

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh nástroje pro ultrazvukové svařování – sonotrody – metodou
numerické simulace

Autor: **Jakub Mocek**

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

Akademický rok 2019/2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jakub MOCEK**
Osobní číslo: **S19B0445P**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie**
Téma práce: **Návrh nástroje pro ultrazvukové svařování – sonotrody – metodou numerické simulace**
Zadávací katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

Zásady pro vypracování

1. Rešeršní část:
 - a) Využití ultrazvuku v technologické praxi se zaměřením na svařování.
 - b) Materiály a tvar sonotrod, jejich vlastnosti s ohledem na svařování
 - c) Rychlořezné nástrojové oceli tvářené a vyrobené metodami práškové metalurgie
2. Praktická část:
 - a) Měření rychlosti ultrazvuku v kované nástrojové rychlořezné oceli
 - b) Simulace tvaru sonotrod v softwaru Sonoanalyzer
 - c) Vliv tepelného zpracování na změnu akustických vlastností materiálu
 - d) Návrh technologického postupu výroby sonotrod
 - e) Závěr

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

Seznam doporučené literatury:

LEPIL, O.: *Fyzika pro gymnázia: Mechanické kmitání a vlnění*. Prometheus, 2007, ISBN: 978-80-7196-387-5

OBRAZ, J. *Zkoušení materiálu ultrazvukem*, Praha: SNTL, 1989. ISBN 80-03-00097-1

Technická podpora-technická příručka (online) dostupné z: <http://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora>

DAVIS J. R., *Tool Materials, Asm Specialty Handbook*, ASM International, 1998. ISBN 13-978-0871705457

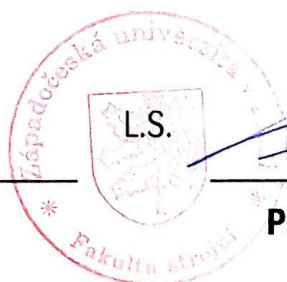
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Soňa Benešová, Ph.D.**
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

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

Datum zadání bakalářské práce: **5. října 2019**
Termín odevzdání bakalářské práce: **24. května 2020**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne: 23.7.2020

Mocek

.....
podpis autora

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Mocek	Jméno Jakub		
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	Návrh nástroje pro ultrazvukové svařování – sonotrody – metodou numerické simulace			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2020
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	72	TEXTOVÁ ČÁST	72	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	<p>Bakalářská práce je zaměřena na ultrazvukové svařování, konkrétně na návrh vhodného nástroje pro ultrazvukové svařování - sonotrody - metodou numerické simulace. V práci je provedena simulace různých návrhů sonotrody v programu SonoAnalyzer. Výsledky jsou mezi sebou porovnány a je zvolena nejlepší varianta.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	<p>Ultrazvukové svařování, návrh sonotrody, sonotroda, tvar sonotrody, numerická simulace, SonoAnalyzer</p>

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Mocek	Name Jakub	
FIELD OF STUDY	B2301 “Materials Engineering and Engineering Metallurgy“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Benešová, Ph.D.	Name Soňa	
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Design of a tool for ultrasonic welding - sonotrode - method of numerical simulation		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2020
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	72	TEXT PART	72	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The bachelor thesis is focused on the ultrasonic welding, specifically on a design of a suitable tool for ultrasonic welding - sonotrode - method of numerical simulation. In the thesis is a simulation of various sonotrode designs in the SonoAnalyzer program. The results are compared and the best option is selected.
KEY WORDS	Ultrasonic welding, the design of a sonotrode, sonotrode, the shape of a sonotrode, numerical simulation, SonoAnalyzer

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucí práce Ing. Soně Benešové, Ph.D. a Ing. Petru Benešovi, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost, poskytnutý čas a rady při tvorbě této bakalářské práce.

Obsah

1. Úvod.....	4
2. Základní pojmy	5
2.1 Fyzikální principy fungování ultrazvuku	5
2.1.1 Kmitavý pohyb (kmitání).....	5
2.1.2 Mechanické vlnění	5
2.1.3 Důležité fyzikální pojmy	5
2.1.4 Postupné vlnění	6
2.1.5 Stojaté vlnění.....	7
2.1.6 Zvuk	9
2.1.7 Ultrazvuk.....	10
3. Využití ultrazvuku v technologické praxi se zaměřením na svařování	11
3.1 Popis ultrazvukového svařovacího zařízení	13
3.2 Svařování kovových materiálů pomocí ultrazvuku	16
4. Svařování plastů pomocí ultrazvuku.....	16
5. Nastavení svařovacího zařízení	18
5.1.1 Amplituda.....	19
5.1.2 Atenuace.....	21
6. Materiály a tvary sonotrod, jejich vlastnosti s ohledem na svařování	21
6.1 Materiály sonotrod.....	21
6.1.1 Ferro-Titanit WFN	21
6.1.2 EN AW-7075.....	22
6.1.3 Ti-6Al-4V.....	23
6.2 Rychlořezné nástrojové oceli.....	23
6.2.1 EN ISO HS6-5-2	24
6.2.2 EN ISO HS6-5-2-5	24
6.2.3 Rychlořezné nástrojové oceli vyrobené metodami práškové metalurgie.....	25
6.3 Tvar sonotrod.....	25
6.4 Povrchové úpravy sonotrod	28
7. Měření rychlosti ultrazvuku v kované nástrojové oceli	29
8. Vliv tepelného zpracování na změnu akustických vlastností	31
9. Simulace tvaru sonotrod v softwaru SonoAnalyzer	32
9.1 Základní principy práce v programu SonoAnalyzer.....	32
9.2 Výpočet pracovní frekvence komerčních sonotrod	34
9.2.1 Shrnutí simulací.....	41

9.3	Navržení vlastní sonotrody v programu SonoAnalyzer	41
9.3.1	Návrh rozměrů sonotrody vyrobené z materiálu EN ISO HS6-5-2 po TZ	43
9.3.2	Návrh rozměrů sonotrody vyrobené z materiálu EN ISO HS6-5-2-5 po TZ	56
10.	Závěr	63
11.	Zdroje	65
11.1	Knihy a skripta	65
11.2	Internetové zdroje	66

Seznam použitých zkratk a symbolů

s.r.o.	společnost s ručením omezeným
a.s.	akciová společnost
TZ	tepelné zpracování
apod.	a podobně
tzn.	to znamená
popř.	popřípadě
např.	například
aj.	a jiný
mj.	mimo jiné
PVC	polyvinylchlorid
tj.	to jest
3D	trojrozměrný
PP	polypropylen
PET	polyethylentereftalát
PE	polyethylen
PA	polyamid
PC	polykarbonát
PS	polystyren
ABS	akrylonitrilbutadienstyren
PMMA	polymethylmethakrylát
HIP	izostatické lisování za tepla
USA	Spojené státy americké
SI	mezinárodní systém jednotek
č.	číslo
vid.	viděno

Zbylé zkratky a symboly jsou uvedeny u jednotlivých kapitol.

1. Úvod

Ultrazvukové svařování je metoda spojování dílů vyrobených ze stejných, nebo chemicky slučitelných materiálů pomocí vysokofrekvenčních ultrazvukových kmitů. Ultrazvukové svařování se v posledních letech prosadilo mezi ostatními spojovacími technologiemi a prochází zároveň prudkým vývojem. S vývojem přichází také nové možnosti pro vytvoření spoje. Proto se tato technologie v současné době používá pro různé druhy kovových materiálů a hlavně plastů. Ultrazvukové svařování tak našlo uplatnění například v elektronickém průmyslu, kde se využívá pro výrobu spotřebičů, spínačů a senzorů. Další příležitostí pro využití je například automobilový průmysl. Vzhledem k tomu, že se zde vyskytují velké výrobní série, může být ultrazvukové svařování nejlepší volba pro vytvoření pevného spoje.

Tato bakalářská práce vznikla ve spolupráci s firmami Boshoku s.r.o. a Hutchinson a.s. Obě společnosti se zaměřují na technologii ultrazvukového svařování plastů. To je důvod, proč se tato práce bude zaměřovat zejména na tuto technologii. Její součástí bude také návrh vlastní sonotrody, nástroje pro ultrazvukové svařování, vytvořený metodou numerické simulace.

Správný návrh sonotrody je velmi důležitý, jelikož má podstatný vliv na funkčnost celého svařovacího zařízení. Sonotroda je totiž z celého svařovacího zařízení nejvíce náchylná k poškození, jelikož je nejvíce namáhána. Její velmi krátká životnost představuje problém, protože výroba sonotrody je nákladná a problematická, jednak kvůli drahým materiálům, z nichž je vyrobena a pak také kvůli obtížnému docílení požadovaného tvaru sonotrody.

V druhé části své bakalářské práce se soustředím na praxi. Nejdříve se zaměřím na seznámení s uživatelským rozhraním programu SonoAnalyzer. Od společností Boshoku s.r.o. a Hutchinson a.s. byly dodány sonotrody, které u nich jsou již zařazeny do provozu. Poslouží mi především k porovnání jejich pracovních parametrů s parametry nově navržených sonotrod v programu SonoAnalyzer.

Poté přejdu k simulaci vlastních sonotrod. Vždy bude navržen tvar, režim kmitů, délka a zaoblení (rádius) v oblasti přechodu mezi částí pro upnutí a tělem sonotrody. Vyčísím také u každé z nich požadovanou pracovní frekvenci 35000 Hz pro materiály EN ISO HS6-5-2 po TZ a EN ISO HS6-5-2-5 po TZ. Tyto materiály byly vybrány, protože jsou oproti materiálům použitým pro výrobu komerčních sonotrod levnější. I když by měli mít podobné vlastnosti. Pro nově navržené sonotrody bude závazná i geometrie v oblasti upnutí a průměr hrotu sonotrody. Na základě závěrečného shrnutí těchto simulací bude možné vyhodnotit vlastnosti jednotlivých sonotrod a navzájem je mezi sebou porovnat.

2. Základní pojmy

Tato kapitola se zaměřuje na popis základních pojmů a principů, které budou použity v nadcházejících kapitolách. Úvodní část je věnována fyzikálnímu principu fungování ultrazvuku. Oproti tomu druhá část této kapitoly je již zaměřena výhradně na samotný ultrazvuk a jeho využití pro technologie, se kterými se můžeme setkat prakticky denně.

Počítačová simulace

Podstatou počítačové simulace je napodobení skutečnosti pomocí numerického výpočtu. Jedná se o nezbytnou součást modelování fyzikálních procesů. Cílem počítačové simulace je na základě sofistikovaných algoritmů předpovědět jak kvantitativní, tak kvalitativní výsledky pokusů při různých počátečních podmínkách. [13]

Numerická metoda

Pomocí numerické metody se hledá vhodné numerické řešení. Využívá se obvykle, pokud je nalezení analytického řešení komplikované, nebo dokonce nemožné. Numerická metoda je přesně popsána cesta k řešení numerické úlohy. [14]

2.1 Fyzikální principy fungování ultrazvuku

2.1.1 Kmitavý pohyb (kmitání)

Pohybující se těleso při kmitavém pohybu zůstává v okolí určitého bodu, který se nazývá rovnovážná poloha. Kmitavý pohyb je nerovnoměrný pohyb (velikost okamžité rychlosti se mění), jedná se rovněž o pohyb periodicky se opakující. Kmitem nazýváme periodicky se opakující část kmitavého pohybu. [15]

2.1.2 Mechanické vlnění

Vlnění je jedním z nejrozšířenějších fyzikálních jevů. Setkáváme se s ním v podobě zvuku, světla, rozhlasového či televizního vysílání atd. Vlnění mají různou fyzikální podstatu, ale platí pro ně řada společných zákonitostí. Ze všech druhů vlnění je nejdůležitější mechanické vlnění. Podstatou mechanického vlnění je přenos kmitání látkovým prostředím. Šířením vln se nepřenášejí žádné látky. Je s ním ale spojen přenos energie. [1]

Mechanické vlnění vzniká v látkách všech skupenství a jeho příčinou je existence vazeb mezi částicemi (atomy, molekulami) prostředí, kterým se vlnění šíří. Kmitání jedné částice se v důsledku vzájemných vazeb přenáší na další částice. Současně se tak na ně přenáší energie kmitavého pohybu. Takové prostředí označujeme jako pružné prostředí. [1]

2.1.3 Důležité fyzikální pojmy

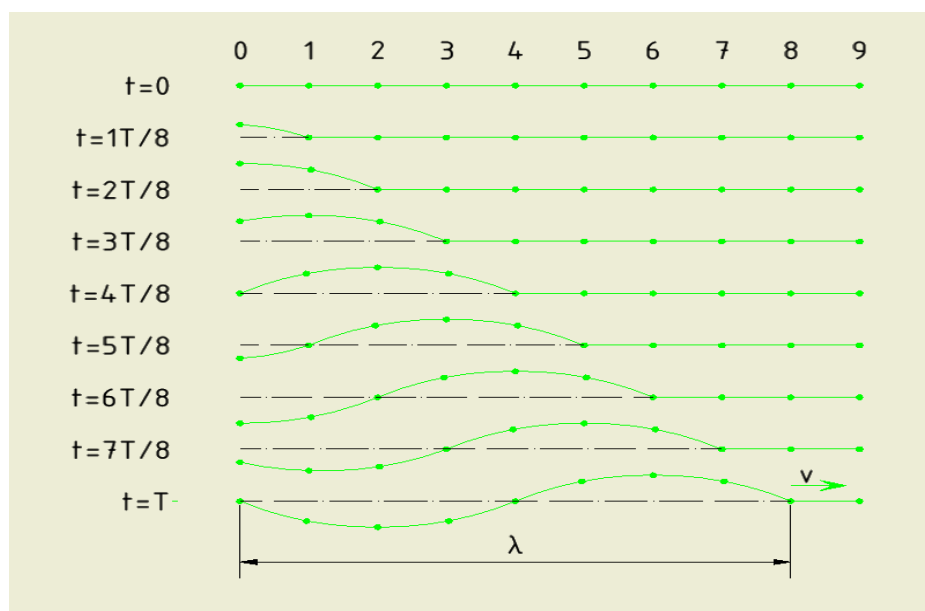
- Fáze φ [rad]: Popisuje vztah mezi časem (u vlnění i polohou) a okamžitou výchylkou.
- Perioda kmitání T [s]: Jedná se o čas, za který je vykonán jeden kmit (doba trvání jednoho cyklu vlny).

- Frekvence kmitání f [Hz]: Udává počet kmitů za sekundu. Její převrácenou hodnotou je perioda.
- Rychlost kmitání v [m/s]: Rychlost, kterou se šíří vlnění daným prostředím.
- Rovnovážná poloha: Je to poloha, ve které má těleso nejmenší potenciální energii.
- Amplituda $[\mu m]$: Vyjadřuje sílu zvuku, to znamená, na kolik se zdroj vychyluje z rovnovážné polohy.
- Vlnová délka λ [m]: Jedná se o vzdálenost, kterou vlna urazí za dobu jednoho kmitu (periody). Jde o vzdálenost dvou sousedních bodů, které kmitají ve stejné fázi. Vlnová délka je definována vztahem: $\lambda = v * T = \frac{v}{f}$ (1)

[1] [16] [17] [18] [19] [20]

2.1.4 Postupné vlnění

Vznik postupné vlny zachycuje následující obrázek (Obrázek 1). Na něm jsou částice látkového prostředí znázorněny jako hmotné body ležící na přímce ve stejných vzdálenostech od sebe. Rychlost postupného vlnění v je v daném směru konstantní. Všechny body kmitají se stejnou amplitudou a se stejnou frekvencí, ale fáze jejich kmitání se liší. Se stejnou fází kmitají body navzájem vzdálené o vlnovou délku (λ), popř. o její násobky. [1]



Obrázek 1 - Postupné vlnění v řadě bodů [1]

Druhy postupného vlnění:

- I. Postupné příčné vlnění: Je to takové vlnění, při němž hmotné body kmitají kolmo na směr, kterým vlnění postupuje. Tento druh vlnění je charakteristický pro pružná pevná tělesa ve tvaru tyčí, vláken apod.
- II. Postupné podélné vlnění: Částice pružného tělesa při tomto druhu vlnění kmitají ve směru, kterým vlnění postupuje. Vzniká v tělesech všech skupenství, tedy i v kapalinách a plynech, která jsou pružná při změně objemu (tzn. při stlačování a rozpínání). Takovým vlněním je například šíření zvuku v pružných látkách.

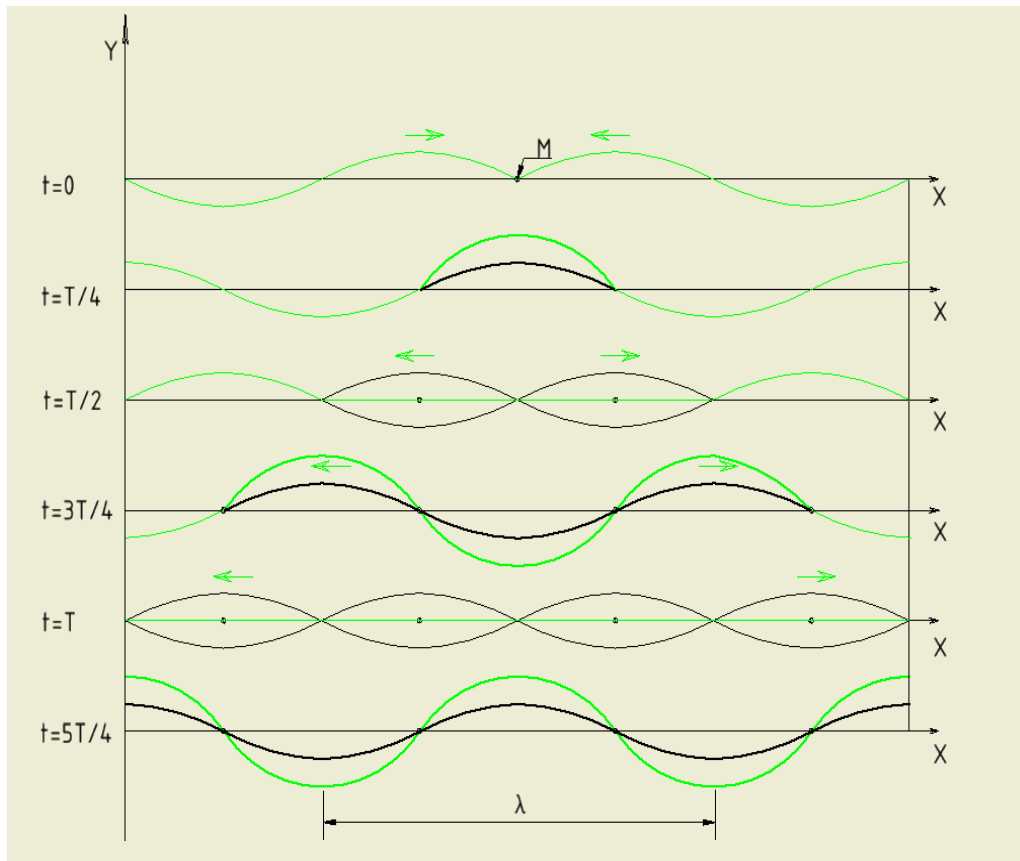
[1]

Rychlost mechanického vlnění závisí na vlastnostech pružného prostředí a je různá pro vlnění příčné a podélné. Když po určité době dospěje postupné vlnění na konec řady svých bodů, po které se šíří, nastává jeho odraz. Po odrazu může dojít k tomu, že se vlnění odrazí se stejnou, nebo opačnou fází. Vše záleží na tom, zda k odrazu dojde na pevném, nebo volném konci. Na pevném konci se postupné vlnění odrazí s opačnou fází. Oproti tomu na volném konci se vlnění odrazí se stejnou fází. [1]

2.1.5 Stojaté vlnění

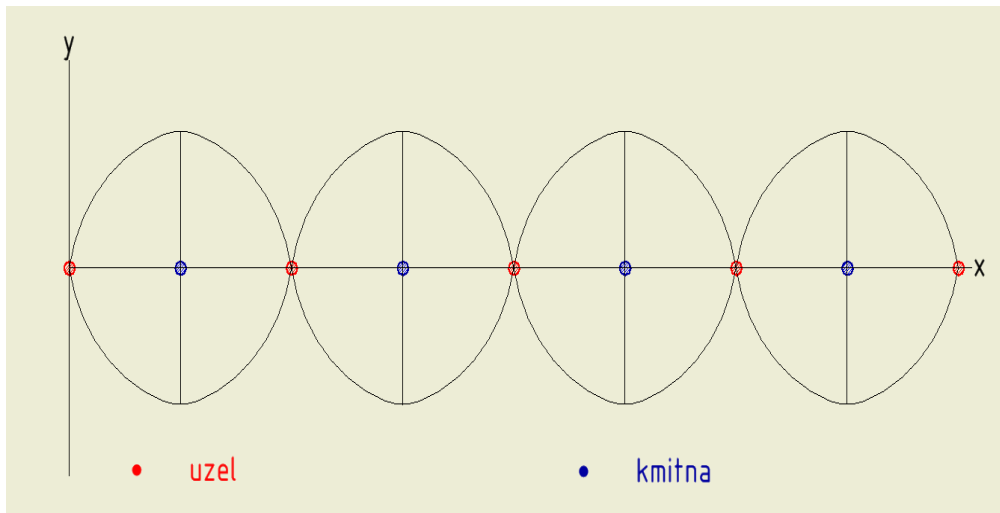
Stojaté vlnění vzniká za předpokladu, že jeden konec pružného vlákna trvale harmonicky kmitá. Vlnění směřuje ke druhému konci pružného vlákna, kde se vlnění odrazí a postupuje opačným směrem ke zdroji vlnění. Nastává tedy případ, kdy dochází k interferenci přímého a odraženého vlnění, které postupují stejnou rychlostí, ale opačnými směry. [1]

Oproti postupnému vlnění, kdy všechny body postupně kmitají se stejnou amplitudou, je v tomto případě amplituda jednotlivých bodů kmitajícího vlákna různá. Některé body vlákna dokonce zůstávají trvale v klidu. [1]



Obrázek 2 - Vznik stojatého vlnění [1]

Vznik stojatého vlnění začíná v čase $t = 0$, kdy se obě vlnění setkávají v bodě M. Vývoj stojatého vlnění je zakreslen po časových intervalech $T/4$. Bod M je od všech dalších bodů vzdálen o $\lambda/2$, tedy o celistvé násobky poloviny vlnové délky (λ) a totéž platí pro vzdálenosti mezi ostatními body. Všechny tyto body kmitají amplitudou, takže v nich vzniká kmitna stojatého vlnění. Pojmeme kmitna stojatého vlnění se tedy označuje bod, který se při kmitání nejvíce vzdaluje od své rovnovážné polohy. Naopak body vyznačené tečkami zůstávají ve všech fázích periody stále v klidu. Jsou to uzly stojatého vlnění. Rovněž uzly jsou ve vzájemné vzdálenosti $\lambda/2$. Poloha kmiten a uzlů stojatého vlnění se nemění. Kmitna je ve vzdálenosti $\lambda/4$ od uzlu. [1]



Obrázek 3 - Popis stojaté vlny [21]

Stojaté vlnění se dělí na příčné, nebo podélné. U podélného vlnění dochází k největšímu zhuštění, popř. zředění kmitajících částic v kmitnách, kdežto částice v uzlech nekmitají. [1]

Pro srovnání stojatého a postupného vlnění je důležité zmínit rozdíl obou vlnění z hlediska přenosu mechanické energie:

- I. Postupným vlněním se přenáší energie.
- II. Stojatým vlněním se energie nepřenáší, ale jen se periodicky mění potenciální energie pružnosti částic prostředí v jejich kinetickou energii a naopak

[1]

2.1.6 Zvuk

Mechanické vlnění, které jsme schopni vnímat sluchem označujeme jako zvuk. Zdrojem zvuku je chvění pružných těles, které se šíří okolním prostředím a vzbuzuje vlnění. Zvuk se šíří dobře v pružných látkách jako jsou např. beton, ocel a sklo. Naopak v látkách, které nejsou dostatečně pružné se zvuk šíří špatně. Pro šíření zvuku je nejdůležitější charakteristikou rychlost šíření zvuku. Obecně platí, že pro kapaliny a pevné látky je rychlost zvuku větší než pro látky plynné. Šíření zvuku je rovněž ovlivněno překážkami, na které vlnění dopadá. [1]

2.1.7 Ultrazvuk

Ultrazvuk je mechanické vlnění s velmi malou vlnovou délkou a frekvencí vyšší než 16 kHz. To je důvod proč ho člověk není schopen vnímat sluchem. Ultrazvukové vlny se mohou šířit ve tvaru úzkých paprsků, které se podobají světelným paprskům. Mohou se odrazet, lámat a zaostřovat. Platí pro ně zákony podobné zákonům geometrické optiky. Díky své malé vlnové délce jsou ultrazvukové vlny schopné soustředit celou svou energii zvuku v požadovaném směru, zároveň jsou schopné soustředit celou svou energii do nevelkého objemu (zaostřit). Pro zaostřování ultrazvuku je možné použít dutých zrcadel a čoček. Zvukové čočky se tvarem podobají optickým, ale zhotovují se z materiálů, v nichž se rychlost šíření zvuku liší od rychlosti zvuku v okolním prostředí. [1] [22]

Přestože člověk ultrazvuk neslyší, dokáže jej využít s pomocí řady přístrojů a technologických postupů. Zde jsou některé způsoby využití ultrazvuku v praxi:

Ultrazvukový odpuzovač

Jak již bylo zmíněno, ultrazvuk je pro člověka neslyšitelný. Nicméně celá řada živočichů je schopná ho vnímat (např. psi, delfini, netopýři aj.). Využívají toho výrobci odpuzovačů švábů a hlodavců. Tyto odpuzovače vydávají hlasitý zvuk ve frekvenčním rozsahu ultrazvuku, aby škůdce zahaly. Mnoho spotřebitelů by však mohlo potvrdit, že účinnost těchto odpuzovačů je často sporná. [1] [23]

Sonar

Sonar se za druhé světové války používal pro odhalení a sledování ponorek pod hladinou. V současné době se sonary používají při navigování lodí pomocí mapování mořského dna v blízkosti pobřeží a v mělkých vodních cestách. Způsob fungování sonaru lze popsat tak, že nejprve vysílá pulzy zvuku, nebo ultrazvuku. Měřením času potřebného k tomu, aby se pulzy odrazily od vzdáleného objektu a vrátily se zpět ke zdroji, jsme schopni zjistit vzdálenost tohoto objektu. Jednou z výhod ultrazvukových vln ve vodě je to, že mají oproti vlnám zvukovým vyšší frekvenci a kratší vlnovou délku. Proto jsou schopny cestovat na vyšší vzdálenost s nižší odchylkou. [24]

Obrábění ultrazvukem

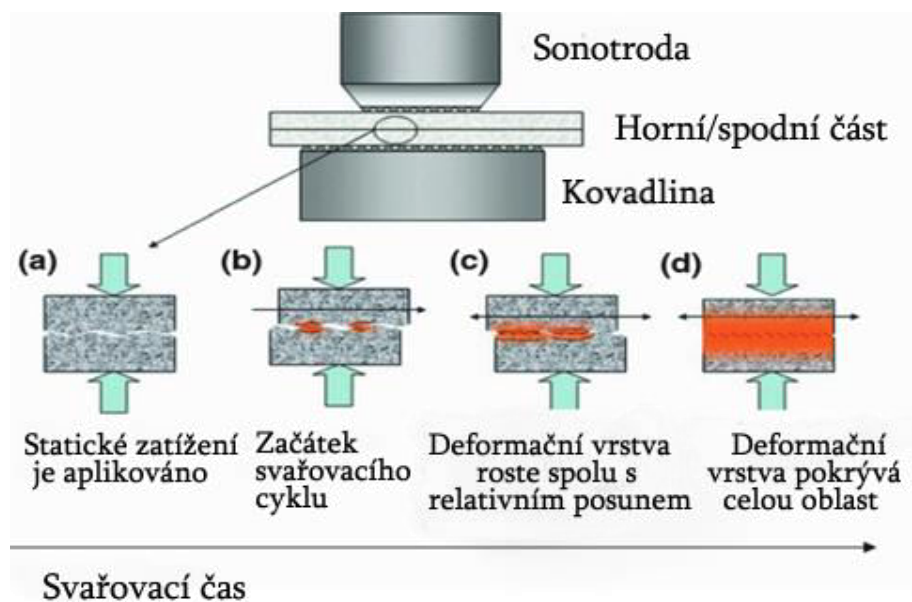
Ultrazvukové obrábění využívá vibrace měniče (podstata fungování elektroakustického měniče bude popsána samostatně v kapitole - Popis ultrazvukového svařovacího zařízení) s vysokou intenzitou k pohybu obráběcího nástroje. Pro lepší mechanické obroušení (abrazi) a účinnost obrábění se mezi nástroj a obrobek přivádí kaše obsahující drť karbidu křemíku, nebo boru. Rozkmitaný nástroj je přitlačen k obrobku a vlivem mechanického obroušení (abraze) dochází k úběru materiálu. Tento způsob obrábění je velmi přesný, obrábějí se tak křehké materiály, které je jinak obtížné obrábět. [24] [25]

K dalším možným formám využití ultrazvuku v praxi patří například ultrazvukové svařování. Princip fungování této technologie bude podrobněji popsán v následující kapitole.

3. Využití ultrazvuku v technologické praxi se zaměřením na svařování

Ultrazvukové svařování se nejčastěji využívá tam, kde jiné technologie nevyhovují. Příkladem toho, co je nejlepší svařovat ultrazvukem, jsou mj. části kondenzátorů, přívodné drátky k polovodičům a jhům magnetických cívek, pouzdra tranzistorů, nebo speciální měřicí přístroje. Pomocí švového svařování s použitím ultrazvuku se hermeticky uzavírají obaly chemikálií, léčiv, výbušnin a radioaktivních látek. Značné uplatnění našlo ultrazvukové svařování zejména při spojování termoplastů. Příkladem může být obalová technika z polystyrénu, polyetylénu, tvrzeného PVC a polyakrylátu pro strojírenství a potravinářství. [2] [26]

Ultrazvukové svařování je proces, při němž jsou spojované předměty vystaveny současnému působení tlaku a mechanických kmitů. Spoj vzniká v důsledku působení potřebné přítláčné síly a kmitání proudícího do místa spoje prostřednictvím sonotrody. Vlivem tření mezi oběma spojovanými materiály dochází nejprve k zarovnání povrchových nerovností a pak k ohřátí místa styku na teplotu, která dosahuje maximálně 60 % teploty tavení svařovaných materiálů, což vytváří podmínky pro difúzi (vytvoření vazeb mezi spojovanými materiály), ne však pro natavení. Při svařování ultrazvukem se tedy na vzniku svarového spoje podílí plastická deformace a difúze. Pro ultrazvukové svařování je tak charakteristické, že za běžných podmínek nedochází k tepelnému ovlivnění materiálu. Proto se také výrazně nemění mechanické vlastnosti svarového spoje. [2] [3]



Obrázek 4 - Schéma svařovacího procesu [27]

Podstatnou nevýhodou ultrazvukového svařování je nutnost vyrobit pro každý typ spoje příslušné nástroje a přípravky na míru. To je pro tuto technologii značně limitující a brání jejímu

širšímu využití v průmyslu. Možnost svařování pomocí ultrazvuku je rovněž omezena tloušťkou svařovaných dílů. S rostoucí tloušťkou se zvětšuje útlum ultrazvukových kmitů (viz. následná kapitola - Atenuace). Maximální tloušťky dosud svařované ultrazvukem jsou 3,17 mm u hliníku, 2 mm u mědi, 0,5 až 0,75 mm u molybdenu, wolframu a kobaltu. Čím menší je tloušťka svaru, tím snáze je možné reprodukovat dosaženou pevnost svarového spoje. Ultrazvukem se tedy nejlépe svařují tenké plechy, fólie nebo dráty. [2] [26]

Výhody a nevýhody ultrazvukového svařování oproti ostatním způsobům svařování:

I. Výhody ultrazvukového svařování:

- Nevzniká teplem ovlivněná oblast.
- Nedochozí k výrazné změně mechanických vlastností v místě spoje.
- Minimální deformace ve svarovém spoji.
- Nízké svařovací časy – řádově jednotky sekund.
- Nevyžaduje se speciální úprava svařovaných ploch (u kovových materiálů).
- Nízká energetická náročnost.
- Lze svařovat materiály a jejich kombinace, které jsou tavnými způsoby svařování nesvařitelné, např. kombinace kovových a nekovových materiálů.

II. Nevýhody ultrazvukového svařování:

- Omezená tloušťka svařovaných dílů.
- Vyžaduje se speciální úprava svařovaných ploch (u plastů).
- Nutnost vyrobit pro každý typ spoje příslušné nástroje a přípravky na míru.
- Ne vždy je zaručena reprodukovatelnost pevnostních vlastností spoje.
- Životnost svařovacích nástrojů (sonotrod), které jsou vyrobeny např. ze slinovaných karbidů, rychlořezné oceli a wolframu, není vysoká.

[2] [28] [29]

Svařovací parametry:

- a) Přítlačná síla F_p [N]: Přítlačná síla zajišťuje přenos ultrazvukových kmitů ze svařovacího nástroje (sonotrody) do místa spoje.
- b) Amplituda kmitu u [μm]: Základní parametr. Se zvětšováním amplitudy výchylky svařovacího nástroje roste lineárně pevnost spoje. Naopak zmenšování vede ke zmenšení pevnosti spoje.

- c) Frekvence f [Hz]: Frekvence kmitání závisí rovněž na použitém zařízení. K dosažení kvalitního svarového spoje je důležité určení optimálních svařovacích parametrů, včetně technologických činitelů, tj. geometrie svařovacího nástroje (sonotrody).
- d) Svařovací čas τ [s]: Svařovací čas volíme co nejkratší, pro většinu materiálů bývá v rozmezí 0,3 až 6 s. Příliš dlouhá doba svařování může způsobit značné přehřátí místa spoje a v důsledku kmitání svařovaných součástí též trhliny, vznikající nejen v oblasti svaru, ale také ve větších vzdálenostech od ní.

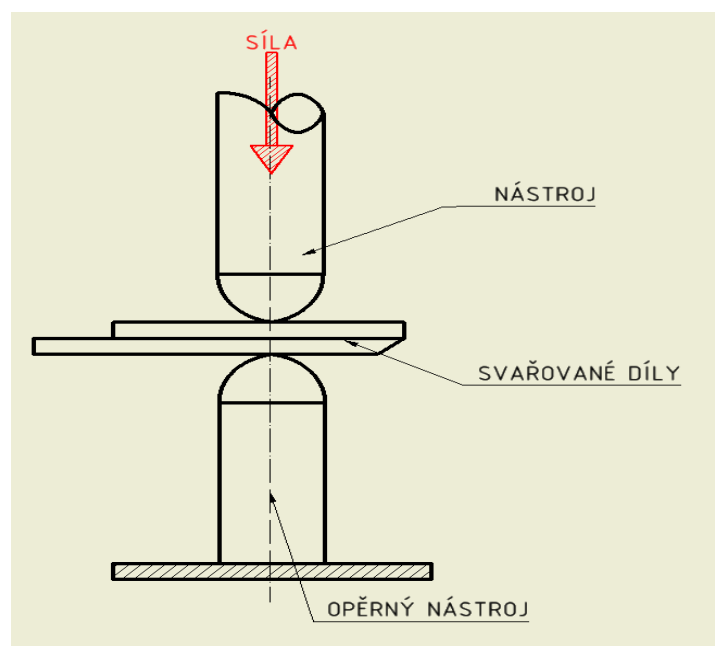
[3] [4] [30]

Základní režimy ultrazvukového svařování:

- a) Velká amplituda kmitu u , malá přitlačná síla F_p : Teplota v místě svaru se při tomto režimu rychle zvyšuje a dochází k místním velkým plastickým deformacím. Vysokou teplotou se urychlí difúze.
- b) Malá amplituda kmitu u , relativně velká přitlačná síla F_p : V tomto případě se získají spoje s lepšími pevnostními vlastnostmi. Teplota v místě svaru se zvyšuje pomaleji.

[2]

3.1 Popis ultrazvukového svařovacího zařízení



Obrázek 5 - Schéma svařovacího zařízení [2]

Mechanické kmity se v ultrazvukovém svařovacím zařízení získávají přeměnou elektrické energie. Pro tuto přeměnu se využívá elektroakustický měnič, který využívá buď piezoelektrický nebo magnetostrikční jev. Častěji se používá elektroakustický měnič založený

na piezoelektrickém jevu. Princip fungování obou měničů bude podrobněji popsán níže. Během svařovacího procesu se energie kmitů přenáší z měniče přenosovými články nejprve na svařovací nástroj (sonotrodu) a následně do místa styku spojovaných dílů. U většiny ultrazvukových svařovacích zařízení s piezoelektrickými měniči přenáší svařovací nástroj podélné kmity. Existují však i zařízení vytvářející kmity, které jsou vynuceny pohyby torzními. [2] [31]

Elektroakustický měnič

Toto zařízení převádí mechanickou energii na elektrickou energii. Je rovněž schopné provádět tento proces i obráceně, tj. dokáže převádět elektrickou energii na energii mechanickou. Existuje celá řada druhů elektroakustických měničů, ve spojení s ultrazvukem je však důležité zmínit dva hlavní druhy:

a) Magnetostrikční měnič

Činnost magnetostrikčního měniče je založena na magnetostrikčním jevu. Ten využívá deformace některých feromagnetických látek v magnetickém poli. Síla deformující materiál je při tom úměrná proudu, který budí magnetické pole. Kvůli malé účinnosti těchto měničů se používá především v oblasti ultrazvuku.

b) Piezoelektrický měnič

Tento druh měniče využívá piezoelektrický jev. Piezoelektrický jev vzniká při mechanickém namáhání některých druhů krystalů, na stěnách těchto krystalů tak dochází ke vzniku elektrického náboje. Piezoelektrický jev se projevuje jen u nesymetrických krystalů (barium-titanová keramika, nebo křemen). Velikost a polarita tohoto napětí závisí na velikosti a směru deformace krystalu. Při stlačení krystalu křemene tlakem 10^4 Pa vzniká v naproti sobě ležících stěnách krystalu napětí o velikosti řádově setiny voltu. Opačný jev se nazývá elektrostrikce a bývá využíván v měniči, který pracuje jako vysílač.

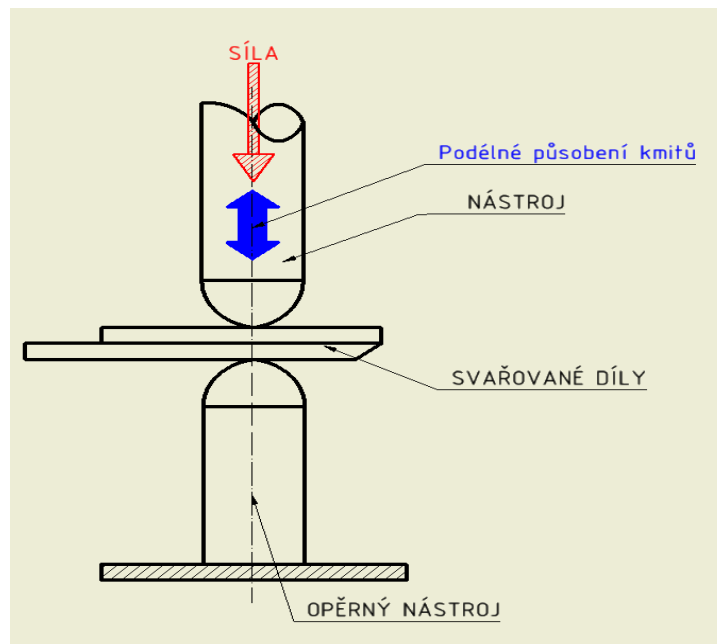
[2] [31] [32]

Sonotroda

Sonotroda je svařovací nástroj pro přenos kmitů do místa vytvoření spoje. Sonotrody jsou v dnešní době navrhovány pomocí metody konečných prvků. To je numerická metoda sloužící k simulaci rozložení napětí, průběhu amplitudy a pracovní frekvence navrženého nástroje. To zaručí optimální vlastnosti kmitání a dlouhou životnost nástroje. [33]

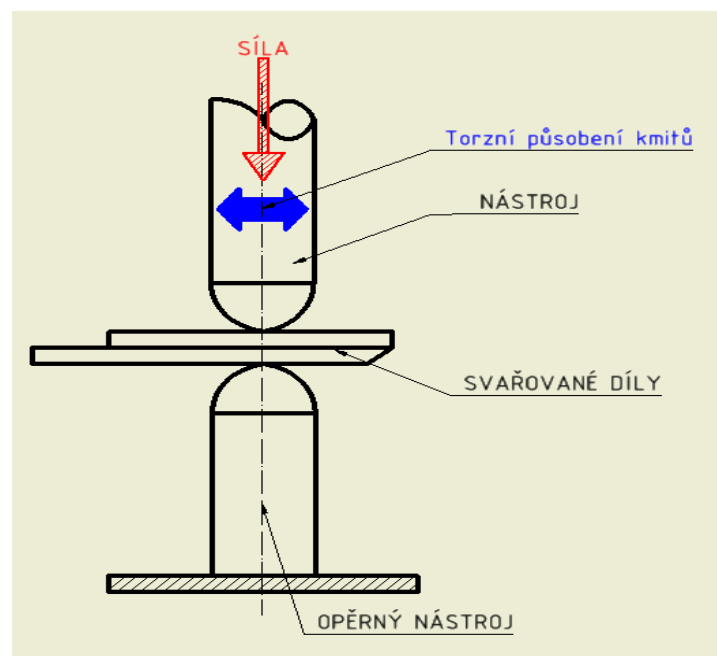
Druhy působení kmitů

Pro svařování kovů se běžně používá podélný i torzní způsob působení kmitů. Pro svařování plastů je však zcela dominantní podélný způsob působení kmitů. V současné době však výrobci nabízí ve svém portfoliu výrobků pro ultrazvukové svařování plastů i svařovací zařízení, která využívají torzní způsob působení kmitů.



Obrázek 6 – Schéma podélného způsobu působení kmitů [34]

- a) Podélný způsob působení kmitů: Kmity působí kolmo na spojované plochy. Sonotroda je uspořádána svisle a svařovací zařízení tlačí sonotrodu (nástroj) ve směru její osy směrem k hornímu spojovanému dílu.



Obrázek 7 - Schéma torzního způsobu působení kmitů [34]

- b) Torzní způsob působení kmitů: Sonotroda je uspořádána opět svisle, směr působení přítláčné síly je také stejný, ale zbytek procesu je již jiný. Kmity tentokrát působí torzně.

Sonotroda tak pohybuje horním spojovaným dílem vůči spodnímu dílu vodorovně. Díky torznímu pohybu sonotrody nezatěžuje ultrazvuk při svém působení spodní díl žádným napětím. Tento způsob je tak velmi vhodný pro aplikace, kde je kvůli riziku poškození nežádoucí působení kmitů i v nejbližším okolí spoje. Jedná se například o citlivé součástky, fólie, textilie a elektroniku.

[34] [35] [36] [37]

Vynucené kmity

Při vynuceném kmitání nutí vnější síla objekt kmitat s jinou frekvencí, než je frekvence vlastních kmitů. [38]

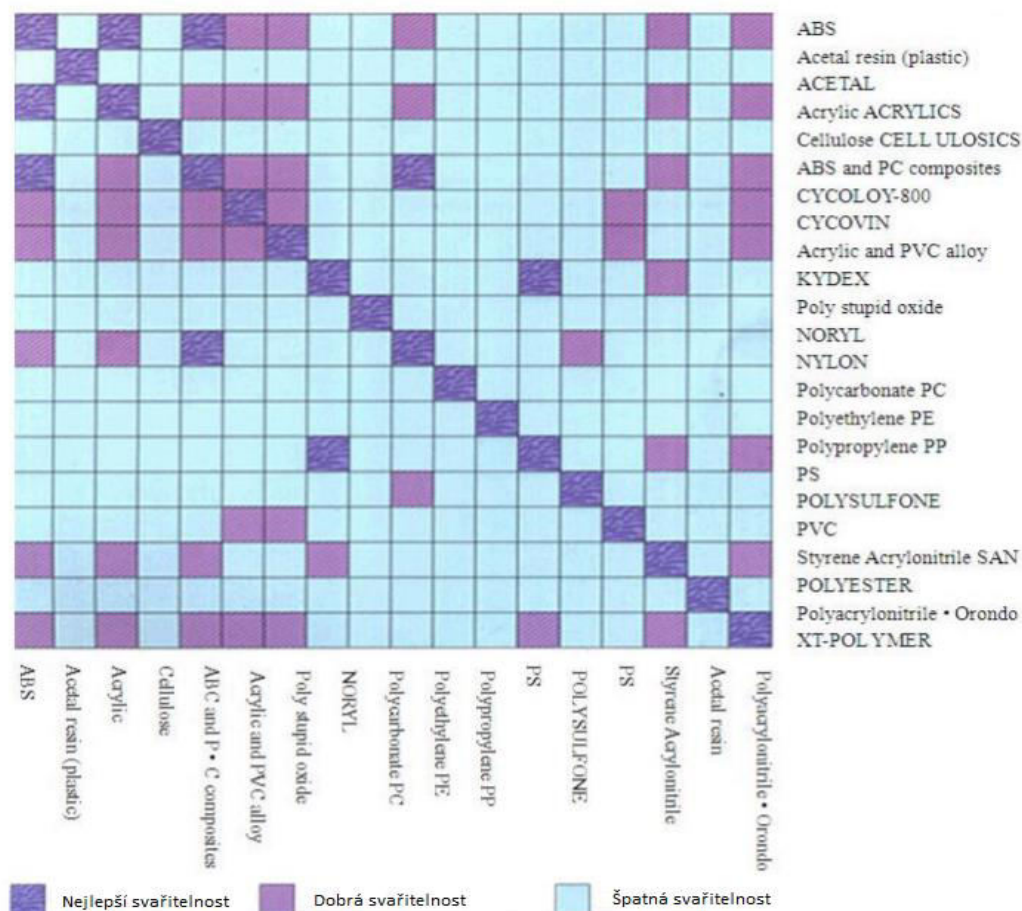
3.2 Svařování kovových materiálů pomocí ultrazvuku

Spoj vzniká bez přídavného materiálu v důsledku určitého plasticko-deformačního přesunu a difúze atomů svařovaných materiálů, a to za teploty nižší, než je teplota jejich tavení. Vznik spoje je podmíněn vytvořením kovových vazeb mezi atomy spojovaných kovových materiálů. Během svařovacího procesu se atomy spojovaných materiálů přiblíží v důsledku vibračního procesu až na vzdálenost mřížkových konstant, tj. až na vzdálenost účinků přitažlivých meziatomových sil (adheze atomů). U kovů je tato vzdálenost normálně menší než 10^{-3} μm , záleží však na druhu vazby mezi atomy. V místě svarového spoje vzrůstá energetická úroveň atomové krystalové mřížky a vytváří se centra poruch (dislokace, vakance). V určitých místech těchto povrchů vznikají kovové vazby. Jejich počet se v průběhu procesu zvětšuje, až vznikne svarový spoj. V místech vzniku spojů probíhají difuzní procesy, urychlené ultrazvukovými kmity a vysokou koncentrací dislokací a vakancí v povrchových partiích spojovaných materiálů. Vznik spojení probíhá snáze a intenzivněji při stejné, nebo co nejvíce přibližné krystalografické orientaci zrn spojovaných materiálů. Výhodně se svařují materiály s kubickou plošně centrovanou mřížkou (např. Al, Cu), které se vyznačují dobrou plastičností, na rozdíl od materiálů s kubickou prostorově centrovanou nebo hexagonální mřížkou. [3]

4. Svařování plastů pomocí ultrazvuku

Princip svařování kovů a plastů je v některých ohledech rozdílný. Spojované materiály se v místě vytvoření budoucího spoje vzájemně dotýkají. Na toto místo působí potřebná přitlačná síla a mechanické kmity proudící do místa spoje prostřednictvím sonotrody. Vlivem působení mechanických kmitů a tření mezi oběma spojovanými díly dochází v místě spoje k lokálnímu růstu teploty. Rozdíl nastává v tom, že spojované plastové díly zde pak plastifikují (proces převedení pevného plastu do kapalného stavu pro formování) a vlivem působení přitlačné síly dojde ke vzniku pevného molekulárního spojení. Pro ultrazvukové svařování jsou nejvhodnější částečně krystalické (PP, PET, PE, PA) a amorfní (PC, PS, ABS a butadienové styreny) plastové materiály, někdy mohou být spojovány i kombinace těchto materiálů.

[2] [3] [34] [35] [39]



Obrázek 8 - Vzájemná svařitelnost plastových materiálů [28]

Pro vytvoření pevného spojení plastových dílů lze ultrazvukové zařízení využít i alternativními způsoby.

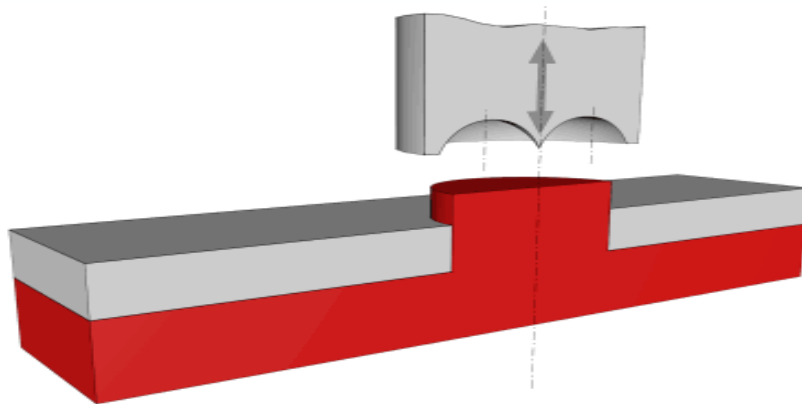
Kotvení kovových součástí do plastu pomocí ultrazvuku

K zatavení se používají výhradně termoplasty, které se taví pomocí sonotrody. Ta je schopná zatavit při příznivých podmínkách v rámci jedné operace více součástí naráz. Do termoplastu se uchycují většinou závity, závrtné šrouby, nebo jiné kovové součásti. Tento způsob ukotvení vyniká svojí pevností a stabilitou. [40]

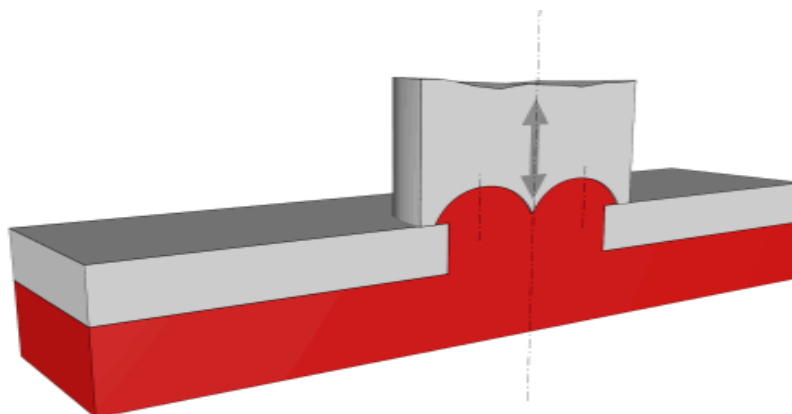
Nýtování termoplastů ultrazvukem

Podobně jako u ultrazvukového svařování je k vytvoření spoje využívána potřebná přítlačná síla a mechanická vibrační energie, které jsou sonotrodou usměrněny do místa spoje. Nejpatrnější rozdíl oproti běžným ultrazvukovým zařízením, lze pozorovat pouze u tvaru trnu, který sonotroda má. Je totiž upraven k nýtování a jeho tvar se dále liší podle toho, kolik kolíků

je potřeba nýtovat současně, v rámci jednoho zdvihu. Tato technologie vytvoření pevného spoje se používá například k uchycení palubní desky automobilu. [41]



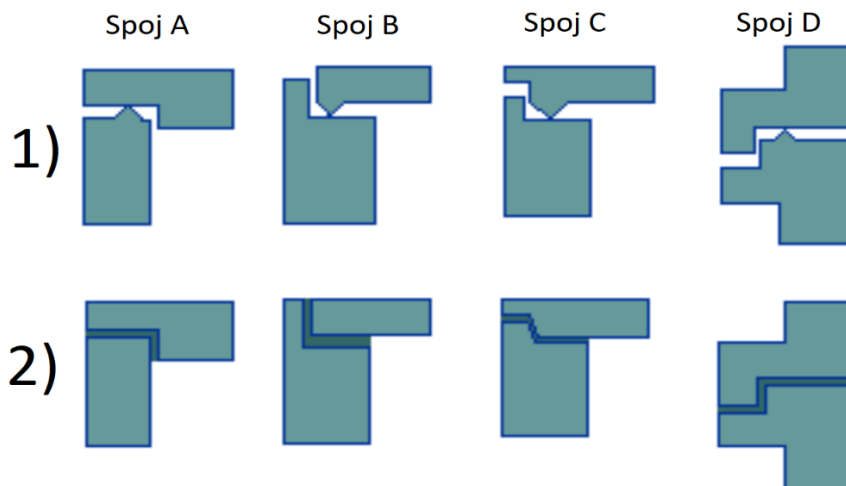
Obrázek 9 - Nýtování termoplastu, sonotroda v horní poloze [41]



Obrázek 10 - Posun sonotrody do dolní polohy a vytvoření spoje [41]

5. Nastavení svařovacího zařízení

Nastavení svařovacího zařízení při svařování plastů a kovů pomocí ultrazvuku není stejné. Při svařování plastů se pracuje s vyšší frekvencí než u svařování kovů. U plastů se používá frekvence v rozsahu 20–50 kHz, zatímco při svařování kovů se pracuje s frekvencí 9-25 kHz. Použitá amplituda pro svařování plastů (10-60 μm) je přibližně stejná jako pro svařování kovů (10-50 μm). Na rozdíl od ultrazvukového svařování kovů je pro svařování plastů potřeba místo spoje nejprve obrobít a vytvořit potřebné stykové plochy. Před samotným svařováním je potřeba tyto plochy vyčistit. Zároveň je třeba uzpůsobit rozhraní mezi oběma materiály, kde je nejvíce patrná nehomogenita materiálu a které je tak velmi náchylné na prudké zvýšení teploty v důsledku pohlcování energie mechanických kmitů. [2] [6] [35] [42]



Obrázek 11 - Svarové plochy plastů [28]

- 1) Před svářením
- 2) Po sváření

5.1.1 Amplituda

Velikost amplitudy je uváděna v mikrometrech. Pro pojem amplituda je jen jedna definice, totiž že jde o maximální výchylku z rovnovážné polohy. [43]

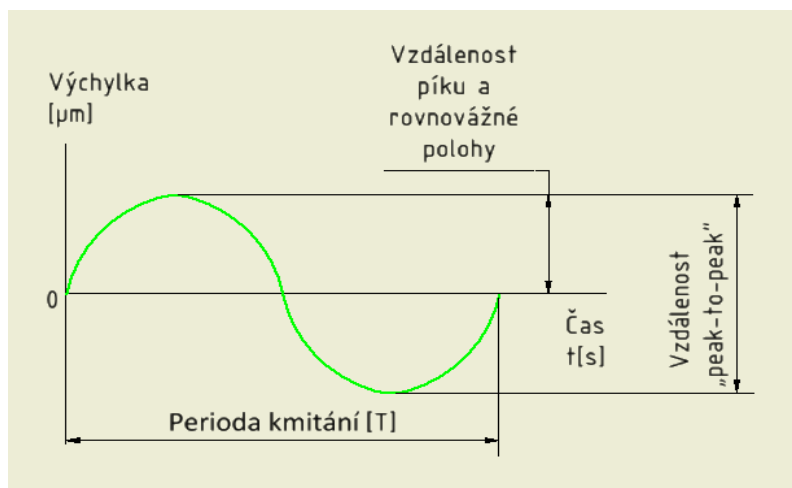
Existuje však více druhů amplitud:

- a) Vzdálenost „peak-to-peak“:

„Peak-to-peak“ amplituda je vzdálenost mezi nejvyšší hodnotou amplitudy a nejnižší hodnotou amplitudy, která může být i negativní. Hodnotou této amplitudy jsou tedy dva po sobě následující píky. [44]

- b) Vzdálenost píku a rovnovážné polohy:

Jako amplituda se označuje vzdálenost mezi polohou píku (nejvyšší hodnoty) a rovnovážné polohy. Hodnotou této amplitudy je tedy pík. Pro ultrazvukové svařování se používá tato hodnota amplitudy. [43] [44]



Obrázek 12 - Popis amplitudy na sinusové přímce [44]

Velikost amplitudy je závislá na výkonu napájecího zařízení, nastavení generátoru a tvaru sonotrody. Amplituda se také volí v závislosti na materiálu spojovaných dílů. [42] [43]

Název plastu	Zkratka	Druh plastu	Amplituda [μm]
Polyamid	PA	Částečně krystalické plastové materiály	23-35
Polyethylentereftalát	PET		28,5-35
Polyethylen	PE		17-37
Polypropylen	PP		20-37
Polystyren	PS	Amorfní plastové materiály	11,5-20
Akrylonitrilbutadienstyren	ABS		14,5-20
Polymethylmethakrylát	PMMA		14,5-23
Polykarbonát	PC		17-26

Tabulka 1 – Amplituda potřebná pro svařování plastových dílů pomocí ultrazvuku při pracovní frekvenci kmitání sonotrody 35000 Hz [42]

Důvodem, proč je potřebná amplituda pro každý materiál různá je, že skrze některé materiály se ultrazvuk šíří hůře. Dochází tak k takzvanému tlumení. Čím větší toto tlumení je, tím je i nutná větší amplituda k vytvoření spoje. [7]

5.1.2 Atenuace

Jde o jev, při němž dochází k tlumení akustických vln při průchodu materiálem. K atenuaci v materiálu může dojít jak přímo v sonotrodě, tak i v samotných spojovaných dílech. Dochází tím ke snížení účinnosti sonotrody, jakož i celého svařovacího zařízení. [8]

Atenuace je potenciálně způsoben různými mechanismy:

- a) Absorpce: Při tomto mechanismu dochází k přeměně akustické energie na teplo díky vnitřnímu pružnému pohybu částic a třením mezi nimi. Absorpce roste úměrně s výškou frekvence.
- b) Rozptyl: K rozptylu dochází, protože materiál uvnitř není dostatečně homogenní. Důsledkem toho dochází k jevům jako je difrakce, odraz a lom vln při dopadu na jednotlivá rozhraní. Tyto jevy jsou tedy způsobeny krystalickými diskontinuitami, hranicemi zrn a vměstky. Rozptyl obecně roste s výškou frekvence a je silně spjatý s vlnovou délkou, danou velikostí prvku.

[8]

6. *Materiály a tvary sonotrod, jejich vlastnosti s ohledem na svařování*

6.1 Materiály sonotrod

Materiál použitý pro výrobu sonotrod by měl mít vlastnosti, důležité pro správné fungování celého svařovacího zařízení. Mezi tyto vlastnosti patří především odolnost vůči únavě způsobené cyklickým namáháním nástroje a dobrý přenos ultrazvukové energie. Nástroj by tak neměl absorbovat příliš mnoho energie z kmitání, které skrze něj proudí. Povrch materiálu by měl být také tvrdý a odolný vůči opotřebení. [2] [45] [46]

V současné době se obvykle používá tvrdý řezný materiál (cermet) Ferro-Titanit. Jeho nevýhodou je vysoká cena a obtížné dosažení potřebného tvaru sonotrody. K dalším používaným materiálům patří slitiny hliníku (EN AW-7075) a titanu (Ti-6Al-4V). Ty jsou dobře obrobitelné a snadno se s nimi dosahuje potřebného tvaru sonotrody, nemají ale dobré mechanické vlastnosti. Nejsou totiž dostatečně tvrdé a odolné vůči opotřebení. Proto se nepoužívají často. [2] [45] [46] [47]

Jelikož cílem této práce je návrh sonotrody vyrobené z kované rychlořezné nástrojové oceli, bude jí následně věnována samostatná kapitola.

6.1.1 Ferro-Titanit WFN

Ferro-Titanit WFN je obchodní název kovokeramického materiálu (cermetu), používaný společností Deutsche Edelstahlwerke GmbH. Matrice materiálu je tvořena chrom-

molybdenovou ocelí, kterou lze tepelně zpracovat. V matici materiálu je přítomen karbid titanu (TiC), který tvoří 33-45 % objemu karbidu v matici oceli. [48] [49]

Ferro-Titanit WFN je jedním z nejnáročnějších materiálů pro výrobu. Vyrábí se izostatickým lisováním za tepla (HIP). Princip difuzního spojování při HIP umožňuje kombinování různých materiálů podle náročnosti profilu dílu a šetří tak drahé materiály, užívané jen na exponovaných místech. [48] [49]

Jako alternativní způsob výroby se používá izostatické lisování za studena s následným vakuovým spékáním za teploty od 1200 do 1500 °C. Ferro-Titanit WFN je obrobitelný a vytvrzovatelný materiál s vlastnostmi ocele a tvrdokovů s vysokou odolností vůči opotřebení. [48] [49]

TiC	Cr	Mo	C	Fe
33	13,5	3	0,75	ostatní

Tabulka 2 - Chemické složení Ferro-Titanitu WFN [hmotnostní %] [49]

6.1.2 EN AW-7075

Slitina na bázi hliníku, zinku a hořčíku s vysokou pevností v tahu až 540 MPa. Pokud se přidá i měď, dosahuje hodnota pevnosti v tahu až 600 MPa. Jedná se tak o nejpevnější slitinu hliníku. K možným nevýhodám slitin s obsahem mědi patří snížená odolnost vůči korozi a náchylnost k vrubům. Existence vrubů jako slabých, nebo silných přechodů a rýh tak může při měnící se zátěži rychle vést k prasklinám. [50] [51]

Slitina se používá zejména tam, kde je důležitá kombinace vysoké tvrdosti a nízké hmotnosti. Je použitelná např. v automobilovém průmyslu (například nárazníky), při výrobě strojů a podobně. Slitina je dobře obrobitelná, ale nemá dobrou svařitelnost a špatně se elokuje. Slitina EN AW-7075 se dodává ve stavu vytvrzení za tepla. Slitina je zároveň schopná tvrdnout i při nízkých teplotách (studené tvrdnutí). [50]

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
≤0,4	≤0,5	1,2-2	≤0,3	2,1-2	0,18-0,28	5,1-6,1	≤0,2	ostatní

Tabulka 3 - Chemické složení EN AW-7075 [hm. %] [52]

Vytvrzení za tepla slitiny EN AW-7075:

a) Žíhání:

- Žíhání naměkko při teplotě 470 až 480 °C a následné kalení ve vodě.
- Rozpouštěcí žíhání při teplotě 470 až 480 °C a následné kalení ve vodě.

b) Vytvrzení za tepla:

- První krok vytvrzení probíhá 12 až 24 hodin při teplotě 115 až 125 °C.
- Druhý krok probíhá 4 až 6 hodin při teplotě 165 až 180 °C.

[50]

6.1.3 Ti-6Al-4V

Jednou z nejpoužívanějších slitin na výrobu sonotrod je slitina titanu Ti-6Al-4V, která byla původně vyvinuta pro letecké konstrukční součásti. Ti-6Al-4V nabízí velmi dobrý poměr vysoké pevnosti k nízké hmotnosti slitiny v kombinaci s vynikající odolností vůči korozi. Ti-6Al-4V rovněž vykazuje mimořádně vysokou lomovou odolnost. To jsou vlastnosti, které vedly k rozšíření této slitiny v ropném, plynárenském a automobilovém průmyslu. Slitina se obvykle používá v žíhaném stavu při provozních teplotách do 400 °C. [53] [54]

Al	V	Fe	O	C	N	H	Ti
5,5 – 6,75	3,5 – 4,5	Max. 0,4	Max. 0,2	Max. 0,08	Max. 0,05	Max. 0,015	ostatní

Tabulka 4 – Chemické složení Ti-6Al-4V [hm. %] [55]

6.2 Rychlořezné nástrojové oceli

Rychlořezné nástrojové oceli patří mezi materiály, které se pro výrobu sonotrod používají nejvíce. Je pro ně charakteristická odolnost vůči opotřebení, přiměřená houževnatost a vynikající stabilita vlastností za tepla. Do teploty 650 °C nedochází k poklesu tvrdosti a ke zhoršení řezných vlastností. [5] [45]

Tyto oceli obsahují 0,7 až 1,3 % C. Dále je v nich 18 % W, 4 % Cr a 1 % V při 0,8 % C. Ve struktuře mají více než 25 % vysoce stabilních karbidů. Dalšího zlepšení řezných vlastností se dosahuje přísadou Co do 10 %, případně náhradou části W molybdenem. [5] [45]

Vzhledem k vysokému obsahu přísadových prvků je rozpustnost uhlíku v rychlořezných ocelích jen 0,7 %. Pro splnění vysokých nároků, kladených na jakost rychlořezných ocelí, je velmi důležité správně zvolit způsob jejich výroby. [5] [45]

6.2.1 EN ISO HS6-5-2

Jedná se o často využívanou rychlořeznou ocel s vysokou houževnatostí a odolností proti opotřebení. Ocel se běžně používá pro výrobu nástrojů (výkonné frézy, vrtáky, závitníky) k obrábění materiálů se střední a vysokou pevností. [56]

Výrobní postup rychlořezné oceli EN ISO HS6-5-2 včetně tepelného zpracování:

- Ocel se vyrábí převážně v elektrických obloukových pecích. Pro menší objemy výroby oceli se osvědčili i indukční pece. Tekutá ocel se odlévá do kokil.
- Proces kování probíhá při teplotě 1100 až 900 °C.
- Žihání naměkko se uskutečňuje při teplotě 800 až 840 °C. Cílem žihání naměkko je snížit tvrdost oceli po kování.
- Žihání na snížení pnutí se koná při teplotě 700 až 750 °C. Provádí se kvůli minimalizaci zbytkového pnutí v oceli, tím má dojít i ke snížení nebezpečí vzniku rozměrových změn během dalšího zpracování.
- Kalení probíhá při teplotě 1220 až 1250 °C. Ochlazení se provádí v oleji, nebo na vzduchu.
- Popouštění probíhá 2 hodiny při teplotě 550 až 600 °C. Celý proces je nutné 3x opakovat. Význam popouštění je snížit tvrdost oceli po kalení a zvýšit její houževnatost.

[57] [58] [59] [60] [61]

6.2.2 EN ISO HS6-5-2-5

Vysoce výkonná rychlořezná ocel se zvýšenou tvrdostí při vyšších teplotách a zároveň dostatečnou houževnatostí. Tato rychlořezná ocel se běžně využívá pro výrobu soustružnických nožů a fréz určených pro obrábění materiálů s vyšší pevností a houževnatostí (kompozitní materiály, dřevo, ocel). [62]

Výrobní postup rychlořezné oceli EN ISO HS6-5-2-5 včetně tepelného zpracování je obdobný jako u rychlořezné oceli EN ISO HS6-5-2, rozdílné jsou pouze pracovní teploty u jednotlivých procesů:

- Kování probíhá při teplotě 1100 až 900 °C.
- Žihání naměkko se uskutečňuje při teplotě 780 až 820 °C.
- Žihání na snížení pnutí se koná při teplotě 650 až 750 °C.
- Kalení probíhá při teplotě 1230 až 1260 °C. Ochlazení se provádí v oleji, nebo na vzduchu.

- Popouštění probíhá 2 hodiny při teplotě 560 až 600 °C. Celý proces je nutné 3x opakovat.

[58]

6.2.3 Rychlořezné nástrojové oceli vyrobené metodami práškové metalurgie

Další informace o rychlořezných nástrojových ocelích vyrobených metodou práškové metalurgie jsem se rozhodl citovat přímo, a to kvůli velmi kvalitně a detailně zpracovanému popisu výroby těchto ocelí a jejich výsledných vlastností:

„Vývoj této technologie probíhal v Evropě a USA téměř paralelně a vůdčími firmami byly společnosti Stora - Koppaberg (ASP) ve Švédsku a Crucible (CPM) v USA. Oba způsoby využívají shodný princip. Vysoce čistá tekutá ocel je rozprašována dusíkem, tedy bez přístupu atmosféry, na velmi jemné částičky. Za podmínek extrémně vysokých rychlostí ochlazování, kterým jsou tyto jemné kuličky vystaveny dochází k výrazné redukci jak velikosti karbidů, tak i jejich růstu. Vzniklý prášek padá dolů, je při tom ochlazován, následně prosíván a ve vakuu plněn do kapslí. Následuje isostatické lisování za tepla (HIP - Hot Isostatic Pressing) při tlaku okolo 1000 bar a teplotě 1200°C. V místech dotyku částic kovového prášku vznikají za těchto podmínek nová spojení a z vysoce čistého kovového prášku tak vzniká produkt s homogenní strukturou a zcela isotropními vlastnostmi. Následné kování a válcování zajistí, že konečný produkt je bez pórů a má velmi jemnou karbidickou strukturu (velikost karbidů cca. 3-5µm). Tyto konečné produkty mohou být ve formě drátů, tyčí, plechů nebo profilů. Tváření za tepla má také za následek výrazné zvýšení houževnatosti. Tyto nákladné výrobní procesy umožňují v současnosti vyrábět slitiny s obsahem až 3,4 % uhlíku a celkovým obsahem legujících prvků až 39 %. Potenciál jejich výkonnosti je již srovnatelný s houževnatými druhy slinutých karbidů. Paralelně s vývojem materiálů se stále vyšší otěruvzdorností (přísadami karbidotvorných prvků, které odolnost proti otěru zvyšují – speciálně vanadu) jsou práškovou metalurgií ve stále větší míře vyráběny i slitiny, které by bylo možno vyrobít konvenční metalurgií. Důvodem jsou i zde zvýšené požadavky výrobců nástrojů. Homogenní struktura práškových kovů bez makroskopických defektů jako jsou lunkry, struskové vměstky a karbidická řádkovitost zaručují oproti svým konvenčním protějškům optimální vlastnosti při třískovém obrábění s vysokými úběry, jakož i nejvyšší jakosti povrchu po elektroerozivním obrábění nebo mechanickém leštění.“ [63]

V listu rychlořezných nástrojových ocelí nabízených společností BOLZANO je velmi zajímavý uvedený obsah uhlíku. U rychlořezné oceli vyráběné práškovou metalurgií dosahoval obsah uhlíku 3,4%. Naproti tomu u rychlořezné nástrojové oceli vyráběné klasickou metalurgií se obsah uhlíku pohyboval v rozsahu od 0,9 do 1,4 %.

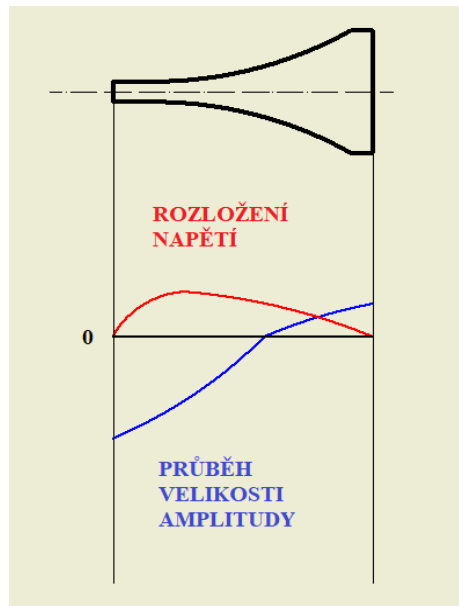
6.3 Tvar sonotrod

Tvar sonotrody ovlivňuje její schopnost rozkládat napětí po celé její délce. Další důležitou veličinou, na niž má tvar sonotrody podstatný vliv, je amplituda. Amplituda, kterou je měnič

schopen vytvořit, je omezená a pro samotné svařování by její velikost nebyla dostatečná. Tvar sonotrody je uzpůsoben tak, aby byl schopen amplitudu zvětšit. [7]

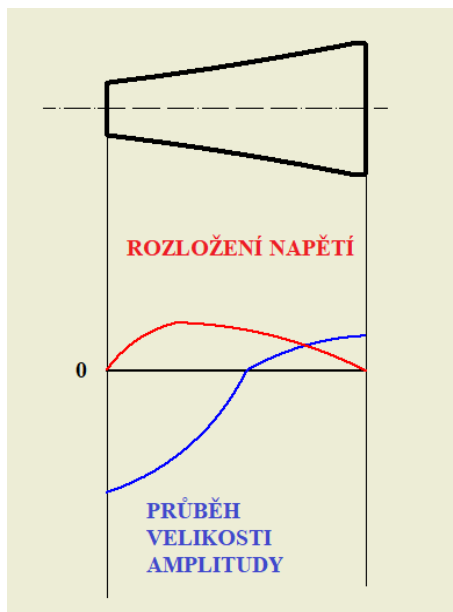
Zvětšení amplitudy se dosahuje změnou průřezu sonotrody. Ten je směrem ke spojovaným dílům zužován, aby se v hrotu sonotrody vytvořila co největší možná amplituda, která je potřebná k vytvoření spoje. Intenzita zužování průřezu závisí na zvoleném tvaru sonotrody. [7]

Pro ultrazvukové svařování se používají tyto základní tvary sonotrody:



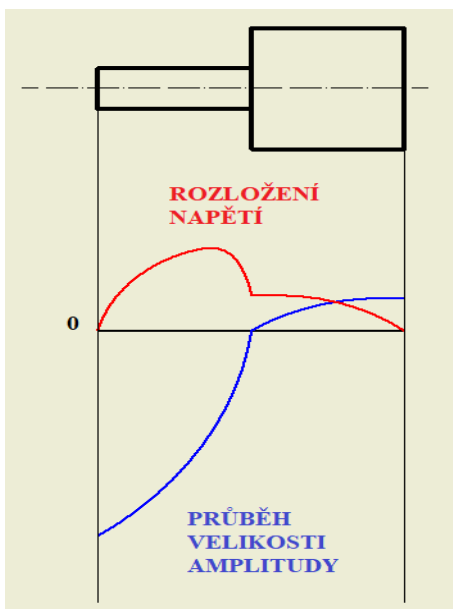
Obrázek 13 - Schéma exponenciálního tvaru sonotrody s kruhovým průřezem a očekávaným rozložením napětí včetně průběhu velikosti amplitudy [7] [64]

- a) Exponenciální tvar: Tvar průřezu exponenciální sonotrody není stálý, ale postupně se exponenciálně mění. V důsledku toho má tato varianta vhodné rozložení napětí a používá se hlavně tam, kde je vyžadována vysoká přitlačná síla a nízká amplituda.



Obrázek 14 - Schéma kónického tvaru sonotrody s kruhovým průřezem a očekávaným rozložením napětí včetně průběhu velikosti amplitudy [7] [64]

- b) Kónický tvar: Vyniká dlouhou životností nástroje, jelikož tento tvar dobře rozkládá napětí. Oproti exponenciálnímu tvaru dochází k výraznějšímu zvětšení amplitudy. Tento tvar sonotrody lze proto opět ve specifických případech využít.



Obrázek 15 - Schéma stupňovitého tvaru sonotrody s kruhovým průřezem a očekávaným rozložením napětí včetně průběhu velikosti amplitudy [7] [64]

- c) **Stupňovitý tvar:** Ke změně průřezu dochází skokově. To je důvod proč se v místě změny průřezu u tohoto tvaru koncentrují nejvyšší hodnoty napětí a je zde i největší riziko deformace. Proto je oblast přechodu mezi širším a užším průřezem obvykle opatřena zaoblením (rádiusem) pro redukci napětí, zaoblení však také mírně redukuje amplitudu. Pro tento tvar je charakteristické, že je ze všech tří tvarů schopný vytvořit nejvyšší amplitudu. To jsou spolu se snadnou vyrobiteľností hlavní důvody, proč je tento tvar pro sonotrodu nejpriznivější.

[7] [47] [65]

6.4 Povrchové úpravy sonotrod

Povrchové úpravy (nanesení povlaku) se u nástrojů používají proto, aby co nejvíce prodloužila životnost nástroje. Při správně zvolené povrchové úpravě, může nástroj získat i další charakteristické vlastnosti, díky nimž může lépe plnit svůj účel. Avšak každá úprava má své klady a zápory. Nesprávná volba povrchové úpravy může vést až ke zkrácení životnosti nástroje a může zhoršit jeho užité vlastnosti oproti nástroji bez povrchové úpravy. Pro nanesení povlaku na nástroj se nejčastěji používají technologie PVD (fyzikální depozice z plynné fáze) a CVD (chemická depozice z plynné fáze). [66]

Je také třeba zmínit některé důležité vlastnosti materiálu, které může povrchová úprava ovlivnit. Patří mezi ně například tvrdost, jejíž zvýšení ovlivňuje délku životnosti nástroje, který je pak méně náchylný k poškození. Povrchová úprava může prodloužit životnost nástroje rovněž tím, že zlepší odolnost povrchu materiálu vůči abrazi. Kluzkost povrchu je další důležitou vlastností materiálu, kterou lze ovlivnit pomocí povrchové úpravy. Kluzkost lze zvýšit tím, že nově nanesená tenká vrstva bude mít menší koeficient tření, než měl materiál původně. Zvětšení kluzkosti povrchu materiálu souvisí s redukováním tepla, které vzniká v důsledku tření. [66]

Karbonitrid titanu (TiCN)

Tvrdost	3500 ± 500 HV
Součinitel tření proti oceli	0,2
Tloušťka povlaku	1-4 μm
Maximální teplota použití	400 °C

Tabulka 5 - Důležité vlastnosti povlaku TiCN [67]

Nanesení tohoto povlaku se často používá pro zvýšení životnosti sonotrody. Tato povrchová úprava zaručuje dobrou odolnost vůči opotřebením, a také vysokou tepelnou vodivost. Příměs uhlíku zvyšuje tvrdost a zároveň snižuje koeficient tření, aby povrch byl kluzký. I přes velmi

vysokou tvrdost si povlak zachovává dobrou houževnatost. Je třeba myslet i na to, že povrchová úprava zvyšuje frekvenci, na jakou je sonotroda naladěna. Sonotroda se pak nemusí vejít do dovolené tolerance pro tuto frekvenci. Nástroj pak nelze nadále využívat pro ultrazvukové svařování. Frekvenci je poté nutné opět redukovat. Povrchová úprava se nepoužívá na hrotu sonotrody, kde by vlastnosti získané povlakováním nebyli žádoucí pro správnou funkci nástroje. [67] [68]

7. Měření rychlosti ultrazvuku v kované nástrojové oceli

Program SonoAnalyzer je založený na metodě konečných prvků. Tento software slouží k tomu abychom zjistili, jestli námi navrhovaná sonotroda, která musí splňovat rozměrové požadavky, dosahuje hodnot požadovaných pro pracovní frekvenci nástroje. Dále software slouží k zobrazení dosažené amplitudy posunutí v hrotu sonotrody a také k zobrazení oblasti s maximálním napětím a hodnotu tohoto napětí. [69]

Podrobnější popis fungování tohoto softwaru je obsažen v kapitole věnující se základním principům práce v programu SonoAnalyzer. Stačí v něm zadat hodnoty Youngova modulu pružnosti v tahu, hustoty a Poissonovu konstantu, rychlost šíření podélných a příčných vln si již program SonoAnalyzer dopočte sám. Oproti tomu měření a výpočet materiálových parametrů probíhaly obráceně. V bakalářské práci na téma Měření rychlosti šíření ultrazvuku ve vybraných materiálech v návaznosti na ultrazvukové svařování od Ondřeje Stacha se nejdříve provádí měření rychlosti šíření podélných a příčných vln metodou puls-echo a průchodovou metodou. Pomocí nich pak lze spolu s vzorci a vzájemnými vztahy dopočítat Poissonovu konstantu a Youngův modul pružnosti v tahu. Hustota vzorků je oproti tomu vypočtena pomocí měření objemu vzorků v odměrném válci a zvážení vzorků.

Základem pro simulace jsou tyto materiálové parametry:

- Youngův modul pružnosti v tahu (Modulus) E [Pa]
- Hustota (Density) ρ [kg/m³]
- Poissonova konstanta (Poisson's Ratio) σ [–]
- Rychlost šíření podélných vln (Velocity-axial) c_B [m/s]
- Rychlost šíření příčných vln (Velocity-radial) c_S [m/s]

Modulus:	<input type="text" value="285,630"/>	<input type="text" value="GPa"/>
Density:	<input type="text" value="8022,7"/>	<input type="text" value="kg/m3"/>
Poisson's Ratio:	<input type="text" value="0,299"/>	
Velocity (axial):	<input type="text" value="5966,8"/>	<input type="text" value="m/s"/>
Velocity (radial):	<input type="text" value="6252,9"/>	<input type="text" value="m/s"/>

Obrázek 16 - Ukázka vstupních parametrů materiálu v programu SonoAnalyzer

Výpočet hustoty vzorků

Nejdříve byla zjištěna hmotnost každého vzorku. Dále byl na základě měření rozdílného objemu před a po vložení vzorku do odměrného válce změřen objem vzorku. Na základě těchto dvou měření mohla být vypočtena hustota vzorku.

Měření rychlosti šíření podélných a příčných vln metodou P/E (odrazová metoda) [70]

Princip této metody spočívá ve vyslání krátkého ultrazvukového impulsu sondou do vzorku. Impuls se odrazí od protilehlého povrchu vzorku. Tento odražený impuls se nazývá echo. Echo pak po stejné dráze putuje k sondě, která impuls vyslala. Měří se čas, který ultrazvuková vlna potřebovala k tomu, aby prošla od sondy skrz materiál, odrazila se od jeho protilehlého povrchu a dorazila zpět do sondy.

- Rychlost šíření ultrazvukových vln v prostředí c [m/s]
- Tloušťka vzorku d [m]
- Čas potřebný k průchodu ultrazvukové vlny prostředím t [s]

Vztah pro výpočet rychlosti šíření ultrazvukový vln v prostředí metodou P/E:

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

Měření rychlosti šíření podélných a příčných vln průchodovou metodou [70]

Principem průchodové metody je použití dvou, pokud možno stejných sond. Obě sondy jsou umístěny proti sobě, na dvou protilehlých stranách vzorku. Jedna sonda slouží k vyslání impulsu, druhá slouží k jeho zachycení a změření času potřebnému k tomu, aby vlna prošla od jedné strany vzorku k druhé.

Vztah pro výpočet rychlosti šíření ultrazvukový vln v prostředí pomocí průchodové metody:

$$c = \frac{d}{t} \quad (3)$$

Vyjádření Youngova modulu pružnosti v tahu a Poissonovy konstanty

- Modul pružnosti ve smyku G [Pa]
- Rychlost šíření podélných vln v tenké tyči c_0 [m/s]: Rychlost zvuku v dlouhé štíhlé tyči, kde je pohyb částic rovnoběžný s osou tyče.
- Poissonova konstanta σ [-]: Jedná se o bezrozměrnou veličinu, která vyjadřuje poměr mezi relativním podélným prodloužením a relativním příčným zkrácením při namáhání tahem.

Rychlost šíření podélných vln v tenké tyči je definována: $c_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ (4)

Vzorec pro rychlost šíření podélných vln v tenké tyči, kde je pohyb částic omezen pouze na pohyb částic podél osy tyče už ovšem neplatí pro širší tyče. Proto musí být tento vzorec pro širší tyče upraven. Pohyb částic u širších tyčí už není omezen pouze na pohyb částic ve směru rovnoběžném s osou tyče, ale částice se pohybují i v příčném směru, tedy kolmo na osu tyče.

Vztah pro rychlost šíření podélných vln je tak: $c_B = \sqrt{\frac{E * (1 - \sigma)}{\rho * (1 + \sigma) * (1 - 2 * \sigma)}}$ (5)

Vztah mezi modulem pružnosti v tahu a ve smyku: $G = \frac{E}{2 * (1 + \sigma)}$ (6)

Rychlost šíření příčných vln je definována: $c_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$ (7)

Dosazením rovnice (6) a (7) do rovnice (5) vyjádříme Poissonovu konstantu:

$$c_B^2 = \frac{c_S^2 * \rho * 2 * (1 + \sigma) * (1 - \sigma)}{\rho * (1 + \sigma) * (1 - 2 * \sigma)} \rightarrow \frac{c_B^2}{c_S^2} = \frac{2 * (1 - \sigma)}{2 * (\frac{1}{2} - \sigma)} \rightarrow$$

$$\frac{c_B^2}{c_S^2} = \frac{1}{(1 - 2 * \sigma)} + 1 \rightarrow \sigma = \frac{c_B^2 - 2 * c_S^2}{2 * c_B^2 - 2 * c_S^2}$$
 (8)

Zároveň úpravou rovnice (5) vyjádříme Youngův modul pružnosti v tahu:

$$E = \frac{c_B^2 * \rho * (1 + \sigma) * (1 - 2 * \sigma)}{(1 - \sigma)}$$
 (9)

[8]

8. Vliv tepelného zpracování na změnu akustických vlastností

Tepelné zpracování sonotrody, konkrétně kalení, je běžně používaná technika, která zvýší tvrdost nástroje a prodlouží tím jeho životnost. Dalším pozitivním účinkem kalení je změna

akustických vlastností nástroje. Při kalení nástroje dojde ke změně vnitřní struktury materiálu. Přeměna začíná ohřevem nad kritické teploty a přeměnou feriticko-cementitické struktury na austenitickou strukturu, tento proces se nazývá austenitizace. Následuje výdrž na této teplotě a poté prudké přechlazení austenitu a jeho přeměna. Přeměna ale není nikdy úplná, vždy ve struktuře zůstane zbytkový austenit. Se změnou struktury dojde také ke změně krystalografické mřížky. Při pomalém ochlazení by za běžných podmínek došlo k přeměně austenitu, který má kubickou plošně středěnou mřížku na ferit α , který má kubickou prostorově středěnou mřížku. Přechlazení austenitu ale způsobuje potlačení difúze uhlíku, který je tak v této mřížce obsažen více, než při běžné fázové přeměně a pomalém ochlazení. To tedy následně způsobí tetragonalitu této mřížky. Tato struktura se nazývá martenzit. V důsledku změny krystalografické mřížky dojde také k tomu, že nově vzniklý martenzit má oproti austenitu nižší hustotu. Nižší hustota má zásadní vliv na změnu akustických vlastností, která je dobře patrná ve vzorci pro výpočet rychlosti šíření podélných vln (5) i vzorci pro výpočet rychlosti šíření příčných vln (7). Je již tedy zcela zřejmé, že snížená hustota zvýší hodnoty rychlosti šíření podélných i příčných vln. [71]

9. Simulace tvaru sonotrod v softwaru SonoAnalyzer

9.1 Základní principy práce v programu SonoAnalyzer

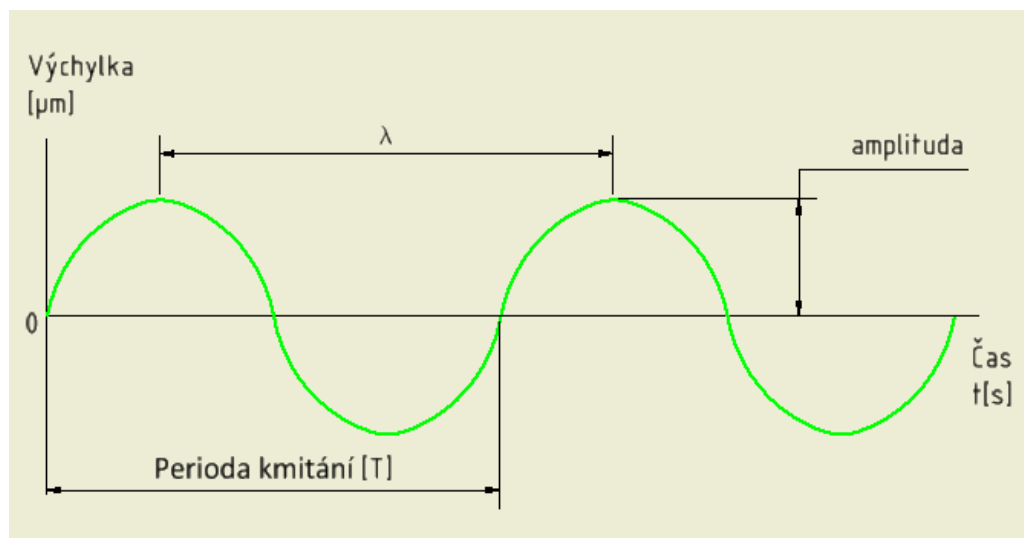
Při šíření ultrazvukových vln a kmitání nástroje dochází uvnitř materiálu sonotrody k tomu, že se atomy krátkodobě vychylují ze své rovnovážné polohy. Sonotroda se tedy rozpíná a smršťuje zároveň s frekvencí kmitů nástroje. Pro návrh sonotrody je důležitý požadavek, aby sonotroda měla pracovní frekvenci 35 000 Hz. Tomu musí být přizpůsoben tvar sonotrody a její rozměry. Sonotrody jsou někdy zjednodušeně považovány za nástroje, které mají pouze jeden režim kmitů na jedné frekvenci (pracovní frekvence). Ve skutečnosti tomu tak není, program SonoAnalyzer neomezuje svou analýzu na jeden jediný režim. Jakákoliv sonotroda má nekonečně mnoho různých režimů. Výsledky programu zahrnují prvních 10-20 režimů frekvenčního rozsahu. Některé z nich mohou být cennou alternativou k pracovnímu režimu. Jde tedy o volbu tzv. axial-mode. Jak již název napovídá, axial-mode odkazuje na směr, ve kterém se budou kmity převážně šířit, a to podél osy sonotrody. Příkladem je režim axial 1 s poloviční vlnovou délkou $\lambda/2$. Režim axial 2 má oproti tomu vlnovou délku (λ). V tomto případě je pouze na uživateli, aby rozhodl, který režim frekvence by měl být nastaven. [7] [69]

Napětí a amplituda

Správné rozložení napětí v sonotrodě je klíčový faktor, který je třeba zohlednit i při jejím navrhování. V místech koncentrace nejvyššího napětí dochází totiž v mnoha případech k ukončení životnosti nástroje, a to tzv. únavovými trhlinami. V programu SonoAnalyzer můžeme snadno tato kritická místa s nejvyšším napětím snadno vidět v záložce „Stress von Mises“, což je efektivní napětí, běžně používaná hodnota vypočtená z tenzoru napětí, který ukazuje, kde nejpravděpodobněji může dojít ke vzniku prasklin a zlomů. Napětí je v programu SonoAnalyzer udáváno v jednotkách SI, konkrétně v pascálech (Pa). Místo, kde se podle

programu koncentruje maximální napětí, může být vhodnou úpravou tvaru sonotrody pozměněno tak, aby v něm došlo k redukci napětí. Tak je možné prodloužit životnost nástroje. [69]

Dalším velmi důležitým faktorem pro správnou funkčnost ultrazvukového zařízení je velikost amplitudy. Ta se může v různých částech sonotrody značně lišit. Pro ultrazvukové zařízení je přitom důležité, aby se kmitna, tedy bod, který kmitá s maximální amplitudou (v programu SonoAnalyzer zobrazen červenou barvou), nacházela v hrotu sonotrody a aby hodnota amplitudy byla zde co nejvyšší. V programu SonoAnalyzer můžeme průběh amplitudy v sonotrodě sledovat v záložce „Displacement“. [69]



Obrázek 17 – Displacement a jeho popis na sinusové přímce [72]

Pojem displacement pomůže lépe definovat a přiblížit Obrázek 17. Vlnová délka (λ) zde ukazuje horizontální vzdálenost mezi body, kde se vlna nachází ve stejné pozici a které kmitají se stejnou fází. Perioda (T) zobrazuje čas, za který vlna vykoná jeden kmit. Jako displacement označujeme vychýlení atomů z rovnovážné polohy, nebo také posunutí atomů od jejich rovnovážné polohy v konkrétním čase. Maximální vychýlení nebo posunutí atomů od rovnovážné polohy se nazývá amplituda. [72]

9.2 Výpočet pracovní frekvence komerčních sonotrod

Vzorek	Hustota $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Poissonova konstanta [-]	Modul pružnosti v tahu [GPa]
Sonotroda č.2 WSK 1423.10 Hutchinson	8022,7	0,29893	285,63
Sonotroda č.3 ART 42441 Boshoku	7983,1	0,292	278,41
Sonotroda č. 5 WSK 1423.4 Hutchinson	4493,6	0,33522	175,2

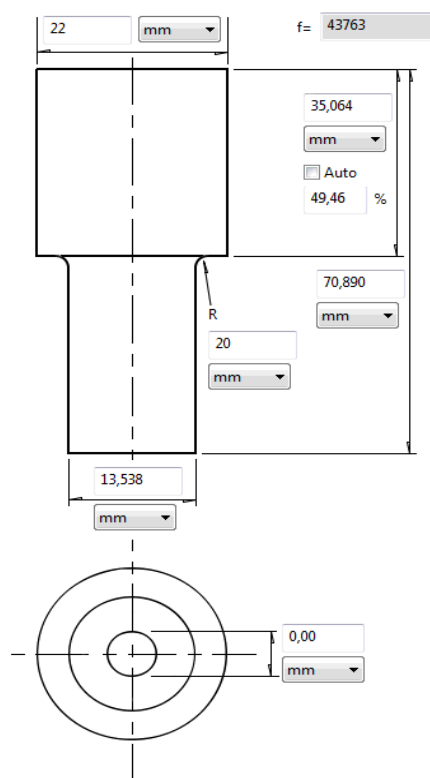
Tabulka 6 - Tabulka důležitých hodnot materiálů pro simulaci komerčních sonotrod [9] [10]

Základem pro provedení simulací v programu SonoAnalyzer jsou známé rozměry komerčních sonotrod, které byly změřeny pomocí 3D skeneru v Regionálním technickém institutu v Plzni, a potřebné materiálové charakteristiky, jako jsou hustota, Poissonova konstanta a modul pružnosti v tahu. Tyto charakteristiky byly vybrány z bakalářských prací Ondřeje Stacha a Jana Trčky ([9] a [10]). Na ně moje bakalářská práce navazuje a díky nim mohu provést simulaci v programu SonoAnalyzer a zjistit parametry komerčních sonotrod i jejich pracovní frekvenci. U následujících vybraných komerčních sonotrod je tedy vždy na úvodní listu uvedeno chemické složení použitého materiálu, vstupní materiálové charakteristiky, pracovní frekvence, režim frekvence, rozměry a tvar sonotrody. Následující list obsahuje další důležité parametry jako je grafické zobrazení průběhu velikosti amplitudy a rozložení napětí. Výsledkem simulací komerčních sonotrod by mělo být prozkoumání hodnot jednotlivých parametrů. To by mělo pomoci k pochopení návrhu těchto sonotrod a mělo by být použito jako základ pro návrh vlastní sonotrody.

1) Sonotroda č.2 – Hutchinson WSK 1423.10 (vlnová délka $\lambda/2$, axial 1)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
DIN 1.2376	0,92	0,2	0,2	Max.	Max.	11	0,8	0,8
	-	-	-	0,03	0,03	-	-	-
	1	0,4	0,4			12	1	1

Tabulka 7 - Chemické složení materiálu sonotrody [hm. %] [73]



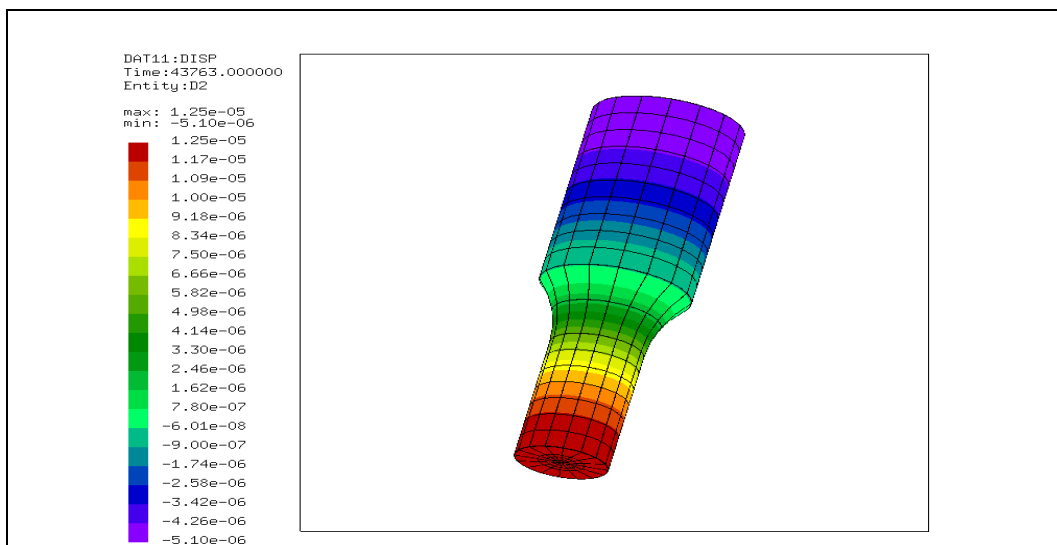
Obrázek 18 - Rozměry a pracovní frekvence sonotrody

Mode: Axial 1 (43763 Hz)

Obrázek 19 - Dosažená frekvence 43763 Hz při režimu axial 1

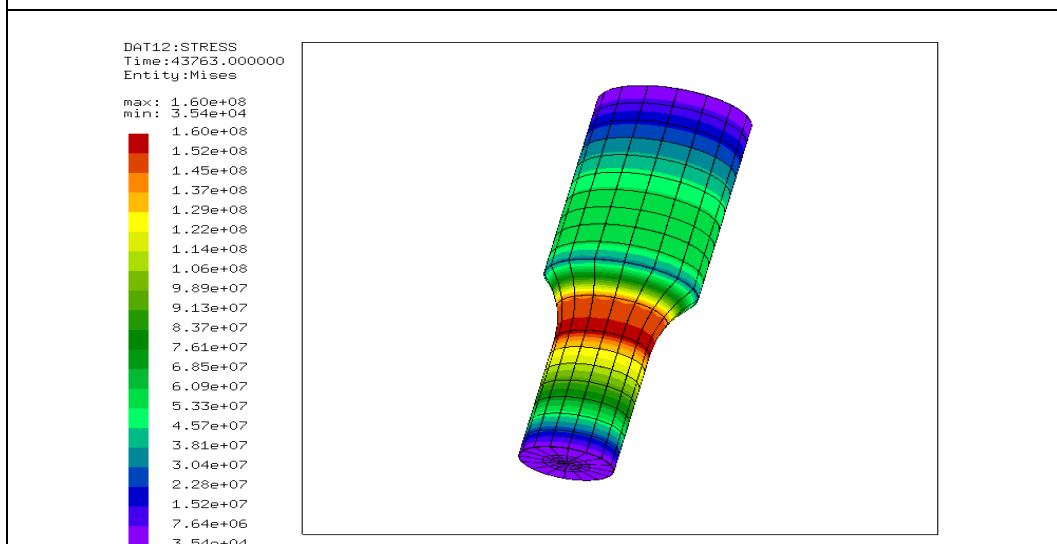
Modulus: 285,630 GPa
 Density: 8022,7 kg/m³
 Poisson's Ratio: 0,299
 Velocity (axial): 5966,8 m/s
 Velocity (radial): 6252,9 m/s

Obrázek 20 - Důležité materiálové charakteristiky



Obrázek 21 - Grafické zobrazení posunutí sonotrody s poloviční vlnovou délkou $\lambda/2$

Program SonoAnalyzer uvádí hodnoty posunutí (displacement) v metrech, jelikož jsou tyto hodnoty příliš malé, budou vždy převedeny na mikrometry. Na obrázku je tedy maximální posunutí (červená oblast) v kmitně, která se správně nachází v hrotu sonotrody. Hodnota maximálního posunutí je 12,5 μm .



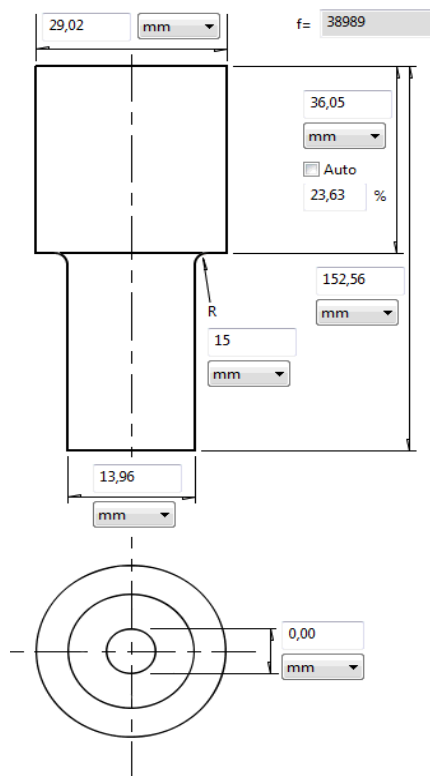
Obrázek 22 - Grafické zobrazení rozložení napětí v sonotrodě

Hodnoty napětí jsou v pascálech. Hodnota maximálního dosaženého napětí je 160 MPa v červené oblasti, která je kvůli zvolenému rádiusu mírně posunuta od místa přechodu mezi částí pro upnutí a tělem sonotrody.

2) Sonotroda č.3 – Boshoku ART 42441 (vlnová délka λ , axial 2)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	W	V	Mo	Ni
DIN 1.3340	0,99	0,45	0,35	0,035	0,017	3,95	6,7	1,7	3,83	0,75

Tabulka 8 - Chemické složení materiálu sonotrody [hm. %] [74]



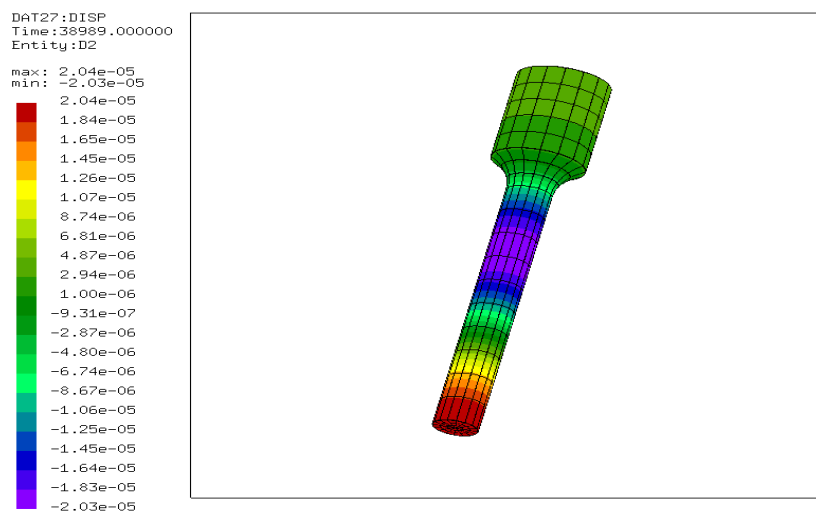
Obrázek 23 - Rozměry a pracovní frekvence sonotrody

Mode: Axial 2 (38989 Hz)

Obrázek 24 - Dosažená frekvence 38989 Hz při režimu axial 2

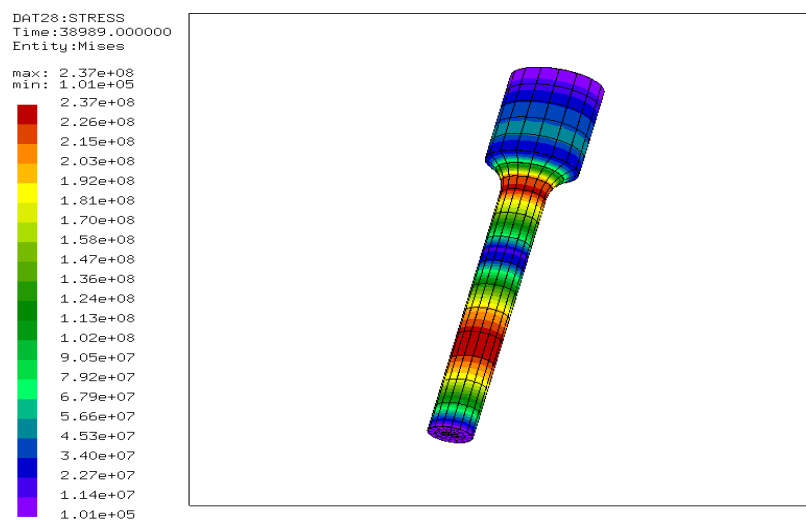
Modulus: 278,410 GPa
 Density: 7983,1 kg/m³
 Poisson's Ratio: 0,292
 Velocity (axial): 5905,5 m/s
 Velocity (radial): 6174,6 m/s

Obrázek 25 – Důležité materiálové charakteristiky



Obrázek 26 - Grafické zobrazení posunutí sonotrody s vlnovou délkou λ

Sonotroda má vlnovou délku λ . Velikost maximálního posunutí v kmitně je oproti předchozí sonotrodě vyšší a to 20,4 μm .



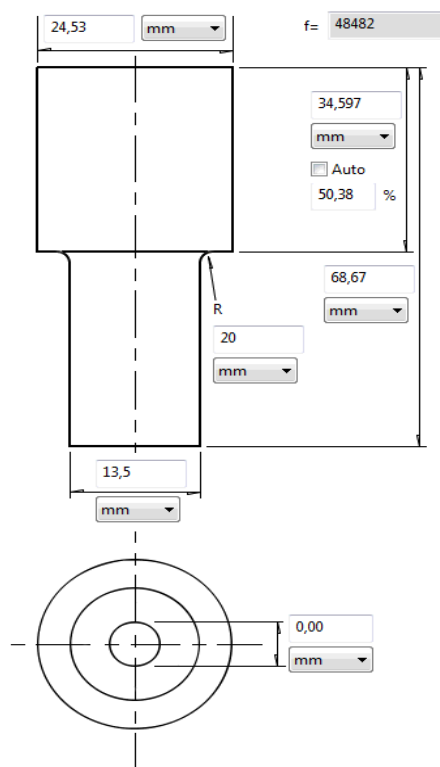
Obrázek 27 - Grafické zobrazení rozložení napětí v sonotrodě

Nejvyšší napětí je 237 MPa v červené oblasti (oblast s nejvyšší napjatostí). Červené oblasti jsou hned rovnou 2. Hodnota maximálního napětí je oproti předchozí sonotrodě s poloviční vlnovou délkou vyšší.

3) Sonotroda č.5 – Hutchinson WSK 1423.4 (vlnová délka $\lambda/2$, axial 1)

	Al	V	Fe	O	C	N	H
Ti-6Al-4V	5,5 – 6,75	3,5 – 4,5	Max. 0,4	Max. 0,2	Max. 0,08	Max. 0,05	Max. 0,015

Tabulka 9 - Chemické složení materiálu sonotrody [hm. %] [55]



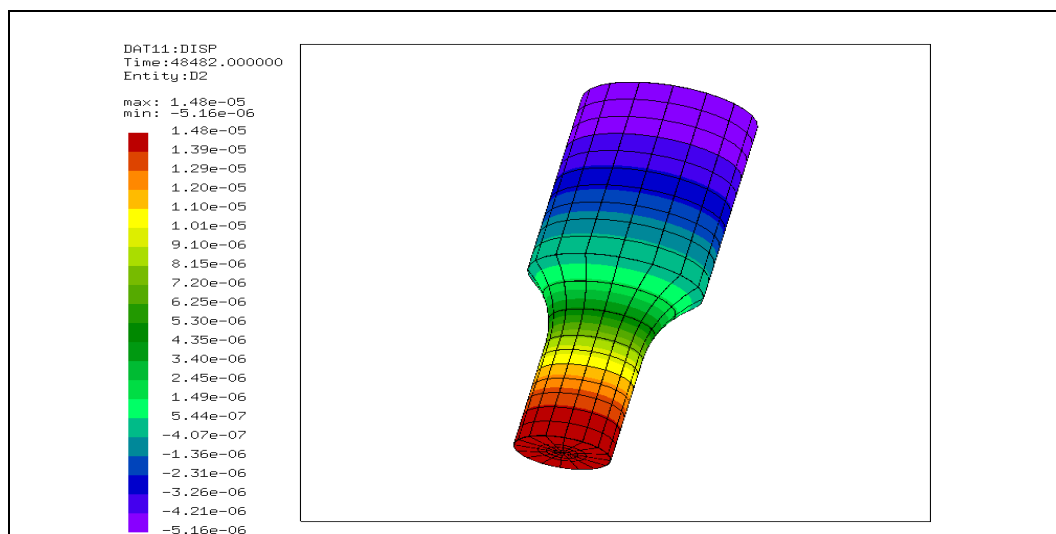
Obrázek 28 - Rozměry a pracovní frekvence sonotrody

Mode: Axial 1 (48482 Hz)

Obrázek 29 – Dosažená frekvence 48482 Hz při režimu axial 1

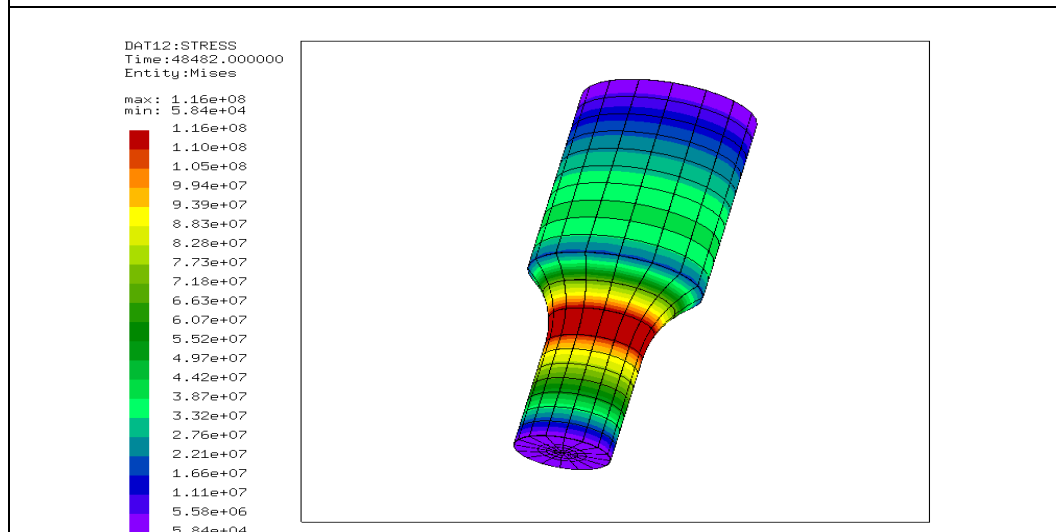
Modulus: 175,200 GPa
 Density: 4493,6 kg/m³
 Poisson's Ratio: 0,335
 Velocity (axial): 6244,1 m/s
 Velocity (radial): 6627,6 m/s

Obrázek 30 - Důležité materiálové charakteristiky



Obrázek 31 - Grafické zobrazení posunutí sonotrody s poloviční vlnovou délkou $\lambda/2$

Velikost maximálního posunutí v kmitně, která se nachází v hrotu sonotrody je 14,8 μm . Je tedy také výrazně nižší, než u sonotrody č.3.



Obrázek 32 - Grafické zobrazení rozložení napětí v sonotrodě

Tato sonotroda má nejvyšší hodnotu napětí 116 MPa v červené oblasti, která je podobně jako sonotroda č.2 kvůli zvolenému rádiusu mírně posunuta od místa přechodu mezi částí pro upnutí a tělem sonotrody. Hodnota maximálního napětí je ale ještě výrazně nižší než u sonotrody č.2.

9.2.1 Shrnutí simulací

Simulací komerčních sonotrod bylo zjištěno, v jakých hodnotách se pohybují jejich pracovní frekvence. Navíc byly zachyceny hodnoty maximálního posunutí v hrotu sonotrody a oblasti s nejvyšší koncentrací napětí, kde bude docházet nejpravděpodobněji k únavovým trhlinám.

Nejvyšší hodnotu posunutí a amplitudy posunutí v hrotu sonotrody vykazovala sonotroda č.3 a to 20,4 μm . Zdaleka nejmenší hodnotu napětí 116 MPa měla sonotroda č.5, dokázala tedy nejlépe zredukovat napětí. Měla také druhou nejvyšší hodnotu posunutí, i když za sonotrodou č.3 v tomto parametru výrazně zaostala. Sonotroda č.5 tedy z mého pohledu dosáhla nejzajímavějších výsledků.

Sonotrody se lišily nejen svými rozměry, nýbrž i materiály, z nichž byly vyrobeny. Je tak patrné, že při výběru materiálu nejsou výrobci u svých nástrojů zajedno. Materiál sonotrody č.2 a č.3 se svými hodnotami velmi podobal materiálům EN ISO HS6-5-2 po TZ a EN ISO HS6-5-2-5 po TZ, z nichž by se měly vyrábět nově navržené sonotrody. Naopak materiál sonotrody č.5 se svými hodnotami od ostatních materiálů lišil.

Zajímavé byly ty hodnoty pracovních frekvencí, které se pohybovaly řádově od 38900 do 48500 Hz a byly tedy relativně vysoké. V těchto případech se jednalo o sonotrody pro jiný typ svářeček, které ke svému fungování potřebují rozdílnou pracovní frekvenci. Proto se jejich hodnoty pracovní frekvence výrazně liší od hodnoty pracovní frekvence 35000 Hz, kterou požadují výrobci Hutchinson a.s. a Boshoku s.r.o. u nově navržených sonotrod.

Na závěr je ještě třeba zmínit, že všechny komerční sonotrody měly stupňovitý tvar, což naznačuje, že tato varianta je pro sonotrodu skutečně nejlepší.

9.3 Navržení vlastní sonotrody v programu SonoAnalyzer

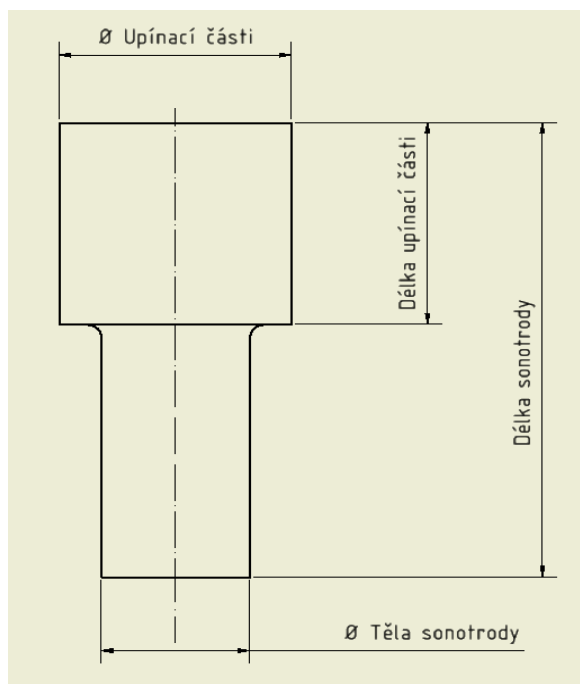
Vzorek	Hustota $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Poissonova konstanta [-]	Modul pružnosti v tahu [GPa]
EN ISO HS6-5-2 po TZ	8020,5	0,29269	281,25
EN ISO HS6-5-2-5 po TZ	7987,5	0,28661	280,83

Tabulka 10 – Tabulka důležitých hodnot materiálů pro simulaci [9]

	C	Mn	Si	Cr	W	V	Mo	Co	P	S
EN ISO HS6-5-2-5	0,87 – 0,95	Max. 0,45	Max. 0,45	3,8 – 4,5	5,9 – 6,7	1,7 – 2,1	4,7 – 5,2	4,5 – 5	Max. 0,03	Max. 0,03
EN ISO HS6-5-2	0,8 – 0,88	Max. 0,45	Max. 0,45	3,8 – 4,5	5,9 – 6,7	1,7 – 2,1	4,7 – 5,2	-	Max. 0,03	Max. 0,03

Tabulka 11 - Chemické složení [hm. %] [11] [12]

Pomocí zadaných rozměrů sonotrody, potřebné pracovní frekvence a některých důležitých materiálových charakteristik lze provést simulaci nově navržených sonotrod v softwaru SonoAnalyzer. Simulace bude provedena pro materiály EN ISO HS6-5-2 po TZ a EN ISO HS6-5-2-5 po TZ. Simulace je nezbytná pro navržení výsledné délky, hodnoty zaoblení, režimu frekvence a tvaru sonotrody. Potřebné materiálové charakteristiky pro simulaci jsou hustota (měrná hmotnost), Poissonova konstanta a modul pružnosti v tahu. Na základě těchto veličin je software schopný vypočítat rychlost šíření podélné a příčné vlny. Hodnoty těchto charakteristik jsem převzal z předchozích bakalářských prací ([9] a [10]), na které ve své práci navazuji.



Obrázek 33 – Schéma sonotrody

9.3.1 Návrh rozměrů sonotrody vyrobené z materiálu EN ISO HS6-5-2 po TZ

Provozní požadavek	
Průměr části pro uchycení sonotrody:	28 mm
Průměr těla sonotrody:	14 mm
Délka části pro uchycení sonotrody:	34 mm

Tabulka 12 - Provozní požadavek na sonotrodu

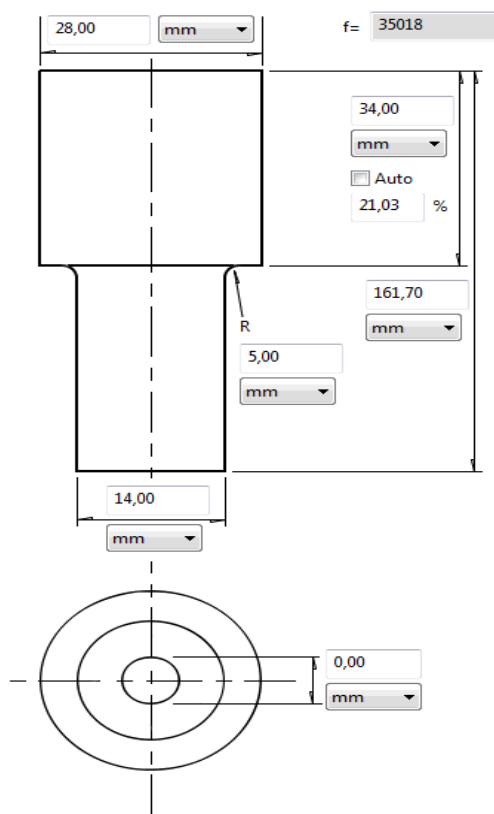
Modulus:	<input type="text" value="281,250"/>	<input type="text" value="GPa"/>
Density:	<input type="text" value="8020,5"/>	<input type="text" value="kg/m3"/>
Poisson's Ratio:	<input type="text" value="0,293"/>	
Velocity (axial):	<input type="text" value="5921,7"/>	<input type="text" value="m/s"/>
Velocity (radial):	<input type="text" value="6193,5"/>	<input type="text" value="m/s"/>

Obrázek 34 - Důležité materiálové charakteristiky pro provedení simulace

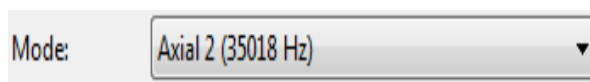
U následujících nově navržených sonotrod z materiálu EN ISO HS6-5-2 po TZ je vždy na úvodní listu uvedena pracovní frekvence, režim frekvence, rozměry a tvar sonotrody. Následující list obsahuje další důležité parametry jako je grafické zobrazení průběhu velikosti amplitudy a rozložení napětí.

1) Stupňovitá sonotroda, materiál EN ISO HS6-5-2 a vlnová délka (λ) - režim axial 2

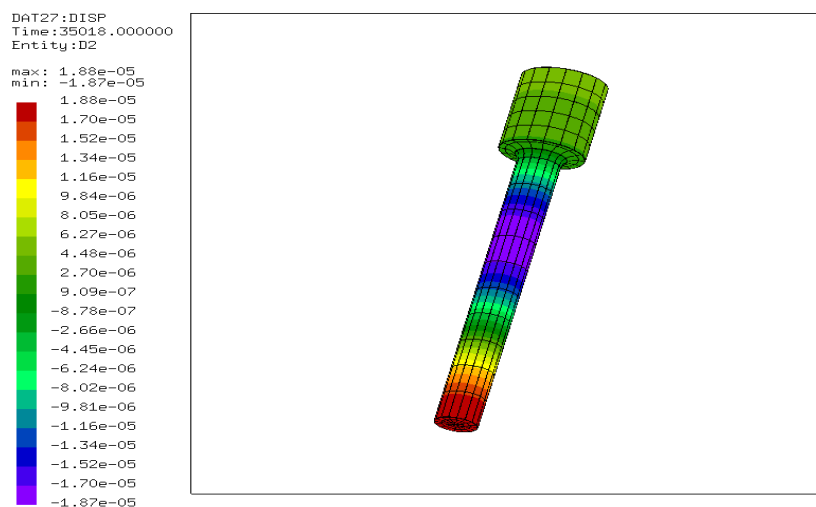
Délka sonotrody byla upravována tak dlouho, až se její pracovní frekvence limitně přiblížila frekvenci 35000 Hz. Délka sonotrody tak vyšla na 161,7 mm při dosažené frekvenci 35018 Hz. Sonotroda má vlnovou délku (λ), režim frekvence je tedy axial 2.



Obrázek 35 - Rozměry a pracovní frekvence sonotrody

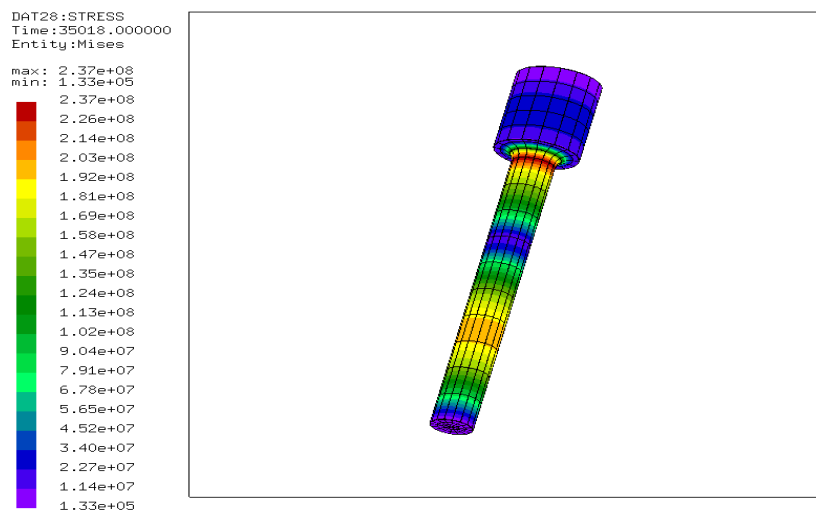


Obrázek 36 - Dosažená frekvence 35018 Hz při režimu axial 2



Obrázek 37 - Grafické zobrazení posunutí sonotrody s vlnovou délkou λ

Na obrázku můžeme pozorovat hodnotu maximálního posunutí, a tedy i amplitudy posunutí v hrotu sonotrody. Hodnota maximálního posunu je 18,8 μm .

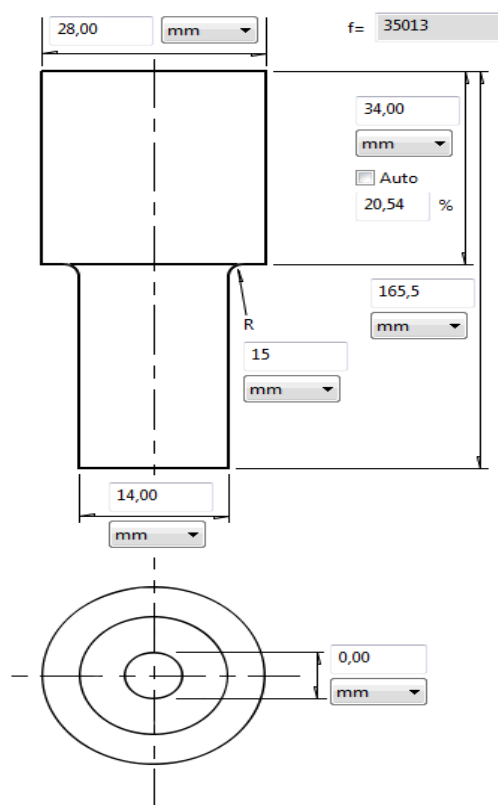


Obrázek 38 - Grafické zobrazení rozložení napětí v sonotrodě

Nejvyšší napětí 237 MPa a nachází se v červené oblasti.

2) Stupňovitá sonotroda, materiál EN ISO HS6-5-2 a vlnová délka (λ) - režim axial 2, rádius 15 mm

Stejná sonotroda jako předchozí. Byla však zvýšena hodnota rádiusu v přechodu. Hodnota maximálního napětí tím byla redukována. Hodnota amplitudy zůstala přibližně podobná.

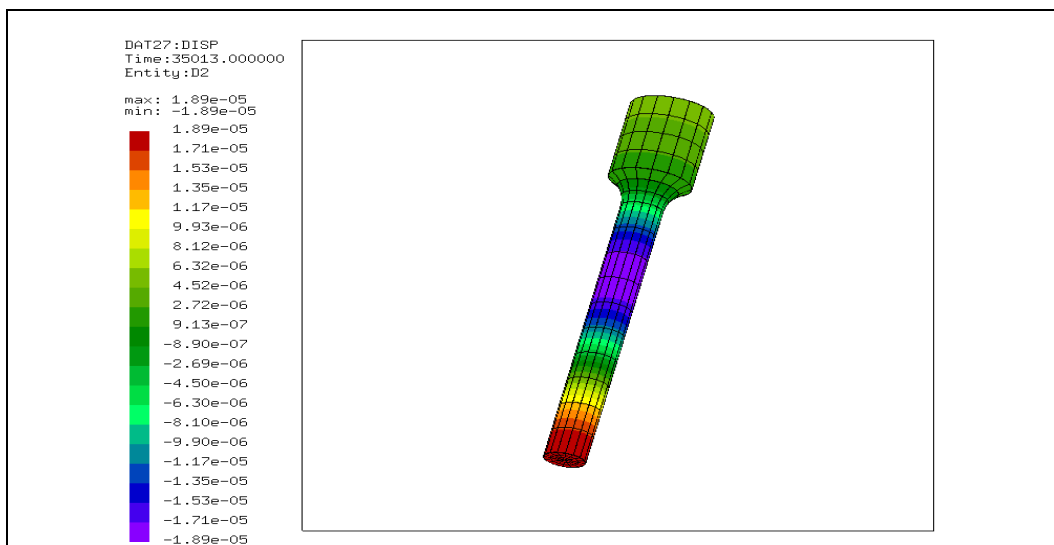


Obrázek 39 – Rozměry a pracovní frekvence sonotrody

Mode:

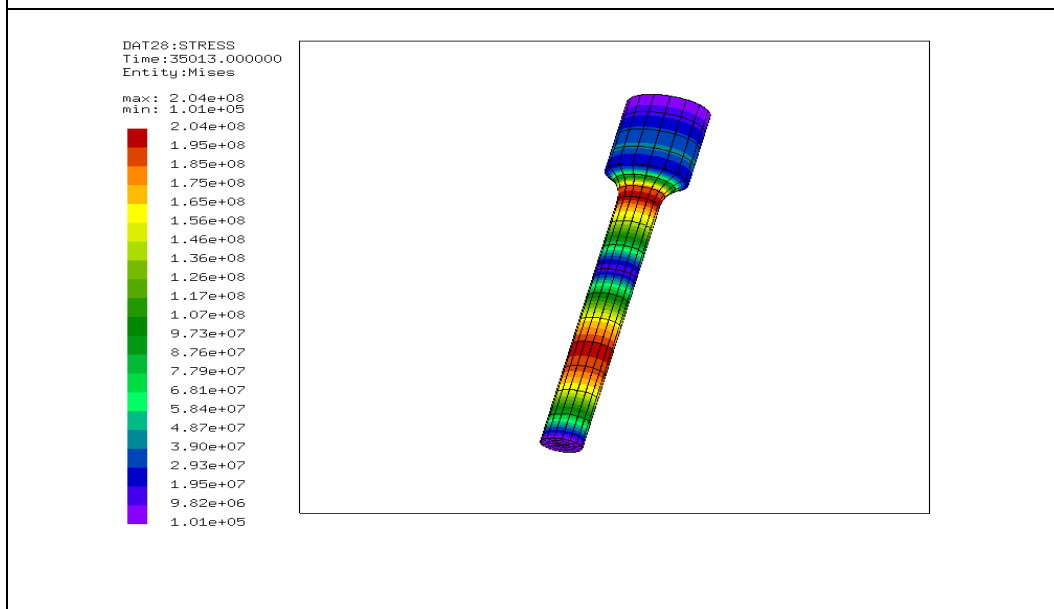
Axial 2 (35013 Hz)

Obrázek 40 - Dosažené frekvence 35013 Hz při režimu axial 2



Obrázek 41 - Grafické zobrazení posunutí sonotrody s vlnovou délkou λ

Hodnota maximálního posunutí v kmitně (červená oblast) je 18,9 μm .

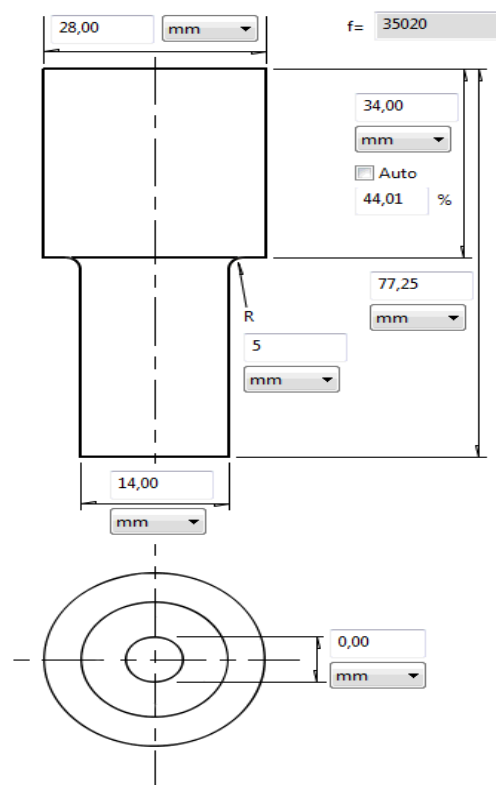


Obrázek 42 - Grafické zobrazení rozložení napětí v sonotrodě

Nejvyšší napětí je 204 MPa v červené oblasti. Je tedy oproti předchozí sonotrodě s menším rádiusem v přechodu menší.

3) Stupňovitá sonotroda, materiál EN ISO HS6-5-2 a vlnová délka ($\lambda/2$) - režim axial 1

V režimu vibrací sonotrody s poloviční vlnovou délkou axial 1 jsme schopni na základě požadavku na pracovní frekvenci okolo 35000 Hz vytvořit sonotrodu s menší délkou oproti režimu axial 2. Tato sonotroda je dlouhá 77,25 mm a má frekvenci 35020 Hz. To, jaký režim je pro sonotrodu vhodnější zvolit, je třeba určit na základě rozložení napětí a velikostí amplitudy posunutí v sonotrodě. Dále zde bude na jednotlivých příkladech ukázáno, jaký vliv na frekvenci a rozložení napětí má u stupňovité sonotrody zaoblení (rádius). Začneme se zaoblením $R=5$ mm.

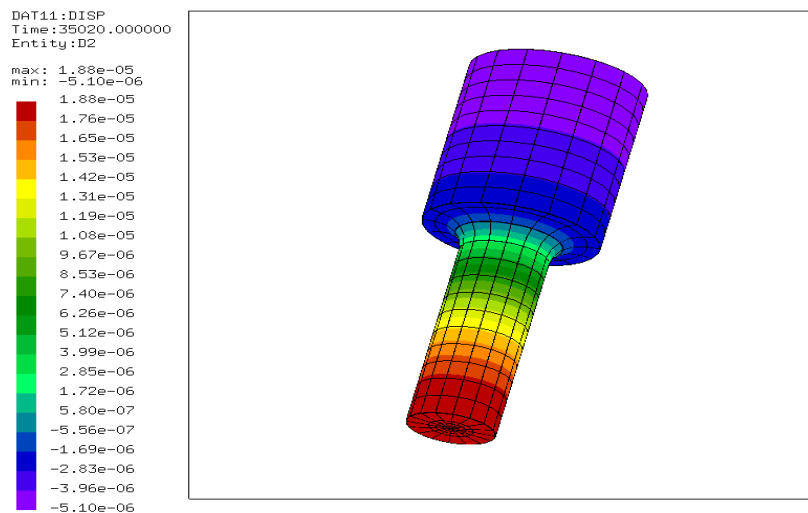


Obrázek 43 – Rozměry sonotrody a dosažená frekvence

Mode:

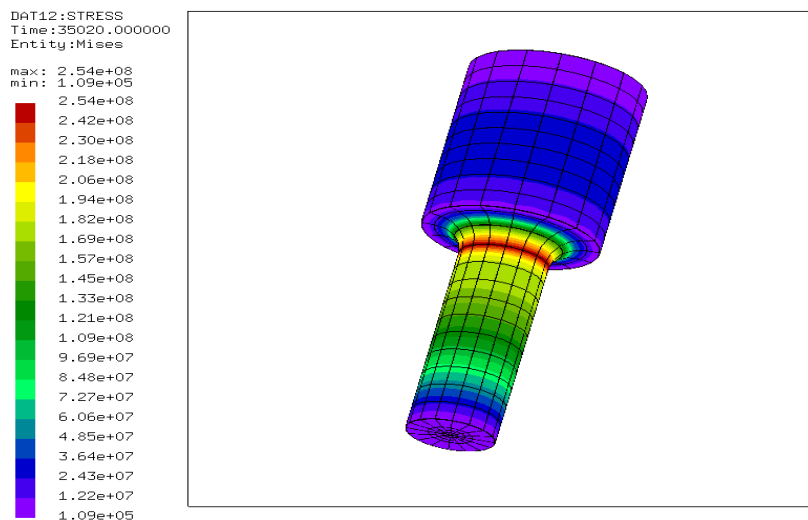
Axial 1 (35020 Hz)

Obrázek 44 - Dosažené frekvence 35020 Hz při režimu axial 1



Obrázek 45 - Grafické zobrazení posunutí sonotrody s poloviční vlnovou délkou $\lambda/2$

Na obrázku je hodnota amplitudy posunutí v hrotu sonotrody (červená oblast) a hodnota maximálního posunutí je 18,8 μm .

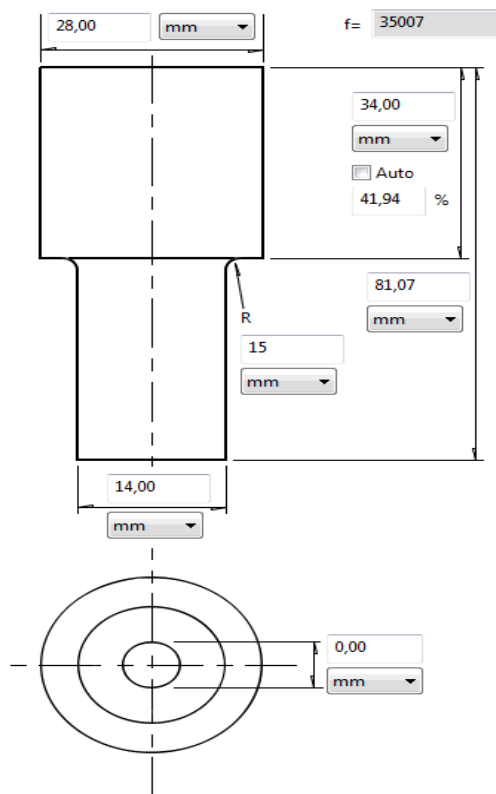


Obrázek 46 - Grafické zobrazení rozložení napětí v sonotrodě

Hodnota napětí je zde vysoká a dosahuje maximální hodnoty 254 MPa v červené oblasti, která je koncentrována v oblasti přechodu mezi průřezem části pro upnutí a menším průřezem těla sonotrody.

4) Stupňovitá sonotroda, materiál EN ISO HS6-5-2 a vlnová délka ($\lambda/2$) - režim axial 1, rádius 15 mm

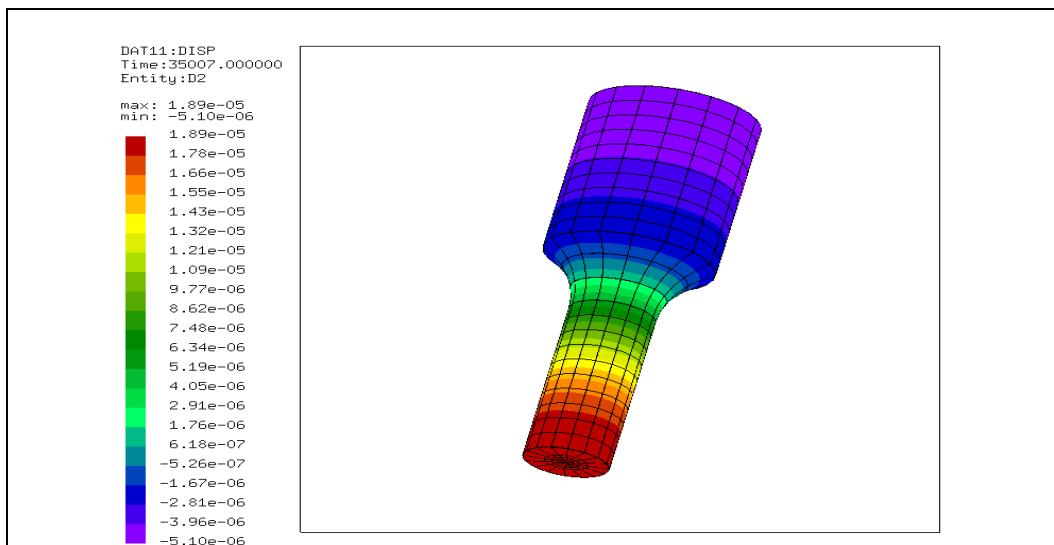
Jedná se o stejnou stupňovitou sonotrodu, která má pouze vyšší hodnotu zaoblení (rádius). Se zvyšující se hodnotou zaoblení roste i frekvence. Proto se délka sonotrody musí prodloužit, aby frekvence zůstala co nejbližee hodnotě 35000 Hz. Tato sonotroda má tedy délku 81,07 mm a frekvenci 35007 Hz.



Obrázek 47 - Rozměry sonotrody a dosažená frekvence

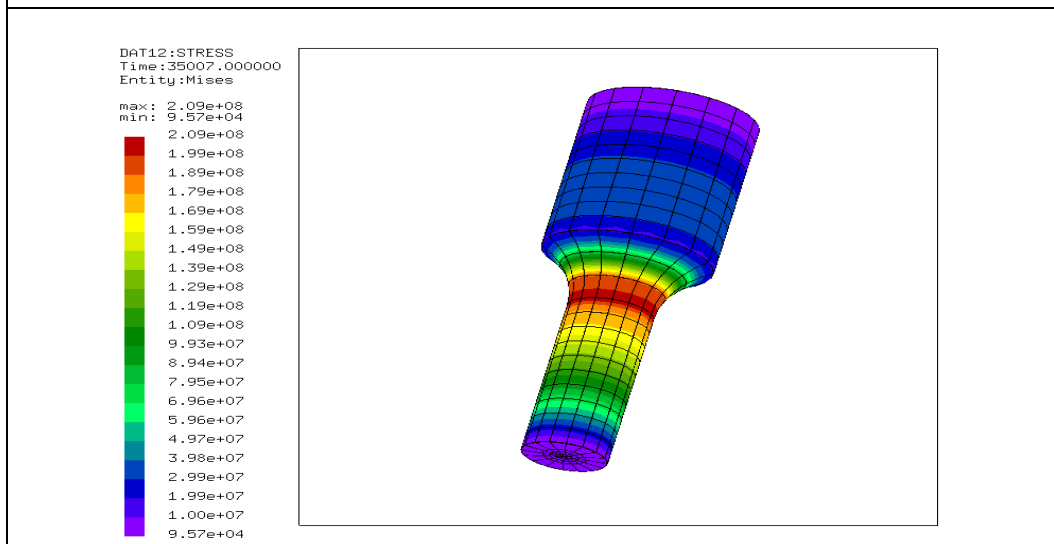
Mode: Axial1 (35007 Hz)

Obrázek 48 - Dosažená frekvence 35007 Hz při režimu axial 1



Obrázek 49 - Grafické zobrazení posunutí sonotrody s poloviční vlnovou délkou $\lambda/2$

Na obrázku je hodnota maximálního posunutí v hrotu 18,9 μm . Tato hodnota je tedy přibližně podobná jako u předchozí sonotrody s menším rádiusem v přechodu mezi částí pro upnutí a tělem sonotrody.

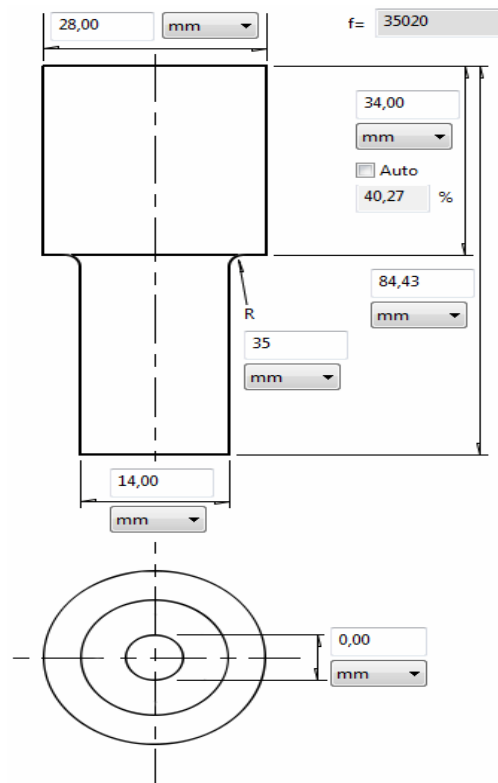


Obrázek 50 - Grafické zobrazení rozložení napětí v sonotrodě

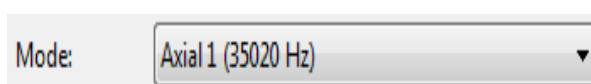
Hodnota maximálního napětí se zde oproti předchozí sonotrodě s menším rádiusem snížila a dosahuje hodnoty 209 MPa v červené oblasti. Je zde také patrný mírný posun oblasti s maximálním napětím (červená oblast) od místa přechodu.

5) Stupňovitá sonotroda, materiál EN ISO HS6-5-2 a vlnová délka ($\lambda/2$) - režim axial 1, rádius 35 mm

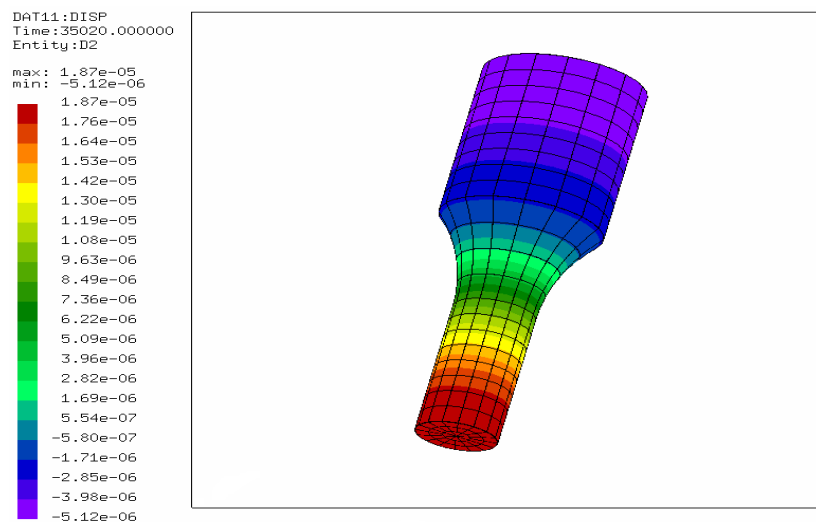
Opět stejná stupňovitá sonotroda, pouze s vyšší hodnotou zaoblení (rádius). Rostoucí hodnota rádiusu zvyšuje i frekvenci sonotrody. Proto má tato sonotroda délku 84,43 mm a frekvenci 35020 Hz.



Obrázek 51 - Rozměry sonotrody a dosažená frekvence

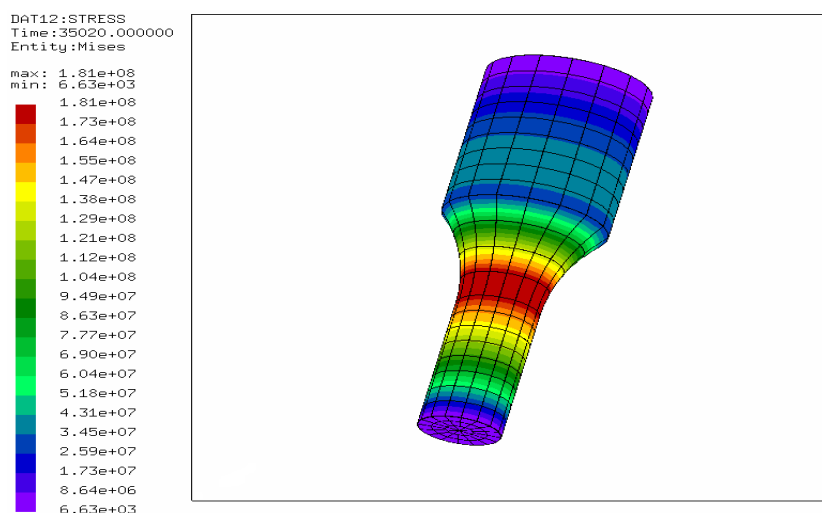


Obrázek 52 - Dosažená frekvence 35020 Hz při režimu axial 1



Obrázek 53 - Grafické zobrazení posunutí sonotrody s poloviční vlnovou délkou $\lambda/2$

Můžeme pozorovat, že hodnota maximální posunutí v kmitně (červená oblast) je 18,7 μm . Hodnota amplitudy v hrotu sonotrody se tedy oproti předchozím dvěma sonotrodám s menším rádiusem jen minimálně snížila.

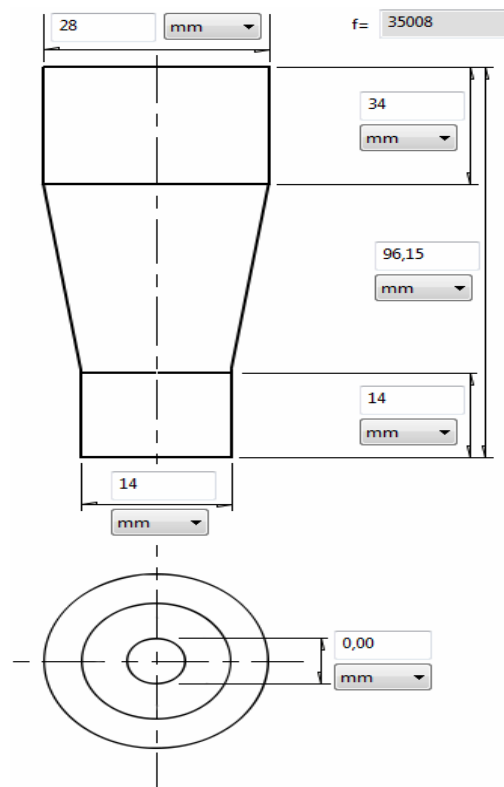


Obrázek 54 - Grafické zobrazení rozložení napětí v sonotrodě

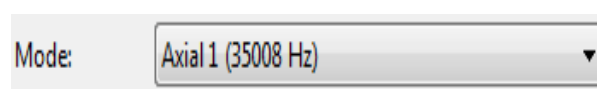
Napětí zde dosahuje maximální hodnoty 181 MPa v červené oblasti. Tato hodnota je tedy oproti předchozím dvěma sonotrodám nejmenší. Je zde také již dobře pozorovatelný posun oblasti s maximálním napětím (červená oblast) směrem od oblasti přechodu mezi částí pro upnutí a tělem sonotrody.

6) Kónická sonotroda, vlnová délka ($\lambda/2$), režim axial 1, materiál EN ISO HS6-5-2

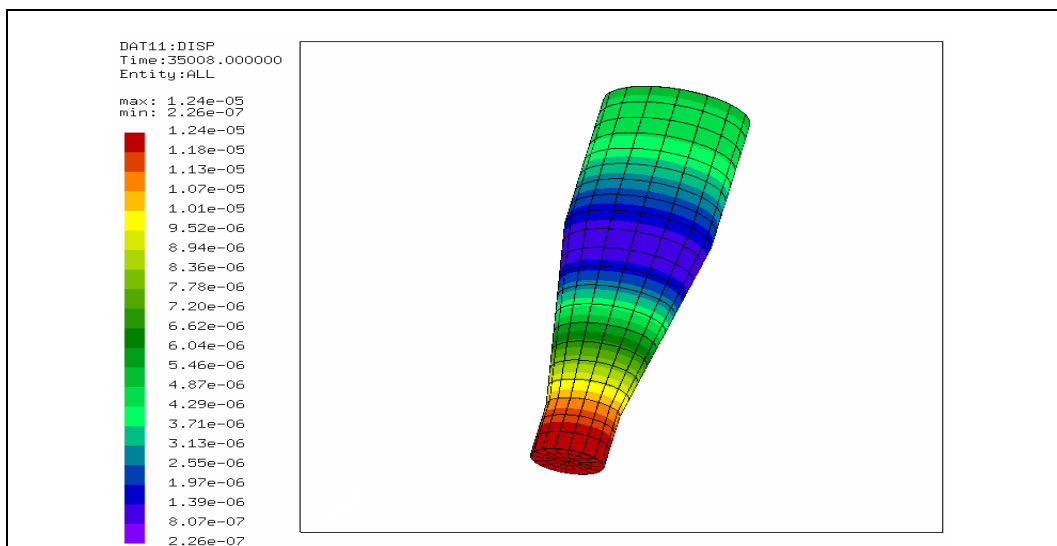
Na tomto tvaru sonotrody jsem chtěl ukázat alternativní přístup k návrhu sonotrody s vlnovou délkou ($\lambda/2$) a režimem vibrací axial 1. Důležité bylo samozřejmě také přiblížit se co nejvíce potřebné pracovní frekvenci okolo 35000 Hz. Podařilo se dosáhnout délky sonotrody 96,15 mm a frekvence 35008 Hz. Potřebné pracovní frekvence bylo dosaženo pouze úpravou délky těla sonotrody. Tento typ sonotrody totiž nemá žádný rádius.



Obrázek 55 – Rozměry a pracovní frekvence sonotrody

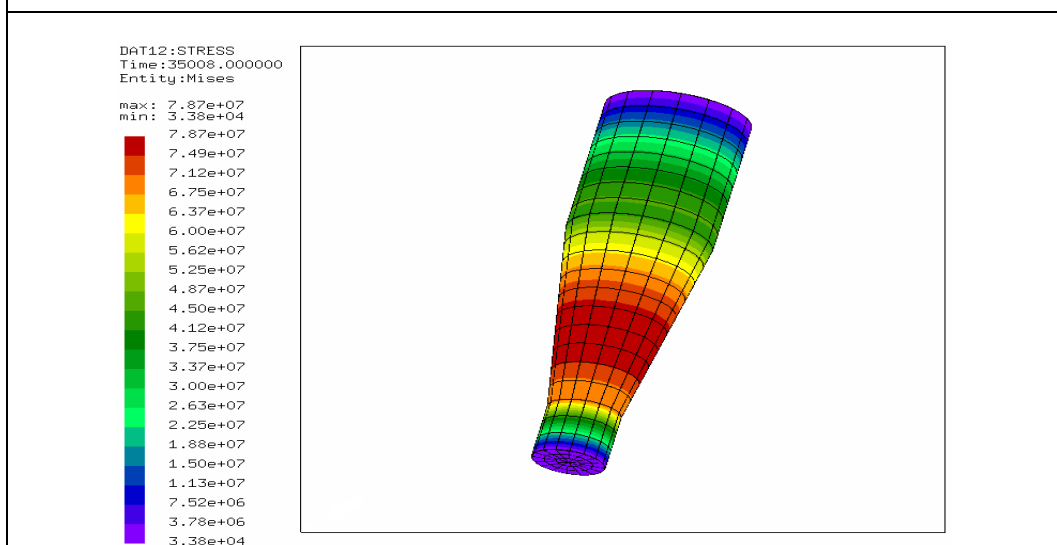


Obrázek 56 - Dosažená frekvence 35008 Hz při režimu axial 1



Obrázek 57 - Grafické zobrazení posunutí kónické sonotrody s poloviční vlnovou délkou $\lambda/2$

Hodnota maximálního posunutí v hrotu sonotrody je pouze 12,4 μm , To je méně, než dokážou vytvořit stupňovité sonotrody.



Obrázek 58 - Grafické zobrazení rozložení napětí v sonotrodě

Hodnota napětí zde dosahuje maximální hodnoty 78,7 MPa v červené oblasti. Kónický tvar je tedy schopný dosáhnout vcelku příznivých hodnot maximálního napětí.

9.3.2 Návrh rozměrů sonotrody vyrobené z materiálu EN ISO HS6-5-2-5 po TZ

Provozní požadavek	
Průměr části pro uchycení sonotrody:	28 mm
Průměr těla sonotrody:	14 mm
Délka části pro uchycení sonotrody:	34 mm

Tabulka 13 - Provozní požadavek na sonotrodu

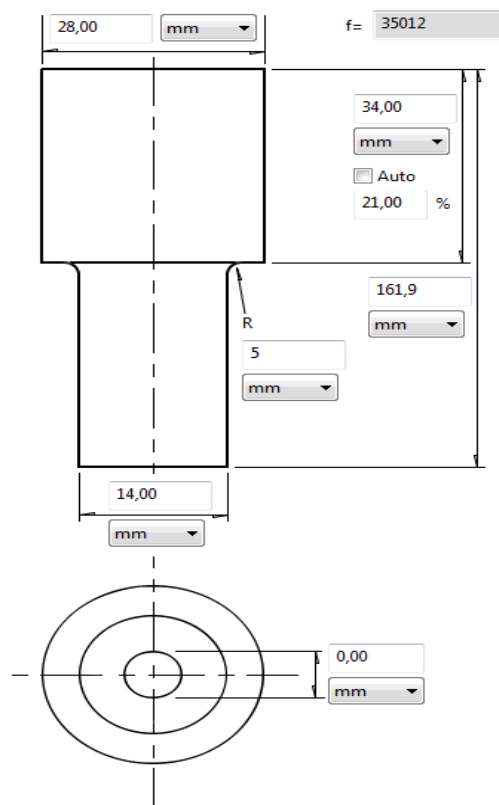
Modulus:	<input type="text" value="280,830"/>	<input type="text" value="GPa"/>
Density:	<input type="text" value="7987,5"/>	<input type="text" value="kg/m3"/>
Poisson's Ratio:	<input type="text" value="0,287"/>	
Velocity (axial):	<input type="text" value="5929,5"/>	<input type="text" value="m/s"/>
Velocity (radial):	<input type="text" value="6189,9"/>	<input type="text" value="m/s"/>

Obrázek 59 - Důležité materiálové charakteristiky pro provedení simulace v programu SonoAnalyzer

U následujících nově navržených sonotrod z materiálu EN ISO HS6-5-2-5 po TZ je vždy na úvodní listu uvedena pracovní frekvence, režim frekvence, rozměry a tvar sonotrody. Následující list obsahuje další důležité parametry jako je grafické zobrazení průběhu velikosti amplitudy a rozložení napětí.

1) Stupňovitá sonotroda, materiál EN ISO HS6-5-2-5 a vlnová délka (λ) - režim axial 2

Postup stejný jako u materiálu EN ISO HS6-5-2 po TZ. Stejně zadané rozměry, potřebná pracovní frekvence 35000 Hz. Délka sonotrody byla tedy stále upravována, dokud se její pracovní frekvence co nejvíce nepřiblížila frekvenci 35000 Hz. Délka sonotrody tak vyšla 161,9 mm při dosažené frekvenci 35012 Hz.

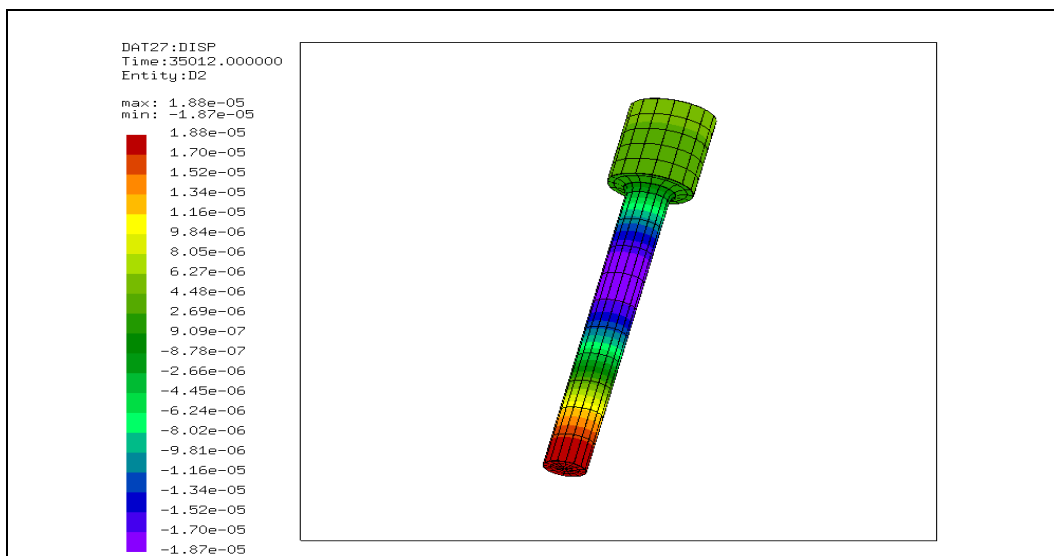


Obrázek 60 – Rozměry sonotrody a dosažená frekvence

Mode:

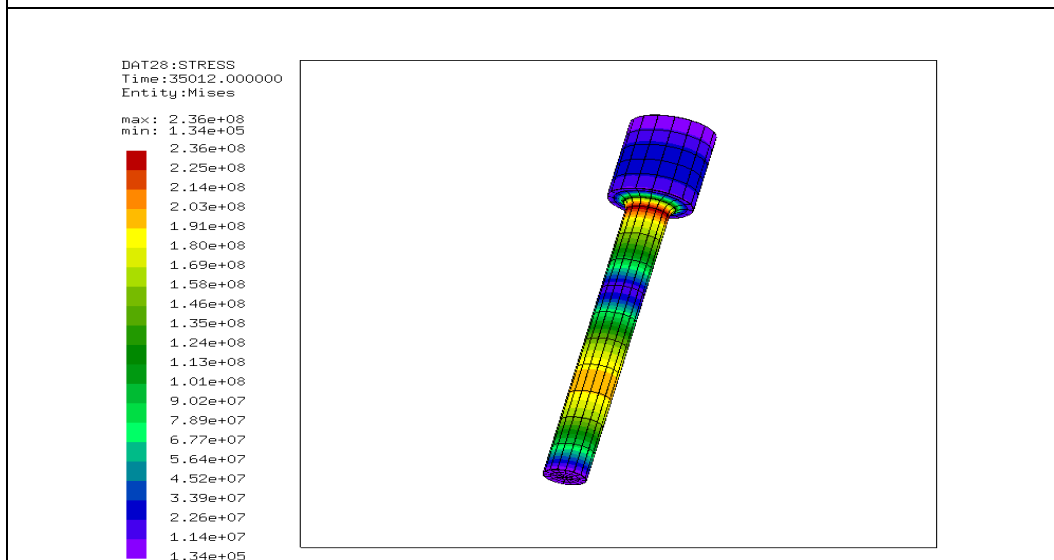
Axial 2 (35012 Hz)

Obrázek 61 - Dosažená frekvence 35012 Hz při režimu axial 2



Obrázek 62 - Grafické zobrazení posunutí sonotrody s vlnovou délkou λ

Na obrázku můžeme pozorovat v grafickém zobrazení posunutí, že hodnota maximálního posunutí (červená oblast) je 18,8 μm . Kmitna se tedy opět správně nachází v hrotu sonotrody.

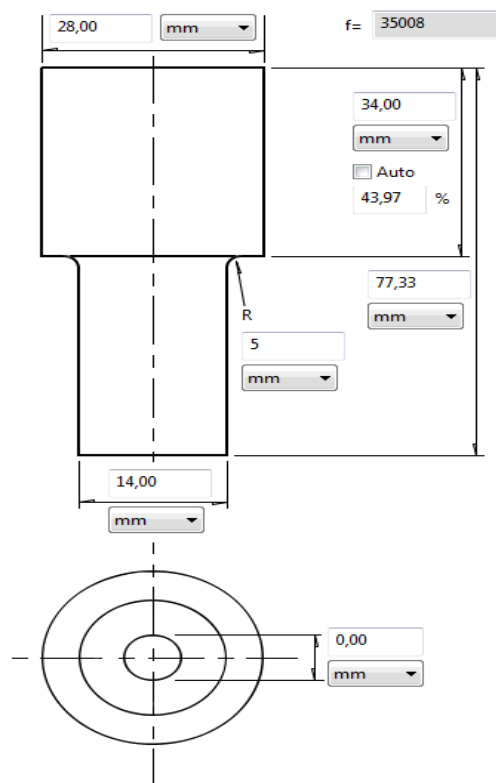


Obrázek 63 - Grafické zobrazení rozložení napětí v sonotrodě

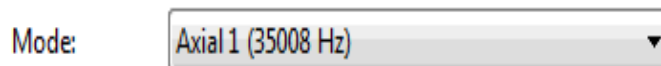
Hodnota nejvyššího napětí je 236 MPa a nachází se v červené oblasti.

2) Stupňovitá sonotroda, materiál EN ISO HS6-5-2-5 a vlnová délka ($\lambda/2$) - režim axial 1

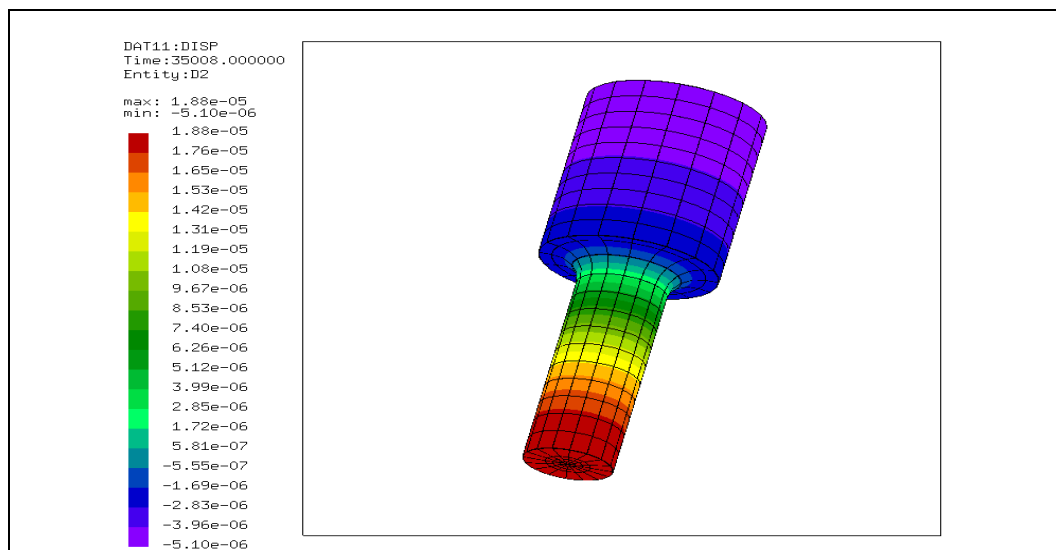
Délka sonotrody byla stále upravována, dokud se její pracovní frekvence co nejvíce nepřiblížila frekvenci 35000 Hz. Délka sonotrody je oproti předchozí sonotrodě menší, protože má oproti ní poloviční vlnovou délku. Délka sonotrody tak vyšla 77,33 mm při dosažené frekvenci 35008 Hz



Obrázek 64 – Rozměry sonotrody a dosažená frekvence

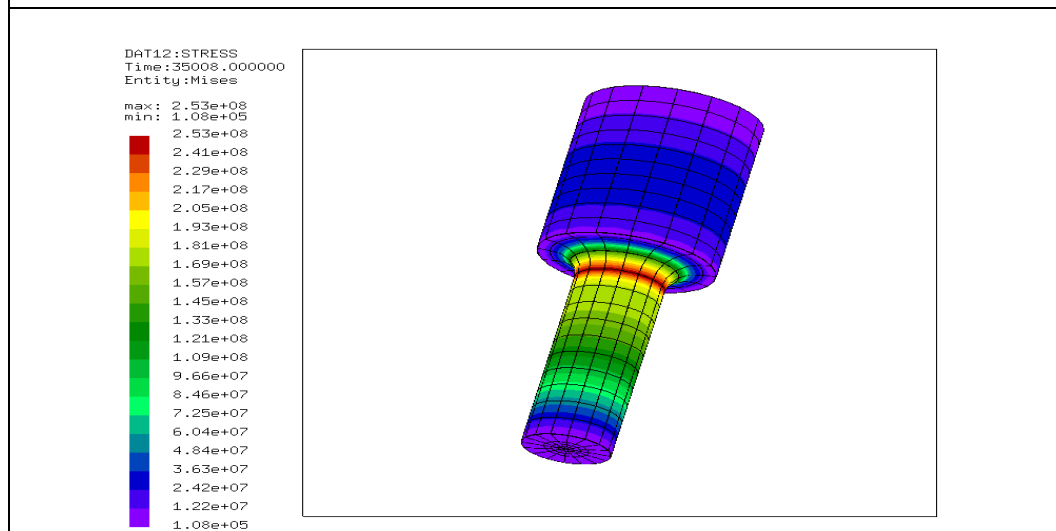


Obrázek 65 - Dosažená frekvence 35008 Hz při režimu axial 1



Obrázek 66 – Grafické zobrazení posunutí sonotrody s poloviční vlnovou délkou $\lambda/2$

Na obrázku je hodnota maximálního posunutí v hrotu sonotrody, tedy i amplitudy posunutí 18,8 μm .

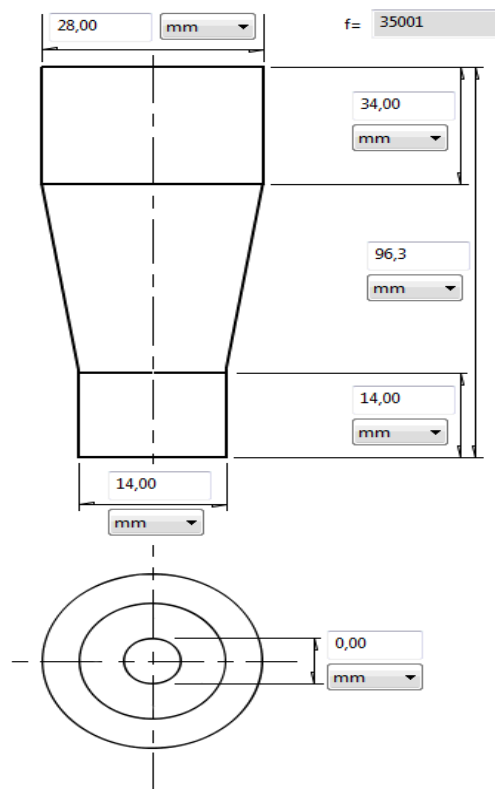


Obrázek 67 - Grafické zobrazení rozložení napětí v sonotrodě

Hodnota maximálního napětí je zde vysoká a v červené oblasti dosahuje hodnoty 253 MPa.

3) Konický tvar sonotrody, vlnová délka ($\lambda/2$), režim axial 1, materiál EN ISO HS6-5-2-5

Stejně jako u předchozího materiálu EN ISO HS6-5-2 je i zde simulován alternativní tvar sonotrody. Simulace kónického tvaru byla oproti stupňovitému tvaru složitější. U kónického tvaru totiž stačí i malá změna délky ke dramatické změně frekvence. Je tedy složitější jí naladit na správnou frekvenci. Je zde opět velmi příznivá hodnota maximálního napětí, která je relativně nízká. Kromě nižší hodnoty napětí má tato sonotroda i výrazně nižší amplitudu posunutí ve svém hrotu. Je to dáno tím, že přechod mezi částí s větším průměrem a částí s menším průměrem je oproti stupňovité sonotrodě pozvolnější.

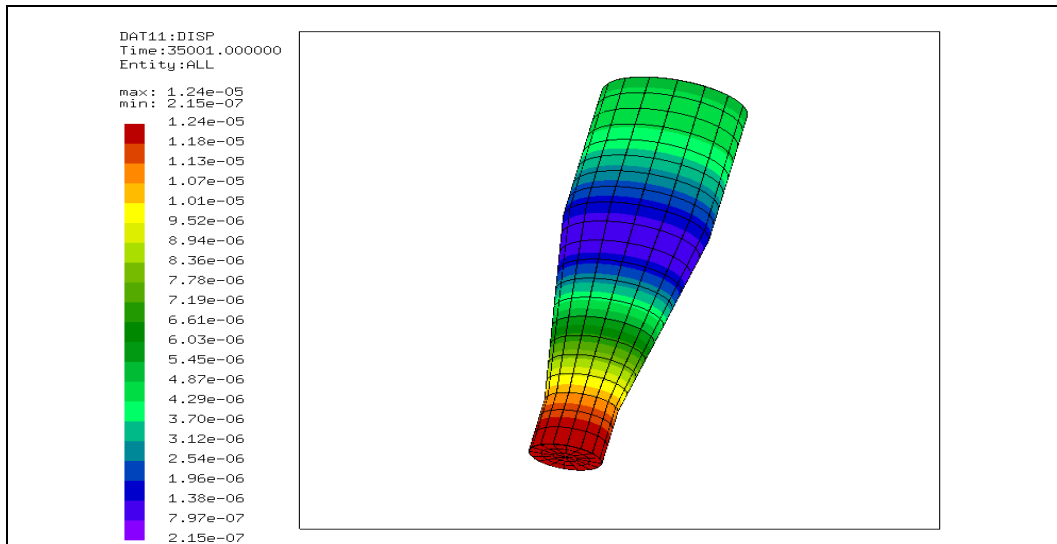


Obrázek 68 - Rozměry sonotrody a dosažená frekvence

Mode:

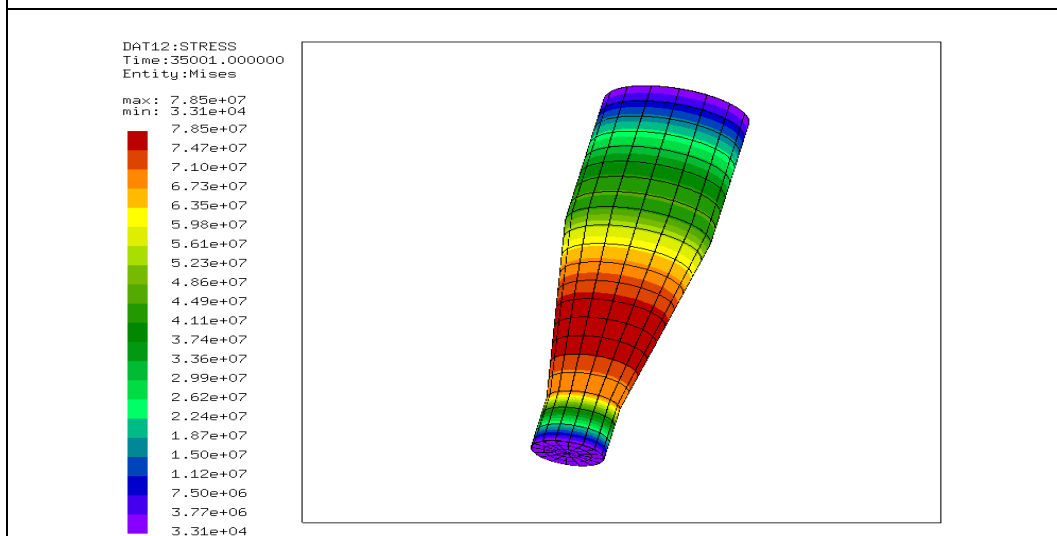
Axial 1 (35001 Hz)

Obrázek 69 - Dosažená frekvence 35001 Hz při režimu axial 1



Obrázek 70 - Grafické zobrazení posunutí kónické sonotrody s poloviční vlnovou délkou $\lambda/2$

Na obrázku je patrná správně umístěná kmitna v hrotu sonotrody. Hodnota maximálního posunutí a amplitudy posunutí je 12,4 μm . To je nízká hodnota amplitudy oproti sonotrodám se stupňovitým tvarem.



Obrázek 71 - Grafické zobrazení rozložení napětí

Oproti stupňovité sonotrodě zde můžeme pozorovat rozsáhlejší červenou oblast. Hodnota maximálního napětí je zde pouze 78,5 MPa.

10. Závěr

Ve své práci jsem se snažil shrnout základní principy fungování technologie ultrazvukového svařování z fyzikálního hlediska. Dále jsem popsal samotný proces vytvoření spoje a představil jsem jednotlivé části svařovacího zařízení.

Ultrazvukové svařování nabízí oproti ostatní způsobům svařování velké výhody. Jelikož se nejedná o tavný způsob svařování, nevzniká riziko tepelného ovlivnění a výsledný spoj je vytvořen do několika sekund. Tento druh svařování je zároveň energeticky nenáročný. Tato metoda svařování se využívá zejména pro svařování plastů.

Problémem této technologie je krátká životnost sonotrody. Výroba nové sonotrody je navíc finančně nákladná, zejména kvůli pořizovací ceně materiálu.

Vhodnost sonotrody pro svařování a podobné aplikace, spojené s tavením plastů můžeme posuzovat z hlediska amplitudy posunutí na konci sonotrody a maximálního napětí, kterému je vystavena. Zatímco amplituda posunutí ukazuje účinnost sonotrody, z údajů o maximálním napětí lze vyčíst, kde nejčastěji dochází k poškození svařovacího nástroje. Sonotroda má vykazovat co největší amplitudu posunutí, která v závislosti na součiniteli tření určuje množství tepla, vznikajícího v taveném materiálu. Naopak namáhání sonotrody by mělo být co nejmenší. Je také nutné, aby bylo pod mezí únavy materiálu.

V experimentální části této práce byla nejprve provedena simulace komerčních sonotrod, které byly dodány společnostmi Hutchinson a.s. a Boshoku s.r.o. Simulované sonotrody se lišily v rozměrech, pracovní frekvenci a materiálu z něž byly vyrobeny. Naopak se shodovaly v tom, že měly stupňovitý tvar.

Název sonotrody	Materiál	Režim sonotrody	Pracovní frekvence [Hz]	Délka sonotrody [mm]	Rádus [mm]	Maximální napětí [MPa]	Amplituda posunutí [μm]
Komerční sonotroda č.2 Hutchinson	ocel DIN 1.2376	$\lambda/2$	43763	70,89	20	160	12,5
Komerční sonotroda č.3 Boshoku	ocel DIN 1.3340	λ	38989	152,56	15	237	20,4
Komerční sonotroda č.5 Hutchinson	Titanová slitina Ti-6Al-4V	$\lambda/2$	48482	68,67	20	116	14,8

Tabulka 14 - Shrnutí parametrů komerčních sonotrod

Jako komerční sonotrodu s nejzajímavějšími parametry jsem zvolil sonotrodu č.5, která dokázala velmi dobře rozložit napětí a měla druhou nejvyšší hodnotu amplitudy posunutí.

Vzhledem k vysoké ceně komerčních sonotrod se dá očekávat, že nově navržené sonotrody budou ekonomicky výhodnější.

U nově navržených sonotrod byla dána geometrie v oblasti upnutí a průměr hrotu sonotrody. Variabilní byla délka a zaoblení (rádius) v oblasti přechodu mezi částí pro upnutí a tělem sonotrody.

Sonotrody byly navrhovány buď pro celou vlnovou délku nebo pro její polovinu. Sonotrody v režimu celé vlnové délky λ jsou dlouhé více než 16 cm, což může způsobit problémy při výrobě. Roste také riziko jejich nežádoucího namáhání, v jehož důsledku může docházet k ohybu nástroje. Sonotrody s vlnovou délkou $\lambda/2$ a s malým poloměrem zaoblení v oblasti přechodu dosáhly při simulaci vyššího maximálního napětí než sonotrody s vlnovou délkou λ , které měly také malý poloměr zaoblení v oblasti přechodu (viz. Tabulka 15).

Název sonotrody	Materiál	Režim sonotrody	Pracovní frekvence [Hz]	Délka sonotrody [mm]	Rádius [mm]	Maximální napětí [MPa]	Amplituda posunutí [μm]
Stupňovitá sonotroda	EN ISO HS6-5-2 po TZ	λ	35018	161,7	5	237	18,8
Stupňovitá sonotroda		λ	35013	165,5	15	204	18,9
Stupňovitá sonotroda		$\lambda/2$	35020	77,25	5	254	18,8
Stupňovitá sonotroda		$\lambda/2$	35007	81,07	15	209	18,9
Stupňovitá sonotroda		$\lambda/2$	35020	84,43	35	181	18,7
Kónický tvar sonotrody		$\lambda/2$	35008	96,15	0	78,7	12,4
Stupňovitá sonotroda	EN ISO HS6-5-2-5 po TZ	λ	35012	161,9	5	236	18,8
Stupňovitá sonotroda		$\lambda/2$	35008	77,33	5	253	18,8
Kónický tvar sonotrody		$\lambda/2$	35001	96,3	0	78,5	12,4

Tabulka 15 – Shrnutí parametrů různých variant nově navržených sonotrod z kovaných ocelí EN ISO HS6-5-2 po TZ a EN ISO HS6-5-2-5 po TZ

Sonotrody s kónickým tvarem dosáhly ze všech sonotrod nejnižší hodnoty maximálního napětí, ale měly také nízkou hodnotu amplitudy v hrotu sonotrody. Stejně jako sonotrody s kónickým tvarem se i sonotrody s exponenciálním tvarem běžně vyrábějí, ale stupňovitý tvar má nejvyšší hodnoty amplitudy posunutí v hrotu sonotrody a je nejsnáze vyrobitelný. Jako nejvýhodnější tvar sonotrody byl tedy zvolen stupňovitý tvar. Z Tabulka 15 je patrné, že u stupňovitých sonotrod z kovaných ocelí EN ISO HS6-5-2 po TZ a EN ISO HS6-5-2-5 po TZ je velikost amplitudy posunutí v hrotu sonotrody téměř stejná, a to v rozmezí 18,7 - 18,9 μm .

Při navrhování tvaru byl u všech sonotrod dodržen požadavek na pracovní frekvenci 35000 Hz. Vstupní hodnoty pro provedení simulace materiálů EN ISO HS6-5-2 po TZ a EN ISO HS6-5-2-5 po TZ byly podobné.

Jako jediný parametr pro porovnání nově navržených sonotrod tedy nakonec zůstala hodnota napětí. Tento parametr s hodnotou 181 MPa měla nakonec ze všech stupňovitých sonotrod nejlepší sonotroda s poloviční vlnovou délkou ($\lambda/2$), rádiusem 35 mm a použitým materiálem EN ISO HS6-5-2 po TZ. Tato sonotroda se tak ukazuje jako nejlepší ze všech nově navržených.

11. Zdroje

11.1 Knihy a skripta

- [1] LEPIL, OLDŘICH: Fyzika pro gymnázia: Mechanické kmitání a vlnění. Prometheus, 2007, ISBN 978-80-7196-387-5
- [2] KOVAŘÍK, RUDOLF a ČERNÝ, FRANTIŠEK: Technologie svařování. Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň, 1993, ISBN 80-7082-112-4
- [3] KUNCIPÁL, JOSEF a kolektiv: Nové technologie ve svařování. SNTL, Praha, 1984, 279s
- [4] KUNCIPÁL, JOSEF a kolektiv: Teorie svařování. SNTL, Praha, 1986, 255s
- [5] SKÁLOVÁ, J., KOUTSKÝ, J., MOTYČKA V.: Nauka o materiálech. Západočeská univerzita v Plzni, 2000, ISBN 978-80-7043-244-0
- [6] LOYDA MILOSLAV a kolektiv: Svařování termoplastů. UNO Praha, Praha, 2001, ISBN 80-238-6603-6
- [7] TROUGHTON, M.: Handbook of plastics joining: a practical guide. William Andrew Inc., Norwich NY, 2008, ISBN 978-0-8155-1581-4
- [8] ENSMINGER, D. and BOND, L.J.: Ultrasonics: fundamentals, technologies and applications. Taylor and Francis Group, 2012, ISBN 978-1-4200-2027-4
- [9] STACH, O.: Měření rychlosti šíření ultrazvuku ve vybraných materiálech v návaznosti na ultrazvukové svařování, Bakalářská práce, Západočeská univerzita - Fakulta strojní, Plzeň 2018

- [10] TRČKA, J.: Měření ultrazvukových parametrů kované nástrojové oceli, Bakalářská práce, Západočeská univerzita - Fakulta strojní, Plzeň 2018
- [11] EN ISO HS6-5-2-5
- [12] EN ISO HS6-5-2

11.2 Internetové zdroje

- [13] <https://www.aldebaran.cz/glossary/print.php?id=1299> [vid. 28. října 2019]
- [14] https://cs.wikipedia.org/wiki/Numerick%C3%A1_metoda [vid. 28. října 2019]
- [15] <http://www.fyzika007.cz/mechanicke-kmitani-a-vlneni/kmitavy-pohyb---jeho-zavedeni> [vid. 28. října 2019]
- [16] http://www.wikina.cz/a/Vlnov%C3%A1_d%C3%A9lka [vid. 28. října 2019]
- [17] <http://www.fyzika007.cz/mechanicke-kmitani-a-vlneni/vznik-a-druhy-vlneni>
[vid. 1. prosince 2019]
- [18] <http://fyzikalnipokusy.cz/2065/faze-vlny> [vid. 1. prosince 2019]
- [19] https://www.wikiskripta.eu/w/Vlastnosti_zvuku [vid. 1. prosince 2019]
- [20] https://wikisofia.cz/wiki/Zvuk_a_zvukov%C3%A9_vln%C4%9Bn%C3%AD
[vid. 1. prosince 2019]
- [21] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/168-odraz-vlneni-v-rade-bodu-stojate-vlneni> [vid. 1. prosince 2019]
- [22] <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/akustika/ultrazvuk>
[vid. 2. prosince 2019]
- [23] <https://www.britannica.com/science/ultrasonics> [vid. 2. prosince 2019]
- [24] <https://www.britannica.com/science/ultrasonics/Ranging-and-navigating>
[vid. 2. prosince 2019]
- [25] <http://mlgeardesigns.blog.cz/1503/obrabeni-ultrazvukem> [vid. 2. prosince 2019]
- [26] <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009svarovani/2-06-41.pdf> [vid. 2. prosince 2019]
- [27] https://media.springernature.com/original/springer-static/image/chp%3A10.1007%2F978-3-319-56099-1_8/MediaObjects/418904_1_En_8_Fig2_HTML.gif [vid. 2. prosince 2019]
- [28] http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_svarovani_ultrazvukem_mrna.pdf [vid. 2. prosince 2019]

- [29] https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-56099-1_8
[vid. 2. prosince 2019]
- [30] <https://adoc.tips/ultrazvukove-svaovani-41.html> [vid. 2. prosince 2019]
- [31] <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/elektrostatika/pyroelektricky-piezoelektricky-jev> [vid. 2. prosince 2019]
- [32] http://dlabos.wz.cz/en/Eletkroakusticke_menice.html [vid. 3. prosince 2019]
- [33] <https://sonotronic.de/products/ultrasonic-components/sonotrodes>
[vid. 3. prosince 2019]
- [34] <https://www.telsonic.com/en/plastic-welding/plastic-welding-ultrasonics/>
[vid. 2. března 2020]
- [35] <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyuziti-ultrazvuku-pri-svarovani-plastu.html>
[vid. 2. března 2020]
- [36] <https://www.wiretech.cz/c/ultrazvukova-technologie/ultrazvukove-svarovani-plastu>
[vid. 2. března 2020]
- [37] <https://www.wiretech.cz/c/ultrazvukova-technologie/ultrazvukove-svarovani-plastu/torzni-metoda-pro-narocne-aplikace> [vid. 2. března 2020]
- [38] <http://home.zcu.cz/~mikaMM/Motivace%20MM/kmity.html>
[vid. 2. března 2020]
- [39] <https://www.alinecomponents.com/plastification-in-thermoplastic-injection-molding.html> [vid. 2. března 2020]
- [40] <https://www.wiretech.cz/c/ultrazvukova-technologie/ultrazvukove-svarovani-plastu/zatavovani-kovovych-dilu> [vid. 3. března 2020]
- [41] <https://www.wiretech.cz/c/ultrazvukova-technologie/ultrazvukove-svarovani-plastu/nytovani-termoplastu> [vid. 3. března 2020]
- [42] http://www.st-rong.com/tc105_eg.html [vid. 3. března 2020]
- [43] <https://www.herrmannultraschall.com/en/ultrasonic-welding-basics/ultrasonic-basics/vibration-amplitude/> [vid. 4. března 2020]
- [44] <https://cs.qwe.wiki/wiki/Amplitude> [vid. 5. března 2020]
- [45] https://www.researchgate.net/publication/269481350_Steels_as_Materials_for_Sonotrode_Tools [vid. 6. března 2020]
- [46] <https://www.powerultrasonics.com/content/sonotrode-materials-shapes-parameters>
[vid. 6. března 2020]

- [47] <http://www.powerultrasonics.com/content/sonotrode-design-and-manufacturing-instructions-zvei-handbook> [vid. 6. března 2020]
- [48] <https://www.mmspektrum.com/clanek/izostaticke-lisovani-za-tepla.html>
[vid. 6. března 2020]
- [49] https://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publikationen/Broschueren/028_DEW_FerTit_Pulvermetallur_GB.pdf
[vid. 6. března 2020]
- [50] <http://www.alunet.cz/ENAW-7075> [vid. 6. března 2020]
- [51] <https://proal.cz/hlinik/slitiny-hliniku/en-aw-7075/> [vid. 6. března 2020]
- [52] <http://www.alunet.cz/pouzito> [vid. 6. března 2020]
- [53] <https://www.neonickel.com/cS/titanium-6al-4v/> [vid. 7. března 2020]
- [54] <https://www.neonickel.com/cs/alloys/slitiny-titanu/ti-6al-4v-jakost-5/>
[vid. 7. března 2020]
- [55] <https://www.bibusmetals.cz/materialy/titan-slitiny-titanu/titan-grade-5-6al-4v/>
[vid. 7. března 2020]
- [56] <https://bbolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/nastrojove-oceli/nastrojove-oceli-rychlorezne/materialove-listy/materialovy-list-oceli-hs-6-5-2>
[vid. 7. března 2020]
- [57] <https://bbolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/nastrojove-oceli/nastrojove-oceli-rychlorezne/prehled-rychloreznych-nastrojovych-oceli>
[vid. 7. března 2020]
- [58] <http://www.tumlikovo.cz/rychlorezne-nastrojove-oceli-tridy-19-jejich-slozeni-a-tepelne-zpracovani/> [vid. 8. března 2020]
- [59] <https://www.bodycote.com/cs/sluzby/tepelne-zpracovani/zihani-normalizacni-zihani/zihani-na-mekko/> [vid. 8. března 2020]
- [60] <https://www.bodycote.com/cs/sluzby/tepelne-zpracovani/zihani-ke-snizeni-pnuti/>
[vid. 8. března 2020]
- [61] <https://www.bodycote.com/cs/sluzby/tepelne-zpracovani/kaleni-popusteni-zuslechteni/popousteni/> [vid. 8. března 2020]
- [62] <https://bbolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/nastrojove-oceli/nastrojove-oceli-rychlorezne/materialove-listy/materialovy-list-oceli-hs-6-5-2-5>

[vid. 8. března 2020]

[63] https://bolzano.cz/wp-content/uploads/2020/01/listy_nastrojove_oceli_rychlomezne_nastrojove_oceli.pdf

[vid. 10. března 2020]

[64] <http://www.sonicsystems.co.uk/page/power-ultrasonics-a-guide/39/>

[vid. 10. března 2020]

[65] <https://www.emerson.com/documents/automation/branson-horn-catalog-en-us-160126.pdf> [vid. 14. března 2020]

[66] <http://www.svetdilny.cz/jak-vybrat-spravne-povlakovani-nastroje/>

[vid. 14. března 2020]

[67] https://www.acerosbohler.com/app/uploads/sites/101/2020/01/TICN_EN.pdf

[vid. 14. března 2020]

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

[vid. 15. března 2020]

[69] <http://www.sonoanalyzer.com/content/ultrasonic-horn-design-using-sonoanalyzer-basic-guide> [vid. 29. března 2020]

[70] https://www.proinex.cz/cs/blog/3_mereni-tloustky-nateru-ultrazvukem-ndt

[vid. 29. března 2020]

[71] https://www.opi.zcu.cz/download/Tepelne%20zpracovani%2009_10.pdf

[vid. 12. dubna 2020]

[72] <https://www.a-levelphysicstutor.com/wav-wave-props.php>

[vid. 20. dubna 2020]

[73] <http://toolsteel.cz/1-2376-x96crmov12/> [vid. 20. dubna 2020]

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

[vid. 20. dubna 2020]

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Postupné vlnění v řadě bodů [1].....	6
Obrázek 2 - Vznik stojatého vlnění [1]	8
Obrázek 3 - Popis stojaté vlny [21].....	9
Obrázek 4 - Schéma svařovacího procesu [27].....	11
Obrázek 5 - Schéma svařovacího zařízení [2].....	13
Obrázek 6 – Schéma podélného způsobu působení kmitů [34]	15
Obrázek 7 - Schéma torzního způsobu působení kmitů [34]	15
Obrázek 8 - Vzájemná svařitelnost plastových materiálů [28]	17
Obrázek 9 - Nýtování termoplastu, sonotroda v horní poloze [41].....	18
Obrázek 10 - Posun sonotrody do dolní polohy a vytvoření spoje [41].....	18
Obrázek 11 - Svarové plochy plastů [28].....	19
Obrázek 12 - Popis amplitudy na sinusové přímce [44]	20
Obrázek 13 - Schéma exponenciálního tvaru sonotrody s kruhovým průřezem a očekávaným rozložením napětí včetně průběhu velikosti amplitudy [7] [64]	26
Obrázek 14 - Schéma kónického tvaru sonotrody s kruhovým průřezem a očekávaným rozložením napětí včetně průběhu velikosti amplitudy [7] [64]	27
Obrázek 15 - Schéma stupňovitého tvaru sonotrody s kruhovým průřezem a očekávaným rozložením napětí včetně průběhu velikosti amplitudy [7] [64]	27
Obrázek 16 - Ukázka vstupních parametrů materiálu v programu SonoAnalyzer	30
Obrázek 17 – Displacement a jeho popis na sinusové přímce [72]	33
Obrázek 18 - Rozměry a pracovní frekvence sonotrody	35
Obrázek 19 - Dosažená frekvence 43763 Hz při režimu axial 1	35
Obrázek 20 - Důležité materiálové charakteristiky	35
Obrázek 21 - Grafické zobrazení posunutí sonotrody s poloviční vlnovou délkou $\lambda/2$	36
Obrázek 22 - Grafické zobrazení rozložení napětí v sonotrodě	36
Obrázek 23 - Rozměry a pracovní frekvence sonotrody	37
Obrázek 24 - Dosažená frekvence 38989 Hz při režimu axial 2.....	37
Obrázek 25 – Důležité materiálové charakteristiky	37
Obrázek 26 - Grafické zobrazení posunutí sonotrody s vlnovou délkou λ	38
Obrázek 27 - Grafické zobrazení rozložení napětí v sonotrodě	38
Obrázek 28 - Rozměry a pracovní frekvence sonotrody	39
Obrázek 29 – Dosažená frekvence 48482 Hz při režimu axial 1	39
Obrázek 30 - Důležité materiálové charakteristiky	39
Obrázek 31 - Grafické zobrazení posunutí sonotrody s poloviční vlnovou délkou $\lambda/2$	40
Obrázek 32 - Grafické zobrazení rozložení napětí v sonotrodě	40
Obrázek 33 – Schéma sonotrody.....	42
Obrázek 34 - Důležité materiálové charakteristiky pro provedení simulace	43
Obrázek 35 - Rozměry a pracovní frekvence sonotrody	44
Obrázek 36 - Dosažená frekvence 35018 Hz při režimu axial 2.....	44
Obrázek 37 - Grafické zobrazení posunutí sonotrody s vlnovou délkou λ	45

Obrázek 38 - Grafické zobrazení rozložení napětí v sonotrodě	45
Obrázek 39 – Rozměry a pracovní frekvence sonotrody	46
Obrázek 40 - Dosažené frekvence 35013 Hz při režimu axial 2.....	46
Obrázek 41 - Grafické zobrazení posunutí sonotrody s vlnovou délkou λ	47
Obrázek 42 - Grafické zobrazení rozložení napětí v sonotrodě	47
Obrázek 43 – Rozměry sonotrody a dosažená frekvence	48
Obrázek 44 - Dosažené frekvence 35020 Hz při režimu axial 1	48
Obrázek 45 - Grafické zobrazení posunutí sonotrody s poloviční vlnovou délkou $\lambda/2$	49
Obrázek 46 - Grafické zobrazení rozložení napětí v sonotrodě	49
Obrázek 47 - Rozměry sonotrody a dosažená frekvence	50
Obrázek 48 - Dosažená frekvence 35007 Hz při režimu axial 1	50
Obrázek 49 - Grafické zobrazení posunutí sonotrody s poloviční vlnovou délkou $\lambda/2$	51
Obrázek 50 - Grafické zobrazení rozložení napětí v sonotrodě	51
Obrázek 51 - Rozměry sonotrody a dosažená frekvence	52
Obrázek 52 - Dosažená frekvence 35020 Hz při režimu axial 1	52
Obrázek 53 - Grafické zobrazení posunutí sonotrody s poloviční vlnovou délkou $\lambda/2$	53
Obrázek 54 - Grafické zobrazení rozložení napětí v sonotrodě	53
Obrázek 55 – Rozměry a pracovní frekvence sonotrody	54
Obrázek 56 - Dosažená frekvence 35008 Hz při režimu axial 1	54
Obrázek 57 - Grafické zobrazení posunutí kónické sonotrody s poloviční vlnovou délkou $\lambda/2$	55
Obrázek 58 - Grafické zobrazení rozložení napětí v sonotrodě	55
Obrázek 59 - Důležité materiálové charakteristiky pro provedení simulace v programu SonoAnalyzer.....	56
Obrázek 60 – Rozměry sonotrody a dosažená frekvence	57
Obrázek 61 - Dosažená frekvence 35012 Hz při režimu axial 2.....	57
Obrázek 62 - Grafické zobrazení posunutí sonotrody s vlnovou délkou λ	58
Obrázek 63 - Grafické zobrazení rozložení napětí v sonotrodě	58
Obrázek 64 – Rozměry sonotrody a dosažená frekvence	59
Obrázek 65 - Dosažená frekvence 35008 Hz při režimu axial 1	59
Obrázek 66 – Grafické zobrazení posunutí sonotrody s poloviční vlnovou délkou $\lambda/2$	60
Obrázek 67 - Grafické zobrazení rozložení napětí v sonotrodě	60
Obrázek 68 - Rozměry sonotrody a dosažená frekvence	61
Obrázek 69 - Dosažená frekvence 35001 Hz při režimu axial 1	61
Obrázek 70 - Grafické zobrazení posunutí kónické sonotrody s poloviční vlnovou délkou $\lambda/2$	62
Obrázek 71 - Grafické zobrazení rozložení napětí.....	62

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Amplituda potřebná pro svařování plastových dílů pomocí ultrazvuku při pracovní frekvenci kmitání sonotrody 35000 Hz [42]	20
Tabulka 2 - Chemické složení Ferro-Titanitu WFN [hmotnostní %] [49].....	22
Tabulka 3 - Chemické složení EN AW-7075 [hm. %] [52].....	22
Tabulka 4 – Chemické složení Ti-6Al-4V [hm. %] [55]	23
Tabulka 5 - Důležité vlastnosti povlaku TiCN [67].....	28
Tabulka 6 - Tabulka důležitých hodnot materiálů pro simulaci komerčních sonotrod [9] [10]	34
Tabulka 7 - Chemické složení materiálu sonotrody [hm. %] [73]	35
Tabulka 8 - Chemické složení materiálu sonotrody [hm. %] [74]	37
Tabulka 9 - Chemické složení materiálu sonotrody [hm. %] [55]	39
Tabulka 10 – Tabulka důležitých hodnot materiálů pro simulaci [9]	41
Tabulka 11 - Chemické složení [hm. %] [11] [12]	42
Tabulka 12 - Provozní požadavek na sonotrodu	43
Tabulka 13 - Provozní požadavek na sonotrodu	56
Tabulka 14 - Shrnutí parametrů komerčních sonotrod.....	63
Tabulka 15 – Shrnutí parametrů různých variant nově navržených sonotrod z kovaných ocelí EN ISO HS6-5-2 po TZ a EN ISO HS6-5-2-5 po TZ.....	64