

Problematika ultrazvukového svařování polymerních materiálů

Bc. Martin Truhlář

Diplomová práce
2017

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin Truhlář**
Osobní číslo: **T15344**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Problematika UV svařování polymerních materiálů**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární studie na dané téma
2. Experimentální svařování ultrazvukem vzorků zvolené geometrie
3. Vyhodnocení získaných dat a statistické zpracování

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucí práce

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Libuše Sýkorová, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

2. ledna 2017

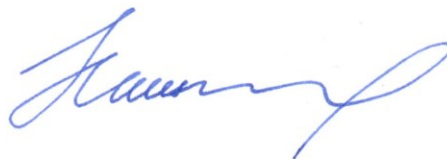
Termín odevzdání diplomové práce:

12. května 2017

Ve Zlíně dne 26. ledna 2017



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno:

Obor:

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně

.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá studiem a sledováním vlivu účinku ultrazvuku na kvalitu svařovaných polymerních materiálů. Teoretická část je všeobecně zaměřena na problematiku ultrazvuku. Vysvětluje fyzikální podstatu ultrazvuku, ultrazvukové vlnění, jednotlivé tvary a druhy vln, rychlosti a způsoby šíření ultrazvuku v různých látkách. Popisuje jevy, které jsou s ultrazvukem spojené. Je popsán princip ultrazvukového svařování a způsob vzniku svarů u plastových spojů.

V praktické, respektive experimentální části bude problematika řešena na předem vybraných zkušebních vzorcích, které byly vyrobeny vstřikováním. Nejprve bude proveden návrh či výběr přípravku pro zkušební vzorky. Následuje výběr vhodné ultrazvukové svářečky a za pomoci přípravku bude provedeno svaření jednotlivých polymerních vzorků, přičemž tyto vzorky budou svařovány ve stejných či různých materiálových kombinacích. Závěrem práce bude provedeno jejich vyhodnocení na trhacím stroji Zwick 1456, včetně FEM analýzy.

Klíčová slova: ultrazvuk, ultrazvukové svařování, ultrazvukové vlnění, vstřikování.

ABSTRACT

This thesis deals with study and monitoring the effect of ultrasonic effect on the quality of welded polymer materials. The theoretical part is generally focused on the issue of ultrasound. It explains the physical essence of ultrasound, ultrasound waves, individual shapes and types of waves, velocities and ways of spreading ultrasound in different substances. It describes the phenomena that are associated with ultrasound. The principle of ultrasonic welding and the method of welding in plastic joints are described.

In the practical and experimental part the problems will be solved on pre-selected test samples, which were made by injection molding. First, design or selection of test specimens will be done. The following is a selection of a suitable ultrasonic welding machine and the welding of the individual polymer samples will be carried out with the help of the preparation, these samples being welded in the same or different material combinations. At the end of the work, they will be evaluated on Zwick 1456, including FEM analysis.

Keywords: ultrasound, ultrasonic welding, ultrasonic waves, injection molding.

Mé poděkování patří paní doc. Ing. Libuši Sýkorové, Ph.D. za odborné vedení, rady a cenné připomínky při zpracování této práce. Poděkování dále patří firmě Herrmann Ultrazvuk s.r.o. za poskytnutí jejich zařízení a přípravku pro zpracování experimentální části a panu Ing. Janu Volejníkovi za odbornou spolupráci.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 FYZIKÁLNÍ PODSTATA ULTRAZVUKU	12
1.1 POPIS VLNY	12
1.2 TVARY A DRUHY VLN	14
1.2.1 Tvary vln	15
1.2.2 Druhy vln	15
1.3 AKUSTICKÝ TLAK.....	16
1.4 INTENZITA VLNĚNÍ	17
1.5 AKUSTICKÝ VÝKON.....	17
2 ULTRAZVUKOVÉ VLASTNOSTI PROSTŘEDÍ	18
2.1 RYCHLOST ŠÍŘENÍ VLNĚNÍ	18
2.1.1 V kapalných látkách	19
2.1.2 V plynných látkách	20
2.1.3 V pevných látkách.....	21
2.1.4 Informativní hodnoty rychlosti šíření ultrazvukových vln.....	22
2.2 VZNIK JEVŮ SPOJENÝCH S APLIKACÍ ULTRAZVUKU	22
2.2.1 Piezoelektrický jev	22
2.2.2 Dopplerův jev	23
3 TECHNOLOGIE ULTRAZVUKOVÉHO SVAŘOVÁNÍ	25
3.1 POPIS ZAŘÍZENÍ PRO UZ SVAŘOVÁNÍ.....	25
3.1.1 Typy měničů.....	26
3.2 PRINCIP METODY	27
3.3 MECHANISMUS VZNIKU SPOJE	28
3.4 TEPelné PROCESY.....	29
3.5 SVAŘOVACÍ REŽIMY	30
3.6 SVAŘOVACÍ PARAMETRY.....	30
3.7 SVAŘITELNOST MATERIÁLŮ	31
3.7.1 Svařitelnost kovů.....	31
3.7.2 Svařitelnost plastů	32
3.8 TYPY SVAROVÝCH SPOJŮ	33
3.8.1 Příprava svarových ploch.....	33
3.9 VÝHODY A NEVÝHODY ULTRAZVUKOVÉHO SVAŘOVÁNÍ	34
II PRAKTICKÁ ČÁST	35
4 CÍLE PRÁCE	36
5 VÝBĚR ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	37
5.1 FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÉ CHARAKTERISTIKY VYBRANÝCH POLYMERŮ.....	37
6 PŘÍPRAVKY PRO UZ SVAŘOVÁNÍ	39

7	POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ A NÁSTROJE	40
7.1	UZ SVÁŘEČKA HIQ DIALOG ULTRAPLAST DIGITAL 4800	40
7.2	VÝBĚR SONOTRODY	41
8	UZ SVAŘOVÁNÍ POLYMERNÍCH VZORKŮ	42
8.1	NASTAVENÉ PARAMETRY PRO UZ SVAŘOVÁNÍ	43
9	ZKOUŠKY PEVNOSTI V TAHU SVAŘENÝCH VZORKŮ	44
9.1	UNIVERZÁLNÍ ZKUŠEBNÍ STROJ ZWICK 1456.....	44
9.2	NASTAVENÉ PARAMETRY ZKOUŠKY	45
9.3	GRAF MĚŘENÍ PRO NESVAŘENÉ ZKUŠEBNÍ VZORKY	45
9.4	VÝSLEDKY MĚŘENÍ PRO SVAŘENÉ ZKUŠEBNÍ VZORKY	46
9.4.1	Výpočet hodnot	46
9.4.2	Materiály ABS + PMMA	46
9.4.3	Materiály PP+PP	48
9.4.4	Materiály PMMA + PMMA.....	49
9.4.5	Materiály ABS + ABS	51
9.4.6	Materiály PA + PA.....	52
9.4.7	Materiály LDPE(o) + LDPE(o).....	54
9.4.8	Materiály PBT + PBT	55
9.4.9	Materiály LDPE(n) + LDPE(n).....	57
10	POROVNÁNÍ A ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	59
11	FEM ANALÝZA TRHACÍ ZKOUŠKY	60
	ZÁVĚR	63
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	64
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	67
	SEZNAM OBRÁZKŮ	69
	SEZNAM TABULEK.....	71
	SEZNAM PŘÍLOH.....	72

ÚVOD

Ultrazvuková svařovací technika se za posledních dvacet let prosadila jako důležitá spojovací technologie. Tato spojovací technologie našla široké spektrum využití v několika oblastech, zejména v automobilovém průmyslu, lékařství a zdravotnictví, obalovém, textilním a potravinářském průmyslu. Pro úspěšné svařování touto spojovací metodou je však nutno pro každý spoj vyrobit příslušné přípravky a nástroje (sonotrody). Prakticky se tak jedná o jedinou nevýhodu této technologie.

Mezi největší přednosti této spojovací technologie patří vysoká svařovací rychlost, která se pohybuje v desetinách až jednotkách sekund, čistota, kompaktnost, nenáročnost na připojení, téměř žádná údržba a nevyžaduje žádný spotřební materiál, jako jsou např. pájky apod. Velkou předností je rovněž vysoká životnost nástrojů, zpravidla se jedná až o stovky tisíc svarů.

V dnešní době se tato spojovací technologie používá i ke svařování téměř veškerých kovů, plastů nebo dokonce kovů se sklem či keramikou [2].

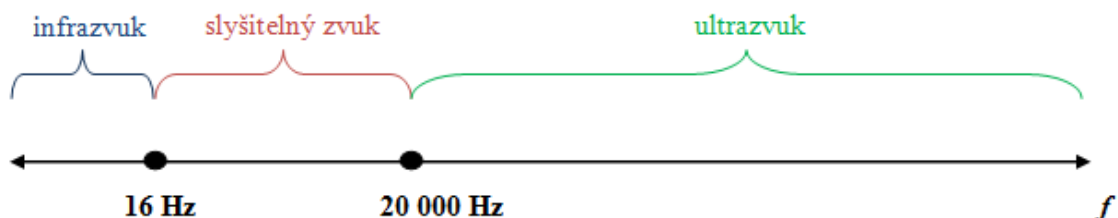
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 FYZIKÁLNÍ PODSTATA ULTRAZVUKU

Zvuk lze obecně definovat jako mechanické vlnění šířící se prostorem. Vědní obor, který se zabývá samotnou podstatou zvuku, jejím vznikem, přenosem v prostoru až po vnímání lidskými smysly se nazývá akustika.

Část zvuků bývá projevována jako slyšitelný zvuk, což je akustické vlnění, respektive kmitání pružného prostředí o frekvenci 16 Hz až 20 000 Hz, které jsou schopny vyvolávat zvukové vjemy. Definice slyšitelného zvuku je hodně individuální, málokdo je schopen vnímat celé pásmo frekvencí. Mimo tohle frekvenční pásmo zvuky nejsou slyšet, přesto jsme schopni je vnímat, a mohou mít i nepříznivé dopady na naše zdraví či psychiku.

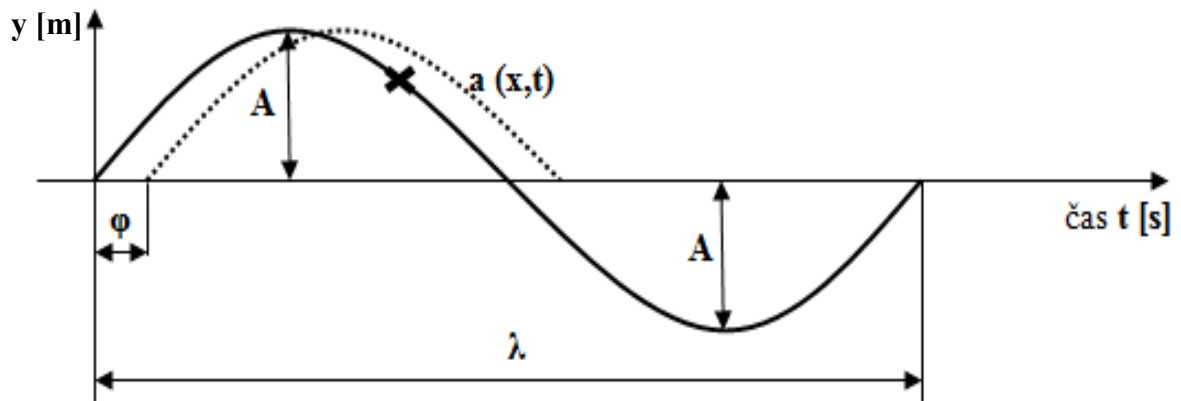
Za infrazvuk jsou považovány zvuky pod slyšitelnou hranicí menší než 16 Hz. Jedná se o velmi nízké frekvence, které lidské tělo může vnímat hmatem. Nad slyšitelnou hranicí jsou považovány zvuky vyšší než 20 000 Hz definované jako ultrazvuk [1], [2].



Obr. 1 - spektrum kmitočtů

1.1 Popis vlny

Kmitavý pohyb je fyzikální děj, kde se v závislosti na čase střídavě (periodicky) mění charakteristické veličiny jako je např.: poloha, rozměr, rychlost, tlak apod. Nejjednodušší je periodický tzv. sinusový pohyb [4].



Obr. 2 - popis parametrů vlny [2]

- λ vlnová délka [m],
 A amplituda výchylky [x],
 a okamžitá hodnota výchylky [x,t],
 φ fáze [rad].

Převrácena hodnota periody T se nazývá frekvence f , výpočet dle vztahu (1.1).

$$f = \frac{1}{T} \quad 1.1$$

- f frekvence vlnění [Hz],
 T čas, za který soustava provedla jeden kmit - perioda [s].

Vlnění pak během jednoho kmitu překoná vzdálenost nazývanou vlnová délka λ , výpočet dle vztahu níže (1.2).

$$\lambda = \frac{v}{f} = v \cdot T \quad 1.2$$

- λ vlnová délka [m],
- v rychlost šíření vlnění v prostředí [$m \cdot s^{-1}$],
- f frekvence vlnění [Hz],
- T čas, za který soustava provedla jeden kmit - perioda [s].

1.2 Tvary a druhy vln

Vlnění je jeden z nejrozšířenějších jevů a je charakterizováno šířením a přenosem energie bez přenosu hmoty. Rozděluje se na dva základní druhy:

- a) podélné, šíří se ve všech skupenstvích,
- b) příčné, šíří se pouze v pevných látkách.

Vlnění, při kterém probíhá kmitání ve směru šíření vln, se nazývá podélné nebo tzv. longitudinální. Pokud jednotlivé částice kmitají kolmo na směr šíření vln, hovoříme o příčném vlnění.

Příkladem mechanického vlnění může být např. hozený kámen na vodní hladinu, kdy po dopadu vzniknou kruhové vlny. V místě dopadu kamene na vodní hladinu se vlnění šíří ve všech směrech. V momentě, kdy vlna zasáhne plovoucí předmět na hladině např. dřevo, tak i dřevo se stane součástí kmitů - je rozkmitáno a rovněž předá pohybovou energii v podobě kmitů dál. Dřevo však není unášeno dál, setrvává stále na stejném místě. Šíření vln není spojeno s přenosem hmoty, její částice kmitají okolo své rovnovážné polohy [5].



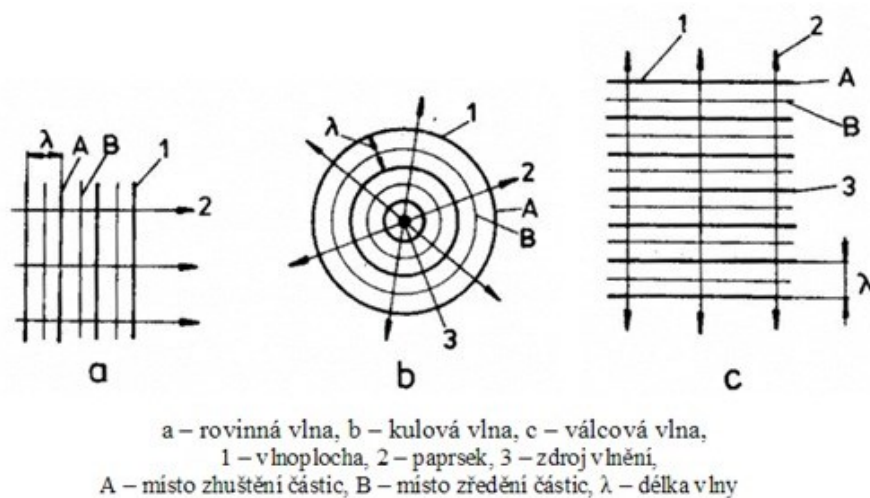
Obr. 3 - vlnění [6]

1.2.1 Tvary vln

Akustické vlny se od zdroje šíří ve formě vlnoploch. Jednotlivé tvary vln jsou odvislé od tvaru zdroje a způsobu šíření vln. Dělíme je na:

- a) rovinné,
- b) válcové,
- c) kulové.

Jednotlivé směry, kterými je vlnění šířeno, se nazývají paprsky. Částice pak vytvářejí vlnoplochy kmitající ve stejné fázi [1].



Obr. 4 - jednotlivé tvary vln [1]

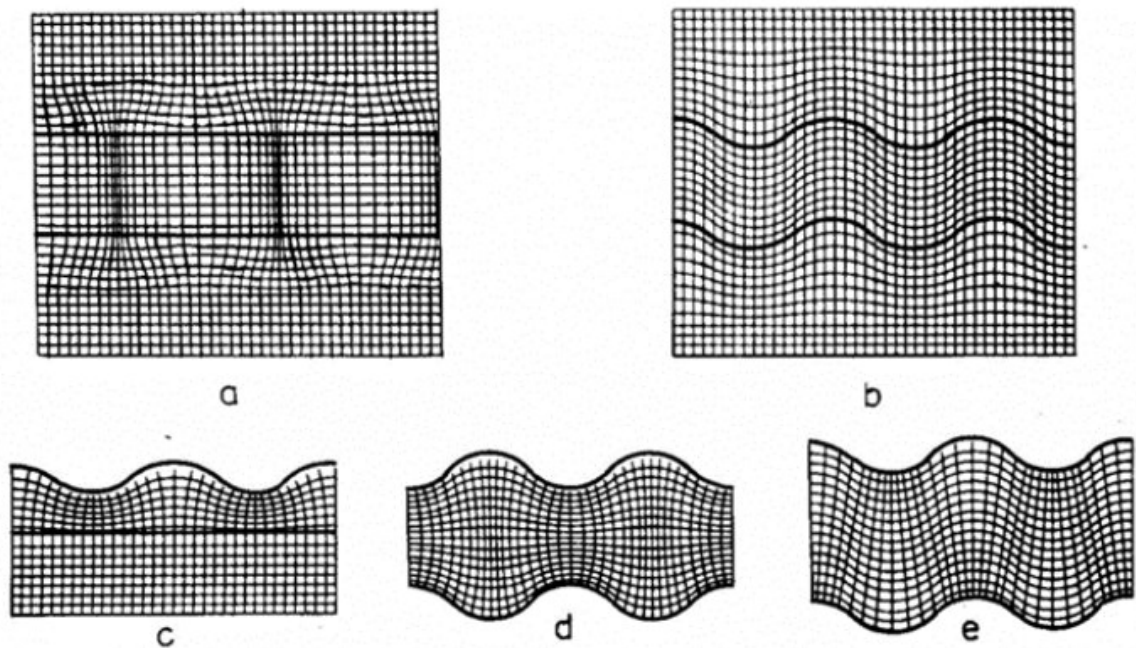
1.2.2 Druhy vln

Podélné a příčné vlny (Obr. 5a, b) se šíří v ohraničeném prostředí. Využívají se při aplikaci aktivního i pasivního ultrazvuku (ultrazvukové čištění, obrábění, ultrazvuková defektoskopie a další).

Povrchové vlny (Obr. 5c) jsou považovány za zvláštní případ příčných vln, kdy pod povrchem zaniká podélná složka rychleji než příčná.

Ve dvou rozměrech ohraničeného prostředí se šíří radiální vlny (Obr. 5d), což jsou např. tyče, trubky, válce apod.

Vlny, které vyvolávají namáhání v ohybu, nazýváme jako ohybové vlny (Obr. 5e). Mohou se šířit v prostředí o jednom nebo dvou rozměrech. Jejich využití najdeme při ultrazvukovém svařování kovů a plastů [1].



Obr. 5 - jednotlivé druhy vln [1]

1.3 Akustický tlak

V důsledku šíření ultrazvukové vlny v prostředí dochází v místě polohy k malým tlakovým změnám, které jsou nazývány jako akustický tlak. Výpočet dle vztahu (1.3):

$$p_A = Z_A \cdot v = \rho \cdot c \cdot v \quad 1.3$$

p_A akustický tlak [Pa]

Z_A akustická impedance [Ω]

v akustická rychlost [$m \cdot s^{-1}$]

ρ hustota prostředí [$kg \cdot m^{-3}$]

c rychlost šíření ultrazvuku prostředím [$m \cdot s^{-1}$]

Interakci mezi ultrazvukovým vlněním a prostředím popisuje akustická impedance Z_A , která je dána součinem hustoty a rychlostí šíření zvuku v daném prostředí. Jinými slovy, označuje odpor kladený prostředím proti šíření ultrazvuku [7].

1.4 Intenzita vlnění

Vyjadřuje mohutnost šíření energie a je definována výkonem P procházející danou plochou S . Vztah je vyjádřen následovně (1.4):

$$I_A = \frac{P}{S} \quad 1.4$$

I_A intenzita vlnění [$W \cdot m^{-2}$]

P akustický výkon [W]

S plocha, kterou prochází vlnění [m^2]

Intenzita vlnění klesá se zvyšující se vzdáleností svařovaného materiálu od zdroje [7].

1.5 Akustický výkon

Jde o výkon přenášený ultrazvukovým vlněním. Vztah je definován jako podíl energie zvukových vln E_A vyzářené zdrojem dopadající na plochu za jednotku času (1.5):

$$P = \frac{dE_A}{dt} = I_A \cdot S \quad 1.5$$

P akustický výkon [W]

I_A intenzita vlnění [$W \cdot m^{-2}$]

S plocha, kterou prochází vlnění [m^2]

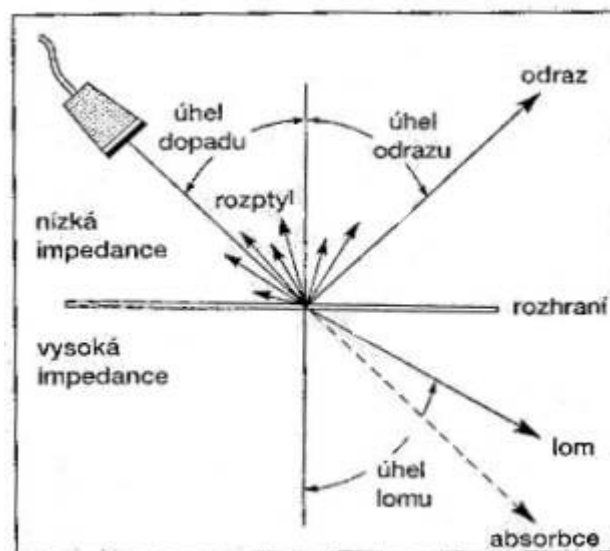
Akustický výkon není hodnota, kterou lze zachytit sluchem, je proto počítán celkový akustický tlak [7].

2 ULTRAZVUKOVÉ VLASTNOSTI PROSTŘEDÍ

Ultrazvuk má velmi vysokou frekvenci s krátkou vlnovou délkou. Každé prostředí se pak vyznačuje svými charakteristickými vlastnostmi, jako jsou např. geometrické faktory, absorpce či rychlost šíření.

Pro všechny druhy vlnění, v tomto případě i pro ultrazvuk, platí fyzikální zákony. Při šíření vlnění se může na rozhraní [5]:

- a) odrazet,
- b) rozptylovat,
- c) ohýbat (lámat),
- d) pohlcovat (absorbovat).



Obr. 6 - šíření vlnění na rozhraní [5]

2.1 Rychlost šíření vlnění

Rychlost šíření závisí na hustotě daného prostředí, ve kterém se vlnění šíří. Čím vyšší hustota prostředí bude, tím efektivnější a rychlejší bude proces přenosu kmitů vlnění. Nejrychleji se šíří v pevných látkách, kde rychlost šíření vlnění přesahuje až $4000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, nejpomaleji se šíří v plynech, v případě vzduchu $330 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [5].

2.1.1 V kapalných látkách

Vztah pro výpočet rychlosti šíření vlnění v kapalných látkách (1.6):

$$v_k = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\beta_{AD} \cdot \rho}} = \sqrt{\frac{\kappa}{\beta_{IZ} \cdot \rho}} \quad 1.6$$

v_k	rychlost šíření vlnění v kapalných látkách [$m \cdot s^{-1}$]
K	adiabatický modul objemové pružnosti [Pa]
ρ	hustota [$kg \cdot m^{-3}$]
β_{AD}	adiabatická stlačitelnost [Pa^{-1}]
β_{IZ}	izotermická stlačitelnost [Pa^{-1}]
κ	Poissonova konstanta (poměr tepla při stálém tlaku a objemu) [-]

V závislosti na okolním prostředí dochází ke změně rychlosti šíření vln. Změna rychlosti v závislosti na teplotě daného prostředí je vyjádřena vztahem (1.7):

$$v_{kt} = v_o + \gamma \cdot (t_k - t_o) \quad 1.7$$

v_{kt}	rychlost šíření vlnění v kapalných látkách v závislosti na teplotě prostředí [$m \cdot s^{-1}$]
v_o	rychlost šíření při počáteční teplotě [$m \cdot s^{-1}$]
γ	absolutní teplotní součinitel [$m \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$]
t_o	počáteční teplota kapaliny [K]
t_k	koncová teplota kapaliny [K]

Izotermický děj je závislost tlaku p při změně stavových parametrů objemu V . U adiabatického děje nedochází k tepelné výměně mezi plynem a okolím, tj. probíhá za dokonalé tepelné izolace [8], [9].

2.1.2 V plynných látkách

Vztah pro výpočet je totožný jako v případě kapalin, tedy výše uvedený vztah (1.6). Pro malé odchylky teplot a tlaku lze vyjádřit rychlost šíření jako (1.8):

$$v_p = v_o + \gamma \cdot t \quad 1.8$$

Vztah pro rychlost šíření vlnění suchého vzduchu při tlaku $p = 0,1$ MPa a teplotě t (1.9):

$$v_{pt} = v_o \cdot (1 + 1,83 \cdot 10^{-3} \cdot t) \quad 1.9$$

Se stoupajícím obsahem vodních par se téměř lineárně zvyšuje rychlost šíření vlnění a v závislosti na vlhkosti vzduchu je pak uveden vztah (1.10):

$$v_{pv} = v_o \cdot (1 + 2 \cdot 10^{-3} \cdot \varphi) \cdot (1 + 1,83 \cdot 10^{-3} \cdot t) \quad 1.10$$

v_p rychlost šíření vlnění v plynných látkách pro malé odchylky teplot a tlaku [$m \cdot s^{-1}$]

v_{pt} rychlost šíření vlnění v plynných látkách v závislosti na teplotě [$m \cdot s^{-1}$]

v_{pv} rychlost šíření vlnění v plynných látkách v závislosti na vlhkosti vzduchu [$m \cdot s^{-1}$]

v_o rychlost šíření při počáteční teplotě [$m \cdot s^{-1}$]

γ absolutní teplotní součinitel [$m \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$]

t teplota vzduchu [K]

φ relativní vlhkost, resp. proměnná vlhkost vzduchu [%]

V rámci diplomové práce by stačilo využít vzorce pro rychlost šíření ve vzduchu (1.11):

$$v_{vz} = 331,57 + 0,607 \cdot t \quad 1.11$$

v_{vz} rychlost šíření vzduchu [$m \cdot s^{-1}$]

t teplota vzduchu [K]

Absolutní teplotní součinitel vzduchu $\gamma = 0,607 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, rychlost šíření vzduchu při počáteční teplotě $v_0 = 331,57 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [8], [9].

2.1.3 V pevných látkách

V pevných látkách se mohou šířit vlny podélné, jako v případě u kapalných a plynných látek, ale také vlny příčné. Jedná se o pružný jev v materiálu a na základě *Hookeova zákona* lze odvodit vztah [8], [9].

Rychlost šíření podélného vlnění je dána vztahem (1.12):

$$v_L = \sqrt{\frac{E_P}{\rho}} \quad 1.12$$

v_L rychlost šíření podélného vlnění [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

E_P modul pružnosti v tahu [Pa]

ρ hustota prostředí [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

Pro příčné vlnění je pak definován vztah (1.13):

$$v_T = \sqrt{\frac{G_S}{\rho}} = \sqrt{\frac{E_P}{\rho} \cdot \frac{1}{2 \cdot (1 + \kappa)}} \quad 1.13$$

v_T rychlost šíření příčného vlnění [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

G_S modul pružnosti ve smyku [Pa]

κ Poissonovo číslo [-]

Poissonovo číslo κ u pevných látek vyjadřuje poměr mezi podélným prodloužením a příčným zkrácením [8], [9].

2.1.4 Informativní hodnoty rychlosti šíření ultrazvukových vln

materiál	rychlost vln [m/s]
feritická ocel	5 920
litina	3 500 až 5 600
titan	6 100
hliník	6 320
měď	4 600
polyetylén	1 950
polystyrén	2 350
nerezová ocel	5 790
ocel	5 960
olovo	1 960
silikonová pryž	948
voda	1 480 - 1 500
zinek	4 210

Tab. 1 - rychlost šíření ultrazvuku v různých látkách [10]

2.2 Vznik jevů spojených s aplikací ultrazvuku

Ultrazvuk je pro diagnostické účely využíván v řadě aplikací. Jedná se o snadno dostupnou a rozšířenou metodu s minimálním rizikem. V praxi dochází při generování ultrazvuku k několika jevům.

2.2.1 Piezoelektrický jev

Piezoelektrický jev u krystalu turmalínu byl poprvé zpozorován bratry Pierrem a Jacquesem Curieových v roce 1880, kteří při stlačení krystalu objevili výskyt povrchového elektrického náboje.

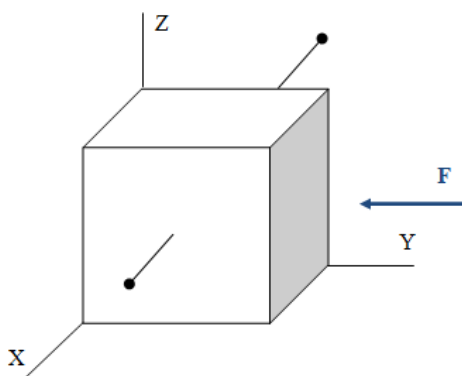
Vyskytuje se pouze u krystalů, které nejsou středově souměrné. Takový krystal je vyroben z materiálu, nejčastěji monokrystalického křemene, v jehož krystalické mřížce je destička

v příslušné orientaci tak, aby jedna část plochy byla soustředěna na kladné náboje a druhá část plochy na záporné náboje.

Zjednodušeně se dá říci, že jde o schopnost krystalu generovat elektrické náboje při jeho deformaci tj. stlačením destičky krystalu.

Níže je zobrazen element, respektive výbrus z krystalu křemene ve formě krychličky. Jednotlivé hrany jsou rovnoběžné s osami X, Y a Z. Piezoelektrický jev bude záviset na směru deformace či působení síly.

Působí-li síla F , která je současně rovnoběžná s osou Y, vzniknou elektrické náboje kolmé k ose X [11], [12].



Obr. 7 - Piezoelektrický jev působení síly F ve směru osy Y

2.2.2 Dopplerův jev

Představuje fyzikální jev, který popisuje změnu detekované frekvence vlnění pohybujícího se zdroje zvuku oproti frekvenci téhož zdroje zvuku v klidu. Příkladem může být blížící se houkající sanitka, kdy zvuk houkačky má vyšší frekvenci, než když se sanitka od nás vzdaluje [13].



Obr. 8 - příklad Dopplerova efektu - houkající sanitka [14]

Změna frekvence je pak dle vztahu (1.14):

$$f_1 = f_0 \cdot \left(1 \pm \frac{c_z}{v}\right) \quad 1.14$$

f_0 frekvence u pozorovatele, vůči kterému je zdroj v klidu [Hz]

f_1 frekvence u pozorovatele, vůči kterému se zdroj pohybuje [Hz]

c_z rychlost zdroje směrem k pozorovateli [$m \cdot s^{-1}$]

v rychlost šíření vlnění [$m \cdot s^{-1}$]

Pro přibližování zdroje směrem k pozorovateli platí vztah se znaménkem (+). V opačném případě, kdy se zdroj od pozorovatele vzdaluje, tak platí vztah se znaménkem (-) [15].

3 TECHNOLOGIE ULTRAZVUKOVÉHO SVAŘOVÁNÍ

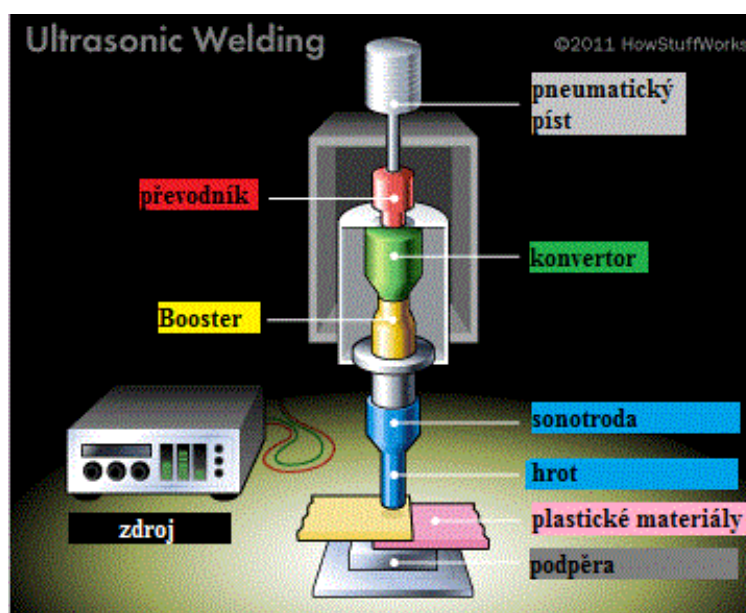
Jedná se o průmyslovou techniku, kde se způsob pevného spojení vybraných typů plastových, kovových a dalších jiných materiálů vytváří za použití kmitavé ultrazvukové energie či vysokofrekvenčního akustického chvění v místě spoje. Tato energie se třením přeměňuje na tepelnou a prakticky ihned dochází ke spojení součástí.

3.1 Popis zařízení pro UZ svařování

Zařízení se dělí podle:

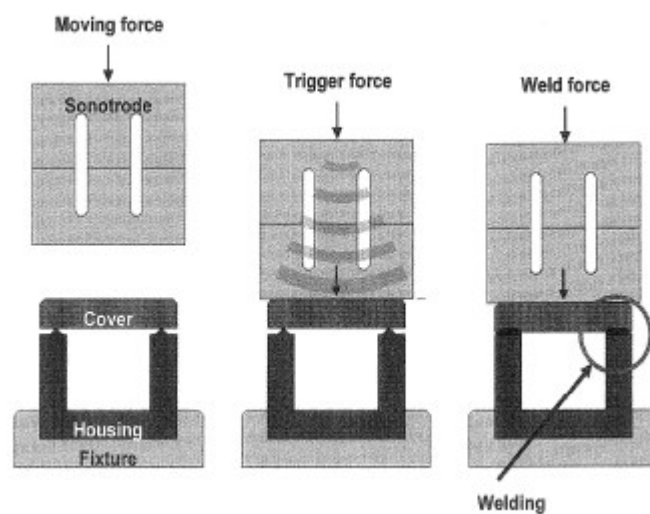
- a) **ultrazvukového měniče** - piezoelektrické nebo magnetostrikční měniče.
- b) **kmitavé soustavy** - příčné, podélné, ohybové a torzní kmity. V případě podélných kmitů nelze zvýšit výkon, je zapojen pouze jeden magnetostrikční měnič.
- c) **použití na svařování** - kovy nebo plasty.

Nástroj (sonotrodu) je třeba volit dle podstavce (přípravku) a svařované plochy tak, aby byl zajištěn co největší přísun ultrazvukové energie do místa svaru. Výkony měničů mohou být limitovány, někdy je nutno svařovací nástroje konstruovat s více měniči. Nejpoužívanější materiály pro výrobu ultrazvukových nástrojů jsou hliník (Al), dural a titan (Ti) [2], [21].



Obr. 9 - popis UZV zařízení [17]

- **pneumatický píst** je mechanické zařízení, které slouží pro převod síly stlačeného vzduchu na mechanický pohyb.
- **převodník** slouží pro měření výšky hladiny.
- **konvertor, tzv. ultrazvuková sonda** slouží k přeměně vysokofrekvenční energie na mechanické kmitání pomocí piezoelektrických měničů, které jsou v konvertoru umístěny.
- **Booster** modifikuje amplitudu vibrace.
- **sonotroda a hrot sonotrody** přenáší mechanické vibrace na spoj.



Obr. 10 - princip sonotrody

3.1.1 Typy měničů

Konvertory představují elektroakustická zařízení, která přeměňují elektrickou energii na mechanickou energii a naopak. Princip přeměny této energie závisí na typu použitého ultraakustického měniče uvnitř sondy (konvertoru) [2], [21].

- a) **mechanické** - mechanických měničů se využívá zejména pro kapaliny a plyny, kde dochází k přeměně energie přímo na ultrazvukové vlnění. Jsou výrobně i konstrukčně jednoduché, mají však omezený rozsah výkonového i frekvenčního pásma.

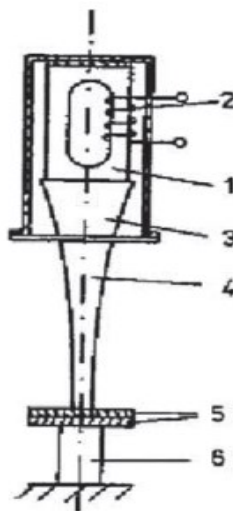
b) elektromechanické

- **piezoelektrické**, které fungují na principu Piezoelektrického jevu, viz kapitola výše 2.2 *Vznik jevů spojených s aplikací ultrazvuku*.
- **magnetostrikční**, mají malou účinnost, proto jsou využívány hlavně v oblasti ultrazvuku.
- dále jsou elektrodynamické, elektromagnetické, odporové měniče [2], [19], [21].

3.2 Princip metody

Spojení ultrazvukem je dosaženo převedením energie do vysokofrekvenčního mechanického pohybu tzv. vibrací. Tento mechanický pohyb společně se silou působící na materiál vytváří teplo v místě kontaktu. Díky tomuto teplu se daný materiál začne v kontaktním bodě tavit a vytvoří pevné molekulární spojení.

Zpravidla jde o dva svařované díly, které jsou přitlačovány k sobě. Jeden materiál je pevně fixován na podpěře a druhý materiál je rozkmitán frekvencí magnetostrikčního, popřípadě piezoelektrického měniče [2], [21].

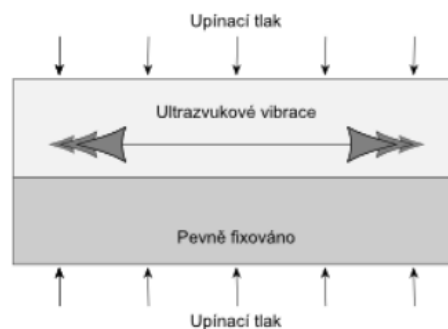


1 – magnetostrikční měnič, 2 – cívka měniče, 3 – transformátor pružných kmitů, 4 – svařovací nástroj, 5 – svařované díly, 6 – podpěra

Obr. 11 - princip UZV metody [22]

Tento měnič je s materiálem propojen vlnovodem pomocí tzv. sonotrody, která zajišťuje přenos kmitů do materiálu. Vlnovod zvyšuje výkon ultrazvukové svářečky, přesněji řečeno zvětšuje amplitudu mechanických kmitů. Zvýšená amplituda kmitu snižuje čas svařování. Velikost amplitudy kmitu je ovlivněna tzv. kritickou amplitudou, tj. amplituda kmitu, kde vzniká taková energie, že svarové plochy budou přetavené a dojde ke vzniku nekvalitního spoje. Kmitáním na rozhraní spojovaných dílů dochází ke tření i k nárůstu teploty. Dochází k plastické deformaci, která by se měla pohybovat v rozmezí 3 až 5 % z celkové tloušťky spoje, aby došlo ke kvalitnímu svarovému spoji. Následným přitlakem dojde ke vzniku svarového spoje.

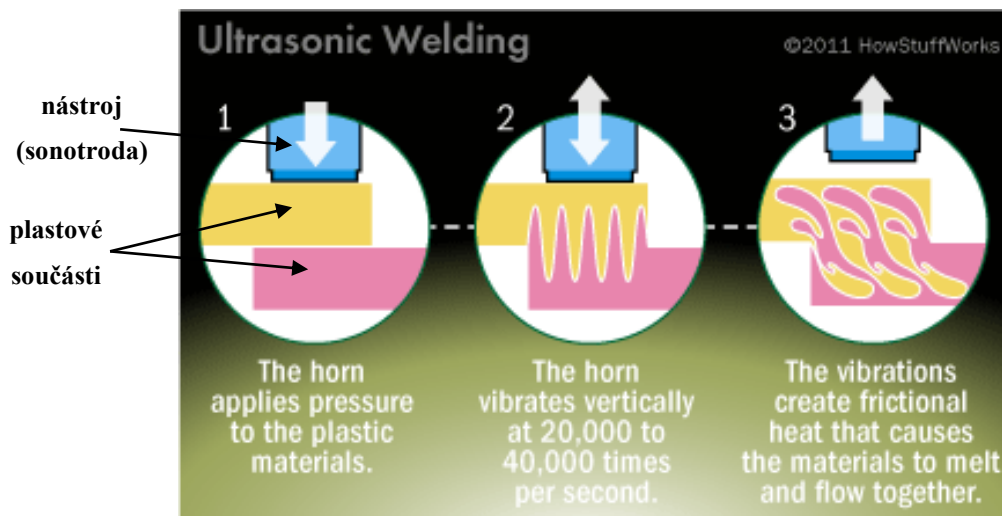
Frekvence kmitů závisí na typu vybraného ultrazvukového zařízení a pohybuje se v intervalu mezi 10 000 Hz až 100 000 Hz [2], [21].



Obr. 12 - princip UZV svařování [2]

3.3 Mechanismus vzniku spoje

Jedná se o obdobný proces jako při třecím svařování s vibracemi. Vznik spoje při ultrazvukovém svařování má stejnou podstatu vzniku spoje jako v případě u jiných druhů svařování v tuhém stavu, zásadní rozdíl je však v kinetice jednotlivých fází procesu tvorby plastového spoje [2].



Obr. 13 - vznik svaru u plastového spoje [18]

Proces tvorby plastového spoje probíhá ve třech fázích:

- 1) V první fázi je aplikován tlak na svařované plastové díly, tj. dochází ke tvorbě kontaktů mezi sonotrodou a materiálem.
- 2) V druhé fázi dochází vlivem ultrazvukových vibrací k tzv. aktivaci dotykových povrchů. Dochází k tření a nárůstu teploty.
- 3) V poslední, třetí fázi dochází k objemovým procesům. Dochází k plošné interakci spojovaných materiálů. Vznikají vazební plochy mezi spojovanými materiály. Vazební plocha se rozšíří na celou spojovanou plochu - dojde k vytvoření svarového spoje pomocí plastické deformace. Následuje ustálení teploty a v průběhu chlazení plastu udržujeme sevření, aby došlo ke správnému spojení, jedná se o tzv. přitlačný cyklus, který zlepšuje pevnost a neprodyšnost svaru. Poté se sonotroda vrací zpět do původní polohy [2], [18], [21].

3.4 Tepelné procesy

Do svařovaných materiálů je přiváděna ultrazvuková energie. V oblasti spojovacích dílů se zvyšuje teplota daných materiálů, které může výrazně ovlivnit proces tvorby spoje.

Základní zdroje tepla při svařování ultrazvukem jsou:

- a) v místě dotyku svařovacího hrotu s horním materiálem,
- b) v oblasti svařovaných materiálů.

V místě svaru je dosahováno maximálně 60% teploty tavení svařovaných dílů. Maximální teploty závisí na fyzikálních vlastnostech svařovaných materiálů, konkrétně na tepelné vodivosti a tepelné kapacitě [2].

3.5 Svařovací režimy

Ultrazvukové svařovací stroje jsou řízeny a kontrolovány počítačově nebo mikroprocesorově s možností nastavení parametrů, režimů a jejich řízení.

Svařovací režimy se dělí na dva základní způsoby:

- a) **na velké amplitudy s malou přitlačnou silou**, jejich charakteristikou jsou velké plastické deformace materiálů, rychlé nárůsty teplot v místě svaru.
- b) **na malé amplitudy s velkou přitlačnou silou**, kde je dosahováno lepší pevnosti spojů beze stop opotřebení.

Nastavením změny poměru velikosti amplitudy a přitlačné síly lze vyrobit spoje s rozdílnou strukturou, pevností a plasticitou [2].

3.6 Svařovací parametry

Základními svařovacími parametry jsou:

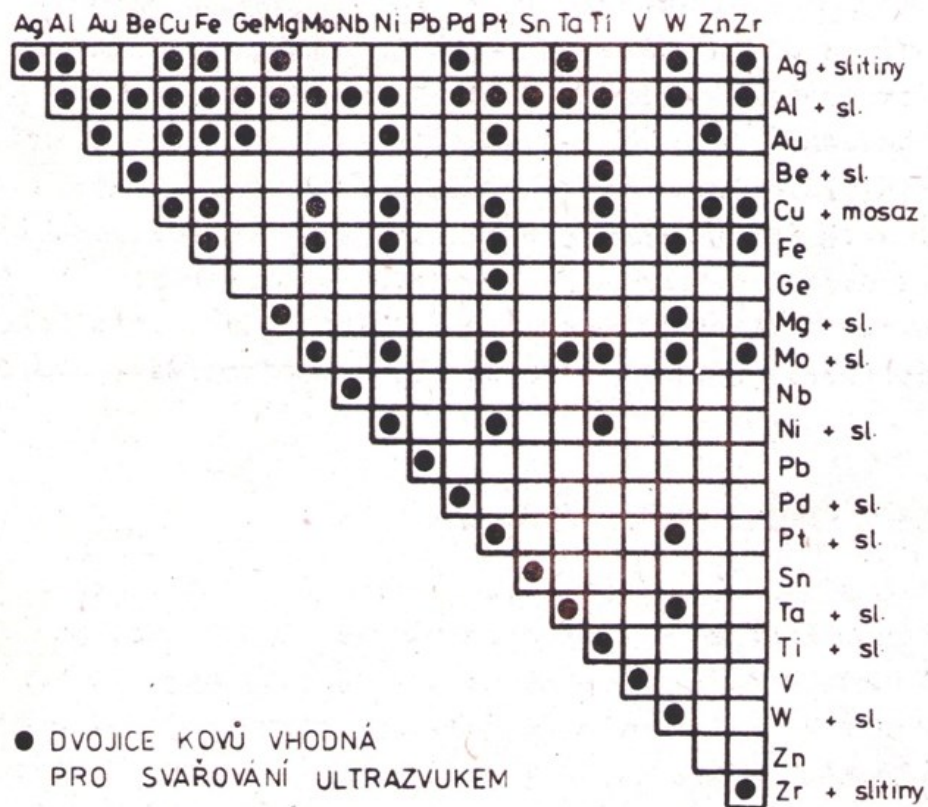
- a) **přítlačná síla působící na spoj**, zabezpečuje přenos ultrazvukových kmitů ze sonotrody na svařovaný spoj.
- b) **amplituda kmitů**, kde s postupným zvyšováním amplitudy výchylky dosahujeme vyšší pevnosti spojů.
- c) **frekvence kmitů**, při vyšší frekvenci dochází k zahřívání sonotrody, zmenšování amplitudy a zvětšují se energetické ztráty.
- d) **svařovací čas**, spolurozhoduje na pevnosti svaru. Je vhodné používat co nejkratší časy, jinak dojde k přehřátí a následnému snížení pevnosti [2].

3.7 Svařitelnost materiálů

Se špatnou svařitelností se vyznačují materiály s obsahem olova (Pb), cínu (Sn), zinku (Zn) a vanadu (V). Dva rozdílné kovy se svařují podstatně lépe než stejné. Svařují se nejčastěji materiály s velkou tepelnou vodivostí - hliník (Al), měď (Cu), s rozdílným tepelným odporem např.: mědi (Cu) a železa (Fe). Dále se svařují plastické hmoty, fólie [2].

3.7.1 Svařitelnost kovů

Svařitelnost kovů se pohybuje v tloušťkách 0,005 až 3 mm. S růstem tloušťky vzrůstá útlum mechanického vlnění. Se zvětšující se tvrdostí kovového materiálu se zhoršuje svařitelnost. Měkký materiál se svařuje lépe než tvrdší [2], [21].

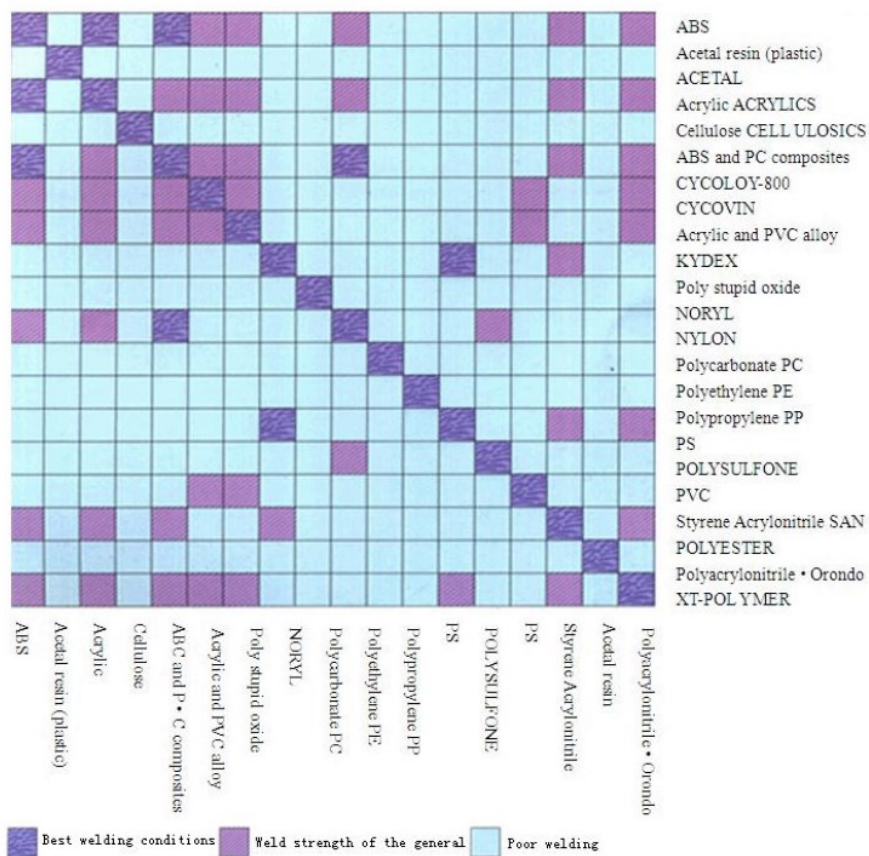


Obr. 14 - dvojice kovů vhodná pro UZV svařování [21]

3.7.2 Svařitelnost plastů

Reaktoplasty jsou polymery, které nelze svařovat, protože po zpracování jsou dále netavitelné, tudíž je nelze převést do plastického stavu. Do této skupiny patří např.: fenoplasty, polyestery, polyuretany apod.

Termoplasty jsou opakem reaktoplastů. Působením tepla měknou a následným působením chladu opět tuhnou, tudíž jsou vhodné i pro ultrazvukové svařování. U termoplastů dochází k tlumení ultrazvukových kmitů a nižší teplotě tavení. Navlhavé plasty je nutno před svařováním vysušit, jinak pevnost svarového spoje může klesnout až o 50 %. Patří zde např.: polyethylen (PE), polypropylen (PP), polyvinylchlorid (PVC), polystyren (PS) atd. [2], [21].



Obr. 15 - dvojice plastů vhodná pro UZV svařování [21]

Tabulka demonstruje dvojici plastů, které jsou doporučeny pro svařování ultrazvukem. S nejlepšími svařovacími vlastnostmi se vyznačují rámečky vyznačeny modře ■, méně pak označeny fialově ■ a nejhůře se svařují kombinace označeny světle modrým rámečkem □.

3.8 Typy svarových spojů

Svarové spoje jsou pevné, nerozebíratelné součásti, které jsou založeny na principu roztavení spojovaných součástí za působení tepla či tlaku. Spojení lze dosáhnout dvěma způsoby - tavným svařováním nebo v našem případě tlakovým svařováním.

Za optimální výsledek procesu svařování se považuje svar, jehož vlastnosti se budou co nejvíce blížit vlastnostem základního materiálu.

Svary mohou být:

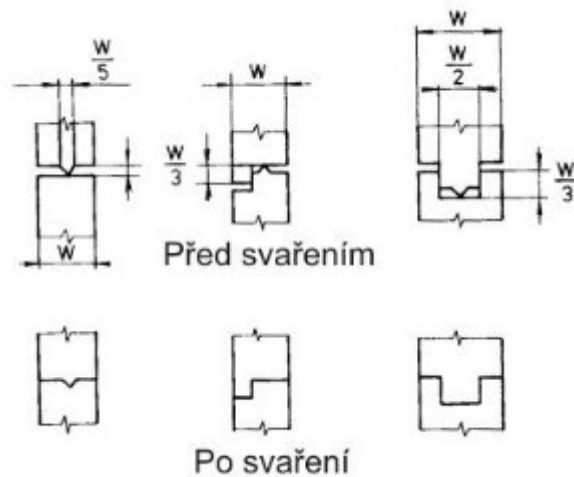
- a) **silové** - nosné svary,
- b) **spínací** - slouží pouze pro kompaktnost (bez vnějšího, respektive s mizivým zatížením),
- c) **těsnící** - zajišťují těsnost spojovaných dílů (potrubí, nádrže apod.) [2], [21].

3.8.1 Příprava svarových ploch

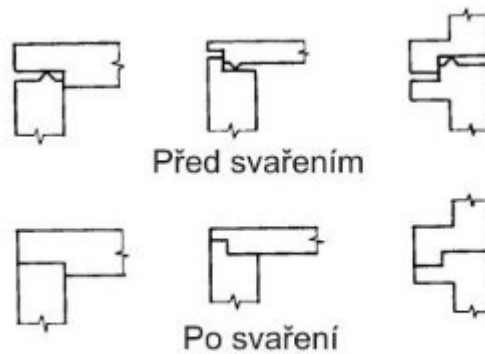
Stav povrchu na pevnost svarového spoje u svařovaných kovů je diskutabilní. Svařované kovy nevyžadují žádnou zvláštní přípravu, přesto je však doporučováno alespoň odstranit hlubší nečistoty, popř. mastnoty z povrchu svařovaných materiálů.

V případě ultrazvukového svařování plastů jsou doporučeny určité přípravy pro svarové plochy. Nepřípravené plochy výrazně ovlivňují svařovací čas, ale i kvalitu spoje. Názorným příkladem je, když se pro jeden svařovaný díl vytvoří rovná styčná plocha, a na druhé bude vytvořen klínový průřez. Těmito způsoby je dosahováno optimálního kontaktu, dochází ke zvýšení pevnosti mezi spojovanými díly a ke snížení spotřeby energie při svařování.

Níže jsou uvedeny jednotlivé přípravy styčných ploch [2], [21].



Obr. 16 - přípravy styčných ploch [2], [21]



Obr. 17 - další přípravy styčných ploch [2], [21]

3.9 Výhody a nevýhody ultrazvukového svařování

Výhodou bývá nižší tepelné ovlivnění spoje - nenastávají tedy změny vlastností materiálu, jako v případě u tavných metod svařování. Díky přípravě styčných ploch dosahujeme nízkých svařovacích časů v jednotkách sekund a vyšší pevnosti spoje, lze svařit materiály kovové s nekovovými, u plastů není potřebná čistota svarových ploch.

Nevýhodou je svařitelnost pouze malých dílů, pro každý spoj je nutno vyrobít příslušný přípravek a vybrat vhodnou sonotrodu tak, aby byl zajištěn maximální přísun kmitů do místa svaru [2], [21].

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍLE PRÁCE

Požadavkem na praktickou část této práce je svařování navržených polymerních vzorků, které budou svařovány ve stejných či různých materiálových kombinacích. Svařené spoje budou následně vyhodnoceny na trhacím stroji Zwick 1456 ve zkušební laboratoři v rámci FT UTB.

Cílem je tedy:

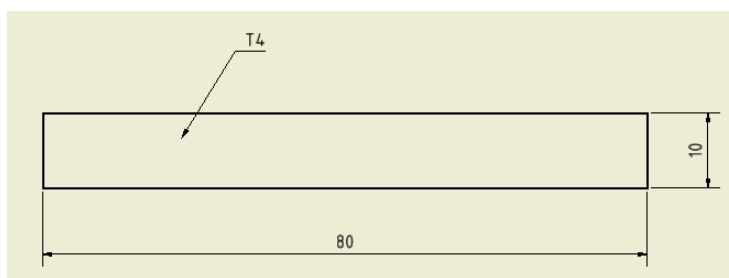
- navrhnout vhodné polymerní materiály (zkušební vzorky),
- navrhnout, respektive provést výběr vhodného přípravku pro svařování, pokud je k dispozici,
- seznámit se s ultrazvukovou svářečkou, kterou poskytla firma Herrmann Ultrazvuk s.r.o.,
- najít a nastavit vhodné parametry pro svařování polymerních materiálů,
- vyhodnotit svarové spoje na základě výsledků tahových zkoušek provedených na trhacím stroji Zwick 1456,
- provést FEM analýzu svarových spojů pomocí softwaru *Geostar*.

Výsledkem a shrnutím dosáhneme hlubšího porozumění vybraným polymerním materiálům v oblasti ultrazvukového svařování.

5 VÝBĚR ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

Pro experimentální část bylo vybráno 7 různých polymerních materiálů.

- polyamid (PA 66),
- neozářený a ozářený polyethylen (LDPE),
- polymetylmetakrylát (PMMA),
- polybutadientereftalát (PBT),
- akrylonitrilbutadienstyren (ABS),
- polypropylen (PP).



Obr. 18 - tvar/rozměry polymerních vzorků

5.1 Fyzikálně-mechanické charakteristiky vybraných polymerů

- **Polyamid (PA)**

Patří mezi technické polymery a je nejčastěji používanou skupinou plastů díky jeho vynikajícímu poměru vlastností a ceny. Mezi hlavní vlastnosti patří např.: odolnost proti stárnutí, vysoká pevnost a tuhost, odolnost proti hoření, odolnost proti otěru či vynikající dielektrické vlastnosti. Celkově mají polyamidy malé koeficienty tření a nízké sklony k opotřebení. V průběhu času dochází ke žloutnutí díky UV záření, a proto nelze poskytnout záruku na barevnou stálost.

- **Polyethylen (LDPE)**

Přesněji *Low Density Polyethylene*, je označován jako nízkohustotní polyethylen. Je netoxický, bez zápachu s nízkou hustotou. Nejčastěji je využíván k výrobě plastových fólií, slouží pro izolaci kabelů, výrobu igelitových tašek, umělohmotných košů či přepravek apod. Polyethylen se dá snadno upravit ozářením za účelem zlepšení jeho mechanických vlastností dle potřeb.

- **Polymetylmetakrylát (PMMA)**

Mezi hlavní přednosti patří jeho tvrdost, pevnost, odolnost proti otěru, zdravotní nezávadnost, výborné optické vlastnosti, odolnost vůči povětrnostním vlivům. Dále je hořlavý, slzotvorný, má sladkou vůni a neodolává silným kyselinám.

- **Polybutadientereftalát (PBT)**

Ke klíčovým vlastnostem tohoto polymeru patří vysoká pevnost, trvalá servisní teplota, vysoká tuhost a tvrdost, nízké tření, odolnost proti otěru, rozměrová stálost a odolnost proti korozi. Je vhodný pro technické aplikace díky nízkému koeficientu tepelné roztažnosti a nízké nasákavosti vody. Typické použití tohoto polymeru je nejčastěji v automobilovém průmyslu (části spalovacích motorů, čidla, komponenty el. systémů) a elektrotechnickém průmyslu (konektory, zásuvky, vypínače).

- **Akrylonitrilbutadienstyren (ABS)**

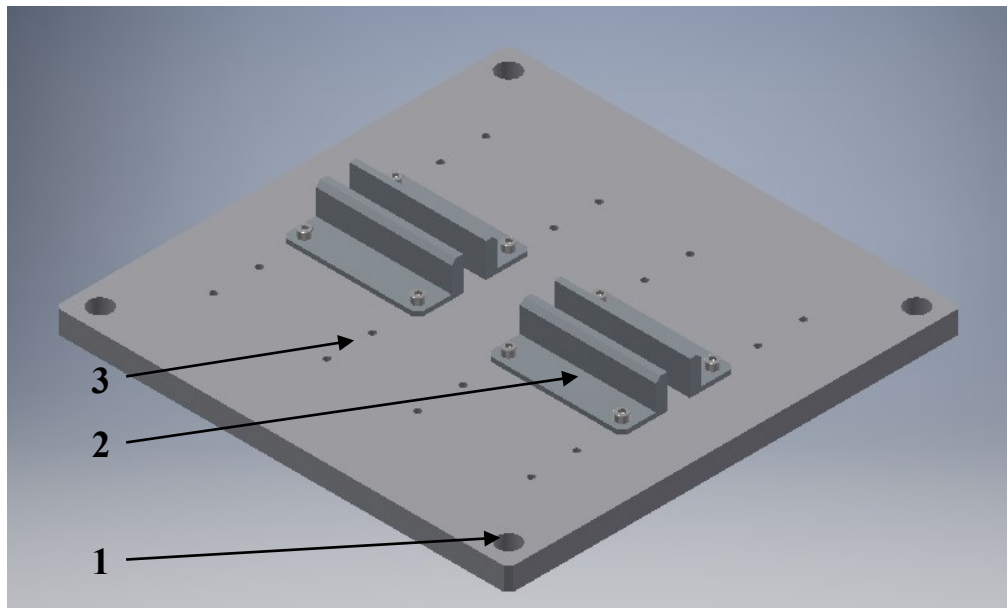
Charakteristickou vlastností je jeho tuhost, odolnost vůči kolísajícím teplotám, nízká nasákavost, hořlavý, zdravotně nezávadný. Kvůli vysoké tepelné odolnosti a zdravotní nezávadnosti je nejčastěji využíván při výrobě kojeneckých láhví, nábytku, plastových láhví, cestovních kufrů. Vyrábí se z něj i většina kostek LEGO.

- **Polypropylen (PP)**

Patří mezi nejběžnější plasty, využíván v mnoho odvětvích textilního a potravinářského průmyslu. Je odolný vůči olejům, alkoholům, rozpouštědlům. Vyniká výbornou chemickou a mechanickou odolností. Díky nízké hustotě hmotnosti je využíván k výrobě lan a provazů. Používá se také pro izolaci elektrických kabelů, zejména v tunelech.

6 PŘÍPRAVKY PRO UZ SVAŘOVÁNÍ

Přípravek pro svařování součástí byl poskytnut firmou Herrmann Ultrazvuk s.r.o. Jedná se o ocelový podstavec s předvrtanými děrami pro možnost nastavení různých opěrek, které zajišťují nehybnost součástí při svařování.



Obr. 19 - přípravek pro UZ svařování

- 1) otvory pro upnutí přípravku na podstavu stojanové UZ svářečky,
- 2) opěrky pro zajištění svařovaných součástí,
- 3) další předvrtané otvory pro možnost jiného nastavení opěrek.

7 POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ A NÁSTROJE

7.1 UZ svářečka HiQ Dialog Ultraplast digital 4800

Jedná se o stojanovou svářečku, osazenou generátorem, tlumičem, dráhovým senzorem a sestavou svařovacího ústrojí. Tato je složena z konvertoru, boosteru a sonotrody. Jednotlivé funkce uvedených prvků jsou popsány v teoretické části v kapitole 3.1 *Popis zařízení pro UZ svařování*.

Svářečka byla poskytnuta firmou Herrmann Ultrazvuk s.r.o. se sídlem v Brně.

Informace o verzi

Verze software DIALOG G4	V04.22.02 / 08
Verze firmware MCU	V03.17.06 / 93
Verze firmware DSP	V00.03.70
Verze firmware HMC	V00.00.46

Generátor

Typ	ULTRAPLAST digital 4800
Sériové číslo	100394
Rok výroby	2012-05-07
Frekvence systému	20 kHz
Jmenovitý výkon	4800 W

Stroj

Typ	HIQ DIALOG
Sériové číslo stroje	SM11.243/12
Rok výroby	2010
Připojovací hodnota	7.7 kW
Provozní napětí	400 V
Řídící napětí	24 V



Obr. 20 - popis UZ svářečky HiQ Dialog

U tohoto zařízení je generátor spojen s řídicí jednotkou a je napájen zdrojem 230V 50 Hz. Pomocí UHF kabelu je generována frekvence na 20 kHz a tato frekvence se poté přivádí na konvertor, který převádí signály vysokých frekvencí na mechanické rázy, jak již bylo zmíněno v teoretické části.

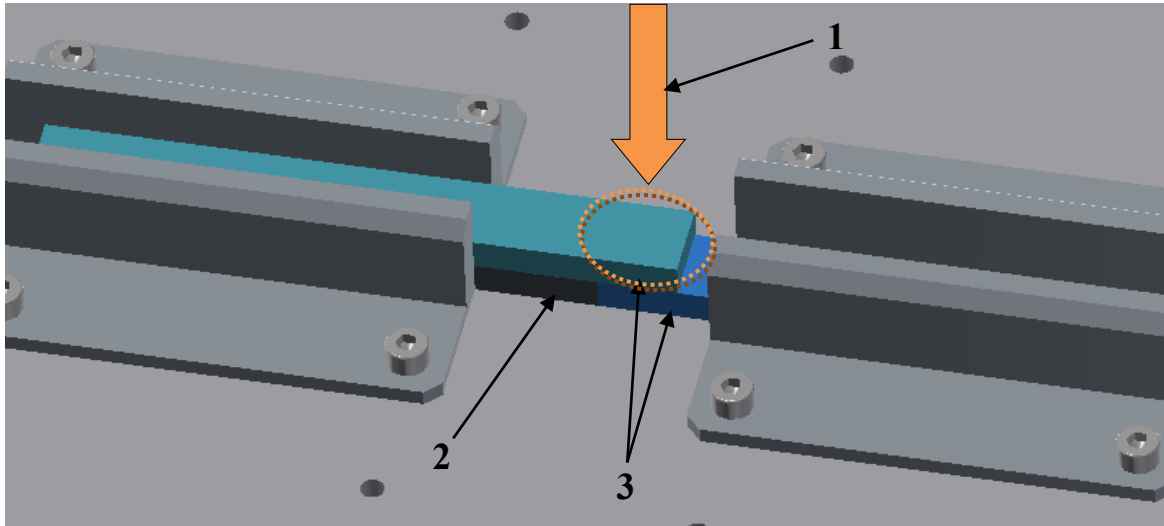
7.2 Výběr sonotrody

Výběr svařovacího přípravku (sonotrody) je jednoduchý. Jedná se o válcovou sonotrodu vyrobenou z hliníku, přičemž hrot by měl zakrývat svařovací plochu spoje tak, aby došlo k co největšímu přísunu ultrazvukové energie do místa svaru.



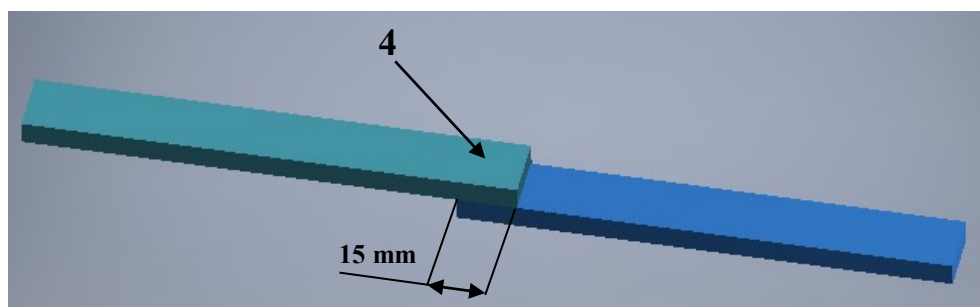
Obr. 21 - sonotroda s válcovým hrotem [23]

8 UZ SVAŘOVÁNÍ POLYMERNÍCH VZORKŮ



Obr. 22 - UZV svařování vybraných materiálů

- 1) působení válcového hrotu sonotrody na svařovaný spoj,
- 2) ocelová tyčinka, slouží jako podstavec pro horní svařovaný vzorek,
- 3) polymerní vzorky, přičemž každý je z jiného nebo stejného materiálu,
- 4) jejich přesah byl nastaven přibližně na 15 mm.



Obr. 23 - svařený spoj

Takto provedené svarové spoje se dále podrobují mechanickým zkouškám na trhacím zařízení Zwick 1456.

8.1 Nastavené parametry pro UZ svařování

Pro každou kombinaci zvolených materiálů bylo nutno předem vyzkoušet vhodné nastavení jednotlivých parametrů a ty postupně upravovat dle vizuální kontroly svařovaného spoje. Níže uvedená tabulka neuvádí přesné a doporučené hodnoty. Pouze poukazuje, s jakými parametry a kombinacemi bylo pracováno v této praktické části.

Jak již bylo zmíněno v podkapitole 3.8.1 *Příprava svarových ploch*, k zajištění lepšího molekulárního spojení je doporučováno provést přípravu svarových, respektive styčných ploch např. vybroušením klínového průřezu aspoň pro jeden vzorek. Ideální je však provedení zářezů pro oba vzorky.

V této práci pro svarové plochy nebyla provedena žádná příprava, tj. polymerní součásti byly svařovány tzv. "plocha na plochu", čímž jsou vlastnosti a pevnosti spojů částečně ovlivněny. Současně jsou tímto do určité míry ovlivněny i jednotlivé nastavené parametry, jak již bylo zmíněno v teoretické části, neupravené styčné plochy zvyšují např. svařovací čas a přítláčnou sílu.

vybrané kombinace polymerů			NASTAVENÉ PARAMETRY				DALŠÍ HODNOTY		
			amplituda [%]	přítláčná síla [F]	svařovací čas [s]	hloubka svařování [mm]	energie [J]	potřebný výkon [W]	frekvence [kHz]
1	ABS	PMMA	60	250	0,2-0,7	0,15	20-200	100-500	20
2	PP	PP							
3	PMMA	PMMA							
4	ABS	ABS							
6	PA	PA	100	300	0,2-0,9	0,12	20-250	1000-3000	
6	LDPE(o)	LDPE(o)							
7	PBT	PBT							
8	LDPE(n)	LDPE(n)							

Tab. 2 - nastavené parametry pro svařování

9 ZKOUŠKY PEVNOSTI V TAHU SVAŘENÝCH VZORKŮ

9.1 Univerzální zkušební stroj ZWICK 1456

K provedení tahových zkoušek jednotlivých vzorků byl využit univerzální zkušební stroj Zwick 1456, který je dostupný v laboratořích FT UTB. Průběh zkoušek byl zaznamenáván v softwaru *testExpert*.



Obr. 24 - zkušební stroj Zwick 1456

TECHNICKÉ PARAMETRY STROJE	
Maximální posuv příčnicku	800 mm/min
Snímač síly	2,5 - 20 kN
Teplotní komora	-80 až 250 °C
Software (možnost měření tahu, tlaku, ohybu)	testExpert

Tab. 3 - technické parametry zkušebního stroje Zwick 1456

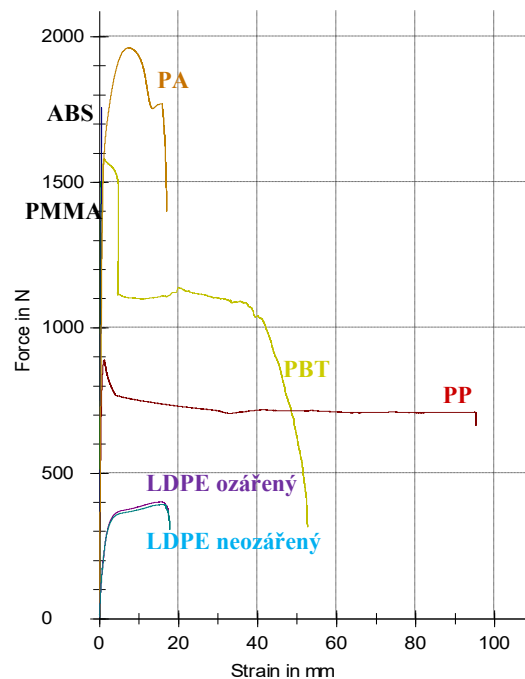
9.2 Nastavené parametry zkoušky

Zkouška tahem byla provedena dle normy ČSN EN ISO 527.

Nastavení základních parametrů pro měření:

- jednoosý tah,
- rychlost 10 mm/min,
- vzdálenost upínacích čelistí 30 mm.

9.3 Graf měření pro nesvařené zkušební vzorky



Obr. 25 - závislost tahové síly na prodloužení pro nesvařené vzorky

Přehled získaných hodnot výsledné síly pro přetržení (F at break).

Název materiálu	F [N]
PBT	316
PP	671
PMMA	1480
ABS	1620
PA	1400
LDPE (ozářený)	341
LDPE (neozářený)	306

Tab. 4 - výsledné hodnoty pro nesvařené vzorky

Z výše uvedených výsledků závislosti tahové síly na celkovém prodloužení je patrné, že ozářený vzorek LDPE má lepší mechanické vlastnosti než neozářený. K největšímu prodloužení došlo v případě použitého materiálu PP, kde tato hodnota dosahovala téměř 100 mm. Největší potřebná síla pro přetržení tyčinky byla zjištěna u materiálu ABS, který je křehký, současně bez výrazného prodloužení.

9.4 Výsledky měření pro svařené zkušební vzorky

9.4.1 Výpočet hodnot

Zpracování naměřených hodnot bylo provedeno v softwaru *Excel 2013*. Pro výpočet aritmetického průměru „ \bar{x} “ bylo využito funkce „=průměr“, pro výpočet směrodatné odchylky výběru „s“ pak „=smodch.výběr“, směrodatná odchylka průměru (1.15) je pak:

$$s_x = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad 1.15$$

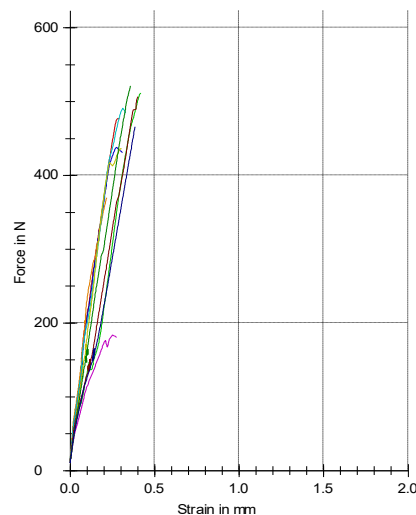
s_x směrodatná odchylka průměru [-]

s směrodatná odchylka výběru [-]

n počet naměřených hodnot [-]

Na základě vypočtených hodnot byl stanoven výsledný aritmetický průměr. Grafy dosažených hodnot jsou postupně uvedeny níže pro jednotlivé druhy použitých materiálů, včetně tabulkových výsledků.

9.4.2 Materiály ABS + PMMA



Obr. 26 - závislost tahové síly na prodloužení pro ABS+PMMA

materiály ABS + PMMA			
počet měření	F [N]	počet měření	F [N]
1	476	6	485
2	511	7	436
3	431	8	507
4	370	9	521
5	180	10	466
aritmetický průměr:	438,3		
směrodatná odchylka výběru:	101,4		
směrodatná odchylka průměru:	32,0		
výsledný průměr:	438±32		

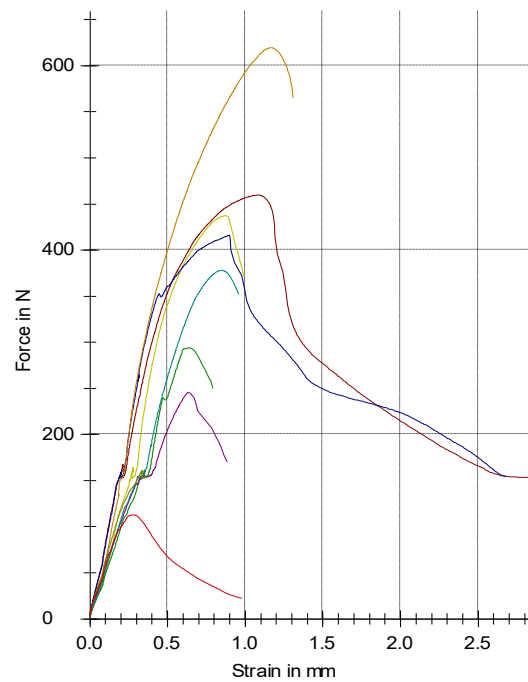
Tab. 5 - naměřené hodnoty pro ABS+PMMA



Obr. 27 - přetržený spoj ABS+PMMA

Ze získaných hodnot lze usoudit, že v případě měření č. 5 došlo pravděpodobně ke špatnému provaření spoje, nízká síla pro přetržení spoje výrazně vyčnívala z výsledků naměřených hodnot. Výše uvedený obrázek demonstruje sílu svařeného spoje, u ostatních vzorků téměř vždy došlo k ulomení až za svarovou plochou.

9.4.3 Materiály PP+PP



Obr. 28 - závislost tahové síly na prodloužení pro PP+PP

materiály PP + PP			
počet měření	F [N]	počet měření	F [N]
1	372	6	170
2	153	7	352
3	250	8	154
4	154	9	22,3
5	565	-	-
aritmetický průměr:	243,5		
směrodatná odchylka výběru:	162,1		
směrodatná odchylka průměru:	54,0		
výsledný průměr:	244±54		

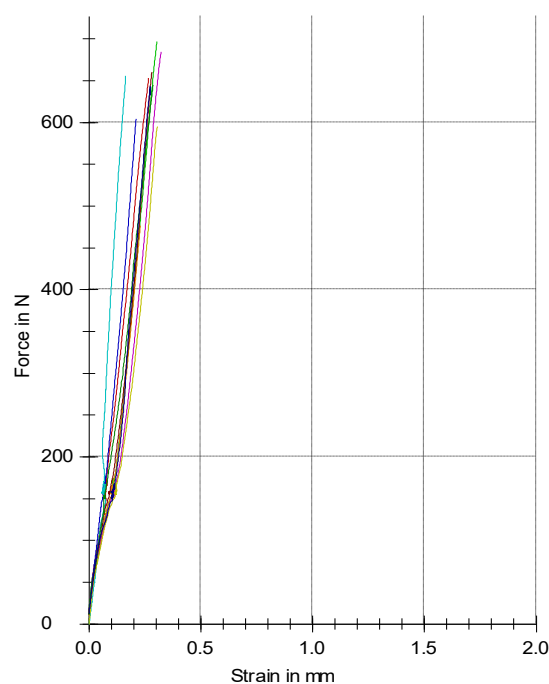
Tab. 6 - naměřené hodnoty pro PP+PP



Obr. 29 - přetržený spoj PP+PP

V tomto případě bylo k dispozici pouze 9 svařených spojů tohoto druhu materiálu. Získané hodnoty se výrazně liší. Mezi nejnižší a nejvyšší hodnotou síly při přetržení je značný rozdíl. Na obrázku lze vidět, že k přetržení tyčinky dochází zejména v místě styčných ploch, tj. v místě svaru. Svařitelnost tohoto materiálu je komplikovaná a vyžaduje přesnější nastavení podmínek při UZ svařování.

9.4.4 Materiály PMMA + PMMA



Obr. 30 - výsledky měření pro svařený spoj PMMA+PMMA

materiály PMMA + PMMA			
počet měření	F [N]	počet měření	F [N]
1	653	6	656
2	697	7	596
3	604	8	660
4	477	9	645
5	685	10	633
aritmetický průměr:	630,6		
směrodatná odchylka výběru:	62,4		
směrodatná odchylka průměru:	19,7		
výsledný průměr:	631±20		

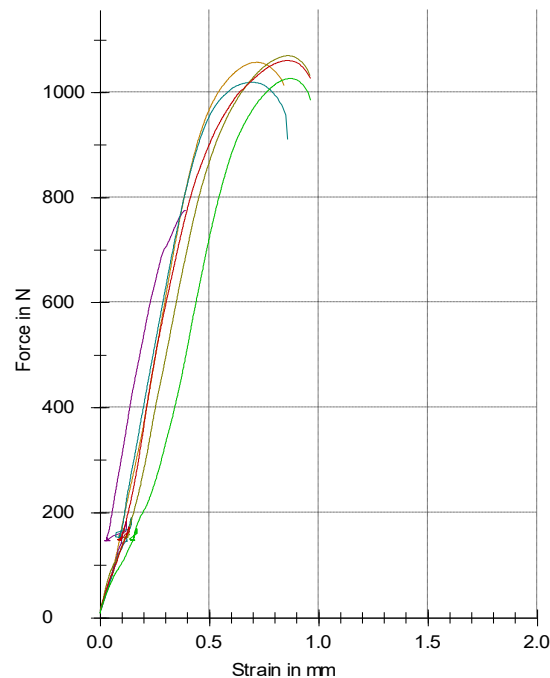
Tab. 7 - naměřené hodnoty pro PMMA+PMMA



Obr. 31 - přetržený spoj PMMA+PMMA

Naměřené síly se pohybují v určitém rozmezí, s výjimkou měření č. 4, kdy potřebná síla pro přetržení vyčnívá z ostatních naměřených hodnot. Tato hodnota mohla být způsobena např.: špatným nasazením a upevněním vzorků do svařovacího přípravku nebo nedostatečným svařovacím časem. Výše uvedený obrázek opět ukazuje sílu svarového spoje, neboť k přetržení tyčinek docházelo až za místem svaru (v těle jednoho z vzorků).

9.4.5 Materiály ABS + ABS



Obr. 32 - závislost tahové síly na prodloužení pro ABS+ABS

materiály ABS + ABS			
počet měření	F [N]	počet měření	F [N]
1	1010	6	985
2	775	-	-
3	910	-	-
4	1030	-	-
5	1030	-	-
aritmetický průměr:	956,6		
směrodatná odchylka výběru:	99,5		
směrodatná odchylka průměru:	40,6		
výsledný průměr:	957±41		

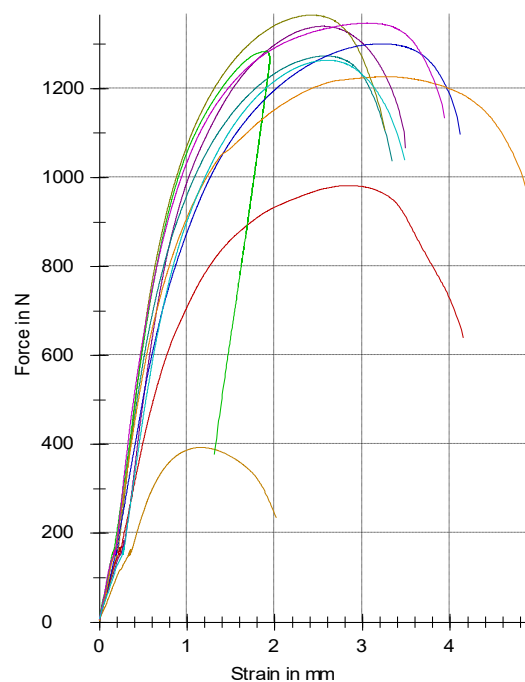
Tab. 8 - naměřené hodnoty pro ABS+ABS



Obr. 33 - přetržený spoj ABS+ABS

Než byly nalezeny vhodné parametry pro UZ svařování tohoto spoje, značná část zkušebních tyčinek byla vynaložena na testování a hledání optimálních parametrů. Proto je k dispozici pouze 6 svařených vzorků. Výrazný rozdíl se týká pouze měření č. 2, kde potřebná síla pro přetržení je zhruba o 300 N nižší. To mohlo být opět způsobeno špatným nasazením tyčinek do přípravku, respektive mechanickým porušením spoje při vyjímání vzorku z přípravku. Nízká síla mohla být způsobena také nedostatečným svařovacím časem. K lámání tyčinek docházelo opět za místem svaru, což jinak svědčí o dobré kvalitě svarového spoje.

9.4.6 Materiály PA + PA



Obr. 34 - závislost tahové síly na prodloužení pro PA+PA

materiály PA + PA			
počet měření	F [N]	počet měření	F [N]
1	234	6	377
2	1070	7	1100
3	1040	8	981
4	1110	9	1130
5	639	10	1040
aritmetický průměr:	872,1		
směrodatná odchylka výběru:	331,5		
směrodatná odchylka průměru:	104,8		
výsledný průměr:	872±105		

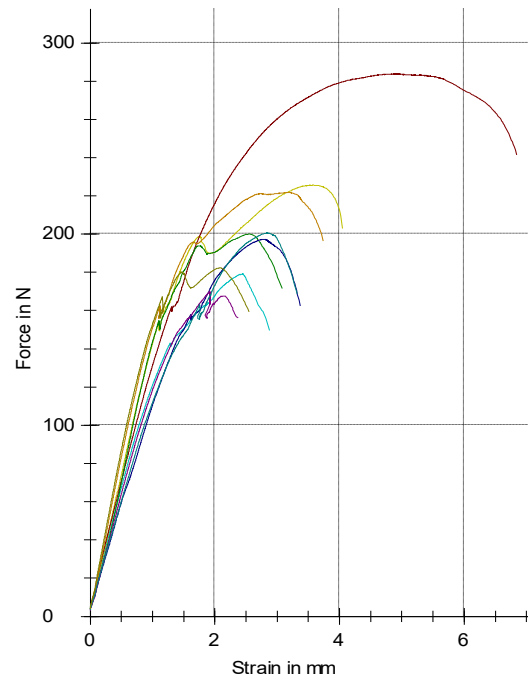
Tab. 9 - naměřené hodnoty pro PA+PA



Obr. 35 - přetržený spoj PA+PA

Měření č. 1, 5, 6 značí špatné svaření spoje, předpokládáme stejné vlivy jak byly popsány při odlišných výsledcích v předchozích případech. Ostatní naměřené hodnoty jsou srovnatelné, zde se dá předpokládat správnost svaření. Tyto výrazně odlišné hodnoty ovlivňují výpočet celkového průměru tahové síly při přetržení. Z výše uvedeného obrázku je patrné, že svarové plochy drží pevně, a k přetržení docházelo převážně za hranou svarové plochy.

9.4.7 Materiály LDPE(o) + LDPE(o)



Obr. 36 - závislost tahové síly na prodloužení pro LDPE(o)+LDPE(o)

materiály LDPE(o) + LDPE(o)			
počet měření	F [N]	počet měření	F [N]
1	150	6	196
2	203	7	156
3	241	8	169
4	171	9	159
5	162	-	-
aritmetický průměr:	178,5		
směrodatná odchylka výběru:	29,4		
směrodatná odchylka průměru:	9,8		
výsledný průměr:	179±10		

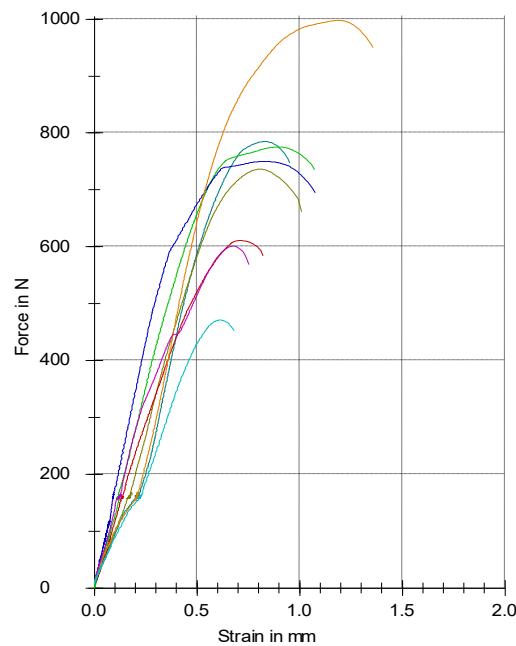
Tab. 10 - naměřené hodnoty pro LDPE(o)+LDPE(o)



Obr. 37 - přetržený spoj LDPE(o)+LDPE(o)

V úvodu této kapitoly bylo zmíněno, že ozářený LDPE vykazuje nepatrně lepší mechanické vlastnosti než neozářený. Všechny naměřené hodnoty se pohybují přibližně ve stejných hodnotách, zde se dá považovat provedení vlastního svařování za správné. Tento materiál je však obtížně svařitelný, což vyloučilo zjištění, že k přetržení docházelo v místě svaru a síly k přetržení jsou nízké.

9.4.8 Materiály PBT + PBT



Obr. 38 - závislost tahové síly na prodloužení pro PBT+PBT

materiály PBT + PBT			
počet měření	F [N]	počet měření	F [N]
1	747	6	950
2	662	7	568
3	584	8	452
4	735	-	-
5	695	-	-
aritmetický průměr:	674,1		
směrodatná odchylka výběru:	148,5		
směrodatná odchylka průměru:	52,5		
výsledný průměr:	674±53		

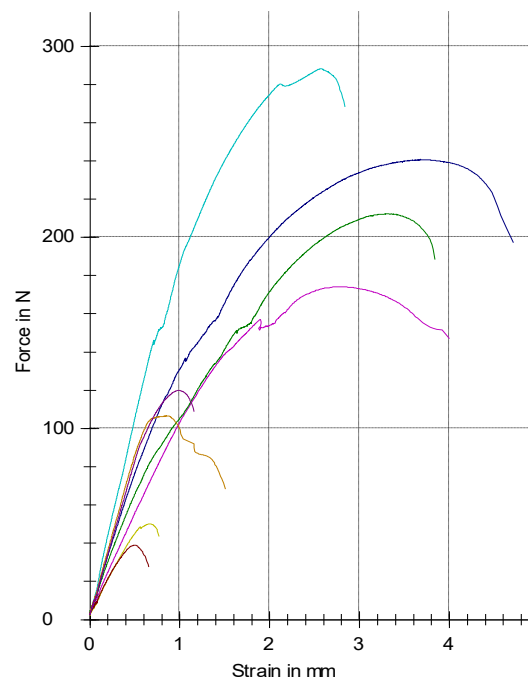
Tab. 11 - naměřené hodnoty pro PBT+PBT



Obr. 39 - přetržený spoj PBT+PBT

Naměřené hodnoty tahové síly pro přetržení jsou nepravidelné téměř ve všech měřeních. Svařitelnost tohoto materiálu je komplikovaná a vyžaduje opět přesnější zvolení a nastavení jednotlivých parametrů a podmínek při UZ svařování. Tyčinky se lámaly většinou v místě svaru, přičemž část zůstala svařená a část nesvařená nebo došlo k úplnému utržení, tj. celý svar vůbec nedržel.

9.4.9 Materiály LDPE(n) + LDPE(n)



Obr. 40 - závislost tahové síly na prodloužení pro LDPE(n)+LDPE(n)

materiály LDPE(n) + LDPE(n)			
počet měření	F [N]	počet měření	F [N]
1	147	6	197
2	268	7	68,2
3	43,5	8	109
4	27,6	-	-
5	188	-	-
aritmetický průměr:	131,0		
směrodatná odchylka výběru:	84,0		
směrodatná odchylka průměru:	29,7		
výsledný průměr:	131±30		

Tab. 12 - naměřené hodnoty pro LDPE(n)+LDPE(n)



Obr. 41 - přetržený spoj LDPE (n)+LDPE(n)

Měření č.4 vyniká ze všech ostatních hodnot, zde se opět předpokládá špatné provedení svarového spoje. Výsledek měření je obdobný jako pro ozářené LDPE, tj. špatná svařitelnost materiálu a přetržení spoje je opět v místě svaru. Vyžaduje důkladnější nastavení parametrů při UZ svařování.

10 POROVNÁNÍ A ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

materiály	výsledný průměr svařených spojů F [N]	nesvažené tyčinky F [N]
ABS + PMMA	438 ± 32	-
PP + PP	244 ± 54	671
PMMA + PMMA	631 ± 20	1480
ABS + ABS	957 ± 41	1620
PA + PA	872 ± 105	1400
LDPE(o) + LDPE(o)	179 ± 10	341
PBT + PBT	674 ± 53	316
LDPE(n) + LDPE(n)	131 ± 30	306

Tab. 13 - shrnutí naměřených hodnot

Největší pevnosti spoje bylo dosaženo při použití materiálu ABS s kombinací ABS. Z důvodů nedostatečného množství jednotlivých vzorků nebylo možné svařit další materiálové kombinace a provést přesnější a důkladnější porovnání.

V případě srovnání hodnot síly svařeného a nesvařeného materiálu PBT došlo nejspíše vlivem vnitřní vady materiálu k předčasnému přetržení tyčinky, hodnota tahové síly u prosté tyčinky by měla převyšovat hodnotu tahové síly potřebné pro přetržení svařeného spoje.

Nejdůležitějším a hlavním ovlivňujícím faktorem výsledných sil při přetržení spojů je nedostatečná příprava svarových, respektive styčných ploch. V případě vybroušení klínového průřezu se dá očekávat dosažení vyšších hodnot tahových sil pro přetržení svarových vzorků. Takto upravené plochy by následně umožnily lépe spojit a svařit i hůře svařitelné polymerní materiály, jako v případě LDPE.

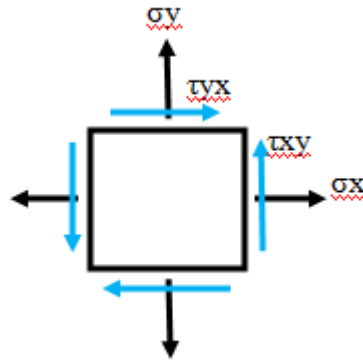
Při hledání optimálních podmínek došlo v některých případech ke špatnému svaření spojů, tak lze vysvětlit velké odchylky od aritmetického průměru.

Za další důležité ovlivňující faktory se dá považovat jednotlivé nastavení parametrů UZ stroje, tj. amplituda, přitlačná síla, hloubka svařování a čas svařování.

11 FEM ANALÝZA TRHACÍ ZKOUŠKY

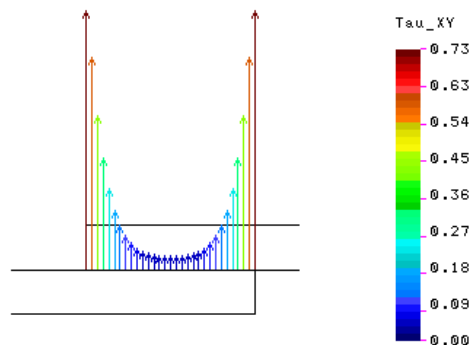
Tato analýza byla provedena na základě zadaných parametrů trhací zkoušky a daného materiálu. Pomocí počítačové simulace v softwaru *Geostar* byly tyto parametry převedeny do grafické podoby.

Na základě rovinné napjatosti, nazývané též jako dvouosá napjatost, byly rozděleny jednotlivé napětí působící na spoj (smyková a normálová napětí). V případě normálového napětí σ působí síly kolmo ke zkoumanému průřezu. Působí-li síla rovnoběžně se zkoumaným průřezem, hovoříme o smykovém napětí τ . Vnitřní síly v průřezech vzorků leží v rovině střednice, ve směru kolmém jsou tak složky napjatosti nulové [24].

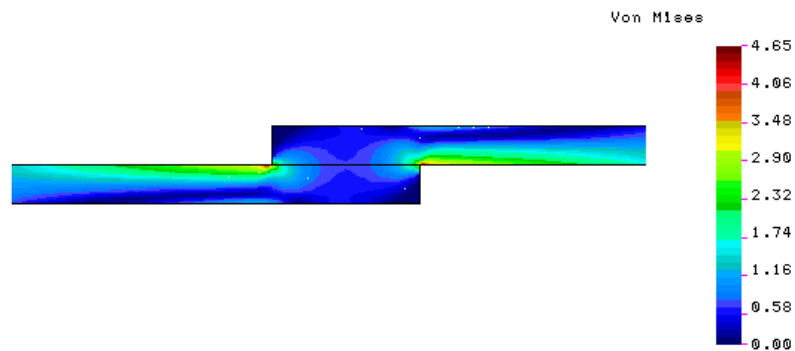


Obr. 42 - dvouosá napjatost 2D

Bylo provedeno předdimenzování svařeného spoje. Na obrázcích níže vidíme, že v místě vrubu, tj. za hranou svařeného spoje docházelo ke zvýšení napětí. Pokud je spoj dobře svařený, tak by měl praskat právě v těchto vrubech.



Obr. 43 - smykové napětí při tahové zkoušce - přesah 15 mm



Obr. 44 - von Misesovo srovnávací napětí při zatížení spoje v tahu - přesah 15 mm

Von Misesovo napětí srovnává napjatosti na základě hodnoty měrné energie části napjatosti potřebné na změnu tvaru [24].

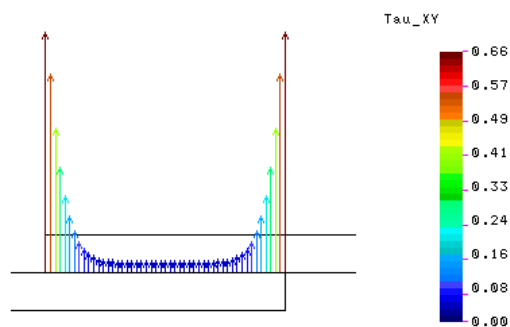
Pro rovinnou napjatost je srovnávací von Misesovo napětí pak (1.16):

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2} \quad 1.16$$

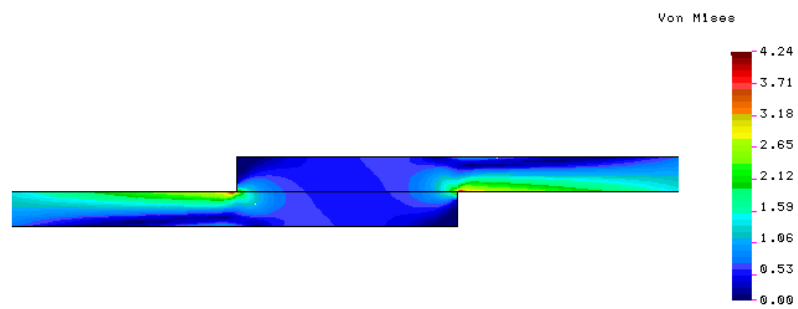
Pro čistý smyk $\sigma_1 = \tau$, $\sigma_2 = -\tau$, pak (1.17):

$$\sigma_s = \sqrt{3\tau^2} \quad 1.17$$

Dále byly provedeny analýzy svařeného spoje pro různé přesahy (25 mm, 50 mm).

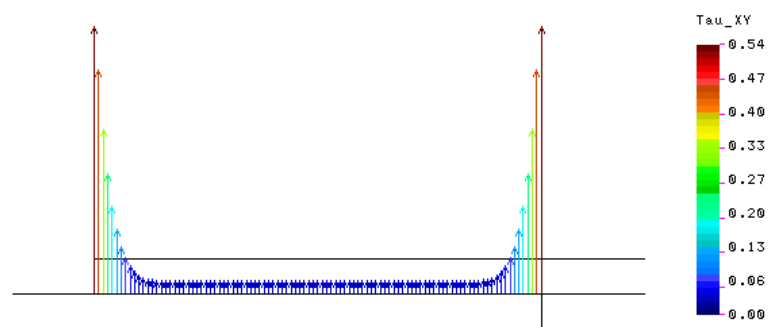


Obr. 45 - smykové napětí při tahové zkoušce - přesah 25 mm



Obr. 46 - von Misesovo srovnávací napětí při zatížení spoje v tahu - přesah 25 mm

Se zvětšujícím přesahem svařovaného spoje dochází k poklesu smykového napětí a von Misesova napětí.



Obr. 47 - smykové napětí při tahové zkoušce - přesah 50 mm



Obr. 48 - von Misesovo srovnávací napětí při zatížení spoje v tahu - přesah 50 mm

ZÁVĚR

V teoretické části byla všeobecně rozebrána problematika ultrazvuku. Byla vysvětlena fyzikální podstata ultrazvuku, jednotlivé tvary a druhy vln, způsoby a rychlosti šíření vlnění v různých látkách. Jsou popsány jevy, které jsou s ultrazvukem spojené. Na závěr teoretické části byl vysvětlen princip ultrazvukového svařování. Je popsána ultrazvuková svářečka, jednotlivé svařovací režimy, vznik tepelných procesů a způsoby vzniku svarů u plastových spojů.

V experimentální části byl nejprve proveden výběr vhodného přípravku pro svařovací vzorky. Následovalo seznámení s vybranou stojanovou ultrazvukovou svářečkou, která byla poskytnuta firmou Herrmann s.r.o. sídlící v Brně. Na základě přípravku a svařovacích vzorků byla vybrána vhodná sonotroda, která zajistila kvalitní přísun ultrazvukové energie do místa svaru.

Před svařováním bylo nutno najít a nastavit optimální parametry pro jednotlivé vybrané polymerní součásti (vzorky), které se svařovaly ve stejných či různých materiálových kombinacích. Značná část materiálu byla spotřebována zkoumáním a hledáním optimálních podmínek tak, aby bylo dosaženo provedení kvalitního svarového spoje a nedocházelo ke snižování fyzikálních a mechanických vlastností použitých materiálů.

Svařené spoje byly trhány na zkušebním zařízení Zwick 1456 ve školních laboratořích. Byla vyhodnocována pouze jedna hodnota a to síla potřebná pro přetržení tyčinky, respektive svarového spoje.

Na základě poznatků z praktické části je doporučeno před svařováním provést přípravu svarových ploch. Svařovaný přesah nemá výrazný vliv na přetržení, pokud je spoj dobře svařen, dojde k přetržení za místem svaru. S postupně zvětšujícím se svařovaným přesahem dochází k poklesu von Misesova a smykového napětí. Doporučuje se proto dále provést zkosení hran svařovacích ploch, z důvodů snížení těchto napětí za místem svaru.

Důkladnějším hledáním optimálních parametrů při UZ svařování a připravením styčných ploch se lze přiblížit hodnotám nesvařených vzorků. I malé změny parametrů při UZ svařování dále výrazně ovlivňují celkové výsledky.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ŠVEHLA, Štefan a Zdenko Figura - Ultrazvuk v technológii. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1984, 521 s.
- [2] idoc.vsb.cz - Teorie a technologie svařování - Ultrazvukové svařování [online].
<http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-06-41.pdf>
- [3] idoc.vsb.cz - Teorie a technologie svařování - Akustika, vznik a šíření zvuku, frekvenční analýza a syntéza, sluchový vjem zvukového signálu [online].
http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly_akustika.htm
- [4] Fyzikální web, e-fyzika.cz - Vlnění [online].
<http://www.e-fyzika.cz/kapitoly/16-vlneni.pdf>
- [5] Biofyzikální web ftplf2.agarek.com, T. Zdražilová - Ultrazvuk - Diagnostické a terapeutické využití [online].
http://ftplf2.agarek.com/fyzioprak/biofyzika/semin/tercaza_uz.php
- [6] Elektronická učebnice - Fyzika - Mechanické vlnění - Mechanické vlnění na vodní hladině [online].
<https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1659>
- [7] WikiSkripta.eu - Akustika [online].
<http://www.wikiskripta.eu/index.php/Akustika>
- [8] Ústav fyziky FAST VUT, Pavel Schauer - Vybrané statě z akustiky [online].
http://fyzika.fce.vutbr.cz/doc/vyuka_schauer/vybrane_state_z_akustiky.pdf
- [9] Fakulta dopravní CVUT - Ultrazvuk v robotice [online].
<https://www.fd.cvut.cz/departament/k620/ROD/CVICENI/texty/uzvkrob.pdf>
- [10] tlakinfo.cz - Oborový portál pro vyhrazená tlaková zařízení - Nedestruktivní zkoušení - Měření tloušťky ultrazvukem [online].
<http://www.tlakinfo.cz/t.py?t=2&i=1306>
- [11] Encyklopedie fyziky, Jaroslav Reichl, Martin Všeticka - Piezoelektrický jev - vysvětlení jevu [online].
<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/419-vysvetleni-jevu>

- [12] Energetický ústav - Odbor termomechaniky a techniky prostředí - skripta Piezoelektrické snímače [online].
otp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/mereni/ka03-05.htm
- [13] Encyklopedie fyziky, Jaroslav Reichl, Martin Všeticka - Mechanické kmitání a vlnění - Dopplerův jev [online].
<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/419-vysvetleni-jevu>
- [14] i-creative.cz - Zdravotnická záchranná služba [online].
<http://www.i-creative.cz/2012/03/26/sanitky-ambulance-zachranky/>
- [15] army.cz - O vlnění - Dopplerův jev [online].
http://www.army.cz/images/id_8001_9000/8753/radar/k14.htm
- [16] army.cz - O vlnění - Dopplerův jev [online].
<http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-06-41.pdf>
- [17] HowStuffWorks Science - How Ultrasonic Welding Works - Ultrasonic Welding and Friction [online].
<http://science.howstuffworks.com/ultrasonic-welding1.htm>
<http://science.howstuffworks.com/ultrasonic-welding2.htm>
- [18] HowStuffWorks Science - How Ultrasonic Welding Works - Ultrasonic Welding Step by Step [online].
<http://science.howstuffworks.com/ultrasonic-welding2.htm>
- [19] dlabos.wz.cz - Elektroakustické měniče [online].
http://dlabos.wz.cz/en/Eletkroakusticke_menice.html
- [20] obzor.cz - Ultrazvukové svařování plastů [online].
<https://www.obzor.cz/sluzby/ostatni-sluzby/ultrazvukove-svarovani-plastu>
- [21] Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie - HSV speciální metody svařování - Svařování ultrazvukem [online].
http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__svarovani_ultrazvukem__mrna.pdf

- [22] techportal.cz - Obrázek principu svařování ultrazvukem [online].
https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrOHEn2FFltCydtrRSzIj9142qFCBcB3dohQA
- [23] hielscher.com - Hielscher - Ultrasound Technology [online].
https://www.hielscher.com/400s_p.htm
- [24] doc. Ing. Oldřich Šuba, CSc. - Mechanické chování těles, páté vydání
Univerzita Tomáše Bati 2010, 101s.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

UZ	ultrazvukové svařování
UHF	Ultra High Frequency - ultra krátké vlny
λ	vlnová délka
A	amplituda výchylky
a	okamžitá hodnota výchylky
φ	fáze
f	frekvence vlnění
f_0	frekvence u pozorovatele, vůči kterému je zdroj v klidu
f_1	frekvence u pozorovatele, vůči kterému se zdroj pohybuje
T	čas, za který provedla soustava jeden kmit - perioda
v	rychlost šíření vlnění v prostředí
p_A	akustický tlak
Z_A	akustická rychlost
ρ	hustota prostředí, látky
c	rychlost šíření ultrazvuku prostředím
c_z	rychlost zdroje směrem k pozorovateli
I_A	intenzita vlnění
P	akustický výkon
S	plocha, kterou vlnění prochází
v_k	rychlost šíření vlnění v kapalných látkách
K	adiabatický modul objemové pružnosti
β_{AD}	adiabatická stlačitelnost
β_{IZ}	izotermická stlačitelnost
κ	Poissonova konstanta

v_{kt}	rychlost šíření vlnění v kapalných látkách v závislosti na teplotě prostředí
v_o	rychlost šíření při počáteční teplotě
γ	absolutní teplotní součinitel
t_o	počáteční teplota kapaliny
t_k	koncová teplota kapaliny
t	teplota vzduchu
v_p	rychlost šíření vlnění v plynných látkách pro malé odchylky teplot a tlaku
v_{pt}	rychlost šíření vlnění v plynných látkách v závislosti na teplotě
v_{pv}	rychlost šíření vlnění v plynných látkách v závislosti na vlhkosti vzduchu
φ	relativní vlhkost, resp. proměnná vlhkost vzduchu
v_L	rychlost šíření podélného vlnění
E_p	modul pružnosti v tahu
v_T	rychlost šíření příčného vlnění
G_S	modul pružnosti ve smyku
F	síla při přetržení
\bar{x}	aritmetický průměr
s_x	směrodatná odchylka průměru
s	směrodatná odchylka výběru
n	počet naměřených hodnot
σ	normálové napětí
τ	smykové napětí
σ_s	von Misesovo napětí

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 - spektrum kmitočtů</i>	12
<i>Obr. 2 - popis parametrů vlny [2]</i>	13
<i>Obr. 3 - vlnění [6]</i>	14
<i>Obr. 4 - jednotlivé tvary vln [1]</i>	15
<i>Obr. 5 - jednotlivé druhy vln [1]</i>	16
<i>Obr. 6 - šíření vlnění na rozhraní [5]</i>	18
<i>Obr. 7 - Piezoelektrický jev působení síly F ve směru osy Y</i>	23
<i>Obr. 8 - příklad Dopplerova efektu - houkající sanitka [14]</i>	24
<i>Obr. 9 - popis UZV zařízení [17]</i>	25
<i>Obr. 10 - princip sonotrody</i>	26
<i>Obr. 11 - princip UZV metody [22]</i>	27
<i>Obr. 12 - princip UZV svařování [2]</i>	28
<i>Obr. 13 - vznik svaru u plastového spoje [18]</i>	29
<i>Obr. 14 - dvojice kovů vhodná pro UZV svařování [21]</i>	31
<i>Obr. 15 - dvojice plastů vhodná pro UZV svařování [21]</i>	32
<i>Obr. 17 - další přípravy styčných ploch [2], [21]</i>	34
<i>Obr. 16 - přípravy styčných ploch [2], [21]</i>	34
<i>Obr. 18 - tvar/rozměry polymerních vzorků</i>	37
<i>Obr. 19 - přípravek pro UZ svařování</i>	39
<i>Obr. 20 - popis UZ svářečky HiQ Dialog</i>	40
<i>Obr. 21 - sonotroda s válcovým hrotem [23]</i>	41
<i>Obr. 22 - UZV svařování vybraných materiálů</i>	42
<i>Obr. 23 - svařený spoj</i>	42
<i>Obr. 24 - zkušební stroj Zwick 1456</i>	44
<i>Obr. 25 - závislost tahové síly na prodloužení pro nesvařené vzorky</i>	45
<i>Obr. 26 - závislost tahové síly na prodloužení pro ABS+PMMA</i>	46
<i>Obr. 27 - přetržený spoj ABS+PMMA</i>	47
<i>Obr. 28 - závislost tahové síly na prodloužení pro PP+PP</i>	48
<i>Obr. 29 - přetržený spoj PP+PP</i>	49
<i>Obr. 30 - výsledky měření pro svařený spoj PMMA+PMMA</i>	49
<i>Obr. 31 - přetržený spoj PMMA+PMMA</i>	50
<i>Obr. 32 - závislost tahové síly na prodloužení pro ABS+ABS</i>	51

<i>Obr. 33 - přetržený spoj ABS+ABS</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 34 - závislost tahové síly na prodloužení pro PA+PA.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 35 - přetržený spoj PA+PA</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 36 - závislost tahové síly na prodloužení pro LDPE(o)+LDPE(o)</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 37 - přetržený spoj LDPE(o)+LDPE(o)</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 38 - závislost tahové síly na prodloužení pro PBT+PBT.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 39 - přetržený spoj PBT+PBT</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 40 - závislost tahové síly na prodloužení pro LDPE(n)+LDPE(n)</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 41 - přetržený spoj LDPE (n)+LDPE(n)</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 42 - dvouosá napjatost 2D.....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 43 - smykové napětí při tahové zkoušce - přesah 15 mm</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 44 - von Misesovo srovnávací napětí při zatížení spoje v tahu - přesah 15 mm</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 45 - smykové napětí při tahové zkoušce - přesah 25 mm</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 46 - von Misesovo srovnávací napětí při zatížení spoje v tahu - přesah 25 mm</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 47 - smykové napětí při tahové zkoušce - přesah 50 mm</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 48 - von Misesovo srovnávací napětí při zatížení spoje v tahu - přesah 50 mm</i>	<i>62</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 - rychlost šíření ultrazvuku v různých látkách [10]</i>	22
<i>Tab. 2 - nastavené parametry pro svařování</i>	43
<i>Tab. 3 - technické parametry zkušebního stroje Zwick 1456</i>	44
<i>Tab. 4 - výsledné hodnoty pro nesvařené vzorky</i>	45
<i>Tab. 5 - naměřené hodnoty pro ABS+PMMA</i>	47
<i>Tab. 6 - naměřené hodnoty pro PP+PP</i>	48
<i>Tab. 7 - naměřené hodnoty pro PMMA+PMMA</i>	50
<i>Tab. 8 - naměřené hodnoty pro ABS+ABS</i>	51
<i>Tab. 9 - naměřené hodnoty pro PA+PA</i>	53
<i>Tab. 10 - naměřené hodnoty pro LDPE(o)+LDPE(o)</i>	54
<i>Tab. 11 - naměřené hodnoty pro PBT+PBT</i>	56
<i>Tab. 12 - naměřené hodnoty pro LDPE(n)+LDPE(n)</i>	57
<i>Tab. 13 - shrnutí naměřených hodnot</i>	59

SEZNAM PŘÍLOH

viz přiložený CD/DVD disk