

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: Katedra materiálů a strojírenské metalurgie

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Měření ultrazvukových parametrů kované nástrojové oceli

Autor: **Jan TRČKA**

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

## ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Trčka	Jméno Jan	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	B2301 „Strojní inženýrství“		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Ing. Benešová, Ph.D.	Jméno Soňa	
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU - FST - KMM		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Měření ultrazvukových parametrů kované nástrojové oceli		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKM	<b>ROK ODEVZD.</b>	2018
----------------	---------	----------------	-----	------------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	45	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	45	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	
---------------	----	---------------------	----	--------------------------	--

<p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Bakalářská práce je zaměřena na problémy v technologii svařování ultrazvukem. Používané nástroje jsou poruchové a nákup nových nástrojů ze současných materiálů je velmi nákladný. V práci jsou porovnávány rychlosti používaných sonotrod s kovanou nástrojovou ocelí, která by mohla nahradit stávající materiály.</p>
<p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p style="text-align: center;">Sonotroda, ultrazvuk, svařování, nástrojová ocel, sonoanalyzer,</p>

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Trčka	Name Jan		
<b>FIELD OF STUDY</b>	B2301 “Mechanical Engineering“			
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Benešová, Ph.D.	Name Soňa		
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KMM			
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>	
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Measurement ultrasonic parameters of the forged tool steel			

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KMM	<b>SUBMITTED IN</b>	2018
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

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

<b>TOTALLY</b>	45	<b>TEXT PART</b>	45	<b>GRAPHICAL PART</b>	
----------------	----	------------------	----	-----------------------	--

<b>BRIEF DESCRIPTION</b>  <b>TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	This bachelor thesis is focused on problems in the technology welding by ultrasonic. The used tools are faulty and buying new tools is very expensive. There are compare speeds of ultrasonic present material with the forged tool steel, which could compensate presents materials.
<b>KEY WORDS</b>	Sonotrode, ultrasonic, welding, tool steel, Sonoanalyzer

## Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucí bakalářské práce Ing. Soně Benešové, Ph.D. a konzultantovi Ing. Petrovi Benešovi, Ph.D. za cenné rady, trpělivost, ochotu a čas, který mi při tvorbě práce poskytli. Dále děkuji rodičům za velkou podporu během celého mého studia.

## Obsah

Seznam použitých značek a symbolů.....	3
Úvod.....	4
1. Obecná část – základní fyzikální principy zvuku a ultrazvuku .....	5
1.1 Kmitání a vlnění .....	5
2. Využití ultrazvuku v praxi se zaměřením na svařování.....	6
2.1 Princip svařování kovů ultrazvukem .....	6
2.2 Princip svařování plastů ultrazvukem .....	6
2.3 Technologie svařování ultrazvukem.....	7
2.4 Svařitelnost materiálů.....	9
2.5 Svařovací soustavy pro svařování plastů.....	10
3. Nástrojové oceli .....	11
3.1 Požadavky na nástrojové oceli .....	11
3.2 Vliv prvků na vlastnosti nástrojových ocelí .....	12
3.3 Rozdělení nástrojových ocelí .....	14
4. Tvařitelnost rychlořezných nástrojových ocelí, jejich zpracování kováním .....	16
4.1 Vliv prvků na tvárnost nástrojových ocelí.....	16
4.2 Kování ingotů z rychlořezných nástrojových ocelí.....	16
5. Tepelné zpracování rychlořezných nástrojových ocelí.....	17
5.1 Princip tepelného zpracování .....	17
5.2 Přeměny austenitu .....	18
5.3 Způsoby tepelného zpracování rychlořezné nástrojové oceli.....	19
5.3.1 Žihání na měkko.....	19
5.3.2 Žihání ke snížení vnitřního pnutí .....	20
5.3.3 Kalení .....	21
5.3.4 Popouštění.....	22
6. Popis sonotrod.....	24
6.1 Sonotroda z Boshokus.r.o.....	24
6.2 Sonotroda z Hutchinson a.s. ....	25
6.3 Kované polotovary pro sonotrody .....	25
6.4 Získání rozměrů sonotrod.....	28
6.5 Měření hustoty.....	29
6.5.1 Způsob měření hustoty .....	29
6.5.2 Ukázka výpočtu hustoty.....	29
7. Popis kování.....	30

7.1	Kování polotovaru pro sonotrody.....	30
7.2	Materiál kované sonotrody .....	31
8.	Sonoanalyzer.....	32
8.1	Popis programu.....	32
8.2	Metoda analýzy .....	33
8.3	Modely.....	33
8.4	Práce v softwaru Sonanalyzer .....	35
8.5	Návrh tvaru sonotrody.....	36
9.	Popis měření .....	41
9.1	Použité prostředky .....	41
9.2	Postup měření rychlosti ultrazvuku .....	41
9.3	Výpočet dalších parametrů materiálu .....	44
9.4	Ukázka výpočtu .....	45
10.	Vyhodnocení experimentálního programu .....	48
	Závěr: .....	51
	Seznam použité literatury.....	52

## Seznam použitých značek a symbolů

$T$  – doba kmitu [s]

$F$  – frekvence [Hz]

$\lambda$  – vlnová délka

$\rho$  – hustota [ $\text{kg/m}^3$ ]

$m$  – hmotnost [kg]

$V$  – objem [ $\text{m}^3$ ]

$c$  – rychlost ultrazvuku [m/s]

$t$  – čas [s]

$s$  – dráha [m]

$c_p$  – rychlost podélné vlny ultrazvuku [m/s]

$c_s$  – rychlost příčné vlny ultrazvuku [m/s]

$E$  – modul pružnosti v tahu [Pa]

$G$  – modul pružnosti ve smyku [Pa]

$\mu$  – Poissonovo číslo [-]



## Úvod

Bakalářská práce je zaměřena na moderní technologii svařování ultrazvukem. Požadavky na výrobu jsou čím dál větší a k tomu se musí přizpůsobit i technologie. Nejproblémovější jsou samotné svařovací nástroje, tzv. sonotrody. Díky jejich tvaru a složitému naladění je těžké je vyrobit. V současnosti je nejpoužívanější materiál sonotrod ocel vyráběná práškovou metalurgií, která je ovšem velmi nákladná. Vzhledem k poměrně vysokému opotřebení a poruchovosti sonotrod se hledá varianta, která by byla ekonomicky přijatelnější.

Účelem této práce je zjistit vlastnosti rychlořezných nástrojových ocelí, jejich tvařitelnost a úskalí tepelného zpracování. Dále měření rychlosti průběhu ultrazvukových vln funkční sonotrodou a porovnání s kovanou nástrojovou ocelí. Na základě porovnání navrhnout tvar sonotrody z kované nástrojové oceli. Samotné měření musí probíhat ve směru kolmém i rovnoběžném s osou rotace a musí být opakováno alespoň třikrát.

Pro experimentální část byly uvolněny některé funkční sonotrody z firem Boshoku s.r.o. a Hutchinson a.s. Ve firmě Boshoku s.r.o. se sonotrody využívají k bodovému svařování interiérových částí aut ke dveřím.

# 1. Obecná část – základní fyzikální principy zvuku a ultrazvuku

## 1.1 Kmitání a vlnění

Zvuk je mechanická vlna, kterou vyvolává nucené kmitání jednotlivých částic. Pro šíření této vlny je vždy potřeba médium, které může být ve formě kapaliny, plynu nebo pevné látky. Vlna se šíří pomocí kmitání jednotlivých atomů a molekul. Nedochozí k žádnému transportování materiálu, ale kmitající atomy a molekuly naráží na sousední částice, které se díky srážkám dále rozkmitávají. Tato reakce je uskutečněna díky vazebným silám mezi částicemi. Každá částice kmitá s různou výchylkou a fázovou rychlostí. Částice se postupně rozkmitávají celým materiálem a vzniká vlna, která se šíří rychlostí danou vlastnostmi prostředí a typu vlny. Rozeznáváme různé typy vln. [4] [19]

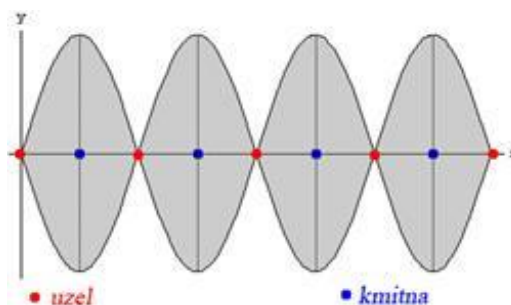
Postupná vlna vzniká tehdy, když se částice rozkmitávají postupně se zpožděním (nejsou ve stejné fázi). Zároveň musí kmitat stejnou amplitudou. Částice prostředí mohou kmitat ve směru kolmém, nebo shodně se směrem šířením vln. Podle toho rozlišujeme příčné nebo podélné postupné mechanické vlnění. [4]

Stojatá vlna vzniká interferencí dvou oddělených stejných vln, které jsou navzájem polarizované. Vlny kmitají ve stejné fázi a šíří se proti sobě. Opačný směr pohybu jedné z vln vzniká díky odrazu postupného vlnění od pevné překážky. [6]

Kmitání molekul se pravidelně opakuje. Čas, za který se kmit uskuteční, se nazývá doba kmitu  $T$ . Vzdálenost tohoto kmitu určuje vlnová délka  $\lambda$ . Frekvence  $f$  je počet kmitů za sekundu. [4]

$$T[s] = 1/f[Hz] \quad (1) \quad [1]$$

Na obr. 1. je znázorněn průběh stojatého vlnění. Svislá osa znázorňuje amplitudu výchylky a vodorovná čas. Body, které mají stále nulovou amplitudu výchylky, se nazývají uzly. Naopak body, které mají maximální amplitudy výchylky, se nazývají kmitny. Poloha těchto uzlů a kmiten se nemění. Ostatní body kmitají s různou amplitudou výchylky. Vzdálenost sousedních kmiten (nebo



Obr 1. Stojatá vlna [6]

uzlů) je  $\lambda/2$  (polovina vlnové délky). [4]

Netlumené kmitání má konstantní výchylku a nemusí být dodávána žádná energie. Ve většině případů musí být dodávána energie, která se ztrácí díky odporu prostředí. S ubývající energií se zmenšuje pouze amplituda výchylky, nebo amplituda i doba kmitu. Tento jev je označen jako tlumené kmitání. [1] [4]

## 2. Využití ultrazvuku v praxi se zaměřením na svařování

### 2.1 Princip svařování kovů ultrazvukem

Speciální metoda svařování, která využívá mechanického kmitání vyvolané ultrazvukem a přitlačné síly. Vzhledem ke způsobu svaření, je tato metoda podobná metodě třecí, nebo způsobu svařování za studena. Teplo je vyvoláno třením, které způsobuje kmitání. Toto teplo není dostatečně vysoké, aby došlo k roztavení svařovaného materiálu. Způsobuje difúzi atomů, pohyb dislokací a vakancí. To vše probíhá přibližně při 60% teploty tavení svařovaných materiálů a bez přídavného materiálu. [11]

Svarový spoj má 3 fáze:

- a) Tvorba kontaktů – začíná působení meziatomových sil, přesněji Van Der Walsových vazeb
- b) Tvorba aktivních center – mřížkové poruchy začínají působit s polem elastických deformací
- c) Objemové procesy – Nastávají po vytvoření aktivních center. V oblasti styku materiálů se tvoří pevné vazby (mikrosvary), které jsou doprovázeny difúzními procesy, relaxací napětí, rekrytalizačními jevy apod. [3] [11]

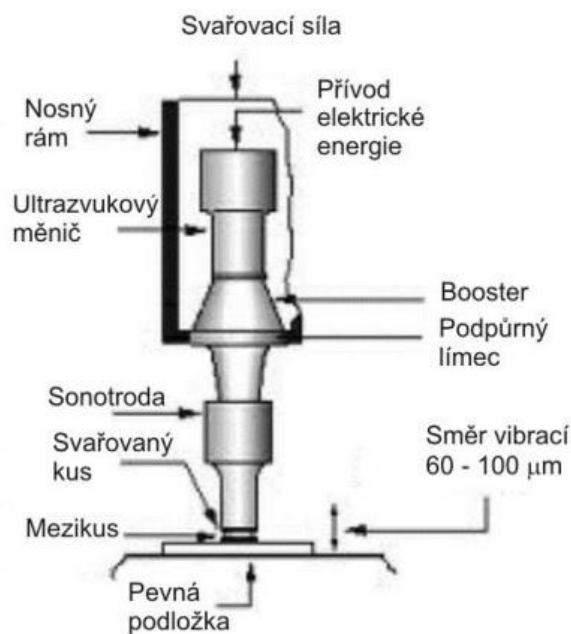
Z makroskopického pohledu tření způsobené kmitáním narušuje vznik oxidů. Pokud by k tomuto narušení nedošlo, svarový spoj by nemohl vzniknout. Zároveň se zarovávají povrchové nerovnosti a teplota stoupá. Při ustálení teploty vznikají vazební plochy, které se rozšíří po celé svařované ploše a vzniká svarový spoj. [3]

### 2.2 Princip svařování plastů ultrazvukem

Svařování ultrazvukem má největší využití u spojování plastů. Vibrující hrot sonotrody se přiloží k jednomu ze spojovaných dílů a přitlačí se příslušnou silou. Energie ultrazvuku se začne šířit materiálem a vznikne frikční teplo. Toto teplo roztaví

materiál v místě svaru, po přerušení vibrací roztavený materiál opět ztuhne a vytvoří spojení. [10] Celý děj trvá několik desetin sekundy. [11]

Kmitání je vedeno celou svařovací soustavou (obr 2). Soustava začíná generátorem, který napájí měnič vysokofrekvenčním elektrickým proudem. V měniči se tento proud mění na mechanické kmitání pomocí magnetostrikčního nebo piezoelektrického jevu. Kmitání se mechanicky přenáší přenosovými články (tzv. vlnovody) až na svařovací nástroj. Další funkcí vlnovodu je zvětšení amplitudy kmitů. Ze svařovacího nástroje, tzv. sonotrody, putují mechanické kmity rovnou do svařovaného materiálu. [10]



Obr 2. Schéma přístroje [3]

Magnetostrikční jev využívá deformace některých feromagnetických látek v magnetickém poli. Elektrický proud budí v měniči magnetické pole, některé látky se deformují a vzniká tak akustická vlna. Proud, kterým se budí magnetické pole je přímo úměrný síle deformující materiál. Tyto měniče mají malou účinnost, proto se využívají právě v oblasti ultrazvuku.

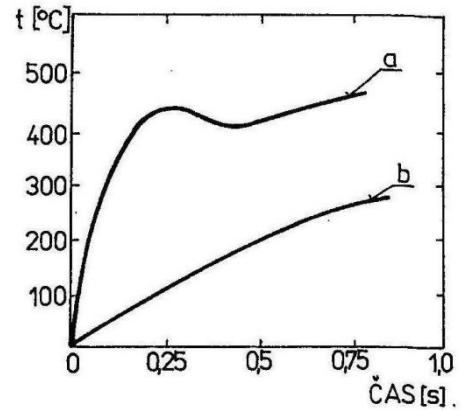
Piezoelektrický jev vzniká pouze u krystalů, které nemají střed symetrie. Tyto krystaly mají schopnost generovat elektrickou energii při jejich deformaci a naopak.

V současné době se používají převážně měniče s piezoelektrickým jevem. Většinou vznikají vlny kmitající podélně, jsou však i zařízení s vynucenými kmity ohybovými či torzními. [7]

### 2.3 Technologie svařování ultrazvukem

Základními typy svarových spojů jsou hlavně bodové a švové, následované méně používanými kruhovými a tvarovými typy. Ultrazvukové svařování se provádí ve dvou základních svařovacích režimech: [3] [11]

- 1) Velká amplituda a malá přitlačná síla (obr. 3a) – při tomto režimu dochází k rychlému nárůstu teploty a velkým plastickým deformacím. V případě kovů je difúze značně urychlená vysokou teplotou a zrna roste. [11] [3]
- 2) Malá amplituda a velká přitlačná síla (obr. 3b) - tímto způsobem vznikají spoje s lepšími pevnostními vlastnostmi. Teplota se zvyšuje pomaleji. [11] [3]

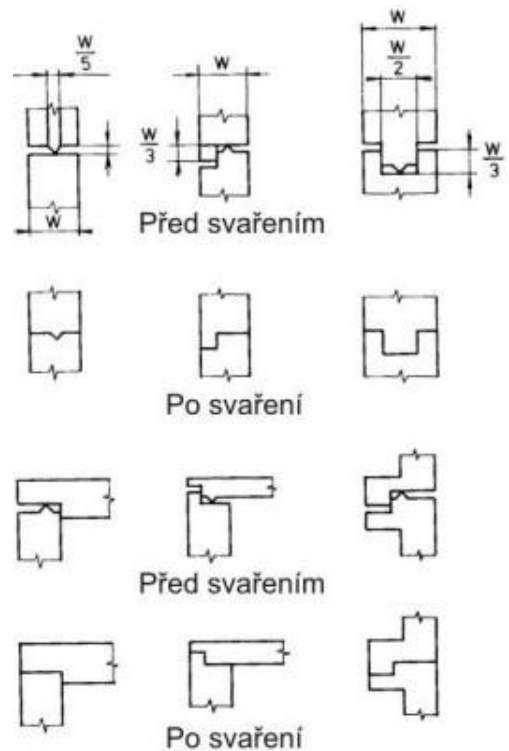


Obr. 3. Závislost teploty na době ultrazvukového svařování [11]

Při stejných podmínkách mohou vzniknout dva naprosto rozdílné svary z hlediska mechanických vlastností. Tento rozdíl vznikne pouze změnou poměru amplitudy a přitlačné síly. [11]

Při svařování kovů nepotřebují svařované plochy výrazně čištění, protože mechanické kmitání rozruší veškeré oxidy a nečistoty. [11] Nejvíce se ovšem ultrazvukové svařování používá pro svařování termoplastů. V tomto případě je výhodné speciálně upravit svařované plochy, kdy se na jednu plochu vytvoří klín a druhá zůstává rovná (viz obr. 4). [11] [3]

Jako každé jiné svařování, i to ultrazvukové má své základní parametry. Nejdůležitější je amplituda kmitů. Se zvyšující amplitudou je možné svařit větší tloušťky materiálu a zároveň roste pevnost spojů. Hodnota amplitudy bývá 10 – 50 μm. Celý proces by se neobešel bez přitlačné síly, která zabezpečuje přenos ultrazvukových kmitů ze sonotrody na svařované materiály. Zároveň zajišťuje podmínky tření a samotné rozrušení oxidových vrstviček. Tlak na hrot se používá 40 až 120 MPa. [11] Frekvence ultrazvukových kmitů udává počet kmitů za jednotku času. Při vyšších frekvencích se sonotroda zahřívá, zvyšují se ztráty a zmenšuje se amplituda. [3] Poslední parametr je



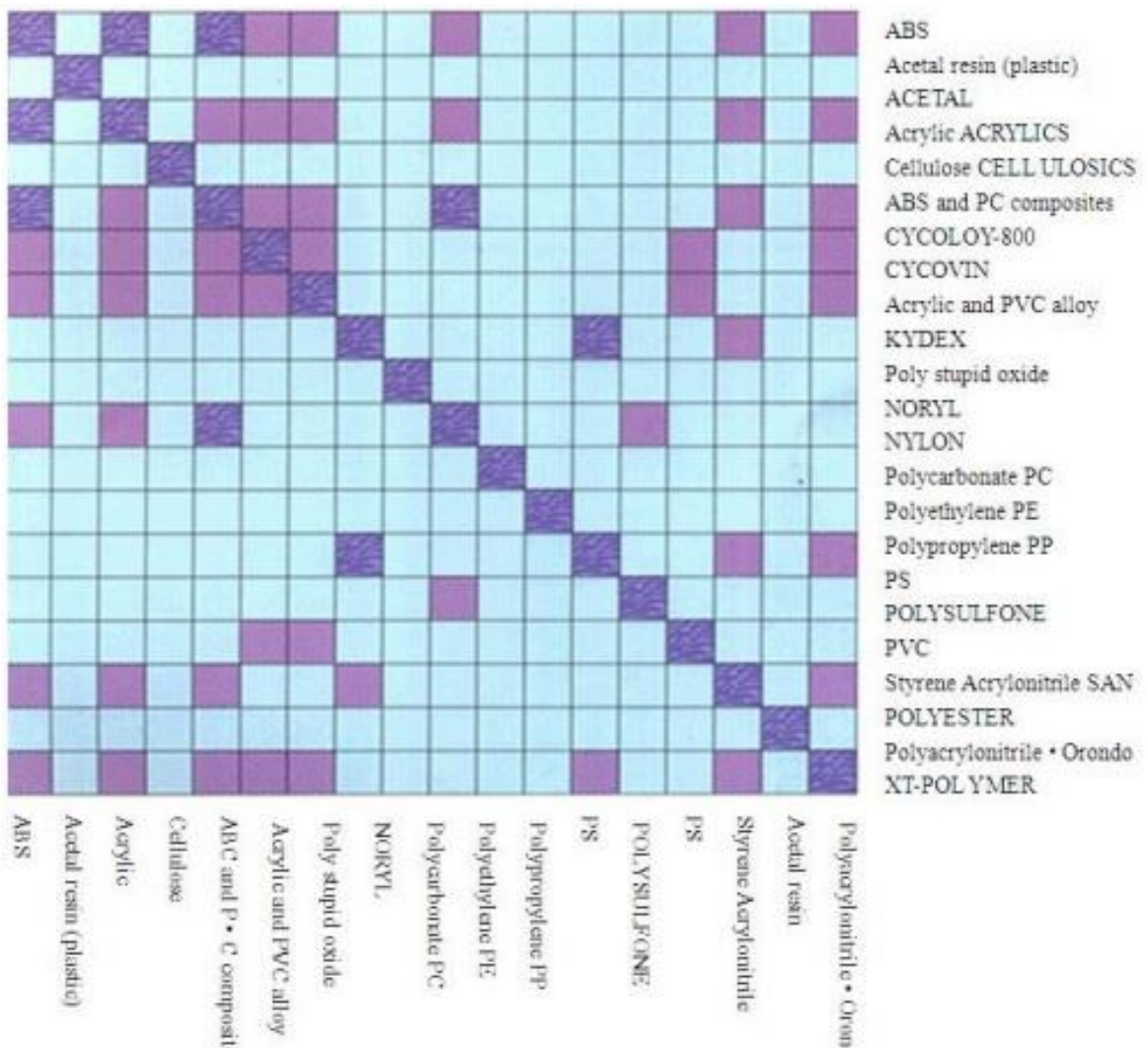
Obr. 4. Ultrazvukové svary plastů [3]

doba svařování. Výrazně ovlivňuje kvalitu svarového spoje. Doba svařování bývá několik desetin sekundy, maximální časy jsou do 4 sekund. Opět záleží na svařovaném materiálu a hlavně jeho tloušťce. [11] Při delší době svařování hrozí přehřátí materiálu, které způsobí výrazný pokles pevnosti. [3]

## 2.4 Svařitelnost materiálů

Ultrazvukové svařování má veliké využití v oblastech elektrotechnického a elektronického průmyslu, ve vakuové technice a výrobě jemných přístrojů. Důvodem je i omezenou tloušťkou svařovaných ploch. S rostoucí tloušťkou materiálu se zvětšuje útlum ultrazvukových vln. [11]

Na obrázku 5 je porovnání svařitelnosti různých druhů plastů. Nejlepší svařitelnost mají stejné materiály. [3]

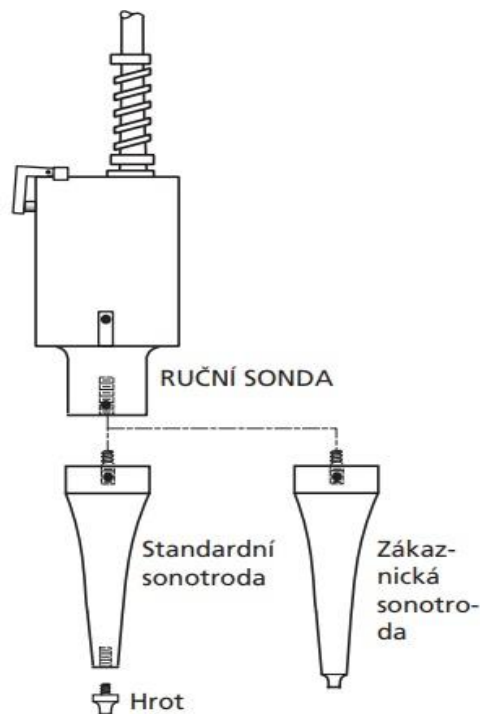


Obr 5. Svařitelnost plastů. ■ - nejlepší svařitelnost ■ - běžně svařované ■ - obtížná svařitelnost nebo nesvařitelné [3]

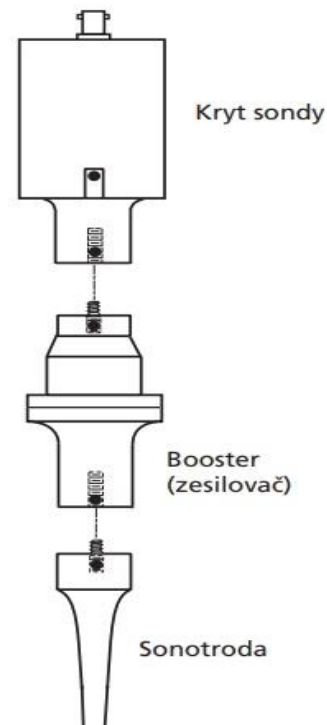
Mezi hlavní výhody patří zachování mechanických vlastností v místě spoje, nevyžaduje se speciální čištění a úprava svarových ploch, lze svařovat kombinace kovů a plastů, malé svařovací časy. Deformace ve svarovém spoji je minimální a nevzniká žádná tepelně ovlivněná oblast. Naopak nevýhoda je malá životnost svařovacích nástrojů, omezená tloušťka svařování a pro každý spoj se musí vyrobit příslušná svařovací soustava a přípravky. [3] [11]

## 2.5 Svařovací soustavy pro svařování plastů

Na obrázku 5 je příklad ruční svařovací soustavy. Kabel přivádí elektrickou energii do měniče, který vytváří mechanické kmitání. Pomocí zavrtného šroubu je připojena sonotroda, která se soustředí energii do místa svaru. Sonotrody se vyrábí ploché pro švové svařování, nebo s hrotem, které se používají pro bodové svařování. Hroty mohou být pevné nebo vyměnitelné, opatřené závitem. Vyměnitelné hroty se dají měnit podle svařovaného materiálu, v seriové výrobě se však nedoporučují. [10]



Obr 6. Ruční sonotroda a hrot [10]



Obr 7. Sonda, booster (zesilovač) a sonotroda [10]

Na obrázku 6 je svařovací soustava pro strojní svařování, která je rozšířena o tzv. booster = zesilovač. Jeho funkcí je měnit výstupní amplitudu sondy. Může vibrace

zesilovat nebo zeslabovat. U ručního svařování se zesilovač nepoužívá z důvodu vyšší váhy svařovací soustavy, což vede k horší manipulaci se soustavou.

Sonotrody se většinou vyrábí z hliníku, titanu nebo tvrzené oceli. Odchytky ve struktuře materiálu znemožňují správně naladění, které se provádí pomocí elektronického měření frekvence. S rostoucí frekvencí klesá amplituda vibrací, roste vnitřní namáhání svařovací soustavy a její opotřebení, zejména sonotrody. Vyšší frekvence se používají při svařování menších dílů, které by vysokou amplitudu vibrací nevydržely. Právě z hlediska frekvence se svařování ultrazvukem dělí na nízkofrekvenční (20 kHz) a vysokofrekvenční (40 kHz). [10]

### 3. Nástrojové oceli

Oceli, které se využívají k výrobě nástrojů pro obrábění, tváření, dělení, měření nebo mletí a drcení jiných materiálů. Pro každý nástroj je důležité vybrat vhodný typ nástrojové oceli s ohledem na vlastnosti nástroje, jeho namáhání a samotnou funkci. Správná nástrojová ocel se volí podle materiálu (chemického složení) a tepelného zpracování. Vyrábějí se v elektrických pecích z vybraných surovin. Dle využití a složení se dělí na oceli uhlíkové, které se značí od 19 0XX do 19 299, oceli legované 19 300 až 19 799 a nástrojové oceli rychlořezné (HSS) značené od 19 800 do 19 899. Označení 19 9XX je vyhrazeno pro oceli na lité nástroje. [8]

#### 3.1 Požadavky na nástrojové oceli

- a) Tvrdost a pevnost – Hodnota optimální tvrdosti se liší podle způsobu práce a namáhání nástrojů, minimální hodnota tvrdosti se uvádí 60 HRC. Vždy musí být tvrdost nástroje větší, než tvrdost obráběného materiálu. Největší vliv na hodnotu tvrdosti má obsah uhlíku v oceli. Tvrdost se zvyšuje s rostoucím obsahem uhlíku až do 0,8%. Od této hodnoty tvrdost zůstává přibližně stejná, ale vzrůstá počet karbidů. Další prvky ovlivňují tvrdost pouze tehdy, pokud tvoří s uhlíkem tvrdé karbidy. Pro dosažení hodnoty tvrdosti je samozřejmostí dodržení postupu tepelného zpracování. Pevnost se mění s procentem uhlíku podobně jako tvrdost. Od určité hodnoty se dále nezpevňuje, z důvodu následné křehkosti materiálu. [18] [14]



- b) Odolnost proti otěru – Tato vlastnost má rozhodující vliv na trvanlivost ostří nástroje. Se vzrůstající odolností proti otěru si nástroj lépe drží ostří a svůj přesný tvar. [18] [14]
- c) Houževnatost – Nástroje bývají namáhány statickým i dynamickým namáháním. Namáháním v tahu, tlaku, ohybu i krutu. Ocel musí vydržet rázy různých velikostí a směrů. Požadované hodnoty houževnatosti lze dosáhnout jemnozrnnou strukturou a minimálním vnitřním pnutím. Zároveň ocel nesmí mít větší množství nečistot a vměstků, musí být správně zakalená (bez předežhátí) a popuštěna. Negativní vliv na houževnatost má karbidická řádkovitost. [18] [14]
- d) Odolnost proti popuštění – Vlivem tření se funkční části nástroje zahřívají. Při některých činnostech (např. tváření) se povrch funkční části zahřeje až na 1200 °C. Vyhřátí způsobuje nežádoucí popuštění, které snižuje tvrdost, pevnost a odolnost proti otěru. Odolnost proti popuštění zlepšují vyšší obsahy legujících prvků kobaltu, wolframu, molybdenu nebo vanadu. [18] [14]
- e) Prokalitelnost – Některé druhy nástrojových ocelí musí mít požadovanou tvrdost do určité hloubky. U uhlíkových ocelí je prokalitelnost malá. Lze ji zlepšit zvýšením obsahu legujících prvků manganu, niklu, chromu, molybdenu nebo wolframu. Pokud se požaduje tvrdost pouze na povrchu a jádro má zůstat houževnaté, používají se oceli nelegované nebo oceli k cementování. Prokalitelnost závisí na velikosti nástroje, rychlosti ochlazování a chemickém složení. [18] [14]
- f) Stálost rozměrů – Vlivem tepelného a mechanického namáhání dochází k vnitřnímu pnutí a následné deformaci nástroje, což vede ke změně rozměrů. Deformacím můžeme předejít vhodným výběrem tepelného zpracování a druhu materiálu. [18] [14]

### 3.2 Vliv prvků na vlastnosti nástrojových ocelí

- a) Uhlík – Se zvyšujícím se procentem uhlíku roste tvrdost a zlepšuje se prokalitelnost, snižuje se teplota kalení a teplota přeměny austenitu na martenzit. S některými prvky (Cr, W, Mo, V, Ti apod.) tvoří karbidy. Pokud je obsah uhlíku příliš vysoký, snižuje se houževnatost a tepelná vodivost. [17] [14] [16]
- b) Mangan – Zvyšuje prokalitelnost, ale i obsah zbytkového austenitu. Váže se na síru a tím zneškodňuje její nežádoucí vlastnosti. Proto zabraňuje křehkosti za

tepla. S uhlíkem tvoří komplexní karbidy. Zvyšuje stálost austenitu a snižuje napětí a deformace při kalení. [17] [14] [16]

- c) Křemík – Zvyšuje žáruvzdornost, mez únavy a stálost oceli za tepla. Mírně zvyšuje odolnost proti popuštění a prokalitelnost. Obsah křemíku se musí současně kompenzovat přidáním chromu, protože křemík zvyšuje náchylnost ke grafitizaci. [17] [14] [16]
- d) Chrom – Zvyšuje prokalitelnost a odolnost proti popuštění. V ocelích tvoří podvojně karbidy. Příznivě působí proti korozi a oxidaci. Negativní vlastností je zvýšení popouštěcí křehkosti. Při vyšším obsahu zlepšuje řezivost a odolnost proti otěru. [17] [14] [16]
- e) Wolfram – V oceli tvoří podvojně karbidy podobně jako chrom. Výrazně zvyšuje odolnost proti popouštění. Zvyšuje prokalitelnost, ale s přibývajícím množstvím tato vlastnost ztrácí účinnost. Zvyšuje odolnost proti otěru a řezivost oceli při zvýšených teplotách. Při větším obsahu snižuje houževnatost a plastické vlastnosti ocelí. Karbidy wolframu se při austenitizaci obtížně rozpouštějí. Zároveň karbidy wolframu snižují prokalitelnost a kalitelnost. [17] [14] [16]
- f) Molybden – Podobně jako wolfram tvoří karbidy a zvyšuje prokalitelnost. Zlepšuje houževnatost a snižuje teplotu martenzitické přeměny. Největší nevýhodou většího množství molybdenu je snadná tvorba okují. [17] [14] [16]
- g) Vanad – V oceli tvoří s uhlíkem karbid, který je velmi tvrdý. Zlepšuje odolnost proti otěru a řezivost. Zvyšuje prokalitelnost a odolnost proti popuštění. Má příznivý vliv na houževnatost, díky jeho schopnosti zvýšit jemnozrnnost struktury oceli. Čím méně uhlíku ocel obsahuje, tím více snižuje vanad prokalitelnost a kalitelnost. [17] [14] [16]
- h) Titan – Velmi stálý karbid. Snadno se vylučuje s kyslíkem a dusíkem. Protože tyto prvky mají škodlivý vliv na vlastnosti oceli, je to velmi užitečná vlastnost. V nástrojových ocelích se však používá jen výjimečně v množství kolem 0,1%. [17] [14] [16]
- i) Kobalt – Odlišné chování proti ostatním prvkům. Karbidy netvoří. Zvyšuje teploty kalení a přeměny martenzitu. Značně zvyšuje odolnost proti otěru, ale také značně snižuje prokalitelnost. [17] [14] [16]

- j) Nikl – Zvyšuje prokalitelnost, podporuje tvorbu jemnozrnné struktury, která má příznivý dopad na houževnatost oceli. Rozpouští se pouze v tuhém roztoku a zvyšuje množství zbytkového austenitu. [17] [14] [16]
- k) Síra – Tvoří sulfidy a má negativní vliv na soudružnost austenitických zrn. Z tohoto důvodu je materiál více křehký hlavně při tváření za tepla. Sice má pozitivní vliv na obrobitelnost, ale je označována za škodlivý prvek. [17] [14] [16]
- l) Fosfor – Další škodlivý prvek, který zhoršuje vrubovou houževnatost a tvařitelnost. Podporuje popouštěcí křehkost a sklon k lámavosti za studena. [17] [14] [16]
- m) Kyslík – Může mít negativní i pozitivní vliv. Rozpuštěný v železe zvyšuje tvrdost, ale i křehkost. Negativně ovlivňuje vrubovou houževnatost a má sklony ke křehnutí. [17] [14] [16]

### 3.3 Rozdělení nástrojových ocelí

- a) Nástrojové oceli uhlíkové – Aby nástroj byl houževnatější, používají se většinou méně prokalitelné oceli. Pro řezné nástroje se volí oceli s obsahem uhlíku asi 0,7 – 1,4%, pro nástroje na stříhání se doporučuje obsah uhlíku lehce nižší, asi 0,5 – 1,2%. Nástroje, které pracují rázem, musí být tvrdé, ale zároveň dostatečně houževnaté. U těchto nástrojů se doporučuje obsah uhlíku maximálně do 1%. Největší nevýhoda těchto ocelí je, že při zvýšení teploty jsou značně náchylné k popuštění a následnému snížení tvrdosti a požadovaných vlastností. Při obrábění snesou teplotu pouze do 250 °C. [8] [15]
- b) Nástrojové oceli slitinové legované – Nejrozšířenější typ nástrojových ocelí, který se používá hlavně pro více namáhané nástroje. Nedůležitější legující prvky jsou vanad, chróm, wolfram, molybden, křemík, mangan a nikl. Jejich tvrdost je dosažena kalením. Díky legujícím prvkům může být rychlost ochlazování relativně nižší a nedochází tak k deformacím tvaru nástroje. [8] [15]
- c) Nástrojové oceli slitinové rychlořezné (HSS) – U předchozích typů nástrojových ocelí jsou řezné rychlosti značně omezeny. Při zvyšování řezných rychlostí roste teplota a dochází k nežádoucímu popuštění a rychlému otupení nástroje. Proto se využívají oceli rychlořezné, které jsou vysokým řezným rychlostem přizpůsobeny. Oceli jsou legovány hlavně wolframem, který zvětšuje řezivost

nástroje, dále chromem a vanadem. Tvrdost je dosažena díky zakalené martenzitické struktuře a přítomnosti karbidů legujících prvků. Své vlastnosti si zachovávají až do teploty kolem 650 °C. [8] [15]

- d) Nástrojové oceli slitinové na lité nástroje – Nástroje z rychlořezných ocelí, které nebyly zhotovené kováním, ale litím odstředivým nebo sklopným. Mají lepší řezivost, ale jsou o poznání křehčí. Ostatní vlastnosti jsou podobné jako u ocelí HSS. [8] [15]
- e) Nástrojové oceli se slinutým karbidem – Často se označují SK a umožňují největší řezné rychlosti. Lze s nimi obrábět i nejtvrdsí materiály při teplotách až 700 °C. Většinou jsou samotné nástroje vyráběny ve formě destiček, které se připevní k tělu nástroje z jiné oceli pájením nebo mechanicky. Pro nejobtížněji obráběné materiály se vyrábí ze slinutého karbidu celý nástroj, nejčastěji frézy, průvlaky k tažení wolframových drátů nebo některé druhy zápustek. [8] [15]

Dále se nástrojové ocelí dělí do skupin dle použití na konkrétní druhy nástrojů: [16] [14]

- Oceli na řezné nástroje – určené pro třískové obrábění. U těchto ocelí je požadována velká tvrdost, která odolá vysokým teplotám a opotřebením. Největší zastoupení u rychlořezných ocelí, na které jsou tyto požadavky nejvyšší.
- Oceli na nástroje pro tváření – určené pro lisování, válcování, kování atd. Tyto nástroje jsou namáhány hlavně na tlak a třením, proto je u těchto ocelí kladen největší důraz na tvrdost povrchu nástroje a jeho houževnaté jádro.
- Oceli na měřicí nástroje – musí si zachovávat rozměrovou stálost, proto u těchto ocelí nesmí být žádné vnitřní pnutí a nesmí obsahovat žádné strukturní nestabilitnosti. Dále musí odolávat otěru.
- Oceli na pomocné zařízení – jako jsou vodící lišty, různé upínací přípravky apod. Tyto součásti musí mít vysokou tvrdost a odolnost proti opotřebením.
- Oceli na nástroje pro stříhání
- Oceli na formy
- Oceli na nástroje pro drcení a mletí
- Oceli na ruční nástroje a nářadí

#### 4. Tvařitelnost rychlořezných nástrojových ocelí, jejich zpracování kováním

Nástrojová ocel se po výrobě v elektrických pecích dále zpracovává tvářením za tepla. Tvářením se často provádí v několika operacích, mezi kterými se provádí kontrola a čištění materiálu. Cílem tvářením je rozrušit ztuhlou strukturní nestejnorodost a tím zlepšit homogenitu oceli. Při tvářením se struktura může uspořádat do hlavního směru tvářením, proto je vhodné tvářet ve více než jednom směru. (např. všestranné kování). [9]

Důležitý ukazatel pro dosažení správné struktury je stupeň protváření. Je to poměr mezi průřezem slitku (např. ingotu) a průřezem výkovku (resp. vývalku). Každý druh oceli má svůj doporučený stupeň protváření. [9]

Tvárnost rychlořezných nástrojových ocelí klesá se snižováním teploty. Dokovací teplota musí být podstatně vyšší než u běžných ocelí. Při nedostatečných teplotách hrozí nebezpečí vzniku trhlin. Zároveň mají tyto oceli krátký tepelný interval kování, proto se musí během kování přehřívat. Díky nízké tepelné vodivosti, kterou způsobují legující prvky, musí být ohřev pomalý a opatrný. Při rychlejší ohřevu se jádro neprohřeje dostatečně, má špatnou tvárnost a vznikají trhliny. Ochlazování musí být také pomalé a kontrolované. Během rychlého ochlazení opět může dojít k trhlinám. [9]

##### 4.1 Vliv prvků na tvárnost nástrojových ocelí

Legující prvky většinou snižují tvárnost za tepla a tepelnou vodivost.

- a) Mangan – Zvyšuje náchylnost ocelí k přehřátí a tvoření trhlin. Snižuje tepelnou vodivost. V některých případech se na hranicích zrn vylučuje sulfid manganatý, který snižuje soudružnost zrn a tím zhoršuje tvárnost.
- b) Nikl – Zvyšuje tažnost a pevnost ocelí
- c) Chrom – Snižuje tažnost a tepelnou vodivost. Zvyšuje pevnost
- d) Wolfram – Snižuje tepelnou vodivost a nepatrně i tažnost. Zvyšuje pevnost.

[13]

##### 4.2 Kování ingotů z rychlořezných nástrojových ocelí

První operací výrobní technologie bývá kování pod buchary a lisy. Následuje hrubování povrchu ingotů, aby se odstranily všechny nečistoty, povrchové a podpovrchové vady. Povrchová vrstva ingotu je navíc do určité hloubky oduhličená. Z tohoto důvodu výrobci předepisují minimální přídatky na opracování, teprve po jejich odstranění je povrch ingotu bez oduhličené vrstvy. [13]

Další operace je ohřev studených ingotů ke kování. Větší ingoty se většinou ohřívají ve vozových plynových pecích s výjezdnou nístějí. Pro menší ingoty stačí plynové ohřívací kontinuální pece. U rychlořezných ocelí je důležité zařazovat při ohřevu dostatečně dlouhý předeřev. Celkový čas ohřevu tvoří ze 2/3 předeřev a z 1/3 ohřev na kovací teplotu včetně prodlevy na vyrovnání teploty v celém průřezu. Průměrné doby ohřevu závisí na hlavně na hmotnosti ingotu. [13]

Prvním cílem vlastního kování ingotů je dostatečné zjemnění struktury. Pro splnění tohoto požadavku musí být zvolen dostatečně velký ingot a optimální stupeň prokování. Stupeň prokování je běžně volem 2,5 až 3. K dostatečnému rozrušení lité struktury dojde i při menším stupni prokování (až 1,8). [13]

Druhý důležitý požadavek je zamezení vzniku středových trhlin v polotovaru. Tyto vady se v následných operacích přenášejí do hotových výrobků. Pro zamezení vzniku trhlin musí být přesně dodrženy základní operace kování. Základem je správný ohřev, který je popisován výše. Všechny vedlejší časy jako jsou dovoz ingotu pod buchar, upnutí do kleští nebo čelistí kovacího manipulátoru musí být co nejkratší. Při zbytečně dlouhých vedlejších časech dochází k tepelným ztrátám ohřátého ingotu. Vlastní kování začíná lehkými a rychlými údery bucharu po celém obvodu ingotu. Během kování se musí ingot otáčet nebo posouvat po každém úběru. Při nedodržení tohoto postupu dochází k nadměrné deformaci v jednom místě, které způsobuje vnitřní přehřátí v jednom místě nebo rozštěpení středu. Posouvání ingotu se provádí vždy ve směru k hlavě ingotu. Na začátku tváření se provádí mírnější údery těsně za hlavou ingotu, kde by měla pravděpodobně končit staženina (tzv. zakování hlavy ingotu). Tato operace zamezuje šíření staženiny do polotovaru a omezuje štěpení polotovaru v konci po odseknutí hlavy. [13]

## 5. Tepelné zpracování rychlořezných nástrojových ocelí

### 5.1 Princip tepelného zpracování

Pomocí tepelného zpracování lze získat požadovanou strukturu, na které závisí mechanické a technologické vlastnosti. Materiál je podroben tepelnému cyklu, při kterém dochází ke změně fází. U každého materiálu změna fází probíhá odlišně s ohledem na chemické složení a rychlost ochlazování. Cyklus tepelného zpracování se skládá z ohřevu, výdrže na teplotě a ochlazování.

Ohřev na teplotu může být přímý nebo stupňovitý. Stupňovitý ohřev probíhá pomocí prodlev pro vyrovnání teplotního gradientu a usnadnění fázových přeměn. Využívá se právě u vysokolegovaných ocelí, z důvodu jejich nízké tepelné vodivosti. Ohřev probíhá v pecích nebo v lázních. Lázně jsou výhodnější, protože pro ohřev v peci musí být materiál chráněn zábalou nebo nátěry proti oduhličení a oxidaci. Dnes jsou nejlepší variantou moderní průběžné pece, které ohřívají materiál v inertní ochranné atmosféře. [12]

Výdrž na této teplotě zajišťuje prohrátí celého průřezu materiálu, vyrovnává chemické složení, rozpouští některé fáze a zajistí průběh dalších požadovaných reakcí.

Ochlazování je nejdůležitější fáze z hlediska dosažené struktury. Podle rychlosti ochlazování je možné rozlišit dva základní typy tepelného zpracování. Při žíhání jsou rychlosti ochlazování pomalejší a dosahuje se spíše struktur v rovnovážném stavu. U kalení probíhá ochlazování nadkritickou rychlostí, které způsobuje nerovnovážné struktury. [12]

Nástrojové oceli mají vysoký obsah uhlíku a při tepelném zpracování jsou velmi náchylné k oduhličení povrchu, které zapříčiňuje pokles tvrdosti a praskání. Z tohoto důvodu se musí u tepelného zpracování těchto druhů ocelí dbát zvýšené pozornosti. Přesně dodržovat předepsané postupy, kalící teploty a časy. [12]

## 5.2 Přeměny austenitu

Austenit je tuhý roztok v železe  $\gamma$ , který se při ochlazování transformuje za současného vzniku cementitu. Tato feriticko-cementitická směs je označována jako perlit. V této struktuře se ferit a cementit ukládají ve formě lamel střídavě vedle sebe.

Pokud dojde k většímu přechlazení austenitu, difúze železa a substitučně rozpuštěných prvků už není dostatečně účinná. Začne probíhat difúze uhlíku a vznikne bainit (nerovnovážná směs přesyceného feritu a drobných karbidů). Základem je změna plošně středěné mřížky austenitu na prostorově středěnou mřížku feritu. Změnu mřížky doprovází změna v rozložení uhlíku a vznik karbidické fáze. Podle teploty bainitické přeměny vzniká horní nebo dolní bainit. Horní bainit vzniká v horní části bainitické přeměny, je tvořen svazky hrubších jehlic feritu a podélně uspořádanými částicemi cementitu, které se nachází hlavně na povrchu jehlic. Dolní bainit vzniká za nižších teplot přeměny. Na rozdíl od horního bainitu obsahuje velké množství jemných

karbidických částic feritu, které mají tvary destiček. S klesající teplotou roste tvrdost bainitu. [14]

Při ještě větším přechlazení difúze ztrácí účinnost a vzniká nerovnovážený přesycený tuhý roztok uhlíku v železe  $\alpha$ , nazývaný martenzit. Právě z důvodu bezdifúzní přeměny je chemické složení martenzitu stejné jako chemické složení výchozího austenitu. Kubická plošně středěná mřížka austenitu se mění na prostorově středěnou tetragonální mřížku martenzitu bez přerozdělení uhlíku. Martenzit roste velmi rychle. Rychlost jeho růstu se blíží k rychlosti zvuku v kovech. Uhlík má v mřížce martenzitu uzavřené interstetické atomy, proto s rostoucím obsahem uhlíku v oceli roste i tvrdost a pevnost martenzitu. [14]

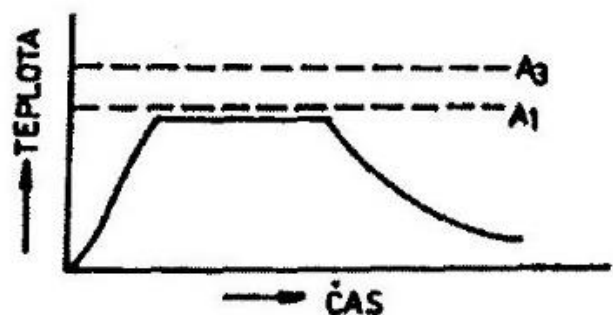
### 5.3 Způsoby tepelného zpracování rychlořezné nástrojové oceli

Každá rychlořezná nástrojová ocel má své chemické složení, proto se pro každý typ musí přizpůsobit teploty ohřevu a doby ochlazování. Podle druhu a složitosti nástroje se také určuje počet stupňů ohřevu.

#### 5.3.1 Žihání na měkko

Jedná se o typ žihání bez překrytí. Při tomto žihání obvykle teplota nepřesáhne hranici, při které se začne měnit (překrystalovat) struktura. Tato teplota je označována jako  $A_{C1}$  a její hodnota v případě ocelí je  $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Dochází k rozpadu nerovnoměrných fází a mění se rozpustnost uhlíku a dusíku. Účelem tohoto žihání bývá přeměna lamelárního perlitu na globulární. Zároveň dochází ke snížení tvrdosti a tím zlepšení obrobitelnosti. Další účel je homogenizace struktury pro lepší průběh následného kalení. [12]

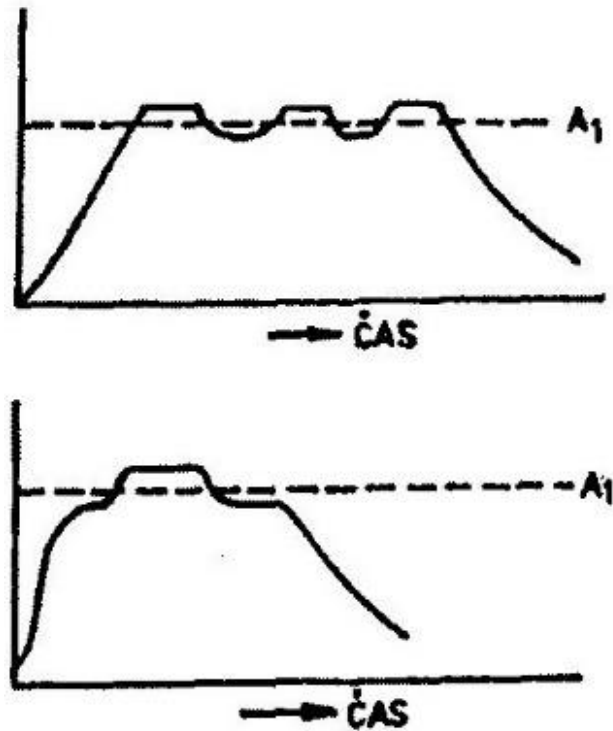


Obr 8. Schéma žihání na měkko [12]



Nejjednodušší žíhání je těsně pod teplotu  $A_{C1}$  s několikahodinovou výdrží na této teplotě a následném ochlazování. Rychlořezné nástrojové oceli mají vysoký obsah legujících prvků, které zpomalují difúzní rychlost uhlíku ve feritu, a proto by musela být výdrž na teplotě několik desítek hodin. Proces se urychluje zvýšením teploty až nad teplotu  $A_{C1}$  (obr. 8). S přibývajícím obsahem uhlíku se prodlužuje doba rozpouštění karbidů a zvyšuje se teplota žíhání. V praxi se nejčastěji používá ohřev na teplotu 800 °C až 840 °C. Čím pomalejší je ochlazování

z teploty žíhání, tím jsou karbidy hrubší a mají nižší tvrdost. Pomalé ochlazování musí plynule probíhat až do vychladnutí, aby se zabránilo vzniku vnitřního pnutí. Průběh žíhání se v některých případech urychluje pomocí kolísání kolem kritické teploty (obr. 9). [12]



Obr 9. Schéma dalších postupů žíhání na měkko [12]

### 5.3.2 Žíhání ke snížení vnitřního pnutí

Toto tepelné zpracování se provádí za účelem odstranění zbytkových vnitřních pnutí, které vznikají při předchozích operacích (např. při tuhnutí, obrábění, tváření za studena apod.). Jakákoliv změna struktury a mechanických vlastností je u tohoto procesu nežádoucí. Důležité je toto žíhání zařadit před kalení. Kalení bez předchozího žíhání ke snížení vnitřního pnutí by způsobilo, že by se vnitřní pnutí uvolňovalo během ohřevu na kalící teplotu. [12] [9]

Postup začíná pomalým ohřevem (100 °C až 200 °C za hodinu) na žíhací teplotu. Žíhací teplota se běžně pohybuje 450 °C až 600 °C. V případě konstrukčních ocelí je tato teplota opět vyšší než u ostatních ocelí, z důvodu většího obsahu legujících prvků. V praxi se používá žíhací teplota v rozmezí 700 °C až 780 °C. Následuje výdrž

na této teplotě, obvykle 1 až 2 hodiny po vyrovnání teploty v celém průřezu. Poslední fáze je pomalé ochlazení na vzduchu (30 °C až 50 °C za hodinu). [12]

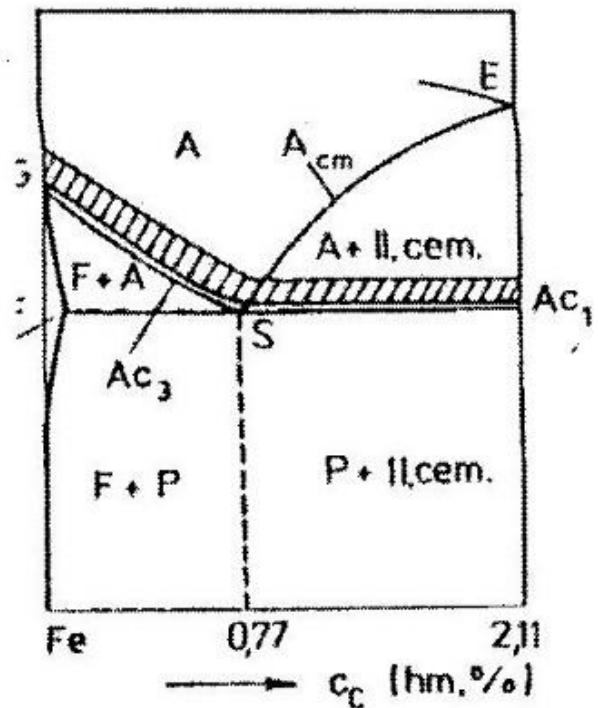
Další způsob je žíhání ke snížení vnitřního pnutí povrchově kalených součástí. Rozdíl je v žíhací teplotě, která dosahuje pouze 150 až 200 °C. V tomto případě je kladen největší důraz na zachování tvrdosti zakaleného povrchu. [12]

### 5.3.3 Kalení

Účelem tohoto tepelného zpracování je zvýšení tvrdosti pomocí změny rovnovážné struktury na částečně nebo zcela nerovnovážné struktury. Základní struktury v zakalených součástích jsou martenzitické nebo bainitické. [12]

Při kalení se součást ohřeje až nad teplotu austenitizace. U podeutektoidních ocelí (oceli s obsahem uhlíku méně než 0,77%) je to teplota nad křivkou označenou  $A_{C3}$  (obr. 10). Pro nadeutektoidní oceli musí být teplota vyšší než teplota  $A_{C1}$ . Ovšem pro nástrojové oceli je teplota kalení mnohem vyšší. [12]

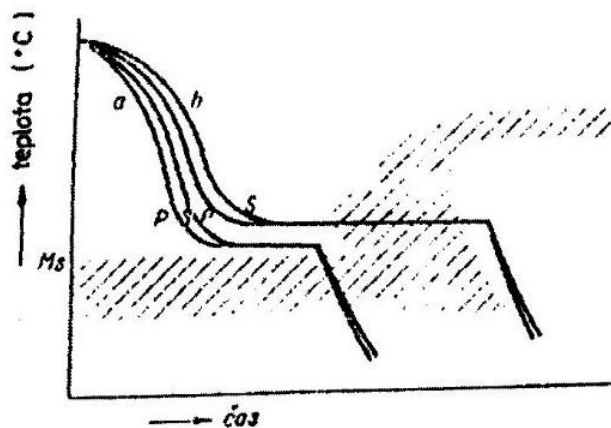
Ohřev na teplotu kalení probíhá v několika stupních. Nástroj se chrání před okujením a oduhličením povrchu, proto je vhodný ohřev ve vakuu. Nerovnoměrný ohřev způsobuje tvarové deformace a v horším případě i trhliny. První stupeň ohřevu je na teplotu 500 °C až 550 °C, následuje prodleva. Druhý ohřev končí kolem teploty 850 °C a nastává další prodleva. U jednodušších tvarů už je druhý stupeň dostačující, ale většinou ohřev pokračuje třetím stupněm až na teplotu 1050 °C, v některých případech až 1250 °C. Doby prodlev se v praxi používají 0,5 minuty na 1 mm tloušťky při první prodlevě a 1 minutu na 1 mm tloušťky při prodlevě druhé. Po dosažení kalící teploty v celém průřezu následuje výdrž na této teplotě, která je vzhledem k vysoké kalící teplotě pouze v řádu minut. [9]



Obr. 10. Pásmo kalících teplot v diagramu Fe-Fe<sub>3</sub>C [12]

teplotu 1050 °C, v některých případech až 1250 °C. Doby prodlev se v praxi používají 0,5 minuty na 1 mm tloušťky při první prodlevě a 1 minutu na 1 mm tloušťky při prodlevě druhé. Po dosažení kalící teploty v celém průřezu následuje výdrž na této teplotě, která je vzhledem k vysoké kalící teplotě pouze v řádu minut. [9]

Po ohřevu a výdrži na kalicí teplotě následuje řízené ochlazování. Podle druhu oceli, složitosti tvaru a požadované výsledné struktury se volí ochlazovací prostředí, které může být voda, olej, vzduch nebo solná lázeň. Na rychlosti ochlazování závisí konečná tvrdost. Pro vznik martenzitu musí být rychlost ochlazování větší než kritická. Kritickou rychlost má každý druh oceli. Je to hraniční rychlost, kdy ještě probíhá změna austenitu na martenzit. Zároveň ovšem platí čím vyšší rychlost, tím více se zvyšuje vnitřní pnutí a riziko poškození. Volba ochlazovacího prostředí a tím ochlazovací rychlosti je proto velmi důležitá. [9]



Obr 11. Křivka ochlazování a) u termálního kalení, b) u izotermického bainitického kalení [12]

Pro nástrojové oceli je nejvhodnější kalení termální. Ohřev a výdrž na teplotě probíhá výše popsaným způsobem. Pro ochlazování jsou nejvhodnější solné lázně, protože mají vysokou ochlazovací účinnost. Ochlazování probíhá nadkritickou rychlostí až nad teplotu  $M_s$  (začátek přeměny martenzitu). Na této teplotě nastává prodleva, pokud možno do vyrovnání teploty v celém průřezu. Následuje dochlazení na klidném vzduchu až na pokojovou teplotu (obr. 11). [12]

V případě ocelí s vyšším obsahem uhlíku a legujících prvků je teplota konce martenzitické přeměny nižší, než je teplota okolí. V případě ukončení ochlazování na okolní teplotě zůstává v oceli nežádoucí vyšší množství zbytkového austenitu, který nebyl dostatečně ochlazen, aby se transformoval na martenzit. Nepřeměněný zbytkový austenit zabraňuje materiálu dosáhnout požadované tvrdosti. Pro odstranění tohoto zbytkového austenitu se používá zmrazení, které by mělo proběhnout dříve, než se zbytkový austenit stabilizuje (tedy ihned po martenzitickém kalení). K zmrazení se využívá směs lihu a tuhého oxidu uhličitého (suchý led) nebo tekutého dusíku. [12]

#### 5.3.4 Popouštění

Po kalení je materiál křehký a náchylný k praskání, proto musí po kalení ihned následovat popouštění. Proces začíná opět ohřevem, tentokrát na teplotu pod  $A_1$ . Hodnota teploty se volí podle požadované tvrdosti, pevnosti a funkce nástroje. Například pro ocel ČSN EN 19 800 se doporučuje popouštěcí teplota 550 °C až 600 °C u běžného nástroje, ale pro málo namáhané a jemné nástroje je to 120 °C až 200 °C. Rychlořezné oceli se pouštějí alespoň 3x, některé druhy dokonce více než 3x. Prodleva na teplotě se doporučuje alespoň 2 hodiny. Popouštěcí teplota u druhého a dalšího pouštění se doporučuje vždy o 10 °C než u popouštění předchozího. Toto násobné popouštění způsobuje dokonalejší rozpad zbytkového austenitu. [12]

## 6. Popis sonotrod

Firmy Boshoku s.r.o. a Hutchinson a.s. uvolnili pro Západočeskou Univerzitu některé funkční sonotrody. Tyto sonotrody byly poslány na Regionální technický institut v Plzni, kde byly změřeny jejich přesné geometrické rozměry a vytvořeny 3D modely. Dále byly v rámci Západočeské Univerzity vykovány 2 polotovary pro sonotrody, které budou porovnávány se sonotrodami funkčními.

### 6.1 Sonotroda z Boshokus.r.o.

#### Sonotroda č. 3 (obr.12)

Materiál této sonotrody je DIN 1.3340. Je to ocel zpracovaná práškovou metalurgií. Naměřená hustota je  $7\,983,11\text{ kg/m}^3$ .

Průměr těla sonotrody – 13,932 mm

Válcovitost těla sonotrody - 0,014 mm

Průměr upnutí sonotrody – 28,985 mm

Celková délka – 152,561 mm

Délka hrotu – 1,158 mm

Délka sonotrody bez hrotu – 151,404 mm

Rovinnost - 0,005 mm

Průměr vršku sonotrody – 13,953 mm

Kruhovitost – 0,016 mm



Obr. 12: Sonotroda č. 3

Prvek	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	W
Obsah	0,95 –	Max	Max	Max	Max	3,80 –	4,70 –	1,70 –	6,00 –
[%]	1,05	0,45	0,40	0,030	0,030	4,50	4,50	2,00	6,70

Tabulka 1: Chemické složení materiálu DIN 1.3340 [23]

## 6.2 Sonotroda z Hutchinson a.s.

### Sonotroda č. 2 (obr. 13)

Materiál sonotrody je ocel DIN 1.2376, označovaná také jako X96CrMoV12. Hustota tohoto materiálu je 8 022,7 Kg/m<sup>3</sup>.

Průměr těla sonotrody – 13,538 mm  
Válcovitost těla sonotrody - 0,024 mm  
Průměr upnutí sonotrody – 22,040 mm  
Celková délka – 70,890 mm  
Délka hrotu – 0,492 mm  
Délka sonotrody bez hrotu – 70,398 mm  
Rovinnost - 0,006 mm

Průměr vršku sonotrody – 13,542 mm  
Kruhovitost vršku sonotrody – 0,009 mm  
Rovnoběžnost přímek vršku - 0,016 mm  
Vzdálenost přímek vršku – 9,969 mm



Obr. 13: Sonotroda č. 2

Prvek	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
Obsah	0,92 –	0,20 –	0,20 -	Max	Max	11,00 –	0,80 –	0,80 –
[%]	1,00	0,40	0,40	0,030	0,030	12,00	1,00	1,00

Tabulka 2: Chemické složení materiálu DIN 1.2376 [22]

## 6.3 Kované polotovary pro sonotrody

Rozměry těchto polotovarů pro sonotrody byly získány pouze pomocí posuvného měřítka.

### Sonotroda A (obr. 14)

Materiál polotovaru pro sonotrodu je kovaná nástrojová ocel ČSN EN 19 830. První měření probíhalo před tepelným zpracováním, hustota v tomto stavu byla 8 049,8 kg/m<sup>3</sup>. Po následném tepelném zpracování hustota mírně klesla na hodnotu 8 020,5 kg/m<sup>3</sup>.

Chemické složení viz 7.2

Průměr těla sonotrody – 24,3 mm

Průměr upnutí sonotrody – 30,6 mm

Celková délka bez hrotu – 153,5 mm

Délka upnutí sonotrody – 28 mm



Obr. 14: Polotovar pro sonotrodu A



Obr. 15: Polotovar pro sonotrodu B

#### Sonotroda B (obr. 15)

Materiál polotovaru pro sonotrodu je kovaná nástrojová ocel ČSN EN 19 852. První měření probíhalo před tepelným zpracováním, hustota v tomto stavu byla 8 091,9 kg/m<sup>3</sup>. Po následném tepelném zpracování hustota klesla na hodnotu 7 989,7 kg/m<sup>3</sup>.

Chemické složení viz 7.2

Průměr těla sonotrody – 23,2 mm

Průměr upnutí sonotrody – 27,6 mm

Celková délka bez hrotu – 191,5 mm

Délka upnutí sonotrody – 66 mm

Označení sonotrody	Fotka sonotrody	Původ sonotrody	Materiál sonotrody
Sonotroda č. 2		Hutchinson a.s.	DIN 1.2376 (X96CrMoV12)
Sonotroda č. 3		Boshoku s.r.o.	DIN 1.3340
Polotovar pro sonotrodu A		ZČU Plzeň	ČSN EN 19 830
Polotovar pro sonotrodu B		ZČU Plzeň	ČSN EN 19 852

Tabulka 3: Přehled měřených sonotrod



## 6.4 Získání rozměrů sonotrod

K získání rozměrů byl využitý Regionální technický institut (Laboratoř dílenské metrologie), kde se sonotrody měřily pomocí 3D skeneru. Výstupem byly přesné rozměry, geometrie a 3D model.

Měření proběhlo na přístroji Taylor Hobson Talyrond 585 Lt (obr. 8). Tento přístroj je využíváno pro měření úchylek tvaru a polohy, zároveň měří i lineární a obvodové drsnosti. Jedná se o přístroj nejlepší kvality s odchylkou měření  $0,15 + 0,00025 \mu\text{m}/\text{mm}$ . [25] Přesnost měření dále závisí na laboratorních podmínkách, které byly na ideálních hodnotách. Teplota  $20,2^\circ\text{C}$ , relativní vlhkost 53 % a doba teplotní stabilizace 48 hodin.

- Naměřeny byly tyto hodnoty:
- Průměr těla sonotrody
- Válcovitost těla sonotrody
- Průměr upnutí sonotrody
- Délka celková
- Délka hrotu bez roviny
- Rovinnost
- Průměr vršku sonotrody
- Kruhovitost vršku sonotrody
- Rovnoběžnost přímek vršku
- Vzdálenost přímek vršku

V současné době jsou nejdůležitější geometrické rozměry, které jsou nutné k uskutečnění simulace sonotrod v programu Sonoanalyzer.



Obr. 16: 3D skener [25]

## 6.5 Měření hustoty

### 6.5.1 Způsob měření hustoty

Hustota byla měřena jednoduchou fyzikální metodou na základě vztahu mezi objemem, hmotností a hustotou.

Objem byl získán pomocí ponoření sonotrody do odměrného válce s přesností 2 mm<sup>3</sup>. V první řadě byl odměrný válec naplněn vodou a byla odečtena hodnota objemu vody ve válci. Do vody ve válci se opatrně ponořila sonotroda a hodnota objemu se odečetla znovu. Rozdíl těchto hodnot je roven objemu sonotrody. Každé měření bylo pětkrát opakováno a výsledná hodnota byla určena jako aritmetický průměr všech měření.

Hmotnost sonotrody byla získána pomocí digitální váhy s přesností 0,01 g. Naměřené hodnoty byly dosazeny do rovnice (2).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2)$$

$\rho$  – hustota [kg/m<sup>3</sup>]

$m$  – hmotnost [kg]

$V$  – objem [m<sup>3</sup>]

### 6.5.2 Ukázka výpočtu hustoty

Ukázka měření je pro polotovar kalené sonotrody A.

*Naměřené objemy:*

$$V_1 = 8,2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$V_2 = 8,1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$V_3 = 8,1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$V_4 = 8,2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$V_5 = 8,2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

*Výsledný objem sonotrody:*

$$V = \frac{V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5}{5} = 8,16 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

### Naměřená hmotnost:

$$m = 0,65447 \text{ Kg}$$

### Výsledná hustota:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{0,65447}{8,16 * 10^{-5}} = 8\,020,5 \text{ Kg/m}^3$$

## 7. Popis kování

### 7.1 Kování polotovaru pro sonotrody

Na Západočeské Univerzitě v Plzni v současné době probíhá výzkum kování polotovaru pro sonotrody. Problémem je vláknitost v kované struktuře, proto prvotním cílem je vysoké prokování špalku z nástrojové oceli. Kovací postup byl navrhnut pro kovací lis CKW6000, který je k dispozici v halové laboratoři Západočeské Univerzity v Plzni. Tento lis má maximální sílu 1 MN.

Základní polotovar s nulovým stupněm prokování je tyč o průměru 50 mm. Za pomoci simulací v softwaru Deform byla navržena speciální sada kovadel. Tyto kovadla musí zabránit tvorbě přeložek a dalším vadám, tedy zajišťují tvarově i strukturně kvalitní výkovek. Při návrhu kovadel byla uvažována horní kovací teplota 1 150 °C před každou operací. Vzhledem k předpokládanému ručnímu kování polotovaru je celý proces relativně pomalý a mezi jednotlivými manipulacemi více času. Z tohoto důvodu se kovadla nestihnou více zahřát a jejich teplota zůstává konstantní na hodnotě 20 °C. [20]

Celý postup začíná pēchováním a následným dvoufázovým prodloužením, po kterém vznikl špalek o průřezových rozměrech 40x40 mm. Další série byla překována na osmihran pomocí úhlové vložky a vzorek se opět pēchuje a prodlužuje. Třetí série probíhá opět překováním na osmihran s následným pēchováním a prodloužením. Výsledný špalek byl tedy celkem třikrát pēchován a prodloužen. [20]

Pro kování samotného tvaru sonotrody byl navržen prodlužovací kalibr eliptického průřezu. Tento kalibr se skládá z dvou částí, které nejsou nastaveny přesně proti sobě z důvodu lepšího úběru materiálu. Metoda se podle simulací z počátku zdála

velmi efektivní a rychlá, ale při výpočtu síly působící kováři proti ruce se zjistilo, že by musel kovář udržet cca 220 Kg. Z těchto údajů vyplývá, že tento způsob není pro ruční kování možný. [20]

Reálný způsob je pomocí klasických kovadel s kruhovými kalibry, které vlastní Regionální technický institut ZČU. V těchto kalibrech dochází v jednom průchodu k úběru v rozmezí 8% až 14%. Velkým počtem úběrů v postupných šesti kalibrech kování proběhlo bez problému a s přijatelnou přesností. [21]

Cílem bylo vykovat polotovary pro sonotrodu č. 3.

## 7.2 Materiál kované sonotrody

### ČSN EN 19 830 [15]

Výkonná molybdenwolframová rychlořezná ocel s vysokou houževnatostí, dobrou odolností proti popuštění a opotřebení. Vhodná k nitridování.

Nejčastější využití:

- *Řezné nástroje* - značně namáhané nástroje pro obrábění kovových materiálů o střední pevnosti do 900 MPa.
- *Nástroje pro stříhání za studena* – požadovaná velká životnost, stříhání tvrdých a pevných materiálů do tlouštěk 2 mm. Např. kruhové nože strojních nůžek na kovy
- *Nástroje pro tváření za studena* – např. průtlačníky na ocel pro nejvyšší tlaky a velké série
- *Nástroje pro stříhání za tepla* – např. nože a pouzdra pro výrobu matic, šroubů, nýtů apod.
- *Nástroje pro tváření za tepla* – např. velmi namáhaná kováčka pro ruční kování

### ČSN EN 19 852 [15]

Vysoce výkonná rychlořezná ocel s vysokou stálostí proti popuštění a s vysokou tvrdostí za vyšších teplot. Dále má dobrou odolnost proti opotřebení, ale zvýšenou náchylnost k oduhličení.

Ocel používaná pro velmi namáhané nástroje k obrábění oceli a oceli na odlitky, těžko obrobitelných materiálů, tvrdé šedé litiny apod.

Materiál		Si [%]	P [%]	C [%]	Mn [%]	Cr [%]	Mo [%]	V [%]	S [%]	W [%]
ČSN EN 19 830	Min	Max	Max	0,8	Max	3,8	4,5	1,5	Max	5,5
	Max	0,45	0,035	0,9	0,45	4,6	5,5	2,2	0,035	7
ČSN EN 19 852	Min	Max	Max	0,8	Max	3,8	4,5	1,5	Max	5,5
	Max	0,45	0,035	0,9	0,45	4,6	5,5	2,2	0,035	7

Tabulka 4: Porovnání chemického složení ocelí [24]

Materiál	Tvrdost HRC	Mez kluzu $R_{el}$ [Mpa]	Mez pevnosti v ohybu $R_{mo}$ [MPa]
ČSN EN 19 830	65 – 66	3500 - 3600	$\geq 4\ 400$
ČSN EN 18 852	$\geq 66$	-	$\geq 3\ 900$

Tabulka 5: Porovnání vlastností ocelí [24]

## 8. Sonoanalyzer

### 8.1 Popis programu

Na Západočeskou univerzitu v Plzni byl zakoupen nový software Sonoanalyzer. Jeho hlavní účel je na základě zadaných parametrů zjistit frekvenci, na kterou by se měla sonotroda naladit. V našem případě nám pomůže i s pochopením průběhu ultrazvuku v sonotrodách.

Program má následující 4 základní:

- Analýza – v této části se musí zdroj dat, druh analýzy a základní informace o sonotrodě
- Rozměry – zadání rozměrů sonotrody
- Materiál – zvolení materiálu sonotrody
- Výsledky – v poslední části se volí typ ultrazvukových vln a následuje vyhodnocení frekvence a napjatosti.

Software obsahuje několik databází, ze kterých si lze vybrat tvar sonotrody, materiál a způsob testování.

## 8.2 Metoda analýzy

Program, který je nainstalován v počítači, funguje podobně jako online prohlížeč. Zobrazuje různé výsledky získané z databází, zadaných parametrů a dalšími způsoby. Výsledky se mohou získávat i z jiných počítačů. [26]

### Místní databáze

V této databázi jsou dostupné tři jednoduché modely – kroužky, trubice s pevným koncem a stupňovitý válec. Tento tvar je využíván právě pro sonotrody. Software používá tuto databázi k nalezení nejlepší shody se všemi kombinacemi zadaných rozměrů. [26]

### Soubor uložených výsledků

Výsledky simulací lze uložit a vytvořit si vlastní databázi, do které je možnost kdykoliv nahlédnout a porovnat výsledky. [26]

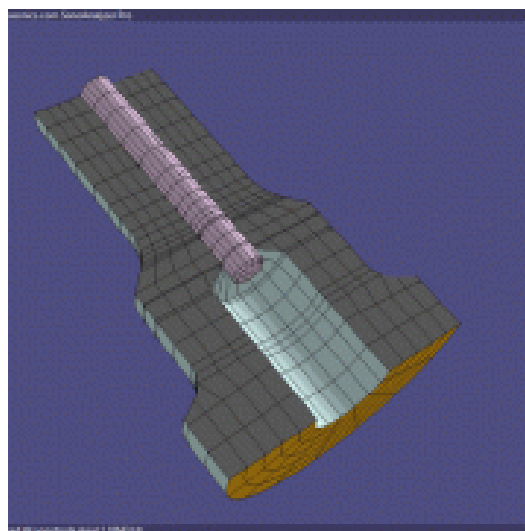
## 8.3 Modely

Software obsahuje databázi modelů, které umí vyhodnocovat přímou analýzou konečných prvků

### Uživatelsky definovaná sonotroda (obr. 17) [26]

Libovolný profil, který je definován pomocí série průmětů a délek. Mohou být zahrnuty poloměry pro vyrovnání přechodu mezi úseky, včetně konečné výstupní části. Díky zadaným poloměrům můžeme na výstupní části získat i sférický profil hrotu. Pro méně složité požadavky může být určen průchozí otvor s pevným průmětem. Podobně může být definováno i jádro.

Sady rozměrů:



Obr. 17: Uživatelsky definovaná sonotroda [26]

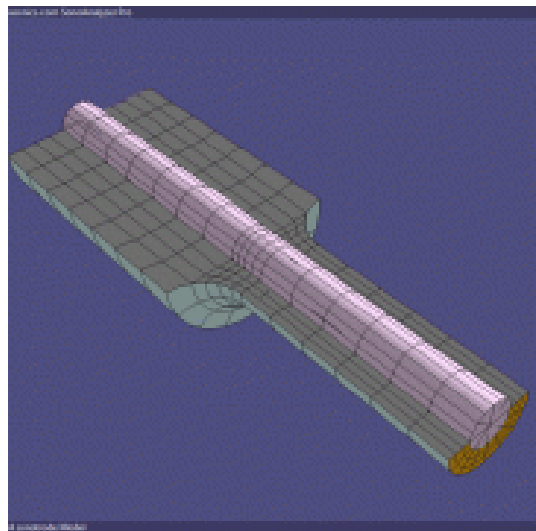
- Délka jednotlivých vnějších částí: 0 mm – 150 mm
- Průměr jednotlivých vnějších částí: 2,5 mm – 150 mm
- Délka jednotlivých vnitřních částí: 0 mm – 150 mm
- Průměr jednotlivých vnitřních částí: 0 mm – maximální průměr v daném místě
- Celková délka: 10 mm – 750 mm
- Profil jádra je stanovený stejně jako rozměry vnitřních částí

Stupňová sonotroda (obr. 18) [26]

Model obsahuje dva objemy válců, které jsou spojeny rádiusem. Horní a celkové délky jsou definované nezávisle na sobě. Horní délka může být také definována jako procento z celkové délky. Opět může být definována jednoduchý otvor nebo jádro.

Sady rozměrů:

- Celková délka: 2,5 mm – 300 mm
- Horní délka: 1,25 mm – 200 mm
- Průměry vstupní a výstupní části: 1 až 150 mm
- Profil jádra nebo vnitřní části musí být vždy v mezích vnějšího tvaru



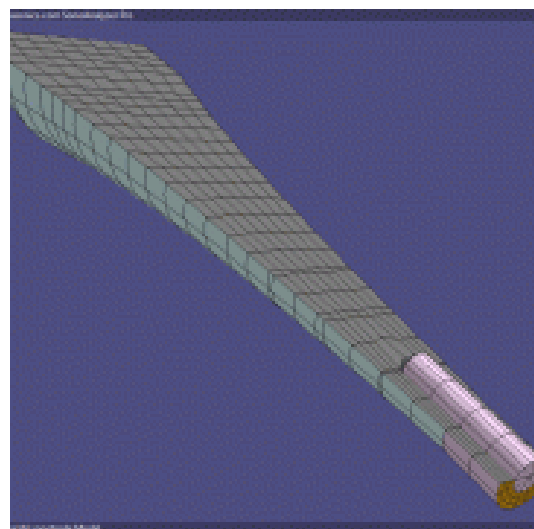
Obr. 18: Stupňovitá sonotroda [26]

Exponenciální sonotroda [26]

Tvar je definovaný pomocí dvou objemů s válcovou částí, které jsou spojeny exponenciální křivkou. Vstupní a výstupní celkové délky jsou definovány nezávisle na sobě. Dále může být horní délka definovaná jako procento z délky celkové. Opět je možný vytvoření jednoduchého vnitřního profilu nebo jádra. Vnitřní otvory mohou být i slepé (viz obr. 19).

Sady rozměrů:

- Celková délka: 2,5 mm – 300 mm



Obr. 19: Exponenciální sonotroda [26]

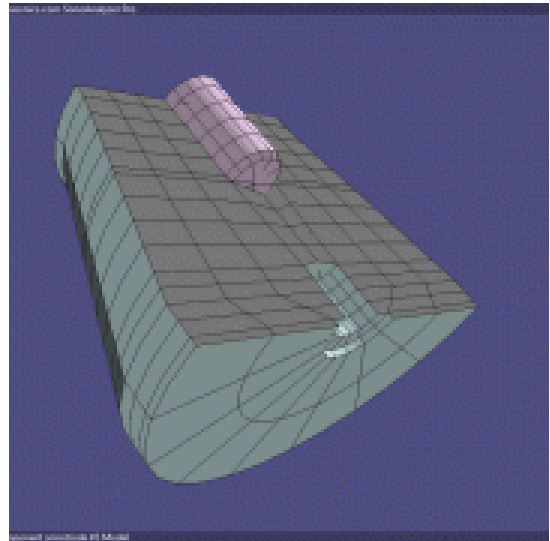
- Délka vstupní části: 0 mm – 200 mm
- Délka výstupní části: 0 mm – 200 mm
- Průměry vstupní a výstupní části: 1 mm – 150 mm
- Profil jádra nebo vnitřní části musí být vždy v mezích vnějšího tvaru

#### Kuželová sonotroda (obr. 20) [26]

Definovaná pomocí dvou objemů, válců, které jsou spojené částí ve tvaru komolého kužele. Délka vstupní části, výstupní části i celkové délky jsou definovány nezávisle na sobě. Délka horní části může být dále definována jako procento z celkové délky. Opět možnost vnitřního profilu včetně slepých otvorů nebo jádra.

#### Sada rozměrů:

- Celková délka: 2,5 mm – 300 mm
- Délka vstupní části: 0 mm – 200 mm
- Délka výstupní části: 0 mm – 200 mm
- Profil jádra nebo vnitřní části musí být vždy v mezích vnějšího tvaru



Obr. 20: Kuželová sonotroda [26]

## 8.4 Práce v softwaru Sonanalyzer

### Analýza

V první části softwaru se volí typ analýzy. Základní rozdělení je na radiální nebo axiální mód. Každý mód je rozdělený do analýzy pro jednotlivé modely. Dále se v první části řeší základní informace o modelu jako jeho jméno, třída a zdroj dat, na základě kterých bude model vyhodnocen.

### Rozměry

V druhé části se zadávají přesné rozměry sonotrody. Zde budou využity hodnoty, které byly naměřeny v Regionálním institutu v Plzni (viz 6.4). Rozměry mohou být zadávány v milimetrech, metrech nebo palcích.



### Materiál

Ve třetí části se vybírá druh materiálu sonotrody. Software obsahuje nadefinované materiály. Vybrat si lze z oceli, hliníku nebo titanu. Využívána bude poslední možnost, kde si uživatel nadefinuje sám nový materiál. V tomto případě si uživatel vyplní všechny parametry svého materiálu, které jsou modul pružnosti v tahu, hustota materiálu a Poissonova konstanta. Na základě těchto informací software vypočítá rychlost šíření podélné vlny ultrazvuku ve směru rovnoběžném a kolmém k ose sonotrody.

Hodnoty rychlosti ultrazvuku slouží spíše ke kontrole, protože rychlosti jsou neměřené ještě před prací v Sonoanalyzáru.

### Výsledky

V poslední části probíhá vyhodnocení zadaných informací. Nejdříve se musí potvrdit změny tlačítkem „recalculate“ (přečítat) a po načtení se spustí animace. Pomocí přepínání módu se může měnit typ ultrazvukových vln. O řádek níže je vypočtená hodnota frekvence, na kterou by se měla sonotroda ve skutečnosti naladit.

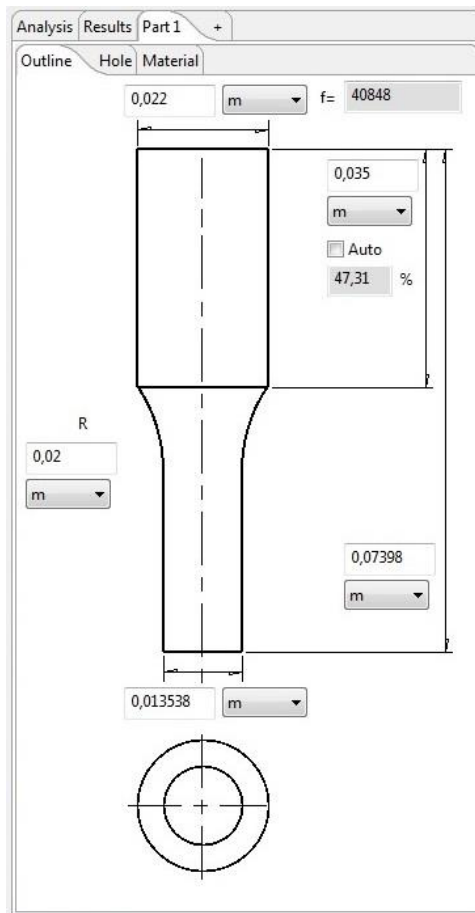
## 8.5 Návrh tvaru sonotrody

Součástí práce je návrh sonotrody z kované nástrojové oceli. Jako první probíhala simulace funkčních sonotrod z firmy Boshoku s.r.o. a Hutchinson a.s.

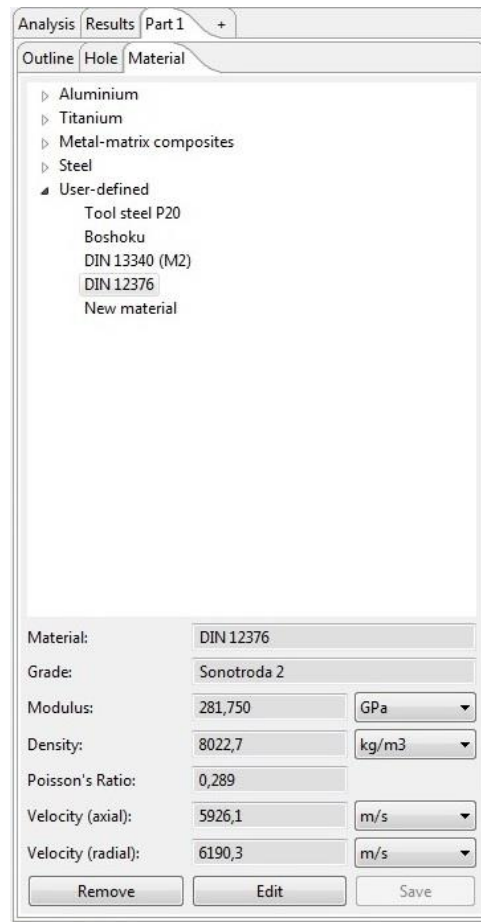
### Sonotroda č.2 Hutchinson s.r.o.

Na obrázku 21 jsou zadávané rozměry, které byly získány pomocí 3D skeneru viz 6.4. Dále byl definován materiál pro sonotrodu (obr. 22) a vypočítány výsledky. Z obr. 21 lze vyčíst frekvenci, na kterou by se měla sonotroda skutečně naladit, v tomto případě je to 40 848 Hz.

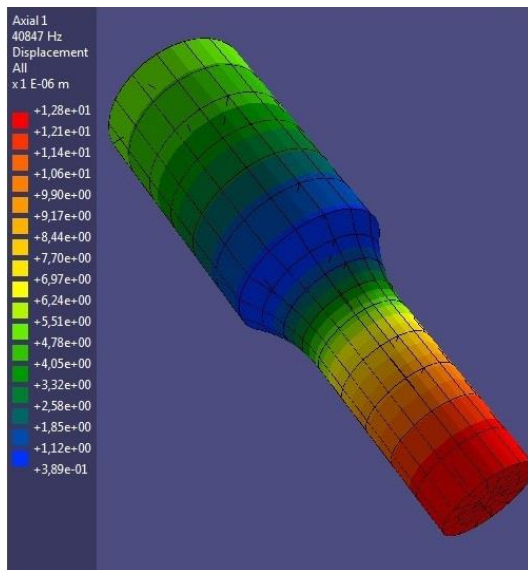
Součástí simulace je i zobrazení průběhu kmitání a napětí v sonotrodě (obr. 23 a 24). Zobrazení těchto průběhů je barevně odlišeno. Modrá barva znamená nejmenší namáhání a červená barva namáhání největší. V případě napětí by mělo být největší namáhání v uzlových bodech kmitání.



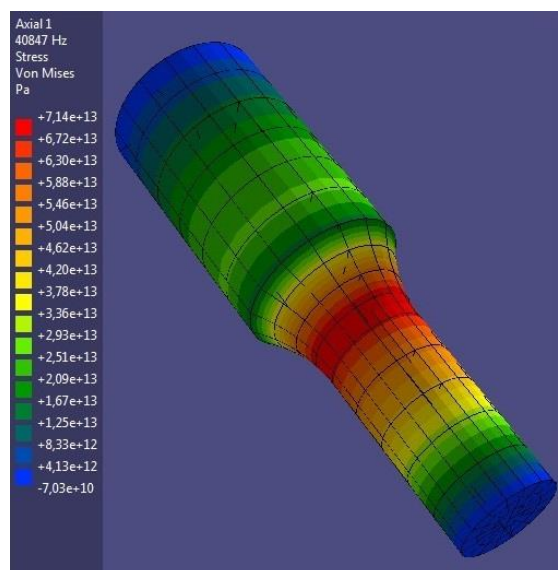
Obr. 21: Definování rozměrů pro sonotrodu č. 2 [27]



Obr. 22: Definování materiálu pro sonotrodu č. 2 [27]



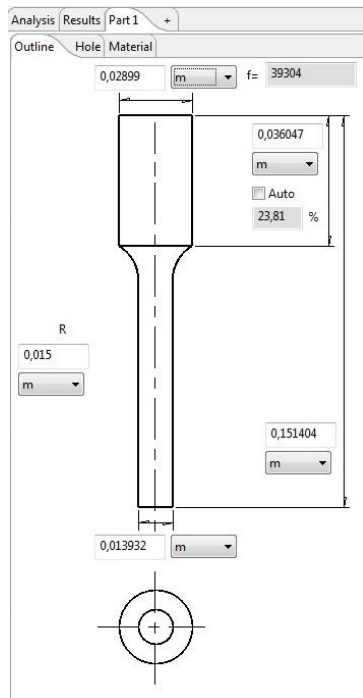
Obr. 23: Průběh kmitání sonotrodou č. 2 [27]



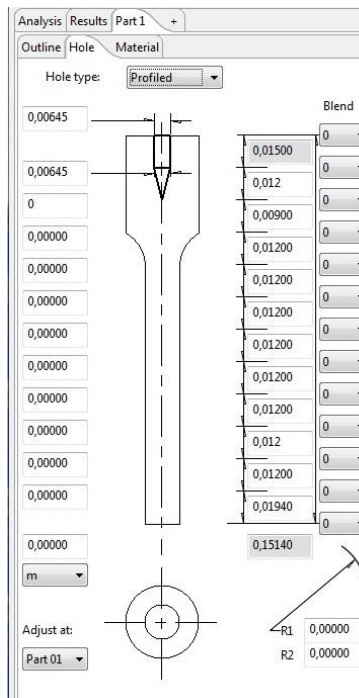
Obr. 24: Průběh napětí sonotrodou č. 2 [27]

### Sonotroda č. 3 Boshoku s.r.o.

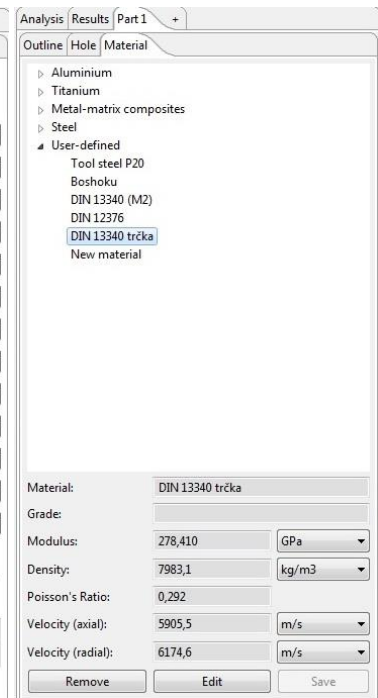
U této sonotrody byla navíc definována díra se závitem v upnutí sonotrody (obr. 26). Ostatní informace platí obdobně jako u sonotrody č. 2.



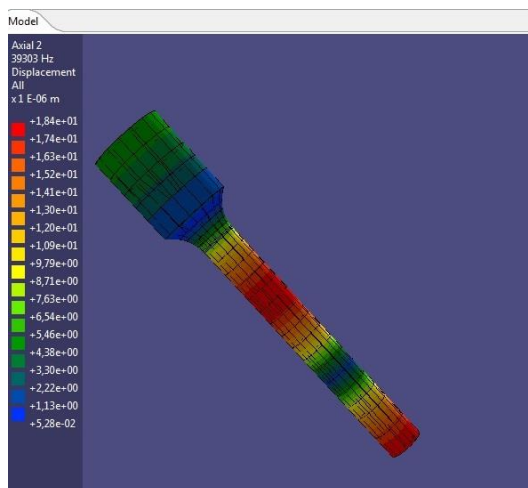
Obr. 25: Definování rozměrů pro sonotrodu č. 3 [27]



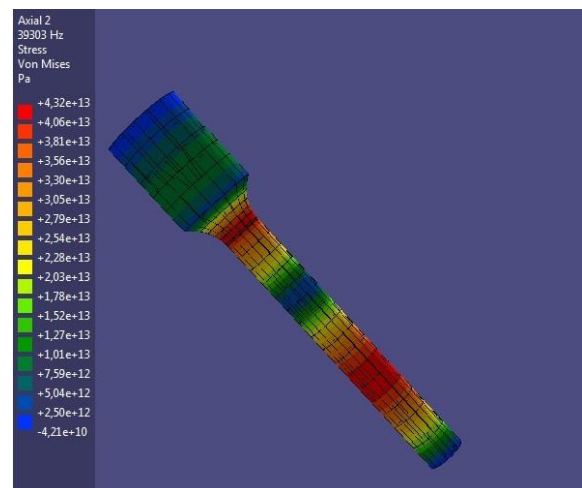
Obr. 26: Definování rozměrů pro sonotrodu č. 3 [27]



Obr. 27: Definování materiálu pro sonotrodu č. 3 [27]



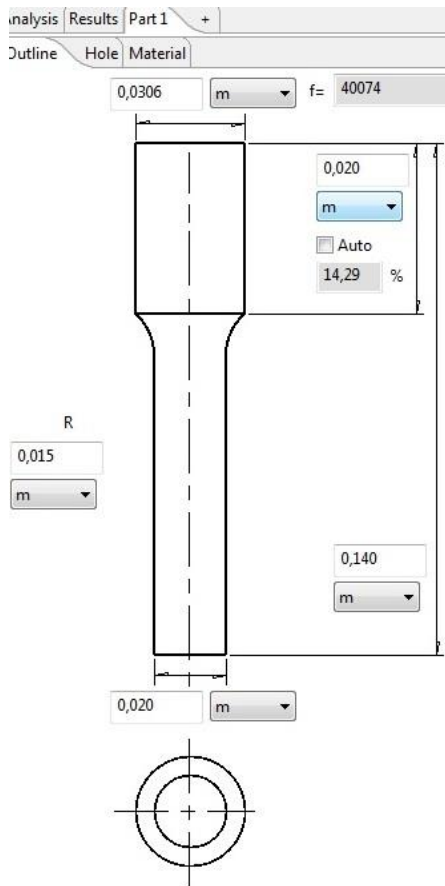
Obr. 28: Průběh kmitání sonotrodou č. 3 [27]



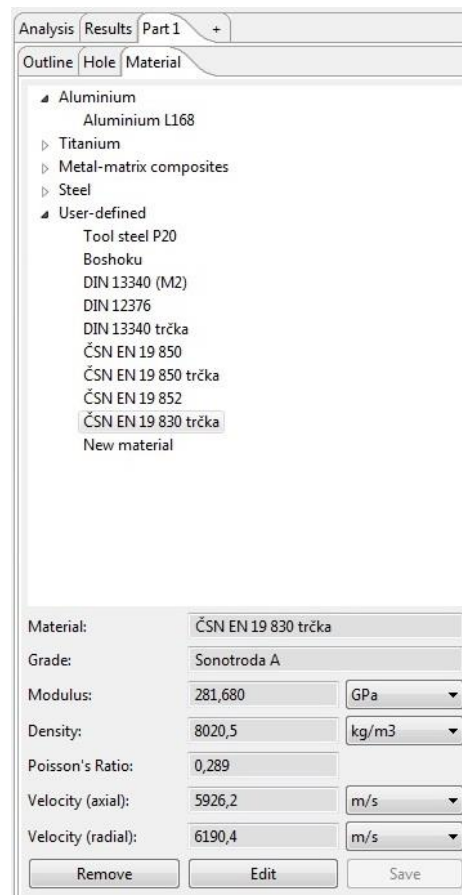
Obr. 29: Průběh napětí sonotrodou č.3 [27]

### Sonotroda A – ČSN 19 830

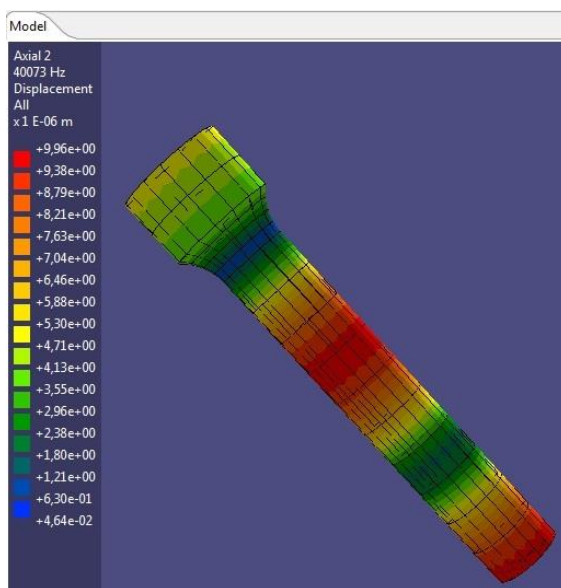
Zjištěná frekvence u funkčních sonotrod byla kolem 40 000 Hz, proto byla sonotroda z kované nástrojové oceli navržena tak, aby se její frekvence také pohybovala kolem této hodnoty. V tomto případě vyšla frekvence 40 074 Hz (obr. 30).



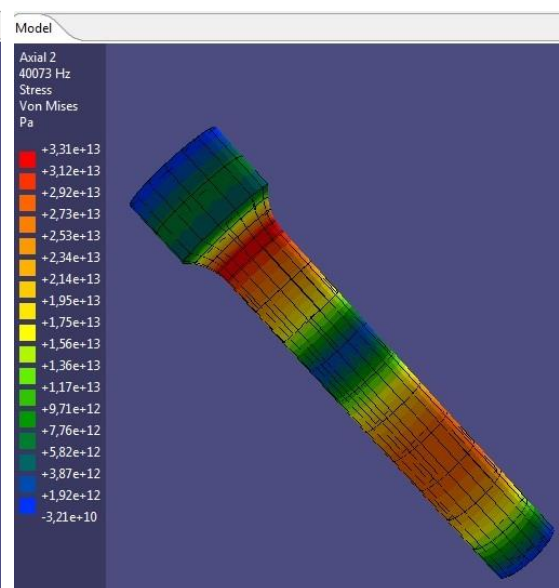
Obr. 30: Definování rozměrů pro sonotrodu A [27]



Obr. 31: Definování materiálu pro sonotrodu A [27]



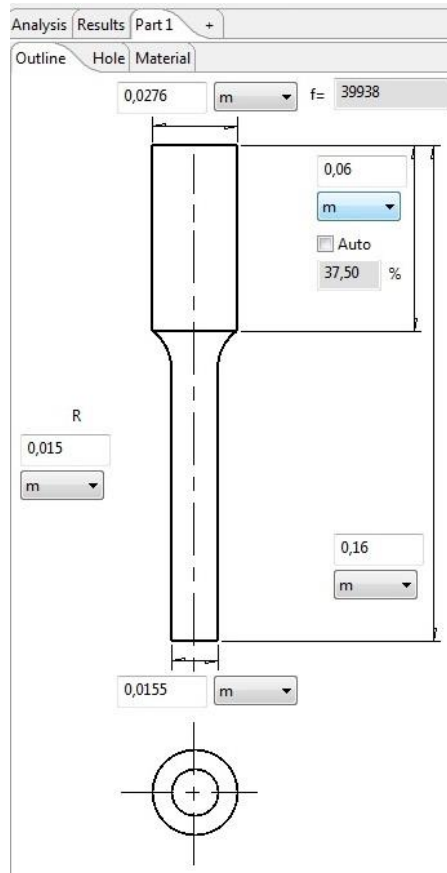
Obr. 32: Průběh kmitání sonotrodou A [27]



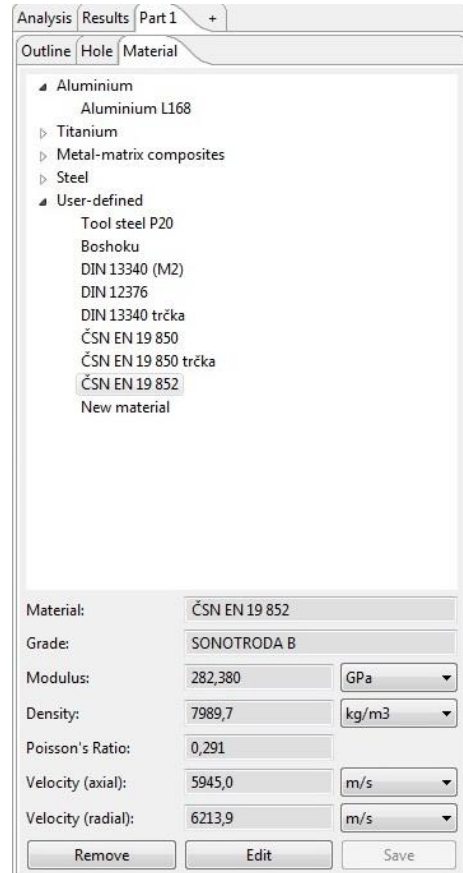
Obr. 33: Průběh napětí sonotrodou A [27]

## Sonotroda B – ČSN EN 19 852

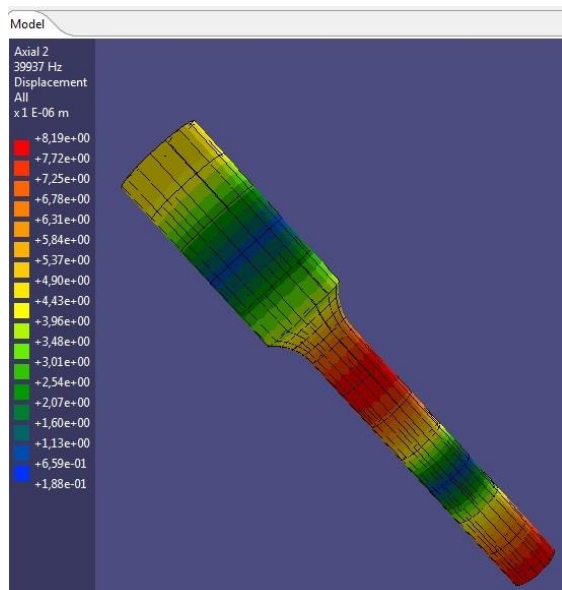
U této sonotrody vyšla frekvence 39 998 HZ (obr. 34)



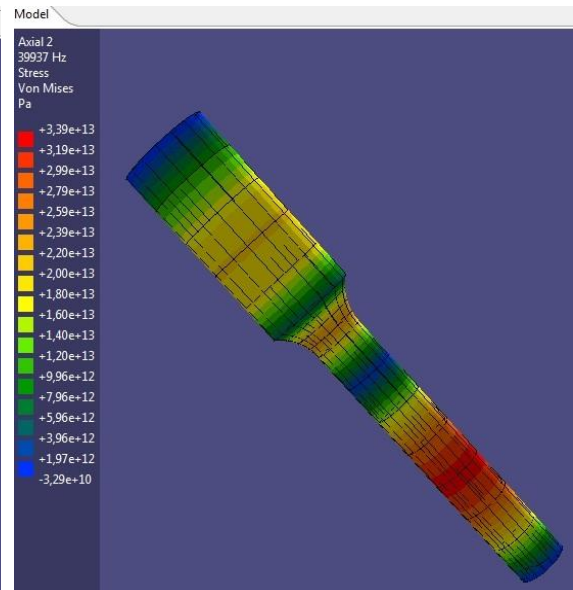
Obr. 34: Definování rozměrů pro sonotrodu B [27]



Obr. 35: Definování materiálu pro sonotrodu B [27]



Obr. 36: Průběh kmitání sonotrodou B [27]



Obr. 37: Průběh napětí sonotrodou A [27]

## 9. Popis měření

### 9.1 Použité prostředky

K měření rychlosti ultrazvuku byl použit přístroj Olympus Epoch 1000i (obr. 38), který vlastní Západočeská univerzita v Plzni. Epoch 1000 je pokročilý konvenční ultrazukový detektor vad, který lze aktualizovat pomocí fázového zobrazování v autorizovaném středisku společnosti Olympus. Klíčové vlastnosti zahrnují kompatibilitu s normou EN 12668-1, výběr 37 digitálních přijímacích filtrů a opakovací frekvenci impulsu 6 kHz pro vysokorychlostní skenování. [28]

Dále byly použity 3 sondy. Dvě z nich (4 MHz a 1 MHz) sloužily k měření rychlosti podélných vln a třetí (1 MHz) k měření vln příčných. Pro měření podélných i příčných vln se používá příslušný kontaktní gel.



Obr. 38: Přístroj Olympus Echo 1000i a dvě sondy pro měření podélných ultrazukových vln (vlevo 4 MHz, vpravo 1 MHz)

### 9.2 Postup měření rychlosti ultrazvuku

Měření probíhalo následujícími metodami. Tyto metody jsou stejné pro měření podélných i příčných ultrazukových vln.

### Průchodová metoda

Z obou stran byl na vzorek nanesen kontaktní gel. Na jednu stranu byla přiložena vysílací sonda o frekvenci 4 MHz, na druhou stranu přijímací sonda o frekvenci 1 MHz. Na displeji se začne objevovat echo, které se mírným pohybem mění. V případě nesilnějšího signálu se displej zmrazí a sondy mohou být odloženy. Na displeji je vidět kdy ultrazvuk do sondy vstoupil a kdy se dorazil do přijímací sondy. Na signál vstupu se nastaví brána A, na signál výstupu brána B. Tyto brány ve skutečnosti slouží k upozornění na vadu v materiálu, v tomto případě pomocí jsou využité k označení největšího peaku (nejsilnější signál) na vstupu či výstupu. Za předpokladu, že tyto největší peaky jsou ve stejné fázi signálu na vstupu i výstupu, se může měřit vzdálenost mezi vstupem i výstupem.

Další krok je použití referenčních kurzorů. Referenční kurzor A se nastaví tak, aby se kryl s největším peakem v bráně A. Podobně se nastaví i referenční kurzor B, který se překrývá největší peak brány B. Přístroj dokáže přesně měřit vzdálenost mezi referenčními kurzory ve třech jednotkách, kterými jsou palce, milimetry a mikrosekundy. V praxi se využívají hlavně palce nebo milimetry a tato funkce využívána ke stanovení hloubky, ve které je vada materiálu. V tomto případě se využívají mikrosekundy, takže výstupem je čas s přesností  $0,01 \mu\text{s}$ , za který ultrazvukový signál projde celou tloušťkou materiálu.

Pro zjištění rychlosti ultrazvuku je nutné ještě zjistit tloušťku zkoušeného vzorku. K tomuto úkonu bylo použité posuvné měřítko s přesností 0,01 mm.

Zjištěné hodnoty se dosazují do rovnice (3).

$$c = \frac{2*s}{t} \quad (3)$$

c – rychlost ultrazvuku [m/s]

t – čas průchodu vlny materiálem [s]

s – šířka vzorku [m]

### Odrazová metoda

Postup se od metody liší použitím pouze jedné sondy, konkrétně 4 MHz. Tato sonda má funkci vysílání i přijímání signálu. Ultrazvuku je vyslán sondou, projde celým materiálem až na protější stranu, kde se odrazí a putuje zpět do sondy. Po zmrazení displeje se dále postupuje stejně jako u metody průchodové. Na obr. 39 je příklad měření. Odečtený čas je v tomto případě 16,55  $\mu\text{s}$ .

Díky použití jedné sondy je tato metody jednodušší z hlediska manipulace. Pro kontrolu správnosti měření je nejlepší provádět měření oběma metodami.



Obr. 39: Ukázka měření odrazovou metodou (P/E)



### 9.3 Výpočet dalších parametrů materiálu

Na základě zjištěných rychlostí příčných a podélných ultrazvukových vln v materiálu jsou počítány další parametry. Tyto parametry jsou nutné pro práci v softwaru Sonoanalyzer (viz 3.4).

#### Modul pružnosti v tahu

$$c_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \Rightarrow E = c_p^2 * \rho \quad (4)$$

$c_p$  – rychlost šíření ultrazvuku podélné vlny [m/s]

$E$  – modul pružnosti v tahu [Pa]

$\rho$  – hustota materiálu [kg/m<sup>3</sup>]

#### Poissonovo číslo

$$\mu = \frac{c_p^2 - 2 * c_s^2}{2 * (c_p^2 - c_s^2)} \quad (5)$$

$\mu$  – Poissonovo číslo [-]

$c_p$  – rychlost šíření podélné vlny ultrazvuku [m/s]

$c_s$  – rychlost šíření příčné vlny ultrazvuku [m/s]

#### Modul pružnosti ve smyku

$$G = \rho * c_s^2 \quad (6)$$

$G$  - modul pružnosti ve smyku [Pa]

$c_s$  – rychlost šíření příčné vlny ultrazvuku [m/s]

$\rho$  – hustota materiálu [kg/m<sup>3</sup>]

## 9.4 Ukázka výpočtu

Ukázka výpočtu všech předchozích parametrů. Zkoušená je sonotroda z Boshoku s.r.o. č. 3, která je zhotovena práškovou metalurgií. Výrobní označení je Art. 42441, Code 131202. Každá hodnota byla měřena třikrát a z těchto hodnot udělán aritmetický průměr. Hustota materiálu  $\rho = 7\,983,11 \text{ kg/m}^3$

### Podélná vlna v podélném směru

a) Průchodová metoda

$$s = 48,9 \text{ mm}$$

$$t = 16,55 \mu\text{s}$$

$$c = \frac{2 * s}{t} = \frac{2 * 48,9 * 10^{-3}}{16,55 * 10^{-6}} = 5\,909,37 \text{ m/s}$$

b) Odrazová metoda

$$s = 48,9 \text{ mm}$$

$$t = 16,55 \mu\text{s}$$

$$c = \frac{2 * s}{t} = \frac{2 * 48,9 * 10^{-3}}{16,55 * 10^{-6}} = 5\,909,37 \text{ m/s}$$

### Podélná vlna v příčném směru

a) Průchodová metoda

$$s = 13,9 \text{ mm}$$

$$t = 4,71 \mu\text{s}$$

$$c = \frac{2 * s}{t} = \frac{2 * 13,9 * 10^{-3}}{4,71 * 10^{-6}} = 5\,902,33 \text{ m/s}$$

b) Odrazová metoda

$$s = 13,9 \text{ mm}$$

$$t = 4,71 \mu\text{s}$$

$$c = \frac{2 * s}{t} = \frac{2 * 13,9 * 10^{-3}}{4,71 * 10^{-6}} = 5\,902,33 \text{ m/s}$$

### Příčná vlna v podélném směru

Odrazová metoda

$$s = 48,9 \text{ mm}$$

$$t = 30,36 \text{ } \mu\text{s}$$

$$c = \frac{2 * s}{t} = \frac{2 * 48,9 * 10^{-3}}{30,36 * 10^{-6}} = 3\,221,34 \text{ m/s}$$

### Příčná vlna v příčném směru

Odrazová metoda

$$s = 13,9 \text{ mm}$$

$$t = 8,8 \text{ } \mu\text{s}$$

$$c = \frac{2 * s}{t} = \frac{2 * 13,9 * 10^{-3}}{8,8 * 10^{-6}} = 3\,181,82 \text{ m/s}$$

### Výsledné rychlosti šíření ultrazvuku

Pro výpočet dalších parametrů se hodnoty rychlosti ultrazvuku stanoví aritmetickým průměrem příčného a podélného směru

$$\text{Podélná vlna: } c_p = \frac{5\,909,37 + 5\,909,37 + 5\,902,33 + 5\,902,33}{4} = 5\,905,85 \text{ m/s}$$

$$\text{Příčná vlna: } c_s = \frac{3\,221,34 + 3\,181,82}{2} = 3\,201,82 \text{ m/s}$$

### Modul pružnosti v tahu

$$c_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \Rightarrow E = c_p^2 * \rho = 5\,905,85^2 * 7983,11 = 2,784 * 10^{11} \text{ Pa} = 278,4 \text{ GPa}$$

Poissonovo číslo

$$\mu = \frac{c_p^2 - 2 * c_s^2}{2 * (c_p^2 - c_s^2)} = \frac{5\,905,85^2 - 2 * 3\,201,82^2}{2 * (5\,905,85^2 - 3\,201,82^2)} = 0,292$$

Modul pružnosti ve smyku

$$G = \rho * c_s^2 = 7\,983,11 * 3\,201,82^2 = 8,18 * 10^{10} Pa = 81,8 GPa$$

## 10. Vyhodnocení experimentálního programu

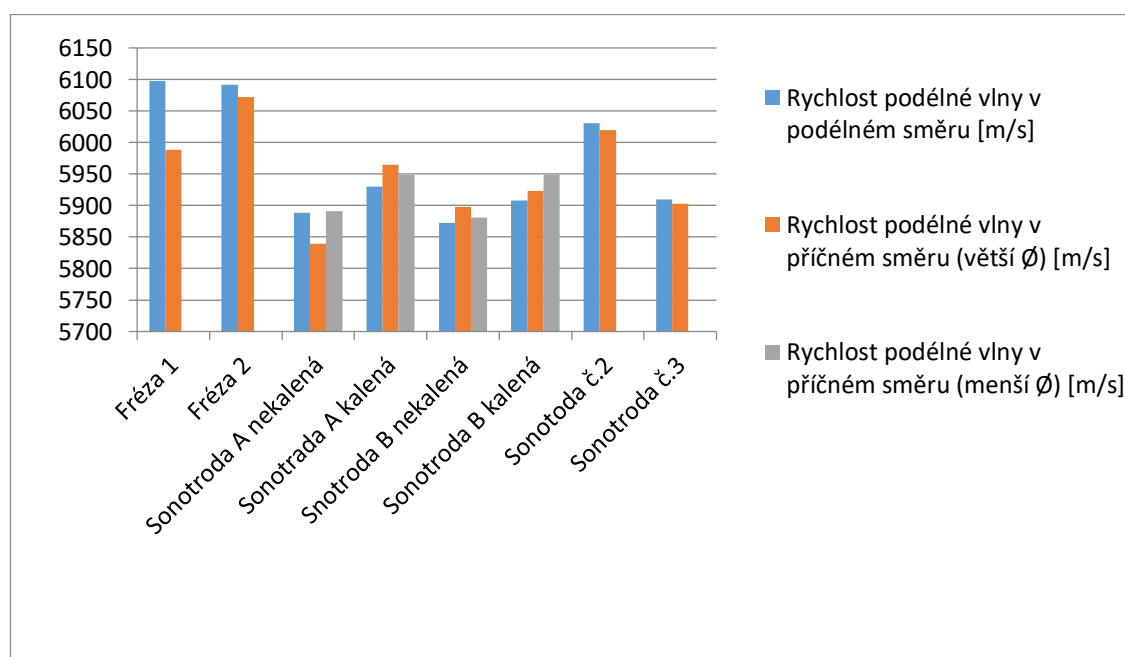
Celkem bylo změřeno 8 vzorků. Všechna měření byla opakována třikrát a za konečný výsledek je považován jejich aritmetický průměr. V tabulce 6 jsou všechny naměřené hodnoty, v tabulce 7 hodnoty spočtené moduly pružnosti a poissonova čísla. Na grafech 1,2 a 3 jsou znázorněny rychlosti ultrazvuku příslušných vzorků.

Označení vzorku/ materiál	Hustota materiálu [kg/m <sup>3</sup> ]	Směr měření	Vzdálenost [mm]	Rychlost šíření podélné vlny [m/s]		Rychlost šíření příčné vlny [m/s]
				Průchodová metoda	Odrazová metoda	Odrazová metoda
Fréza 1 ERA ASP 2052	7 872,8	Délka	46,4	6 097,2	6 105,3	3327,4
		Průměr	25	5 988,3	5 988,3	3 248,9
Fréza 2 ERA ASP 2052	8 173,5	Délka	56,1	6 091,2	6 074,7	3 357,3
		Průměr	32	6 072,1	6 066,4	3 338,6
Polotovar pro sonotrodu A ČSN EN 19 830 Před kalením	8 049,8	Délka	153,5	5 888,8	5 886,9	3 192,6
		Průměr	30,6	5 839,7	5 845,3	3 211,8
		Průměr	24,3	5 890,9	5 890,9	3 165,1
Polotovar pro sonotrodu A ČSN EN 19 830 Po kalení	8 020,5	Délka	153,5	5 930,2	5 924,5	3 207,2
		Průměr	30,6	5 964,9	5 953,3	3 231,3
		Průměr	24,3	5 948,6	5 948,6	3 246,5
Polotovar pro sonotrodu B ČSN EN 19 852 Před kalením	8 091,9	Délka	191,5	5 872,4	5 867,1	3 241,4
		Průměr	27,6	5 897,4	5 897,4	3 170,6
		Průměr	23,2	5 880,9	5 888,4	3 156,5
Polotovar pro sonotrodu B ČSN EN 19 852 Po kalení	7 989,7	Délka	191,5	5 907,8	5 908,7	3 221,7
		Průměr	27,6	5 922,7	5 935,5	3 226,2
		Průměr	23,2	5 948,7	5 933,5	3 233,4
Sonroda č. 2 WSK 1423.10	8 022,7	Délka	19,6	6030,8	6049,4	3347,6
		Průměr	22	6019,2	6019,2	3288,5
Sonotroda č. 3 ART 42441, code 131202	7 983,1	Délka	48,9	5 909,4	5 909,4	3 221,3
		Průměr	13,9	5 902,4	5 902,4	3 181,8

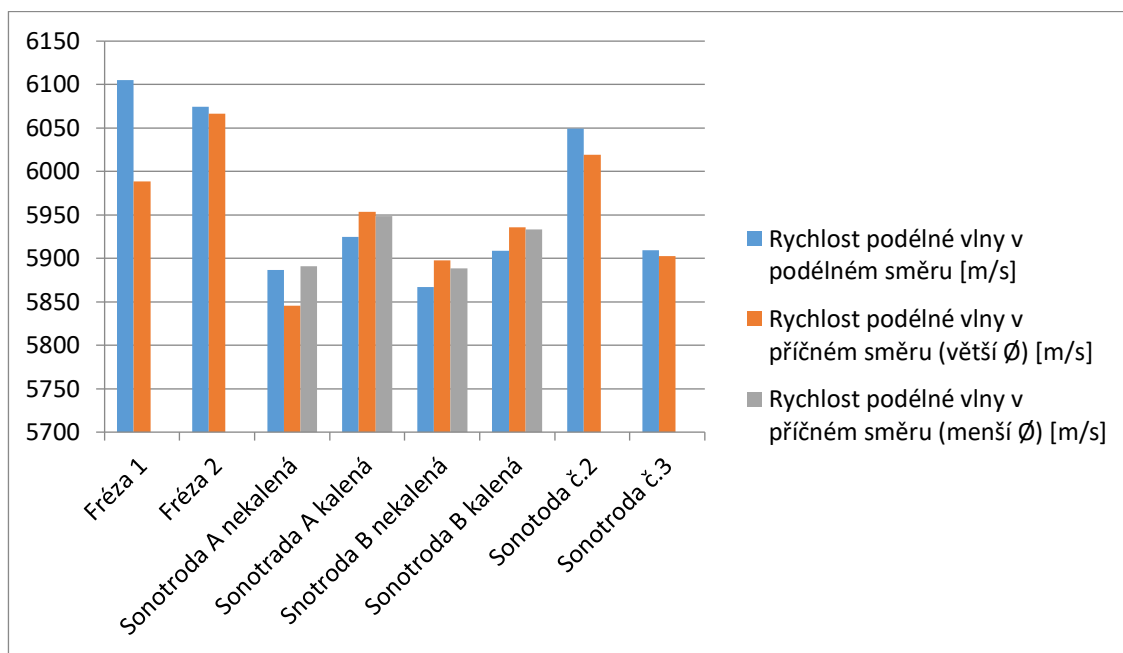
Tabulka 6: Hodnoty rychlosti ultrazvuku

Označení sonotrody (vzorku)	Materiál	$\mu$ [-]	E [GPa]	G [GPa]
Fréza 1 (Ø 25 mm)	ERA ASP 2052	0,290	287,65	85,12
Fréza 2 (Ø 32 mm)	ERA ASP 2052	0,282	295,99	91,61
Polotovar pro sonotrodu A před kalením	ČSN EN 19 830	0,286	277,68	83,27
Polotovar pro sonotrodu A po kalení	ČSN EN 19 830	0,289	281,69	83,53
Polotovar pro sonotrodu B před kalením	ČSN EN 19 852	0,292	280,15	82,32
Polotovar pro sonotrodu B po kalení	ČSN EN 19 852	0,291	282,38	83,27
Sonotroda č. 2 WSK 1423.10	DIN 1.2376 (X96CrMoV12)	0,289	281,75	83,55
Sonotroda č.3 ART 42411, code 131202	DIN 1.3340	0,292	278,41	82,77

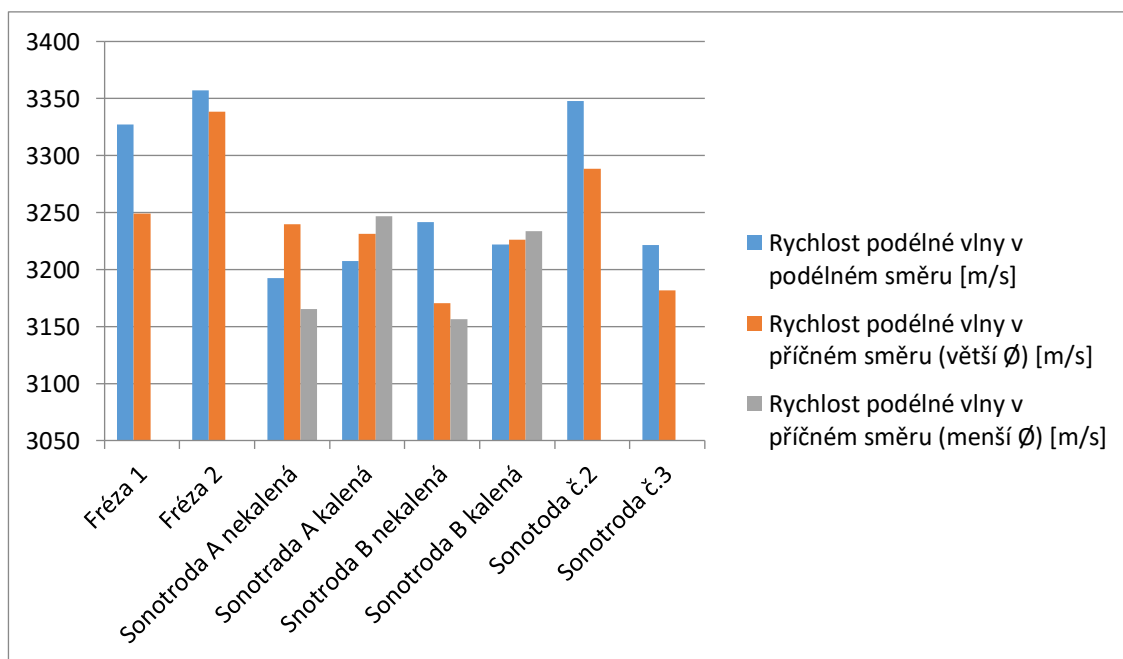
Tabulka 7: Mechanické hodnoty materiálů



Graf 1: Porovnání rychlostí podélné vlny u všech vzorků – metoda průchodová



Graf 2: Porovnání rychlostí podélné vlny u všech vzorků – metoda odrazová



Graf 3: Porovnání rychlostí příčné vlny u všech vzorků – metoda odrazová

## Závěr:

Svařování ultrazvukem je velmi moderní technologie. Základní princip je poměrně jasný, ale samotný průběh ultrazukových vln sonotrodou je složitější. V praxi jsou zavedené určité postupy, ale teoretického hledisko není příliš známo.

Tvařitelnost rychlořezných nástrojových ocelí není příliš dobrá a jejich kování je poměrně obtížné. Největší podíl na špatné tvařitelnosti má vysoký obsah uhlíku a legujících prvků, které podstatně zhoršují tepelnou vodivost.

Tepelné zpracování rychlořezných nástrojových ocelí je ovlivněné vysokým obsahem uhlíku a legujících prvků, podobně jako tvařitelnost. Předepsané tepelné postupy se musí přesně dodržovat. Kalící teploty jsou velmi vysoké a ohřevy musí být stupňovité.

Většina naměřených hodnot rychlosti ultrazvuku vyšla velmi podobně, což je předpoklad pro správné měření. Pouze u prvního vzorku z materiálu ASP 5025 vyšla podélná vlna v příčném a podélném směru rozdílná. Tento rozdíl je způsoben špatnou homogenitou ve struktuře vzorku.

Pro kované sonotrody z nástrojové oceli vyšli hodnoty ve směru podélném a příčném k ose rotace s minimálním rozdílem. To vypovídá o dobře protvářeném polotovaru a dostatečně homogenní struktuře.

Kované polotovary pro sonotrody z nástrojové oceli zaznamenaly po tepelném zpracování mírnou změnu rychlosti šíření ultrazvuku. Kalené sonotrody dovolují šíření rychlosti ultrazvuku o 1 – 2% vyšší, než sonotrody bez tepelného zpracování. Zároveň byla po kalení zjištěná mírně nižší hustota a vyšší objem, což je způsobeno změnou struktury na martenzitickou.

Podle zjištěných hodnot a rozměrů byly vytvořeny první simulace v softwaru Sonoanalyzer. Z těchto prvních simulací a naměřených hodnot rychlosti šíření ultrazvuku je patrné, že by kovaná nástrojová ocel mohla nahradit současné oceli zhotovené práškovou metalurgií.



## Seznam použité literatury

- [1] LEPIL, O. *Fyzika pro gymnázia: Mechanické kmitání a vlnění*. Prometheus, 2007, ISBN: 978-80-7196-387-5
- [2] OBRÁZ, J. *Zkoušení materiálu ultrazvukem*, SNTL Praha, 1989
- [3] [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory\\_soubory/hsv\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_svarovani\\_ultrazvukem\\_mrna.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv_specialni_metody_svarovani_svarovani_ultrazvukem_mrna.pdf)
- [4] REGAZZO, R., REGAZOVÁ, M. *ULTRAZVUK základy ultrazvukové defektoskopie*, Praha, 2013
- [5] DAVIS, J. R. *TOOL MATERIALS*, ASM SPECIALTY HANDBOOK, 1998
- [6] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/168-odraz-vlneni-v-rade-bodu-stojate-vlneni>
- [7] [http://dlabos.wz.cz/en/Eletkroakusticke\\_menice.html](http://dlabos.wz.cz/en/Eletkroakusticke_menice.html)
- [8] <http://www.tumlikovo.cz/rozdeleni-nastrojovych-oceli/>
- [9] [http://www.bolzano.cz/assets/files/TP/Nastrojove\\_oceli/MOP\\_Zpracovani%20nastrojovych\\_%20oceli.pdf](http://www.bolzano.cz/assets/files/TP/Nastrojove_oceli/MOP_Zpracovani%20nastrojovych_%20oceli.pdf)
- [10] [http://www.dukane.eu/downloads/cz/manuals/iQ\\_Hand\\_Probe\\_System\\_manual\\_C\\_Z.pdf](http://www.dukane.eu/downloads/cz/manuals/iQ_Hand_Probe_System_manual_C_Z.pdf)
- [11] KOVAŘÍK, R., ČERNÝ, F. *Technologie svařování*, ZČU v Plzni, 2000
- [12] KRAUS, V. *Tepelné zpracování a slinování*, ZČU v Plzni, 2013
- [13] HAŠK, V. *Kování*, SNTL Praha, 1965
- [14] SKÁLOVÁ, J., KOUTSKÝ, J., MOTYČKA V. *Nauka o materiálech*, ZČU v Plzni, 2000
- [15] LEINVEBER, J., VÁVRA P. *Strojnické tabulky, čtvrté doplněné vydání*, Albra, Úvaly, 2008
- [16] SKÁLOVÁ, J., BENEDIKT, V. *Nauka o kovech*, Ediční středisko VŠSE, Plzeň, 1987
- [17] <http://www.tumlikovo.cz/vliv-jednotlivych-prvku-na-vlastnosti-oceli/>
- [18] <http://www.tumlikovo.cz/pozadavky-na-vlastnosti-nastrojovych-oceli/http://www.tumlikovo.cz/pozadavky-na-vlastnosti-nastrojovych-oceli/>
- [19] KREIDL, M., ŠMÍD, R., MATZ, V., ŠTARMAN, S. *Ultrazvuková defektoskopie*, Praha, 2011
- [20] BENEŠOVÁ, S., KRÍŽ, A. *Kovárenství*. Plzeň: ZČU – KMM, 2012

- [21] BENEŠOVÁ, S., KŘÍŽ, A. *Využití numerické simulace k odhalení chyb a nesprávných cest při navrhování technologie tváření*. Plzeň: ZČU – KMM, 2017.
- [22] <http://www.otaisteel.com/products/cold-work-tool-steel/1-2376-steel/>
- [23] [http://www.tool-die-steels.com/grades/Special-Alloy/45/750/1\\_3340.html](http://www.tool-die-steels.com/grades/Special-Alloy/45/750/1_3340.html)
- [24] Software Lexikon kovů se zahraničními ekvivalenty
- [25] [https://rti.zcu.cz/laboratore/ldm/vybaveni\\_ldm.html](https://rti.zcu.cz/laboratore/ldm/vybaveni_ldm.html)
- [26] <http://www.sonoanalyzer.com/manual>
- [27] Software Sonoanalyzer pro
- [28] <https://www.olympus-ims.com/cs/ut-flaw/epoch1000/>