

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

**Studijní program:** B0715A270013

**Studijní specializace:** Strojírenské materiály a metalurgie

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Ověřování ztráty houževnatosti drátů z legovaných ocelí pomocí  
rázové zkoušky**

**Autor:** Andrij KRASIJ

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

Akademický rok 2021/2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2021/2022

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Andrij KRASIJ**  
Osobní číslo: **S19B0568P**  
Studijní program: **B0715A270013 Strojní inženýrství**  
Specializace: **Strojírenské materiály a technologie**  
Téma práce: **Ověřování ztráty houževnatosti drátů z legovaných ocelí pomocí rázové zkoušky**  
Zadávající katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

## Zásady pro vypracování

1. Rozdělení ocelí, legované oceli
2. Příčiny a důsledky ztráty houževnatosti u ocelí
3. Mechanické zkoušky pro určení houževnatosti materiálu
4. Návrh konstrukce zkušebního stroje pro zkoušení vrubové houževnatosti drátů
5. Experimentální program
6. Vyhodnocení experimentů
7. Diskuze výsledků
8. Závěr

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

Seznam doporučené literatury:

ASM Handbook, Volume 4, Heat Treating, ISBN: 978-0871703798, ASM International, 1991.

Kraus, V.: Tepelné zpracování a slinování.; Skripta ZČU v Plzni, 2000.

Jech, J., Tepelné zpracování ocelí, Praha, SNTL, ISBN: 04-401-69, 1983.

ASM Handbook, Volume 8, Mechanical Testing and Evaluation, ASM International, ISBN: 978-1-62708-176-4, 2000.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Beneš, Ph.D.**  
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Konzultant bakalářské práce: **Doc. Ing. Václav Machek, CSc.**  
Mubea, spol. s r.o.

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **27. května 2022**

L.S.

---

**Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.**  
děkan

---

**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

## ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Krasij	<b>Jméno</b> Andrij		
<b>STUDIJNÍ PROGRAM</b>	B0715A270013 Strojní inženýrství			
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Ing. Beneš, Ph.D.	<b>Jméno</b> Petr		
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU – FST – KMM			
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>	
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Ověřování ztráty houževnatosti drátů z legovaných ocelí pomocí rázové zkoušky			

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KMM	<b>ROK ODEVZD.</b>	2022
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	54	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	54	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b> <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Tato bakalářská práce se zabývá měřením houževnatosti u drátů z nízkolegované oceli. Hlavním cílem práce je navrhnout příslušné zkušební zařízení a posléze sérií experimentů ověřit, zda-li je takto navržený stroj schopen zachytit změnu houževnatosti. Experimentální měření bylo provedeno na oceli ČSN 14 260.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b> <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	houževnatost, vodíková křehkost, drát, lom, ohyb

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Krasij	Name Andrij	
<b>STUDY PROGRAMME</b>	B0715A270013 Mechanical Engineering		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Beneš, Ph.D.	Name Petr	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU – FST – KMM		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b><del>DIPLOMA</del></b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Verification of the loss of toughness of alloy steel wire by impact test		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KMM	<b>SUBMITTED IN</b>	2022
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

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

<b>TOTALLY</b>	54	<b>TEXT PART</b>	54	<b>GRAPHICAL PART</b>	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	<p>This bachelor thesis deals with the measurement of toughness in low-alloy steel wires. The main goal of this work is to design the appropriate test equipment and then perform a series of experiments to verify whether the designed machine is able to capture the desired change in toughness. Experimental measurements were performed on ČSN 14 260 steel.</p>
<b>KEY WORDS</b>	toughness, hydrogen embrittlement, wire, fracture, bend

## **Poděkování**

Velice rád bych poděkoval vedoucímu Ing. Petru Benešovi, Ph.D. za jeho ochotu, čas a odborné znalosti poskytované v průběhu zpracování této bakalářské práce.

## Obsah

Přehled použitých zkratk a jednotek.....	10
Seznam obrázků .....	11
Seznam tabulek .....	12
Seznam grafů.....	12
1 Úvod.....	13
2 Rozdělení ocelí.....	14
2.1 Legované oceli.....	15
2.2 Pružinové oceli .....	15
2.3 Výroba drátu .....	17
2.3.1 Válcování drátů .....	17
2.3.2 Tažení drátů.....	18
2.4 Tepelné zpracování drátů.....	19
2.4.1 Rekrytalizační žíhání .....	19
2.4.2 Žíhání naměkko .....	19
2.4.3 Patentování .....	19
2.4.4 Kalení .....	19
2.4.5 Popouštění .....	21
3 Příčiny a důsledky ztráty houževnatosti u ocelí.....	22
3.1 Popouštěcí křehkost.....	22
3.1.1 Nízkoteplotní popouštěcí křehkost – NTPK .....	22
3.1.2 Vysokoteplotní popouštěcí křehkost – VTPK.....	23
3.2 Vodíková křehkost.....	24
3.2.1 Nevratná vodíková křehkost.....	24
3.2.2 Vratná vodíková křehkost .....	24
4 Mechanismy porušování .....	26
4.1 Iniciace a šíření trhliny.....	26
4.1.1 Tvárný lom .....	26
4.1.2 Štěpný lom.....	27
5 Zkoušky houževnatosti.....	28
5.1 Rázová zkouška v ohybu – dle Charpyho .....	28
5.1.1 Zkušební vzorky – rozměry a tvary vrubu .....	29
5.1.2 Vliv teploty – tranzitní teplota .....	30
5.2 Zkouška rázem v ohybu – Instrumentovaná.....	31



5.3	Zkouška padajícím závažím – stanovení teploty nulové houževnatosti.....	32
6	Experimentální část.....	33
6.1	Návrh stroje .....	33
6.1.1	Upnutí ramena – objímka .....	33
6.1.2	Rameno.....	34
6.1.3	Kladiva .....	34
6.1.4	Svěrák.....	35
6.1.5	Výpočet nárazové energie .....	36
6.2	Zkušební materiál .....	37
6.2.1	Chemické složení ČSN 14 260 (54 CrSi 6).....	37
6.2.2	Mikrostruktura.....	37
6.2.3	Tvrдость .....	38
6.2.4	Rozměry a způsob upnutí.....	38
6.3	Zpracování vzorků.....	39
6.3.1	Elektrolytické vodíkování .....	39
6.3.2	Chemické vodíkování.....	39
6.3.3	Žihání .....	40
6.4	Průběh zkoušení.....	41
6.4.1	Naměřené hodnoty – část I.....	41
6.4.2	Naměřené hodnoty – část II .....	43
6.4.3	Naměřené hodnoty – část III .....	44
6.4.4	Naměřené hodnoty – část IV .....	45
6.4.5	Naměřené hodnoty – část V .....	46
6.4.6	Naměřené hodnoty – část VI.....	48
7	Diskuze výsledků .....	50
8	Závěr.....	52
	Seznam použitých zdrojů .....	53

## Přehled použitých zkratk a jednotek

### Zkratky

AIDE	Adsorption-induced dislocation emission
ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma
HEDE	Hydrogen-enhanced decohesion
HELP	Hydrogen enhanced localized plasticity
HESIV	hydrogen-enhanced strain-induced vacancies
ISO	International Organization for Standardization
Max.	Maximálně
Např.	Například
NTPK	Nízkoteplotní popouštěcí křehkost
Obr.	Obrázek
ŘEM	Řádkovací elektronový mikroskop
Tab.	Tabulka
VTPK	Vysokoteplotní popouštěcí křehkost

### Jednotky

°	Stupeň
°C	Stupeň Celsia
g	Gram
h	Hodina
HV	Tvrдость dle Vickerse
J	Joule
kg	Kilogram
m	Metr
min	Minuta
mm	Milimetr
N	Newton
s	Sekunda
μm	Mikrometr

## Seznam obrázků

Obr. 1: Válcování drátů (8) .....	17
Obr. 2: Blok drátotažné linky (9) .....	18
Obr. 3: vpravo: 1) Kalení základní, 2) Kalení lomené, vlevo: 3) Kalení termální, 4) Izotermické zušlechťování(1).....	20
Obr. 4: Výskyt popouštěcí křehkosti (13) .....	22
Obr. 5: Struktura tvárného lomu(2).....	26
Obr. 6: vlevo: transkrystalický štěpný lom, vpravo: interkrystalický štěpný lom (20).....	27
Obr. 7 a) Schéma Charpyho kladiva b) polohování zkušební vzorku (22) .....	28
Obr. 8 Rozměry zkušebních vzorků pro Charpyho zkoušku (V-vrub nahoře, U-vrub dole)...	29
Obr. 9: Teplotní závislost houževnatosti na teplotě, charaktery lomu (21) .....	30
Obr. 10: Metody stanovení tranzitní teploty (21).....	31
Obr. 11: Graf závislosti síly na průhybu (24).....	31
Obr. 12: Zkouška padajícím závažím (25) .....	32
Obr. 13: Model objímky .....	33
Obr. 14: Model spoje rameno – kladivo.....	34
Obr. 15: Zhotovená kladiva 500, 350 a 200 g.....	34
Obr. 16: Model svěráku.....	35
Obr. 17: Schéma navrhovaného stroje .....	36
Obr. 18: Snímek ze světelného mikroskopu, zvětšení 500x, ocel ČSN 14 260 .....	37
Obr. 19: Rozměry zkušební vzorku.....	38
Obr. 20: Zkušební vzorek.....	38
Obr. 21: Schéma upínání vzorku ve svěráku.....	39
Obr. 22: Vodíkování v 17 % roztoku HCl .....	39
Obr. 23: Snímky lomových ploch na stereo-lupě, vlevo vodíkováný 9 hodin, vpravo výchozí stav .....	42
Obr. 24: Nové rozměry vzorku .....	43
Obr. 25: vlevo: schéma průběhu ohýbání vzorku, vpravo: schéma nového způsobu upnutí kladiva.....	44
Obr. 26: a) Vzorek ve výchozím stavu (12_2); b) Vzorek vyžíhaný (13_1); c) Vzorek vyžíhaný a elektrolyticky vodíkováný (14_1); d) Vzorek vyžíhaný a chemicky vodíkováný (15_1) .....	45
Obr. 27: Snímek z ŘEM, zvětšení 1000x, vlevo vzorek 19_1, vpravo vzorek 22_1, v obou případech houževnaté porušení .....	46
Obr. 28: Snímek z ŘEM, zvětšení 500x, vzorek 22_1, částečné křehké porušení způsobené zpětným nárazem kladiva.....	47
Obr. 29: Vzorek 22_1 .....	47

Obr. 30: Obr. 32: Snímek z ŘEM, zvětšení 1000x, vlevo vzorek 18_1, vpravo vzorek 17_1, v obou případech houževnaté porušení .....	48
Obr. 31: Snímek z ŘEM, zvětšení 1000x, vlevo vzorek 20_1, vpravo vzorek 23_1, v obou případech houževnaté porušení .....	48
Obr. 32: Rozměry zkušebního vzorku.....	48
Obr. 33: Snímky z ŘEM, zvětšení 1000x, vlevo vzorek 24_2, vpravo vzorek 25_2, v obou případech houževnaté porušení .....	49
Obr. 34: Návrh nových zkušebních podmínek.....	51

## Seznam tabulek

Tab. 1:Třídy oceli (2) .....	14
Tab. 2: Mezní hodnoty pro legované oceli (3) .....	15
Tab. 3: Nejčastěji používané nelegované a nízkolegované oceli pro výrobu pružinových drátů .....	16
Tab. 4: Hodnoty energii jednotlivých kladiv .....	37
Tab. 5: Chemické složení oceli ČSN 14 260 .....	37
Tab. 6: Naměřené hodnoty na tvrdoměru.....	38
Tab. 7: Naměřené hodnoty – část I, hmotnost kladiva 200 g.....	41
Tab. 8: Naměřené hodnoty – část II, hmotnost kladiva 500 g, *vzorek pouze deformovaný ohnutím.....	43
Tab. 9: Naměřené hodnoty – část III, hmotnost kladiva 500 g .....	44
Tab. 10: Naměřené hodnoty – část IV, hmotnost kladiva 200 g.....	45
Tab. 11: Naměřené hodnoty – část V, hmotnost kladiva 500 g, *vzorek pouze deformovaný ohnutím.....	46
Tab. 12:Naměřené hodnoty – část VI, kladivo o hmotnosti 500 g.....	49
Tab. 13: Naměřené hodnoty tvrdosti kaleného vzorku .....	49

## Seznam grafů

Graf 1: Naměřené hodnoty nárazové práce – část I .....	42
--	----

## 1 Úvod

Cílem této práce je navrhnout stroj, který by umožňoval zjištění ztráty houževnatosti drátu z pružinové oceli. Houževnatost je nesmírně důležitá mechanická vlastnost u ocelí, která zabráňuje jejímu křehkému chování. Takové chování je u ocelí nebezpečné, jelikož dochází k porušení součásti bez viditelné plastické deformace. Je tedy nezbytné si plně uvědomovat, jakými procesy, ať už výrobními nebo exploatačními, ocel prochází. Jelikož při použití materiálu o stejném chemickém složení může dojít k jeho degradaci z pohledu houževnatosti, a to vlivem nesprávného tepelného zpracování, vystavováním agresivnímu prostředí, nevhodně navrženými výrobními postupy atd.

V první kapitole rešeršní část jsou popsány druhy ocelí používané pro výrobu pružin, jejich chemické složení, vliv jednotlivých legujících prvků na mechanické vlastnosti, technologie výroby drátů a jejich tepelné zpracování. V druhé kapitole jsou vyjmenovány způsoby, kterými dochází ke ztrátě houževnatosti u ocelí, se zaměřením na vodíkovou a popouštěcí křehkost. Třetí kapitola se zabývá mechanismy porušování, způsoby vzniku trhlin a jejich další šíření. V poslední kapitole rešeršní části jsou charakterizovány zkoušky, které jsou učeny k měření houževnatosti.

Experimentální program je rozdělen do dvou částí, první popisuje návrh nového zkušebního zařízení a definuje zkušební podmínky. Druhá část se zabývá měřením nárazové energie u drátů z pružinové oceli (ČSN 14 260), které byly různými způsoby zpracovány za účelem změny houževnatosti.

## 2 Rozdělení ocelí

Ocel je slitina železa a uhlíku, s maximálním obsahem uhlíku 2,14 %. Ocel obsahuje doprovodné a legující prvky. Doprovodné prvky se do oceli nepřidávají úmyslně, dostávají se ze vsázky při výrobě surového železa, rozdělujeme je na škodlivé a prospěšné. Legující prvky naopak se přidávají záměrně, dokážou totiž značným způsobem ovlivnit výsledné vlastnosti oceli, a to jak chemické, tak i fyzikální. (1)

Oceli můžeme rozdělovat podle různých hledisek. Rozdělení podle způsobů využití, na oceli k tváření a na odlitky, dle obsahu legujících prvků, na oceli slitinové (legované) a uhlíkové. V Tabulce 1 je vidět detailnější rozdělení (v tabulce je použito značení tříd ocelí dle normy ČSN 42 0002). (1)

Třída oceli	Druh oceli podle			Bližší údaje
	Jakosti	Použití	Chemického složení	
10	Obvyklé jakosti	Konstrukční	Uhlíkové	Bez záruky složení. (Ve zvláštních případech se zaručuje max. obsah některých prvků v tavbovém vzorku a hutním výrobku)
11				Zaručuje se max. obsah C, P a S v tavbovém vzorku a hutním výrobku. (Ve zvláštních případech i obsah dalších prvků.)
12	Ušlechtilé		Slitinové	Oceli uhlíkové
13				Mn, Si
14				Cr (Mn, Si)
15				Mo, W, V, (Cr)
16				Ni (Cr, W, Mo, V)
17	Vysoce legované oceli: korozivzdorné, žáruvzdorné, žárovevné, speciální			
19	Nástrojové	Slitinové Uhlíkové	Oceli uhlíkové	
			Oceli slitinové a rychlořezné	

Zaručuje se chemické složení tavbového vzorku a hutních výrobku udáním rozmezí prvků nebo max. či min. obsahu

Tab. 1: Třídy oceli (2)

## 2.1 Legované oceli

Legování je operace, která se provádí za účelem změny vlastnosti oceli za pomoci změny chemického složení. Legované oceli mají využití tam, kde vlastnosti oceli obvyklé jakosti už nestačí. Mohou na ně být kladeny požadavky jako například korozivzdornost, žáruvzdornost, ořeruvzdornost, tvrdost, houževnatost za nízkých teplot atd. Jako nejčastější legující prvky se používají chrom, nikl, mangan, wolfram, molybden, vanad, titan, kobalt, křemík, hliník, bor, nebo jejich kombinace. (2)

Přidáním slitinových prvků vede k tvorbě nových fází a také může docházet ke změně teplot rozpadu jednotlivých fází. Prvky, se kterými má železo podobnou velikost atomu, vytváří substituční tuhý roztok, ty, které mají atomy menší, obvykle vytváří intersticiální tuhý roztok. Také jsou legury, které za snížených teplot a úzkém rozmezí koncentrací vytváří intermediální fáze. Legující prvky reagují nejen se železem, ale taky často vytvářejí karbidy, nitridy nebo mohou reagovat mezi sebou nebo s doprovodnými prvky. (2)

Za legované oceli se řadí takové, jejichž střední obsah libovolného prvku přesahuje hodnoty uvedené v tab.2. (3)

Prvek	Mezní hmotnostní obsah [%]	Prvek	Mezní hmotnostní obsah [%]
Al – Hliník	0,30	B – Bór	0,008
Bi – Bismut	0,10	Co – kobalt	0,30
Cr – Chrom	0,30	Cu – Měď	0,40
La – Lanthanidy	0,10	Mn – Mangan	1,65
Mo – Molybden	0,08	Nb – Niob	0,06
Ni – Nikl	0,30	Pb – Olovo	0,40
Se – selen	0,10	Si – Křemík	0,60
Te – Telur	0,10	Ti – Titan	0,05
V – Vanad	0,10	W – Wolfram	0,30
Zr – Zirkonium	0,05	Jiné prvky (mimo: C, P, S, N)	0,10

Tab. 2: Mezní hodnoty pro legované oceli (3)

## 2.2 Pružinové oceli

Na tento typ ocelí jsou kladeny specifické požadavky, jakými jsou vysoká mez únavy, pro schopnost materiálu snášet statické a dynamické namáhání, a právě u pružin hlavně střídavými silami. Takové vlastnosti jsou ve větší míře umožněny vysokou mezí kluzu, pevností, příslušnou kvalitou povrchu a za současně vysoké houževnatosti. A v nepolední řadě pružinový drát musí mít vysokou mez pružnosti, čímž umožňuje pružině splňovat její hlavní funkci. Kdy při zatížení součásti dojde k její pružné deformaci a po následovaném odlehčení dojde a navrácení do své důvodní polohy. (4)

Pro pružiny, které nejsou vystaveny velkým namáháním a nemají být exponovány vysokým provozním teplotám, se využívá uhlíková ocel s obsahem uhlíku nad 0,4 %. Mechanické vlastnosti drátu mohou být i zlepšeny, tažením drátu za studena (pro dráty

do 5 mm), před samotným tažením se drát patentuje, pro dosažení nevhodnější struktury. Příklady uhlíkových ocelí využívané na výrobu pružin jsou oceli 12 072, 12 090 a 12 051. (4)

Pro pružiny, které jsou vystavovány náročnějším podmínkám, jsou používány slitinové oceli.

Rozdělení nízkolegovaných ocelí pro výrobu drátu dle hlavních legujících prvků (rozdělení z větší části založeno na ČSN EN 10270-2):

- Manganová
- Křemíková
- Chrom-křemíková
- Chrom-vanadiová
- Chrom-křemík-vanadiová

Manganové oceli mají zvýšenou kalitelnost a mez kluzu. Obsah manganu ale nesmí přesáhnout mez 2 %, jelikož ocel se stává samokalitelná, což způsobuje ztrátu houževnatosti, zvýšení křehkosti a zhoršuje obrobitelnost. Typickým představitelem manganové pružinové oceli je 13 180. (5) (4)

Křemíkové oceli jsou často využívány pro výrobu pružinových drátů, což je zapříčiněno jeho příspěvkem ke zvýšení pevnosti a meze kluzu. Obdobně jako u manganu podíl křemíku by neměl přesahovat 2 %, při překročení této meze může hrozit náchylnost k hrubé krystalizaci a křehnutí. Tento druh ocelí je vhodný k zušlechťování. Příkladem křemíkové oceli běžně používané pro výrobu drátu je 13 270. (5) (4)

Chrom-křemíkové oceli jsou nejvíce využívány pro výrobu drátů. Chrom značně zvyšuje prokalitelnost oceli, taktéž dochází k nárůstu tvrdosti a odolnosti vůči opotřebení. Oceli tohoto typu mohou snášet teploty do 300°C. Tato odolnost vůči teplotám je dána odolností vůči popouštění. Příklady chrom-křemíkových slitin pro výrobu pružin jsou oceli 14 260 a 14 160. (5) (4)

Vanad slouží jako prvek zjemňující strukturu, čímž vylepšuje houževnatost, jelikož se účastní odkysličení a odsíření. Taktéž prospěšně přispívá pro stálost mechanických vlastností za tepla. Mezi obvyklé chrom-vanadiové pružinové oceli se řadí ocel 15 260. (5) (4)

Název dle legujícího prvku	EN ISO	ČSN	W.Nr.
Uhlíková	C 50E	12 051	1.1206
	C 85	12 090	1.1269
Manganová	-	13 180	1.1259
Křemíková	60 Si 7	13 270	1.5024
Chrom-křemíková	54 SiCr 6	14 260	1.7102
Chrom-vanadiová	51 CrV 4	15 260	1.8159
Chrom-křemík-vanadiová	54 SiCrV 6	-	1.8152

Tab. 3: Nejčastěji používané nelegované a nízkolegované oceli pro výrobu pružinových drátů

Všechny výše vyjmenované druhy ocelí se řadí mezi nízkolegované oceli, jejichž obsah legujících prvků nepřesahuje 5 %. Pružiny, které jsou vystavovány největším teplotám a namáháním, se vyrábí z vysokolegovaných ocelí třídy 19, které jsou legovány wolframem, vanadem a chromem, nebo také jsou vyráběny z ocelí rychlořezných. (5)(4)



## 2.3 Výroba drátů

Pro výrobu drátů se využívají technologie spadající pod objemové tváření. Rozdělují se dle průměru výstupního drátu, pro menší průměry (do 5 mm) se uplatňuje tažení drátu za studena a pro větší válcování drátů

### 2.3.1 Válcování drátů

Dráty vyrobené válcováním mají průměry 5-13 mm, a nemusí být jen kruhového průřezu. Polotovar pro válcování drátů je sochor. Jedná se o operaci prováděnou za tepla a konkrétně nad teplotou austenitizace, pro zlepšení houževnatosti a tvárnosti materiálu. Uspořádání válcovacích tratí se rozděluje na otevřené, polospojité a spojitě, rozdělení je z hlediska toho, jak se uspořádání tratí s časem měnilo. Hlavním rozdílem je rychlost válcování, kde otevřené a polospojité uspořádání dosahují maximální rychlosti  $9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , kdežto u spojitých rychlosti běžně dosahují  $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Počet průchodu, kterých je potřeba na vyvácování drátů je 16 až 29. Dráty po válcování jsou navinuty na cívky. (6)(7)



Obr. 1: Válcování drátů (8)

Zvýšení rychlosti válcování drátů způsobuje také zvýšení doválcovací teploty, a to z  $850^{\circ}\text{C}$  na  $1000^{\circ}\text{C}$ . To má vliv na vznik nerovnoměrné hrubé struktury a nárůst tvorby okujů. Pro odstranění těchto nežádoucích jevů, se využívá řízené ochlazování. Nejčastěji využívanou metodou řízeného ochlazování je Stelmor, kdy dochází k ochlazení drátu vodou na teplotu kolem  $800^{\circ}\text{C}$ . Následně drát v rozvinutém stavu putuje dopravníkem a je ochlazován na vzduchu, rychlost ochlazování je regulovaná dle typu oceli a požadovaných vlastností. (6)(7)

### 2.3.2 Tažení drátů

Tažením se vyrábějí dráty do 5 mm, taktéž nemusí být pouze kruhového průřezu. Při tažení drátu dochází nejen k redukování průměru ale i ke zlepšení jeho vlastnosti jako je pevnost a jakost povrchu. Drát se táhne vždy na několik tahu, kdy každým dalším tahem dochází ke zmenšování jeho průměru, na obr. 2 lze vidět jeden blok drátotahu. Na jednom stroji je takových bloků několik v sérii, jeden blok je tvořen průvlakem a bubnem. [6]

Jako polotovary pro tažení se využívají dráty válcované o průměru 5 mm. Konec polotovaru je opatřen hrotem, který je následně upnut do kleští a tažen. Při tažení dochází k průchodu drátu přes průvlak, kde dochází ke zmenšení jeho průměru a zároveň zvětšení délky. Průvlak je nástroj, který se skládá z jádra a objímky, kde jádro je část nástroje, které je bezprostředně v kontaktu s tvářeným materiálem a objímka slouží pro zachycení jádra, proto také se jádro vyrábí z kvalitnějších materiálů. Samotné jádro se skládá ze vstupního (mazacího) kuželu, který slouží pro snadnost zavádění drátu, pro souvislý průchod do pracovní části a za účelem mazání. Tažný (pracovní) kužel, složí pro tváření na požadovaný průřez. Kalibrační válec zaručuje rozměrovou přesnost a hladkost povrchu. Výstupní kužel chrání průvlak proti jeho poškození, při přetržení drátu. Mazání při tažení drátu je velice důležitým aspektem, jelikož má vliv na tření, tažnou sílu, životnost nástroje, teplotu a na výsledný povrch drátu. Pro různé druhy materiálu a průměry tažených drátů se aplikují různé druhy maziva. Dráty se nedají táhnout na jeden tah, proto po vyčerpání jejich plastických vlastností se zavádí mezioperační žihání. (7)



Obr. 2: Blok drátotažné linky (9)

## 2.4 Tepelné zpracování drátů

Tepelné zpracování drátu se zavádí pro dosažení co nejvýhodnějších mechanických vlastností materiálu nebo pro požadovanou strukturu. Rozděluje se na mezioperační tepelné zpracování a konečné.(7)

### 2.4.1 Rekrystalizační žíhání

Při tažení drátu za studena dochází k vyčerpání tvárných vlastností oceli, rekrystalizační žíhání slouží k obnovení těchto vlastností. Dochází k ohřevu materiálu na rekrystalizační teplotu, dle stupně tváření, následuje výdrž na dané teplotě a ochlazení. Důležitým je, aby teplota žíhání nepřekročila hranici teploty  $A_{c1}$ , neboť při překročení této teploty dochází k překrystalizaci.(4)(7)

### 2.4.2 Žíhání naměkko

Žíhání naměkko se provádí za účelem snížení tvrdosti oceli, u výroby drátu tažením je to využíván před konečným tzv. kalibračním tahem, nebo také pro zvětšení homogenizace struktury pro následné kalení. Cílem je získat globulární perlit. Při nejjednodušším žíhání naměkko se ocel zahřívá pod teplotu  $A_{c1}$ , a následuje několikahodinová výdrž na dané teplotě. U martenzitických a bainitických výchozích struktur dochází k relativně rychlému vylučování a shlukování karbidu, zatímco u perlitu je tato přeměna pomalejší, a to v závislosti, čím hrubší lamely, tím je prodleva delší. Pro hrubý lamelární perlit je tento způsob žíhání nevhodný, neboť dochází k tvorbě hrubého globulárního perlitu, což je nežádoucí struktura pro kalení. Jedinou možností, jak při výchozí struktuře s hrubým lamelárním perlit dosáhnou jemného globulárního, je ohřát ocel nad teplotu  $A_{c1}$ . Po ohřevu dojde k částečné austenitizaci perlitu, a z těchto nových zárodků při ochlazení se budou vylučovat jemné a stejnoměrně uspořádané karbidy. S rostoucím obsahem uhlíku také stoupá doba rozpadu karbidu, proto se taky zvyšuje teplota žíhání. (4)(10)(7)

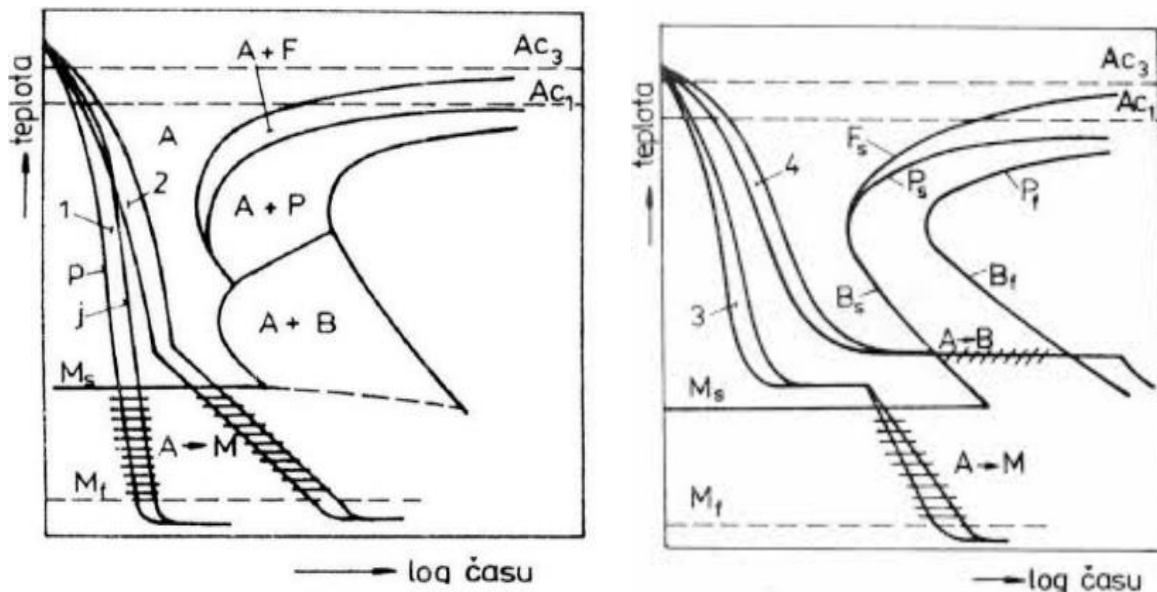
### 2.4.3 Patentování

Patentování je tepelné zpracování, které ne nejčastěji spojované právě s výrobou drátů. Využívá se zejména pro získání co nevhodnějších mechanických vlastností a strukturu pro následné tažení. Obvykle je tato operace již zabudovaná do linky drátotahu. Zpočátku je odporově drát zahřát na austenitizační teplotu, po které následuje ochlazení na teplotu kolem  $500^{\circ}\text{C}$ . Pro výdrž na teplotě, se zpravidla využívají olověné nebo solné lázně. Na konec dochází k ochlazení na vzduchu. Tento druh tepelného zpracování je podobný izotermickému zušlechťování, kde dochází k izotermickému rozpadu austenitu na horní bainit nebo jemný perlit – troosit. (4)(10)

### 2.4.4 Kalení

Kalení se provádí za účelem zvýšení tvrdosti oceli. Výchozí struktura po kalení je martenzit, bainit nebo případně jemný lamelární perlit – troosit. Ocel se zahřeje na austenitizační teplotu a následně se prudce ochladí, pro podeutektoidní oceli se teplota pohybuje  $30-50^{\circ}\text{C}$  nad teplotou  $A_{c3}$ , pro podeutektoidní nad  $A_{c1}$ , oceli které jsou legovány karbidotvornými prvky může být kalicí teplota i mnohem vyšší. Po zahřátí materiálu na austenitizační teplotu následuje výdrž na této teplotě, aby došlo k co největšímu rozpuštění uhlíku v austenitu. Při překročení nebo podkročení kalicích teplot snižujeme kvalitu výchozí struktury a tím i mechanické vlastnosti. Pro dosažení martenzitické struktury, musí být rychlost ochlazení vyšší nebo sejná jako kritická rychlost. Kritická rychlost je rychlost

ochlazování, při které nedochází k přeměně austenitu na perlit nebo bainit. Prakticky po každém kalení následuje popouštění.



Obr. 3: vpravo: 1) Kalení základní, 2) Kalení lomené, vlevo: 3) Kalení termální, 4) Izotermické zušlechťování(1)

Nejjednodušší a nejčastěji využívané je kalení základní. Dochází k ochlazení z austenitizační teploty na teplotu v místnosti, prostřednictvím jednoho media, nejběžnější voda, olej, vzduch. Ochlazení olejem a vzduchem se jeví jako více bezpečné, z důvodu menšího rozdílu teplot ve středu a na povrchu materiálu, což vede k minimalizaci rizika vzniku trhlin a deformace. (4)(10)

Kalení přerušované (lomené), tento druh využívá dvou prostředí s rozdílným odvodem tepla. První prostředí se volí s rychlejší ochlazovací schopností, aby rychlost ochlazování v oblasti perlitické přeměny byla intenzivnější, což zabraňuje vyučování perlitu. Druhé prostředí s nižší ochlazovací schopností zaručuje ochlazování v oblasti martenzitické přeměny. Využívá se zejména v případech kdy, při základním kalení nedochází k dosažení potřebné tvrdosti, z důvodu nedostatečné rychlosti ochlazování, nebo naopak rychlost ochlazování je příliš velká a dochází k prskání materiálu.(4) (10)

Kalení termické se využívá k vyrovnání teplot na povrchu a uvnitř materiálu. Z kalící teploty je materiál ochlazován nad teplotu  $M_s$ , po ochlazení následuje výdrž na dané teplotě pro snížení rozdílu teplot na povrchu a uvnitř. Při výdrži na dané teplotě je důležité, aby medium mělo teplotu nad  $M_s$  a prodleva výdrže nezasahovala do oblasti tvorby bainitu. Následné ochlazení na teplotu prostředí se provádí většinou na vzduchu. Pro daný druh kalení musí mít materiál náležitým tvar IRA diagramu. (4) (10)

Izotermické zušlechťování umožňuje materiál nepopouštět, a to při zachování stejných mechanických vlastností jako materiál kalený a popouštěný, dokonce u některých materiálu dochází ke zvýšení houževnatosti a meze únavy. Tvar křivky chladnutí je obdobný jako u kalení termického, ale setrvání na teplotě nad  $M_s$  se provádí až ke konci bainitické transformace. Konečné ochlazování je prováděno na vzduchu. (4) (10)

### 2.4.5 Popouštění

Popouštění je tepelné zpracování následující hned po kalení. Účelem popouštění je rozpuštění zbytkového austenitu, snížení tvrdosti, zvýšení houževnatosti, odstranění vnitřního pnutí. Popouštění se provádí zahřátím na určitou teplotu, setrváním na dané teplotě a poté se materiál nechá vychladit. Teplota ohřevu je stanovena typem oceli a požadavky na výstupní vlastnosti, nikdy však nepřekračuje hodnotu  $A_{c1}$ . Popouštění kalených ocelí se rozdělují na 4 stádia dle teplot, takové rozdělení není úplně striktní a jednotlivé pochody se mohou navzájem prolínat. (4)(10)

První stadium popouštění (cca do  $200^{\circ}\text{C}$ ) – dochází k rozpadu tetragonálního martenzitu na karbid  $\varepsilon$  ( $\text{Fe}_{2,4}\text{C}$ ) a nízkouhlíkový martenzit. Karbid  $\varepsilon$  je koherentní precipitát, který se vyskytuje zejména na hranicích nízkouhlíkového martenzitu, tento jev slouží jako mechanismus k vytvrzení, který v značné míře nahrazuje ztrátu tvrdosti při přeměně tetragonálního martenzitu na martenzit nízkouhlíkový, v sumě tedy nedochází k velké ztrátě tvrdosti. (10)(1)

Druhé stadium popouštění (cca  $200\text{--}300^{\circ}\text{C}$ ) – vzniká struktura bainitického typu jako produkt rozpadu zbytkového austenitu, vliv na změnu měrného objemu. (7) (1)

Třetí stadium popouštění (cca nad  $250^{\circ}\text{C}$ ) – rozpad nízkouhlíkového martenzitu na ferit a cementit. Při nižších teplotách se cementit vyskytuje v tyčkové podobě, vzniká na místě zároveň rozpouštějícího se karbidu  $\varepsilon$ , další uhlík je čerpán z transformujícího se nízkouhlíkového martenzitu, za vzniku feritu. Za teplot nad  $400^{\circ}\text{C}$  dochází k přeměně cementitu z tyčinkového na kuličkový. Výsledkem všech těchto pochodů je snížení tvrdosti, zvýšení tvárnosti a houževnatosti, snížení pnutí. Výsledná struktura je perliticko-cementická – sorbit. (10)(1)

Čtvrté stadium popouštění (cca na  $500^{\circ}\text{C}$ ) – nadále pokračuje snížení tvrdosti za současné zvýšení houževnatosti a plasticity, vlivem hrubnutí cementitu a feritického zrna. U legovaných ocelí, které jsou legovány karbidotvornými prvky, může docházet k difuzi těchto prvků za vzniku speciálních karbidů s jinou krystalografickou mřížkou, než má cementit, což může mít za následek zvyšování tvrdosti, jinak označovaná sekundární tvrdost. (10)(1)

Obecně při zvyšování stupně popouštění vede ke zvyšování houževnatosti, oceli které jsou náchylné na popouštěcí křehkost tato závislost nemusí být zachována. (10)(1)



### 3 Příčiny a důsledky ztráty houževnatosti u ocelí

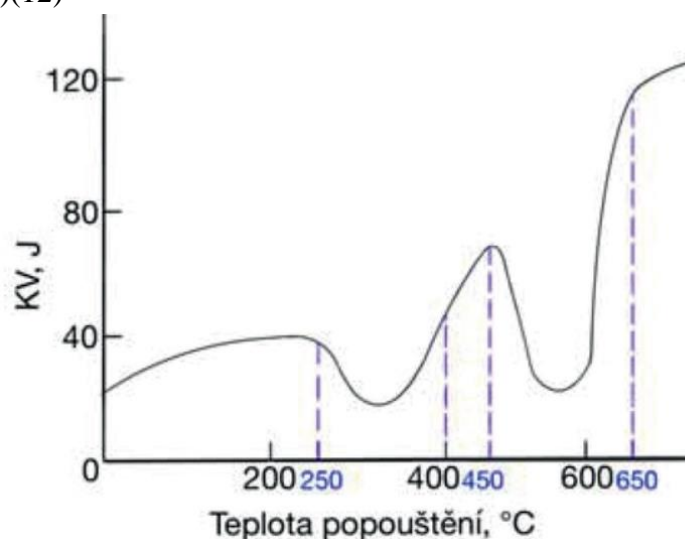
Ke ztrátě houževnatosti ocelových součástí může dojít z mnoha různých důvodů, jelikož příčiny zkřehnutí se mohou vyskytnout od výroby až po samotné použití. Křehké porušení součástí se jeví jako velice nebezpečné, neboť porušení může nastat bez jakékoliv zjevné deformace, což znemožní libovolné opatření, aby k porušení nedošlo. Dochází tedy k náhlému lomu. Z toho důvodu je třeba dbát na procesy kterými bude materiál zpracován a jakým podmínkám vystavován.

Nejčastější příčiny zkřehnutí(11):

- Vlastní křehkost oceli a jeho strukturních složek (karbidy, martenzit atd.)
- Zkřehnutí tvářením za studena
- Zkřehnutí výskytem nečistot v oceli
- Zkřehnutí vnitřním napětím
- Zkřehnutí precipitací tvrdých částic
- Zkřehnutí vlivem výskytu plynu v kovech

#### 3.1 Popouštěcí křehkost

Popouštěcí křehkostí se nazývá jev, při kterém dochází ke snížení houževnatosti po popouštění. Jak lze vidět na obr. 4 vyskytuje se ve dvou intervalech teplot, v intervalu od 250 až 400 °C se nachází nízkoteplotní popouštěcí křehkost (NTPK) a v rozmezí teplot 450 až 650 °C vysokoteplotní popouštěcí křehkost (VTPK). Náchylnost oceli na daný druh ztráty houževnatosti má vliv její chemické složení, obzvláště výskyt povrchově aktivních prvků např. P, S, Sb, Sn, As. (1)(12)



Obr. 4: Výskyt popouštěcí křehkosti (13)

##### 3.1.1 Nízkoteplotní popouštěcí křehkost – NTPK

Nízkoteplotní popouštěcí křehkost je často taky označovaná jako nevratná popouštěcí křehkosti. Název je odvozen z jedné charakteristické vlastnosti, kterou je neschopnost vyvolat daný duh křehkosti opakovaně. Materiál který se NTPK jednou zbavil (např. popouštěním za vyšší teploty), při dalším popouštění za teplot nižších již nezkřehne. Nízkoteplotní popouštěcí křehkost se v jisté míře objevuje jak u uhlíkové, tak i legované oceli. (1)(12)

NTPK se projevuje na lomové ploše dvěma druhy štěpného lomu, interkrystalický a transkrystalický, oba mají ale odlišné příčiny vzniku. V případě interkrystalického štěpného lomu, kdy dochází k porušení na hranicích původních austenitických zrn, je důvodem vzniku NTPK segregace povrchové aktivních prvků. K segregaci povrchové aktivních prvků, zejména fosforu, dochází na hranicích původních austenitických zrn se současnou precipitací karbidů na těchto místech. Právě souhrn těchto faktorů má vliv na výskyt interkrystalického lomu. Tento druh porušení se u NTPK vyskytuje nejčastěji. Při transkrystalickém štěpném lomu, kdy porušení materiálu nastává napříč zrny podél významných krystalografických rovin, je spojován důvod vzniku NTKP s rozpadem zbytkového austenitu. Rozpad zbytkového austenitu zapříčiní precipitaci cementitu na povrch martenzitu, to způsobí vznik zárodku trhlin uvnitř původního austenitického zrna. Legující prvky, které zabraňují vylučování uhlíku ze zbytkového austenitu (Al, Si), posouvají interval teplot NTPK k vyšším teplotám. Zvyšování čistoty materiálu se zdá být jediný způsob, jak NTPK zabránit. NTPK je neodstranitelná, neboť regulací podmínek popouštění ji nelze významně ovlivnit.(12)(1)(14)

### 3.1.2 Vysokoteplotní popouštěcí křehkost – VTPK

VTPK se vyskytuje jen u legovaných ocelí, a to v případě výdrže na intervalu teplot 450 až 600 °C (izotermická), nebo při zpomaleném ochlazování v tomto intervalu (anizotermická) při popouštění za vyšších teplot (nad 600 °C). V obou případech se jedná o děje vratné, lze je vyvolat a následně odstranit opakovaně, proto také se nazývá jako vratná popouštěcí křehkost. (1)(15)

Zvyšování obsahu prvků jako P, Ar, Sb, Sn má za následky zvýšení intenzity vývoje VTPK. Tyto prvky segregují na hranicích zrn, čímž snižují kohezní pevnost. U ocelí s vysokou čistotou se VTPK neprojevuje. Některé legující prvky např. Cr, Ni, Si, Mn taktéž zvyšují náchylnost oceli na snížení houževnatosti. Obzvlášť silný projev VTPK má u ocelí chrom-niklových, chrom-manganových a chrom-mangan-křemíkových. Přidáním do oceli 0,2 až 0,7 % molybdenu, dojde ke snížení vývoje VTPK. Při větších koncentracích molybdenu se tento efekt nevyskytuje. Taktéž kladný vliv na vývoj VTPK má i wolfram, při koncentracích 0,6 až 1,2 %. Se snížením obsahu uhlíku se efekt VTPK slábne, ale nedojde k úplnému odstranění. Velikost původního austenitického zrna hraje také důležitou roli, s hrubnutím zrna dochází také ke snížení houževnatosti. Růst popouštěcí křehkosti je pozorován nejen u ocelí s výchozí martenzitickou strukturou ale také i u ocelí s bainitickou a perlitickou strukturou. K maximálnímu zkřehnutí jsou vystavovány právě struktury martenzitické, a nejméně perlitické. (15)

Metody zamezení vzniku VTPK:

Jedním ze způsobů, jakým lze VTPK omezit, je správným chemickým složením. Zejména omezit výskyt fosforu ve slitině, jelikož je hlavním prvkem přispívajícím ke snížení houževnatosti. Snížení VTPK je také možné dosáhnout vhodnými legujícími prvky. Molybden může sloužit jako prvek značně snižující zkřehnutí. Také je možné částečně omezit vývoj křehnutí snížením obsahu legujících prvků jako nikl nebo křemík. V tomto případě ale je třeba brát na vědomí jejich účinek na strukturu a mechanické vlastnosti.

Zjemnění austenitického zrna kladně přispívá ke snížení vývoje popouštěcí křehkosti, kdy mechanismem zjemnění může sloužit legování karbidotvornými prvky. Zmenšení austenitického zrna zároveň přivede ke zlepšení mechanických vlastností, jako pevnost a houževnatost. Ve značné míře lze anizotermickou VTPK (při popouštění nad 600 °C) odstranit zrychlením ochlazování, přičemž ke zrychlenému ochlazování nedochází po celou

dobu, ale pouze v intervalu teplot, kdy je materiál ke zkřehnutí nejvíce náchylný (450 až 600°C). V případě zrychleného ochlazování zejména větších součástí se musí dbát na rychlost ochlazování, jelikož dochází k nestejnomylnému ochlazování v celém průřezu, a to může vést ke zvýšení vnitřních napětí. Pro snížení náchylnosti k VTPK lze využít termomechanického zpracování.(15)

## 3.2 Vodíková křehkost

Vodíkovou křehkostí se nazývá jev, při kterém dochází k degradaci mechanických vlastností kovů, zejména houževnatosti a tažnosti, působením vodíku. Příčinu vzniku vodíkové křehkosti nevyvolává pouze jeden jev, existuje více mechanismů, jakým způsobem vodík negativně ovlivňuje mechanické vlastnosti. Vodíkovou křehkost můžeme rozdělit na vratnou a nevratnou. U vratné existují procesy, kterými lze navrátit vlastnosti oceli a u nevratné dochází k nenávratné degradaci. Vliv na vývoj vodíkové křehkosti je dán mnohými faktory jako difuze a pronikání vodíku, stav povrchu, struktura, chemické složení, mechanické namáhání, které umožňuje vytvoření strukturních poruch, ve kterých se vodík nashromažďuje.(16)

### 3.2.1 Nevratná vodíková křehkost

Pokud je křehkost stále zachovaná i při odstranění vodíku z oceli (např. žíháním), tak v tom případě se hovoří o křehkosti nevratné. U nízkolegovaných oceli se nevratná vodíková křehkost může vyskytnout např. při ochlazování výkovku nebo svarových housenek. kdy v důsledku snížení rozpustnosti vodíku dochází k jeho nashromažďování ve vnitřních nespojitostech materiálu (bublina), kde dochází k vytvoření molekulárního vodíku, čímž zvyšuje lokální tlak a dochází ke vzniku trhlin. Jako zárodek prvotní trhliny slouží různé nestejnorodosti materiálu např. hranice zrn, karbidy, nekovové vměstky. Trhlinka roste převážně podél působení největšího smykového napětí. Jako zárodek prvotních bublin u materiálu s průmyslovou čistotou nejčastěji slouží nekovové vměstky, zejména sulfidy (MnS). U materiálu s vyšší čistotou je to Ti (TiC, TiN), Al (AlN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) nebo Si (SiO<sub>2</sub>). (17)

### 3.2.2 Vratná vodíková křehkost

Pokud po odstranění vodíku z materiálu, efekty spojené s vodíkem zmizí, v tom případě se jedná o vratnou vodíkovou křehkost. Dnes neexistuje jednotná teorie, pomocí které by se daly objasnit všechny zákonitosti pozorované u vratné vodíkové křehkosti. (17)

Teorie vzniku vratné vodíkové křehkosti:

Vodíkem stimulovaná dekoheze (hydrogen-enhanced decohesion-HEDE), vysvětluje zvýšení křehkosti materiálu následujícím způsobem, vodík nahromaděný uvnitř materiálu, oslabuje meziatomární vazby v mřížce kovu, v důsledku čehož napětí potřebné pro narušení těchto vazeb se stane nižším než napětí potřebné pro plastickou deformaci. Z toho důvodů dojde právě ke křehkému porušení, bez zjevné účasti plastické deformace. (17)

Lokalizovaná plasticita indukovaná vodíkem (hydrogen enhanced localized plasticity-HELP), jako mechanismus vedoucí ke zvýšení křehkosti. Dříve se předpokládalo, že vodík stejně jiné intersticiální rozpuštěné prvky (např. uhlík, dusík), vytváří Cottlerovu atmosféru na dislokacích, čímž blokuje anebo zpomaluje pohyb dislokací. Nicméně později byly objeveny stopy plastické deformace na povrchu porušeného materiálu, který byl zkřehlý vodíkem. Na základě těchto pozorování byl vyzdvižen předpoklad, že vodík naopak zvyšuje pohyb dislokací. Dle tohoto předpokladu byl zformulovaný mechanismus zvýšení křehkosti HELP. Daný mechanismus předpokládá, že makroskopicky křehký lom je způsoben vysoce



lokalizovaným plastickým tokem mikro-objemu materiálu obohacený vodíkem, tj. v malé oblasti v čele trhliny. (17)

Adsorpčně indukované dislokační emise (adsorption-induced dislocation emission-AIDE), předpokládá adsorpci vodíku na povrch materiálu včetně ústí trhlin. Při adsorpci vodíku dochází ke snížení povrchové energie a takovým způsobem umožní emisi dislokací v blízkosti čela trhliny. Přestože mechanismus AIDE je hlavně založen na emisi dislokací, také zahrnuje i tvorbu mikro pór vznikající v plastické zóně před trhlinou (stejně jako u obyčejného tvarného lomu). Hlavním rozdílem mezi AIDE a HELP, je v tom, že AIDE počítá pouze z adsorbci vodíku na povrchu, nikoliv ale na nahromadování vodíku uvnitř.(17)

Vakanční mechanismus (hydrogen-enhanced strain-induced vacancies-HESIV), je založen na mnoha studiích ukazujících vliv vodíku na vakance (materiálová vada). Vodík ve značné míře zvyšuje koncentraci vakancí a jejich stabilitu, snižují jejich pohyb a také přispívá k jejich shlukování. Nahromadění vakancí přivede ke vzniku mikro-póru, které poslouží jako zárodky pro trhlinu. (17)

## 4 Mechanismy porušování

Pod pojmem porušení se myslí proces, při kterém během zatěžování, dochází k iniciaci a rozvoji trhliny v materiálu. K porušení materiálu dochází v důsledku vzniku několika trhlín nebo sloučení jich v jednu hlavní, podél které dochází k úplnému porušení. Vědní obor, který studuje danou problematiku se nazývá lomová mechanika. Popisuje materiál s ohledem na realitu, tj. materiál není dokonale homogenní a může obsahovat velkou řadu vnitřních i vnějších vad, které mohou při působení vnějších vlivů přivést k jeho destrukci. Porušení materiálu dle velikosti plastické deformace můžeme rozdělit na tvárné a štěpné. Mechanismus zárodku trhliny je ale v obou případech stejný.

### 4.1 Iniclace a šíření trhliny

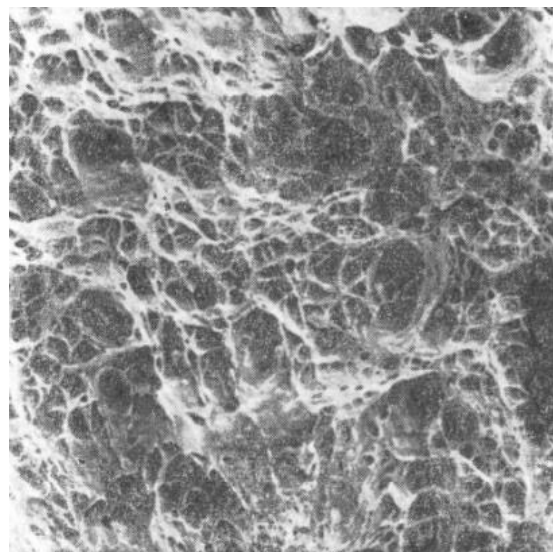
Ve většině případu příčinou iniciací trhliny je shlukování pohybujících se dislokací v okolí nějaké překážky (např. hranice zrn, rozhraní fází, vměstky). Další šíření trhliny je způsobeno tím, že lokální napětí (v blízkosti čela trhliny) je větší nežli v ostatním průřezu materiálu, a to takovým způsobem, čím blíže k čelu trhliny tím je napětí větší.

#### 4.1.1 Tvárný lom

Tento druh lomu je taky označován jako bezpečný lom, nedochází k němu náhle a kvůli tomu je možné uskutečnit jeho odhalení, kterým lze předejít případným haváriím. Způsobeno je to výskytem vysokého podílu plastické deformace při šíření trhliny. Takový lom je energeticky velice náročný, právě kvůli tomu že značná část energie je absorbována plastickou deformací, takové šíření je označované jako tzv. stabilní šíření lomu. (18) (19)

V případě houževnatých materiálu v blízkosti čela trhliny vzniká plastická zóna, která způsobuje otupování (zvyšuje poloměr) čela trhliny. Otupování trhliny přivádí ke snížení lokálního napětí, v případě kdy napětí klesne na hodnotu nižší než je potřebná k vykonání plastické deformace, šíření trhliny bude zastaveno. U materiálu s houževnatým lomem dochází v plastické zóně k vytváření mikro-dutin, které se při šíření trhliny propojují. Vytváření daných dutin je často způsobeno vměstky, které nejsou schopny se plasticky deformovat. Šíření trhliny je v houževnatých materiálech pomalé, což je vyvoláno ve značné míře přítomnosti plastické deformace. (18) (19)

Jedním z dalších kritérií, kterým můžeme posuzovat charakter lomu, je způsob jeho šíření vůči hranicím zrn. Šíření trhliny v případě tvárného se z větší části uskutečňuje přes zrna (transkystalický lom). Tvárný lom při pohledu pouhým okem se dá částečně identifikovat, dle matného vzhledu lomové plochy a výrazného podílu plastické deformace. Nicméně tímto způsobem to nelze vždy posuzovat, často může být zavádějící, proto se pro vyšetření využívá zařízení umožňující zblízka posoudit charakter plochy (např. řádkovací elektronový mikroskop). Struktura tvárného lomu viz obr. 5. (18) (19)



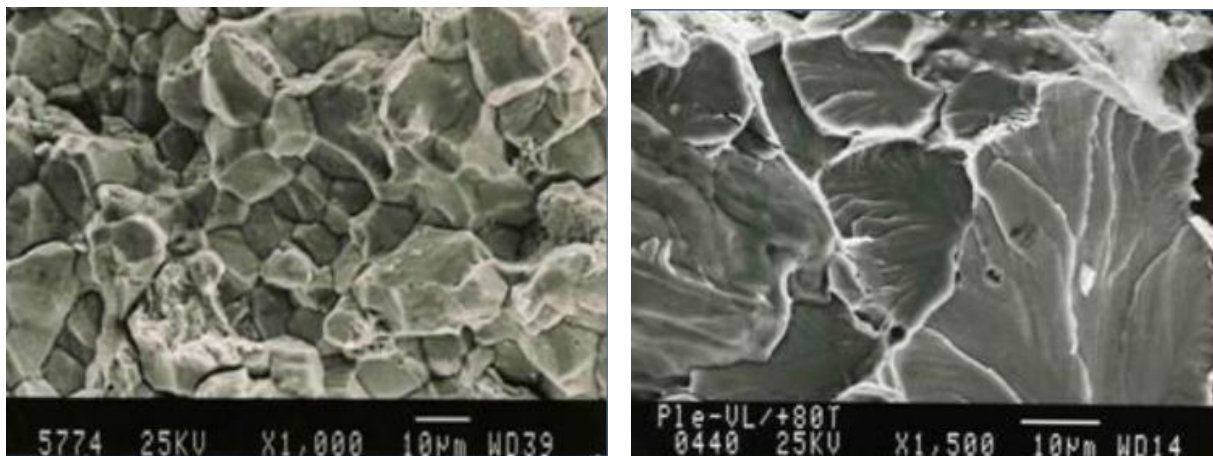
Obr. 5: Struktura tvárného lomu(2)

#### 4.1.2 Štěpný lom

Daný druh lomu je specifikován vysokou rychlostí růstu trhliny, kde rychlost šíření trhliny se blíží rychlosti zvuku v daném materiálu. To je způsobeno velice malou přítomností plastické deformace, při šíření trhliny. Také je označován jako nebezpečný lom, jelikož materiál nevykazuje žádné předběžné plastické deformace a k lomu dochází náhle, což znemožňuje případnou prevenci. Z důvodu absence plastických deformací, je štěpný lom méně energeticky pracný, tj. materiál při porušení absorbuje menší energii.

Obdobně jako u tvárného lomu dochází ke koncentraci napětí v čele trhliny. Rozdílem je vysoká hodnota meze kluzu u křehkých materiálu, která neumožňuje plastickou deformaci, trhlina je ostrá (poloměr zaoblení čela je malý). V momentě, kdy bude překročeno kritické napětí, dojde k porušení meziatomových vazeb a nastává tzv. nestabilní šíření lomu. Také je důležité zmínit, že pro takové nestabilní šíření trhliny, musí velikost trhliny dosáhnout kritické hodnoty. Předpovědět křehké chování s jistotou vždy nelze, jelikož materiály, které na první pohled by měly vykazovat houževnaté chování, se taky mohou porušit křehce. Je to způsobeno některými faktory, které mají vliv na lomové chování materiálu, např. nízká teplota, složitý stav napjatosti a rychlost zatěžování. (18) (2)

Z hlediska šíření lomu vůči hranicím zrn, se štěpné lomy rozdělují na transkystalické (obr. 6 vlevo) a interkystalické (obr. 6 vpravo). Plochy lomů v případě štěpného porušení jsou minimálně nebo vůbec nedeformované, kvůli velice malému podílu plastické deformace. Při pohledu na lomovou plochu pouhým okem, lze křehký lom identifikovat lesklým povrchem a malou nebo žádnou mírou deformace lomové plochy. Pro přesnější posudek se využívají řádkovací elektronové mikroskopy. (18) (2)



Obr. 6: vlevo: transkystalický štěpný lom, vpravo: interkystalický štěpný lom (20)

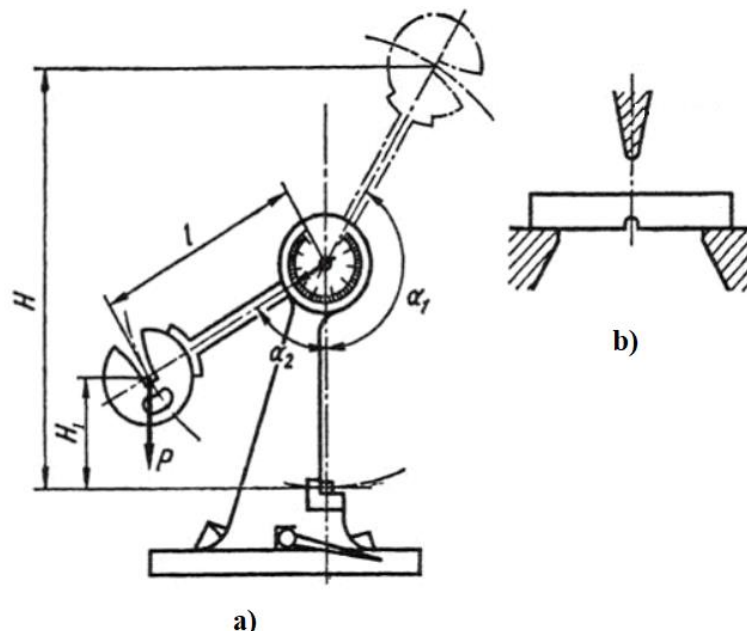
## 5 Zkoušky houževnatosti

Houževnatost je mechanická vlastnost materiálu a je definovaná jako schopnost materiálu absorbovat energii ve formě plastické deformace. Nebo také se dá definovat jako míra odolnosti materiálu vůči vytvoření křehkého lomu. Opakem houževnatosti je křehkost, kde materiál při namáhání je porušen bez viditelné plastické deformace. Křehké porušení není způsobeno pouze nízkou jakostí materiálu, ale je to závislost na mnoha proměnných např. teplota, výskyt povrchových a vnitřních vad případně vrubu nebo zvýšená rychlost deformace.

Zkoušky materiálu, které se provádí rovnoměrně zvyšujícím se namáháním (statické), nedávají úplnou charakteristiku o spolehlivosti materiálu. Proto je také nebytné pro určení kompletních charakteristik materiálu je zkoušet za podmínek přiblížených k reálným, kdy vliv určitých faktorů (teplota, koncentrátor napětí, rychlost deformace) mohou přivést ke křehkému chování. Z těchto důvodů jsou vhodnější pro sledování neprostředně houževnatosti, zkoušky dynamické.

### 5.1 Rázová zkouška v ohybu – dle Charpyho

Metoda je založená na přeražení zkušební vzorku jedním úderem kyvadlového kladiva, za účelem zjištění potřebné energie pro jeho přeražení. Vzorek je opatřen vrubem, který slouží jako koncentrátor napětí a tím zajišťuje nashromáždění deformace v blízkém okolí vrubu. Zkušební vzorek se umístí na dvě podpěry, vrubem na opačnou stranu vůči nárazu kladiva a následuje jeho přeražení. Výsledkem dané zkoušky je absorbovaná energie  $K$  [J], kterou odečteme ze stupnice, udává energii spotřebovanou materiálem při jeho přeražení. Takto stanovená hodnota se zřejmě nedá přímo používat pro výpočty při návrhu součástí, slouží pouze jako porovnávací hodnota. Proto aby výsledky takto provedené zkoušky byly relevantní, musí se provádět dle norem (aktuální norma ČSN EN ISO 148-1). (21)

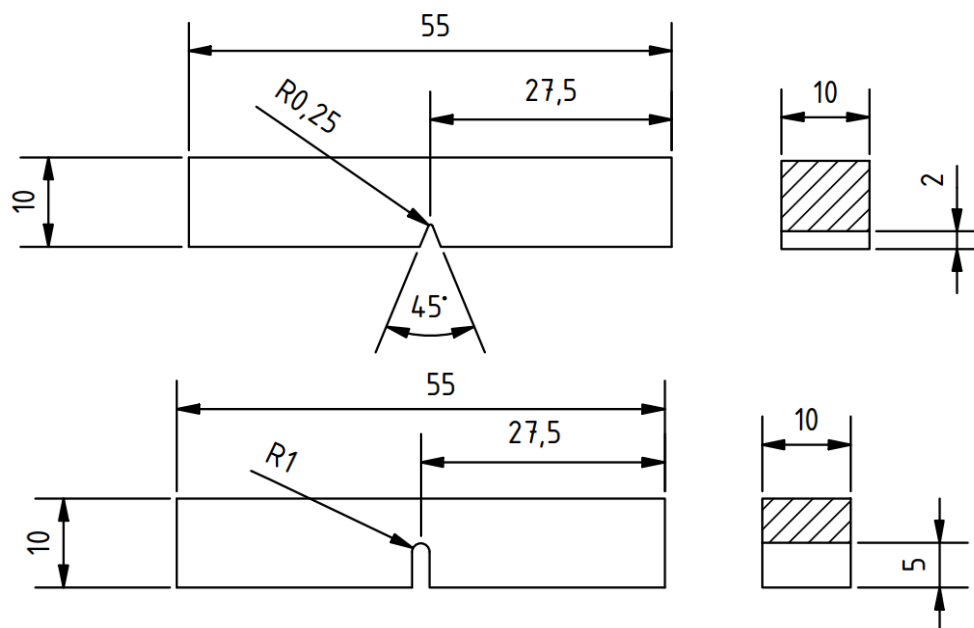


Obr. 7 a) Schéma Charpyho kladiva b) polohování zkušební vzorku (22)

Po přeražení zkušební vzorku lze zjišťovat podíl tvárného a štěpného lomu. Lze jí provádět mnoha způsoby, principem jednoho z nich spočívá ve změření délky a šířky štěpné plochy. Následně dle naměřených hodnot odečíst z tabulky procenta tvárného lomu. Dalším způsobem je pořídit fotografii lomené plochy s dostatečným zvětšením a následně změřit plochu štěpného lomu. V dnešní době se měření provádí pomocí příslušných softwarů, dříve se využívalo planimetru. Z této hodnoty lze dále dopočítat procentní podíl štěpného a tvárného lomu.(23)

### 5.1.1 Zkušební vzorky – rozměry a tvary vrubu

Při zkoušení materiálu na razový ohyb dle Charpyho se standartně používá zkušební materiál o délce 55 mm čtvercového průřezu o délce hrany 10 mm. Pokud nelze z materiálu vyrobít vzorek s takovými rozměry, je možné použít vzorky o menší tloušťce 7,5 mm, 5 mm, a 2,5 mm. V případě rozdílných tloušťek ale nesmíme materiály mezi sebou porovnávat. Zkušební vzorek je opatřen v polovině své délky vrubem, nejběžněji s U nebo V tvarem. Rozdílné tvary vrubu způsobují ve výsledku jiné hodnoty vrubové houževnatosti. Zapříčiněno je to tím, jakým způsobem je napětí ve vzorku rozkládáno, jaké jsou deformované objemy. Všechny rozměry vrubu jsou normalizované. V-vrub je definovaný úhlem rozevření 45°, hloubkou vrubu 2 mm a poloměrem v kořeni 0,25 mm. Vrub tvaru U musí mít hloubku 5 mm a poloměr v kořeni 1 mm. Detailnější rozměry vzorku viz obr. 8. Dle typu vrubu se se mění značení hodnoty nárazové práce, pro V-vrub je značení KV a pro U-vrub je KU. (21)



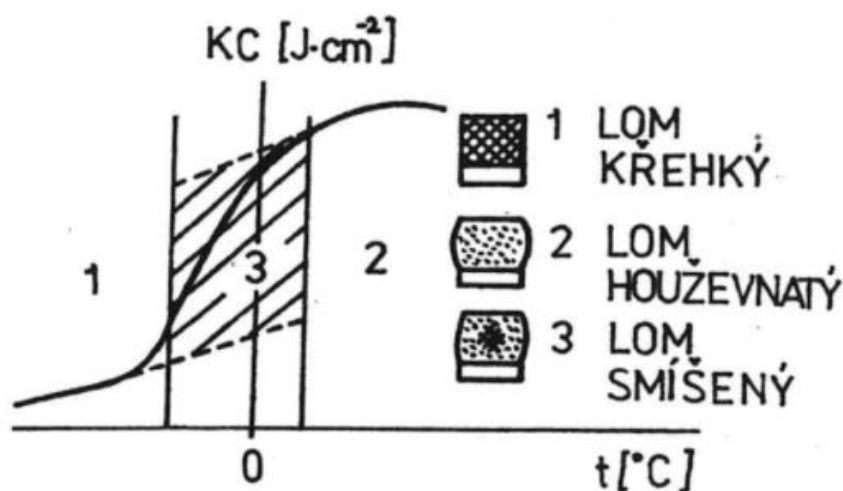
Obr. 8 Rozměry zkušebních vzorků pro Charpyho zkoušku (V-vrub nahoře, U-vrub dole)

Hloubka vrubu je parametr, který umožňuje změnit výstupní hodnoty zkoušky, nejvíc se to projeví u houževnatého materiálu. U takových materiálů při nárazu kladiva je značná část objemu plasticky deformovaná právě v blízkosti vrubu. Zvyšováním hloubky řezu snížíme deformovaný objem a s tím i vrubovou houževnatost. U křehkého materiálu se tato závislost neprojevuje, jelikož podíl plastické deformace je minimální. Nejvýhodněji z hlediska spotřebované práce je zkušební materiál dělit takovým způsobem, aby břit kladiva narážel

kolmo na směr, ve kterém byl materiál tvářen. Je to zapříčiněno rozdílnými vlastnosti tvářených materiálu v různých směrech. (21)

### 5.1.2 Vliv teploty – tranzitní teplota

Nárazová práce se nezkoumá jen při teplotách okolí, která se pohybuje kolem 23 °C, ale také za vyšších a nižších. Provedením řady zkoušek, dostaneme graf závislosti houževnatosti na teplotě, dle kterého můžeme posuzovat chování materiálu za různých teplot. Takto vzniklá křivka se nazývá Vidalova. U ocelí je pozorovaná závislost, při které snižování teploty vede ke snižování houževnatosti, k takovému poklesu může docházet strmě v určitém intervalu teplot nebo pozvolně. Totéž je pozorováno i z charakteru lomových ploch, kdy za vyšších teplot převládá lom tvárný a se snižující se teplotou začíná se zvětšovat plocha štěpného lomu. (21)



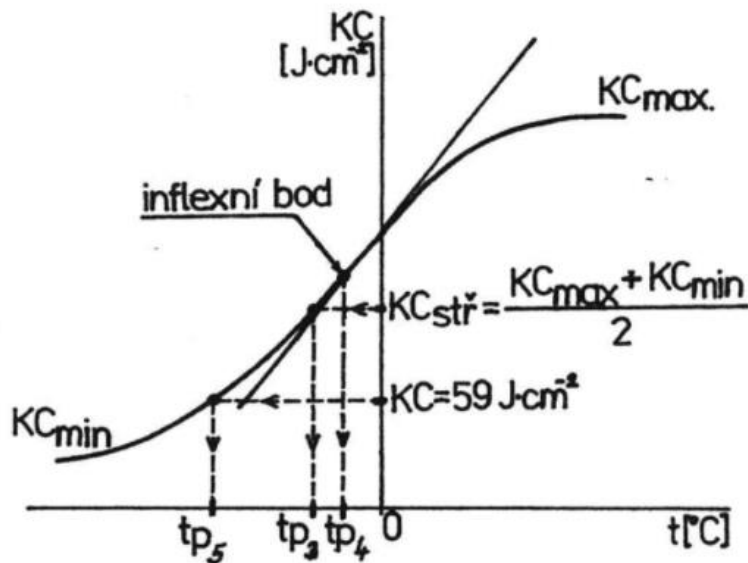
Obr. 9: Teplotní závislost houževnatosti na teplotě, charaktery lomu (21)

Na obr. 9 je vidět interval teplot, ve kterém dochází k přechodu z houževnatého lomu na lom štěpný. V tomto intervalu leží tzv. tranzitní teplota, která je pro praxi velice důležitá. Pro určení tranzitní teploty není stanovena jednotná definice, existuje několik definic, dle kterých ji můžeme stanovit. Tranzitní neboli přechodová teplota se běžně označuje  $t_p$ . (21)

Způsoby stanovení tranzitní teploty  $t_p$  (21):

- Nejnižší teplota, při které je v celém průřezu lomové plochy zastoupen tvárný lom
- Teplota při které je podíl tvárního lomu je stejný jako štěpného (1:1)
- Teplota při které nárazová práce je rovna střední vrubové houževnatosti, která je se počítá:  $K_{stř} = \frac{K_{max} + K_{min}}{2}$
- Teplota která odpovídá inflexnímu bodu křivky teplotní závislosti
- Teplota odpovídající domluvené hodnotě nárazové práce např. pro nízkouhlíkové oceli je to teplota, která odpovídá nárazové práce  $K = 27$  J. Tento způsob se používá pro značení ocelí.

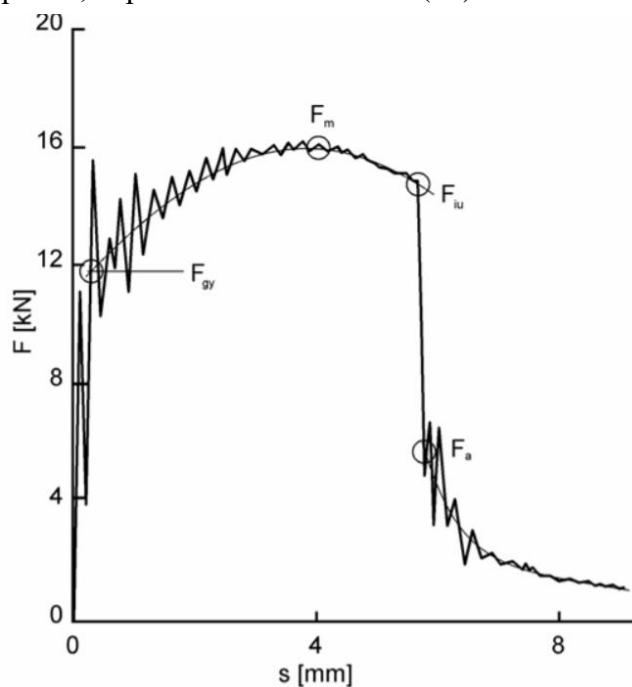
Na obr. 10 lze vidět výstupy rozdílných metod určování tranzitní teploty.



Obr. 10: Metody stanovení tranzitní teploty (21)

## 5.2 Zkouška rázem v ohybu – Instrumentovaná

Na rozdíl od obyčejné zkoušky rázem v ohybu instrumentovaná zkouška má navíc jako výstup závislost síly na průhybu. Tedy dochází ke klasickému zkoušení jako např. dle Charpyho, ale navíc je zkušební zařízení opatřeno snímači, které umožňují zaznamenávat průběh síly a průhybu zkušebního tělesa. Takto provedená zkouška může poskytnout detailnější charakteristiku o lomovém chování materiálu, jelikož různé materiály mohou mít stejnou energii potřebnou pro přeražení tělesa, ale jiný průběh závislosti síly na průhybu. Pro měření síly se na břit kyvadlového kladiva připevní odporové tenzometry, pro měření průhybu se používají metody optické, kapacitní nebo indukční. (24)

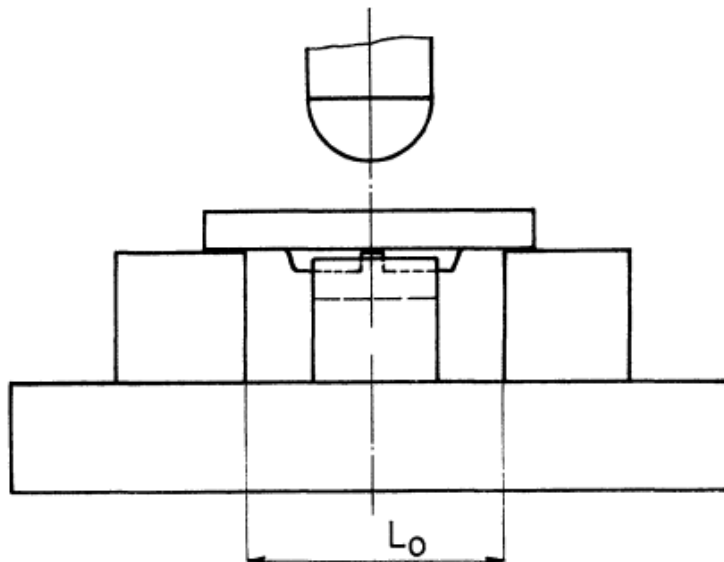


Obr. 11: Graf závislosti síly na průhybu (24)

Na výstupní graf se zaznamenávají významné body pro určení ploch pod křivkou, pro stanovení jednotlivých energií. První je vyznačena hodnota síly  $F_{gy}$ , je to síla na mezi makroskopických deformací, lineární část křivky. Následně se stanovena  $F_m$ , která odpovídá naměřené hodnotě maximální síly. Pomocí daného bodu lze stanovit energii vztaženou k maximální síle, spočte se integrací v mezích od  $s_0$  do  $s_m$ . Bod  $F_{ui}$  odpovídá síle iniciace nestabilní trhliny, na grafu je to místo prudkého spádu, někdy mohou síly  $F_{ui}$  a  $F_m$  být shodné. Integrací v mezích  $s_0$  a  $s_{ui}$  je získávána energie iniciace trhliny. Bod  $F_a$  odpovídá hodnotě síly zastavení trhliny, integrací v mezích  $s_0$  do  $s_a$ , získáme energii v čase zastavení trhliny. Celková nárazová energie je dopočítávána integrací v mezích od  $s_0$  do  $s_t$ , kde poloha  $s_t$  je bod kdy se síla bude blížit nulové hodnotě, v případě oscilací je síla stanovena jako  $F = 0,02F_m$ . (24)

### 5.3 Zkouška padajícím závažím – stanovení teploty nulové houževnatosti

Daná zkouška se provádí na padostroji za účelem získání teploty, při které dojde ke zlomení tělesa s uměle vytvořeným defektem. Zkušební vzorek je obdélníkového průřezu, na kterém je vytvořený návar s vybroušeným vrubem. Zkouška se provádí pro konstrukční oceli o tloušťce 16 mm a více. Zkušební těleso je uloženo na podpěrách (svarem na opačnou stranu od dopadu beranu) a při pádu závaží je materiál namáhán na tří bodovém ohybem. Beran musí dopadnout co neblíže ke středu vytvořeného svaru, aby došlo ke stejnému rozkladu namáhání v obou směrech. Pod zkušebním materiálem je uložený přípravek, kterého se materiál po zkoušce musí dotýkat, nebude-li se materiál dotýkat přípravku, zkouška bude neplatná. Zkoušení se provádí za různých teplot a je snaha získat teplotu  $t_{NDT}$  (nil ductility temperature) při které dojde k proniknutí trhliny do základního materiálu. Přičemž se nemusí dojít k úplnému rozdělení zkušební vzorku na dvě části, stačí když se v základním materiálu objeví viditelná trhlina, která dosáhne jedné z bočních hran materiálu. Tedy jestli dojde k vytvoření trhliny, která nedosáhne jedné z bočních hran těleso je považované za nezlomené. Pro stanovení teploty  $t_{NDT}$  je doporučovaný počet zkušebních těles 8 ks. Také je tato zkouška označovaná zkratkou DWG – drop weight test. (25) (18)



Obr. 12: Zkouška padajícím závažím (25)



## 6 Experimentální část

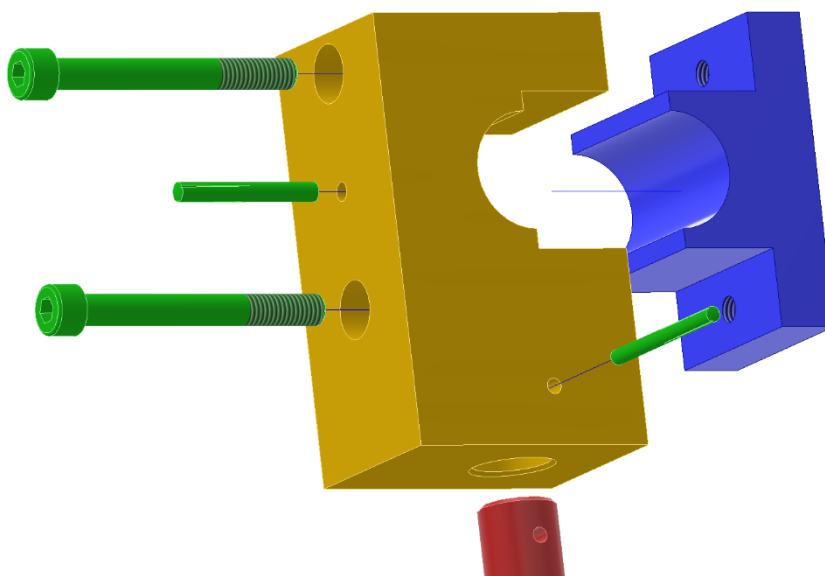
Cílem experimentální části je vytvořit stroj na kterém by se dala měřit absorbovaná práce drátu z pružinové oceli. Jako základ pro dané zařízení byl použit stroj, na kterém byla prováděná rázová zkouška dle Charpyho. Došlo k předělaní celého ramena, a navíc byl navržen svěrák který zajišťuje polohu zkušební drátu. Následně byly navrženy zkušební podmínky, při kterých byl drát zkoušen. Zkušební vzorky byly zpracovány za účelem snižování anebo zvyšování houževnatosti, pro dosažení u stejného typu oceli ke křehkému a houževnatému porušení.

### 6.1 Návrh stroje

Z počátku byly naměřeny všechny rozměry, které byly za potřebí pro návrh stroje. Na základě rozměru byly potom navrhovány všechny součásti, a to takovým způsobem, aby byly co nejjednodušší na výrobu, montáž a na manipulaci během zkoušení. Proběhl návrh způsobu upnutí nového ramena (objímka) na původní část stroje, rameno na kterém budou upínány tři výměnná kladiva a svěrák pro upnutí zkušební vzorku.

#### 6.1.1 Upnutí ramena – objímka

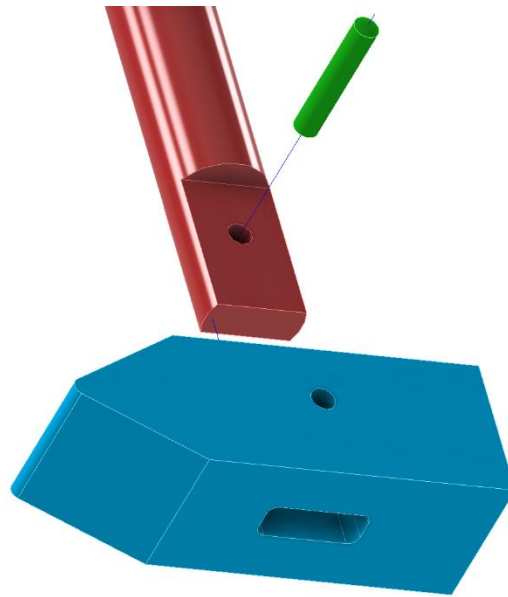
Provedení objímky, která zajišťuje spojení ramena se strojem je ve větší části stejné jako bylo i na původním stroji, rozdílem je pouze způsob, kterým je rameno k objímce připevněno. Na původním stroji bylo rameno s objímkou spojeno svarovým spojem. V novém provedení je v objímce vyroben otvor, do kterého je rameno zasunuto a poloha je zajištěná kolíkem. Objímka se skládá ze dvou částí, přičemž vyrobená byla jen část, ve které je rameno zajištěno (na obr. 13 žlutě), druhá část se přebrala z původního provedení (na obr. 13 modře) a zůstala beze změn. Pro zajištění proti prokluzu hřídele v ložiskách (která umožňuje rotaci) a objímky je využit kolík. Na obr. 13 lze vidět celou sestavu objímky.



Obr. 13: Model objímky

### 6.1.2 Rameno

Rameno je část stroje, na jehož konci je uloženo kladivo. Provedení spoje ramena s objímkou je vidět na obr. 13 (rameno červeně), jejich vzájemná poloha je zajištěná kolíkem. Pro výrobu ramena se použila tyč z hliníkové slitiny, což je provedeno za účelem snížení hmotnosti, tím dochází ke snížení jeho vlivu na nárazovou energii. Na konci ramena je vytvořeno tvarové zakončení obdélníkového průřezu, na které je nasunuto kladivo, které je zajištěno kolíkem, takové spojení poskytuje rychlou a jednoduchou výměnu kladiva. Celková délka ramena, která je dána od osy ložisek k břitu kladiva (část kterým kladivo naráží do vzorku) je 775 mm, tato hodnota je potřebná pro výpočet nárazové energie. Způsob zajištění kladiva s ramenem je zobrazeno na obr. 14.



Obr. 14: Model spoje rameno – kladivo

### 6.1.3 Kladiva

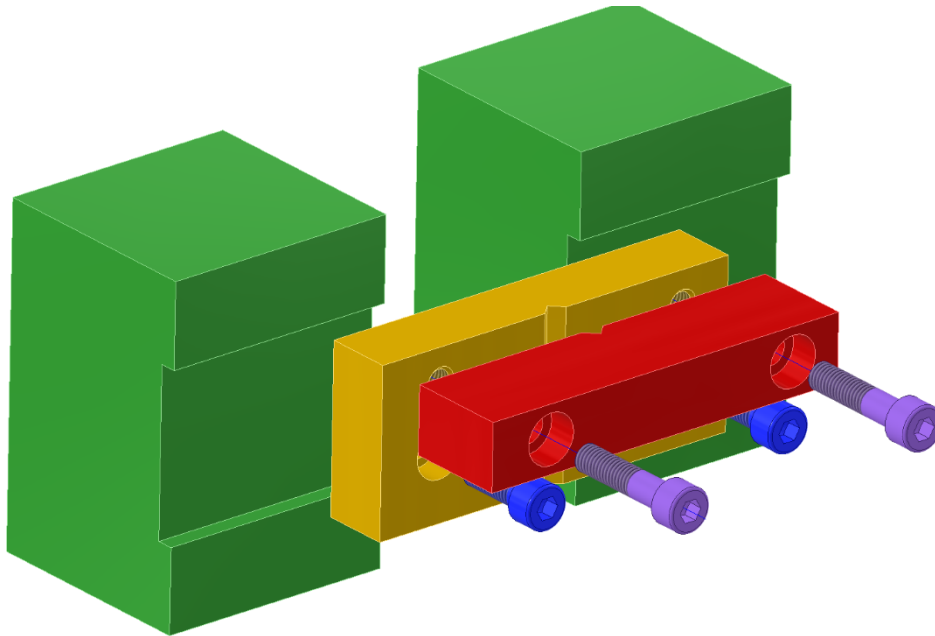
Kladiva byla vyrobena v počtu tří kusu s rozdílnou hmotností, což umožňuje variovat nárazovou práci. Hmotnosti jednotlivých kladiv jsou 200, 350 a 500 g. Kladiva jsou opatřena tvarovým otvorem pro nasunutí na rameno, a dírou pro zajištění polohy kolíkem. Na obr. 15 lze vidět již zhotovená kladiva.



Obr. 15: Zhotovená kladiva 500, 350 a 200 g

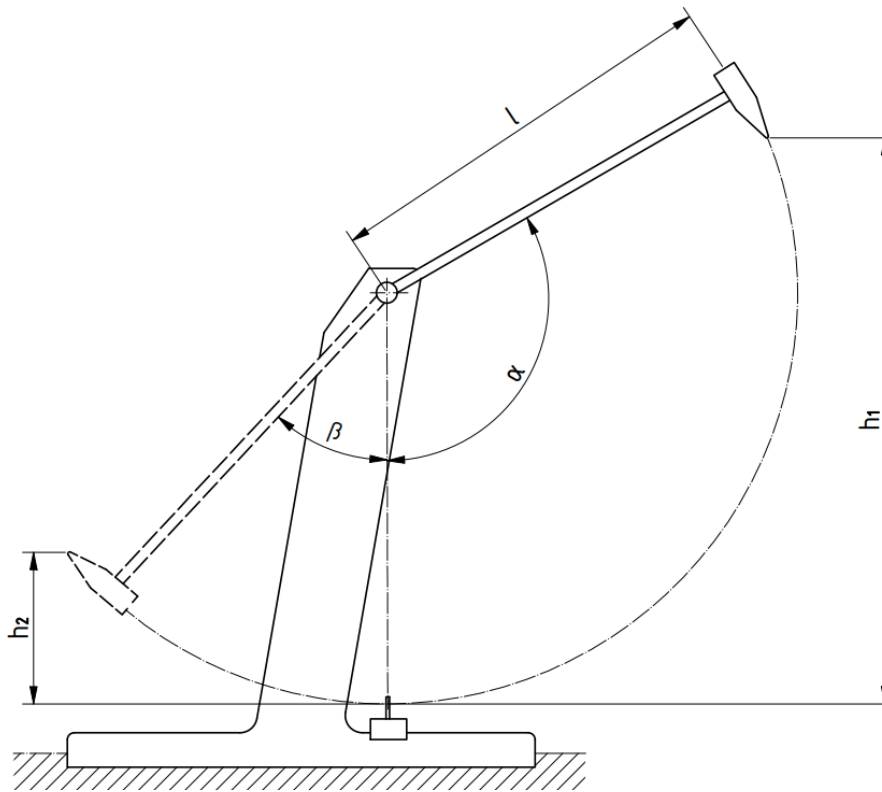
#### 6.1.4 Svěrák

Pro zajištění polohy zkušebního drátu ve vertikální poloze bylo potřebné navrhnout svěrák, jelikož původní stroj neumožňoval takové uložení. Svěrák se skládá ze dvou čelistí, kde první čelist je nehybná (na obr. 16 žlutě), je pevně spojená s rámem stroje. Druhá čelist je pohyblivá a je spojená s nehybnou čelistí pomocí šroubů. Utahováním nebo povolováním šroubu dochází k regulaci vzdálenosti čelistí. Obě čelisti jsou opatřeny drážkou ve tvaru trojúhelníku s úhlem rozevření 90 °, která umožňuje ve svěráku upínat vzorky s kruhovým průřezem, což je v tomto případě zkoušení drátu nezbytné. Nejmenší průměr drátu, který je možný upnout na daném svěráku je 1,6 mm.



Obr. 16: Model svěráku

### 6.1.5 Výpočet nárazové energie



Obr. 17: Schéma navrhovaného stroje

Stanovení materiálem absorbované energie  $K$  při jeho porušení se počítá pomocí vztahu pro potenciální energii. Přesněji se jedná o rozdíl potenciálních energií v počáteční a koncové poloze kladiva. Počáteční poloha je dána výškou pádu kyvadla  $h_1$  resp. úhlem pádu kyvadla  $\alpha$ , a koncová poloha je definovaná jako výška zdvihu  $h_2$ , resp. úhel zdvihu  $\beta$ . Vztah (1) popisuje absorbovanou práci v závislosti na rozdílu výšek, úpravou tohoto vztahu je získán vztah (2), který je vyjádřen pomocí rozdílu úhlu. Pro další výpočty bude využíván vztah (2), jelikož se jedná o kyvadlo a je jednodušší operovat s úhly než-li s výškami. V tab. 4 lze vidět hodnoty energií jednotlivých kladiv.

$$K = m \cdot g \cdot (h_2 - h_1) \quad (1)$$

$$K = m \cdot g \cdot l \cdot (\cos \beta - \cos \alpha) \quad (2)$$

Kde:

$K$  ... absorbovaná energie [J]

$m$  ... hmotnost kladiva [kg]

$g$  ... gravitační zrychlení [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ]

$l$  ... délka ramene [m]

$h_1/h_2$  ... výška pádu/výšk zdvihu [m]

$\alpha/\beta$  ... úhel pádu/úhel zdvihu [m]

Hmotnost [g]	200	350	500
Energie [J]	2,95	5,16	7,37

Tab. 4: Hodnoty energií jednotlivých kladiv

## 6.2 Zkušební materiál

Jako zkušební materiál byl posloužil drát z chrom-křemíkové oceli ČSN 14 260 (54 CrSi 6). U tohoto zkušebního materiálu byla provedena analýza mikrostruktury a dále změřena tvrdost. Dále byly stanovené zkušební podmínky, při kterých se drát bude zkoušet, a to zejména hloubku vrubu a způsob upnutí drátu. Také drát byl zpracováván pro dosažení rozdílných lomových charakterů.

### 6.2.1 Chemické složení ČSN 14 260 (54 CrSi 6)

Jedná se o pružinový drát z nízkolegované oceli, který je specifikován normou ČSN EN 10 270-2. Dle dané normy je označován jako FDSiCr, označení FD udává o využití daného drátu pro statické namáhání, a SiCr značí hlavní legující prvky, kterými jsou chrom a křemík. Celé chemické složení je uvedeno v tab. 5. (26)

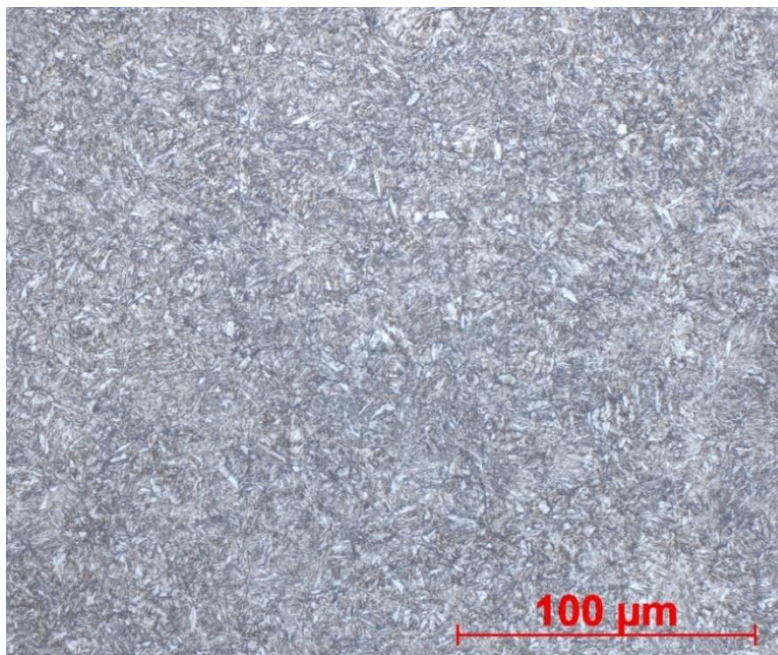
Tabulka v [%]

C	Si	Mn	P max.	S max.	Cu max.	Cr
0,50-0,60	1,20-1,60	0,50-0,90	0,030	0,025	0,12	0,50-0,80

Tab. 5: Chemické složení oceli ČSN 14 260

### 6.2.2 Mikrostruktura

Pro zjištění mikrostruktury byl odebrán vzorek o délce kolem 10 mm, a ten byl za tepla zalit do plastu pro snazší manipulaci. Zkušební vzorek byl ručně broušen a leštěn, a po dosažení dostatečné drsnosti povrchu byl vzorek leptán 3 % nitalem. Následně byl vytvořen snímek mikrostruktury na světelném mikroskopu s 500x zvětšením. Na obr. 18 lze vidět snímek struktury popuštěného martenzitu.



Obr. 18: Snímek ze světelného mikroskopu, zvětšení 500x, ocel ČSN 14 260

### 6.2.3 Tvrdost

Na tvrdoměru byla naměřená tvrdost dle Vickerse HV 30, měření bylo provedeno 5x. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 6. Z naměřených hodnot byly dopočteny podle vztahu (3) tvrdosti, ze kterých byl stanoven aritmetický průměr a následně učena směrodatná odchylka. Naměřená tvrdost experimentálního materiálu je  $HV30 = 568 \pm 11$

$$HV = 0,198 \frac{F}{d^2} \quad (3)$$

	1	2	3	4	5
$d_1$ [mm]	0,325	0,315	0,311	0,313	0,313
$d_2$ [mm]	0,316	0,323	0,316	0,312	0,317
HV 30	578	584	604	608	599
Průměr HV 30	568				
$\sigma$	11				

Tab. 6: Naměřené hodnoty na tvrdoměru

$F$  ... síla vtisku [N]

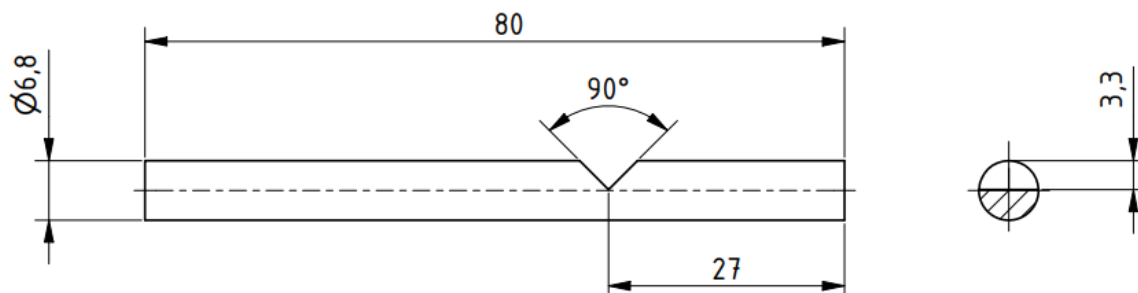
$d$  ... Velikost diagonal vtisku [mm]

$\sigma$  ... Směrodatná odchylka

HV...Tvrdost dle Vickerse [HV]

### 6.2.4 Rozměry a způsob upnutí

Na zkušebních drátech se vyrobil na frézce vrub tvaru V, s úhlem rozevření  $90^\circ$ , a hloubkou vrubu 3,3 mm. Na obr. 19 lze vidět rozměry vzoru a na obr. 20 je jeho reálné provedení.



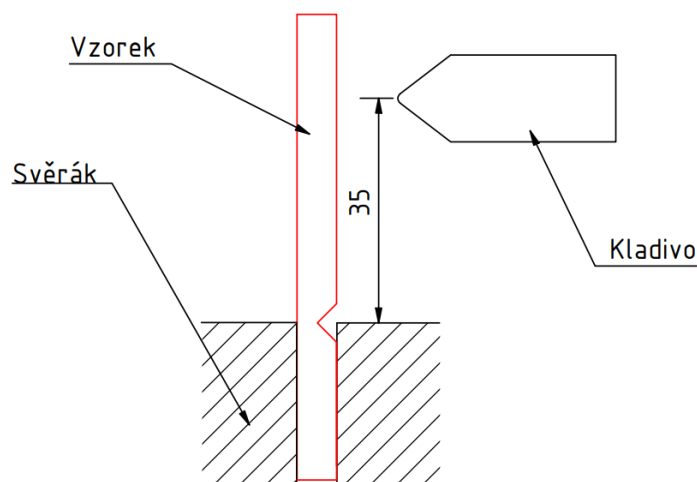
Obr. 19: Rozměry zkušebního vzorku



Obr. 20: Zkušební vzorek



Zajištění polohy vzorku v kolmé poloze je realizováno pomocí svěráku. Vzorek je ve svěráku umístěn takovým způsobem, aby při nárazu docházelo k rozevření vrubu, tj. vrubem proti směru nárazu kladiva. Při upínání vzorku ve svěráku je používána speciální měrka pro vystředění vrubu, na obr. 21 je znázorněno schéma upínání vzorku. Vzdálenost nárazu špičky kladiva od vrubu je 35 mm (viz obr. 21).



Obr. 21: Schéma upínání vzorku ve svěráku

## 6.3 Zpracování vzorků

Bylo využito několik druhů zpracování vzorků za účelem ovlivnění houževnatosti. Jako mechanismus snížení houževnatosti bylo využito vodíkování oceli, a to chemickým a elektrolytickým způsobem. Pro zvýšení houževnatosti bylo využito zejména žíhání naměkko v několika případech i normalizační žíhání.

### 6.3.1 Elektrolytické vodíkování

Vodíkování za pomoci elektrolýzy bylo prováděno v solném roztoku. Roztok byl tvořen 100 ml vody ve kterém bylo rozpuštěno 5 g NaCl (sůl). Jako anoda (+) posloužila grafitová tyč a jako katoda (-) posloužily zkušební vzorky, mezi nimi byla dána plastová přepážka, která zabraňovala přímý kontakt katody a anody. Na zdroji elektrického napětí byl nastaven konstantní proud velikosti 0,5 A.

### 6.3.2 Chemické vodíkování

Chemické vodíkování bylo prováděno v 17,5 % roztoku kyseliny chlorovodíkové (HCl). Roztok byl namíchan z 35 % HCl a vody v poměru 1:1. Pro zahájení vodíkování vzorky byly ponořeny do roztoku, následně po vodíkování byly vzorky z kádinky vyndány pomocí kleští a byly opláchnuty.



Obr. 22: Vodíkování v 17 % roztoku HCl

### 6.3.3 Žihání

Žihání bylo využíváno jako mechanismus, kterým byla zvyšována houževnatost u zkušebního materiálu. Vzorky bez vrubů byly vloženy do kalici folie, za účelem omezení oduhličování povrchu, a následně vkládány od již rozehřáté pece. V průběhu zkoušení bylo využito dvou způsobů žihání naměkko a normalizační žihání. Žihání naměkko bylo prováděno za teploty 720 °C, teplota normalizačního byla stanovená na 880 °C. Výdrž na daných teplotách byla v obou případech stejná 45 min.



## 6.4 Průběh zkoušení

Zkoušení se provádělo na nově navrženém stroji za účelem stanovení nárazové energie. Snaha byla vyvolat u zkušebních vzorků porušení dvojího typu, a to houževnatého a křehkého. Z toho důvodu také byly vzorky různým způsobem zpracovány, zejména vodíkovány a žihány. Jako zkušební materiál byl použit drát z pružinové oceli ČSN 14 260. U každého vzorku byl kontrolován průměr a hloubka vrubu, aby porovnávání jednotlivých zkušebních vzorků nebylo zavádějící. Při upínání zkušební vzorku se využívala speciální měrka, která zajišťovala správnou polohu vrubu (viz obr. 22). Úhel pádu kladiva byl v rámci celého experimentálního programu stejný 160 °.

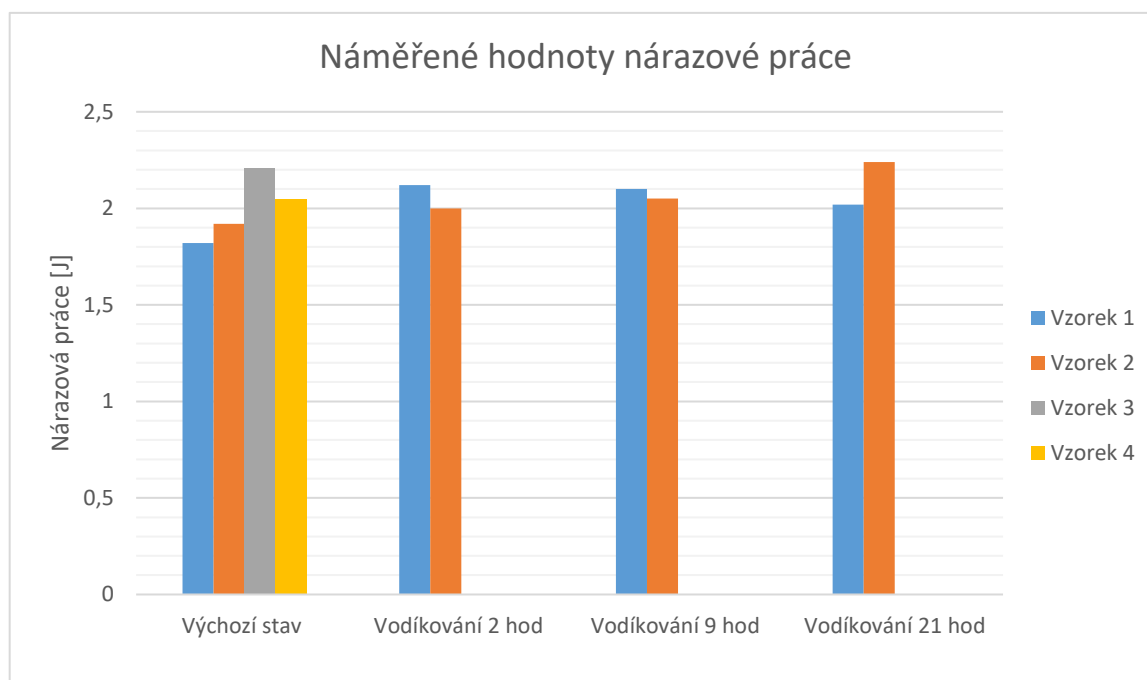
Zkušební vzorky byly rozděleny na jednotlivé série, v každé sérii se nacházely vzorky se stejným zpracováním. Nejčastěji sérii tvořily dva vzorky. Naměřené hodnoty jsou zpracovány do tabulek, ve kterých je značeno typ zpracování, úhel zdvihu a nárazová práce. Nárazová práce se dopočítávala dle vztahu (2), viz kapitola 6.1.5. Při zkoušení docházelo k výměně kladiv (každé z kladiv má jinou hmotnost), porovnávání výsledku je tedy možné jen v případě, kdy vzorky byly zkoušeny stejným kladivem. Následující kapitoly (6.4) budou rozděleny do několika částí, v každé z nich budou porovnávány vzorky zkoušené za stejných podmínek.

### 6.4.1 Naměřené hodnoty – část I

Pro přeražení vzorků bylo použito kladivo o hmotnosti 200 g s maximální hodnotou nárazové energie 2,95 J. Žádný ze zkušebních vzorků nebyl žihán. Vodíkování bylo prováděno pouze pomocí elektrolýzy. Všechny naměřené hodnoty a typy zpracování jsou zaznamenány v tab.7 a grafu 1.

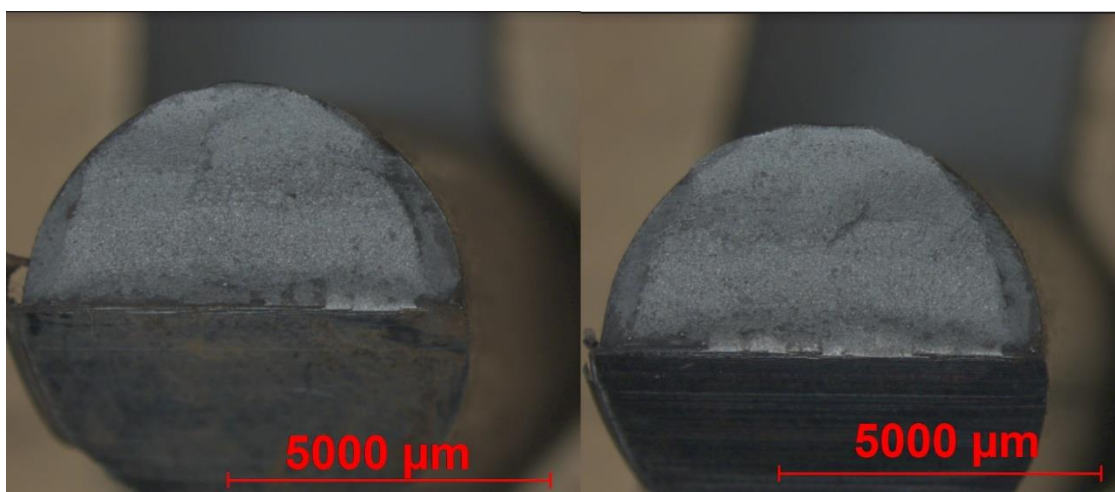
Série	Číslo vzorku	Žihání [°C]	Vodíkování [h]	Úhel zdvihu $\beta$ [°]	Nárazová práce [J]	Poznámka
1	1_1	-	-	75	<b>1,82</b>	
	1_2	-	-	71	<b>1,92</b>	
2	2_1	-	2	63	<b>2,12</b>	
	2_2	-	2	68	<b>2,00</b>	
3	3_1	-	9	64	<b>2,10</b>	
	3_2	-	9	71	<b>1,92</b>	
4	4_1	-	-	59	<b>2,21</b>	
	4_2	-	-	66	<b>2,05</b>	
5	5_1	-	21	67	<b>2,02</b>	
	5_2	-	21	58	<b>2,24</b>	

Tab. 7: Naměřené hodnoty – část I, hmotnost kladiva 200 g



Graf 1: Naměřené hodnoty nárazové práce – část I

Jako první byly zkoušeny vzorky bez jakéhokoliv zpracování pro stanovení výchozí houževnatosti, se kterou by se ostatní porovnávaly. Jsou to vzorky série 1 a 4. Následně bylo provedeno elektrolytické vodíkování vzorků. Zpočátku vodíkování bylo prováděno po dobu 2 hodin (série 2). Při srovnávání těchto vzorků se vzorky v základním stavu, nelze pozorovat pokles houževnatosti, který se předpokládal u vzorků ovlivněných vodíkem. Na základě toho byla doba vodíkování navýšena na 9 hodin (série 3). Navýšení doby vodíkování se neprojeví na naměřených hodnotách nárazové energie, opět nelze vidět projev vodíku v materiálu. U poslední série vzorků v této části (série 5), byla doba vodíkování zvýšena více než 2krát na 21 hod. Naměřené hodnoty se opět nelišily od předchozích, změnu houževnatosti se znovu nepodařilo zaznamenat. Byla taky kontrolována lomová plocha na stereomikroskopu, zda-li průběh šíření lomu u vzorků ovlivněných vodíkem neprobíhá pomocí křehkého mechanismu. Při analyzování vzorků na stereo-lupě nebylo zaznamenáno křehkého porušení u vzorků ovlivněných vodíkem (snímky lomových ploch viz obr. 23).



Obr. 23: Snímky lomových ploch na stereo-lupě, vlevo vodíkováný 9 hodin, vpravo výchozí stav

## 6.4.2 Naměřené hodnoty – část II

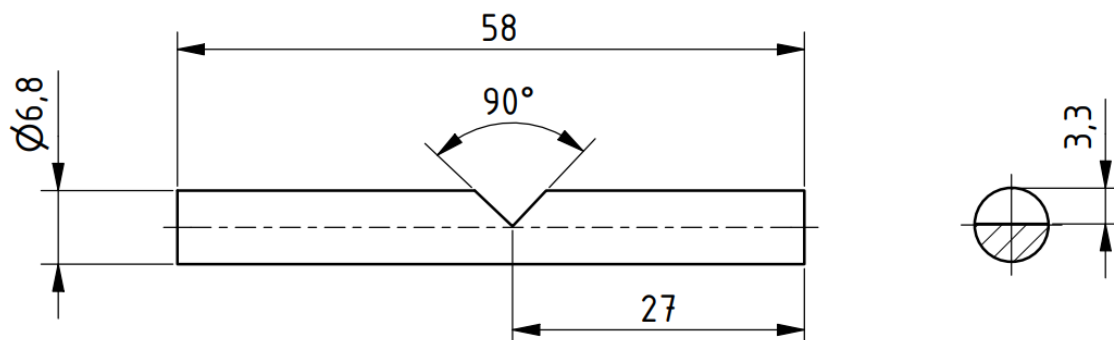
Na základě předchozích pokusu bylo rozhodnuto zvýšit hmotnost kladiva na 500 g, s maximální hodnotou nárazové práce 7,37 J. Také vzorky byly žíhány naměkko (teplota žíhání 720 °C), za účelem zvýšení houževnatosti. Jedná část vzorků byla elektrolyticky vodíkováná, pro vyvolání křehkého porušení. Naměřené hodnoty jsou zpracovány do tab.8.

Série	Číslo vzorku	Žíhání	Vodíkování [h]	Uhel zdvihu $\beta$ [°]	Nárazová práce [J]	Poznámka
7	7_1	Naměkko	-	0	<b>7,37</b>	Nepřeražen
	7_2	Naměkko	-	16	<b>7,23</b>	Nepřeražen*
8	8_1	Naměkko	19	0	<b>7,37</b>	Nepřeražen
	8_2	Naměkko	19	27	<b>6,96</b>	Nepřeražen*

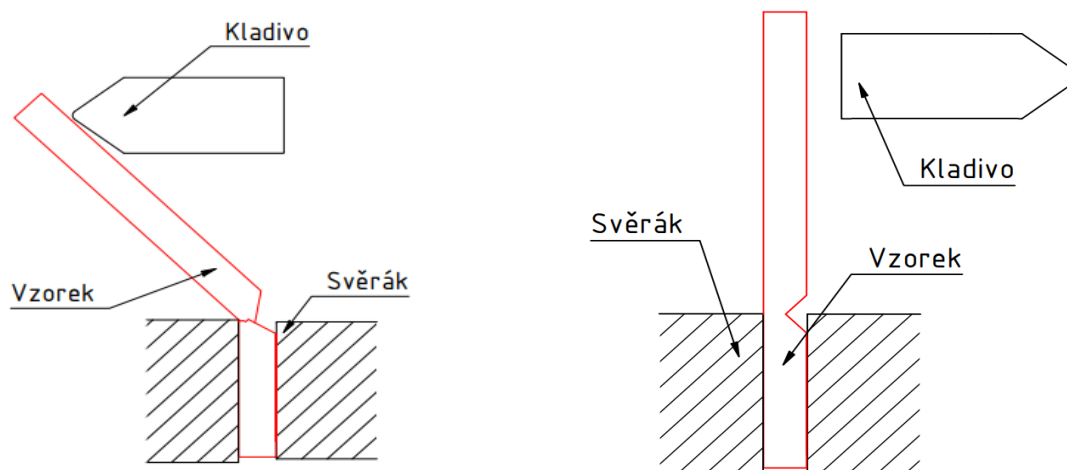
Tab. 8: Naměřené hodnoty – část II, hmotnost kladiva 500 g, \*vzorek pouze deformovaný ohnutím

Zpočátku byly zkoušeny vzorky, které byly pouze vyžíhány (série 7), v obou případech ale nedošlo k úplnému porušení vzorků. U vzorku 7\_1 při nárazu kladiva došlo k zastavení kladiva, a z toho důvodu byl zaznamenán úhel zdvihu 0°. U vzorku z téže série 7\_2 náraz kladiva způsobil ohnutí vzorku do takové míry, kdy kladivo se mohlo vychýlit, přičemž byl zaznamenán úhel zdvihu 16°. Takové výsledky u vzorků pouze vyžíhaných jsou předvídatelné, jelikož žíhání způsobilo výrazný nárůst houževnatosti. Při zkoušení vzorků vyžíhaných a vodíkových (série 8), výsledky jsou identické jako u vzorků pouze žíhaných. Takové chování ale už jde proti předpokladům, kdy vzorky, které byly navíc vodíkovány projevují houževnaté chování. V této části se opět nepovedlo zaznamenat žádoucí změnu houževnatosti, která by měla nastat u vodíkových vzorků.

V průběhu experimentu bylo zjištěno, že v momentě, kdy kladivo začíná ohýbat vzorek, dochází ke tření mezi spodním břitem kladiva a plochou vzorku (obr. 25 vlevo). Takový kontakt mohl být příčinou zavádějících výsledků, jelikož tření mezi dvěma plochy mohlo absorbovat značnou část energie. Proto bylo rozhodnuto otočit kladivo, aby k nárazu docházelo plochou částí (obr. 25 vpravo), a v momentě kdy bude vzorek ohýbán v kontaktu se vzorkem bude pouze spodní hrana kladiva, a ne celá plocha. Otočením kladiva byla zkrácena délka ramena (z 35 na 20 mm), pomocí kterého je vzorek ohýbán. Také bylo rozhodnuto zkrátit zkušební vzorky, aby čas, ve kterém je vzorek v kontaktu s kladivem byl co nejmenší (nové rozměry vzorku viz obr. 24).



Obr. 24: Nové rozměry vzorku



Obr. 25: vlevo: schéma průběhu ohýbání vzorku, vpravo: schéma nového způsobu upnutí kladiva

### 6.4.3 Naměřené hodnoty – část III

Pro přeražení vzorků se využívalo kladiva o hmotnosti 500 g s maximální nárazovou prací 7,37 J. Všechny vzorky byly normalizačně žháný (teplota žhání 880 °C), jedná část vzorků elektrolytický vodíkováná. Zkoušení se provádělo již při nových podmínkách, které jsou popsány v kapitole 6.4.2. Všechny naměřené hodnoty jsou zpracovány v tab. 9.

Série	Číslo vzorku	Žhání	Vodíkování [h]	Uhel zdvihu $\beta$ [°]	Nárazová práce [J]	Poznámka
9	9_1	Normalizační	-	119	<b>1,73</b>	
	9_2	Normalizační	-	115	<b>1,97</b>	
10	10_1	Normalizační	20	115	<b>1,97</b>	
	10_2	Normalizační	20	110	<b>2,27</b>	
	10_3	Normalizační	20	117	<b>1,85</b>	
	10_4	Normalizační	20	114	<b>2,03</b>	

Tab. 9: Naměřené hodnoty – část III, hmotnost kladiva 500 g

Došlo k přeražení vzorků ve vyžháném stavu a v stavu vyžháném a vodíkováném. Při porovnání hodnot nárazové práce, nelze spatřit snížení hodnoty nárazové práce u vodíkováných vzorků, což je v rozporu s předpokládaným chováním.

Po ukončení tohoto experimentu se zdálo, že zavedení nových zkušebních podmínek částečně prospělo. Došlo k úplnému porušení všech zkušebních vzorků, při malých energiích, což se projevilo velkým úhlem zdvihu kyvadla. Bylo předpokládáno, že takové chování způsobilo právě minimalizace tření zmenšením kontaktních ploch a zkrácením brzdné dráhy (detailní popis změn zkušebních podmínek viz kapitola 6.4.2). Takové nízkoenergetické porušení bylo ale způsobeno typem žhání, a ne změnou podmínek zkoušení. Teplota normalizačního žhání leží nad teplotou vylučování austenitu, to přivedlo k částečnému rozpadu původní struktury (popuštěný martenzit). Po žhání materiál byl ochlazován na vzduchu, čímž došlo k částečné změně struktury materiálu, která má patrně nižší houževnatost.

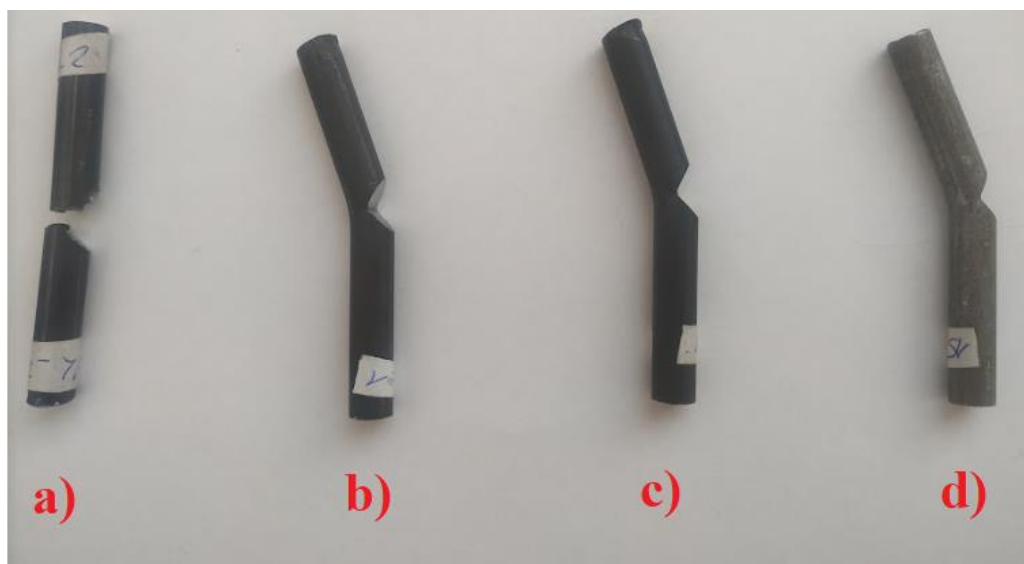
#### 6.4.4 Naměřené hodnoty – část IV

Pro přeražení zkušebních vzorků bylo využito kladivo o hmotnosti 200 g s maximální nárazovou energií 2,95 J. V této části byl zaveden nový způsob zpracování a to vodíkování vzorků v roztoku kyseliny chlorovodíkové. Z tohoto důvodu je třeba stanovit jiné značení v tabulce s výsledky. V kolonce vodíkování se nyní chemické vodíkování bude značit Ch X, a elektrolytické El X, kde X je počet hodin. Všechny naměřené hodnoty jsou zpracovány do tab. 10.

Série	Číslo vzorku	Žihání	Vodíkování [h]	Uhel zdvihu $\beta$ [°]	Nárazová práce [J]	Poznámka
12	12_1	-	-	66	<b>2,05</b>	
	12_2	-	-	59	<b>2,21</b>	
13	13_1	Naměkko	-	0	<b>2,95</b>	Nepřeražen
	13_2	Naměkko	-	0	<b>2,95</b>	Nepřeražen
14	14_1	Naměkko	El 9	0	<b>2,95</b>	Nepřeražen
	14_2	Naměkko	El 9	0	<b>2,95</b>	Nepřeražen
15	15_1	Naměkko	Ch 1	0	<b>2,95</b>	Nepřeražen

Tab. 10: Naměřené hodnoty – část IV, hmotnost kladiva 200 g

Opět na začátku byla stanovená rázová houževnatost u vzorků ve výchozím stavu. Následně byly testovány vzorky žíhané a chemicky nebo elektrolyticky vodíkované. Ve všech případech kdy vzorek byl vyžíhán, nedošlo k úplnému přeražení vzorků, trhlinka byla zastavená hned v ústí vrubu. Žíhané vzorky byly pouze mírně ohnuty (obr. 26), bez zjevného šíření trhlinky, což znemožnilo případné dolomení vzorku pro kontrolu lomových ploch. Takové chování je způsobeno nedostatečnou energií kladiva.



Obr. 26: a) Vzorek ve výchozím stavu (12\_2); b) Vzorek vyžíháný (13\_1); c) Vzorek vyžíháný a elektrolyticky vodíkováný (14\_1); d) Vzorek vyžíháný a chemicky vodíkováný (15\_1)



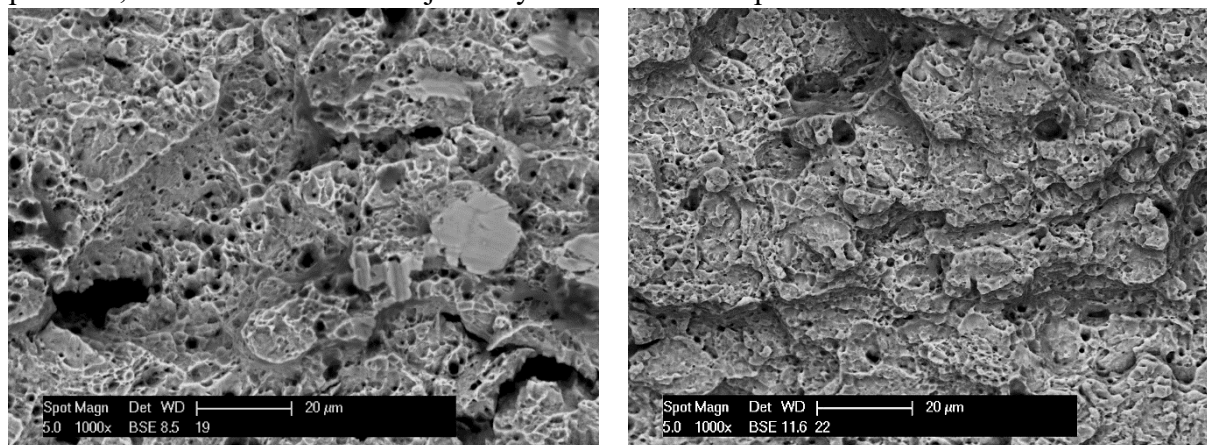
### 6.4.5 Naměřené hodnoty – část V

Pro přeražení zkušebních vzorků bylo využito kladivo o hmotnosti 500 g s maximální nárazovou energií 7,37 J. Tato experimentální část je nejrozsáhlejší, co se týče počtu vzorků a provedených analýz. Byly použity všechny druhy zpracování, žihání, chemické a elektrolytické vodíkování. Byly také navýšeny časy vodíkování vzorků až na několik desítek hodin. U většiny vzorků byla provedena kontrola lomové plochy na řádkovacím elektronovém mikroskopu (ŘEM). Z důvodu lepší přehlednosti jsou hodnoty v tab. 11 uspořádány dle typu zpracování.

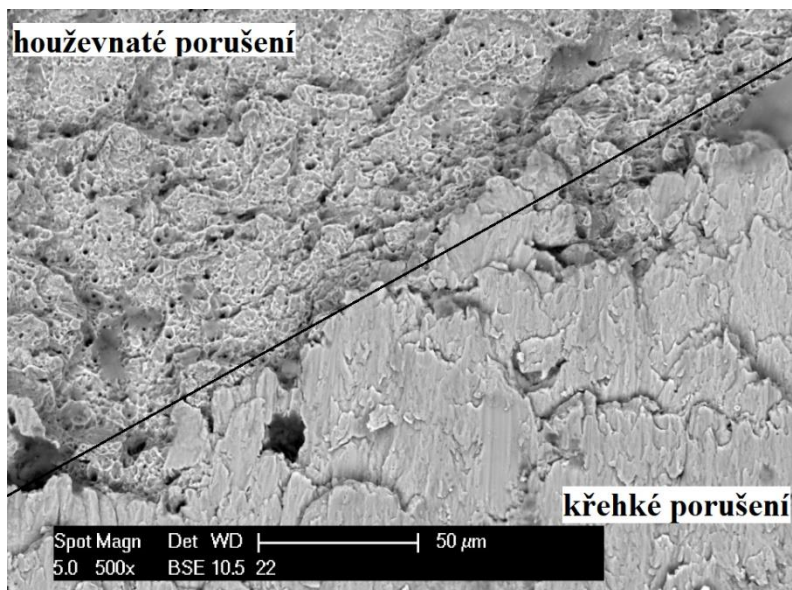
Série	Číslo vzorku	Žihání	Vodíkování [h]	Uhel zdvihu $\beta$ [°]	Nárazová práce [J]	Poznámka
19	19_1	-	-	98	<b>3,04</b>	
21	21_1	-	Ch 11	70	<b>4,87</b>	
22	22_1	-	Ch 23	56	<b>5,70</b>	
18	18_1	Naměkko	-	26	<b>6,99</b>	Nepřeražen*
17	17_1	Naměkko	Ch1	39	<b>6,53</b>	Nepřeražen*
	17_2	Naměkko	Ch 1	0	<b>7,37</b>	Nepřeražen
20	20_1	Naměkko	Ch 1	0	<b>7,37</b>	Nepřeražen
	20_2	Naměkko	Ch 1	0	<b>7,37</b>	Nepřeražen
23	23_1	Naměkko	El 45	20	<b>7,15</b>	Nepřeražen*

Tab. 11: Naměřené hodnoty – část V, hmotnost kladiva 500 g, \*vzorek pouze deformovaný ohnutím

Při porovnání hodnot nárazové energie vzorků 19, 21, 22 které nejsou žihány, nelze vidět nelze vidět pokles nárazové energie u vodíkováných vzorků, jak by se předpokládalo. Byly vytvořeny snímky na ŘEM, pro stavování charakteru lomu. U snímků vzorků 19\_1 (obr. 27 vlevo) a 22\_1 (obr. 27. vpravo), nelze objevit u vodíkováného vzorku křehké chování. Oba vzorky mají typickou pro houževnatý (smykový) lom jamkovou morfologii. U vzorku 22\_1 došlo k dolomení zpěným nárazem kladiva, takové dolomení způsobilo křehké chování, kvůli jinému způsobu namáhání. Na obr. 28 je zachycen výsledek takového porušení, na horní části obrázku je zachyceno houževnaté porušení a na dolní části křehké.



Obr. 27: Snímek z ŘEM, zvětšení 1000x, vlevo vzorek 19\_1, vpravo vzorek 22\_1, v obou případech houževnaté porušení



Obr. 28: Snímek z ŘEM, zvětšení 500x, vzorek 22\_1, částečné křehké porušení způsobené zpětným nárazem kladiva

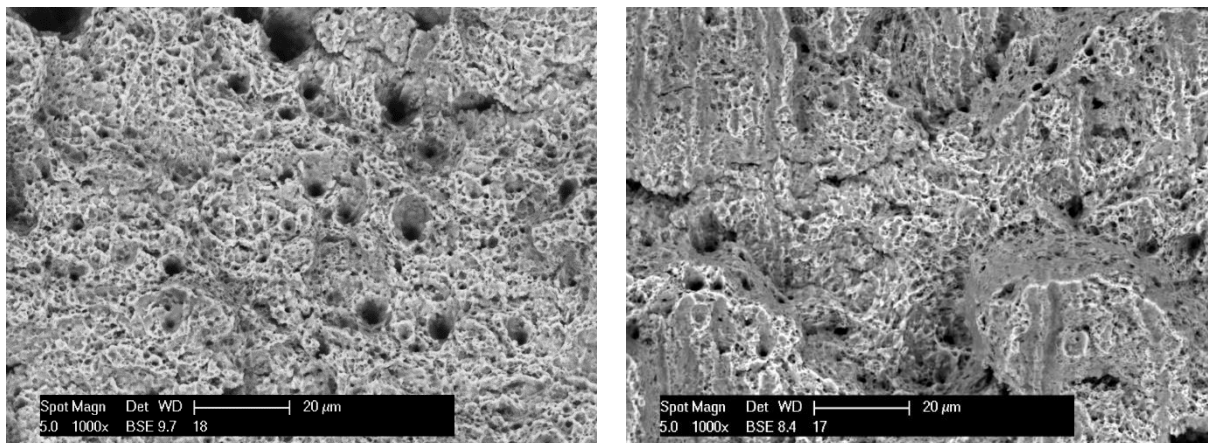
Při porovnávání vzorků série 17, 18, 20, 23 které byly vyžihány, nelze stanovit, zda-li došlo k šíření trhliny po štěpném nebo smykovém mechanismu, jelikož žádný ze vzorků nebyl zcela přeražen. V polovině případů docházelo při nárazu kladiva k jeho zastavení, což znemožnilo naměření jakékoli hodnoty nárazové energie. V druhé polovině případů kladivo ohnulo vzorky do takové míry, kdy kladivo se mohlo vychýlit, a bylo možné zaznamenat úhel vychýlení, přesto tyto hodnoty nejsou směrodatné. Ve všech případech byla hloubka trhliny dostatečně velká (obr. 29), aby vzorky mohly být dolomené a následně kontrolované jejich lomové plochy na ŘEM.



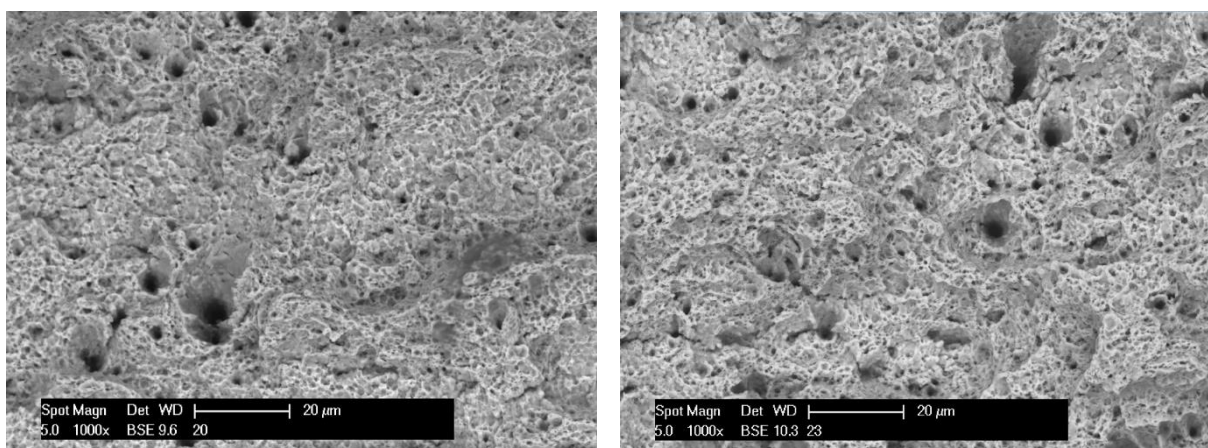
Obr. 29: Vzorek 22\_1

Na ŘEM byly pořízeny snímky lomových ploch vzorků sérií 17,18, 20 a 23. Kontrolována byla pouze plocha v té části kde trhlina byla vytvořena nárazem kladiva. Na obr. 30 vlevo lze vidět snímek lomové plochy vzorku pouze žihaného a obr. 30 vpravo a obr. 31 reprezentují lomové plochy vzorků které byly navíc vodíkovány. Při porovnávání těchto lomových ploch, nelze spatřit u vzorků navíc vodíkováných projev křehkého porušení. Naopak ve všech případech šíření lomu probíhalo dle houževnatého mechanismu, opět lze spatřit charakteristickou pro smykový lom jamkovou morfoloii. V celé této části se znovu nepovedlo vyvolat křehkolomové chování u vodíkováných vzorků.





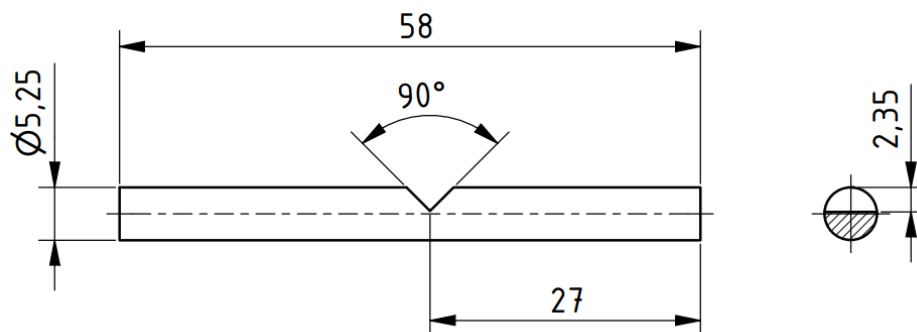
Obr. 30: Obr. 32: Snímek z ŘEM, zvětšení 1000x, vlevo vzorek 18\_1, vpravo vzorek 17\_1, v obou případech houževnaté porušení



Obr. 31: Snímek z ŘEM, zvětšení 1000x, vlevo vzorek 20\_1, vpravo vzorek 23\_1, v obou případech houževnaté porušení

#### 6.4.6 Naměřené hodnoty – část VI

V této části došlo ke změně zkušebních podmínek, a to konkrétně ke zmenšení průměru drátu z 6,8 na 5,25 mm. Dále pro vyvolání křehkého porušení byla část vzorků kalená. Teplota kalení pro daný materiál je 880 °C, jako kalicí médium byl využit olej, výdrž na kalicí teplotě byla 15 min. Část vzorků byla chemicky vodíkováná. Hmotnost zkušebního kladiva byla 500 g s maximální nárazovou energií 7,37 J. Na obr. 32 lze vidět všechny rozměry zkušebního vzorku. Všechny hodnoty jsou zpracované do tab. 12.



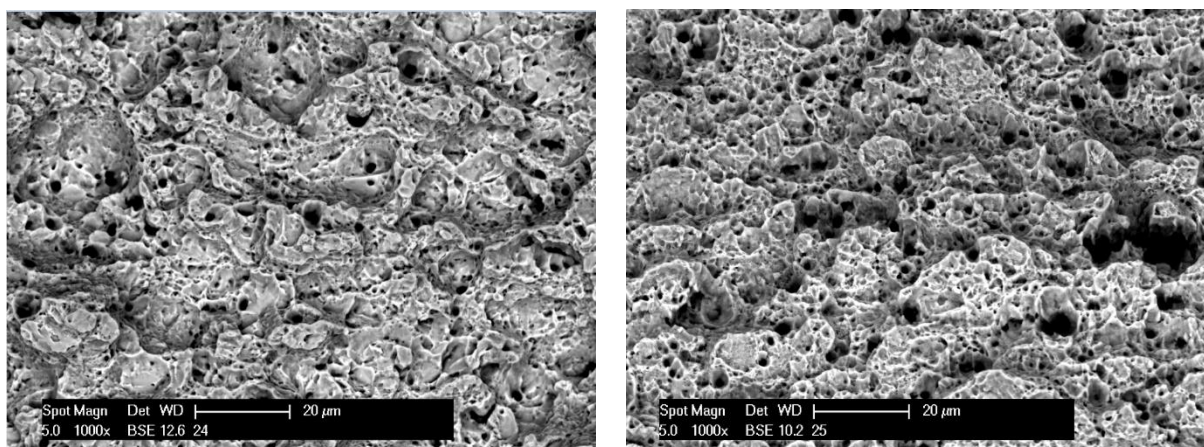
Obr. 32: Rozměry zkušebního vzorku



Série	Číslo vzorku	Žihání	Vodíkování [h]	Uhel zdvihu $\beta$ [°]	Nárazová práce [J]	Poznámka
24	24_1	-	-	110	<b>0,91</b>	
	24_2	-	-	107	<b>0,98</b>	
25	25_1	-	Ch 1	106	<b>1,01</b>	
	25_2	-	Ch 1	99	<b>1,19</b>	
26	26_1	-	-	147	<b>0,15</b>	Kalený
	26_2	-	-	147	<b>0,15</b>	Kalený
	26_3	-	-	148	<b>0,14</b>	Kalený

Tab. 12: Naměřené hodnoty – část VI, kladivo o hmotnosti 500 g

Na základě naměřených hodnot sérii vzorků 24 a 25, nelze spatřit ztrátu houževnatosti u vzorků vodíkováných. Proto byly pořízeny snímky pomocí ŘEM, za účelem kontroly lomových ploch, u vzorků ovlivněných vodíkem by se mělo projevit křehké porušení. Na obr. 33 jsou vidět snímky z ŘEM, v obou případech se jedná o houževnaté porušení, což v případě vodíkováných vzorků je v rozporu s předpokládaným chováním.



Obr. 33: Snímky z ŘEM, zvětšení 1000x, vlevo vzorek 24\_2, vpravo vzorek 25\_2, v obou případech houževnaté porušení

Pro vyvolání křehkolomového chování byly vzorky ze série 26 zakaleny. Při porovnání výsledku kalených vzorků a vzorků ve výchozím stavu, je patrné zjevné snížení houževnatosti. U vzorků kalených hodnota nárazové energie je několikanásobně nižší, než je u vzorků ve výchozím stavu. Plocha zakalených vzorků je bez jakékoli viditelné plastické deformace, což je u takto křehkého porušení typické. Dále byla stanovena u kalených vzorků tvrdost  $HV_{30} = 918 \pm 76$ , takto velká odchylka je dána velkým rozdílem tvrdosti na povrchu a ve středu materiálu. Naměřené hodnoty velikost vtisku lze vidět v tab. 13.

	1	2	3	4	5
$d_1$ [mm]	0,260	0,245	0,255	0,255	0,235
$d_2$ [mm]	0,260	0,243	0,258	0,250	0,230
HV 30	839	952	862	889	1049
Průměr HV 30	918				
$\sigma$	76				

Tab. 13: Naměřené hodnoty tvrdosti kaleného vzorku

## 7 Diskuze výsledků

Tato kapitola je zaměřena na vyhodnocení všech výsledků získaných z experimentálního programu. Cílem experimentální části bylo na nově navrženém stroji testovat houževnatost materiálu, konkrétně byla měřena nárazová energie. Snahou bylo vyvolat u stejného materiálu porušení dle houževnatého a křehkého mechanismu. Z toho důvodu byl zkušební materiál různými způsoby zpracováván. Za účelem snížení houževnatosti byly zkušební vzorky vodíkovány a kaleny. Pro dosažení opačného efektu, kterým je navýšení houževnatosti, bylo použito žíhání. V průběhu experimentů docházelo ke změnám zkušebních podmínek, z toho důvodu výsledky byly rozděleny do několika částí. V každé z částí byly porovnávány výsledky naměřené při stejných podmínkách, jinak by srovnávání výsledků bylo zavádějící.

V první části (kapitola 6.4.1) byly zkoušeny vzorky ve výchozím a vodíkováném stavu. Při srovnání získaných hodnot nárazové energie nelze pozorovat u vodíkováných vzorků pokles nárazové energie. Byla provedena kontrola lomových ploch na stereomikroskopu a v obou případech lomová plocha vykazovala houževnatý charakter šíření trhliny.

V druhé části (kapitola 6.4.2) byly provedeny zkoušky u vzorků ve vyžíhaném stavu a ve stavu vyžíhaném a vodíkováném. V žádném z případů nedošlo k celkovému porušení zkušebních vzorků. U vzorků žíhaných byl takový průběh očekávaný, ale u těch vzorků, které byly navíc vodíkovány se předpokládalo, že dojde k úplnému porušení. V průběhu zkoušení bylo zjištěno, že dochází ke tření mezi zkušebním vzorkem a částí kladiva, proto byly stanoveny nové zkušební podmínky (nové podmínky viz kapitola 6.4.2).

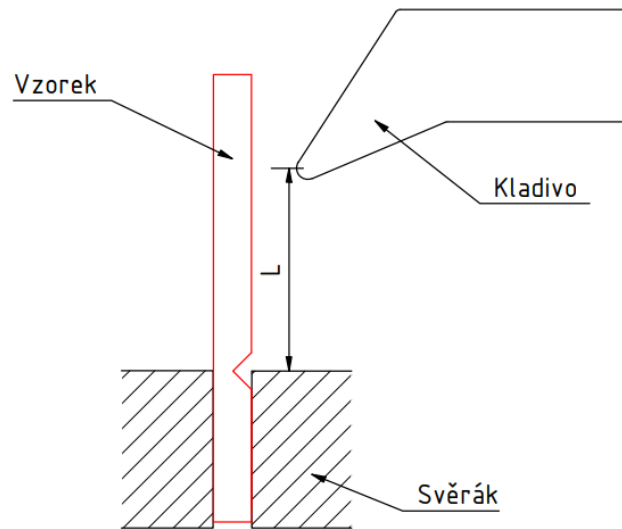
V třetí části (kapitola 6.4.3) byly opět zkoušeny vzorky ve vyžíhaném stavu a ve stavu vyžíhaném a vodíkováném. Došlo k přeražení všech zkušebních vzorků, ale při porovnání naměřených hodnot nelze pozorovat pokles houževnatosti u vodíkováných vzorků. Po zkoušení bylo předpokládáno, že změna zkušebních podmínek prospěla, jelikož oproti druhé části došlo k přeražení všech zkušebních vzorků. Na základě následujících měření bylo zjištěno, že takové chování bylo způsobeno jiným způsobem žíhání.

V čtvrté části (kapitola 6.4.4) byly měřeny vzorky ve výchozím stavu, vzorky ve stavu vyžíhaném a vzorky ve stavu vyžíhaném a vodíkováném. U všech vzorků, které byly žíhány nedošlo k přeražení, ani nebyla vytvořena dostatečně velká trhlina pro jejich dolomení, po kterém by bylo možné analyzovat jejich lomovou plochu. Takové chování bylo způsobeno nedostatečnou energií kladiva.

Pátá část (kapitola 6.4.5) byla nejrozsáhlejší, kromě naměřených hodnot byly kontrolovány lomové plochy pomocí ŘEM. Také byla značně navýšena doba vodíkování až na několik desítek hodin. Ale i přes navýšenou dobu vodíkování hodnoty nárazové energie u vodíkováných vzorků nebyly odlišné od vzorků ve výchozím stavu nebo vzorků vyžíhaných. Při kontrolování vzorků na ŘEM všechny lomové plochy odpovídaly houževnatému porušení. Byla zaznamenána jamková morfologie, která je typická pro houževnaté porušení.

V šesté části (kapitola 6.4.6) byly použity dráty s nižším průměrem, které byly zkoušeny ve výchozím a ve vodíkováném stavu. Také bylo provedeno měření nárazové energie u vzorků pouze kalených. Při porovnání hodnot nárazové energie u vzorků ve výchozím stavu a u vzorků vodíkováných opět nelze pozorovat pokles hodnoty nárazové houževnatosti. Při srovnání kalených vzorků se vzorky ve výchozím stavu byl zaznamenán

značný pokles houževnatosti. Při kontrole lomových ploch kalených vzorků nebyla zaznamenána viditelná plastická deformace.



Obr. 34: Návrh nových zkušebních podmínek

Na základě naměřených hodnot lze říci, že na navrženém stroji je možné zachytit pouze výraznou změnu houževnatosti, která byla dosahována tepelným zpracováním (kalení, žíhání). V případě vodíkových vzorků stroj neměl dostatečnou citlivost a žádný ze zkušebních vzorků neprojevil křehké chování, což je v rozporu s předpokládaným chováním. Již během zkoušení byly navrhovány nové podmínky, při kterých by bylo možné u vodíkových vzorků vyvolat křehkolomové chování. Hlavní změna spočívá v zvětšení vzdálenosti  $L$  (viz obr. 34) z 20 na 40 mm, čímž dojde také ke zvýšení ohybového momentu, tím pádem i napětí. Zvětšení této vzdálenosti bylo možné realizovat pouze snížením svěráku, což vyžadovalo výrobu jedné nové části. Z toho důvodu došlo k návrhu nové části svěráku a následně byla objednána její výroba. Taktéž by bylo vhodné změnit tvar kladiva na takový jak na obr. 36. Taková geometrie znemožní tření ploch, ke kterému docházelo v momentě ohýbání vzorku (daný problém je popsán v kapitole 6.4.2). Tento problém byl vyřešen otočením kladiva (viz obr. 25 vpravo, kapitola 6.4.2), ale nově navržené řešení se zdá být vhodnější.

## 8 Závěr

Daná bakalářská práce se zabývá zkoušením drátů z pružinové oceli pomocí rázové zkoušky. V rešeršní části jsou popsána témata jako pružinové oceli a jejich tepelné zpracování, příčiny a důsledky ztráty houževnatosti, mechanismy porušování a zkoušky houževnatosti. Všechna tato témata úzce souvisí s navazujícím experimentálním programem, který se skládá ze dvou částí. První část je věnována návrhu zkušebního stroje a zkušebních podmínek. Druhá se zabývá záznamem veškerých naměřených hodnot. Ve druhé části jsou také popsány změny zkušebních podmínek, které byly prováděny mezi jednotlivými měřeními.

Tato práce je zaměřená na experimentální část, cílem které bylo navrhnout stroj, který by umožnil zachytit změnu houževnatosti u pružinové oceli. Dle naměřených hodnot získaných v experimentálním programu je možné konstatovat, že na daném stroji se dá zachytit pouze výrazná změna houževnatosti, která byla vyvolaná tepelným zpracováním. U vodíkováných vzorků se nepovedlo zkřehnutí zaznamenat, z důvodu nízké citlivosti stroje. Kvůli tomu byly navrženy nové zkušební podmínky (viz kapitola 7), jejichž realizaci nebylo možné provést v průběhu experimentální činnosti, jelikož bylo za potřebí vyrobit novou část svěráku. Tato součást již byla navržena a objednána a po její výrobě bude instalovaná na zkušební zařízení.

## Seznam použitých zdrojů

1. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. Brno: CERM, 1999. ISBN 978-80-7204-130-5.
2. PLUHAR, Jaroslav a Josef KORITTA. *Strojírenské materiály*. Praha; Bratislava: SNTL ; Alfa, 1982.
3. ČSN EN 10020: *Definice a rozdělení ocelí*
4. JECH, Jaroslav. *Tepelné zpracování oceli: metalografická příručka*. Praha: SNTL, 1969.
5. JAREŠ, Vojtěch. *OCEL*. Praha: Státní Nakladatelství Technické Literatury, 1962.
6. ELFMARK, Jiří. *Tváření kovů*. Praha: SNTL, 1992. ISBN 978-80-03-00651-9.
7. ŽIDEK, Milan, Vladimír DĚDEK a Boris SOMMER. *Tváření oceli*. Praha; Bratislava: SNTL ; Alfa, 1988.
8. *Válcování drátu* [online]. Dostupné z: <https://img.trueniu.net/wp-content/uploads/sites/9/2019/06/25175646/wire-rod-rolling-mills.png>
9. *Tažení drátu* [online]. Dostupné z: <https://i.ytimg.com/vi/VVewNWWBVjs/maxresdefault.jpg>
10. KRAUS, Václav. *Tepelné zpracování a slinování*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2013. ISBN 978-80-261-0260-1.
11. POLUSHKIN, Eugene Paul a Pavel SCHIER. *Příčiny a odstraňování vad kovů*. 1963.
12. НОВИКОВ, Илья Изриэлович. *Теория термической обработки металлов*. Moskva: Металлургия, 1986.
13. HRDINOVÁ, Hana. *Článek: Povrchové úpravy a křehkost ocelí* [online]. Dostupné z: <https://www.engineering.sk/clanky2/povrchove-upravy/9871-povrchove-upravy-a-krehkost-oceli>
14. *PZ\_Jur01.pdf* [online]. [vid. 2021-11-19]. Dostupné z: [http://mechanika.fs.cvut.cz/content/files/PZ/2011/PZ\\_Jur01.pdf](http://mechanika.fs.cvut.cz/content/files/PZ/2011/PZ_Jur01.pdf)
15. СМИРНОВ, М. А, В.М. СЧАСТЛИВЦЕВ а L. G ЖУРАВЛЕВ. *Основы термической обработки стали: Учебное пособие*. Екатеринбург: УрО РАН, 1999. ISBN 978-5-7691-0848-8.
16. BARTONÍČEK, Robert. *Koroze a protikorozi ochrana kovů*. Praha: Academia, 1966.

17. МЕРСОН, Евгений. *ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ И ПРИРОДЫ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ВОДОРОДНОЙ ХРУПКОСТИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ* [online]. B.m., nedatováno. Тольяттинский государственный университет. Dostupné z: [https://misis.ru/files/3833/Merson\\_ED\\_disser.pdf](https://misis.ru/files/3833/Merson_ED_disser.pdf)
18. ПТАЇЕК, Luděk. *Nauka o materiálu*. Brno: CERM, 2003. ISBN 978-80-7204-283-8.
19. *Lasek\_Zaklady\_degradacnich\_procesu.pdf* [online]. [vid. 2022-04-09]. Dostupné z: [https://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-3-materialove-izenyrstvi/zaklady-degradacnich-procesu/Lasek\\_Zaklady\\_degradacnich\\_procesu.pdf](https://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-3-materialove-izenyrstvi/zaklady-degradacnich-procesu/Lasek_Zaklady_degradacnich_procesu.pdf)
20. *Lomová mechanika a lomy* [online]. [vid. 2022-04-10]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2789444/>
21. SKÁLOVÁ, Jana, Rudolf KOVAŘÍK a Vladimír BENEDIKT. *Základní zkoušky kovových materiálů*. Plzen: Západočeská univerzita, 2010. ISBN 978-80-7043-417-8.
22. *Испытания на ударную вязкость* [online]. Dostupné z: <https://poznayka.org/s89157t1.html>
23. ČSN EN ISO 148-1: *Kovové materiály – Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy – Část 1: Zkušební metoda*. nedatováno.
24. ČSN EN ISO 14556: *Kovové materiály – Zkouška rázem v ohybu na kyvadlovém kladivu tyčí Charpy s V-vrubem – Instrumentovaná zkušební metoda*
25. ČSN 42 0349: *Stanovení teploty nulové houževnatosti konstrukčních ocelí*. nedatováno.
26. ČSN EN 10270-2: *Ocelové dráty na mechanické pružiny – Část 2: Ocelové pružinové dráty kalené do oleje a popouštěné*