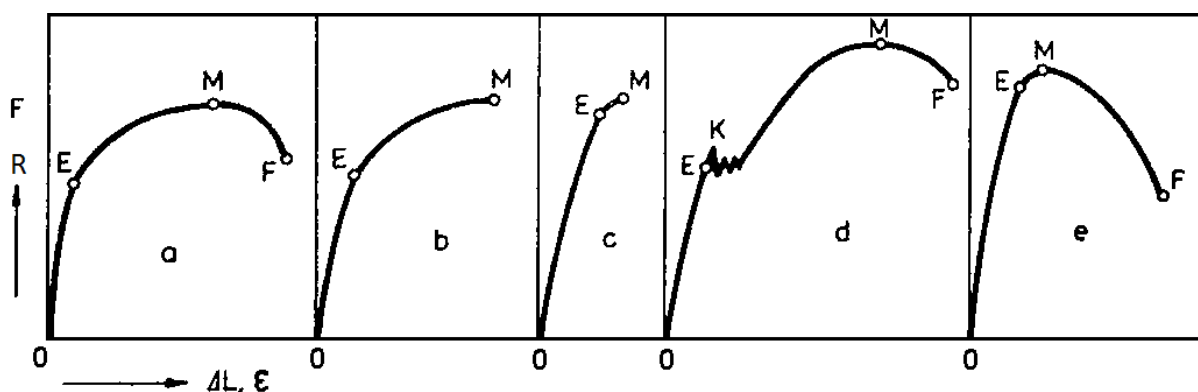
Prvú časť diagramu na obr. 2.4b – od bodu 0 do bodu U – tvorí priamka, ktorá predstavuje elasticnú deformáciu. Vratná elasticná deformácia je v prípade kovových materiálov určená množstvom deformácie, ktorá môže byť vyvolaná v jednotlivých kovových väzbách pred porušením. Táto hodnota sa pohybuje väčšinou pod hranicou 1% [6]. Spomenutý úsek popisuje Hookov zákon, vyjadrený v tvare

$$R = E \cdot \varepsilon_{el} [MPa] . \quad (7)$$

Predĺženie skúšobnej tyče je merané a zaznamenávané snímačom umiestneným priamo na nej. V prípade, že predĺženie skúšobného telesa je odvodené z pohybu priečnika ťahového stroja, zahŕňa sklon tejto časti ťahového diagramu okrem elastickej deformácie skúšobnej tyče aj elasticnú deformáciu častí skúšobného stroja – rám stroja, dynamometer a čeľuste, ktorá býva rádovo väčšia ako elasticná deformácia vzorky. Z toho dôvodu sa nedá v tomto prípade modul E vyhodnotiť [2].

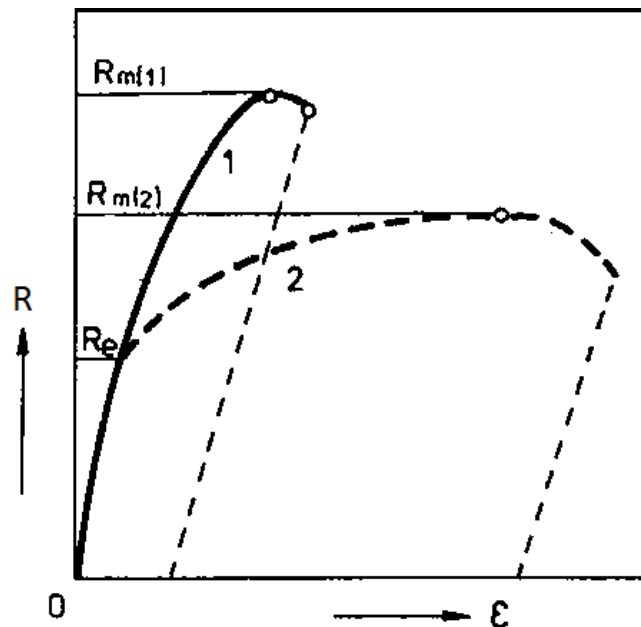
V úseku od bodu U do bodu P zostáva deformácia rovnomerná, avšak z dôvodu začiatku hromadenia plastickej deformácie sa stráca linearita a nastáva odklon od pôvodného priamkového trendu. Napätie sa stále zvyšuje s nárastom deformácie až do najvyššieho bodu diagramu, ktorý daná závislosť dosiahne. Dej prebiehajúci v tejto časti diagramu sa nazýva deformačné spevňovanie. V bode P po skončení rovnomerného zužovania mernej časti skúšobnej tyče, t.j. extenzometrom meraného úseku na skúšobnej vzorke, následne vzniká kľčok a ďalšia deformácia je spojená s poklesom (relaxáciou) napätia. Po skončení tejto nerovnomernej plastickej deformácie, t.j. po vyčerpaní možných sklzových systémov dislokácií, nastáva porušenie (lom) skúšobnej tyče. Ťahová skúška sa považuje za úspešnú len v prípade, že lom nastane v mernej časti vzorky a nepretrhne sa napríklad v mieste upnutia [2, 4].

Na obr. 2.5 je uvedený prehľad možných základných tvarov týchto diagramov. Prvý typ diagramu je najbežnejší – jedná sa o klasický pomer medzi jednotlivými oblasťami diagramu bez výraznej medze klzu (medza klzu bude priblížená neskôr v tejto práci). Ďalší tvar neobsahuje tvorbu kľčoka a porušenie nastáva pri najväčšej zaťažovacej sile na základe značného deformačného spevnenia. V prípade obr. 2.5c vzniká veľmi malá plasticná deformácia pred samotným lomom (krehké chovanie materiálu). Tvar diagramu na obr. 2.5d je charakteristický výraznou medzou klzu. Posledný typ diagramu ilustruje obmedzené deformačné spevňovanie v oblasti plastickej stability [3].



Obr. 2.5 Základné typy ťahových diagramov [3]

Je potrebné ešte poznamenať, že fázové premeny v materiáli majú tiež vplyv na tvar ťahového diagramu. Obr. 2.6 ukazuje zmenu tvaru krivky austeniticko-martenzitickej ocele, v ktorej sa pri zvýšení teploty skúšobnej vzorky z 20 na 70 °C zastaví premena austenitu na martenzit pri plastickej deformácii a medza pevnosti takejto ocele sa zníži asi na polovicu tej pôvodnej [3].



Obr. 2.6 Vplyv fázovej premeny pri ťahovej skúške na tvar ťahového diagramu zliatiny [3]

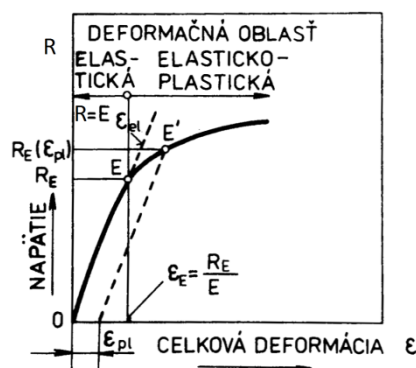
2.3.2 Napät'ové charakteristiky [6, 8]

Medzi napät'ové charakteristiky ťahového diagramu patria:

- modul pružnosti v ťahu E
- medza úmernosti R_U
- medza pružnosti (elasticity) R_E
- medza klzu (priet'ažnosti) R_e (R_p)
- medza pevnosti R_m
- napätie pri porušení skúšobného telesa R_f

Hodnoty všetkých uvedených veličín sa udávajú v jednotkách MPa (okrem E [GPa]) [3].

Ťahový diagram sa z hľadiska deformácie skladá z dvoch deformačných oblastí – z oblasti elastickej a elasticko-plastickej. Zatiaľ čo elastická oblasť predstavuje predĺženie telesa, ktoré sa po odľahčení vráti do pôvodného stavu, v elasticko-plastickej oblasti je určitý podiel nevratnej (trvalej) deformácie, ktorá telesu po odľahčení zostane. Na rozmedzí týchto dvoch oblastí sa mení tvar ťahovej krivky a určuje sa hodnota medze pružnosti R_E , ktorá je definovaná ako najvyššie napätie, pri ktorom ešte nevzniká plastická deformácia (avšak pre technické účely sa definuje ako konvenčné napätie, ktoré spôsobí určitú malú pomernú trvalú deformáciu ϵ_{pl}). Tieto skutočnosti a princíp určenia zmluvnej medze pružnosti R_E (ϵ_{pl}) pre určitú hodnotu plastickej deformácie ϵ_{pl} sú znázornené na obr. 2.7 [3].



Obr. 2.7 Prechod z elastickej do elasticko-plastickej oblasti deformácie [3]

Modul pružnosti v ťahu E (Youngov modul) sa určuje v lineárnej časti diagramu, a to ako smernica priamky, ktorá predstavuje tento úsek.

$$E = \operatorname{tg} \alpha = \frac{R}{\varepsilon} \text{ [MPa] ,} \quad (8)$$

kde α je uhol, ktorý zvierá priamka vedená touto časťou diagramu s osou deformácie ε [2, 3].

Najvyššie napätie, kedy ešte platí Hookov zákon úmernosti sa nazýva medza úmernosti R_U . Je to napätie, pri ktorom krivka v elastickej oblasti ťahového diagramu stráca svoju linearitu. Pri zisťovaní hodnôt medze úmernosti R_U a medze pružnosti R_E je výsledná hodnota výrazne ovplyvnená citlivosťou snímača predĺženia, z toho dôvodu sa tieto hodnoty neudávajú v normách a väčšinou sa ani neurčujú [3].

Najdôležitejšou mechanickou vlastnosťou je medza klzu. Je definovaná ako napätie, pri ktorom začína vznikáť v materiáli plastickej deformácia. Avšak aj tu sa objavuje problém v tom, že jej hodnota môže byť závislá na citlivosti snímača predĺženia. Príkladom môže byť ťahový diagram materiálu, ktorý je uvedený na obr. 2.4a. V tomto prípade by sa podľa definície mala považovať hodnota napätia pri odklone krivky od priamkového trendu práve za hodnotu medze klzu. Z toho dôvodu sa zavádza tzv. zmluvná medza klzu, ktorá sa označuje $R_{p0,2}$. Ako jej hodnota sa považuje napätie, pri ktorom veľkosť plastickej (trvalej) deformácie dosiahne hodnotu $\varepsilon_{pl} = 0,002$. Jej grafické určenie je znázornené na obr. 2.8a. Súčet hodnôt tejto plastickej deformácie $\varepsilon_{pl} = 0,002$ a elastickej deformácie, ktorá je daná vzťahom

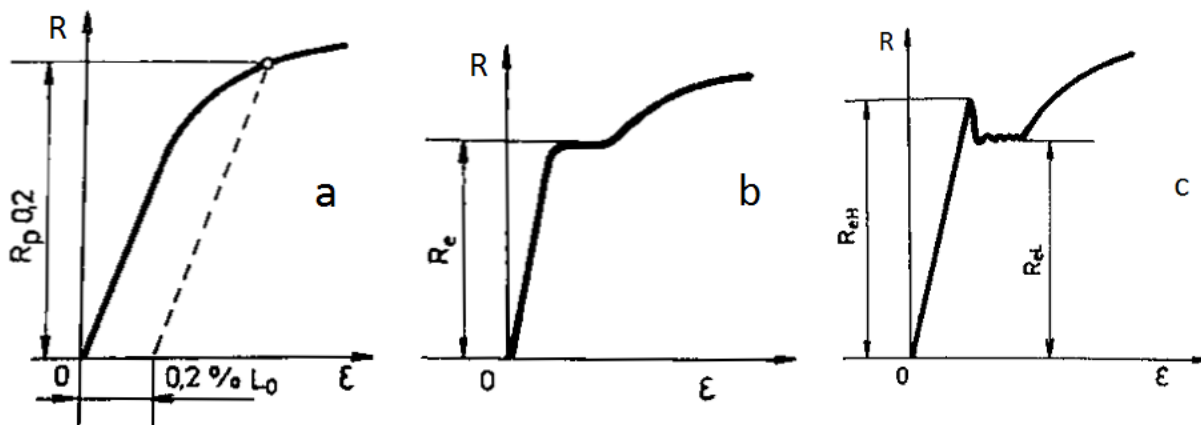
$$\varepsilon_{el} = \frac{R_{p0,2}}{E} \text{ [-] ,} \quad (9)$$

dáva hodnotu celkovej deformácie ε_c skúšobného telesa pri napätí $R_{p0,2}$ [2, 3].

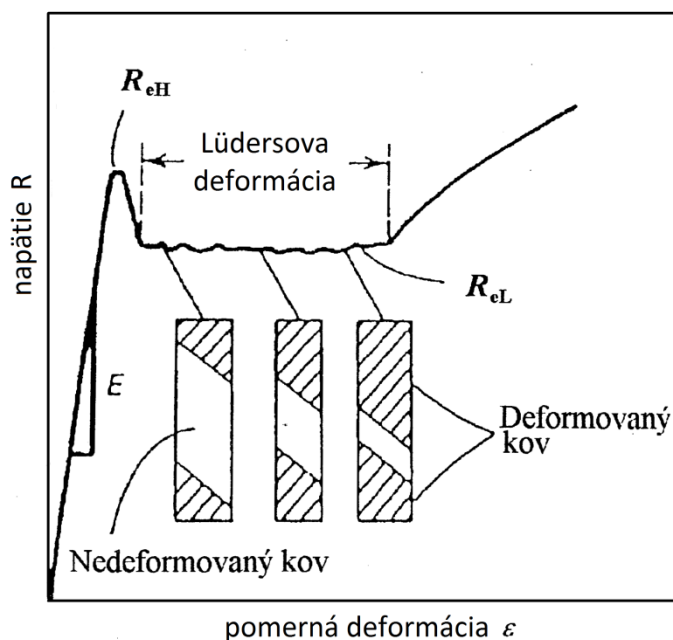
Napätie potrebné pre rozpochybovanie alebo vznik nových dislokácií je podstatne väčšie ako napätie, ktoré umožňuje samotný pohyb dislokácií. Z toho dôvodu pri materiáloch, ktoré majú takto uchytené dislokácie vznikne určitá nespojitosť v ťahovom diagrame v oblasti prechodu z elastickej do elasticko-plastickej deformácie pri uvoľnení a vzniku nových dislokácií. Napätie v tomto mieste sa nazýva výrazná medza klzu R_e . Takáto výrazná medza klzu je znázornená na obr. 2.8b. Ďalším špecifickým prípadom sú materiály, ktoré vykazujú značne heterogénny proces vzniku plastickej deformácie pôsobením napríklad atómami dusíka alebo uhlíka na zakotvenie dislokácií, ktoré je v tomto prípade veľmi silné. Na základe vzniku plastickej deformácie naberajú ťahové diagramy týchto materiálov charakteristické kontúry v oblasti medze klzu. Tento tvar ťahového diagramu je znázornený na obr. 2.8c.

Prvou medznou hodnotou je tzv. horná medza klzu R_{eH} , ktorá predstavuje miesto na rozhraní lineárneho úseku diagramu a výrazného poklesu napätia. Tento prepad je sprevádzaný rozšírením plastickej deformácie cez celý nosný prierez skúšobnej tyče v oblasti úzkeho pásu. Hodnota, na ktorú napätie poklesne sa označuje R_{eL} a nazýva sa dolná medza klzu. Pri relatívne konštantnej hodnote tohto napätia sa sklzové pásy rozširujú postupne pozdĺž celej mernej dĺžky skúšobnej tyče. Rozsah deformácie s konštantnou hodnotou tohto napätia nesie názov Lüdersova deformácia, ktorá je vyobrazená na obr. 2.9. Takýto tvar ťahového diagramu je typický pre tvárne mäkké nízkouhlíkové ocele [2].

Jednotlivé typy medze klzu sú zobrazené na nasledujúcom obrázku [3]:



Obr. 2.8 a) zmluvná medza klzu $R_{p0,2}$ určená z trvalej deformácie pod zaťažením
 b) výrazná medza klzu R_e
 c) diskontinuitný priebeh zaťaženia pri výraznej medzi klzu [3]



Obr. 2.9 Ťahový diagram s Lüdersovou deformáciou typický pre nízkouhlíkovú oceľ [2]

Hodnoty medze klzu sa pohybujú pre väčšinu zliatin v rozmedzí 100 – 1000 MPa, pre nízkouhlíkové ocele býva v rozpätí 135 – 480 MPa, pre zliatiny hliníku 200 – 480 MPa a pre kvalitné ocele s vysokou pevnosťou až 1200 – 1650 MPa [6].

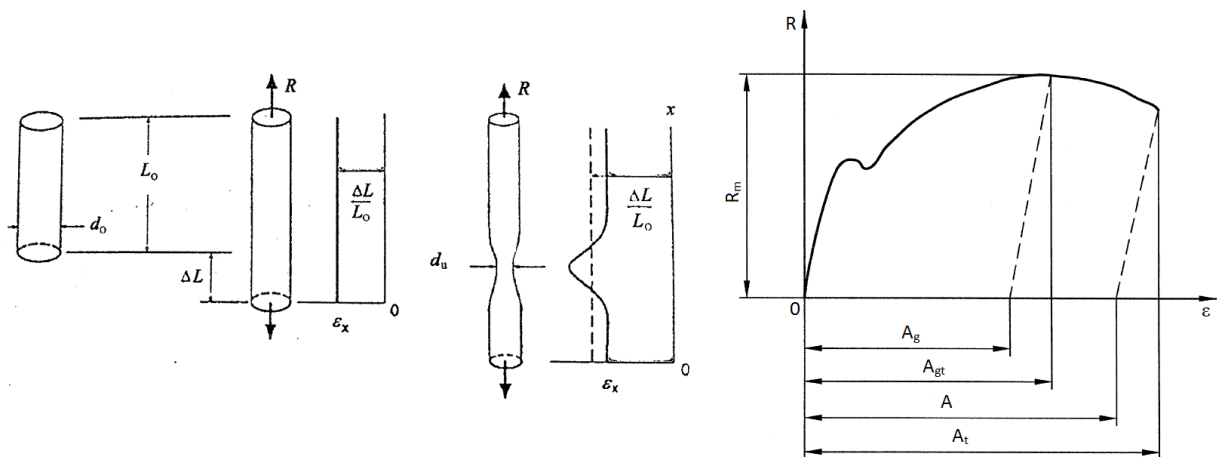
Medzou pevnosti R_m , resp. medzou plastickej nestability, sa v prípade tvárnych materiálov rozumie napätie, pri ktorom nastáva tvorba krčku na skúšobnej tyči, pričom lom nastáva až po vytvorení krčku a napätie v momente porušenia sa označuje ako lomové napätie R_f . Pri krehkých materiáloch sa môže stať, že porušenie súvislosti materiálu (lom) nastane prakticky ihneď po dosiahnutí maximálnej hodnoty napätia, takže vzniknutá plastická deformácia je nulová alebo len veľmi malá. V tomto prípade sa hodnota medze pevnosti R_m rovná hodnote lomového napätia R_f . Vo všeobecnosti platí, že medza pevnosti R_m je najväčšie napätie dosiahnuté v priebehu celej ťahovej skúšky (najvyšší bod na ťahovom diagrame). Platí pre ňu vzťah

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \text{ [MPa] ,} \quad (10)$$

kde F_m je maximálna dosiahnutá sila pri skúške. Problematika medze pevnosti spočíva v tom, že neudáva skutočnú únosnosť súčiastky vyrobenej z tvárneho materiálu, pretože sa vzťahuje len na pôsobenie jednoosovej napätosti namiesto reálneho pôsobenia napätosti viacosovej. Avšak aj napriek tomu, že pojednáva o pevnosti materiálu iba v rámci prísnych podmienok takéhoto zaťažovania, stále je uvádzaná v materiálových listoch ako jedna z hlavných mechanických charakteristík zisťovaných ťahovou skúškou, ktorá nachádza svoje uplatnenie pri celkovej špecifikácii a kontrole kvality materiálu. Je to tiež z dôvodu reprodukovateľnosti jej merania vzhľadom na to, že k tomu nie sú potrebné stroje so snímačmi predĺženia skúšobného telesa. V oblasti výpočtov bola medza pevnosti (vhodne redukovaná faktorom bezpečnosti) postupne nahradená odbornejším prístupom, ktorý je založený na počítaní s medzou klzu ako najviac adekvátnou charakteristikou. Vďaka určitým empirickým korelačným vzťahom medzi medzou pevnosti a inými charakteristikami, akými sú napríklad medza únavy, tvrdosť a iné, zostáva jej použitie naďalej dostatočne rozsiahle [2, 9].

2.3.3 Deformačné charakteristiky [8]

Deformačné charakteristiky sa určujú na základe rozmerov mernej časti skúšobnej tyče pred a po skúške (nezatážení stav), takže súvisia len s plastickou deformáciou skúšaného materiálu. Zvláštnosťou tvárnych materiálov je, že k najväčšiemu predĺženiu dochádza v oblasti krčku, ktorý sa tvorí na mernej časti vzorky ešte pred samotným lomom a jeho tvar závisí na priereze skúšobnej tyče. Tým pádom je deformácia takýchto telies pozdĺž meranej dĺžky nerovnomerná. Tento jav ilustruje obr. 2.10, ktorý tiež znázorňuje jednotlivé typy meraných ťažností materiálu. A_g je ťažnosť pri maximálnej zaťažovacej sile (na medzi plastickej nestability), A_{gt} je celková ťažnosť pri maximálnej zaťažovacej sile, A_t je celková ťažnosť v momente porušenia a A je ťažnosť po porušení [2].



Obr. 2.10 Schéma merania ťažnosti a typy ťažnosti [2, 8]

Ťažnosť A a kontrakciu (zúženie) Z vypočítame zo vzťahov

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 \text{ [%] ,} \quad (11)$$

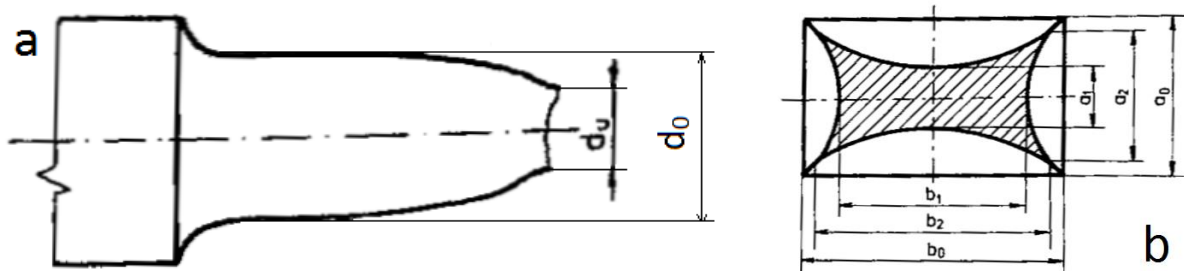
$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 = \frac{\Delta S}{S_0} \cdot 100 \text{ [%] ,} \quad (12)$$

naviac pre kruhovú skúšobnú tyč platí

$$Z = \frac{d_0^2 - d_u^2}{d_0^2} \cdot 100 \text{ [%] ,} \quad (13)$$

kde L_0 je dĺžka mernej časti vzorky pred skúškou, L_u je dĺžka mernej časti vzorky po skúške, S_0 je prierez tyče pred skúškou, S_u je prierez tyče po skúške, d_0 je priemer prierezu tyče pred skúškou a d_u je priemer prierezu tyče po skúške. Platí, že čím je menšia počiatková dĺžka L_0 , tým väčšia bude výsledná hodnota A . Vo všeobecnosti tiež platí, že hodnoty kontrakcie pri kruhových prierezoch sú vyššie ako pri prierezoch štvorhranných. Je to dané tým, že z dôvodu vystužovacieho účinku hrán pri skúšobných tyčiach štvorhranných prierezov nebýva zúženie pravidelné, špeciálne pri mäkkých materiáloch. Na obr. 2.11 sú znázornené zúžené prierezy S_u pre obidva typy skúšobných tyčí. Plocha prierezu sa pri štvorhranných skúšobných telesách zistí v mieste lomu z empirického vzťahu [2, 3]

$$S_u = 0,25 \cdot (a_1 + a_2) \cdot (b_1 + b_2) \text{ [m}^2\text{] .} \quad (14)$$



Obr. 2.11 Meranie zúženého prierezu S_u na lome skúšobnej tyče a) s kruhovým prierezom b) so štvorhranným prierezom [3]

Pojmom pomerná skúšobná tyč sa zavádzajú normované telesá konkrétneho tvaru, ktoré musia byť použité v prípade, že si to daný materiálový list vyžaduje predpísaním hodnoty A . Pre tieto tyče platí, že spĺňa zavedený pomer k , ktorý je daný vzťahom

$$k = \frac{L_0}{\sqrt{S_0}} \quad [-] . \quad (15)$$

Doporučené hodnoty pre tento pomer sú $k = 5,65$ pre krátke skúšobné tyče (sú preferované) a $k = 11,3$ pre dlhé skúšobné tyče. Navyiac pre kruhové skúšobné tyče platí po zjednodušení vzťahu (15), že $L_0 = 5d_0$ pre krátke skúšobné tyče a $L_0 = 10d_0$ pre dlhé skúšobné tyče. Pri skúšaní ocelí sa pri použití krátkej skúšobnej tyče označuje ťažnosť A bez prídavného symbolu, označenie $A_{3,4}$ potom znamená, že ťažnosť bola určená na pomernej skúšobnej tyči s pomerom $k = 3,4$. Tvarová podobnosť skúšobných tyčí je dôležitá napríklad z dôvodu prepočtu ťažností určených na skúšobných tyčiach s rôznymi hodnotami pomeru k [2].

Opodstatnenie týchto kvantifikátorov plasticity materiálu je napríklad v tom, že sa dá na ich základe zistiť, koľko plastickej deformácie dokáže materiál absorbovať bez toho, aby sa porušil. To má význam pri konštrukčných výpočtoch prevádzkových napätí, ako aj pre rôzne technologické operácie, napríklad lisovanie, valcovanie alebo ťahanie. Taktiež nájdu využitie pri hodnotení čistoty materiálov – kontrakcia sa znižuje s narastajúcou hodnotou obsahu nečistôt a iných prímiesí v kove, ktoré spôsobujú vznik dutín v kĺčku počas plastickej deformácie. Tiež platí, že jej hodnota klesá so stúpajúcou pevnosťou. Pre tvárne materiály platí, že hodnota Z závisí od materiálu, od podmienok skúšky a jej hodnota v dôsledku vytvárania kĺčka rastie rýchlejšie ako ťažnosť A , takže $A < Z$ [2, 3].

2.3.4 Deformačné spevnenie

Na stupni deformačného spevnenia n závisí tvar ťahového diagramu za medzou klzu, pričom jeho hodnotu získame nasledujúcim pomerom:

$$n = \frac{R_m}{R_e} \quad [-] . \quad (16)$$

Vysoký stupeň deformačného spevnenia znamená, že pomer je väčší ako 1,4. V opačnom prípade, kedy je hodnota pomeru menšia ako 1,2, sa jedná o nízky stupeň deformačného spevnenia [2].

V polykrystalických kovových materiáloch sa plastickej deformácii vytvára pri neustálo zvyšovaní napätia a tento jav sa nazýva deformačné spevnenie. Je dané pohybom, interakciou a násobením množstva dislokácií, pričom počet dislokácií parabolicky rastie. Nasleduje interakcia týchto dislokácií medzi sebou a s rôznymi rozhraniami, akými sú napríklad hranice zŕn. V momente, kedy dislokácia dosiahne hranicu zrna, sa jej pohyb zastaví. Aj keď je možný priamy prechod do susedného zrna, dislokácie sa väčšinou začnú zhromažďovať na hranici zŕn a tak sa vytvárajú zhluky dislokácií. Pokračovaním tohto zhromažďovania sa vyvinie spätné napätie, ktoré zabraňuje pohybu ďalších dislokácií, a teda nastáva mechanické spevňovanie. Podobne ako pri lineárnej časti skutočného ťahového diagramu, kde platí Hookov vzťah, úsek rovnomerných plastickej deformácií, v ktorom nastáva parabolické deformačné spevňovanie môže byť popísaný Hollomonovým vzťahom

$$\sigma = K \cdot \bar{\varepsilon}^n \text{ [MPa] ,} \quad (17)$$

kde σ je aplikované napätie na materiál, K je pevnostný koeficient (materiálová konštanta), $\bar{\varepsilon}$ je plastická deformácia a n je exponent deformačného spevnenia (materiálová konštanta). Hodnota n sa pohybuje v rozmedzí 0 až 1, kde 0 znamená, že materiál je dokonale plastický a 1 znamená presný opak, tzn. že materiál je dokonale elastický. Väčšina kovových materiálov vykazuje n v rozpätí 0,1 až 0,6. Po jednoduchej úprave vzťahu (17) vznikne

$$\ln \sigma = \ln K + n \cdot \ln \bar{\varepsilon} . \quad (18)$$

Táto rovnica vykazuje lineárnu závislosť v logaritmickej súradniciach skutočné napätie-skutočná deformácia $\ln \sigma - \ln \bar{\varepsilon}$, kde n udáva sklon tejto priamky [6].

2.3.5 Výpočet rýchlosti deformácie [6]

Rýchlosť deformácie je rýchlosť, s akou je na materiál aplikované zaťaženie, pričom väčšina materiálov pri rôznych rýchlostiach vykazuje rôzne pevnostné a deformačné charakteristiky. To znamená, že rýchlosť deformácie má významný vplyv na napätovo-deformačnú krivku. Rýchlosť deformácie je definovaná vzťahom

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{d\tau} \text{ [s}^{-1}\text{] ,} \quad (19)$$

kde $d\varepsilon/d\tau$ je zmena deformácie za čas. Zvyšovanie rýchlosti deformácie zvyšuje deformačné napätie a jej závislosť na pevnosti materiálu sa zvyšuje s teplotou. Medza klzu a deformačné napätie pri nižších hodnotách plastickej deformácie sú viac ovplyvnené rýchlosťou deformácie ako medza pevnosti. Ak rýchlosť priečnika skúšobného stroja je

$$v = \frac{dL}{d\tau} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{] ,} \quad (20)$$

potom rýchlosť deformácie vyjadrená v rámci zmluvnej deformácie je

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{d\tau} = \frac{d(L-L_0)/L_0}{d\tau} = \frac{1}{L_0} \frac{dL}{d\tau} = \frac{v}{L_0} \text{ [s}^{-1}\text{] .} \quad (21)$$

Inžinierska rýchlosť deformácie je úmerná rýchlosti pohybu priečnika. V moderných skúšobných strojoch, v ktorých sa dá rýchlosť pohybu priečnika presne nastaviť a kontrolovať, je jednoduché vykonávať ťahové skúšky konštantnou zmluvnou rýchlosťou deformácie. Skutočná rýchlosť deformácie je daná vzťahom

$$\dot{\varepsilon}_s = \frac{d\varepsilon_s}{d\tau} = \frac{d[\ln(L/L_0)]}{d\tau} = \frac{1}{L} \frac{dL}{d\tau} = \frac{v}{L} \text{ [s}^{-1}\text{] .} \quad (22)$$

Vzťah (22) ukazuje, že pre konštantnú rýchlosť pohybu priečnika sa skutočná rýchlosť deformácie bude znižovať s predĺžovaním vzorky alebo so zúžením jej prierezu. Vykonávanie ťahových skúšok za konštantnej skutočnej rýchlosti deformácie vyžaduje monitorovanie okamžitého prierezu deformujúcej sa oblasti s kontrolou odozvy na zvyšovanie rýchlosti pohybu priečnika pri znižujúcom sa priereze. Skutočná rýchlosť deformácie sa vzťahuje k zmluvnej rovnicou

$$\dot{\epsilon}_s = \frac{v}{L} = \frac{L_0}{L} \frac{d\epsilon}{d\tau} = \frac{1}{1+\epsilon} \frac{d\epsilon}{d\tau} = \frac{\dot{\epsilon}}{1+\epsilon} \quad [\text{s}^{-1}] . \quad (23)$$

Bežné deformačné rýchlosti pri skúške ťahom, či už na hydraulicky alebo mechanicky poháňaných skúšobných strojoch, sa pohybujú v rozmedzí 10^{-5} až 10^{-1} s^{-1} .

2.4 Normy

V každej krajine existuje inštitúcia, ktorá je poverená vydávaním národných noriem pre skúšanie materiálov. Na Slovensku sa týmto zaoberá Slovenský ústav technickej normalizácie a normy sú označené STN – slovenská technická norma. V Českej republike to je Český normalizační institut (normy ČSN), nemecké normy sú označené DIN, americké ASTM, britské BS, švédske SS atď. Symbolom EN sa označujú normy vydávané štátmi Európskej únie v spolupráci s CEN (Comité Européen de Normalisation). Normy ISO vydáva medzinárodná organizácia International Organisation for Standardization [2].

Hlavné normy pre ťahové skúšky kovových materiálov sú:

- ČSN EN ISO 6892-1 Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty [8]
- ČSN EN ISO 6892-2 Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 2: Zkušební metoda za zvýšené teploty
- ČSN EN ISO 6892-3 Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 3: Zkušební metoda za nízké teploty
- ČSN EN ISO 7500-1 Kovové materiály – Kalibrace a ověřování statických jednoosých zkušebních strojů – Část 1: Tahové a tlakové zkušební stroje – Kalibrace a ověřování systému měření síly
- ČSN EN ISO 376 Kovové materiály – Kalibrace siloměrů používaných k ověřování jednoosých zkušebních strojů
- ČSN EN ISO 9513 Kovové materiály – Kalibrace průtahoměrových systémů používaných při zkoušení jednoosým zatížením

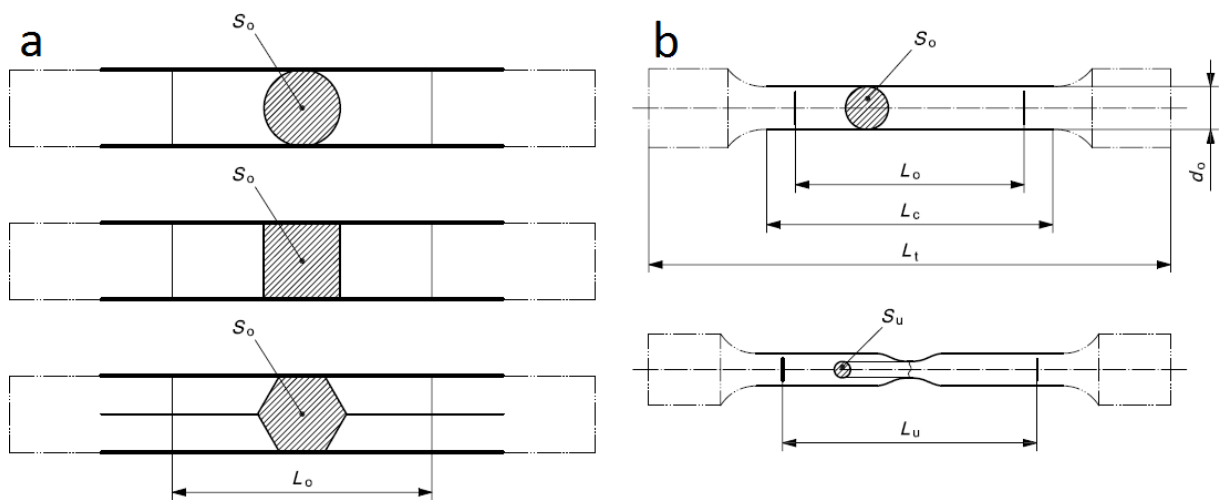
Normy obsahujú metodiku samotného postupu ťahovej skúšky, rozmery a geometrie skúšobných telies, požiadavky na skúšobné stroje a extenzometre, spôsoby upínania skúšobných telies, podmienky, pri ktorých má byť skúška vykonávaná atď. Materiálové listy obsahujú zase výpis jednotlivých mechanických vlastností, ktoré by mali skúšané materiály spĺňať. Okrem spomenutých noriem sa pre skúšku ťahom používajú aj ďalšie zahraničné normy, medzi ktoré patrí napr. DIN 50125 Testing of metallic materials – Tensile test pieces (angl. názov).

Vzhľadom na tému tejto práce treba ešte poznamenať, že normy na testovanie miniatúrnych vzoriek skúškou ťahom ešte nie sú zavedené (okrem amerických ASTM), pretože táto problematika je pomerne dosť nová a chýbajú potrebné informácie, výsledky a skúsenosti.

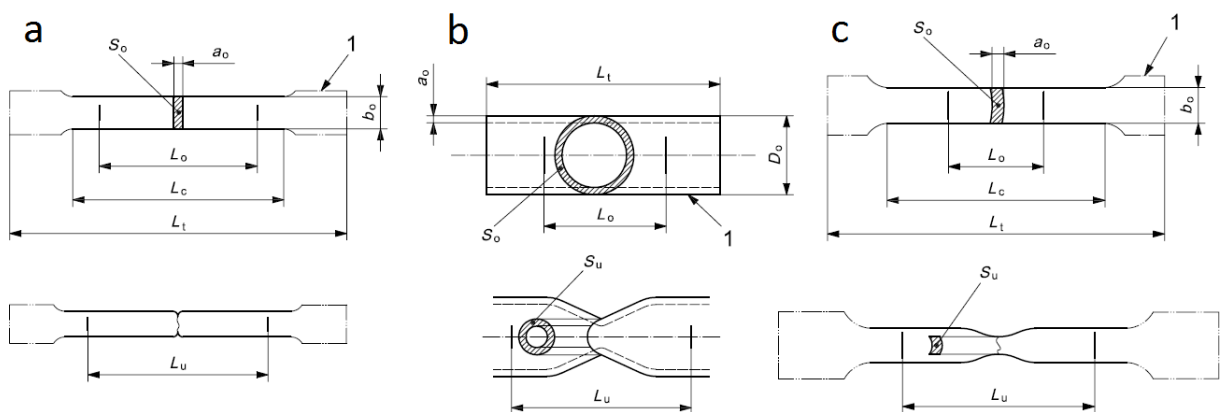
2.5 Skúšobné tyče

Na ťahovú skúšku sa používajú hladké skúšobné tyče s normovanými rozmermi a geometriou. Skúšobnú tyč tvoria dve upínacie hlavy a skúšaná merná časť, ktorá má svoj charakteristický prierez s obsahom S_0 a dĺžku L_0 . Pre skúšku a jej vyhodnotenie je podstatná deformácia práve v tejto pracovnej časti skúšobnej tyče [3, 8].

Skúšobné tyče sa rozdeľujú podľa tvaru prierezu na kruhové (obr. 2.12), ploché (obr. 2.13a) a ostatné (obr. 2.12a, obr. 2.13b,c), pričom kruhové sú najbežnejšie. Ploché tyče sa používajú najmä pri testovaní pásov a plechov. Rúry a trubky sa testujú buď vcelku pri menších prierezoch (obr. 2.13b), alebo sa z nich vyberajú nevyrovnané skúšobné tyče (obr. 2.13c). Drôty, laná, reťaze a podobne sa testujú neopracované vcelku. Pri kruhových tyčiach tvorí mernú časť valec s priemerom d_0 , v prípade plochých je to kváder s charakteristickými rozmermi prierezu a_0 a b_0 [3].



Obr. 2.12 a) kruhový a ostatné tvary prierezu b) kruhová skúšobná tyč pred a po skúške [8]



Obr. 2.13 a) plochá skúšobná tyč pred a po skúške b) trubková skúšobná tyč vcelku pred a po skúške c) výrez z trubky ako skúšobná tyč pred a po skúške [8]

Podľa tvaru upínacích hláv (pre kruhové tyče) existujú skúšobné tyče s osadenými hlavami, s hladkými valcovými hlavami a so závitovými hlavami. Upínací systém s osadenými hlavami má výhodu v presnosti ťahovej skúšky, avšak nehodí sa pre krehké materiály, ktoré majú tendenciu prasknúť v mieste zmeny prierezu tyče. Upínanie s hladkými valcovými hlavami je rýchle a jednoduché, ale pri tvrdých materiáloch upínacie hlavy často

preklzavajú, čím vznikajú nežiadúce otrasy pri zaťažení. Tento spôsob sa používa pri upínaní všetkých tyčí s nekruhovým prierezom. Upínací systém so závitovými hlavami je najdokonalejší a používa sa pri presných skúškach, pri skúškach za vyšších teplôt a uplatnenie má aj pri krehkých materiáloch. Pri plochých tyčiach sa využívajú dva spôsoby upnutia: pomocou čapu alebo pomocou ozubených klinov [3].

Pri výrobe skúšobných tyčí z polovýrodkov treba dbať a dávať pozor na materiálovú nehomogenitu a hospodárnosť výroby. Obrobenie musí byť také, aby zmeny štruktúry v blízkosti opracovaného povrchu nemali vplyv na výsledky skúšky. Materiály nižších pevností sa môžu testovať neopracované, tie vyšších pevností musia byť opracované, aby sa neporušovali pri upínacích hlavách [3].

Jednotlivé normy zavádzajú požadované rozmery s toleranciami a geometriu pre normované skúšobné tyče, pričom v niektorých prípadoch sa prelínajú, inokedy sú sčasti odlišné. Pre predstavu je uvedený obr. 2.14, ktorý zobrazuje prehľad preferovaných pomerných skúšobných tyčí kruhového a obdĺžnikového prierezu z normy ČSN EN ISO 6892-1 [8].

a

Coefficient of proportionality k	Diameter d mm	Original gauge length $L_o = k\sqrt{S_o}$ mm	Minimum parallel length L_c mm
5,65	20	100	110
	14	70	77
	10	50	55
	5	25	28

b

Dimensions in millimetres

Width b_o	Original gauge length L_o	Minimum parallel length L_c	Approximately total length L_t
40	200	220	450
25	200	215	450
20	80	90	300

Obr. 2.14 Normované skúšobné tyče pre skúšku ťahom a) kruhové b) ploché [8]

3 Miniaturne vzorky [10, 11]

Vyhodnocovanie mechanických charakteristík z ťahových skúšok vykonaných na miniatúrnych skúšobných telesách je predmetom záujmu vedeckých a výskumných skupín inžinierov už pomerne dlhú dobu. Hlavnou motiváciou pre výskum tohto druhu je vývoj nových materiálov, odhad životnosti súčiastok alebo zvarov v prevádzke odobratím veľmi malého objemu materiálu z týchto výrobkov (napr. tlakových nádob alebo potrubí), ako aj trend neustáleho zmenšovania rozmerov súčiastok a výrobkov z dôvodu lepšej hospodárnosti a šetrenia materiálom. Taktiež nedostatok materiálu pri niektorých technológiách výroby, napr. práškovej metalurgii, je dôvodom pre rozvoj v tejto oblasti. Medzi aplikácie, v ktorých sa dajú tieto skúšobné metódy využiť patria napríklad tenké kovové fólie a pásy alebo kovové mikroelektronické mechanické systémy (MEMS) [13].

Na základe týchto skutočností je snaha o vývoj a zavedenie skúšobných metód miniatúrnych skúšobných telies čoraz väčšia. Avšak na rozdiel od štandardných skúšobných telies, v prípade miniatúrnych vzoriek nie je k dispozícii zatiaľ žiadna normalizácia, ktorá by špecifikovala ich rozmery (okrem americkej ASTM E345-93, ktorá stanovuje požiadavky pre jednoosové skúšky ťahom fóliových materiálov). V dôsledku toho vzniklo veľké množstvo rozličných typov a veľkostí miniatúrnych vzoriek na testovanie mechanických vlastností materiálov podľa potreby a dostupnosti materiálu. Podľa normy ČSN EN ISO 6892-1, kde sú ako najmenšie štandardné (normované) kruhové skúšobné telesá definované tyče s počiatočným priemerom prierezu $d_0 = 5$ mm, by sa dalo uvažovať, že pod touto hranicou sú to už „malé“ alebo „zmenšené“ skúšobné telesá. Za predpokladu dodržania pomernosti skúšobných telies by sa dali pokladať telesá s hodnotou d_0 nižšou ako 4 mm ako miniatúrne tyče, s čím by súhlasila aj norma DIN 50125. V norme ASTM E8(M) sú ako „malé“ skúšobné telesá úmerné štandardným uvedené všetky s hodnotou $d_0 = 9$ mm a nižšou, pričom tyče s $d_0 = 2,5$ mm by sa už dali považovať za miniatúrne [8].

3.1 Teoretický vplyv veľkosti vzoriek na výsledky skúšky ťahom

Cieľom je dopracovať sa k hodnotám mechanických vlastností porovnateľným s výsledkami z ťahových skúšok štandardných skúšobných telies pri minimálnom objeme materiálu v mernej časti miniatúrnej skúšobnej vzorky. Jedná sa hlavne o medzu pevnosti, medzu klzu a ťažnosť.

Miniaturizácia vzoriek spôsobuje tzv. „size effect“ alebo „scaling effect“, ktorý predstavuje vplyv rozmerov a geometrie miniatúrnych vzoriek na správanie materiálu počas ťahovej skúšky. V rámci mechaniky je tento efekt limitovaný na závislosť pevnosti materiálu na priereze vzorky, avšak v skutočnosti nezávisí len na veľkosti a geometrii vzorky, ale aj na mikroštruktúre a z nej plynúcej anizotropii vlastností, veľkosti, tvare a orientácii zŕn, mikroštruktúrnej a chemickej nehomogenite, rozmiestnení precipitátov a ich veľkosti, kryštalografickom usporiadaní atómov, stave povrchu vzorky, technológii výroby vzorky a zbytkových napätiach [12, 13].

Ďalším problémom pri používaní miniatúrnych skúšobných vzoriek je spoľahlivosť a reprodukovateľnosť výsledkov. To viedlo k množstvu paralelných štúdií v rámci mernej dĺžky, prierezu a hrúbke skúšobnej tyče, ďalej v rámci veľkosti zrna a počtu zŕn v priereze

vzorky, a taktiež v oblasti technológie výroby skúšobných telies, zaťažovacieho rámu strojov a podmienok skúšky. Už na začiatku 80-tych rokov sa objavili informácie, že hodnoty medze pevnosti a medze klzu boli porovnateľné, avšak hodnoty ťažnosti neboli ešte optimalizované. Fülöp a kol. [13] skúmali vplyv veľkosti zo štúdie zŕn v ultratenkých kovových pásoch a zistili, že vývoj deformačného napätia počas deformácie závisí na počte zŕn v smere hrúbky materiálu. Horná medza klzu a deformačné spevnenie tiež klesajú so znižujúcou sa hrúbkou materiálu [13].

Dôležitou otázkou pri skúšaní miniatúrnych vzoriek je optimalizácia minimálneho potrebného objemu materiálu v mernej časti skúšobnej tyče tak, aby boli výsledky porovnateľné so štandardnými. Fülöp a kol. [13] taktiež uvádzajú, že vzhľadom na odlišnú orientáciu zŕn v ploche prierezu skúšaného kovového pásu nie je deformácia rovnomerná ani pri homogénnych podmienkach zaťažovania. Vo viacerých štúdiách je uvedené, že celkové predĺženie skúšobných vzoriek je menšie v porovnaní s ťažnosťou štandardných vzoriek, najmä pri zvyšovaní pomeru mernej dĺžky k mernému prierezu. Taktiež pri konštantnom priereze sú ťažnosť a Youngov modul silne závislé na mernej dĺžke skúšobného telesa [13].

Podobnosť geometrie skúšobných vzoriek s geometrickými tvarmi uvádzanými v normách je ďalším dôležitým parametrom. Rovnako ako v prípade štandardných skúšobných vzoriek, aj pri miniatúrnych sa výsledné ťažnosti líšia z dôvodu rozmanitosti ich tvarov a veľkostí. Pre porovnateľné hodnoty ťažnosti je potrebné, aby boli skúšobné vzorky geometricky podobné, takisto ako je to pri pomere L_0/d_0 pre kruhové vzorky a $L_0/\sqrt{S_0}$ pre ploché vzorky. Je zrejmé, že podobné vzťahy budú potrebné aj v prípade miniatúrnych skúšobných vzoriek [8].

Meranie ťažnosti pozostáva z dvoch častí. Prvou je rovnomerné predlžovanie až do momentu vytvorenia krčka, ktoré závisí hlavne na metalurgickom stave materiálu a druhou je lokalizované predlžovanie po vytvorení krčka. Na predlžovaní krčka sa podieľa veľkosť a tvar skúšobnej vzorky. Platí, že čím je menšia merná dĺžka, tým je väčší vplyv lokalizovanej deformácie v krčku na celkové predĺženie mernej dĺžky. Z uvedeného vyplýva, že rozdiel medzi konečnou a počiatočnou dĺžkou skúšobnej tyče je súčtom rovnomerného predĺženia a lokálneho predĺženia v oblasti krčka. Na základe mnohých pokusov o vysvetlenie rozdelenia deformácie pri skúške ťahom sa prišlo k záveru, že geometricky podobné vzorky vykazujú geometricky podobné oblasti krčka [8].

Z dôvodu náročnej výroby miniatúrnych skúšobných telies nemusia tieto vzorky reprezentovať štandardné vzorky. Či už sa jedná o brúsenie, leštenie alebo elektroiskrové obrábanie, výsledky môžu byť značne ovplyvnené poškodením skúšobného telesa počas výrobného procesu, ktoré má vplyv na celý objem materiálu vzorky. Príprava skúšobnej vzorky a kvalita jej povrchu sú významné parametre, ktoré by mali byť dôkladne normované [12].

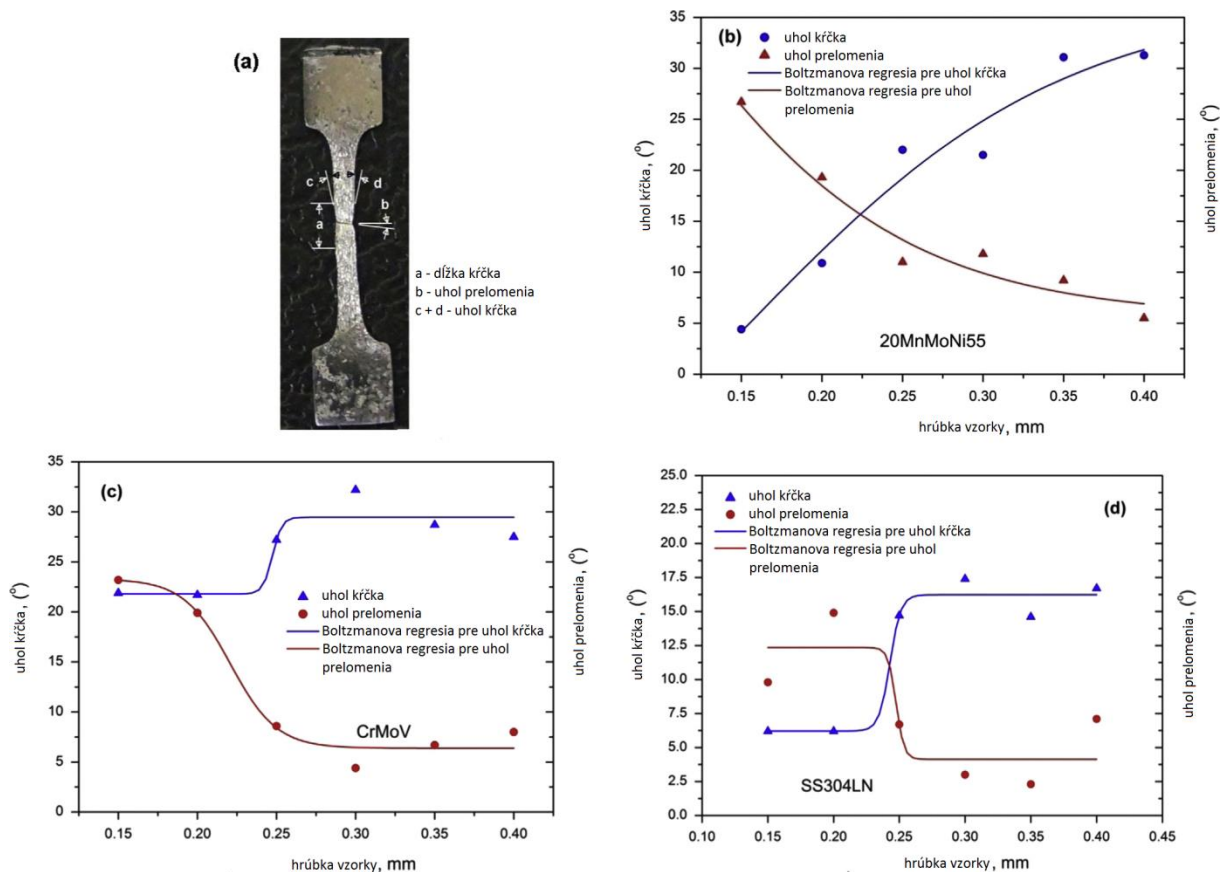
Problémom samotných miniatúrnych skúšobných tyčí je obmedzená veľkosť upínacích hláv. V prípade plochých skúšobných tyčí je výhodnejšie upnutie pomocou ozubených klinov namiesto upnutia čapom z toho dôvodu, že diery pre čapy musia byť vyrobené na vzorke s dostatočnou rozmerovou a pozičnou presnosťou, čo je nie vždy jednoduchou úlohou. Taktiež sa tieto diery môžu začať deformovať počas skúšky, a tým by nemuseli byť výsledné hodnoty predĺženia zaručene správne.

Miniatúrne veľkosti skúšobných vzoriek neumožňujú použitie bežných mechanických extenzometrov na meranie deformácie a hodnoty posuvu priečnika môžu spôsobiť veľký rozptyl meraní v dôsledku kratšej dĺžky oblasti křčka. Z toho dôvodu sa zavádzajú nové technológie aj v oblasti bezkontaktných zariadení na meranie deformácie. Taktiež v oblasti rozlíšenia dynamometrov je zaznamenávaný určitý pokrok.

Kumar a kol. [11] použili pri ich výskume, zaoberajúcom sa optimalizáciou hrúbky miniatúrnych skúšobných vzoriek pre vyhodnotenie mechanických charakteristík získaných z ťahových skúšok, ploché skúšobné tyče rovnakej šírky (1 mm), ale rôznych hrúbok (od 0,15 do 0,4 mm). Zistili, že tenšie vzorky sa porušujú skôr v porovnaní s tými hrubšími, v dôsledku čoho vykazovali nižšie hodnoty pevnostných charakteristík a ťažnosti. Grafy na obr. 3.1 znázorňujú závislosti uhlu křčka a uhlu prelomenia na hrúbke vzoriek pre jednotlivé testované materiály (body sú preložené Boltzmanovou regresiou, t.j. nelineárna regresia dvojparametrovou krivkou).

Uhol křčka predstavuje odpor materiálu počas tvorby křčka – čím je väčší uhol křčka, tým je väčší odpor materiálu voči porušeniu. Takisto tento uhol indikuje aj tvárnu povahu lomu a dostatočný objem materiálu v mernej časti vzorky, potrebný pre odpor materiálu voči tvorbe křčka (zreteľnejší pri hrubších vzorkách). V prípade nedostatku materiálu v mernej časti vzorky sa vzorky porušujú skôr a vykazujú štiepny typ lomu. Druhým merítkom pre posúdenie dostatočného objemu materiálu v mernej časti vzorky je uhol prelomenia – čím väčší je tento uhol, tým viac je mechanizmus lomu strihový. Posledným kritériom pre hodnotenie dostatku materiálu v mernej časti vzorky je dĺžka křčka. V prípade tenších vzoriek sú dĺžky křčkov menšie pre všetky tri materiály, čo naznačuje nedostatočný objem materiálu v mernej časti vzorky, ktorý by mohol potláčať skoré tvorenie křčka.

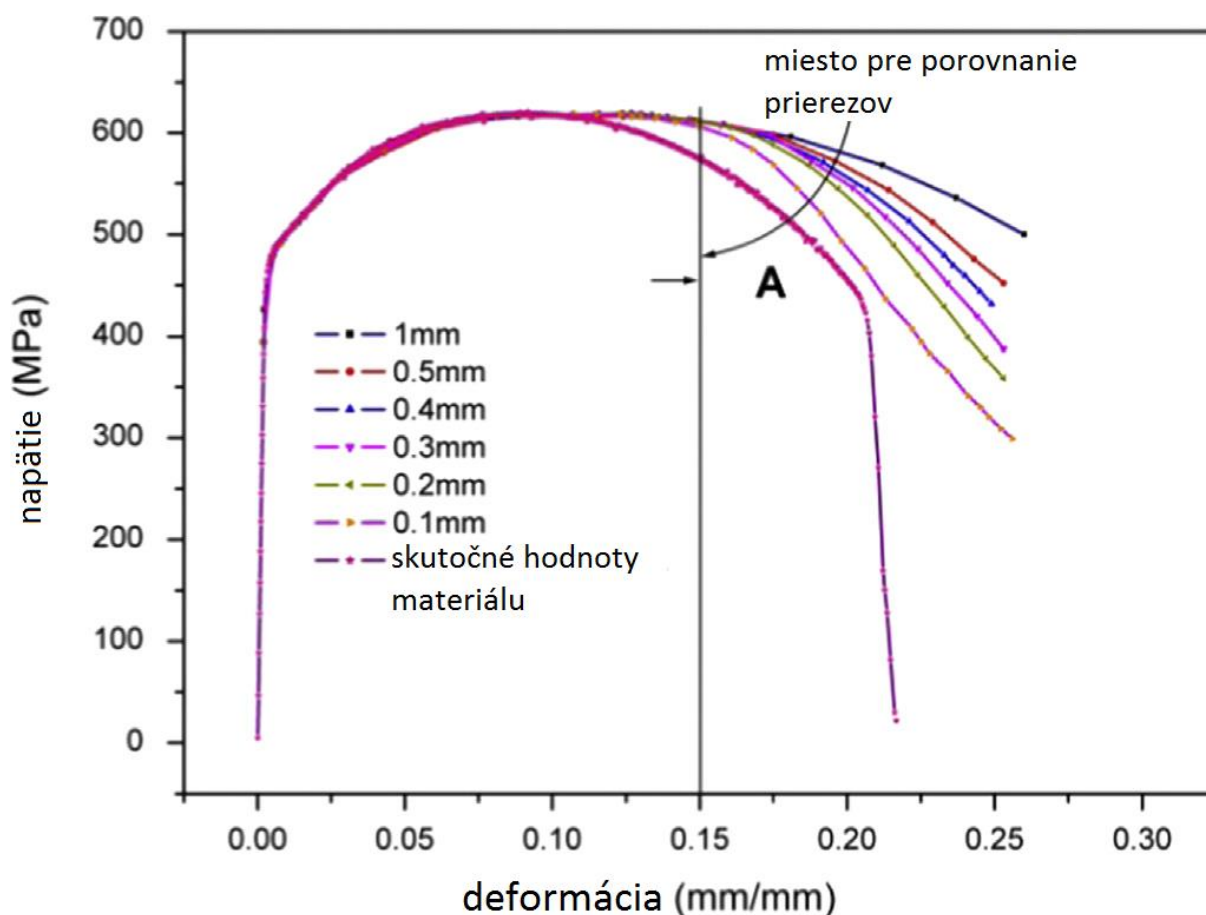
Tieto tri parametre, menovite uhol křčka, uhol prelomenia a dĺžka křčka, stanovujú požiadavky na minimálnu hrúbku mernej časti miniatúrnej skúšobnej vzorky pre skúšku ťahom.



Obr. 3.1 a) označenie uhlov na porušenej skúšobnej vzorke b) c) d) grafy závislostí týchto uhlov na hrúbke vzoriek pre tri rôzne materiály, prevzaté a upravené z [11]

Z pohľadu fraktografie, ktorej sa tiež venovali Kumar a kol. [11], sa zdala byť morfológia lomovej plochy jednotlivých hrúbok materiálu pre všetky tri materiály veľmi podobná. Avšak na základe dutín a vláknitého charakteru lomových plôch usúdili, že sa odpor materiálu voči lomu zvyšuje so zväčšovaním hrúbky vzoriek. To má za následok zvýšenie ťažnosti a pevnostných charakteristík. Taktiež sa zistilo, že so zvyšovaním pomeru hrúbka/veľkosť zrna (resp. t/d) zostávajú hodnoty medze klzu, medze pevnosti a rovnomerného predĺženia takmer konštantné pri hodnote hrúbky vzorky približne 0,25 mm, zatiaľ čo celkové predĺženie vzoriek sa ďalej zvyšuje. Príčinou tohto pokračujúceho rastu celkového predĺženia vzoriek väčších hrúbok je dostupnosť väčšieho objemu materiálu v mernej časti vzorky, ktorý umožňuje vzorke predlžovať sa až do objemu materiálu v oblasti krčka, ktorý je schopný udržovať rast, ale zároveň predísť porušeniu. Pri užších vzorkách nevydrží tento odpor materiálu voči lomu tak dlho ako pri vzorkách hrubších. Je to z toho dôvodu, že porušenie užších vzoriek je založené na strihovom mechanizme a hrubšie sa porušujú na základe vzniku dutín a ich vzájomnom spájaní. Mechanizmus plastickej deformácie bol ďalej skúmaný z hľadiska zmeny stupňa deformačného spevnenia n v závislosti na pomere t/d . Prišlo sa k záveru, že so zvyšujúcou sa hodnotou pomeru t/d hodnoty n narastajú a pri určitej hodnote pomeru t/d sa napokon ustália a zostávajú konštantnými.

Na obr. 3.2 sú zaznamenané ťahové diagramy miniatúrnych plochých skúšobných vzoriek pre jednotlivé hrúbky skúšobných tyčí.



Obr. 3.2 Ťahové diagramy pre rôzne hrúbky skúšobných vzoriek [11]

Z obr. 3.2 je vidieť, že ťahové krivky miniatúrnych skúšobných vzoriek sa zhodujú s napätovo-deformačnou závislosťou štandardnej skúšobnej vzorky až po medzu pevnosti. Za medzou pevnosti sa mení chovanie materiálu pri skúške ťahom vplyvom znižujúcej sa hrúbky skúšobnej tyče, najmä pri hrúbkach menších ako 0,3 mm. Pre porovnanie ťahových kriviek pre rôzne hrúbky skúšobných tyčí je zvolený bod A, kde sa ešte tieto závislosti pomerne zhodujú s experimentálnymi hodnotami. Pri hrúbkach 0,1 mm a 0,2 mm je zrejmy značný pokles pevnosti v porovnaní s ostatnými hrúbkami. Tento jav je spôsobený odlišnosťou trojosových napätí vzniknutých v priereze v oblasti kĺčka pri rôznych hrúbkach a taktiež nedostatočným objemom materiálu, ktorý by mohol odporovať zaťaženiu. Veľké lokalizované deformácie v oblasti kĺčka pri hrúbke 0,1 mm vedú k skoršiemu vzniku mikrotrhín a poklesu pevnosti.

Všetky spomenuté poznatky a výsledky z výskumov poukazujú na užitočnosť technológie miniatúrnych vzoriek. Pre plné využitie tohto potenciálu je však potrebné najprv štandardizovať samotnú techniku takýchto skúšok a osvojiť si postupy vyhodnocovania mechanických vlastností pomocou skúšok vykonaných na miniatúrnych skúšobných telesách [12].

4 Experimentálna časť

Na začiatku celého experimentu sa dali na zákazku z vhodne zvolenej ocele vyhotoviť štandardné a miniatúrne skúšobné telesá pre skúšku ťahom (súčasťou objednávky bola aj nepotrebná časť materiálu z polotovaru, ktorým bola tyč). Experimentálna časť spočívala v spektrálnej analýze chemického zloženia tohto kusu materiálu a následne z výroby metalografickej vzorky z výbrusu daného materiálu. Na tejto vzorke bola neskôr pozorovaná a hodnotená mikroštruktúra materiálu. Na dvoch druhoch skúšobných vzoriek bola vykonaná skúška ťahom na dvoch skúšobných strojoch. Ťahová skúška bola potom vyhodnotená a analyzovaná prostredníctvom ťahových diagramov a výsledných hodnôt mechanických charakteristík, ktoré boli na konci medzi sebou porovnané. V priebehu experimentu bola ešte prevedená fraktografická analýza lomových plôch oboch druhov vzoriek. Cieľom bolo zistiť, či je možná implementácia skúšky ťahom na miniatúrne skúšobné telesá, príp. v akom rozsahu sa výsledky zhodujú s ťahovou skúškou štandardných skúšobných telies.

4.1 Charakteristika experimentálneho materiálu

Materiál, ktorý bol použitý na výrobu skúšobných vzoriek má označenie X5CrNiCuNb16-4 (1.4542, v americkej norme ASTM je to Type 630) a je to vytvrditeľná korozivzdorná chróm-niklová martenzitická oceľ v stave po normalizačnom žíhaní. Táto oceľ je magnetovateľná a používa sa na výrobu korozivzdorných súčiastok s vysokou pevnosťou pracujúcich do prevádzkovej teploty 315 °C, špeciálne na skrutky a vretená v armatúrach a na kolesá a veká kompresorov. Polotovarom pre výrobu skúšobných vzoriek bola tyč, z ktorej prierezu bola prevedená spektrálna analýza chemického zloženia. Chemické zloženie je uvedené v tab. 4.1.

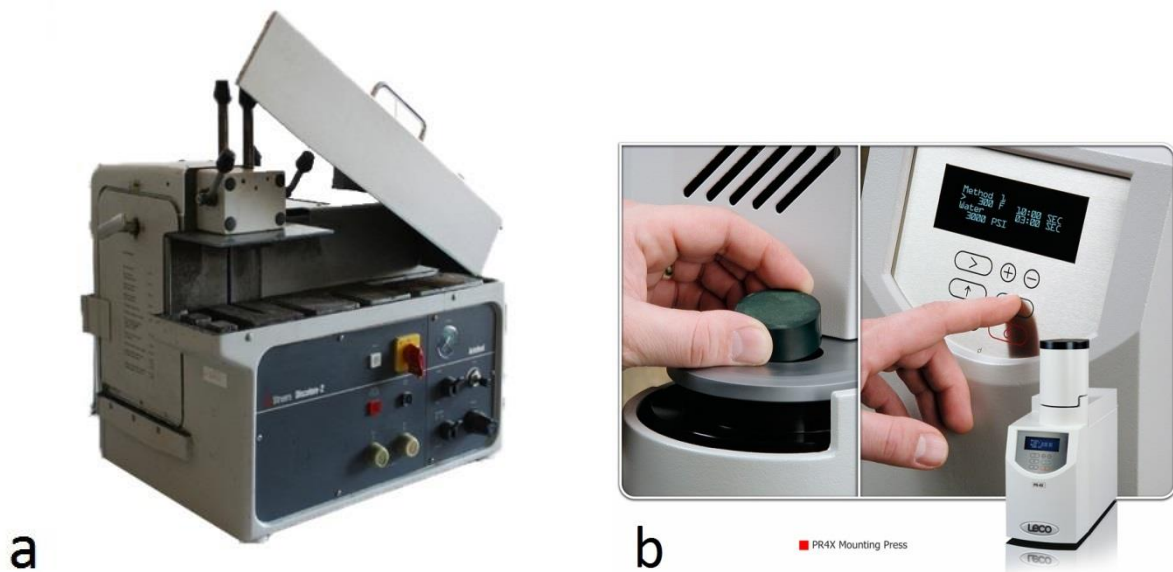
Tab. 4.1 Chemické zloženie zistené spektrálnou analýzou

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Co	Sn	Sb	Nb
hm. %	0,03	0,6	0,38	0,030	0,001	15,5	4,1	0,11	4,3	0,024	0,04	0,02	0,03	0,25

4.2 Použité metódy a prístroje

4.2.1 Metalografia

Z časti polotovaru bola odrezaná na poloautomatickej vodou chladenej píle Struers Discotom-2 (obr. 4.1a [14]) vzorka, ktorá bola následne zaliata do epoxidovej živice s použitím lisu Leco PR-4X (obr. 4.1b [15]). Parametre zalievania a vytvrdzovania boli nasledovné: čas 8 min, teplota 170 °C a tlak 21000 kPa.



Obr. 4.1 a) poloautomatická píla Struers Discotom-2 [14] b) lis Leco PR-4X [15]

Následne sa zaliata vzorka brúsila a leštila na poloautomatických rotačných brúskach chladených vodou od firmy Struers (obr. 4.2 [16]). Postupnosť jednotlivých jemností brúsnych papierov bola nasledovná: 220, 320, 500, 800, 1000; pričom chladiacou kvapalinou a zároveň aj zmáčadlom bola voda. Leštenie prebiehalo na magnetických leštiacich diskoch s veľkosťami zrna $3\ \mu\text{m}$ a $1\ \mu\text{m}$ s použitím príslušnej diamantovej pasty ako suspenziou, zmáčadlom bol etanol. Parametre pri brúsení a leštení: čas 3 až 3,5 min, rýchlosť 250 ot./min.



Obr. 4.2 Poloautomatická rotačná brúska Struers PEDEMIN [16]

Pred samotným pozorovaním štruktúry na svetelnom inverznom mikroskope Olympus GX51 (obr. 4.3a [17]) prebehlo ešte leptanie vzorky, použité bolo leptadlo Marble.



Obr. 4.3 Svetelný inverzný mikroskop Olympus GX51 [17]

4.2.2 Fraktografická analýza lomových plôch

Fraktografická analýza lomových plôch bola vykonaná pomocou stereolupy Olympus SZ61 (obr. 4.4 [18]).

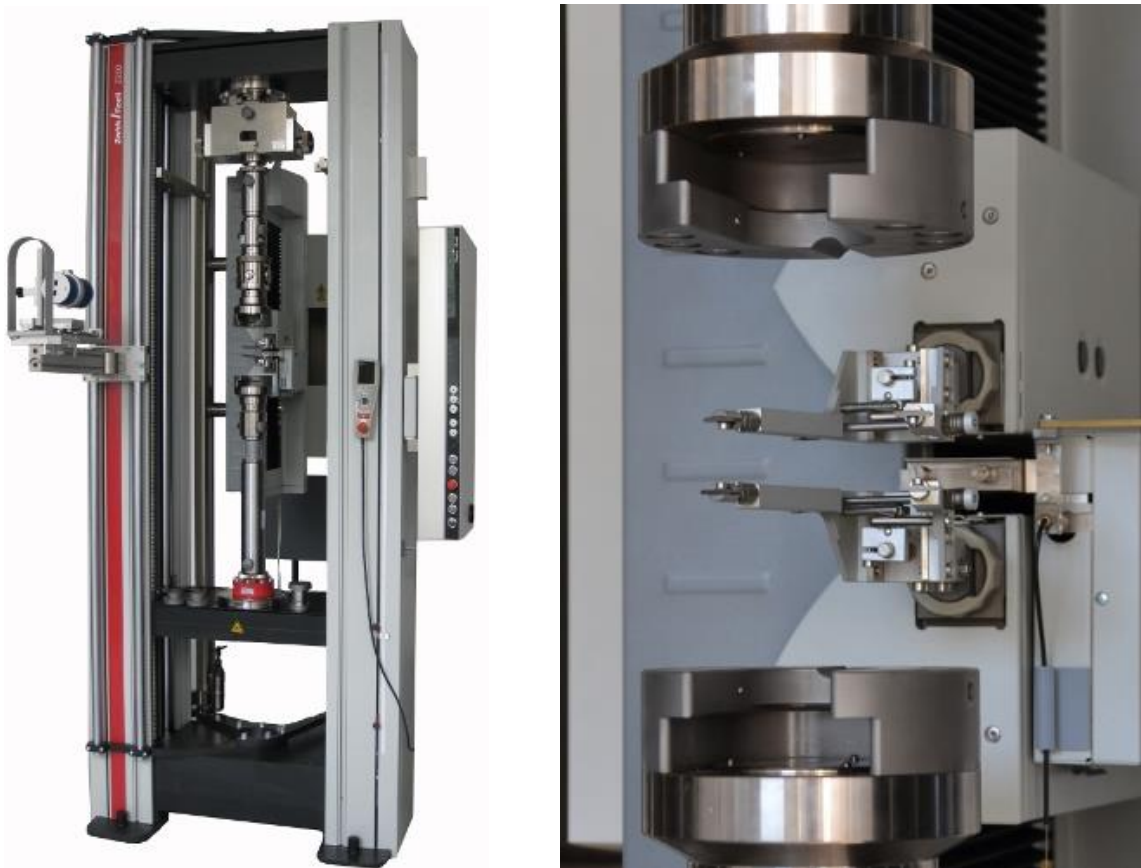


Obr. 4.4 Stereolupa Olympus SZ61 [18]

4.2.3 Skúška ťahom

Ťahové skúšky boli vykonané na dvoch ťhacích strojoch.

Štandardné normované vzorky sa testovali na univerzálnom elektromechanickom stroji Zwick AllroundLine Z250 (obr. 4.5 [19]) so silovou hlavou 150 kN. K dispozícii je univerzálny extenzometer so snímačmi deformácie. Pri jeho rozsahu rýchlostí zaťažovania od 0,0005 do 600 mm/min bola zvolená rýchlosť pohybu priečnika $v = 1$ mm/min, pričom táto rýchlosť je nezávislá od zaťažovacej sily. Výhodou stroja je, že na začiatku každého merania si automaticky nastaví nulový bod [19, 20].



Obr. 4.5 Skúšobný stroj Zwick AllroundLine Z250 [19]

Miniaturne vzorky boli skúšané na univerzálnom servohydraulickom stroji Instron 8801 (obr. 4.6 [21]). Rozsah zaťažovacej axiálnej sily je do 100 kN. Rýchlosť zaťažovania bola 0,25 mm/min [21].

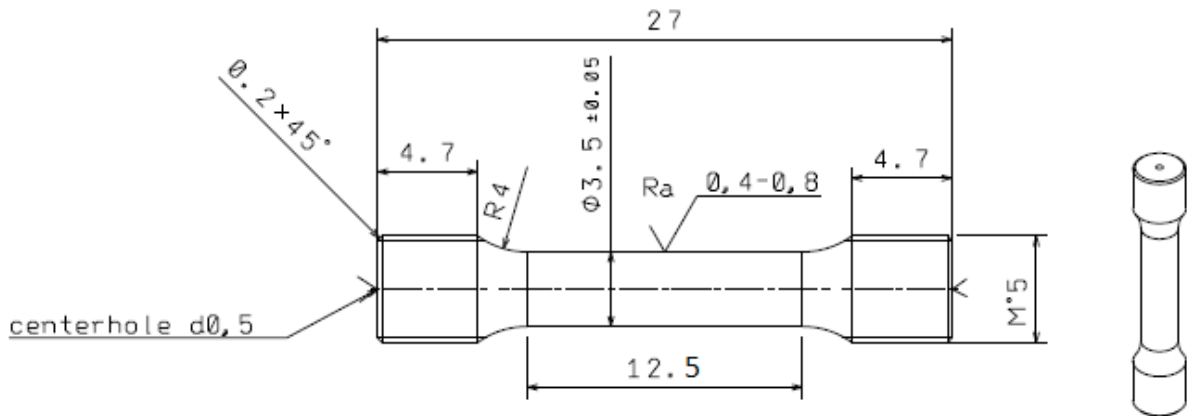


Obr. 4.6 Skúšobný stroj Instron 8801 [21]

Rozmery a geometria štandardných vzoriek boli zvolené podľa platnej verzie normy ČSN EN ISO 6892-1 [8]. V tomto prípade bol zvolený počiatkový priemer kruhového prierezu skúšobnej tyče $d_0 = 6$ mm a aby tyč spĺňala podmienky pre normou uvádzanú

pomernú skúšobnú tyč, tak jej počiatočná merná dĺžka bola vypočítaná na základe vzťahu (15) pre pomer $k = 5,65$. Z toho dôvodu bola zvolená počiatočná merná dĺžka $L_0 = 30$ mm. Túto kombináciu rozmerov priamo uvádza aj norma DIN 50125.

Miniaturne vzorky boli vyrobené na základe výkresu, ktorý je uvedený na obr. 4.7. Tolerancie rozmerov sú platné podľa normy ČSN ISO 2768m (Všeobecné tolerance. Nepředepsané mezní úchylky délkových a úhlových rozměrů).



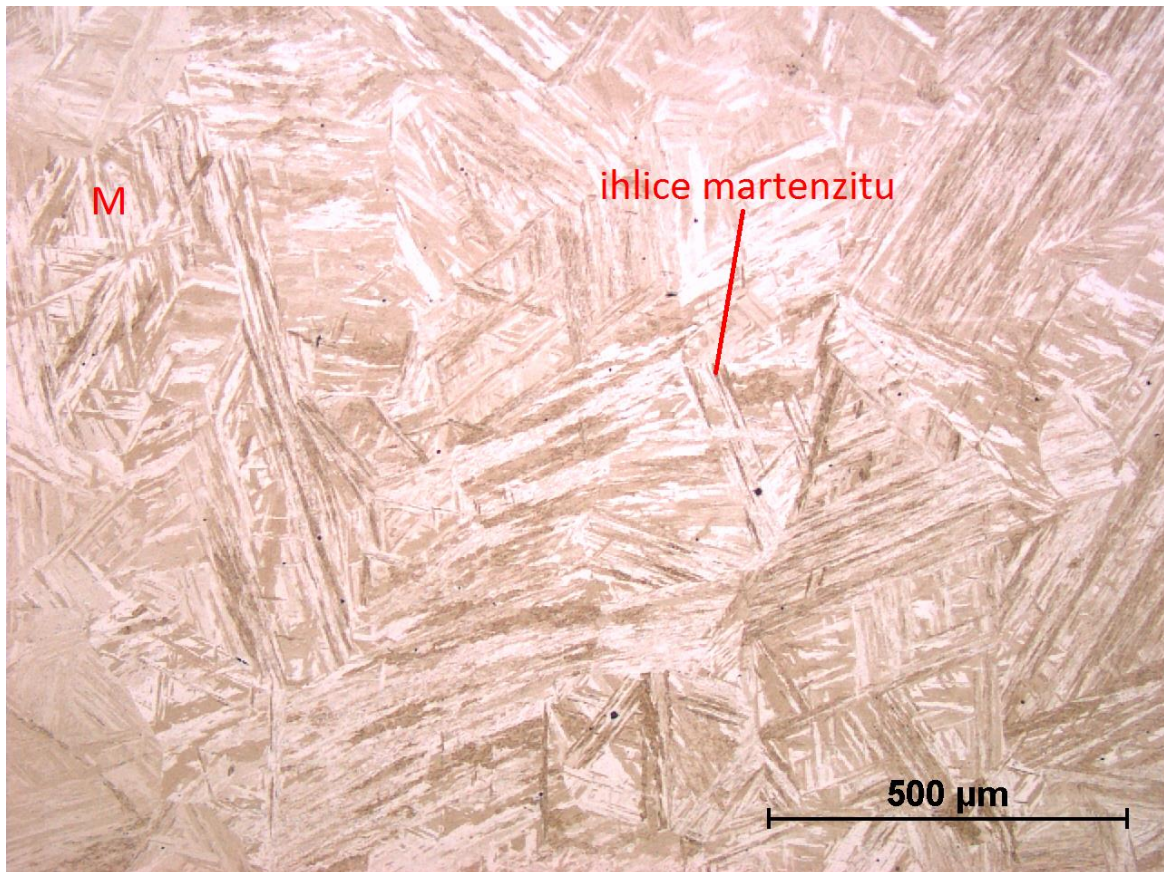
Obr. 4.7 Výkres miniaturnej vzorky

Z uvedených informácií je možné dopočítať podľa vzťahu (26) rýchlosti deformácie pre oba prípady skúšobných tyčí. Po dosadení hodnôt v príslušných jednotkách je deformačná rýchlosť $\dot{\epsilon} = 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ pre štandardné skúšobné vzorky a $\dot{\epsilon} = 3,3 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ pre miniaturne skúšobné vzorky. Je teda vidieť, že rýchlosti deformácie boli pri oboch prípadoch rádovo porovnateľné.

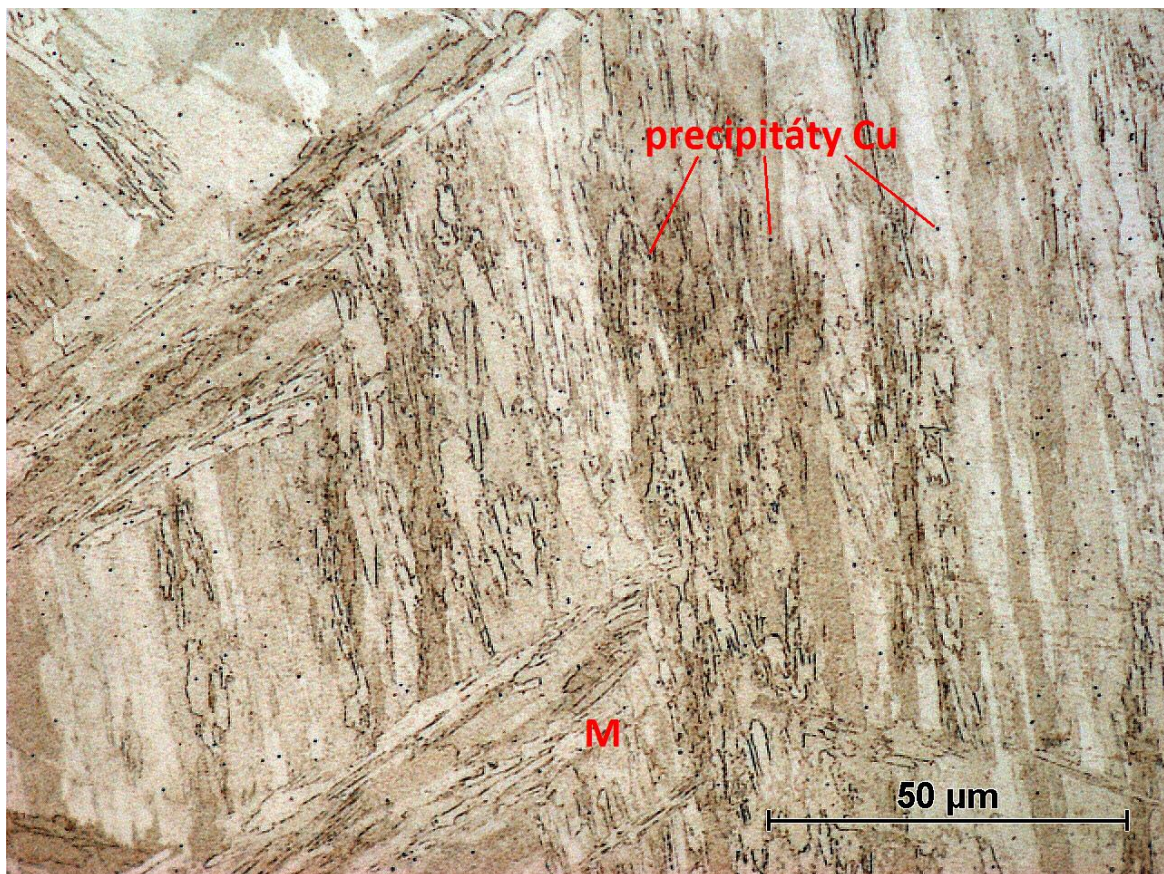
4.3 Výsledky

4.3.1 Metalografia

Po vyvolaní štruktúry bolo možné pozorovať typickú ihlicovitú martenzitickú mikroštruktúru (obr. 4.8) s jemnými precipitátmi intermetalických fáz medi (obr. 4.9).



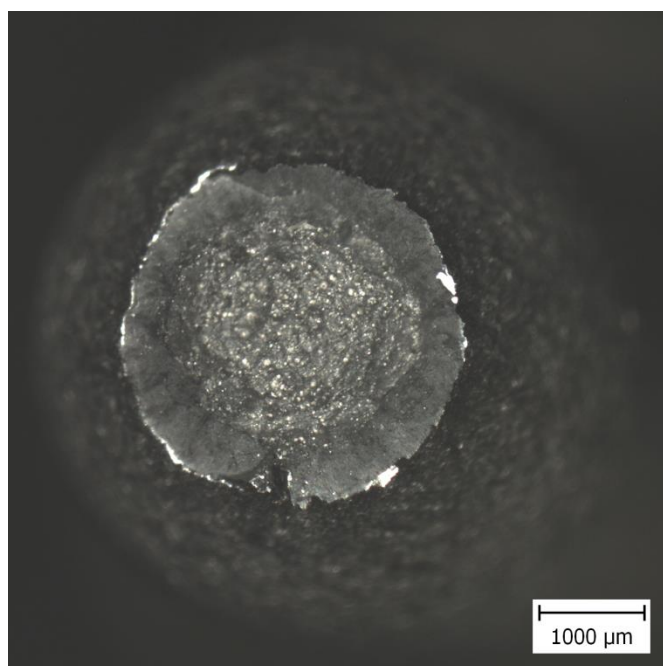
Obr. 4.8 Martenzitická ihlicovitá štruktúra



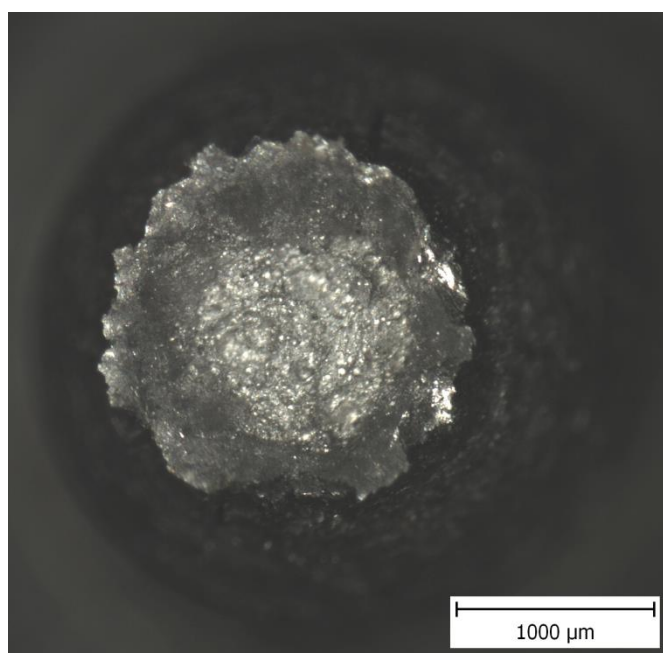
Obr. 4.9 Ihlice martenzitu s jemnými precipitátmi Cu

4.3.2 Fraktografická analýza lomových plôch

Lomová plocha normovanej a miniatúrnej porušenej skúšobnej vzorky je na obr. 4.10, resp. na obr. 4.11.



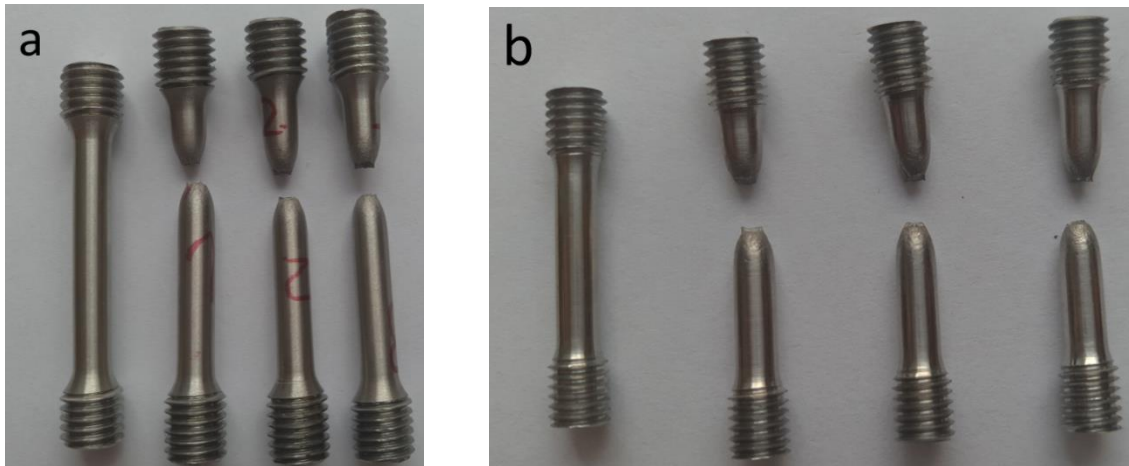
Obr. 4.10 Lomová plocha normovanej vzorky



Obr. 4.11 Lomová plocha miniatúrnej vzorky

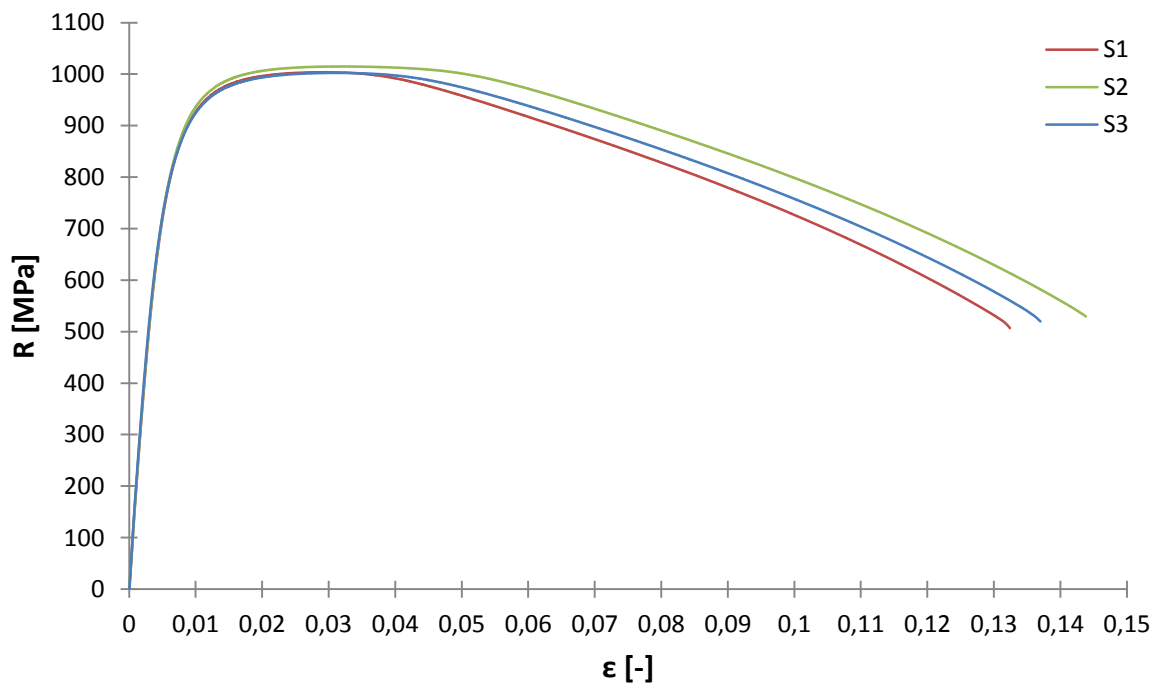
4.3.3 Skúška ťahom a porovnanie charakteristík

Na nasledujúcom obrázku sú zachytené použité štandardné a miniatúrne skúšobné tyče pred a po ťahovej skúške (obr. 4.12).



Obr. 4.12 a) štandardné b) miniatúrne skúšobné tyče pred a po skúške ťahom

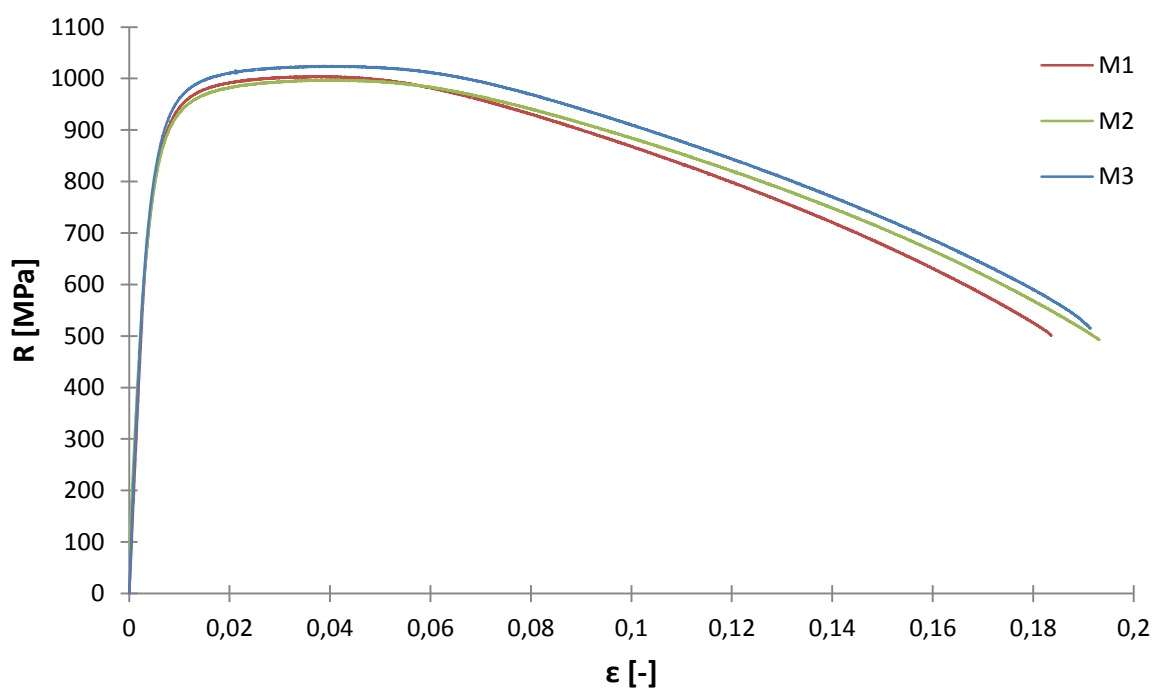
Na obrázkoch a v tabuľkách, ktoré budú nasledovať, značí „S“ štandardnú vzorku a „M“ vzorku miniatúrnu. Ťahové diagramy štandardných skúšobných vzoriek sú uvedené na obr. 4.13 a zistené mechanické charakteristiky jednotlivých vzoriek sú uvedené v tab. 4.2. Na obr. 4.14 sú uvedené ťahové diagramy miniatúrnych skúšobných vzoriek a tab. 4.3 obsahuje zistené mechanické charakteristiky jednotlivých vzoriek. Porovnanie závislostí získaných zo štandardných a miniatúrnych skúšobných tyčí je znázornené na obr. 4.15 a prehľadné porovnanie získaných mechanických charakteristík materiálu pri ťahovej skúške štandardných a miniatúrnych skúšobných vzoriek je uvedené v tab. 4.4.



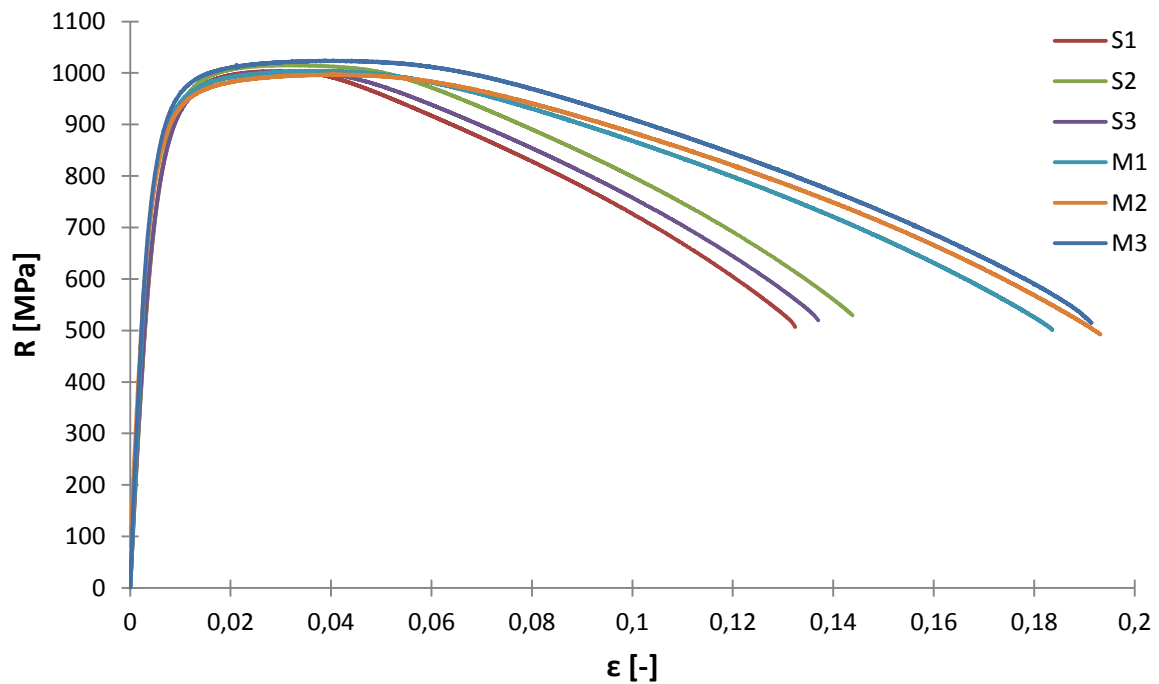
Obr. 4.13 Ťahový diagram jednotlivých štandardných skúšobných tyčí

Tab. 4.2 Mechanické charakteristiky štandardných skúšobných vzoriek

S	d_0 [mm]	L_0 [mm]	E [GPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_{gt} [%]	A [%]	A_t [%]	Z [%]
1	6,0	30,0	188	803	1004	2,4	2,9	13,5	13,7	73,3
2	6,0	30,0	192	808	1015	2,7	3,2	14,7	14,8	69,6
3	6,0	30,0	201	787	1002	2,5	3,0	13,9	14,1	69,4
\bar{x}	6,0	30,0	194	799	1007	2,5	3,1	14,0	14,2	70,8
s	$5,8 \cdot 10^{-4}$	$5,7 \cdot 10^{-3}$	4	6	4	0,1	0,1	0,3	0,3	1,3

**Obr. 4.14** Ťahový diagram jednotlivých miniatúrnych skúšobných vzoriek**Tab. 4.3** Mechanické charakteristiky miniatúrnych skúšobných vzoriek

M	d_0 [mm]	L_0 [mm]	E [GPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_{gt} [%]	A [%]	A_t [%]	Z [%]
1	3,5	12,5	208	847	1004	3,4	3,8	20,5	20,5	73,1
2	3,5	12,5	222	826	998	3,6	4,2	20,7	20,6	73,0
3	3,5	12,5	218	858	1025	3,5	3,9	20,7	20,7	72,4
\bar{x}	3,5	12,5	216	844	1009	3,5	4,0	20,6	20,6	72,8
s	$7,5 \cdot 10^{-3}$	0,0	4	9	8	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2



Obr. 4.15 Porovnanie ťahových diagramov všetkých skúšobných tyčí

Tab. 4.4 Porovnanie mechanických charakteristík materiálu

	d_0 [mm]	L_0 [mm]	E [GPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_{gt} [%]	A [%]	A_t [%]	Z [%]
S	6,0	30,0	194	799	1007	2,5	3,1	14,0	14,2	70,8
M	3,5	12,5	216	844	1009	3,5	4,0	20,6	20,6	72,8

5 Diskusia výsledkov

Z hľadiska mikroštruktúry vykazoval použitý materiál očakávanú hrubozrnnú ihlicovitú martenzitickú štruktúru s jemnými precipitátmi intermetalických fáz medzi s rovnomernou distribúciou.

Lomové plochy všetkých porušených vzoriek, normovaných aj miniatúrnych, vykazovali typický dutinový (kalíškový) lom, ktorý je charakteristický pre húževnaté materiály. Charakter lomových plôch bol veľmi podobný pri oboch typoch skúšobných vzoriek, nevykazoval teda morfológické rozdiely. Na všetkých testovaných vzorkách sa podľa očakávania vytvoril pred porušením viditeľný křčok.

Výsledná hodnota modulu pružnosti v ťahu bola v porovnaní s hodnotou uvádzanou v materiálovom liste ($E = 200$ GPa) v prípade štandardných skúšobných vzoriek nižšia – približne 194 GPa. V prípade miniatúrnych skúšobných vzoriek bola vyššia, konkrétne 216 GPa. Hodnoty modulu pružnosti v ťahu boli teda v prípade miniatúrnych skúšobných telies vyššie o približne 11 % v porovnaní so štandardnými telesami.

Vzhlľadom na to, že materiál nevykazuje výraznú medzu klzu, bola meraná zmluvná medza klzu pre trvalú deformáciu 0,2 % L_0 , t.j. $R_{p0,2}$. V tomto prípade boli opäť nepatrne vyššie hodnoty zistené pri skúšaní miniatúrnych skúšobných tyčí o približne 6 % od štandardných skúšobných telies.

Zistené hodnoty medze pevnosti boli v oboch prípadoch nižšie v porovnaní s uvádzanou maximálnou zaručenou medzou pevnosti $R_m = \max. 1275$ MPa, pohybovali sa okolo hodnoty $R_m = 1000$ MPa. Dosiagnuté medze pevnosti boli pri oboch typoch vzoriek skoro totožné (rozdiel približne 0,2%).

Z hľadiska deformačných charakteristík vykazovali miniatúrne skúšobné vzorky vyššie hodnoty všetkých sledovaných ťažností: v prípade ťažnosti pri maximálnej zaťažovacej sile (na medzi plastickej nestability) A_g to bol takmer 1,5násobok hodnôt štandardných skúšobných vzoriek, celková ťažnosť pri maximálnej zaťažovacej sile A_{gt} bola vyššia o 1/3 v porovnaní s hodnotami štandardných skúšobných telies, pri celkovej ťažnosti v momente porušenia A_t a v prípade hodnoty ťažnosti po porušení A bol nárast hodnôt miniatúrnych skúšobných telies opäť 1,5násobný. Z hľadiska ťažnosti splňali oba typy porušených vzoriek minimálnu hodnotu uvádzanú v materiálovom liste $A = 5$ %, dokonca boli 3krát, resp. 4krát vyššie, keďže vykazovali hodnoty 14 % a 20,6 %. Percentuálne rozdiely absolútnych hodnôt jednotlivých ťažností je vidieť z tab. 4.4. Hodnoty kontrakcií Z sa líšili menej, avšak aj tu dosahovali miniatúrne skúšobné tyče vyššie hodnoty zúženia s nárastom o takmer 3 %.

Hodnoty $R_{p0,2}$ a R_m sú teda pre oba typy vzoriek takmer rovnaké, t.j. dokonale zrovnateľné. Je to dané tým, že ide o pomer zaťažovacej sily k ploche prierezu, a ten sa v podstate pre skúšané vzorky nemení, zatiaľ čo hodnoty ťažností, najmä A_t a A , sa výraznejšie líšia.

V porovnaní ťahových diagramov všetkých skúšobných vzoriek znázornenom na obr. 4.15 je možné vidieť, že pri dosiahnutí približne rovnakých medzí pevností vykazujú miniatúrne skúšobné tyče podstatne väčšie deformácie pred porušením. Zo závislostí na obrázku je vidieť, že tento rozdiel je v určitom prípade až 10 %. Celkovo je však možné zhodnotiť, že ťahové diagramy štandardných a miniatúrnych skúšobných vzoriek sú tvarovo veľmi podobné, výraznejšie sa líšia len za medzou plastickej nestability.

Z uvedeného vyplýva, že implementácia skúšky ťahom na miniatúrne skúšobné telesá je možná po určitej optimalizácii rozmerov a geometrie samotných vzoriek. Výsledky skúšky vykonanej na takýchto skúšobných telesách sú do veľkej miery porovnateľné - celkovo sa ťahové diagramy a výsledné mechanické charakteristiky pri použití štandardných a miniatúrnych skúšobných vzoriek zhodovali v pomerne veľkom rozsahu. Väčšie rozdiely boli prítomné len v prípade ťažností, čo môže byť spôsobené vplyvom niektorého z faktorov spomenutých v kapitole 3, napríklad vplyvom mernej dĺžky skúšobnej tyče, ktorá bola v prípade miniatúrnych skúšobných telies skrátená, tzn. miniatúrne skúšobné tyče neboli pomerné (použité miniatúrne vzorky boli skrátené z hľadiska pomeru L_0/d_0 v porovnaní so štandardnými skúšobnými tyčami, ktoré boli pomerné). Pri kratších merných dĺžkach skúšobných tyčí je vplyv lokalizovanej plastickej deformácie v kĺčku väčší, z toho dôvodu vykazovali použité miniatúrne skúšobné tyče väčšie ťažnosti. Vplyv mernej dĺžky tyče na ťažnosť potvrdil aj experiment.

Záver

Predkladaná práca bola zameraná na analýzu možnosti použitia miniatúrnych skúšobných telies s odlišnými rozmermi a geometriou na plnohodnotnú skúšku ťahom za predpokladu, že výsledky budú porovnateľné s tými, ktoré boli získané pri ťahovej skúške vykonanej na štandardných skúšobných telesách. Po prevedení skúšky ťahom na oboch typoch skúšobných telies boli získané určité výsledky, ktoré bolo potrebné vyhodnotiť a porovnať. Na základe získaných poznatkov a informácií je možné vyvodit' nasledujúce závery:

- z pohľadu fraktografie nevykazujú lomové plochy štandardných a miniatúrnych skúšobných telies žiadne morfológické rozdiely
- ťahové diagramy a mechanické charakteristiky získané ťahovou skúškou štandardných a miniatúrnych skúšobných telies sú vo veľkej miere porovnateľné
- na základe správnosti a reprodukovateľnosti výsledkov z mnohých analýz podobného typu bude pravdepodobne možné v blízkej budúcnosti používať takýto typ ťahovej skúšky vrátane rozmerov a geometrie použiteľných miniatúrnych skúšobných telies

Táto problematika má teda značnú perspektívu do budúcnosti a témou nasledujúceho výskumu by mohla byť napríklad skúška ťahom vykonaná na miniatúrnych skúšobných telesách s inou geometriou.

Zoznam použitej literatúry

- [1] TIMOSHENKO, Stephen. *History of strength of materials: with a brief account of the history of theory of elasticity and theory of structures*. New York: Dover Publications, 1983, x, 452 s. : il. ; 22 cm. ISBN 9780486611877.
- [2] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu. I. 2. opr. a rozš. vyd.* Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, xii, 516 s. : il. ISBN 8072042831.
- [3] VELES, Pavol. *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov*. Bratislava : Praha: Alfa ; SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1985, 408 s. : 362 obr., 8 tab.
- [4] MOLLIKOVÁ, Eva. ZKOUŠENÍ MATERIÁLŮ A VÝROBKŮ. *Ústav materiálových věd a inženýrství* [online]. Brno: FSI VUT v Brně, 2012 [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/zmv/Index.html>
- [5] BELHÁČ, Jakub. *Srovnání vybraných mechanických vlastností slitin hliníku a konstrukčních ocelí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2009, 52 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce Ing. František Vlašic.
- [6] KUHN, H a D MEDLIN. *ASM Handbook. Volume 8: Mechanical Testing and Evaluation*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2000, 8. ISBN 0871703890.
- [7] ŠVEC, Martin. *Přehled zkušebních strojů pro mechanické zkoušky materiálů a konstrukcí na FSI VUT v Brně*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2009, 42 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce Ing. Petr Liškutín.
- [8] ČSN EN ISO 6892-1 (42 0310). *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Český normalizační institut, 2017.
- [9] STODOLA, Martin. *Stanovení mechanických vlastností materiálů svarového spoje na základě měření tvrdosti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2016, 143 s. Disertační práce. Vedoucí práce Ing. Lubomír Junek, Ph.D.
- [10] KUMAR, Kundan, Arun POOLEERY, K. MADHUSOODANAN, R.N. SINGH, J.K. CHAKRAVARTTY, B.K. DUTTA a R.K. SINHA. Use of Miniature Tensile Specimen for Measurement of Mechanical Properties. *Procedia Engineering* [online]. Elsevier, 2014, 86, 899-909 [cit. 2017-05-29]. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.11.112. ISSN 18777058. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S1877705814020712>
- [11] KUMAR, Kundan, Arun POOLEERY, K. MADHUSOODANAN, R.N. SINGH, Arnomitra CHATTERJEE, B.K. DUTTA a R.K. SINHA. Optimisation of thickness of miniature tensile specimens for evaluation of mechanical properties. *Materials Science & Engineering A* [online]. Elsevier B.V, 2016, 675, 32-43 [cit. 2017-05-29]. DOI: 10.1016/j.msea.2016.08.032. ISSN 09215093. Dostupné z:

- <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0921509316309455>
- [12] OLBRICHT, Jürgen, Marc BISMARCK a Birgit SKROTZKI. Characterization of the creep properties of heat resistant 9–12% chromium steels by miniature specimen testing. *Materials Science & Engineering A* [online]. Elsevier B.V, 2013, **585**, 335-342 [cit. 2017-05-29]. DOI: 10.1016/j.msea.2013.07.067. ISSN 09215093. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S092150931300837X>
- [13] FÜLÖP, T., W.A.M. BREKELMANS a M.G.D. GEERS. Size effects from grain statistics in ultra-thin metal sheets. *Journal of Materials Processing Tech* [online]. Elsevier B.V, 2006, **174**(1), 233-238 [cit. 2017-05-29]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.01.006. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013606000501>
- [14] Struers Discotom-2. *SPECTROGRAPHIC* [online]. Bradford: Spectrographic Limited, 2017 [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: <http://www.spectrographic.co.uk/shop/refurbished/recent-sales-refurbished/struers-discotom-2/>
- [15] PR4X: Mounting Press. *LECO* [online]. Mahape: LECO Instruments India Pvt., 2017 [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: <http://lecoindia.in/products/metallographic-science/mounting/pr4x-mounting-press>
- [16] Struers Pedemin DAP-7 grinding and polishing machine. *Gemini BV* [online]. Apeldoorn: Gemini BV, 2016 [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: <http://www.geminibv.nl/labware/streurs-pedemin-2-specimen-mover-1>
- [17] GX51: Industrial Microscopes. *OLYMPUS* [online]. OLYMPUS CORPORATION, 2017 [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: [http://www.olympus-ims.com/en/microscope/gx51/#!cms\[tab\]=%2Fmicroscope%2Fgx51%2Foverview](http://www.olympus-ims.com/en/microscope/gx51/#!cms[tab]=%2Fmicroscope%2Fgx51%2Foverview)
- [18] SZ61: Industrial Microscopes. *OLYMPUS* [online]. OLYMPUS CORPORATION, 2017 [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: [http://www.olympus-ims.com/en/microscope/sz61/#!cms\[tab\]=%2Fmicroscope%2Fsz61%2Foverview](http://www.olympus-ims.com/en/microscope/sz61/#!cms[tab]=%2Fmicroscope%2Fsz61%2Foverview)
- [19] Když se řekne ZWICK. *FSInfo* [online]. Brno: FSI VUT Brno, 2013 [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: <http://fsinfo.fme.vutbr.cz/index.php/casopis/fsi-zive/45-kdyz-se-rekne-zwick>
- [20] AllroundLine. *Zwick/Roell* [online]. Herefordshire: Zwick Testing Machines, 2017 [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: <http://www.zwick.co.uk/en/products/static-materials-testing-machines/testing-machines-from-5-kn-to-250-kn/allround-line-materials-testing-machines.html>

- [21] 8801 (100kN) Fatigue Testing Systems. *INSTRON* [online]. Norwood: Illinois Tool Works, 2017 [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: <http://www.instron.us/en-us/products/testing-systems/dynamic-and-fatigue-systems/servo-hydraulic-fatigue/8801-floor-model>

Zoznam použitých skratiek a symbolov

Označenie	Legenda	Jednotka
F	zaťažovacia sila	[N]
ΔL	predĺženie	[mm]
R	zmluvné napätie	[MPa]
ε	pomerná deformácia	[-], [%]
σ	skutočné napätie	[MPa]
$\bar{\varepsilon}$	skutočná deformácia	[-], [%]
d_0	počiatočný priemer prierezu	[mm]
d	okamžitý priemer prierezu	[mm]
d_u	priemer prierezu po skúške ťahom	[mm]
S_0	počiatočná plocha prierezu	[mm ²]
S	okamžitá plocha prierezu	[mm ²]
S_u	plocha prierezu po skúške ťahom	[mm ²]
L_0	počiatočná merná dĺžka	[mm]
L	konečná merná dĺžka	[mm]
L_u	merná dĺžka po skúške ťahom	[mm]
ε_{el}	elastická deformácia	[-]
ε_{pl}	plastická deformácia	[-]
ε_c	celková deformácia	[-]
$\bar{\varepsilon}_{el}$	skutočná elastická deformácia	[-]
$\bar{\varepsilon}_{pl}$	skutočná plastická deformácia	[-]
$\bar{\varepsilon}_c$	skutočná celková deformácia	[-]
K	súčiniteľ deformačného spevnenia (pevnostný koeficient)	[MPa]
n	stupeň (exponent) deformačného spevnenia	[-]
α	uhol	[°]

E	modul pružnosti v ťahu (Youngov modul)	[GPa]
R _U	medza úmernosti	[MPa]
R _E	medza pružnosti (elasticity)	[MPa]
R _e	výrazná medza klzu	[MPa]
R _p	medza priet'ážnosti	[MPa]
R _{p0,2}	zmluvná medza klzu	[MPa]
R _{eH}	horná medza klzu	[MPa]
R _{eL}	dolná medza klzu	[MPa]
R _m	medza pevnosti (plastickej nestability)	[MPa]
F _m	maximálna zaťažovacia sila	[N]
R _f	napätie pri porušení	[MPa]
A _g	ťažnosť pri maximálnej zaťažovacej sile	[%]
A _{gt}	celková ťažnosť pri maximálnej zaťažovacej sile	[%]
A _t	celková ťažnosť v momente porušenia	[%]
A	ťažnosť po porušení	[%]
Z	kontrakcia (zúženie)	[%]
a ₀ , a ₁ , a ₂	charakteristické rozmery štvorhranného prierezu	[mm]
b ₀ , b ₁ , b ₂	charakteristické rozmery štvorhranného prierezu	[mm]
k	pomer pre pomerné skúšobné telesá	[-]
ε̇	rýchlosť deformácie	[s ⁻¹]
ε̇ _s	skutočná rýchlosť deformácie	[s ⁻¹]
τ	čas	[s]
v	rýchlosť pohybu priečnika skúšobného stroja	[m.s ⁻¹]
t	hrúbka	[mm]
STN	slovenská technická norma	–
ČSN	česká technická norma	–
DIN	Deutsche Norm	–

ASTM	American Society for Testing and Materials	–
BS	British Standard	–
SS	Svensk Standard	–
EN	European standard	–
CEN	Comité Européen de Normalisation	–
ISO	International Organisation for Standardization	–
MEMS	mikroelektronické mechanické systémy	–
S (v 4. kap.)	štandardná skúšobná tyč	–
M (v 4.kap.)	miniatúrna skúšobná tyč	–
\bar{x}	aritmetický priemer	rôzne
s	smerodajná odchýlka	rôzne

Zoznam obrázkov a tabuliek

Obr. 1.1 Známy akvadukt Pont du Gard postavený za čias starovekého Ríma na území dnešného Francúzska	3
Obr. 1.2 Da Vinciho ťahová skúška oceľového drôtu	4
Obr. 1.3 Galileove ilustrácie a) skúšky ťahom b) skúšky ohybom	4
Obr. 1.4 Havária lode Liberty po krehkom porušení	5
Obr. 2.1 Schéma ťahacieho stroja a) hydraulického b) mechanického	8
Obr. 2.2 Príklad vlastností rôznych kovových materiálov stanovených pomocou skúšky ťahom	10
Obr. 2.3 Porovnanie zmluvného a skutočného ťahového diagramu	12
Obr. 2.4 Zmluvný diagram napätie-deformácia z hľadiska a) etáp b) charakteristík	12
Obr. 2.5 Základné typy ťahových diagramov	13
Obr. 2.6 Vplyv fázovej premeny pri ťahovej skúške na tvar ťahového diagramu zliatiny	14
Obr. 2.7 Prechod z elastickej do elasticko-plastickej oblasti deformácie	15
Obr. 2.8 a) zmluvná medza klzu $R_{p0,2}$ určená z trvalej deformácie pod zaťažením b) výrazná medza klzu R_e c) diskontinuitný priebeh zaťaženia pri výraznej medzi klzu	16
Obr. 2.9 Ťahový diagram s Lüdersovou deformáciou typický pre nízkouhlíkovú oceľ	16
Obr. 2.10 Schéma merania ťažnosti a typy ťažnosti	18
Obr. 2.11 Meranie zúženého prierezu S_u na lome skúšobnej tyče a) s kruhovým prierezom b) so štvorhranným prierezom	18
Obr. 2.12 a) kruhový a ostatné tvary prierezu b) kruhová skúšobná tyč pred a po skúške	22
Obr. 2.13 a) plochá skúšobná tyč pred a po skúške b) trubková skúšobná tyč vcelku pred a po skúške c) výrez z trubky ako skúšobná tyč pred a po skúške	22
Obr. 2.14 Normované skúšobné tyče pre skúšku ťahom a) kruhové b) ploché	23
Obr. 3.1 a) označenie uhlov na porušenej skúšobnej vzorke b) c) d) grafy závislostí týchto uhlov na hrúbke vzoriek pre tri rôzne materiály, prevzaté a upravené z	27
Obr. 3.2 Ťahové diagramy pre rôzne hrúbky skúšobných vzoriek	28
Obr. 4.1 a) poloautomatická píla Struers Discotom-2 b) lis Leco PR-4X	30
Obr. 4.2 Poloautomatická rotačná brúska Struers PEDEMIN	30
Obr. 4.3 Svetelný inverzný mikroskop Olympus GX51	31

Obr. 4.4 Stereolupa Olympus SZ61	31
Obr. 4.5 Skúšobný stroj Zwick AllroundLine Z250	32
Obr. 4.6 Skúšobný stroj Instron 8801	32
Obr. 4.7 Výkres miniatúrnej vzorky	33
Obr. 4.8 Martenzitická ihlicovitá štruktúra	34
Obr. 4.9 Ihlice martenzitu s jemnými precipitátmi Cu	34
Obr. 4.10 Lomová plocha normovanej vzorky	35
Obr. 4.11 Lomová plocha miniatúrnej vzorky	35
Obr. 4.12 a) štandardné b) miniatúrne skúšobné tyče pred a po skúške ťahom	36
Obr. 4.13 Ťahový diagram jednotlivých štandardných skúšobných tyčí	36
Obr. 4.14 Ťahový diagram jednotlivých miniatúrnych skúšobných vzoriek	37
Obr. 4.15 Porovnanie ťahových diagramov všetkých skúšobných tyčí	38
Tab. 1.1 Základné metódy nedeštruktívneho skúšania	6
Tab. 1.2 Rozdelenie deštruktívnych skúšok	6
Tab. 2.1 Všeobecné charakteristiky hlavných skupín technických materiálov	9
Tab. 4.1 Chemické zloženie zistené spektrálnou analýzou	29
Tab. 4.2 Mechanické charakteristiky štandardných skúšobných vzoriek	37
Tab. 4.3 Mechanické charakteristiky miniatúrnych skúšobných vzoriek	37
Tab. 4.4 Porovnanie mechanických charakteristík materiálu	38