

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B2301 Strojní inženýrství

Studijní zaměření: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Měření rychlosti šíření ultrazvuku ve vybraných materiálech v návaznosti
na ultrazvukové svařování

Autor: **Ondřej STACH**

Vedoucí práce: **Ing. Soňa Benešová, Ph.D.**

Akademický rok 2017/2018

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Autor děkuje Ing. Soně Benešové, Ph.D. a Ing. Petru Benešovi, Ph.D. za odborné vedení a užitečné rady při tvorbě této bakalářské práce.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

| | | | |
|----------------------|--|------------------------|---------------------------------|
| AUTOR | Příjmení Stach | Jméno Ondřej | |
| STUDIJNÍ OBOR | B2301 „Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“ | | |
| VEDOUcí PRÁCE | Příjmení (včetně titulů) Ing. Benešová, Ph.D. | Jméno Soňa | |
| PRACOVISŤE | ZČU - FST - KMM | | |
| DRUH PRÁCE | DIPLOMOVÁ | BAKALÁŘSKÁ | Nehodící se škrtněte |
| NÁZEV PRÁCE | Měření rychlosti šíření ultrazvuku ve vybraných materiálech v návaznosti na ultrazvukové svařování | | |

| | | | | | |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|
| FAKULTA | strojní | KATEDRA | KMM | ROK ODEVZD. | 2018 |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

| | | | | | |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|---|
| CELKEM | 46 | TEXTOVÁ ČÁST | 46 | GRAFICKÁ ČÁST | 0 |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|---|

| | |
|---|--|
| <p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p> | <p>Cílem bakalářské práce je měření rychlosti šíření ultrazvuku u komerčně používaných sonotrod a ocelových vzorků. Spolu s naměřenými hustotami těchto vzorků, lze dále určit pružnostní konstanty daných materiálů, které lze použít k simulaci chování sonotrody při ultrazvukovém svařování.</p> |
| <p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p> | <p>Ultrazvuk, rychlost ultrazvuku, ultrazvukové svařování, sonotroda, modul pružnosti</p> |

SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

| | | | |
|--------------------------|---|-----------------------|-----------------------------------|
| AUTHOR | Surname Stach | Name Ondřej | |
| FIELD OF STUDY | B2301 „Materials Engineering and Engineering Metallurgy” | | |
| SUPERVISOR | Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Benešová, Ph.D. | Name Soňa | |
| INSTITUTION | ZČU - FST - KKS | | |
| TYPE OF WORK | DIPLOMA | BACHELOR | Delete when not applicable |
| TITLE OF THE WORK | Measurement of ultrasound velocity in certain materials in relation to ultrasound welding | | |

| | | | | | |
|----------------|------------------------|-------------------|-----|---------------------|------|
| FACULTY | Mechanical Engineering | DEPARTMENT | KMM | SUBMITTED IN | 2018 |
|----------------|------------------------|-------------------|-----|---------------------|------|

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

| | | | | | |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|---|
| TOTALLY | 46 | TEXT PART | 46 | GRAPHICAL PART | 0 |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|---|

| | |
|---|--|
| BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS | The aim of the bachelor thesis is to measure the velocity of ultrasound in commercial sonotrode and steel samples. It is possible to determine the modulus of elasticity with the knowledge of ultrasound velocity and density of material. The simulation of sonotrode can be done with these values. |
| KEY WORDS | Ultrasound, velocity of ultrasound, ultrasound welding, sonotrode, modulus of elasticity. |

Obsah

| | |
|---|----|
| 1 Úvod | 3 |
| 2 Ultrazvuk, princip šíření ultrazvuku v pevných látkách..... | 3 |
| 2.1 Vznik a druhy vlnění | 3 |
| 2.2 Rozdělení postupného mechanického vlnění | 3 |
| 2.3 Vlnová délka..... | 3 |
| 2.4 Rychlost vlnění | 3 |
| 2.5 Odraz vlnění | 4 |
| 2.6 Stojaté vlnění | 4 |
| 2.7 Základní vlastnosti a veličiny charakterizující zvuk | 6 |
| 2.8 Ultrazvuk | 6 |
| 3 Obecné principy šíření ultrazvuku vědecky | 7 |
| 3.1 Vlnová délka..... | 8 |
| 3.2 Akustická rychlost | 8 |
| 3.3 Akustický tlak..... | 8 |
| 3.4 Délka vln | 9 |
| 3.5 Rychlost šíření akustických vln..... | 9 |
| 3.6 Energie přenášená vlněním..... | 10 |
| 3.7 Intenzita zvuku | 11 |
| 4 Zkoušení materiálu ultrazvukem | 12 |
| 4.1 Útlum ultrazvuku v tuhých látkách | 12 |
| 4.1.1 Pohlcování | 12 |
| 4.1.2 Rozptyl | 12 |
| 4.2 Druhy rozptylů podle délky vlny..... | 14 |
| 5 Využití ultrazvuku v technologické praxi se zaměřením na svařování | 15 |
| 5.1 Princip technologie | 15 |
| 5.2 Návrh svařovací sestavy | 18 |
| 5.3 Návrh sonotrody | 19 |
| 6 Materiály sonotrod, jejich vlastnosti s ohledem na svařování..... | 22 |
| 6.1 Titanové slitiny | 22 |
| 6.1.1 Ti6Al4V | 22 |
| 6.2 Ferro – titanit WFN | 23 |
| 6.3 Dural AlCu ₄ Mg | 24 |
| 7 Rychlořezné nástrojové oceli tvářené a vyrobené metodami práškové metalurgie..... | 24 |
| 7.1 Nástrojová ocel ASP 2023..... | 24 |

| | |
|--|----|
| 7.2 Nástrojová ocel ASP 2053..... | 25 |
| 7.3 Nástrojová ocel DIN 1.3340 (M2)..... | 25 |
| 7.4 Nástrojová ocel 19 830 (DIN 1.3343) | 26 |
| 7.5 Nástrojová ocel 19 852 (DIN 1.3243) | 26 |
| 8 Experimentální část | 27 |
| 8.1 Příprava a měření vzorků..... | 27 |
| 9 Měření rychlosti ultrazvuku u ocelových vzorků | 31 |
| 10 Měření rychlosti ultrazvuku u komerčních sonotrod ve vztahu k materiálu | 35 |
| 10.1 Přehled značení komerčních sonotrod..... | 36 |
| 11 Určení modulu pružnosti z naměřených hodnot..... | 39 |
| 12 Simulace | 41 |
| 13 Závěr..... | 43 |
| 14 Zdroje | 45 |
| Zdroje obrázků..... | 47 |

1 Úvod

Ultrazvukové svařování funguje na principu přenosu energie mechanického kmitání ultrazvuku do místa svarového spoje, kde se přemění třením na energii tepelnou. Pro každý spoj je třeba navrhnout speciální nástroj – sonotrodu, která zesiluje a přenáší energii z ultrazvukového zdroje do místa, kam potřebujeme. Návrh zmíněné sonotrody zahrnuje výběr vhodného materiálu, který vlastnostmi zajistí bezpečnost a efektivnost svařovacího procesu. Jedním z parametrů materiálu, jenž je při tvorbě návrhu sonotrody rozhodující, je rychlost šíření zvuku ve směru podélném a příčném.

2 Ultrazvuk, princip šíření ultrazvuku v pevných látkách

2.1 Vznik a druhy vlnění

Vlněním se rozumí šíření vzruchu, jež založeno na různých fyzikálních podstatách. Vlněním se šíří zvuk, světlo nebo televizní signál.

Mechanické vlnění může vznikat ve všech skupenstvích - pevném, kapalném i plynném. Jedná se o šíření vzruchu v daném prostředí, které je zapříčiněno vazbami mezi částicemi daného prostředí. Kmitáním jednotlivých částic se díky zmíněným vazbám postupně šíří kmitání z jedné částice na druhou, čímž vzniká postupné mechanické vlnění. Tímto způsobem se přenáší pouze energie, nikoliv však hmota.

2.2 Rozdělení postupného mechanického vlnění

Postupné mechanické vlnění lze podle směru kmitání vůči směru šíření vlny rozdělit následovně:

- Mechanické vlnění příčné – body nebo částice kmitají kolmo na směr šíření vlnění,
- Mechanické vlnění podélné – částice kmitají ve směru šíření vlnění.

2.3 Vlnová délka

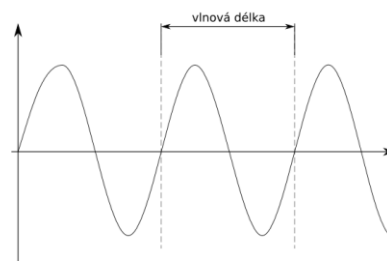
Vlnová délka λ [m] je vzdálenost dvou nejbližších bodů kmitajících se stejnou fází a zároveň vzdálenost, kterou urazí vlnění za určitou dobu, periodu T .

$$\lambda = v \cdot T = \frac{v}{f} [m] \quad (1)$$

T ...perioda

f ...frekvence kmitání zdroje vlnění

v ...fázová rychlost vlnění



Obrázek 1 Vlnová délka, dostupné z [1].

2.4 Rychlost vlnění

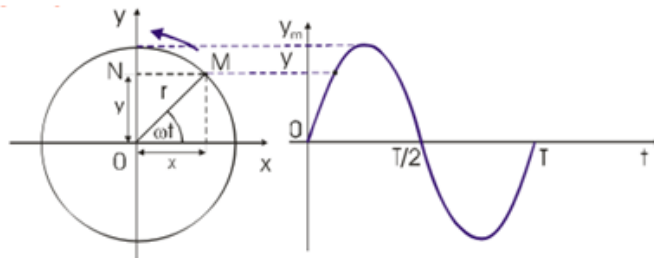
Rychlost vlnění je závislá na vlastnostech pružného prostředí, ve kterém se vlnění šíří. U vlnění příčného je rychlost ovlivněna modulem pružnosti ve smyku, u vlnění podélného modulem pružnosti v tahu.

Rovnice harmonického kmitání:

$$y = y_m \sin(\omega \cdot t) [m]. \quad (2)$$

y okamžitá výchylka
 y_m amplituda výchylky
 $\omega \cdot t$ okamžitá fáze kmitání
 ω úhlová frekvence

$$\omega = \frac{2\pi}{T} [\text{rad}/\text{s}^{-1}] \quad (3)$$



Obrázek 2 Dostupné z [1] viz příloha Zdroje obrázků.

2.5 Odraz vlnění

Dojde-li vlnění na konec prostředí, ve kterém se šíří, například vlákna, dochází k jeho odrazu. Podle uchycení konce vlákna, bývají rozlišovány dva odrazy: odraz na volném konci a odraz na pevném konci. Vlnová délka zůstává po odrazu stejná, může se však lišit fáze.

- Odraz na volném konci - vlna se odráží se stejnou fází,
- Odraz na pevném konci - vlna se odráží s fází opačnou, změněnou o hodnotu π .

2.6 Stojaté vlnění

Postupují-li dvě vlnění o stejné frekvenci a amplitudě proti sobě v opačném směru, dojde k interferenci obou vlnění a postupnému vzniku stojatého vlnění. Místa, kde se vlnění setkají se stejnou fází, kmitají s dvojnásobnou amplitudou a nazývají se kmitny. V bodech, kde se vlnění potkají s opačnou fází, je výchylka nulová. Tyto body označujeme jako uzly. Energie se stojatým vlněním nepřenáší. Pouze se při něm mění potenciální energie bodů na kinetickou a naopak. Rozlišujeme stojaté vlnění podélné a příčné. U podélného dochází k největšímu zhušťování a zředování bodů v kmitnách. Body v uzlech nekmitají. Ostatní body kmitají s různými výchylkami menšími než hodnota amplitudy, které jsou pro daný bod konstantní. Poloha kmiten a uzlů se nemění. Vzdálenost dvou sousedních kmiten/uzlů je $\lambda/2$, kde λ je vlnová délka stojatého vlnění. Vzdálenost nejbližší kmitny a uzlu je $\lambda/4$, kde λ je vlnová délka stojatého vlnění.

Tab. 1: Srovnání postupného a stojatého vlnění.

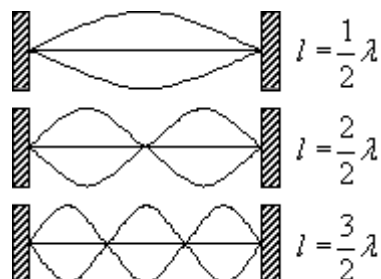
| VLASTNOSTI | POSTUPNÉ VLNĚNÍ | STOJATÉ VLNĚNÍ |
|--|-----------------|----------------|
| amplituda výchylky všech bodů do vzdálenosti $\lambda/2$ | stejná | různá |
| fáze všech bodů do vzdálenosti λ | různá | stejná |
| přenos mechanické energie | ano | ne |

Chvění struny

Chvění struny či tyče nastává v případě příčného stojatého vlnění za předpokladu, že je tyč v nějakém bodě upevněna. V tomto místě vzniká uzel. Podle způsobu upevnění tyče a jejích geometrických rozměrů mohou na tyči vznikat vlny různých vlnových délek a frekvencí.

Frekvence nejsou nahodilé, představují násobky frekvence základní. Chvění může vznikat nejen v tyčích, ale například i v deskách různých tvarů. Typickými místy vzniku chvění jsou zdroje zvuku. [2][3]

Struna upevněná na obou koncích



Obrázek 3 Dostupné z [2] viz příloha Zdroje obrázků.

Aby na struně vznikly stojaté vlny, musí být splněny následující podmínky:

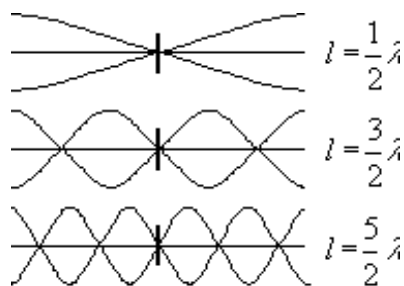
$$l = k \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (4) \quad k = 1, 2, 3, \dots;$$

$l =$ délka struny.

$$f_z(k = 1) = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{2l} \quad (5) \quad f_z = \text{základní frekvence}$$

$$f_k = k \cdot f_z \quad (6) \quad f_k = \text{vyšší harmonické frekvence při } k > 1$$

Struna upevněná ve středu



Obrázek 4 Dostupné z [2], viz příloha Zdroje obrázků.

$$l = (2k - 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (7) \quad k = 1, 2, 3, \dots;$$

$l =$ délka struny

$$f_z(k = 1) = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{2l} \quad (8) \quad f_z = \text{základní frekvence}$$

$$f_k = k \cdot f_z \quad (9) \quad f_k = \text{vyšší harmonické frekvence při } k > 1$$

2.7 Základní vlastnosti a veličiny charakterizující zvuk

Zvuk je v podstatě mechanické vlnění, jehož frekvence leží mezi 16 Hz až 16 kHz. Jako zdroj zvuku slouží chvění pružných soustav. Vlna postupuje periodickým stlačováním a rozpínáním pružného prostředí. Zvuk může být tudíž šířen pouze v pružném prostředí. Ve vzduchu se zvuk šíří jako podélné postupné vlnění.

Výška zvuku (tónu)

Je-li zvuk periodický, lze jej považovat za tón. Zvuk s harmonickým průběhem představuje tón jednoduchý, zvuky s průběhem složitějším jsou pak složené. Výška zvuku je dána jeho frekvencí.

Hlasitost zvuku

Periodickým stlačováním a rozpínáním prostředí, dochází ke změnám tlaku. Tyto změny tlaku detekuje ušní bubínek. Čím větší změny zaznamená, tím větší je hlasitost. Vnímání hlasitosti je subjektivní záležitost každého jedince.

Intenzita zvuku

Intenzitu je definována jako objektivní veličina popisující sílu zvuku. Jednotkou intenzity je Bel (B), v praxi se užívá spíše jednotka 10x menší 1 deciBel (dB). Práh bolesti je 120 dB.

$$I = \frac{W}{S} \left[B = \frac{W}{m^2} \right] \quad (10)$$

| | | |
|-----|------------------------------------|--------------------------------|
| I | $\left[B = \frac{W}{m^2} \right]$ | intenzita zvuku |
| S | $[m^2]$ | plocha, kterou vlnění prochází |
| W | $[W]$ | výkon zvukového vlnění |

Výkon zvukového vlnění je dán přenesenou energií vlněním za čas. [2]

$$W = \frac{E}{t} [w] \quad (11)$$

| | |
|-----|------------------------------------|
| E | energie přenesená zvukovým vlněním |
| T | doba přenosu zvuku |

2.8 Ultrazvuk

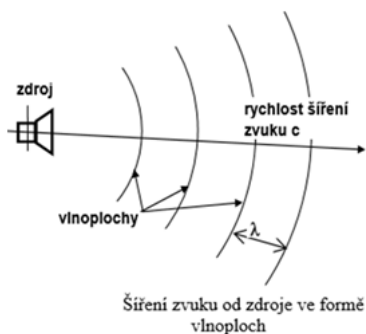
Za ultrazvuk považujeme akustické vlnění, jehož kmitočet přesahuje 16 kHz, čímž se toto vlnění stává nezaznamatelné pro lidské ucho. Jelikož je jeho vlnová délka menší než u zvuku, méně podléhá ovlivnění ohybem. Má však výrazný odraz od překážek. Navíc je méně pohlcován v kapalinách a pevných látkách. [2]

3 Obecné principy šíření ultrazvuku vědecky

Jak už bylo uvedeno, zvuk se šíří v pružném prostředí, to znamená v kapalinách, pevných látkách i plynech, přičemž se částice při šířícím vlnění pohybují (kmitají) okolo svých rovnovážných poloh. Vlnění se dělí na podélné a příčné podle směru kmitání částic, jak již bylo výše zmíněno. U podélného vlnění je směr vlnění dán směrem šíření vlnění. K příčnému vlnění, tedy kolmému na směr šíření, musíme uvést i rovinu, v které se částice pohybují. Jestliže všechny kmity spadají do jedné roviny, jedná se o vlnění příčné, lineárně polarizované.

Plyny a kapaliny jsou pružné ve smyslu objemové stlačitelnosti, proto se v nich může šířit pouze vlnění podélné. V ostatních pružných materiálech může probíhat vlnění podélné i příčné, neboť projevují elasticitu při namáhání v tahu, tlaku i smyku. Díky kombinaci uvedených namáhání se může objevit kmitání ohybové.

Zvukové vlnění prochází prostředím ve vlnoplochách směrem od zdroje zvuku. Vlnoplochami jsou myšleny body v určitém časovém okamžiku, v nichž je stejný akustický stav. Když povedeme kolmici k vlnoploše, vznikne nám přímka označená jako akustický paprsek.



Obrázek 5 Šíření zvuku od zdroje ve formě vlnoploch, dostupné z [3] viz Zdroje obrázků.

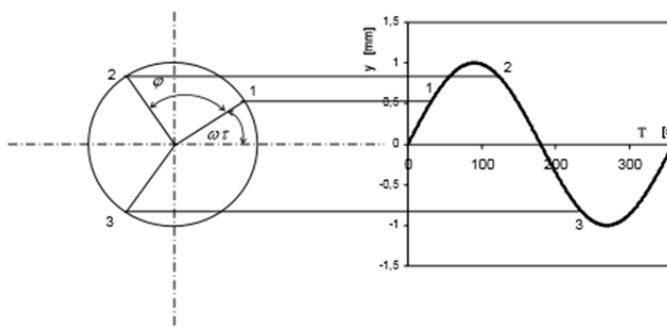
K přenosu kmitů může dojít mezi prostředím, například mezi pevnou látkou a kapalinou či plynem. Vychýlíme-li částici z rovnovážné polohy, stává se oscilátorem. V takovém případě dochází k narušení silové rovnováhy a začínají zde působit síly snažící se vrátit element zpět do rovnovážné polohy. Z toho můžeme usoudit, že za akustické generátory lze považovat jednoduché mechanické oscilátory jako je pružina, ladička nebo struna.

Rychlost, jakou se rozruch šíří, se označuje jako rychlost zvuku c [m/s], která je pro homogenní prostředí konstantou. Při stanovení výchylky v určitém bodě x , je potřeba uvažovat ve výpočtu to, že se rozruch šíří v bodové řadě konstantní rychlostí zvuku, tudíž do určeného bodu dorazí vlnění se zpožděním $\Delta\tau$ (doba za kterou děj urazí dráhu k bodu x rychlostí zvuku).

Z výše uvedeného vyplývá vztah pro výchylku kmitajícího bodu:

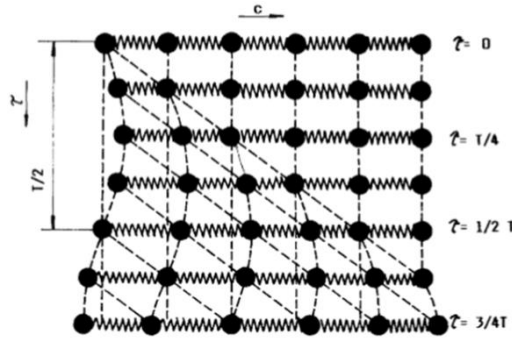
$$y = y_0 \sin \omega \left(\tau \pm \frac{x}{c} \right) [m] \quad (12),$$

| | | |
|--------|-------|------------------------|
| y_0 | [m] | amplituda výchylky, |
| τ | [s] | čas, |
| x | [m] | vzdálenost od počátku, |
| c | [m/s] | rychlost šíření zvuku. |



Obrázek 6 Akustická výchylka jako funkce vzdálenosti, dostupné z [3], viz Zdroje obrázků.

Částice pružného prostředí, ve kterém se vlnění šíří, jsou spojeny mezimolekulárními silami. Ty můžeme schematicky nahradit pružinami se stejným stlačením. Vychýlením bodu z rovnovážné polohy dojde k šíření pohybu na další body. Pohyb se šíří rychlostí zvuku, proto dojde k výchylkám bodů s různým zpožděním. Vlnění po souřadné ose je nazýváno vlněním bodovou řadou. Vlnění šířící se prostorem označujeme jako prostorové vlnění.



Obrázek 7 Šíření vzruchu mezi částicemi, dostupné z [3], viz Zdroje obrázků.

3.1 Vlnová délka

Vlnová délka λ udává vzdálenost, již je schopna vlna urazit za jednu dobu kmitu T . Určuje zároveň vzdálenost dvou bodů se stejným akustickým stavem, tedy se stejnou fází. Závislost délky vlny na frekvenci a rychlosti zvuku je dána vztahem:

$$c = \lambda f \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]} \quad (13).$$

3.2 Akustická rychlost

Vyjádřuje rychlost kmitání částic pružného prostředí, ve kterém se šíří rozruch. Parciální derivací výchylky podle času získáme akustickou rychlost $v \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$.

$$v = \frac{\partial y}{\partial \tau} = \omega y_0 \cos\left[\omega\left(\tau \pm \frac{x}{c}\right)\right] \quad (14)$$

Amplitudu akustické rychlosti získáme součinem úhlové frekvence a amplitudy výchylky. Důležité je rozlišovat akustickou rychlost (mnohem menší) od rychlosti zvuku.

$$v = \omega y_0 \quad (15)$$

3.3 Akustický tlak

Šířením vlnění dochází v bodové řadě ke shlukování a zředování kmitajících částic, čímž vznikají místa s větší či menší hustotou molekul. V těchto místech pak vznikají místa přetlaku nebo podtlaku. S tímto dějem souvisí změna celkového statického tlaku vzduchu. Změna se projeví tím, že ke střednímu barometrickému tlaku 100 000 Pa přičteme tlak akustický p . Změna je minimální, neboť akustický tlak $p \text{ [Pa]}$ je o mnoho řádu nižší. Lidé dokážou vnímat akustické tlaky od $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$. Akustický tlak je tedy závislý na změně hustoty prostředí ρ a poloze příslušného místa. Výsledný vztah (16) se rovná parciální derivaci podle polohy x .

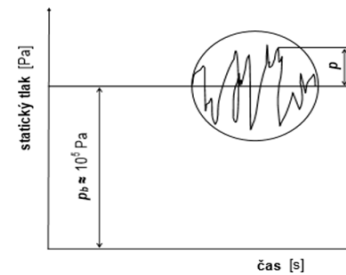
$$p = -K \frac{\partial y}{\partial x} = -y_0 K \omega \left(-\frac{1}{c}\right) \cos \omega \left(\tau \pm \frac{x}{c}\right) = y_0 K \omega \frac{1}{c} \cos \omega \left(\tau \pm \frac{x}{c}\right) \quad (16)$$

Dále ze vzorce pro rychlost šíření, který bude uveden dále (18), vyjádříme K :

$$K = c^2 \rho. \quad (17)$$

Akustický tlak pak zapíšeme:

$$p = y_0 c \rho \omega \cos \left[\omega \left(\tau \pm \frac{x}{c} \right) \right] \quad (18),$$



Obrázek 8 Statický tlak vzduchu, dostupné z [3], viz Zdroje obrázků.

kde $p_0 = y_0 c \rho \omega$ je amplituda akustického tlaku [4][5].

3.4 Délka vln

Aby mohlo vzniknout vlnění v nějakém materiálu (součásti), musí mít délku l rovnou, či větší než je polovina vlnové délky. Potom platí:

$$l \geq \frac{\lambda_L}{2} = \frac{c_L}{2f} \quad (19)$$

Z toho vyplývá, že podélné šíření vlnění v běžných materiálech je značně omezeno rozměry součástí, protože vzniká vlnění o velkých vlnových délkách. Přehled vlnových délek je uveden v tabulce níže.

Tab. 2: Přehled vlnových délek [mm] v podélných dlouhých tyčích různých materiálů při různých frekvencích.

| f [Hz] | 31,5 | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Ocel | 182 | 91 | 46 | 23 | 11,5 | 5,7 | 2,88 | 1,44 | 0,72 |
| Hliník | 152 | 76 | 38 | 19 | 9,6 | 4,8 | 2,4 | 1,2 | 0,6 |
| Olovo | 45 | 22 | 11 | 5,6 | 2,8 | 1,4 | 0,7 | 0,35 | 0,17 |
| Novodur | 27 | 13,5 | 7 | 3,4 | 1,7 | 0,85 | 0,42 | 0,21 | 0,1 |
| Silon | 40 | 20 | 10 | 5 | 2,5 | 1,25 | 0,62 | 0,31 | 0,15 |
| Plexisklo | 50 | 25 | 12,6 | 6,3 | 3,2 | 1,58 | 0,78 | 0,39 | 0,19 |
| Korek | 16 | 8 | 4 | 2 | 1 | 0,5 | 0,25 | 0,12 | 0,06 |
| Měkká pryž | 2,2 | 1,1 | 0,56 | 0,28 | 0,14 | 0,07 | 0,03 | 17 | 9 |
| Tvrdá pryž | 44 | 22 | 11 | 5,6 | 2,8 | 1,4 | 0,7 | 0,35 | 0,17 |
| Beton | 98 | 49 | 24,8 | 12,4 | 6,2 | 3,1 | 1,55 | 0,77 | 0,39 |

3.5 Rychlost šíření akustických vln

Pro pružná prostředí, to znamená plyny a kapaliny, platí při výpočtu rychlosti šíření zvukových vln c [m/s] následující vztah.

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (20)$$

K [kg/ms²] modul objemové stlačitelnosti
 ρ [kg/m³] hustota prostředí

U šíření podélných vln v tenkých tyčích vyměníme ve vztahu pro výpočet rychlosti šíření vln dynamický modul K za dynamický modul pružnosti materiálu. Vztah je přesný pro tenké tyče, ale platí s malými odchylkami i pro silnější tyče a desky.

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (21)$$

E [N/m²] dynamický modul pružnosti v tahu

Pro šíření příčných vln potom platí c_T :

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho 2(1+\mu)}} \quad (22)$$

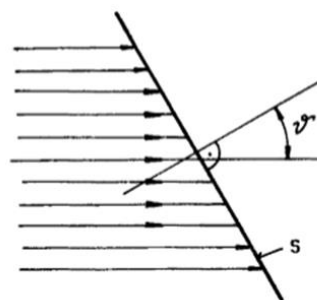
Z předchozích dvou rovnic (19) a (20) vyplývá, že rychlost šíření akustických vln vůbec nezávisí na frekvenci. Celková rychlost bude tím vyšší, čím bude hodnota dynamického modulu pružnosti větší a zároveň hustota prostředí menší.

Běžné konstrukční materiály mají Poissonovu konstantu $\mu = 0,3$. Rychlost šíření torzních (příčných) vln je zhruba 62 % rychlosti podélného šíření.

3.6 Energie přenášená vlněním

Velikost akustické energie za jednotku času je akustický výkon W [W]. Uvažujeme-li rovinnou vlnu šířící se ve vodorovném směru a k ní měřící plochu S pod úhlem ϑ podle obrázku č. 9, můžeme zavést měrný akustický výkon N [W/m²] vztahovaný k této k této ploše.

$$N = \frac{dW}{dS \cos \vartheta} \quad (23)$$



Obrázek 9 Šíření energie, dostupné z [3] viz Zdroje obrázků

Když zjednodušíme podmínky předpokladem, že ve všech bodech rovinné vlny máme stejný akustický stav, odpadne nám diferenciální tvar a můžeme akustický výkon nahradit součinem síly F a rychlosti. Sílu F dále rozepíšeme na součin akustického tlaku p a plochy S . Zvolením měřící plochy kolmé na paprsky zvuku ($\cos \vartheta = 1$) dostaneme nový vztah pro výpočet měrného akustického výkonu.

$$N = \frac{W}{s \cos \theta} = \frac{Fv}{s} = \frac{Spv}{s} = pv \quad (24)$$

Hodnota akustického tlaku je určena vztahem (18), což je parciální derivace výchylky podle x :

$$p = y_0 c \rho \omega \cos\left[\omega\left(\tau \pm \frac{x}{c}\right)\right]. \quad (25)$$

Dosazením vztahů (14) a (18) za rychlost a akustický tlak do vztahu pro měrný akustický výkon získáme:

$$N = c \rho y_0^2 \omega^2 \cos^2\left[\omega\left(\tau \pm \frac{x}{c}\right)\right]. \quad (26)$$

3.7 Intenzita zvuku

Předchozí veličina má časově neustálý průběh. Z toho důvodu se pro technickou praxi užívá veličina intenzita zvuku I [W/m^2], což je střední hodnota měrného akustického výkonu. Podobně jako v elektrotechnice se výkon vypočítává z efektivních hodnot.

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T N d\tau \quad (27)$$

T [s] ... doba integrace (u harmonických signálů rovna jedné periodě)

Intenzitu můžeme též vyjádřit:

$$I = p_{ef} v_{ef} \quad (28),$$

přičemž definujeme $p_{ef} = \frac{p_0}{\sqrt{2}}$ a $v_{ef} = \frac{v_0}{\sqrt{2}}$,

kde indexy ef značí hodnoty efektivní.

Akustickou rychlost není možno změřit spolehlivě, a proto se u rovinných vln využívá konstantního poměru Z [Ns/m^3] mezi akustickým tlakem a rychlostí.

$$Z = \frac{p}{v} = c \rho \quad (29)$$

Vyjádríme-li z předchozího vztahu rychlost v a dosadíme-li ji do vztahu (29), dostáváme vzorec, který je pro technickou akustiku velmi důležitý. Přestože je přesný pouze pro rovinnou vlnu, se zanedbatelnými odchylkami jej lze použít i pro výpočet šíření vln kulových. Od platnosti tohoto vztahu se odvíjí měření hluku a další výpočty v akustice. V praxi se běžně pracuje s efektivními hodnotami, takže se index ef nezapisuje.

$$I = \frac{p_{ef}^2}{c \rho} = \frac{p_0^2}{2 c \rho} = \frac{(y_0 c \rho \omega)^2}{2 c \rho} = y_0^2 \omega^2 \rho \sqrt{\frac{E}{\rho}} = 2 \pi^2 y_0^2 f \sqrt{E \rho} \quad [4] \quad (30)$$

4 Zkoušení materiálu ultrazvukem

4.1 Útlum ultrazvuku v tuhých látkách

Při průchodu ultrazvukové vlny určitou látkou dochází k úbytku energie vlny (útlumu) a akustického tlaku. Tyto jevy jsou způsobeny pohlcováním ultrazvuku prostředním, ve kterém se vlna šíří, a zároveň rozptylem v daném prostředí. Jelikož bývá struktura tuhých látek často nehomogenní, dostáváme činitel útlumu α jako součet:

$$\alpha = \alpha_p + \alpha_r \quad (31)$$

α_p ... útlum pohlcováním

α_r ... útlum rozptylem

Nerovnosti a drsnost povrchu tlumí povrchové vlny.

4.1.1 Pohlcování

Pohlcování je způsobeno vnitřním třením kmitajících částic a elastickou hysterezí. Mechanická energie se pohlcováním mění v energii tepelnou. Ztráty pohlcením se zvyšují společně se zvyšováním frekvence. Při stejné vlnové délce je u příčných vln útlum způsobený pohlcením menší než u vln podélných, kdy zároveň probíhá adiabatická změna objemu.

4.1.2 Rozptyl

V nehomogenních a krystalických prostředích dochází při dopadu na rozhraní různě orientovaných nehomogenit (vycezeniny, vločky, póry, zrna kovových materiálů a slinutých karbidů) k odrazu, lomu i ohybu ultrazvuku, neboť na každém rozhraní se změní akustická impedance. Z důvodu různé prostorové orientace těchto uvedených struktur se ultrazvuková vlna rozptyluje do všech směrů. Stejně jako ohyb ultrazvukových vln závisí na velikosti nehomogenit i rozptyl, který dále závisí na velikosti vlny. Energie se rozptylem nepřeměňuje na jiný druh energie, ale vytratí se do směrovaného ultrazvukového pole. Při vyšších frekvencích převažuje útlum rozptylem.

Čím větší jsou nehomogenity a anizotropie krystalů struktury, tím větší podíl má ztráta rozptylem na celkové ztrátě. Největší dopad na ztráty útlumem α je dán vztahem mezi střední velikostí nehomogenit \bar{D} a vlnovou délkou λ :

$$\alpha_r = \frac{\bar{D}}{\lambda} \quad (32)$$

- Rozptyl je většinou zapříčiněn větším úbytkem u vln příčných než u vln podélných při stejné vlnové délce, tudíž i celkový útlum příčných vln je větší než u podélných
- V polykrystalických látkách převažuje rozptyl nad pohlcováním

Útlum snižuje možnost nalezení drobných vad materiálu. Vliv útlumu lze snížit využitím nižší frekvence. Pro zkoušení materiálů s hrubou nebo nehomogenní strukturou proto volíme nižší frekvence.

Obecně lze říci, že materiály s:

- Hrubou strukturou mají vyšší útlum (beton, šedá litina, plasty);
- Střední útlum lze nalézt u jemnozrnné keramiky, mosazi, bronzu, slinutých karbidů a některých litin;
- V jemnozrnné tvářené oceli, hořčíku a hliníku bude nejnižší útlum.

Tab. 3: Útlum vln v různých materiálech.

| Prostředí | Útlum vln [db/mm] | |
|-------------------|--|--------------------------------|
| | Podélných | Příčných |
| ocel feritická | 0,01 až 0,1 | 0,02 až 0,3 |
| ocel austenitická | 0,03 až 0,4 | 0,1 až 0,5 |
| hliník | 0,001 až 0,04 | 0,003 až 0,04 |
| hořčík | $5 \cdot 10^{-4}$ až $3 \cdot 10^{-3}$ | 10^{-3} až $8 \cdot 10^{-3}$ |
| měď | 0,05 až 0,2 | - |
| tavený křemen | 0,001 | 0,002 |
| olovnaté sklo | 0,002 | 0,004 |
| okenní sklo | 0,006 | - |
| plexisklo | 0,5 | - |
| polystyren | 0,4 | - |
| voda | $5 \cdot 10^{-4}$ | - |
| glycerin | 0,1 | - |

Útlum v tvářené a lité struktuře

Na základě údajů uvedených v tabulce výše lze předpokládat velký rozdíl mezi útlumem v tvářené a lité struktuře. Tvářením zmenšujeme velikost zrna i anizotropii struktury. Póry v materiálu zmenšují svůj objem a výsledkem je snížení útlumu. Zároveň dochází ke zvětšování hustoty materiálu a modulu pružnosti, čímž se zvyšuje i rychlost šíření ultrazvuku. Tímto dostáváme nepřímou závislost mezi útlumem a rychlostí šíření ultrazvuku. Sníží-li se útlum, zvýší se nám rychlost šíření ultrazvuku.

Materiály s lící strukturou (odlitky či svary) jsou charakteristické velkým zrnem. Tím pádem u nich útlum o řád narůstá. Orientace zrn lící struktury rovněž ovlivňuje útlum.

4.2 Druhy rozptylů podle délky vlny

Rayleighův rozptyl - $\lambda \gg \bar{D}$

Pro $0,016 < \alpha = \frac{\bar{D}}{\lambda} < 0,16$ platí:

$$\alpha \approx \alpha_p \cdot f + \alpha_r \cdot f^4 \quad (33).$$

Součinitel rozptylu α_r je mnohonásobně menší oproti součiniteli pohlcování α_p a rozptyl se začíná projevovat až při vyšších frekvencích. U ocelí dochází k rozptylu při frekvenci vyšší 2 MHz. Součinitel rozptylu je přímo úměrný objemu nehomogenity:

$$\alpha_r = k \cdot \bar{D}^3 \quad (34).$$

k součinitel anizotropie

Zkoušení ultrazvukem využívá oblast Rayleighova rozptylu.

Stochastický (náhodný) rozptyl - $\lambda \approx \bar{D}$

Pro $\bar{D} < \lambda < 2\pi\bar{D}$ ($0,16 < \frac{\bar{D}}{\lambda} < 1$) platí:

$$\alpha \approx \alpha_p \cdot f + \alpha_r \cdot f^2 \quad (35).$$

Jestliže můžeme vlnovou délku λ porovnat se střední hodnotou velikosti zrna \bar{D} ve výše uvedeném intervalu, dochází v materiálu díky fázovým rozdílům drah od různě orientovaných ploch zrn k deformaci čela původně rovinné vlny. Tím je způsoben rozptyl do náhodných směrů. Ztráty jsou přímo úměrné velikosti zrna ($\alpha_r = k \cdot \bar{D}$).

Difuzní rozptyl $\lambda < \bar{D}$

V intervalu $0,1 \cdot \bar{D} < \lambda < \bar{D} \cdot (1 < \frac{D_{stř.}}{\lambda} < 10)$ při vyšších frekvencích dochází k difuznímu rozptylu. Ultrazvuk difunduje mezi jednotlivými krystaly. Útlum je maximální tehdy, když se délka vlny blíží střední velikosti zrna. Ztráty jsou nepřímo úměrné velikosti zrna.

Při $\lambda \ll \bar{D} \cdot \lambda < 0,1\bar{D}$ ($10 < \frac{\bar{D}}{\lambda}$) dochází k odrazu na hranicích každého zrna, a to zvláště v tom případě, je-li tam něco vyloučeno.

Útlum ultrazvuku v pevných látkách se zvyšuje se stoupající teplotou. U plastů je nárůst patrný již při teplotách 50 až 100 °C, u kovů nad 200 °C. [6]

5 Využití ultrazvuku v technologické praxi se zaměřením na svařování

5.1 Princip technologie

Jedná se o jednu z modifikací svařování třením, při kterém se využívá mechanického kmitání o vysokých frekvencích (tedy ultrazvuku). Dva materiály jsou k sobě přitlačeny silou. Zatímco jeden materiál je pevně ukotven, druhý je rozkmitáván frekvencí ultrazvukového měniče. Měnič je spojen s materiálem pomocí vlnovodu (booster), jehož účelem je kromě úpravy amplitudy kmitů také distribuce vlnění na sonotrodu (svařovací nástroj). Pomocí sonotrody je přenášeno kmitání do míst, kde je požadován svar. Sonotroda navíc přenáší přitlačnou sílu a tvarem ovlivňuje výslednou svařovací amplitudu. Na rozhraní spojovaných materiálů vzniká tření a relativně málo vzrůstá teplota. Probíhá plastická deformace a tlakem dojde k promísení materiálů. Plastická deformace tvoří zhruba 3 až 5 % tloušťky spoje, čímž vznikne kvalitní svar (tlakový spoj). Frekvence kmitání může být mezi 10 kHz až 100 kHz podle typu ultrazvukového zařízení.

Mechanismus vzniku spoje – elementární procesy

- Tvorba kontaktů

Atomy se přiblíží na vzdálenost, při které je možná slabá chemická interakce. Tím dochází k tvorbě van der Walsových sil.

- Aktivace dotykových povrchů

Tvoří se aktivní centra, těmi jsou strukturní povrchy (dislokace a vakance). U svařování dvou odlišných materiálů se aktivní centra vytvářejí na povrchu toho tvrdšího. Při svařování stejných materiálů aktivní centra vznikají současně.

- Objemové procesy

Objemové procesy nastávají po vytvoření aktivních center. Začíná plošná interakce spojovaných materiálů, dochází k tvorbě mikrosvarů s kovovými vazbami, relaxaci napětí, difúzi prvků a k tvorbě nových fází.

Mechanismus vzniku spoje – jeho fáze z makroskopického hlediska

- 1) Tření rozrušuje vrstvu oxidů, teplota narůstá, pokud zůstanou nějaké oxidy na povrchu, nedojde k tvorbě svaru.
- 2) Zarovnávání nerovností povrchu za stále vzrůstající teploty.
- 3) Vznik a zánik vazebných ploch mezi povrchy materiálů, teplota se ustaluje.
- 4) Vazební plocha se rozšíří na celou spojovanou plochu, dochází k vytvoření spoje díky plastické deformaci a difúzi, narůstá koncentrace vakancí a dislokací.

Svářecí režimy

Podle vlastností spojovaných materiálů se volí jeden ze dvou režimů. První se vyznačuje velkými plastickými deformacemi kovů a rychlým nárůstem teploty ve svaru. Používá se velká amplituda a malá přitlačná síla. Druhý využívá malé amplitudy a velké přitlačné síly. Spoje mají větší pevnost.

Kombinací parametrů amplitudy a přitlačné síly lze získat struktury s odlišnou plasticitou a pevností. Ultrazvukové svářečky řídí mikroprocesor s možností volby parametrů. K dispozici jsou soubory s parametry a možnost jejich uložení.

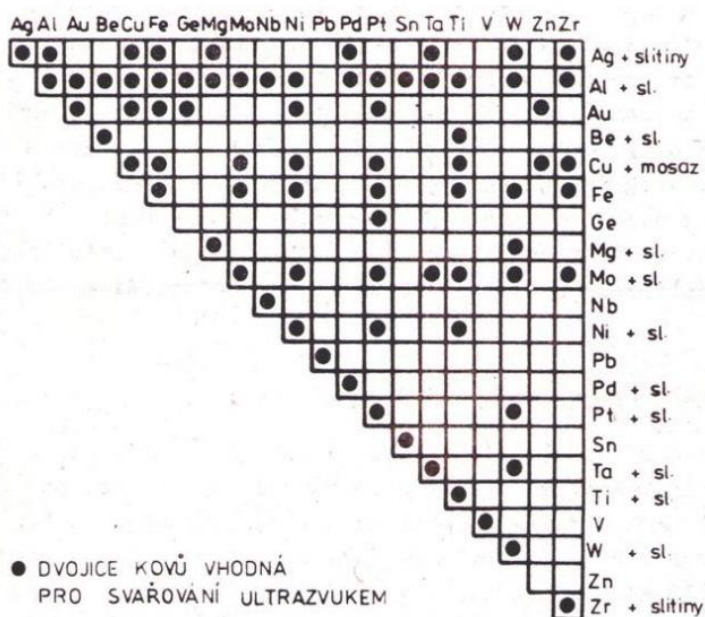
Svařitelnost materiálů

Při volbě svařovaných materiálů, musíme brát ohled na velikost průměrů atomů, ty se mohou lišit asi o 18%, aby byl možný vznik substitučního roztoku. Při rozdílech 19 až 44% ultrazvukový spoj nevznikne.

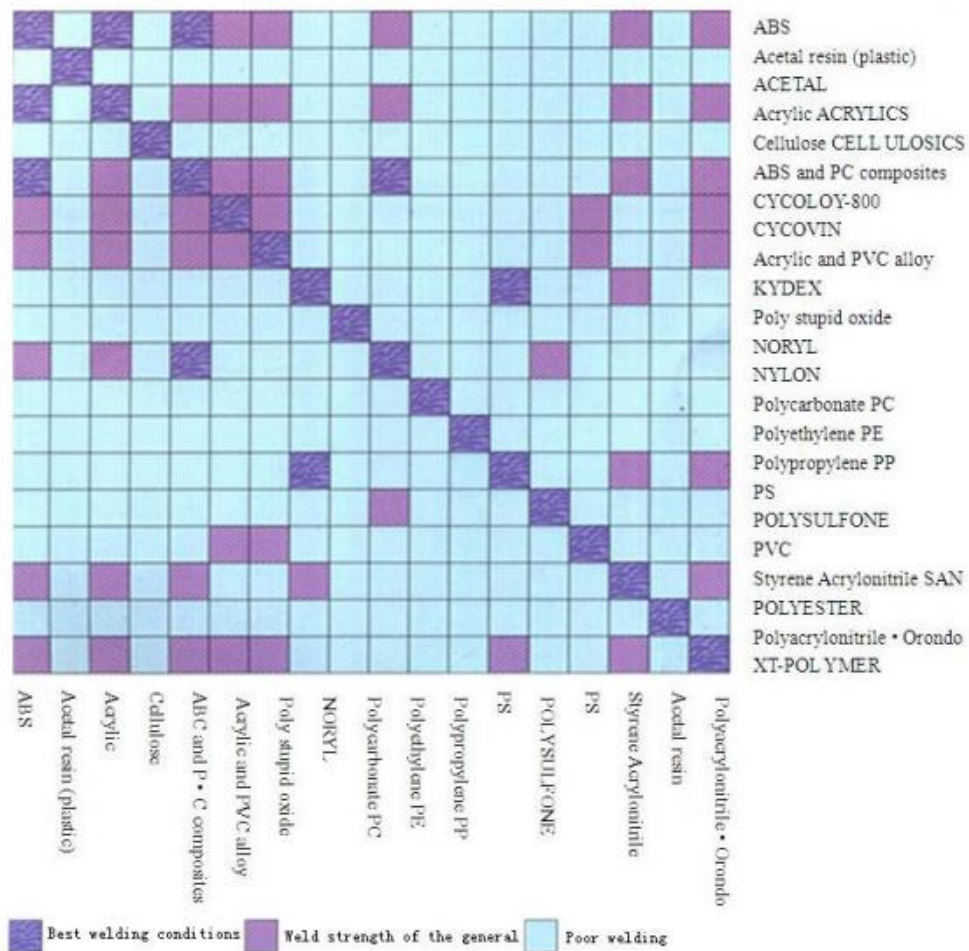
Možnosti svařitelných materiálů:

- Materiály s velkou tepelnou vodivostí Al, Cu,
- Materiály rozdílným tepelným odporem (Cu+Fe),
- Materiály s povrchovými ochrannými vrstvami,
- Barevné kovy i v legované podobě ,
- Materiály odlišných tlouštěk,
- Plastické hmoty i fólie.

Pro ultrazvukové svařování jsou vhodné materiály s kubickou, plošně centrovanou mřížkou – Al, Cu, Ni, Co aj. Ty se vyznačují dobrou plasticitou. Dva odlišné kovy se svařují lépe než kovy shodné. Naopak nevhodné materiály pro tuto technologii jsou materiály a s obsahem Pb, Sn a Zn.



Obrázek 10 Svařitelnost kovů, dostupné z [7] viz Zdroje obrázků.



Obrázek 11 Svařitelnost plastů, dostupné z [7] viz Zdroje obrázků.

Svařovací parametry:

- Přítlačná síla působící na spoj

Zajišťuje přenos ultrazvukových kmitů ze sonotrody na svařované materiály a dále tření potřebné k narušení oxidových vrstviček.

- Amplituda kmitů

Jedná se o základní parametr. Se zvyšováním amplitudy výchylky sonotrody roste pevnost spojů lineárně. Oproti tomu zmenšování amplitudy vede ke snížení pevnosti spoje.

- Frekvence kmitů

Při vyšších frekvencích kmitů se navyšují ztráty energie v přenosových člancích. Teplota sonotrody vzrůstá a tím se úměrně zmenšuje amplituda vlnění.

- Svařovací čas

Svařovací čas je jedním ze zásadních faktorů rozhodujících o pevnosti spoje. V závislosti na ostatních parametrech se doporučuje zvolit co nejkratší čas, aby nedocházelo k přehřívání místa svaru. Tím by došlo ke snížení pevnosti svaru (únavové porušení).

Výhody ultrazvukového svařování

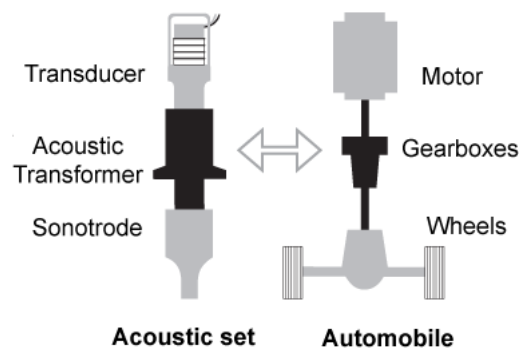
- Ultrazvukové svařování ovlivňuje spoje méně než tavné metody svařování a nedochází ke změně vlastností materiálu,
- Stykové plochy není nutno nákladně a zdlouhavě upravovat,
- Lze svařovat i vytvrditelné materiály,
- Krátké svařovací časy (řádově jednotky sekund),
- U plastů není potřeba čistit povrchy svářených ploch,
- Lze svařit kovový materiál s nekovovým (Al s keramikou), elektrické vlastnosti materiálů nejsou podstatné.

Nevýhody

- Svary jsou omezeny velikostí a konstrukcí svářečky, většinou se svařují jen malé díly,
- Každý spoj vyžaduje návrh sonotrody a zhotovení přípravků [7][8].

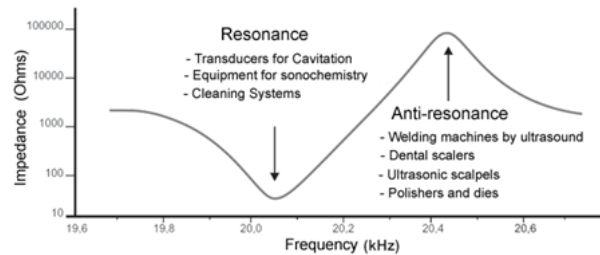
5.2 Návrh svařovací sestavy

Svařovací sestava neboli akustický set či řetězec se skládá z ultrazvukového zdroje (Transducer), vlnovodu (Acoustic Transformer) a sonotrody (Sonotrode). K lepšímu pochopení principu fungování svařovací sestavy lze její chod přirovnat k principu fungování automobilu. Zdroj provádí přeměnu energie (jako motor), vlnovod, jinak zesilovač, zvětšuje amplitudu kmitů (jako převodovka) a sonotroda zajišťuje převod energie do potřebných míst (kola auta). Stejně jako u auta i u ultrazvukových systémů musí být dobře a harmonicky navrženy mechanické části, aby byla s co nejmenšími ztrátami využita energie. Hlavním parametrem je frekvence částí, která by se měla shodovat nebo co nejméně lišit (příklad $20\text{kHz} \pm 50\text{ Hz}$).



Obrázek 12 Připodobnění akustické sestavy k mechanickému systému automobil, dostupné z [4], viz Zdroje obrázků.

U zdroje rozlišujeme dvě provozní frekvence, jež jsou dobře rozlišitelné na elektrické impedanční křivce. Maximální impedance připadá antirezonanční frekvenci (maximální rychlost), při které pracují svařovací systémy. Minimální impedance připadá rezonanční frekvenci (maximální síla). Na této frekvenci pracují systémy pro čištění ultrazvukem.



Obrázek 13 Impedance křivky v závislosti na frekvenci převodníku, dostupné z [4], viz Zdroje obrázků.

Test zdroje

Aby zdroj fungoval správně, musí být frekvence a impedance v tolerančních mezích. Např. pro svařovací systémy by frekvence měla být $\pm 2,5\%$, tedy $20\text{kHz} \pm 50\text{Hz}$. Určujícím faktorem pro frekvenci a impedanci jsou rozměrová přesnost součástí, těsnost, kvalita keramiky a ladění (podobné jako u sonotrod).

Test akustických sestav

Výkon závisí na odladění frekvence a soudržnosti mezi částmi. Při nevhodné kombinaci zdroje a převodníku (jeden s nízkou frekvencí a druhý s vysokou frekvencí) může docházet ke špatnému výkonu i přes to, že set pracuje na správné frekvenci. Tento typ problému je detekován měřením impedance [9].

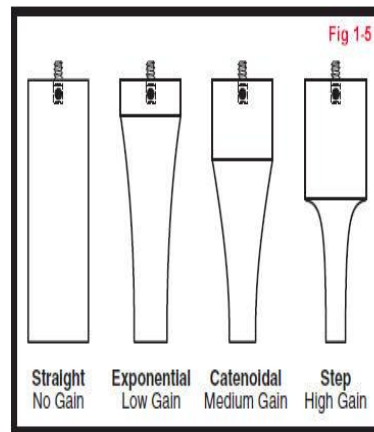
5.3 Návrh sonotrody

Amplituda sonotrody je dána pohybem povrchu sonotrody, který se stýká se součástí (nejkratší a největší vzdálenost povrchu od součástí). Sonotrody jsou navrhovány jako dlouhé rezonující tyče, většinou s délkou $\lambda/2$ ve speciálních případech s délkou násobku $\lambda/2$. Změnou průřezu lze zesílit amplitudu vibrací přicházejících ze zdroje a zesilovače. V praxi se objevují tři varianty tyčí s kruhovým průřezem a různým tvarem: kónická, exponenciální a s přechodem (stupňovitá).

Stupňovité sonotrody se skládají ze dvou odlišných průřezů. Přechod mezi průřezy je v místech uzlového bodu. Kvůli skokové změně průřezu zde dochází k vysoké koncentraci místního napětí, proto je v přechodu rádius. Stupňovitými sonotrodami lze dosáhnout zesilujícího poměru až 9:1.

Kónické tyče mění svůj průřez plynule s délkou, čímž nedochází k tak velké koncentraci napětí jako u stupňovité sonotrody v přechodu. Tyto tyče však nedosahují tak velkého zesilovacího poměru a bývají použity tam, kde jsou potřeba menší síly a menší výchyly.

Exponenciální sonotrody mění svůj průběh exponenciálně s délkou, tudíž v nich nedochází ke koncentraci napětí jako u kónických tyčí, ale lze s nimi získat větší zesilovací poměr. Výroba exponenciálních sonotrod však představuje náročný proces [10].



Obrázek 14 Vliv tvaru sonotrody na zesílení amplitudy (zleva rovná, exponenciální, catenoidální, stupňovitá sonotroda), seřazeno od nulového zesílení po největší ve stejném pořadí, dostupné z [5], viz Zdroje obrázků.

Klíčovým parametrem návrhu sonotrody je vlastní frekvence. Ta musí být shodná s frekvencí ultrazvukového zdroje a celé sestavy, aby došlo k rezonanci. K dosažení správného fungování systému musí být správně navržena každá část svařovací sestavy tak, aby pracovala na rezonanční frekvenci. Toho dosáhneme následujícími kroky:

- Určení frekvence,
- Výběr vhodného materiálu sonotrody,
- Určení rychlosti ve vybraném materiálu,
- Výpočet teoretických rozměrů sonotrody,
- Zhotovení dokumentace,
- Zhotovení sonotrody a ladění [12].

Tab. 4: Parametry pro návrh sonotrody.

| Parametry sonotrod | |
|--|-------------|
| Rychlost šíření zvuku | v |
| Polovina vlnové délky | $\lambda/2$ |
| Vstupní průměr na styku se zesilovačem | D_1 |
| Výstupní průměr na konci sonotrody | D_2 |
| Výstupní průměr zesilovače | D_3 |
| Vstupní plocha sonotrody | $A1$ |
| Výstupní plocha sonotrody | $A2$ |
| Výstupní plocha zesilovače | $A3$ |
| Vstupní amplituda sonotrody | ξ_1 |
| Výstupní amplituda sonotrody | ξ_2 |
| Výstupní amplituda zesilovače | ξ_3 |
| Rychlostní (transformační poměr) | β |

Výpočet rozměrů stupňovité sonotrody kruhového průřezu

Předem dané (známé) hodnoty:

- Amplituda na zesilovači ξ_3 ,
- Výstupní průměr zesilovače D_3 ,

- Pracovní frekvence f .

Výstupní amplituda ξ_2 je dána typem spojovaných materiálů (tabulková hodnota).

Pro ideální stykové plochy platí rovnost amplitudy: $\xi_1 = \xi_3$.

Transformační poměr amplitudy β získáme ze vztahu: $\beta = \frac{\xi_2}{\xi_1}$ (36),

Zároveň platí: $\beta = \frac{A_1}{A_2} = \frac{D_1^2}{D_2^2}$ (37)

A_1 ... vstupní plocha sonotrody

A_2 ... výstupní plocha sonotrody

D_1 ... vstupní průměr sonotrody

D_2 ... výstupní průměr sonotrody

Délka sonotrody

Stupňovité sonotrody se skládají ze dvou částí, které jsou spojené v uzlové rovině, výslednou délku sonotrody L_0 získáme součtem obou délek L_1 a L_2 . Délky lze určit z diagramu (Obrázek 15) nebo počtetně:

$L_0 = L_1 + L_2 = k \cdot \frac{v}{2 \cdot f}$ (38), kde k je korekční součinitel. [11]

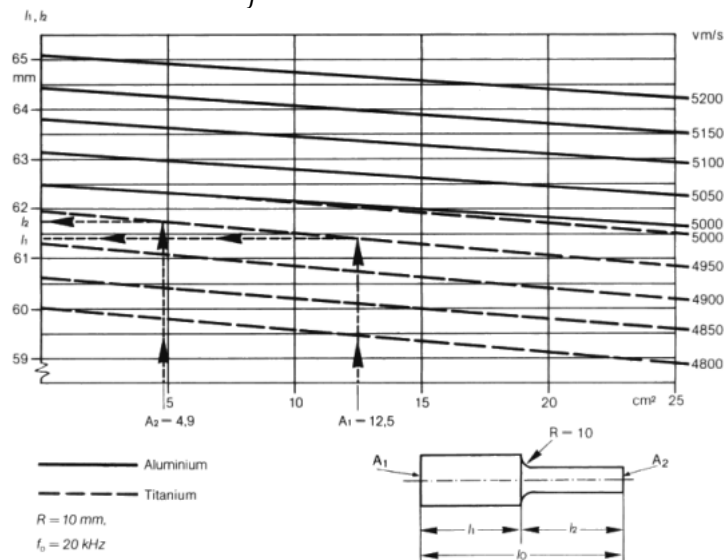
Délku L_0 lze určit počtetně takto [12]:

$$L_0 = L_1 + L_2, \quad (39)$$

$$L_1 = \frac{1,5}{k_u}, L_2 = \frac{1,6}{k_u}, \quad (40)$$

$$k_u = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (41)$$

$$\lambda = \frac{v}{f}. \quad (42)$$

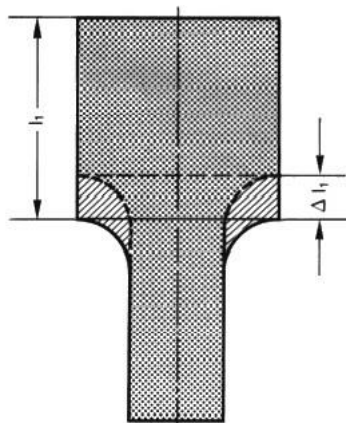


Obrázek 15 Diagram k určení délek jednotlivých částí sonotrody, dostupné z [6] viz Zdroje obrázků.

Ladění sonotrody

Obvykle se nechává na délku sonotrody přírůstek 1-2 mm, takže frekvence sonotrody je nižší než rezonanční frekvence. Aby se jí dosáhlo, je třeba sonotrodu postupně zkracovat a

proměřovat změnu frekvence. Systém pro měření frekvence sonotrody slouží k určení její vlastní frekvence. Měřicí přístroj se skládá ze zdroje ultrazvuku, zesilovače a frekvenčního čidla. Jestliže čidlo zaznamená maximální amplitudu, byla dosažena frekvence rezonance. Určitým počtem iterací seřizování délky sonotrody postupně modifikujeme její vlastní frekvenci za účelem dosažení požadované pracovní frekvence. Pokud dojde k povrchové úpravě sonotrody (úprava povrchu špičky), narůstá frekvence sonotrody, která již neodpovídá svařovací sestavě. U stupňovité sonotrody lze frekvenci snížit zkrácením délky L_1 [12].



Obrázek 16 Snížení frekvence sonotrody, zkrácením délky, dostupné z [6] viz Zdroje obrázků.

6 Materiály sonotrod, jejich vlastnosti s ohledem na svařování

Při volbě materiálu sonotrod musíme zohlednit poměrně velké amplitudy při svařování, díky čemuž dochází k hromadění napětí. Vhodnými materiály jsou tedy takové, které vydrží střídavé dynamické zatížení, mají nízký útlum, vysokou únavovou pevnost a jsou odolné vůči opotřebení [12].

Při výběru vhodného materiálu jsou pro návrh zásadní následující hodnoty:

- Měrná hmotnost,
- Poissonova konstanta,
- Rychlost šíření ultrazvuku v příčném směru,
- Rychlost šíření ultrazvuku v podélném směru,
- Modul pružnosti v tahu.

6.1 Titanové slitiny

Titanové slitiny obecně mají skvělý poměr pevnosti a hustoty, vykazují velkou únavovou pevnost v různých prostředích a lze je použít i při velkých provozních teplotách. Titan samotný je houževnatý při vysoké pevnosti a tažnosti. Titan má však nízkou tepelnou vodivost a u sonotrod může nastat jejich přehřívání. [19]

6.1.1 Ti6Al4V

Jedná o nejpoužívanější ($\alpha+\beta$) slitinu titanu také s označením Grade 5 či Ti 6-4. Mezi výhody tohoto materiálu patří skvělá kombinace pevnosti, odolnosti proti korozi, tvařitelnosti, svařitelnosti a obrobitelnosti. Další předností je možnost tepelného zpracování a stabilita

do 400° C. Materiál byl původně vyvinut pro výrobu lopatek plynových turbín. Dříve se používal jako biomateriál, kvůli toxicitě hliníku a vanadu se ale v medicíně už nepoužívá. Dnes je používán především v leteckém, těžebním nebo energetickém průmyslu. Použití najdeme i na součásti vystavené působení slané vody.

Tab. 5: Chemické složení titanové slitiny Grade 5.

| Prvek | Obsah prvku v % [hm.%] |
|--------------|---------------------------|
| ASTM Grade 5 | |
| Hliník | 5,75 - 6,75 |
| Vanad | 3,5 - 4,5 |
| Železo | max. 0,25 |
| Kyslík | max. 0,20 |
| Dusík | max. 0,05 |
| Vodík | max. 0,015 |
| Uhlík | max. 0,08 |

Tab. 6: Mechanické vlastnosti slitiny Grade 5. [13]

| Slitina | Rm [Mpa] | Rp0,2 [Mpa] | HV | E [Mpa] |
|---------|------------|-------------|-----------|-----------|
| Grade 5 | 900 - 1200 | 800 - 1000 | 300 - 400 | 110 - 140 |

Další používanou titanovou slitinou je TiAlV64, která je vhodná pro svařování plastů vytvrzených skleněnými vlákny [11].

6.2 Ferro – titanit WFN

Ferro – titanit se řadí mezi kompozitní materiál vyráběný práškovou metalurgií. Funkci základní matrice zajišťuje ocel vyztužená karbidem titanu TiC. Kombinací těchto dvou fází je dosaženo velké odolnosti proti opotřebení, velkého modulu pružnosti ($E = 294\,000$ MPa) a pevnosti v tlaku spolu s nízkou hmotností materiálu. Ferro – titanit má velké tlumící účinky.

Tab. 7: Chemické složení Ferro-titanitu. [19]

| Ferro-titanit WFN | |
|-------------------------------|------|
| Obsah v % [hm. %] | |
| Karbidická fáze | |
| TiC | 33 |
| Pojivová fáze(matrice) | |
| C | 0,75 |
| Cr | 13,5 |
| Mo | 3 |

6.3 Dural AlCu₄Mg

K přednostem slitin hliníku patří především nízká měrná hmotnost a poměrně dobrá pevnost. Dural je materiál se střední pevností, dobře mechanicky obrobitelný, náchylný k tvorbě trhlin při svařování. Vytvrzením za studena se značně navýší pevnost materiálu [18]. U sonotrod je materiál chráněn vrstvou chromu[16].

Tab. 8: Chemické složení materiálu AlCu₄Mg. [16]

| AlCu ₄ Mg | |
|----------------------|-------------------------|
| Prvek | Obsah prvku v % [hm. %] |
| Cu | 3,6 |
| Si | 0 |
| Mn | 0,68 |
| Mg | 1,9 |

7 Rychlořezné nástrojové oceli tvářené a vyrobené metodami práškové metalurgie

7.1 Nástrojová ocel ASP 2023

Jedná se o bezkobaltovou rychlořeznou ocel vyráběnou práškovou metalurgií, vhodnou pro vysokovýkonné stroje a práci za studena. Tuto ocel lze opracovat třískovým obráběním, jemným broušením, elektroerozivním obráběním a svařováním. Materiál je dobrým nosným substrátem pro povlakování metodami PVD a CVD.

Tab. 9: Chemické složení ASP 2023.

| ASP 2023 | |
|----------|-------------------------|
| Prvek | Obsah prvku v % [hm. %] |
| C | 1,28 |
| Cr | 4,1 |
| Mo | 5 |
| W | 6,4 |
| Co | - |
| V | 3,1 |

Tepelné zpracování

- Žihání naměkko po dobu 3 hodin v ochranné atmosféře při teplotě 890 – 900 °C, následuje pomalé ochlazování rychlostí 10 °C/ hod. na 700 °C a dochlazení na vzduchu,
- Žihání na odstranění pnutí probíhá při teplotě 700 °C s výdrží okolo 2 hodin a následovným pomalým ochlazením na 500 °C,

- Kalení v ochranné atmosféře s předehřevem ve 2 stupních při 450 – 500 °C a při 850 – 900 °C, teplota austenizace se volí podle požadované tvrdosti (pro tvrdost 56 – 66 HRC se volí teplota 975 – 1180 °C). Při kalení je materiál ochlazován na teplotu 40 – 50 °C,
- Popouštění se provádí 3 x nejméně hodinu za teploty 560 °C. Mezi jednotlivými cykly dochází k ochlazování až na teplotu okolí, 25 °C [14].

7.2 Nástrojová ocel ASP 2053

Nástrojová ocel se skvělou otěruvzdorností je vysoce legovaná vanadem. Ocel lze opět opracovat třískovým obráběním, broušením, elektroerozivním obráběním i svařováním. Je vhodným substrátem pro povlakování PVD a CVD.

Tab. 10: Chemické složení oceli ASP 2053.

| ASP2053 | |
|---------|-------------------------|
| Prvek | Obsah prvku v % [hm. %] |
| C | 2,48 |
| Cr | 4,2 |
| Mo | 3,1 |
| W | 4,2 |
| Co | - |
| V | 8 |

Podmínky pro tepelné zpracování jsou stejné jako u oceli ASP 2023, liší se pouze kalicí teplotou v závislosti na požadované tvrdosti.[15]

7.3 Nástrojová ocel DIN 1.3340 (M2)

Jde o molybdenovou ocel v zušlechtném stavu značenou dle německé normy. Sonotrody jsou chráněny vrstvou AlCrN vytvořenou PVD procesem (obloukové odpařování katody ve vakuu) [16]. Materiál obecně nachází uplatnění v obrábění vysokými rychlostmi, jako materiál nástrojů. Pro tuto ocel je kromě tvrdosti a vysoké odolnosti proti otěru charakteristické také dobré vlastnosti při relativně vysokých teplotách. [17]

Tab. 11: Chemické složení oceli DIN 1.3340. [16]

| DIN 1.3340 | |
|------------|-------------------------|
| Prvek | Obsah prvku v % [hm. %] |
| C | 0,99 |
| Si | 0,45 |
| Mn | 0,35 |
| P | 0,035 |
| S | 0,017 |
| Cr | 3,95 |
| W | 6,7 |
| V | 1,7 |
| Mo | 3,83 |
| Ni | 0,75 |

7.4 Nástrojová ocel 19 830 (DIN 1.3343)

Nástrojová ocel 19 830 patří mezi výkonné rychlořezné ocele. K jejím vlastnostem patří velká odolnost proti opotřebení, popuštění a vysoké tvrdosti po zakalení při zachování dostatečné houževnatosti. Použití tohoto materiálu je vhodné pro velmi namáhané nástroje k obrábění materiálu se střední a vyšší pevností. Jedná se o velmi používanou rychlořeznou ocel. Teplota pro tváření je 1100 – 900 °C.

Tab. 12: Chemické složení ocele 19 830.

| 19 830 | |
|-----------|-------------------------|
| Prvek | Obsah prvku v % [hm. %] |
| C | 0,86 - 0,94 |
| Si | ≤ 0,45 |
| Mn | ≤ 0,45 |
| Cr | 3,80 - 4,50 |
| Mo | 4,70 - 5,20 |
| V | 1,7 - 2,1 |
| W | 5,9 - 6,7 |

Tepelné zpracování

- Žihání na měkko při teplotě 780 – 820 °C,
- Kalení při teplotě 1150 – 1250 °C s ochlazením v solné lázni o teplotě 500 – 550 °C nebo v oleji popřípadě proudu vzduchu,
- Popouštění 540 – 640 °C podle požadované tvrdosti (54 – 61HRC).

7.5 Nástrojová ocel 19 852 (DIN 1.3243)

Má podobné vlastnosti jako předchozí ocel. Jedná se o velmi výkonnou ocel se zvýšenou tvrdostí za vysokých teplot a se zvýšenou odolností proti popuštění. Při vyšší tvrdosti si zachovává dostatečnou houževnatost. Bývá používána k výrobě soustružnických a hoblovacích nožů. Lze ji použít i na obrábění austenitických korozivzdorných ocelí. Teplotní rozmezí pro tváření je 1100 – 900 °C.

Tab. 13: Chemické složení ocele 19852.

| 19 852 | |
|-----------|-------------------------|
| Prvek | Obsah prvku v % [hm. %] |
| C | 0,87 - 0,95 |
| Si | ≤ 0,45 |
| Mn | ≤ 0,45 |
| Co | 4,5 - 5 |
| Cr | 3,8 - 4,5 |
| Mo | 4,7 - 5,2 |
| V | 1,7 - 2,1 |
| W | 5,9 - 6,7 |

Tepelné zpracování:

- Žihání naměkko, při teplotě 770 – 840 °C,
- Kalení při teplotě 1200 – 1260 °C s ochlazením v solné lázni o teplotě 500 – 550 °C nebo v oleji popřípadě proudu vzduchu,
- Popouštění za teploty 550 – 580 °C (v počtu 3 – 4x). [26]

8 Experimentální část

K tomu, abychom mohli provést simulaci chování sonotrody je třeba znát její geometrický tvar, rozměry a materiál, ze kterého bude sonotroda případně vyrobena. Mezi důležité charakteristiky materiálu patří rychlost šíření ultrazvuku v příčném směru a rychlost šíření ultrazvuku podélném směru. Uvedené rychlosti spolu s měrnou hustotou, se mění v závislosti na struktuře materiálu a tím se mění i materiálové pružnostní konstanty – modul pružnosti v tahu E , modul pružnosti ve smyku G a Poissonova konstanta ν . Materiálové konstanty lze dopočítat díky znalosti rychlosti šíření ultrazvuku v příčném i podélném směru a hustoty materiálu. Zmíněné materiálové hodnoty poslouží k provedení simulace softwarem Sonoanalyzer.

8.1 Příprava a měření vzorků

Ke správnému měření ultrazvuku, je třeba zajistit na vzorku nejlépe dvě rovnoběžné roviny bez závitových děr či zápichů s dostatečně velkou kontaktní plochou pro měřicí sondy. Z tohoto důvodu, bylo potřeba vzorky rozřezat. Na obrázcích je uveden příklad vzorku před rozřezáním a po rozřezání. K tomu byla použita metalografická pila Struers Discotom 6.



Obrázek 17: Sonotroda před rozřezáním.



Obrázek 18: Vzorek připravený ze sonotrody.

Posuvným měřidlem byly naměřeny rozměry vzorků, které dále posloužily k výpočtu rychlosti šíření ultrazvuku. Hodnoty, z nichž se udělal aritmetický průměr, byly změřeny v třikrát v různých polohách.

Tab.14-17: Rozměry vzorků.

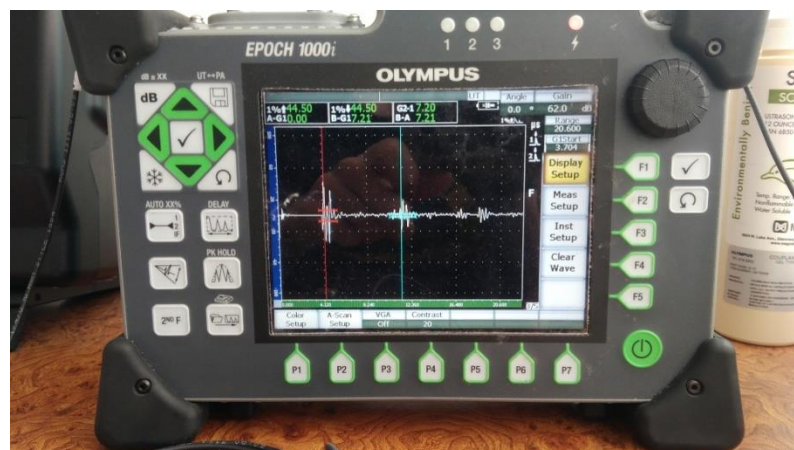
| Ocel 19830 | | | | Ocel 19 852 | | | |
|------------------------------|-------|------------------------------|--------|------------------------------|-------|------------------------------|--------|
| Ø č.1 [mm] | 27,78 | Délka č.1 [mm] | 153,60 | Ø č.1 [mm] | 30,66 | Délka č.1 [mm] | 192,50 |
| Ø č.2 [mm] | 27,76 | Délka č.2 [mm] | 153,56 | Ø č.2 [mm] | 30,62 | Délka č.2 [mm] | 192,53 |
| Ø č.3 [mm] | 27,77 | Délka č.3 [mm] | 153,59 | Ø č.3 [mm] | 30,68 | Délka č.3 [mm] | 192,48 |
| Průměrná hodnota [mm] | 27,77 | Průměrná hodnota [mm] | 153,58 | Průměrná hodnota [mm] | 30,65 | Průměrná hodnota [mm] | 192,50 |

| ASP 2052 | | | | Fréza | | | |
|------------------------------|-------|------------------------------|-------|------------------------------|-------|------------------------------|-------|
| Ø č.1 [mm] | 24,95 | Délka č.1 [mm] | 46,34 | Ø č.1 [mm] | 31,92 | Délka č.1 [mm] | 56,04 |
| Ø č.2 [mm] | 24,92 | Délka č.2 [mm] | 46,37 | Ø č.2 [mm] | 31,93 | Délka č.2 [mm] | 55,89 |
| Ø č.3 [mm] | 24,93 | Délka č.3 [mm] | 46,35 | Ø č.3 [mm] | 31,95 | Délka č.3 [mm] | 56,00 |
| Průměrná hodnota [mm] | 24,93 | Průměrná hodnota [mm] | 46,35 | Průměrná hodnota [mm] | 31,93 | Průměrná hodnota [mm] | 55,98 |

| WSK 1423.4 | | | | WSK 1423.10 | | | |
|------------------------------|-------|------------------------------|-------|------------------------------|-------|------------------------------|-------|
| Ø č.1 [mm] | 24,48 | Délka č.1 [mm] | 14,59 | Ø č.1 [mm] | 21,95 | Délka č.1 [mm] | 19,74 |
| Ø č.2 [mm] | 24,47 | Délka č.2 [mm] | 14,55 | Ø č.2 [mm] | 21,99 | Délka č.2 [mm] | 19,79 |
| Ø č.3 [mm] | 24,49 | Délka č.3 [mm] | 14,61 | Ø č.3 [mm] | 22,00 | Délka č.3 [mm] | 19,82 |
| Průměrná hodnota [mm] | 24,48 | Průměrná hodnota [mm] | 14,58 | Průměrná hodnota [mm] | 21,98 | Průměrná hodnota [mm] | 19,78 |

| WSK 1422.5 | | | | WSK 1422.2 | | | |
|-----------------------|-------|-----------------------|------|-----------------------|-------|-----------------------|-------|
| Ø č.1 [mm] | 19,26 | Délka č.1 [mm] | 9,52 | Ø č.1 [mm] | 19,21 | Délka č.1 [mm] | 15,79 |
| Ø č.2 [mm] | 19,27 | Délka č.2 [mm] | 9,54 | Ø č.2 [mm] | 19,22 | Délka č.2 [mm] | 15,79 |
| Ø č.3 [mm] | 19,28 | Délka č.3 [mm] | 9,50 | Ø č.3 [mm] | 19,20 | Délka č.3 [mm] | 15,79 |
| Průměrná hodnota [mm] | 19,27 | Průměrná hodnota [mm] | 9,52 | Průměrná hodnota [mm] | 19,21 | Průměrná hodnota [mm] | 15,79 |

Měření rychlosti šíření ultrazvuku probíhalo na ultrazvukovém defektoskopu Olympus Epoch 1000i pomocí kontaktních přímých sond Olympus Panametrics NDT 4MHz (podélné vlny) a 1 MHz (příčné vlny) s piezoelektrickým měničem. Přímé sondy fungují na takovém principu, že se vysílaný ultrazvuk šíří kolmým směrem do materiálu. Kontaktní se označují sondy, které se přikládají přímo na povrch měřeného vzorku. Jelikož se ultrazvuk na vzduchu okamžitě utlumí, bylo třeba během měření využít vazebného gelu, který zajistil přenos vysílaného signálu ze sondy do materiálu. U měření rychlosti šíření podélných vln byl použit glycerin. K měření rychlosti šíření příčných vln je nutno použít vazebný gel, který přenáší i příčné vlny, proto byla použita vysoce viskózní pasta Olympus SWC-2. Na měření rychlosti příčných vln byly k přístroji připojeny speciální sondy s měniči, vysílajícími příčné vlny (používají se výjimečně např. právě pro měření rychlosti ultrazvuku). Většinou se používají sondy vysílající podélné vlny.



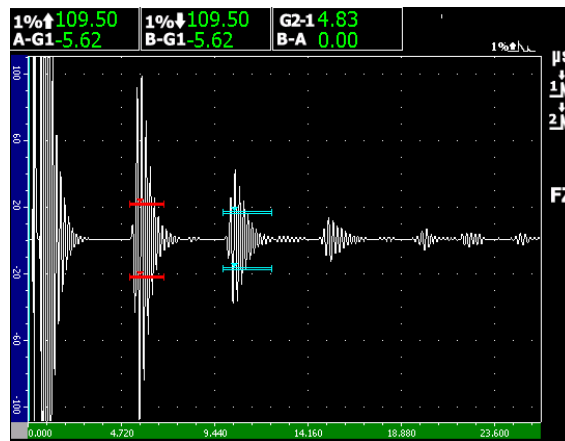
Obrázek 19 Defektoskop Olympus Epoch 1000i.

Měření probíhalo nepřímě, přes změřenou dráhu, kterou urazí impuls vyslaný budicí sondou zkoušeným materiálem. Osa x znázorňuje čas v [μs] a osa y hodnotu signálu v [dB]. Po přiložení budicí sondy k materiálu (v případě průchodové metody i po přiložení přijímací sondy) se na obrazovce ultrazvukového defektoskopu zobrazil průběh vysílaného signálu složený z několika výchylek (tzv. echa), které znamenají odraz vlny od prostředí s odlišnou rychlostí šíření vlnění (v tomto případě odraz na konci vzorku materiálu). Po více násobném průchodu signálu vznikají násobná echa. Toho jsme využili pro změření času průchodu vzorkem. Pro vznik násobného echa musí vlnění urazit vždy stejnou vzdálenost (známou

tloušťku materiálu d). Z defektoskopu odečteme rozdíl mezi časem vzniku jednotlivých echo signálů a můžeme určit rychlost ultrazvuku c podle vzorce:

$$c = \frac{d}{t} \quad (43).$$

Přesnější odečtení času proběhlo v módu „freeze“, kdy byl signál zaznamenán pro jeden okamžik. Prostřednictvím funkce „Gate“ jsem vymezil echa, ze kterých se dále měřil čas. Tzv. „Gate 1“ a „Gate 2“ (na obrázku červená a modrá vodorovná úsečka) slouží k označení námi vymezené oblasti. Ve vymezených oblastech můžeme poté hledat hodnoty podle nastaveného režimu (na obrázku protilehlé šipky). Měřil jsem v módu Peak, to znamená, že jsem měl šipkami vyznačen čas, při kterém echo nabylo největší hodnoty. Poté stačilo nastavit měřící referenční kurzor na místo vyznačených hodnot a odečíst čas z displeje defektoskopu. Na obrázku se jedná o hodnotu B-A, v době pořizování snímku obrazovky však byly referenční kurzory vypnuté, proto je čas nulový.



Obrázek 20 Záznam měření metodou P/E, s nastavenými branami "gate".

Puls-echo metoda měření (P/E)

Pro měření rychlosti ultrazvuku lze využít buď metodu průchodovou nebo metodu P-E (puls-echo).

Během měření metodou P/E funguje jako budící i přijímací pouze jediná sonda. Vysílané vlnění musí projít tloušťkou vzorku d , poté se na konci odrazí a opět se vrací na stejnou vzdálenost zpět. Proto musíme naměřený čas t vydělit dvěma. Za naměřený čas t projde vlnění skrz vzorek dvakrát. Pro určení rychlosti ultrazvuku c pro metodu Puls-echo tedy platí:

$$c = 2 \cdot \frac{d}{t} \quad (44).$$

Průchodová metoda měření

Měření touto metodou spočívá v připojení dvou sond k materiálu naproti sobě v jedné ose. Jedna sonda vysílá signál (budící sonda), druhá signál přijímá. Při prvním průchodu vlnění, se nám při průchodu koncem vzorku díky změně prostředí vytvoří echo zaznamenané přijímací sondou. Vlnění se odráží nazpět, vrací se vzorkem na začátek, aby se zde opět odrazilo (zde jen budící sonda – nepřijímá signál) a putuje znovu na konec vzorku, kde přijímací sonda zaznamená násobné echo. Protože neznámé počáteční referenční bod, ten vznikne až po prvním průchodu jako první echo, odečítáme čas t , za který prošlo vlnění dvakrát (od

přijímací sondy k budící a zpět) stejnou dráhu – tloušťku vzorku d . K určení rychlosti ultrazvuku c platí stejný proto vzorec jak u metody P/E:

$$c = 2 \cdot \frac{d}{t} .$$

Všechny vzorky měly válcovitý tvar. Měření rychlosti ultrazvuku bylo provedeno vždy přes průměr vzorku a na jeho délku. Jednalo se tedy o měření rychlosti šíření podélných vln v podélném a příčném směru. Materiál může mít totiž směrově orientovanou, nehomogenní strukturu a rychlost ultrazvuku v různých směrech může být díky útlumu odlišná. Měření rychlosti šíření příčných vln proběhlo také v podélném a příčném směru. Podélné vlny byly změřeny jak průchodovou metodou, tak pro kontrolu i metodou P/E. Průchodová metoda by měla být o něco přesnější. Na měření příčných rychlostí byla k dispozici pouze jedna sonda, a proto jsou příčné vlny změřeny pouze metodou P/E.

9 Měření rychlosti ultrazvuku u ocelových vzorků

Všechny vzorky měly válcovitý tvar. Měření rychlosti ultrazvuku bylo provedeno vždy napříč vzorkem (na jeho průměr) a na jeho délku. Jednalo se tedy o měření rychlosti šíření podélných vln v podélném a příčném směru. Materiál může mít totiž směrově orientovanou, nehomogenní strukturu a rychlost ultrazvuku v různých směrech může být díky útlumu odlišná. Měření rychlosti šíření příčných vln proběhlo také v podélném a příčném směru. Podélné vlny byly změřeny jak průchodovou metodou, tak pro kontrolu i metodou P/E. Na měření příčných rychlostí byla k dispozici pouze jedna sonda, a proto jsou příčné vlny změřeny pouze metodou P/E.

Rychlost šíření ultrazvuku u ocelových vzorků byla změřena u kovaných ocelí 19 830 a 19852. Tyto kované nástrojové ocele byly proměřeny ve stavu před kalením a po kalení.

Opakovaným petchováním a prodlužováním těchto ocelí vznikla vysoce protvářená struktura. Petchování a prodlužování proběhlo ve směrech tří souřadnicových os za účelem potlačení vláknitosti po kování, rozdrčení karbidů a jejich rovnoměrnému rozmístění v materiálu. Po kování byly vzorky ochlazovány v peci po dobu cca 48 hodin tak, aby nedošlo ke vzniku zakalené struktury (odpovídá stavu, označovanému v praxi jako „vyžiháný stav“). Výsledná struktura, pokud jde o homogenitu rozložení karbidů, by se měla blížit práškovým ocelím. Rozdíl v rychlosti šíření ultrazvukových vln v podélném a příčném směru souvisí s nehomogenitou struktury. Z tohoto důvodu proběhlo měření rychlosti šíření ultrazvuku i na vzorcích fréz, které byly vyrobeny právě práškovou metalurgií (vzorky oceli ASP 2052). Jejich chemické složení je uvedeno v tabulce 18. Z výsledku měření lze vyčíst, že rychlost podélných vln na délku vzorků, je vždy o něco vyšší u práškových ocelí. Na průměr vzorku jsou hodnoty různé, ale směrodatnější by měly být hodnoty měřené na délku (větší vzdálenost), kdy se může projevit nehomogenita materiálu a ztráty rozptylem.

Tab. 18: Chemické složení zjištěné metodou GDOES:

| Chemické složení v hmot. % | | | | | | | | | |
|----------------------------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ASP 2052 | | | | | | | | | |
| C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Ni | Cu | Al |
| 1,646 | 0,286 | 0,231 | 0,03 | <0,150 | 4,715 | 1,899 | 0,235 | 0,064 | 0,01 |
| Ce | Co | N | Nb | Pb | Sb | Ta | Ti | V | W |
| 0,198 | 7,707 | <0,020 | 0,055 | 0,033 | 0,108 | 0,472 | 0,004 | 4,647 | 9,436 |

Tab. 19: Chemické složení v hmot. % podle [24]:

| C | Cr | Mo | W | Co | V |
|-----|-----|----|------|----|---|
| 1,6 | 4,8 | 2 | 10,5 | 8 | 5 |

Chemické složení ocelí 19 830 a 19852 je uvedeno v kapitole 6 v tabulkách 12 a 13.

Tab. 20: Naměřené hodnoty rychlosti šíření ultrazvuku podélných vln u ocelových vzorků – průchodovou metodou.

Průchodová metoda, vysílací sonda NDT 4MHz, režim Peak, podélné vlny, Olympus EPOCH 1000i

| Vzorek | délka [mm] | průměr [mm] | čas podél. [μ s] | rychlost podél. [$m \cdot s^{-1}$] | čas na průměr [μ s] | rychlost na prům. [$m \cdot s^{-1}$] |
|------------------|------------|-------------|-----------------------|--------------------------------------|--------------------------|--|
| 19 830 | 153,58 | 27,77 | 51,92 | 5916,02 | 9,11 | 6096,60 |
| 19 830 po kalení | 153,58 | 27,77 | 51,87 | 5921,73 | 10,29 | 5397,47 |
| 19 852 | 192,50 | 30,65 | 65,03 | 5920,34 | 8,92 | 6872,20 |
| 19 852 po kalení | 192,50 | 30,65 | 64,93 | 5929,46 | 9,29 | 6598,49 |
| ASP 2052.1 | 46,35 | 24,93 | 15,46 | 5996,12 | 8,22 | 6065,69 |
| ASP 2052.2 | 55,98 | 31,93 | 18,55 | 6035,58 | 10,60 | 6024,53 |

Příklad výpočtu – rychlost podélná u vzorku oceli 19 830 (1. řádek tabulky č.16):

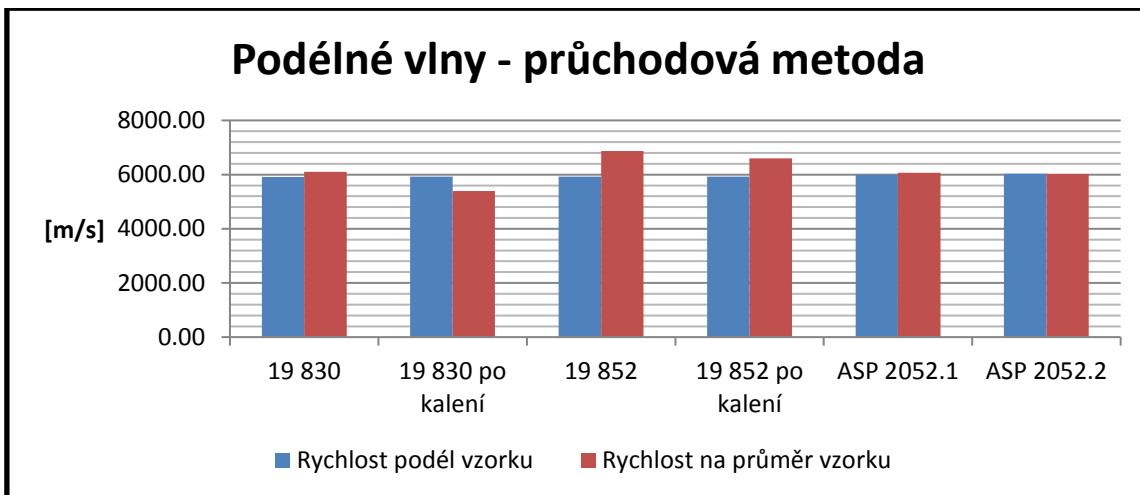
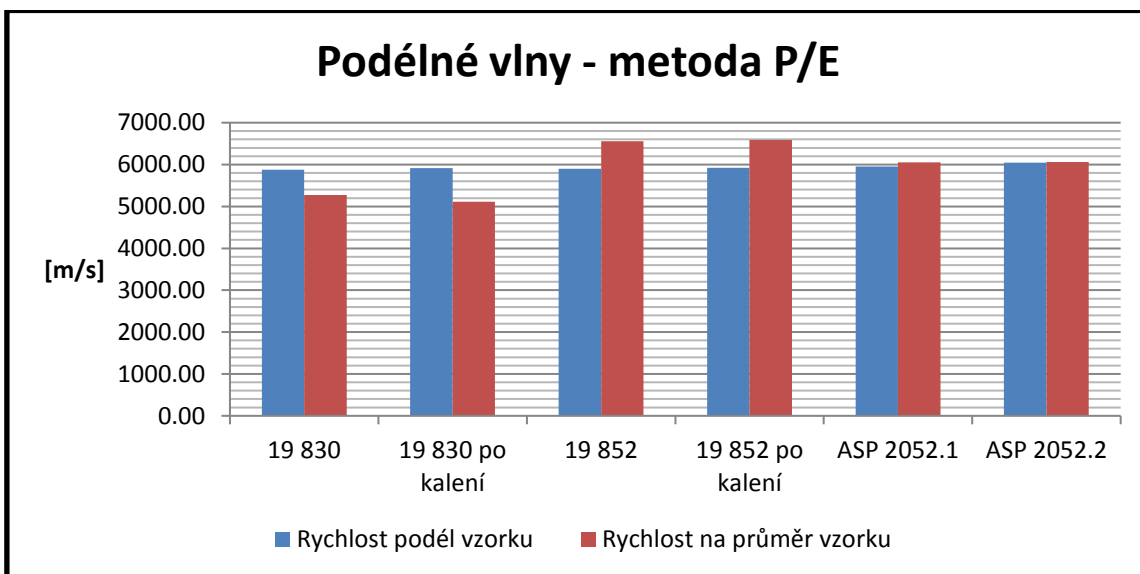
$$c = 2 \cdot \frac{d}{t} = 2 \cdot \frac{153,58 \cdot 10^{-3}}{51,92 \cdot 10^{-6}} = 5916,02 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

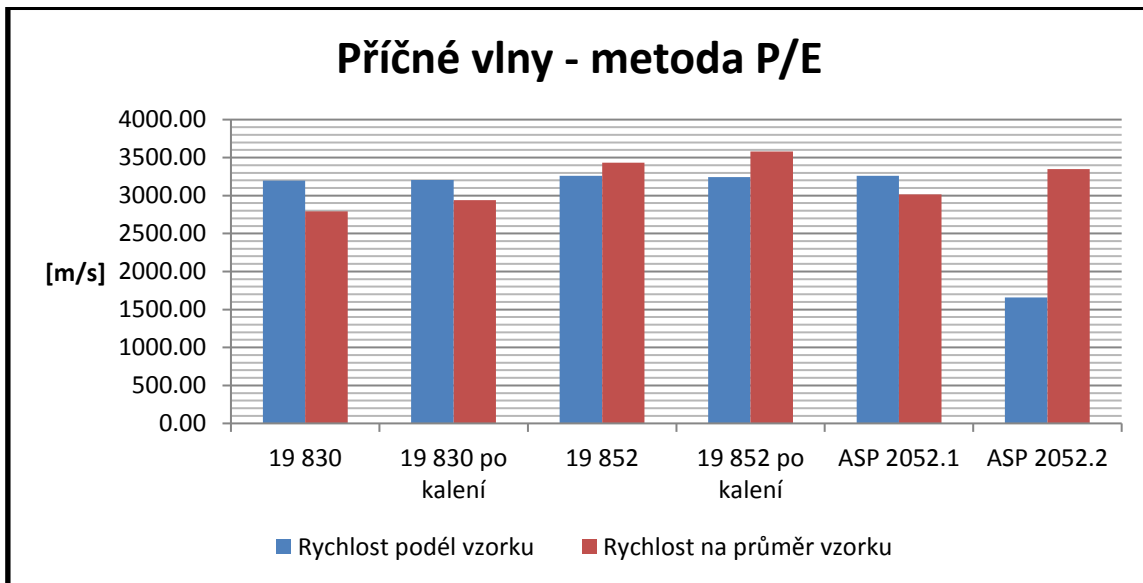
Tab. 21: Naměřené hodnoty rychlosti šíření ultrazvuku podélných vln u ocelových vzorků P/E metodou.

| Podélné vlny - metoda P/E vysílací sonda NDT 4 MHz (kontrola průchodové metody) | | | | | | |
|---|------------|-------------|-----------------------|--------------------------------------|-------------------------|--|
| Vzorek | délka [mm] | průměr [mm] | čas podél. [μ s] | rychlost podél. [$m \cdot s^{-1}$] | čas na prům. [μ s] | rychlost na prům. [$m \cdot s^{-1}$] |
| 19 830 | 153,58 | 27,77 | 52,24 | 5879,79 | 10,54 | 5269,45 |
| 19 830 po kalení | 153,58 | 27,77 | 51,96 | 5911,47 | 10,87 | 5109,48 |
| 19 852 | 192,50 | 30,65 | 65,28 | 5897,67 | 9,35 | 6556,15 |
| 19 852 po kalení | 192,50 | 30,65 | 64,96 | 5926,72 | 9,3 | 6591,40 |
| ASP 2052.1 | 46,35 | 24,93 | 15,58 | 5949,94 | 8,24 | 6050,97 |
| ASP 2052.2 | 55,98 | 31,93 | 18,51 | 6048,62 | 10,54 | 6058,82 |

Tab. 22: Naměřené hodnoty rychlosti šíření ultrazvuku příčných vln u ocelových vzorků P/E metodou.

| Příčné vlny (metoda P/E, budící sonda Olympus 1MHz) | | | | | | |
|---|------------|-------------|-----------------------|--------------------------------------|-------------------------|--|
| Vzorek | délka [mm] | průměr [mm] | čas podél. [μ s] | rychlost podél. [$m \cdot s^{-1}$] | čas na prům. [μ s] | rychlost na prům. [$m \cdot s^{-1}$] |
| 19 830 | 153,58 | 27,77 | 96,11 | 3195,92 | 19,89 | 2792,36 |
| 19 830 po kalení | 153,58 | 27,77 | 95,81 | 3205,93 | 18,88 | 2941,74 |
| 19 852 | 192,50 | 30,65 | 118,15 | 3258,57 | 17,85 | 3434,17 |
| 19 852 po kalení | 192,50 | 30,65 | 118,72 | 3242,92 | 17,12 | 3580,61 |
| ASP 2052.1 | 46,35 | 24,93 | 28,44 | 3259,49 | 16,53 | 3016,33 |
| ASP 2052.2 | 55,98 | 31,93 | 67,48 | 1659,16 | 19,08 | 3346,96 |

Graf č. 1: Porovnání naměřených rychlostí podélných vln, naměřených průchodovou metodou.**Graf č. 2: Porovnání naměřených rychlostí podélných vln, naměřených metodou P/E.**

Graf č. 3: Porovnání naměřených rychlostí příčných vln, naměřených metodou P/E.

10 Měření rychlosti ultrazvuku u komerčních sonotrod ve vztahu k materiálu

Vzorky materiálů byly připraveny k měření z vyřazených sonotrod. Jedná se o titanové sonotrody. Typem materiálu se lišily pouze vzorek s označením WSK 1423.10 (připravený z ocelové nekalené sonotrody) a vzorek práškové ocele DIN 1.3340. U vzorku DIN 1.3340 nebylo možné změřit rychlost šíření napříč vzorkem. Průměr vzorku byl moc malý. Z tohoto důvodu byl válcovitý vzorek rozříznut podélně uprostřed k zajištění co největší rovinné kontaktní plochy pro měřící sondu. Vzniklý půlválec bylo možné změřit pouze metodou P/E (jen jedna rovinná plocha). U ostatních vzorků byli podélné vlny změřeny průchodovou metodou a příčné vlny metodou P/E. Z tabulek a grafů uvedených níže vyplývá, že titanové sonotrody vykazují lepší hodnoty rychlosti šíření ultrazvuku. To souvisí s rozdílem hustoty těchto dvou skupin materiálů (titanových a ocelových). Titanové sonotrody mají zhruba o polovinu menší hustotu než sonotrody ocelové.

Vzorky sonotrod jsou dále v tabulkách označeny pracovním názvem podle tabulky (23).

10.1 Přehled značení komerčních sonotrod

Tab. 23: Přehled značení komerčních sonotrod a jejich vzorků.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-----------------|---|----------------|-------------|----------|----------------|-------|------------|---|---|-----------------|---|----------------|------------|----------|---------|-------|------------|--|
| <table border="1"> <tr><td>Číslo sonotrody</td></tr> <tr><td>2</td></tr> <tr><td>Pracovní název</td></tr> <tr><td>WSK 1423.10</td></tr> <tr><td>Materiál</td></tr> <tr><td>X96CrMoV12</td></tr> <tr><td>Firma</td></tr> <tr><td>Hutchinson</td></tr> </table> | Číslo sonotrody | 2 | Pracovní název | WSK 1423.10 | Materiál | X96CrMoV12 | Firma | Hutchinson |  | <table border="1"> <tr><td>Číslo sonotrody</td></tr> <tr><td>5</td></tr> <tr><td>Pracovní název</td></tr> <tr><td>WSK 1423.4</td></tr> <tr><td>Materiál</td></tr> <tr><td>Ti6Al4V</td></tr> <tr><td>Firma</td></tr> <tr><td>Hutchinson</td></tr> </table> | Číslo sonotrody | 5 | Pracovní název | WSK 1423.4 | Materiál | Ti6Al4V | Firma | Hutchinson |  |
| Číslo sonotrody | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Pracovní název | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| WSK 1423.10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Materiál | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| X96CrMoV12 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Firma | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Hutchinson | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Číslo sonotrody | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Pracovní název | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| WSK 1423.4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Materiál | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ti6Al4V | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Firma | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Hutchinson | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <table border="1"> <tr><td>Číslo sonotrody</td></tr> <tr><td>3</td></tr> <tr><td>Pracovní název</td></tr> <tr><td>B1</td></tr> <tr><td>Materiál</td></tr> <tr><td>DIN 1.3340(M2)</td></tr> <tr><td>Firma</td></tr> <tr><td>Boshoku</td></tr> </table> | Číslo sonotrody | 3 | Pracovní název | B1 | Materiál | DIN 1.3340(M2) | Firma | Boshoku |  | <table border="1"> <tr><td>Číslo sonotrody</td></tr> <tr><td>6</td></tr> <tr><td>Pracovní název</td></tr> <tr><td>WSK 1422.5</td></tr> <tr><td>Materiál</td></tr> <tr><td>Ti6Al4V</td></tr> <tr><td>Firma</td></tr> <tr><td>Hutchinson</td></tr> </table> | Číslo sonotrody | 6 | Pracovní název | WSK 1422.5 | Materiál | Ti6Al4V | Firma | Hutchinson |  |
| Číslo sonotrody | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Pracovní název | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Materiál | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DIN 1.3340(M2) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Firma | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Boshoku | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Číslo sonotrody | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Pracovní název | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| WSK 1422.5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Materiál | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ti6Al4V | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Firma | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Hutchinson | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <table border="1"> <tr><td>Číslo sonotrody</td></tr> <tr><td>7</td></tr> <tr><td>Pracovní název</td></tr> <tr><td>WSK 1422.2</td></tr> <tr><td>Materiál</td></tr> <tr><td>Ti6Al4V</td></tr> <tr><td>Firma</td></tr> <tr><td>Hutchinson</td></tr> </table> | Číslo sonotrody | 7 | Pracovní název | WSK 1422.2 | Materiál | Ti6Al4V | Firma | Hutchinson |  | | | | | | | | | | |
| Číslo sonotrody | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Pracovní název | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| WSK 1422.2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Materiál | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ti6Al4V | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Firma | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Hutchinson | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Tab. 24: Chemické složení v hmot. % vzorku WSK 1423.10 zjištěné metodou GDOES:

| WSK 1423.10 | | | | | |
|-------------|-------|-------|--------|--------|------|
| C | Mn | Si | P | S | Cr |
| 1.3 | 0.354 | 0.401 | 0.0331 | 0.0040 | 13.1 |
| Ni | Mo | V | Cu | Co | |
| 0.223 | 0.718 | 0.729 | 0.127 | 0.0229 | |

Chemické složení se nejvíce blíží oceli X96CrMoV12 (DIN 1.2376).

Tab. 25: Chemické složení v hmot. % oceli X96CrMoV12. [25]

| C | Si | Mn | Cr | Mo | V |
|------|-----|-----|------|-----|-----|
| 0,96 | 0,3 | 0,3 | 11,5 | 0,9 | 0,9 |

Tab. 26: Chemické složení v hmot. % titanových vzorků zjištěné metodou GDOES.

| Vzorek | Al | V | Cr | Ti |
|--------|------|------|--------|------|
| 1423.4 | 5.91 | 3.84 | 0.0085 | 89.2 |
| 1422.5 | 6.07 | 3.76 | 0.0074 | 89.2 |
| 1422.2 | 6.06 | 3.74 | 0.0133 | 89.2 |

Chemické složení odpovídá slitině Ti6Al4V. Její chemické složení je uvedeno v kapitole 5 v tabulce číslo 5.

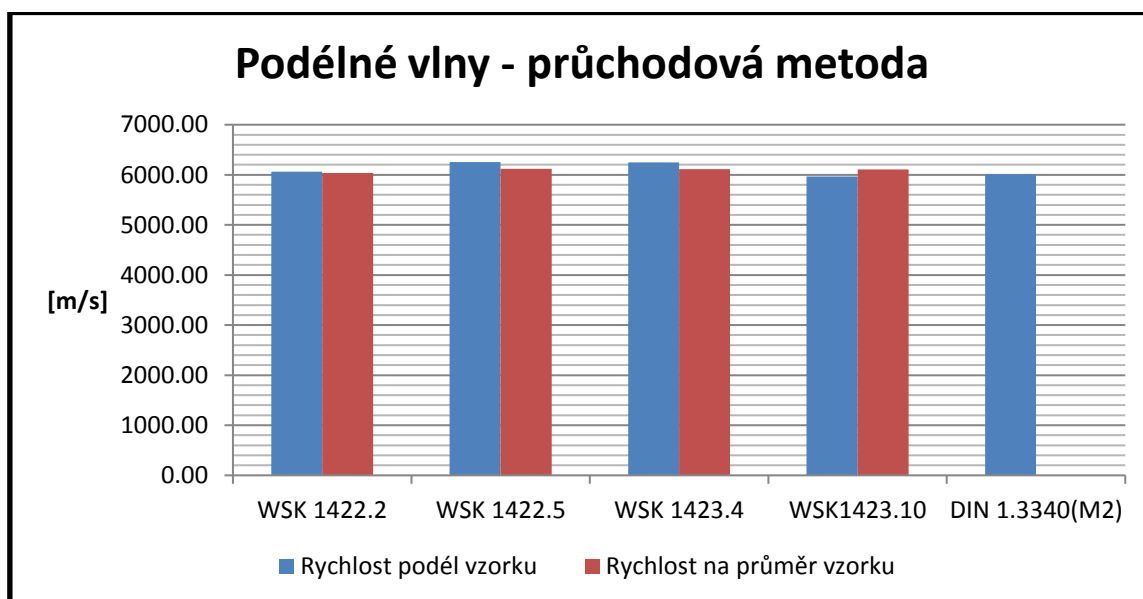
Tab. 27: Naměřené hodnoty rychlosti šíření ultrazvuku podélných vln u vzorků z komerčních sonotrod průchodovou metodou.

| Průchodová metoda, vysílací sonda NDT 4MHz, režim Peak, podélné vlny, Olympus EPOCH 1000i | | | | | | |
|---|------------|-------------|-----------------------|--------------------------------------|-------------------------|--|
| Vzorek | délka [mm] | průměr [mm] | čas podél. [μ s] | rychlost podél. [$m \cdot s^{-1}$] | čas na prům. [μ s] | rychlost na prům. [$m \cdot s^{-1}$] |
| WSK 1422.2 | 9,52 | 19,26 | 3,14 | 6063,69 | 6,38 | 6037,62 |
| WSK 1422.5 | 15,79 | 19,21 | 5,05 | 6253,47 | 6,28 | 6117,83 |
| WSK 1423.4 | 14,58 | 24,48 | 4,67 | 6244,111 | 8,01 | 6112,36 |
| WSK1423.10 | 19,78 | 21,98 | 6,63 | 5966,82 | 7,20 | 6105,56 |
| B1 | 28,90 | 14,03 | 9,62 | 6008,32 | 1,88* | 6053,19 |

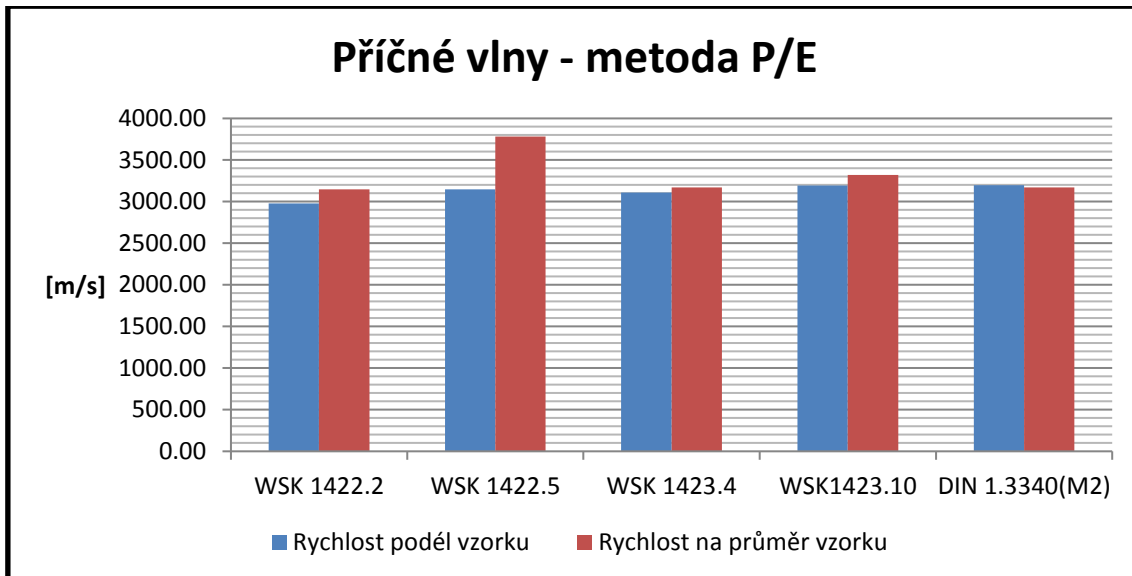
(* měřeno metodou P/E)

Tab. 28: Naměřené hodnoty rychlosti šíření ultrazvuku příčných vln u vzorků z komerčních sonotrod metodou P/E.

| Příčné vlny - metoda P/E, budící sonda Olympus 1MHz | | | | | | |
|---|------------|-------------|-----------------------|--------------------------------------|-------------------------|--|
| Vzorek | délka [mm] | průměr [mm] | čas podél. [μ s] | rychlost podél. [$m \cdot s^{-1}$] | čas na prům. [μ s] | rychlost na prům. [$m \cdot s^{-1}$] |
| WSK 1422.2 | 9,52 | 19,26 | 6,39 | 2979,66 | 12,24 | 3147,06 |
| WSK 1422.5 | 15,79 | 19,21 | 10,03 | 3148,55 | 10,16 | 3781,50 |
| WSK 1423.4 | 14,58 | 24,48 | 9,38 | 3108,74 | 15,44 | 3170,98 |
| WSK1423.10 | 19,78 | 21,98 | 12,38 | 3195,48 | 13,24 | 3320,24 |
| B1 | 28,90 | 5,69 | 18,08 | 3196,90 | 3,59 | 3169,92 |

Graf č. 4: Porovnání naměřených rychlostí podélných vln, naměřených průchodovou metodou.

Graf č. 5: Porovnání naměřených rychlostí příčných vln, naměřených metodou P/E.



11 Určení modulu pružnosti z naměřených hodnot

Pružnostní konstanty – modul pružnosti v tahu E , modul pružnosti ve smyku G a Poissonovu konstantu ν lze dopočítat z rychlosti šíření příčných, z rychlosti šíření podélných vln v materiálu a hustoty materiálu.

Pro rychlost šíření podélných vln platí vztah:

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1 - \nu}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}} \quad (45).$$

Pro rychlost šíření příčných vln platí vztah:

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (46).$$

Závislost modulu pružnosti v tahu na modulu pružnosti ve smyku vyjadřuje rovnice:

$$\frac{E}{G} = 2 \cdot (1 + \nu) \quad (47).$$

Vyjádřením modulu pružnosti v tahu a modulu pružnosti ve smyku z rovnic (45) a (46) a dosazením do rovnice (47) získáme následující vztah pro výpočet Poissonovy konstanty jen ze znalosti rychlosti příčných a podélných vln:

$$\nu = \frac{\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{c_L}{c_T}\right)^2 - 1}{\left(\frac{c_L}{c_T}\right)^2 - 1} \quad (48).$$

Úpravou rovnice (45) dostaneme vztah pro výpočet modulu pružnosti:

$$E = \rho \cdot c_L^2 \cdot \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{1 - \nu} \quad (49)[21].$$

Tab. 29: Určené hodnoty měrné hmotnosti zkoumaných vzorků, měřeno pomocí odměrného válce s vodou s přesností 1ml.

| | Hmotnost [g] | Měřené objemy [ml] | Průměrný objem [ml] | Hustota [kg·m ⁻³] |
|--|-----------------|----------------------------|------------------------|----------------------------------|
| WSK 1422.5 titan | 66,27 | 14,8; 14,5; 15 | 14,77 | 4486,8 |
| WSK 1422.2 titan | 64,83 | 14;14;14 | 14 | 4630,7 |
| WSK 1422.6 titan | 66,13 | 14,25;14,6;14,75 | 14,53 | 4551,27 |
| WSK 1423.10 (ocel nekalená) | 141,44 | 17,5;17,4;18 | 17,63 | 8022,7 |
| WSK 1423.4 titan | 95,58 | 21;21,3;21,5 | 21,27 | 4493,6 |
| B1 | 53,4427 | 6,7;6,8;6,5;6,7;6,8;6,6 | 6,68 | 8000,404 |
| Kovaná ocel 19830 | 694,7 | 86; 87; 86; 86,5; 86 | 86,3 | 8049,8262 |
| Kovaná ocel 19852 | 774,4 | 95,5; 95,5; 96;95,5; 96 | 95,7 | 8091,954 |
| Kov. ocel 19 830 kalená | 654,5 | 82;81;81;82;82;82 | 81,6 | 8020,5 |
| Kov. ocel 19 852 kalená | 774,4 | 96;96;98;97;98 | 97 | 7987,5 |

Vzorek kované oceli 19 830 byl zkrácen kvůli měření, proto jsou v tabulce 28 rozdílné hmotnosti před a po kalení. Hustota obou kalených materiálů klesla. Důvodem je o trochu větší objem martenzitické fáze oproti původní feriticko-perlitické.

Hodnoty v tabulkách č. 22 a č. 23 (uvedené níže) jsou vypočteny pomocí rovnice (49). Do výpočtu jsou za rychlost podélných vln dosazeny hodnoty naměřené průchodovou metodou z tabulek č. 16 (ocelové vzorky) a č. 19 (komerčně používané materiály). Za rychlost příčných vln hodnoty změřené metodou P/E z tabulek č. 18 pro ocelové vzorky a č. 21 pro komerčně využívané materiály. Dosazené rychlosti jsou brány z měření podélně, protože by měly být více vypovídající. Na délku se totiž více projeví nehomogenita struktury a s tím spojený útlum.

Rychlost podélných vln obecně v materiálu se dá spočítat pomocí rovnice (45). Jiným vztahem (21) lze popsat rychlost šíření podélných vln v tenkých tyčích, který platí s dostatečnou přesností a malými odchylkami i u silnějších tyčí a desek. Vyjádřením ze vztahu (21) získáme vztah pro modul pružnosti tenkých tyčí (50):

$$E = \rho \cdot c_L^2(50).$$

Tab. 30: Vypočtený modul pružnosti v tahu E a Poissonova ν konstanta u ocelových vzorků.

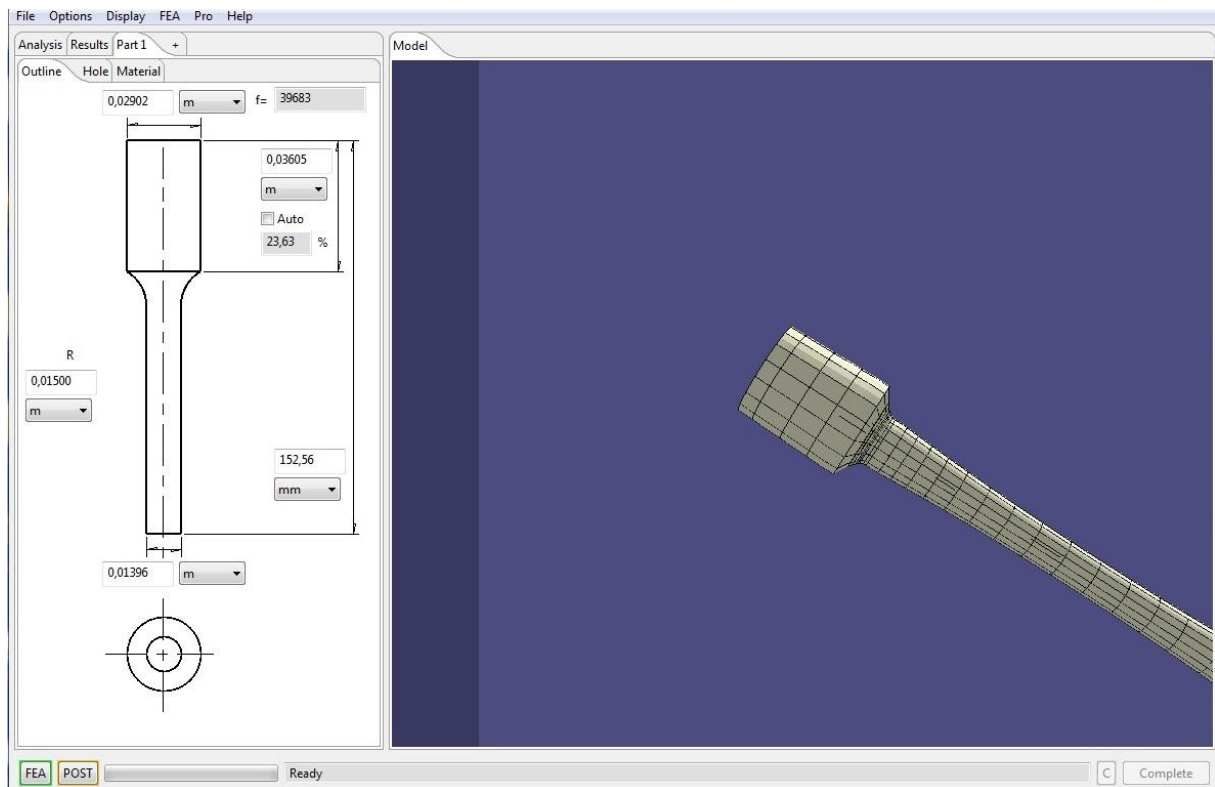
| Vzorek | Hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] | Poiss.k. ν [-] | E [Pa] | E [GPa] | E - tenká tyč [GPa] |
|------------------|--|-----------------------|-----------------|------------|------------------------|
| 19 830 | 8049,83 | 0,293953315 | 212778268493,79 | 212,78 | 281,74 |
| 19 830 po kalení | 8020,50 | 0,292689755 | 213124502887,86 | 213,12 | 281,25 |
| 19 852 | 8091,954 | 0,282699167 | 220425695972,64 | 220,43 | 283,63 |
| 19 852 po kalení | 7987,5 | 0,286612816 | 216153575069,59 | 216,15 | 280,83 |

Tab. 31: Vypočtený modul pružnosti v tahu E a Poissonova ν konstanta u komerčně používaných materiálů.

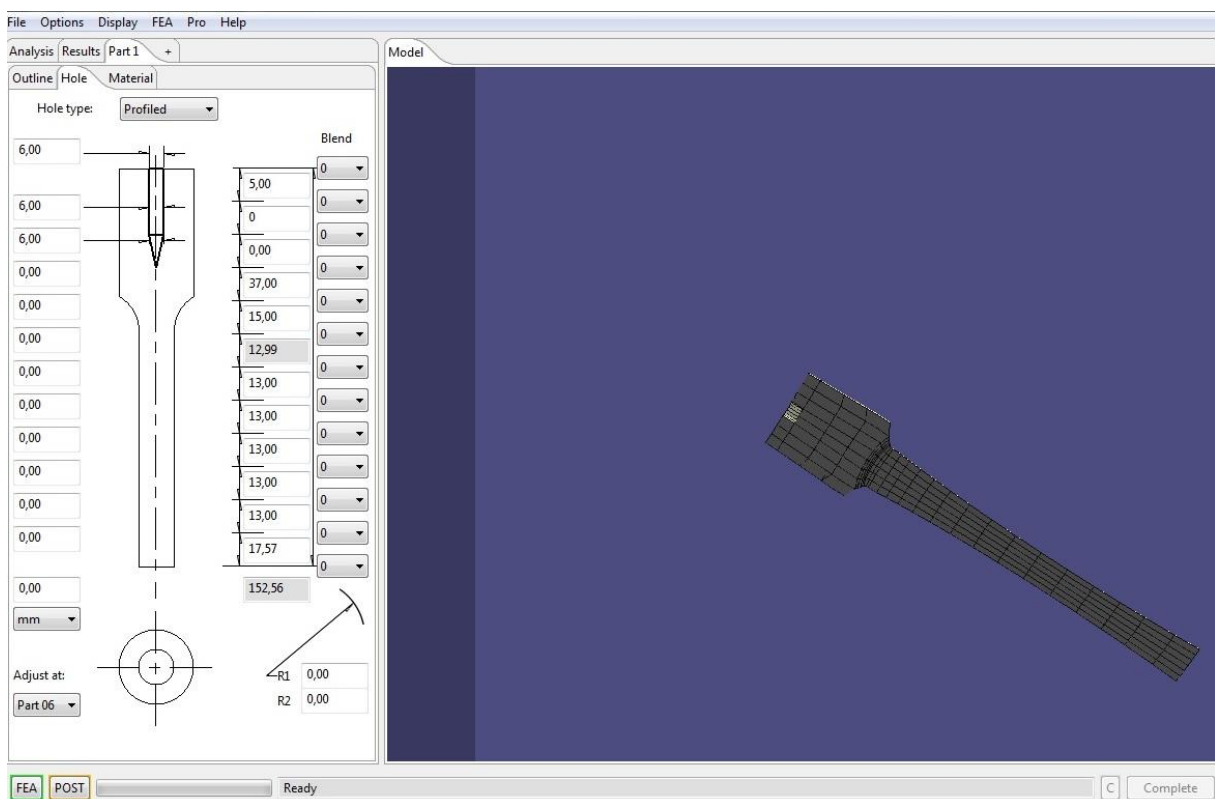
| Vzorek | Hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] | Poiss.k. ν [-] | E [Pa] | E [GPa] | E - tenká tyč [GPa] |
|------------|--|-----------------------|-----------------|------------|---------------------|
| WSK 1422.2 | 4630,7 | 0,340833 | 110251245076,07 | 110,25 | 170,26 |
| WSK 1422.5 | 4486,8 | 0,330206 | 118333586695,09 | 118,33 | 175,46 |
| WSK 1423.4 | 4493,6 | 0,335219 | 115970184150,98 | 115,97 | 175,20 |
| WSK1423.10 | 8022,7 | 0,29893 | 212817628626,56 | 212,82 | 285,63 |
| B1 | 8000,404 | 0,302544 | 213006663421,34 | 213,01 | 288,81 |

12 Simulace










Pokus o simulaci stupňovité sonotrody z firmy Megatech Boshoku proběhl v software Sonoanalyzer. V daném programu lze nadefinovat materiál, ze kterého chceme vyrobit sonotrodu. Jako parametry materiálu se zadává modul pružnosti, Poissonova konstanta a hustota materiálu. Software je schopen z těchto hodnot dopočítat rychlost šíření ultrazvuku. Pomocí tohoto programu lze částečně simulovat ladění sonotrody. Po zadání rozměrů sonotrody a materiálových vlastností, nám program vypočte hodnotu vlastní frekvence sonotrody. Na obrázcích 21 a 22 lze vidět výsledky simulace. Zadané rozměry byly zjištěny pomocí 3D skenu provedeném na RTI (obrázek 23). Pro zadané rozměry byla zjištěna vlastní frekvence 39 683 Hz. Frekvenci lze upravovat volbou rozměrů jednotlivých částí sonotrody. Frekvenci lze snížit buď zkrácením širší části či prodloužením celkové délky.



Obrázek 21: Výpočet vlastní frekvence a volba vnějších rozměrů sonotrody v SW Sonoanalyzer.



Obrázek 22: Nastavení rozměrů díry sonotrody.

| | Měř.hod. | Jm.hod. | Horní tol. | Dolní tol. | Odchylka |
|--|-------------------------------|---------|------------|------------|----------|
|  | Celkový výsledek | | | | |
| | Všechny charakteristiky: | | | | |
| | | 9 | | | |
| | ...v toleranci: | | | | |
| | | 6 | | | |
| | ...Mimo toleranci: | | | | |
| | | 3 | | | |
| | ...Nad výstražnou mezí: | | | | |
| | | 0 | | | |
| | ...Nevypočteno: | | | | |
| | | 0 | | | |
| | Souř.systémů celkem: | | | | |
| | | 0 | | | |
| | ...Nevypočteno: | | | | |
| | | 0 | | | |
| | Text. elementů celkem: | | | | |
| | | 0 | | | |
|  | Průměr tela sondy | 13.932 | 13.956 | | -0.024 |
|  | Válcovitost tela sondy | 0.014 | 0.000 | 0.000 | 0.014 |
|  | Průměr upnutí sondy | 28.985 | 29.015 | | -0.030 |
|  | délka celková_Z | 152.561 | 152.563 | | -0.002 |
|  | Delka hrotu sondy od roviny_Z | 1.158 | 1.168 | | -0.010 |
|  | Delka sondy bez hrotu_Z | 151.404 | 151.395 | 0.200 | 0.009 |
|  | Rovinnost1 | 0.005 | 0.000 | 0.000 | 0.005 |
|  | Průměr vrsku sondy | 13.953 | 13.958 | | -0.004 |

Obrázek 23 Vyhodnocení rozměrů pomocí 3D skenu.

13 Závěr

Bylo provedeno měření rychlosti ultrazvuku u komerčně používaných sonotrod z titanu a nekalené oceli, používané ve firmě Hutchinson v Rokycanech, a u sonotrody z práškové oceli z firmy Megatech Boshoku a.s. v Plzni. Dále byla rychlost ultrazvuku měřená u nástrojových ocelí ČSN EN 1982 a 19830, zpracovaných kováním v různých směrech a pomalu ochlazovaných v pecích - tj. v nezakaleném stavu. Vzorky kovaných ocelí, byly po změření zakaleny a opět proměřeny. Dále byly zjištěny hodnoty měrné hmotnosti pro jednotlivé materiály, kdy bylo dosaženo vysoké shody s tabulkově uváděnou hustotou [23] pro materiály sonotrod z titanu. Lze tedy očekávat dostatečnou přesnost i u ostatních materiálů.

Rychlost šíření ultrazvuku u ocelových vzorků, byla změřena u kovaných ocelí 19 830 a 19852. Opakovaným petchováním a prodlužováním těchto ocelí vznikla vysoce protvářená struktura. Petchování a prodlužování proběhlo ve směrech tří souřadnicových os za účelem potlačení řádkovistosti karbidů, rozdrčení karbidů a jejich rovnoměrnému rozmístění v materiálu. Výsledná struktura by se měla blížit práškovým ocelím. Z tohoto důvodu proběhlo měření rychlosti šíření ultrazvuku i na vzorkách fréz, které byly vyrobeny právě práškovou metalurgií (vzorek ocele ASP 2052). Z výsledků měření je vidět, že rychlost podélných vln na délku vzorků, je vždy o něco vyšší u práškových ocelí. Hodnota rychlosti ultrazvuku na délku vzorku ASP 2052.2 se výrazně liší. Tento vzorek byl již dříve podroben analýze struktury v rámci objednávky zpracované na KMM. Struktura byla vyhodnocena v některých místech nehomogenní. To mohlo způsobit odchylku hodnot rychlosti. Na průměry všech ocelových vzorků jsou hodnoty různé, ale směrodatnější by měly být hodnoty měřené na délku (větší vzdálenost), kdy se může lépe projevit nehomogenita materiálu a tím i útlum ultrazvuku (rozptyl). Po kalení ocelových vzorků 19 830 a 19 852 rychlost šíření ultrazvuku nepatrně vzrostla. Hustota těchto materiálů se kalením trochu snížila z důvodu

většího objemu martenzitické fáze, než fáze původní. To se projevilo i změnou modulu pružnosti, kdy jeho hodnota vzrostla a při použití výpočtu pro tenké tyče klesla. U vzorku ocele 19 852 tomu tak není. Rychlost šíření příčných vln na délku tohoto vzorku po zakalení byla naměřena nižší a tím pádem i vypočítaný modul pružnosti se zvýšil. Podle ostatních naměřených hodnot lze však předpokládat, že došlo k chybnému měření, neboť ostatní hodnoty měřených rychlostí po zakalení narostly. Vypočtené hodnoty modulu pružnosti vyšly v rozmezí 212 až 220 GPa. Podle vzorce pro tenké tyče pak okolo 280 GPa.

Vzorky materiálu s označením WSK byly připraveny k měření z vyřazených sonotrod z firmy Hutchinson. Jedná se o titanové sonotrody a ocelovou sonotrodu s označením WSK 1423.10. Ocelová sonotroda s označením DIN 1.3340 pochází z firmy Boshoku. Rychlost podélných vln změřených průchodovou metodou se příliš neliší. Nejnižší hodnotu vykazuje ocelová sonotroda WSK 1423.10. Výpočet Poissonova čísla 0,34 a modulu pružnosti v tahu okolo 115 GPa pro titan odpovídá uváděným tabulkovým hodnotám [22]. Pro ocelové vzorky s označením WSK 1423.10 a DIN 1.3340 vyšel modul pružnosti okolo 213 GPa stejně jako u předchozích ocelových vzorků.

Naměřené hodnoty částečně posloužili při seznámení se s programem SonoanalyzerPro, který slouží k simulaci ladění sonotrod. Vedlejším přínosem práce je zjištění, že měřením rychlosti ultrazvuku po korelaci se strukturní analýzou, provedenou metalografickými metodami, se mohou tyto metody využít pro odhad strukturní homogenity po kování nedestruktivní metodou, která je rychlá a levná.

14 Zdroje

- [1] Dostupné z [vid. 24.9.2017]: <http://www.fyzika007.cz/mechanicke-kmitani-a-vlneni/vznik-a-druhy-vlneni>
- [2] LEPIĽ, O.: Fyzika pro gymnázia: Mechanické kmitání a vlnění. Prometheus, 2007, ISBN: 978-80-7196-387-5
- [3] Dostupné z [vid. 24.9.2017]:
http://www.walter-fendt.de/ph14cz/stwaverefl_cz.htm
- [4] Doc. Ing. Richard Nový, CSc. a Ing. Miroslav Kučera, SNIŽOVÁNÍ HLUKU A VIBRACÍ, Praha 2009, Evropský sociální fond Praha & EU: Investujeme do vaší budoucnosti, dostupné z [vid. 18.10.2017]:
https://ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni_materialy/SHV/Novy_Kucera_Snizovani_hluku_a_vibraci.pdf
- [5] Dostupné z [vid. 20.10.2017]:
http://www.studopory.vsb.cz/studijnimaterialy/Fyzikaprobakalare/PDF/1_8_3_akustika.pdf
- [6] OBRAZ, J., CSc.: Zkoušení materiálu ultrazvukem. STNL Nakladatelství technické literatury, Praha, 1989, ISBN: 80-03-00097-1
- [7] Dostupné z [vid. 31.10.2017]:
http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__svarovani_ultrazvukem__mrna.pdf
- [8] Dostupné z [vid. 31.10.2017]:
<http://homen.vsb.cz/~hla80/2009svarovani/2-06-41.pdf>
- [9] Dostupné z [vid. 31.10.2017]:
<http://www.atcp-ndt.com/products/piezo-and-ultrasonics/trz-horn-analyzer/ultrasonic-technology.html>
- [10] Dostupné z [vid. 2.11.2017]:
https://www.researchgate.net/publication/292888404_Analysis_of_Different_Shaped_Sonotrodes_used_for_Plastic_Welding?enrichId=rgreq-25aaca5bb4421c18fd2eb8754de1b93b-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI5Mjg4ODQwNDtBUzozMjQ5NjU5MTQ2MTE3MzhAMTQ1NDQ4OTMxOTYzOA%3D%3D&el=1_x_2&_esc=publicationCoverPdf
- [11] ZVEI Handbook - Ultrasonic assembly of thermoplastic mouldings and semi-finished products - Recommendations on methods, construction and applications
Dostupné z [vid. 2.11.2017]:
<http://www.powerultrasonics.com/content/sonotrode-design-and-manufacturing-instructions-zvei-handbook>

[12] Dostupné z [vid. 2.11.2017]:

http://www.doctorate-posdru.ulbsibiu.ro/media/phd/file_31b_bdi_journal_full_article_000165.pdf

[13] Dostupné z [vid. 2.11.2017]:

https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=65907

[14] Dostupné z [vid. 2.11.2017]:

<http://www.bolzano.cz/assets/files/ASP2023-1.pdf>

[15] Dostupné z [vid. 2.11.2017]:

http://www.bolzano.cz/assets/files/materialove_listy/ASP2053-1.pdf

[16] Technická zpráva KMM v rámci objednávky 4500161981 ze dne 6. 3. 2015

[17] Dostupné z [vid.]:

http://www.ccsteels.com/Tool_steel/3940.html

[18] Dostupné z [vid.]:

<http://www.proal.cz/info/424201.htm>

[19] Dostupné z [vid. 1.12.2017]:

<https://www.dew-stahl.com/en/products/special-materials/ferro-titanit/>

[20] Dostupné z [vid. 1.12.2017]:

<http://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/nastrojove-oceli/nastrojove-oceli-rychlomezne/materialove-listy/materialovy-list-oceli-hs-6-5-2-5>

[21] Dostupné z [vid.7.4.2018]:

<https://www.helago-cz.cz/files/3b-navody/sireni-zvuku-v-pevnych-latkach-ue107053cz.pdf>

[22] Dostupné z [vid.7.4.2018]:

<http://www.prvky.com/tvrdest-kovu.html>

[23] Dostupné z [vid.7.4.2018]:

<http://www.prvky.com/22.html>

[24] Dostupné z [vid. 15.5.2018]:

http://www.bolzano.cz/assets/files/materialove_listy/ASP2052-1.pdf

[25] Dostupné z [vid. 15.5.2018]:

<http://steelselector.sij.si/steels/CRV1.html>

[26]

DAVIS J.R.: Tool Materials, ASM SPECIALTY HANDBOOK, 1998, ISBN: 978-0-87170-545-7

Zdroje obrázků

[1] Dostupné z [vid.7.4.2018]:

<http://www.fyzika007.cz/mechanicke-kmitani-a-vlneni/vznik-a-druhy-vlneni>

[2] Dostupné z [vid.7.4.2018]:

http://www.fyzika007.cz/mechanicke-kmitani-a-vlneni/chveni-mechanickych-soustav/struna_dve.gif?attredirects=0

[3] Doc. Ing. Richard Nový, CSc. a Ing. Miroslav Kučera, SNIŽOVÁNÍ HLUKU A VIBRACÍ, Praha 2009, Evropský sociální fond Praha & EU: Investujeme do vaší budoucnosti, dostupné z [vid.18.10.2017]:

https://ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni_materialy/SHV/Novy_Kucera_Snizovani_hluku_a_vibraci.pdf

[4] Dostupné z [vid.7.4.2018]:

<http://www.atcp-ndt.com/products/piezo-and-ultrasonics/trz-horn-analyzer/ultrasonic-technology.html>

[5] Dostupné z [vid.7.4.2018]:

<http://usblog.dukane.com/2010/>

[6] ZVEI Handbook - Ultrasonic assembly of thermoplastic mouldings and semi-finished products - Recommendations on methods, construction and applications

Dostupné z [vid. 2.11.2017]:

<http://www.powerultrasonics.com/content/sonotrode-design-and-manufacturing-instructions-zvei-handbook>

[7] Dostupné z [vid. 2.11.2017]:

http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__svarovani_ultrazvukem__mrna.pdf