

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

Studijní program: B0715A270013 – Strojní inženýrství  
Studijní specializace: Strojírenské materiály a technologie

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Ultrazvukové hodnocení změn modulu pružnosti při deformaci oceli**

Autor: Martin LEJSEK  
Vedoucí práce: doc. Ing. Petr BENEŠ, Ph.D.

Akademický rok 2022/2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Martin LEJSEK**

Osobní číslo: **S19B0354P**

Studijní program: **B0715A270013 Strojní inženýrství**

Specializace: **Strojírenské materiály a technologie**

Téma práce: **Ultrazvukové hodnocení změn modulu pružnosti při deformaci oceli**

Zadávací katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

## Zásady pro vypracování

1. Základy měření zbytkových napětí v materiálech
2. Základní deformační mechanismy kovových materiálů
3. Vliv tlakového namáhání na kovové materiály
4. Základy ultrazvukového zkoušení materiálů
5. Vliv elastické a plastické deformace na ultrazvukové vlnění
6. Experimentální program
7. Vyhodnocení experimentů
8. Diskuse výsledků
9. Závěr

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

Seznam doporučené literatury:

Kopec, B., a kolektiv, Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí. Akademické nakladatelství CERM, ISBN:9788072045914, 2008.

Kopec, B., Neugebauer, J., Mazal, P. a kolektiv, Ultrazvukové zkoušení, studijní příručka, Česká společnost pro NDT, ISBN:978-80-214-5722-5, 2020.

Kumar, A., et al., Correlation between ultrasonic shear wave velocity and Poisson's ratio for isotropic solid materials. Acta Materialia. Vol. 51, pp 2417-2426, 2003.

Kobayashi, M., Analysis of deformation localization based on proposed theory of ultrasonic wave velocity propagating in plastically deformed solids, International Journal of Plasticity, Vol. 26, pp 107-125, 2010.

Zavadil, T., Ultrasonic detection of plastic deformation, IXth NDT in PROGRESS October 9-11, 2017.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Beneš, Ph.D.**  
Katedra materiálu a strojírenské metal  
Konzultant bakalářské práce: **Doc. Ing. Václav Machek, CSc.**  
Mubea, spol. s r.o.  
Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2022**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2023**

L.S.

---

**Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.**

děkan

---

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

vedoucí katedry

## Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Lejsek	<b>Jméno</b> Martin	
<b>STUDIJNÍ PROGRAM</b>	B0715A270013 Strojní inženýrství		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> doc. 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>	Ultrazvukové hodnocení změn modulu pružnosti při deformaci oceli		

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

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	98	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	77	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	21
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b> <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Bakalářská práce obsahuje popis základních deformačních mechanismů, vliv deformace na kovové materiály a ultrazvukové vlnění. V experimentální části se práce zabývá změnou Youngova modulu pružnosti při plastické deformaci a vlivem plastické deformace na šíření ultrazvukových vln materiálem.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b> <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	Youngův modul pružnosti, ultrazvukové zkoušení, plastická deformace, měření deformace

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Lejsek	Name Martin
<b>STUDY PROGRAMME</b>	B0715A270013 Mechanical Engineering	
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) doc. Ing. Beneš, Ph.D.	Name Petr
<b>INSTITUTION</b>	ZČU – FST – KMM	
<b>TYPE OF WORK</b>	<del>DIPLOMA</del>	BACHELOR
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Delete when not applicable	
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Ultrasonic evaluation of in E modulus by deformation of steel	

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

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

<b>TOTALLY</b>	98	<b>TEXT PART</b>	77	<b>GRAPHICAL PART</b>	21
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The bachelor thesis contains a description of the basic deformation mechanisms, the effect of deformation on metallic materials and ultrasonic waves. The experimental part of the thesis deals with the change of Young's modulus during plastic deformation and the effect of plastic deformation on the propagation of ultrasonic waves through the material.
<b>KEY WORDS</b>	Elastic Young's modulus of elasticity, ultrasonic testing, plastic deformation, deformation measurement

## **Poděkování**

V této části bych rád poděkoval vedoucímu práce panu doc. Ing. Petru Benešovi, Ph.D. za vedení práce, odborné rady, pomoc při práci na experimentální části práce a za jeho cenný čas.

## Obsah

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE.....	2
Přehled použitých zkratk a symbolů.....	11
Seznam obrázků .....	13
Seznam tabulek .....	14
1 Úvod.....	16
2 Základní deformační mechanismy kovových materiálu .....	17
2.1 Deformace .....	17
2.2 Pružná deformace .....	18
2.3 Plastická deformace.....	19
2.3.1 Základní mechanismy plastické deformace .....	19
3 Vliv deformace na vlastnosti a strukturu kovů.....	23
3.1 Deformace za studena.....	23
3.2 Deformace za tepla .....	24
3.3 Zotavení .....	24
3.4 Rekrytalizace.....	25
3.5 Vliv deformace na Youngův modul pružnosti .....	25
3.6 Vliv deformace na Youngův modul pružnosti čistého železa .....	27
4 Zbytková (reziduální) napětí .....	30
4.1 Typy zbytkových napětí .....	30
4.2 Vznik zbytkových (reziduálních) napětí.....	32
4.2.1 Mechanické procesy.....	32
4.2.2 Tepelné procesy.....	32
4.2.3 Chemické procesy .....	32
5 Metody měření deformací .....	33
5.1 Elektrické průtahoměry .....	33
5.1.1 Kapacitní průtahoměry.....	33
5.1.2 Piezoelektrické snímače .....	34
5.1.3 Tenzometry.....	34
5.2 Optické snímače .....	35
5.2.1 Video-extenzometr .....	36
5.2.2 Laserový extenzometr .....	37



6	Základy ultrazvukového zkoušení.....	38
6.1	Ultrazvuk .....	38
6.2	Fyzikální princip.....	38
6.3	Šíření vlny.....	39
6.4	Typy vlnění.....	39
6.4.1	Podélné vlny .....	40
6.4.2	Příčné vlny.....	40
6.4.3	Povrchová vlna .....	41
6.4.4	Desková (Labdova) vlna .....	41
6.5	Interakce zvuku s pevnou látkou .....	41
6.5.1	Snellův zákon .....	42
6.5.2	Kolmý dopad na rozhraní.....	42
6.5.3	Šikmý dopad na rozhraní.....	42
6.6	Vliv deformace na rychlost šíření ultrazvukových vln.....	43
6.7	Komerčně dostupná měřící zařízení .....	44
6.8	Výpočet velikosti E z rychlosti ultrazvukových vln.....	44
7	Experimentální část .....	45
7.1	Příprava vzorků.....	45
7.2	Měření tvrdosti materiálu ve výchozím stavu .....	47
7.3	Žíhání.....	49
7.4	Deformace vzorků .....	50
7.5	Měření tvrdosti materiálu po deformaci .....	51
7.6	Měření hustoty materiálů.....	52
8	Určení Youngova modulu pružnosti .....	53
8.1	Měření rychlosti šíření ultrazvukových vln pomocí defektoskopu .....	53
8.2	Výsledky měření a vypočtených hodnot .....	55
9	Vliv plastické deformace na šíření ultrazvukové vlny .....	61
9.1	Doplňující výsledky.....	68
10	Metalografická analýza .....	70
11	Diskuse výsledků.....	72
11.1	Ultrazvukové hodnocení změn modulu pružnosti při deformaci oceli .....	72
11.2	Hodnocení vlivu plastické deformace na šíření ultrazvukové vlny .....	72

11.3	Vyhodnocení metalografické analýzy.....	73
12	Závěr.....	74
13	Citovaná literatura .....	75
	PŘÍLOHA č. 1 .....	i
	PŘÍLOHA č. 2.....	xiii

## Přehled použitých zkratek a symbolů

A – amplituda

AISI – American Iron and Steel Institut (Americký institut železa a oceli)

c – rychlost ultrazvukové vlny [m/s]

$c_r$  – rychlost povrchové ultrazvukové vlny [m/s]

$c_t$  – rychlost příčné ultrazvukové vlny [m/s]

D – tloušťka vzorku [m]

E – Youngův modul pružnosti [MPa]

$\varepsilon$  – poměrná deformace (prodloužení) [%]

f – frekvence [Hz]

G – modul pružnosti ve smyku [MPa]

$\gamma$  – zkos [-]

h – výška vzorku po deformaci [m]

$h_0$  – výška vzorku před deformací [m]

HV – tvrdost dle Vickerse

$\lambda$  – vlnová délka [m]

m – hmotnost vyvažujícího závaží tělesa na vzduch [kg]

$m'$  – hmotnost vyvažujícího závaží tělesa ponořeného do vody [kg]

$\mu$  – Poissonova konstanta

p – akustický tlak [Pa]

P1 – frekvence vlny

P2 – šířka pásma vlny na úrovni 50 % signálu

P3 – maximální pík signálu vlny

P4 – RMS vlny

P5 – amplituda vlny

P6 – perioda vlny

P7 – čas náběhu hodnoty signálu vlny z úrovně 10 % na 90 %

P8 – čas poklesu hodnoty signálu vlny z úrovně 90 % na 10 %

$R_m$  – napětí na mezi pevnosti [MPa]

$R_e$  – napětí na mezi kluzu [MPa]

$\rho$  – hustota [ $\text{kg/m}^3$ ]

RMS – Root Mean Square (kvadratický průměr)

$S$  – plocha roviny kolmé ke směru působení síly [ $\text{m}^2$ ]

$\sigma$  – napětí [MPa]

$S_k$  – plocha roviny skluzu [ $\text{m}^2$ ]

$T$  – perioda [s]

$t$  – čas průchodu ultrazvukové vlny vzorkem [s]

$t_1$  – čas naměření využitím brán [s]

$t_2$  – čas změření pomocí referenčních kurzorů [s]

$t_L$  – čas průchodu podélné ultrazvukové vlny [s]

$t_{L1,2}$  – průměrná doba průběhu podélné ultrazvukové vlny [s]

$t_T$  – čas průchodu příčné ultrazvukové vlny [s]

$t_{T1,2}$  – průměrná doba průběhu příčné ultrazvukové vlny [s]

TEM – Transmisní elektronový mikroskop

$\tau$  – smykové napětí [MPa]

$\tau_{kr}$  – kritické smykové napětí [MPa]

$v$  – akustická rychlost [m/s]

$v_{1,2}$  – rychlost vlnění v daném prostředí [m/s]

$Z$  – akustická impedance [ $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ]

## Seznam obrázků

Obr. 1: Schéma tvarové a rozměrové změny hranolu při pýchování [2].....	17
Obr. 2: Plastická deformace prostým skluzem [4] .....	20
Obr. 3: Vztah mezi normálovým a smykovým napětím při jednoosém tahovém namáhání zkušebního tělesa [2].....	21
Obr. 4: Mechanické dvojče [1].....	22
Obr. 5: Závislost mechanických hodnot materiálu na stupni deformace [6] .....	23
Obr. 6: Mikrostrukturu vysokouhlíkové oceli s 0,7 % C před deformací [5] .....	24
Obr. 7: Mikrostrukturu vysokouhlíkové oceli s 0,7 % C po deformaci [5] .....	24
Obr. 8: Průběh rekystalizace [8] .....	25
Obr. 9: Výsledky měření závislosti modulu pružnosti na deformaci [10] .....	26
Obr. 10: Dislokační buněčná struktura [13] .....	28
Obr. 11: Snímky buněčné dislokační struktury (TEM) – (A) – nedeformováno, (B) – deformace 3 %, (C) – deformace 6 %, (D) - deformace 8 %, (E) – deformace 10 % [11].....	28
Obr. 12: Vývoj dislokační hustoty (horní graf) a Youngovo modulu (dolní graf) při tažení za studena [11] .....	29
Obr. 13: Schematické znázornění zbytkové napětí typu I, II a III. M a R označují matici a výztuž [15] .....	31
Obr. 14: Deskový kapacitor [16].....	33
Obr. 15: Piezoelektrický jev [20] .....	34
Obr. 16: Zapojení do Wheatstoneova můstku [19] .....	35
Obr. 17: Schéma foliového kovového tenzometru [18] .....	35
Obr. 18: Měření deformace video-extenzometrem [23].....	36
Obr. 19: laserový extenzometr [23].....	37
Obr. 20: Popis ultrazvukového vlnění [26] .....	38
Obr. 21: a) Podélná vlna, b) Příčná vlna [25].....	40
Obr. 22: Povrchová vlna [25] .....	41
Obr. 23: Snellův zákon [25] .....	42
Obr. 24: Hliníkový vzorek [28].....	43
Obr. 25: Materiál S235 před rozřezem.....	45
Obr. 26: Materiál S235 po rozřezání .....	46
Obr. 27: Měření tvrdosti na přístroji Mitutoyo AVK.....	48
Obr. 28: Měření úhlopříčky vtisku indentoru.....	48

Obr. 29: Měření délky uhlopříček vtisku [31].....	48
Obr. 30: Vzorky při vkládání do pece.....	49
Obr. 31: Vlevo vzorek před deformací, vpravo po deformaci.....	51
Obr. 32: Oblasti pro měření tvrdosti.....	51
Obr. 33: Ultrazvukový defektoskop.....	54
Obr. 34: Měření na ultrazvukovém defektoskopu.....	56
Obr. 35: Graf závislosti modulu pružnosti na poměrné deformaci – C45 – ČSN 12 050.....	57
Obr. 36: Graf závislosti modulu pružnosti na poměrné deformaci – S235 – ČSN 11 373.....	58
Obr. 37: Graf závislosti modulu pružnosti na poměrné deformaci - 2. měření – S235 – ČSN 11 373.....	59
Obr. 38: Graf závislosti modulu pružnosti na poměrné deformaci – EN AW 1050 T1.....	60
Obr. 39: Záznam měření na digitálním osciloskopu – vzorek C2.....	61
Obr. 40: Porovnání vlnových charakteristik (frekvence 2,25 MHz) – C45 – ČSN 12 050.....	62
Obr. 41: Porovnání vlnových charakteristik (frekvence 4 MHz) – C45 – ČSN 12 050.....	63
Obr. 42: Porovnání vlnových charakteristik (frekvence 2,25 MHz) – S235 – ČSN 11 373.....	64
Obr. 43: Porovnání vlnových charakteristik (frekvence 4 MHz) – S235 – ČSN 11 373.....	65
Obr. 44: Porovnání vlnových charakteristik (frekvence 2,25 MHz) – EN AW 1050 T1.....	66
Obr. 45: Porovnání vlnových charakteristik (frekvence 4 MHz) – EN AW 1050 T1.....	67
Obr. 46: Graf pro ocel C45 (frekvence 2,25 MHz).....	68
Obr. 47: Graf pro ocel C45 (frekvence 4 MHz).....	68
Obr. 48: Graf pro ocel S235 (frekvence 2,25 MHz).....	69
Obr. 49: Graf pro ocel S235 (frekvence 4 MHz).....	69
Obr. 50: Graf pro slitinu EN AW 1050 T1 (frekvence 2,25 MHz).....	69
Obr. 51: Graf pro slitinu EN AW 1050 T1 (frekvence 4 MHz).....	69
Obr. 52: Horní strana – C1 100x.....	71
Obr. 53: Dolní strana – C1 100x.....	71
Obr. 54: Struktura podél vzorku – C1 25x.....	71
Obr. 55: Střed - C1 500x.....	71
Obr. 56: Střed - C1 100x.....	71

## Seznam tabulek

Tab. 1: Výsledky měření závislosti modulu pružnosti na deformaci č. 2 [11].....	26
Tab. 2: Seznam vzorků.....	46

Tab. 3: Měření tvrdosti HV30 – ocel S235 - ČSN 11 373 .....	47
Tab. 4: Měření tvrdosti HV30 – ocel C45 – ČSN 12 050 .....	47
Tab. 5: Měření tvrdosti HV1 – hliníková slitina EN AW 1050 T1 .....	47
Tab. 6: Měření tvrdosti HV30 – ocel C45 vyžíhaný stav .....	49
Tab. 7: Deformace oceli C45 – ČSN 12 050.....	50
Tab. 8: Deformace oceli S235 - 11 373 .....	50
Tab. 9: Deformace hliníkové slitiny EN AW 1050 T1 .....	50
Tab. 10: Měření tvrdosti po deformaci – výsledky .....	51
Tab. 11: Určení hustoty slitiny EN AW 1050 T1 .....	52
Tab. 12: Určení hustoty hydrostatickou metodou .....	52
Tab. 13: Určení hustoty ocelových vzorku .....	52
Tab. 14: Výsledky měření: vzorek C2 .....	55
Tab. 15: Výsledky pro materiál C45 – ČSN 12 050 .....	57
Tab. 16: Výsledky pro materiál S235 – ČSN 11 373.....	58
Tab. 17: Výsledky pro materiál S235 - 2. měření– ČSN 11 373 .....	59
Tab. 18: Výsledky pro materiál EN AW 1050 T1 .....	60
Tab. 19: Měření vlnových charakteristik (frekvence 2,25 MHz) – C45 – ČSN 12 050 .....	62
Tab. 20: Měření vlnových charakteristik (frekvence 4 MHz) – C45 – ČSN 12 050 .....	63
Tab. 21: Měření vlnových charakteristik (frekvence 2,25 MHz) – S235 – ČSN 11 373.....	64
Tab. 22: Měření vlnových charakteristik (frekvence 4 MHz) – S235 – ČSN 11 373.....	65
Tab. 23: Měření vlnových charakteristik (frekvence 2,25 MHz) – EN AW 1050 T1 .....	66
Tab. 24: Měření vlnových charakteristik (frekvence 4 MHz) – EN AW 1050 T1 .....	67

## 1 Úvod

Youngův modul pružnosti ( $E$ ) je jednou z důležitých mechanických vlastností materiálů, která má významné praktické využití například při návrhu konstrukcí a tvářecích procesech. V technické praxi je Youngův modul pružnosti považován za konstantu. V průběhu 20. století se ukázalo, že hodnota Youngova modulu pružnosti není vždy konstantní a může se měnit v závislosti na deformaci materiálu. Zvláště v případě kovů se může během plastické deformace výrazně snížit, což má vliv na chování materiálu při zatěžování.

Cílem této bakalářské práce je ultrazvukové hodnocení změn modulu pružnosti při deformaci oceli. Tato změna bude zkoumána na vzorcích z oceli a hliníku pomocí neinvazivní metody měření ultrazvukových vln. Během experimentů budou vzorky podrobeny různým stupňům plastické deformace a bude měřena rychlost šíření příčných a podélných ultrazvukových vln materiálem. Na základě získaných dat budou poté pomocí empirického vzorce vypočteny hodnoty Youngova modulu pružnosti pro každý deformovaný vzorek.

Kromě toho bude v rámci práce sledován také vliv plastické deformace na šíření ultrazvukových vln v materiálu. Tento vliv bude hodnocen na základě analýzy změn ultrazvukových vlnových charakteristik, které se projeví při šíření vln materiálem.



## 2 Základní deformační mechanismy kovových materiálů

Tato kapitola bude pojednávat o druzích deformace a o mechanismech vzniku plastické deformace

### 2.1 Deformace

Deformace je způsobena napětím vyvolaným v tělese působením vnějších sil. Těleso pod vlivem vnější síly mění svůj tvar, deformuje se. Pokud těleso po odlehčení získá opět původní tvar, jde o pružnou (vratnou) deformaci. Nestane-li se tak, jedná se plastickou (trvalou) deformaci [1, 2].

Deformaci lze vyjádřit několika způsoby:

#### Absolutní deformace

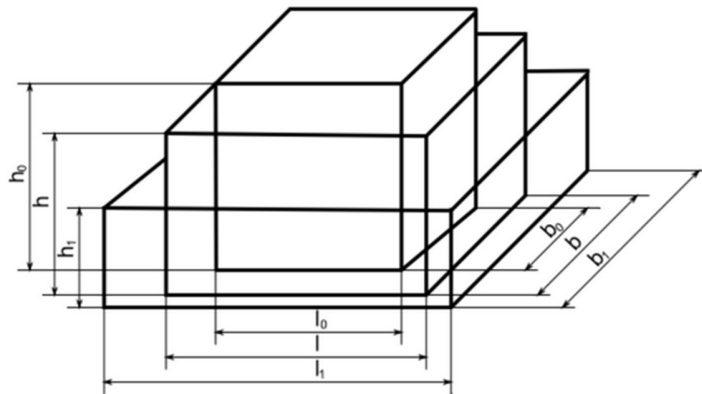
Absolutní deformaci vyjádříme jako rozdíl rozměrů tělesa před deformací a po deformaci (oObr. 1).

$$\begin{aligned}\Delta h &= h_0 - h_1 \\ \Delta b &= b_0 - b_1 \\ \Delta l &= l_0 - l_1\end{aligned}\quad (1)$$

$\Delta h$ ,  $\Delta b$ ,  $\Delta l$  – absolutní deformace

$h_0$ ,  $b_0$ ,  $l_0$  – počáteční rozměry

$h_1$ ,  $b_1$ ,  $l_1$  – konečné rozměry



Obr. 1: Schéma tvarové a rozměrové změny hranolu při pěchování [2]

### Poměrná lineární deformace

Je definována jako podíl změny rozměru k původnímu rozměru. Je vhodná pouze pro popis malých deformací v pružné deformaci (do cca  $\varepsilon = 0,1$ ). Pro popis velkých deformací je nevhodná [2].

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \frac{\Delta h}{h_0} && \text{stlačování} \\ \varepsilon_2 &= \frac{\Delta b}{b_0} && \text{šíření} \\ \varepsilon_3 &= \frac{\Delta l}{l_0} && \text{prodlužování}\end{aligned}\tag{2}$$

$\Delta h, \Delta b, \Delta l$  – rozdíl počátečních a konečných rozměrů  
 $h_0, b_0, l_0$  – počáteční rozměry

### Součinitel deformace

V technické praxi využívaný součinitel

$$\begin{aligned}\gamma &= \frac{h_1}{h_0} - \text{součinitel stlačení} \\ \beta &= \frac{b_1}{b_0} - \text{součinitel šíření} \\ \lambda &= \frac{l_1}{l_0} - \text{součinitel prodloužení}\end{aligned}\tag{3}$$

$h_0, b_0, l_0$  – počáteční rozměr  
 $h_1, b_1, l_1$  – konečný rozměr

## **2.2 Pružná deformace**

Do určitého zatížení se těleso deformuje pouze pružně (elasticky). Pružná deformace je omezena mezí. Tato mez je určena hodnotou napětí, při kterém dochází k trvalé deformaci. Pružná deformace krystalických látek se uskutečňuje vysunutím atomů z rovnovážných poloh v krystalové mřížce. Po odlehčení jsou atomy převládajícími přitažlivými nebo odpudivými silami vráceny do rovnovážné polohy a těleso nabude původního tvaru. Z toho vyplývá že modul pružnosti v tahu závisí na typu vazeb atomů a uspořádání atomů v prostoru. Doba nezbytná ke změně středních poloh atomů při pružné deformaci je zpravidla o několik řádů kratší než doba, po které trvá, jak růst síly na plnou hodnotu při zatěžování, tak její vymizení při odlehčení. Proto je většinou možné uvažovat, že pružná deformace sleduje zatížení bez časové prodlevy a je časově nezávislá. Mezi pružnou deformací a napětím platí přímá úměrnost, kterou vyjadřuje Hookův zákon  $\sigma = \varepsilon \times E$ . Kde  $E$  je Youngův modul pružnosti. Pro deformaci skosem  $\gamma$  platí podobný vztah  $\tau = G \times \gamma$ . Kde  $G$  je modul pružnosti ve smyku [1, 2, 3].

Hookův zákon:

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (5)$$

E – Youngův modul pružnosti [MPa]

$\sigma$  – napětí [MPa]

$\varepsilon$  – poměrné prodloužení [-]

$\Delta l$  – rozdíl počáteční a koncové délky [m]

$l_0$  – počáteční délka [m]

$$\tau = G \times \gamma \quad (6)$$

G – modul pružnosti ve smyku [MPa]

$\tau$  – napětí [MPa]

$\gamma$  – zkos [1, 2, 3]

## 2.3 Plastická deformace

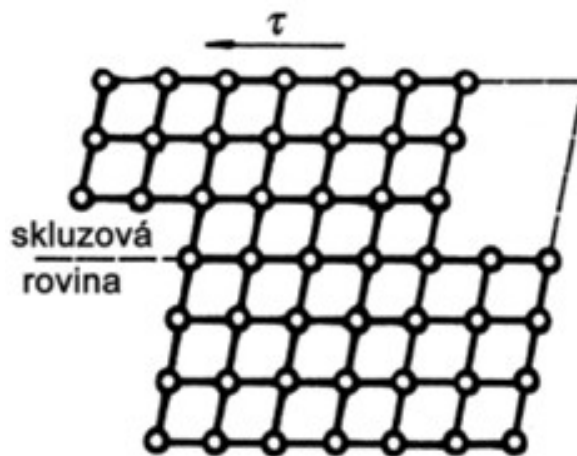
Pro vznik plastické (trvalé) deformace je zapotřebí překročit mez pružnosti a těleso zůstane i po odlehčení deformováno. Na rozdíl od pružné deformace nedochází při odeznění vnějších sil k navrácení atomů do původních rovnovážných poloh. Tento posun je trvalý. Vzdálenost, o kterou se atomy posunou, je větší než mřížková konstanta. Plastická deformace nemůže být způsobena působením normálového napětí. Pro vznik deformace musí působit smykové napětí  $\tau$ . Deformace nastane po překročení kritického smykového napětí  $\tau_{kr}$ . K překročení  $\tau_{kr}$  dochází jen v některých činných krystalografických rovinách a směrech, kde pohyb atomů brání nejmenší počet překážek [1,2].

### 2.3.1 Základní mechanismy plastické deformace

Plastická deformace probíhá několika základními mechanismy. Těmito mechanismy jsou prostý skluz a mechanismus dvojčatění.

### 2.3.1.1 Prostý skluz – translace

Na Obr. 2 je znázorněn nejčastější mechanismus plastické deformace, kterým je prostý skluz. Ke skluzu dochází v rovinách, které jsou nejhustěji obsazeny atomy. Tyto roviny nazýváme jako skluzové. Aby došlo k deformaci skluzem musí být překročeno kritické smykové napětí  $\tau_{kr}$ . Velikost  $\tau_{kr}$  je závislá na několika faktorech. Například na teplotě, druhu krystalické mřížky a skutečnosti, jestli byl materiál v minulosti deformován [1,2,3].



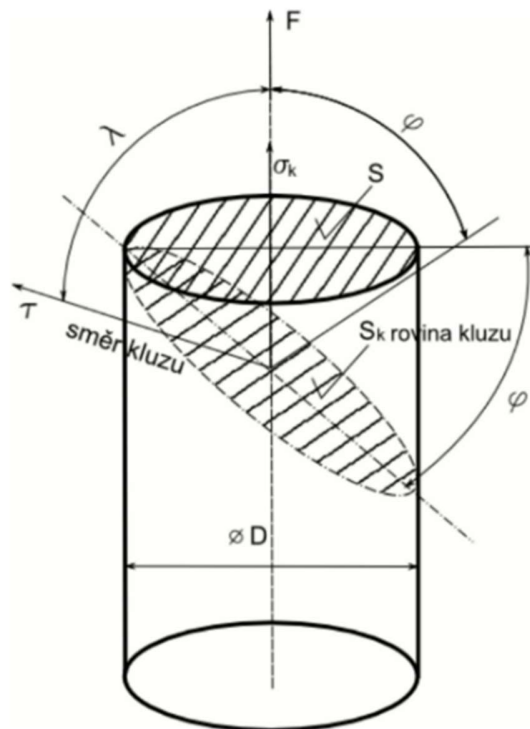
Obr. 2: Plastická deformace prostým skluzem [4]

Zákony kluzu:

- Kluz nastává v rovinách nejhustěji obsazených atomy
- Smyková napětí dosahují maximálních hodnot v rovinách skloněných pod úhlem  $45^\circ$  k rovinám kde působí normálová napětí. Směr těchto rovin je často totožný se směrem vnější zatěžující síly.
- Z dané skupiny kluzných rovin je činný ten kluzný systém, v němž smykové napětí  $\tau$  dosahuje hodnoty rovné  $\tau_{kr}$  [1, 2, 3].

Výpočet smykového napětí v rovině skluzu při tahovém zatížení válcového tělesa:

Na obr. 3 jsou uvedeny potřebné veličiny pro výpočet.



Obr. 3: Vztah mezi normálovým a smykovým napětím při jednoosém tahovém namáhání zkušebního tělesa [2]

$$R_e = \frac{F}{S_k} = \frac{F}{S} \times \cos \varphi \quad (7)$$

$$\frac{\tau}{R_e} = \cos \lambda \quad (8)$$

$$\tau = \frac{F}{S} \times \cos \varphi \times \cos \lambda = \tau_{kr} \quad (9)$$

$R_e$  – mez kluzu

$\tau$  – smykové napětí

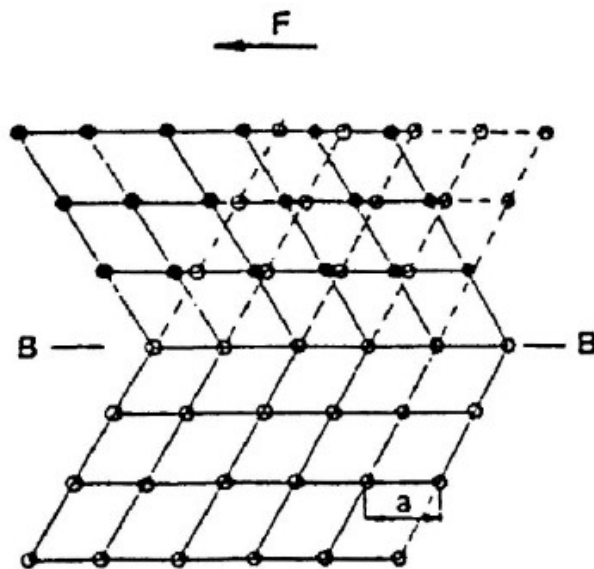
$S_k$  – plocha roviny skluzu

$S$  – plocha roviny kolmé ke směru působení síly

Dosáhne-li hodnota napětí  $\tau$  hodnoty napětí  $\tau_{kr}$  dojde k dislokačnímu skluzu v rovinách nejhustěji obsazených atomy. Hodnoty napětí  $\tau_{kr}$  dosáhnou nejdříve skluzové roviny svírající úhel  $45^\circ$  s osou tělesa [2].

### 2.3.1.2 Mechanismus dvojčatění

Je to deformační mechanismus, při kterém dochází k posunu části krystalové mřížky o vzdálenost menší, než je meziatomová vzdálenost. Posunutá část mřížky tvoří zrcadlově symetrický obraz neposunuté části mřížky. Posunutá část krystalu se nazývá dvojče. Dvojče je zobrazeno na Obr. 4. Mechanismem dvojčatění nedochází k velkým deformacím. Ke dvojčatění dochází při nízké teplotě a vysokých rychlostech deformace. Hodnota kritického smykového napětí pro dvojčatění je vyšší než hodnota kritického smykového napětí pro prostý skluz. Proto dochází přednostně k deformaci skluzem [1,3].



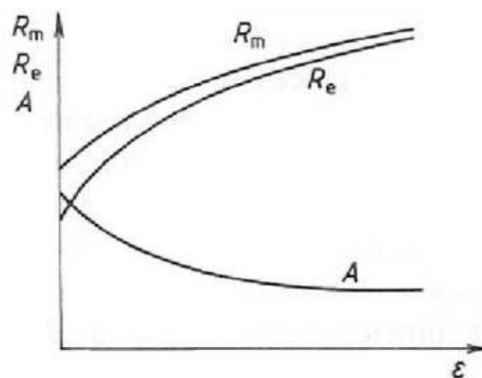
Obr. 4: Mechanické dvojče [1]

### 3 Vliv deformace na vlastnosti a strukturu kovů

Deformace kovu zásadně ovlivňuje mechanické, fyzikální a strukturální změny. Tyto změny jsou závislé na teplotě, při které dochází k deformaci. Deformace může probíhat za studena, kdy teplota při tváření nepřekročí teplotu rekrytalizace, nebo za tepla, kdy je teplota vyšší, než teplota rekrytalizace.

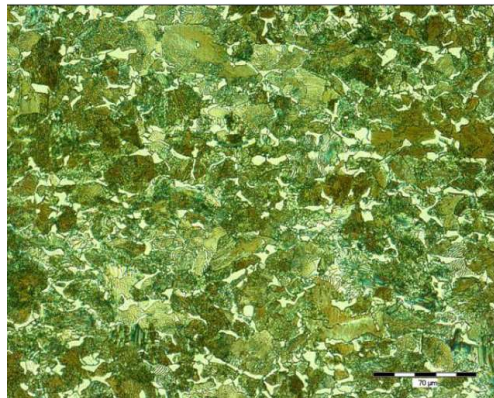
#### 3.1 Deformace za studena

Plastickou deformací dochází k deformačnímu zpevnění materiálu. Zpevnění vzniká vlivem růstu poruch krystalové mřížky a vzniku dislokací. Deformací se hustota dislokací a mřížkových poruch zvyšuje, dochází ke zvýšení odporu proti deformaci, zpevnění a zvýšení pevnosti. Dosáhne-li materiál určité meze zpevnění, je materiál zpevněn tak, že mu zcela vymizí plastická deformace. Pro obnovení nedeformované a nezpevněné struktury používáme uzdravovací procesy. Nejběžnějším z nich je rekrytalizace a zotavení. Deformační zpevnění má zejména vliv na mechanické a fyzikální vlastnosti. Tento vliv je znázorněn v grafu na Obr. 5. Jedná se zejména o pokles tažnosti, kontrakce a vrubové houževnatosti. Se vzrůstajícím zpevněním dochází k růstu tvrdosti a pevnosti.

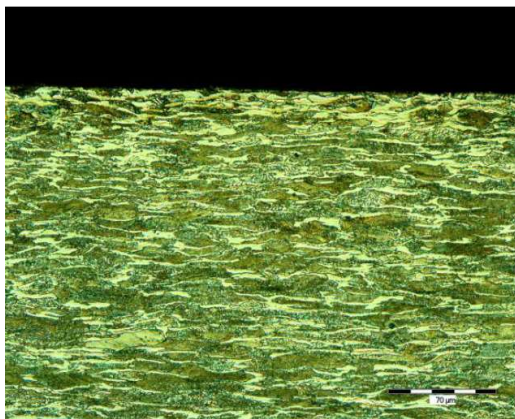


Obr. 5: Závislost mechanických hodnot materiálu na stupni deformace [6]

Z počátku deformace dochází k prudkému poklesu tažnosti ( $A$ ). Mez kluzu ( $R_e$ ) roste. dochází ke zvýšení hustoty materiálu, částečně roste elektrický odpor a materiál ztrácí odolnost proti korozi. Při plastické deformaci se jednotlivá zrna protahují ve směru hlavní deformace a vytvářejí vláknitý vzhled struktury. Na Obr. 6 je znázorněna struktura oceli před plastickou deformací s nedeformovanými zrny. Dále na Obr. 7 je zobrazena plasticky deformovaná struktura s protaženými zrny. Při deformaci dochází ke změně tvaru zrn, ale nikoli však objemu. Vměstky se při dostatečné tvárnosti usměrněně protahují stejně jako zrna kovu, při malé tvárnosti jsou rozdrobeny a rozmístěny do řádku sledujících směr deformace kovu. Výsledkem vláknité struktury je anizotropie vlastností deformovaného kovu [1,5,6].



Obr. 6: Mikrostrukturu vysokouhlíkové oceli s 0,7 % C před deformací [5]



Obr. 7: Mikrostrukturu vysokouhlíkové oceli s 0,7 % C po deformaci [5]

### 3.2 Deformace za tepla

Deformace za tepla je doprovázena probíhající rekrystalizací. Výsledkem deformace je rovnoosá, nezáporná struktura kovu. Rekrystalizací dochází pouze k přeměně kovových zrn. Nekovové vměstky zachovávají své rozložení dané deformací, a proto je struktura i po rekrystalizaci řádkovitá. Obsahuje-li materiál větší množství vměstků, vyznačuje se též řádkovitou texturou a anizotropií vlastností [6].

### 3.3 Zotavení

Kovové materiály, které byly deformovány za studena jsou v nerovnovázném stavu. Tento nerovnovázný stav může být dlouhodobě zachován, pokud je teplota dostatečně nízká. Při zvýšení teploty dochází v deformované krystalické stavbě ke změnám. Tyto změny vedou ke snižování deformační energie, která je uložena v zrnech. Zotavení začíná přemísťováním a shlukováním bodových poruch. Dochází ke zmenšování jejich koncentrace. Při zvýšení teploty se začnou

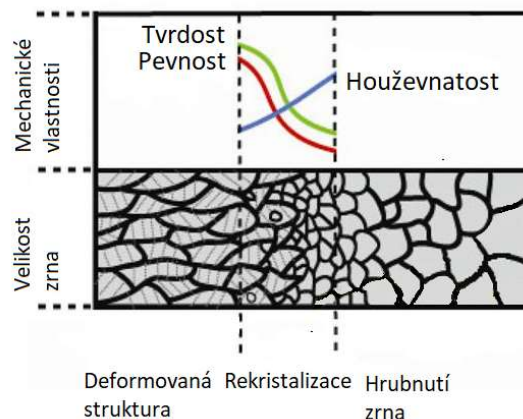


přeskupovat dislokace. Dochází ke snížení koncentrace bodových poruch a dislokací a zároveň se mění rozložení dislokací. K zotavení dochází při teplotě nižší, než je teplota rekrytalizace. V první fázi zotavení dochází ke snížení vnitřního pnutí, vlivem klesající koncentrací bodových poruch. V závěrečné fázi, kdy dojde ke snížení koncentrace dislokací, dochází ke snížení tvrdosti, pevnosti a meze kluzu. Tato změna bývá nevýrazná, výjimečně může dosáhnout až 20 % výchozího deformačního zpevnění [3,7].

### 3.4 Rekrytalizace

Rekrytalizace navazuje při zvýšení teploty na zotavení. Rekrytalizační teplota se pohybuje mezi 35–45 % teploty tavení. Společnou vlastností zotavení a rekrytalizace je, že oba děje jsou nevratné. Při rekrytalizaci dochází k úpravě deformované krystalografické mřížky způsobené předchozí deformací. Výsledkem rekrytalizace je nová struktura, která není deformovaná ani deformačně zpevněná. Kov vykazuje vlastnosti podobné vyžáhanému stavu. Vliv rekrytalizace je naznačen na Obr. 8. Rekrytalizaci rozdělujeme do těchto samostatných fází:

- Vznik zárodků nových zrn a jejich růst
- Růst rekrytalizačních zrn až dojde k nahrazení původní deformované struktury
- Hrubnutí rekrytalizované struktury [2,7]



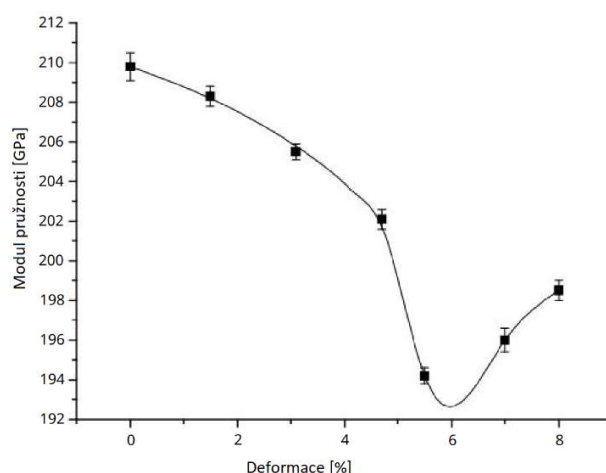
Obr. 8: Průběh rekrytalizace [8]

### 3.5 Vliv deformace na Youngův modul pružnosti

Youngův modul pružnosti  $E$  je důležitá mechanická vlastnost materiálu, která udává odolnost materiálu vůči pružné deformaci. Tradičně je Youngův modul v inženýrských aplikacích a numerických simulacích považován za konstantu. Ve skutečnosti dochází k jeho změně během deformace. Na začátku 20. století několik autorů uvedlo, že  $E$  některých kovů se snížilo, když se zvýšila deformace za studena, a detekovali snížení až o 15 % u ocelí, hliníku, mědi, mosazi. Tento jev již studovalo mnoho autorů například Yamaguchi a kolektiv studovali vliv plastické deformace u plechů z nízkouhlíkové oceli v podmínkách dvouosé deformace. Tito autoři detekovali pokles  $E$  v těchto materiálech s rostoucí plastickou deformací. Bylo potvrzeno, že Youngův modul plechu z nízkouhlíkové oceli obnovil počáteční hodnotu nedeformovaného materiálu následným žiháním.

Modul pružnosti se pohybovala od 215 GPa při 0 % deformace do 200 GPa pro 10 % deformaci. Následně klesl na 195 GPa pro 15 % deformaci. Úroveň poklesu byla 9,3 % oproti původnímu materiálu. Toto Snížení E nelze přičíst zbytkovým napětím ani texturám. Existuje úzká souvislost mezi dislokační strukturou vyvinutou s deformací a chováním E [9,10].

Benito a kolektiv ve své práci uvádí výsledky změn E za studena deformovaného čistého železa tahovou zkouškou. Získané výsledky jsou uvedeny na Obr. 9. Youngův modul pružnosti klesá v prvním kroku deformace z 210 GPa při 0 % deformaci na 194 GPa při 5,5 % deformaci a poté se obnoví na 198 GPa při 9 % deformaci [10].



Obr. 9: Výsledky měření závislosti modulu pružnosti na deformaci [10]

V další práci uvádí autor Morestin, že u různých ocelí používaných pro výrobu výlisků dochází ke snížení modulu pružnosti o 4–5 % z původních hodnot stanovených tahovou zkouškou. U jedné z těchto ocelí se E snížilo z 203 GPa na 194 GPa při 4 % deformaci. Následně tato hodnota zůstává konstantní v rozsahu mezi 4 a 11 % deformací [12].

Posledním příkladem je práce autorů Jorba a kolektivu. Autoři uvádějí že modul pružnosti nerezové oceli AISI 304 klesá z 200 GPa na 185 GPa, když je tento materiál deformován o 4,4 % tahovou zkouškou. Následně se zvyšuje na 194 GPa při 6 % deformaci a poté dochází k opětovnému snížení na 170 GPa při 30 % deformaci. V Tab. 1 jsou uvedeny výsledky získané u nerezové oceli AISI 304 [10,11].

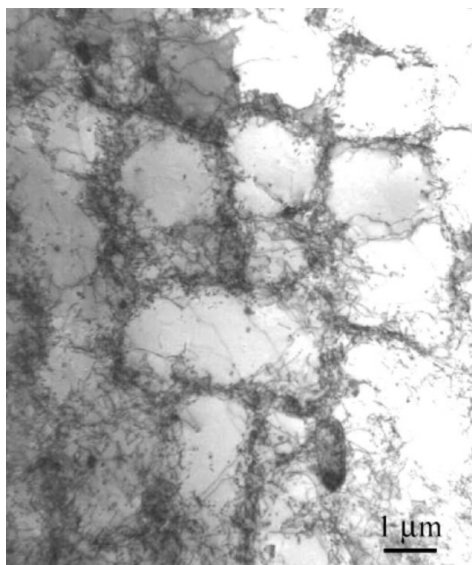
Tab. 1: Výsledky měření závislosti modulu pružnosti na deformaci č. 2 [11]

Deformace [%]	0,0	2,5	3,3	4,4	5,0	6,0	7,5	11,5	14,0	30,0
Modul pružnosti [Gpa]	200	193	194	185	187	194	189	187	184	170

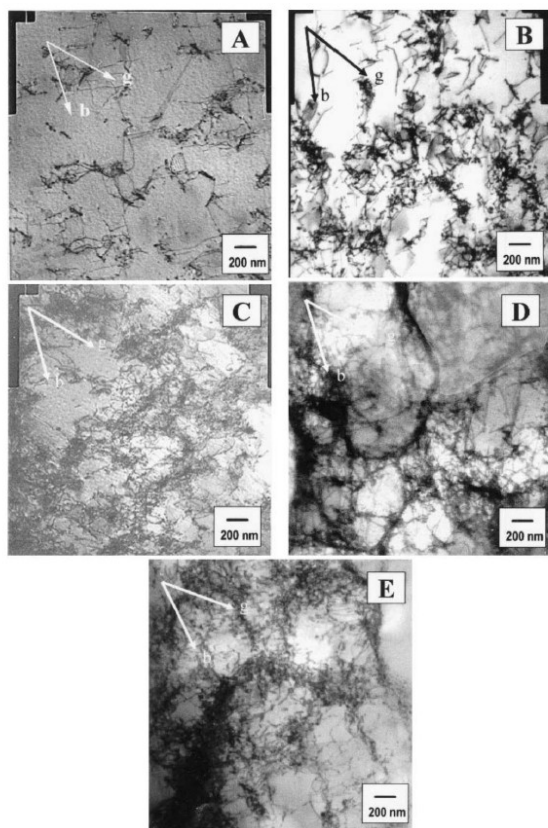
Z výše uvedených výsledku experimentů jiných autorů je patrné, že v průběhu plastické deformace může docházet k poklesu modulu pružnosti, ale je možný i částečný růst či stagnace.

### 3.6 Vliv deformace na Youngův modul pružnosti čistého železa

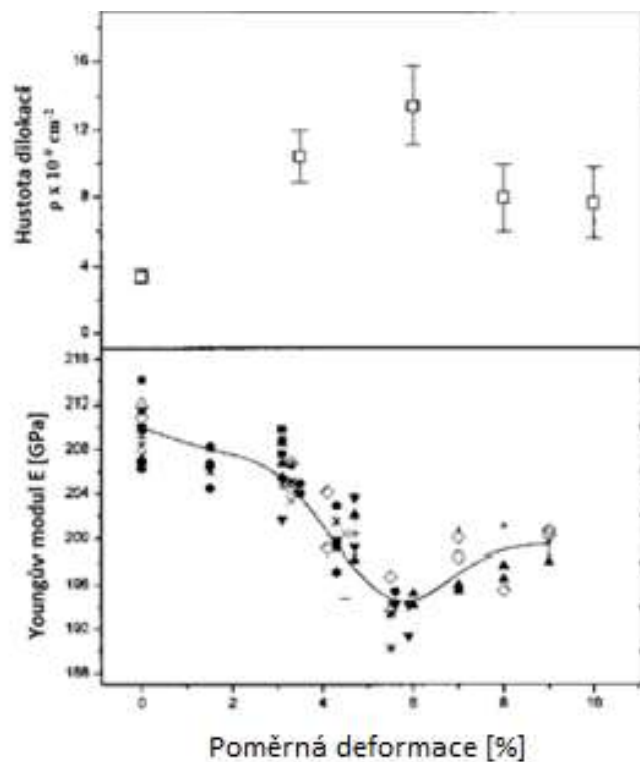
J.A. Benito a kolektiv ve své práci popisují experiment který zkoumá změnu modul pružnosti čistého železa deformovaného za studena. Je popsána úzká souvislost mezi dislokační strukturou vyvinutou deformací a chováním  $E$ . Modul pružnosti čistého železa je posouzen deformací v tahovém stroji při pokojové teplotě. V počáteční fázi jsou dislokace rovnoměrně rozloženy s malými průsečíky mezi nimi. S nárůstem plastické deformace dochází zvýšení počtu dislokací přítomných v materiálu. Tyto dislokace jsou spojeny buď uzlovými body v důsledku interakcí s jinými dislokacemi nebo defektními body, jako jsou nečistoty a vakance. Když je aplikováno napětí, dislokační čáry mezi body připnuté se prohýbají a způsobují další elastickou deformaci. Výsledkem toho je snížení naměřeného  $E$ . Toto vysvětluje chování  $E$  během první části deformace do  $\epsilon = 0,060$ . Při  $\epsilon = 0,060$  je nalezena minimální hodnota  $E$ . V téhle chvíli je naměřená hodnota  $E$  přibližně o 7 % menší než u nedeformovaného materiálu. Při následném deformaci se hodnoty  $E$  pohybují v rozsahu snížení o 4 % až 6 %. Mezi  $\epsilon = 0,060$  a  $\epsilon = 0,080$  se vytvoří nová dislokační struktura. Nové dislokace tvoří dislokační stěny s vysokou hustotou. Tyto stěny ohraničují prostor s nižší hustotou dislokací a měkčí strukturou. Takto vzniklá struktura je nazývána buněčnou strukturou. Buněčná struktura je zobrazena na obr 10. Dislokace v buněčných stěnách jsou akumulovány ve velmi malém objemu ve srovnání s dislokacemi, které zůstávají uvnitř buněk. Tuto skutečnost je možné pozorovat na Obr. 11. Jakmile se vytvoří buněčná struktura ( $\epsilon = 0,080$ ), vnitřky buněk mají výrazně nižší hodnotu hustoty dislokací a při dalším namáhání se nevykazuje žádné zvýšení hustoty dislokací ( $\epsilon = 0,100$ ). Buněčná dislokační struktura není homogenní a buněčné stěny a vnitřky buněk je třeba zkoumat odděleně. Pokles  $E$  souvisí nejen s hustotou dislokace, ale také s délkou dislokační čáry mezi body připnuté a povoleným posunutím dislokační čáry. Nyní budeme uvažovat vývoj hustoty dislokací a délky dislokační čáry v buněčných stěnách a uvnitř buněk. Co se týče buněčných stěn, hustota dislokací je větší než dislokační hustota uvnitř buněk a očekává se, že se bude zvyšovat se zvyšujícím se napětí. Dislokace v buněčných stěnách jsou však silně připnuté kvůli vysokému počtu průsečíků mezi nimi a nejsou schopny poskytnout dodatečnou elastickou deformaci. Jejich hodnoty délky dislokačních čar by klesaly se zvyšující se hustotou dislokací a jejich příspěvek ke snížení  $E$  by byly velmi malé. Dislokace uvnitř buněk jsou zřetelně méně přichycené než dislokace v buněčných stěnách (Obr. 11). Tyto dislokace ve vnitřku buněk jsou schopny dodat dodatečnou elastickou deformaci a zmenšení  $E$ , jako dislokace v počátečních fázích deformace. Jak je však vidět na obrázku (obr. 12), hustota dislokací uvnitř buněk je nižší než hustota dislokací při  $\epsilon = 0,060$ , takže se očekává snížení celkového úbytku  $E$ . To je důvod, proč se  $E$  zvyšuje při  $\epsilon = 0,080$  s ohledem na hodnoty pozorované při  $\epsilon = 0,060$ . Jak deformace postupuje z  $\epsilon = 0,080$  na  $\epsilon = 0,100$ , dislokační struktura uvnitř buněk zůstává stejná a hodnoty hustoty dislokací uvnitř buněk jsou podobné (Obr. 12). V důsledku toho se předpovídá, že nedojde k změně  $E$  během tohoto období. Tato předpověď se dobře shoduje s experimentálními výsledky a ukazuje úzkou souvislost mezi uspořádáním dislokací a  $E$  pro mírné deformace [11].



Obr. 10: Dislokační buněčná struktura [13]



Obr. 11: Snímky buněčné dislokační struktury (TEM) – (A) – nedeformováno, (B) – deformace 3 %, (C) – deformace 6 %, (D) - deformace 8 %, (E) – deformace 10 % [11]



## 4 Zbytková (reziduální) napětí

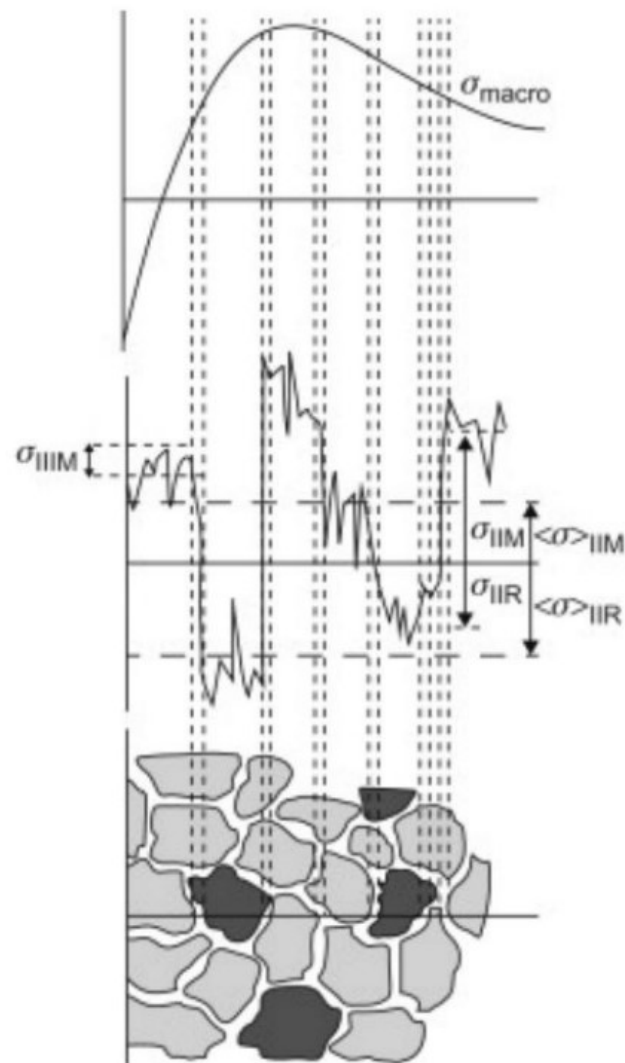
Zbytková napětí jsou definována jako napětí, která existují v pružném tělese i bez vnějšího tepelného nebo mechanického zatížení. Zbytková napětí mohou vznikat důsledkem tepelných procesů jako je například nerovnoměrné chladnutí. Také mohou vznikat plastickou deformací. Velikost zbytkového napětí je zejména ovlivněna způsobem mechanického zatěžování, vneseného tepla a strukturními změnami. Úplné odstranění zbytkového napětí není možné. Dodržováním správných výrobních technik je možno zbytkové napětí snížit. Zbytkové napětí může být významným faktorem ovlivňujícím životnost součást [14,15].

### 4.1 Typy zbytkových napětí

Zbytková napětí se v materiálech vyskytují v různých délkových měřítcích. V závislosti na délkové škále, ve které jsou přítomny, mohou být klasifikovány do typu I, II nebo III.

- Typ I je označován jako makronapětí a mění se v měřítku konstrukce. Jsou přibližně homogenní v oblasti mnoha zrn materiálu. Výslednice vnitřních sil jsou nulové v libovolném řezu tělesa. Při použití destruktivních metod, kdy dochází k narušení této rovnováhy v tělese, dochází ke změně jeho makroskopických rozměrů. Do této kategorie lze zařadit napětí existující v součásti v důsledku nerovnoměrného ohřevu a ochlazování a prudkého teplotního gradientu. Příčinou vzniku mohou být tyto výrobní technologie: Obrábění, svařování, pájení, lití, tváření, tepelné zpracování, povlakování
- Typ II se mění v měřítku několika zrn a jsou v této oblasti přibližně homogenní. Výslednici vnitřních sil uvažujeme za nulovou v objemu většího počtu zrn. Do tohoto typu spadají napětí existující v kompozitních materiálech v důsledku rozdílných elastických a tepelných vlastností. Vznikají při tepelných procesech v materiálech, jehož fáze mají rozdílný součinitel teplotní roztažnosti. Další možnost vzniku je deformace materiálu skládajícího se buď z jedné fáze, jejíž zrna jsou však různě orientována k silovému působení a jejichž mez kluzu je anizotropní. Anebo z více fází s různými mechanickými vlastnostmi.
- Typ III se liší o méně než měřítko zrna. Jsou nehomogenní. Pod tento typ spadají napětí vzniklá důsledkem strukturních poruch, jako jsou například vakance, intersticiály, dislokace a nečistoty.

Všechny tyto tři typy zbytkových napětí jsou shrnuty na Obr. 13. Ve většině případech se výše zmíněné druhy vzájemně překrývají. Výsledné napětí je dáno součtem všech těchto napětí [15].



Obr. 13: Schematické znázornění zbytkové napětí typu I, II a II. M a R označují matrici a výztuž [15]

## 4.2 Vznik zbytkových (reziduálních) napětí

Zbytková napětí vznikají vždy při výrobě a zpracování materiálu. Mohou být přítomna již v polotovaru, nebo mohou vzniknout při mnoha výrobních technologiích a montáži. Vznik zbytkových napětí můžeme rozdělit do několika procesů. Ve většině případů dochází ke kombinaci těchto procesů [14,16].

### 4.2.1 Mechanické procesy

Působením vnější síly dochází k plastické deformaci v povrchové části průřezu. Ve zbylé části průřezu dochází k elastické deformaci. Po následném odlehčení zmizí pouze elastická část deformace a zbývající část deformace je již trvalou. V plasticky deformované povrchové části průřezu je po odstranění vnější síly vyvolán stav zbytkové komprese. Zbylá část bude naopak vystaven zbytkovým tahům. Tento stav zapříčiňuje zbytková napětí. Příkladem vzniku zbytkových napětí tímto procesem mohou být technologie jako tažení a válcování za studena, kuličkování, lisování [16, 17].

### 4.2.2 Tepelné procesy

Účinek teplotních gradientů způsobí změny objemu. Při následném nerovnoměrném ochlazování dochází ke vzniku zbytkových napětí. Tepelná napětí jsou často doprovázena fázovými transformačními napětími. Ty jsou zapříčiněna fázovou transformací a s ní související změnu měrného objemu, typu krystalické mřížky a mechanických vlastností. Tímto způsobem vznikají zbytková napětí u kalení, odlévání a sváření [16, 17].

### 4.2.3 Chemické procesy

Může docházet k pronikání částic cizích látek do materiálu. Příkladem je difuze a absorpce. Jsou to například procesy oxidace, galvanické pokovování nebo žárové stříkání [16, 17].



## 5 Metody měření deformací

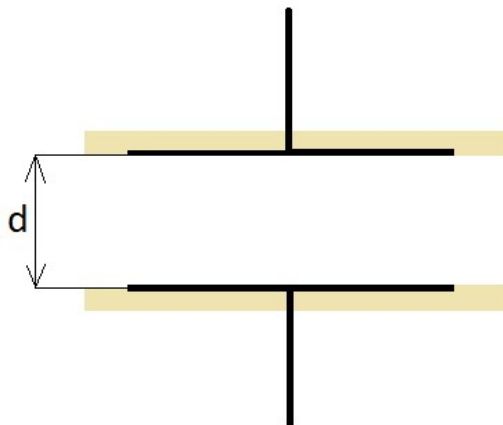
Jednou ze základních a nejdůležitějších zkoušek je zkouška tahem. Jejím výsledkem je tahový diagram. Tento diagram je vykreslován v průběhu zkoušky za pomoci záznamového zařízení. Záznamové zařízení zapisuje velikost deformace a síly. Z tahového diagramu můžeme vyčíst několik základních hodnot zkoušeného materiálu. Těmito hodnotami jsou například mez elasticity, mez kluzu a mez pevnosti. K získání přesných hodnot je zapotřebí vhodných měřicích zařízení. Tato zařízení nazýváme průtahoměry [18].

### 5.1 Elektrické průtahoměry

Tato kapitola bude pojednávat o typech a způsobům fungování elektrických průtahoměrů.

#### 5.1.1 Kapacitní průtahoměry

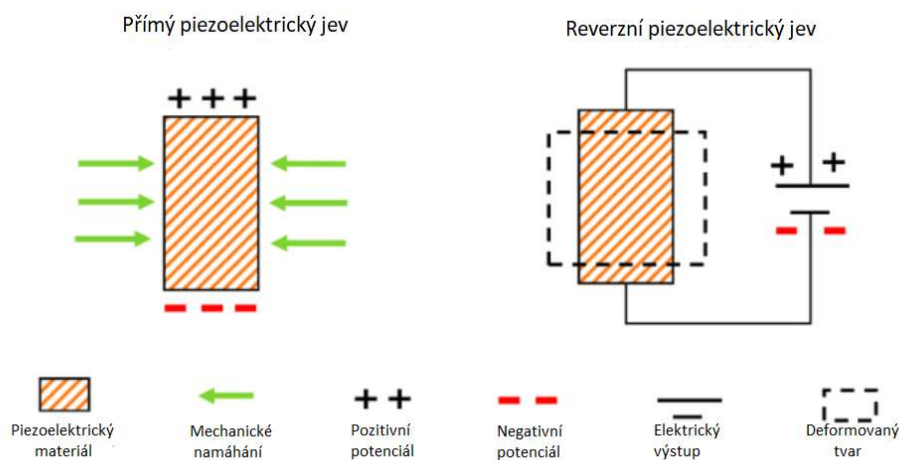
Kapacitní snímač pracuje na principu změny vzdálenosti mezi elektrodami, ke které dochází vlivem měřené neelektrických veličin. Elektrodotový systém bývá dvou až několika elektrodotový. Snímač je připevněn na zkoušené těleso například pomocí stavěcího šroubu, kleštin, gumiček, nalepením nebo s využitím vhodného tvaru tělesa. Při zkoušce tahem bývá často upnut na těleso pomocí gumiček nebo se využívá vhodného tvaru tělesa. Nejjednodušším typem tohoto snímače je deskový kapacitor, který je znázorněn na Obr. 14. Dojde-li při deformaci k prodloužení, změní se vzdálenost mezi deskami a dojde ke změně kapacity. Kapacitní průtahoměr má nelineární charakteristiku, a proto je zapotřebí jednotlivé hodnoty přepočítat [18, 19].



Obr. 14: Deskový kapacitor [16]

### 5.1.2 Piezoelektrické snímače

Piezoelektrické snímače pracují na principu piezoelektrického jevu, jehož princip je znázorněn na Obr. 15. Při působení mechanických deformací dochází u některých druhů krystalů ke vzniku elektrického náboje. Také je možno krystal mechanicky rozkmitat přiložením střídavého elektrického pole. Piezoelektrický snímač je vytvořen z krystalového výbrusu, který je opatřen vodivými elektrodami. Snímač se při působení neelektrické veličiny chová jako generátor náboje. Představuje zdroj napětí s velkým vnitřním odporem. Náboj, vznikající při působení měřené veličiny, se převádí na napětí. Mezi měřicí přístroj a snímač je nutno zařadit zesilovač signálu. Pro výrobu piezoelektrické snímače se často využívá křemenného krystalu, jehož předností je lineární charakteristika, nepatrná závislost piezoelektrické konstanty na teplotě, velký měřicí rozsah, který je dán mechanickou pevností krystalu a široké teplotní rozmezí [19].



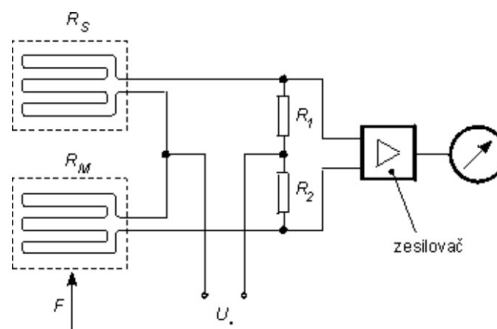
Obr. 15: Piezoelektrický jev [20]

### 5.1.3 Tenzometry

Principem tohoto snímače je změna elektrického odporu. Ke změně odporu dochází vlivem působení vnější síly. Z naměřené hodnoty změny elektrického odporu lze vypočítat velikost deformace [19].

#### 5.1.3.1 Polovodičový tenzometr

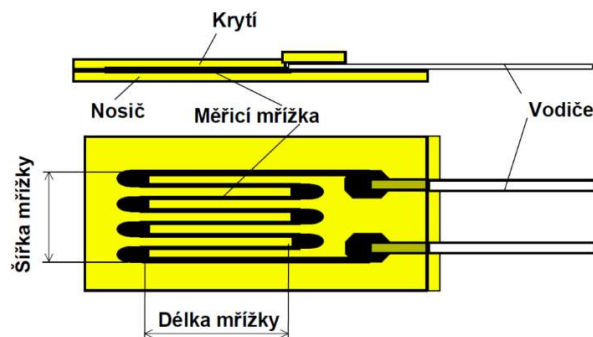
Jedná se o odporový senzor, u kterého při deformaci dojde ke změně elektrického odporu. Jeho funkce je založena na piezoelektrickém jevu polovodiče (křemíku). Monokrystalický křemík je modifikován příměsí stopových prvků (akceptorů) tak, že jeho měrný odpor je závislý na deformaci. Vlivem mechanického namáhání v určité krystalografické ose monokrystalu polovodiče nebo v difúzní vrstvě polovodiče dochází ke změně elektrické vodivosti. Změna odporu je závislá na typu polovodiče a na koncentraci příměsí. Závislost odporu na deformaci je u polovodičových tenzometrů nelineární. Polovodičové tenzometry jsou závislé na okolní teplotě. Pro kompenzaci tohoto nechtěného vlivu se polovodičové tenzometry zapojují do Wheatstoneova můstku. Toto zapojení je znázorněno na Obr. 16. Při použití Wheatstoneova můstku dále dochází k zvýšení citlivosti tenzometru na čtyřnásobek ve srovnání s jedním tenzometrem [18, 19].



Obr. 16: Zapojení do Wheatstoneova můstku [19]

### 5.1.3.2 Kovový tenzometr

Jedná se o odporový senzor, u kterého při deformaci dojde ke změně elektrického odporu. Ke změně odporu dochází vlivem změny jeho průřezu vlivem natažení při neměnném měrném odporu materiálu, ze kterého je vyroben. Většinou se jedná o slitinu 55 % mědi a 45 % cínu. Měrný odpor této slitiny je téměř nezávislý na teplotě. Kovový tenzometr je obvykle vodič na tenkém filmu tvořeném z polyamidu, s nímž je pevně spojen. Konstrukce kovového tenzometru je znázorněna na Obr. 17. Často bývá senzor meandrovitě poskládán to proto, aby bylo dosaženo co největší efektivní délky vodiče. Tenzometr je připevněn na deformované těleso a je společně s tělesem deformován. Výsledná hodnota deformace je tedy deformace tenzometru, a ne deformovaného tělesa [20, 21, 22].



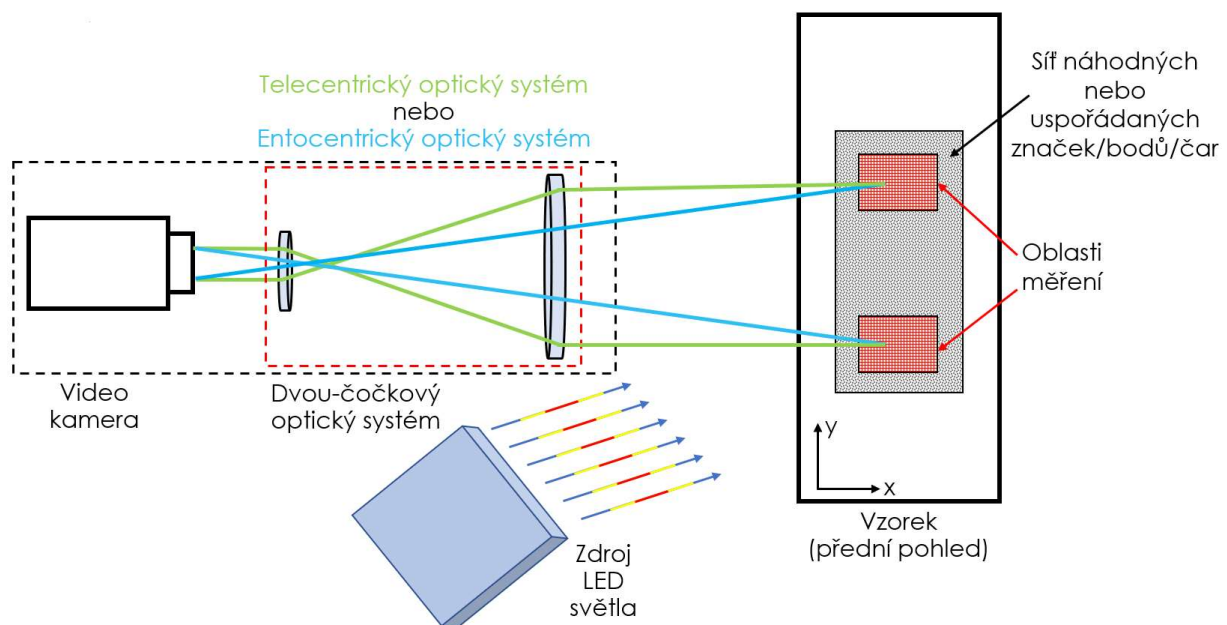
Obr. 17: Schéma foliového kovového tenzometru [18]

## 5.2 Optické snímače

Optické snímače jsou bezkontaktní a velmi přesné snímače. Nedochozí k přímému měření deformace. Před začátkem zkoušky je potřeba na vzorek nakreslit mřížku. Deformace se vizuálně zaznamenává a následně hodnotí ze získaných snímků. Výhodou této metody je schopnost zaznamenávat jak podélné deformace, tak i příčné deformace. Toto například umožňuje přesnější hodnocení napěťové charakteristiky během zkoušky tahem v závislosti na měnícím se průřezu vzorku. Další výhodou optických snímačů je možnost zaznamenávat celý průběh zkoušky, a to až do přerušení vzorku. Tenzometry musejí být po vzniku krčku odstraněny, aby nedošlo k jejich poškození. Nevýhodou optických snímačů je vysoká pořizovací cena [18, 21].

### 5.2.1 Video-extenzometr

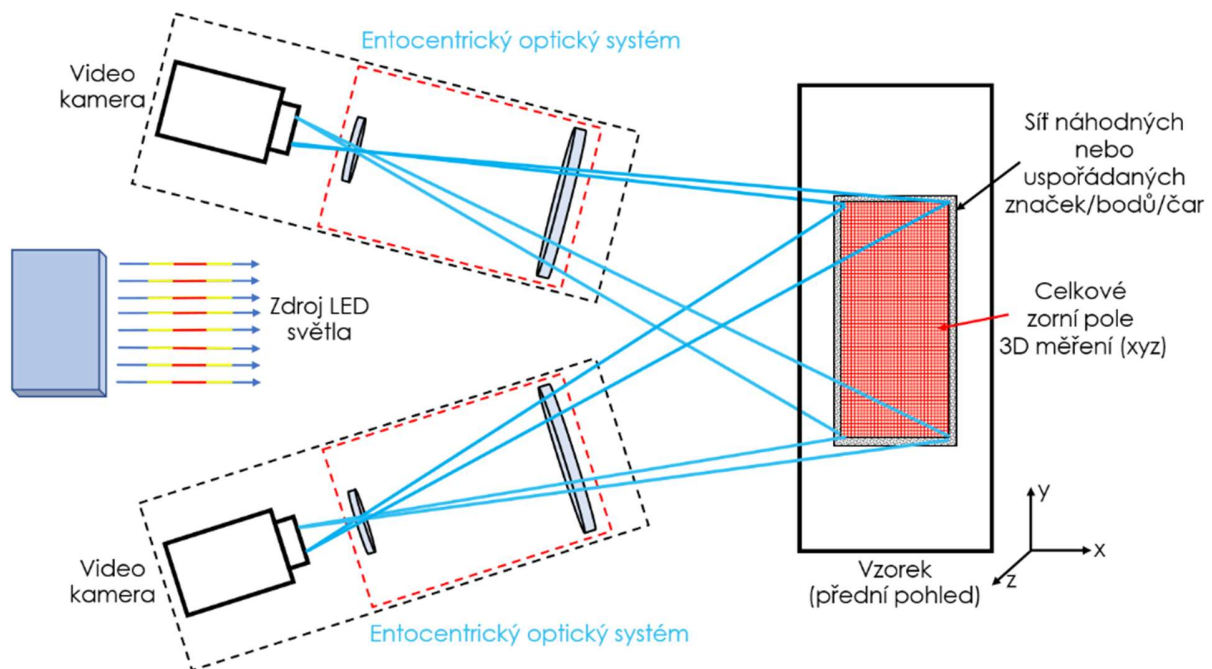
Použití video-extenzometru je vhodné pro měření deformace u mnoha druhů materiálů. Například pro kovové materiály, plasty, elastomery a kompozitní materiály. Jedná se o vysokorychlostní digitální kameru s vysokým rozlišením. Kamera zaznamenává deformaci zkušebního vzorku v reálném čase. Na zkušebním vzorku musejí být umístěny kontrastní body nebo čáry. Vzdálenost mezi body se při deformaci mění. Počítačový program sleduje ze záznamu vzdálenost středů bodů a z rozdílu vzdáleností před a po zkoušce vypočte deformaci. V průběhu měření nesmí dojít ke změně vzdálenosti mezi vzorkem a kamerou. Kdyby ke změně vzdálenosti došlo, znamenalo by to změnu zorného pole. Výpočetní program by změnu uvažoval jako deformaci zkoušeného vzorku, a to by vedlo k chybnému vyhodnocení deformace. Touto metodou je možno sledovat podélnou i příčnou deformaci. Na Obr. 18 je znázorněn princip měření deformace pomocí video-extenzometru [18, 21].



Obr. 18: Měření deformace video-extenzometrem [23]

### 5.2.2 Laserový extenzometr

Laserový extenzometr je schopný plynulého a bezkontaktního měření deformace až do přerušení vzorku. Výhodou tohoto extenzometru je vysoká přesnost měření za jakýchkoli teplot, univerzálnost a široká oblast použití. Pomocí laserového extenzometru můžeme měřit podélnou i příčnou deformaci. Značnou výhodou oproti video-extenzometru je urychlení přípravy měření absencí potřeby značek na zkoušeném vzorku. Laserový extenzometr pracuje se dvěma vysílacími a snímacími zařízeními. Vysílací zařízení osvětluje povrch vzorku. Osvícený povrch se pomocí snímacích zařízení naskenuje. Obraz plochy se jeví jako zrnitý a nerovný. Nerovnost a zrnitost povrchu poslouží jako souřadnicový systém, ve kterém si program vybere body. Tyto body bude sledovat při zkoušce a bude z nich vyhodnocovat deformaci. Na Obr. 19 je znázorněn princip laserového extenzometru [18, 21].



Obr. 19: laserový extenzometr [23]

## 6 Základy ultrazvukového zkoušení

Tato kapitola bude pojednávat ultrazvuku a o základech ultrazvukového zkoušení

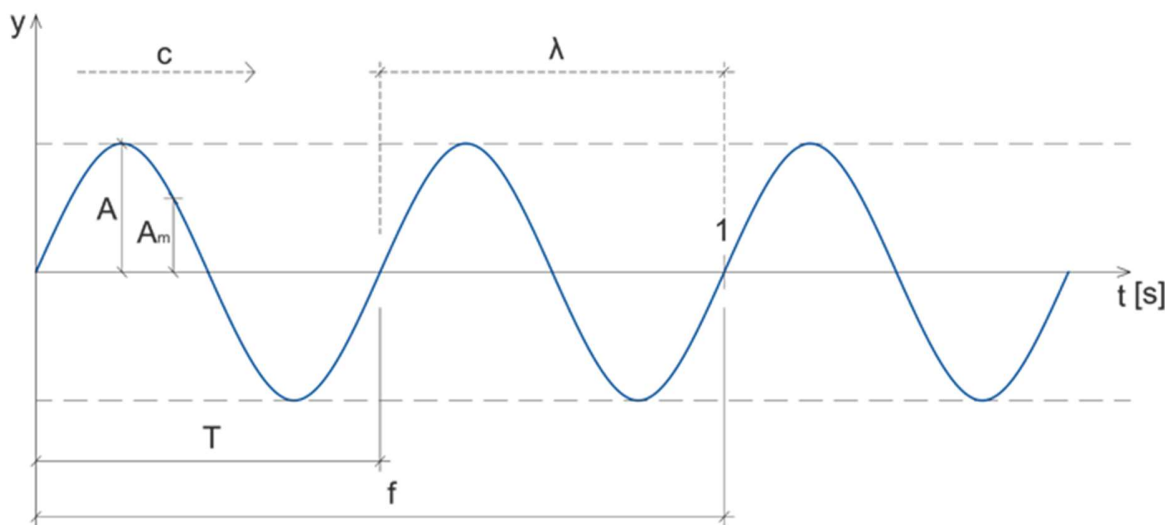
### 6.1 Ultrazvuk

Ultrazvuk je zvukové vlnění o frekvenci větší než 20 kHz. Tato frekvence je nad hranicí lidského sluchu. Tyto zvukové vlny jsou kmitavým pohybem částic prostředí. Částice kmitají kolem svých rovnovážných poloh. Protože na sebe částice působí silami, dochází k přenosu pohybu na všechny částice v okolí. Dochází k šíření vzruchu – vlny určitou rychlostí prostředím [24].

### 6.2 Fyzikální princip

Jedná se o mechanické kmity částic prostředí. Frekvence kmitů je vyšší než 20 kHz. Při šíření zvuku prostředím, kmitají částice prostředí kolem své rovnovážné polohy. Díky vazbám mezi částicemi dochází k přenosu kmitů na ostatní částice. Při šíření ultrazvuku nedochází k přesunu hmoty, ale pouze energie. Šíření ultrazvuku látkou je ovlivněno jejími elastickými a mechanickými vlastnostmi [25].

Pro popis ultrazvuku používáme několik veličin. Tyto veličiny jsou znázorněny na Obr. 20 a jsou níže popsány:



Obr. 20: Popis ultrazvukového vlnění [26]

#### 1) Frekvence $f$ [Hz]

Frekvence udává počet kmitů za jednotku času, které vykoná hmotný bod. Zvuk je rozdělen dle velikosti frekvence na infrazvuk, slyšitelný zvuk a ultrazvuk. Jednotka [Hz] je pro použití v praxi poměrně malá a využívá se jednotky [MHz].

2) Rychlost  $c$  [m/s]

Tato rychlost je závislá na druhu látky, kterou se zvuk šíří. Nejrychleji dochází k šíření zvuku v pevných látkách, naopak nejpomaleji v plynech. Rychlost je také závislá na šířící se vlny. Pomocí rychlosti šíření ultrazvuku v materiálu můžeme určovat některé z materiálových vlastností.

3) Vlnová délka  $\lambda$  [m]

Vlnová délka je rovna vzdálenosti, kterou vlna urazí za dobu jedné periody.

4) Amplituda  $A$

Amplituda je největší výchylka hmotného bodu z jeho rovnovážné polohy.

5) Perioda  $T$  [s]

Perioda je čas, za který se hmotný bod dostane z rovnovážné polohy přes krajní polohy zpět do svého rovnovážného stavu.

6) Akustická impedance  $Z$  [kg/(m<sup>2</sup>s)]

Tato veličina popisuje prostředí, kterým se šíří ultrazvuková vlna. Akustická impedance má význam na odraz a průchod ultrazvukové vlny mezi dvěma prostředími [25].

$$Z = \frac{p}{v}$$

$p$  – akustický tlak [Pa]

$v$  – akustická rychlost [m/s]

### 6.3 Šíření vlny

Ultrazvuk je mechanické vlnění, které se šíří v materiálu pomocí vazeb mezi částicemi. Částice se nikam nešíří, pouze přenáší energii kmitavého pohybu na sousední částice. Rychlost, kterou se ultrazvukové vlny šíří v pevných látkách, je závislá na hustotě, Poissonově čísle a modulu pružnosti. Pro konkrétní materiál a druh vlnění je rychlost konstantní. Vlnění se může šířit dvěma způsoby [25, 26].

- Spojité vlny – vlnění se šíří souvisle materiálem
- Impulz – vlnění se šíří v časových intervalech

### 6.4 Typy vlnění

Rozeznává se několik základních typů vlnění. Tyto typy jsou určeny směrem šíření vlny ke směru kmitání částic.

### 6.4.1 Podélné vlny

Podélné (longitudinální) vlnění je takové vlnění, kde částice kmitají ve směru šíření vln. Toto vlnění je zobrazeno na Obr. 21. V prostředí, kde dochází k šíření podélných vln, vznikají tahové a tlakové síly. Tyto síly jsou způsobeny střídavým oddalováním a přibližováním částic. Tyto vlny se mohou šířit v dostatečně pružném pevném, plynném i kapalném prostředí. Rychlost podélné vlny v materiálu značíme  $c_L$  a lze ji vypočítat pomocí následujícího vztahu [25].

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{1 - \mu}{(1 + \mu) \times (1 - 2\mu)}} \quad (10)$$

E – Modul pružnosti v tahu

$\rho$  – Hustota

$\mu$  – Poissonova konstanta

### 6.4.2 Příčné vlny

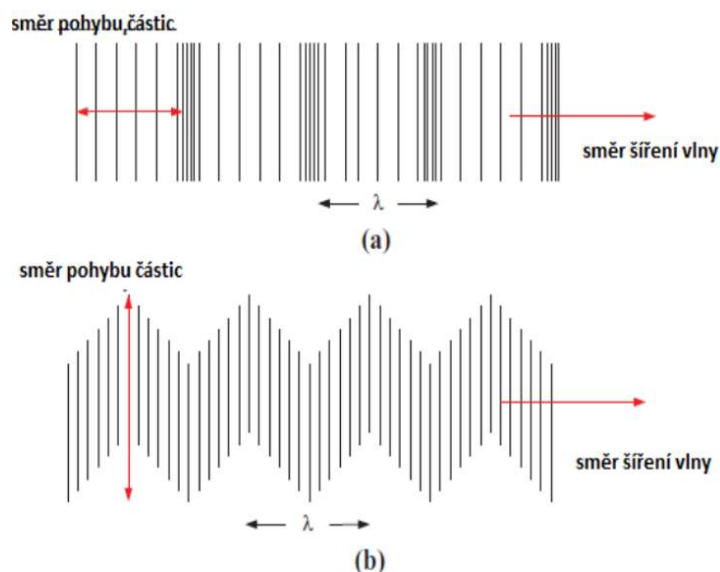
Příčné (transversální) vlnění je vlnění, při kterém částice kmitají kolmo na směr postupu vlny. Toto vlnění je zobrazeno na Obr. 21. Částice zachovávají v rovině kmitání stejný směr. Příčné vlny jsou schopny se šířit pouze v pevném prostředí, protože je schopno přenášet smykové síly. Rychlost šíření příčné vlny se značí  $c_T$ . Rychlost šíření příčné vlny je vždy menší než rychlost šíření podélné vlny [25].

$$c_T = c_L \times \sqrt{\frac{1 - 2\mu}{2 \times (1 - \mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (11)$$

G – modul pružnosti ve smyku

$\rho$  – Hustota

$\mu$  – Poissonova konstanta

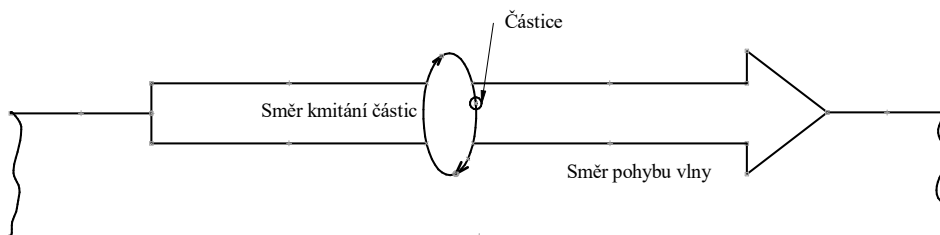


Obr. 21: a) Podélná vlna, b) Příčná vlna [25]



### 6.4.3 Povrchová vlna

Povrchová vlna, která je znázorněna na Obr. 22 je taková vlna, která se šíří na povrchu a pod povrchem do hloubky asi jedné vlnové délky. Částice kmitají v rovině kolmé na směr šíření vln. V této rovině částice opisují elipsy. Aby se mohli povrchové vlny šířit musí být povrch čistý. Rychlost povrchových vln se označuje  $c_r$ . Její velikost je přibližně 92 % až 94 % rychlosti příčné vlny [25].



Obr. 22: Povrchová vlna [25]

### 6.4.4 Desková (Labdova) vlna

K šíření deskové vlny dochází v celém průřezu materiálu. Z tohoto důvodu musí mít zkoušený materiál jeden rozměr srovnatelný s vlnovou délkou. Deskové vlny mohou být symetrické a asymetrické. Částice u povrchu kmitají jako u povrchové vlny. Ve středu materiálu kmitají částice jako u podélného (symetrické deskové vlny) nebo příčného vlnění (asymetrické deskové vlny). Rychlost šíření je proměnlivá a závisí na součinu frekvence a tloušťky nebo průměru materiálu [25].

## 6.5 Interakce zvuku s pevnou látkou

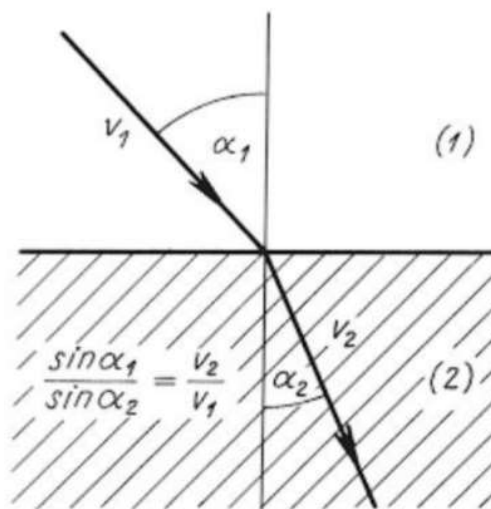
Při dopadu ultrazvukového vlnění na rozhraní dvou prostředí o různých akustických impedancích dochází ke změně v šíření vln. Charakter této změny závisí na rozdílu akustických impedancí a velikosti úhlu dopadu. Díky podobnosti mechanického vlnění a elektromagnetického záření lze použít při lomu ultrazvukového vlnění na rozhraní Snellův zákon. Také platí rovnost mezi úhlem dopadu ( $\alpha$ ) a úhlem odrazu ( $\alpha'$ ) [25, 26].

### 6.5.1 Snellův zákon

Snellův zákon patří k základním zákonům popisujícím šíření vlnění, které přechází přes rozhraní z jednoho prostředí do jiného prostředí, kde se skokově mění optické vlastnosti prostředí. Snellův zákon je znázorněn na Obr. 23. Např. voda – vzduch, sklo – vzduch [27].

$$\frac{\sin \alpha_1}{v_1} = \frac{\sin \alpha_2}{v_2} \quad (12)$$

$v_{1,2}$  - rychlost vlnění v daném prostředí



Obr. 23: Snellův zákon [25]

### 6.5.2 Kolmý dopad na rozhraní

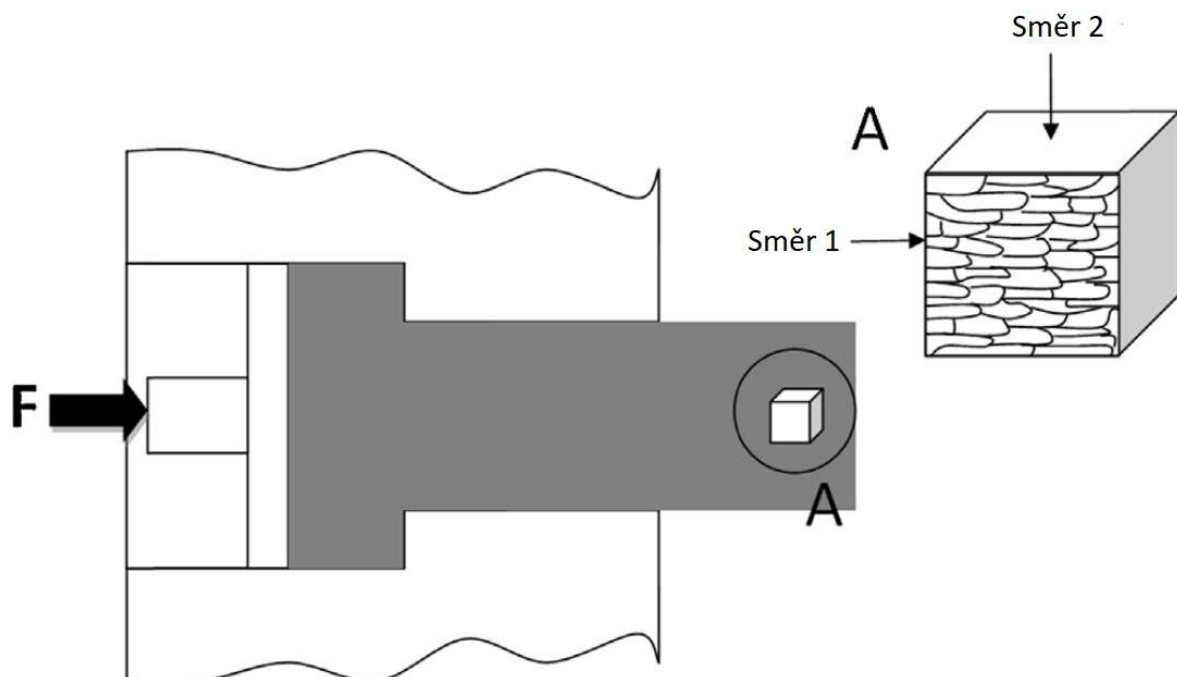
Dopadne-li vlnění kolmo na rozhraní dvou prostředí, dojde k částečnému odrazu zpět a částečnému prostupu části vlnění. Na tento jev má vliv několik faktorů jako například akustická impedance a drsnost povrchu. Drsnost povrchu musí být srovnatelná s vlnovou délkou. Při dokonale hladkém povrchu dochází k odrazu vlnění zpět. Při dopadu na drsný povrchu dochází k částečnému rozptylu odraženého vlnění [25, 26].

### 6.5.3 Šikmý dopad na rozhraní

Dopadne-li vlnění pod určitým úhlem na rozhraní dvou materiálů, dojde na rozhraní materiál k odraz, lomu a transformaci. Vlna přenesená do druhého materiálu, vlivem rozdílných rychlostí šíření vlny v jednotlivých prostředích, mění úhel lomu [25, 26].

## 6.6 Vliv deformace na rychlost šíření ultrazvukových vln

Ultrazvukové impulsy jsou mechanické a elastické kmitání částic v materiálech, jejichž tvar závisí na mikrostruktúře a mechanických vlastnostech materiálů. Na změně rychlosti ultrazvuku se významně podílí typ materiálu, kterým se ultrazvukový impuls šíří. Kromě toho bude rychlost ultrazvuku také záviset na hustotě materiálu, elastických vlastnostech a vnitřních napětích, strukturních nehomogenitách, precipitátech, dislokacích, fázových přeměnách, pórovitosti a trhlinách, koncentraci různých složek slitin, vakancích a mřížkových místech. Také teplota materiálu významně ovlivňuje rychlost ultrazvuku. Zdenka Keran a kolektiv ve svém experimentu pozorovali rychlost ultrazvuku v deformované struktuře za studena vytlačovaných hliníkových vzorků. Místo odběru a tvar vzorku je naznačen na Obr. 24. Deformovaná struktura vykazovala silnou anizotropii. Ultrazvuková měření byla provedena v směrech 1 a 2, na ose symetrie vzorku. Ultrazvukové měření rychlosti bylo provedeno na digitálním osciloskopu. Naměřená rychlost ultrazvuku ve směru 2 je menší než ve směru 1. Tento výsledek lze vysvětlit větším počtem překážek pro šíření vln materiálem, které představují hranice zrn. Při větším počtu hranic zrn dochází k pomalejšímu šíření ultrazvukové vlny, a tím je nižší rychlost ultrazvuku. Ve směru působení tvářecí síly  $F$  (směr 1) je menší počet hranic zrn a díky tomu roste rychlost ultrazvuku. Ve směru kolmém s tvářecí síly a protáhlou strukturu (směr 2) existuje větší počet hranic zrn a rychlost ultrazvuku klesá [28, 29].



Obr. 24: Hliníkový vzorek [28]

## 6.7 Komerčně dostupná měřicí zařízení

Pro měření rychlosti šíření rychlosti ultrazvukových vln je možno využít ultrazvukové defektoskopy s příslušnými sondami. Na trhu jsou dostupná například zařízení firmy Olympus. Konkrétně například Ultrazvukový defektoskop EPOCH 650 nebo EPOCH 6LT. Tyto přístroje jsou dostupné na stránkách firmy Evident. Dalším dostupným měřicím zařízením pro příjem signálu jsou digitální osciloskopy například od firmy TELEDYNE LECROY.

## 6.8 Výpočet velikosti $E$ z rychlosti ultrazvukových vln

Pomocí rychlosti podélných a příčných ultrazvukových vln je možno vypočítat Youngův modul pružnosti materiálu, jímž prochází ultrazvukové vlny [30].

$$E = \frac{3 \times \rho \times c_T^2 \left( c_L^2 - \frac{4}{3} \times c_T^2 \right)}{(c_L^2 - c_T^2)} \quad (13)$$

$c_L$  – rychlost šíření podélné vlny

$c_T$  – rychlost šíření příčné vlny

$\rho$  – hustota

## 7 Experimentální část

Cílem první části experimentu bylo ultrazvukové hodnocení změn modulu pružnosti při deformaci oceli. Pro určení velikosti modulu pružnosti bylo využito rychlostí podélných a příčných ultrazvukových vln. Na změně rychlosti ultrazvuku se významně podílí typ a strukturní stav materiálu, kterým se ultrazvukový impuls šíří. Kromě toho rychlost ultrazvuku také závisí na hustotě materiálu, elastických vlastnostech a vnitřních napětích, strukturních nehomogenitách, precipitátech, dislokacích a dalších faktorech. Pomocí ultrazvukového defektoskopu byly změřeny doby průchodu podélných a příčných ultrazvukových vln. Ze znalosti těchto časů a vzdálenosti, kterou vlna prochází byla vypočtena rychlost, kterou vlny procházejí materiálem. Pro určení modulu pružnosti bylo dále zapotřebí znát hustotu materiálu, kterým se vlna šíří. Následně bylo využito vzorce (13) pro výpočet modulu pružnosti pro jednotlivé deformované vzorky. U vzorků je nutné zjistit jejich rozměry před a po deformaci pro určení velikosti plastické deformace.

$$E = \frac{3 \times \rho \times c_T^2 \left( c_L^2 - \frac{4}{3} \times c_T^2 \right)}{c_L^2 - c_T^2} \quad (13)$$

V další části experimentu došlo k zhodnocení vlivu plastické deformace na ultrazvukové vlny. Pomocí osciloskopu byly zkoumány rozdíly ve vybraných charakteristikách ultrazvukové vlny po průchodu různě deformovanými vzorky.

### 7.1 Příprava vzorků

Pro experiment byly zvoleny tři materiály, a to uhlíková konstrukční ocel C45 (ČSN 12 050), nelegovaná konstrukční ocel S235 (ČSN 11 373) a hliníková slitina EN AW 1050 T1. Z výchozího materiálu bylo zapotřebí nařezat dostatečně velké zkušební vzorky, aby bylo možné vytvořit dostatečně velkou kontaktní plochu pro ultrazvukové sondy. K rozřezu vzorků byla využita metalografická pila Struers Discotom 6. Na obr. 25 – 26 jsou zobrazeny připravené vzorky a výchozí materiál pro jejich přípravu.



Obr. 25: Materiál S235 před rozřezáním



Obr. 26: Materiál S235 po rozřezání

Následující tabulka (Tab. 2) obsahuje seznam vzorků s jejich značením.

Tab. 2: Seznam vzorků

Seznam vzorků					
S235 – ČSN 11 373	Poměrná deformace	C45 – ČSN 12 050	Poměrná deformace	EN AW 1050 T1	Poměrná deformace
S1	38,68 %	C1	8,36 %	H1	51,53 %
S2	24,82 %	C2	2,26 %	H2	37,76 %
S3	8,93 %	C3	0,84 %	H3	29,37 %
S4	0 %	C4	0 % - žíháno	H4	13,94 %
-	-	C5	0 %	H5	3,06 %
-	-	-	-	H6	0 %

## 7.2 Měření tvrdosti materiálu ve výchozím stavu

Po rozřezání vstupního materiálu byla změřena tvrdost každého druhu materiálu dle Vickerse na tvrdoměru Mitutoyo AVK (Obr. 27). Měření proběhlo ve směru válcované stuktury a kolmo k válcované struktuře. V každém směru byly provedeny tři vtisky. Po odtížení byla změřena délka uhlopříček vtisku ve dvou na sebe kolmých směrech  $d_1$  a  $d_2$  (Obr. 28 a Obr. 29), ze kterých byl vypočten aritmetický průměr. Délky uhlopříček vtisku jsou uvedeny v mm. Toto bylo proveden u všech třech vtisků. Výsledky měření jsou uvedeny v Tab. 3 – 5.

Tab. 3: Měření tvrdosti HV30 – ocel S235 – ČSN 11 373

S235	Ve Směru válcování				Kolmo ke směru válcování			
	1. vtisk	2. vtisk	Průměr	HV 30	1. vtisk	2. vtisk	Průměr	HV 30
1. měření	0,675	0,674	0,675	122	0,697	0,712	0,705	112
2. měření	0,683	0,690	0,687	118	0,690	0,710	0,700	114
3. měření	0,678	0,703	0,691	117	0,695	0,710	0,703	113
	Výsledná tvrdost HV30			119 ±2	Výsledná tvrdost HV30			113 ±1

Tab. 4: Měření tvrdosti HV30 – ocel C45 – ČSN 12 050

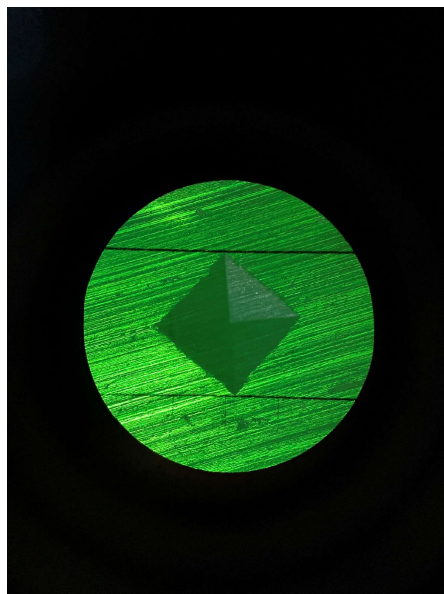
C45	Ve Směru válcování				Kolmo ke směru válcování			
	1. vtisk	2. vtisk	Průměr	HV 30	1. vtisk	2. vtisk	Průměr	HV 30
1. měření	0,480	0,496	0,488	234	0,496	0,483	0,490	232
2. měření	0,490	0,497	0,494	228	0,491	0,492	0,492	230
3. měření	0,497	0,497	0,497	225	0,495	0,498	0,497	225
	Výsledná tvrdost HV30			229 ±4	Výsledná tvrdost HV30			229 ±3

Tab. 5: Měření tvrdosti HV1 – hliníková slitina EN AW 1050 T1

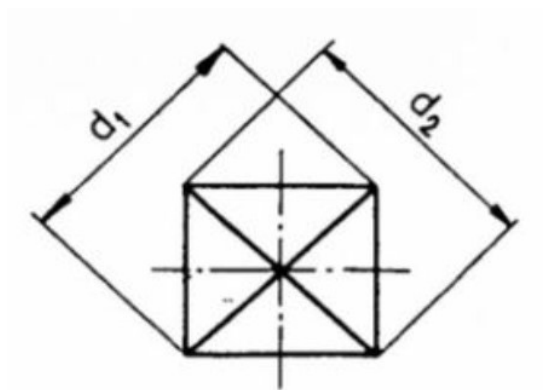
EN AW 1050 T1	Ve Směru válcování			
	1. vtisk	2. vtisk	Průměr	HV 1
1. měření	0,255	0,258	0,257	28
2. měření	0,253	0,265	0,259	28
3. měření	0,250	0,257	0,254	29
	Výsledná tvrdost HV30			28 ±0



Obr. 27: Měření tvrdosti na přístroji Mitutoyo AVK



Obr. 28: Měření úhlopříčky vtisku indentoru



Obr. 29: Měření délkou uhlopříček vtisku [31]



### 7.3 Žihání

Z důvodu vysoké tvrdosti a pevnosti oceli C45 byl tento materiál žihán naměkko. K žihání došlo v peci Nabertherm program controller C19. Ocel byla žihána při teplotě 680 °C s výdrží 5 hodin a následným ochlazováním vzorků v peci 20 °C za jednu hodinu. Po žihání byla opět změřena tvrdost materiálu. Výsledky měření tvrdosti jsou uvedeny v Tab. 6. Na Obr. 30 jsou zobrazeny vzorky při vkládání do pece.

Tab. 6: Měření tvrdosti HV 30 – ocel C45 – ČSN 12 050 - vyžiháný stav

C45	Ve směru válcování				Kolmo ke směru válcování			
	1. vtisk	2. vtisk	Průměr	HV 30	1. vtisk	2. vtisk	Průměr	HV 30
1. měření	0,569	0,565	0,567	173	0,580	0,578	0,579	166
2. měření	0,581	0,575	0,578	167	0,568	0,575	0,572	170
3. měření	0,581	0,578	0,580	165	0,569	0,570	0,570	171
	Výsledná tvrdost HV30			168 ±3	Výsledná tvrdost HV 30			230 ±2



Obr. 30: Vzorky při vkládání do pece

## 7.4 Deformace vzorků

Jednotlivé zkušební vzorky byly deformovány na hydraulickém lisu DMG o silové kapacitě  $F_{\max}$  500 kN. Deformaci vzorků provedl vedoucí práce pan doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D. Na každý vzorek bylo aplikováno zatížení o jiné velikosti, aby bylo docíleno různých velikostí deformace. V Tab. 7 – 9 jsou uvedeny výsledné velikosti deformací jednotlivých vzorků. Na Obr. 31 je zobrazen průběh deformace vzorku H1.

Tab. 7: Deformace oceli C45 – ČSN 12 050

C45 – ČSN 12 050				
Vzorek	$h_0$ [mm]	h [mm]	F [kN]	$\varepsilon$ [%]
C1	29,9	27,4	130	8,36
C2	31	30,3	100	2,26
C3	29,9	29,65	85	0,84

Tab. 8: Deformace oceli S235 – ČSN 11 373

S235 – ČSN 11 373				
Vzorek	$h_0$ [mm]	h [mm]	F [kN]	$\varepsilon$ [%]
S1	20,58	12,62	200	38,68
S2	20,95	15,75	150	24,82
S3	21,28	19,38	100	8,93

Tab. 9: Deformace hliníkové slitiny EN AW 1050 T1

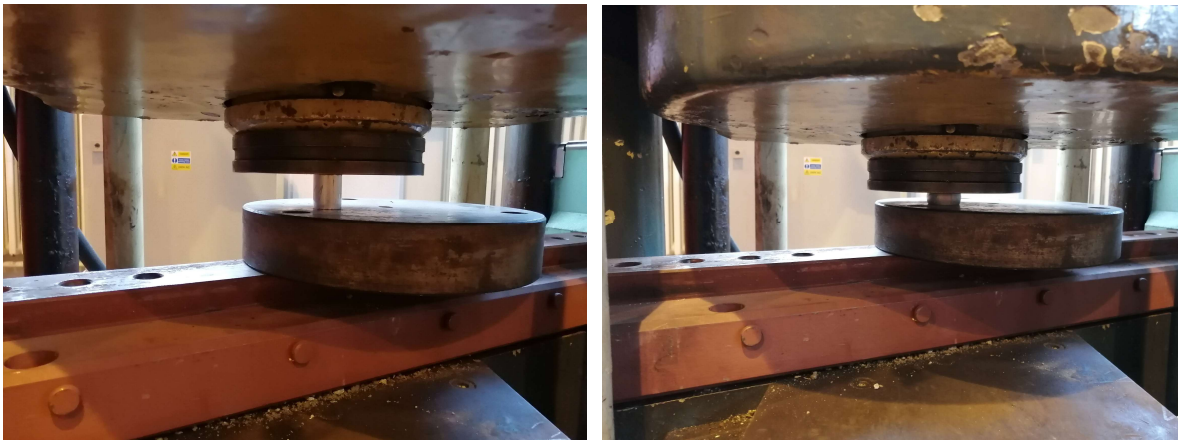
EN AW 1050 T1				
Vzorek	$h_0$ [mm]	h [mm]	F [kN]	$\varepsilon$ [%]
H1	29,5	14,3	150	51,53
H2	29,4	18,3	100	37,76
H3	28,6	20,2	80	29,37
H4	28,7	24,7	50	13,94
H5	29,4	28,5	30	3,06

$h_0$  – výška vzorku před deformací

h – výška vzorku po deformaci

F – zatížení lisu

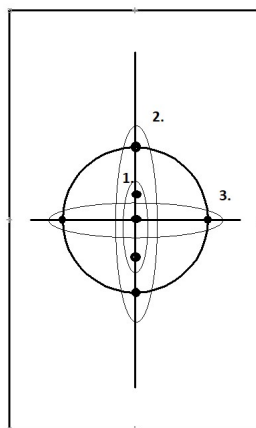
$\varepsilon$  – poměrná deformace



Obr. 31: Vlevo vzorek před deformací, vpravo po deformaci

## 7.5 Měření tvrdosti materiálu po deformaci

Po deformaci vzorků byla opět změřena jejich tvrdost. Tvrdost byla změřena u šech ocelových vzorků, u kterých proběhla deformace. Tvrdost byla měřena v místě, kde byly následně umístěny ultrazvukové sondy. Tvrdost byla měřena ve třech oblastech, které jsou zobrazeny na Obr. 32. Výsledky měření jsou uvedeny v Tab. 10.



Obr. 32: Oblasti pro měření tvrdosti

Tab. 10: Měření tvrdosti po deformaci – výsledky

Vzorek	Tvrdost HV 30	Vzorek	Tvrdost HV 30
C1	200 +6	S1	174 +12
C2	190 +13	S2	197 +8
C3	190 +4	S3	192 +14

## 7.6 Měření hustoty materiálů

Pro určení hustota vzorků hliníkové slitiny bylo využito odměrného válce a laboratorní váhy. Naměřené a vypočtené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 11.

Tab. 11: Určení hustoty slitiny EN AW 1050 T1

Materiál	EN AW 1050 T1			
Vzorek	D [mm]	V [ml]	m [g]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
H1	16,00	8,00	21,50	2687,50
H2	16,72	9,00	24,90	2766,67
H3	15,10	9,00	23,50	2611,11
H4	13,19	8,00	22,50	2812,50
H5	15,68	11,00	28,80	2618,18
H6	13,47	9,00	24,50	2722,22

D – tloušťka vzorku

V – objem vzorku

m – hmotnost vzorku

$\rho$  – hustota vzorku

Hustota vybraných ocelových vzorků byla zjištěna hydrostatickou metodou. Těleso nejprve zvážíme na vzduchu a hmotnost vyvažujícího závaží označíme m. Pro zjednodušení nebudeme uvažovat vztlakovou sílu vzduchu. Poté těleso zvážíme, když je zcela ponořeno do vody. Hmotnost vyvažujícího závaží v tomto případě označíme m'. Podle Archimedova zákona je zřejmé:

$$m' = m - V \times \rho_{voda}$$

$$V = \frac{m - m'}{\rho_{voda}}$$

$$\rho = \frac{m \times \rho_{voda}}{m - m'} [32]. \quad (14)$$

Hustoty určené tuto metodu jsou uvedeny v Tab. 12.

Tab. 12: Určení hustoty hydrostatickou metodou

Vzorek	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Vzorek	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
S1	7794,20	C1	7792,40
S2	7806,10	C2	7792,30
S3	7799,90	C3	7785,60

U ocelových vzorků, které nebyly deformovány byla hustota určena stejnou metodou jako u materiálu EN AW 1050 T1. Výsledky jsou uvedeny v Tab. 13.

Tab. 13: Určení hustoty ocelových vzorku

Vzorek	D [mm]	V [ml]	m [g]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Výchozí stav S4	9,62	6	46,28	7713,33
Vyžiháný C4	9,75	6	48	8000
Výchozí stav C5	6,85	4	33	8250

## 8 Určení Youngova modulu pružnosti

Pro výpočet Youngova modulu pružnosti bylo zapotřebí zjistit rychlosti šíření ultrazvukových vln. Zjišťování těchto hodnot je popsáno v následující kapitole.

### 8.1 Měření rychlosti šíření ultrazvukových vln pomocí defektoskopu

Měření rychlosti šíření podélných a příčných ultrazvukových vln probíhalo pomocí defektoskopu Olympus Epoch 1000i (Obr. 33). Pro měření bylo využito odrazové metody (Pulse – Echo), při které je využito jedné sondy. Tato sonda slouží jako vysílací a přijímací zároveň. Sonda do vzorků vysílá signál ve formě ultrazvukového vlnění. Signál prochází materiálem a odráží se od protilehlého povrchu materiálu a vrací se zpět do sondy. Pro prostup ultrazvukových vln do materiálu bylo potřeba využít akustického vazebného prostředku, protože na vzduchu dochází k okamžitému rozptylu ultrazvuku. Jako vazebný prostředek pro podélné vlny byl využit gel Sonotech Soundsafe Ultrasonic Couplant. Pro příčné vlny musela být použita vazebná pasta Olympus Couplant SWC - 2 s vysokou viskozitou, jelikož příčné vlny jsou schopny se šířit pouze prostředím, které přenáší smykové síly. Výstupem měření z defektoskopu byl čas průchodu ultrazvukové vlny vzorkem. To je čas za, který vlna prošla vzorkem, odrazila se od protilehlé stěny a vrátila se zpět do sondy. Jelikož vlna prošla vzorkem dvakrát, bylo potřeba tento čas vydělit dvěma. Pomocí znalosti tohoto času a tloušťky  $D$  lze vypočítat rychlost ultrazvukové vlny pomocí vzorce (15). Pokud došlo k naměření čas mezi prvním a vícenásobným echem, bylo zapotřebí vydělit čas daným počtem průchodů vlny vzorkem.

$$c = \frac{2D}{t} \quad (15)$$

$c$  – rychlost ultrazvukové vlny

$D$  – tloušťka vzorky

$t$  – čas průchodu ultrazvukové vlny vzorkem

Z důvodu zpřesnění určení průměrné rychlosti ultrazvukových vln bylo použito více sond o různých frekvencích. Pro toto měření byly využity sondy:

- Panametrics CN4R – 10: generující podélné vlny (frekvence 4 MHz)
- Panametrics C549 – SM: generující podélné vlny (frekvence 2,25 MHz)
- Panametrics CN10R – 5: generující podélné vlny (frekvence 10 MHz)
- V156: generující příčné vlny (frekvence 5 MHz)
- V153: generující příčné vlny (frekvence 1 MHz)

Měření času bylo prováděno dvěma způsoby, aby bylo dosaženo přesnějšího průměrného času. Při měření se na obrazovce ultrazvukovém defektoskopu zobrazoval průběh vysílaného signálu. Signál se skládá z amplitud signálu, které nazýváme echa. Tyto výchylky znamenají odraz signálu od prostředí s odlišnou rychlostí šíření vlnění. V tomto případě se jednalo o protilehlou stěnu vzorku. Jelikož dochází k opětovnému odražení vln, zobrazují se na obrazovce defektoskopu další amplitudy signálu, které nazýváme vícenásobná echa. Pomocí funkce „Gate“ byly vymezeny oblasti ech, které byly vybrány pro měření. K vymezení oblasti slouží tzv. brány/gate

(Gate 1: červená vodorovná úsečka, Gate 2: vodorovná modrá úsečka). Brány/gate jsou zobrazeny na Obr. 34. Další funkcí „Peak“ byly pro měření zvoleny největší hodnoty vybraných ech. Následně došlo k odečtení času z obrazovky, za který urazí vlna vzdálenost mezi těmito echy. Druhou metodou pro měření je ruční nastavení referenčních kurzorů na místa nejvyšších hodnot ech a změření času průchodu vlny mezi nimi. Referenčními kurzory jsou červená a modrá svislá čára na obrazovce defektoskopu (Obr. 34).



Obr. 33: Ultrazvukový defektoskop

## 8.2 Výsledky měření a vypočtených hodnot

V Tab. 14 jsou uvedeny výsledky měření rychlosti šíření ultrazvukových pro vzorek C2. V sloupci ECHO je uvedeno, mezi kterými echy došlo k měření času. Způsob měření mezi 1. a 2. echem je možno vidět na Obr. 34. Výsledky celého měření jsou uvedeny v příloze 1. Pro vzorek S1 nedošlo k naměření rychlosti šíření ultrazvukových vln všemi sondami z důvodu velkých rozměrů sondy. Dané výsledky pro vzorek S1 jsou uvedeny v příloze 1. (II).

Tab. 14: Výsledky měření: vzorek C2

C45 – ČSN 12 050 – vzorek C2						
ECHO	Podélné vlny - 4 MHz			Příčné vlny - 5 MHz		
	$t_1$ [μs]	$t_2$ [μs]	$t_L$ [μs]	$t_1$ [μs]	$t_2$ [μs]	$t_T$ [μs]
1. echo - 2. echo	3,37	3,37	1,69	6,24	6,24	3,12
1. echo - 3. echo	6,92	6,92	1,73	12,38	12,39	3,10
1. echo - 4. echo	10,46	10,43	1,74	18,5	18,48	3,08
2. echo - 3. echo	3,54	3,54	1,77	6,13	6,14	3,07
2. echo - 4. echo	6,92	6,92	1,73	12,26	12,25	3,06
3. echo - 4. echo	3,38	3,39	1,69	6,12	6,12	3,06
ECHO	Podélné vlny - 2,25 MHz			Příčné vlny – 1MHz		
	$t_1$ [μs]	$t_2$ [μs]	$t_L$ [μs]	$t_1$ [μs]	$t_2$ [μs]	$t_T$ [μs]
1. echo - 2. echo	3,38	3,39	1,69	6,13	6,13	3,07
1. echo - 3. echo	6,76	6,78	1,69	12,77	12,75	3,19
1. echo - 4. echo	10,15	10,16	1,69	19,31	19,3	3,22
2. echo - 3. echo	3,39	3,39	1,70	6,63	6,64	3,32
2. echo - 4. echo	6,74	6,77	1,69	13,2	13,2	3,30
3. echo - 4. echo	3,37	3,39	1,69	6,56	6,55	3,28
Průměrné hodnoty		$t_L$ [μs]	1,71		$t_T$ [μs]	3,15

$t_1$  – čas naměření využitím brán

$t_2$  – čas změření pomocí referenčních kurzorů

$t_{L1,2}$  – průměrná doba průběhu podélné ultrazvukové vlny

$t_{T1,2}$  – průměrná doba průběhu příčné ultrazvukové vlny

$t_L$  – čas průchodu podélné ultrazvukové vlny

$t_T$  – čas průchodu příčné ultrazvukové vlny



Obr. 34: Měření na ultrazvukovém defektoskopu

V následující Tab. 15 a Obr. 35 jsou shrnuty výsledky naměřených hodnot a výpočtů pro materiál C45 – ČSN 12 050. Výpočet modulu pružnosti byl proveden pomocí vzorce (13).

Pro příklad je zde uveden výpočet pro vzorek C1:

$$E = \frac{3 \times \rho \times c_T^2 \left( c_L^2 - \frac{4}{3} \times c_T^2 \right)}{(c_L^2 - c_T^2)}$$

$$E = \frac{3 \times 7792,30 \times 3163,27^2 \left( 5195,53^2 - \frac{4}{3} \times 3163,27^2 \right)}{(5195,53^2 - 3163,27^2)} = 187,99 \text{ GPa}$$



Tab. 15: Výsledky pro materiál C45 – ČSN 12 050

Materiál	C45 – ČSN 12 050							
Vzorek	D [mm]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$t_L$ [μs]	$t_T$ [μs]	$c_L$ [m/s]	$c_T$ [m/s]	E [GPa]	$\epsilon$ [%]
C1	9,30	7792,40	1,79	2,94	5195,53	3163,27	187,99	8,36
C2	10,25	7792,30	1,58	3,15	6487,34	3253,97	219,79	2,26
C3	9,70	7785,60	1,64	3,00	5914,63	3233,33	209,49	0,84
Vyžíhaný C4	9,75	8000,00	1,66	3,00	5873,49	3250,00	216,21	0,00
Výchozí stav C5	6,85	8250,00	1,17	2,16	5854,70	3171,30	214,46	0,00

D – tloušťka vzorku

$\rho$  – hustota vzorků

$t_L$  – čas průchodu podélné ultrazvukové vlny

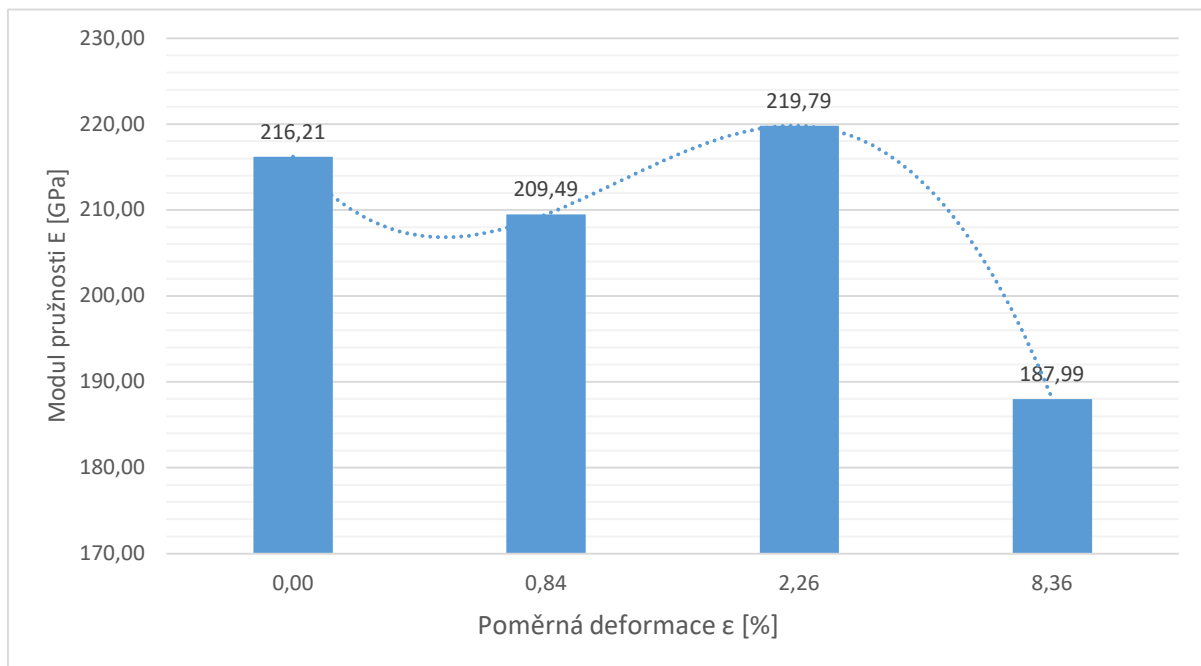
$t_T$  – čas průchodu příčné ultrazvukové vlny

$c_L$  – rychlost podélné ultrazvukové vlny

$c_T$  – rychlost příčné ultrazvukové vlny

E – Youngův modul pružnosti

$\epsilon$  – poměrná deformace

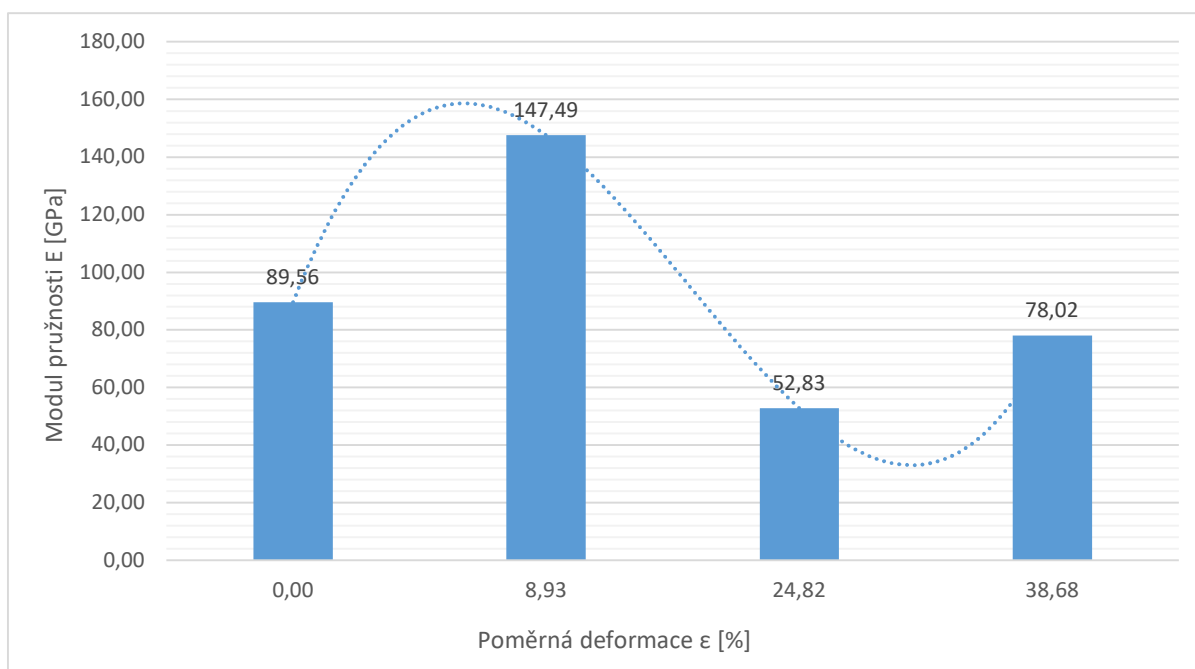


Obr. 35: Graf závislosti modulu pružnosti na poměrné deformaci – C45 – ČSN 12 050

V následující Tab. 16 a Obr. 36 jsou shrnuty výsledky naměřených hodnot a výpočtů pro materiál S235 – ČSN 11 373. Pro vzorek S1 nedošlo k naměření rychlosti šíření ultrazvukových vln všemi sondami z důvodu velkých rozměrů sond. Dané výsledky pro vzorek S1 jsou uvedeny v příloze 1. (II).

Tab. 16: Výsledky pro materiál S235 – ČSN 11 373

Materiál	S235 – ČSN 11 373							
Vzorek	D [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$t_L$ [μs]	$t_T$ [μs]	$c_L$ [m/s]	$c_T$ [m/s]	E [Gpa]	$\epsilon$ [%]
S1	10,90	7794,20	1,82	5,86	5989,01	1860,07	<b>78,02</b>	38,68
S2	9,32	7806,10	1,99	6,08	4683,42	1532,89	<b>52,83</b>	24,82
S3	11,86	7799,90	1,57	4,62	7554,14	2567,10	<b>147,49</b>	8,93
Výchozí stav S4	9,62	7713,33	1,64	4,78	5865,85	2012,55	<b>89,56</b>	0,00

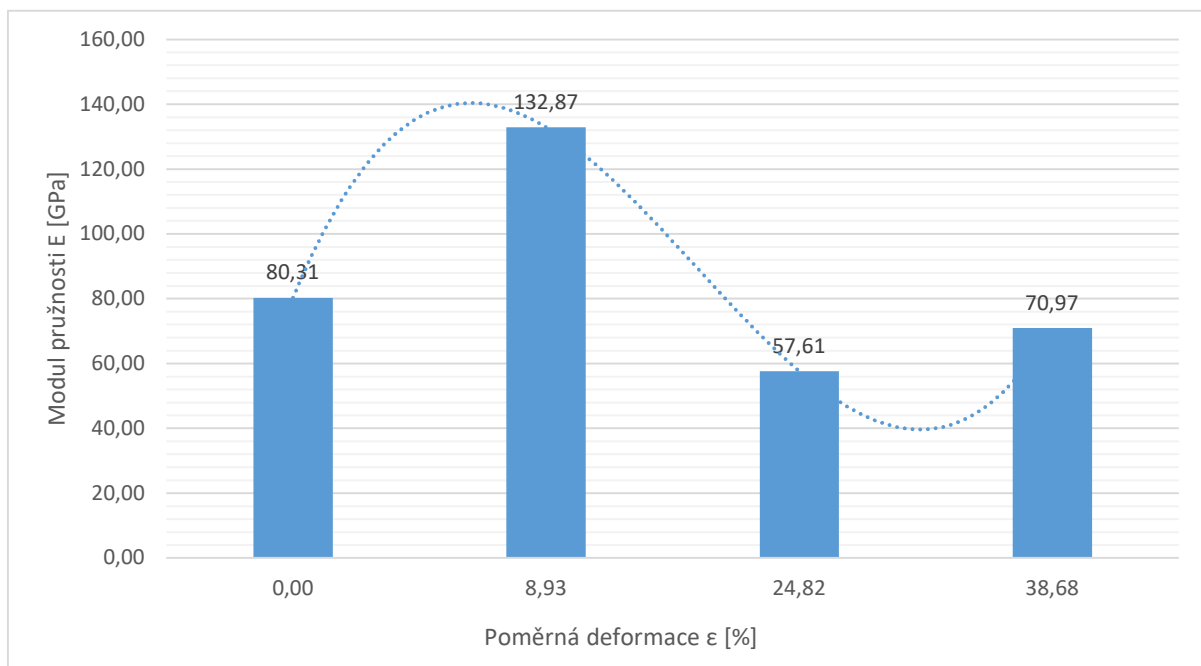


Obr. 36: Graf závislosti modulu pružnosti na poměrné deformaci – S235 – ČSN 11 373

Pro potvrzení správnosti měření bylo pro materiál S235 – ČSN 11 373 měření a výpočet proveden ještě jednou. V naměřených výsledcích nebyly nalezeny žádné významné rozdíly. V následující Tab. 17 a Obr. 37 jsou shrnuty výsledky naměřených a vypočtených hodnot.

Tab. 17: Výsledky pro materiál S235 - 2. měření – ČSN 11 373

Materiál	S235 - ČSN 11 373							
Vzorek	D [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$t_L$ [ $\mu$ s]	$t_T$ [ $\mu$ s]	$c_L$ [m/s]	$c_T$ [m/s]	E [GPa]	$\epsilon$ [%]
S1	10,90	7794,20	3,04	5,86	3585,53	1860,07	70,97	38,68
S2	9,32	7806,10	2,98	5,52	3127,52	1688,41	57,61	24,82
S3	11,86	7799,90	2,52	4,61	4706,35	2572,67	132,87	8,93
Výchozí stav S4	9,62	7713,33	2,62	4,78	3671,76	2012,55	80,31	0,00

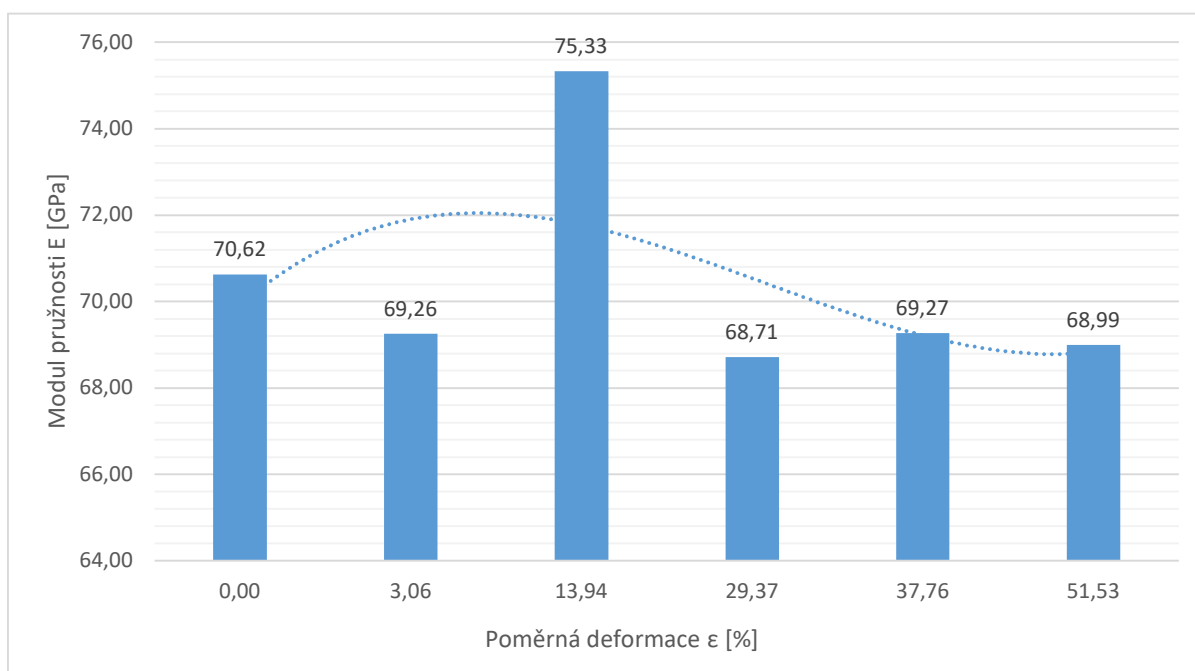


Obr. 37: Graf závislosti modulu pružnosti na poměrné deformaci - 2. měření – S235 – ČSN 11 373

V následující Tab. 18 a Obr. 38 jsou shrnuty výsledky naměřených hodnot a výpočtů pro materiál EN AW 1050 T1.

Tab. 18: Výsledky pro materiál EN AW 1050 T1

Materiál	EN AW 1050 T1							
Vzorek	D [mm]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$t_L$ [s]	$t_T$ [s]	$c_L$ [m/s]	$c_T$ [m/s]	E [GPa]	$\epsilon$ [%]
H1	16,00	2687,50	2,43	5,21	6584,36	3071,02	68,99	51,53
H2	16,72	2766,67	2,64	5,49	6333,33	3045,54	69,27	37,76
H3	15,10	2611,11	2,37	4,82	6371,31	3132,78	68,71	29,37
H4	13,19	2812,50	2,06	4,17	6402,91	3163,07	75,33	13,94
H5	15,68	2618,18	2,46	4,99	6373,98	3142,28	69,26	3,06
H6	13,47	2722,22	2,13	4,33	6323,94	3110,85	70,62	0,00



Obr. 38: Graf závislosti modulu pružnosti na poměrné deformaci – EN AW 1050 T1

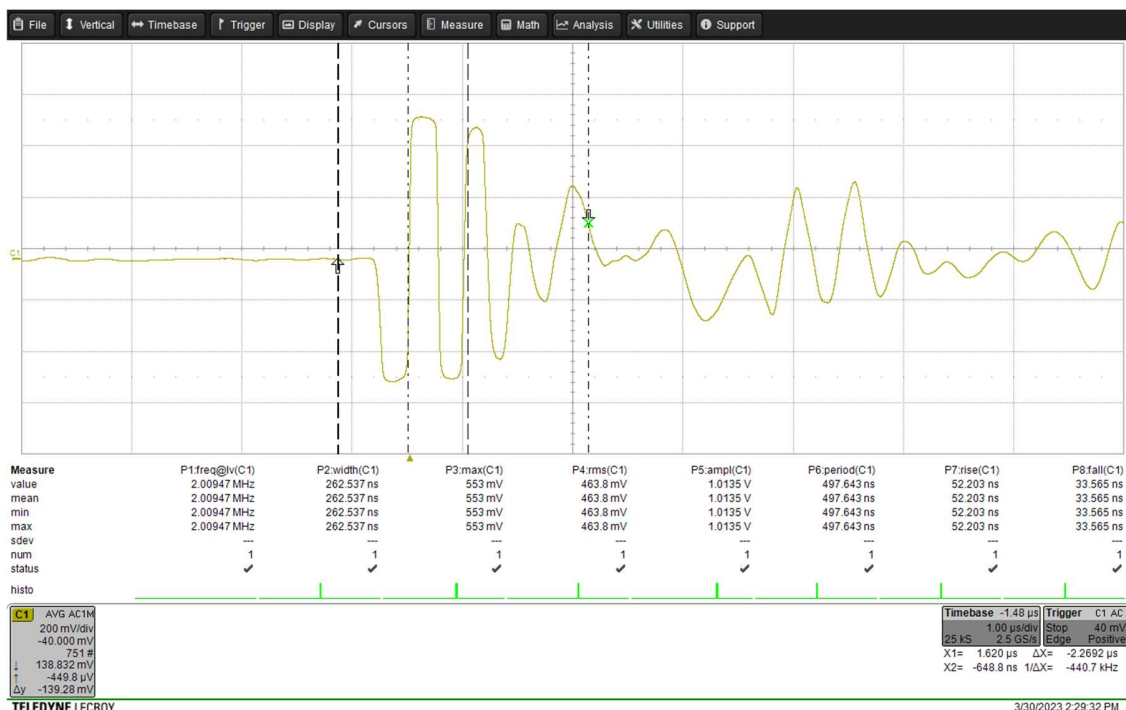
## 9 Vliv plastické deformace na šíření ultrazvukové vlny

V této části experimentu bude zkoumána závislost vlivu plastické deformace materiálu na šíření ultrazvukové vlny. Experiment byl proveden průchodovou metodou, kdy je ultrazvukový signál vyslán jednou sondou a přijímán druhou sondou. Sondy byly umístěny přesně proti sobě. Jako zdroje ultrazvukového signálu bylo využito ultrazvukového defektoskopu Olympus Epoch 1000i. Druhým použitým zařízením byl osciloskop Teledyne lecroyc HDO 4022, který byl využit pro příjem a zpracování ultrazvukového signálu. Jako přijímací a vysílací sondy byly využity následující sondy:

- SIUI C2.25-L. (frekvence 2,25 MHz, generována podélná vlna, vysílací i přijímací sonda)
- MB4S-N (frekvence 4 MHz, generována podélná vlna, vysílací sonda)
- Panametrics CN4R – 10 (frekvence 4 MHz, generována podélná vlna, přijímací sonda)

Měření bylo provedeno dvakrát se sondami o různých frekvencích z důvodu získání přesnějších výsledků.

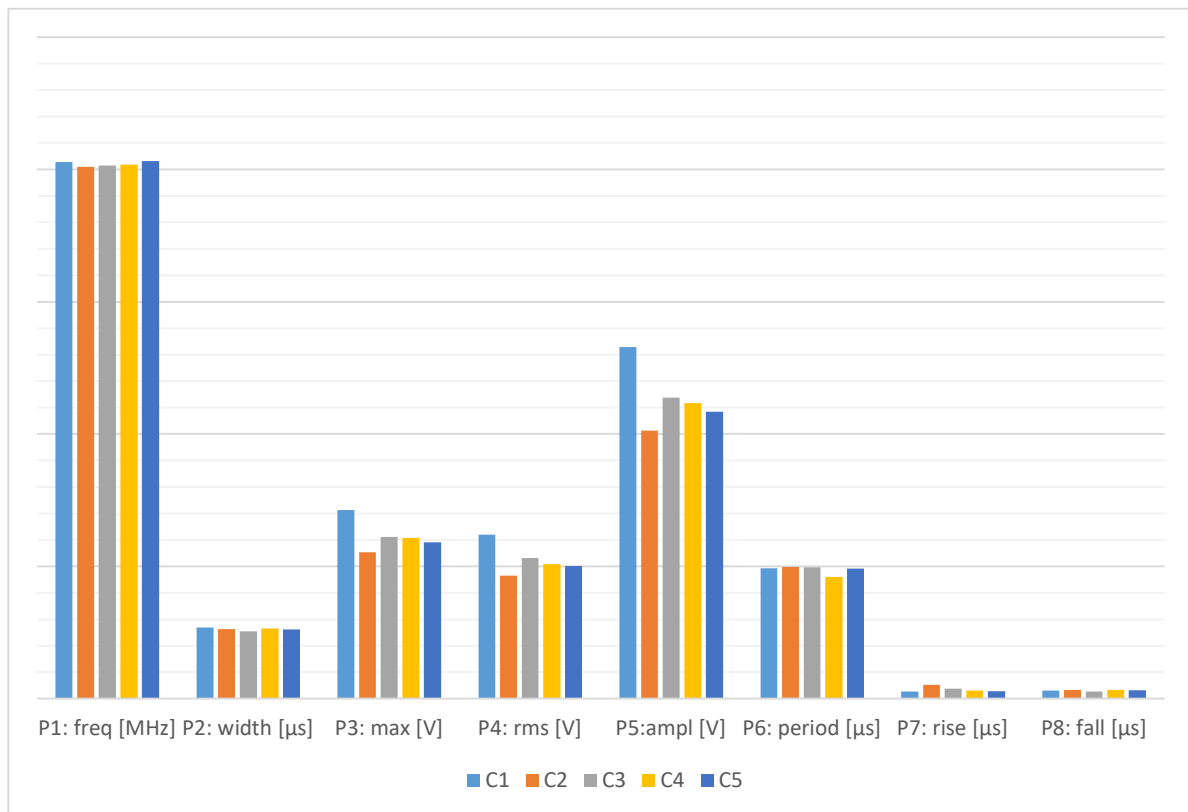
Hodnocení vlivu plastické deformace na šíření ultrazvukové vlny bylo posuzováno ze změn měřených vlnových charakteristik. Měřeny byly tyto vlnové charakteristiky: frekvence vlny (P1), šířka pásma vlny na úrovni 50 % signálu (P2), maximální pík signálu vlny (P3), RMS vlny (P4), amplituda vlny (P5), perioda vlny (P6), čas náběhu hodnoty signálu vlny z úrovně 10 % na 90 % (P7), čas poklesu hodnoty signálu vlny z úrovně 90 % na 10 % (P8). Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 19. – 24. a přehledně zobrazeny na obr. 40. – 45. Na Obr. 39 je zobrazen záznam z měření pro vzorek C2.



Obr. 39: Záznam měření na digitálním osciloskopu – vzorek C2

Tab. 19: Měření vlnových charakteristik (frekvence 2,25 MHz) – C45 – ČSN 12 050

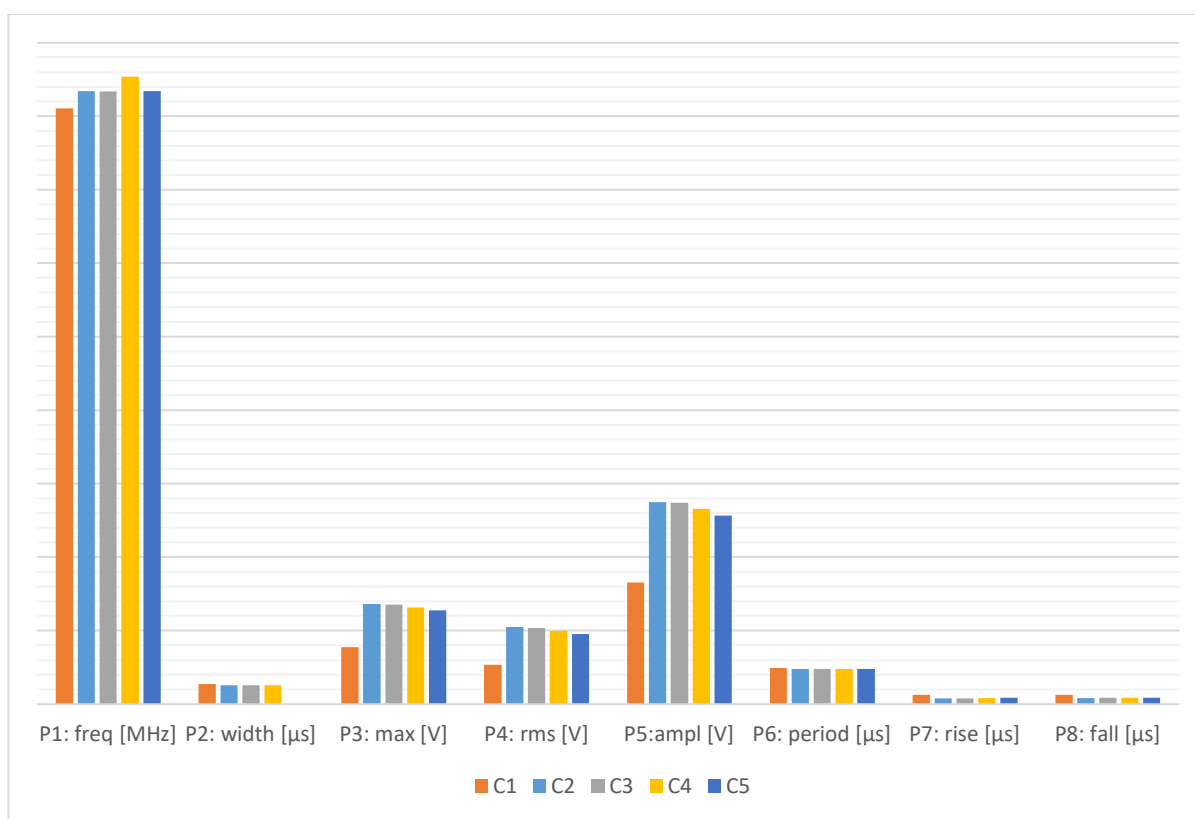
Měření vlivu deformace na šíření ultrazvukové vlny – C45 – ČSN 12 050									
Vzorek	$\epsilon$ [%]	P1: freq [MHz]	P2: width [ $\mu$ s]	P3: max [V]	P4: rms [V]	P5: ampl [V]	P6: period [ $\mu$ s]	P7: rise [ $\mu$ s]	P8: fall [ $\mu$ s]
C1	8,36	2,02868	0,26953	0,713	0,620	1,3290	0,49293	0,02590	0,02977
C2	2,26	2,00947	0,26254	0,553	0,464	1,0135	0,49764	0,05220	0,03357
C3	0,84	2,01446	0,25433	0,612	0,531	1,1372	0,49641	0,03844	0,02629
C4	0,00	2,01760	0,26593	0,607	0,508	1,1173	0,45964	0,02956	0,03383
C5	0,00	2,03224	0,26241	0,590	0,501	1,0843	0,49207	0,02728	0,03273



Obr. 40: Porovnání vlnových charakteristik (frekvence 2,25 MHz) – C45 – ČSN 12 050

Tab. 20: Měření vlnových charakteristik (frekvence 4 MHz) – C45 – ČSN 12 050

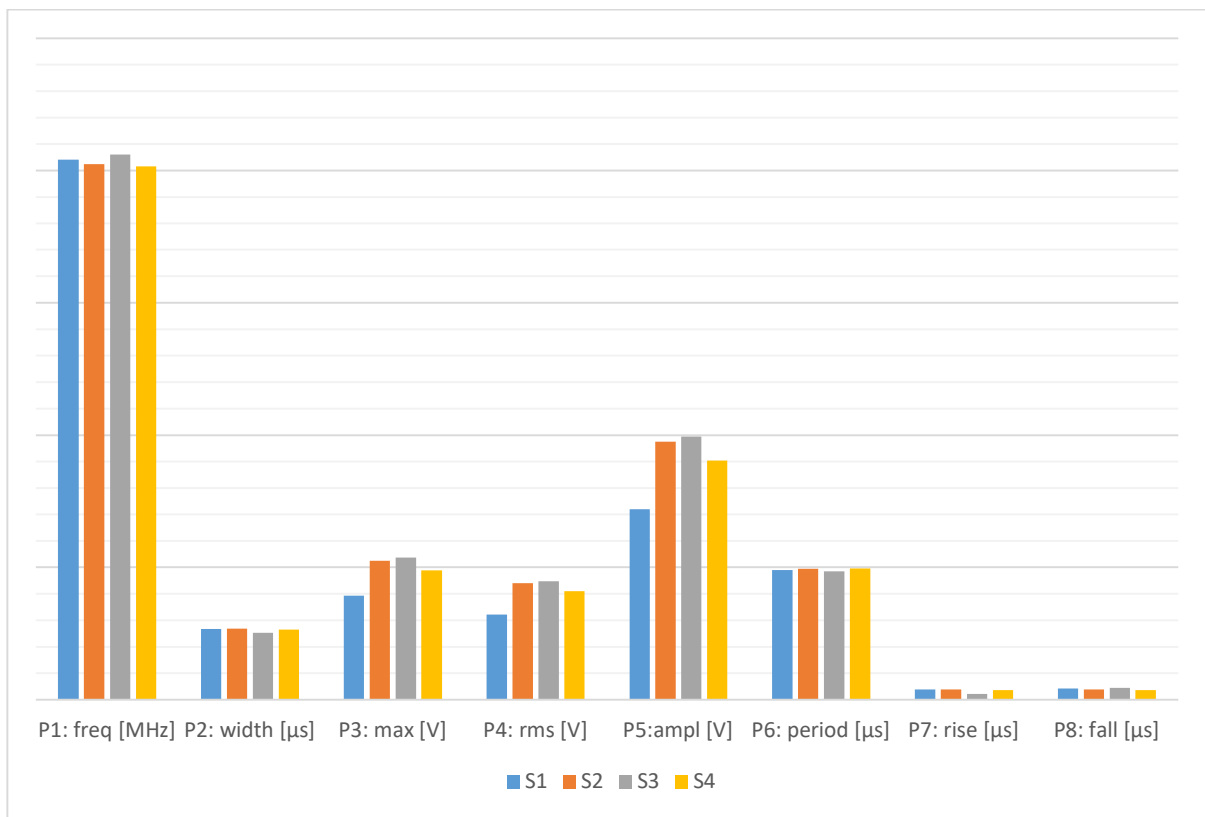
Měření vlivu deformace na šíření ultrazvukové vlny – C45 – ČSN 12 050									
Vzorek	$\epsilon$ [%]	P1: freq [MHz]	P2: width [ $\mu$ s]	P3: max [V]	P4: rms [V]	P5: ampl [V]	P6: period [ $\mu$ s]	P7: rise [ $\mu$ s]	P8: fall [ $\mu$ s]
C1	8,36	4,05355	0,13712	0,388	0,2682	0,8279	0,24670	0,06403	0,06267
C2	2,26	4,17079	0,12739	0,681	0,5235	1,3735	0,23976	0,03819	0,04035
C3	0,84	4,16778	0,12779	0,676	0,5164	1,3692	0,23994	0,03928	0,04172
C4	0,00	4,26703	0,12784	0,657	0,4990	1,3290	0,23998	0,04032	0,04241
C5	0,00	4,17013	0,12767	0,638	0,4779	1,2835	0,23980	0,04247	0,04338



Obr. 41: Porovnání vlnových charakteristik (frekvence 4 MHz) – C45 – ČSN 12 050

Tab. 21: Měření vlnových charakteristik (frekvence 2,25 MHz) – S235 – ČSN 11 373

Měření vlivu deformace na šíření ultrazvukové vlny – S235 – ČSN 11 373									
Vzorek	$\epsilon$ [%]	P1: freq [MHz]	P2: width [ $\mu$ s]	P3: max [V]	P4: rms [V]	P5: ampl [V]	P6: period [ $\mu$ s]	P7: rise [ $\mu$ s]	P8: fall [ $\mu$ s]
S1	38,68	2,04051	0,26742	0,393	0,3218	0,7200	0,49007	0,03890	0,04215
S2	24,82	2,02454	0,26834	0,525	0,4399	0,9751	0,49394	0,03827	0,03859
S3	8,93	2,06084	0,25316	0,537	0,4468	0,9934	0,48524	0,02080	0,04514
S4	0,00	2,01554	0,26507	0,489	0,4094	0,9030	0,49615	0,03623	0,03692

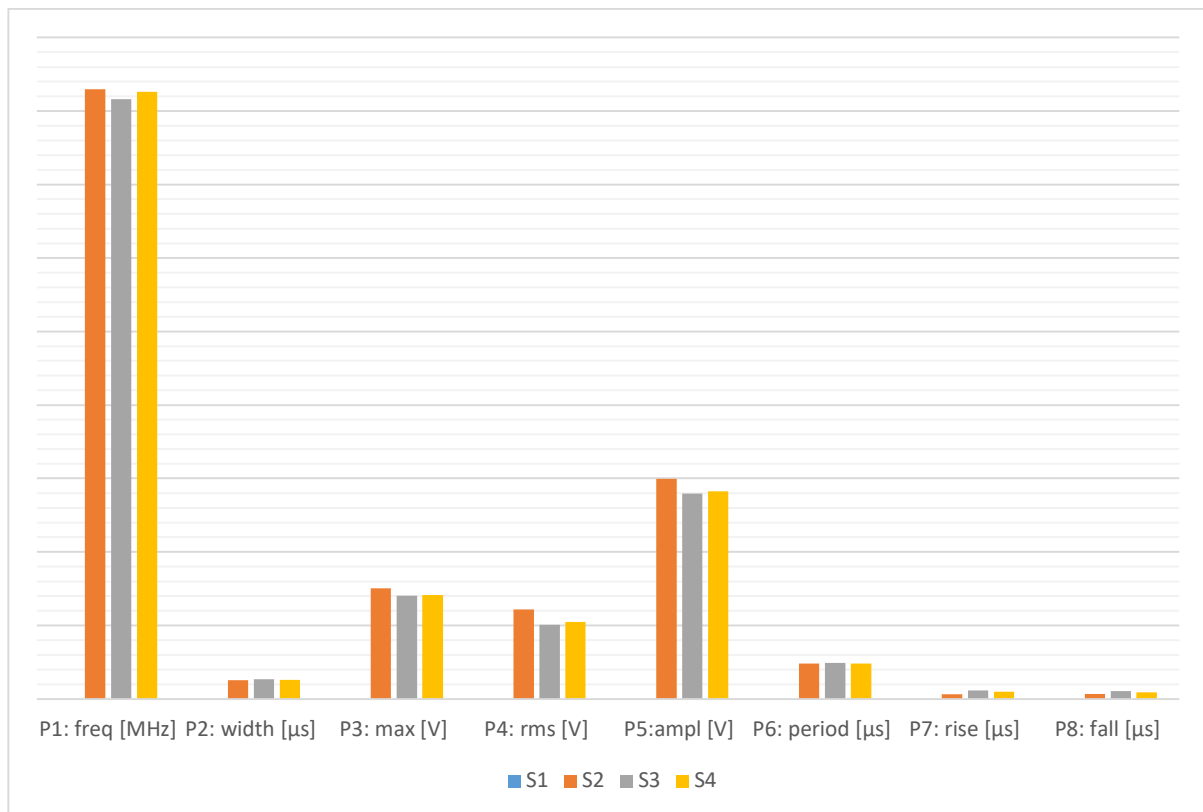


Obr. 42: Porovnání vlnových charakteristik (frekvence 2,25 MHz) – S235 – ČSN 11 373



Tab. 22: Měření vlnových charakteristik (frekvence 4 MHz) – S235 – ČSN 11 373

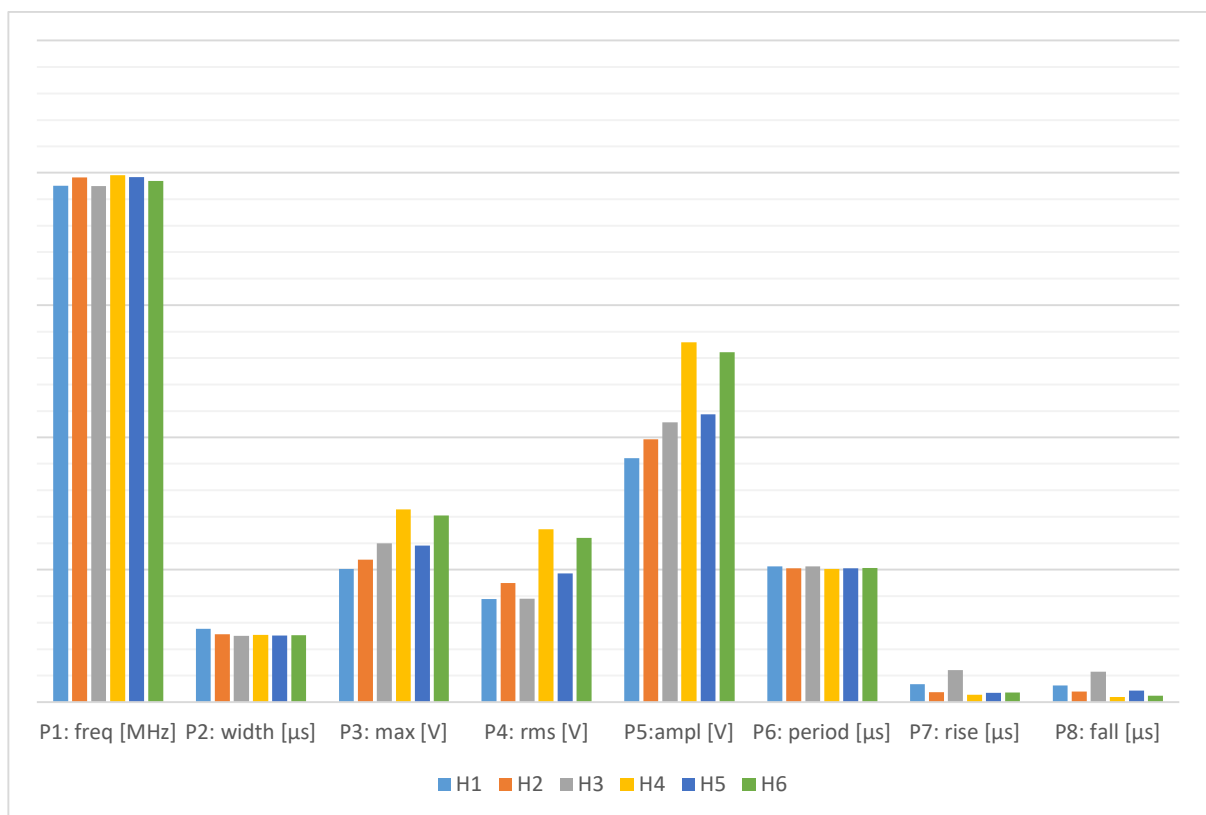
Měření vlivu deformace na šíření ultrazvukové vlny – S235 – ČSN 11 373									
Vzorek	$\epsilon$ [%]	P1: freq [MHz]	P2: width [ $\mu$ s]	P3: max [V]	P4: rms [V]	P5: ampl [V]	P6: period [ $\mu$ s]	P7: rise [ $\mu$ s]	P8: fall [ $\mu$ s]
S1	38,68	-	-	-	-	-	-	-	-
S2	24,82	4,14788	0,12747	0,752	0,6078	1,4975	0,24109	0,03240	0,03412
S3	8,93	4,08019	0,13379	0,702	0,5052	1,3965	0,24509	0,05717	0,05375
S4	0,00	4,12982	0,12914	0,705	0,5242	1,4109	0,24214	0,04873	0,04502



Obr. 43: Porovnání vlnových charakteristik (frekvence 4 MHz) – S235 – ČSN 11 373

Tab. 23: Měření vlnových charakteristik (frekvence 2,25 MHz) – EN AW 1050 T1

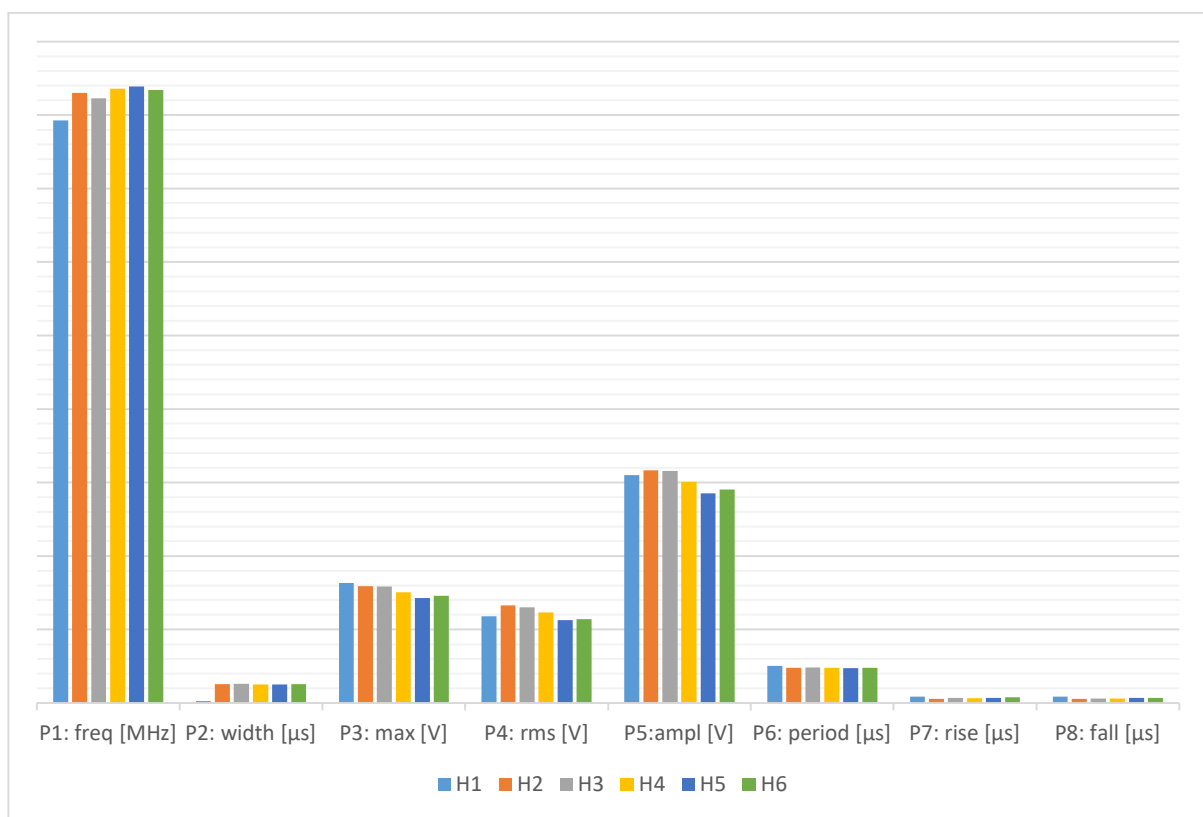
Měření vlivu deformace na šíření ultrazvukové vlny – EN AW 1050 T1									
Vzorek	$\epsilon$ [%]	P1: freq [MHz]	P2: width [ $\mu$ s]	P3: max [V]	P4: rms [V]	P5: ampl [V]	P6: period [ $\mu$ s]	P7: rise [ $\mu$ s]	P8: fall [ $\mu$ s]
H1	51,53	1,95104	0,27571	0,502	0,3890	0,9214	0,512547	0,068258	0,062923
H2	37,76	1,98269	0,25619	0,538	0,4496	0,9934	0,504366	0,037065	0,040002
H3	29,37	1,94992	0,25067	0,600	0,3902	1,0565	0,512841	0,121004	0,115092
H4	13,94	1,99131	0,25380	0,728	0,6532	1,3595	0,502182	0,028261	0,019967
H5	3,06	1,98365	0,25164	0,591	0,4864	1,0877	0,504122	0,035013	0,042460
H6	0,00	1,97016	0,25277	0,705	0,6206	1,3220	0,507573	0,036176	0,024641



Obr. 44: Porovnání vlnových charakteristik (frekvence 2,25 MHz) – EN AW 1050 T1

Tab. 24: Měření vlnových charakteristik (frekvence 4 MHz) – EN AW 1050 T1

Měření vlivu deformace na šíření ultrazvukové vlny – EN AW 1050 T1									
Vzorek	$\epsilon$ [%]	P1: freq [MHz]	P2: width [ $\mu$ s]	P3: max [V]	P4: rms [V]	P5: ampl [V]	P6: period [ $\mu$ s]	P7: rise [ $\mu$ s]	P8: fall [ $\mu$ s]
H1	51,53	3,96290	0,01301	0,816	0,5904	1,5493	0,252341	0,043140	0,042979
H2	37,76	4,15064	0,12691	0,796	0,6646	1,5812	0,240927	0,028725	0,027843
H3	29,37	4,11317	0,12880	0,793	0,6505	1,5777	0,243122	0,033714	0,029833
H4	13,94	4,17925	0,12616	0,754	0,6142	1,5026	0,239278	0,032696	0,030967
H5	3,06	4,19287	0,12590	0,715	0,5654	1,4254	0,238500	0,033907	0,033514
H6	0,00	4,17110	0,12662	0,729	0,5709	1,4523	0,239745	0,037781	0,035384



Obr. 45: Porovnání vlnových charakteristik (frekvence 4 MHz) – EN AW 1050 T1

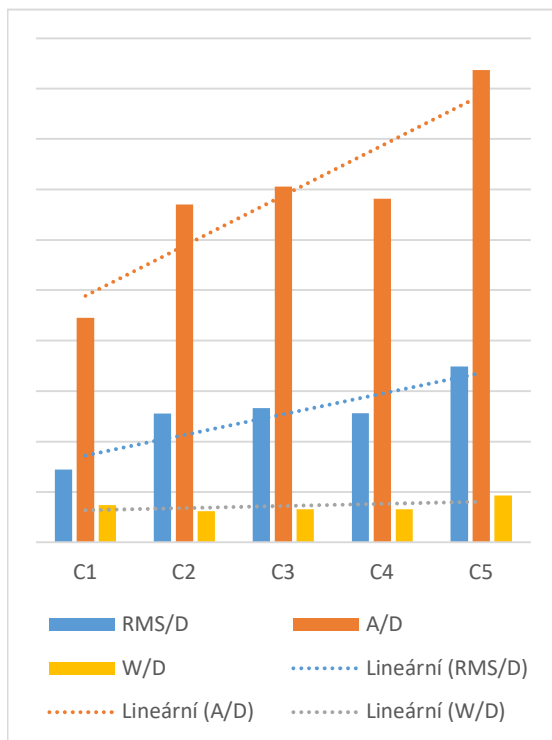
## 9.1 Doplnující výsledky

Z důvodu možného ovlivnění naměřených výsledků z předchozího měření různou tloušťkou zkušebních vzorků a výsledků, které nevykazují jednoznačný trend, byla provedena dodatečná úprava výsledků. U vybraných měřených vlnových charakteristik byly jejich hodnoty vztaženy k tloušťce konkrétního vzorku. Pro tuto úpravu byly vybrány tyto vlnové charakteristiky: šířka pásma vlny na úrovni 50 % signálu (P2), RMS vlny (P4) a amplituda vlny (P5). Výsledky jsou shrnuty na obr. 46–51.

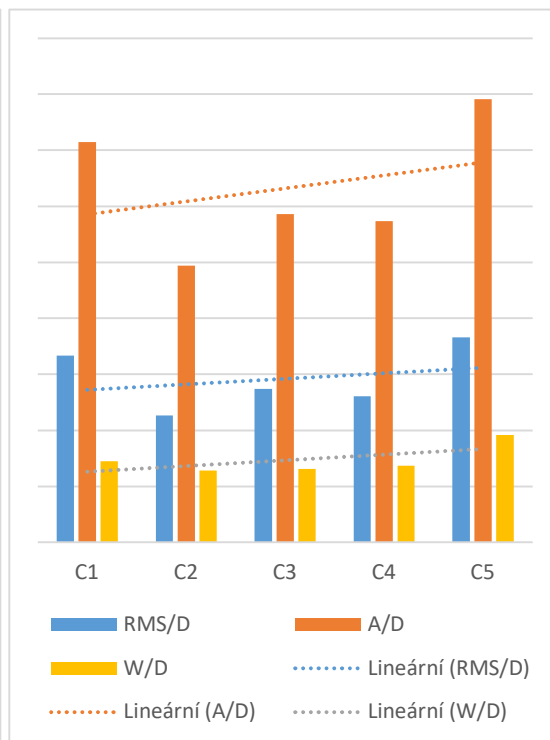
D – tloušťka vzorku

A – amplituda vlny

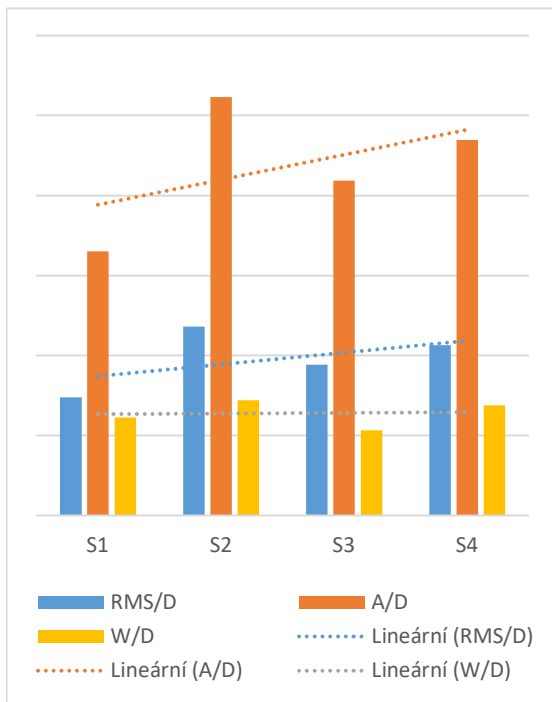
W – šířka pásma vlny na úrovni 50 % signálu



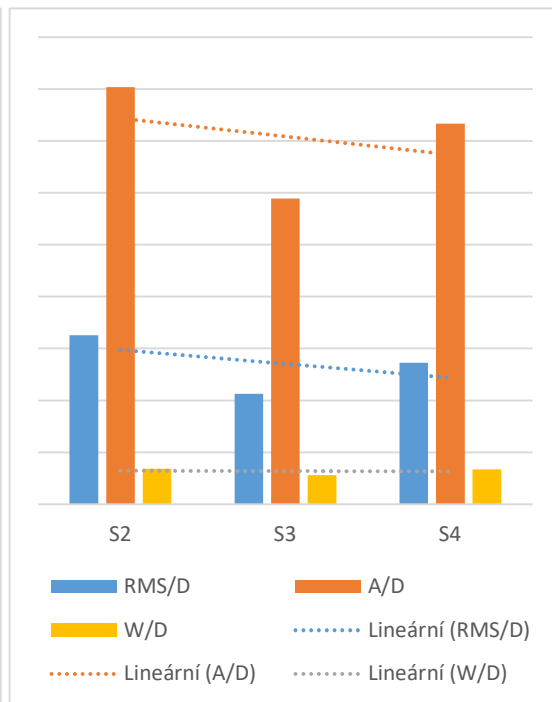
Obr. 46: Graf pro ocel C45 (frekvence 2,25 MHz)



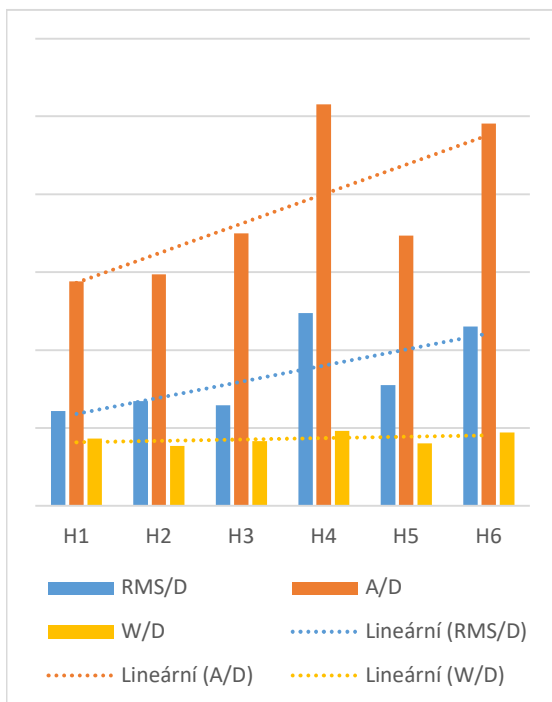
Obr. 47: Graf pro ocel C45 (frekvence 4 MHz)



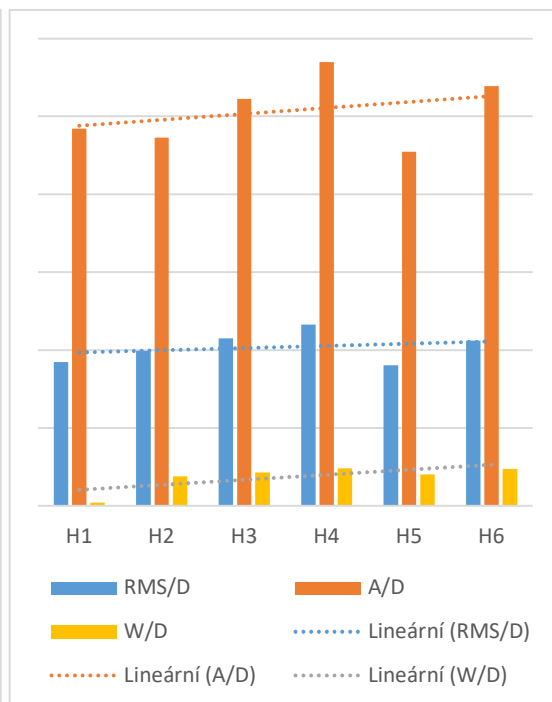
Obr. 48: Graf pro ocel S235 (frekvence 2,25 MHz)



Obr. 49: Graf pro ocel S235 (frekvence 4 MHz)



Obr. 50: Graf pro slitinu EN AW 1050 T1  
(frekvence 2,25 MHz)



Obr. 51: Graf pro slitinu EN AW 1050 T1  
(frekvence 4 MHz)

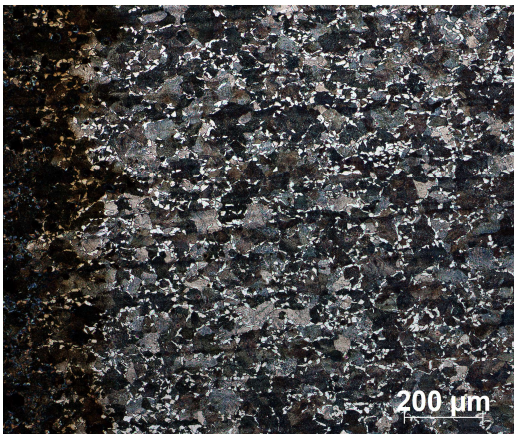
## 10 Metalografická analýza

U Ocelových vzorků proběhla metalografická analýza struktury. Příprava zahrnovala zbroušení povrchu vzorku pod vodou na metalografické brusce brusnými papíry od hrubosti 180 až 2000. Mezi jednotlivými kroky broušení byly vzorky čištěny technickým lihem a osoušeny. Po broušení následovalo leštění pomocí textilních kotoučů a leštící pasty ve dvou krocích. V prvním kroku leštění byla využita brusná pasta s brusnými částicemi o velikost 6  $\mu\text{m}$  a ve druhém kroku byla využita brusná pasta s brusnými částicemi o velikost 3  $\mu\text{m}$ . Mezi jednotlivými kroky leštění byly vzorky očištěny pod tekoucí vodou, technickým lihem a byly vysušeny. Jako leptadlo pro naleptání byl použit 3 % Nital.

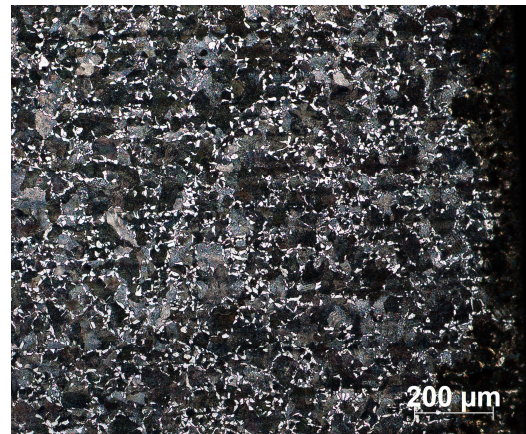
Metalografická analýza byla provedena na mikroskopu ZEISS. Byly pořízeny přehledové snímky struktury celého vzorku při zvětšení 25x. Dále byly pořízeny snímky na horním, dolním okraji a středu vzorku se zvětšením 100x. Posledním snímkem byl střed vzorku se zvětšením 500x. Na obr. 46. – 50. jsou snímky struktury vzorku C1. Ostatní fotografie jsou přiloženy v příloze 2.



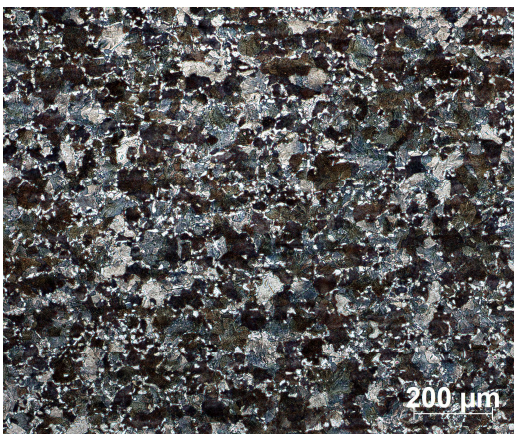
Obr. 51: Struktura podél vzorku – C1 25x



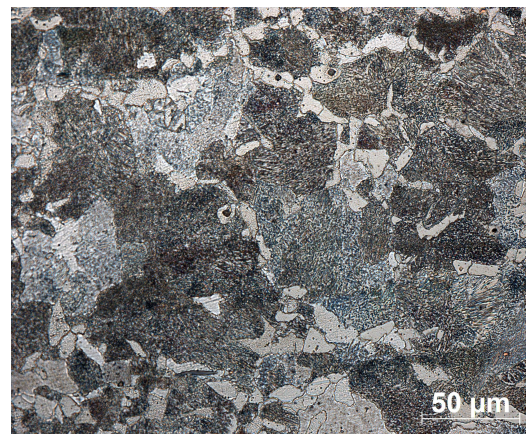
Obr. 46: Horní strana – C1 100x



Obr. 47: Dolní strana – C1 100x



Obr. 55: Střed - C1 100x



Obr. 56: Střed - C1 500x

## 11 Diskuse výsledků

V následující kapitole budou zhodnoceny výsledky všech experimentů práce

### 11.1 Ultrazvukové hodnocení změn modulu pružnosti při deformaci oceli

Výsledky experimentu ultrazvukového hodnocení změn modulu pružnosti při deformaci oceli ukazují, že plastická deformace má vliv na Youngův modul. U materiálu C45 – ČSN 12 050 při nižších stupních deformace došlo k méně významným změnám hodnoty Youngova modulu, a to v řádu jednotek giga pascalů. Při deformaci vzorku S3 s  $\varepsilon = 8,36 \%$  došlo ke snížení hodnoty Youngova modulu na  $E = 187,99 \text{ GPa}$  z původních  $E = 216,21 \text{ GPa}$  ve výchozím stavu vzorku. To je změna téměř o  $30 \text{ GPa}$ . Jelikož hustota vzorků C4 a C5 byla určena jinou metodou než hustota u deformovaných vzorků, je možné že hodnota Youngova modulu u těchto vzorků je touto skutečností ovlivněna. Výsledky jsou shrnuty v Tab. 15 a na Obr. 35.

U materiálu S 235 – ČSN 11 373 byl u vzorku S3 s  $\varepsilon = 8,93 \%$  pozorován nárůst Youngova modulu pružnosti z původních  $E = 89,56 \text{ GPa}$  ve výchozím stavu na  $E = 147,49 \text{ GPa}$ . Následoval pokles u vzorku S2 s  $\varepsilon = 24,82 \%$  na hodnotu  $E = 52,83 \text{ GPa}$  a opětovný nárůst u vzorku S1 s  $\varepsilon = 38,68 \%$  na hodnotu  $E = 78,02 \text{ GPa}$ . Z neočekávaného vysokého nárůst Youngova modulu u vzorku S3 bylo měření a výpočty provedeny pro kontrolu podruhé. V naměřených a vypočtených výsledcích byl pozorován pokles hodnot Youngova modulu oproti prvnímu měření. Především u vzorku S3 s  $\varepsilon = 8,93 \%$ , a to přibližně o  $15 \text{ GPa}$ . Průběh hodnot Youngova modulu během deformace se však podobá výsledkům prvního měření, a tudíž se rozdíl hodnot přisuzuje chybě v měření a výpočtu. Vzorek S3 nevykazuje ve své struktuře žádné odlišnosti a ani jeho tvrdost se zásadně neliší od ostatních vzorků. Výsledky jsou shrnuty v Tab. 16 – 17 a na Obr. 36 - 37.

U materiálu EN AW 1050 T1 došlo k nevýznamnému snížení Youngova modulu pružnosti maximálně o necelé  $2 \text{ GPa}$ . Pouze u vzorku H4 s  $\varepsilon = 13,94 \%$  došlo ke zvýšení z výchozí hodnoty  $E = 70,62 \text{ GPa}$  na  $E = 75,33 \text{ GPa}$ . Toto zvýšení pravděpodobně vzniklo kvůli vyšší hustotě tohoto vzorku. Pro určení hustoty pro tento materiál byla aplikována méně přesná metoda a tím mohlo dojít k vnesení chyby do výpočtu Youngova modulu. Výsledky jsou shrnuty v Tab. 18 a Obr. 38. Podobných výsledků při nižší deformaci u téže slitiny dosáhli autoři LUCENA, M. et al. ve své práci. [33].

### 11.2 Hodnocení vlivu plastické deformace na šíření ultrazvukové vlny

Z výsledků měření je patrné že plastická deformace ovlivňuje vlnové charakteristiky. Některé více a některé méně.

U materiálu C45 – ČSN 12 050 Nejvíce došlo k ovlivnění těchto charakteristik: maximální pík signálu vlny (P3), RMS vlny (P4), amplituda vlny (P5). Toto ovlivnění je pozorovatelné jak u měření s frekvencí  $2,25 \text{ MHz}$  i  $4 \text{ MHz}$ . Při použití sond s frekvencí  $2,25 \text{ MHz}$  bylo pozorován rostoucí trend hodnot vlnových charakteristik se zvyšující se deformací. Pouze vzorek C2 má všechny charakteristiky skokově menší než všechny ostatní vzorky. Při použití sondy s frekvencí  $4 \text{ MHz}$  byl tento trend shodný, ale namísto vzorku C2 byly hodnoty charakteristik skokově nejnižší u vzorku C1. U ostatních vlnových charakteristik jsou pozorované změny hodnot buď velmi malé nebo není pozorován žádný trend. Výsledky jsou uvedeny v Tab. 19 – 20 a zobrazeny v grafech na Obr. 40 – 41.



Nejvíce proměnlivé vlnové charakteristiky u materiálu S235 – ČSN 11 373 byly opět tyto: maximální pík signálu vlny (P3), RMS vlny (P4), amplituda vlny (P5). U obou použitých frekvencí nebyl pozorován žádný trend hodnot vlnových charakteristik. Při použití sondy o frekvenci 4 MHz nebylo možné z důvodu velikosti sondy naměřit hodnoty pro vzorek S1. Výsledky měření jsou uvedeny v tab. 21–22 a zobrazeny v grafech na obr 42–43.

U hlinkové slitiny EN AW 1050 T1 docházelo opět k největšímu ovlivnění těchto vlnových charakteristik: maximální pík signálu vlny (P3), RMS vlny (P4), amplituda vlny (P5). Při použití sondy o frekvenci 2,25 MHz byl pozorován se zvyšující se deformací klesající trend hodnot vlnových charakteristik. Avšak některé hodnoty, převážně vzorku H5, z trendu vybočovaly. Naopak při použití sondy o frekvenci 4 MHz byl trend hodnot vlnových charakteristik zvyšující se s rostoucí deformací, ale opět z tohoto trendu některé hodnoty vybočovaly. Především u vzorku H5. Výsledky měření jsou uvedeny v tab. 23–24 a zobrazeny v grafech na obr 44–45.

Výsledky měření byly nejspíše ovlivněny různou tloušťkou zkušebních vzorků. Proto byly u vybraných ultrazvukových charakteristik jejich hodnoty vztaheny k jejich reálné tloušťce. Výsledné hodnoty byly vyneseny do grafů na obr. 46–51. Z lineární spojnice trendu je pozorovatelný klesající trend charakteristik vln se zvyšující se deformací. Pouze u výsledků ocele S235 s použitou 4 MHz sondou není tento trend pozorován. To je pravděpodobně zapříčiněno malým počtem naměřených dat.

### 11.3 Vyhodnocení metalografické analýzy

Důvodem pro provedení metalografické analýzy byla očekávaná změna struktury ve směru deformačního toku materiálu. Výsledky mikroskopické analýzy neprokázaly u většiny vzorků žádné optickou mikroskopií viditelné změny struktury. U těchto vzorků plastická deformace nejspíše způsobila zvýšení hustoty dislokací a vnitřní energie. Pouze u vzorku S1 je na fotografii ze středu vzorku pozorovatelná deformace zrna oproti struktuře nedeformovaného vzorku S4.

## 12 Závěr

Tato práce se zabývala tématem „Ultrazvukové hodnocení modulu pružnosti při deformaci oceli“. V teoretické části byla popsána témata blízká řešené problematice v experimentálním programu. Byla zde popsána deformace, její rozdělení, základní mechanismy vzniku plastické deformace a její vliv na vlastnosti, strukturu kovů a Youngův modul. Dále byly představeny metody měření deformací a úvod do ultrazvukového zkoušení.

Experimentální program se skládal ze dvou částí. První část se zabývala ultrazvukovým hodnocení změn modulu pružnosti při deformaci oceli. Ve druhé části experimentu byl sledován vlivu plastické deformace na šíření ultrazvukových vln v materiálu. Tento vliv byl pozorován na základě analýzy změn ultrazvukových vlnových charakteristik, které se projeví při šíření vln materiálem.

Výsledky první části experimentu ukazují, že plastická deformace ovlivňuje velikost Youngova modulu pružnosti oceli. Experiment ukazuje, že může dojít jak ke snížení, tak i ke zvýšení jeho hodnoty. U oceli S235 – ČSN 11 373 bylo pozorováno zvýšený Youngova modulu až o cca 58 GPa a opětovné snížení až o cca 95 GPa. Výsledky tohoto experimentu pro hliníkovou slitinu EN AW 1050 T1 ukazují, že plastická deformace tohoto materiálu nemá zásadní vliv na velikost Youngova modulu pružnosti. Výsledky toho měření nemohou být brány jako směrodatné, a to z několika důvodů. Prvním důvodem je, že vlivem dvouosého namáhání došlo u zkušebních vzorků ke vzniku nehomogenního deformačního pole, které může ovlivnit naměřené hodnoty. Druhým důvodem je zatížení měření vlivem statistických nejistot. Po vyhlazení statistických nejistot je možno pozorovat klesající trend Youngova modulu, který uvádějí jiní autoři ve svých pracích. Nicméně platnost experimentálně získaných dat by bylo nutné ověřit dalším měřením.

Druhá část experimentu, zabývající se vlivem plastické deformace na šíření ultrazvukové vlny materiálem, ukazuje že dochází k ovlivnění šíření ultrazvukové vlny materiálem. Z výsledku měření nelze určit konkrétní vliv plastické deformace, jelikož jsou mezi jednotlivými měřeními s různými frekvencemi pozorovatelné odchylky a výsledky nevykazují jednotný trend změny hodnot. Deformace zkušebních vzorků jsou číselně velké, ale pro dané materiály nejsou zásadní tak, aby dostatečně ovlivňovali šíření vlnění. Z tohoto důvodu se viditelně projevují chyby měření. Chyby pravděpodobně vznikly již v přípravě vzorků a samotném měření. Jak již bylo řečeno při deformaci na lisu vzniká dvouosý napětový stav a dochází tak k vytvoření nehomogenního deformačního pole. Při opakování měření se sondami o jiné frekvenci nebylo možné provést měření na totožném místě a také rozměr sond byly rozdílné. Z těchto důvodů mohlo být měření provedeno pokaždé v jiné oblasti nehomogenního deformačního pole. Určitý vliv na měření mohla mít také skutečnost, že jednotlivé vzorky neměly totožnou tloušťku. Proto byly u vybraných ultrazvukových charakteristik jejich hodnoty vztaheny k tloušťce. Výsledné hodnoty byly vyneseny do grafů. Z lineární spojnice trendu lze říct, že se zvyšující se deformací je pozorovatelný klesající trend charakteristik vln.

Pro ověření platnosti experimentálně získaných dat by bylo zapotřebí měření zopakovat a vyvarovat se chybám, které vznikly v tomto experimentu. Především by se měla věnovat pozornost precizní a jednotné přípravě každého vzorku.

### 13 Citovaná literatura

- [1] PTÁČEK, L. et al. *Nauka o materiálu I*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. ISBN 80-7204-193-2.
- [2] BENEŠOVÁ, S a BERNÁŠEK, V. *Technologie tváření*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2014. ISBN 978-80-261-0449-0.
- [3] PLUHAŘ, J. et al. *Nauka o materiálech*. Praha: SNTL/ALFA, 1989. ISBN 04-205-89.
- [4] SILBERNAGEL, A. et al. *Struktura, vlastnosti, zkoušení a použití kovů*. Ostrava: Kovosil, 2011. ISBN 978-80-903694-6-7.
- [5] SCHINDER, L a KAWULOK, P. *Deformační chování materiálu*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3361-3.
- [6] ZEDNÍČEK, J. *Vliv tváření na mechanické vlastnosti materiálu*. [online]. Brno, 2009 [cit. 2022-23-10]. Diplomová práce. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, Agronomická fakulta, Ústav techniky a automobilové dopravy.
- [7] JENÍČEK, L. et al. *Nauka o materiálu I: Nauka o kovech*. Praha: Nakladatelství československé akademie věd, 1968.
- [8] VĚCHET, S. a NĚMEC, K. *Tepelné zpracování oceli*. [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně [cit. 2022-28-11]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2810347/>.
- [9] YAMAGUCHI, K. *Effects of plastic strain path on Young's modulus of sheet metals*. *Metals and materials*. [online]. Kyoto: Institute of Technology Matsugasaki, 1998, **4** (3), 420–425, [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03187802>
- [10] ROCA, A. V. et al. *Can Young's Modulus of Metallic Alloys Change with Plastic Deformation*. *Materials Science Forum*. [online]. Barcelona: Politechnic University of Catalonia, 2014, [cit. 2022-05-11]. ISSN 1662-9752. Dostupné z: DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.783-786.2382
- [11] BENITO, J. A. et al. *Change of Young's modulus of cold-deformed pure iron in a tensile test*. *Metallurgical and Materials Transactions A*. [online]. Barcelona: Politechnic University of Catalonia, 2004, **36**, 3317-3324, [cit. 2022-06-11]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11661-005-0006-6>
- [12] MORESTIN, F. M. a BOIVIN, M. *On the necessity of taking into account the variation in the Young modulus with plastic strain in elastic-plastic software*. *Nuclear engineering and design*. [online]. Lyon: Laboratoire de Mecanique des solides. 1996, **162** (1), 107-116, [cit. 2022-9-11]. ISSN 0029-5493. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0029549395011234>
- [13] EL-MADHOUNY, Y., MOHAMED, A. a BASSIM, M. N. *Cyclic stress-strain response and dislocation structures in polycrystalline aluminum*. *Materials science & engineering. A*. [online]. Manitoba: The University of Manitoba, Faculty of Engineering. 2003, **359**(1-2), 220-227. [cit. 2022-12-11]. ISSN 0921-5093. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509303003472>

- [14] PODUŠKA, J. Popis reziduálních napětí v polymerních trubkách. [online]. Brno, 2014 [cit. 2022-12-11]. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky.
- [15] KUMAR, N. a BAUMANN, J. A. Residual Stresses in Friction Stir Welding. Elsevier 2013. ISBN 978-0-12-800150-9
- [16] VLK, M. Experimentální mechanika: [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003, [cit. 2022-14-12]. Dostupné z: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwir0\\_OK4eX9AhUdhP0HHdlPBkAQFnoECAoQAQ&url=http%3A%2F%2Fean2011.fme.vutbr.cz%2Fimg%2Ffckeditor%2Ffile%2Fopory%2Fexperimentalni\\_mechanika.pdf&usq=AovVaw1VCCZt0hkdnzNlp2l3z3yB](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwir0_OK4eX9AhUdhP0HHdlPBkAQFnoECAoQAQ&url=http%3A%2F%2Fean2011.fme.vutbr.cz%2Fimg%2Ffckeditor%2Ffile%2Fopory%2Fexperimentalni_mechanika.pdf&usq=AovVaw1VCCZt0hkdnzNlp2l3z3yB)
- [17] GANEV, N. Poznání nehmotného světa zbytkových napětí: [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2013, [cit. 2022-14-11]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2433305/>
- [18] KOLAŘÍK, R. Srovnání konvenčních metod měření deformace s metodou DIC. [online]. Zlín, 2016 [cit. 2022-18-11]. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta Technologická, Ústav výrobního inženýrství.
- [19] KADLEC, K. a KMÍNEK, M. Měření tlaku. Měřicí a řídicí technika: [online]. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005 [cit. 2022-18-11]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/ucebnice/mrt/F4/F4k42-tlak.htm#k424>.
- [20] Odporové tenzometry: [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská, [cit. 2022-19-11]. Dostupné z: <https://homel.vsb.cz/~jur286/mast/tenzometry.htm>
- [21] SOUKUP, K. Měření mechanických vlastností konstrukčních materiálů s využitím optických metod měření deformace. [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2022-19-11]. Diplomová práce. Západočeská univerzita v plzni, Fakulta strojní, Katedra materiálů a strojírenské metalurgie.
- [22] ELUC. Snímače mechanického namáhání – odporové tenzometry. Elektronická učebnice. [online]. [cit. 2022-20-11]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1588#>.
- [23] DVOŘÁK, J. Mereni deformace. JD Dvořák, s.r.o. [online]. Praha: JD Dvořák, s.r.o. [cita. 2022-28-11] Dostupné z: <https://www.testsysteme.cz/mereni-deformace-prutaznosti-se-zamerenim-na-bezkontaktni-technologie>.
- [24] KOPEC, B. et al. Nedestruktivní zkoušení. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [25] KOPEC, B. et al. Ultrazvukové zkoušení. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. ISBN 978-80-214-5722-5.
- [26] JÜTTNEROVÁ, S. Interaktivní učebnice ultrasonografie. Fyzika ultrazvuku. [Online] Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2016. [cit. 2022-23-11]. Dostupné z: [http://www.jtarchitekt.cz/fyzika\\_ultrazvuku.html](http://www.jtarchitekt.cz/fyzika_ultrazvuku.html).
- [27] Snellův zákon In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation. Last modified on 15. 3. 2023 [cit. 2022-29-11]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Snell%C5%Afv\\_z%C3%A1kon](https://cs.wikipedia.org/wiki/Snell%C5%Afv_z%C3%A1kon)

- [28] KERAN, Z. Ultrasonic testing of grain distortion direction in cold formed aluminium profile. Archives of Civil and Mechanical Engineering. [online]. Zagreb: University of Zagreb Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture. 2017, **17**(2), 375-381. [cit. 2022-24-11]. ISSN 1644-9665. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com//article/pii/S1644966516301455>
- [29] KOBAYASHI. M. Acoustoelastic Theory for Finite Plastic Deformation of Solids. **In:** AKHTAR. S. K. a MASATAKA T. Advances in Plasticity 1989. Amsterdam: Elviser, 1989. 401-404
- [30] KUMAR, A. et al. Correlation between ultrasonic shear wave velocity and Poisson's ratio for isotropic solid materials. Acta Materialia. [online]. Kharagpur: Indian Institute of Technology. 2003, **51**(8), 2417-2426. [cit. 2022-29-11]. ISSN 1359-6454. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645403000545>.
- [31] ELUC. Měření tvrdosti. Elektronická učebnice. [online]. [cit. 2023-18-3]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1569>
- [32] Měření hustoty. [online]. Plzeň: Západočeská univerzita, Fakulta aplikovaných věd [cit. 2023-29-03]. Dostupné z: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjdiYagsoHAhWJRfEDHXpJDPkQFnoECCgQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.kfy.zcu.cz%2Frest%2Fcmis%2Fdocument%2Fworkspace%3A%2F%2FspacesStore%2F2c927e564e5649649f7591102894aee2%3B1.0%2Fcontent&usg=AOvVaw1GzeuoyiqM7yqtT9Feykls>
- [33] LUCENA, M. et al. Variación de las constantes elastomecánicas del aluminio puro deformado en frío por estirado. Revista De Metalurgia. [online]. Barcelona: Dpt. d'Enginyeria Química i Metalúrgia, Facultat de Química, Martí i Franqués. 1998, **34** (Extra), 310–313. [cit 2023-09-05]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3989/revmetalm.1998.v34.iExtra.760>

## **PŘÍLOHA č. 1**

# I. VÝSLEDKY MĚŘENÍ RYCHLOSTI ULTRAZVUKOVÁCH VLN PRO MATERIÁL C45 – ČSN 12 050

Tab.: Podmínky měření C45 – ČSN 12 050

<b>Odrázová metoda P/E – Podélné</b>	
Měřeno sondou	4 MHz
Napájení sondy	200 V
Tlumení	400 $\Omega$
Rozsah tlumení signálu	1,5 – 8,5 MHz
<b>Odrázová metoda P/E – Příčné</b>	
Měřeno sondou	5 MHz
Energie	200 V
Tlumení	400 $\Omega$
Rozsah tlumení signálu	1,5 – 8,5 MHz
<b>Odrázová metoda P/E – Podélné</b>	
Frekvence	2,25 MHz
Napájení sondy	200 V
Tlumení	400 $\Omega$
Rozsah tlumení signálu	1,5 – 8,5 MHz
<b>Odrázová metoda P/E – Příčné</b>	
Frekvence	1 MHz
Napájení sondy	200 V
Tlumení	400 $\Omega$
Rozsah tlumení signálu	0,5 – 4 MHz

Tab.: Výsledky měření: vzorek C1

C45 – ČSN 12 050 – vzorek C1						
ECHO	Podélné vlny – 4 MHz			Příčné vlny – 5 MHz		
	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>L</sub> [μs]	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>T</sub> [μs]
1. echo – 2. echo	3,37	3,37	1,69	6,24	6,24	3,12
1. echo – 3. echo	6,92	6,92	1,73	12,38	12,39	3,10
1. echo – 4. echo	10,46	10,43	1,74	18,5	18,48	3,08
2. echo – 3. echo	3,54	3,54	1,77	6,13	6,14	3,07
2. echo – 4. echo	6,92	6,92	1,73	12,26	12,25	3,06
3. echo – 4. echo	3,38	3,39	1,69	6,12	6,12	3,06
ECHO	Podélné vlny – 2,25 MHz			Příčné vlny – 1HMz		
	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>L</sub> [μs]	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>T</sub> [μs]
1. echo – 2. echo	3,38	3,39	1,69	6,13	6,13	3,07
1. echo – 3. echo	6,76	6,78	1,69	12,77	12,75	3,19
1. echo – 4. echo	10,15	10,16	1,69	19,31	19,3	3,22
2. echo – 3. echo	3,39	3,39	1,70	6,63	6,64	3,32
2. echo – 4. echo	6,74	6,77	1,69	13,2	13,2	3,30
3. echo – 4. echo	3,37	3,39	1,69	6,56	6,55	3,28
Průměrné hodnoty		t <sub>L</sub> [μs]	1,71 ±0,03		t <sub>T</sub> [μs]	3,15 ±0,10

Tab.: Výsledky měření: vzorek C2

C45 – ČSN 12 050 – vzorek C2						
ECHO	Podélné vlny – 4 MHz			Příčné vlny – 5 MHz		
	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>L</sub> [μs]	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>T</sub> [μs]
1. echo – 2. echo	3,15	3,15	1,58	5,90	5,90	2,95
1. echo – 3. echo	6,29	6,29	1,57	11,70	11,71	2,93
1. echo – 4. echo	9,44	9,44	1,57	17,50	17,52	2,92
2. echo – 3. echo	3,15	3,15	1,58	5,79	5,79	2,90
2. echo – 4. echo	6,41	6,41	1,60	11,60	11,58	2,90
3. echo – 4. echo	3,27	3,26	1,63	5,79	5,80	2,90
ECHO	Podélné vlny – 2,25 MHz			Příčné vlny – 1HMz		
	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>L</sub> [μs]	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>T</sub> [μs]
1. echo – 2. echo	3,14	3,13	1,57	5,7	5,71	2,85
1. echo – 3. echo	6,28	6,29	1,57	11,95	11,96	2,99
1. echo – 4. echo	9,44	9,44	1,57	17,7	17,7	2,95
2. echo – 3. echo	3,15	3,16	1,58	6,24	6,25	3,12
2. echo – 4. echo	6,30	6,30	1,58	11,97	11,98	2,99
3. echo – 4. echo	3,15	3,15	1,58	5,73	5,73	2,87
Průměrné hodnoty		t <sub>L</sub> [μs]	1,58 ±0,02		t <sub>T</sub> [μs]	2,94 ±0,07



Tab.: Výsledky měření: vzorek C3

C45 – ČSN 12 050 – vzorek C3						
ECHO	Podélné vlny – 4 MHz			Příčné vlny – 5 MHz		
	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>L</sub> [μs]	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>T</sub> [μs]
1. echo – 2. echo	3,22	3,21	1,61	6,11	6,12	3,06
1. echo – 3. echo	6,44	6,45	1,61	12,12	12,12	3,03
1. echo – 4. echo	9,96	9,94	1,66	18	18,01	3,00
2. echo – 3. echo	3,38	3,37	1,69	6,00	6,00	3,00
2. echo – 4. echo	6,74	6,72	1,68	12,01	12	3,00
3. echo – 4. echo	3,34	3,33	1,67	6,00	6,00	3,00
ECHO	Podélné vlny – 2,25 MHz			Příčné vlny – 1HMz		
	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>L</sub> [μs]	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>T</sub> [μs]
1. echo – 2. echo	3,27	3,27	1,64	6,02	6,02	3,01
1. echo – 3. echo	6,54	6,55	1,64	11,95	11,97	2,99
1. echo – 4. echo	9,81	9,81	1,64	17,96	17,95	2,99
2. echo – 3. echo	3,27	3,27	1,64	5,94	5,93	2,97
2. echo – 4. echo	6,54	6,55	1,64	11,95	11,95	2,99
3. echo – 4. echo	3,28	3,27	1,64	5,99	6,00	3,00
Průměrné hodnoty		t <sub>L</sub> [μs]	1,64 ±0,02		t <sub>T</sub> [μs]	3,00 ± 0,02

Tab.: Výsledky měření: vzorek C4

C45 – ČSN 12 050 – vzorek ve vyžíhaném stavu C4						
ECHO	Podélné vlny – 4 MHz			Příčné vlny – 5 MHz		
	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>L</sub> [μs]	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>T</sub> [μs]
1. echo – 2. echo	3,43	3,43	1,72	6,16	6,15	3,08
1. echo – 3. echo	6,72	6,73	1,68	12,2	12,19	3,05
1. echo – 4. echo	10,01	10,02	1,67	18,06	18,06	3,01
2. echo – 3. echo	3,29	3,3	1,65	6,03	6,04	3,02
2. echo – 4. echo	6,58	6,6	1,65	11,88	11,9	2,97
3. echo – 4. echo	3,29	3,3	1,65	5,84	5,84	2,92
ECHO	Podélné vlny – 2,25 MHz			Příčné vlny – 1HMz		
	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>L</sub> [μs]	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>T</sub> [μs]
1. echo – 2. echo	3,29	3,29	1,65	6,01	5,99	3,00
1. echo – 3. echo	6,57	6,59	1,65	11,98	11,98	3,00
1. echo – 4. echo	9,87	9,88	1,65	17,97	17,97	3,00
2. echo – 3. echo	3,29	3,3	1,65	5,97	5,97	2,99
2. echo – 4. echo	6,58	6,59	1,65	11,98	11,99	3,00
3. echo – 4. echo	3,29	3,3	1,65	6,01	6,02	3,01
Průměrné hodnoty		t <sub>L</sub> [μs]	1,66 ±0,02		t <sub>T</sub> [μs]	3,00 ±0,04

Tab.: Výsledky měření: vzorek C5

C45 – ČSN 12 050 – vzorek ve výchozím stavu C5						
ECHO	Podélné vlny – 4 MHz			Příčné vlny – 5 MHz		
	$t_1$ [μs]	$t_2$ [μs]	$t_L$ [μs]	$t_1$ [μs]	$t_2$ [μs]	$t_T$ [μs]
1. echo – 2. echo	2,45	2,45	1,23	4,32	4,34	2,17
1. echo – 3. echo	4,77	4,78	1,19	8,73	8,73	2,18
1. echo – 4. echo	7,1	7,1	1,18	13,05	13,04	2,17
2. echo – 3. echo	2,33	2,33	1,17	4,41	4,4	2,20
2. echo – 4. echo	4,65	4,66	1,16	8,73	8,73	2,18
3. echo – 4. echo	2,33	2,32	1,16	4,31	4,32	2,16
ECHO	Podélné vlny – 2,25 MHz			Příčné vlny – 1MHz		
	$t_1$ [μs]	$t_2$ [μs]	$t_L$ [μs]	$t_1$ [μs]	$t_2$ [μs]	$t_T$ [μs]
1. echo – 2. echo	2,32	2,33	1,16	4,29	4,27	2,14
1. echo – 3. echo	4,63	4,65	1,16	8,55	8,54	2,14
1. echo – 4. echo	6,97	6,95	1,16	12,81	12,81	2,14
2. echo – 3. echo	2,31	2,32	1,16	4,26	4,28	2,14
2. echo – 4. echo	4,63	4,63	1,16	8,54	8,54	2,14
3. echo – 4. echo	2,33	2,22	1,14	4,27	4,26	2,13
Průměrné hodnoty		$t_L$ [μs]	1,17 ±0,02		$t_T$ [μs]	2,16 ±0,02

## II. VÝSLEDKY MĚŘENÍ RYCHLOSTI ULTRAZVUKOVÁCH VLN PRO MATERIÁL S235 – ČSN 11 373

Tab.: Podmínky měření S235 – ČSN 11 373

<b>Odrazová metoda P/E – Podélné</b>	
Měřeno sondou	10 MHz
Napájení sondy	200 V
Tlumení	400 $\Omega$
Rozsah tlumení signálu	5–15 MHz
<b>Odrazová metoda P/E – Příčné</b>	
Měřeno sondou	5 MHz
Napájení sondy	200 V
Tlumení	400 $\Omega$
Rozsah tlumení signálu	5–15 MHz
<b>Odrazová metoda P/E – Podélné</b>	
Měřeno sondou	2,25 MHz
Napájení sondy	200 V
Tlumení	400 $\Omega$
Rozsah tlumení signálu	1,5 – 8,5 MHz
<b>Odrazová metoda P/E – Příčné</b>	
Měřeno sondou	1 MHz
Napájení sondy	200
Tlumení	400 $\Omega$
Rozsah tlumení signálu	0,5-5 MHz

Tab.: Výsledky měření: vzorek S1

S235 – ČSN 11 373 – vzorek S1						
ECHO	Podélné vlny – 4 MHz			Příčné vlny – 5 MHz		
	$t_1$ [μs]	$t_2$ [μs]	$t_L$ [μs]	$t_1$ [μs]	$t_2$ [μs]	$t_T$ [μs]
1. echo – 2. echo	-	-	-	11,63	11,65	5,82
1. echo – 3. echo	-	-	-	23,50	23,50	5,88
1. echo – 4. echo	-	-	-	35,12	35,11	5,85
2. echo – 3. echo	-	-	-	11,82	11,80	5,91
2. echo – 4. echo	-	-	-	23,47	23,50	5,87
3. echo – 4. echo	-	-	-	11,66	11,68	5,84
ECHO	Podélné vlny – 2,25 MHz			Příčné vlny – 1MHz		
	$t_1$ [μs]	$t_2$ [μs]	$t_L$ [μs]	$t_1$ [μs]	$t_2$ [μs]	$t_T$ [μs]
1. echo – 2. echo	3,65	3,64	1,82	-	-	-
1. echo – 3. echo	7,29	7,28	1,82	-	-	-
1. echo – 4. echo	10,95	10,96	1,83	-	-	-
2. echo – 3. echo	3,64	3,64	1,82	-	-	-
2. echo – 4. echo	7,32	7,31	1,83	-	-	-
3. echo – 4. echo	3,66	3,65	1,83	-	-	-
Průměrné hodnoty		$t_L$ [μs]	1,82 ±0,00		$t_T$ [μs]	5,86 ±0,03

Tab.: Výsledky měření: vzorek S2

S235 – ČSN 11 373– vzorek S2						
ECHO	Podélné vlny – 4 MHz			Příčné vlny – 5 MHz		
	$t_1$ [μs]	$t_2$ [μs]	$t_L$ [μs]	$t_1$ [μs]	$t_2$ [μs]	$t_T$ [μs]
1. echo – 2. echo	4,00	3,97	1,99	12,18	12,17	6,09
1. echo – 3. echo	7,90	7,91	1,98	24,51	24,53	6,13
1. echo – 4. echo	11,98	12,00	2,00	36,54	36,57	6,09
2. echo – 3. echo	4,02	4,01	2,01	12,18	12,17	6,09
2. echo – 4. echo	8,01	8,04	2,01	24,20	24,19	6,05
3. echo – 4. echo	3,80	3,82	1,91	12,03	12,03	6,02
ECHO	Podélné vlny – 2,25 MHz			Příčné vlny – 1MHz		
	$t_1$ [μs]	$t_2$ [μs]	$t_L$ [μs]	$t_1$ [μs]	$t_2$ [μs]	$t_T$ [μs]
1. echo – 2. echo	3,98	3,99	1,99	-	-	-
1. echo – 3. echo	7,97	7,97	1,99	-	-	-
1. echo – 4. echo	11,94	11,96	1,99	-	-	-
2. echo – 3. echo	3,98	3,98	1,99	-	-	-
2. echo – 4. echo	7,96	7,97	1,99	-	-	-
3. echo – 4. echo	3,98	3,99	1,99	-	-	-
Průměrné hodnoty		$t_L$ [μs]	1,99 ±0,03		$t_T$ [μs]	6,08 ±0,04

Tab.: Výsledky měření: vzorek S3

S235 – ČSN 11 373 – vzorek S3						
ECHO	Podélné vlny – 4 MHz			Příčné vlny – 5 MHz		
	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>L</sub> [μs]	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>T</sub> [μs]
1. echo – 2. echo	3,15	3,14	1,57	9,37	9,41	4,70
1. echo – 3. echo	6,30	6,30	1,58	18,59	18,63	4,65
1. echo – 4. echo	9,45	9,44	1,57	27,77	27,79	4,63
2. echo – 3. echo	3,15	3,15	1,58	9,20	9,19	4,60
2. echo – 4. echo	6,30	6,31	1,58	18,40	18,39	4,60
3. echo – 4. echo	3,15	3,15	1,58	9,20	9,21	4,60
ECHO	Podélné vlny – 2,25 MHz			Příčné vlny – 1MHz		
	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>L</sub> [μs]	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>T</sub> [μs]
1. echo – 2. echo	3,14	3,14	1,57	9,27	9,29	4,64
1. echo – 3. echo	6,27	6,29	1,57	18,43	18,46	4,61
1. echo – 4. echo	9,43	9,44	1,57	27,63	27,62	4,60
2. echo – 3. echo	3,13	3,14	1,57	9,17	9,18	4,59
2. echo – 4. echo	6,29	6,31	1,58	18,32	18,36	4,59
3. echo – 4. echo	3,15	3,16	1,58	9,17	9,19	4,59
Průměrné hodnoty		t <sub>L</sub> [μs]	1,57 ±0,00		t <sub>T</sub> [μs]	4,62 ±0,03

Tab.: Výsledky měření: vzorek S4

S235 – ČSN 11 373 – výchozí stav vzorek S4						
ECHO	Podélné vlny – 4 MHz			Příčné vlny – 5 MHz		
	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>L</sub> [μs]	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>T</sub> [μs]
1. echo – 2. echo	3,38	3,36	1,69	9,51	9,51	4,76
1. echo – 3. echo	6,64	6,63	1,66	19,18	19,19	4,80
1. echo – 4. echo	9,91	9,90	1,65	28,70	28,71	4,78
2. echo – 3. echo	3,27	3,27	1,64	9,51	9,51	4,76
2. echo – 4. echo	6,54	6,54	1,64	19,02	18,98	4,75
3. echo – 4. echo	3,27	3,26	1,63	9,50	9,51	4,75
ECHO	Podélné vlny – 2,25 MHz			Příčné vlny – 1MHz		
	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>L</sub> [μs]	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>T</sub> [μs]
1. echo – 2. echo	3,26	3,26	1,63	9,81	9,82	4,91
1. echo – 3. echo	6,53	6,54	1,63	19,3	19,31	4,83
1. echo – 4. echo	9,8	9,8	1,63	28,81	28,83	4,80
2. echo – 3. echo	3,27	3,28	1,64	9,49	9,47	4,74
2. echo – 4. echo	6,54	6,55	1,64	19,01	19,03	4,76
3. echo – 4. echo	3,27	3,27	1,64	9,51	9,5	4,75
Průměrné hodnoty		t <sub>L</sub> [μs]	1,64 ±0,01		t <sub>T</sub> [μs]	4,78 ±0,06

### III. VÝSLEDKY MĚŘENÍ RYCHLOSTI ULTRAZVUKOVÁCH VLN PRO MATERIÁL EN AW 1050 T1

Tab.: Podmínky měření EN AW 1050 T1

<b>Odrazová metoda P/E – Podélné</b>	
Frekvence	10 MHz
Napájení sondy	200 V
Tlumení	400 $\Omega$
Rozsah tlumení signálu	5-15 MHz
<b>Odrazová metoda P/E – Příčné</b>	
Frekvence	5 MHz
Napájení sondy	200 V
Tlumení	400 $\Omega$
Rozsah tlumení signálu	1,5 – 8,5 MHz
<b>Odrazová metoda P/E –Podélné</b>	
Frekvence	2,25 MHz
Napájení sondy	200 V
Tlumení	400 $\Omega$
Rozsah tlumení signálu	1,5 – 8,5 MHz
<b>Odrazová metoda P/E – Příčné</b>	
Frekvence	1 MHz
Napájení sondy	200 V
Tlumení	400 $\Omega$
Rozsah tlumení signálu	0,5 – 4 MHz

Tab.: Výsledky měření: vzorek H1

EN AW 1050 T1 – vzorek H1						
ECHO	Podélné vlny – 10 MHz			Příčné vlny – 5 MHz		
	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>L</sub> [μs]	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>T</sub> [μs]
1. echo – 2. echo	4,99	5,02	2,50	10,38	10,42	5,20
1. echo – 3. echo	9,97	10,02	2,50	20,53	20,53	5,13
1. echo – 4. echo	14,92	14,92	2,49	30,83	30,85	5,14
2. echo – 3. echo	4,96	4,96	2,48	10,26	10,27	5,13
2. echo – 4. echo	9,84	9,95	2,47	20,47	20,41	5,11
3. echo – 4. echo	4,92	4,99	2,48	10,36	10,37	5,18
ECHO	Podélné vlny – 2,25 MHz			Příčné vlny – 1MHz		
	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>L</sub> [μs]	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>T</sub> [μs]
1. echo – 2. echo	4,96	4,95	2,48	10,58	10,57	5,29
1. echo – 3. echo	9,92	9,92	2,48	20,61	20,62	5,15
1. echo – 4. echo	14,13	14,13	2,36	31,71	31,71	5,29
2. echo – 3. echo	4,96	4,96	2,48	10,56	10,56	5,28
2. echo – 4. echo	9,17	9,17	2,29	21,13	21,15	5,29
3. echo – 4. echo	4,20	4,20	2,10	10,60	10,60	5,30
Průměrné hodnoty			t <sub>L</sub> [μs]	2,43 ±0,16	t <sub>T</sub> [μs]	5,21 ±0,07

Tab.: Výsledky měření: vzorek H2

EN AW 1050 T1 – vzorek H2						
ECHO	Podélné vlny - 10 MHz			Příčné vlny - 5 MHz		
	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>L</sub> [μs]	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>T</sub> [μs]
1. echo - 2. echo	5,21	5,21	2,61	10,81	10,81	5,41
1. echo - 3. echo	10,44	10,43	2,61	21,63	21,64	5,41
1. echo - 4. echo	15,65	15,65	2,61	32,45	32,41	5,41
2. echo - 3. echo	5,17	5,22	2,60	10,90	10,89	5,45
2. echo - 4. echo	10,39	10,44	2,60	21,81	21,81	5,45
3. echo - 4. echo	5,21	5,22	2,61	10,91	10,91	5,46
ECHO	Podélné vlny - 2,25 MHz			Příčné vlny – 1MHz		
	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>L</sub> [μs]	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>T</sub> [μs]
1. echo - 2. echo	5,20	5,20	2,60	11,11	11,11	5,56
1. echo - 3. echo	10,40	10,41	2,60	21,67	21,65	5,42
1. echo - 4. echo	16,23	16,20	2,70	33,44	33,45	5,57
2. echo - 3. echo	5,21	5,21	2,61	10,54	10,55	5,27
2. echo - 4. echo	10,84	10,87	2,71	22,33	22,35	5,59
3. echo - 4. echo	5,64	5,60	2,81	11,75	11,73	5,87
Průměrné hodnoty			t <sub>L</sub> [μs]	2,64 ±0,06	t <sub>T</sub> [μs]	5,49 ±0,14

Tab.: Výsledky měření: vzorek H3

EN AW 1050 T1 – vzorek H3						
ECHO	Podélné vlny - 10 MHz			Příčné vlny - 5 MHz		
	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>L</sub> [μs]	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>T</sub> [μs]
1. echo - 2. echo	4,71	4,71	2,36	9,54	9,68	4,81
1. echo - 3. echo	9,38	9,43	2,35	19,21	19,18	4,80
1. echo - 4. echo	14,08	14,14	2,35	19,42	29,25	4,06
2. echo - 3. echo	4,71	4,70	2,35	7,74	9,76	4,38
2. echo - 4. echo	9,41	9,42	2,35	19,33	19,30	4,83
3. echo - 4. echo	4,71	4,72	2,36	9,59	9,57	4,79
ECHO	Podélné vlny - 2,25 MHz			Příčné vlny – 1MHz		
	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>L</sub> [μs]	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>T</sub> [μs]
1. echo - 2. echo	4,70	4,71	2,35	10,14	10,13	5,07
1. echo - 3. echo	9,43	9,44	2,36	19,38	19,37	4,84
1. echo - 4. echo	14,34	14,36	2,39	29,90	29,90	4,98
2. echo - 3. echo	4,73	4,72	2,36	9,65	9,65	4,83
2. echo - 4. echo	9,64	9,65	2,41	19,82	19,83	4,96
3. echo - 4. echo	4,92	4,91	2,46	10,90	10,91	5,45
Průměrné hodnoty			t <sub>L</sub> [μs]	2,37 ± 0,03	t <sub>T</sub> [μs]	4,82 ± 0,14

Tab.: Výsledky měření: vzorek H4

EN AW 1050 T1 – vzorek H4						
ECHO	Podélné vlny - 10 MHz			Příčné vlny - 5 MHz		
	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>L</sub> [μs]	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>T</sub> [μs]
1. echo - 2. echo	4,11	4,12	2,06	8,33	8,32	4,16
1. echo - 3. echo	8,19	8,24	2,05	16,66	16,66	4,17
1. echo - 4. echo	12,36	12,36	2,06	25,20	25,21	4,20
2. echo - 3. echo	4,08	4,12	2,05	8,45	8,44	4,22
2. echo - 4. echo	8,24	8,24	2,06	16,87	16,86	4,22
3. echo - 4. echo	4,11	4,12	2,06	8,55	8,50	4,26
ECHO	Podélné vlny - 2,25 MHz			Příčné vlny – 1MHz		
	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>L</sub> [μs]	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>T</sub> [μs]
1. echo - 2. echo	4,10	4,11	2,05	8,80	8,81	4,40
1. echo - 3. echo	8,22	8,21	2,05	17,06	17,06	4,27
1. echo - 4. echo	12,41	12,44	2,07	24,86	24,88	4,15
2. echo - 3. echo	4,10	4,10	2,05	8,27	8,24	4,13
2. echo - 4. echo	8,31	8,33	2,08	16,06	16,04	4,01
3. echo - 4. echo	4,21	4,22	2,11	7,80	7,85	3,91
Průměrné hodnoty			t <sub>L</sub> [μs]	2,06 ± 0,02	t <sub>T</sub> [μs]	4,17 ± 0,12



Tab.: Výsledky měření: vzorek H5

EN AW 1050 T1 – vzorek H5						
ECHO	Podélné vlny - 10 MHz			Příčné vlny - 5 MHz		
	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>L</sub> [μs]	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>T</sub> [μs]
1. echo - 2. echo	4,83	4,88	2,43	9,90	9,90	4,95
1. echo - 3. echo	9,73	9,78	2,44	19,87	19,88	4,97
1. echo - 4. echo	14,71	14,68	2,45	29,76	29,77	4,96
2. echo - 3. echo	4,80	4,88	2,42	10,00	9,98	5,00
2. echo - 4. echo	9,83	9,78	2,45	19,88	19,89	4,97
3. echo - 4. echo	4,98	4,90	2,47	9,88	9,89	4,94
ECHO	Podélné vlny - 2,25 MHz			Příčné vlny – 1MHz		
	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>L</sub> [μs]	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>T</sub> [μs]
1. echo - 2. echo	4,89	4,89	2,45	9,82	9,82	4,91
1. echo - 3. echo	9,79	9,80	2,45	20,12	20,13	5,03
1. echo - 4. echo	15,08	15,09	2,51	30,02	30,00	5,00
2. echo - 3. echo	4,90	4,91	2,45	10,29	10,30	5,15
2. echo - 4. echo	10,19	10,20	2,55	20,17	20,17	5,04
3. echo - 4. echo	4,83	4,85	2,42	9,90	9,90	4,95
Průměrné hodnoty			t <sub>L</sub> [μs]		t <sub>T</sub> [μs]	4,99 ±0,06

Tab.: Výsledky měření: vzorek H6

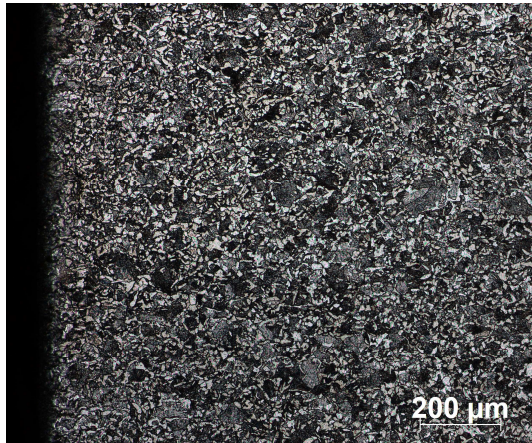
EN AW 1050 T1 – nedeformovaný vzorek H6						
ECHO	Podélné vlny - 10 MHz			Příčné vlny		
	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>L</sub> [μs]	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>T</sub> [μs]
1. echo - 2. echo	4,17	4,17	2,09	8,50	8,50	4,25
1. echo - 3. echo	8,34	8,35	2,09	17,02	17,02	4,26
1. echo - 4. echo	12,49	12,49	2,08	25,51	25,54	4,25
2. echo - 3. echo	4,17	4,17	2,09	8,50	8,51	4,25
2. echo - 4. echo	8,32	8,33	2,08	17,02	17,00	4,25
3. echo - 4. echo	4,15	4,15	2,08	8,52	8,50	4,26
ECHO	Podélné vlny - 2,25 MHz			Příčné vlny – 1MHz		
	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>L</sub> [μs]	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>T</sub> [μs]
1. echo - 2. echo	4,19	4,20	2,10	8,43	8,41	4,21
1. echo - 3. echo	8,55	8,54	2,14	17,35	17,35	4,34
1. echo - 4. echo	13,04	13,06	2,18	26,87	26,85	4,48
2. echo - 3. echo	4,51	4,52	2,26	8,92	8,92	4,46
2. echo - 4. echo	8,84	8,83	2,21	17,83	17,82	4,46
3. echo - 4. echo	4,33	4,32	2,16	8,91	8,91	4,46
Průměrné hodnoty			t <sub>L</sub> [μs]		t <sub>T</sub> [μs]	4,33 ±0,10

## **PŘÍLOHA č. 2**

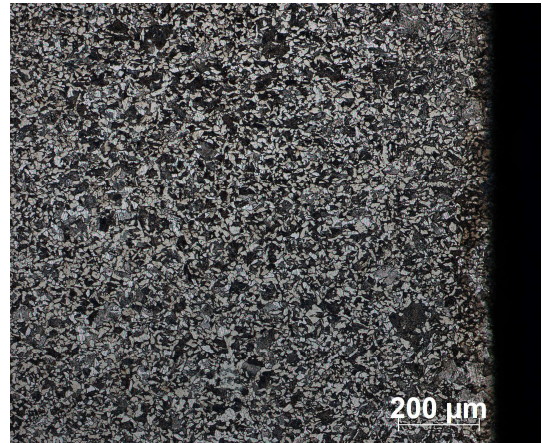
## I. Fotografie struktury vzorků z materiálu C45 – ČSN 12 050



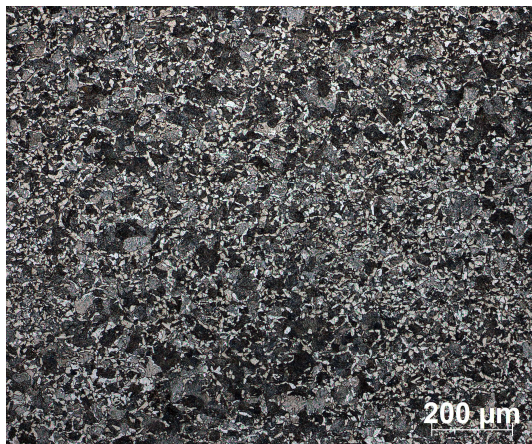
Obr. Struktura podél vzorku – C1 25x



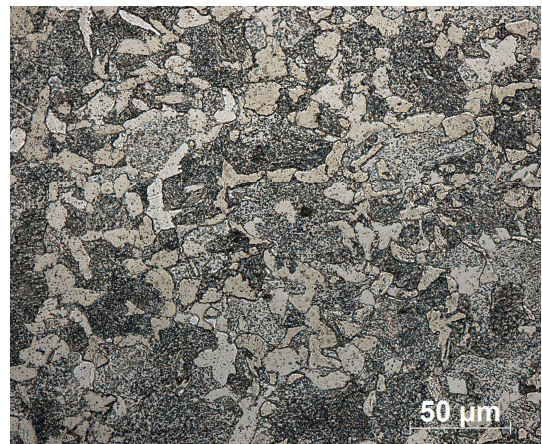
Obr.: Horní strana – C2 100x



Obr.: Dolní strana – C2 100x



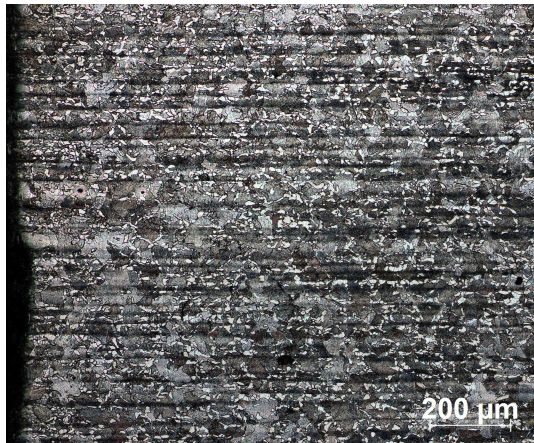
Obr.: Střed – C2 100x



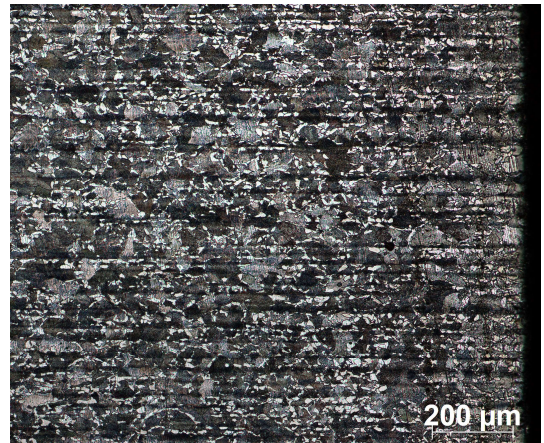
Obr.: Střed – C2 500x



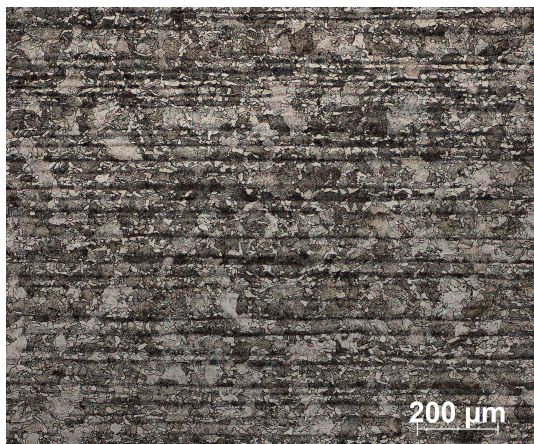
Obr.: Struktura podél vzorku – C3 25x



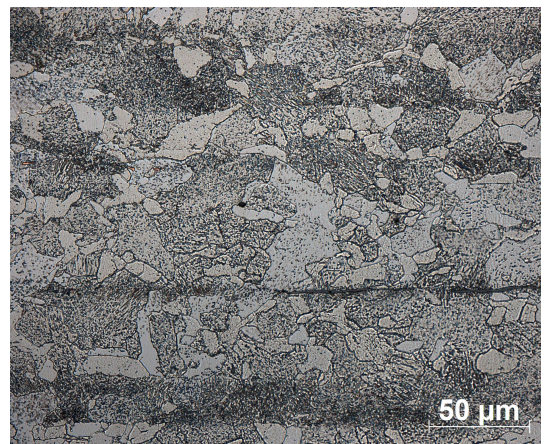
Obr.: Horní strana – C3 100x



Obr.: Dolní strana – C3 100x



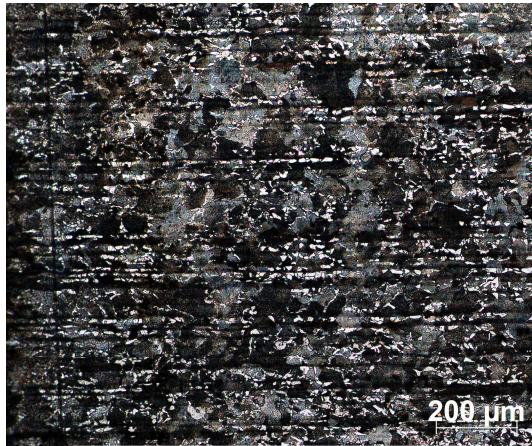
Obr.: Střed – C3 100x



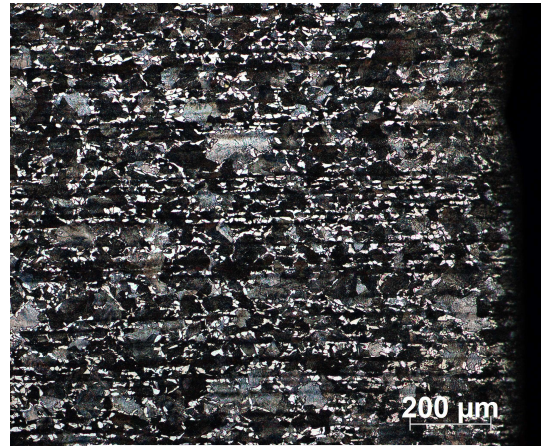
Obr.: Střed – C3 500x



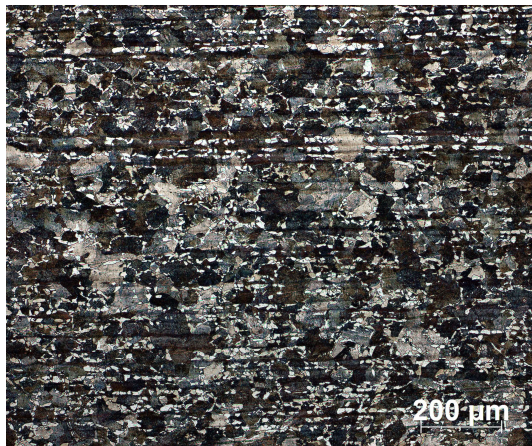
Obr.: Struktura podél vzorku – C4 25x



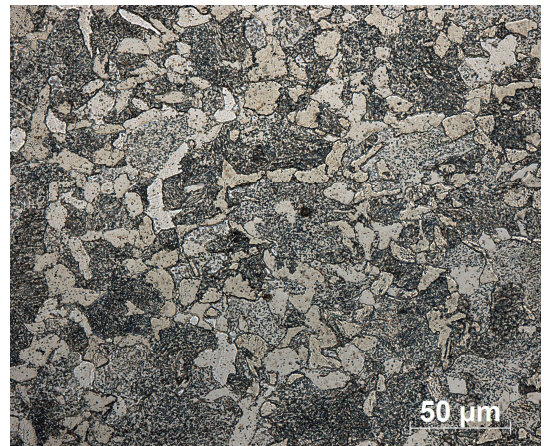
Obr.: Horní strana – C4 100x



Obr.: Dolní strana – C4 100x



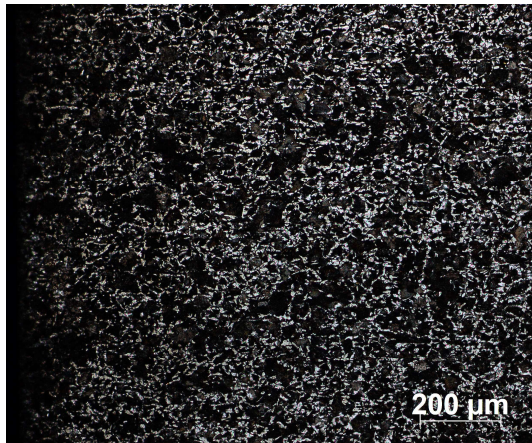
Obr.: Střed – C4 100x



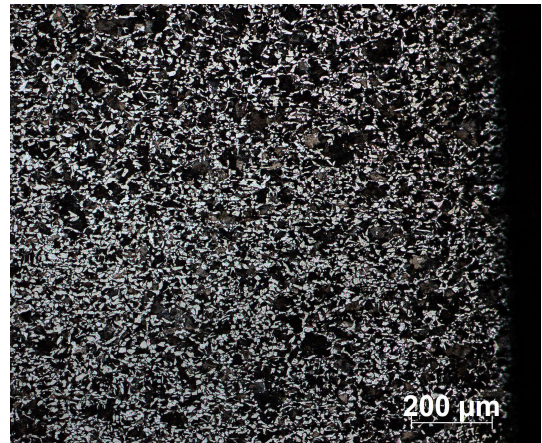
Obr.: Střed – C4 100x



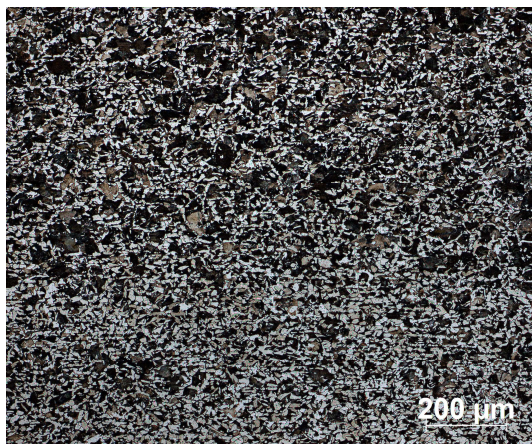
Obr.: Struktura podél vzorku – C5 25x



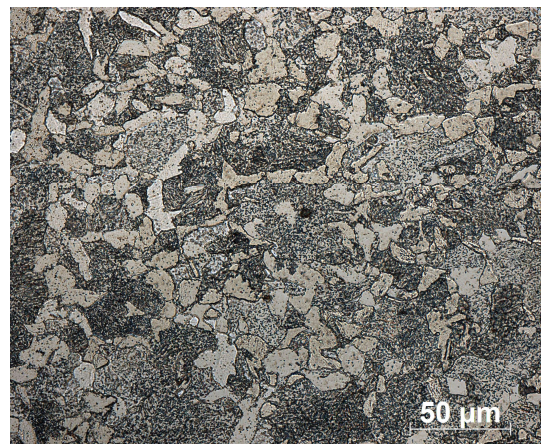
Obr.: Horní strana – C5 100x



Obr.: Dolní strana – C5 100x



Obr.: Střed – C5 100x

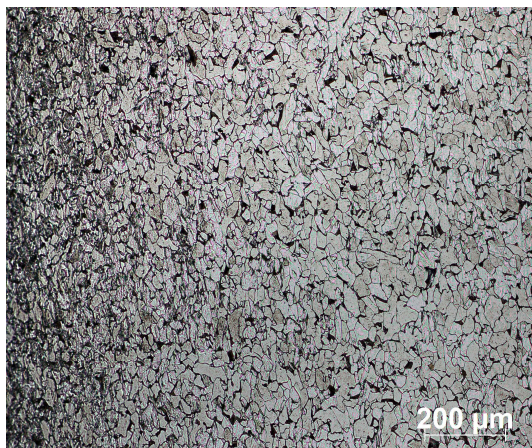


Obr.: Střed – C5 500x

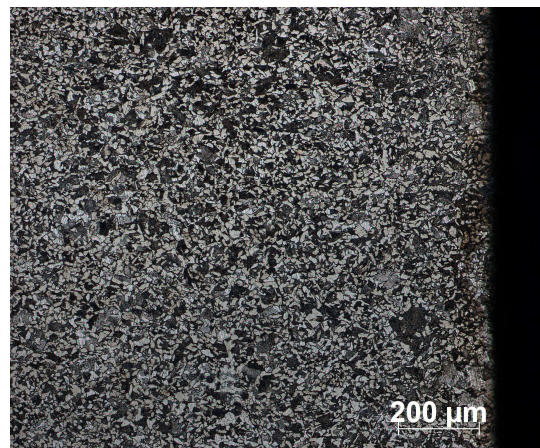
## II. Fotografie struktury vzorků z materiálu S235 – ČSN 11 373



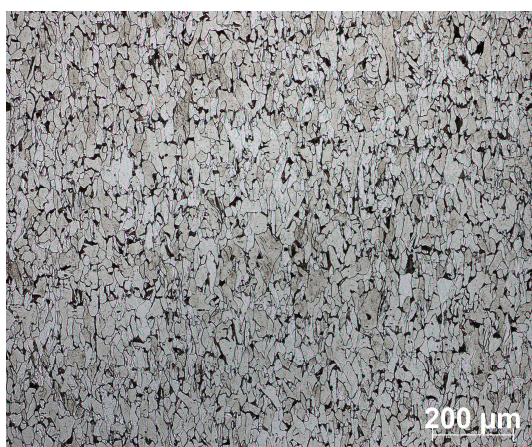
Obr.: Struktura podél vzorku – S1 25x



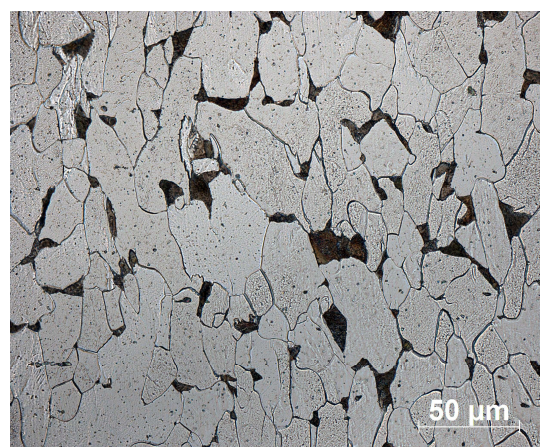
Obr.: Horní strana – S1 100x



Obr.: Dolní strana – S1 100x



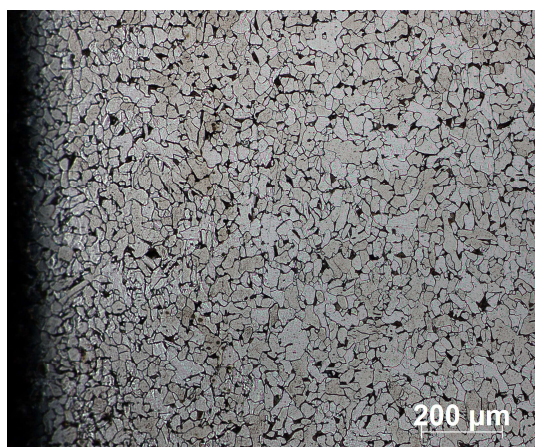
Obr.: Střed – S1 100x



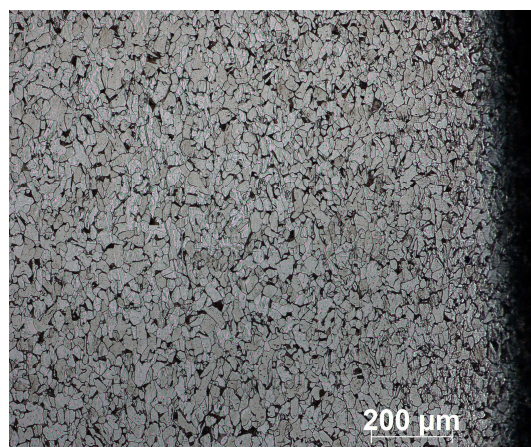
Obr.: Střed – S1 500x



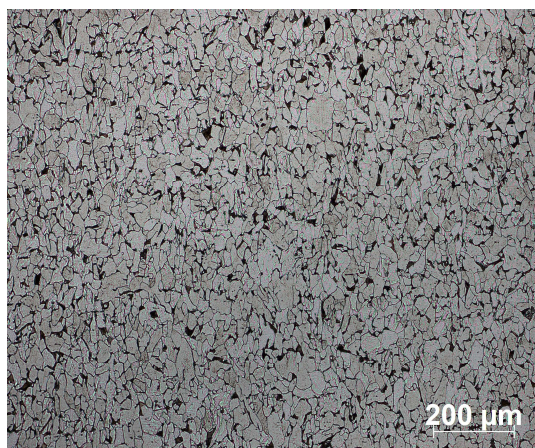
Obr.: Struktura podél vzorku – S2 25x



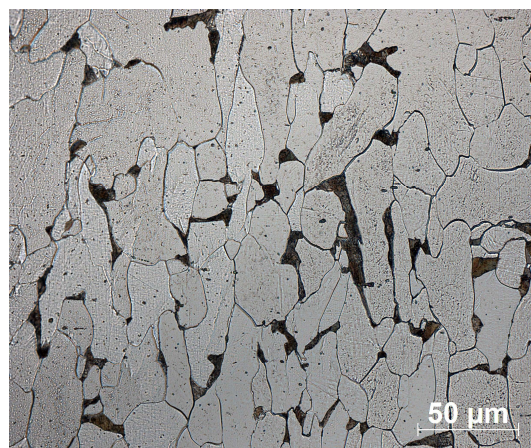
Obr.: Horní strana – S2 100x



Obr.: Dolní strana – S2 100x



Obr.: Střed – S2 100x

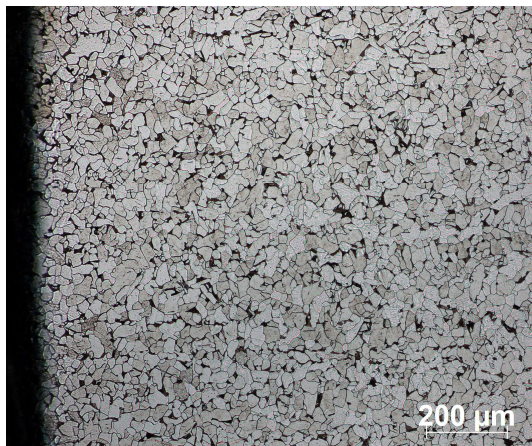


Obr.: Střed – S2 100x

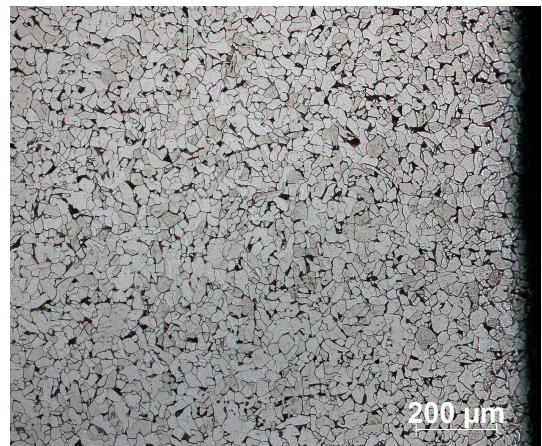




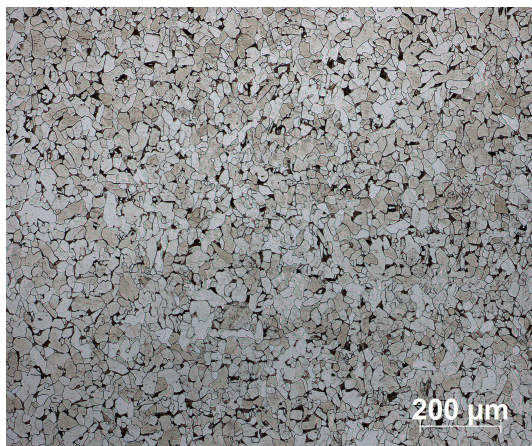
Obr.: Struktura podél vzorku – S3 25x



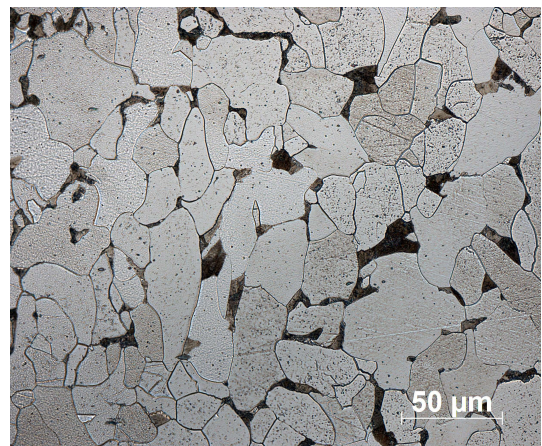
Obr.: Horní strana – S3 100x



Obr.: Dolní strana – S3 100x



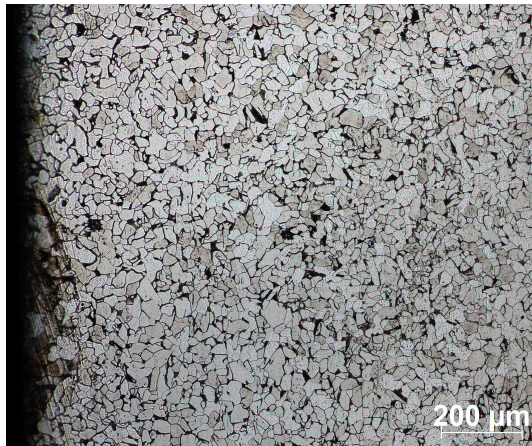
Obr.: Střed – S3 100x



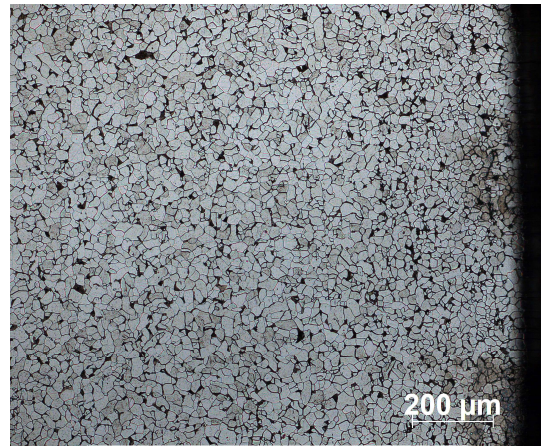
Obr.: Střed – 500x



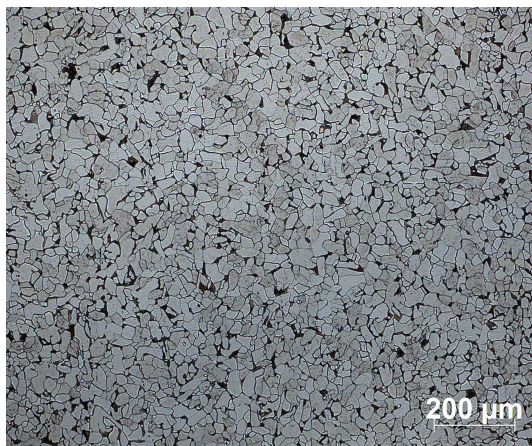
Obr.: Struktura podél vzorku – S4 25x



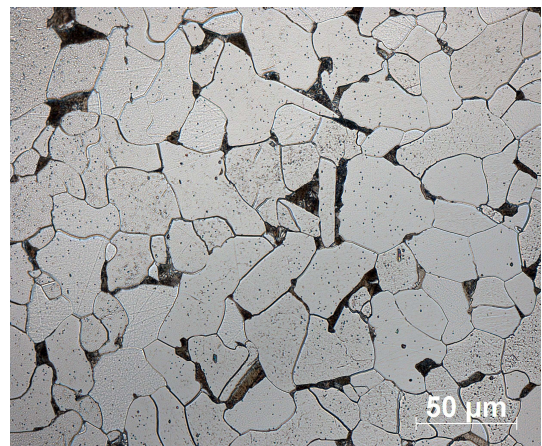
Obr.: Horní strana – S4 100x



Obr.: Dolní strana – S4 100x



Obr.: Střed – S4 100x



Obr.: Střed – S4 500x