

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA STROJNÍ**

**Studijní program: B0715A270013 – Strojní inženýrství**

**Studijní specializace: Strojírenské materiály a technologie**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Vypracování studijního materiálu a příručky o provádění destruktivních  
zkoušek dle normy EN ISO 15614-1**

**Autor: Eva HAJŠMANOVÁ**

**Vedoucí práce: Doc. Ing. Petr BENEŠ, Ph.D.**

*Akademický rok 2022/2023*

# ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2022/23

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Eva HAJŠMANOVÁ**  
Osobní číslo: **S19B0296P**  
Studijní program: **B0715A270013 Strojní inženýrství**  
Specializace: **Strojírenské materiály a technologie**  
Téma práce: **Vypracování studijního materiálu a příručky o provádění destruktivních zkoušek dle normy EN ISO 15614-1**  
Zadávací katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

### Zásady pro vypracování

1. Základy mechanického zkušebnictví
2. Procesy a metody svařování ocelí
3. Kontrola svarů
4. Základní normy vztažené ke kontrole svařovaných spojů a konstrukcí
5. Přehled požadovaných destruktivních zkoušek a zkušebních metod
6. Kritéria pro vyhodnocení zkoušek svarů
7. Diskuze
8. Závěr

Rozsah bakalářské práce: **30-40 stran**  
Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Normy vztahující se ke kontrole svařovaných spojů a konstrukcí.

ASM Handbook vol.8., Mechanical testing and evaluation. 2002. ISBN  
0-87170-389-0.

JEFFUS, LARRY, F. Welding: principles and applications. Eighth edition.  
Boston: Cengage Learning, 2017, ISBN 978-1-305-49469-5.

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.**  
Katedra materiálů a strojírenské metalurgie  
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Martina Dvořáková**  
ŠKODA JS a.s.  
Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2022**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2023**

L.S.

---

**Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.**  
děkan

---

**Doc. Ing. Josef Odehnal, Ph.D.**  
vedoucí katedry

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucímu mé bakalářské práce panu Doc. Ing. Petru Benešovi, Ph.D. za vedení a cenné rady při tvorbě práce. Poděkování patří i paní Ing. Martině Dvořákové za možnost konzultací a osobních setkání a zároveň za komentáře a připomínky k práci. Také děkuji panu Ing. Václavu Jandíkovi a Ing. Milanu Vnoučkovi, Ph.D. za jejich čas, který věnovali, aby mi ukázali a komentářem doplnili všechny potřebné zkoušky pro vypracování bakalářské práce.

Díky patří i mé rodině, partnerovi a přátelům bez jejichž podpory, pomoci a trpělivosti by tato práce nevznikla.

## ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Hajšmanová	Jméno Eva	
<b>STUDIJNÍ PROGRAM</b>	B0715A270013 Strojní inženýrství		
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Beneš, Ph.D.	Jméno Petr	
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU – FST – KKS		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	Nehodící se škrtněte
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Vypracování studijního materiálu a příručky o provádění destruktivních zkoušek dle normy EN ISO 15614-1		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KMM	<b>ROK ODEVZD.</b>	2023
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	83	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	83	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	-
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b>  <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	<p>Bakalářská práce obsahuje popis destruktivních zkoušek prováděných na svarových spojích. Cílem je vypracovat přehlednou a kompletní příručku pro pracovníky firmy Škoda JS a.s. Tato příručka by měla při práci nahradit používání velkého množství norem a tím zjednodušit a zároveň zefektivnit práci.</p>
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>  <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	<p>Destruktivní zkoušení svarových spojů, norma, zkušební tyč, svarový spoj</p>

**SUMMARY OF BACHELOR SHEET**

<b>AUTHOR</b>	<b>Surname</b> Hajšmanová	<b>Name</b> Eva
<b>STUDY PROGRAMME</b>	B0715A270013 Mechanical Engineering	
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname (Inclusive of Degrees)</b> Doc. Ing. Beneš, Ph.D.	<b>Name</b> Petr
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KKS	
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Delete when not applicable	
	Bus-body Design	

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KMM	<b>SUBMITTED IN</b>	2023
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

**NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)**

<b>TOTALLY</b>	83	<b>TEXT PART</b>	83	<b>GRAPHICAL PART</b>	-
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION</b> <b>TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The bachelor thesis contains a description of destructive tests performed on welded joints. The aim is to develop a clear and complete manual for the employees of Škoda JS a.s. This manual should replace the use of a large number of standards in the work and thanks that simplify and at the same time make the work more efficient.
<b>KEY WORDS</b>	Destructive testing of welded joints, standard, test rod, welded joint

## Obsah

Zadání bakalářské práce .....	2
Seznam použitých symbolů .....	11
Seznam obrázků.....	14
Seznam tabulek.....	17
1 Úvod .....	18
2 Destruktivní zkoušky podle normy ČSN EN ISO 15614-1.....	19
2.1 Tvar a rozměry zkušebních kusů .....	19
2.2 Kontrola a zkoušení zkušebních tyčí .....	21
2.3 Umístění a odběr zkušebních vzorků.....	22
3 Zkouška tahem.....	26
3.1 Průběh tahové zkoušky a tahový diagram .....	26
3.2 Značení rozměrů zkušebních tyčí .....	28
3.3 Hodnoty získané ze zkoušky tahem.....	29
3.3.1 Mez kluzu .....	29
3.3.2 Mez pevnosti .....	30
3.3.3 Tažnost .....	30
3.3.4 Kontrakce.....	30
3.4 Příčná zkouška tahem .....	31
3.4.1 Značení rozměrů zkušebních tyčí.....	31
3.4.2 Příprava zkušebních vzorků.....	32
3.4.3 Umístění zkušební tyče.....	32
3.4.4 Označování tyčí .....	34
3.4.5 Tepelné zpracování a/nebo stárnutí .....	34
3.4.6 Dělení .....	34
3.4.7 Strojní obrábění zkušebních tyčí .....	35
3.4.8 Rozměry zkušebních tyčí.....	35
3.4.9 Úprava povrchu .....	38
3.4.10 Výsledek zkoušky.....	39
3.5 Podélná zkouška tahem svarového kovu tavných svarových spojů .....	39
3.5.1 Odběr zkušebních vzorků .....	39
3.5.2 Dělení zkušebních vzorků .....	40
3.5.3 Strojní opracování zkušebních tyčí.....	40



3.5.4	Výsledek podélné zkoušky tahem .....	41
3.6	Zkouška tahem za zvýšené teploty .....	42
4	Zkouška ohybem .....	44
4.1	Značení rozměrů zkušebních tyčí .....	45
4.2	Zkušební zařízení .....	46
4.2.1	Ohýbací přípravek s podpěrami a trnem.....	46
4.2.2	Ohýbací přípravek s blokem ve tvaru V .....	47
4.2.3	Ohýbací přípravek s upínacími čelistmi .....	47
4.3	Teploty během zkoušky .....	47
4.4	Metody pro použití zkoušky ohybem .....	48
4.5	Postup zkoušky ohybem .....	49
4.6	Zjišťované veličiny .....	51
4.6.1	Mez pevnosti v ohybu .....	51
4.6.2	Průhyb.....	52
4.7	Zkouška ohybem – ČSN EN ISO 5173 .....	54
4.7.1	Zkušební tyč pro příčnou lící zkoušku ohybem tupého svaru.....	54
4.7.2	Zkušební tyč pro zkoušku ohybem ze strany kořene tupého svaru .....	54
4.7.3	Zkušební tyč pro příčnou boční zkoušku ohybem tupého svaru .....	55
4.7.4	Zkušební tyč pro podélnou zkoušku ohybem z lící strany nebo ze strany kořene tupého svaru.....	55
4.7.5	Zkušební tyč pro lící zkoušku ohybem naplátované vrstvy bez tupého svaru.....	55
4.7.6	Zkušební tyč pro boční zkoušku ohybem naplátované vrstvy bez tupého svaru.....	56
4.7.7	Zkušební tyč pro boční a lící zkoušku ohybem naplátované vrstvy s tupým svarem.....	56
4.7.8	Rozměry zkušebních tyčí.....	58
4.7.8.1	TFBB a TRBB.....	58
4.7.8.2	SBB .....	58
4.7.8.3	LFBB a LRBB.....	59
4.7.8.4	FBC .....	59
4.7.8.5	SBC .....	59
4.7.8.6	FBCB.....	59
4.7.9	Rozměry zkušební tyče.....	60
4.7.9.1	Šířka zkušební tyče.....	60

4.7.9.2	Hrany.....	60
5	Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy.....	61
5.1	Zkušební tyče.....	64
5.2	Vruby.....	64
5.2.1	Značení vrubů.....	64
5.2.2	V-vrub.....	65
5.2.3	U-vrub.....	65
6	Zkouška tvrdosti.....	66
6.1	Zkratky a termíny.....	67
6.2	Příprava zkušebních tyčí.....	67
6.3	Zkušební postup.....	68
6.3.1	Řada vtisků.....	68
6.3.2	Jednotlivé vtisky.....	72
7	Makroskopická kontrola.....	73
7.1	Příprava zkušebních tyčí.....	73
7.2	Hodnocení vad.....	73
7.3	Příklad zkušební tyče.....	74
8	Korozní zkouška.....	75
8.1	Zcitlivění.....	75
8.2	Příprava zkušebních vzorků.....	75
8.3	Postup zkoušky.....	77
8.3.1	Zkouška v 16 % kyselině sírové a síranu měďnatém.....	77
8.4	Zkouška ohybem po zkoušce korozní.....	78
8.5	Hodnocení korozní zkoušky.....	78
9	Závěr.....	80
	Seznam použitých zdrojů.....	81

## Seznam použitých symbolů

ČSN	česká technická norma	
EN	evropská norma	
FBC	zkušební tyč pro lící zkoušku ohybem naplátované vrstvy bez tupého svaru (face bend test specimen for cladding without a butt weld)	
FBCB	zkušební tyč pro lící zkoušku ohybem naplátované vrstvy s tupým svarem (face bend test specimen for cladding with a butt weld)	
HB	tvrdost podle Brinella (Brinell hardness)	
HV	tvrdost podle Vickerse (Vickers hardness)	
ISO	Mezinárodní organizace pro standardizaci	
KU	absorbovaná energie u tyče s U vrubem	
KV	absorbovaná energie u tyče s V vrubem	
LFBB	zkušební tyč pro podélnou zkoušku ohybem z lící strany tupého svaru (longitudinal face bend test specimen for a butt weld)	
LRBB	zkušební tyč pro podélnou zkoušku ze strany kořene tupého svaru (longitudinal root bend test specimen for a butt weld)	
SBB	zkušební tyč pro příčnou boční zkoušku ohybem tupého svaru (side bend test specimen for a butt weld)	
SBC	zkušební tyč pro boční zkoušku ohybem naplátované vrstvy bez tupého svaru (side bend test specimen for cladding without a butt weld)	
SBCB	zkušební tyč pro boční zkoušku ohybem naplátované vrstvy s tupým svarem (side bend test specimen for cladding with a butt weld)	
TFBB	zkušební tyč pro příčnou lící zkoušku ohybem tupého svaru (transverse face bend test specimen for a butt weld)	
TRBB	zkušební tyč pro zkoušku ohybem ze strany kořene tupého svaru (transverse root bend test specimen for a butt weld)	
VHT	V vrub v tepelně ovlivněné oblasti, který je kolmý v povrchu	
VWT	V vrub ve svarovém kovu, který je kolmý k povrchu	
$A$	tažnost	[%]
$a$	tloušťka ohýbané zkušební tyče	[mm]
$A_{gt}$	celkové prodloužení v procentech měřeného průtahoměrem při maximální zatížení	[%]
$A_t$	tažnost celková	[%]
$b$	šířka rovnoběžné délky	[mm]
$b_1$	šířka hlavy upínacího konce	[mm]

Katedra materiálů		Eva Hajšmanová
$d$	průměr upevňovacího trnu	[mm]
$D$	průměr trnu	[mm]
$E$	jednotlivé vtisky u zkoušky tvrdosti	[/]
$F_m$	maximální síla dosažená při zkoušce	[N]
$F_{p0,2}$	smluvní síla na mezi kluzu	[N]
$H$	vzdálenost řad vtisků od povrchu referenční linie nebo obl. natavení	[mm]
$l$	vzdálenost mezi podpěrami u zkoušky ohybem	[mm]
$L$	délka zkušební tělesa pro zkoušku ohybem	[mm]
$L_0$	měřená délka zkušební tyče před zkouškou	[mm]
$L_c$	rovnoběžná délka	[mm]
$L_f$	počáteční vzdálenost mezi dotykem válečků a osou svaru	[mm]
$L_s$	maximální šířka svaru po opracování	[mm]
$L_t$	celková délka zkušební tyče	[mm]
$L_u$	měřená délka zkušební tyče po lomu	[mm]
$M_{omax}$	maximální ohybový moment	[mm]
$r$	poloměr zaoblení u hlavy tyčí pro zkoušku tahem	[mm]
$R$	řada vtisků u zkoušky tvrdosti	[/]
$R_e$	mez kluzu	[MPa]
$R_{eH}$	horní mez kluzu	[MPa]
$R_{eL}$	dolní mez kluzu	[MPa]
$R_{mo}$	mez pevnosti v ohybu	[MPa]
$R_m$	mez pevnosti v tahu	[MPa]
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu	[MPa]
$R_{r0,1}$	mez kluzu určená z trvalé deformace po odlehčení	[MPa]
$R_{t0,5}$	smluvní mez kluzu z celkové deformace pod zatížením	[MPa]
$S_0$	počáteční hodnota příčného průřezu zkušební tyče	[mm <sup>2</sup> ]
$S_u$	plocha příčného průřezu zkušební tyče po zkoušce	[mm]
$t$	tloušťka svarového spoje	[mm]
$T$	specifická teplota	[°C]
$T_i$	teplota měřená na povrchu tyče	[°C]
$t_c$	tloušťka naplátování	[mm]
$t_s$	tloušťku zkušební tyče	[mm]
$t_w$	tloušťka základního materiálu pod naplátováním	[mm]
$U$	napětí	[MPa]

---

Katedra materiálů		Eva Hajšmanová
$W_0$	průřezový modul v ohybu	[mm <sup>3</sup> ]
$Z$	kontrakce	[%]
$\alpha$	úhel, který svírají zkosené boky povrchu bloku ve tvaru V nebo úhel odbočky	[°]
$\varepsilon$	poměrné prodloužení	[%]

## Seznam obrázků

Obr. 1 - Přehled použitých norem .....	19
Obr. 2 - Zkušební kus pro tupý spoj na plechu s plným průvarem [1].....	19
Obr. 3 - Zkušební kus pro tupý spoj na trubce s plným průvarem [1].....	20
Obr. 4 - Zkušební kus pro T-spoj [1].....	20
Obr. 5 - Zkušební kus pro spoj odbočky [1].....	21
Obr. 6 - Umístění zkušebních vzorků pro tupý spoj na plechu [1].....	23
Obr. 7 - Umístění zkušebních vzorků pro tupý spoj na trubce [1] .....	24
Obr. 8 - Umístění zkušebních vzorků na T-spoji [1].....	24
Obr. 9 - Umístění zkušebních vzorků pro spoj odbočky na trubce [1].....	25
Obr. 10 - Průběh tahové zkoušky [2].....	26
Obr. 11 - Detail tahové zkoušky z obr. 1 [7] .....	27
Obr. 12 - Určení smluvní meze kluzu [9].....	30
Obr. 13 - Tyč pro zkoušku tahem trubek plného průřezu [4] .....	32
Obr. 14 - Schéma zkušebního zařízení [12] .....	33
Obr. 15 - Upnutí zkušební tyče do čelistí zkušebního stroje.....	34
Obr. 16 - Příklady umístění zkušebních tyčí ve spojích [4] .....	35
Obr. 17 - Zkušební tyč pro plechy [4] .....	36
Obr. 18 - Zkušební tyč pro trubky [4] .....	37
Obr. 19 – Tyč pro příčnou zkoušku tahem (před zkouškou).....	37
Obr. 20 - Válcová zkušební tyč s plným průřezem [4].....	37
Obr. 21 - Zápal svaru [15] .....	38
Obr. 22 - Převýšení svaru [18] .....	38
Obr. 23 - Tyč pro příčnou zkoušku tahem (po zkoušce) .....	39
Obr. 24 - Příklady polohy zkušebních tyčí – Podélný řez [19] .....	40
Obr. 25 - Příklad polohy zkušební tyče u příčného řezu – Zkušební tyč z čistého svarového kovu pro kvalifikaci svařovacího materiálu [19].....	41
Obr. 26 - Příklad polohy zkušební tyče u příčného řezu – Zkušební tyč z pouze jednostranně svařeného spoje [19] .....	41
Obr. 27 - Příklad polohy zkušebních tyčí u příčného řezu – Zkušební tyč z oboustranně svařeného spoje [19].....	41
Obr. 28 – Zkušební tyč pro zkoušku tahem za zvýšené teploty – před zkouškou.....	42
Obr. 29 - Zkušební tyč pro zkoušku tahem za zvýšené teploty – po zkoušce.....	43
Obr. 30 - Upnutí zkušební tyče při zkoušce tahem za zvýšené teploty do tahového stroje .....	43

Obr. 31 - Záznam tahové zkoušky pomocí tahového diagramu .....	43
Obr. 32 - Rozložení napětí v namáhané zkušební tyči během zkoušky ohybem [23]....	44
Obr. 33 - Zkušební tyč před zkouškou ohybem .....	45
Obr. 34 - Ohýbací přípravek se dvěma podpěrami a trnem [25].....	46
Obr. 35 - Ohýbací přípravek s blokem ve tvaru V a trnem [25].....	47
Obr. 36 - Ohýbací přípravek s upínacími čelistmi [25].....	47
Obr. 37 - Ohýbání ramen zkušebního tělesa [25].....	48
Obr. 38 - Ramena zkušebního tělesa navzájem rovnoběžná [25].....	48
Obr. 39 - Ramena zkušebního tělesa v přímém kontaktu [25] .....	49
Obr. 40 - Uložení zkušební tyče do stroje před zatížením.....	50
Obr. 41 - Uložení zkušební tyče ve stroji pod zatížením – 1.....	50
Obr. 42 - Uložení zkušební tyče ve stroji pod zatížením – 2.....	51
Obr. 43 - Uložení zkušební tyče ve stroji na konci zkoušky ohybem .....	51
Obr. 44 - Pomocný obrázek pro příklad vypočítání průřezového modulu v ohybu [40]	52
Obr. 45 – Zkušební tyč po zkoušce ohybem .....	53
Obr. 46 - Detail zkušební tyče po zkoušce ohybem .....	53
Obr. 47 - Tyč pro příčnou lící zkoušku ohybem tupého svaru (TFBB) [26].....	54
Obr. 48 - Tyč pro příčnou zkoušku ohybem ze strany kořene tupého svaru (TRBB) [26] .....	54
Obr. 49 - Tyč pro příčnou boční zkoušku ohybem tupého svaru (SBB) [26] .....	55
Obr. 50 - Tyč pro podélnou zkoušku ohybem tupého svaru (LFBB a LRBB) [26].....	55
Obr. 51 - Tyč pro lící zkoušku ohybem naplátované vrstvy bez tupého svaru (FBC) [26] .....	56
Obr. 52 - Tyč pro boční zkoušku ohybem naplátované vrstvy bez tupého svaru (SBC) [26] .....	56
Obr. 53 - Tyč pro lící zkoušku ohybem naplátované vrstvy s tupým svarem (FBCB) [26] .....	57
Obr. 54 - Tyč pro boční zkoušku ohybem naplátované vrstvy s tupým svarem (SBCB) [26] .....	57
Obr. 55 - Zkušební tyče pro zkoušku ohybem ze strany kořene a z lící strany tupého svaru (TFBB, TRBB, LFBB a LRBB) [26] .....	58
Obr. 56 - Tyče pro boční zkoušku ohybem tupého svaru (SBB) [26].....	59
Obr. 57 - Zkušební tyč s vrubem – pohled shora.....	61
Obr. 58 - Zkušební tyč s vrubem – pohled z boku .....	61
Obr. 59 - Tvárný lom na zkušební tyči po zkoušce rázem v ohybu .....	62
Obr. 60 - Křehký lom na zkušební tyči po zkoušce rázem v ohybu.....	62

Obr. 61 - Chladicí se zkušební tyče na teplotu -20 °C .....	63
Obr. 62 - Charpyho kladivo a průběh zkoušky [30] .....	63
Obr. 63 - Uložení zkušební tyče do stroje pro zkoušku rázem v ohybu .....	64
Obr. 64 – Zkušební tyč s vrubem v tepelně ovlivněné oblasti .....	65
Obr. 65 – Tvrdoměr .....	66
Obr. 66 - Matnice tvrdoměru s vtiskem .....	67
Obr. 67 - Umístění vtisků na tupých svarech [34] .....	68
Obr. 68 - Jednostranný jedno – a vícehouseskový tupý svar [34] .....	69
Obr. 69 - Oboustranný jedno – a vícehouseskový svar [34] .....	70
Obr. 70 - Částečně provařený oboustranný jedno – a vícehouseskový tupý svar [34] ..	70
Obr. 71 - Hodnocení vytvrzování jednotlivých kořenových housesek [34] .....	70
Obr. 72 - Koutový svar [34] .....	71
Obr. 73 - Tupý T-svar [34] .....	71
Obr. 74 - Ukázka zkušební tyče po zkoušce tvrdosti, kde jsou patrné vtisky .....	71
Obr. 75 - Příklady zobrazení oblastí pro zkoušení tvrdosti jednotlivými vtisky (E) [34] .....	72
Obr. 76 - Zkušební tyč pro makroskopickou kontrolu [36] .....	74
Obr. 77 - Zkušební vzorek rovinného výrobku s tupým svarem [37] .....	76
Obr. 78 - Zkušební vzorek trubky s tupým svarem [37] .....	76
Obr. 79 - Zkušební vzorek rovinného výrobku s křížovým tupým svarem [37] .....	76
Obr. 80 - Zkušební vzorek trubky s podélným svarem [37] .....	77
Obr. 81 - Mezikrystalová koroze pod zvětšením na mikroskopu [39] .....	78
Obr. 82 - Viditelnost mezikrystalové koroze pouhým okem .....	79



## Seznam tabulek

Tab. 1 - Pro úroveň 1: Kontrola a zkoušení zkušebních tyčí [1] .....	21
Tab. 2 - Pro úroveň 2: Kontrola a zkoušení zkušebních kusů [1] .....	22
Tab. 3 - Značení rozměrů zkušebních tyčí a jejich význam [11] .....	28
Tab. 4 - Značky a zkrácené termíny [4].....	31
Tab. 5 - Rozměry plechů a trubek [4].....	36
Tab. 6 - Dovolené odchylky mezi $T_i$ a $T$ a maximální přípustné změny podél zkušební tyče [20].....	42
Tab. 7 - Značky rozměrů zkušebních tyčí, jejich význam a jednotky [25] .....	45
Tab. 8 - Rozměry pevných součástí pro ohyb ze strany líce nebo kořene [26].....	46
Tab. 9 - Značky a jejich významy použité v nákresech zkušebních tyčí [26].....	57
Tab. 10 - Značky a termíny pro zkoušku tvrdosti [34].....	67
Tab. 11 - Doporučená vzdálenost $L$ mezi středy vtisků v tepelně ovlivněné oblasti [34] .....	69
Tab. 12 - Návod k hodnocení znaků při makroskopických kontrolách [35] .....	73

## 1 Úvod

Destruktivní zkoušení svarových spojů je klíčovou součástí ověření či zajištění technické bezpečnosti konstrukcí a výrobků. Tyto zkoušky umožňují detekovat případné vady a nedostatky ve svarových spojích, jako jsou např. bubliny, trhliny, praskliny, studené spoje, neprůvazy či špatné promísení svarového kovu se základním materiálem a další. Zároveň dokážou odhalit, zda byla při svařování použita správná technologie, nebo zda byl svar kvalitně proveden.

Destruktivní zkoušky svarových spojů musí být prováděny podle platných norem, v nichž jsou na tyto zkoušky stanoveny požadavky.

Téma bakalářské práce bylo navrženo firmou ŠKODA JS a.s. Jedná se o společnost, která se zaměřuje na inženýring, výrobu a servis v jaderné energetice.

Firma provádí mimo jiné i kontroly svarových spojů pomocí právě destruktivních zkoušek. Při provádění zkoušek musí každý pracovník dodržovat platné normy a vyhledávat v nich potřebné informace. To snižuje rychlost a efektivitu práce a z toho důvodu bylo navrženo téma na bakalářskou práci.

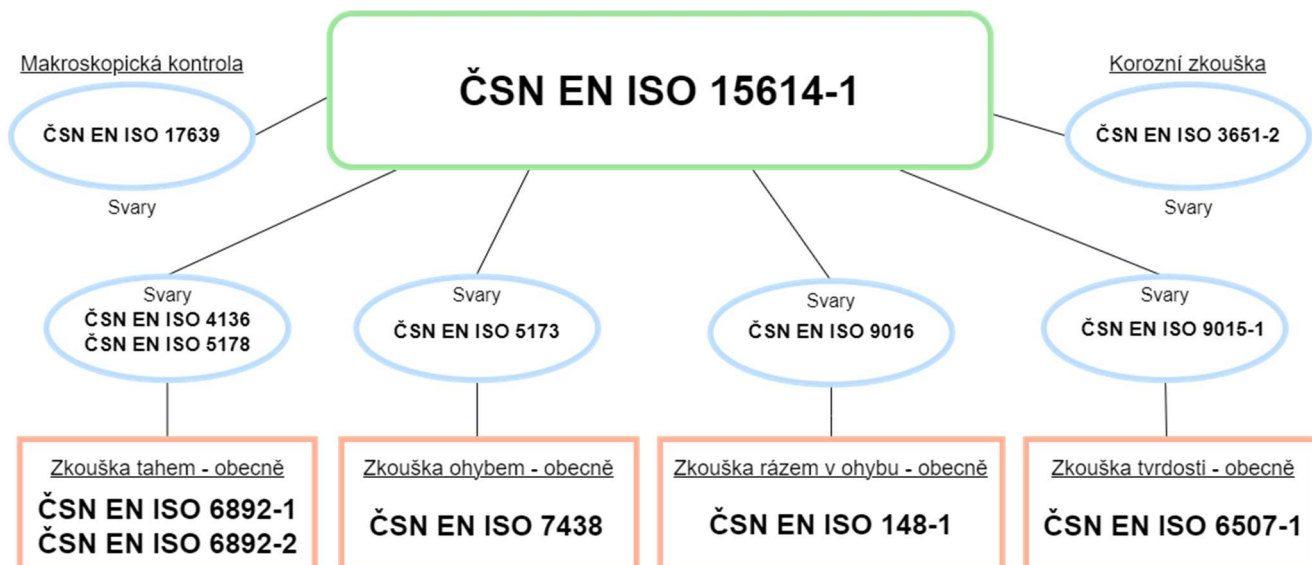
Cílem práce je vytvořit pro pracovníky přehlednou příručku, která bude obsahovat veškeré destruktivní zkoušky svarových spojů, které firma provádí a k nim nejpodstatnější informace. Jinými slovy je za úkol vytvořit příručku, která bude pro pracovníka natolik dostačující, že nebude potřeba při zkoušení svarových spojů čerpat z jiných zdrojů.

V práci jsou postupně rozebrány potřebné destruktivní zkoušky svarových spojů od způsobu namáhání zkušebního materiálu, přes rozměry zkušebních tyčí až po vlastnosti zkušebního materiálu získaných ze zkoušek.

## 2 Destruktivní zkoušky podle normy ČSN EN ISO 15614-1

Aby bylo možné provádět konkrétní destruktivní zkoušky svarových spojů, je potřeba svarové spoje nejprve vhodně zhotovit a určit způsob zkoušení. K tomu slouží norma ČSN EN ISO 15614-1.

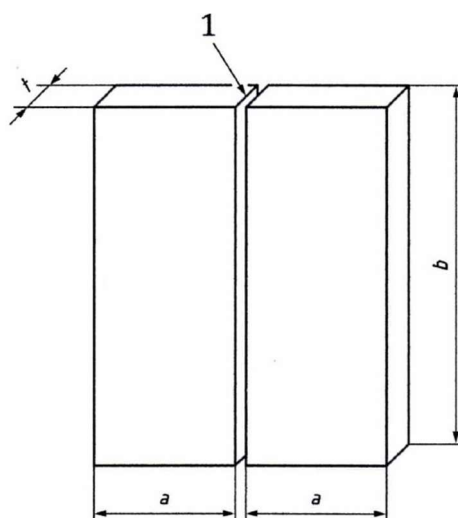
Norma ČSN EN ISO 15614-1 v sobě obsahuje odkazy na všechny zkoušky, které jsou v práci podrobně popsány. Pro přehlednost je přidán následující obr. 1, který ukazuje vazby mezi jednotlivými normami.



Obr. 1 - Přehled použitých norem

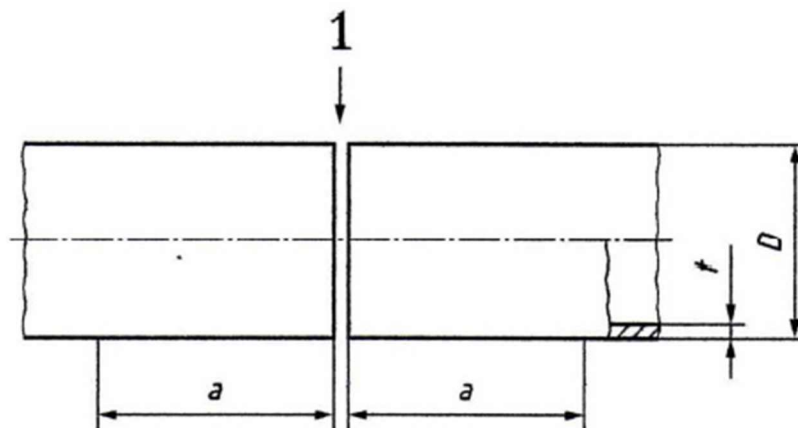
### 2.1 Tvar a rozměry zkušebních kusů

Obecně platí, že je potřeba mít dostatečně velký zkušební kus, aby bylo možné z něj zhotovit vzorky pro všechny požadované zkoušky. Na následujících obrázcích je vidět, jak musí být v různých případech zkušební kusy připraveny.



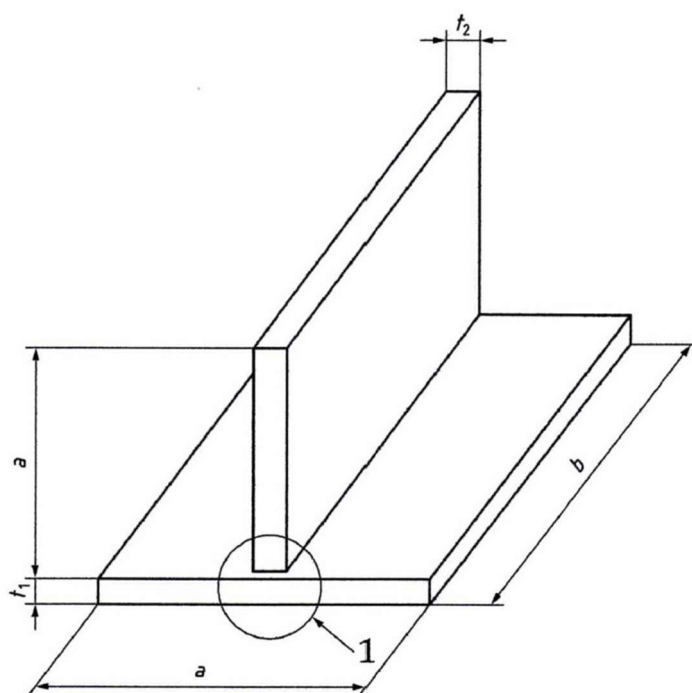
Obr. 2 - Zkušební kus pro tupý spoj na plechu s plným průvarem [1]

Kóta  $a$  v obr. 2 značí minimální rozměr, a to 150 mm a kóta  $b$  znázorňuje též minimální rozměr, který je 350 mm. Značka  $t$  znamená tloušťka materiálu a číslo  $1$  znázorňuje přípravu spoje a sestavení podle podrobností v předběžné specifikaci postupu svařování.



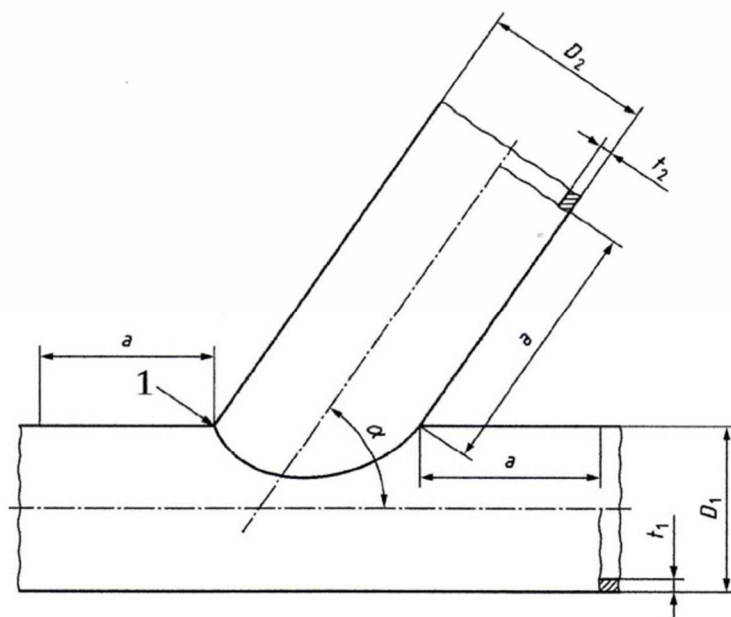
Obr. 3 - Zkušební kus pro tupý spoj na trubce s plným průvarem [1]

V obr. 3 číslo  $1$  opět znázorňuje přípravu spoje a sestavení podle podrobností v předběžné specifikaci postupu svařování. Kóta  $a$  je minimální rozměr a to 150 mm.  $T$  je opět tloušťka materiálu a  $D$  značí vnější průměr trubky.



Obr. 4 - Zkušební kus pro T-spoj [1]

Jednička v obr. 4 má naprosto stejný význam jako v předchozích případech (znázorňuje přípravu spoje a sestavení podle podrobností v předběžné specifikaci postupu svařování). Tloušťka materiálů je označena jako  $t_1$  a  $t_2$ . Minimální rozměry jsou značeny jako  $a = 150$  mm a  $b = 350$  mm.



Obr. 5 - Zkušební kus pro spoj odbočky [1]

Značky  $l$ ,  $t_1$ ,  $t_2$  a  $a$  mají v obr. 5 stejný význam jako u předchozích případů.  $D_1$  značí vnější průměr hlavní trubky a  $D_2$  značí vnější průměr trubky odbočky. Úhel odbočky je  $\alpha$  [1].

## 2.2 Kontrola a zkoušení zkušebních tyčí

U zkoušení zkušebních tyčí záleží na typu a rozsahu zkoušení. To znázorňují následující tab. 1 a tab. 2.

Tab. 1- Pro úroveň 1: Kontrola a zkoušení zkušebních tyčí [1]

Zkušební kus	Typ zkoušky	Rozsah zkoušení	Poznámka pod čarou
Tupý spoj s plným průvarem (viz obr. 2 a obr. 3)	Příčná zkouška tahem	2 tyče	1
	Příčná zkouška ohybem	4 tyče	
Koutové svary (viz obr. 4)	Makroskopická kontrola	2 tyče	2

<sup>1</sup> Platí pro zkoušky ohybem, viz kapitola 4

<sup>2</sup> Musí být zkoušeny odpovídajícím způsobem tam, kde jsou výrobkovou normou požadovány mechanické vlastnosti. Pokud je potřeba doplňující zkušební tyč, její rozměry by měly být dostatečné k tomu, aby umožnily zkoušení mechanických vlastností. Pro tuto doplňující zkušební tyč musí platit stejné svařovací parametry, skupina základního materiálu, přídavný materiál a tepelné zpracování [1].

Tab. 2 - Pro úroveň 2: Kontrola a zkoušení zkušebních kusů [1]

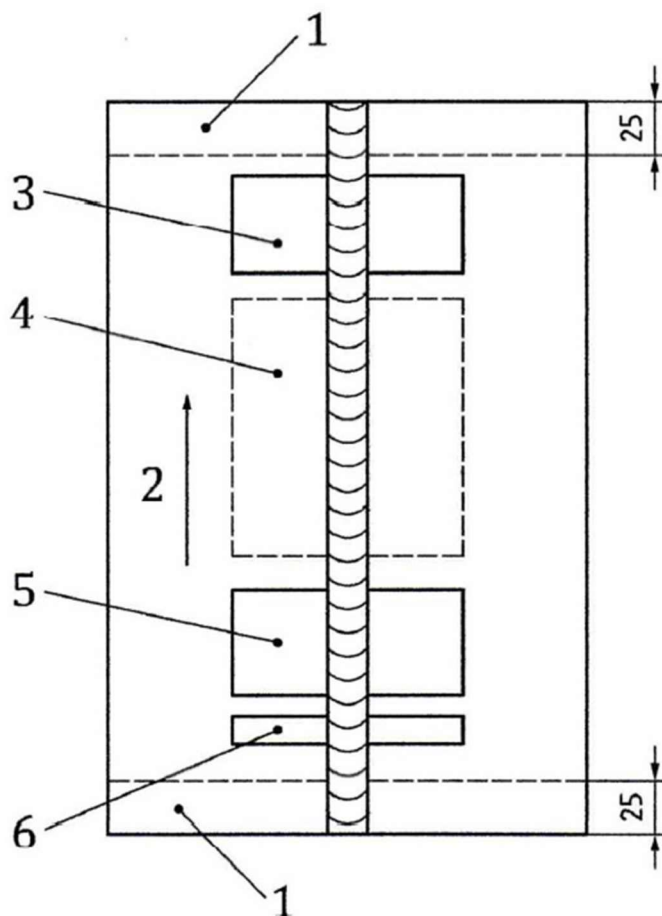
Zkušební kus	Typ zkoušky	Rozsah zkoušení	Poznámka pod čarou
Tupý spoj s plným průvarem (viz obr. 2 a obr. 3)	Příčná zkouška tahem	2 tyče	/
	Příčná zkouška ohybem	4 tyče	1
	Zkouška rázem v ohybu	2 sady	3
	Zkouška tvrdosti	Požadovaná	4
	Makroskopická kontrola	1 tyč	/
T-spoj s plným průvarem (viz obr. 4) Spoj odbočky s plným průvarem (viz obr. 5)	Zkouška tvrdosti	Požadovaná	4
	Makroskopická kontrola	2 tyče	/
Koutový svar (viz obr. 4 a obr. 5)	Zkouška tvrdosti	Požadovaná	4
	Makroskopická kontrola	2 tyče	/

### 2.3 Umístění a odběr zkušebních vzorků

Na následujícím obr. 6 je ukázáno, jak se odebírají zkušební vzorky na tupém svaru při svařování plechů. Vždy musí být nechán odpad po okrajích, který by měl být široký 25 mm. Odpadem se rozumí začátek a konec svaru u kterého nedochází k vyhodnocování z důvodu výskytu možných odchylek ve svařovacích parametrech při náběhu a výběhu svaru. Směr svařování je označen číslicí 2. Dále jsou na obrázku vykresleny jednotlivé oblasti, které ukazují odkud se odebírají vzorky pro jednotlivé zkoušky. Oblasti, které jsou označeny číslem 3 a 5 jsou vhodné pro odběr jednoho vzorku pro zkoušku tahem a pro vzorky na zkoušku ohybem. Dále oblast číslo 4 slouží k odběru vzorků pro zkoušku rázem v ohybu a případně doplňující zkoušky. Z poslední oblasti číslo 6 se odebírá jeden vzorek pro zkoušku tvrdosti a jeden vzorek pro kontrolu makrostruktury.

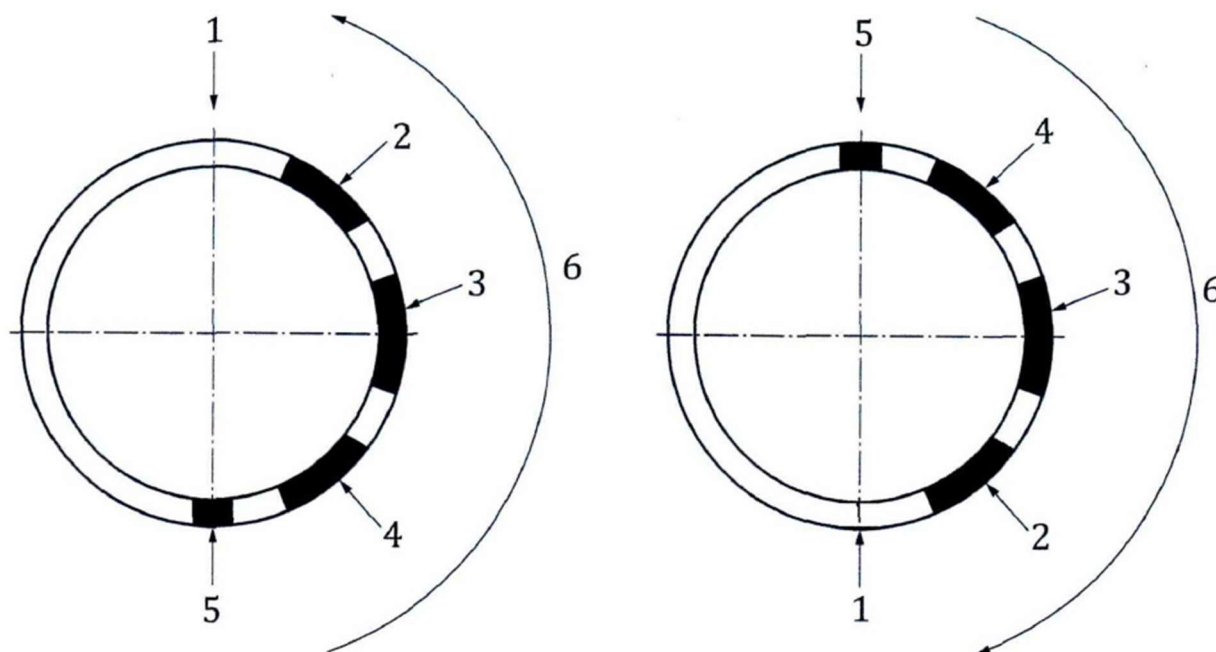
<sup>3</sup> Pro materiály, které mají tloušťku větší nebo rovnu 12 mm a mají speciální rázové vlastnosti je jedna sada ve svarovém kovu a druhá v tepelně ovlivněné oblasti. Výrobní normy mohou požadovat zkoušku rázem v ohybu pro tloušťku do 12 mm. Doplnění zkoušky viz kapitola 5 [1].

<sup>4</sup> Není požadováno pro základní materiály: podskupiny 1.1, skupiny 8 a 41 až 48 a různorodé spoje mezi těmito skupinami, s výjimkou různorodých spojů mezi podskupinou 1.1 a skupinou 8 (skupiny a podskupiny jsou uvedeny v normě ČSN EN ISO 15614-1) [1].



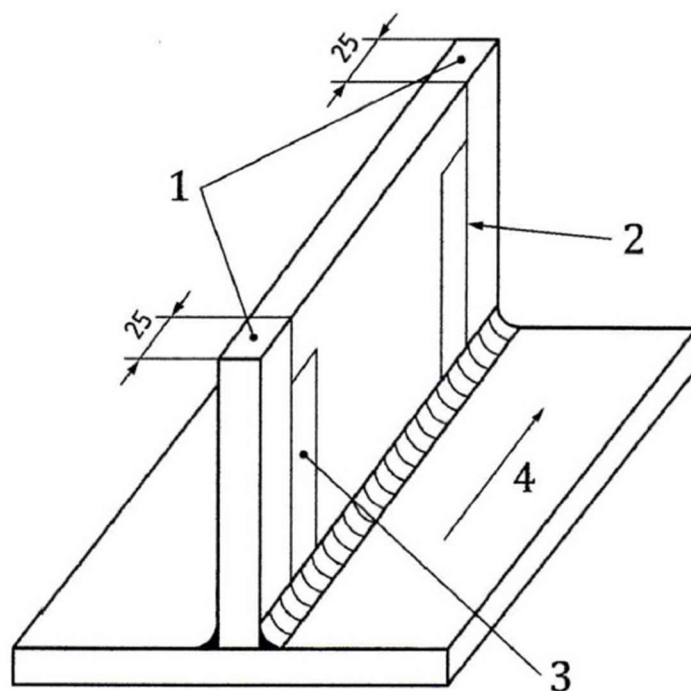
Obr. 6 - Umístění zkušebních vzorků pro tupý spoj na plechu [1]

Na dalším obr. 7 je znázorněno opět umístění zkušebních vzorků pro tupý spoj, ale tentokrát na trubce. Směr svařování je naznačen šipkou a číslicí 6, přičemž číslice 1 označuje konec svařování. Oblasti 2 a 4 jsou určeny pro odběr jednoho vzorku pro zkoušku tahem a pro vzorky na zkoušku ohybem. Z oblasti 3 se odebírají vzorky pro zkoušku rázem v ohybu a zkoušku doplňující. Poslední oblast 5 je určena k odběru jednoho vzorku potřebného na zkoušku tvrdosti a jednoho vzorku pro kontrolu makrostruktury. U trubek je nutné brát ohled na jejich vnější průměr. Např. u trubky TR KR 14x2 je nutné vyrobít více svařů neboli svařit více trubek, aby bylo možné získat vzorky pro všechny zkoušky. Konkrétně je potřeba udělat jeden svar pro zkoušku makrostruktury, dva svary pro zkoušku tahem a dva svary pro zkoušku ohybem. U trubek, které mají vnější průměr větší (např. 150 mm), je dostačující jeden svar. Tato problematika nenastává u vzorků s tupým svarem, kde je potřeba udělat tupý svar pouze dostatečně dlouhý, aby bylo možné z něj všechny vzorky odebrat.



Obr. 7 - Umístění zkušebních vzorků pro tupý spoj na trubce [1]

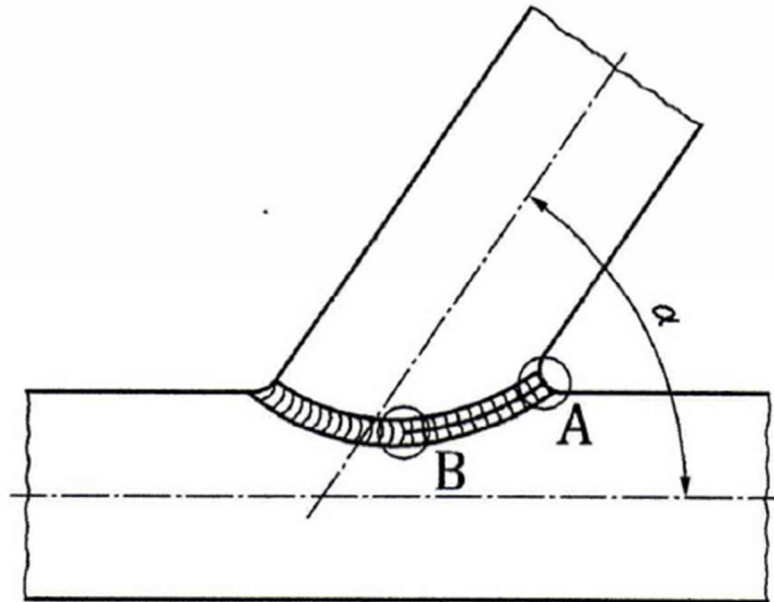
Následující obr. 8 představuje umístění zkušebních vzorků na T-spoji. Opět je zde vyznačen směr svařování číslicí 4 a odpad číslicí 1. Zde lze odebrat vzorky pouze ze dvou oblastí. První oblast je označena číslem 2 a slouží pro odebrání vzorků na kontrolu makrostruktury. Druhá oblast je vyznačena pod číslem 3 a odebírají se z ní vzorky pro kontrolu makrostruktury a zkoušku tvrdosti.



Obr. 8 - Umístění zkušebních vzorků na T-spoji [1]



Další obr. 9, který znázorňuje umístění zkušebních vzorků je pro spoj odbočky na trubce. Zde je zakótován úhel  $\alpha$ , který říká, jaký je úhel odbočky. Písmenem *A* je označen odebraný zkušební vzorek pro makrostrukturu a tvrdost a písmeno *B* označuje vzorek pro kontrolu makrostruktury [1].



Obr. 9 - Umístění zkušebních vzorků pro spoj odbočky na trubce [1]

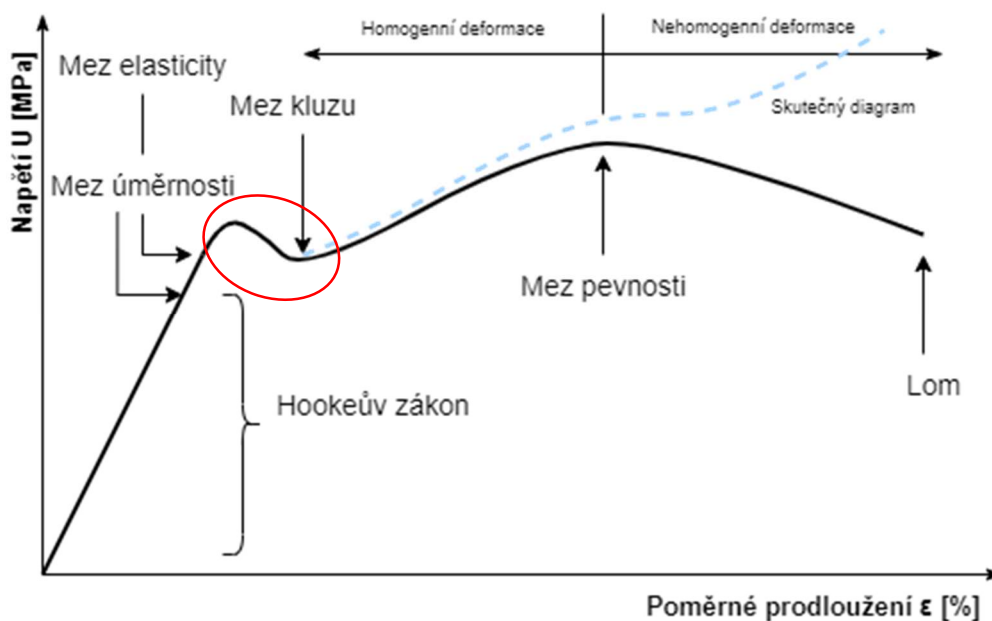
### 3 Zkouška tahem

Jedná se o základní a zároveň nejrozšířenější statickou zkoušku. Zkouška se provádí na trhacím stroji, kdy je zkušební tyč (těleso) zatěžována pomalu vzrůstající silou, přesněji řečeno jednoosým namáháním. Při tahovém namáhání dochází k deformaci zkušební tyče, která je odebrána napříč nebo podél svarového spoje. Zkušební tyč je namáhána, dokud nedojde k jejímu přetržení. Během namáhání se zjišťují deformační (absolutní prodloužení, poměrné prodloužení, tažnost a kontrakce) a napěťové (mez pevnosti v tahu a mez kluzu v tahu) charakteristiky. Zkouška tahem obvykle končí při destrukci zkušební tyče a výsledkem jsou mechanické vlastnosti jako např. pevnost v tahu ( $R_m$ ), mez kluzu ( $R_{eH}$ ), tažnost ( $A$ ) nebo kontrakce ( $Z$ ) [2; 3].

Pokud není uvedeno jinak, zkouška se provádí za pokojové teploty ( $23 \pm 5$ ) °C [4].

#### 3.1 Průběh tahové zkoušky a tahový diagram

Postup zkoušky lze graficky znázornit pomocí tahového diagramu (viz obr. 10), kde je závislost napětí na poměrném prodloužení zkoušené tyče.



Obr. 10 - Průběh tahové zkoušky [2]

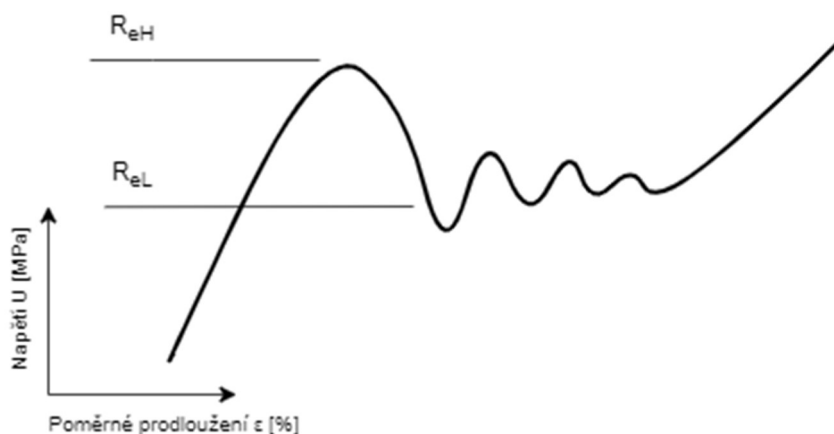
Pokud se mluví o smluvním diagramu, tak v první fázi zkoušky je závislost napětí na poměrném prodloužení lineární a dochází k uplatnění Hookova zákona. Deformace vznikající na tyči jsou až do meze elasticity elastické neboli vratné.

Za mezí elasticity je deformace zkušební tyče již plastická neboli nevratná. Běžně se tato mez v praxi nestanovuje, protože slouží pouze k ukázce přechodu z elastické do plastické deformace.

Následně je v grafu patrný zlom křivky, kdy grafický záznam pokračuje bez zvyšování zátěžné síly. Síla, při které ke zlomu dojde se nazývá síla na výrazné mezi kluzu neboli horní mez kluzu ( $R_{eH}$ ). Naopak minimální hodnota této prodlevy se nazývá dolní mez kluzu ( $R_{eL}$ ) [5].

Někdy mez kluzu nelze zjistit přímo z diagramu jako fyzickou hodnotu [6]. Z toho důvodu se zavádí tzv. smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$ . Jako smluvní napětí chápeme hodnotu, která způsobí prodloužení o 0,2 % z celkového poměrného prodloužení. Zobrazení horní a dolní meze kluzu je vidět na následujícím obr. 11, který je detailem obr. 10 [7].

Výrazná mez kluzu mizí např. s přítomností cizích atomů, vnitřním pnutím nebo se zvyšující se teplotou [6].



Obr. 11 - Detail tahové zkoušky z obr. 1 [7]

Nad mezí kluzu zatížení stále roste a dochází k homogenní neboli rovnoměrné deformaci v celém objemu zkoušené tyče, dokud nezačne vznikat krček. V tom okamžiku je podle grafu na obr. 10 dosaženo maximálního napětí celé zkoušky. Krček můžeme vidět např. na obr. 23. Krček může vznikat i dříve než na mezi pevnosti, protože začátek vzniku krčku je ovlivněn plasticitou materiálu, kdy se u velmi plastických materiálů může začít objevovat už při dosažení meze kluzu [2; 5].

Maximální napětí nastává při dosažení meze pevnosti a jedná se o napětí, při kterém je deformace stále ještě rovnoměrná.

Za mezí pevnosti dochází k nehomogenní deformaci, které je lokalizována do jednoho místa, jinak řečeno, tyč se dále neprodlužuje nikde jinde než v krčku. Prodlužování krčku probíhá, přestože zatěžovací síla klesá. Průřez zkušební tyče v krčku se začne značně zmenšovat. To je vidět v diagramu poklesem křivky [5; 6].

Skutečný diagram se od smluvního začíná lišit za horní mezí kluzu. Vlivem výraznějších plastických deformací se zmenšuje průřez zkušební tyče a tím se zvyšuje skutečné napětí, které roste až do okamžiku přetržení zkušební tyče, kdy je nejvyšší díky nejmenšímu průřezu. Vlivem tvorby krčku se výrazně zmenšuje průřez zkušební tyče a tím se průběh skutečného napětí více odchyluje od smluvního.

Na chování kovů při tahovém zatížení má vliv jemnost krystalizace. Obecně platí, že pokud má materiál zkoušené tyče hrubou krystalizaci, plastické deformace začínají dříve [6].

Podrobnější informace o postupu zkoušky jsou obsaženy v normách ČSN EN ISO 6892-1 a ČSN EN ISO 6892-2 [3].

### 3.2 Značení rozměrů zkušebních tyčí

Následující tab. 3 značí rozměry zkušebních tyčí pro zkoušku tahem.

Tab. 3 - Značení rozměrů zkušebních tyčí a jejich význam [11]

Značka	Jednotka	Význam
<b>Zkušební tyč</b>		
$a_0$	mm	Počáteční tloušťka zkušebního tělesa nebo tloušťky stěny trubky
$b_0$	mm	Počáteční šířka zkoušené délky zkušebního tělesa nebo průměrná šířka podélného pásu odebraného z trubky nebo šířka plochého drátu
$d_0$	mm	Počáteční průměr zkoušené délky zkušebního tělesa kruhového průřezu drátu nebo vnitřní průměr trubky
$D_0$	mm	Počáteční vnější průměr trubky
$L_0$	mm	Počáteční měřená délka
$L_0'$	mm	Počáteční měřená délka pro stanovení $A_{wn}$
$L_c$	mm	Zkoušená délka
$L_e$	mm	Měřená délka průtahu
$L_t$	mm	Celková délka zkušebního tělesa
$L_u$	mm	Konečná měřená délka po lomu
$L_u'$	mm	Konečná měřená délka po lomu pro stanovení $A_{wn}$
$S_0$	mm <sup>2</sup>	Počáteční průřezová plocha zkoušené délky
$S_u$	mm <sup>2</sup>	Minimální průřezová plocha po lomu
$k$	-	Součinitel proporcionality
$Z$	%	Kontrakce
<b>Prodloužení</b>		
$A$	%	Tažnost
$A_{wn}$	%	Plastické prodloužení v procentech bez tvorby krčku
<b>Prodloužení měřené průtahoměrem</b>		
$e$	%	Prodloužení měřené průtahoměrem
$A_e$	%	Prodloužení v procentech měřené průtahoměrem na výrazné mezi kluzu
$A_g$	%	Plastické prodloužení v procentech měřené průtahoměrem při maximálním zatížení

$A_{gt}$	%	Celkové prodloužení v procentech měřené průtahoměrem při maximálním zatížení
$A_t$	%	Celková tažnost
$\Delta L_m$	mm	Prodloužení měřené průtahoměrem při maximálním zatížení
$\Delta L_f$	mm	Prodloužení měřené průtahoměrem v okamžiku lomu
<b>Rychlosti</b>		
$e_{le}$	$s^{-1}$	Deformační rychlost
$e_{lc}$	$s^{-1}$	Deformační rychlost odhadnutá ze zkoušené délky
$\dot{R}$	$MPa \cdot s^{-1}$	Napětíová rychlost
$v_c$	$MPa \cdot s^{-1}$	Rychlost posuvu příčnicku

### 3.3 Hodnoty získané ze zkoušky tahem

Ze zkoušky tahem lze obecně získat čtyři hodnoty, a to mez kluzu, mez pevnost, tažnost a kontrakci.

#### 3.3.1 Mez kluzu

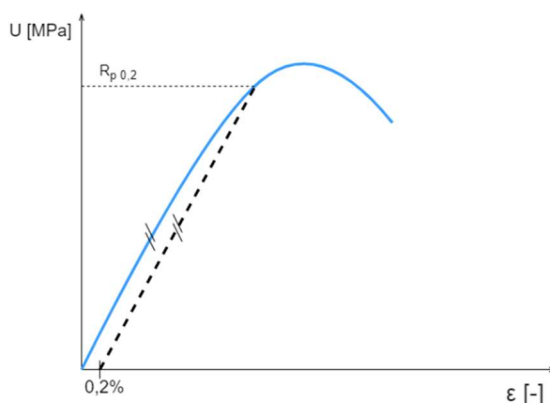
Mezi kluzu vyznačujeme patrný zlom křivky v tahovém diagramu, kdy začíná docházet k prodloužování zkušební tyče, aniž bychom museli výrazně zvyšovat zatěžovací sílu. Ne vždy je tato prodleva patrná a z toho důvodu se v praxi používá smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$ , kterou zjistíme pomocí následujícího vzorce (1):

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} [MPa] \quad (1)$$

Hodnota  $F_{p0,2}$  v rovnici představuje smluvní sílu na mezi kluzu.  $S_0$  je počáteční hodnota příčného průřezu zkušební tyče [8].

Mez kluzu lze vyjádřit i jinak. Např. mez kluzu  $R_{r0,1}$ , která se zjišťuje z trvalého prodloužení zkušební tyče po odlehčení, ale je vyjádřena v procentech počáteční měřené délky (zde např. 0,1 %). Další mez kluzu se využívá u materiálů, kde je prakticky nemožné vidět v diagramu lineární část napětí (měď, šedé litiny atd.). Proto se zjistí napětí, při kterém celková deformace zkušební tyče dosáhne žádané hodnoty (např. 0,5 % při poměrném prodloužení 0,005), která se vyjadřuje v procentech počáteční měřené délky. Této mezi se říká smluvní mez kluzu  $R_{t0,5}$  a je určena z celkové deformace pod zatížením [7].

Graficky se mez kluzu určuje podle následujícího obr. 12. Přes bod 0,002 na ose  $\epsilon$  se vede rovnoběžka s lineární částí tahového diagramu a v místě, kde tato rovnoběžná křivka protne tahový diagram je hledaná smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$  [9].



Obr. 12 - Určení smluvní meze kluzu [9]

### 3.3.2 Mez pevnosti

Mez pevnosti se značí jako  $R_m$  a jedná se o maximální napětí, kterého se v diagramu dosáhne. Mez pevnosti se vypočítá následujícím vzorcem [8].

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (2)$$

Jinými slovy se jedná o největší možné napětí, kterému materiál odolává, aniž by došlo k jeho porušení [10].

$F_m$  v rovnici (2) představuje maximální sílu, které se při zkoušce dosáhne a  $S_0$  opět znamená počáteční hodnotu příčného průřezu zkušební tyče [8].

### 3.3.3 Tažnost

Tažnost se vyjadřuje v procentech a je to prodloužení délky zkušební tyče po lomu, které je trvalé. Vyjadřuje se v procentech. Lze ji vypočítat pomocí následujícího vzorce.

$$A = 100 \cdot \frac{L_u - L_0}{L_0} \text{ [%]} \quad (3)$$

$L_u$  v rovnici (3) vyjadřuje měřenou délku zkušební tyče po lomu a  $L_0$  představuje měřenou délku zkušební tyče před zkouškou [8].

Dále je možné tažnost vyjádřit jako celkové prodloužení v procentech měřeného průtahoměrem při maximálním zatížení. Toto celkové prodloužení se značí  $A_{gt}$ . Vypočítá se jako prodloužení měřené průtahoměrem při maximálním zatížení ku měřené délce průtahoměru a vynásobí se stem. Tím se dosáhne výsledku v procentech.

Dalším druhem je tažnost celková, která se označuje  $A_t$ . Touto metodou se počítá prodloužení měřené průtahoměrem v okamžiku lomu na křivce zatížení. Tato celková tažnost se vypočítá jako prodloužení měřené průtahoměrem v okamžiku lomu ku měřené délce průtahoměru, a to se opět vynásobí stem pro získání výsledku v procentech [11].

### 3.3.4 Kontrakce

Kontrakcí se nazývá největší změna plochy příčného průřezu, která vznikla během zkoušky. V technické praxi se kontrakce určuje pouze pro zkušební tyče s kruhovým průřezem, protože plocha krčku po lomu zůstává přibližně kruhová.

$$Z = 100 \cdot \frac{S_0 - S_u}{S_0} [\%] \quad (4)$$

V rovnici (4) se objevuje  $S_0$ , které představuje počáteční hodnotu příčného průřezu zkušební tyče a  $S_u$ , které vyjadřuje plochu příčného průřezu zkušební tyče po zkoušce [8].

### 3.4 Příčná zkouška tahem

Příčná zkouška tahem je v normách pod označením ČSN EN ISO 4136. Při zkoušení je nutné postupovat i podle normy ČSN EN ISO 15614-1. Tato norma říká, že příčná zkouška tahem musí reprezentovat celou tloušťku zkušební tyče až na případ, kdy je nutné získat na tyčích rovnoběžné strany.

Pro trubky, které mají vnější průměr větší než 50 mm se musí převýšení svaru obrobít z obou stran tak, aby měla zkušební tyč stejnou tloušťku, jako je tloušťka stěny trubky.

U trubek s vnějším průměrem menším nebo rovném 50 mm a u případů, kdy byly jako zkušební tyče použity celé trubky, může převýšení svaru na vnitřním povrchu trubky zůstat neopracováno [1].

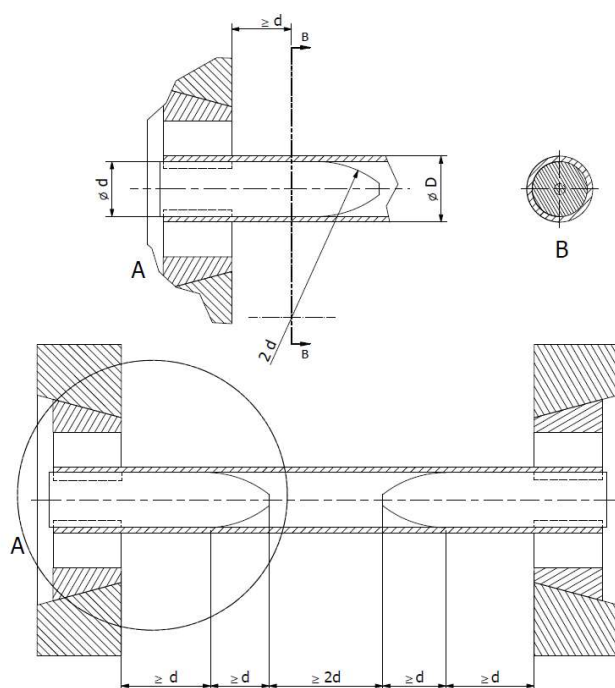
#### 3.4.1 Značení rozměrů zkušebních tyčí

Tab. 1 doplňují obr. 13 a obr. 18 Obr. 18 - Zkušební tyč pro trubky.

Tab. 4 - Značky a zkrácené termíny [4]

Značka	Termín	Jednotka
$b$	Šířka rovnoběžné délky	mm
$b_1$	Šířka hlavy upínacího konce	mm
$d$	Průměr upevňovacího trnu	mm
$D$	Vnější průměr trubky <sup>5</sup>	mm
$L_c$	Rovnoběžná délka	mm
$L_o$	Počáteční měřená délka	mm
$L_s$	Maximální šířka svaru po opracování	mm
$L_t$	Celková délka zkušební tyče	mm
$r$	Poloměr zaoblení u hlavy	mm
$t$	Tloušťka svarového spoje	mm
$t_s$	Tloušťka zkušební tyče	mm

<sup>5</sup> Pojem „trubka“, samostatně nebo v kombinaci znamená trubku, potrubí nebo dutý profil (bez pravoúhlého průřezu)



Obr. 13 - Tyč pro zkoušku tahem trubek plného průřezu [4]

### 3.4.2 Příprava zkušebních vzorků

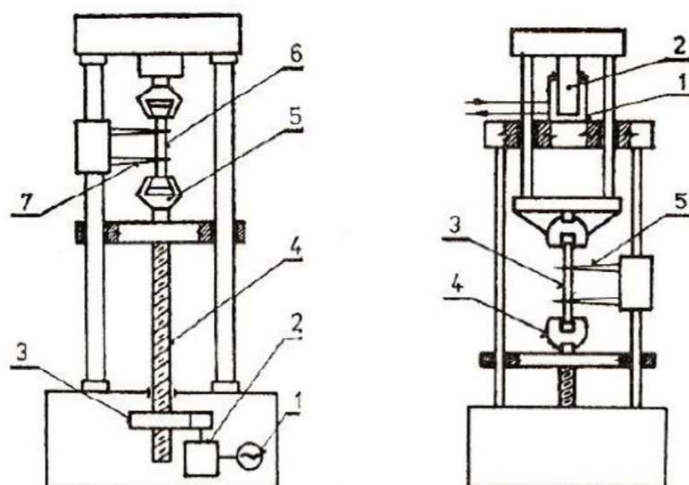
Příprava zkušebních vzorků má velký vliv na celý následný průběh zkoušky, ale i na její výsledky. Zkušební vzorky se musí vyrábět podle norem.

### 3.4.3 Umístění zkušební tyče

Zkušební tyč se odebírá příčně vzhledem k podélné ose svarového spoje tak, aby tato osa svaru zůstala ve středu rovnoběžné délky zkušebnímu kusu. V případě příliš malého průměru trubky, může být zkouška provedena na celé trubce (viz obr. 13). Pokud není uvedeno jinak, jako „příliš malý průměr“ se bere průměr  $D < 18$  mm [4].

Tyče jsou pak upínány do zkušebního stroje za pomoci čelistí. Upínání zkušebních tyčí do čelistí je třeba věnovat patřičnou pozornost. Při špatném upnutí může během zkoušky docházet k prokluzování tyče a tím je ztíženo nebo znemožněno vyhodnocování naměřených hodnot [2].





Obr. 14 - Schéma zkušebního zařízení [12]

Vlevo na obr. 14 je schéma mechanického zkušebního stroje.

- 1 – elektromotor
- 2 – převodovka
- 3 – ozubené kolo s maticí
- 4 – pohybový šroub
- 5 – upínací hlava
- 6 – zkušební těleso
- 7 – snímač prodloužení zkušebního tělesa

Vpravo na obr. 14 je schéma hydraulického zkušebního stroje.

- 1 – hydraulický válec
- 2 – píst
- 3 – zkušební těleso
- 4 – upínací hlava
- 5 – snímač prodloužení zkušebního tělesa

Na obr. 15 je vidět upnutí zkušební tyče do zkušebního trhacího stroje.



Obr. 15 - Upnutí zkušební tyče do čelistí zkušebního stroje

#### 3.4.4 Označování tyčí

Z označení každého zkušební vzorku musí být možno určit přesné umístění na výrobku nebo na spoji, ze kterého byl odebrán.

Z označení každé zkušební tyče musí být možno určit její přesné místo na zkušebním vzorku, ze kterého byla odebrána.

Každá zkušební tyč musí být označena, i když je odebrána ze zkušební kusu [4].

#### 3.4.5 Tepelné zpracování a/nebo stárnutí

Pokud není dáno jinak, tepelné zpracování se na svarovém spoji nebo zkušební kusu nesmí provádět [4].

Při tavném svařování dochází ke změnám ve struktuře daného materiálu a tím se mění vlastnosti svařovaného materiálu i svarového kovu [13]. Ve svarovém kovu dochází ke snížení tvrdosti a pevnosti. Naopak se zvyšuje vrubová houževnatost a tažnost [14].

#### 3.4.6 Dělení

Použití mechanických nebo tepelných postupů nesmí v žádném případě měnit vlastnosti materiálu zkušební tyče.

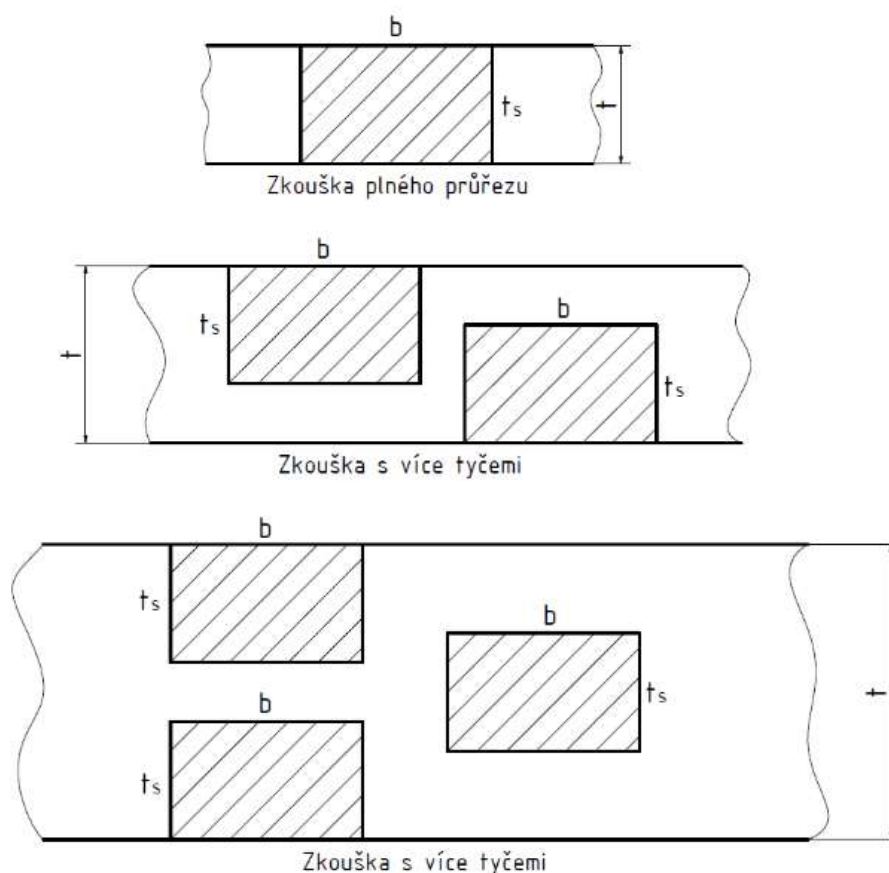
U dělení ocelí s tloušťkou větší než 8 mm, platí, že stříhání nůžkami je nepřístupné. Při oddělování zkušebních vzorků tepelným řezáním nebo jinými metodami řezání, které ovlivňují rezný povrch, musí být řez proveden ve vzdálenosti  $\geq 8$  mm od povrchů konečné rovnoběžné délky zkušební kusu. Tepelné řezání nesmí být použito k oddělení

materiálu v rovnoběžném směru s původním povrchem svařovaného plechu nebo zkušebního kusu.

U dělení jiných kovových materiálů, než jsou oceli, je zcela vyloučeno stříhání nůžkami a tepelné dělení. Je možno použít pouze mechanické obrábění [4].

### 3.4.7 Strojní obrábění zkušebních tyčí

Tloušťka  $t_s$  zkušební tyče musí být stejná, jako tloušťka základního kovu vedle svarového spoje (viz obr. 16 – zkouška plného průřezu). Pokud příslušná výrobková norma vyžaduje zkoušení plné tloušťky  $> 30$  mm, více zkušebních tyčí může být odebráno takovým způsobem, aby pokrývaly celkovou tloušťku spoje (viz obr. 16 – zkouška s více tyčemi) [4].



Obr. 16 - Příklady umístění zkušebních tyčí ve spojích [4]

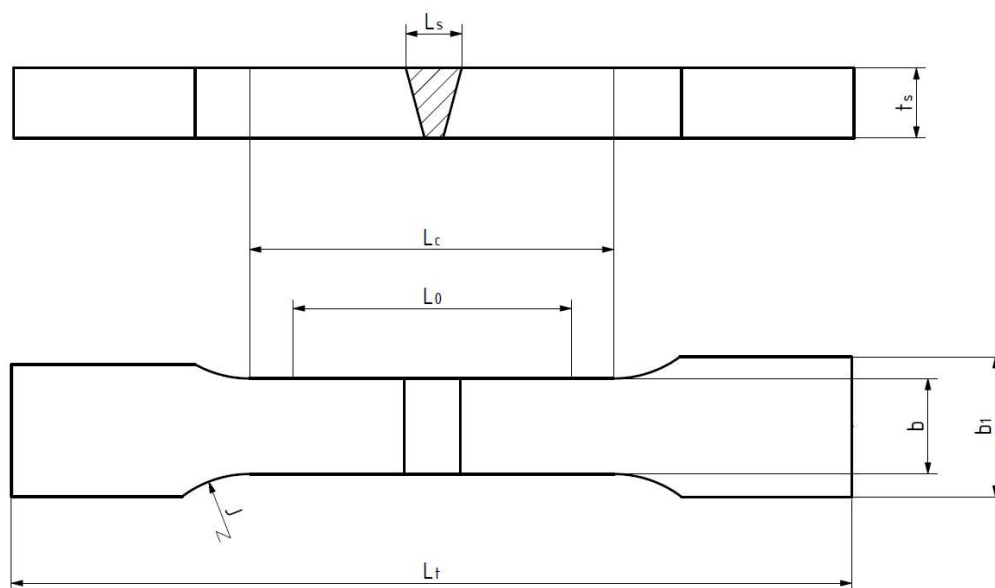
### 3.4.8 Rozměry zkušebních tyčí

Pro rozměry plechů a trubek platí, že tloušťka zkušební tyče musí být po celé rovnoběžné délce  $L_c$  konstantní. Tvar a rozměry zkušebních tyčí musí souhlasit s hodnotami uvedenými v tab. 5, s odkazem na značky na obr. 17 a obr. 18.

Pokud je u zkušební tyče obrobene z trubky nezbytné zploštění upínacích konců, je nutno zajistit, aby tato změna tloušťky neovlivnila rovnoběžnou délku  $L_c$  [4].

Tab. 5 - Rozměry plechů a trubek [4]

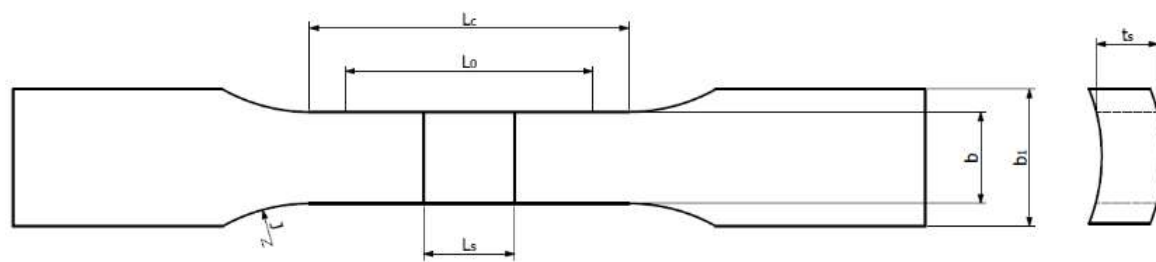
Označení	Značka	Rozměr
Celková délka zkušební tyče	$L_t$	Podle zkušebního stroje
Šířka hlavy	$b_1$	$b + 12$
Šířka rovnoběžné délky	plechy	$b$ 12 pro $t_s \leq 2$ 25 pro $t_s > 2$
	trubky	$b$ 6 pro $D \leq 50$ 12 pro $50 < D \leq 168,3$ 25 pro $D > 168,3$
Rovnoběžná délka <sup>6,7</sup>	$L_c$	$\geq L_s + 60$
Poloměr zaoblení u hlavy	$R$	$\geq 25$



Obr. 17 - Zkušební tyč pro plechy [4]

<sup>6</sup> Pro tlakové a laserové svařování (skupiny metod 2, 4 a 5 podle ISO 4063:2009),  $L_s = 0$

<sup>7</sup> Pro některé jiné kovové materiály (například hliník, měď a jejich slitiny) může být nutné  $L_c \geq L_s + 100$



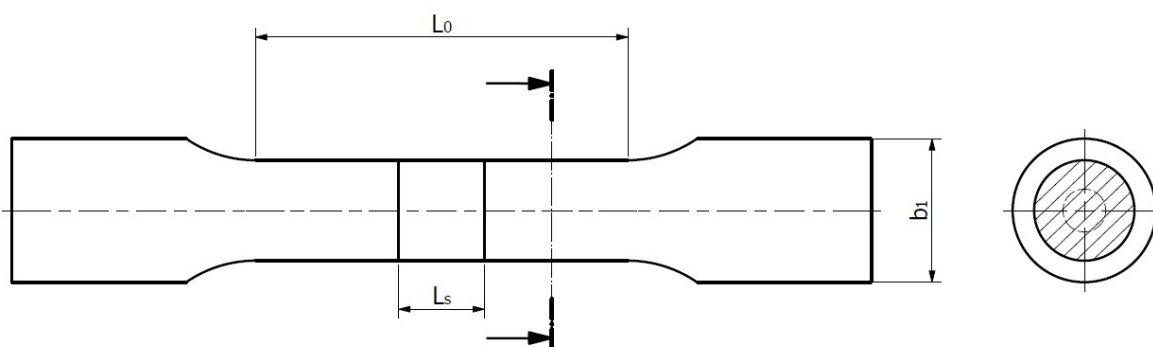
Obr. 18 - Zkušební tyč pro trubky [4]



Obr. 19 – Tyč pro příčnou zkoušku tahem (před zkouškou)

Obr. 19 zobrazuje zkušební tyč pro zkoušku tahem ještě před zkoušením.

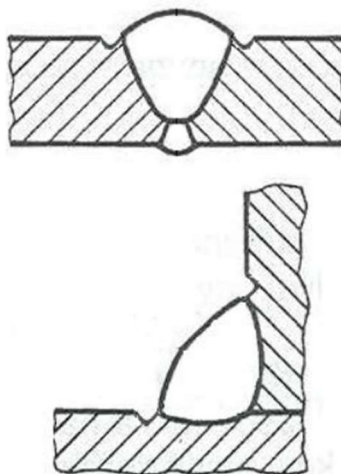
U zkušebních tyčí plných průřezů (viz obr. 20) musí být jejich rozměry dohodnuty zúčastněnými stranami. Pokud jsou požadovány zkušební tyče s kruhovým průřezem, pak musí rozměr odpovídat ČSN EN ISO 6892-1 a ČSN EN ISO 6892-2. Výjimkou je, že rovnoběžná délky tyče  $L_c$  nesmí být menší než  $L_s + 60$  mm [4].



Obr. 20 - Válcová zkušební tyč s plným průřezem [4]

### 3.4.9 Úprava povrchu

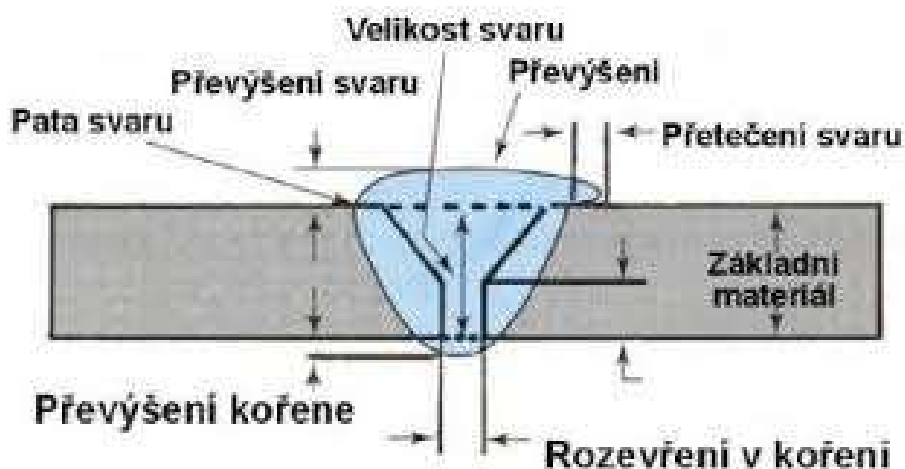
Pro konečnou úpravu musí být použito mechanické opracování nebo broušení a nesmí dojít k povrchovému mechanickému zpevnění nebo nadměrnému vyhřátí materiálu. U povrchu rovnoběžné délky tyče  $L_c$  nesmí dojít ke vzniku rýh nebo vrubů, které by byly příčné na směr zkušební tyče, s výjimkou zápalu, který nesmí být odstraněn, pokud to nevyžaduje příslušná výrobní norma. Zápal je schematicky ukázán na obr. 21.



Obr. 21 - Zápal svaru [15]

Povrchy zkušební tyče musí být obrobeny tak, aby bylo odstraněno převýšení svaru, pokud to není v příslušné výrobní normě uvedeno jinak. Vnitřní průvar kořene trubek s plným průřezem musí zůstat neporušený, pokud není stanoveno jinak [4].

Převýšení svaru (viz obr. 22) se řadí mezi vady svarů. Vzniká většinou jako důsledek nedostatečné zručnosti svářeče. Lze ho odstranit, jak bylo zmíněno výše mechanickým opracováním (např. broušením) [16]. Převýšení svaru je nutné odstranit z důvodu koncentrace napětí právě v místě převýšení. Zvýšená koncentrace napětí způsobuje praskliny a další nežádoucí problémy [17].



Obr. 22 - Převýšení svaru [18]

### 3.4.10 Výsledek zkoušky

Výsledky zkoušky musí být vyhodnoceny podle ISO 6892-1 a ISO 6892-2.

Do protokolu se musí zapisovat poloha lomu a pokud je to nutné pro ulehčení určení polohy svaru, tak je možné stranu zkušební tyče naleptat [4].

Na obr. 23 je vidět zkušební tyč po provedení příčné zkoušky tahem. Je zde krásně vidět krček, který vznikl v důsledku zvyšování napětí a překročení meze pevnosti. Zároveň je na obrázku patrný lom.



Obr. 23 - Tyč pro příčnou zkoušku tahem (po zkoušce)

Jak už bylo výše zmíněno, výsledkem příčné zkoušky tahem jsou mez pevnosti, poloha lomu (svarový kov, základní materiál, tepelně ovlivněná oblast) a případně popis výskytu vad na lomové ploše. Vady jsou popsány v normě ČSN EN ISO 4135 (kapitoly 1, 7.2 a 7.3).

## 3.5 Podélná zkouška tahem svarového kovu tavných svarových spojů

Podélná zkouška tahem svarového kovu je v normách označena jako ČSN EN ISO 5178 a platí pro ni stejné podmínky a požadavky, jako pro zkoušku příčnou z předešlé kapitoly. Rozdílem je, že zkušební tyč se ze svarového spoje zhotoveného výrobku nebo zkušební kusu odebírá podélně a opět je plynule zatěžována až dojde k jejímu přetržení. Zkouška se běžně provádí za pokojové teploty a to mezi 10°C a 35°C, ale i za zvýšených teplot [19].

### 3.5.1 Odběr zkušebních vzorků

Zkušební vzorek se odebírá podélně ze svarového spoje ze zkušební kusu či zhotoveného výrobku. Po mechanickém opracování je podmínkou, aby zkoušená délka zkušební tyče obsahovala pouze svarový kov.

Každý zkušební vzorek je potřeba označit tak, aby bylo možné určit jeho přesné umístění na zkušebním kusu, ze kterého byl odebrán [19].

### 3.5.2 Dělení zkušebních vzorků

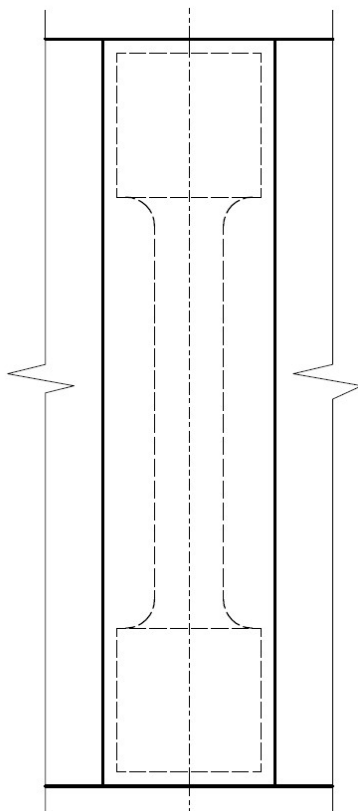
Jak mechanické, tak i tepelné způsoby dělení, které jsou při dělení zkušebních vzorků použity, v žádném případě nesmí změnit vlastnosti zkušebního vzorku.

U ocelí se vylučuje dělení stříháním strojními nůžkami u tlouštěk, které převyšují 8 mm. Při výřezu zkušebního vzorku s použitím metody dělení, která může ovlivnit řezné plochy (např. tepelné řezání), je potřeba řez provádět minimálně ve vzdálenosti 8 mm od povrchů konečné zkoušené délky zkušební tyče.

U jiných materiálů, než je ocel, je vyloučeno používat k dělení stříhání na nůžkách a tepelné dělení. Je možno použít pouze strojní obrábění (např. řezání pilou nebo soustružení) [19].

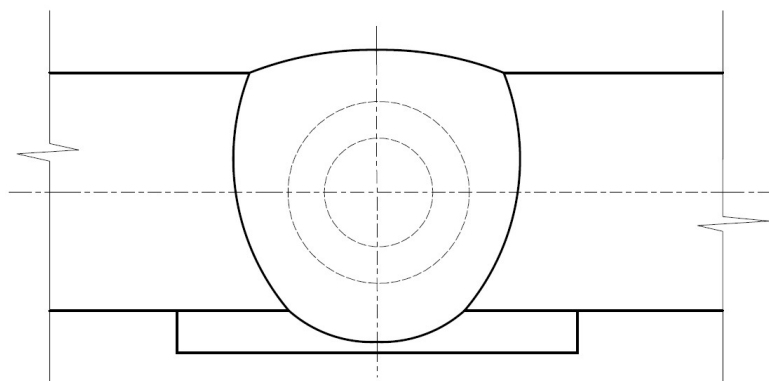
### 3.5.3 Strojní opracování zkušebních tyčí

Zkušební tyče se musí odebírat ze středu svarového kovu podle obr. 24 a v příčném řezu podle obr. 25 - obr. 27. Pokud zkušební tyč není odebrána ze středu tloušťky, tak musí být uvedena vzdálenost od povrchu  $t_1$  (viz obr. 25 a obr. 26). V případě oboustranných svarových spojů nebo velkých tlouštěk, může být odebráno více zkušebních tyčí v jiných místech po tloušťce (viz obr. 27). Pak se ale musí zaznamenat vzdálenosti  $t_1$  a  $t_2$  v příčném řezu spoje pro každou zkušební tyč [19].

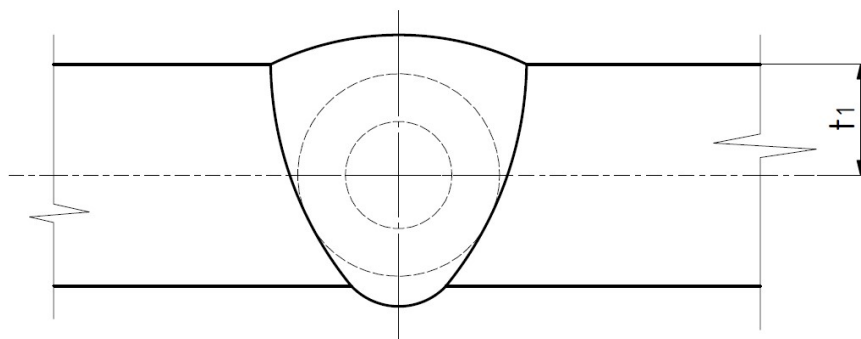


Obr. 24 - Příklady polohy zkušebních tyčí – Podélný řez [19]

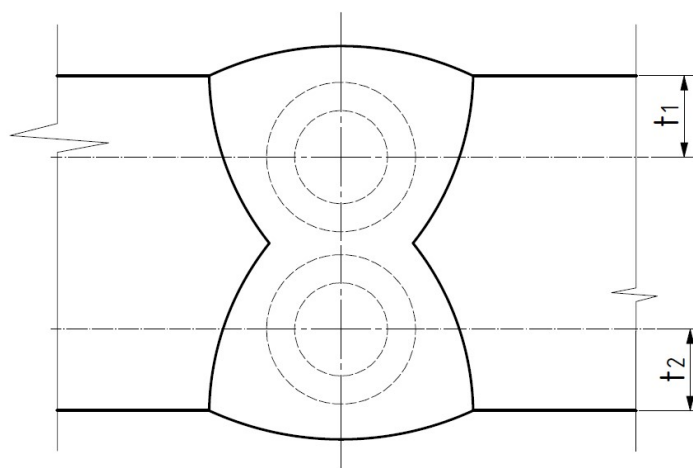




Obr. 25 - Příklad polohy zkušební tyče u příčného řezu – Zkušební tyč z čistého svarového kovu pro kvalifikaci svařovacího materiálu [19]



Obr. 26 - Příklad polohy zkušební tyče u příčného řezu – Zkušební tyč z pouze jednostranně svařeného spoje [19]



Obr. 27 - Příklad polohy zkušebních tyčů u příčného řezu – Zkušební tyč z oboustranně svařeného spoje [19]

### 3.5.4 Výsledek podélné zkoušky tahem

Ve výsledcích je rozdíl oproti příčné zkoušce tahem svarového spoje. Zde se kromě meze pevnosti a případného výskytu vad na lomové ploše vyhodnocuje i mez kluzu, tažnost a kontrakce. Tyto hodnoty se uvádějí při zkoušení válcových zkušebních tyčí [19].

### 3.6 Zkouška tahem za zvýšené teploty

Zkouška tahem za zvýšené teploty je popsána v normě ČSN EN ISO 6892-2 a může být prováděna buď jako příčná zkouška tahem svarového spoje podle normy ČSN EN ISO 4136 nebo jako podélná zkouška tahem svarového kovu podle normy ČSN EN ISO 5178. Zkouška opět spočívá v zatěžování zkušební tělesa tahovou zatěžující silou, kdy dochází k deformaci zkušební tyče a její destrukci. Zkouška se provádí za teploty větší, než je teplota pokojová. To znamená, že teplota musí převyšovat 35 °C.

Zkouška tahem za zvýšené teploty byla jako jediná prováděna ve firmě Comtes FHT.

Při zkoušce jsou dovoleny nějaké teplotní odchylky. Tyto odchylky uvádí následující tab. 6.

Tab. 6 - Dovolené odchylky mezi  $T_i$  a  $T$  a maximální přípustné změny podél zkušební tyče [20]

Specifikovaná teplota, $T$ °C	Dovolená odchylka mezi $T_i$ a $T$ °C	Maximální přípustná teplotní změna podél zkušební tyče °C
$T \leq 600$	$\pm 3$	3
$600 < T \leq 800$	$\pm 4$	4
$800 < T \leq 1000$	$\pm 5$	5
$1000 < T \leq 1100$	$\pm 6$	6

$T$  z tabulky je teplota, která je specifikovaná nebo jmenovitá a má se při ní provádět zkouška.  $T_i$  je teplota indikovaná nebo měřená na povrchu zkoušené délky zkušební tyče.

Pokud má zkušební tyč měřenou délku menší než 50 mm, teplota se měří na obou koncích délky. V případě, že je zkušební tyč delší než 50 mm, teplota se měří na obou koncích, ale i ve středu celkové délky.

Ohřev zkušební tyče probíhá tak, že se tyč nejprve ohřeje na předepsanou teplotu  $T$  a na této teplotě je nutné zkušební tyč udržet alespoň 10 min, než se začne zatěžovat. Výdrž na teplotě je důležitá z důvodu prohrátí zkušební tyče. Pokud je potřeba, doba výdrže může být i delší [20]

Následující obr. 28 a obr. 29 ukazují zkušební tyč před a po tahové zkoušce za zvýšené teploty.



Obr. 28 – Zkušební tyč pro zkoušku tahem za zvýšené teploty – před zkouškou



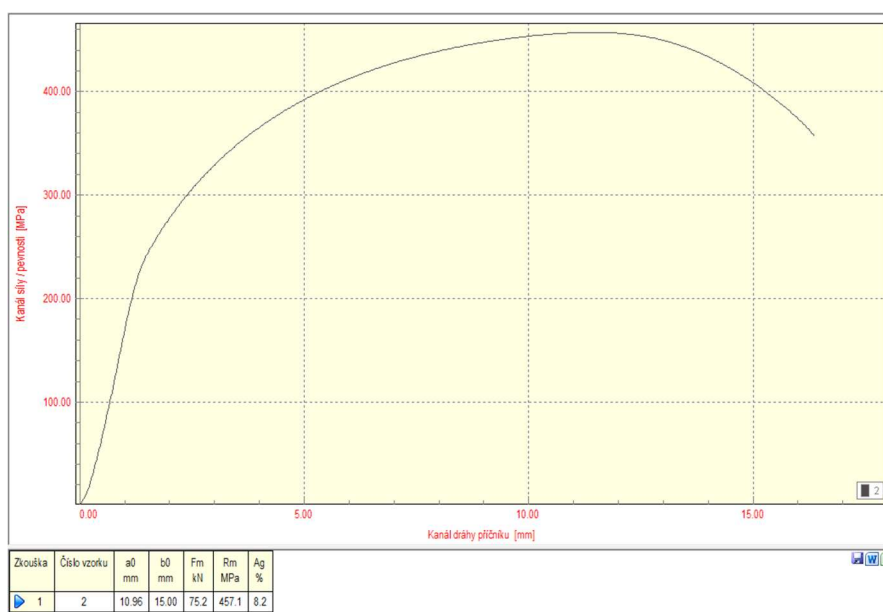
Obr. 29 - Zkušební tyč pro zkoušku tahem za zvýšené teploty – po zkoušce

Na obr. 30 je vidět upnutí zkušební tyče do trhacího stroje s pecí pro zajištění zvýšené teploty během zkoušky.



Obr. 30 - Upnutí zkušební tyče při zkoušce tahem za zvýšené teploty do tahového stroje

Obr. 31 ukazuje záznam zkoušky tahem za zvýšené teploty. Záznamem se rozumí pracovní diagram se závislostí napětí na poměrném prodloužení zkušební tyče.



Obr. 31 - Záznam tahové zkoušky pomocí tahového diagramu

## 4 Zkouška ohybem

Zkouška ohybem je v normách označena jako ČSN EN ISO 7438. Patří mezi statické mechanické zkoušky.

Díky zkoušce ohybem získáváme informace o chování materiálu v třibodovém ohybu [21].

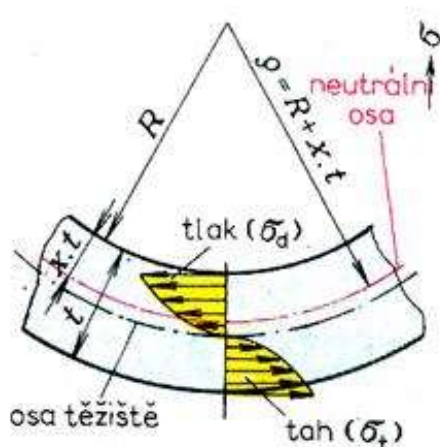
U svarových spojů je účelem zkoušky ohybem prokázat, že je svar řádně spojen se základním materiálem a že je odolný vůči ohybovému napětí. Tím dokážeme, že ve svaru není vada (např. špatný kořen svaru, špatné promísení svarového kovu se základním materiálem, bublina, příliš velká tepelně ovlivněná oblast, špatně zvolená technologie atd.), která by způsobila jeho nespolehlivost [22].

Podle normy ČSN EN ISO 15614-1 musí platit, že zkušební tyče jsou pro zkoušku ohybem tupých svarových spojů vyrobeny podle normy ČSN EN ISO 5173 (viz kapitola: Zkouška ohybem – ČSN EN ISO 5173).

Pokud je tloušťka svaru menší než 12 mm, dvě tyče jsou zkoušeny ze strany kořene svaru a dvě z lícové strany svaru. U tlouštěk, které jsou větší nebo rovné 12 mm, je možné provést ohyb boční na čtyřech tyčích místo zkoušek ohybem ze strany kořene svaru a lící strany svaru.

Během zkoušení se na zkušebních tyčích nesmí objevit jakákoliv vada větší než 3 mm. Nehodnotí se vady, které vznikly na hranách tyčí. [1]

Během zkoušky ohybem je napětí ve zkušební tyči rozloženo, tak jak je vyobrazeno na obr. 32.



Obr. 32 - Rozložení napětí v namáhané zkušební tyči během zkoušky ohybem [23]

Maximální napětí je v krajních vrstvách. Na straně působení síly (na vnitřní straně ohybu) je napětí tlakové (vlákna se zkracují) a na straně druhé (na vnější straně ohybu) je napětí tahové (vlákna se natahují). Uprostřed zkušební tyče je tzv. neutrální vrstva a napětí je zde nulové.

Na začátku zkoušky je neutrální osa uprostřed průřezu zkušební tyče. V průběhu zkoušky se v důsledku ohýbání posouvá směrem k vnitřní straně ohybu. Výsledkem je, že neutrální osa není totožná s osou těžiště zkušební tyče [23].

Zkouška ohybem se provádí především u křehkých materiálů, u kterých dojde k porušení. U houževnatých materiálů zkouška ohybem nemá ukončení. Proto se u nich stanovuje limitní deformace a pro ni se určuje napětí a poměrný průhyb, při kterém byla dosažena [24].

Na obr. 33 je vyfocena zkušební tyč pro zkoušku ohybem.



Obr. 33 - Zkušební tyč před zkouškou ohybem

#### 4.1 Značení rozměrů zkušebních tyčí

Následující tab. 7 obsahuje značky a jejich rozměry a význam, které jsou použity na obrázcích v kapitole zkouška ohybem.

Tab. 7 - Značky rozměrů zkušebních tyčí, jejich význam a jednotky [25]

Značka	Význam	Jednotka
$a$	Tloušťka nebo průměr zkušební tyče (nebo průměr vepsané kružnice u těles polygonálního průřezu)	mm
$b$	Šířka zkušební tyče	mm
$c$	Vzdálenost mezi rovinou zahrnující horizontální osu podpěr a středovou osou zaoblené části trnu před zkouškou	mm
$D$	Průměr ohýbacího trnu	mm
$f$	Posun trnu	mm
$L$	Délka zkušební tyče	mm
$l$	Vzdálenost mezi podpěrami	mm
$R$	Poloměr podpěr	mm
$r$	Vnitřní poloměr ohnuté části zkušební tyče po ohýbání	mm
$\alpha$	Úhel ohybu	°

## 4.2 Zkušební zařízení

Zkoušku ohybem je nutno provádět na zkušebních strojích, které jsou vybaveny alespoň jedním z následujících přípravků:

- Ohýbací přípravek se dvěma podpěrami a trnem znázorněným na obr. 34
- Ohýbací přípravek s blokem ve tvaru V a trnem znázorněným na obr. 35
- Ohýbací přípravek s upínacími čelistmi znázorněný na obr. 36 [25]

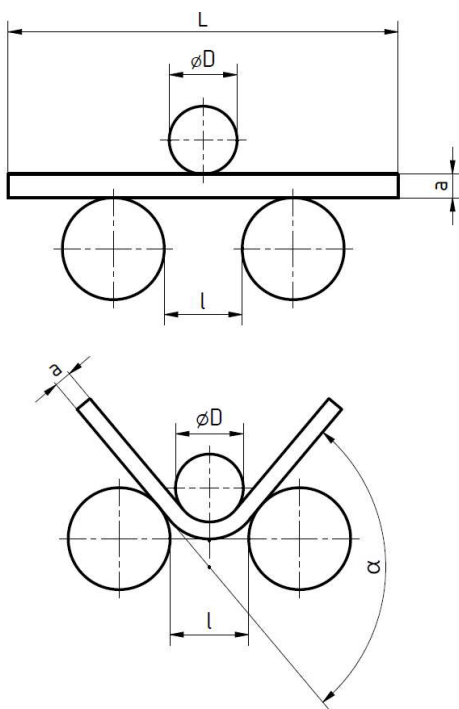
### 4.2.1 Ohýbací přípravek s podpěrami a trnem

Šířku nebo průměr zkušební tyče musí převyšovat délka podpěr a šířka trnu.

Pokud není stanoveno jinak, vzdálenost mezi podpěrami musí být podle následujícího vzorce (5) a během zkoušky ohybem se nesmí měnit.

$$l = (D + 3a) \pm \frac{a}{2} \quad (5)$$

Symbol  $D$  z rovnice značí průměr trnu a symbol  $a$  je použit pro tloušťku ohýbané zkušební tyče [25].



Obr. 34 - Ohýbací přípravek se dvěma podpěrami a trnem [25]

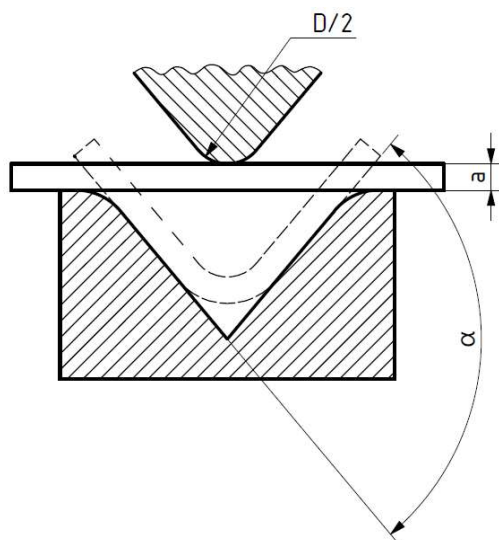
Tab. 8 obsahuje vztahy mezi tloušťkou zkušební tyče, poloměrem ohýbacího trnu a poloměrem matrice.

Tab. 8 - Rozměry pevných součástí pro ohyb ze strany líce nebo kořene [26]

Tloušťka tyče [mm]	Poloměr ohýbacího trnu [mm]	Poloměr matrice [mm]
10	20	32
$t_s$	$2 \cdot t_s$	$r_p + t_s + 2$

#### 4.2.2 Ohýbací přípravek s blokem ve tvaru V

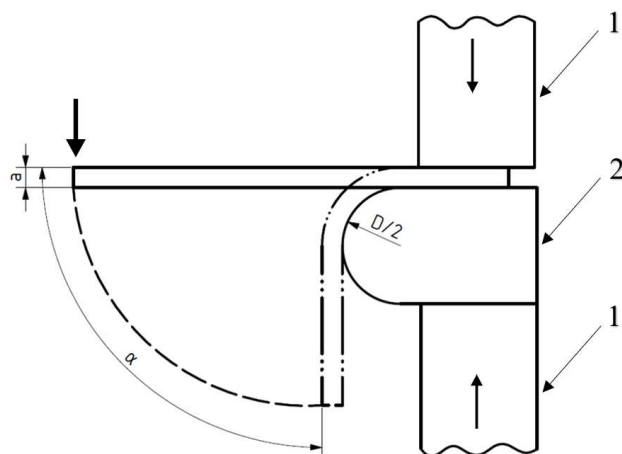
Úhel  $\alpha$ , který svírají zkosené boky povrchu bloku ve tvaru V, musí být  $180^\circ$ . Hrany bloku tvaru V musí mít poloměr zaoblení v mezích jednoho až deseti násobku tloušťky zkušební tyče [25].



Obr. 35 - Ohýbací přípravek s blokem ve tvaru V a trnem [25]

#### 4.2.3 Ohýbací přípravek s upínacími čelistmi

Tento přípravek je tvořen z čelistí a trnu, který musí vykazovat dostatečnou tvrdost.



Obr. 36 - Ohýbací přípravek s upínacími čelistmi [25]

V obr. 36 je pod číslem 1 označena upínací čelist a pod číslem 2 ohýbací trn.

#### 4.3 Teploty během zkoušky

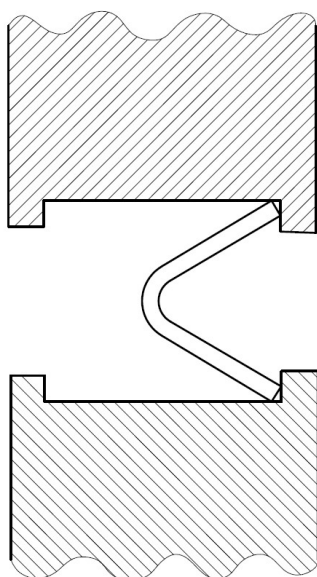
Zkouška se zásadně provádí při okolní teplotě mezi  $10^\circ\text{C}$  a  $35^\circ\text{C}$  [25].



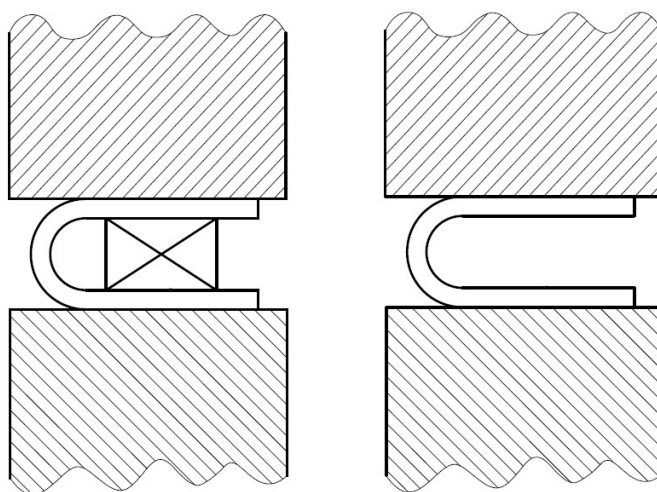
#### 4.4 Metody pro použití zkoušky ohybem

Nadále je nutnost zkoušku ohybem provádět s využitím jedné z následujících metod tak, jak je specifikováno v normě:

- V daných podmínkách se pod přiměřeným zatížením dosáhne předepsaného úhlu ohybu viz obr. 34 - obr. 36
- Ramena zkušebního tělesa jsou pod zatížením v předepsané vzdálenosti od sebe vzájemně rovnoběžná viz obr. 38
- Ramena zkušebního tělesa jsou pod přiměřeným zatížením v přímém kontaktu viz obr. 39 [25]

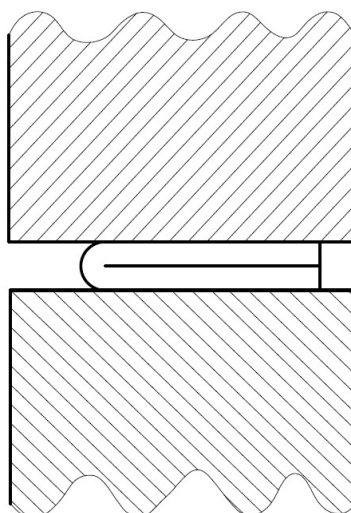


Obr. 37 - Ohýbání ramen zkušebního tělesa [25]



Obr. 38 - Ramena zkušebního tělesa navzájem rovnoběžná [25]





Obr. 39 - Ramena zkušebního tělesa v přímém kontaktu [25]

#### 4.5 Postup zkoušky ohybem

Pro ohnutí zkušebního tělesa na předepsaný úhel se těleso musí umístit na dvě podpěry (viz obr. 34) nebo do bloku ve tvaru V (viz obr. 35) a uprostřed působením zatěžující síly ohnout.

Pro zajištění volného plastického toku materiálu u zmíněných třech metod (ohýbací přípravek se dvěma podpěrami a trnem, ohýbací přípravek s blokem ve tvaru V a trnem, ohýbací přípravek s upínacími čelistmi) je důležité, aby ohybové zatížení působilo pomalu. Rychlost posuvu trnu je obvykle  $1 \pm 0,2 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Pokud zkušební těleso nelze výše uvedeným způsobem ohnout přímo na předepsaný úhel, ohyb je potřeba dokončit přímým lisováním konců ramen zkušebního tělesa viz obr. 37.

U zkoušky ohybem, kde je vyžadována rovnoběžnost ramen je možné zprvu začít zkušební tyč ohýbat tak, jak je zdokumentováno na obr. 37 a až poté mezi rovnoběžná ramena umístit desku lisu viz obr. 38. Po přidání desky lisu dojde k dalšímu tvarování zatěžující silou, kterou působíme tak dlouho, dokud nezískáme rovnoběžnost ramen. Zkoušku lze provádět s vložkou, ale i bez vložky.

Pokud je předepsán přímý kontakt mezi rameny zkušebního tělesa (viz obr. 39), zkušební těleso se musí po předběžném ohybu podrobit dalšímu ohýbání pod zatížením mezi rovnoběžnými deskami lisu [25].

Na obr. 40 - obr. 43 je vidět průběh ohýbání (od prvního dotyku ohýbacího trnu se zkušební tyčí až po její úplné ohnutí) zkušební tyče.



*Obr. 40 - Uložení zkušební tyče do stroje před zatížením*



*Obr. 41 - Uložení zkušební tyče ve stroji pod zatížením – 1*



Obr. 42 - Uložení zkušební tyče ve stroji pod zatížením – 2



Obr. 43 - Uložení zkušební tyče ve stroji na konci zkoušky ohybem

## 4.6 Zjišťované veličiny

Při dodržení správného postupu a všech podmínek během zkoušky dostaneme jako výsledek celého zkoušení následující hodnoty.

### 4.6.1 Mez pevnosti v ohybu

Mez pevnosti v ohybu je maximální napětí, které působí na povrch zkušební tyče v okamžiku lomu nebo ukončení zkoušky. Tato pevnost v ohybu odpovídá napětí na krajním vlákně zkušební tyče při dosažení maximální síly. Mez pevnosti v ohybu se vypočítá dle následujícího vzorce:

$$R_{mo} = \frac{M_{0max}}{W_0} \quad (6)$$

Ve vzorci (6) je použit symbol  $M_{0max}$ , který značí maximální ohybový moment.  $W_0$  ze vzorce znázorňuje průřezový modul v ohybu [25].

Maximální ohybový moment se vypočítá jako velikost zatěžující síly násobená ramenem. Ramenem se rozumí vzdálenost od podpěry k působení ohybové síly.

Průřezový modul se počítá podle vzorce (7):

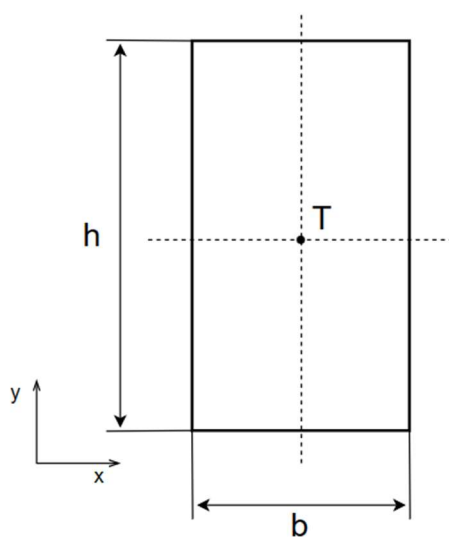
$$W_0 = \frac{J}{e} \quad (7)$$

Kde  $J$  je kvadratický moment k neutrální ose a  $e$  je vzdálenost od krajních vláken průřezu. Např. pro obdélník (viz obr. 44) se průřezový modul v ohybu k rovnoběžné ose  $x$  vypočítá následovně (8):

$$J_x = \frac{bh^3}{12} \quad (8)$$

Dosazením rovnice (8) do rovnice (7) se vypočítá průřezový modul (9) [40]:

$$W_{0x} = \frac{J}{e} = \frac{\frac{bh^3}{12}}{\frac{h}{2}} = \frac{1}{6}bh^2 \quad (9)$$



Obr. 44 - Pomocný obrázek pro příklad vypočítání průřezového modulu v ohybu [40]

#### 4.6.2 Průhyb

Průhybem značíme velikost prohnutí zkušební tyče ve směru zatěžování proti nezatíženému stavu.

Průhyb je vidět na obr. 45 a obr. 46, kde je vyfocena zkušební tyč po zkoušce ohybem.



*Obr. 45 – Zkušební tyč po zkoušce ohybem*



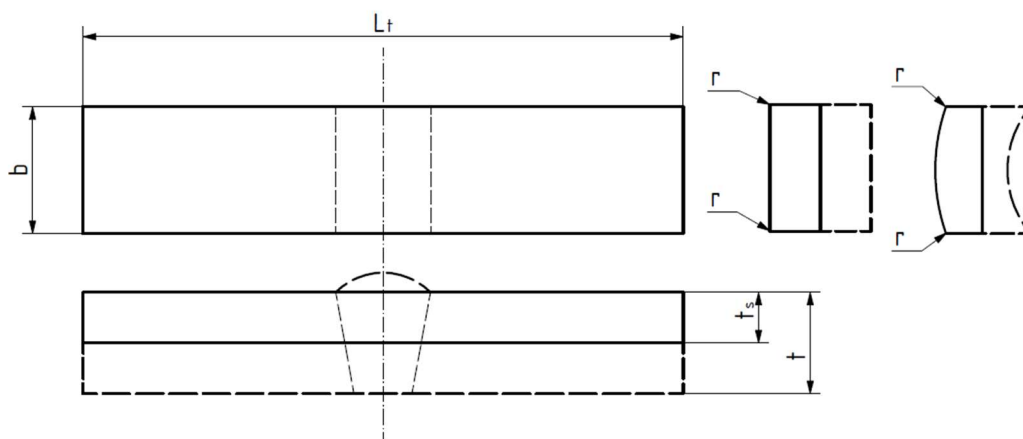
*Obr. 46 - Detail zkušební tyče po zkoušce ohybem*

## 4.7 Zkouška ohybem – ČSN EN ISO 5173

Tato norma určuje, jakým postupem se bude příčná zkouška ohybem provádět. Říká, zda se bude provádět z lící strany, ze strany kořene nebo z boku. Platí pro zkušební tyče s tupým svarovým spojem naplátovaných materiálů. Norma pojednává i o provádění podélných zkoušek ohybem, a to buď ze strany kořene nebo líce svarového spoje. Norma ČSN EN ISO 5173 platí pro svarové spoje, které jsou provedeny obloukovým svařováním [26].

### 4.7.1 Zkušební tyč pro příčnou lící zkoušku ohybem tupého svaru

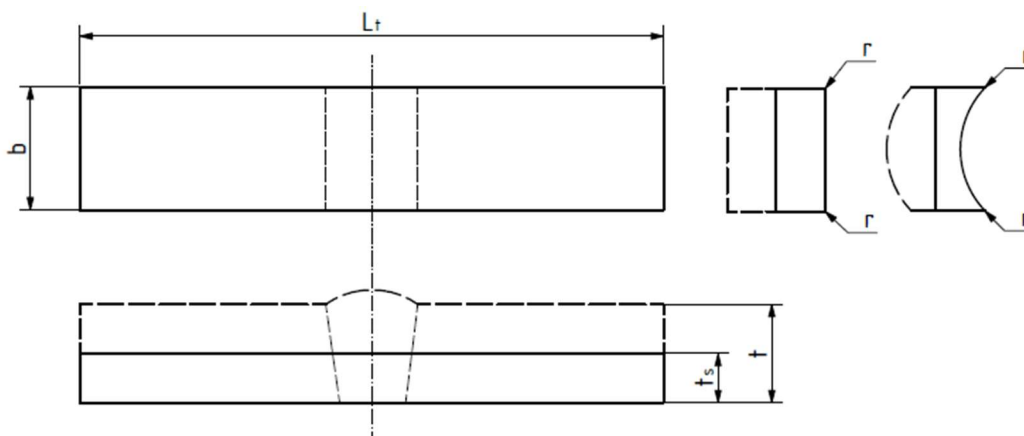
Zkušební tyč pro příčnou lící zkoušku ohybem tupého svaru (viz obr. 47) má zkratku TFBB. Je zde při ohybu zkušební tyče tažena lící strana svaru. Lící strana svaru je strana, kde je větší šířka svaru, nebo také strana, kde se začínalo svařovat. Platí pro zkušební tyče, které byly odebrány příčně z tupých svarových spojů [26].



Obr. 47 - Tyč pro příčnou lící zkoušku ohybem tupého svaru (TFBB) [26]

### 4.7.2 Zkušební tyč pro zkoušku ohybem ze strany kořene tupého svaru

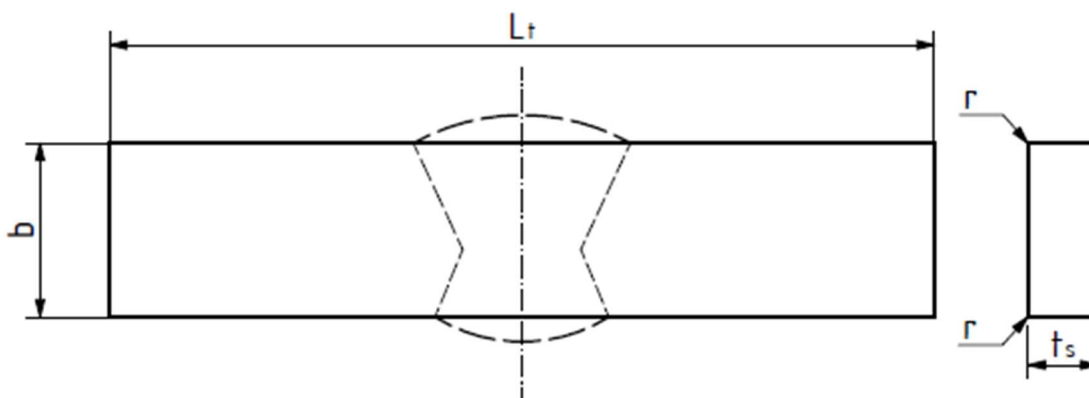
Zkušební tyč pro zkoušku ohybem ze strany kořene tupého svaru (viz obr. 48) se značí zkratkou TRBB. Jinými slovy to znamená zkušební tyč, u které je při ohybu tažen povrch strany, který leží naproti straně, kde je líc svaru. Jako předchozí případ je i tento platný pro příčné tyče odebrané z tupých svarů [26].



Obr. 48 - Tyč pro příčnou zkoušku ohybem ze strany kořene tupého svaru (TRBB) [26]

#### 4.7.3 Zkušební tyč pro příčnou boční zkoušku ohybem tupého svaru

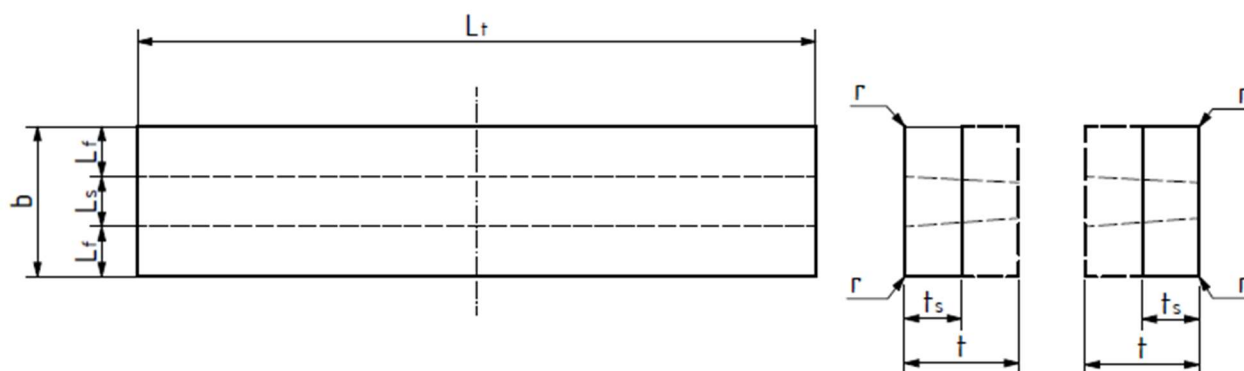
Zkušební tyč pro příčnou boční zkoušku ohybem tupého svaru (viz obr. 49) je označována jako SBB a platí pro zkušební tyče, u kterých je během ohybu natahována plocha řezu napříč svarovým spojem [26].



Obr. 49 - Tyč pro příčnou boční zkoušku ohybem tupého svaru (SBB) [26]

#### 4.7.4 Zkušební tyč pro podélnou zkoušku ohybem z lící strany nebo ze strany kořene tupého svaru

Zde se jedná o zkušební tyč pro podélnou zkoušku ohybem z lící strany nebo ze strany kořene tupého svaru (viz obr. 50). LFBB zkratka je pro stranu lící a LRBB pro stranu kořene. Zkušební tyč má stejný směr jako je směr tupého svaru [26].

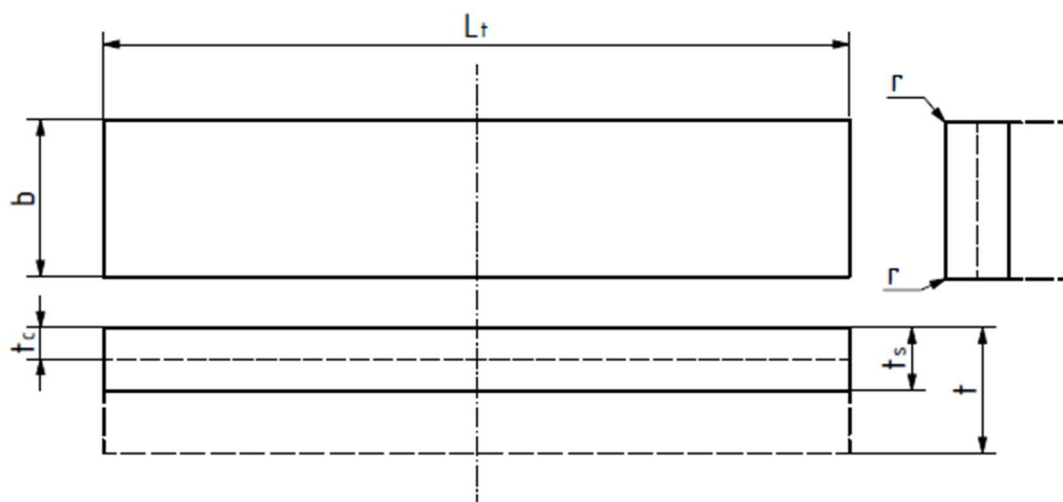


Obr. 50 - Tyč pro podélnou zkoušku ohybem tupého svaru (LFBB a LRBB) [26]

#### 4.7.5 Zkušební tyč pro lící zkoušku ohybem naplátované vrstvy bez tupého svaru

Zkušební tyč pro lící zkoušku ohybem naplátované vrstvy bez tupého svaru (viz obr. 51) má zkratku FBC. Jedná se o zkušební tyč, u které je při ohybu tažena naplátovaná vrstva a platí jak pro příčné, tak i pro podélné tyče [26].



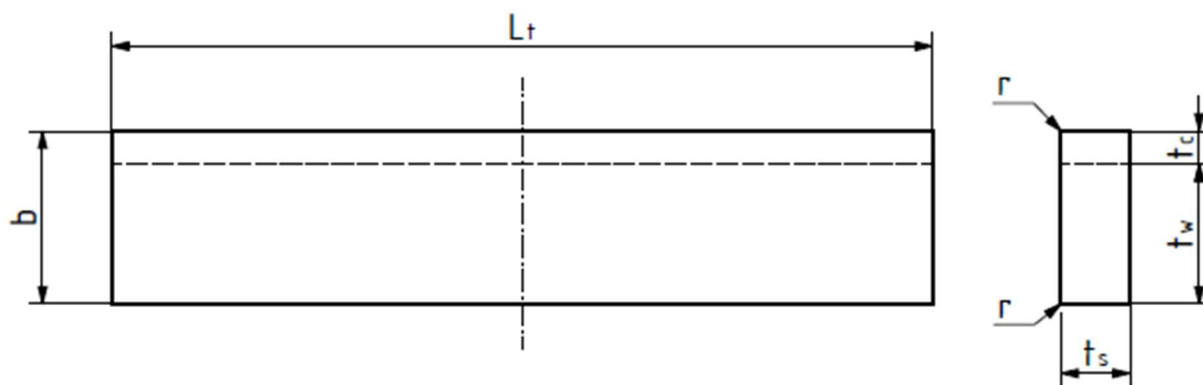


Obr. 51 - Tyč pro lícni zkoušku ohybem naplátované vrstvy bez tupého svaru (FBC) [26]

Naplátovaná vrstva se nachází na povrchu tyče a vyrábí se např. z kompozitních materiálů nebo epoxidové pryskyřice. Slouží k rozložení napětí při ohybu na celou plochu zkušební tyče a díky tomu je možné lépe sledovat vlastnosti materiálu.

#### 4.7.6 Zkušební tyč pro boční zkoušku ohybem naplátované vrstvy bez tupého svaru

Zkušební tyč pro boční zkoušku ohybem naplátované vrstvy bez tupého svaru (viz obr. 52) je označena zkratkou SBC. Zde je při ohybu tažena plocha příčného řezu s naplátovanou vrstvou a opět platí pro příčné i podélné tyče [26].

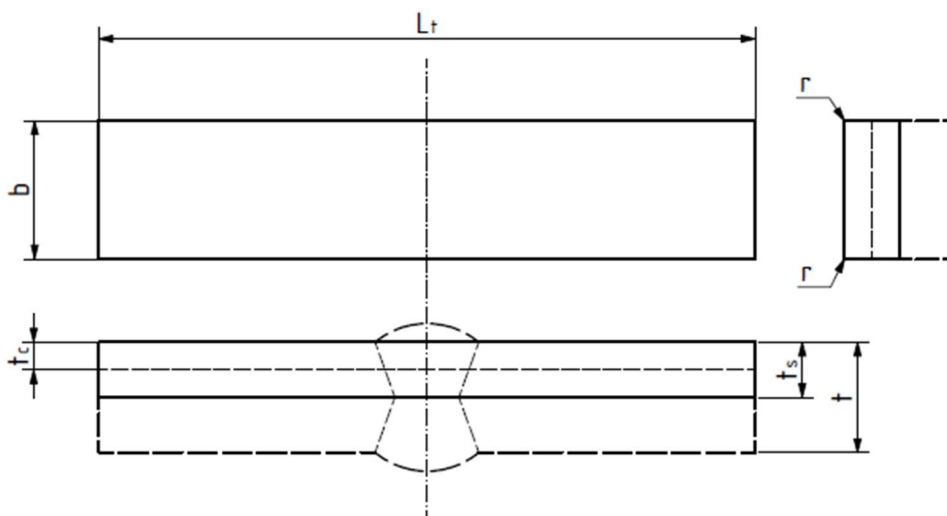


Obr. 52 - Tyč pro boční zkoušku ohybem naplátované vrstvy bez tupého svaru (SBC) [26]

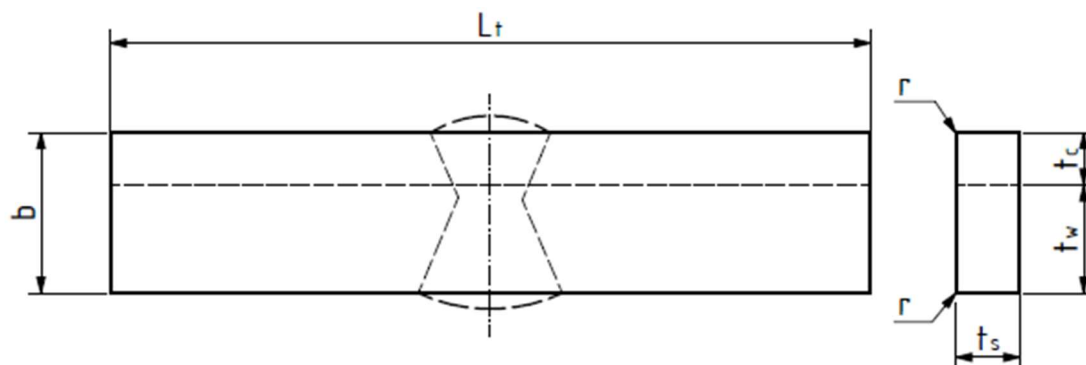
#### 4.7.7 Zkušební tyč pro boční a lícni zkoušku ohybem naplátované vrstvy s tupým svarem

FBCB znamená zkušební tyč pro lícni zkoušku ohybem naplátované vrstvy s tupým svarem (viz obr. 53) a SBCB je zkušební tyč pro boční zkoušku ohybem naplátované vrstvy s tupým svarem (viz obr. 54). V tomto případě je tažena strana naplátované vrstvy nebo plocha příčného řezu tupého svaru s naplátovanou vrstvou [26].





Obr. 53 - Tyč pro lícni zkoušku ohybem naplátované vrstvy s tupým svarem (FBCB) [26]



Obr. 54 - Tyč pro boční zkoušku ohybem naplátované vrstvy s tupým svarem (SBCB) [26]

Významy a jednotky veškerých značek použitých v předchozích obrázcích (obr. 47 – obr. 54) jsou uvedeny v následující tab. 9.

Tab. 9 - Značky a jejich významy použité v nákresech zkušebních tyčí [26]

Značka	Význam	Jednotka
$b$	Šířka zkušební tyče	mm
$L_t$	Celková délka zkušební tyče	mm
$L_f$	Počáteční vzdálenost mezi dotykem válečků a osou svaru	mm
$L_s$	Maximální šířka svaru po opracování	mm
$r$	Poloměr hran tyče	mm
$t$	Tloušťka zkušebního dílu	mm
$t_s$	Tloušťka zkušební tyče	mm
$t_c$	Tloušťka naplátování	mm
$t_w$	Tloušťka základního materiálu pod naplátováním	mm

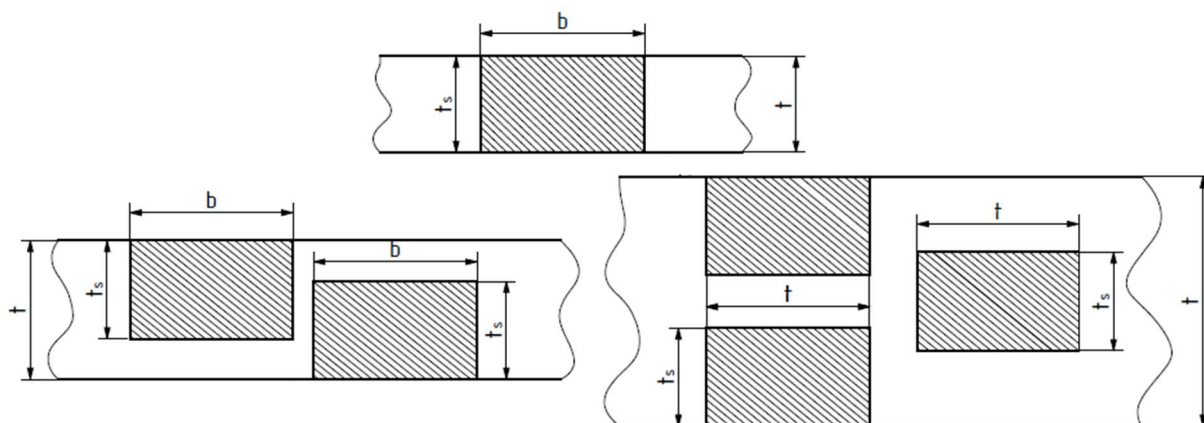
#### 4.7.8 Rozměry zkušebních tyčí

U výroby zkušebních tyčí je potřeba brát ohled na tloušťku svarového spoje.

##### 4.7.8.1 TFBB a TRBB

Tloušťka  $t_s$  ze strany kořene a z lící strany musí být stejná, jako tloušťka základního materiálu přiléhajícího ke svarovému spoji až do maximální tloušťky 30 mm. Pokud jsou tloušťky  $t$  (tloušťka zkušebního kusu) větší než 10 mm, pak jsou tloušťky zkušebních tyčí  $t_s$  mechanicky opracovány na stejnou tloušťku a to na  $(10 \pm 0,5)$  mm. To je vidět na obr. 47 a na obr. 48. Během ohýbání zkušební tyče musí být tažen kořen nebo líc svarového spoje.

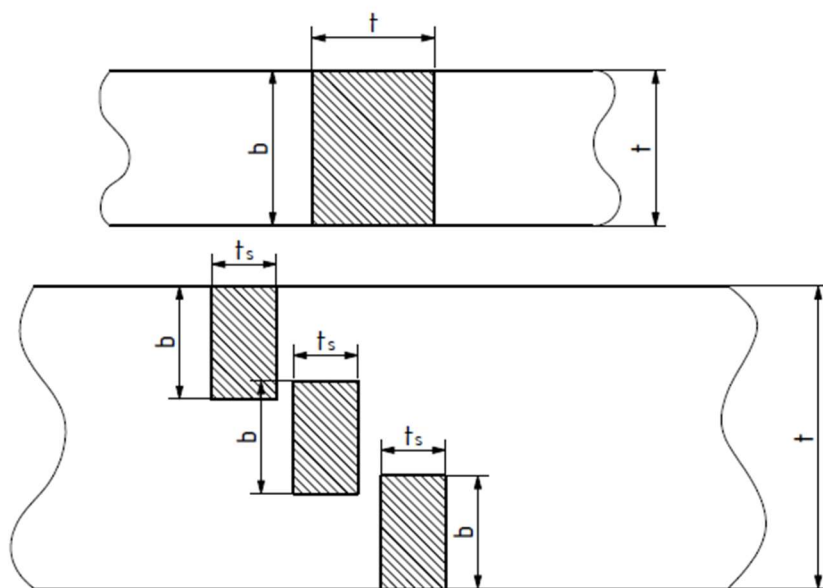
Pokud je nutno zkoušet plnou tloušťku zkušebního kusu, která je větší než 10 mm, zkušebních tyčí musí být odebráno více. Zkušební tyče jsou odebírány tak, aby pokryly celou tloušťku spoje. To je vidět na obr. 55. Pokud takový případ nastane, je nutné, aby bylo umístění zkušební tyče v tloušťce svaru identifikovatelné [26].



Obr. 55 - Zkušební tyče pro zkoušku ohybem ze strany kořene a z lící strany tupého svaru (TFBB, TRBB, LFBB a LRBB) [26]

##### 4.7.8.2 SBB

U boční zkoušky ohybem musí být šířka zkušební tyče stejná jako tloušťka základního materiálu svarového spoje. Tloušťka tyče  $t_s$  musí být nejméně  $(10 \pm 0,5)$  mm. Pokud tloušťka svaru přesahuje 40 mm, zkušebních tyčí je možné odebírat více až do tloušťky zkoušeného kusu. To je znázorněno na obr. 56. Opět v takovém případě musí být umístění zkušebních tyčí identifikovatelné [26].



Obr. 56 - Tyče pro boční zkoušku ohybem tupého svaru (SBB) [26]

#### 4.7.8.3 LFBB a LRBB

Základní materiál, který přiléhá ke svarovému spoji musí mít stejnou tloušťku, jako je tloušťka  $t_s$  zkušební tyče, ale nesmí přesáhnout 10 mm. Pokud je tloušťka zkušební tyče  $t$  větší než 10 mm, zkušební tyče se mohou mechanicky opracovat z jedné strany na tloušťku  $t_s$ , která bude  $(10 \pm 0,5)$  mm. Tento případ je vidět na obr. 50. Během zkoušky musí být natahován líc nebo kořen svarového spoje [26].

#### 4.7.8.4 FBC

U lícnicích zkoušek ohybem platí, že tloušťka  $t_s$  musí být stejná, jako je tloušťka základního materiálu včetně naplátované vrstvy, ale nesmí být větší než 10 mm. Pokud je tloušťka  $t$  větší než 10 mm, tloušťka  $t_s$  (tloušťka zkušební tyče) může být obrobena, nebo jinak mechanicky opracována na tloušťku  $(10 \pm 0,5)$  mm, tak jak je zobrazeno na obr. 51 [26].

#### 4.7.8.5 SBC

Pro boční zkoušku ohybem je šířka zkušební tyče maximálně do 40 mm včetně naplátované vrstvy. Tato šířka musí být stejná, jako tloušťka základního materiálu. Pokud není stanoveno jinak, tyč musí mít tloušťku  $t_s$  nejméně  $(10 \pm 0,5)$  mm. Jestliže je tloušťka základního materiálu včetně naplátované vrstvy 40 mm, tak je možné základní materiál odstranit tak, aby mohla vzniknout zkušební tyč o šířce  $b$  [26].

#### 4.7.8.6 FBCB

Pro příčnou zkoušku ohybem naplátované vrstvy s tupým svarem musí být tloušťka zkušební tyče  $t_s$  stejná, jako tloušťka základního materiálu včetně tloušťky naplátované vrstvy. Nesmí být však větší než 10 mm. Pokud je tloušťka  $t$  větší než 10 mm, tloušťka tyče  $t_s$  se může rovnat  $(10 \pm 0,5)$  mm. V takovém případě je svar umístěn ve středu zkušební tyče [26].

#### 4.7.9 Rozměry zkušební tyče

Aby se ze zkoušky ohybem získaly odpovídající hodnoty, musí rozměry zkušební tyče splňovat podmínky norem.

##### 4.7.9.1 Šířka zkušební tyče

Pro plechy u příčné zkoušky ohybem ze strany kořene nebo líce musí platit, že šířka  $b$  zkušební tyče musí být  $4 \cdot t_s$  nebo větší.

U příčné zkoušky ohybem ze strany kořene nebo líce pro trubky o průměru menším nebo rovném 50 mm platí, že:

$$b = t + 0,1 \cdot D \quad (10)$$

V rovnici (10) je  $t$  tloušťka zkušební dílu a  $D$  je vnější průměr trubky, který musí být minimálně 8 mm.

Pro trubky o průměru větším než 50 mm platí pro výpočet šířky zkušební tyče rovnice (11):

$$b = t + 0,5 \cdot D \quad (11)$$

Pro vnější průměry, které jsou větší než dvaceti pěti násobek tloušťky stěny trubky, může být zkušební tyč odebrána stejně jako u plechů.

Pro příčné boční zkoušky ohybem obecně platí, že šířka zkušební tyče  $b$  je stejná, jako tloušťka základního materiálu, který je vedle svaru.

Pro podélnou zkoušku ohybem zase platí, že šířka zkušební tyče  $b$  musí být podle následující rovnice (12):

$$b = L_s + 2 \cdot b_1 \quad (12)$$

V rovnici  $b_1$  znamená šířka vnější linie natavení, která je obvykle nastavována na 15 mm.  $L_s$  značí maximální šířku svaru po opracování [26].

##### 4.7.9.2 Hrany

Na tažné straně zkušební tyče se musí hrany mechanicky opracovat neboli zaoblit. Důvodem je minimalizace vzniku vad během ohybu pocházejících právě z hran, ve kterých je větší smykové napětí. Poloměr zaoblení nesmí být větší než  $0,2 \cdot t_s$ , maximálně do 3 mm [26].

## 5 Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy

Zkouška rázem v ohybu je v normách pod označením ČSN EN ISO 148-1. Jedná se o zkoušku, kterou se zjišťují plastické vlastnosti materiálu při rázovém namáhání. Ze zkoušky se získávají vlastnosti chování svarového spoje zařízení nebo konstrukce z hlediska odolnosti proti křehkému porušení. [3] Zkouška se používá v rutinních přejímacích zkouškách v průmyslu.

Obecně se zkouška rázem v ohybu provádí dle normy ČSN EN ISO 148-1.

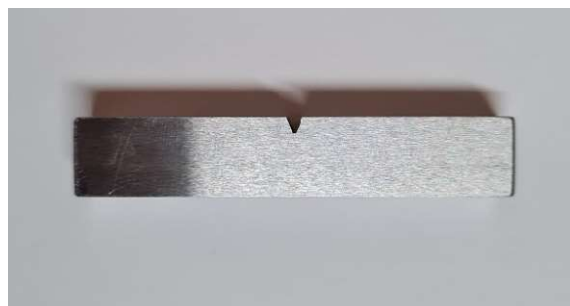
Zkouška rázem v ohybu metodou Charpyho spočívá v přeražení zkušební tyče s vrubem pomocí jednoho rázu kyvadlového kladiva. Zkušební tyč se opět umístí na dvě podpěry a v jejím středu je vrub, který musí mít danou geometrii a nacházet se na protilehlé straně k místu úderu během zkoušky. Ze zkoušky se běžně určuje energie, která se při rázové zkoušce absorbuje, dále rozšíření zkušební tyče pod vrubem a vzhled smykového lomu [27]. energii, která se ze zkoušky získává, se říká absorbovaná a je to energie potřebná na přeražení zkušební tyče. Absorbovaná energie se označuje zkratkami KV nebo KU. KV se používá, pokud je vrub ve tvaru písmene V a KU, pokud má vrub tvar U [28]. Zkratky KV a KU se používají také pro označení poloměrů břítu. Konkrétně se ke zkratkám přidává dolní index (např. KV<sub>2</sub>, KV<sub>8</sub>, KU<sub>2</sub>, KU<sub>8</sub>), který značí právě poloměr břítu v milimetrech [27].

Smykový neboli tvárný lom má velkou spotřebu deformační energie, pomalou rychlost šíření, časté zastavování a stabilní šíření. Smykový lom se označuje za lom bezpečný [29].

Na obr. 57 a obr. 58 jsou vyfocené zkušební tyče pro zkoušku rázem v ohybu metodou Charpyho. Fotografie jsou pořízené před zkouškou.



Obr. 57 - Zkušební tyč s vrubem – pohled shora



Obr. 58 - Zkušební tyč s vrubem – pohled z boku

Obr. 59 a obr. 60 ukazují stejné zkušební tyče jako z předešlých fotografií (obr. 57 a obr. 58) s rozdílem, že tyče jsou zde po zkoušce rázem v ohybu. Je patrné, že u jedné zkušební tyče nastal lom tvárný (viz obr. 59) a u druhé lom křehký (viz obr. 60).



Obr. 59 - Tvárný lom na zkušební tyči po zkoušce rázem v ohybu



Obr. 60 - Křehký lom na zkušební tyči po zkoušce rázem v ohybu

Teplota je velmi důležitým faktorem, na který se musí dát během zkoušky pozor.

U kovových materiálů se mohou hodnoty při rázu s teplotou měnit. Z toho důvodu se zkoušky musí provádět při zadané teplotě. Pokud je zadaná teplota jiná než teplota okolí, zkušební tyč se musí ohřát nebo naopak ochladit na danou teplotu. Na obr. 61 jsou vidět zkušební tyče, které se v nádobě ochlazují kombinací tekutého dusíku a technického lihu na teplotu  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . V nádobě jsou vždy i kleště, kterými se zkušební tyče umisťují do zkušebního stroje. Důvodem ochlazování kleští je, aby neohřívaly zkušební tyče při přenosu do stroje. Přenos tyčí do stroje nesmí trvat více jak 5 vteřin, aby opět nedošlo k ohřátí.

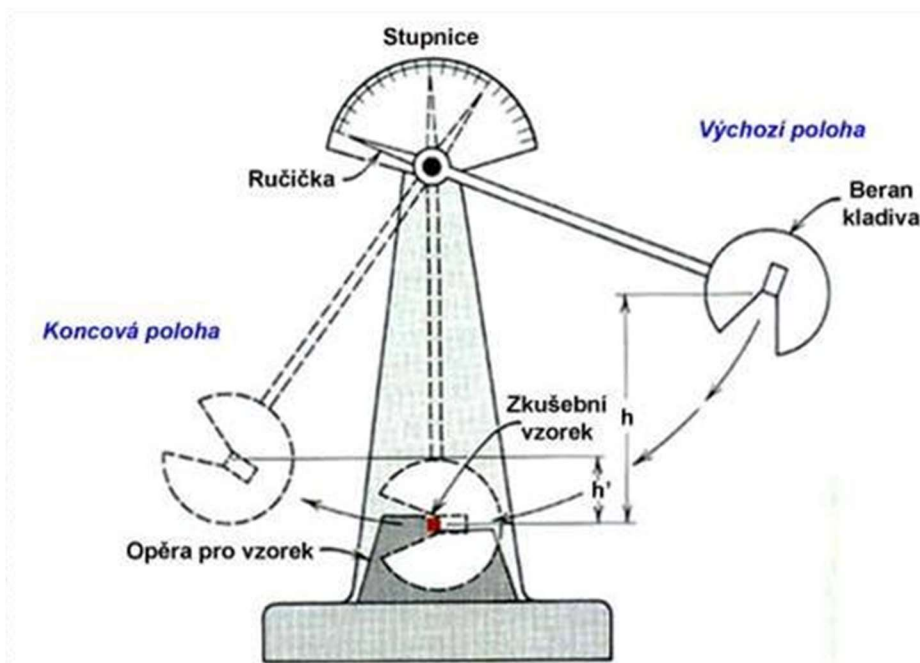




Obr. 61 - Chladící se zkušební tyče na teplotu  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Aby bylo možné srovnat výsledky zkoušky, je nutné přesně dodržovat normu ČSN EN ISO 148-1 a jasně a úplně popsat typ zařízení, zkušební tyč a podrobnosti zkušebních tyčích po zkoušce. Důvodem, proč je nutno dodržovat zde důslednost, je ten, že se mohou použít kladiva s odlišným poloměrem břitu nebo jsou použity odlišné tvary zkušebních tyč, což vede k odlišným výsledkům [27].

Obr. 62 znázorňuje průběh zkoušky rázem v ohybu metodou Charpyho.



Obr. 62 - Charpyho kladivo a průběh zkoušky [30]



Obr. 63 - Uložení zkušební tyče do stroje pro zkoušku rázem v ohybu

U svarů musí být umístění zkušebních tyčí a zkušební teplota v souladu s normou ČSN EN ISO 15614-1 a zkoušení společně s rozměry tyčí podle ČSN EN ISO 9016.

Na obr. 63 je vidět uložení zkušební tyče do zkušebního stroje. Kladivo do zkušební tyče udeří na opačné straně, než je vrub.

Pro svarový kov se používá zkušební tyč, která má vrub typu VWT a pro tepelně ovlivněnou oblast vrub VHT (vysvětlení zkratk je v kapitole 5.2.1 – Značení vrubů).

Zkušební tyče se odebírají maximálně 2 mm pod horním povrchem základního materiálu a odebírají se napříč svarovým spojem.

Pokud je tloušťka materiálu větší než 50 mm, odebírají se dvě sady tyčí z oblasti kořene, jedna ze svarového kovu a jedna z tepelně ovlivněné oblasti.

Pro splnění požadavků musí vyhovovat průměrná hodnota ze tří tyčí. Pouze jedna hodnota může vyjít s odchylkou pod minimální specifikovanou průměrnou hodnotu, ale nesmí být menší než 70 % této hodnoty [1].

## 5.1 Zkušební tyče

Standardní zkušební tyče musí mít celkovou délku 55 mm a také musí být čtvercového průřezu o stranách 10 mm. Pokud není možnost ze vzorku vytvořit standardní zkušební tyč, je potřeba použít vzorek menších rozměrů a tím se rozumí tloušťky vzorku 7,5 mm, 5 mm a 2,5 mm. Tloušťka zkušební tyče je vidět např. na obr. 57. Šířka zkušební tyče je k vidění na obr. 58. Vruby jsou ve tvaru V nebo U a jsou umístěné uprostřed délky. Přesnější informace jsou dostupné v normě ČSN EN ISO 148-1 [27].

## 5.2 Vruby

Vruby se do zkušebních tyčí vyrábějí ve tvaru písmene V nebo U. Vždy musí být vyrobeny tak, aby v kořeni vrubu nebyly žádné známky opracování, které by mohly během zkoušky ovlivnit hodnoty absorbované energie [27].

### 5.2.1 Značení vrubů

Pojmenování vrubů tvoří systém písmen, který říká, o jaký typ vrubu se jedná, jaké má umístění, orientaci a jaká je vzdálenost vrubu od referenční čáry. Vždy platí, že zkušební tyč se odebírá tak, aby její podélná osa byla kolmá na svarový spoj.



Příklad označení vrubu může být např. VHS. První písmeno v označení vrubů je buď U, které říká, že se jedná o vrub ve tvaru písmene U, nebo písmeno V, které znamená vrub ve tvaru písmene V.

Druhé písmeno může být H nebo W. H znamená, že se vrub nachází v tepelně ovlivněné oblasti (referenční čára je čára natavení nebo čára spoje) a W, že je vrub ve svarovém spoji (referenční čára je ve středu svarového spoje).

Třetí písmeno uvádí, jaká je orientace vrubu. Písmeno S znamená, že vrub je rovnoběžný s povrchem tyče a písmeno T, že vrub je kolmý na povrch.

Čtvrté písmeno znázorňuje vzdálenost středu vrubu od povrchu svarového spoje.

Poslední páté písmeno znamená vzdálenost mezi horním povrchem svarového spoje a bližším povrchem zkušební tyče [31].

Obr. 64 ukazuje odkud se odebírají zkušební tyče ze zkušebních vzorků.



Obr. 64 – Zkušební tyč s vrubem v tepelně ovlivněné oblasti

### 5.2.2 V-vrub

Úhel sevření ve V-vrubu musí být 45 °C. Jeho hloubka je 2 mm a poloměr v kořeni 0,25 mm [27].

### 5.2.3 U-vrub

Hloubka U-vrubu je dle normy ČSN EN ISO 148-1 nastavena na 5 mm a poloměr v kořeni 1 mm, pokud není stanoveno jinak [27]. Společnost ŠKODA JS v praxi používá hloubku U-vrubu zpravidla 2 nebo 3 mm.

## 6 Zkouška tvrdosti

Tvrдость je možné definovat jako schopnost materiálů odolávat trvalé deformaci při kontaktu s vtiskovacím zařízením při zatížení [32]. Zkoušku tvrdosti svarových spojů lze v normách najít pod označením ČSN EN ISO 9015-1. Zkouška tvrdosti patří mezi jednu z nejvíce používaných zkoušek svarových spojů. Důvodem k provádění zkoušky tvrdosti je měření odporu materiálu proti vnikání cizího tělesa [3].

Nejvíce je pro zkoušení svarových spojů používána metoda podle Vickerse (v normách je pod označením ČSN EN ISO 6507-1) nebo podle Brinella (ČSN EN ISO 6506-1) [33].

Principem zkoušky podle Vickerse je vnikání diamantového tělesa, který má tvar pravidelného čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou a vrcholových úhlem  $136^\circ$  do zkoušené tyče. U zkoušky podle Brinella do základního materiálu vniká ocelová kulička z karbidu wolframu [3; 21].

Zkouška tvrdosti se provádí na strojích zvaných tvrdoměry (viz obr. 65). Na obr. 66 je detail matnice s vtiskem ve zkušební tyči. Zde byla zkouška provedena metodou podle Vickerse.



Obr. 65 – Tvrdoměr



Obr. 66 - Matnice tvrdoměru s vtiskem

## 6.1 Zkratky a termíny

Pro správné provedení zkoušky tvrdosti je potřeba znát termíny uvedené v tab. 10.

Tab. 10 - Značky a termíny pro zkoušku tvrdosti [34]

Značka	Termín	Jednotky
E	Jednotlivý vtisk	/
R	Řada vtisků	/
HV	Tvrдость podle Vickerse	/
HB	Tvrдость podle Brinella	/
$L$	Vzdálenost mezi středy vtisků v tepelně ovlivněné oblasti	mm
H	Vzdálenost řad vtisků od povrchu referenční linie nebo oblasti natavení	mm
$t$	Tloušťka zkušební tyče	mm

## 6.2 Příprava zkušebních tyčí

Zkušební tyče jsou vyráběny, podle již výše zmíněných norem pro zkoušku podle Vickerse (ČSN EN ISO 6507-1) nebo podle Brinella (ČSN EN ISO 6506-1).

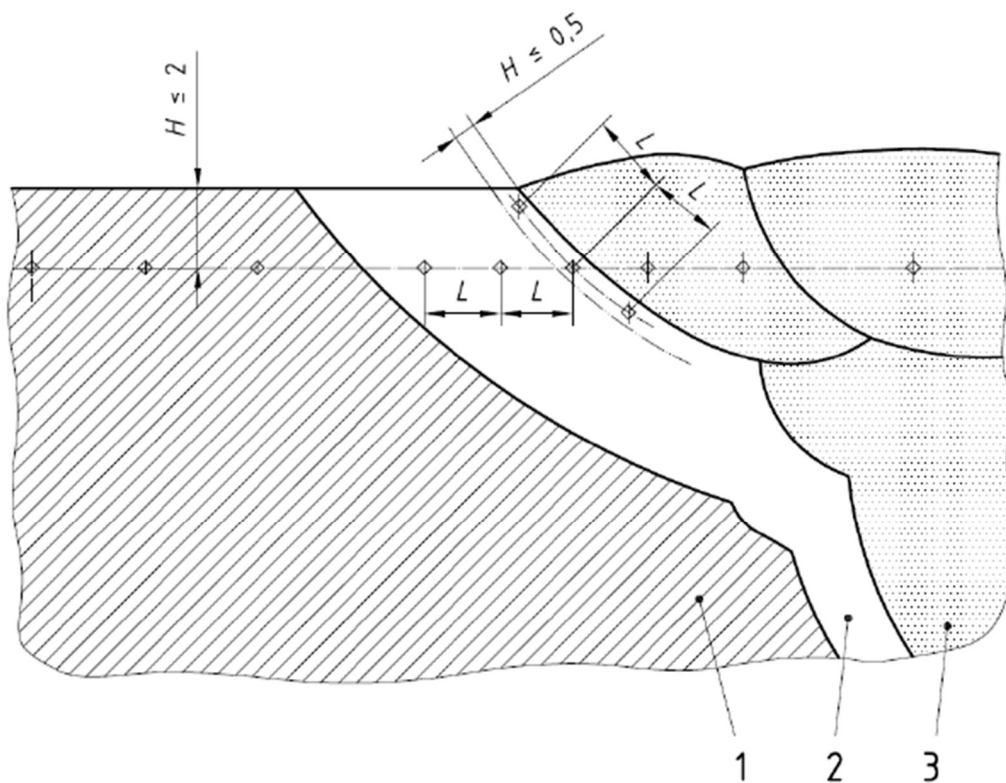
Zkušební vzorky jsou odebírány mechanickým řezáním a u výroby zkušebních tyčí ze vzorků je nutné dodržet určitou pečlivost. Nesmí dojít k ovlivnění zkoušeného povrchu metalurgickými změnami. Také je potřeba zkoušený povrch vhodně upravit (např. broušením nebo leptáním), aby bylo možné správně změřit do materiálu vtisknuté úhlopříčky [34].

### 6.3 Zkušební postup

Zkušební postup se liší podle toho, zda se provádí pouze jeden vtisk nebo celá řada vtisků.

#### 6.3.1 Řada vtisků

Řada vtisků je známá pod označením zkratkou R. Počet vtisků se dělá tak, aby bylo zajištěno, že byla zkouška provedena v základním materiálu, svarovém spoji a u kovů, které v důsledku svařování zvyšují svoji tvrdost i v tepelně ovlivněné oblasti. Z pravidla se provádějí tři vtisky v tepelně neovlivněném základním materiálu, tři vtisky ve svarovém kovu a tři vtisky v tepelně ovlivněné oblasti. U kovů, které zvyšují svoji tvrdost v tepelně ovlivněné oblasti, jsou v důsledku svařování prováděny dva doplňující vtisky ve vzdálenost  $\leq 0,5$  mm mezi středem vtisku a linií natavení.



Obr. 67 - Umístění vtisků na tupých svarech [34]

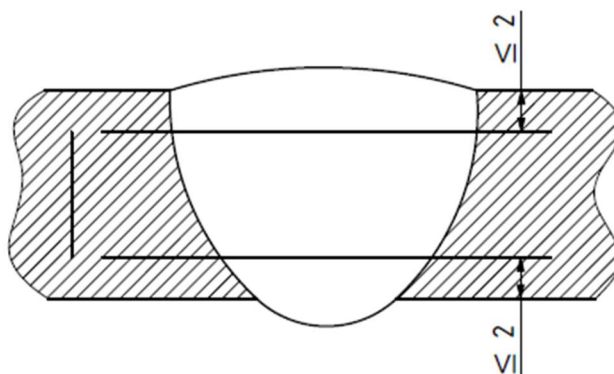
Na obr. 67 je pod číslicí 1 označen základní materiál, pod číslicí 2 tepelně ovlivněná oblast a pod číslicí 3 je svarový kov. Vtisky jsou v obrázku znázorněny malými kosočtverci.

Počet a rozmístění vtisků musí být dostatečné k určení oblasti se zvýšenou nebo sníženou tvrdostí, která vznikla díky svařování. Následující tab. 11 ukazuje doporučenou vzdálenost mezi středy vtisků v tepelně ovlivněné oblasti [34].

Tab. 11 - Doporučená vzdálenost  $L$  mezi středy vtisků v tepelně ovlivněné oblasti [34]

Značka tvrdosti	Doporučené vzdálenost mezi vtisky $L$ mm <sup>8</sup>	
	Železné kovy <sup>9</sup>	Hliník, měď a jejich slitiny
HV 5	0,7	2,5 až 5
HV 10	1	3 až 5
HB 1/2,5	Nepoužitelné	2,5 až 5
HBM 2,5/15,625	Nepoužitelné	3 až 5

V následujících obr. 68 - obr. 73 jsou zobrazeny příklady vtisků pro zjištění tvrdosti ve svařech oceli, které jsou v řadách a jejich vzdálenost od povrchu je zobrazena tak, aby bylo možno svarové spoje vyhodnotit [34]. Čáry v obrázcích znázorňují linie vtisků, jejich umístění od okrajů zkušebních tyčí a jejich počet podle typu svaru a tloušťky svařovaných materiálů.

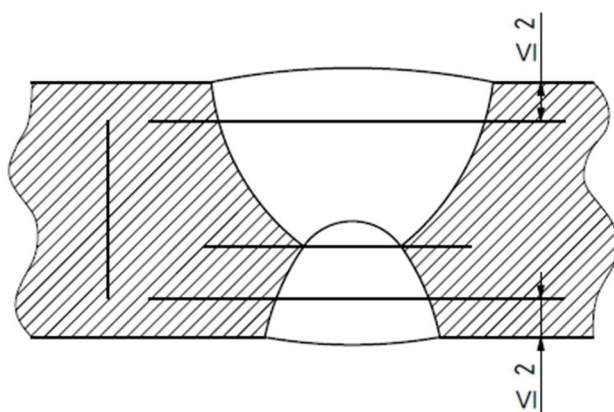


Obr. 68 - Jednostranný jedno – a vícehouseskový tupý svar [34]

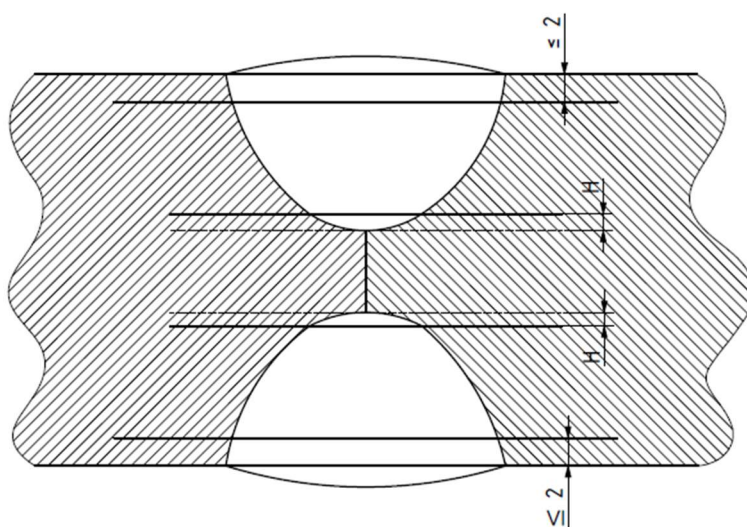
<sup>8</sup> Odstup kteréhokoliv vtisku od předchozího nesmí být menší než hodnota povolená normou ISO 6507-1 pro předchozí vtisk

<sup>9</sup> Kromě austenitických ocelí [34].

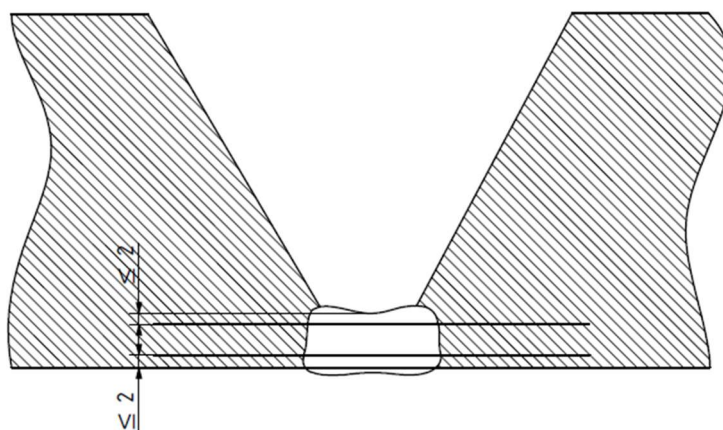




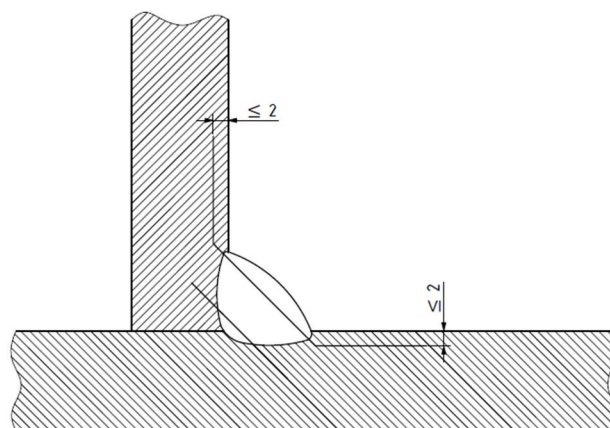
Obr. 69 - Oboustranný jedno – a vícehousekový svar [34]



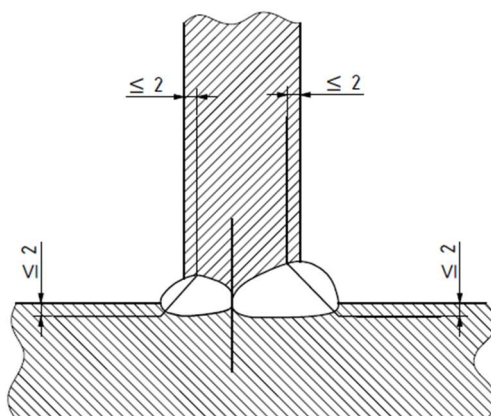
Obr. 70 - Částečně provařený oboustranný jedno – a vícehousekový tupý svar [34]



Obr. 71 - Hodnocení vytvrzování jednotlivých kořenových housenek [34]



Obr. 72 - Koutový svar [34]



Obr. 73 - Tupý T-svar [34]

Obr. 74 ukazuje, jak vtisky vypadají na reálné zkušební tyči a že jsou patrné i pouhým okem. Vtisky jsou vidět jako malé tečky především v okolí červených linií označených čísly 2 a 3.



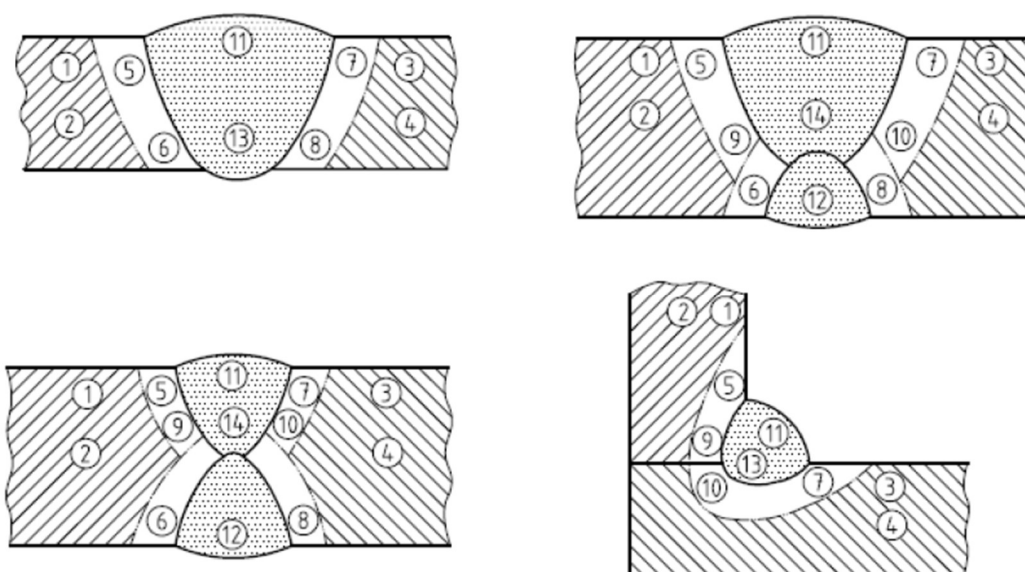
Obr. 74 - Ukázka zkušební tyče po zkoušce tvrdosti, kde jsou patrné vtisky

### 6.3.2 Jednotlivé vtisky

Jednotlivé vtisky jsou označovány značkou E. Jejich umístění je vyobrazeno na obr. 75. Čísla 1 až 4 označují vtisky umístěné v základním materiálu, který není nijak tepelně ovlivněn. Číslům 5 až 10 jsou označeny vtisky v tepelně ovlivněné oblasti a poslední skupinou jsou čísla 11 až 14, které jsou ve svarovém kovu.

Aby nedošlo k deformaci vlivem nejbližšího vtisku, je potřeba, aby minimální vzdálenost mezi středy jednotlivých vtisků byla menší než 2,5 násobek střední úhlopříčky/průměru nejbližšího sousedícího vtisku.

Pokud se testuje kov, u kterého vlivem svařování dochází ke zvýšení tvrdosti v tepelně ovlivněné oblasti, je potřeba udělat alespoň jeden vtisk ve vzdálenosti  $\leq 0,5$  mm mezi středem vtisku a linií natavení [34].



Obr. 75 - Příkladů zobrazení oblastí pro zkoušení tvrdosti jednotlivými vtisky (E) [34]



## 7 Makroskopická kontrola

Makroskopická kontrola svarů kovových materiálů je popsána v normě ČSN EN ISO 17639. Jedná se o zkoušku, která doplňuje zkoušky mechanické a slouží k ověření stavu makrostruktury a čistoty základního svařeného materiálu, tepelně ovlivněné oblasti a svarového kovu. Makroskopická kontrola musí dokázat, že navaření housenek a provaření svaru je bezchybné [3].

Makroskopická kontrola se provádí pomocí mikroskopu při malém zvětšení, a to menším než 50x, nebo prostým okem. Může se provádět v naleptaném i nenaleptaném stavu [35]. Díky naleptání je možné posuzovat např. kvalitu svaru, způsob kladení housenek, strukturu zrn, vměstky nebo precipitáty. Naleptáním se musí dosáhnout viditelnosti všech tří oblastí (základní materiál, tepelně ovlivněná oblast, svarový kov) a jejich hranic z jedné strany tyče, která je ze zkušební vzorku odebrána příčným řezem. Naleptání a příprava zkušební tyče musí být právě podle normy ČSN EN ISO 17639 [1].

Stupeň jakosti se určuje podle normy ČSN EN ISO 5817 a musí odpovídat stupni B. Stupně přípustnosti vad pro kontrolu makrostruktury jsou popsány i v normě ČSN EN ISO 15614-1.

V praxi se tyče pro kontrolu makrostruktury označují velkým písmenem A. Ke značení tyčí se přidává i to, zda je leptaný či nikoliv. Leptané tyče mají v označení velké písmeno E a nenaleptané U [3; 35].

### 7.1 Příprava zkušebních tyčí

Operace, které se používají pro přípravu zkušebních tyčí, jsou řezání, zalití (pouze u malých svarů), broušení, leštění a leptání.

Leptání se provádí nejčastěji třemi způsoby, a to ponořením zkušební tyče do leptadla, potíráním povrchu zkušební tyče nebo elektrolytickým leptáním. Po leptání se tyče musí umýt vodou a vysušit. Jako leptadlo se používá např. lučavka královská ( $\text{HNO}_3 + 3\text{HCl}$ ) nebo nital (roztok  $\text{HNO}_3$  v ethanolu). Lučavka královská je vhodná pro korozivzdorné oceli a nital pro oceli uhlíkové [35].

### 7.2 Hodnocení vad

V následující tab. 12 jsou uvedeny všechny vady, které se objevují z kontroly makrostruktury s naleptáním, ale i bez něj.

Tab. 12 - Návod k hodnocení znaků při makroskopických kontrolách [35]

Charakteristické znaky	Vady podle ISO 6520-1	Bez leptání	S naleptáním
Trhliny za tepla	100	X	X
Trhliny za studena	100	X	X
Lamelární praskání	100	X	X
Dutiny	200	X	X
Vměstky	300	X	X

Studený spoj/neprůvar	400	X	X
Geometrický tvar	500	X	X
Tepelně ovlivněná oblast	/	/	X
Housenky a vrstvy	/	/	X
Tuhý roztok	/	/	X
Příprava spoje	/	(X)	X
Směr válcování/protlačování	/	/	X
Směr vláknité struktury (zrna)	/	/	X
Segregace	/	/	X
Oprava a neshoda	/	(X)	X
Mechanické/tepelné ovlivnění	/	/	X

X v tabulce znamená, že charakteristické znaky byly zjištěny a (X) zase že charakteristické znaky mohou nebo nemusí být zjištěny [35].

### 7.3 Příklad zkušební tyče

Na obr. 76 je zkušební tyč pro kontrolu makrostruktury. Jedná se o materiál S355J2H, což je nelegovaná jakostní ocel používaná pro konstrukce.



Obr. 76 - Zkušební tyč pro makroskopickou kontrolu [36]

## 8 Korozní zkouška

Zkouška ČSN EN ISO 3651-2 pojednává o stanovení odolnosti korozivzdorných ocelí vůči mezikrystalové korozi, což znamená vůči korozi po hranicích zrn. Konkrétně se jedná o korozní zkoušku v prostředí, které obsahuje kyselinu sírovou a platí pro feritické, austenitické a feriticko-austenitické oceli.

Obecně jsou nejznámější dva typy korozní zkoušky. První korozní zkouška je podle Strausse. Provádí se v prostředí mědi a tyč je umístěna do vroucího vodného roztoku kyseliny sírové ( $H_2SO_4$ ) a síranu měďnatého ( $CuSO_4$ ). Druhým typem je zkouška podle Hyue, při které je zkušební tyč ponořena do vroucí kyseliny dusičné ( $HNO_3$ ) o koncentraci 65 %. Norma ČSN EN ISO 3651-2 řeší pouze zkoušky v prostředí s kyselinou sírovou.

Účelem zkoušky je ověřit vlastnosti odolnosti oceli vůči mezikrystalové korozi. Je vhodná pro nízkouhlíkové oceli, které mají obsah uhlíku menší nebo roven 0,03 % a pro stabilizované oceli, které jsou určeny jako odolné vůči mezikrystalové korozi. Materiály jsou zkoušeny po nějakém tepelném procesu, což je např. svařování a tepelné zpracování, které u materiálů způsobuje zcitlivění [3; 37].

### 8.1 Zcitlivění

Tepelné zpracování způsobuje zcitlivění u stabilizovaných ocelí a ocelí s nízkým obsahem uhlíku. Přesněji se tento způsob používá na austenitické a dvoufázové oceli. Ohřev zkušební tyče při tepelném zpracování může být buď na  $700\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$ , kdy po 30 minutách následuje ochlazení vodou. Druhý způsob je ohřev na  $650\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$  a po 10 minutách ochlazení vodou.

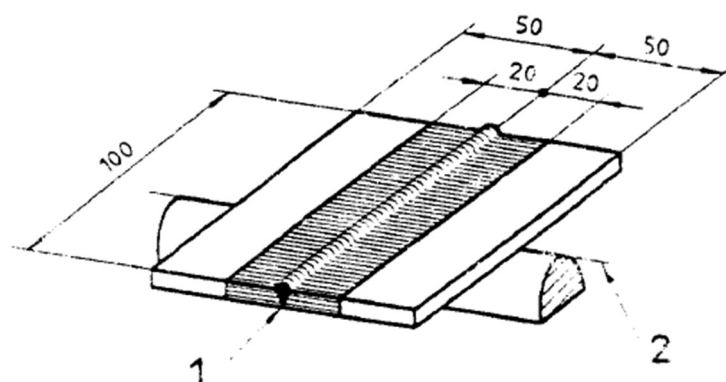
Při zcitlivění pomocí svařování je nutnost, aby byly tyče zkoušené ve stavu dosaženém po svařování. Nesmí dojít k žádnému dodatečnému zcitlivění tepelným zpracováním. Zcitlivění svařováním se vztahuje na všechny korozivzdorné oceli pokryté normou ČSN EN ISO 3651 [37].

Zcitlivění znamená, že se karbidy chromu ( $Cr_7C_3$  nebo  $Cr_{23}C_6$ ) vyloučí na hranice zrn a tím dojde k ochuzení sousedních oblastí o chrom. Tyto oblasti tím ztrácí odolnost vůči korozi. Aby k tomu nedošlo, tak se oceli často obohacují o prvky jako je titan nebo niob, které uhlík vážou lépe než chrom a tím zabrání jeho úniku na hranice zrn. Takové oceli jsou nazývané jako stabilizované. Další možností, jak zamezit mezikrystalové korozi je limitovat obsah uhlíku v ocelích na 0,03 %. V tomto případě se jedná o oceli nízkouhlíkové korozivzdorné [38].

### 8.2 Příprava zkušebních vzorků

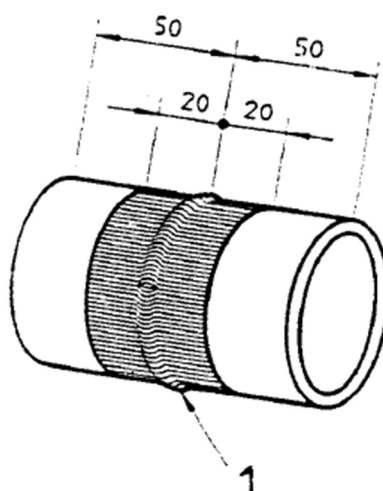
Zkušební vzorky se ze zkušebních kusů vyřezávají v závislosti na tvaru zkušební tyče a směru svarového spoje.

V případě rovinných výrobků jsou svařovány dva díly, které mají délku 100 mm a šířku 50 mm. Zkušební vzorek se z výrobku vyřezává podle obr. 77.



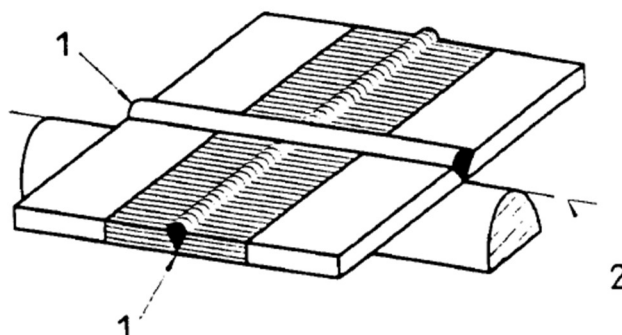
Obr. 77 - Zkušební vzorek rovinného výrobku s tupým svarem [37]

Obr. 78 znázorňuje odebrání zkušební vzorku z trubek, které mají obvodový svar.



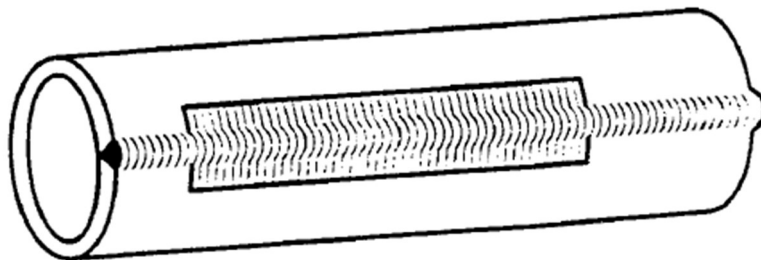
Obr. 78 - Zkušební vzorek trubky s tupým svarem [37]

Pokud se svařují čtyři díly, tak vzniká svar tzv. křížový, kdy první žebro svarového lemu musí být vždy v podélném směru zkušební vzorku, tak jak je vidět na obr. 79. V případě, že je tloušťka základního materiálu větší než 6 mm, vzorek je z jedné strany vždy zbroušen právě na 6 mm. Strana vzorku, která není zbroušená musí být po ohybu z vypuklé strany zkušební vzorku.



Obr. 79 - Zkušební vzorek rovinného výrobku s křížovým tupým svarem [37]

Z trubek, které mají vnější průměr větší než 60 mm se získávají vzorky s maximální délkou 50 mm a šířkou 20 mm. Odebraný vzorek je znázorněn na obr. 80. Pokud je vnější průměr svařovaných trubek do 60 mm, zkušební vzorek tvoří celý průřez trubky a podléhá zkoušce smáčknutím. V takovém případě se vnitřní povrchu trubek hodnotí metalograficky. Metalografické hodnocení mezikrystalové koroze se používá i v případech, kdy není možné odebrat vzorky pro zkoušku ohybem. Důvody pro nemožnost odebrání vzorku můžou být např. nedostatečný objem materiálu, koutový svar nebo tvarově komplikovaný svar.



Obr. 80 - Zkušební vzorek trubky s podélným svarem [37]

Veškeré zkušební vzorky je nutné zbavit okují, a to mechanickým broušením na celém povrchu vzorku. Ostré hrany se odstraňují brusným papírem či plátnem stupně 120 nebo jemnějšího. Během broušení nesmí v žádném případě dojít k přehřátí vzorků. Okuje se dají odstranit i chemicky. Zkušební vzorky se ponořují do roztoku složeného z padesáti objemových dílů kyseliny chlorovodíkové, pěti dílů kyseliny dusičné a padesáti dílů vody při teplotě 50 °C až 60 °C, nebo v roztok který obsahuje padesát objemových dílů kyseliny chlorovodíkové a padesát dílů vody při laboratorní teplotě a doby kratší než jedna hodina.

Než se vzorky umístí do korozního roztoku, musí být důkladně odmaštěny prostředkem, který neobsahuje chlor. Nakonec jsou vzorky opláchnuty a vysušeny [37].

### 8.3 Postup zkoušky

Jsou možné tři následující postupy zkoušky, které se liší v použití roztoku:

- 1) Zkouška v 16 % kyselině sírové/síranu měďnatém
- 2) Zkouška v 35 % kyselině sírové/síranu měďnatém
- 3) Zkouška ve 40 % kyselině sírové/síranu železitém

Všechny tři metody jsou platné pro korozivzdorné oceli, které jsou dodávány v podobě trub, odlitků nebo rovinných válcovaných či kovaných výrobků. Metody jsou určeny pro výrobky, které budou následně v mírně oxidačně působícím prostředí kyselin jako je kyselina sírová nebo kyselina fosforečná [37]. Ve firmě Škoda JS se používá pouze postup s 16 % kyselinou sírovou a síranem měďnatým a z toho bude tento postup v práci podrobněji popsán jako jediný.

#### 8.3.1 Zkouška v 16 % kyselině sírové a síranu měďnatém

Příprava roztoku se skládá z rozpuštění 100 g pentahydrátu síranu měďnatého ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$ ) v 700 ml destilované vody. Následně se přidá 184 g (=100 ml) kyseliny sírové a celý roztok se doplní do jednoho litru destilovanou vodou.

Pokud je objem roztoku nejméně  $8 \text{ ml} \cdot \text{cm}^{-2}$  celkové plochy, je možnost mít zkušební tyče v jedné baňce více než jednu. Zkušební tyče se ponořují do měděných pilin elektrotechnické čistoty. Množství mědi musí být  $50 \text{ g/l}$  roztoku. Musí se zajistit, aby zkušební tyče byly ve vodivém kontaktu s mědí, ale ne jeden s druhým. Následně jsou zkušební tyče umístěny do studeného zkušební roztoku, který je poté přiveden k varu. Začátek zkoušky je počítán od uvedení roztoku do varu. Roztok se ve varu udržuje po dobu  $20 \text{ h} \pm 5 \text{ h}$ .

Měď je možné po vyčištění v teplé tekoucí vodě použít znovu, ale korozní roztok slouží pouze na jedno použití [37].

#### 8.4 Zkouška ohybem po zkoušce korozní

Po vytažení zkušební tyče (válcované a rovinné tyče z tvářených výrobků) z korozního roztoku nastává vždy zkoušení ohybem. Úhel ohybu musí být nejméně  $90^\circ$  a poloměr trnu nesmí přesahovat tloušťku zkušební tyče. U výrobků, které jsou lité, platí, že poloměr trnu nesmí být větší než dvojnásobek tloušťky zkušební tyče.

Trubky, které mají vnější průměr do  $60 \text{ mm}$  jsou zkoušeny na smáčknutí. Dle následující rovnice (13) nesmí být vzdálenost po smáčknutí, měřená pod zatížením, větší než následující hodnota  $H$ :

$$H = \frac{1,09D \cdot t}{0,09D + t} \quad (13)$$

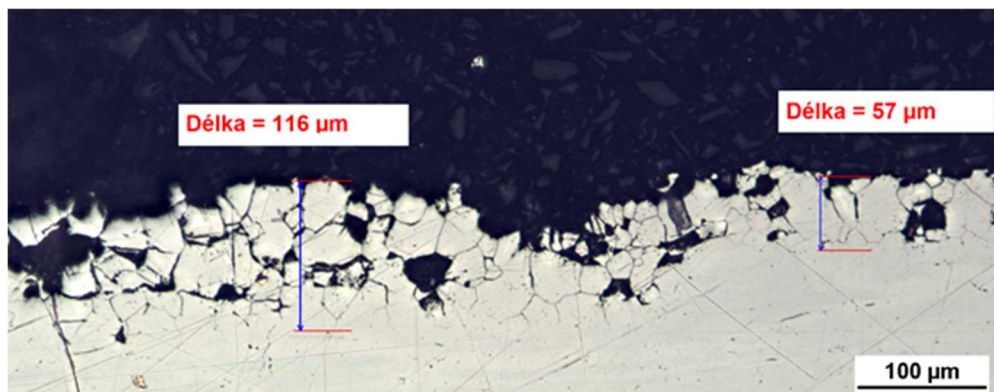
Hodnota  $H$  je v milimetrech.  $T$  je specifikovaná tloušťka stěny opět v milimetrech a  $D$  je vnější průměr trubky [37].

#### 8.5 Hodnocení korozní zkoušky

Zkušební tyč je po zkoušce ohybem sledována pod zvětšením asi  $10\times$  a tím se zjistí výskyt případného praskání. Neuvažuje se praskání vzniklé na hranách tyče. Stejně tak se neuvažuje vzhled deformačních čar, „pomerančové kůry“ nebo vrásek u povrchu, pokud se současně nevyskytují i trhliny či praskliny.

Pokud není jasné, zda praskliny či trhliny vznikly příčinou ohybu nebo mezikrystalové koroze, je potřeba zkoušet na ohyb ještě jednu zkušební, která nebyla vystavena korozní zkoušce. Následné srovnání obou tyčí umožňuje zjistit, zda byly vady důsledkem mezikrystalové koroze či nikoliv [37].

Obr. 81 ukazuje, jak vypadá mezikrystalová koroze pod zvětšením na mikroskopu.



Obr. 81 - Mezikrystalová koroze pod zvětšením na mikroskopu [39]





Obr. 82 - Viditelnost mezikystalové koroze pouhým okem

Na obr. 82 je vidět mezikystalová koroze. Na zkušební tyči úplně vlevo mezikystalová koroze není. Na druhé tyči jsou vidět malé prasklinky na jednom místě. Na tyči třetí je už koroze patrnější v celé ohýbané části. U tyče úplně vpravo je mezikystalová koroze nejzávažnější.

## 9 Závěr

Téma, o kterém celá bakalářská práce pojednává, zní „Vypracování studijního materiálu a příručky o provádění destruktivních zkoušek dle normy EN ISO 15614-1“. Celá práce v závislosti na zadání obsahuje pouze teoretickou část s konkrétními ukázkami, kdy jsou nejdříve přiblíženy destruktivní zkoušky právě dle normy ČSN EN ISO 15614-1 a následně jsou v jednotlivých kapitolách rozepsány konkrétní zkoušky podrobně. Zkoušky, na které se tato práce zaměřuje jsou používány ve firmě ŠKODA JS kromě zkoušky tahem za zvýšené teploty, která se provádí ve firmě Comtes FHT. Zkoušky byly prováděny a dokumentovány za mé přítomnosti, aby bylo docíleno konstruktivního a srozumitelného zápisu pro čtenáře.

Byla zde přiblížena a teoreticky popsána zkouška tahem, ohybem, rázem v ohybu metodou Charpy, dále zkouška tvrdosti a na konec makroskopická kontrola se zkouškou korozní. Byla snaha každou zkoušku stručně popsat a přiblížit jejich praktické provedení. Pořízené fotografie doprovázejí popsané zkoušky prováděné přímo ve firmě ŠKODA JS, což je velmi výhodné právě pro budoucí použití. Koncipování celé bakalářské práce bylo vedeno jejím hlavním účelem, a to je praktické využití v každodenním provozu ve firmě ŠKODA JS a cílem nahradit používání norem, které často bývá poměrně časově náročné. Dalo by se tak říci, že se celá tato práce snaží vybrat důležité informace ohledně výše zmíněných zkoušek z norem, zmínit praktické provedení a doplnit je obrázkovou ilustrací daných zkoušek přímo z prostředí ŠKODA JS.

Cílem bakalářské práce tedy bylo sepsat praktickou a funkční příručku pro pracovníka ve firmě ŠKODA JS, která při provádění zkoušek nahradí používání norem, a tím pádem ušetří čas a zpříjemní práci. Z pohledu splnění stanoveného cíle lze tuto práci považovat za úspěšnou. Dále její budoucí uplatnění je již v rukách firmy ŠKODA JS.



## Seznam použitých zdrojů

- [1] ČSN EN ISO 15614-1. *Stanovení a klasifikace postupů svařování kovových materiálů – Zkouška postupu svařování – Část 1: Obloukové a plamenové svařování ocelí a obloukové svařování niklu a slitin niklu*. Česká agentura pro standardizaci, listopad 2018, 48 s. Třídící znak 05 0313.
- [2] MATCA: *Zkouška tahem* [online]. Technická agentura České republiky [cit. 15.11.2022]. Dostupné z: <https://matca.cz/technologie/analyticke-metody/zkouska-tahem/>
- [3] PODHORA, Jiří. *Destruktivní zkoušení základních materiálů a svarových spojů*. 2. aktualizované vydání. Brno: Tesido, 2015. ISBN 80-903386-4-X.
- [4] ČSN EN ISO 4136. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Příčná zkouška tahem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013, 16 s. Třídící znak 05 1121.
- [5] SOBOTOVÁ, Jana a kolektiv. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. Praha: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [6] OPI. *Mechanické vlastnosti* [online]. In: 18-9-2006 [cit. 20.11.2022]. Dostupné z: [https://www.opi.zcu.cz/mechanicke\\_vlastnosti.pdf](https://www.opi.zcu.cz/mechanicke_vlastnosti.pdf)
- [7] SPSZENGROVA: *Tahová zkouška 2. část* [online]. In: 17-6-2014 [cit. 20.11.2022]. Dostupné z: [https://www.spszengrova.cz/wp-content/uploads/2020/04/KOM\\_3\\_8\\_SPU\\_tahova\\_zkouska\\_2.pdf](https://www.spszengrova.cz/wp-content/uploads/2020/04/KOM_3_8_SPU_tahova_zkouska_2.pdf)
- [8] MACHEK, Václav. *Kovové materiály 2: vlastnosti a zkoušení kovových materiálů*. 1. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05527-4.
- [9] LAMBDA GREEKS. *Jak zjistit mez kluzu z křivky napětí a deformace* [online]. [cit. 7.5.2023]. Dostupné z: <https://cs.lambdageeks.com/how-to-find-stress-strain-curve/>
- [10] KOUKAL, Jaroslav; ZMYDLENÝ, Tomáš: *Svařování I*. Ostrava: VŠB Technická univerzita, 2005. ISBN 80-248-0870-6.
- [11] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály – Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Česká agentura pro standardizaci, 2021, 76 s. Třídící znak: 42 0310
- [12] MARTINÁK, Milan: *Kontrola a měření pro 3. ročník SPŠ strojních*, 1. vydání. Praha: SNTL, 1989. ISBN 80-03-00103-X.
- [13] SVÁŘECÍ KUKLA: *Vše o svaření a svařování* [online]. [cit. 29.1.2022]. Dostupné z: <https://www.svarecikukla.cz/blog/svarovani-svareni-vse-o-svareni/>
- [14] LANÍK, Ondřej: *Vliv tepleného zpracování na vlastnosti svarových spojů modifikované 9% Cr oceli* [bakalářská práce]. Technická univerzita Ostrava, 2014. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/94760029.pdf>
- [15] BEDNÁŘ, Radek: *Analýza vad svarů a jejich příčin při obloukovém svařování MAG* [bakalářská práce]. Technická univerzita v Liberci, 2015. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/17491/bakalářská+práce+Radek+Bednář.pdf?sequence=1>

- [16] VYCHOPEŇ, David: *Svařování – technologie, značení, výpočty* [bakalářská práce]. Vysoké technické učení v Brně, 2013. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=64480](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=64480)
- [17] KREISLOVÁ, Kateřina; GEIPLOVÁ, Hana Faj: *Defekty průvarů svaru a zjednodušení měření a kontroly*, Keyence [online]. 8-8-2019 [cit. 5-12-2022]. ISSN 1803-8433 Dostupné z: <https://www.keyence.eu/cscz/ss/products/microscope/vhx-casestudy/automobile/weld-penetration-measurement.jsp>
- [18] RAYNOCH, Jindřich: *Svařování* [online]. In 30.9.2012 [cit. 20.1.2023]. Dostupné z: <https://www.spszengrova.cz/wp-content/uploads/2020/04/SVAŘOVÁNÍ-UT.pdf>
- [19] ČSN EN ISO 5178. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Podélná zkouška tahem svarového kovu tavných svarových spojů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020, 12 s. Třídící znak 05 1126.
- [20] ČSN EN ISO 6892-2. *Kovové materiály - Zkoušení tahem – Část 2: Zkušební metoda za zvýšené teploty*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2018, 24 s. Třídící znak 42 0310
- [21] UMFI: *Statické zkoušky krátkodobé* [online]. In 12-9-2011 [cit. 8-1-2023]. Dostupné z: [https://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM\\_09.pdf](https://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_09.pdf)
- [22] EUROLAB: *Ohybové a torzní zkoušky* [online]. [cit. 6-1-2023]. Dostupné z: <https://www.eurolab.com.tr/cs/testler/elektriksel-guvenlik-testleri/bukme-ve-burma-testi>
- [23] TECHNICKÁ UNIVERZITA LIBEREC – FAKULTA STROJNÍ: *Technologie plošného tváření – ohýbání* [online]. [cit. 9-1-2023]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/07.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/07.htm)
- [24] HLADKÝ: *Vlastnosti kovových materiálů a jejich zkoušení* [online]. In 24-3-2013 [cit. 8-1-2023]. Dostupné z: [https://katedry.pf.jcu.cz/kaft/wp-content/uploads/Ing\\_Hladky\\_4.pdf](https://katedry.pf.jcu.cz/kaft/wp-content/uploads/Ing_Hladky_4.pdf)
- [25] ČSN EN ISO 7438. *Kovové materiály - zkouška ohybem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021, 20 s. Třídící znak 42 0401
- [26] ČSN EN ISO 5173. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkoušky ohybem*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1997, 24 s. Třídící znak 05 1124
- [27] ČSN EN ISO 148-1. *Kovové materiály - Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy - Část 1: Zkušební metoda*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017, 32 s. Třídící znak 42 0381
- [28] Spolky-csvts: *Metodika měření rázovou zkouškou* [online]. [cit. 7.5.2023]. Dostupné z: [http://www.spolky-csvts.cz/cms/sites/default/files/mpm\\_2410118\\_razova\\_zkouska.pdf](http://www.spolky-csvts.cz/cms/sites/default/files/mpm_2410118_razova_zkouska.pdf)
- [29] BÍLEK, Pavel: *Křehký a tvárný lom, lineární a elastoplastická lomová mechanika* [online]. [cit. 7.5.2023]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/3075432/>
- [30] ELUC: *Zkouška rázem v ohybu* [online]. [cit. 10-2-2023]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1567>

- [31] ČSN EN ISO 9016. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkouška rázem v ohybu*, Česká agentura pro standardizaci, 2022, 16 s. Třídící znak 05 1125
- [32] KUHN, Howard, MEDLIN, Dana: *ASM Handbook 8, Mechanical testing and evaluation*. 2002. ISBN 0-87170-389-0.
- [33] TESTSYSTEME: *Zkoušení tvrdosti svarových spojů* [online]. [cit. 27-2-2023]. Dostupné z: <https://www.testsysteme.cz/zkouseni-tvrdosti-svarovych-spoju>
- [34] ČSN EN ISO 9015-1. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkoušení tvrdosti – Část 1: Zkouška tvrdosti spojů svařených obloukovým svařováním*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011, 20 s. Třídící znak 05 1134
- [35] ČSN EN ISO 17639. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů*, 2022, 16 s. Třídící znak 05 1128
- [36] ŠKODA JS a.s. - *Zkušební tyč pro makroskopickou kontrolu* [fotografie]. Poskytnuto společností ŠKODA JS a.s.
- [37] ČSN EN ISO 3651-2. *Stanovení odolnosti korozivzdorných ocelí vůči mezikrytalové korozi*, 1999, 16 s, Třídící znak 03 8175
- [38] KONSTRUKCE: *Úvod do problematiky koroze a korozivzdorných materiálů* [online]. [cit. 29.3.2023]. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/uvod-do-problematiky-koroze-a-korozivzdornych-materialu/>
- [39] ŠKODA JS a.s. - *Mezikrytalová koroze pod zvětšením na mikroskopu* [fotografie]. Poskytnuto společností ŠKODA JS a.s
- [40] SVOBODA, Jaroslav: *Mechanika, pružnost pevnost* [online]. In 27-11-2013 [cit. 10.5.2023]. Dostupné z: [https://www.sokolska.cz/DUMy/SPS,%20MEC,%20CAD/VY\\_32\\_INOVACE\\_11-13.pdf](https://www.sokolska.cz/DUMy/SPS,%20MEC,%20CAD/VY_32_INOVACE_11-13.pdf)