

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STROJNÍ



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

**Kůrka
Michal**

2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kúrka** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **473518**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh metodiky pro ověřování mechanických vlastností v dílenských podmínkách

Název diplomové práce anglicky:

Design of methodology for the verification of mechanical properties in workshop conditions

Pokyny pro vypracování:

1. Seznámení s problematikou
2. Návrh možných způsobů určování mechanických vlastností v dílenských podmínkách
3. Ověření vybrané varianty pro určování mechanických vlastností
4. Závěrečné zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

ASM Handbook Volume 14B: Metalworking: Sheet Forming
Další literatura na doporučení vedoucího práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. František Tatiček, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Ing. Vít Novák ústav strojírenské technologie FS

Datum zadání diplomové práce: **26.04.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **11.08.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2023**

Ing. František Tatiček, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá možnostmi ověřování vlastností materiálu pro tváření trubek a návrhem zkušební metody pro určení mechanických vlastností v dílenských podmínkách. Teoretická část popisuje problematiku tváření, tvářitelnosti a mechanických zkoušek. Dále se zabývá možnými způsoby určování mechanických vlastností (např. zkouškou tahem) a jejím vyhodnocení. Praktická část je zaměřena na analýzu naměřených dat ze zkoušky tahem a navrhnutí vlastní zkušební metody pro určení mechanických vlastností v dílenských podmínkách. Dále bude navržena metodika zkoušení a ověření navržené metodiky. Výstupem práce je model přípravku pro ověřování mechanických vlastností v dílenských podmínkách a vztah pro určení požadovaných mechanických vlastností z dat naměřených při zkoušce.

Klíčová slova:

Tváření, tvářitelnost, mechanické vlastnosti, tahová zkouška, dílenské prostředí

Abstract

This thesis deals with the possibilities of verifying the properties of material for pipe forming and the design of a test method for determining mechanical properties under workshop conditions. The theoretical part describes the issues of forming, formability and mechanical testing. It also deals with possible methods of determining mechanical properties (e.g. tensile test) and its evaluation. The practical part focuses on the analysis of measured data from tensile testing and the design of a custom test method for determining mechanical properties under shop conditions. Furthermore, the testing methodology and the verification of the proposed methodology will be proposed. The output of the work is a model of the fixture for verification of mechanical properties under shop floor conditions and a relationship for determining the required mechanical properties from the data measured during the test.

Keywords:

Forming, formability, mechanical properties, tensile test, workshop environment

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma **Návrh metodiky pro ověřování mechanických vlastností v dílenských podmínkách** vypracoval samostatně a veškeré literární prameny a zdroje informací, které jsem použil, cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....

Jméno, Příjmení

Poděkování

Tímto děkuji panu Ing. Františku Tatíčkoví Ph.D. a Ing. Vítu Novákovi za cenné rady a připomínky při tvorbě této diplomové práce.

Obsah

1	Úvod.....	8
1.1	Popis problému	9
2	Princip tváření	10
2.1	Teorie tváření.....	10
2.1.1	Princip plastické deformace.....	10
3	Tvářitelnost a její vyhodnocení.....	12
3.1	Charakteristika tvářitelnosti.....	12
3.1.1	Fyzikálně-metalurgický charakter materiálu.....	12
3.1.2	Termochemičtí činitelé	12
3.1.3	Stav napjatosti	14
3.1.4	Technologičtí činitelé	14
3.2	Technologické zkoušky	14
3.2.1	Zkoušky tvářitelnosti.....	14
4	Princip zkoušky tahem.....	16
4.1.1	Zkušební tyče	16
4.1.2	Pracovní diagram.....	17
4.1.3	Vyhodnocení zkoušky tahem	19
5	Charakteristika materiálu.....	22
6	Ověření mechanických hodnot.....	24
6.1	Popis geometrie vzorků a podmínky zkoušky	24
6.2	Analýza naměřených dat	25
7	Návrh metodiky pro dílenské použití.....	30
7.1	Vytipování použitelných mechanických zkoušek	30
7.1.1	Zkouška tahem.....	30
7.1.2	Zkouška tlakem.....	30
7.1.3	Zkouška tvrdosti	31
7.1.4	Zkouška ohybem	32
7.2	Návrh metodiky.....	33
7.2.1	Návrh vymezujícího přípravku	34
7.3	Postup metodiky.....	36
7.3.1	Odebrání zkušebních těles	36
7.3.2	Příprava zkušebních těles	37
7.3.3	Kontrola rozměrů	37

7.3.4	Upínání	38
7.3.5	Nasazení přípravku	38
7.3.6	Zatěžování zkušebního tělesa	39
7.3.7	Odečtení výsledků.....	41
8	Vyhodnocení naměřených hodnot	42
9	Závěr	47
10	Bibliografie.....	49
11	Seznamy.....	52
11.1	Seznam obrázků	52
11.2	Seznam tabulek.....	53
11.3	Seznam grafů	53
11.4	Seznam příloh	53

1 Úvod

Cílem práce je navržení metodiky pro určení mechanických vlastností materiálu pro výrobu sloupů veřejného osvětlení v dílenských podmínkách, která vychází z analýzy materiálových charakteristik používaných materiálových jakostí.

Sloupy veřejného osvětlení jsou tvořeny až několika různými trubkami o postupně se zmenšujícím průměru. Konec každé trubky je tvářen tak, aby byla provedena redukce – zmenšení průměru konce trubky, který odpovídá vnějšímu průměru trubky následující. Vzhledem k rozdílům ve vlastnostech dodávaného materiálu dochází k nestabilitě výroby. Z toho důvodu je třeba navrhnout jednoduchou zkouškou, která bude proveditelná v dílenských podmínkách, a která bude schopna ověřit kvalitu vstupního materiálu.

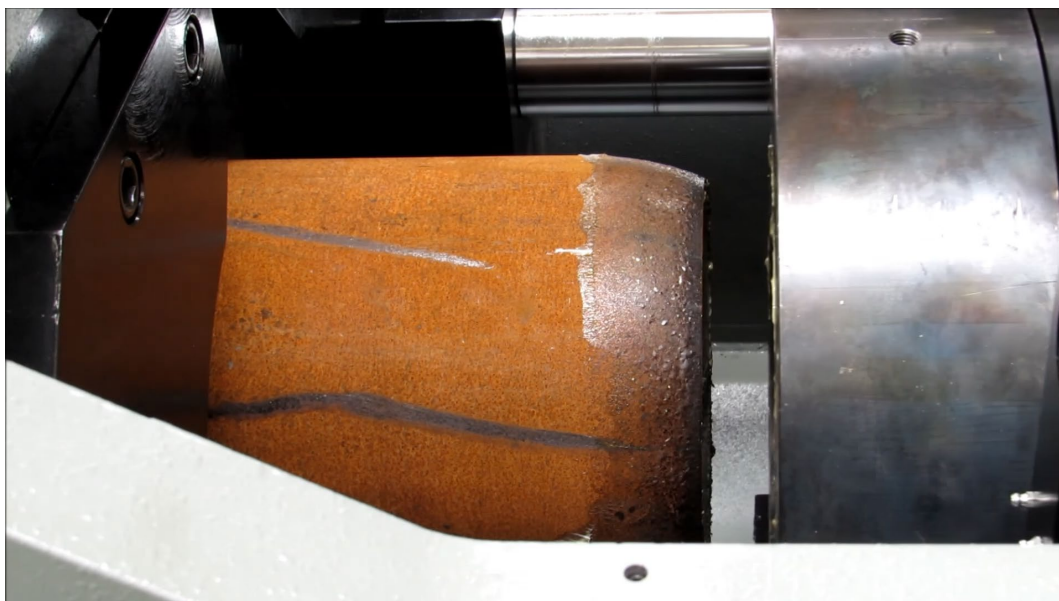
Tato metodika bude vycházet z analýzy provedených zkoušek ověřování mechanických vlastností materiálu na širším spektru dodaných různých šaržích. Data získaná navrženou zkušební metodou budou porovnávána s vlastnostmi získané zkouškou tahem.

Použití standartních zkoušek pro zjištění mechanických vlastností materiálu, v tomto případě nejlépe zkoušky tahem, je pro řešení v dílenských podmínkách firmy nevhodné hned z několik důvodů, mezi které patří nedostupnost zařízení pro ověřování mechanických vlastností zkouškou tahem, časová náročnost získání výsledků zkouškou tahem, potřeba kvalifikované obsluhy, nejlépe samostatné laboratoře.

Z těchto důvodů je třeba, aby výsledná zkušební metoda, která je výstupem této práce, zahrnovala zkoušku, kterou bude schopný vykonat pracovník na dílně, bude rychlá a náklady na přípravek a případné přístroje potřebné pro vykonání zkoušky budou co nejnižší. A také, že pracovník bude schopen samostatně vyhodnotit získané vlastnosti a v případě špatných výsledků bude schopen se obrátit na příslušnou laboratoř, která provede ověření získaných vlastností.

1.1 Popis problému

Jeden z možných způsobů konstrukce sloupů veřejného osvětlení je skládání sloupu z trubek o zmenšujícím se průměru. Napojení těchto trubek vyžaduje, aby konec trubky většího průměru byl tvářen a to tak, aby vznikl zaoblený konec s otvorem o průměru odpovídající následující trubky. Spoj je následně upevněn svarem. Výsledná tvářená trubka vypadá jako na obrázku 1.



Obrázek 1 - Tvářený konec trubky [7]

Aby tvářecí proces proběhl správně a nedocházelo k nekonzistenci výroby, je nutné, aby dodávaný materiál odpovídal požadované specifikaci. Ta je dána rozptylem mechanických a geometrických vlastností. Mezi mechanické vlastnosti patří mez kluzu, mez pevnosti a tažnost. Do geometrických vlastností řadíme toleranci tloušťky, toleranci průměru, ovalitu a průhyb.

Při nedodržení těchto požadovaných vlastností dochází k nestabilitě výroby, což v důsledku může vést k vyšší zmetkovitosti výroby, většímu opotřebení tvářecích nástrojů a strojů a s tím spojený ekonomický dopad. Ověření geometrických tolerancí nebo deformací je možné buď vizuálně, nebo za použití jednoduchých měřicích nástrojů po přijetí materiálu do výroby. Kontrola mechanických vlastností dodaného materiálu je složitější a nejlépe je zjišťovat v laboratoři, kterou většina podniků nemá.

2 Princip tváření

2.1 Teorie tváření

Tváření je proces, při kterém dochází k trvalému přetvoření vstupního materiálu do požadovaného tvaru. K trvalému přetvoření materiálu dochází až nad mezí kluzu. Do meze kluzu je deformace pružná a po odlehčení se materiál vrátí do původního stavu. Tváření lze rozdělit na dva druhy, za studena a za tepla. Hranicí mezi nimi je teplota rekrytalizace, která je zhruba 0,4násobek teploty tavení materiálu. [30]

Při tváření je optimální se pohybovat v oblasti homogenní deformace, tedy mezi mezí kluzu a mezí pevnosti. Nad mezí pevnosti už nedochází k rovnoměrné deformaci materiálu, deformace je lokalizována do určité oblasti, čímž v materiálu dochází ke vzniku krčku. Další deformace pak vede k porušení materiálu. Velmi důležitým pojmem ve tváření je tvářitelnost, ta udává vlastnost materiálu je nevratně deformovat bez makroskopického porušení.[4] [5]

2.1.1 Princip plastické deformace

Základním mechanismem plastické deformace je skluz dislokací, v nich se jednotlivé roviny přemísťují na vzdálenost větší, než je parametr mřížky. Dislokace je čarová porucha krystalické mřížky a je určena hranicí mezi sousedními atomovými rovinami. Je charakterizována velikostí posunutí a jeho směrem neboli Burgesovým vektorem. K dosažené plastické deformace polykrystalického kovu je třeba vyšší napětí než u monokrystalického materiálu. [3] [6] [22]

Dislokace se uvedou v pohyb, pokud vnější napětí přesahuje mez kluzu a je nutné, aby jejich pohyb pokračoval v celém průběhu plastického přetvoření. Dané napětí v procesu označujeme jako τ_{sk} . Čím větší bude hodnota Burgesova vektoru, tím větší je potřeba napětí τ_{sk} . Tím pádem ke skluzu dojde nejprve v rovinách, kde je hodnota Burgesova vektoru nejmenší. [6] [25]

Na pohyb dislokací má vliv i krystalová mřížka materiálu. Nejdříve se do pohybu dají dislokace v zrnech, jejichž mřížka je vhodně orientovaná k působícímu napětí. Působením pohybu dislokací vznikají skluzové pásy, to jsou jednotlivé oddělené bloky, ve kterých nedošlo ke skluzu. [6] [33]

3 Tvářitelnost a její vyhodnocení

3.1 Charakteristika tvářitelnosti

Tvářitelnost udává schopnost materiálu se tvářet bez vzniku jeho porušení. Čím vyšší je zásoba plasticity, tím lepší je tvářitelnost. Na tvářitelnost má vliv více faktorů, ale dělí se do čtyř základních skupin. Fyzikálně-metalurgický charakter materiálu, termochemičtí činitelé, napěťový stav a technologičtí činitelé. Tvářitelnost lze také označit jako zásobou plasticity neboli poměrem meze kluzu ku mezi pevnosti. [13] [23]

Počátek plastické deformace je po dosažení napětí na mezi kluzu. Oblast mezi mezí kluzu a mezí pevnosti se nazývá homogenní oblast. Tvářením v této oblasti vyčerpáváme zásobu plasticity a úplné vyčerpání zásoby vede k porušení materiálu. [13] [15]

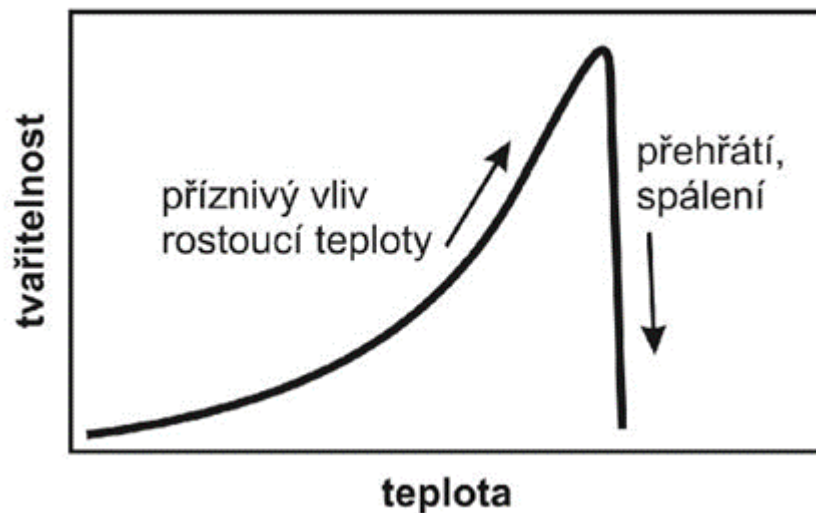
3.1.1 Fyzikálně-metalurgický charakter materiálu

Do této kategorie spadají všechny vlastnosti a procesy týkající se materiálových vlastností. Nejzásadnější faktor v této skupině je chemické složení, protože ovlivňuje všechny vlastnosti materiálu. Chemické složení je určeno typem materiálu a postupem jeho výroby. Velký vliv na tvářitelnost má struktura materiálu, tu dělíme na jednofázovou a vícefázovou. Pro tváření je obecně výhodnější jednofázová struktura. V jednofázové struktuře dochází k lepšímu zpevnění materiálu, buď porušením mřížky nebo substitucí atomů dalších prvků. Ve vícefázové struktuře je tvářitelnost podstatně horší z důvodu různých vlastností jednotlivých fází. Způsob zpracování materiálu udává charakter zrn. Pro tváření je výhodnější materiál už dříve protvářený. Čistě litá struktura může obsahovat vměstky, dutiny nebo póry, které snižují tvářitelnost. [13] [15]

3.1.2 Termochemičtí činitelé

Do této kategorie spadá teplota, deformační rychlost a deformační historie. Nejdůležitější z nich je teplota. Každý materiál má rozsah teplot, ve kterém je vhodné ho tvářet. Zvyšující se teplota má pozitivní vliv na tvářitelnost, jelikož

dochází ke snížení deformačního odporu. Po překročení určité teploty dojde k přehřátí materiálu a tvářitelnost prudce klesá. Pokud se teplota stále zvyšuje, dojde k spálení materiálu, který je pro další tváření nepoužitelný. Závislost tvářitelnosti na teplotě je znázorněna na obrázku 2. [15]



Obrázek 2 - Vliv teploty na tvářitelnost [15]

Teplotou tváření lze proces rozdělit na dva druhy, tváření za studena a tváření za tepla. Hranice mezi nimi je teplota rekystalizace, ta je cca 0,4 teploty tání, jedná se o termodynamickou teplotu. Při tváření za studena, tedy pod teplotou rekystalizace dochází k deformačnímu zpevnění materiálu. K tomuto jevu dochází díky deformování zrna a tvoření překážek proti pohybu dislokací v krystalografické mřížce. [13] [25]

Při tváření za tepla, tedy nad teplotou rekystalizace, již nedochází k deformačnímu zpevnění. Pro tváření za tepla není třeba tak velkých sil jako za studena. Další výhodou je zachování plastických vlastností, takže může dojít k velkým stupňům deformace. Značný vliv na tvářitelnost má deformační rychlost. Pokud je materiál deformován moc rychle, nedochází k úplné rekystalizaci a roste deformační odpor. Deformační rychlost je určena použitou technologií tváření a strojem. Další důležitým činitelem je deformační historie. Tváření probíhá po částečných úběrech, mezi kterými se materiál uzdravuje. Deformační historie dokáže ovlivnit výslednou strukturu i tvářitelnost. [13] [15]

3.1.3 Stav napjatosti

Jsou tři základní stavy napjatosti jednoosý, dvouosý a tříosý. Podle výsledného směru napětí se jedná buď o tlakovou nebo tahovou napjatost. Pokud výslednice sil směřuje do tělesa, jedná se o tlakovou napjatost a obráceně. Stav napjatosti určuje převažující složky napětí v materiálu. Pro tváření je vhodnější tlaková napjatost, z důvodu větší realizovatelné deformace, ale je potřeba větších sil. Tahová napjatost nepotřebuje tak vysoké síly, ale dosažitelná deformace je menší. Při tahové napjatosti je vyšší pravděpodobnost křehkého lomu. [13]

3.1.4 Technologičtí činitelé

Tyto činitelé přímo ovlivňují tvářecí proces. Řadí se mezi ně tvářecí technologie, volba tvářecího stroje a nástrojů. Každý stroj má jiné parametry a kinematiku nástrojů, tedy ovlivňují tváření. Z technologického hlediska je důležité i mazání. To snižuje tření a zvyšuje kvalitu povrchu. Tvářitelnost závisí na technologii, stroji a materiálu. Různými technologiemi je možné se dostat ke stejnému výsledku, ale bude jiný počet technologických kroků, různá síla a životnost nástroje. [13]

3.2 Technologické zkoušky

Tento typ zkoušek se používá pro ověření konkrétních technologických vlastností, například tvářitelnosti nebo svařitelnosti. Zkoušky jsou specifické pro ověření dané vlastnosti, například se může jednat o střídavý ohyb v opačných směrech, nebo prohýbání vzorku se svarovou housenkou. Tyto zkoušky se snaží co nejvíce přiblížit výrobním podmínkám. [24]

3.2.1 Zkoušky tvářitelnosti

Tvářitelnost je vlastnost materiálu se přetvářet pod působením vnějších sil a zachovat si dosažený tvar. Tyto zkoušky je možné provést jak za tepla, tak za studena a jsou vhodné pro ověření chování materiálu ke zpracování různými výrobními technologiemi, jako např. válcování, kování nebo lisování. [19]

Jednou ze zkoušek je zkouška lámavosti. Zkušebním tělesem je plochá tyč, která je položena na dvě válcové podpěry a uprostřed zatížena trnem. Měří se úhel, o který lze tyč ohnout, než se na vnější straně začnou tvořit trhliny. Přesné podmínky zkoušky jsou dány normou. Zkoušky lze provést jak za studena, tak za tepla. [19]

Další zkouška je zkouška pětchováním. Zkušebním tělesem je váleček o výšce odpovídající dvounásobku průměru. Vzorek je zatěžován tlakem v ose, dokud se výška nezmenší na polovinu, respektive třetinu pro zkoušku za studena a za tepla. [19]

Zkouška plechů hloubením neboli zkouška Erichsenova zjišťuje, jestli je plech vhodný k tažení. Plech je vložen na tažnici, přidržen přidržovačem a tažník ve tvaru koule o průměru 20 mm působí silou. Měří se hloubka prohloubení a sledován je také povrch plechu na vnější straně průhybu. [19] [32]

Zkoušky drátu se provádí více způsoby na materiálech určených k výrobě drátů. Například zkouška střídavým ohybem, kdy je drát upnut a ohýbán na obě strany o 180° a měřítkem je počet ohnutí do přerušení drátu. Zkouška kroucením, kdy je drát na jednom konci pevně uchycen a druhá strana se otáčí, měří se počet otáček do přerušení drátu. [19]

Zkoušky trubek, například zkouška rozháněním, kdy je do trubky vtlačován trn předepsaných rozměrů. Materiál trubky vyhovuje, pokud se na vnějším okraji nevyskytnou trhliny. Zkouška lemování spočívá v rozevření konce trubky trnem a následným zploštěním konce deskou. Na okraji trubky opět nesmí vzniknout trhliny. [19]

4 Princip zkoušky tahem

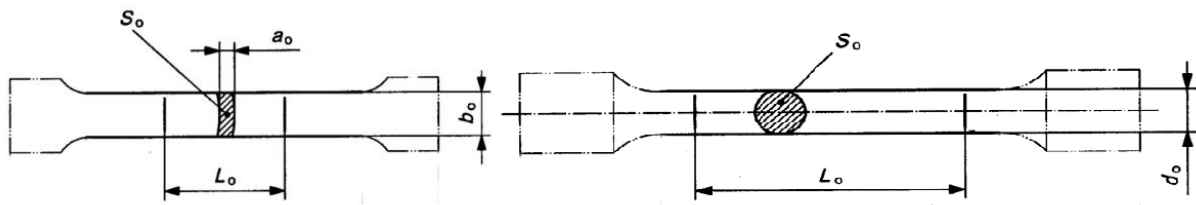
Zkouška tahem je jednou z nejrozšířenějších mechanických zkoušek materiálů, provádí se podle normy ČSN EN 6892-1. Zkušebním zařízením je mechanický či hydraulický zkušební stroj neboli trhačka, příklad konstrukce stroje zobrazena na obrázku 3. Do čelistí stroje je upnuto zkoušené těleso, ve formě normalizované zkušební tyče, a vzorek je namáhán tahovou silou, většinou až do porušení. [2] [31]



Obrázek 3 - trhačí stroj [1]

4.1.1 Zkušební tyče

Tvar zkušební tyče je definován příslušnými normami, literatura [17], [18], [21]. Tyče jsou nejčastěji kruhového nebo čtyřhranného průřezu, kruhové tyče se převážně vyrábí soustružením a ploché vzorky frézováním. Zkušební tělesa mají normou daný tvar, k vidění na obrázku 4, na vzorku musí být stanoven úsek, ve kterém budou vyhodnocovány měřené hodnoty neboli počáteční měrné délka. Tento úsek může, nebo nemusí být vztažen k počátečnímu průřezu, jedná se o poměrovou, respektive nepoměrovou zkušební tyč. [2] [3]



Obrázek 4 - Tvar zkušebních vzorků [2]

Poměrová zkušební tyč má vztaženou počáteční měrnou délku L_0 k průměru nebo ploše počátečního průřezu S_0 podle vztahu:

$$L_0 = k \cdot \sqrt{S_0}$$

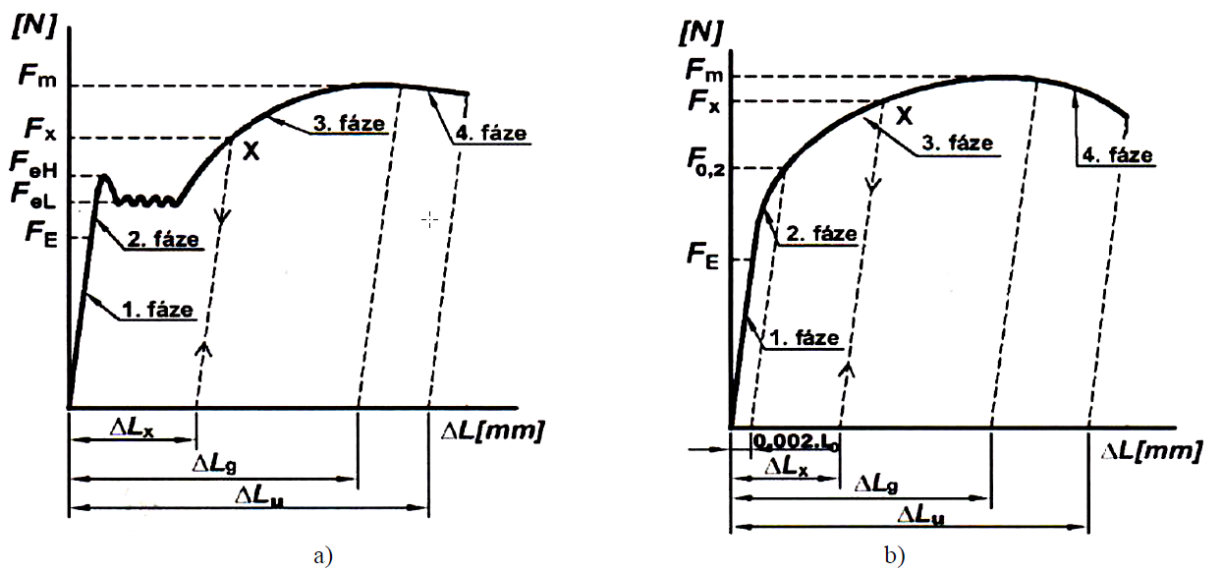
Kde k je součinitel proporcionality, ten má většinou hodnotu 5,65, ale je možné použít i hodnotu 11,3. Tento vztah je používán pro vzorky nekrhového průřezu. Pro tělesa kruhového průřezu lze vztah zjednodušit na násobek pěti, tedy:

$$L_0 = 5 \cdot D$$

Nepoměrové zkušební tyče nemají výpočtový vztah pro počáteční měrnou délku, ta se volí z hodnot 50, 80, 100 a výjimečně 200 mm. [2]

4.1.2 Pracovní diagram

Výstupem z tahové zkoušky je pracovní diagram, který zobrazuje závislost síly na absolutním prodloužení celé zkušební tyče. V závislosti na materiálu může vzniknout diagram s výraznou mezí kluzu, obrázek 5a, nebo s nevýraznou mezí kluzu, obrázek 5b. Na diagramu lze pozorovat hned několik fází průběhu deformace. [2]



Obrázek 5- Pracovní diagramy [2]

1. Fáze diagramu vyznačuje oblast pružné deformace, která je dána přímkou Hookova zákona. Zkušební tyč se prodlužuje přímo úměrně zatěžující síle, kdybychom nepokračovali dále v zatěžování, tak se po odlehčení tyč vrátí do původního stavu. [2]

2. Fáze diagramu je oblastí od meze úměrnosti až do místa, které označujeme jako mez kluzu. Mez kluzu je podle druhu materiálu výrazná, nebo ji určujeme smluvně. [2]

Pro diagram s nevýraznou mezí kluzu platí, že není zřejmý přechod mezi druhou a třetí fází, místo tohoto přechodu nelze v praxi určit. Normou je dáno, že je možné bod přechodu nahradit bodem v diagramu o smluvené velikosti trvalé deformace. Síla je pak nazývána silou na nevýrazné mezi kluzu a je označována jako F_p . Nejpoužívanější hodnotou smluvní deformace je 0,2 % L_0 . [2] [3]

Diagram s výraznou mezí kluzu vykazuje jasný přechod mezi vratnou a nevratnou deformací, v některých případech i roste deformace bez růstu síly. Síla odpovídající tomuto přechodu se označuje F_e , může docházet ke kolísání síly v této oblasti a pak je F_e dále rozdělena na F_{eH} a F_{eL} , horní na horní a dolní mezi kluzu. [2]

Ve 3. fázi diagramu je tvořena plynulá křivka, jedná se oblast plynulé (homogenní) deformace, během této fáze se tyč rovnoměrně prodlužuje a zároveň zužuje, konec třetí fáze je dán maximální silou zatížení. [2]

Poslední fází je fáze 4. kde již nedochází k rovnoměrnému prodlužování vzorku, ale deformace se lokalizuje pouze do určité oblasti zkušebního tělesa, vzniká zaškrcené místo, takzvaný krček, kde nadále roste napětí i přes viditelný pokles síly v diagramu. Tato oblast se nazývá oblast nehomogenní deformace a končí porušením tělesa. [2]

Hodnoty prodloužení původní měřené délky zkušebních tyčí jsou zaznamenávány extenzometrem. Nelze použít odečítání z polohy příčnicku z důvodu zanesených nepřesností z čelistí trhací stroje. Pokud není použit extenzometr, je na tělese vyznačeno místo původní délky a prodloužení se odečítá po provedení zkoušky. [2]

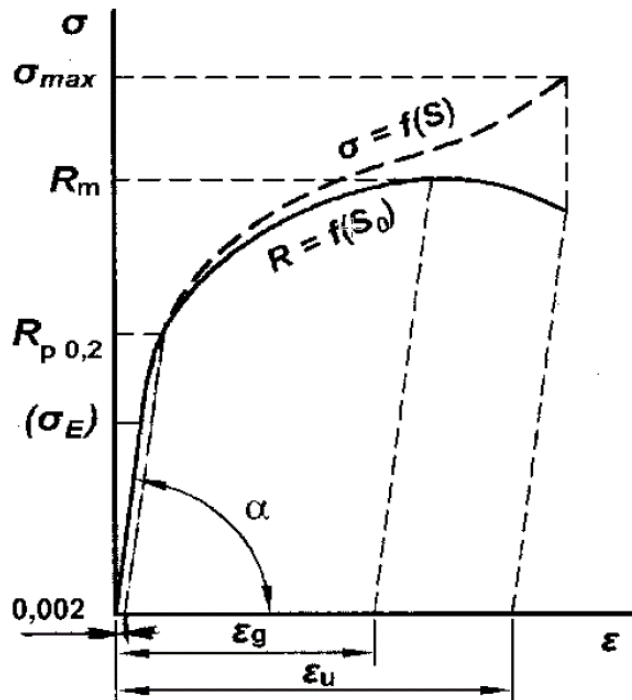
4.1.3 Vyhodnocení zkoušky tahem

Ze samotné závislosti síly a absolutního prodloužení není možné porovnávat mechanické vlastnosti materiálů. Naměřená síla totiž závisí na průřezu. Deformace závisí na výchozí měřené délce zkušební části vzorku. Pracovní diagram je tedy převeden na diagram smluvní, tedy na závislost napětí na poměrném prodloužení. Pro smluvní tahový diagram je napětí označováno jako R a je vypočteno z naměřené síly vztažené k původnímu průřezu vzorku S_0 . Poměrné prodloužení ε je bezrozměrný parametr udávající poměr absolutního prodloužení ΔL a původní délky L_0 . [2] [3]

Pro vytvoření skutečného tahového diagramu je třeba znát aktuální průřez tělesa. Tento průřez je možné dopočítat ze zákona o zachování objemu:

$$V_1 = S_1 \cdot l_1 = S_2 \cdot l_2$$

Známe počáteční hodnoty S_1 a l_1 , také aktuální prodloužení z extenzometru, tudíž jednoduchou úpravou vzorce lze dopočítat aktuální průřez S_2 . Skutečný tahový diagram se od smluvního výrazně liší v průběhu oblastí homogenní a nehomogenní deformace, jak je vidět na obrázku 6.



Obrázek 6 - Smluvní a skutečný tahový diagram

Pokud je součástí zkoušky i zjištění např. součinitele plastické anizotropie r , je třeba použít příčného extenzometru, který měří aktuální šířku během zkoušky. Součinitel plastické anizotropie je poměr deformace šířky ku deformaci tloušťky. Aktuální tloušťku lze dopočítat opět ze zákona o zachování objemu. [26]

Ze smluvního diagramu lze určit několik hodnot. Mez kluzu, která je hranicí mezi vratnou a nevratnou deformací a pro diagramy s výraznou mezí kluzu je odečtena z grafu. Pro diagramy bez výrazné meze kluzu je určena rovnoběžkou s lineární částí diagramu. V lineární části platí Hookův zákon a tato rovnoběžka je posunuta do 0,2% deformace, proto $R_{p0,2}$. V místě, kde rovnoběžka protne průběh napětí je odečtena mez kluzu. [2] [3]

Mez pevnosti je určena z maximálního zatížení, což je nejvyšší napětí, které zkušební těleso v průběhu zkoušky přenáší před vznikem krčku. Na rozdíl od meze kluzu, kde je rozdíl mezi skutečným a smluvním diagramem nepatrný, u meze pevnosti už je rozdíl výrazný, vzhledem k silně se měnícímu průřezu zkušebního tělesa. [2] [3] [12]

Tažnost vyjadřuje trvalé prodloužení měřené délky po lomu v procentech počáteční měřené délky. Tažnost se určuje pro poměrové i nepoměrové zkušební tyče. Výpočetní vztah pro tažnost je následující:

$$A = 100 \cdot \frac{\Delta L}{L_0}$$

Kde ΔL je absolutní prodloužení vzorku po porušení a L_0 je počáteční měřená délka zkušebního tělesa. [2] [12]

Kontrakce je hodnota procentuálního zmenšení průřezu vzorku po přetržení, primárně se určuje pro vzorky kruhového průřezu. Výpočetní vztah:

$$Z = 100 \cdot \frac{\Delta S}{S_0}$$

Kde ΔS je rozdíl původního a konečného průřezu vzorku a S_0 je původní průřez. [2]

5 Charakteristika materiálu

Pro výrobu sloupů veřejného osvětlení je používán materiál S235JRH. Označení JR značí vrubovou houževnatost (27 J při 20 °C) a označení H indikuje že se jedná o duté průřezy. Specifikace materiálu spadá pod normu ČSN EN 10219–1, ČSN EN 10219–2 a ČSN EN 10219–3. Materiál je svařitelný a vhodný k pozinkování. Konkrétní chemické složení je uvedeno v tabulce 1. V tabulce 2 jsou uvedeny normou dané mechanické vlastnosti pro náš materiál. Označení FF znamená plně uklidněnou ocel s dostatečným množstvím prvků, které vážou dusík. [17]

Označování ocelí		Způsob dezoxidace	Hmotnostní podíl v % max.					
Značka	Číselné značení		C	Si	Mn	P	S	N
S235JRH	1.0039	FF	0,17	-	1,4	0,04	0,04	0,009

Tabulka 1 - Chemické složení materiálu S235JRH [17]

Označování ocelí		Minimální mez kluzu [MPa]		Pevnost v tahu [MPa]		Tažnost [%]	Minimální hodnota nárazové práce [J]
		Jmenovitá tloušťka [mm]		Jmenovitá tloušťka [mm]		Jmenovitá tloušťka [mm]	Při zkušební teplotě
Značka	Číselné označení	≤16	> 16 ≤ 40	<3	≥ 3 ≤ 40	≤ 40	20 °C
S235JR H	1.0039	235	225	360–260	360–510	24	27

Tabulka 2 - Mechanické vlastnosti materiálu S235JRH [17]

Norma ČSN EN 10219–2 dále udává hodnoty mezních úchylek tvaru, tolerancí přímostí a hmotností. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3.

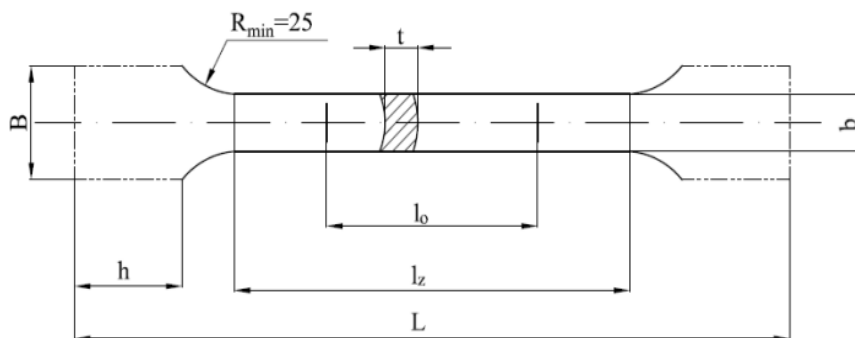
Charakteristika	Duté profily kruhového průřezu
Vnější rozměry (D)	$\pm 1 \%$, nejméně $\pm 0,5$ mm a nejvýše ± 10 mm
Tloušťka (T)	Pro $D \leq 406,4$ mm: $T \leq 5$ mm $\pm 10 \%$, $T > 5$ mm $\pm 0,5$ mm, pro $D > 406,4$ mm: $\pm 10 \%$ nejvýše ± 2 mm
Ovalita (O)	2 % pro duté profily s poměrem průměru k tloušťce stěny nejvýše 100
Přímost (e)	0,2 % celkové délky a 3 mm na jakákoliv 1 m délky
Hmotnost na jednotku délky (M)	$\pm 6 \%$ jednotlivé délky profilu

Tabulka 3 - Mezní úchytky tvaru tolerancí přímosti a hmotnosti materiálu S235JRH

6 Ověření mechanických hodnot

6.1 Popis geometrie vzorků a podmínky zkoušky

Vzorky pro zkoušku tahem jsou vytvořeny z rozvinuté trubky materiálu S235JRH. Z rozvinu byly vyříznuty a následně vyfrézováním opracovány o tvaru standardního zkušební tělesa, viz. obrázek 7.



Obrázek 7 - Schéma zkušební vzorku

Konkrétní rozměry použity při zkoušení jsou $L_0 = 50$ mm, $b = 20$ mm a tloušťka t je v závislosti na tloušťce výchozího materiálu. Hranicí jsou 4 mm tloušťky, vzorky pod a nad tuto hranici mají jiný předpis pro tvar zkušební tělesa. Parametry realizace zkoušky jsou dle normy ČSN EN ISO 6892-1, zkušební stroj LabTest Model 5.100SP1, na obrázku 8. Podmínky zkoušky: snímač síly 100 kN, zkušební metoda A.

Zkouška začíná upnutím označeného zkušební tělesa do čelistí zkušební stroje. Při této zkoušce byla měřena i kontrakce a skutečné prodloužení, je tedy nutné umístit příčný extenzometr a reflexní štítky pro měření prodloužení laserový extenzometrem LE 05. Po přípravě tělesa ke zkoušce a vynulování extenzometrů je možné spustit samotnou zkoušku, průběh je řízen automaticky počítačovým softwarem. Zkouška většinou probíhá až do porušení zkušební tělesa, ale ukončení zkoušky je uživatelsky volitelné. Díky použití počítače je získání výsledků jednoduché, ze softwaru lze vyexportovat tabulku s postupným průběhem jednotlivých hodnot pro další vyhodnocení a grafy průběhu zatěžování.



Obrázek 8 - Laboratorní vybavení použité ke zkoušce

6.2 Analýza naměřených dat

Analýza byla vyhodnocena celkem na 31 šaržích dodaných materiálů, šarže je výrobní várka materiálu s dodaným atestem. Od každé šarže byly odebírány 4 vzorky, 3 z oblasti mimo svar a 1 ze svarové oblasti. Výstupem zkoušky jsou hodnoty meze kluzu $R_{p0,2}$, meze pevnosti R_m a kontrakce A . U některých vzorků došlo k chybě měření z důvodu prokluzu čelistí, nebo došlo k porušení mimo definovanou oblast. Tyto výsledky jsou brány jako neplatné. V některých případech došlo k uvolnění příčného extenzometru a nejsou dostupné výsledky pro kontrakci. Pro celkový přehled o mechanických vlastnostech dodaných materiálů je i přesto dostačující, proto pro tyto vzorky již nebyly zkoušky opakovány. V následující tabulce jsou průměrné hodnoty pro jednotlivé analyzované šarže bez vzorků z oblasti svaru.

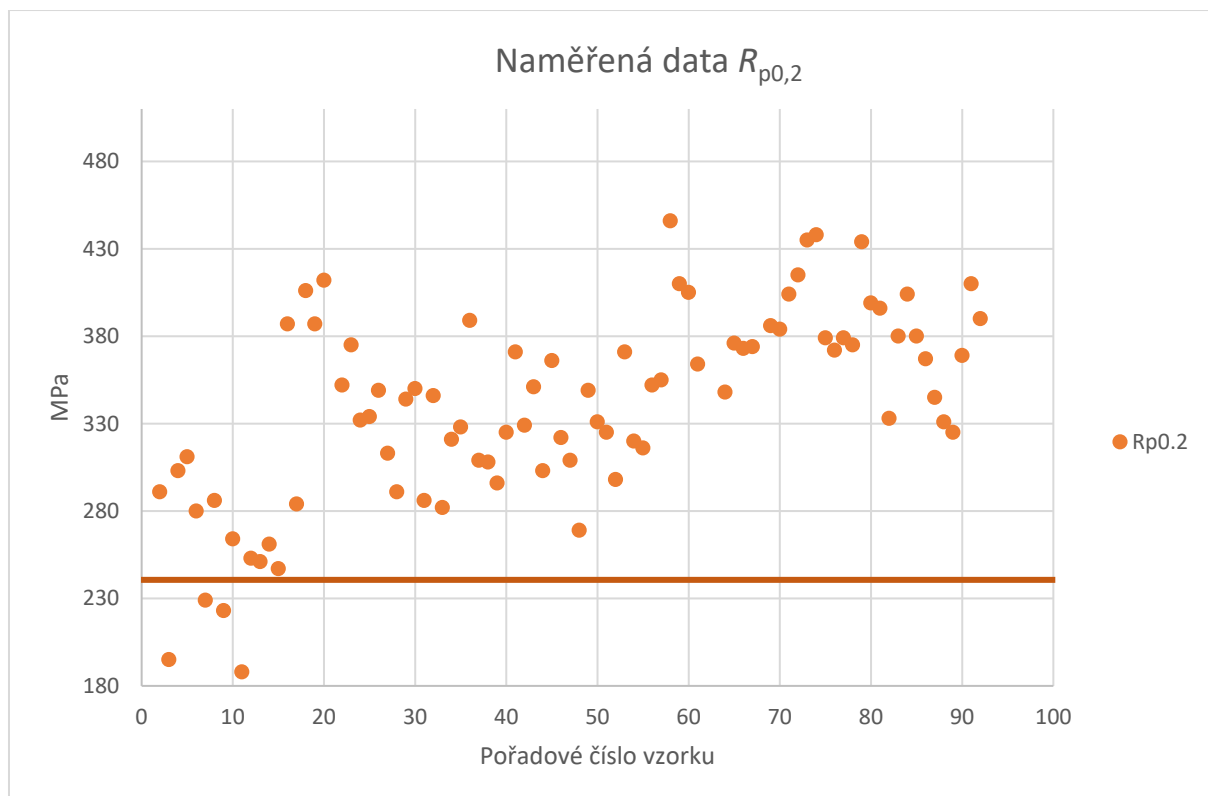
Řada vzorků	$R_{p0,2}$	R_m	A
	[MPa]	[MPa]	[%]
A	243,0	389,5	44,2
B	298,0	371,0	42,4
C	246,0	373,7	42,0
D	235,0	373,7	44,9
E	253,0	363,7	42,5
F	359,0	416,3	32,3
G	399,5	462,0	33,7
H	353,0	408,7	37,3
I	332,0	408,0	39,9
J	328,3	421,3	42,2
K	304,7	440,3	39,6
L	323,3	403,7	37,3
N	304,3	415,3	39,7
O	341,7	439,0	33,6
P	340,0	429,0	39,5
R	300,0	419,7	42,6
S	335,0	401,0	41,2
T	329,7	431,3	38,7
U	341,0	429,3	34,8
1	428,0	452,5	25,9
2	384,5	411,0	30,7
3	362,0	384,5	30,7
4	373,5	430,0	31,8
5	391,3	439,7	31,2
6	429,3	472,0	31,8
7	376,7	431,7	37,5
8	402,7	464,0	31,4
9	369,7	446,7	34,1
10	383,7	460,3	30,4
11	333,7	397,3	41,3
12	389,7	442,7	30,9

Tabulka 4 - Zprůměrované výsledky tahové zkoušky

V tabulce 4 jsou průměrné hodnoty výstupů pro každou šarži. Kompletní soubor naměřených hodnot je uveden v příloze. Označování vzorků probíhalo přiřazením písmene od začátku abecedy pro dodanou šarži. Abeceda by nebyla dostačující, proto se přešlo na číselné označování. Ke každé šarži je dodaný atest od dodavatele polotovaru.

Pokud bychom brali pouze průměrné hodnoty, všechny šarže normu splňují. Při pohledu na jednotlivé vzorky se ovšem situace mění. Většina analyzovaných vzorků splňuje požadovanou minimální hodnotu meze kluzu 235 MPa i rozmezí meze pevnosti 360–510 MPa.

V grafu 1 jsou znázorněny hodnoty mezí kluzu všech měřených těles. Oranžová čára značí minimální hodnotu meze kluzu danou normou, tedy 235 MPa. Ačkoliv většina vzorků splňuje požadavky normy, tak některé hodnoty meze kluzu jsou pod požadavkem normy. Zde je třeba provést analýzu průběhu zkoušky, případně zkoušku opakovat. U některých zkušebních těles jsou hodnoty poměrně vysoké. Takto velký rozptyl hodnot meze kluzu může mít nezanedbatelný vliv na stabilitu výroby.

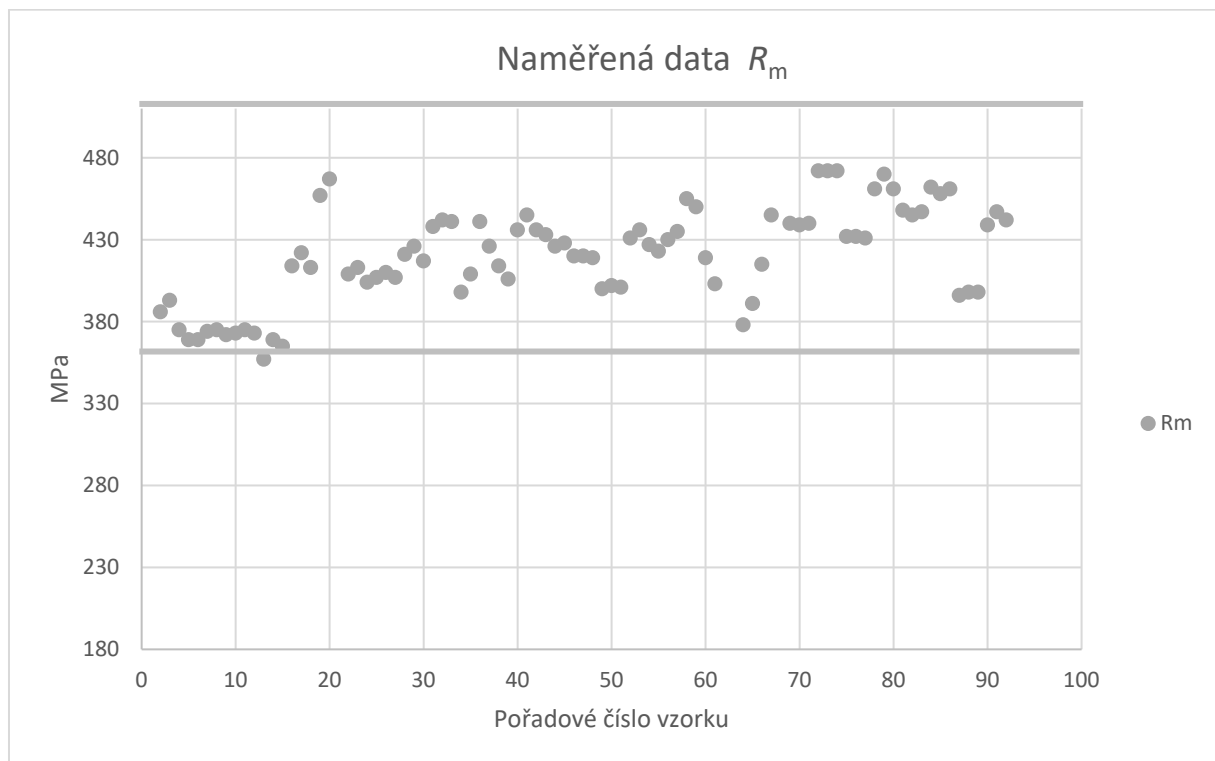


Graf 1 - Naměřené meze kluzu

Například vzorky 16 až 20, 58 až 60 a 72 až 80 respektive šarže F, G, 1, 2, 6, 7 a 8 vykazují hodnoty meze kluzu i více než 400MPa. Takové hodnoty meze kluzu jsou vyšší, než je hodnota meze pevnosti jiných šarží materiálu. Vyšší hodnota meze kluzu znamená vyšší nutné napětí pro počátek plastické deformace. Zároveň je

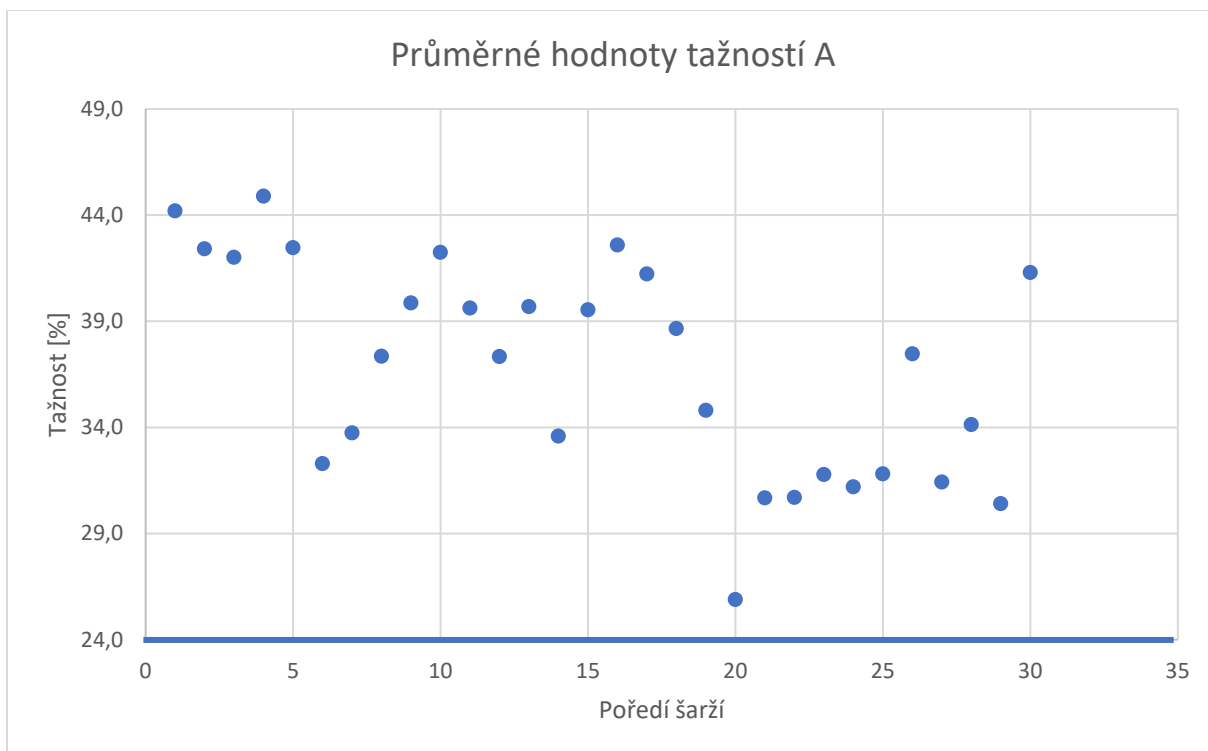
pro tváření vhodné dosáhnout co nejmenšího poměru mezi mezí kluzu a mezí pevnosti.

V grafu 2 jsou zobrazeny hodnoty mezí pevnosti pro všechny vzorky. Všechny hodnoty až na vzorek 13 z šarže E splňují normou požadované rozmezí 360–510 MPa. U meze pevnosti zároveň není tak velký rozptyl jako u meze kluzu.



Graf 2 - Naměřené meze pevnosti

Na grafu 3 jsou vyneseny hodnoty průměrných tažností pro všechny šarže. Z těchto dat vyplývá, že všechny šarže splňují požadavky pro minimální tažnost 24 %, vyznačenou modrou čarou. Z těchto průměrů jsou opět vyřazené vzorky se svarovým spojem. Tyto vzorky vykazují pokles tažnosti, stejně jako nárůst meze kluzu a meze pevnosti. Vzhledem k tomu, že se jedná jen o jednu část tvářené oblasti, k problémům by nemělo docházet. Navíc tato nekonzistence je dána způsobem výroby trubek, jejího odstranění by bylo možné dosáhnout změnou polotovaru na válcované bezešvé trubky, ale za cenu ekonomického dopadu na výrobu.



Graf 3 - Průměrné hodnoty tažností

7 Návrh metodiky pro dílenské použití

7.1 Vytipování použitelných mechanických zkoušek

Pro určení mechanických vlastností je možné využít více druhů zkušebních metod, některé mají za výstup například údaje o tvrdosti materiálu, jiné zase mechanické charakteristiky jako mez kluzu a mez pevnosti. Hledáme metodu, která bude lehce aplikovatelná v dílenských podmínkách a poskytne nám základní představu o vlastnostech materiálu. Pro představu jsou zde přiblíženy metody, které lze pro popis chování materiálu použít.

7.1.1 Zkouška tahem

Této zkoušce se z obecného hlediska věnuje kapitola 2.2, ale ve zkratce se jedná o zatěžování zkušebního tělesa tahovou silou až do jeho přetržení. Výstupem jsou hodnoty meze kluzu a pevnosti, případně tažnosti a kontrakce, ze zkoušky lze také vyhodnotit pracovní diagram průběhu tahového napětí. Výhodou je přesnost dosažených výsledků a odpadá požadavek na převedení získaných hodnot, jelikož dostáváme požadované hodnoty. Nevýhodou je potřeba drahého vybavení, kvalifikované obsluhy a časová náročnost.

7.1.2 Zkouška tlakem

V principu se tato zkouška zásadně neliší od zkoušky tahem, primární rozdíl je ve směru deformace, zde není zkušební vzorek zatěžován tahově, ale jak už z názvu vyplývá, je zatěžován tlakově. Zkušební tělesa mají tvar válečku, ten je pak při zkoušce pěchován. Výstupní data jsou opět podobná, jako u zkoušky tahem, mez kluzu v tlaku, mez pevnosti v tlaku, mezní poměrné stlačení a mezní poměrné rozšíření. Tato zkouška není primárně určena pro kovové materiály, ale spíše pro stavební hmoty, ale pokud to okolnosti vyžadují, je možné ji provádět i na kovech. Zkušební zařízení je k vidění na obrázku 9.



Obrázek 9 - Zkušební zařízení pro zkouška tlakem [9]

7.1.3 Zkouška tvrdosti

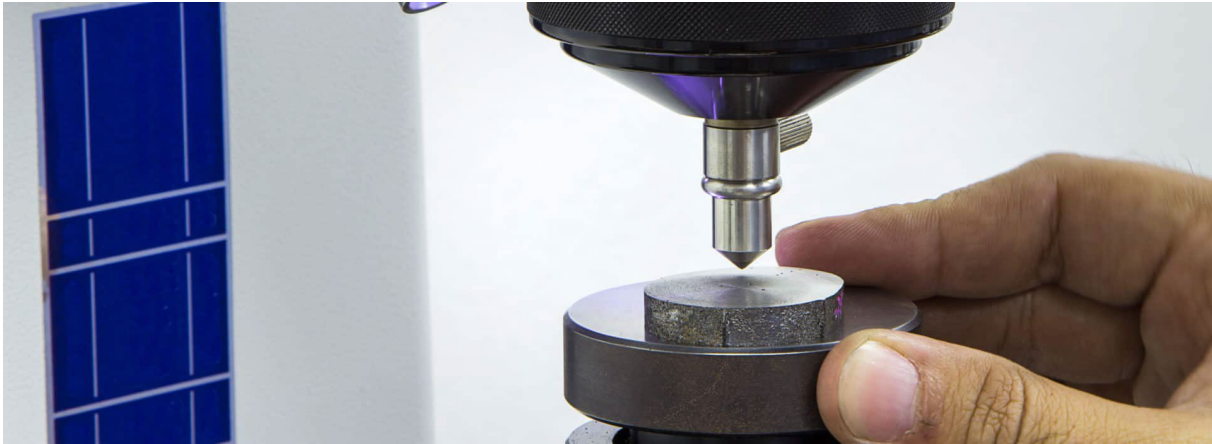
Tato zkouška se zaměřuje na zjištění tvrdosti povrchu daného materiálu a spočívá ve vtlačování zkušebního tělesa, indentoru, do povrchu zkoušeného materiálu. Zkoušky tvrdosti rozdělujeme do třech kategorií podle tvaru indentoru a metodiky zkoušky. Tvrdost materiálu lze tedy vyhodnotit podle Brinella, Vickerse nebo Rockwella.

Pro zkoušku dle Brinella je zkušebním tělesem ocelová nebo karbidová kulička a měří se průměr vtisku. Použití ocelové kuličky je vhodné pro měkčí materiály a označuje se HBS. Kulička ze slinutého karbidu se používá pro tvrdší materiály a tvrdost má označení HBW. Zatížení na vzorku se nechá působit 10 až 15 vteřin. Minimální tloušťka vzorku musí být alespoň osminásobek hodnoty hloubky vtisku.

Podle Vickerse se tvrdost zkouší diamantovým jehlanem a vyhodnocuje se střední délka úhlopříček vtisku. Zatížení se odlehčuje opět po 10 až 15 vteřinách. U této zkoušky musí být minimální tloušťka vzorku jeden a půl násobek úhlopříčky vtisku. Zkouška podle Vickerse je velmi náročná na kvalitu povrchu.

Rockwellova zkouška používá buď diamantový kužel (HRA, HRC) nebo ocelovou kuličku (HRB). Tvrdost se poté určuje z rozdílu hloubky vtisku mezi předběžným zatížením a s přidavným zatížením. Při použití kuželového indentoru, musí být

minimální tloušťka minimálně desetinásobek hloubky trvalého vtisku. Pokud je jako indentor použita kulička, tloušťka vzorku musí být alespoň patnáctinásobek hloubky vtisku. Ukázka zkoušení tvrdosti na obrázku 10. [27] [28] [29]



Obrázek 10 - Zkouška tvrdosti [10]

Tvrdot materiálu koresponduje s jeho pevností, tudíž by připadalo v úvahu použití nějaké zkoušky tvrdosti. Nevýhodou ovšem je zkouškou požadovaná tloušťka materiálu. Jediná z varianta zkoušky tvrdosti, která nemá vysoké nároky na tloušťku materiálu je zkouška podle Vickerse. Tato zkouška ale vyžaduje velmi kvalitní povrch. Ověření tvrdosti by bylo možné vykonávat na metalografickém výbrusu, kde by se eliminovala problematika malé tloušťky analyzovaných vzorků, ale to je náročné na přípravu.

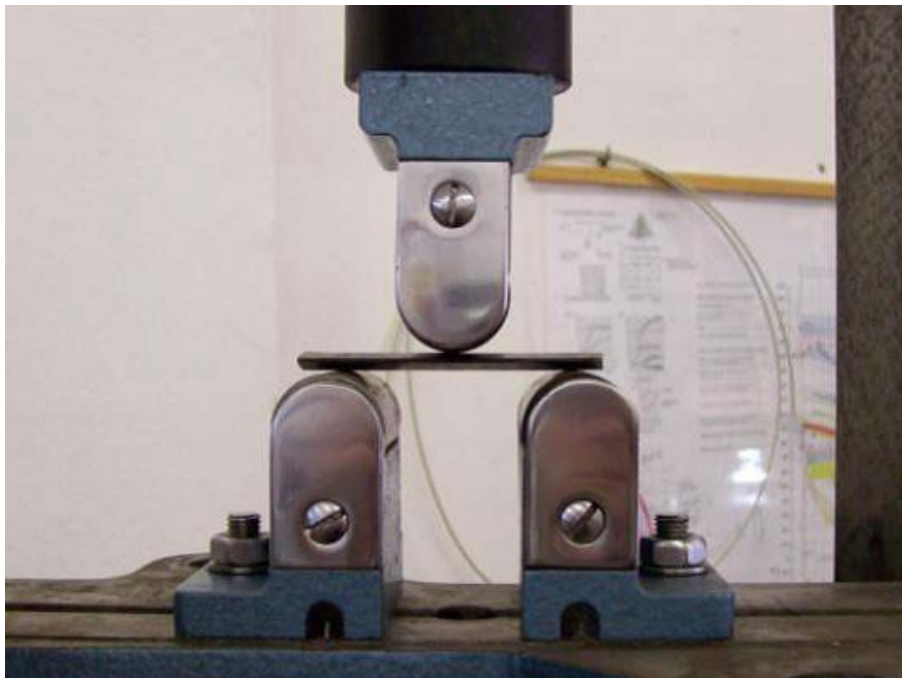
Výhodou zkoušek tvrdosti je možnost provedení zkoušky v dílenských podmínkách a závislost mezi tvrdostí a pevností materiálu. Nevýhodou, avšak je požadavek na tloušťku zkušebního vzorku a případná finanční náročnost na výroby metalografického výbrusu.

7.1.4 Zkouška ohybem

Touto zkouškou nelze určit výslednou pevnost, hodí se tedy více pro křehké materiály. Princip zkoušky spočívá v uložení zkušebních tyče o průměru 20 až 40 mm nebo plechu do stroje. Následně je vzorek zatěžován tlakovou silou uprostřed mezi podporami. Dochází k průhybu tělesa, ale nedojde k lomu. Ohyb vyvolá v horních vláknech tahové napětí a ve spodních vláknech tahové napětí. Primárně je tato zkouška používána pro litiny a některé nástrojové oceli.

Výstupem zkoušky je zatěžovací síla prohnutí, které tato síla způsobila. Ze zkoušky ohybem lze vyhodnotit mez kluzu v ohybu. Stanoví se z průhybu, při kterém byla naměřena trvalá deformace krajního vlákna 0,2 %. Uložený vzorek a zkušební aparatura je k vidění na obrázku 11. Výhodou zkoušky je její jednoduchost a možnost provedení v dílenských podmínkách.

Existují i zkoušky pro ověření tvářitelnosti, kterým je věnována kapitola 3.2.1, ale tyto zkoušky nejsou pro naše použití vhodné.



Obrázek 11 - Zkouška ohybem [11]

7.2 Návrh metodiky

Námi navržená zkušební metoda vychází ze zkoušky ohybem. Vycházíme ze základního vzorce pro výpočet ohybového momentu:

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o}$$

Kde σ_o je ohybové napětí, M_o je ohybový moment a W_o je modul průřezu v ohybu. Přičemž W_o se počítá následovně:

$$W_o = \frac{b^2 \cdot t}{6}$$

Kde b je šířka vzorku a t je tloušťka vzorku. Vzorce lze sloužit dohromady na výsledný vztah:

$$\sigma_o = \frac{6 \cdot M_o}{b^2 \cdot t}$$

Pro dosažení do vztahu potřebujeme mít pevně danou šířku a tloušťku vzorku, stejně jako rameno ohybu, pro získání ohybového momentu. Zkušebním tělesem je plech o tloušťce vstupního materiálu, experimenty byly prováděny na materiálu o tloušťce 3 mm, šířce 10 mm a minimální délce 100 mm. Není dána přesná délka vzorku, rameno pro ohyb je 60 mm a zbývajících 40 mm je dostačující pro upnutí. Zkušební tělesa budou vyrobená z výřezu trubky, který bude opracován obroben frézováním na požadované rozměry. Princip zkoušky spočívá v upnutí zkušebního tělesa a jeho následném ohnutí vymezeným ramenem ohybu. Předpokladem pro vyhodnocení metody je naměření zkoušek tahem na vzorcích ze stejného materiálu. Tyto hodnoty poslouží jako reference mezi naměřenou silou ohybu a odpovídajícími mechanickými vlastnostmi.

7.2.1 Návrh vymezuujícího přípravku

Účel tohoto přípravku je jednoduchý, musí vymezit rameno ohybu na zkušebním vzorku, a to ve vzdálenosti 60 mm od upnutí. Tento přípravek by měl být co nejjednodušší jak designově, tak na výrobu, proto byla zvolena metoda výroby 3D tiskem, materiál PLA. První návrh je na obrázku 12. Okénkem ve vrchní části přípravku přijde provléknout zkušební těleso. V okénku se nachází břit, který je přesně ve vzdálenosti 60 mm od základny přípravku a slouží pro vymezení ramene ohybu.



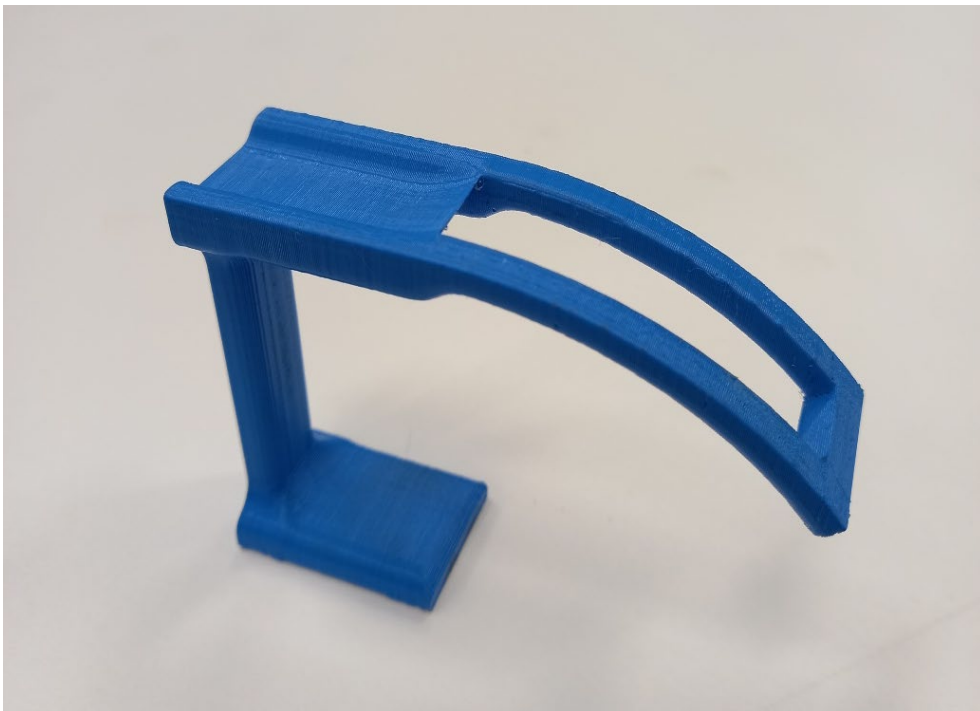
Obrázek 12 - První návrh přípravku

Po provedení prvních zkoušek s přípravkem byl odhalen nedostatek konstrukčního řešení. Vzhledem k rovné ploše přípravku, po které je vedeno závěsné oko dochází ke změně ramena ohybu v průběhu zkoušky. Tento nedostatek má vliv na dosažené výsledky. Proto jsme se rozhodli nedostatek eliminovat a bylo třeba vytvořit druhou verzi přípravku. Druhý návrh je k vidění na obrázku 13.



Obrázek 13 - Druhý návrh přípravku

Zde došlo k eliminaci již zmíněného problému, břit je opět v požadované vzdálenosti 60 mm od podstavy přípravku. Břit a vodící rovina jsou ve stejné výšce a rovina je zakřivená tak, aby bylo dosaženo konstantního rameno ohybu po celou dobu zkoušky. Přípravek byl vytištěn se 100 % výplní pro lepší pevnost a tuhost, přípravek po vytištění na obrázku 14. Okénko, ve kterém se pohybuje ohýbaný vzorek zároveň určuje rozsah zkoušky. Po ohnutí zkušebního tělesa po hranu okénka je zkouška ukončena.



Obrázek 14 - Vytištěný přípravek

7.3 Postup metodiky

7.3.1 Odebrání zkušebních těles

Zkušební tělesa jsou odebrána z trubky vyříznutím vzorku o větších rozměrech než finálních. Odebraný vzorek by měl mít minimální délku 100 mm a šířku 15 mm, aby byl dostačující přídavek na následné obráběcí operace. Při přípravě vzorku je třeba dbát, aby do něj nebyla zanesena nežádoucí deformace, která může ovlivnit výsledky. Těleso musí být odebráno v podélném směru trubky, nejlépe strojní pilou jako na obrázku 15.



Obrázek 15 - Příklad strojní pily [20]

7.3.2 Příprava zkušebních těles

Zkušební tělesa po vyříznutí z trubky nemají požadované rozměry a je třeba je dále obrábět. Je podstatné zajistit paralelní plochy po stranách vzorku a cílovou šířku 10 mm s odchylkou $\pm 0,1$ mm. Pro zhotovení požadovaných rozměrů je vhodné konvenční frézování. Do tělesa opět nesmí být zanesena žádná nežádoucí deformace.

7.3.3 Kontrola rozměrů

Již obrobená zkušební tělesa je třeba zkontrolovat, aby měla požadované rozměry. Požadovaná šířka vzorku je 10 mm s odchylkou $\pm 0,1$ mm. Minimální délka tělesa je 100 mm, tento rozměr nevyžaduje přesnost, ale je důležitý pro upnutí a následné provedení zkoušky. Tloušťka vzorku je dána z výroby a není ovlivněna předchozími operacemi, ale je nutné ji změřit a zaznamenat pro výpočet ohybového napětí.

7.3.4 Upínání

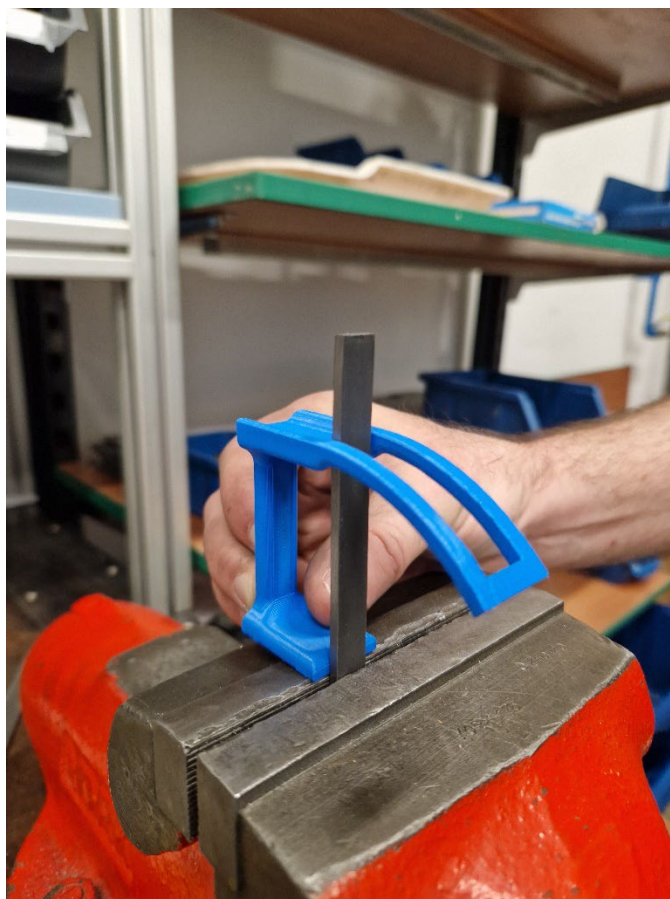
Těleso je upnuto do např. zámečnického svěráku, jako na obrázku 16. Při upínání je třeba dbát na kolmost vzorku s rovinou svěráku. Vyložení vzorku nad rovinu upnutí musí být alespoň 80 mm, aby bylo možné provést zkoušky bezchybně. Svěrák musí být dobře dotažený, aby nedošlo k uvolnění vzorku v průběhu zkoušky. Čelisti svěráku musí vykazovat minimální poškození upínacích čelistí.



Obrázek 16 - Vzorek upnutý ve svěráku

7.3.5 Nasazení přípravku

Dalším krokem je nasazení vymežovacího přípravku, ten je nasazen z vrchu, tak aby vzorek prošel okénkem. Přípravek musí být pevně opřený o čelisti svěráku a zároveň o vzorek, tak aby ke kontaktu docházelo jak u upnutí, tak se břitem v horní části přípravku. Na obrázku 17 je vidět přiložený přípravek v poloze připravené pro zahájení měření.



Obrázek 17 - Upnutý vzorek s přípravkem

7.3.6 Zatěžování zkušebního tělesa

Nyní lze zahájit průběh zkoušky, za část vzorku přesahující nad přiložený přípravek je za pomoci závěsného oka zaháknuta měřící hlava, jako na obrázku 18. Pracovník, který provádí zkoušku následně ohýbá vzorek směrem kolmo k sobě, tak aby se oko stále dotýkalo přípravku. Zkouška je ukončena po kontaktu vzorku s krajní polohou okénka, jako na obrázku 19.



Obrázek 18 - Počáteční poloha při zkoušce



Obrázek 19 - Dokončená zkouška

7.3.7 Odečtení výsledků

Po dokončení zkoušky se z měřicí hlavy odečte maximální zaznamenaná síla, která po dosazení do přepočetního vztahu určí mechanické vlastnosti odpovídajícího materiálu daného vzorku. Opakovatelnost zkoušky je dobrá, jak je vidět na obrázku 20, kde jsou všechny zkoušené vzorky vedle sebe, a až na mírné odchylky v úhlu ohybu, způsobené odpružením materiálu, jsou vzorky ohnuty stejně.



Obrázek 20 - Vzorky po zkoušce

Zkouškou bylo analyzováno 12 vybraných šarží materiálu, každá o třech vzorcích. Vzorky stejného materiálu dříve prošly tahovou zkouškou. Výsledky z tahové zkoušky budou později důležité pro vytvoření přepočetního vztahu. Navržená metoda splňuje požadavky pro snadnou realizaci v dílenských podmínkách. Není třeba žádné složité vybavení, v našem případě dílenský svěrák pro upnutí vzorku, 3D vytištěný přípravek pro vymezení ramena ohybu a siloměrná hlava pro zaznamenání síly potřebné k ohnutí vzorku

8 Vyhodnocení naměřených hodnot

U všech zkoušených těles byla zaznamenána šířka a tloušťka vzorku a naměřená síla ohybu. Tloušťka a šířka vzorků byla zprůměrovaná pro každou šarži. Z těchto hodnot byl spočítán ohybový moment. Všechny naměřené hodnoty jsou v tabulce 5.

Řada vzorku	Vzorek	b [mm]	t [mm]	F [N]	σ_o	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [Mpa]
1	1	9,82	2,82	119	157,5	446	455
	2			120	158,9	410	450
	3			123	162,8	-	-
2	1	9,92	2,85	120	154,0	405	419
	2			120	154,0	364	403
	3			125	160,5	-	-
3	1	10,1	2,9	115	139,9	-	-
	2			114	138,7	348	378
	3			115	139,9	376	391
4	1	10,02	2,85	127	159,8	373	415
	2			115	144,7	374	445
	3			111	139,7	-	-
5	1	10,01	2,95	125	152,2	386	440
	2			128	155,9	384	439
	3			131	159,5	404	440
6	1	10,06	2,8	134	170,2	415	472
	2			136	172,8	435	472
	3			134	170,2	438	472
7	1	10,09	2,9	139	169,5	379	432
	2			139	169,5	372	432
	3			139	169,5	379	431
8	1	10,05	2,92	134	163,6	375	461
	2			135	164,8	434	470
	3			135	164,8	399	461
9	1	10,15	2,94	138	164,0	396	448
	2			136	161,6	333	445
	3			133	158,1	380	447
10	1	10,02	2,95	128	155,6	404	462
	2			128	155,6	380	458
	3			128	155,6	367	461
11	1	9,99	2,92	112	138,4	345	396
	2			108	133,4	331	398
	3			114	140,8	325	398
12	1	10,04	2,93	137	167,0	369	439
	2			147	179,2	410	447
	3			148	180,4	390	442

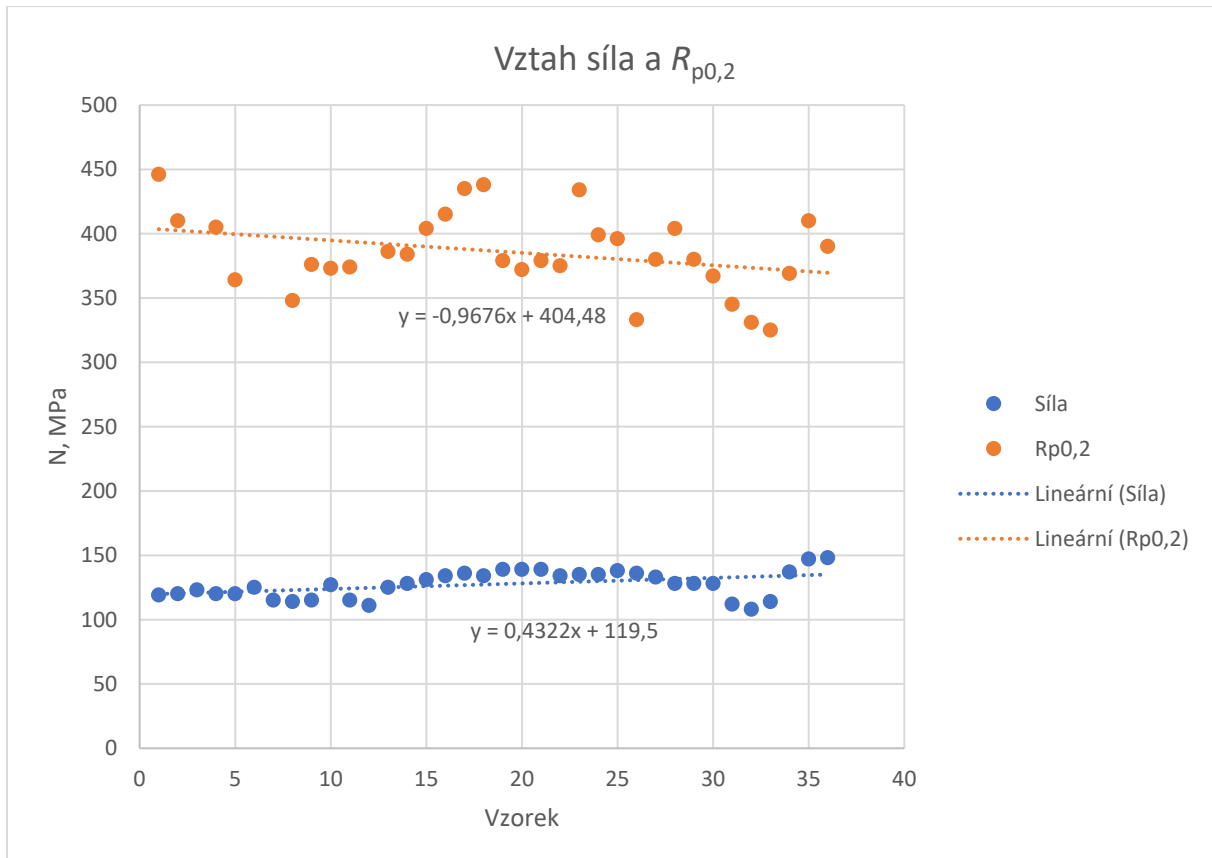
Tabulka 5 - Naměřená data experimentu

Z naměřených dat je vidět, že síla ohybu je konzistentní v rámci šarží. Samotné hodnoty naměřené síly ale nic nevypovídají, proto je nutné je porovnat s hodnotami mezi kluzu a meze pevnosti pro stejné šarže materiálů. Tabulka 6 obsahuje tyto hodnoty.

Řada vzorků	Číslo vzorku	$R_{p0,2}$	R_m
		[MPa]	[MPa]
1	1	446	455
	2	410	450
	3	-	-
2	1	405	419
	2	364	403
	3	-	-
3	1	-	-
	2	348	378
	3	376	391
4	1	373	415
	2	374	445
	3	-	-
5	1	386	440
	2	384	439
	3	404	440
6	1	415	472
	2	435	472
	3	438	472
7	1	379	432
	2	372	432
	3	379	431
8	1	375	461
	2	434	470
	3	399	461
9	1	396	448
	2	333	445
	3	380	447
10	1	404	462
	2	380	458
	3	367	461
11	1	345	396
	2	331	398
	3	325	398
12	1	369	439
	2	410	447
	3	390	442

Tabulka 6 - Referenční hodnoty meze kluzu a meze pevnosti

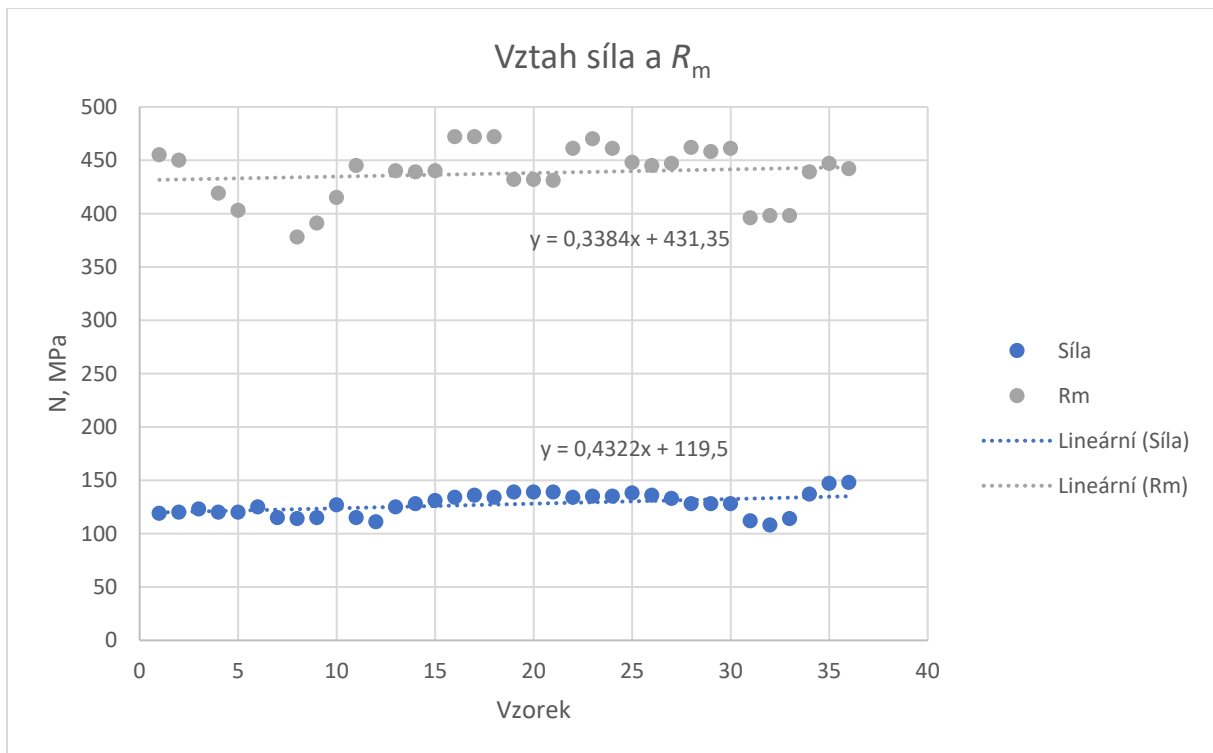
Pro 4 vzorky nejsou dostupné hodnoty z tahové zkoušky z důvodu chyby měření a jsou z porovnání vyřazeny. Dále byly hodnoty mezi sebou porovnány. V grafu 3 jsou zobrazeny hodnoty naměřených sil a meze kluzu. V grafu 4 je k vidění porovnání hodnot sil a meze pevnosti. V obou grafech jsou i směrnice odpovídajících hodnot.



Graf 4 - Porovnání síly a meze kluzu

Při pohledu na hodnoty je vidět vzájemná korelace, především pro vzorky 30 až 35, kde je znatelný pokles v obou hodnotách. Směrnice obou hodnoty sice nevykazují vzájemný směr, ale odchylka není tak veliká. Důvodem proč směrnice neodpovídají může být už samotný rozptyl mezi hodnotami meze kluzu.

Pro ověření by bylo vhodné otestovat další sadu vzorků, ale vztah mezi hodnotami je dostatečný pro uznání metody.

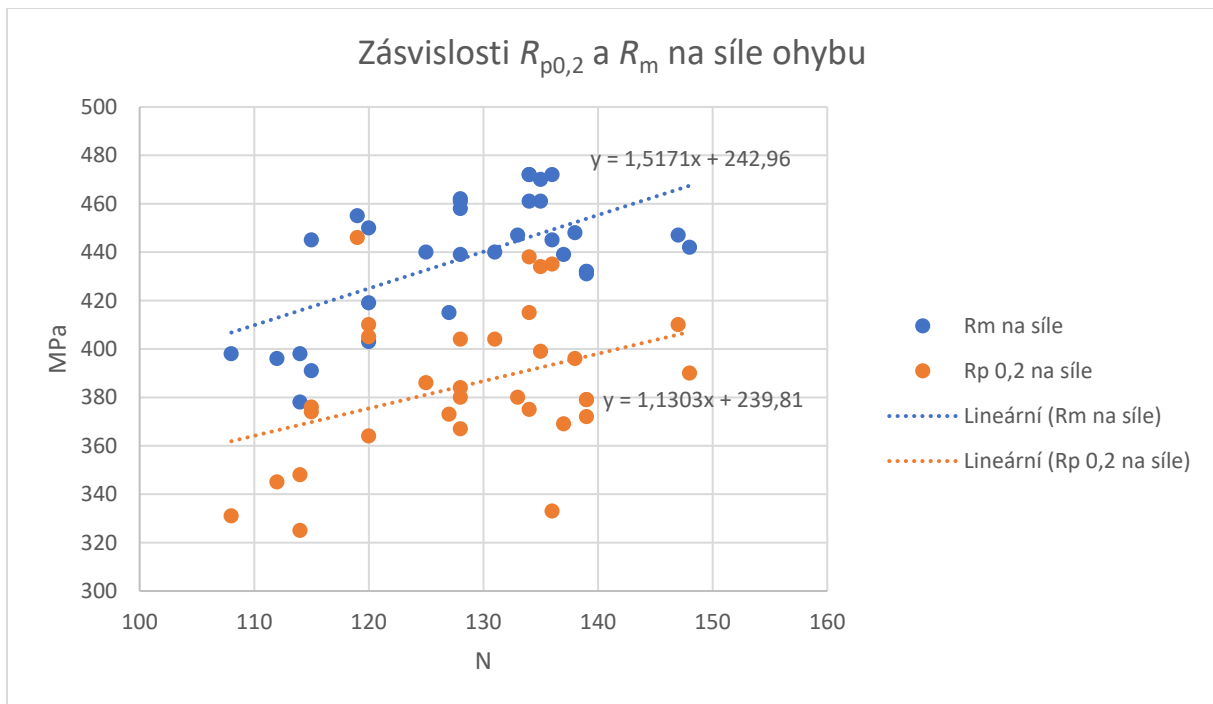


Graf 5 – Porovnání síly a meze pevnosti

U hodnot meze pevnosti je situace lepší. Rozptyl mezi naměřenými daty pro mez pevnosti není tak zásadní jako u meze kluzu. Opět je viditelný stejný pokles v hodnotách pro vzorky 30 až 35. Lehké výkyvy pro prvních 3 vzorků jsou zřetelné jak pro naměřenou sílu, tak pro mez pevnosti. Obě směrnice mají velmi podobný sklon, jen jsou odsazeny o pevnou hodnotu. Tyto hodnoty že metoda je velmi vhodná pro určení meze pevnosti.

V obou grafech jsou sice viditelné závislosti, ale je třeba je dát do vzájemného vztahu a vytvořit přepočtení vztah. V grafu 5 je spojení hodnoty síla a dat z tahových zkoušek. Na vodorovné ose jsou hodnoty sil z experimentu a na svislé ose hodnoty meze kluzu a meze pevnosti.

Samotné hodnoty moc nevyovídají, ale velmi důležité jsou jejich směrnice. Ty určují přepočtení výtah, který slouží pro určení meze kluzu a meze pevnosti z naměřené síly.



Graf 6 - Výsledná závislost dat z experimentu

Tedy pro mez kluzu platí následovný přepočtení vztah:

$$y = 1,1303 \cdot x + 239,81$$

Kde za x je dosazena hodnota naměřené síly ohybu a y je odpovídající mez kluzu.

Pro mez pevnosti platí tento vztah:

$$y = 1,5171 \cdot x + 242,96$$

Kde opět platí, že za x se dosadí naměřená síla a y odpovídá mezi pevnosti pro zkoušený materiál.

Tyto vztahy jsou výstupem celého experimentu a splňují jednoduchost pro jejich použití v dílenských podmínkách. Celá zkouška i s přepočtem na požadované hodnoty materiálových vlastností zabere maximálně 5 minut pro jeden vzorek. Pro zvýšení přesnosti je ideální zkoušet více vzorků z jedné šarže a hodnoty průměrovat.

9 Závěr

Problém, kterým se tato práce zabývá nastává při výrobě sloupů veřejného osvětlení. Sloupy jsou tvořeny až několika různými trubkami o zmenšujícím se průměru, tak aby zapadaly do sebe. Konec větší trubky je tvářen tak, aby upravený průměr odpovídal průměru trubky následující. Dodávaný materiál S235JRH vykazuje velký rozptyl mechanických vlastností mezi jednotlivými šaržemi, což vede k nestabilitě výroby.

Cílem práce bylo vytvořit metodiku pro určení mechanických vlastností materiálu v dílenských podmínkách. Tato metodika má být co nejjednodušší, aby jí mohl vykonat dílenský pracovník a zároveň nebylo třeba drahého vybavení.

Postup pro vytvoření této metodiky je podpořen analýzou mechanických vlastností s odkazem na tvářitelnosti. Ta hraje při tváření důležitou roli, jelikož vypovídá o tom, jak dobře lze materiál tvářet. Z možných zkoušek, kterými lze tvářitelnost určit byla vybrána modifikovaná zkouška ohybem.

Pro metodiku byl navržen speciální přípravek, který slouží k vymezení ramena ohybu v celém průběhu zkoušky. Návrh proběhl ve dvou iteracích, jelikož první verze nevyhovovala požadavkům. Přípravek je vyroben metodou 3D tisku se 100 % výplní pro dostatečnou pevnost.

Pro verifikaci celé metodiky bylo nutné nejprve analyzovat materiál zkouškou tahem. Tyto hodnoty slouží jako reference pro výsledky z navržené metodiky. Celkem tahovou zkouškou prošlo 31 šarží materiálu po 4 vzorcích na šarži. Jeden ze vzorků byl z oblasti svarového spoje. Tato tělesa nebyla použita pro ověření navržené zkoušky, jelikož jejich mechanické vlastnosti se výrazně liší.

Navrženou zkouškou prošla jen část z původních 31 jedna šarží, a to 12 šarží po 3 vzorcích. Tato skupina vzorků je dostatečně reprezentativní a je možné na ni určit přepočtení vztah mezi silou k ohnutí vzorku k mechanickým vlastnostem materiálu. Navržená metodika obsahuje model přípravku, který byl připraven pomocí 3D tisku z materiálu PLA. Tento přípravek vymezuje rameno ohybu na

zkušebním tělese. Dále je ke zkoušce třeba dílenský svěrák, závěsné oko a siloměrná hlava. Podrobný postup zkoušky je popsán v kapitole 6.1.

Výstupem experimentu jsou přepočtení vztahy, které jsou součástí metodiky. Pro mez kluzu je vztah následující: $y=1,1303 \cdot x+239,81$ a pro mez pevnosti: $y=1,5171 \cdot x+242,96$. V obou případech je za x dosazena naměřená síla a y odpovídá mezi kluzu, respektive mezi pevnosti.

Pro zlepšení metodiky by bylo vhodné zajistit pevné upnutí přípravku ke svěráku, ať už modifikací samotného přípravku, nebo použitím svorek. Pokud by tato metodika měla být použita na zkoušení jiného materiálu, nebo pro jinou tloušťku vzorku, je nutné opakovat počáteční měření a zkoušky tahem na vzorcích stejného materiálu. Metodika není univerzální pro všechny materiály.

10 Bibliografie

- [1] [Velký elektrický univerzální testovací stroj 100 kN INSIZE UTM-E100]. In: insz.eu [online]. 2023 [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <https://www.insz.eu/trhaci-stroje/velky-elektricky-univerzalni-testovaci-stroj-100-kn-insize-utm-e100/>
- [2] MACHEK, Václav. Kovové materiály 2: vlastnosti a zkoušení kovových materiálů. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05527-4.
- [3] SOBOTOVÁ, Jana, Zdeňka JENÍKOVÁ, Jakub HORNÍK a Elena ČIŽMÁROVÁ. Nauka o materiálu I. a II.: cvičení. 2. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2022. ISBN 978-80-01-06975-2.
- [4] PETRUŽELKA, Jiří a Pavel SONNEK. Tvářitelnost kovových materiálů [online]. 3 Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2006, poslední aktualizace 9.1.2007
- [5] SCHINDLER, Ivo, Petr KAWULOK a Miroslav LEGERSKI. Metalurgická tvářitelnost [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2008 [cit. 2023-07-27].
- [6] KOTOUČ, Jiří. Teorie tváření. Praha: ČVUT, 1991. ISBN 80-01-00654-9.
- [7] [TUBE END FORMING MACHINE]. In: amobgroup.com [online]. 2023 [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <https://www.amobgroup.com/en/products/tube-end-forming-machine/>
- [9] [img_pevnostni]. In: ceg.fsv.cvut.cz [online]. 2002 [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: https://ceg.fsv.cvut.cz/ceg-old/CZ/ceg-vyzkum/img_pevnostni/tlak2.jpg
- [10] [Härteprüfung]. In: qualitech.ch [online]. 2023 [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <https://qualitech.ch/wp-content/uploads/2017/11/H%C3%A4rtepr%C3%BCfung-e1513766252652-1920x700.jpeg>
- [11] [tribod]. In: knife.cz [online]. 2023 [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <https://www.knife.cz/Portals/0/ObrazkyKClankum/slon/kovabrou/tribod.jpg>
- [12] ČSN EN ISO 6892-1. Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [13] KREJSA, Pavel. STANOVENÍ KŘIVEK MEZNÍ TVĚŘITELNOSTI POMOCÍ ZKOUŠKY TAHEM A SYSTÉMU ARAMIS. [online] V Praze: České vysoké učení technické, 2020. [cit. 2023-07-27] Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/89587/F2-DP-2020-Krejsa-Pavel-Pavel%20Krejsa%20-%20Diplomova%20prace.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>.
- [14] HÁK, Ondřej. VLIV RYCHLOSTI DEFORMACE NA POLOHU FLC KŘIVKY. [online] V Praze: České vysoké učení technické, 2020. [cit. 2023-07-27] Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/89614/F2-DP-2020-Hak-Ondrej-Vliv%20rychlosti%20deformace%20na%20polohu%20FLC%20krivky.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- [15] PETRUŽELKA, Jiří a Richard BŘEZINA. Úvod do tváření I. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2001. ISBN 80-707-8877-1.

- [16] SCHINDLER, Ivo, Petr KAWULOK a Miroslav LEGERSKI. Metalurgická tvářitelnost [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2008 [cit. 2020-02-04]. Dostupné online
- [17] ČSN EN 10219-1. Svařované duté profily z konstrukčních nelegovaných a jemnozrnných ocelí, tvářené za studena – Část 1: Technické dodací podmínky. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.
- [18] ČSN EN 10219-2. Svařované duté profily z konstrukčních nelegovaných a jemnozrnných ocelí, tvářené za studena – Část 2: Rozměry, úchylny a statické hodnoty. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [19] SKÁLOVÁ, Jana, Rudolf KOVAŘÍK a Vladimír BENEDIKT. Základní zkoušky kovových materiálů. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 8070826231.
- [20] [Pásová pila na kov PMS 230/260 SAD Pilana]. In: www.strojni-pily.eu [online]. 2023 [cit. 2023-08-09]. Dostupné z: https://www.strojni-pily.eu/878-thickbox_default/pasova-pilana-kov-pms-230-260-sad-pilana.jpg
- [21] ČSN EN 10219-3. Svařované duté profily z konstrukčních ocelí tvářené za studena – Část 3: Technické dodací podmínky pro oceli s vysokou pevností a odolností vůči povětrnostním podmínkám Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.
- [22] KEELER, Stuart. The Science of Forming: Forming-Limit Diagrams: Then and Now. *Metalformingmagazine* [online]. 2016. [cit. 2023-07-08]. Dostupné z: https://www.metalformingmagazine.com/magazine/article/?/2016/7/1/FormingLimit_Diagrams:_Then_and_Now
- [23] Shyam R. Ghodke, Bijan K. Dutta, P.V. Durgaprasad. Analytical development and experimental verification of empirical correlations to determine mechanical properties of copper alloys using small punch test data [online]. 2020. [cit. 2023-07-08]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0920379620303343>
- [24] Liu Nan, Zhang Xi, Zhang Qiangqiang, Jiang Yihui, Su Yishi, Li Qian, Feng Pengfa, Tang Wenting, Liang Shuhua. Numerical evaluation and experimental verification of mechanical properties and fracture behavior for TiB₂/Cu composites prepared by in-situ mixing casting [online]. 2021. [cit. 2023-07-08]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925838821038858>
- [25] Yashwant S. Munde, Ravindra. B. Ingle. Theoretical Modeling and Experimental Verification of Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Thermoplastics [online]. 2022. [cit. 2023-07-08]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221201731500047X>
- [26] ČSN EN ISO 10113. Kovové materiály – Plechy a pásy – Stanovení součinitele plastické anizotropie. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [27] ČSN EN ISO 6508-1. Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Rockwella – Část 1: Zkušební metoda. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.

[28] ČSN EN ISO 6508-2. Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Rockwella – Část 2: Ověřování a kalibrace zkušebních strojů a vnikacích těles. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.

[29] ČSN EN ISO 6508-3. Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Rockwella – Část 3: Kalibrace referenčních destiček. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.

[30]

Nan Liu, Qiangqiang Zhang, Haoyun Zhang, Fei Cao, Pengfa Feng, Yufei Zuo, Yihui Jiang, Wenting Tang, Shuhua Liang. Experimental verification and numerical analysis on plastic deformation and mechanical properties of the in-situ TiB₂ homogeneous composites and TiB₂/Cu network composites prepared by powder metallurgy [online]. 2022. [cit. 2023-07-08]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925838822022885>

[31] ČSN EN ISO 6892-1. Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.

[32] ČSN EN ISO 20482. Kovové materiály – Plechy a pásy – Zkouška hloubením podle Erichsena. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.

[33] Jinyuan Tang, Yu Shi, Jiuyue Zhao, Liwei Chen, Zhenyu Wu. Numerical modeling considering initial gradient mechanical properties and experiment verification of residual stress distribution evolution of 12Cr2Ni4A steel generated by ultrasonic surface rolling [online]. 2022. [cit. 2023-07-08]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0257897222010489>

11 Seznamy

11.1 Seznam obrázků

OBRÁZEK 1 - TVÁŘENÝ KONEC TRUBKY [7]	9
OBRÁZEK 2 - VLIV TEPLoty NA TVÁŘITELNOST [15]	13
OBRÁZEK 3 - TRHACÍ STROJ [1]	16
OBRÁZEK 4 - TVAR ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ [2]	17
OBRÁZEK 5- PRACOVNÍ DIAGRAMY [2]	18
OBRÁZEK 6 - SMLUVNÍ A SKUTEČNÝ TAHOVÝ DIAGRAM	20
OBRÁZEK 7 - SCHÉMA ZKUŠEBNÍHO VZORKU	24
OBRÁZEK 8 - LABORATORNÍ VYBAVENÍ POUŽITÉ KE ZKOUŠCE	25
OBRÁZEK 9 - ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ PRO ZKOUŠKA TLAKEM [9]	31
OBRÁZEK 10 - ZKOUŠKA TVRDOSTI [10]	32
OBRÁZEK 11 - ZKOUŠKA OHYBEM [11]	33
OBRÁZEK 12 - PRVNÍ NÁVRH PŘÍPRAVKU	35
OBRÁZEK 13 - DRUHÝ NÁVRH PŘÍPRAVKU	35
OBRÁZEK 14 - VYTIŠTĚNÝ PŘÍPRAVEK	36
OBRÁZEK 15 - PŘÍKLAD STROJNÍ PILY [20]	37
OBRÁZEK 16 - VZOREK UPNUTÝ VE SVĚŘÁKU	38
OBRÁZEK 17 - UPNUTÝ VZOREK S PŘÍPRAVKEM	39
OBRÁZEK 18 - POČÁTEČNÍ POLOHA PŘI ZKOUŠCE	40
OBRÁZEK 19 - DOKONČENÁ ZKOUŠKA	40
OBRÁZEK 20 - VZORKY PO ZKOUŠCE	41

11.2 Seznam tabulek

TABULKA 1 - CHEMICKÉ SLOŽENÍ MATERIÁLU S235JRH [17].....	22
TABULKA 2 - MECHANICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLU S235JRH [17].....	22
TABULKA 3 - MEZNÍ ÚCHYLKY TVARU TOLERANCÍ PŘÍMOSTI A HMOTNOSTI MATERIÁLU S235JRH	23
TABULKA 4 - ZPRŮMĚROVANÉ VÝSLEDKY TAHOVÉ ZKOUŠKY	26
TABULKA 5 - NAMĚŘENÁ DATA EXPERIMENTU	42
TABULKA 6 - REFERENČNÍ HODNOTY MEZE KLUZU A MEZE PEVNOSTI	43

11.3 Seznam grafů

GRAF 1 - NAMĚŘENÉ MEZE KLUZU	27
GRAF 2 - NAMĚŘENÉ MEZE PEVNOSTI	28
GRAF 3 - PRŮMĚRNÉ HODNOTY TAŽNOSTÍ	29
GRAF 4 - POROVNÁNÍ SÍLY A MEZE KLUZU	44
GRAF 5 – POROVNÁNÍ SÍLY A MEZE PEVNOSTI	45
GRAF 6 - VÝSLEDNÁ ZÁVISLOST DAT Z EXPERIMENTU	46

11.4 Seznam příloh

Příloha 1 – Soubor všech naměřených dat zkoušek tahem