



# Stanovení vlivu použité metody na výsledek zkoušky rázem v ohybu

## Bakalářská práce

*Studijní program:*

B0715A270008 Strojírenství

*Autor práce:*

**Roman Nebeský**

*Vedoucí práce:*

doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.  
Katedra strojírenské technologie

*Konzultant práce:*

Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.  
Katedra strojírenské technologie





## Zadání bakalářské práce

# Stanovení vlivu použité metody na výsledek zkoušky rázem v ohybu

*Jméno a příjmení:* **Roman Nebeský**  
*Osobní číslo:* S20000304  
*Studijní program:* B0715A270008 Strojírenství  
*Zadávající katedra:* Katedra strojírenské technologie  
*Akademický rok:* **2020/2021**

### Zásady pro vypracování:

1. Základní rozdělení statických a dynamických mechanických zkoušek kovů
2. Vliv teploty na mechanické vlastnosti testovaných materiálů
3. Pro zvolený materiál provést instrumentovanou a neinstrumentovanou zkoušku rázem v ohybu s ohledem na teplotu provádění testu
4. Statistické vyhodnocení experimentu
5. Závěr

*Rozsah grafických prací:*  
*Rozsah pracovní zprávy:*  
*Forma zpracování práce:*  
*Jazyk práce:*

tabulky, grafy  
cca 30  
tištěná/elektronická  
Čeština



### **Seznam odborné literatury:**

- [1] ASM HANDBOOK. Volume 8 –Mechanical Testing and Evaluation. 10th ed. Materials Park: ASM International, 2000. s. 998. ISBN 0-87170-389-0.
- [2] PÓHLANDT, K. Materials Testing for the Metal Forming Industry. Berlin: Springer-Verlag, 1989. s. 226. ISBN 3-540-50651-9.
- [3] VELES, P. Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov. Bratislava: ALFA, 1985. s. 401. ISBN: 063-552-89.
- [4] ASM HANDBOOK. Volume 14 –Forming and Forging. 6th ed. Materials Park: ASM International, 2004. s. 978. ISBN 0-87170-020-4.
- [5] ČSN EN ISO 6892-1. Kovové materiály –Zkoušení tahem –Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. 64 s. Třídící znak 420310.
- [6] ČSN EN ISO 14556. Ocel –Zkouška rázem v ohybu na kyvadlovém kladivu tyčí Charpy s V-vrubem. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2001. 18 s. Třídící znak 420380.
- [7] ČSN EN ISO 148-1 Kovové materiály –Zkouška rázem v ohybu –Metoda Charpy. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005. 12 s. Třídící znak 420401.

*Vedoucí práce:* doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.  
Katedra strojírenské technologie

*Konzultant práce:* Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.  
Katedra strojírenské technologie

*Datum zadání práce:* 15. listopadu 2020

*Předpokládaný termín odevzdání:* 15. května 2022

L.S.

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.  
vedoucí katedry

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

6. června 2021

Roman Nebeský

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL. V tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval všem, kteří mi pomáhali při tvorbě této práce. Své rodině a svým přátelům, kteří mi byli oporou a cennými rádci při jakýchkoli problémech, které jsem při psaní této práce měl. Velký dík pak patří především panu doc. Ing. Pavlu Solfronkovi Ph.D. za jeho trpělivost, odborné vedení a cenné rady, bez kterých by tato práce nevznikla.

## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývá stanovením vlivu použité metody na výsledek zkoušky rázem v ohybu. Teoretická část obsahuje základní rozdělení statických a dynamických mechanických zkoušek kovů. V experimentální části byly vzájemně posuzovány výsledky testů rázem v ohybu prováděné metodou instrumentované a neinstrumentované zkoušky na kyvadlovém kladivu při použití vzorků s V-vrubem. Experimentální testy byly provedeny pro teploty -40 °C, -15°C a teplotě okolí. Pro zkušební testy byl zvolen materiál ocel S235JRG1. Na základě naměřených výsledků byla pomocí statistické metody analýzy rozptylu testována hypotéza o vlivu teploty a použité metodě měření na výsledek testu rázem v ohybu.

### **Klíčová slova:**

zkouška rázem v ohybu, mechanické zkoušky, Charpy, instrumentovaná metoda

## **Abstract**

The bachelor thesis deals with determining the influence of the method used on the result of the impact bending test. The theoretical part contains the basic division of static and dynamic mechanical tests of metals. In the experimental part, the results of impact tests in bending performed by instrumented and noninstrumented tests were mutually assessed on a pendulum hammer using samples with a V-notch. Experimental tests were demonstrated for temperatures of -40°C, -15° C and room temperature. Steel S235JRG1 was chosen for the tests. Based on the measured results, hypothesis about the effect of temperature and used measurement method on the result of the impact bending test were tested by using statistical methods of the variance analysis.

### **Key words:**

impact bending test, mechanical tests, Charpy, instrumented method

# Obsah

1	Úvod .....	12
2	Teoretická část .....	13
2.1	Mechanické zkoušky kovů.....	13
2.1.1	Zkoušky statické .....	13
2.1.1.1	Zkouška tahem .....	13
2.1.1.2	Zkouška tlakem .....	17
2.1.1.3	Zkouška ohybem .....	19
2.1.1.4	Zkouška stříhem (smykem) .....	20
2.1.1.5	Zkouška krutem.....	21
2.1.2	Zkoušky dynamické .....	22
2.1.2.1	Rázová zkouška tahem .....	23
2.1.2.2	Rázová zkouška tlakem .....	23
2.1.2.3	Zkoušky únavy .....	23
2.1.3	Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy .....	24
2.1.3.1	Instrumentovaná zkušební metoda zkoušky rázem v ohybu .....	28
2.2	Vliv teploty na mechanické vlastnosti materiálů.....	32
2.2.1	Tečení kovů při vysokých teplotách .....	33
2.2.2	Vliv teploty na nárazovou práci .....	33



3	Experimentální část.....	35
3.1	Zkoušený materiál.....	35
3.1.1	Příprava zkušebních vzorků.....	36
3.1.2	Teploty měření.....	37
3.2	Výsledky měření.....	38
3.2.1	Neinstrumentovaná metoda zkoušky rázem v ohybu .....	38
3.2.2	Instrumentovaná metoda zkoušky rázem v ohybu.....	40
3.3	Porovnání výsledných hodnot.....	46
3.4	Diskuze výsledků měření.....	50
4	Závěr.....	51
5	Seznam použité literatury .....	52

## Seznam zkratk a použitých symbolů

$R$	Smluvní napětí	[MPa]
$F$	Síla	[N]
$S_0$	Původní průřez	[mm <sup>2</sup> ]
$\varepsilon$	Poměrná deformace	[-]
$L_0$	Původní délka zkušební vzorku	[mm]
$L_u$	Konečná délka zkušební vzorku po přetržení	[mm]
$R_{eL}$	Dolní mez kluzu	[MPa]
$R_{eH}$	Horní mez kluzu	[MPa]
$R_m$	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
$A$	Tažnost	[%]
$Z$	Kontrakce	[%]
$S_u$	průřez v místě přetržení	[mm <sup>2</sup> ]
$R_{mt}$	Mez pevnosti v tlaku	[MPa]
$A_t$	Mezní poměrné stlačení	[%]
$h_0$	Původní šířka	[mm]
$h_u$	Konečná šířka	[mm]
$Z_t$	Mezní poměrné rozšíření	[%]
$R_o$	Pevnost v ohybu	[MPa]
$M_{o\max}$	Maximální ohybový moment	[N·m]
$W_o$	Průřezový modul v ohybu	[mm <sup>3</sup> ]
$y$	Průhyb	[mm]
$l$	Vzdálenost krajních podpor	[mm]
$E$	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
$J$	Modul setrvačnosti	[mm <sup>4</sup> ]
$R_{ms}$	Mez pevnosti ve stříhu	[MPa]
$F_{\max}$	Maximální síla	[N]
$d_1$	Průměr tyče	[mm]
$d$	Průměr průstřihu	[mm]
$e$	Tloušťka plechu	[mm]
$R_{mk}$	Mez pevnosti v krutu	[MPa]
$M_{k\max}$	Maximální krouticí moment	[N·m]

$W_k$	Průřezový modul v krutu	[mm <sup>3</sup> ]
$\varepsilon_k$	Zkrut	[rad/mm]
$\varphi$	Úhel zkrutu	[rad]
$c$	Délka tyče	[mm]
$\sigma_c$	Mez únavy	[MPa]
$\sigma_N$	Časová mez únavy	[MPa]
$K$	Absorbovaná energie	[J]
$KC$	Vrubová houževnatost	[J]
$v$	Rychlost břitu kladiva	[m·s <sup>-1</sup> ]
$v_0$	Rychlost břitu kladiva v okamžiku nárazu	[m·s <sup>-1</sup> ]
$m$	Hmotnost kyvadla kladiva	[kg]
$t$	čas	[s]
$t_0$	Čas v okamžiku počátku deformace zkušebního vzorku	[s]
$s$	Průhyb při zkoušce rázem v ohybu	[mm]
$g_n$	Tíhové zrychlení	[m·s <sup>-2</sup> ]
$h$	Výška zdvihu těžiště břitu kladiva	[m]
$F_{gy}$	Síla na mezi makroskopických deformací	[N]
$F_{iu}$	Velikost síly při iniciaci trhliny	[N]
$F_a$	Velikost síly při zastavení trhliny	[N]
$s_a$	Velikost průhybu odpovídající okamžiku zastavení trhliny	[mm]
$s_{gy}$	Velikost průhybu odpovídající okamžiku dosažení meze makroskopických deformací	[mm]
$s_{iu}$	Velikost průhybu odpovídající okamžiku iniciace trhliny	[mm]
$s_m$	Velikost průhybu odpovídající dosažení maxima síly	[mm]
$s_t$	Celkový průhyb	[mm]
$W_t$	Celková nárazová práce	[J]
$W_{iu}$	Práce odpovídající okamžiku iniciace trhliny	[J]
$W_m$	Práce do maxima síly	[J]
$W_a$	Práce odpovídající okamžiku zastavení trhliny	[J]
$T_t$	Tranzitní teplota	[°C]
$LE$	Podélné rozšíření	[mm]
$k$	Součinitel proporcionality	[-]

## 1 Úvod

Zkouška rázem v ohybu je jednou z nejpoužívanějších mechanických zkoušek kovů, díky které můžeme zjistit důležité informace o chování materiálu za dané teploty. Asi nejdůležitější zjišťovanou hodnotou je vrubová houževnatost, která udává citlivost materiálu vůči koncentraci napětí. Díky nástupu nových technologií je nyní možné kromě klasické metody zkoušky rázem v ohybu, použít její instrumentovanou metodu, díky které můžeme lépe posuzovat lomové chování materiálu. Tyto dvě metody mají však odlišný způsob měření hodnot, potřebné k výpočtu vrubové houževnatosti.

Na základě těchto skutečností se bakalářská práce zabývá zkoumáním, zda tyto dvě metody poskytují srovnatelné výsledky hodnot, navzdory odlišnému způsobu měření. Cílem této práce je porovnání a následná analýza vypočítaných hodnot za různých teplot pro instrumentovanou a neinstrumentovanou zkoušku rázem v ohybu, na základě které se vyhodnotí statistická významnost rozdílu naměřených hodnot.

## 2 Teoretická část

Teoretická část popisuje rozdělení základních mechanických zkoušek kovů a vliv teploty na mechanické vlastnosti zkoušených materiálů.

### 2.1 Mechanické zkoušky kovů

Mechanické vlastnosti charakterizují materiály za působení vnějších sil. Mechanickými zkouškami tyto vlastnosti dokážeme naměřit a rozhodnout, zda je materiál vhodný pro danou aplikaci. Většina mechanických zkoušek je normalizována a je možné je dělit do několika skupin. Pro přehledný popis zkoušek bylo zvoleno dělení podle časového průběhu zátěžné síly, a to na zkoušky statické a dynamické.[1]

#### 2.1.1 Zkoušky statické

Statické zkoušky vyhodnocují chování materiálu při působení stálých nebo pozvolna rostoucích sil. Zkušební těleso se zatěžuje obvykle jen jednou, pokud není stanoveno jinak. Zkouška ve většině případů končí porušením zkušebního tělesa. Patří sem zkoušky tahem, tlakem, ohybem, stříhem (smykem) a krutem. [3]

##### 2.1.1.1 Zkouška tahem

Nejrozšířenější statická zkouška, díky které můžeme zjistit velmi mnoho často používaných mechanických charakteristik kovu. Zkouška podléhá normě ČSN EN ISO 6892-1. [2]

Zkouška se provádí na univerzálním trhacím stroji opatřeném průtahoměrem a snímačem síly. Tvar a rozměry zkušebního tělesa jsou dány normou ČSN 42 0311. Zkušební těleso se nejprve pomocí klínů nebo různých čelistí upne do stroje a následně je namáháno v jedné ose plynule rostoucí tahovou silou až do přetržení. Podle normy ČSN EN ISO 6892-1 [14] se zkouška provádí za pokojové teploty od 10°C do 35°C, pokud není stanoveno jinak.

Zkušební stroj v průběhu zkoušky zaznamenává velikost působící síly a prodloužení vzorku. Tyto data se následně použijí pro výpočet smluvního napětí a poměrné deformace. Závislost těchto dvou veličin se následně zaznamená v takzvaném smluvním diagramu (obrázek 1). Smluvní napětí

je vždy o něco menší než skutečné, protože nezahrnuje změnu průřezu, jak lze vidět ve vztahu 1. [5]  
[6]

$$R = \frac{F}{S_0} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{L-L_0}{L_0} \quad (2)$$

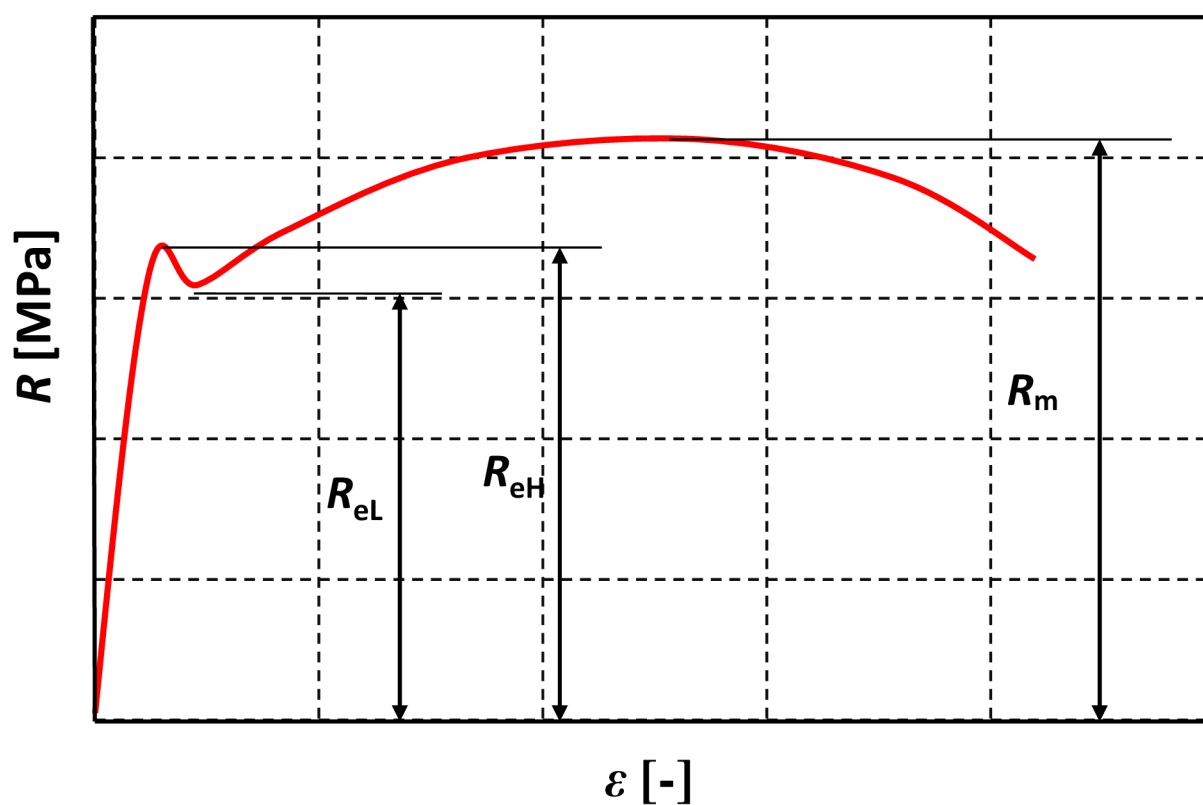
kde:  $S_0$  - počáteční průřezová plocha zkoušené délky [mm<sup>2</sup>]

$L$  - délka zkušebního tělesa [mm]

$L_0$  - počáteční měřená délka [mm]

$R$  - smluvní napětí [MPa]

$\varepsilon$  - poměrná deformace [-]



Obrázek 1: smluvní diagram zkoušky tahem s výraznou mezí kluzu

V první části diagramu je křivka lineární, platí zde Hookův zákon a deformace jsou zde pružné, takže pokud by v této fázi zatěžování přestalo na těleso působit silou, vrátilo by se do původního stavu. Lineární závislost platí až do meze úměrnosti, i po jejím překročení ale stále platí pružné deformace. Tento stav trvá až do meze pružnosti, po překročení této meze se začínají objevovat i deformace plastické. Krátce poté se zkušební vzorek dostává na mez kluzu. V tomto případě je mez kluzu výrazná, je zde vidět výrazné zvětšení deformace bez zvyšování napětí, které zde i dočasně poklesne. Nejvyšší hodnota napětí před prvním poklesem zatížení se nazývá horní mez kluzu, která se značí písmeny  $R_{eH}$ . Nejnižší napětí během plastického kluzu se nazývá dolní mez kluzu, značí se  $R_{eL}$ . Pokud by mez kluzu nebyla výrazná a nedošlo by k poklesu napětí, zavádí se smluvní mez kluzu, která je definována jako napětí, při kterém je plastické prodloužení rovno předepsanému procentu měřené délky průtahoměru  $L_e$  [14]. Obvykle se používá hodnota 0,2% a značí se v tomto případě  $R_{p0,2}$ . Při dalším zvyšování síly se napětí zvyšuje a zkušební tyč se prodlužuje, tento stav trvá do meze pevnosti, což je nejvyšší možné smluvní napětí, které se značí  $R_m$ . Za touto mezí se tyč dále prodlužuje, ale smluvní napětí klesá z důvodu vzniku takzvaného krčku, ve kterém dochází k velkému zmenšení průřezu a následně v něm dojde k přetržení vzorku. [5] [14].

Důležité charakteristiky popisující zkoušku tahem jsou následující:

**Tažnost** - poměrná podélná trvalá deformace po přetržení. [6]

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 \quad (3)$$

kde:  $A$  – tažnost [%]

$L_u$  – konečná délka zkušební vzorku po přetržení [mm]

**Kontrakce** - největší trvalé zúžení průměru, odměřené po přetržení v místě lomu. [6]

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 = \frac{\Delta S}{S_0} \cdot 100 \quad (4)$$

kde:  $Z$  – kontrakce [%]

$S_u$  - průřez v místě přetržení [mm<sup>2</sup>]

$\Delta S$  – změna průřezové plochy [mm<sup>2</sup>]

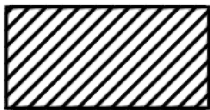
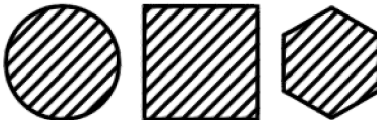
**Mez pevnosti v tahu** - Smluvní napětí, odpovídající největšímu zatížení, které předchází porušení zkušební vzorku. [6]

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (5)$$

kde:  $R_m$  – mez pevnosti v tahu [MPa]

$F_m$  - maximální zatížení [N]

Zkušební tělesa mají přímou závislost mezi měřenou délkou a počátečním průřezem, a to podle vzorce  $L_0 = k\sqrt{S_0}$ , kde  $k$ , je součinitel proporcionality. Hodnota je pro součinitel  $k$  mezinárodně 5,65. V případě menšího průřezu, nebo nepoměrného zkušební tělesa, se volí větší součinitel, aby se dosáhlo minimální měřené délky 15 mm, preferuje se v tomto případě hodnota  $k = 11,3$ . Měřená délka se volí pokud možno tak, aby byla větší než 20 mm, kvůli minimalizaci nejistot měření. Tělesa mohou být obrobená nebo neobrobená. U obrobených těles musí být mezi zkoušenou délkou a částmi, kde se upíná těleso do stroje, plynulý přechod. Počáteční měřená délka nesmí být větší než volná délka mezi čelistmi stroje. U neobrobených těles je potřeba zachovat volnou délku mezi čelistmi stroje, aby značky, vymezující měřenou délku byly od čelistí dostatečně daleko. Každé těleso se opatří značkami na každém konci měřené délky  $L_0$ , tyto značky nesmí nijak porušit materiál, jinak by došlo ke zkreslenému výsledku zkoušky. Hlavní druhy zkušebních těles jsou tenké plechy nebo tyče, které mají kruhový, čtvercový, nebo šestihranný průřez (obrázek 2). [14]

Typ výrobku		Odpovídající příloha	
Pásky – Plechy – Ploché výrobky	Dráty – Tyče – Profily		
			
Tloušťka $a$ [mm]	Průměr nebo strana [mm]		
$0,1 \leq a < 3$	–		B
–	$< 4$		C
$a \geq 3$	$\geq 4$	D	
Trubky		E	

Obrázek 2: Typy zkušebních vzorků u zkoušky tahem [14]



### 2.1.1.2 Zkouška tlakem

Tato zkouška se používá především u křehkých materiálů, jako je litina, beton nebo keramika. U kovů se používají v případech, kdy je kov namáhán pouze tlakem, například kompozice ložiska nebo litinové základové desky mostů. Zkušební těleso bývá většinou kruhového průřezu, u kompozitních materiálů mívají zkušební vzorky tvar krychle. Zkouška probíhá na trhacím stroji nebo na speciálním lisu, kde je možné dostatečně přesně měřit zatěžující sílu. Zkušební vzorek se vloží do příslušného stroje a začne se postupně zatěžovat v jedné ose tlakovou silou. Zkouška končí při vzniku prvních trhlin nebo velkou plastickou deformací materiálu. [2] [6] [8]

Diagram zkoušky vypadá podobně, jako u zkoušky tahem. Z důvodu jiného smyslu působení síly má opačnou orientaci.

Zjišťované hodnoty jsou:

**Mez pevnosti v tlaku** – Smluvní napětí, při kterém dojde k porušení zkušebního vzorku [6]

$$R_{mt} = \frac{F_{mt}}{S_0} \quad (6)$$

kde:  $R_{mt}$  – mez pevnosti v tlaku [MPa]

$F_{mt}$  – zatížení na mezi pevnosti [N]

$S_0$  - původní průřez [mm<sup>2</sup>]

### Mezní poměrné stlačení (tvárnost v tlaku)

$$A_t = \frac{\Delta h}{h_0} \cdot 100 = \frac{h_0 - h_u}{h_0} \cdot 100 \quad (7)$$

kde:  $A_t$  – mezní poměrné stlačení [%]  
 $\Delta h$  – stlačení [mm]  
 $h_0$  – původní výška [mm]  
 $h_u$  – výška na konci zkoušky [mm]

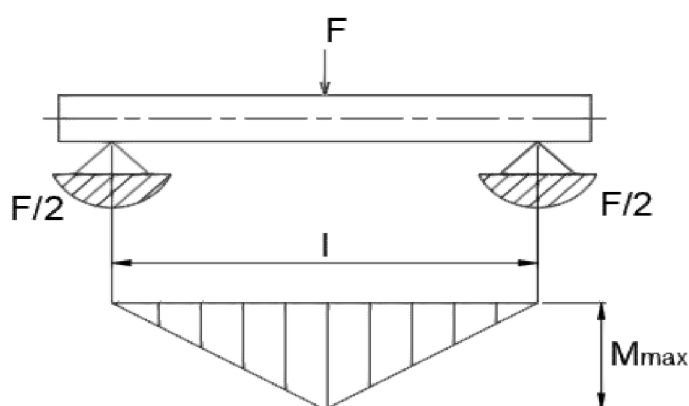
### Mezní poměrné rozšíření

$$Z_t = \frac{\Delta S}{S_0} \cdot 100 = \frac{S_u - S_0}{S_0} \cdot 100 \quad (8)$$

kde:  $Z_t$  – Mezní poměrné rozšíření [%]  
 $\Delta S$  – rozšíření [mm<sup>2</sup>]  
 $S_0$  – původní průřez [mm<sup>2</sup>]  
 $S_u$  – průřez na konci zkoušky [mm<sup>2</sup>]

### 2.1.1.3 Zkouška ohybem

Ohyb je kombinací tahového a tlakového namáhání [6]. Kvůli nerovnoměrnému rozdělení napětí má tato zkouška větší význam pro zjišťování technologických vlastností, než vlastností mechanických. Zkušební těleso bývá tyč kruhového, čtvercového, obdélníkového nebo polygonálního průřezu [15]. Zkouška se dá provést na universálním trhacím stroji, který má posuvné podpory, kvůli různým délkám zkušebních tyčí nebo na speciálních strojích, určeným výhradně pro tuto zkoušku [8]. Nejčastější způsoby ohybové zkoušky jsou buď trojbodovým, nebo čtyřbodovým symetrickým ohybem. V případě trojbodového ohybu je zkušební těleso na obou koncích podepřeno na podporách a uprostřed je namáháno osamělou silou, která vzorek ohýbá (obrázek. 3). Zkouška zpravidla končí zlomením vzorku nebo dosažením daného úhlu. Tato zkouška podléhá normě ČSN EN ISO 7438. [9]



Obrázek 3: Zkouška třibodovým ohybem

U houževnatých kovů se tato zkouška příliš nepoužívá a to z důvodu, že po překročení meze pružnosti se materiál začne ohýbat, aniž by došlo k jeho porušení a nedosáhne mezi pevnosti. Používá se nejčastěji k ověření vlastností svarových nebo nýtovaných spojů. Větší význam má tato zkouška u křehkých materiálů, jako jsou například litiny, kdy se materiál začne lámat už při malém průhybu. Cílem zkoušky je zjištění pevnosti v ohybu a průhybu, který bývá považován za měřítko houževnatosti, ačkoli na velikost průhybu má vliv mnoho dalších okolností. [6] [8]

$$R_o = \frac{M_{o\max}}{W_o} \quad (9)$$

$$y = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot J} \quad (10)$$

kde:

$R_o$  – pevnost v ohybu [MPa]

$M_{o\max}$  – maximální ohybový moment [Nm]

$W_o$  – průřezový modul v ohybu [mm<sup>3</sup>]

$y$  – průhyb [mm]

$F$  – působící síla [N]

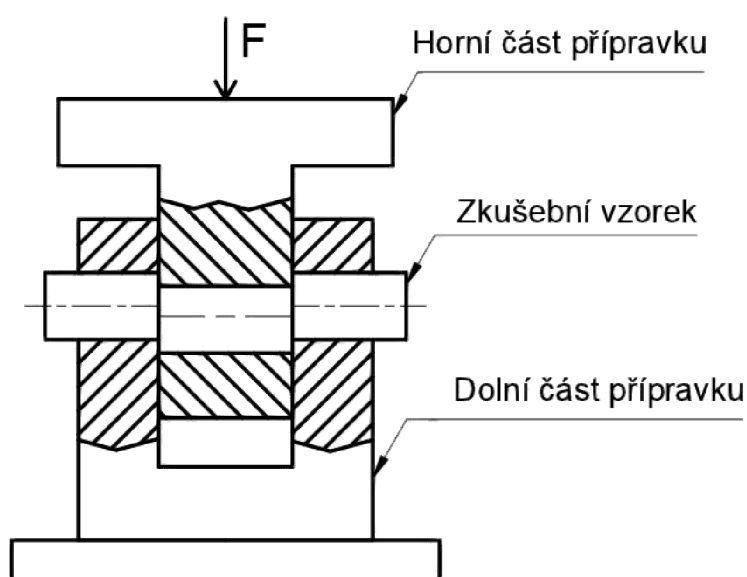
$l$  – vzdálenost krajních podpor [mm]

$E$  – modul pružnosti v tahu [MPa]

$J$  – moment setrvačnosti průřezu [mm<sup>4</sup>]

#### 2.1.1.4 Zkouška stříhem (smykem)

Podobně jako u zkoušky ohybem, má i tato zkouška větší význam pro posuzování vlastností technologických než mechanických. Touto zkouškou se zjišťuje většinou pouze pevnost ve stříhu, kterou je potřeba znát u materiálů pro spojovací součásti, jako jsou šrouby, nýty, kolíky, čepy ad. Kromě spojovacích materiálů se zkouší i plechy, kde se zjišťuje síla potřebná k jejich přestřížení nebo prostřížení děr. Zkouška podléhá normě ČSN 42 0342. [8] [9]



Obrázek 4: Schéma zkoušky stříhem

pro tyče: 
$$R_{ms} = \frac{F_{\max}}{2 \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2}{4}} \quad (11)$$

pro plechy: 
$$R_{ms} = \frac{F_{\max}}{\pi \cdot d \cdot e} \quad (12)$$

kde:  $R_{ms}$  – pevnost ve stříhu [MPa]

$d_1$  – průměr tyče [mm]

$d$  – průměr průstříhu [mm]

$e$  – tloušťka plechu [mm]

Zkouška probíhá vsunutím zkušební vzorku do přípravku, kde se vzorek namáhá ve dvou střížných rovinách, které se rovnají průřezu zkušební tyče, v případě plechů je střížná rovina rovna obvodu průstříhu vynásobená tloušťkou plechu. Zkouška se provádí na univerzálních trhacích strojích s příslušným vybavením. Tato zkouška se příliš neprovádí a to proto, že u většiny kovů se pevnost ve stříhu dá určit pomocí pevnosti v tahu:  $R_{ms} = (0,8 - 1,0)R_m$  [8]

#### 2.1.1.5 Zkouška krutem

Namáhání krutem je časté u hřídelů, vřeten nebo torzních tyčí. Touto zkouškou se mimo jiné určuje jakost drátů za studena. Zkušební vzorky bývají tyče kruhového průřezu. Zkouška se provádí na speciálních strojích, které mohou vyvodit krouticí moment. Na jednom konci se zkušební tyč vetkne a na druhém je zatěžována dvojicí krouticích momentů, které mají opačný smysl otáčení a působí kolmo na osu tyče. Účelem zkoušky je zjistit pevnost v krutu a zkrut. Zkouška je dána normou ČSN EN ISO 7438. [11] [8] [2]

$$R_{mk} = \frac{M_{k\max}}{W_k} \quad (13)$$

$$\varepsilon_k = \frac{\varphi}{c} \quad (14)$$

kde:  $R_{mk}$  – pevnost v krutu [MPa]

$M_{k\max}$  – maximální krouticí moment [Nm]

$W_k$  – průřezový modul v krutu [ $\text{mm}^3$ ]

$\varepsilon_k$  – zkrut [ $\text{rad/mm}$ ]

$\varphi$  – úhel zkroucení [ $\text{rad}$ ]

$c$  – délka tyče [ $\text{mm}$ ]

### 2.1.2 Zkoušky dynamické

Dynamické zkoušky se vyznačují rychlým zatěžováním, které se mění buď rázem, nebo opakovaně v určitých cyklech. Při dynamickém namáhání dochází často k porušení soudržnosti materiálu, i když zatěžující síla zdaleka nedosahuje velikosti síly odpovídající statické pevnosti. Tyto zkoušky můžeme dělit na zkoušky rázové a zkoušky únavové. Mezi rázové zkoušky patří zkouška rázem v ohybu metodou Charpy, která je podrobněji popsána v samostatné kapitole. [13]

### 2.1.2.1 Rázová zkouška tahem

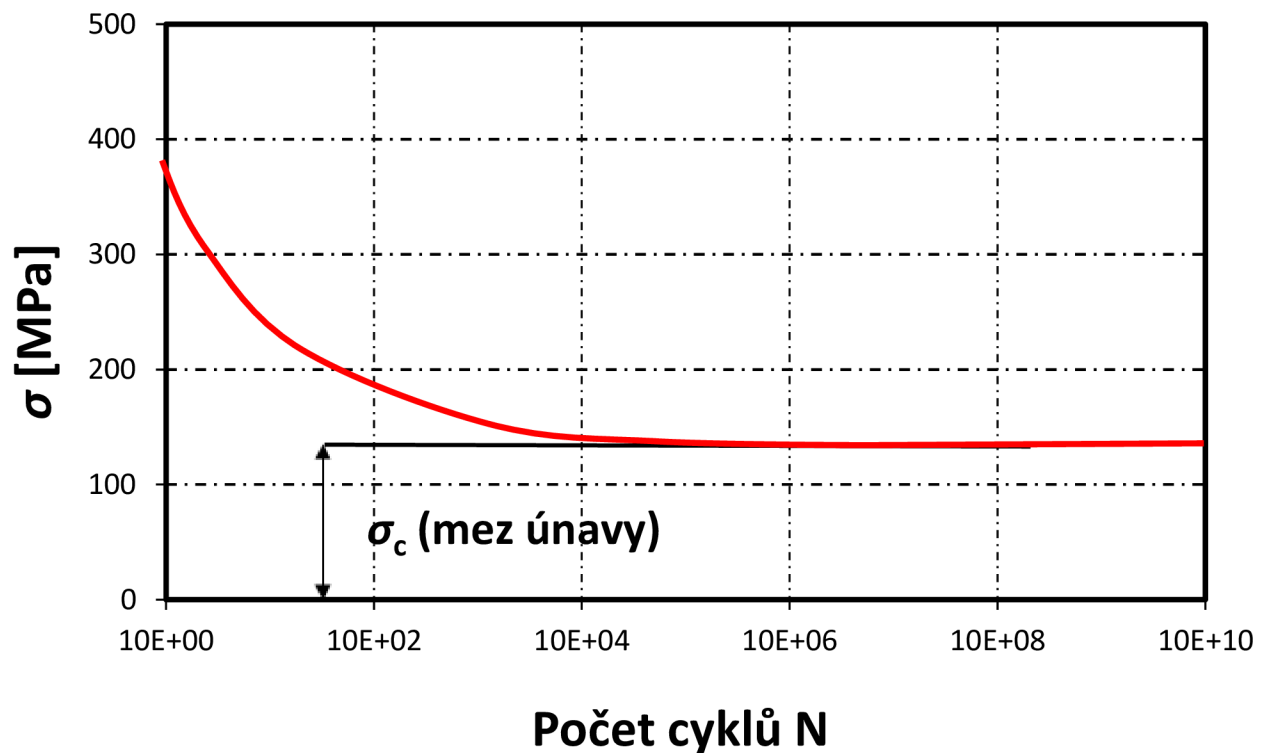
Deformace zkušebních těles u této zkoušky je velmi podobná statické zkoušce tahem. Z práce, spotřebované na přetržení vzorku, se vypočítá houževnatost. V současné době je tato zkouška velmi žádaná zejména pro modelování Crash testů. [12]

### 2.1.2.2 Rázová zkouška tlakem

Tato zkouška se provádí podobně, jako statická zkouška tlakem, rozdíl je v zatěžující síle, která je v tomto případě rázová. Zkouška spočívá v nárazu tělesa do zkoušeného materiálu, který způsobí deformaci, v případě křehkého zkušebního materiálu dojde k rozdrčení. Zkouška je to velmi nepřesná a jediné uplatnění našla ve stanovení deformační práce při kování za tepla, kde je způsob deformace velmi podobný. [12]

### 2.1.2.3 Zkoušky únavy

Při opakovaném namáhání součásti dochází k tomu, že se materiál poruší dříve, než dosáhne mezi pevnosti. Zavádí se tedy zkoušky únavy, označované také jako zkoušky cyklickým namáháním, jejichž princip spočívá v dlouhodobém namáhání materiálu periodicky měnící se silou. Z těchto zkoušek se zjišťuje mezní napětí, které zkoušený materiál vydrží po nekonečný počet cyklů, toto napětí se nazývá mez únavy  $\sigma_c$ . Zkoušené materiály se namáhají buď kolmo na osu vzorku, nebo rovnoběžně s osou vzorku. Zkouška probíhá zatěžováním zkušebního vzorku namáháním, které se periodicky mění mezi dolní a horní hodnotou napětí. Závislost amplitudy těchto napětí a počtu cyklů se znázorní v takzvané Wöhlerově křivce (obr. 10). Pro lepší zobrazení bývá osa počtu cyklů v logaritmické stupnici. Pro reálné provedení zkoušky se místo nekonečného počtu cyklu, pro stanovení meze únavy, zvolil počet v řádu několika milionů cyklů. U ocelí a litin se udává  $10^7$  cyklů. U měkčích kovů, jako je například měď, se počet cyklů zvedá o jeden řád na  $10^8$ . Tato zkouška je časově velmi náročná, může trvat i několik tisíc hodin, a z toho důvodu je i velmi nákladná. [8] [12] [13]



Obrázek 5: Wöhlerova křivka [3]

Když je u výrobku známá jeho životnost v počtech cyklů, je možné zjistit časovou mez únavy  $\sigma_N$ , která je definovaná jako napětí, které vydrží daný počet cyklů. Díky menšímu počtu cyklů, lze zvýšit amplitudu napětí a podle toho použít méně kvalitní materiál, který je ekonomicky výhodnější. [13]

### 2.1.3 Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy

Nejpoužívanější rázová zkouška. Její princip spočívá v přeražení zkušební tělesa jedním úderem kyvadlového kladiva, v tomto případě se jedná o Charpyho kyvadlové kladivo. Zkouška se provádí dle normy ČSN ISO 148-1. Zkušební vzorky se opatřují vrubem, aby se zajistilo přeražení vzorku a také kvůli minimalizaci deformovaného objemu. V místě vrubu dojde ke koncentraci napětí a deformace tak nastává pouze v jeho okolí. Ve zkoušeném vzorku dochází k trojosému napětí, díky kterému vznikne lom a dojde k jeho přeražení. [13] [16]



Břit kladiva má přesně daný poloměr a to 2 mm nebo 8 mm. Zkušební těleso se dle normy uloží přímo proti opěrám kyvadlového kladiva a rovina souměrnosti vrubu musí ležet do 0,5 mm od středové roviny opěr. Kladivo musí udeřit vzorek v rovině souměrnosti vrubu a vrub musí být na opačné straně úderu. Z výsledků zkoušky dostáváme energii, která byla potřeba k přeražení vzorku. Tuto energii označujeme písmenem *K*. Podle toho, jaký vrub má zkušební těleso, doplníme za písmeno *K* buď písmeno *V* pro V-vrub, nebo písmeno *U* pro U-vrub. Dále se značení doplní o číselný index, který odpovídá poloměru použitého břitu kladiva. Například absorbovanou energii u vzorku s V-vrubem, přeraženého kladivem s poloměrem břitu 8 mm, bychom označili jako *KV*<sub>8</sub>. Pokud se nepodaří těleso přerazit a dojde k neúplnému lomu, lze i přesto zjištěnou nárazovou práci použít k vyhodnocení její průměrné hodnoty. Pro eliminaci odporů v ložisku a odporů vzduchu, se před zkouškou provádí kyv na prázdno a vynuluje se stupnice. Z absorbované energie a průřezu vzorku v místě vrubu se vypočítá podle vztahu 16 vrubová houževnatost, označovaná písmeny *KC* a obdobně jako u absorbované energie se doplní označení podle tvaru vrubu a použitého břitu kladiva. Vrubová houževnatost udává citlivost materiálu vůči napětí vyvolané dynamickým rázovým namáháním. [17] [13]

$$KC = \frac{K}{S_0} \quad (16)$$

kde: *KC* – Vrubová houževnatost [J·cm<sup>2</sup>]

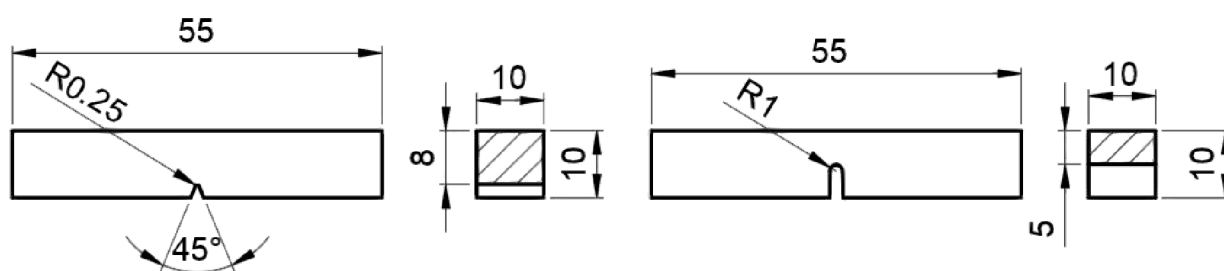
*K* – Absorbovaná energie [J]

*S*<sub>0</sub> – průřez zkušebního vzorku v místě vrubu [cm<sup>2</sup>]

Výsledek zkoušky je velmi závislý na teplotě, proto se musí být při měření pokud možno konstantní. Norma ČSN ISO 148-1 [16] udává, že zkouška musí být provedena při teplotě (23 ± 5) °C, pokud není stanoveno jinak. V případě, že se zkouška provádí za jiné teploty, nesmí mezi okamžikem, kdy je vzorek vyjmut z ohřivacího nebo chladícího média a okamžikem přeražení, uběhnout více než 5 vteřin a těleso musí být temperováno s přesností ±2 °C. Z tohoto důvodu se kromě zkušebních vzorků temperují také části zařízení, které jsou během přenosu se vzorkem v kontaktu. [16]

### Zkušební tělesa:

Těleso má předepsané rozměry 10 x 10 x 55 mm. Zkušební vzorek se uprostřed své délky opatří vrubem, který má buď tvar V, nebo U. Vrub musí být vyroben tak, aby na něm nebyly známky opracování, které by mohly ovlivnit výsledek zkoušky. Jedním ze způsobů vytvoření vrubu je na speciálním vrubovacím zařízení, které k tomu je přímo uzpůsobeno. V-vrub má úhel rozevření 45°, hloubku 2 mm a poloměr zaoblení dna vrubu 0,25 mm. U-vrub má hloubku 5 mm a poloměr zaoblení dna vrubu 1 mm. Pokud je zapotřebí nějakým způsobem zkušební vzorek označit, nesmí být označení v kontaktu s podporami, opěrami nebo břitem kladiva. Pokud se nějaká část označení nachází v deformované části zkušební tělesa, může se tím ovlivnit výsledek naměřených hodnot a je potřeba tuto okolnost zapsat do zkušebního protokolu.[13] [16]



Obrázek 6: Geometrie zkušebních vzorků pro zkoušku rázem v ohybu [16]

### Příčné rozšíření, vzhled lomu a zkušební protokol:

Měřítkem odolnosti materiálu proti lomu je kromě vrubové houževnatosti také rozsah deformace v místě lomu zkušební tělesa. V tomto místě dochází ke kontrakci, ta se ale poměrně obtížně měří, proto se místo kontrakce měří podélné rozšíření, ke kterému dochází na druhé straně roviny lomu a značí se písmeny *LE*. Plocha lomu není téměř nikdy stejná na obou stranách vzorku, proto se musí změřit obě strany vzorku zvlášť. K měření se používá například číselníkový úchylkoměr. Hodnotou příčného rozšíření je pak součet vyšších hodnot z obou zlomených polovin přeraženého vzorku.

Další posuzovanou charakteristikou je vzhled lomu, konkrétně je to poměr smykového a štěpného lomu. Hodnota vrubové houževnatosti je tím větší, čím vyšší procento zastoupení má na přeražené ploše smykový lom. Způsobů určování procenta smykového lomu je několik, zde jsou některé z nich:

- Změří se délka a šířka štěpné části lomové plochy a z příslušných tabulek se určí procento smykového lomu
- Lomovou plochu vyfotografovat a pomocí planimetru se změří procento štěpného lomu, ze kterého se následně dopočítá procento smykového lomu
- Vzhled lomu zkušební vzorku se porovná s mapou vzhledu lomů, kterou je možno nalézt v příslušné normě.

Je potřeba brát v potaz, že toto hodnocení je velmi subjektivní a výsledky dvou zkoušek, prováděné za stejných podmínek a ze stejného materiálu zkušebních vzorků, se od sebe mohou lišit. [16]

Výstupem zkoušky je pak zkušební protokol, který musí dle normy ČSN ISO 148-1 [16] obsahovat tyto údaje:

- odkaz na část normy ISO 148-1:2009;
- identifikaci zkušební tělesa;
- typ vrubu;
- velikost zkušební tělesa, pokud se liší od základní velikosti;
- kondicionovanou teplotu zkušební tělesa;
- příčnou hodnotu absorbované energie  $KV_2$ ,  $KV_8$ ,  $KU_2$  nebo  $KU_8$ ;
- jakékoliv abnormality, které mohou ovlivnit zkoušku;

Kromě těchto informací mohou být v protokolu i další nepovinné údaje, jako například hodnota příčného rozšíření, procentuální podíl smykového lomu v lomové ploše, nejistota měření a další.

### 2.1.3.1 Instrumentovaná zkušební metoda zkoušky rázem v ohybu

#### Princip zkoušky:

Tato metoda se používá, pokud je potřeba podrobněji znát lomové chování materiálu. Princip spočívá, dle normy ČSN EN ISO 14556 [18], v průběžném měření velikosti nárazové síly v závislosti na průhybu zkušebního tělesa, tím se získá graf těchto závislostí (obrázek 7). Zkouška se provádí v souladu s normou ISO 148-1 [16]. Zkušební těleso má, stejně jako u klasické rázové zkoušky ohybem, rozměry 50 x 10 x 10 mm a je opatřeno V-vrubem. Plocha pod křivkou, kterou získáme z měření, udává práci, která byla spotřebována při lomu zkušebního vzorku. Díky této křivce, můžeme graficky zkoumat proces lomu a přehledněji porovnávat chování různých materiálů nebo stejných materiálů za odlišných teplot. Avšak křivku síla – průhyb není možno použít v pevnostních výpočtech, protože z ní není možné přímo určit nejnižší dovolenou provozní teplotu materiálu [18] [13]

#### Zkušební stroj:

Pro získání závislosti síla-čas nebo síla-průhyb je potřeba mít k dispozici kyvadlové rázové kladivo v instrumentovaném provedení. Následně se provádí porovnání celkové nárazové práce  $W_t$  s absorbovanou energií  $KV$ . Pokud je rozdíl těchto hodnot větší než 5 J, může to indikovat špatné seřízení stroje, doporučuje se zkontrolovat zejména tření stroje, kalibraci měřícího systému nebo použitý software.

#### Kalibrace a měření hodnot síly a průhybu:

Kalibrace probíhá dle normy ČSN EN ISO 14556 [18] následovně, síla působí na břit kladiva přes zátěžný rám vybavený kalibrovaným měřidlem síly, za použití speciálního podpěrného bloku, který musí mít vysokou tuhost a jeho parametry musí být v souladu se zkušebním tělesem Charpy s V-vrubem. Podmínky dotyku jsou pokud možno stejné jako u prováděné zkoušky a musí měřit reprodukovatelné výsledky. Doporučený kalibrační interval je 12 měsíců nebo pokaždé, když jsou na stroji prováděny nějaké opravy, montážní práce nebo změny nastavení.

Síla se měří pomocí dvou aktivních elektrických odporových tenzometrů, které se připevní k břitu kladiva tak, aby vytvořili snímač síly. Pokud je splněna požadovaná výkonnost, můžeme použít i jiný způsob instrumentace snímače síly. Instrumentace břitu by měla být uspořádána

takovým způsobem, aby splnila požadovaný nominální silový rozsah, který se obvykle pohybuje v rozmezí od 10 kN do 40 kN.

Průhyb se určuje pomocí závislostní křivky síla-čas, která je úměrná charakteristice zrychlení a vypočítá se pomocí dvojnásobné numerické integrace.

$$v(t) = v_0 - \frac{1}{m} \int_{t_0}^t F(t) dt \quad (17)$$

$$s(t) = \int_{t_0}^t v(t) dt \quad (18)$$

kde:  $v(t)$  - rychlost břitu kladiva v závislosti na čase  $t$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$v_0$  - rychlost břitu kladiva v okamžiku nárazu [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$m$  - hmotnost kyvadla kladiva [kg]

$F(t)$  - síla v závislosti na čase  $t$  [N]

$t$  - čas [s]

$t_0$  - čas v okamžiku počátku deformace zkušební tělesa [s]

$s(t)$  - průhyb v závislosti na čase  $t$  [mm]

Dalším způsobem měření průhybu je pomocí bezkontaktního měření posuvu břitu vzhledem k podporám použitím optických, indukčních nebo kapacitních metod. Přenosové charakteristiky signálu systému měření průhybu musí být stejné jako u systému měření síly, aby je bylo možné synchronizovat. Systém pro měření průhybu musí být konstruován pro hodnoty do 30 mm. V případě určování průhybu v intervalu od 0 do 1 mm je použit vztah 20.

$$v_0 = \sqrt{2g_n h} \quad (19)$$

$$s = v_0(t - t_0) \quad (20)$$

kde:  $s$  – průhyb [mm]

$g_n$  – tíhové zrychlení [ $m \cdot s^{-2}$ ]

$h$  – výška zdvihu těžiště břitu kladiva [m]

### Vyhodnocení křivky síla-průhyb:

Typ křivky síla-průhyb se určí porovnáním se schematickými ukázkami, které je možno nalézt v příslušné normě. Dle těchto ukázek dochází ke třem případům šíření trhliny, pouze nestabilní, stabilní i nestabilní a pouze stabilní. Podmínkou pro vyhodnocení je zřetelné dosažení meze makroskopických deformací  $F_{gy}$ . Pokud nelze křivku označit jako jeden z těchto případů, je nutné do zkušebního protokolu zaznamenat vyobrazení této křivky. [18]

### Určení charakteristických hodnot síly, deformace a nárazové práce:

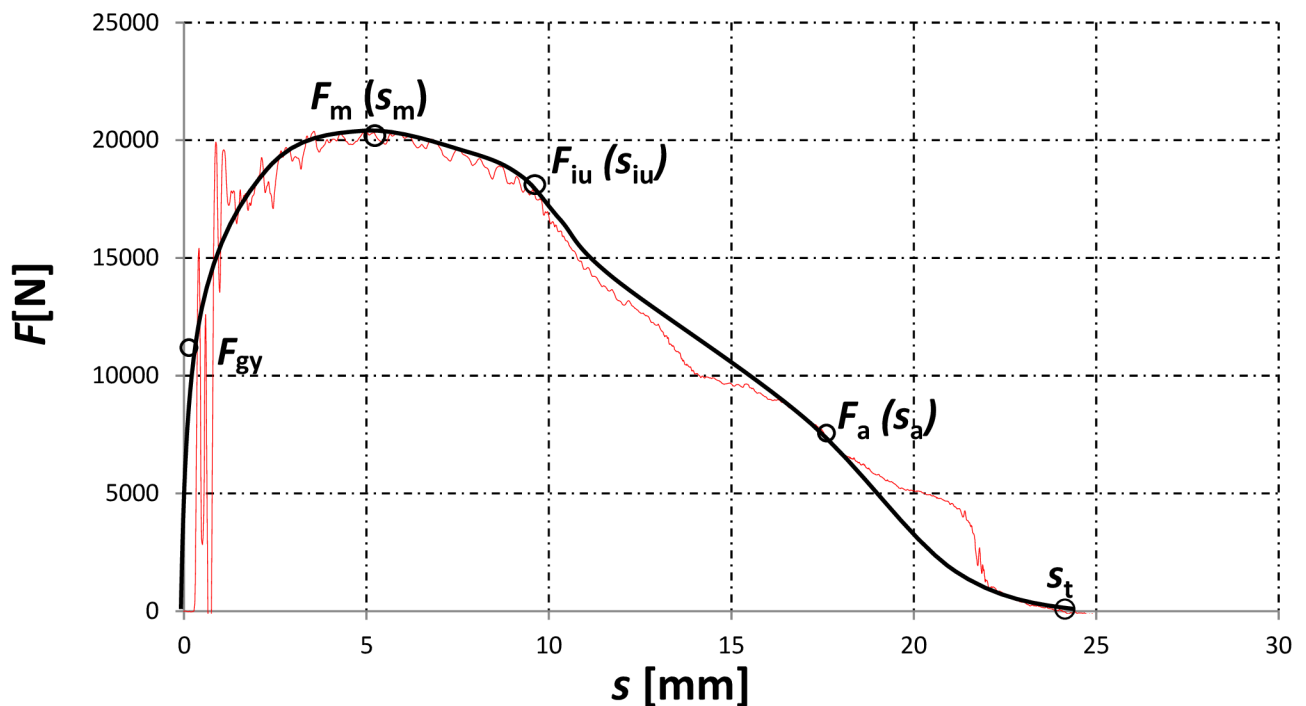
Charakteristické hodnoty se podle normy ČSN EN ISO 14556 [18] určují následovně. Síla  $F_{gy}$  se určí jako průsečík vzrůstající části, předcházející druhému vrcholu křivky a křivky následující po počátku kluzu celého ligamentu. Síla  $F_m$  se určí jako maximální hodnota na křivce proložené oscilacemi. Síla  $F_{iu}$  se nachází v průsečíku křivky proložené oscilacemi a prudce klesající částí křivky a síla  $F_a$  se určí z průsečíku prudce klesající křivky a křivky proložené oscilacemi v následné části křivky. Velikosti průhybů jsou na ose úseček pro příslušné hodnoty charakteristických sil. Celkový průhyb se určuje pouze v případě, že během zkoušky došlo k úplnému přeražení zkušební vzorku. Charakteristické hodnoty nárazové práce se určí vypočtením plochy pod křivkou pro určité intervaly průhybu.

$W_m$  pro interval od  $s = 0$  do  $s = s_m$

$W_{iu}$  pro interval od  $s = 0$  do  $s = s_{iu}$

$W_a$  pro interval od  $s = 0$  do  $s = s_a$

$W_t$  pro interval od  $s = 0$  do  $s = s_t$



Obrázek 7: Křivka síla-průhyb instrumentované zkoušky rázem v ohybu

### Zkušební protokol:

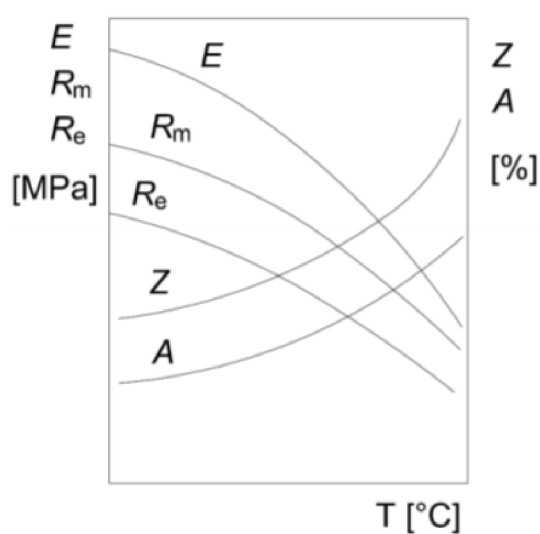
Dle normy se musí do protokolu zaznamenat tyto údaje:

- odkaz na normu ISO 14556;
- rozměry zkušebního tělesa;
- identifikace zkušebního tělesa;
- místo a směr odběru vzorku;
- poloměr břitu;
- identifikace a nominální energie zkušebního stroje;
- zkušební teplota ve stupních Celsia;
- skutečná absorbovaná energie  $KV$  v Joulech;
- typ křivky síla průhyb v souladu s normou;
- charakteristické hodnoty síly, průhybu a nárazové práce v souladu s normou;
- vypočtenou hodnotu podílu tvárného lomu v lomové ploše společně s označením daného vztahu, pokud je to požadováno;

## 2.2 Vliv teploty na mechanické vlastnosti materiálů

Namáhání kovových materiálů se nemusí provádět pouze při pokojové teplotě, ale často při teplotách vyšších nebo nižších než pokojová teplota. Jelikož má teplota velký vliv na chování materiálu, používají se kromě klasických zkoušek materiálu i zkoušky za zvýšených nebo snížených teplot. Obecně platí, že při nízkých teplotách má materiál větší pevnost, ale je více křehký, u zvýšené teploty je to naopak. Za nízkých teplot se zvyšuje mez kluzu, ale klesá plasticita a houževnatost. Při vysokých teplotách má materiál lepší plastické vlastnosti kovů a lépe se tváří. Také se začíná vytrácet výrazná mez kluzu a při velmi vysokých teplotách může zmizet úplně.

Kromě meze kluzu se výrazně mění i další mechanické vlastnosti. Jejich změna v závislosti na teplotě je znázorněna na obrázku 8. Z obrázku je možno vypožorovat, že se stoupající teplotou klesají hodnoty modulu pružnosti, meze pevnosti a meze kluzu v tahu. Naopak se zvyšuje kontrakce a tažnost. Při zvýšené teplotě také nastává výrazné tečení materiálu, které je více popsáno v následující kapitole. [6]



Obrázek 8: Vliv teploty na mechanické vlastnosti kovů [6]

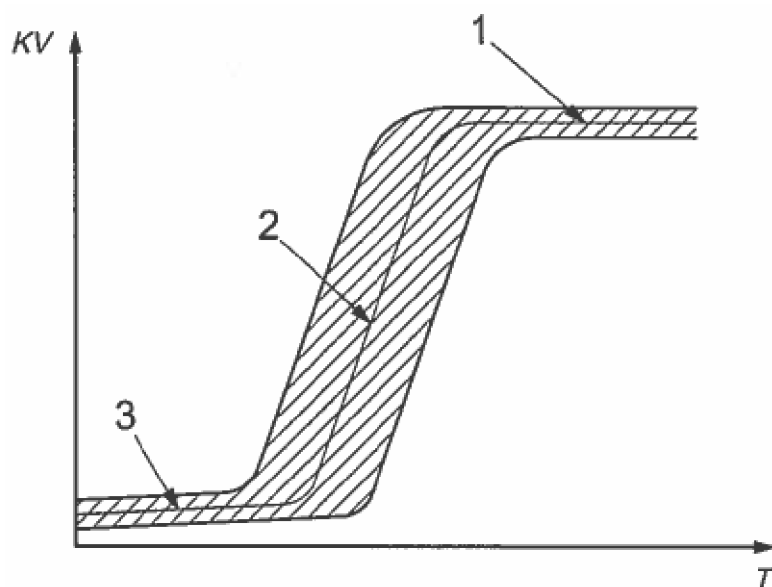


### 2.2.1 Tečení kovů při vysokých teplotách

Tečení materiálu, také označované jako creep, je pomalá plastická deformace materiálu způsobená dlouhodobým konstantním zatížením za stálé teploty. K tečení dochází při napětí, které je menší než mez kluzu za určité teploty, čím je vyšší, tím větší je rychlost tečení. Teplota, kdy nastává tečení se přibližně rovná poloviční teplotě tání daného kovu. Zkoušky tečení se provádí měřením prodloužení materiálu při konstantním zatížení, případně napětí, a stálé teploty. Zkušební vzorky se podobají vzorkům ze statické zkoušky tahem. Walla [6] uvádí, že pro zkoušku používáme tyče kruhového průřezu o průměru 5 mm s měřenou délkou 80 mm nebo tyče o průměru 5 mm a měřenou délkou 50 mm. Zkušební těleso se zahřeje na požadovanou teplotu, zajistí se její stálá hodnota a zatíží se konstantním zatížením. Zkouška končí přetržením materiálu nebo uplynutím stanoveného času od začátku zkoušky. Zkouškou se zjišťuje především mez pevnosti při tečení, což je napětí, které je potřebné pro přetržení vzorku za dané teploty, a mez tečení, která udává napětí potřebné pro dosažení dané deformace za určité teploty.

### 2.2.2 Vliv teploty na nárazovou práci

Teplota má zásadní vliv na výsledek rázové zkoušky v ohybu. S klesající teplotou klesá nárazová práce potřebná k přeražení vzorku a tím také vrubová houževnatost. Na obrázku 9, kde je znázorněna závislost absorbované energie na teplotě, je možno vidět oblast, kde míra absorbované energie velmi rychle stoupá a dochází ke změně charakteru lomu z křehkého na houževnatý. Tato přechodová oblast se charakterizuje jednou teplotou, která se označuje jako tranzitní nebo přechodová, značí se písmenem  $T_i$ . V této oblasti, z důvodu výskytu křehkého i houževnatého lomu, dochází k velkému rozptylu výsledků měření. Machek a Sodomka [4] ve své práci uvádí, že tranzitní teplota se určuje při dosažení absorbované energie  $KV = 27$  J. Dalším způsobem je stanovení teploty, kdy se u přeraženého vzorku vyskytuje z 50% křehký a z 50% houževnatý lom. Mimo tyto dvě metody určení tranzitní teploty, existují ještě další způsoby, například určením inflexního bodu přechodové křivky, vytvořené z naměřených hodnot nárazových prací pomocí metody nejmenších čtverců. [22] [16]



Obrázek 9: Teplotní závislost absorbované energie  
1) oblast horních prahových hodnot 2) přechodová oblast 3) oblast spodních prahových hodnot [16]

### 3 Experimentální část

Experimentální část bakalářské práce se zabývá vlivem použité metody na výsledek zkoušky rázem v ohybu. Postup práce se dá shrnout do následujících bodů:

- Příprava zkušebních vzorků pro následující měření.
- Provedení instrumentované a neinstrumentované zkoušky rázem v ohybu pro teploty RT,  $-15^{\circ}\text{C}$  a  $-40^{\circ}\text{C}$ .
- Zaznamenání naměřených hodnot a jejich závislosti na měřené teplotě.
- Porovnání vypočítaných hodnot vrubové houževnatosti a stanovení vlivu použité metody a teploty měření pomocí analýzy rozptylu.

#### 3.1 Zkoušený materiál

Jako materiál pro zkušební vzorky byla použita ocel S235JRG1 (ČSN 11 373), která se dá označit také čísly 1.0035. Jedná se o neušlechtilou konstrukční ocel se zaručenou svařitelností. Jako tepelné zpracování se používá normalizační žíhání při teplotě 900 až 930 °C. Používá se například pro plechy na strojní konstrukce, šrouby nýty, profilové materiály atd. Význam značení, chemické složení a mechanické a fyzikální vlastnosti jsou popsány níže.

Tabulka 1: chemické složení použité oceli

Příměs	Maximální množství [%]
C	0,170
P	0,045
S	0,045
Ni	0,007

Tabulka 2: Mechanické a fyzikální vlastnosti použité oceli

Mez pevnosti v tahu $R_m$ [MPa]	360 - 510
Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	min 235
Hustota $\rho$ [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	7850
Třída odpadu	001

Vysvětlení značení oceli S235JRG1:

S – oceli pro ocelové konstrukce

235 – stanovená minimální mez kluzu v MPa pro nejmenší rozsah tloušťky výrobku

JR – záruka nárazové práce 27J při teplotě 20°C

G – metoda uklidnění oceli, G1 – neuklidněná ocel

### 3.1.1 Příprava zkušebních vzorků

Výroba zkušebních vzorků byla provedena na pásové pile z čtvercové tyče o rozměrech 10x10, nařezáním na délku 55 mm, aby byly dodrženy rozměry, které udává norma. Celkem bylo vyrobeno přes 60 vzorků. Tyto vzorky byly následně dle normy ČSN EN ISO 148-1 na vrubovacím zařízení VRE od firmy LaborTech (obrázek 10) opatřeny V-vrubem a zbaveny případných otřepů.



Obrázek 10: Vrubovací zařízení VRE



Obrázek 11: Zkušební vzorky

### 3.1.2 Teploty měření

Měření probíhalo za 3 různých teplot, za pokojové teploty (značené jako RT), dále za teploty  $-15^{\circ}\text{C}$  a  $-40^{\circ}\text{C}$ , pro každou metodu a teplotu se měřilo 10 vzorků. Celkem tedy bylo provedeno 60 náměrů. Pro ochlazení vzorků na tyto teploty byla použita laboratorní mraznička ProfiMaster PMU 0450 (obrázek 12).



Obrázek 12: laboratorní mraznička ProfiMaster PMU 0450

### 3.2 Výsledky měření

Měření obou měřících metod se provádělo na instrumentovaném rázovém kladivu LabTest CHK 450J-I od firmy LaborTech.



Obrázek 13: Rázové kladivo LabTest CHK 450J-I

#### 3.2.1 Neinstrumentovaná metoda zkoušky rázem v ohybu

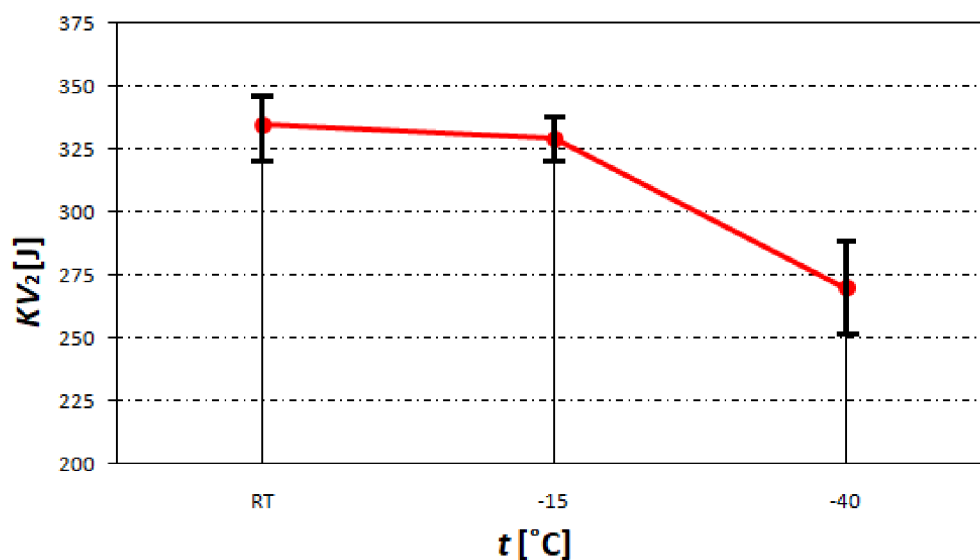
Na připravených zkušebních vzorcích byla v souladu s normou ČSN ISO 148-1 provedena rázová zkouška v ohybu na již dříve zmíněném stroji. Výsledkem zkoušky je v tomto případě pouze absorbovaná energie  $KV_2$ . Software stroje zároveň vypočítá také vrubovou houževnatost, nemusíme se tedy zabývat výpočtem. V tabulkách, které jsou níže, jsou zaznamenány výsledky absorbované energie všech náměrů za různých teplot, dále jejich průměrná hodnota a vrubová houževnatost za jednotlivých teplot a také směrodatné odchylky. Z hodnot výsledků absorbované energie a jednotlivých teplot byl sestaven graf, na kterém je názorně vidět závislost teploty na nárazové práci, body na grafu značí průměrnou hodnotu absorbované energie za dané teploty.

Tabulka 3: Výsledky naměření u neinstrumentované rázové zkoušky ohybem

Číslo vzorku	Absorbovaná energie $KV_2$ [J]		
	RT	-15°C	-40°C
1	302,9	307	271,1
2	326,6	336,7	231,8
3	355	334,5	268,2
4	339,8	320,6	264,4
5	350,9	335,5	304,8
6	342,7	324,2	230,1
7	300,6	351,6	285,2
8	366,8	313,3	289,9
9	319	324,1	284,3
10	344,9	345,2	270

Tabulka 4: Průměrné hodnoty absorbované energie, vrubové houževnatosti a směrodatné odchylky

Teplota	RT	-15°C	-40 °C
$KV_2$ [J]	334,9	329,3	270
Směrodatná odchylka [J]	20,9	13,3	23,9
Vrbová houževnatost [ $J \cdot cm^{-2}$ ]	418,6	411,6	337,5



Obrázek 14: Závislost absorbované energie na teplotě

Z naměřených hodnot (tabulka 4) a také z názorného grafu je možné vypočítat velký vliv teploty na velikosti absorbované energie, která dle očekávání klesá se snižující se teplotou. Při teplotě  $-15^{\circ}\text{C}$  poklesla absorbovaná energie z 334,9J na 329,27J, což je o necelé 2%. Ze směrodatných odchylek v grafu můžeme vidět, že tento rozdíl není významný. Při teplotě  $-40^{\circ}\text{C}$  je pokles absorbované energie mnohem viditelnější, pokles na hodnotu 269,97J. Důvodem tohoto rozdílu je zřejmě překročení tranzitní teploty materiálu, kde dochází k výrazné změně potřebné absorbované energie k přeražení vzorku. Tato problematika je podrobněji popsána v teoretické části práce. V procentech se od teploty  $-15^{\circ}\text{C}$  jedná o pokles o 18% a od teploty RT o necelých 20%. Zkušební vzorky se vždy ochlazovaly na nižší teplotu, než byla teplota zkoušení. Pro teplotu  $-15^{\circ}\text{C}$  se zkušební vzorky chladily na teplotu  $-17^{\circ}\text{C}$  a pro teplotu  $-40^{\circ}\text{C}$  na  $-44^{\circ}\text{C}$ . Přechlazení vzorků se provedlo z důvodu manipulace, takže i když byla malá prodleva mezi vyjmutím vzorků z chladicího média a provedením zkoušky, tak měřená teplota odpovídala správné hodnotě.

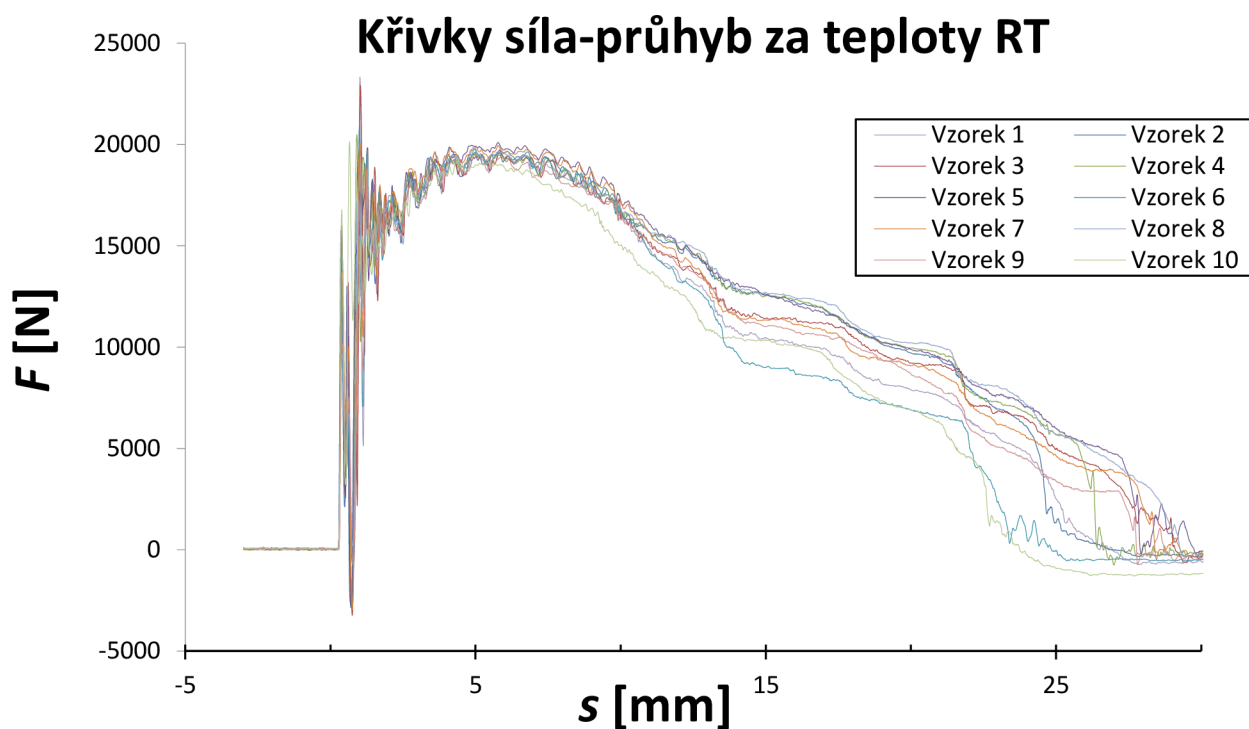
### 3.2.2 Instrumentovaná metoda zkoušky rázem v ohybu

Díky instrumentaci zkušebního stroje bylo možno podle normy ČSN EN ISO 14556 provést instrumentovanou metodu zkoušky rázem v ohybu. Postup zkoušky je totožný s neinstrumentovanou metodou, zde se však místo absorbované energie měří celková nárazová práce vypočítána z plochy pod křivkou síla-průhyb, kterou stroj vykresluje. V následujících tabulkách jsou zaznamenány jednotlivé nárazové práce, jejich průměrná hodnota, průměrná hodnota vrubové houževnatosti a charakteristických hodnot síly, průhybu a nárazové práce, které již byly popsány v teoretické části, a jejich směrodatné odchylky. Z průměrných hodnot nárazové práce, je stejně jako za předchozí metody zpracován graf závislosti nárazové práce na teplotě. Dále jsou zde zobrazeny křivky síla-průhyb pro jednotlivé náměry za daných teplot. Náměry za jedné teploty jsou zobrazeny v jednom grafu a barevně odlišeny.



Tabulka 5: Hodnoty charakteristických veličin křivek síla-průhyb pro teplotu RT

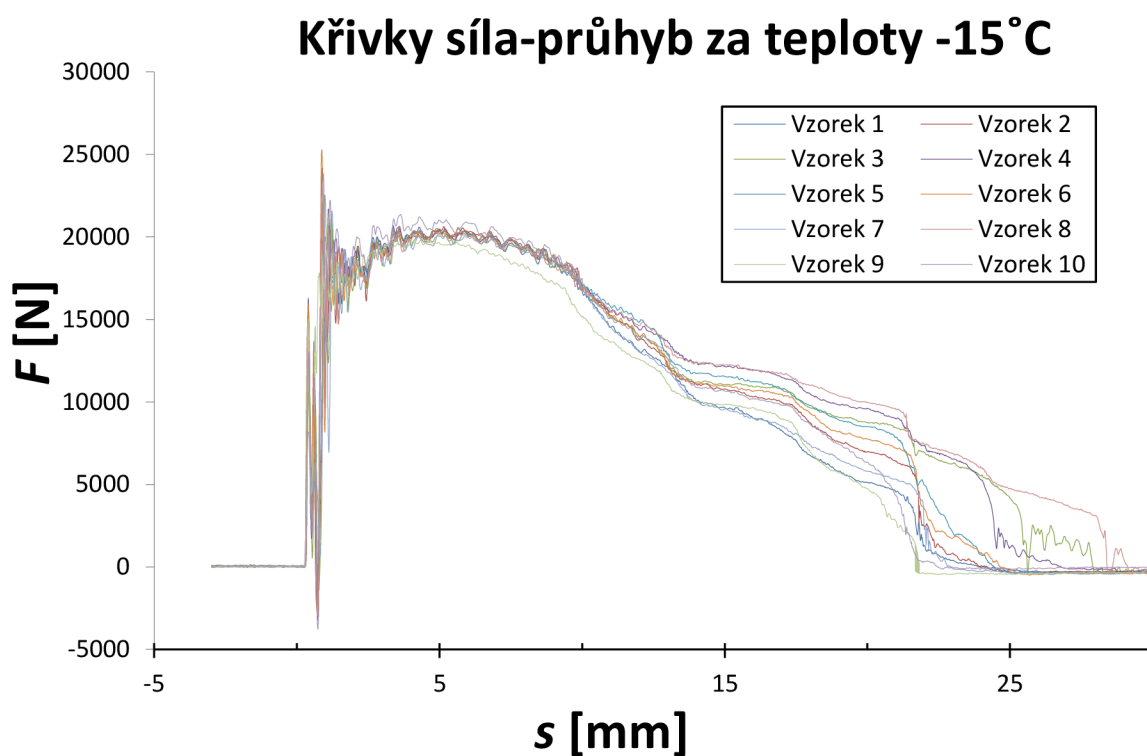
č.v.	$F_{gy}$ [N]	$F_m$ [N]	$F_{iu}$ [N]	$F_a$ [N]	$s_{gy}$ [mm]	$s_m$ [mm]	$s_{iu}$ [mm]	$s_a$ [mm]	$s_t$ [mm]	$W_m$ [J]	$W_{iu}$ [J]	$W_a$ [J]
1	8689	21137	20531	10966	0,447	1,034	1,153	1,183	27,002	5,05	5,44	6,99
2	11186	19595	12434	10157	0,413	5,788	15,536	19,003	27,009	91,56	248,01	287,83
3	10051	20464	20464	16003	0,459	1,056	1,056	1,217	27,003	5,60	6,05	7,86
4	8801	19515	12541	10094	0,482	4,984	15,054	19,636	27,009	76,69	242,81	295,17
5	11028	20061	20061	9828	0,441	5,792	5,792	20,123	27,009	93,92	260,43	304,76
6	19364	19760	12901	9828	1,011	4,989	12,539	13,918	25,029	74,37	205,46	221,25
7	8634	19908	14227	11643	0,482	5,788	12,388	13,849	27,009	92,71	209,5	228,21
8	16433	19811	12388	10628	0,988	4,926	16,558	18,672	27,009	74,45	261,44	285,97
9	18032	19473	13129	9186	1,034	5,029	13,005	19,447	27,009	74,28	209,39	278,71
10	11722	19161	12802	10866	0,441	4,379	11,947	13,092	23,985	66,02	193,19	206,73



Obrázek 15: Křivky síla průhyb pro teplotu RT

Tabulka 6: Hodnoty charakteristických veličin křivek síla-průhyb pro teplotu -15°C

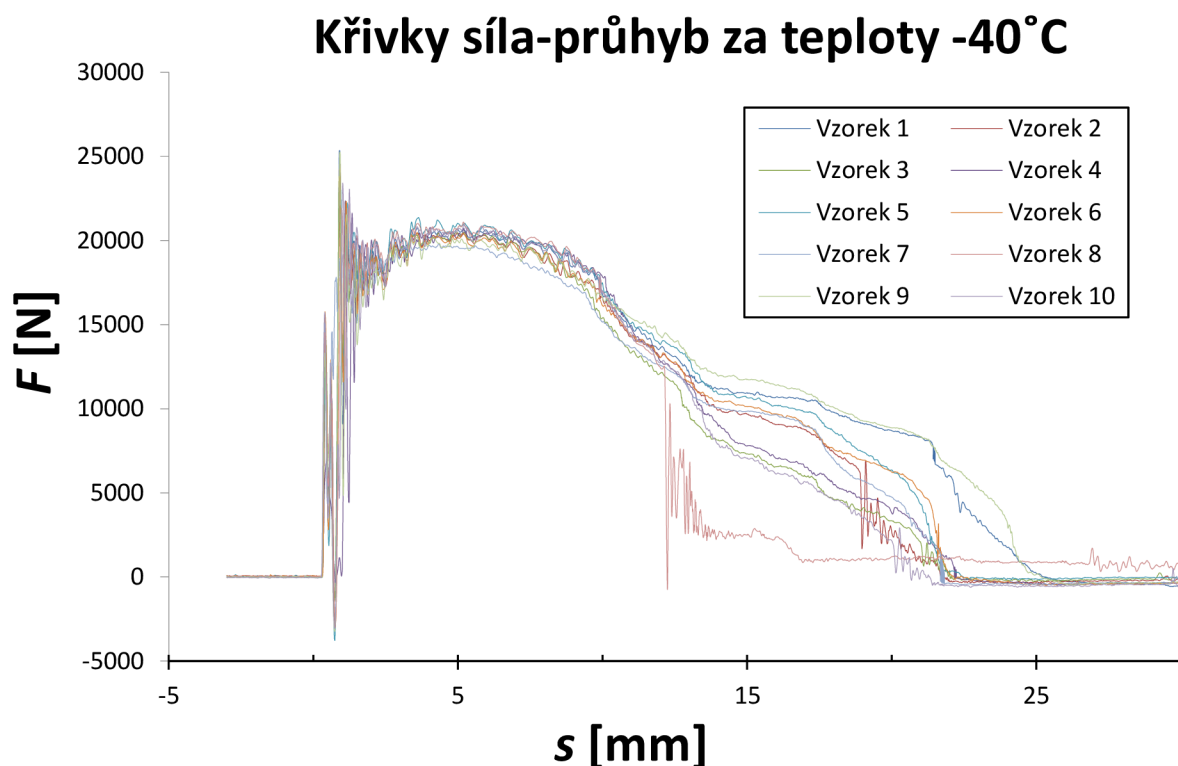
č.v.	$F_{gy}$ [N]	$F_m$ [N]	$F_{iu}$ [N]	$F_a$ [N]	$s_{gy}$ [mm]	$s_m$ [mm]	$s_{iu}$ [mm]	$s_a$ [mm]	$s_t$ [mm]	$W_m$ [J]	$W_{iu}$ [J]	$W_a$ [J]
1	9516	20376	17300	7923	0,455	4,988	9,818	17,308	24,280	82,45	175,39	262,14
2	8252	20586	12756	11983	0,451	5,154	12,836	13,097	24,335	84,41	220,28	223,50
3	20829	20829	12907	12048	0,999	0,999	12,841	13,194	27,009	5,29	218,56	222,96
4	9490	21681	21681	17854	0,459	0,896	0,896	1,068	27,009	4,69	5,30	7,44
5	8336	20490	19484	11730	0,465	5,679	7,148	14,331	24,615	97,04	126,48	242,16
6	10020	22706	22706	15535	0,459	0,878	0,878	1,034	24,831	4,60	5,00	6,81
7	18576	20300	16812	8876	1,011	1,240	10,048	16,444	23,233	8,17	175,10	250,05
8	7981	20861	20861	16934	0,472	0,913	0,913	1,051	27,003	5,45	5,45	7,45
9	9526	20289	15369	10259	0,463	5,412	8,941	15,455	25,308	90,4	162,84	240,1
10	12486	21002	14487	13461	0,454	5,267	7,533	14,896	24,997	88,51	169,4	245,6



Obrázek 16: Křivky síla-průhyb pro teplotu -15°C

Tabulka 7: Hodnoty charakteristických veličin křivek síla-průhyb pro teplotu -40°C

č.v.	$F_{gy}$ [N]	$F_m$ [N]	$F_{iu}$ [N]	$F_a$ [N]	$s_{gy}$ [mm]	$s_m$ [mm]	$s_{iu}$ [mm]	$s_a$ [mm]	$s_t$ [mm]	$W_m$ [J]	$W_{iu}$ [J]	$W_a$ [J]
1	8807	22841	22841	16859	0,482	0,912	0,912	1,074	25,648	4,81	5,21	7,13
2	9874	20662	13669	9928	0,476	0,940	11,638	14,003	21,915	5,21	202,18	230,40
3	9418	21516	17822	11818	0,482	0,899	8,767	12,246	22,053	4,94	157,12	208,01
4	15905	20729	19205	8778	1,148	5,339	8,641	14,216	22,263	84,02	150,09	229,47
5	5437	21805	14656	10866	0,493	0,943	11,471	14,351	22,857	5,05	207,18	243,75
6	7951	22008	22008	16735	0,482	0,933	0,933	1,085	22,650	4,84	5,13	7,14
7	9186	19803	19588	9839	0,442	3,318	4,469	15,083	21,828	51,18	73,71	235,80
8	8034	21447	13776	9964	0,486	1,233	11,327	12,176	17,886	10,05	204,20	215,20
9	7621	23044	23044	10338	0,465	0,923	0,923	1,067	25,424	4,87	4,87	6,48
10	9196	21699	14098	12717	0,465	1,257	11,185	12,195	21,383	9,76	198,69	212,18



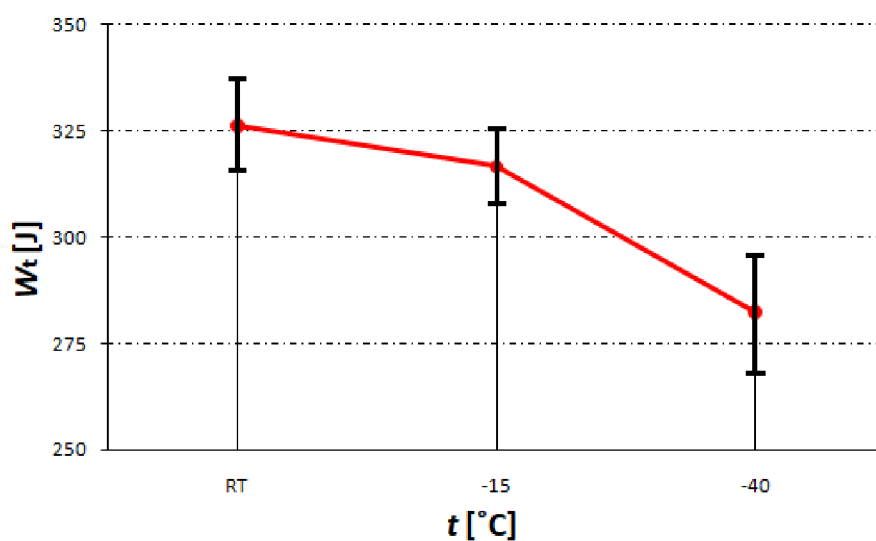
Obrázek 17: Křivky síla-průhyb pro teplotu -40°C

Tabulka 8: Hodnoty nárazové práce zkoušených vzorků

Číslo vzorku	RT		-15°C		-40 °C	
	$W_t$ [J]	$s_t$ [mm]	$W_t$ [J]	$s_t$ [mm]	$W_t$ [J]	$s_t$ [mm]
1	264	27,002	350,3	24,280	285,7	25,648
2	323,4	27,009	286,9	24,335	319,4	21,915
3	230,2	27,003	311,2	27,009	351,5	22,053
4	278,9	27,009	320,4	27,009	335,9	22,263
5	289,9	27,009	339,8	24,615	290,2	22,857
6	302,8	25,029	331,7	24,831	354,8	22,650
7	271,3	27,009	304,2	23,233	344,9	21,828
8	263,1	27,009	287,9	27,003	334,7	17,886
9	278,9	27,009	318,1	25,308	334,9	25,424
10	319,8	23,985	314,6	24,997	309,6	21,383

Tabulka 9: Průměrné hodnoty nárazové práce, vrubové houževnatosti a směrodatné odchylky

Teplota	RT		-15°C		-40 °C	
	$W_t$ [J]	$s_t$ [mm]	$W_t$ [J]	$s_t$ [mm]	$W_t$ [J]	$s_t$ [mm]
Průměrná hodnota	326,2	26,51	316,6	25,26	282,2	22,39
Směrodatná odchylka	23	1,03	21,8	1,26	26,7	2,05



Obrázek 18: Závislost nárazové práce na teplotě

Z křivek síla-průhyb, lze názorně vidět lomové chování zkušebních vzorků. Křivky jsou do dosažení maximální síly  $F_m$  dosti podobné. Větší rozdíly nastávají v okamžiku iniciace trhliny, který v některých případech nastával už při dosažení maximální síly. Čím nižší měřicí teplota, tím razantněji se začala v tomto okamžiku síla snižovat. Tento průběh se dal očekávat, při nižších teplotách má materiál větší tendenci k lomu. Tím pádem dojde k poklesu síly dříve, než například za pokojové teploty, kdy je větší pravděpodobnost neúplného lomu zkušebního vzorku a síla působí mnohem déle, než za normálních okolností, kdy je vzorek v průběhu zkoušky přeražen. Tento důsledek je možné vidět na hodnotě celkového průhybu křivek  $s_t$ , zobrazené v tabulce 8. U teploty  $-40^{\circ}\text{C}$  je průměrná hodnota celkového průhybu 22,39 mm. U teploty RT byl průměrný celkový průhyb 26,51 mm. U této teploty se u šesti zkušebních vzorků vyskytla stejná hodnota celkového průhybu a to 27,009 mm. Tyto stejné výsledky mohou znamenat, že zkušební vzorek dosáhl ve skutečnosti většího celkového průhybu, ale stroj už nedokázal za touto hodnotou průhyb změřit. Teplotní závislost nárazové práce se setkala s očekávaným výsledkem, s klesající teplotou klesala také potřebná nárazová práce. U teploty  $-15^{\circ}\text{C}$  nastal oproti teplotě RT pokles o necelé 3%. U teploty  $-40^{\circ}\text{C}$  je nárazová práce v porovnání s teplotou  $-15^{\circ}\text{C}$  o necelých 11% menší, rozdíl s teplotou RT je 13,5%. Další posuzovanou hodnotou jsou směrodatné odchylky pro nárazovou práci u jednotlivých teplot. Nejmenší směrodatná odchylka je u teploty  $-15^{\circ}\text{C}$ . Důvodem může být menší teplotní rozdíl s pokojovou teplotou v místě prováděné zkoušky. Nenastane tak prudká změna teploty při manipulaci zkušebního vzorku jako u  $-40^{\circ}\text{C}$ , kdy docházelo k největšímu rozptylu hodnot. Zároveň je při této teplotě větší pravděpodobnost úplného přeražení zkušebního vzorku než u teploty RT, kdy docházelo k neúplnému lomu mnohem častěji, a výsledky mohly být touto skutečností ovlivněny. Neúplný lom vzorku je možno vidět na obrázku 19.



Obrázek 19: Neúplný lom zkušebního vzorku

### 3.3 Porovnání výsledných hodnot

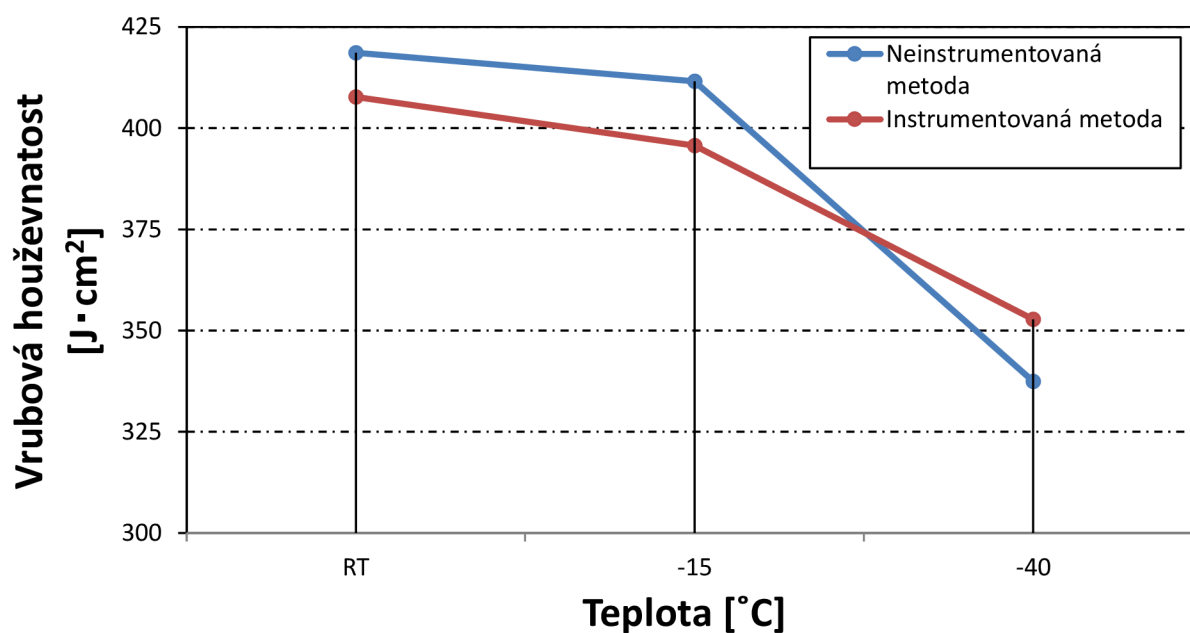
Abychom byli schopni porovnat tyto dvě metody, musíme naměřené hodnoty nejprve převést na společnou veličinu a to na vrubovou houževnatost, která se vypočítá z naměřených hodnot absorbované energie  $KV_2$  z neinstrumentované metody a nárazové práce  $W_t$  z instrumentované metody. V následujících tabulkách jsou uvedené hodnoty nárazové práce, absorbované energie a vrubové houževnatosti obou metod, které jsou zaznamenány v předešlé kapitole, procentuální rozdíl a směrodatné odchylky. Tento rozdíl je potřeba znázornit pouze v jedné tabulce, protože vrubová houževnatost se vypočítá vydělením nárazové práce nebo absorbované energie průřezem zkušebního vzorku v místě vrubu, který má konstantní hodnotu, procentuální rozdíl se tedy po přepočtu nemění. V případě V-vrubu má průřez v místě vrubu hodnotu  $0,8 \text{ cm}^2$ . Na obrázku 20 je názorné zobrazení těchto výsledků, pro přehlednější porovnání.

Tabulka 10: Porovnání výsledků nárazové práce a absorbované energie

Teplota [°C]	NEINST. [J]	INST. [J]
RT	334,9±20,9	326,2±18,1
-15	329,3±13,2	316,6±24,4
-40	269,9±23,9	282,2±31,1

Tabulka 11: Porovnání vrubové houževnatosti

Teplota [°C]	NEINST. [ $\text{J}\cdot\text{cm}^2$ ]	INST. [ $\text{J}\cdot\text{cm}^2$ ]	Rozdíl [%]
RT	418,6±25	407,7±28,8	2,61
-15	411,6±16,5	395,7±27,2	3,86
-40	337,5±29,8	352,8±33,4	4,34



Obrázek 20: Závislost vrubové houževnatosti na teplotě

Z grafu je možno vidět, že porovnávané výsledné hodnoty se za jednotlivých teplot neshodují. Norma ČSN EN ISO 14556 však uvádí, že instrumentovaná a neinstrumentovaná metoda měří podobné, ale různé veličiny, jedna měří nárazovou práci a druhá absorbovanou energii, rozdíly hodnot se tedy dají očekávat. Tento rozdíl by neměl být větší než  $\pm 5\text{J}$ . Nejmenší rozdíl hodnot je za teploty RT, i přesto je však rozdíl za každé teploty větší než předepsaná hodnota.

Ačkoli výsledné hodnoty těchto metod nejsou stejné, mají shodný průběh závislosti vrubové houževnatosti na teplotě. Snížením teploty na  $-15^\circ\text{C}$  dojde k mírnému snížení vrubové houževnatosti, k výraznějšímu snížení dojde až při teplotě  $-40^\circ\text{C}$ . Tuto skutečnost vykazují obě dvě metody.

Rozdíly výsledných hodnot se liší více, než se předpokládalo, musíme však vzít v úvahu možnou chybu měření, ke které byla největší náchylnost při nízkých teplotách.

## Analýza výsledných hodnot:

Z výsledných hodnot vrubové houževnatosti je možné určit, zda má použitá metoda při dané teplotě statisticky významný vliv pomocí dvoufaktorové analýzy rozptylu ANOVA (ANalysis Of Variance), provedené v programu Microsoft Excel. Tato analýza nám dá výsledek v podobě dvou typů tabulek, tabulky faktor a tabulky ANOVA. Analýzou se porovnávaly jednotlivé metody, teploty a kombinace teploty a použité metody. Poté se provedla dvoufaktorová analýza pouze pro teploty RT a -15°C. Hladina významnosti byla zvolena  $\alpha = 0,05$ .

Tabulka 12: Tabulka faktor pro neinstrumentovanou metodu

Faktor	Počet	Součet	Průměr	Rozptyl
RT	10	3349,2	334,92	487,18
-15°C	10	3292,7	329,27	194,71
-40°C	10	2699,8	269,98	569,96
Celkem	30	9341,7	311,39	1280,97

Tabulka 13: Tabulka faktor pro instrumentovanou metodu

Faktor	Počet	Součet	Průměr	Rozptyl
RT	10	2822,4	282,24	792,76
-15°C	10	3165,2	316,52	422,84
-40°C	10	3261,6	326,16	589,76
Celkem	30	9249,2	308,31	927,75

Tabulka 14: Tabulka faktor pro obě metody

Faktor	Počet	Součet	Průměr	Rozptyl
RT	20	6171,6	308,58	1336,6
-15°C	20	6457,9	322,9	335,3
-40°C	20	5961,4	298,1	1379,9



Tabulka 17: Tabulka ANOVA

Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	$F$	Hodnota P	$F_{krit}$
Výběr	142,6	1	142,6	0,2798	0,5989	4,0195
Sloupce	6211,1	2	3105,5	6,0949	0,0041	3,1682
Interakce	30327,1	2	15163,5	29,7597	$1,94 \cdot 10^{-9}$	3,1682
Dohromady	27514,8	54	509,5			
Celkem	64195,6	59				

Tabulka 18: Tabulka faktor pro teplotu RT a  $-15^{\circ}\text{C}$ 

Faktor	Počet	Součet	Průměr	Rozptyl
RT	20	6171,6	308,58	1336,6
$-15^{\circ}\text{C}$	20	6457,9	322,9	335,3

Tabulka 19: Tabulka ANOVA pro teplotu RT a  $-15^{\circ}\text{C}$ 

Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	$F$	Hodnota P	$F_{krit}$
Mezi výběry	2049,2	1	2049,2	2,45	0,1257	4,0981
Všechny výběry	31766,1	38	835,95			
Celkem	33815,3	39				

Pro vyhodnocení analýzy si musíme stanovit hypotézu, podle které rozhodneme, zda má daný parametr statisticky významný vliv na výsledek zkoušky či nikoliv.

Hypotéza je následující:

$H_0$  – daný parametr nemá na hodnoty vrubové houževnatosti vliv.

$H_1$  – daný parametr má na hodnoty vrubové houževnatosti vliv

Z tabulek jsou pro nás důležité zejména dvě hodnoty. Hodnota  $F$ , která vyjadřuje testované kritérium, a hodnota  $F_{krit}$ . Pokud hodnota  $F$  leží v intervalu od 0 do  $F_{krit}$ , platí hypotéza  $H_0$  a pokud leží mimo tento interval, platí hypotéza  $H_1$ . Dále je potřeba vysvětlit řádky ve sloupci Zdroje variability. V řádku Výběr je vypočtena analýza instrumentované a neinstrumentované metody bez ohledu na teplotu. Hodnota  $F$  je v tomto případě menší než  $F_{krit}$ , takže platí hypotéza  $H_0$ , vliv

použité metody nemá statisticky významný vliv na výsledek zkoušky. Následuje řádek Sloupce, ve kterém se porovnávaly 3 měřené teploty bez ohledu na měřenou metodu. Zde je hodnota  $F$  větší než  $F_{krit}$ , výsledkem této analýzy je tedy, že měřená teplota má statisticky významný vliv na výsledek zkoušky. Poslední důležitý řádek je Interakce, kdy se porovnávala jak teplota, tak metoda. Tady opět hodnota  $F$  převyšuje hodnotu  $F_{krit}$ . Výsledkem je, že vzájemné interakce mezi těmito daty jsou statisticky významné, tedy záleží na tom, jaká metoda a teplota se použije pro měření. Pro doplnění byla ještě provedena jednofaktorová analýza, kde se porovnávaly pouze teploty RT a  $-15^{\circ}\text{C}$  bez ohledu na metodu měření (Tabulka 18 a 19). V této analýze je hodnota  $F$  menší než  $F_{krit}$ . Vliv těchto dvou teplot nemá statisticky významný vliv na výsledek.

### 3.4 Diskuze výsledků měření

Celkové výsledky měření dopadly dle očekávání. Vrubová houževnatost klesala s teplotou měření a měla zásadní vliv na výsledek zkoušky, ale pouze při porovnání ostatních teplot s teplotou  $-40^{\circ}\text{C}$ . Když porovnáme výsledky vrubové houževnatosti za teplot RT a  $-15^{\circ}\text{C}$  bez ohledu na použitou metodu, je rozdíl hodnot pouhé 2,3%. Ani dle analýzy rozptylu ANOVA není tento rozdíl statisticky významný, jak je možno vidět v předchozí kapitole. Když však porovnáme teplotu RT, kde byla průměrná hodnota vrubové houževnatosti pro obě metody  $413,16 \text{ J}\cdot\text{cm}^2$ , a teplotu  $-40^{\circ}\text{C}$ , kde je průměrná hodnota  $348,63 \text{ J}\cdot\text{cm}^2$ , jedná se už o rozdíl 15,6%. Pokud bereme v potaz pouze teplotu, tak hodnota výsledků závisí na tranzitní teplotě zkoušeného materiálu. Z výsledků je zřejmé, že až pod teplotou  $-15^{\circ}\text{C}$  začíná mít teplota měření zásadní vliv na výsledek zkoušky. Teplota  $-40^{\circ}\text{C}$  se bude tedy blížit tranzitní teplotě měřeného materiálu, kde nastává velká změna potřebné energie k přeražení vzorku (viz kapitola 2.2.2), tím pádem se mění i vrubová houževnatost. V oblasti tranzitní teploty také dochází k velkému rozptylu výsledků, čímž by se dala vysvětlit velká směrodatná odchylka u této teploty pro obě metody.

Dále se porovnávala použitá metoda měření. Dle výsledků analýzy rozptylu ANOVA vyšlo, že použitá metoda nemá na výsledek zkoušky statisticky významný vliv. Pokud bychom se podívali na procentuální rozdíly, tak průměrná hodnota vrubové houževnatosti pro neinstrumentovanou metodu bez ohledu na teplotu vyšla  $389,23 \text{ J}\cdot\text{cm}^2$ , u instrumentované metody to byla hodnota  $385,39 \text{ J}\cdot\text{cm}^2$ , což je rozdíl o pouhých 0,99%. U jednotlivých teplot už byly rozdíly výsledných hodnot větší. U teploty RT 2,61%, pro teplotu  $-15^{\circ}\text{C}$  3,86% a u teploty  $-40^{\circ}\text{C}$  byl rozdíl 4,34% (tabulka 11).

Další zajímavou hodnotou jsou směrodatné odchylky u výsledných hodnot absorbované energie a nárazové práce pro jednotlivé teploty. V obou případech byla nejmenší směrodatná odchylka při teplotě  $-15^{\circ}\text{C}$ . Největší směrodatná odchylka pak byla za teploty  $-40^{\circ}\text{C}$ . Důvodů může být několik. Jak již bylo zmíněno výše, tato teplota se blíží tranzitní teplotě, kde dochází k velkému rozptylu výsledků. Další důvod může být teplota samotná, i když se zkušební vzorky přechlazovaly na teplotu větší, než byla zkušební teplota, z důvodu manipulace, tak i přesto mohlo rychlé ohřívání vzorků ovlivnit výsledky. Zmenšení odchylek by šlo dosáhnout například rychlejší manipulací, nebo použitím manipulačních kleští, které by se ideálně temperovaly na teplotu zkušební vzorku. Velká směrodatná odchylka u teploty RT byla nejspíše způsobena tím, že u většiny zkušebních vzorků došlo za této teploty k neúplnému lomu, výsledné hodnoty se tím pádem mohly velmi lišit. Eliminace neúplného lomu by se dala realizovat například použitím rázového kladiva s větší počáteční potenciální energií, která by zvýšila pravděpodobnost úplného přeražení vzorku.

#### 4 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo stanovit, zda má použitá metoda vliv na výsledek zkoušky rázem v ohybu. K vyhodnocení tohoto požadavku, byly na rázovém kladivu LabTest CHK 450J-I provedeny podle norem ČSN ISO 148-1 a ČSN EN ISO 14556 dvě metody zkoušky rázem v ohybu, instrumentovaná a neinstrumentovaná. Pro každou metodu se měřilo za tří různých teplot, za teploty RT,  $-15^{\circ}\text{C}$  a  $-40^{\circ}\text{C}$ . Pro tyto zkoušky se vyrobilo celkem 60 zkušebních vzorků z oceli S235JRG1 (ČSN 11 373). Pro zasvěcení do této problematiky jsou v teoretické části popsány základní statické a dynamické zkoušky kovů. Zkouška rázem v ohybu, která se řadí mezi dynamické zkoušky kovů a je v této práci nejdůležitější mechanickou zkouškou, je podrobněji popsána v kapitole 2.1.3.

V experimentální části je nejprve popsán zkoušený materiál a výroba zkušebních vzorků. Dále jsou zaznamenány naměřené hodnoty jednotlivých náměrů, kde je graficky znázorněn vliv teploty na výsledek. V poslední části byly porovnány výsledné hodnoty pro obě metody, nejprve graficky a následně pomocí analýzy rozptylu ANOVA, kterou se určilo, zda má statisticky významný vliv na výsledné hodnoty nejprve použitá metoda, teplota měření a kombinace těchto vlivů.

Z provedeného experimentu byla zjištěna velká závislost naměřených hodnot na teplotě. Díky instrumentované metodě, která vykresluje závislost síla-průhyb u jednotlivých zkoušek, je

možno názorněji tuto závislost pozorovat v jednotlivých fázích lomu. Nicméně tyto hodnoty byly ovlivněny také chybami měření, kterým se dalo předejít. Návrhy na eliminaci těchto chyb jsou popsány v kapitole 3.4.

Z výsledných hodnot se vypočítala vrubová houževnatost, která slouží k porovnání obou použitých metod. Při grafickém porovnání těchto výpočtů za jednotlivých teplot byl zjištěn malý rozdíl použitých metod, avšak obě metody měly stejný charakter průběhu, vrubová houževnatost se s klesající teplotou snižovala. Nakonec se analýzou rozptylu ANOVA zjistilo, že na hodnoty vrubové houževnatosti nemá použitá zkušební metoda statisticky významný vliv. Obě metody tedy produkují srovnatelné výsledky. Poté se analýzou porovnávala teplota zkoušení bez ohledu na použitou metodu. Z té se zjistilo, že teplota měření má vliv na výsledek zkoušky. Ten však začíná být významný až pod teplotou  $-15^{\circ}\text{C}$ . Při provedení analýzy pouze mezi teplotami RT a  $-15^{\circ}\text{C}$  vyšlo najevo, že v tomto rozsahu teplot nemá tento faktor vliv na výsledek.

## 5 Seznam použité literatury

[1] [http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/3\\_2\\_\\_struktura-a-vlastnostni-materialu-a-jejich-zkouseni.pdf](http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/3_2__struktura-a-vlastnostni-materialu-a-jejich-zkouseni.pdf)

[2] ŠAPOŠNIKOV, Nikolaj Aleksandrovič a Karel HUSÁREK. Mechanické zkoušení kovů: Mechničeskije ispytanija metallov. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1953. Řada theoretické literatury.

[3] [http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_bakalari/NOM1/Vlastnosti\\_podklady.pdf](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/NOM1/Vlastnosti_podklady.pdf)

[4] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *[Nauka o materiálu]*. 2. část, Vlastnosti kovových materiálů. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03686-0.

[5] NĚMEC, Jaroslav, Jan DVORÁK a Cyril HÖSCHL. Pružnost a pevnost ve strojírenství. Praha: SNTL - nakladatelství technické literatury, 1989. Česká matice technická, ročník xciv (1989), číslo spisu 433. ISBN 80-03-00193-5.

[6] VELES, Pavol. Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov. 2. vyd. Bratislava: Alfa, 1989.

- [7] ŠIMÁČEK, Stanislav. Zjišťování modulu pružnosti pevnostních plechů: Determination of yang's modulus for high-strngth metal sheets. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2006. Bakalářské práce. Technická univerzita v Liberci.
- [8] JAREŠ, Vojtěch. Mechanické zkoušení kovů. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962. Učební texty vysokých škol.
- [9] MACEK, Karel a Petr ZUNA. Nauka o materiálu. Praha: ČVUT, 1996. ISBN 80-01-01507-6.
- [10] [https://www.opi.zcu.cz/mechanicke\\_vlastnosti.pdf](https://www.opi.zcu.cz/mechanicke_vlastnosti.pdf)
- [11] HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. Strojírenská technologie 1. 4., rev. vyd. Praha: Scientia, 2007. ISBN 978-80-86960-26-5.
- [12] WALLA, Viktor. Zkoušení ocelí a ostatních kovů: zkoušky statické, rázové, na únavu, tvrdostní, technologické, vady ocelí a ostatních kovů. Praha: Práce, 1952. Technické příručky Práce.
- [13] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. [Nauka o materiálu]. 2. část, Vlastnosti kovových materiálů. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03686-0.
- [14] ČSN EN ISO 6892-1 *Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Ústav pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, únor 2010, 64 s. Třídící znak: 84656
- [15] ČSN EN ISO 7438 *Kovové materiály – Zkouška ohybem*. Praha: Český normalizační institut, 2005, 12 s. Třídící znak: 74618
- [16] ČSN ISO 148-1 *Kovové materiály – Zkouška rázem v ohybu – metodou Charpy – Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Ústav pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010, 28 s. Třídící znak: 86144
- [17] SKÁLOVÁ, Jana, Rudolf KOVAŘÍK a Vladimír BENEDIKT. Základní zkoušky kovových materiálů. 4. vydání. V Plzni: Západočeská univerzita, 2010. ISBN 978-80-7043-417-8.
- [18] ČSN EN ISO 14556 *Ocel – Zkouška rázem v ohybu na kyvadlovém kladivu tyčí Charpy s V-Vrubem – Instrumentovaná zkušební metoda*

- [19] PANTĚLEJEV, Libor. Přednášky: Mezní stavy materiálů. Brno, 2007. Dostupné také z: <http://ime.fme.vutbr.cz/index.php/cs/studium/podklady-pro-vyuku-zimni-semester>
- [20] Vlastnosti a zkoušení materiálu, 2013. Projekty s podporou EU online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Dostupné z:
- [21] PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu I. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2003. ISBN 80-7204-283-1.
- [22] SKÁLOVÁ, Jana, Rudolf KOVAŘÍK a Vladimír BENEDIKT. Základní zkoušky kovových materiálů. 4. vydání. V Plzni: Západočeská univerzita, 2010. ISBN 978-80-7043-417-8.
- [23][http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY\\_01\\_014/Vlastnosti%20a%20zkoušení%20materiálů/02%20Text%20pro%20e-learning/Vlastnosti%20a%20zkoušení%20materiálů%2009.pdf](http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_014/Vlastnosti%20a%20zkoušení%20materiálů/02%20Text%20pro%20e-learning/Vlastnosti%20a%20zkoušení%20materiálů%2009.pdf)