

Vliv typu a modifikace akrylových polymerů pro ultrazvukovou svařitelnost s konstrukčními materiály

Adam Kubita

Bakalářská práce
2018



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Adam Kubita**
Osobní číslo: **T15024**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Vliv typu a modifikace akrylových polymerů pro ultrazvukovou svařitelnost s konstrukčními materiály**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši o problematice svařování plastů:
2. Úvod do polymerních materiálů, vlastnosti, dělení
3. Akrylové polymery, výroba, vlastnosti, zpracování a použití PMMA, SAN
4. Problematika svařování plastů, rozdělení technologií a jejich popis
5. Experimentální část:
6. Vytipování vhodných typů PMMA a SAN materiálů
7. Příprava zkušebních těles plastů a jejich svařování
8. Testování připravených spojů
9. Vyhodnocení a doporučení pro praxi

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího bakalářské práce

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ladislav Fojtl, PhD.**
Ústav výrobního inženýrství

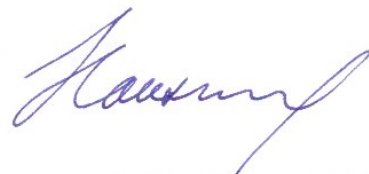
Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **18. května 2018**

Ve Zlíně dne 13. února 2018



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



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

Příjmení a jméno: KUBITA ADAM.....

Obor: PI.....

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 11.5.2018.....

.....


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 nevydávalečně 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 nahlázení 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 přihlídí k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá spojováním polymerních materiálů pomocí technologie ultrazvukového svařování. Konkrétně se zaměřuje na výzkum vlivu typu a modifikace svařovaného materiálu na pevnost spoje. Především se zaměřuje na svařování polymethylmethakrylátu (PMMA) a styren-akrylonitrilu (SAN) s konstrukčními materiály, konkrétně s vybraným materiálem akrylonitrilbutadienstyrenem (ABS). Problematika pevnosti svařovaného spoje bude řešena na zkušebním trhacím stroji, pomocí zkušebních tělísek vytvořených technologií vstřikování a následného svaření pomocí ultrazvuku.

Klíčová slova: ultrazvukové svařování, polymerní materiál, pevnost spoje

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with joining of polymeric materials using ultrasonic welding technology. Specifically, it is focused on the influence of type and modification of welded material on the strength of the joint itself. Primarily, research is focused on welding of polymethylmethacrylate (PMMA) and styrene-acrylonitrile (SAN) with construction materials, specifically with chosen acrylonitrile butadiene styrene (ABS). The bond strength of created weld joints is determined on universal testing machine, using tensile test specimens created by injection molding and subsequently connected by ultrasonic welding.

Keywords: ultrasonic welding, polymeric material, join strenght

Rád bych poděkoval vedoucímu své práce, panu Ing. Ladislavu Fojtlovi, Ph.D., za trpělivost, ochotu, vynaložený čas a cenné rady, které mi pomohly při zpracování této bakalářské práce. Rád bych také poděkoval Firmě Herrmann Ultrazvuk s.r.o. za možnost využití jejich zařízení a především panu Ing. Jiřímu Musilovi za odbornou spolupráci. Děkuji také firmě Lova spol. s r.o. za poskytnuté polymery.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 POLYMERY	12
1.1 PLASTY	12
1.1.1 Reaktoplasty	12
1.1.2 Termoplasty.....	13
1.2 ELASTOMERY	14
2 AKRYLOVÉ POLYMERY	15
2.1 POLYMETHYLMETHAKRYLÁT	15
2.1.1 Mechanické vlastnosti	15
2.1.2 Odolnost proti povětrnostním vlivům	16
2.1.3 Tepelné vlastnosti.....	16
2.1.4 Optické vlastnosti	16
2.1.5 Chemické vlastnosti	16
2.1.6 Využití	16
2.1.7 Zpracování.....	17
2.1.8 Výroba PMMA.....	17
2.2 STYREN-AKRYLONITRIL	20
2.2.1 Mechanické vlastnosti	20
2.2.2 Odolnost proti povětrnostním vlivům	20
2.2.3 Tepelné vlastnosti.....	20
2.2.4 Optické vlastnosti	21
2.2.5 Chemické vlastnosti	21
2.2.6 Využití	21
2.2.7 Zpracování.....	22
2.2.8 Výroba.....	22
3 PŘÍSADEY PŘIDÁVANÉ DO POLYMERŮ	23
3.1 TEPELNÉ STABILIZÁTORY	23
3.2 SVĚTELNÉ STABILIZÁTORY	23
3.3 BARVIVA	24
3.4 OPTICKY ZJASŇUJÍCÍ LÁTKY	24
3.5 ANTIDEGRADANTY	24
3.6 MAZIVA	24
3.7 SEPARAČNÍ ČINIDLA	24
3.8 ZMĚKČOVADLA	25
3.9 ANTISTATIKA	25
3.10 NADOUVADLA	25
3.11 RETARDÉRY HOŘENÍ.....	25
3.12 PLNIVA	26
3.13 ADHEZNÍ PROSTŘEDKY	26
4 ULTRAZVUKOVÉ SVAŘOVÁNÍ	28

4.1	TECHNOLOGIE	28
4.1.1	Plasty vhodné ke svařování ultrazvukem	29
4.1.2	Princip metody	30
4.1.3	Svařovací stroje	31
4.1.4	Svařovací přístroje	33
4.1.5	Svařovací postupy	34
4.1.6	Fáze svařování	35
4.1.7	Příprava svarových ploch	36
4.1.8	Svařovací parametry	37
II	PRAKTICKÁ ČÁST	38
5	CÍL BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	39
6	POUŽITÉ MATERIÁLY A JEJICH VLASTNOSTI	40
6.1	PLEXIGLAS 8N	41
6.2	IH830-82058-E1L	41
6.3	SAN 80HF	41
6.4	TERLURAN GP-22	41
7	PŘÍPRAVA VZORKŮ	43
7.1	NÁVRH TVARU ZKUŠEBNÍCH TĚLES	43
7.1.1	Návrh č. 1	43
7.1.2	Návrh č. 2	44
7.1.3	Návrh protikusu	45
7.2	VSTŘIKOVÁNÍ VZORKŮ	46
7.3	OBRÁBĚNÍ VZORKŮ	48
7.4	SVAŘOVÁNÍ VZORKŮ	50
8	MĚŘENÍ PEVNOSTI SVAŘENÉHO SPOJE	53
	DISKUSE VÝSLEDKŮ	57
	ZÁVĚR	59
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	60
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	62
	SEZNAM OBRÁZKŮ	64
	SEZNAM TABULEK	66
	SEZNAM PŘÍLOH	67

ÚVOD

Svařování ultrazvukem se za poslední dobu dostalo do popředí mezi svařovacími technologiemi používanými při spojování polymerů – konkrétně plastů. Pozitiva ultrazvukového svařování jsou především kvalita svarů, čistota, nenáročnost na připojení, vysoká životnost nástrojů, minimální nutná údržba zařízení. Dále není potřeba používat žádný dodatečný materiál, jako jsou pájky. Všechny uvedené výhody ale především vysoká rychlost svařování, vedou k použití této technologie v sériové výrobě.

Pro úspěšné svařování je však nutné vyrobit jednotlivé přípravky a nástroje pro každý spoj. Díky této jediné nevýhodě je nutné používat metodu ultrazvukového svařování pouze pro velké série, kde se vyplatí náklady na výrobu nástrojů.

Všechny uvedené skutečnosti vedly k tomu, že si tato spojovací technologie našla uplatnění v různých průmyslových odvětvích. Nejčastějším uživatelem je automobilový průmysl, dále farmaceutický, obalový, potravinářský průmysl, a celá série dalších.

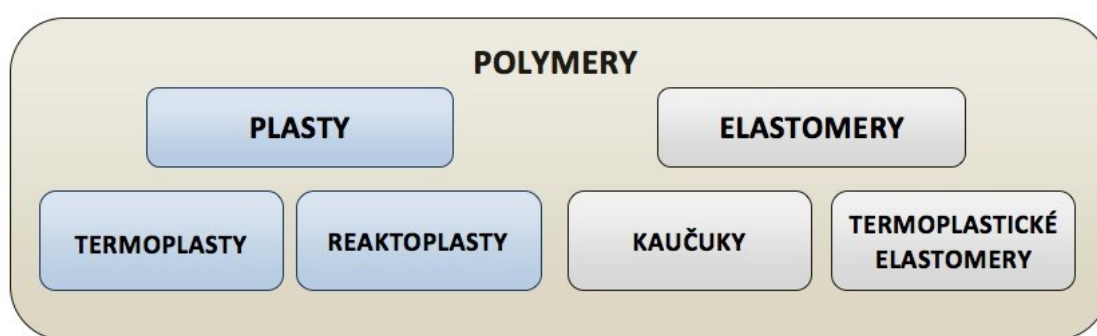
Tato experimentální část bakalářské práce se zabývá návrhem a výrobou testovacích těles, která jsou následně svařena pomocí ultrazvukového svařování plastů. Pro experiment jsou vytipovány čtyři typy polymerů a také recyklát jednoho z nich. Hlavním úkolem této práce je charakterizovat rozdíly mezi použitými polymery s ohledem na jejich svařitelnost s vybraným konstrukčním plastem (ABS). Tato charakterizace je posuzována dle optického vzhledu svaru a na základě pevnosti svarového spoje testovaného v tahu na univerzálním zkušebním stroji.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYMERY

Polymery jsou látky složené z molekul jednoho nebo více druhů atomů v řetězcových strukturách v tak velkém počtu, že přidání nebo odebrání jedné nebo několika konstitučních jednotek nezmění chemické ani fyzikální vlastnosti. Dlouhá řetězec těchto atomů může být přerušen větvením. Ve svých molekulách obsahují především atomy uhlíku, vodíku, kyslíku a často dusíku, chloru a dalších prvků. Mají obrovskou šíři vlastností. [1,5]

Polymery můžeme dělit podle několika kritérií. Základními skupinami jsou plasty a elastomery (Obr. 1). [5]



Obr. 1 Rozdělení polymerů [6]

1.1 Plasty

Plasty patří mezi uměle vytvořené organické látky. Základní látky pro výrobu plastů jsou obvykle vytvořeny z ropy nebo zemního plynu. Jsou za běžných podmínek pevné, tvrdé, často křehké. Vnější namáhání u nich způsobuje deformace trvalého charakteru. Dále je dělíme na termoplasty a reaktoplasty. [5]

1.1.1 Reaktoplasty

Reaktoplasty jsou látky, které účinkem tepla, zářením, nebo pomocí vytvrzovacího prostředku přechází z lineárního stavu do síťovaného stavu. Vytváří se prostorová síť, kterou po vytvrzení nelze vrátit zpět do původního stavu teplem ani rozpouštědly. Nelze je tedy ani svařovat. Za vysokých teplot se chemicky rozkládají. [1,5]

Mezi reaktoplasty se řadí:

- Fenoplasty
- Aminoplasty
- Epoxidy

- Polyestery
- Polyuretany [5]

1.1.2 Termoplasty

Termoplasty jsou látky složené z lineárních makromolekul s dlouhými řetězci. Řetězce mezi sebou drží pouze pomocí mezimolekulárních interakcí. S narůstající teplotou tyto interakce slábnou a termoplast se stává plastičtější. Měkne a při dalším zahřívání přechází do taveniny. [5]

Dělí se:

- Amorfní
- Semikrystalické [5]

Amorfní termoplasty mají nepravidelně uspořádané řetězce a jejich makromolekuly mají nahodilou pozici. Mezi jejich vlastnosti patří vysoká pevnost, tvrdost a křehkost. Bývají čiré nebo průhledné. Mají poměrně malé smrštění vůči formě, proto se hodí na díly, u kterých je nutná rozměrová přesnost. [5]

Semikrystalické termoplasty mají oproti amorfním určitý stupeň uspořádání. Ten se označuje jako krystalinita. Jejich vlastnosti se odvíjí od stupně krystalinity. Ve formě se smršťují více než amorfní termoplasty. [1]

Při zahřívání termoplastů jsou důležité přechodové teploty. U amorfních termoplastů jsou charakteristické teplota skelného přechodu (T_g) a teplota viskózního toku (T_f). Pod teplotou skelného přechodu se nachází plast ve stavu sklovitém. Je pevný, tvrdý. Mezi teplotou skelného přechodu a teplotou viskózního toku se nachází polymer ve stavu kaučukovitém. Získává kaučukovitou pružnost a klesá modul pružnosti. Nad teplotou viskózního toku se mění na taveninu. Nad touto teplotou se nachází oblast zpracovatelnosti amorfních termoplastů pro vstřikování, vytlačování, a další. [1,5]

U semikrystalických termoplastů se naopak hovoří o teplotě skelného přechodu (T_g) a teplotě tání (T_m). V oblasti teploty tání dochází k rozpadu krystalické struktury. Termoplast přechází z tuhého stavu do kapalného. Nad teplotou tání se nachází oblast zpracování technologiemi jako vstřikování, vytlačování apod. Teplota tání je ovlivňována velikostí makromolekul a velikostí sil působících mezi molekulami. [1,5]

1.2 Elastomery

Elastomery jsou za běžných podmínek vysoce pružné materiály s nízkou tuhostí, které můžeme i malou silou značně deformovat. Tyto deformace jsou převážně vratné. Své vlastnosti mají díky řídkému zesíťování jejich molekul. Vlivem zvýšené teploty měknou a jsou pružnější, ale nepřechází do plastického stavu. Zvýšení pružnosti za vyšších teplot jde na úkor tvrdosti, která klesá. Typickým představitelem jsou kaučuky, ze kterých při procesu vulkanizace vznikají pryže. [1,5]

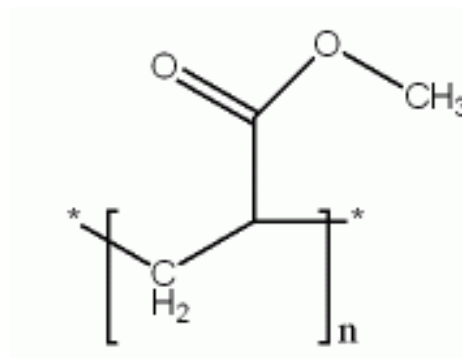
2 AKRYLOVÉ POLYMERY

2.1 Polymethylmethakrylát

Polymethylmethakrylát (PMMA) je termoplastický polymer, který se vyrábí polymerací z esterů kyseliny methakrylové. Největší význam pro výrobu má methylmethakrylát. V praxi se obvykle PMMA vyrábí blokovou nebo suspenzní polymerací. Může se však vyrábět polymerací v emulzi nebo v roztoku. [2]

Vyvinut byl roku 1928 německou společností Röhm and Haas. A do prodeje se dostal v roce 1933 v podobě bloků, desek, popřípadě tyčí. [9]

Pro PMMA se běžně také používá název plexisklo nebo akrylátové sklo. Především kvůli optickým vlastnostem může sloužit jako lehčí a levnější náhrada skla. Čistý materiál je průhledný, lesklý, tvrdý. Sumární vzorec PMMA je $(C_5O_2H_8)_n$ a strukturní vzorec je zobrazen na Obr. 2. [2,9,18]



Obr. 2 Strukturní vzorec PMMA [16]

2.1.1 Mechanické vlastnosti

Za běžných podmínek má PMMA vysokou tuhost a modul pružnosti leží v rozmezí 2300 až 3300 MPa. Zahříváním ztrácí svou tuhost a klesá modul pružnosti jako u všech termoplastů. Čím má PMMA větší molární hmotnost, tím je snižování tuhosti při zahřívání pomalejší. Mezi ostatními termoplasty PMMA nijak nevyniká svojí vrubovou houževnatostí. Má křehký charakter, který se prakticky ani se vzrůstající teplotou příliš nemění. Má malou tažnost, jen 2 – 4 %. Ve srovnání se sklem je PMMA pružnější, není tolik křehký, je ohebný, odolnost proti nárazu je přibližně šestkrát větší. Při prasknutí PMMA nevznikají ostře střepey. Kvůli nízké povrchové odolnosti je poměrně náchylný k poškrábání. Vyznačuje se jako většina plastů vysokou teplotní roztažností. [2,6,9]

2.1.2 Odolnost proti povětrnostním vlivům

Dlouhodobě odolává povětrnostním vlivům. UV záření snáší velmi dobře. Nekřehne ani nezžoutne při působení vnějších vlivů po desítky let. Povrchový lesk je stabilní po celou dobu životnosti. Je mírně hydrofilní. Navlhavost je 0,2 – 0,4 %. [2,9]

2.1.3 Tepelné vlastnosti

PMMA se řadí mezi výrobky s poměrně dobrou teplotní odolností v rámci běžných aplikací. Výrobky z PMMA lze dlouhodobě používat až do teploty 80 °C. Teplota skelného přechodu je 110 °C. Teplota měknutí se pohybuje v rozmezí 84 – 110 °C a závisí na střední molární hmotnosti. Teplota zpracování se pohybuje v rozmezí 240 – 250 °C. Je snadno zápalný a hoří svítivým plamenem. Zápalná teplota je v rozmezí 400 – 465 °C. [2,6]

2.1.4 Optické vlastnosti

PMMA má výborné optické vlastnosti. V přírodním stavu je bezbarvý, čirý. Má dokonce o něco vyšší propustnost světla než sklo. Jeho propustnost je 92 %. Při použití u tlustostěnných výrobků se opticky nezabarvuje do zelena, či do modra, tak jako sklo. Mezi plasty se v propustnosti světla drží na vrcholu. Propust světla se může držet na vysoké hodnotě i po barvení transparentními barvivy. Index lomu má hodnou 1,490. A má vynikající povrchový lesk. [2,9]

2.1.5 Chemické vlastnosti

PMMA je odolný proti slabým kyselinám, louchům, nepolárním rozpouštědlům, tukům, olejům, vodě. Není však odolný proti silným kyselinám a louchům, benzenu. V aromatických a chlorovaných uhlovodících, etherech, ketonech, esterech se rozpouští, proto s nimi nemůže být v dlouhodobém styku. [2,9]

2.1.6 Využití

Jelikož je biologicky inertní, tak ho lze využívat pro aplikace, kde je ve styku s pitnou vodou nebo potravinami. Navíc je hypoalergenní. Z těchto důvodů byl dříve hojně využíván pro výrobu kontaktních čoček. Také měl své uplatnění v zubní protetice. Ovšem v dnešní době byl nahrazen materiály s vyšší povrchovou tvrdostí. A v současnosti se používá spíše jako levnější náhrada. [6,10]

Díky jeho vlastnostem se často používá pro optické aplikace, jako čočky, zrcadla, kryty světelné. Dále se využívá pro dekorativní účely, pohledové díly, ve stavebnictví apod. [6,9,10]

2.1.7 Zpracování

Výrobky z PMMA lze běžně obrábět konvenčními technologiemi jako je řezání, broušení, vrtání, leštění. Ovšem rychlosti obrábění musíme volit tak, aby nedocházelo k vývinu vysoké teploty, při které by docházelo k tavení materiálu. [9]

Pro spojování PMMA výrobků, je možno užít svařování, nebo i lepení. Pro lepení se využívají rozpouštědlová, reaktivní, tavná a také vteřinová lepidla. Vhodné je využití lepidla reaktivního s 10 – 15 % příměsí rozpuštěného PMMA. Pro lepení se používá i samotný monomer PMMA. [2,9]

2.1.8 Výroba PMMA

Pro výrobu PMMA se používá několik metod. Jsou to především bloková a suspenzní polymerace. Tyto metody se používají nejčastěji a jsou dále popisovány podrobněji. PMMA se však dá vyrábět i roztokovou nebo emulzní polymerací. [2,4]

- **Bloková polymerace**

Je proces, kde se používá neřaděný monomer, který se polymeruje. Pro iniciaci se využívá tepla, UV záření nebo přídavku iniciátoru. Také se může použít jejich kombinace. Jedná se o zdánlivě jednoduchý proces, kde se vždy nemusí využívat přídavné látky, jako rozpouštědla, emulgátory, disperzní činidla, a další. Tím se šetří čas izolace a především díky tomu má výrobek vysokou čistotu bez příměsí nežádoucích látek z pomocných chemikálií. Předností této metody je dokonalá průhlednost a čistota skel. Také touto metodou často polymer dostává svůj konečný tvar. Obvykle se používá pro desky. [2,4]

Nejprve se připravuje předpolymer. V kotlích o objemu 100 – 1000 l se zahřívá nestabilizovaný monomer. Požadovaná teplota je 60 – 100 °C. K monomeru se přidává iniciátor v množství asi 0,1 %. Ukončení polymerace se provádí při asi 5% konverzi. Stupeň konverze se sleduje podle indexu lomu a viskozity. Poté je předpolymer zfiltrován do hliníkového zásobníku, odkud se odebírá pro další operace. [2,4]

Pro výrobu PMMA desek se nejčastěji používají formy ve tvaru dvou skleněných desek, které jsou od sebe odděleny pomocí profilu z PVC. Těsnění po obvodu musí být pružné, aby forma sledovala pohyb smrštění při polymeraci. Následně se formy umístí do stojanů, naleje

se do nich předpolymer a potom se přesunou do temperačních prostor. Tam se zvýšenou teplotou spouští polymerace. Následně vzduch, který proudí v prostoru mezi deskami, odvádí přebytečné reakční teplo. Místo vzduchu se používá také voda. Teplota polymerace bývá mezi 30 – 130 °C. Čas reakce se řídí teplotou reakce a tloušťkou desek. U této metody se jedná o diskontinuální proces a proto je tato metoda finančně i časově náročnější. [2,4]

Kvůli uvedeným nevýhodám byla vyvinuta kontinuální výroba mezi nekonečnými ocelovými pásy. Jejich šířka bývá 3 m a délka 250 m. Okraje bývají utěsněny PVC hadicí. Jednotlivé pásy jsou přesouvány po válcích. Prochází několika teplotními zónami a mezi ně se vstříkuje připravený předpolymer. Kvalita se odvíjí od povrchu ocelových desek, ale obvykle nedosahuje kvality desek vyráběných diskontinuálním způsobem. [2,4]

Při blokové polymeraci, když se dosáhne konverze okolo 25 %, dochází ke gel – efektu. Jelikož polymery špatně vedou teplo, může nastat problém s odváděním exotermního tepla ze středu materiálu. Pokud se nestihne dostatečně odvádět teplo. Může teplota monomeru překročit bod varu a tím dochází ke zpěnění materiálu. A dojde ke znehodnocení kvality výrobků. Z těchto důvodů je nutné zajistit dostatečné chlazení reakce. [2,4]

K omezení gel – efektu se využívá kopolymerace s jiným monomerem, který má menší náchylnost k tomuto jevu. V případě výroby PMMA se může využívat kopolymerace monomeru metylmetakrylátu spolu se styrenem. [2,4]

Výhody:

- vysoká čistota při diskontinuální výrobě
- kvalita
- vysoký polymerační stupeň
- výtěžek

Nevýhody:

- odvod přebytečného reakčního tepla [2,4]

- **Suspenzní polymerace**

Nazývá se také perličková nebo perlová polymerace. Tato metoda se používá hlavně pro výrobu PMMA, kde se pro další zpracování využívá technologií vstřikování nebo vytlačování při teplotách 170 až 220 °C. U této metody je zároveň nutné snažit se směřovat polymeraci tak, aby měl polymer nízkou molekulovou hmotnost. A to proto, že polymery s vysokou molekulovou hmotností se vstřikováním nebo vytlačováním zpracovávají velmi těžce. [2,4]

Při suspenzní polymeraci polymeruje monomer ve vodné disperzi. Tedy vodou nerozpustný monomer je ve formě perliček dispergován ve vodě. Rozměry rozptýlených kapiček bývá obvykle od 50 µm do 2 mm. V kapičkách je obsažen iniciátor. Kinetika polymerace je prakticky stejná s blokovou polymerací. Výhodou této metody je, že jednotlivé kapičky jsou dostatečně malé na to, aby docházelo při reakci k dostatečnému odvodu tepla. Chladicí médium je zde voda, obsažená v prostoru mezi kapičkami monomeru. Voda se přímo reakce neúčastní. A proto je nutné volit iniciátory rozpustné v polymeru, a ne ve vodě. Dále je nutné, aby se monomer nerozpouštěl ve vodném prostředí. [2,4]

Při polymeraci postupně kapalný polymer začíná tuhnout. Přejíždí přes zbotnalý polymer v monomeru, který má strukturu podobající se gelu. Až dochází do bodu, kdy se jedná o tuhý polymer, ve kterém mohou být obsaženy zbytky monomeru a nezreagovaný iniciátor. [2,4]

V určité fázi má polymer tendenci tvořit hrudky a slepovat se. Pro zabránění tohoto jevu se používají stabilizátory suspenze neboli dispergační činidla. Jejich další funkcí je zvyšování viskozity vodné fáze proto, aby mírnily rychlost probíhající reakce. [2,4]

Výhody:

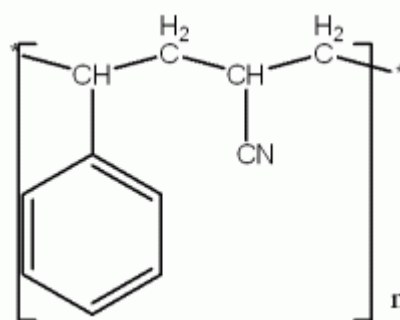
- lepší odvod tepla
- využití dalších technologií ve zpracování (vstřikování, vytlačování)
- snadná izolace polymeru

Nevýhody:

- horší optické vlastnosti
- nutnost přidání chemikálií
- výsledný polymer s obsahem stabilizátorů [2,4]

2.2 Styren-akrylonitril

Styren-akrylonitril (SAN) je kopolymer styrenu a akrylonitrilu. Používá se jako modifikace běžného polystyrenu a odstraňuje jeho některé nedostatky. Používá se kopolymer s obsahem 20 – 37 % obsahu akrylonitrilu. Ten je využíván nejčastěji. Technologie zpracování se u něho využívají vstřikování nebo vytlačování a hodí se na technické díly. Dále se využívá kopolymer s 60 – 80 % akrylonitrilu. Tento kopolymer se využívá pro výrobu obalů. Strukturální vzorec je uveden na Obr. 3. [1]



Obr. 3 Strukturální vzorec PMMA [17]

2.2.1 Mechanické vlastnosti

Jedná se o amorfní, tuhý, tvrdý, v přírodním stavu průhledný materiál. Má vyšší houževnatost než samotný polystyren. Ze všech styrenových polymerů má nejvyšší modul pružnosti. Je odolný vůči povrchovému poškrábání. Modul pružnosti lze výrazně zvýšit přidáním skleněných vláken. SAN má vyšší nasákavost oproti polystyrenu, ta je asi 0,3 %. Je propustný pro plyny, ovšem se vzrůstajícím podílem akrylonitrilu tato vlastnost klesá. [1,2,8]

2.2.2 Odolnost proti povětrnostním vlivům

Není vhodný pro dlouhodobé využívání ve venkovních podmínkách. Za působení vlivů okolního prostředí žloutne, povrch se zdrsňuje a dochází ke snižování mechanických vlastností. Pro odvrácení degradačních procesů se využívají UV-stabilizátory a další přísady. [8]

2.2.3 Tepelné vlastnosti

Pro dlouhodobé používání se horní teplotní hranice pohybuje okolo 85 °C u neplněného SAN. Při využití plniva v podobě skelných vláken se teplota horní hranice dlouhodobého použití posune na 95 °C. Krátkodobě se dá využívat i pro vyšší teploty. Při dlouhodobém

používání za nízkých teplot se spodní teplotní hranice pohybuje okolo $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Teplota skelného přechodu je $105\text{ }^{\circ}\text{C}$. [6,8]

Při hoření neukapává a spaliny mají nasládlý zápach. Má svítivý nažloutlý čadivý plamen a hoří i po odstranění zdroje hoření. [8]

2.2.4 Optické vlastnosti

SAN je transparentní, lesklý materiál, který dosahuje světelné propustnosti viditelného světla 90 %. V přírodním provedení má nádech do modra. Index lomu se pohybuje okolo 1,56 a mění se s poměrem akrylonitrilu. Pohlcuje ultrafialové záření. Má sklony ke žloutnutí. Čím vyšší je obsah akrylonitrilu, tím silnější tato náchylnost je. U tohoto materiálu se dá dobře měnit zabarvení pomocí průhledných barviv a krycích pigmentů. [2,8]

2.2.5 Chemické vlastnosti

Za všech styrenových polymerů má největší chemickou odolnost. Ta roste se vzrůstajícím poměrem akrylonitrilu. Běžně odolává:

- kyselinám (kromě oxidujících)
- louhům
- nasyceným uhlovodíkům
- tenzidům
- olejům
- benzinu [8]

Není odolný proti benzenu, ketonům, uhlovodíkům. [8]

2.2.6 Využití

Využívá se pro předměty, kde se očekává průhlednost a také rázová odolnost. Běžně se používá pro balení potravin, ve farmaceutickém průmyslu. Vyztužený SAN se používá pro zakrytování přístrojů – kryty projektorů, klimatizační zařízení v automobilech. Dále v automobilovém průmyslu pro zadní světla, pro domácí nádobí a spotřebiče. [2,6,8]

2.2.7 Zpracování

Výrobky a polotovary se vyrábí vstřikováním, vytlačováním, vyfukováním. Následně lze polotovary obrábět konvenčními technologiemi. Dají se lepit i svařovat. Lepení je problematické kvůli vysoké chemické odolnosti. Technologie svařování se používají ultrazvukové, rotační, zrcadlem natupo. Tisk na materiál je snadný. [8]

2.2.8 Výroba

Výroba polymerů pomocí suspenzní nebo emulzní polymerace není pro výrobu SAN ideální kvůli velké rozpustnosti akrylonitrilu ve vodě. Emulzní polymerace se nedá využít ani kvůli čistotě výsledného kopolymeru. [2]

Proto se využívá výroby pomocí kontinuální blokové polymerace do neúplné konverze. Využívá se zde účinku rozpouštědla – ethylmethylketon nebo ethylbenzen. Směs připravených monomerů s rozpouštědlem je nepřetržitě dávkována přes ohřívák do reaktoru. V reaktoru probíhá polymerace při 150 °C. Při dosažení požadované konverze se polymer vede do filmové odparky, kde se odstraňují nezreagovaný monomery s rozpouštědlem. Dále se polymer odvádí ze dna do granulátoru. [2]

3 PŘÍSAKY PŘIDÁVANÉ DO POLYMERŮ

Do polymerů se přidávají různé přísady pro úpravu jejich vlastností. Málo kdy se používají pouze čisté plasty bez žádných příměsí. Často upravujeme vlastnosti jako:

- Hořlavost
- Elektrické vlastnosti
- Odolnost vůči teplotám
- Nedostatečná houževnatost
- Tvrdost
- Chemická odolnost
- Optické vlastnosti [6]

Přísady nám velmi ovlivňují cenu produktů. Také nám ovlivňují vlastnosti výrobků a zpracovatelnost materiálu. [6]

3.1 Tepelné stabilizátory

Mají za úkol zpomalit tepelnou degradaci polymerů především při zpracovatelských procesech. Dále zlepšují odolnost výrobků vůči vysokým teplotám. Při nežádoucí degradaci polymerů dochází ke změně struktury zpracovávaného polymeru. Může docházet ke zkracování makromolekul. Nastává změna vlastností polymeru, která může způsobit nedostatečnou kvalitu výrobků. Dochází ke změně zbarvení polymeru. [5,6]

3.2 Světelné stabilizátory

Zpomalují degradaci polymerů způsobenou slunečním zářením. Především chrání před UV zářením, které má na polymery silný účinek. Při jeho působení vznikají volné radikály, které mohou vyvolat štěpení nebo síťování makromolekul. [5,6]

Světelné stabilizátory plní svoji funkci několika způsoby. První typ stabilizátorů absorbuje UV záření a přemění ho na tepelnou energii. Druhý typ stabilizátorů mění UV záření na záření o jiné vlnové délce. Větší vlnová délka je pro polymery neškodná. UV záření má vlnovou délku od 290 do 400 nm. A třetí typ se přidává do polymerů, aby zabránil prostupu UV záření. Příkladem mohou být saze. [5,6]

3.3 Barviva

Používají se pro dosažení požadovaného zbarvení polymeru. Mohou být buď anorganické, nebo organické. Polymery, v nichž jsou použity organická barviva, jsou průhledné. Je to způsobeno rozpustností organických barviv v polymerech. Ideální pigment musí odolávat teplotám a tlakům při zpracování polymerů. [5,6]

3.4 Opticky zjasňující látky

Tyto látky absorbují UV záření. Získanou energii pak vyzařují ve formě fluorescence. Což je záření o vlnové délce 430 – 460 nm. Tím se vytváří v lidském oku dojem, že je barva jasnější. Jejich použití je problematické v případech, kdy je použito světelných stabilizátorů. V tom případě se zjasňující účinek ruší. [5,6]

3.5 Antidegradanty

Látky chránící polymerní výrobky před vlivy vodních srážek, vzdušného kyslíku, ozónu, tepelné energie, mikroorganismů. Dělí se podle účinků na různé druhy. Příkladem mohou být antiozonanty, antioxidanty, apod. [5,6]

3.6 Maziva

Napomáhají při zpracování polymerů. Zvyšují tekutost taveniny. Napomáhají k lepšímu vyjímání výrobků z forem. [5]

Dělí se na maziva s:

- vnějším účinkem
- vnitřním účinkem [5]

Maziva s vnějším účinkem jsou špatně rozpustné v polymeru. Díky tomu zůstávají na povrchu polymeru a tvoří film. Ten usnadňuje sejmutí produktu z povrchu formy. Oproti tomu maziva s vnitřním účinkem jsou v polymeru dobře rozpustná a zlepšují tokové vlastnosti taveniny a zlepšují zpracovatelnost polymerů. [5,6]

3.7 Separační činidla

Slouží pro snadné oddělení výrobků z forem při zpracování polymerů. Používají se silikonové oleje nebo polytetrafluorethylenové disperze. Ty se nanášejí ve formě nástřiků. Mají

dobrou tepelnou stabilitu (do 300 °C). Při jejich aplikacích mohou nastat problémy s další úpravou výrobků, jako je potisk nebo pokovení výrobků. [5,6]

3.8 Změkčovadla

V případě potřeby zvýšení ohebnosti, houževnatosti nebo tekutosti taveniny se používají změkčovadla. Jsou to organické kapaliny. Mají vysoký bod varu. Fungují tak, že zvyšují vnitřní pohyblivost makromolekul. Způsobují jejich oddálení a tím dochází ke snižování sil mezi nimi. Použití změkčovadel má negativní účinky v podobě snižování mechanických vlastností, jako je mez pevnosti apod. [5,6]

3.9 Antistatika

Jedná se o přísady, díky kterým zvyšujeme elektrickou vodivost polymerů. Tyto látky přidáváme proto, abychom odvedli elektrostatický náboj, který může vznikat při jejich tření. Elektrostatický náboj může způsobovat špinění pohledových výrobků, lnutí výrobků ke strojům a jiné problémy. [5,6]

3.10 Nadouvadla

Používají se pro výrobu lehčených hmot. Nadouvadla se při tepelném zpracování rozkládají a vytváří plyny. Plyny ve výrobku vytvoří dutiny (póry). Vytvořený plyn bývá nejčastěji dusík nebo oxid uhličitý. Další možností je odpaření tekutiny ve formě freonu nebo pentanu. Výhodou je, že výrobky získávají tepelně – izolační vlastnosti. Požadavek na reakci je, aby nebyla příliš exotermická. [5,6]

3.11 Retardéry hoření

Jedná se o látky používané pro zpomalení procesu hoření a vývinu hořlavých produktů. Vytvářejí inertní atmosféru. Zabraňují přístupu vzduchu. Snižují viskozitu taveniny. Tyto přísady se přidávají do výrobků používajících se ve stavebnictví, jako nehořlavé nátěrové hmoty nebo lehčené materiály. [5,6]

Používají se přísady jako:

- Oxid antimony
- Organické sloučeniny obsahující fosfor
- Boritan zinečnatý
- Škrob

- Kyselina aminooctová, salicylová
- Tetrabrombisfenol
- Pentabromfenol [5,6]

3.12 Plniva

Dělíme je podle původu na anorganické a organické. Plniva můžeme dále dělit podle účinku jako vyztužující nebo nevyztužující. Jak z názvu vyplývá, vyztužující plniva slouží pro zvýšení tuhosti. Jejich použití přináší i zvýšení dalších vlastností. Jako je houževnatost, mez pevnosti a modul pružnosti. Nevyztužující plniva plní obvykle funkce zlepšení vzhledových vlastností nebo snížení ceny výrobku. Speciálnější využití má například grafit, který slouží pro samomazné aplikace. Podobné vlastnosti má i sulfid molybdeničitý. Práškové kovy se zase používají pro zvýšení tepelné vodivosti polymerů. [5,6]

Plniva jsou používána rozličných tvarů. Od moučky a prášků, přes kuličky a krátká vlákna, až po dlouhá vlákna spletené v tkaniny. [6]

Jako plniva organického původu se používají:

- dřevité moučky
- vlákna z konopí,
- vlákna z kokosu
- vlákna ze lnu [6]

Mezi často používaná anorganická plniva patří:

- skleněná vlákna, kuličky a prášek
- uhlíková vlákna a prášek
- aramidová vlákna
- kovová vlákna a částice
- oxidy křemíku
- uhličitan vápenatý
- minerály jako slída, kaolin, břidlice nebo křída [6]

3.13 Adhezní prostředky

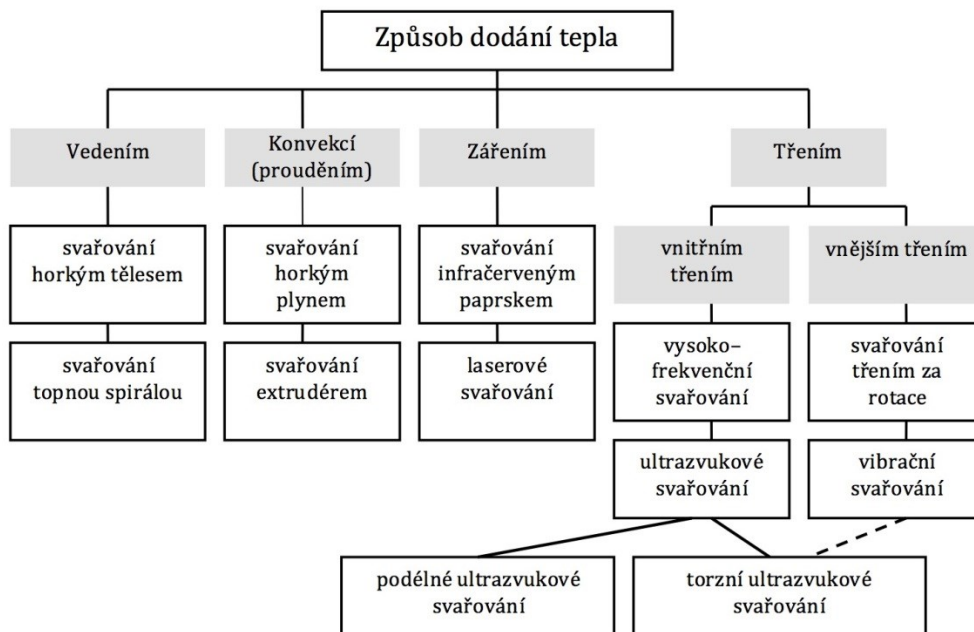
Jsou používané pro lepší přilnavost mezi polymery a jejich plnivy. Zvyšují mezi nimi adhezní síly. Bez dostatečného přilnutí polymeru a plniva by nedošlo ke zlepšení vlastností.

Lze je používat tak, že se impregnují na plniva, nebo se při zpracování přidávají do polymeru. Používají se silanové prostředky. [5,6]

4 ULTRAZVUKOVÉ SVAŘOVÁNÍ

Pro spojování plastů se používá celá řada metod. Tyto metody se dělí na rozebíratelné a nerozebíratelné. Mezi rozebíratelné patří spoje šroubové, západkové, zácvakové, kolíkové, čepové, apod. Spoje nýtové, lepené, lisované a svarové se řadí do kategorie nerozebíratelných spojů. [3]

Svařování termoplastů můžeme dělit podle způsobu dodání tepla (Obr. 4). [7]



Obr. 4 Rozdělení technologie svařování plastů [7]

Při výběru vhodné metody musíme klást důraz na volení optimální metody. A to z hlediska několika faktorů:

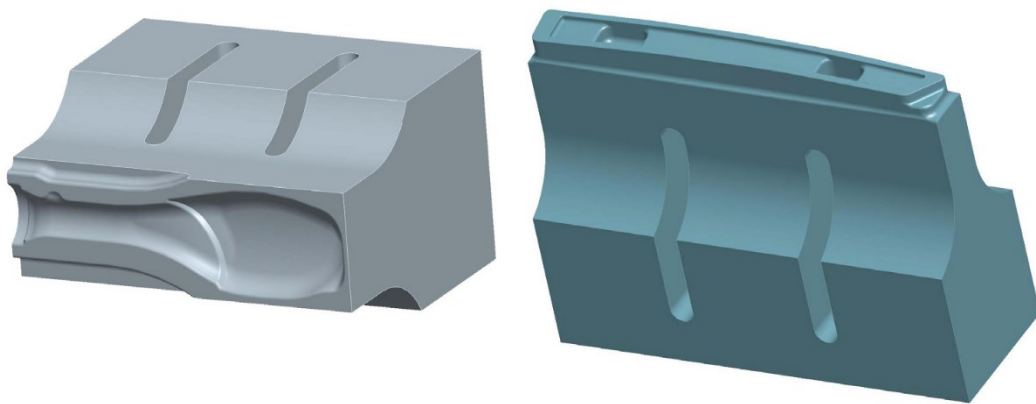
- Materiál vhodný pro svařování daným procesem
- Složitost geometrie dílu
- Požadovaná kvalita svarů
- Počet výrobků a hospodárnost výroby [7]

4.1 Technologie

Ultrazvuková svařovací technologie si v posledních 20 letech našla široké uplatnění v průmyslové výrobě. A od té doby prochází progresivním vývojem. Postupem času se rozvíjí rozsah materiálů použitelných pro tuto technologii. V začátcích bylo možné svařování pouze

neflexibilních plastů. A to kvůli účinnému přenosu energie uvnitř materiálu. Dnes se dají ovšem touto technologií svařovat téměř všechny termoplasty i kovy. [3,11]

Vyznačuje se všestranným použitím. Nejvyšší využití potenciálu této technologie nastává při výrobě velkých sérií. A to z důvodu nutnosti výroby přípravků a nástrojů na míru pro každý spoj (Obr. 5). Navíc díly nelze svařovat příliš velkých rozměrů. Nastává omezení v podobě rozměrů svářečky. Využívá se při výrobě automobilů a jejich doplňků, elektrických přístrojů, domácích spotřebičů, obalové techniky, v letecké technice, ve farmaceutickém a textilním průmyslu. [3,11]



Obr. 5 Svařovací sonotroda pro konkrétní spojované součásti [19]

Tato technologie se vyznačuje vysokou rychlostí svařování, čistotou a kvalitou svarů, relativně malými nároky na prostor, jednoduché zapojení do elektrické sítě, minimální údržba a nejsou potřeba žádné dodatečné pájecí materiály. Lze svařovat i rozdílné materiály. [11]

Svařování ultrazvukem funguje na principu vysokofrekvenčních akustických kmitů. Kde se energie kmitů transformuje v podobě tření na tepelnou energii. Samotné tavení materiálu i spojení pod tlakem probíhá velmi rychle v řádu desetin až jednotek sekund. [11]

4.1.1 Plasty vhodné ke svařování ultrazvukem

Nejvhodnější materiály vhodné ke svařování ultrazvukem jsou především amorfni termoplasty. Ale dají se použít i některé semikrystalické. Norma DVS 2216-6 uvádí vhodné materiály a také jejich kombinace vhodné pro ultrazvukové svařování. Z amorfniích uvádí např. PMMA, PSU, PES, ASA, SAN a SB. Z ostatních skupin jsou to např. PA, PP, nebo PE. Možnosti svařování dalších plastů uvádím v následující tabulce (Tab. 1). Navlhavé plasty se musí před použitím vysušit, jinak se vytvoří nedostatečně pevný spoj. Pevnost je menší až o

50 %. Svařovat se dají i plasty plněné. Ale svar neobsahuje příliš mnoho plniv, a proto je svar méně pevný než samotný materiál. [1]

Tab. 1: Možnosti ultrazvukového svařování některých plastů [11]

Druh plastu	Technologie
	ultrazvukem
PE - polyethylen	omezená
PP - polypropylen	omezená
PVC - polyvinylchlorid	dobrá
měkčený PVC	žádná
PS - polystyren	dobrá
houževnatý PS	dobrá
ABS - akrylonitrilbutadienstyren	dobrá
SAN - styrenakrylonitril	dobrá
PMMA - polymethylmethakrylát	dobrá
PA - polyamid	omezená
POM - polyoxymethylen	dobrá
PC - polykarbonát ¹	omezená
PBTP - polybutylentereftalát	dobrá
PPO - polyfenylenoxid	dobrá
PS - polysulfid	dobrá
PI - polyimid	žádná
PTFE - polytetrafluorethylen ²	žádná

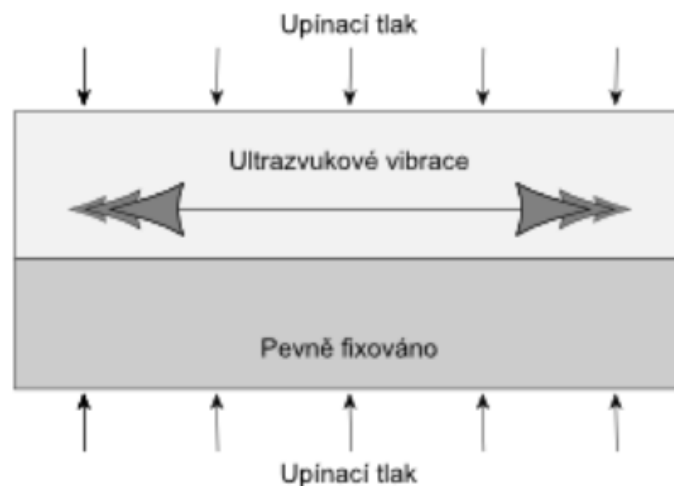
Pro svařování se používají polotovary nejčastěji vyráběné technologiemi vstřikování, vytlačování nebo vyfukování. Polotovary musí odpovídat patřičným kvalitativním nárokům. U výrobků se musí dodržovat rozměrové přesnosti. Jako polotovary se kromě přesných výrobků používají také různé typy desek, folií nebo netkané textilie, které mají obsah plastových vláken. [1]

4.1.2 Princip metody

Pro svařování ultrazvukem se používá mechanické kmitání, které má vysokou frekvenci. Frekvence bývá mezi 20 – 70 kHz. Generátorem vyrobené elektrické kmity se v měniči (hlava, konvertor) mění na kmity mechanické. Mechanické kmity mají stejnou frekvenci

jako kmity elektrické. Transformační díl (booster) a sonotroda přivádí tyto kmity na svařované díly. [1]

Na svařované díly působí tlak asi 0,2 až 0,3 MPa. Jeden díl je pevně připevněn v upínacím nástroji a druhý je rozkmitáván sonotrodou (Obr. 6). Díly se vůči sobě přímočaře pohybují. Nastává tření, které zahřívá materiály. Po zahřátí materiálu na svařovací teplotu, zajistí jejich trvalé spojení tlak působící mezi tělesy, který působí do ochlazení svaru. [1,11]



Obr. 6 Princip metody [11]

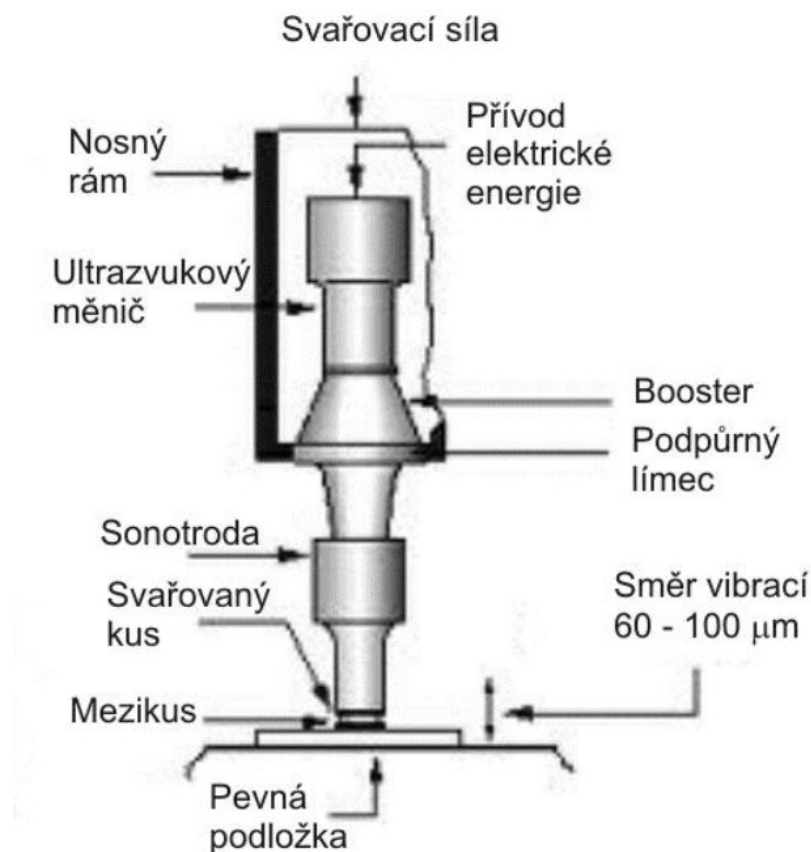
Amplituda pohybu sonotrody bývá obvykle v rozmezí 5 – 35 μm . Čím je použita pro svařování vyšší amplituda, tím je kratší čas procesu. Ovšem při volbě amplitudy se nesmí překročit kritická amplituda. Ta je tak velká, že při jejím použití dochází k natavení svařovaných ploch a vzniká nekvalitní spoj. [1,11]

4.1.3 Svařovací stroje

Svařovací zařízení jsou složena z několika částí (Obr. 7).

- **Generátor**, má za úkol přeměňovat nízkofrekvenční elektrickou energii dodávanou do zařízení z elektrické sítě na elektrickou energii s vysokou frekvencí. Tento úkon se může provádět buď analogovou, nebo digitální generátorovou technikou. Výstupní frekvence bývají v rozmezí 20 – 70 kHz. Generátory mívají výkony od 0,1 do 6 kW. Bývají založeny na principu magnetostrikčního jevu nebo elektrostrikčního jevu. Pro oba typy generátorů platí, že amplituda kmitů z nich vystupující je velmi malá. A proto se musí vhodným transformátorem zvýšit. [1]
- **Měnič**, slouží pro přeměnu elektrické energie o vysoké frekvenci na mechanické kmity. Měniče se používají magnetostrikční vyrobeny ze slitin Fe + Ni nebo Fe + Co

- + V. Anebo piezoelektrické vyrobené z titanátu baria popřípadě zirkontitanátu olova. [1]
- **Transformátor** mění amplitudu mechanických kmitů z měniče na potřebnou hodnotu, která má být na výstupu. [1]
- **Sonotroda** (Obr. 8) se přímo dotýká svařovaných dílů. Má za úkol přivádět mechanické kmity ke svařovaným dílům a také přenáší na díly tlak. Bývá vyrobena ze směsi neželezných kovů, jako je bronz nebo mosaz. Také se používají materiály jako hliník, nebo titan. Hliník se používá pro výrobu prototypů, kvůli jeho nízké ceně. Titan se využívá naopak pro velké série, kde se ospravedlní jeho vysoké pořizovací a zpracovatelské náklady. [1,19]
- **Opora**, je zařízení sloužící pro podepření svařovaných dílů. Vyrobená bývá z plastů, což jsou pasivní opory. Nebo z kovů, které slouží jako aktivní opora. A tedy při práci odrážejí zvukové vlny zpět do sonotrody. [1]



Obr. 7 Schéma ultrazvukové svářečky [12]



Obr. 8 Různé typy sonotrod [13]

4.1.4 Svařovací přístroje

- **Zařízení s ručním vedením sonotrody** (Obr. 9), to se skládá z řídicí jednotky a rukojeti, která má v sobě obsaženu sonotrodu. Ta má obvykle kruhový tvar. Tento typ se používá pro bodové svařování, pro opravy a převážně v kusové výrobě. Také se používá pro výrobu vzorků a zjišťování parametrů svařování. [1]



Obr. 9 Ruční ultrazvuková svářečka [14]

- **Zařízení s pneumatickým vedením sonotrody** (Obr. 10). U tohoto systému je celé zařízení uloženo ve stojanu nebo v přípravku. Ten je součástí výrobní linky. Díky pneumatickému pohonu je dosaženo přesného dávkování tlaku při každé fázi svařování. Tím se zvyšuje rychlost procesu a také se mohou zvětšovat svařované díly. [1]

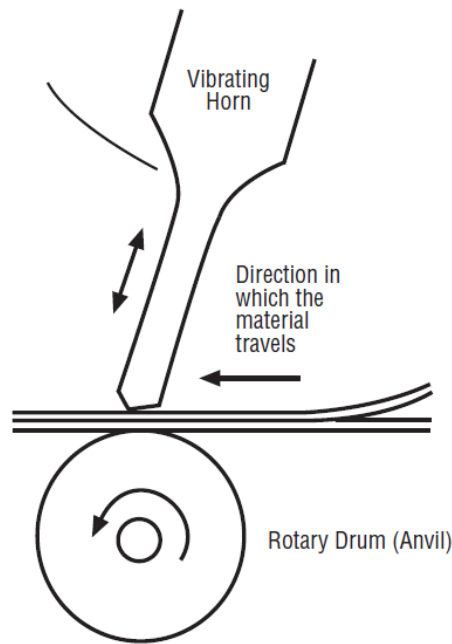


Obr. 10 Svářečka s pneumatickým vedením sonotrody [15]

- **Zařízení s vedením sonotrody pomocí elektromotů**, kde pohon svářečky provádí elektromotory. Tento typ přináší výhody v možnosti přesně definovat spojovací rychlost a v potřebných fázích ji udržet. [1]

4.1.5 Svařovací postupy

- **Kontaktní svařování** se používá pro svařování v blízkém poli. Hodí se tedy pro výroby malých tloušťek a to do 5 mm. Svařují se měkčí materiály jako PE – LD, PP. [1]
- **Distanční svařování** nazývá se také jako přenosové svařování. Jeho použití je možné až do vzdálenosti 200 mm. Používá se pro svařování objemných dílů z amorfních termoplastů. Vhodné materiály jsou např. PS, PMMA, PC. [1]
- **Klouzající nástroj** se používá pro svařování folií. Při svařování nástroj nejen svařuje, ale také se posouvá po povrchu svařované folie (Obr. 11). [1]



Obr. 11 Svařování klouzajícím nástrojem [19]

4.1.6 Fáze svařování

- Fáze 1: Natavování usměřovače energie (ERG)

Díly pro svařování se vloží mezi sonotrodu a mezi opěrnou desku. Začne se působit svařovacím tlakem a ultrazvukovými kmity. To má za následek natavení usměřovačů. Usměřovače bývají většinou výstupky materiálu na jedné z hran, které se budou spojovat. [1]

- Fáze 2: Nestacionární tvorba taveniny

Svařované díly se spojují vzniklou vrstvou taveniny. Vzniklá tavenina je zatím nestacionární. Z důvodu obsahu části zdeformovaného usměřovače energie. Až se usměřovač energie celý roztaví, tak dochází k ukončení druhé fáze. [1]

- Fáze 3: kvazistacionární odtavování

V této fázi dochází k prohřívání celých svařovaných ploch. Svařovací tlak je velmi malý. Po dosažení nastavených parametrů se ultrazvukové svařování vypíná. Parametry může být nastavený svařovací čas nebo dráha. [1]

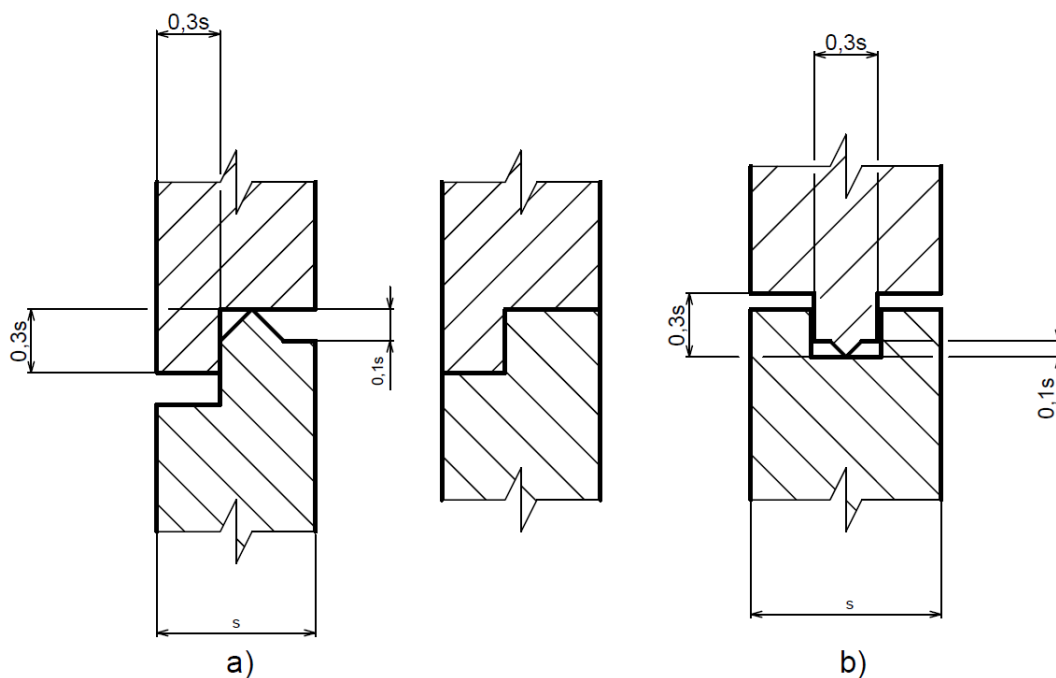
- Fáze 4: Přítlak a chladnutí

Tato fáze probíhá bez působení ultrazvukových kmitů. Dochází zde k chladnutí svaru. Ukončení procesu nastává při poklesu teploty pod teplotu tečení. [1]

4.1.7 Příprava svarových ploch

Zahřívání materiálu při ultrazvukovém svařování se odvíjí od schopnosti materiálu pohlcovat energii vibrací. Nejvyšší schopnost pohlcování energie způsobuje nehomogenita materiálu. Ta se nejvíce shromažďuje na rozhraní mezi spojovanými polotovary. To je důvodem, proč se v tomto místě dosahuje vyšší teploty, než v celkovém objemu materiálu. A proto musí docházet k navrhování polotovarů s ohledem na vhodné tvary. Tvary vhodné pro svařové plochy udává norma DVS 2216-1. Mezi základní tvary svařovaných ploch patří břitový a střížný styk. [1,3]

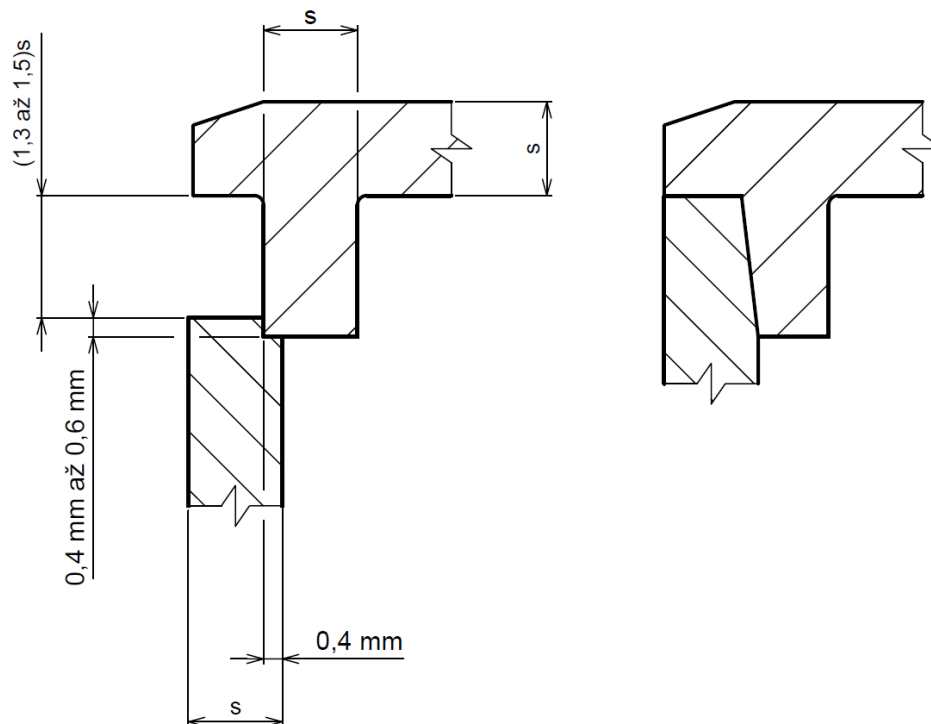
Břitový styk (obr. 12) je poměrně jednoduchý a usměrňuje vysokou koncentraci energie. Je vhodný pro termoplasty, které mají nízkou teplotu tavení, např. PVC, SAN, PS. Dělí se na břitový styk s jednoduchým vedením (Obr. 12 – a) a styk s dvojitým vedením (obr. 12 -b). Druhý typ se využívá tam, kde by se svařované součásti mohly vůči sobě posunout nebo k zajištění lepší těsnosti svaru. Břitový styk se dokonale svaří pouze v místě břitu. [1,3]



Obr. 12 Břitový styk [1]

V případě svařování termoplastů s vyšší teplotou tavení, nebo u látek rychle krystalujících, jako PA, POM, se používá střížný styk (Obr. 13). U stříhu břitového by tyto materiály mohly příliš rychle chladnout, a tak by nedocházelo k dostatečnému spojení součástí.

Vzniklý svar by měl nízkou pevnost a mohl by propouštět plyny. Stříh střížný nabízí větší provařenou plochu a také spotřebovává méně energie. Horní součást může mít vyhloubení pro vhodné umístění sonotrody. [1,3]



Obr. 13 Střížný styk [1]

4.1.8 Svařovací parametry

K nastavení svařovacích strojů lze obvykle využívat řídicích jednotek, které jsou součástí stroje. Parametry nutné k nastavení se liší podle druhu svařování (distanční, kontaktní). Nastavovat lze množství dodané energie nebo průnikovou hloubku. Údaje lze zjistit ze snímače kmitů umístěného v opoře. [1]

Svařovací cyklus je velmi rychlý. Natavení materiálu nastává obvykle v rozmezí 0,1 – 2 sekundy. Účinek se zaměřuje do místa požadovaného spoje bez natavení ostatních ploch, proto lze tuto technologii použít i za nízkých teplot. [1]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍL BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem bakalářské práce bude výzkum vlivu vybraných materiálů a také jejich modifikací na ultrazvukovou svařitelnost s konstrukčními materiály. Záměrem bude vytvořit zkušební tělesa s parametry vhodnými k dobré svařitelnosti pomocí ultrazvuku. Následně bude ověřena kvalita svaru pomocí zkušebního trhacího stroje.

Body vypracování byly následující:

1. Výroba zkušebních těles
2. Úprava zkušebních těles obráběním
3. Svařování připravených zkušebních těles
4. Provedení mechanických zkoušek
5. Vyhodnocení dat a formulace závěrů

6 POUŽITÉ MATERIÁLY A JEJICH VLASTNOSTI

Pro experimentální část bakalářské práce byly na základě požadavku kooperující firmy použity polymerní materiály, které jsou využívány při výrobě základen výstražných trojúhelníků (Obr. 14 a 15). Konkrétně se jednalo o následující materiály:

1. PMMA
2. SAN
3. ABS



Obr. 14 Díly výstražného trojúhelníku z materiálu PMMA (červený) a ABS (černý)



Obr. 15 Svařená část základny výstražného trojúhelníku

6.1 PLEXIGLAS 8N

Tento PMMA vyrábí společnost Evonik. Pro vstřikování byl použit také jeho recyklát v různých poměrech. Výrobce zdůrazňuje jeho přednosti jako:

- Dobré tečení při zpracování
- Vysoká mechanická pevnost
- Vysoká průhlednost
- Velmi dobrá odolnost proti povětrnostním podmínkám

Tento materiál nachází vhodné uplatnění v aplikacích jako kryty svítidel, kryty přístrojů, osvětlení automobilů, optické čočky a displeje.

6.2 IH830-82058-E1L

Jedná se o PMMA od společnosti LG Chemical. Jeho přednosti udává výrobce tyto:

- Dobrá tepelná odolnost
- Mechanická pevnost a tvrdost povrchu
- Vynikající průhlednost
- Chemická odolnost

Materiál je zvláště vhodný pro zadní světla, reflektory a běžná svítidla u automobilů. Další uplatnění nachází v domácnostech jako rámy obrazů, ozdoby, pro zakrytování techniky a pro elektronické součástky.

6.3 SAN 80HF

Společnost LG Chemical vyrábějící tento SAN materiál udává vlastnosti:

- Vysoká transparentnost materiálu
- Teplotní odolnost
- Chemická odolnost

Materiál se hodí pro různé produkty, jako jsou dílce do ledniček, výrobky do automobilového průmyslu a krytování přístrojů.

6.4 Terluran GP-22

Materiál ABS, který vyrábí firma BASF Plastics. Jedná se o konstrukční materiál s dobrými tokovými vlastnostmi při vstřikování. Je odolný proti tepelné degradaci.

Využití materiálu se nachází v automobilovém průmyslu, zakrytování přístrojů a v potravinářství.

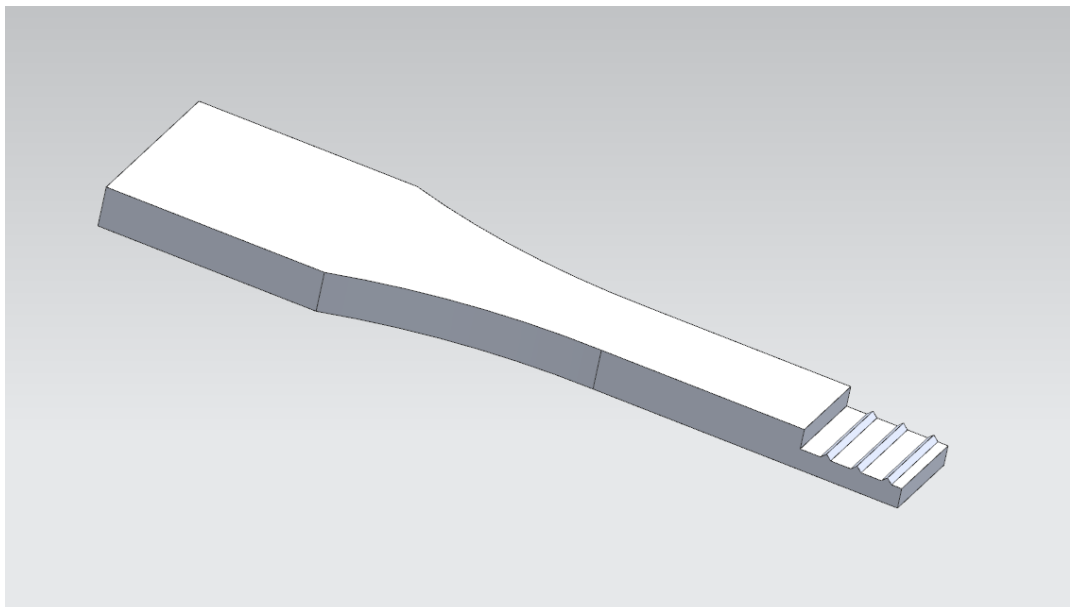
7 PŘÍPRAVA VZORKŮ

7.1 Návrh tvaru zkušebních těles

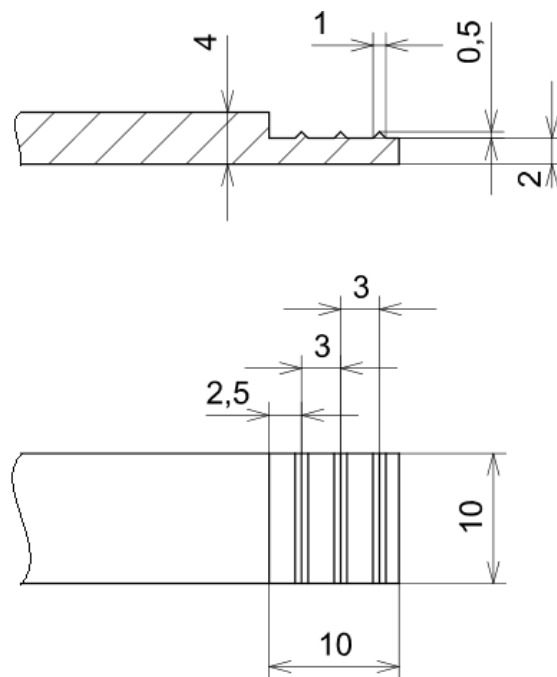
Zkušební vzorky byly navrženy ve tvaru rozpůlené oboustranné lopatky. Rozměry tělísek byly voleny dle normy ISO 527-4. Byly provedeny dva návrhy návarové hrany. Rozměry návarových hran byly voleny dle doporučení v literatuře firmy Herrmann Ultrazvuk s.r.o. zabývající se výrobou ultrazvukových svařovacích zařízení. [20]

7.1.1 Návrh č. 1

Návarová hrana u prvního návrhu byla vytvořena ve formě 3 shodných rovnoběžných trojúhelníkových výstupků (Obr. 16 a 17).



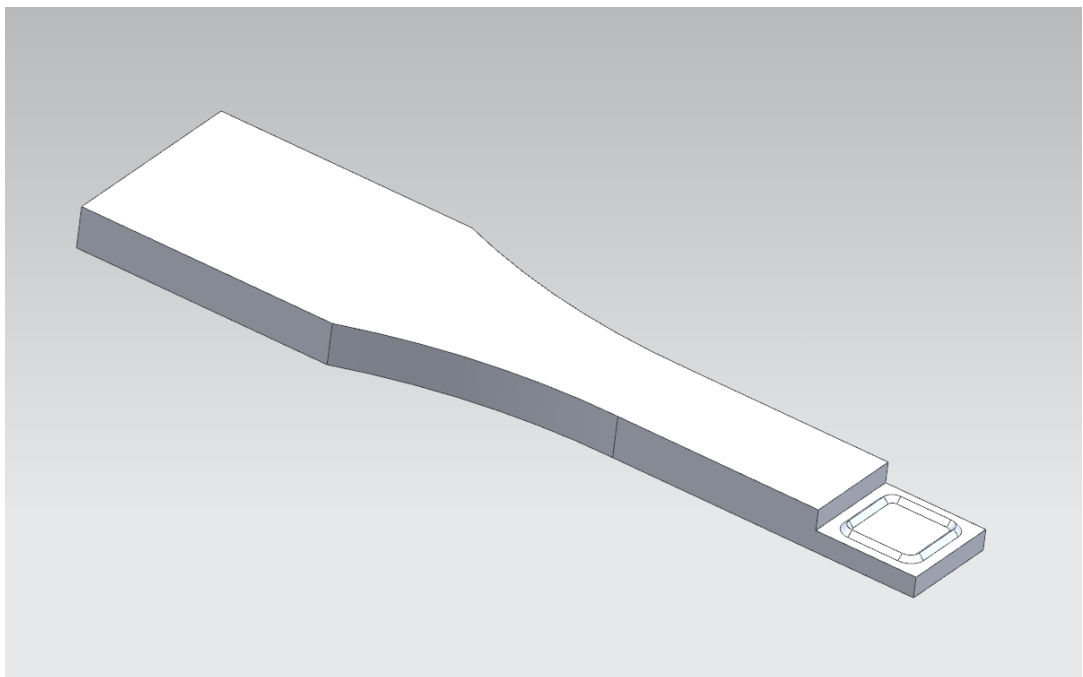
Obr. 16 Návrh návarové hrany č. 1



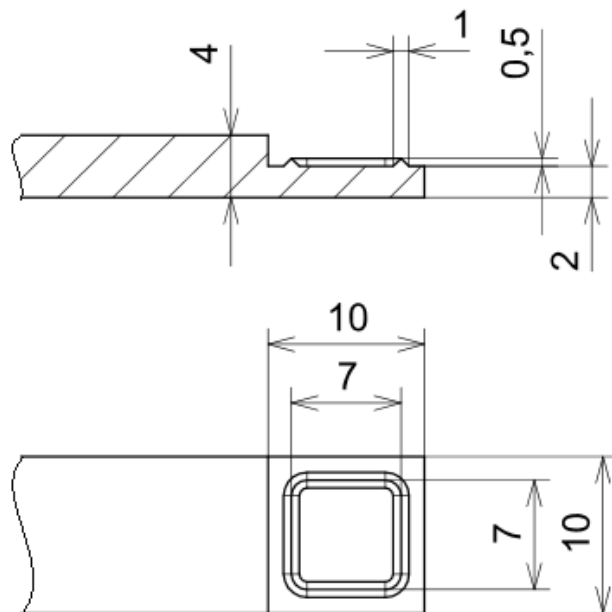
Obr. 17 Schéma návarové hrany č. 1

7.1.2 Návrh č. 2

Druhá navržená návarová hrana byla vytvořena ve tvaru čtverce se zaoblenými rohy (Obr. 18 a 19).



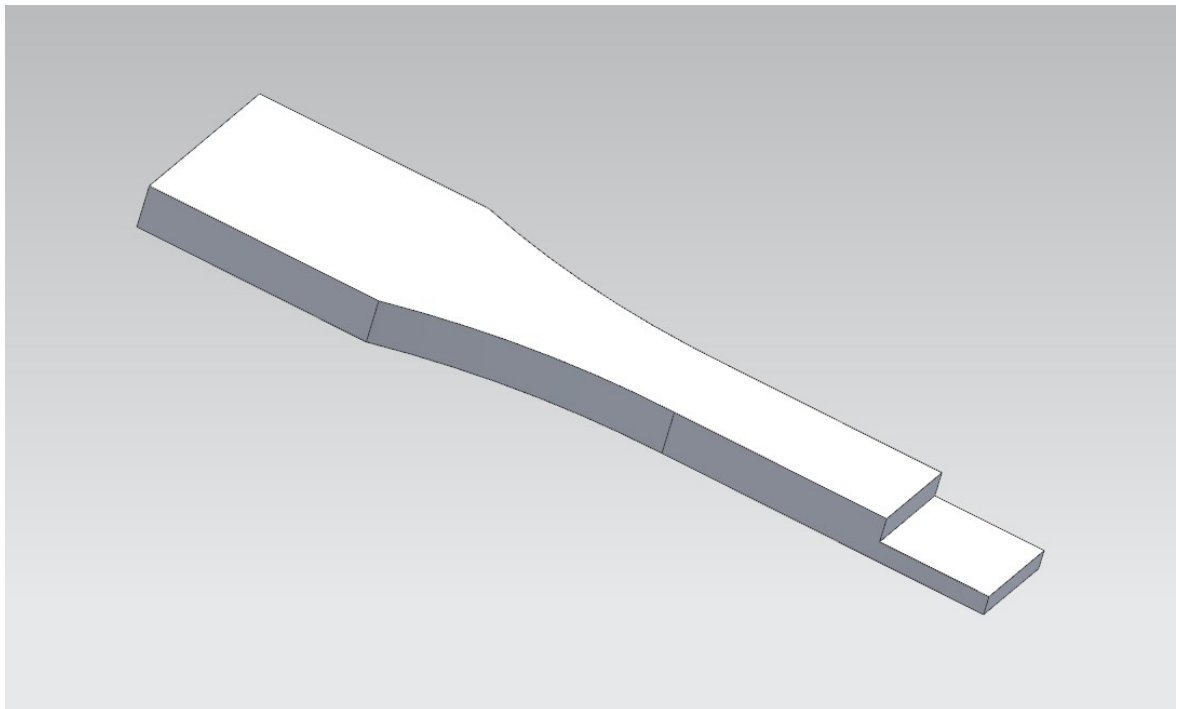
Obr. 18 Návrh návarové hrany č. 2



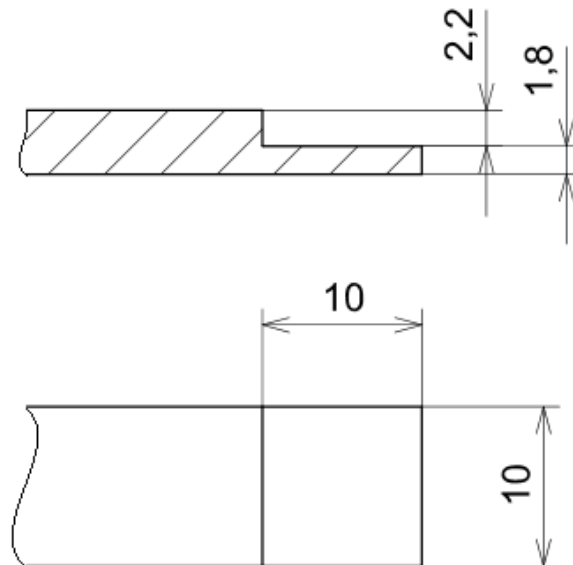
Obr. 19 Schéma návarové hrany č. 2

7.1.3 Návrh protikusu

Následně byl proveden návrh protikusu použitého pro svařování. Jedná se o poloviční zkušební tělísko s výřezem pro umístění na tělesa s návarovou hranou (Obr. 20 a 21).



Obr. 20 Návrh protikusu



Obr. 21 Schéma protikusu návarové hrany

7.2 Vstřikování vzorků

Vzorky byly vstřikovány na vstřikovacím stroji Mitsubishi 180 MET3 (Obr. 22). Základní parametry vstřikovacího stroje jsou uvedeny níže (Tab. 2). Byla použita dostupná dvojnásobná forma pro vstřikování zkušebních tělísek. Materiál byl dle doporučení výrobce předem vysušen v elektrických sušárnách.



Obr. 22 Vstřikovací stroj Mitsubishi 180 MET3 [21]

Tab. 2 Základní parametry vstřikovacího stroje

Parametry	
Uzavírací síla	180 t
Výška formy (min/max)	200/500 mm
Vstřikovací objem	69 – 475 cm ³
Vstřikovací rychlost	185 – 499 cm ³ /s
Vzdálenost mezi vodícími sloupy	560 x 560 mm
Spotřeba energie	4,1 – 5,4 kWh

Materiály byly vstřikovány dle parametrů uvedených v materiálových listech. U materiálu PMMA od firmy LG Chemical byl nejprve dotlak nastaven na hodnotu 60 MPa, ale v průběhu vstřikování začalo docházet k nedotékání materiálu a proto byl dotlak postupně zvyšován na 95 MPa. Parametry vstřikování jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 3).

Tab. 3 Parametry vstřikování

Parametry	PMMA Evonik	PMMA LG	SAN	ABS
Teplota formy [°C]	65	65	65	65
Vstřikovací tlak [MPa]	85	95	95	85
Dotlak [MPa]	60	60 / 95	60	55
Doba dotlaku [s]	5	5	5	5
Teplota pod nasypkou [°C]	70	70	70	50
Teplota vstupního pásma [°C]	230	200	195	230
Teplota přechodového pásma [°C]	250	215	210	240
Teploty výstupního pásma [°C]	253	225	220	250
Teplota trysky [°C]	245	220	210	245
Doba chlazení [s]	20	20	20	20

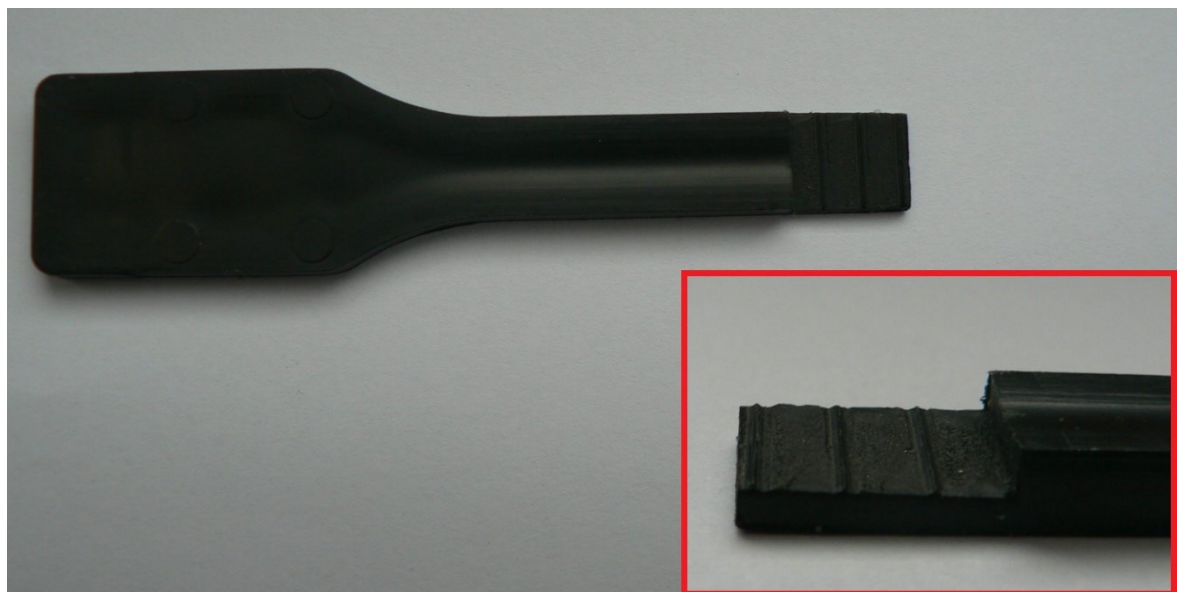
Po vstřikování byly zkušební tělíska zbavena zbytků po vtoku. A následně byly rozřezány na laboratorní pile s diamantovým kotoučem.

7.3 Obrábění vzorků

Dalším procesem bylo obrobení polotovarů pomocí CNC frézky, na kterou byl sestrojen jednoduchý přípravek pro upnutí vzorků. Frézka i s přípravkem je zobrazena níže (Obr. 25). Nejprve byly vyráběny protikusy z materiálu PMMA (Obr. 23) a SAN. Následně byly obráběny tělíska s návarovou hranou z materiálu ABS (Obr. 24).



Obr. 23 Obrobený protikus z materiálu PMMA



Obr. 24 Obrobený díl s návarovými hranami z materiálu ABS

Zamýšleno bylo vytvořit tělíska s hranou návrhu č. 1 i č. 2, uvedených výše. Ale po pokusech vytvořit čtvercovou hranu dle návrhu č. 2. bylo zjištěno, že kvalita návarové hrany je příliš nízká a nemuselo by dojít ke svaření s protikusem. Proto neproběhlo obrábění dle návrhu č. 2 a tělíska byly obrobena pouze podle prvního návrhu.



Obr. 25 CNC frézka s upnutým přípravkem pro obrábění tělísek

7.4 Svařování vzorků

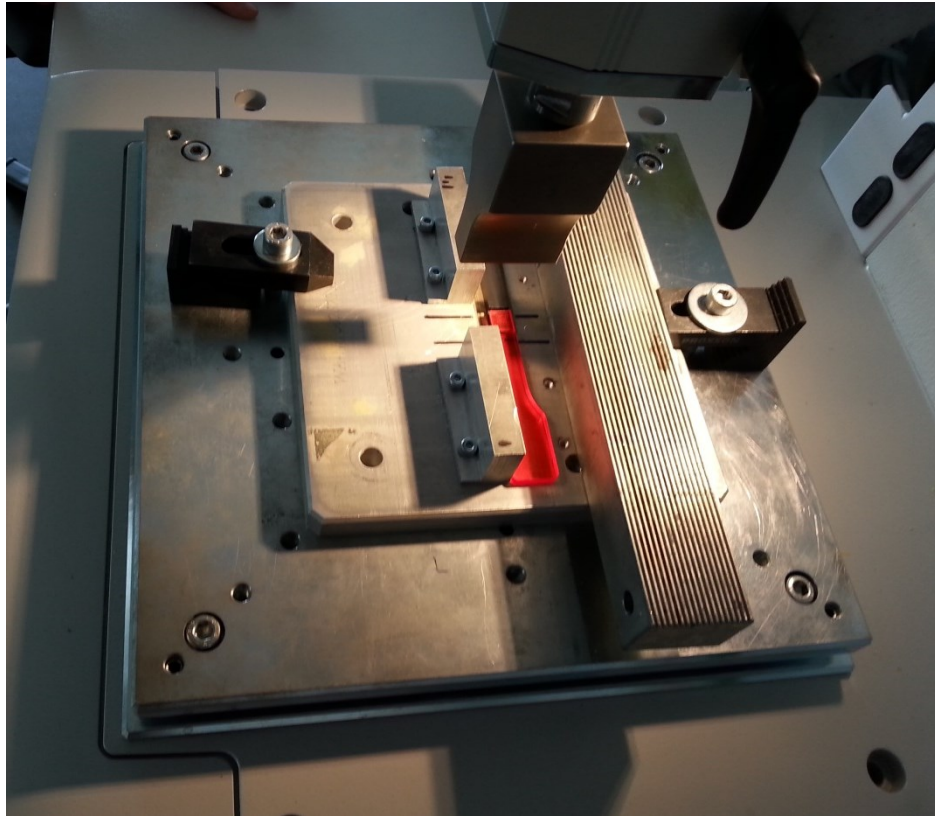
Svařování vzorků proběhlo ve firmě Herrmann Ultrazvuk s.r.o. na pobočce v Brně. Použité svářecí zařízení byla ultrazvuková svářečka HIQ Dialog 35 kHz (Obr. 26) a její hlavní parametry jsou uvedeny níže (Tab. 4). Pro svařování zkušebních těles byl sestrojen jednoduchý přípravek (Obr. 27).



Obr. 26 HIQ Dialog 35 kHz [22]

Tab. 4 Parametry použité svářečky

Řada	HIQ Dialog
Frekvence [kHz]	35
Výkon [W]	1200
Svařovací síla (min/max) [N]	10/650
Výškový rozsah [mm]	430
Rozměry (Š x V x H) [mm]	678 x 1533 x 707

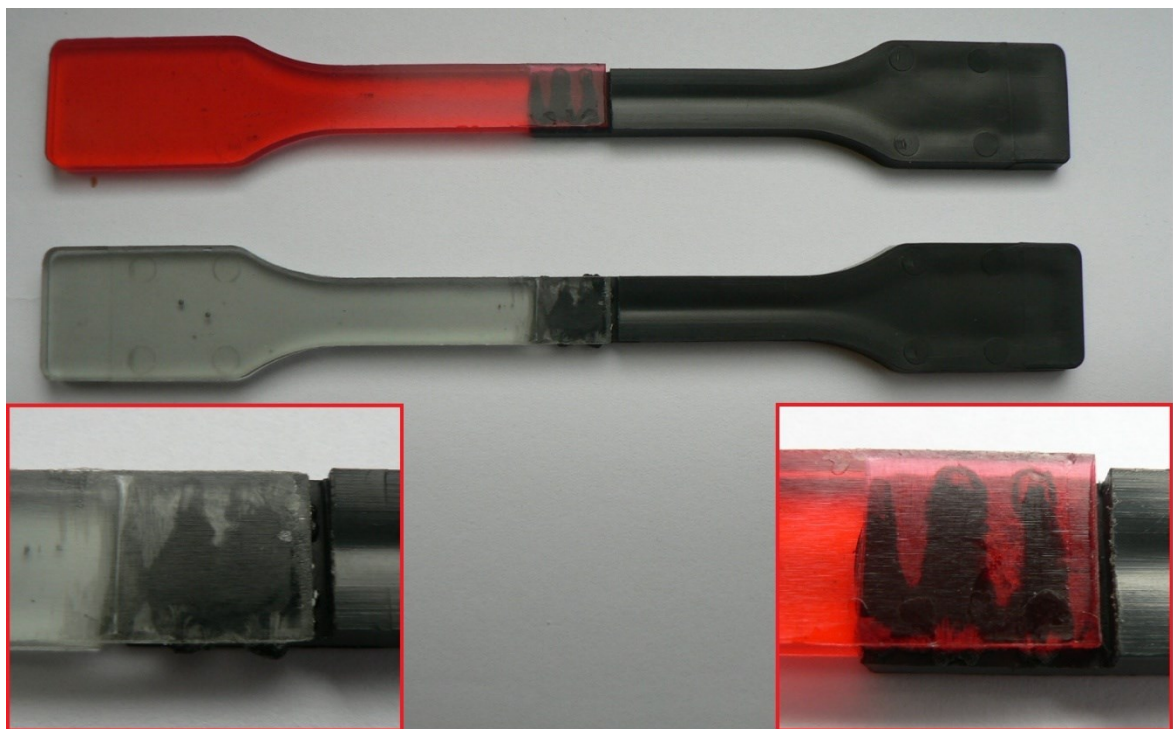


Obr. 27 Připravené díly ke svaření umístěné v přípravku

Po sestavení přípravku byly zvoleny technologické parametry. Nejprve bylo nastaveno svařování na dráhu 0,5 mm, jež by měla odpovídat výšce návarové hrany. Toto řešení se ukázalo jako nevhodné kvůli rozdílnosti jednotlivých vzorků a nepřesnostem návarové hrany vzniklých při obrábění. A proto bylo nastaveno ukončení svařování po dosažení požadované energie, což se ukázalo jako vhodnější řešení. Po vyzkoušení nastavení několika hodnot byla zvolena jako optimální energie 60 J. Další parametry svařování jsou uvedeny v Tab. 5. Na Obr. 28 jsou zobrazeny příklady svařených vzorků s detaily svaru, kde je vidět mapa roztažených návarových hran.

Tab. 5 Parametry svařování

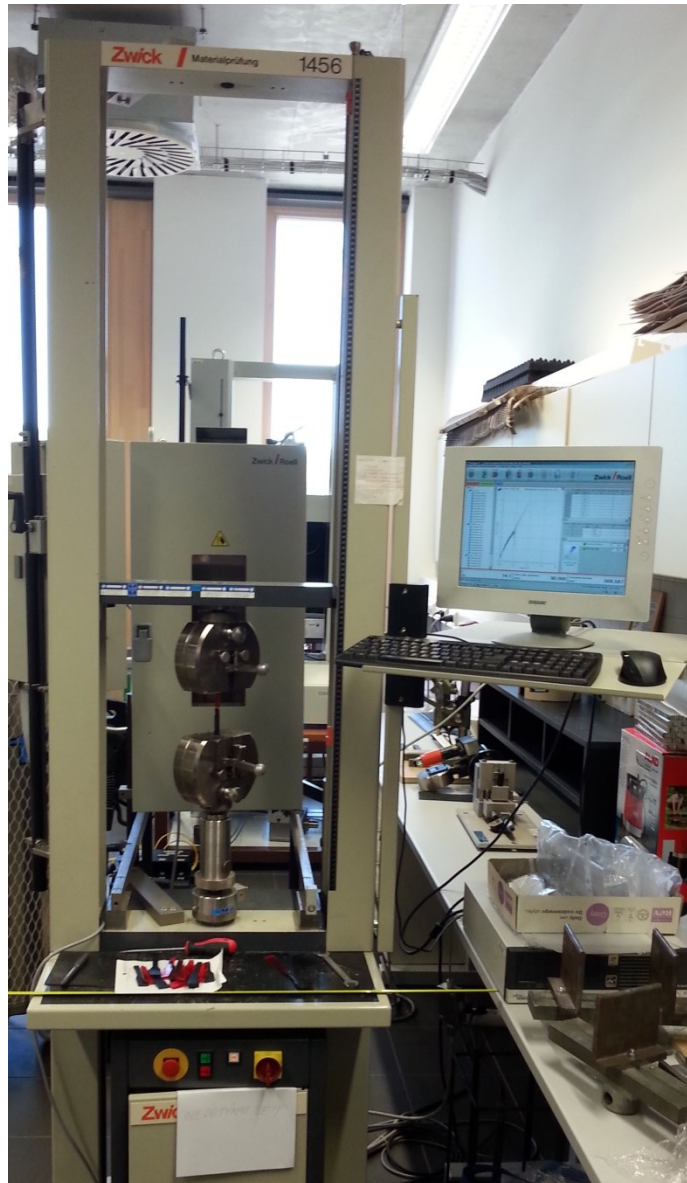
Připojovací síla [N]	50
Spouštěcí síla [N]	50
Zpoždění spuštění [s]	0,2
Amplituda [%]	90
Amplituda (nominální) [μm]	19,3
Svařovací síla [N]	120
Doba svařování [s]	0,219
Ukončovací energie [J]	60
Doba přidržení [s]	1
Přidržovací síla [N]	120



Obr. 28 Zobrazení svařených vzorků s detailními záběry svarů

8 MĚŘENÍ PEVNOSTI SVAŘENÉHO SPOJE

Tahové zkoušky byly provedeny na zkušebním stroji Zwick 1456 (Obr. 29). Měření probíhalo při teplotě 23 °C a rychlost zkoušky byla 5 mm/min. Zkoušky byly provedeny dle normy ISO 527-4.



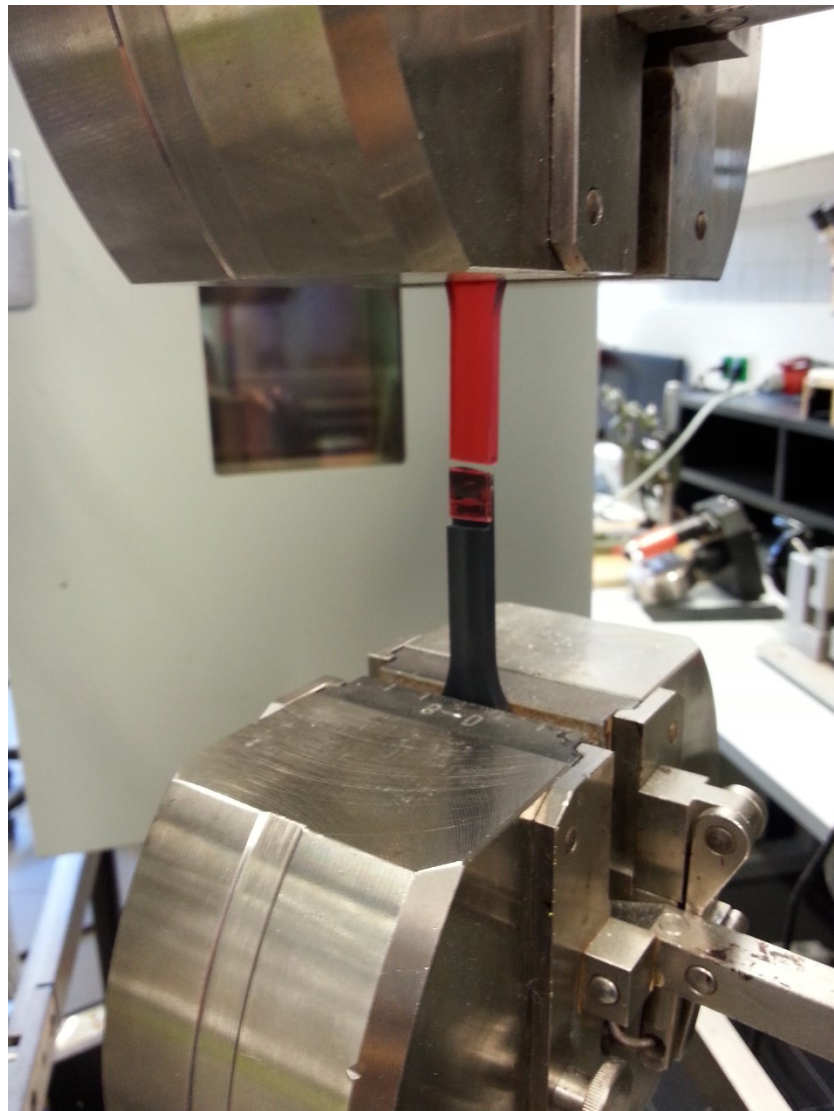
Obr. 29 Použitý univerzální zkušební stroj

Pro tahové zkoušky byly použity vzorky svařené z konstrukčního materiálu ABS a protikusů z různých materiálů. Materiály protikusů:

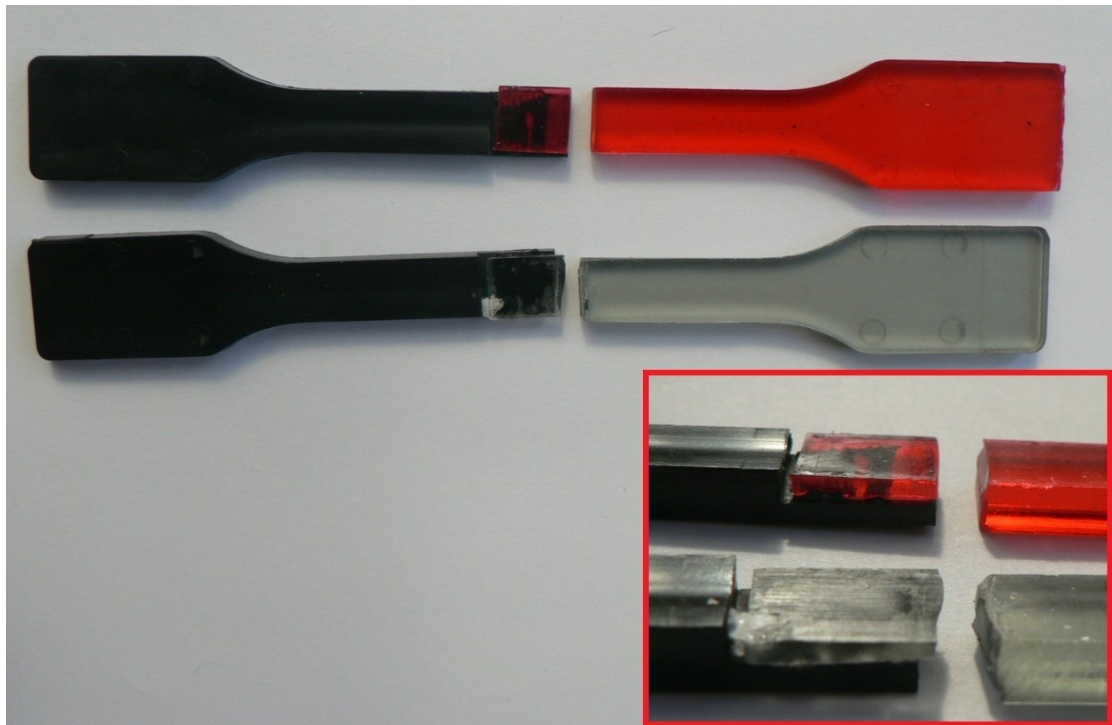
- A. Čistý PMMA od firmy LG Chemical
- B. Čistý PMMA od firmy Evonik
- C. Čistý PMMA recyklát od firmy Evonik

- D. Směs PMMA 90 % a recyklátu 10 % od firmy Evonik
- E. Směs PMMA 80 % a recyklátu 20 % od firmy Evonik
- F. Směs PMMA 70 % a recyklátu 30 % od firmy Evonik
- G. Čistý SAN od firmy LG Chemical

Při tahové zkoušce byla zjišťována síla při přetržení. Naměřené hodnoty byly vyneseny do Tab. 6. Následně byl stanoven aritmetický průměr a směrodatná odchylka. Uchycení do čelistí a způsob trhání tělísek je zobrazen na Obr. 30. Tělesa po tahové zkoušce a detailní pohled na místo zlomu jsou zobrazeny na Obr. 31. Porovnání naměřených hodnot je zaznamenáno na Obr. 32.



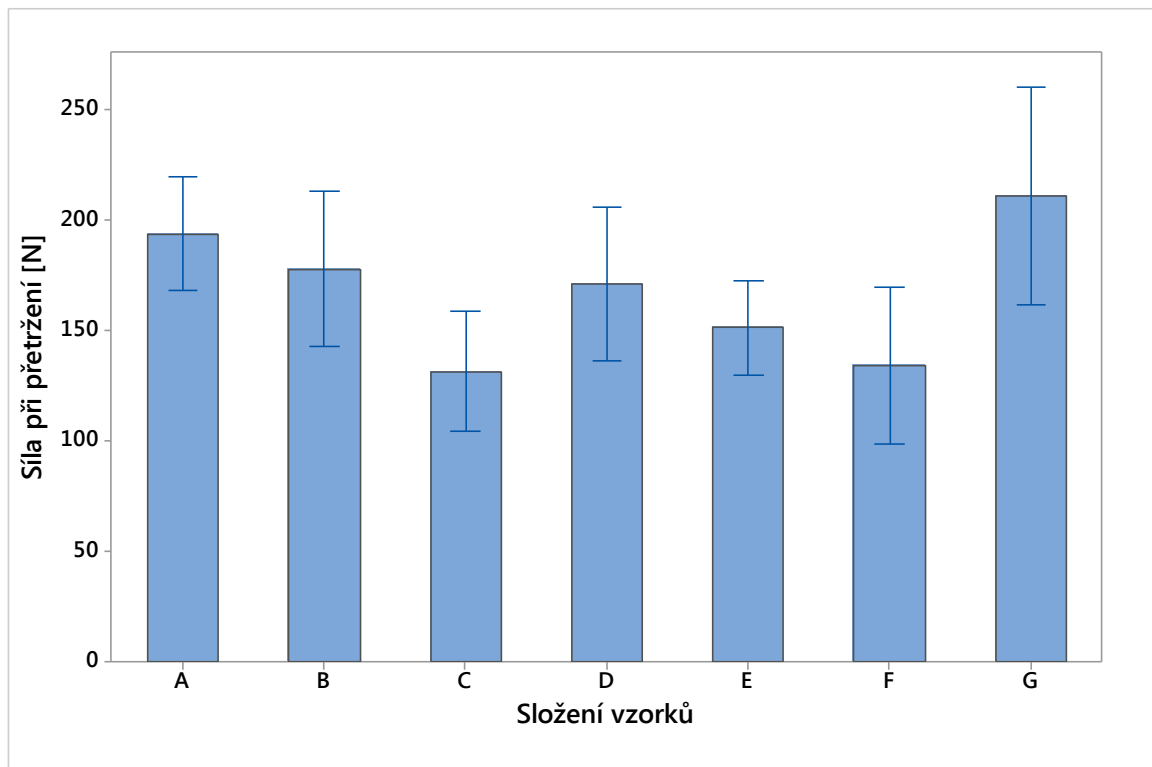
Obr. 30 Otestované zkušební tělísko



Obr. 31 Zkušební tělesa po tahové zkoušce

Tab. 6 Síla při přetržení při tahové zkoušce pro vzorky A – G

Vzorek	A [N]	B [N]	C [N]	D [N]	E [N]	F [N]	G [N]
1	172	209	107	159	107	162	162
2	182	174	153	136	157	94	191
3	205	298	99	157	119	176	290
4	187	140	124	192	184	101	305
5	205	158	191	169	107	156	162
6	177	146	95	267	162	86	212
7	115	152	103	169	187	164	220
8	178	171	195	157	176	-	147
9	229	131	99	220	155	-	-
10	178	200	149	85	159	-	-
11	286	-	-	-	-	-	-
12	212	-	-	-	-	-	-
$\bar{x} \pm \sigma$	194 ± 40	178 ± 49	132 ± 38	171 ± 49	151 ± 30	134 ± 38	211 ± 59



Obr. 32 Závislost průměrné hodnoty maximální zatěžující síly

DISKUSE VÝSLEDKŮ

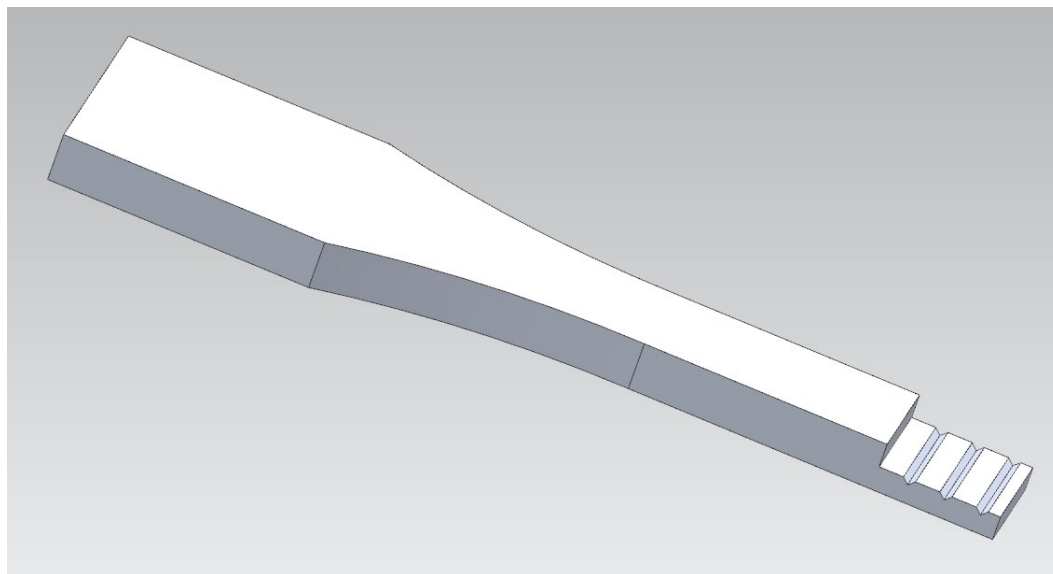
Pro testy svažitelnosti byly zvoleny 3 druhy akrylátových polymerů (dva typy PMMA, SAN) a jeden konstrukční materiál (ABS). Testování vzorků probíhalo pomocí tahové zkoušky na trhacím stroji Zwick 1456.

Záměrem bylo zjistit pevnost svařených spojů. Ovšem u všech testovaných vzorků došlo k přerušení materiálu těsně za svařenou částí (Obr. 31), v místě přechodu výřezu protikusů. Svary na všech vzorcích zůstaly bez poškození. Tím lze konstatovat, že pevnost svaru byla vyšší než pevnost samotného materiálu v místě zlomu.

Vliv na tento způsob deformace mohlo mít několik faktorů. Například, když při tahové zkoušce takto svařených testovacích těles, díky geometrii spoje nedochází k čistému tahu, ale dochází také k namáhání v ohybu. Následně křehký materiál (PMMA, SAN) tento způsob namáhání díky slabé stěně nevydrží a dojde k jeho prasknutí. Další vliv mohlo mít obrábění zkušebních těles, kdy kontaktní plochy na sebe vhodně nedoléhaly. Popřípadě byla při obrábění narušena struktura křehkého materiálu (PMMA, SAN). V tomto případě by bylo vhodné použít vstřikovací formu přímo pro konkrétní výrobek a tím by odpadl proces obrábění. Popřípadě do původní vstřikovací formy vložit vložky ve tvaru protikusů (Obr. 33), například z materiálu PTFE. Kde rozměry vložky vychází z návrhu zkušebních těles (Obr. 17). Použitím vložky by také odpadla nutnost řezání zkušebních těles.

Místo pevnosti svarů byla měřena únosnost samotných materiálů těsně za místem svaru, kde docházelo k lomu zkušebního tělesa. Z výsledků vyplývá že největší pevnost v tahu, respektive únosnost měl materiál SAN. Následně skončil materiál PMMA výrobce LG Chemical, u kterého pevnost dosáhla 92 % materiálu SAN. Pevnost materiálu PMMA výrobce Evonik dosáhla 84 % oproti materiálu SAN a 92 % oproti materiálu PMMA výrobce LG Chemical.

Dále byla zhodnocena pevnost svarových spojů ve vztahu přídatku recyklátu do základního materiálu. Během měření však docházelo ke shodnému porušení zkušebních těles a nedocházelo tedy k měření únosnosti spoje, ale samotného materiálu PMMA. Přídavek 10 % recyklátu způsobil pokles na 96 % pevnosti původního materiálu. Po přídavku 20 % recyklátu klesla pevnost na 85 % základního materiálu. Po přidání 30 % recyklátu bylo dosaženo 75 % pevnosti původního materiálu. 100 % recyklátu mělo pevnost 74 % původního materiálu.



Obr. 33 Vložka do vstřikovací formy pro vzorky návrhu č. 1

ZÁVĚR

Bakalářská práce řeší vliv materiálu na ultrazvukovou svařitelnost u akrylových polymerů. Součástí praktické části je popis použitých materiálů, návrh a výroba zkušebních těles pro mechanické zkoušky, jejich následné svaření a měření pevnosti.

Byly řešeny dva návrhy zkušebních těles. Použitý návrh s třemi návarovými hranami se ukázal jako vhodnější a výrobně rychlejší. Výsledkem byl pevný svar, kdy byla pozorována vhodně natavená a roztečená mapa konstrukčního materiálu skrz transparentní protikus. Na druhou stranu se ukázalo nevhodné postupné obrábění zkušebních těles. Zkušební tělesa se při chladnutí po vstřikování deformovala. Docházelo k jejich prohnutí, vzniku propadlin a samozřejmě smrštění. Díky tomu docházelo při upnutí do obráběcího přípravku k odlišnému obrobení každého tělesa. Tento problém by se dal vyřešit vložením vložky ve tvaru protikusu do dutiny vstřikovací formy.

Pro práci byly použity 2 druhy transparentních polymerů (PMMA, SAN). PMMA byl použit od dvou různých výrobců. U jednoho typu PMMA byl použit také jeho recyklát. Transparentní materiály byly svařovány ultrazvukovou svářečkou HIQ Dialog 35 kHz s konstrukčním materiálem (ABS). Pevnost svařených spojů byla zjišťována tahovou zkouškou na trhacím stroji Zwick 1456.

Z výsledků vyplývá, že v tomto případě vliv materiálu a obsahu recyklátu neměl vliv na ultrazvukovou svařitelnost. Všechna zkušební tělesa se svařila kvalitně a při tahové zkoušce došlo u všech testovacích těles dříve k poruše materiálu samotného než k poruše svaru. Ovšem výrazný vliv má recyklát na pevnost samotných materiálů. Nejvyšší pevnosti dosáhl čistý materiál SAN. Z materiálu PMMA dosáhl nejvyšší pevnosti materiál PMMA od výrobce LG Chemical. Nejnižší pevnosti dosáhl čistý recyklát materiálu PMMA od výrobce Evonik. Z hlediska optických vlastností nebyl na první pohled podíl recyklátu patrný. Pro kooperující firmu jsou tedy stěžejní informace, že přídavek recyklátu neovlivní samotnou svařitelnost a nejsou očekávány případné výkyvy v kvalitě svařených dílců.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LOYDA, Miloslav. *Svařování termoplastů*. 2., dopl. a rozš. vyd. Praha: UNO Praha, 2011. ISBN 978-80-904949-0-9.
- [2] MLEZIVA, Josef a Jaromír ŠŇUPÁREK. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přeprac. vyd. Praha: Sobotáles, 2000. ISBN 80-85920-72-7.
- [3] KOLOUCH, Jan. *Strojní součásti z plastů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981.
- [4] MLEZIVA, Josef a Jaroslav KÁLAL. *Základy makromolekulární chemie*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986.
- [5] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-617-6.
- [6] BĚHÁLEK, L.: *Polymery*. Svitavy: SOU Svitavy. Elektronická učebnice, 2014. ISBN 978-80-88058-68-7
- [7] AUSPERGER, Aleš. *Technologie zpracování plastů*. 2016. ISBN 978-80-88058-77-9.
- [8] SOVA, Miloš. *Kopolymer styren-akrylonitril (SAN)* [online]. 6.2.2015 [cit. 2018-01-06]. Dostupné z: <https://www.techportal.cz/33/kopolymer-styren-akrylonitril-san-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EqQUkSFod1GxlchZwg1SjLw/?query=Kopolymer%20styr%E9n-akrylonitril%20SAN&serp=1>
- [9] Plexisklo - popis plexiskla [online]. [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: <https://www.koplast.cz/plexisklo-popis-plexiskla/>
- [10] ŠVANDRLÍKOVÁ, Mirka. *PLEXISKLO* [online]. [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyrobky/plexisklo>
- [11] Ultrazvukové svařování – 41 [online]. [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-06-41.pdf>

- [12] MRŇA, Libor. Svařování ultrazvukem [online]. 7.12.2011 [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__svarovani_ultrazvukem__mrna.pdf
- [13] Sonotrody [online]. [cit. 2017-12-20]. Dostupné z: <http://www.siriuselectric.it/index.php/en/blog-en/40-technologies/146-sonotrode>
- [14] Ruční ultrazvuková svářečka [online]. [cit. 2017-12-20]. Dostupné z: <https://www.wiretech.cz/p/534/handystar-plast>
- [15] Svářečka s pneumatickým vedením sonotrody [online]. [cit. 2017-12-20]. Dostupné z: <http://www.dukane.eu/cz/produkty/ultrazvukove-svarecky/iq-es>
- [16] Vzorec PMMA [online]. [cit. 2018-02-03]. Dostupné z: <http://fyzika.ft.utb.cz/klic/index.php?lang=cz&char=PMMA&menu=4>
- [17] Vzorec SAN [online]. [cit. 2018-02-13]. Dostupné z: <http://fyzika.ft.utb.cz/klic/index.php?lang=cz&char=SAN&menu=4>
- [18] Molekulový vzorec PMMA [online]. [cit. 2018-02-14]. Dostupné z: <https://www.arkema.com/export/shared/.content/media/downloads/socialresponsability/safety-summuries/Altuglas-PMMA-Methyl-Methacrylate-GPS-2013-07-15-V0.pdf>
- [19] Guide to Ultrasonic Plastics Assembly [online]. [cit. 2018-02-14]. Dostupné z: <https://www.dukane.com/us/Documents/Design-Guides/Guide%20To%20US%20Plastic%20Assembly.pdf>
- [20] Interní literatura firmy Herrmann Ultrazvuk s.r.o.
- [21] MITSUBISHI 180 MET3 [online]. [cit. 2018-05-1]. Dostupné z: <https://km-system.sk/vstrekovacie-stroje/elektricke/mitsubishi-180-met3/>
- [22] HIQ Dialog 35 kHz [online]. [cit. 2018-05-6]. Dostupné z: <https://www.herrmannultrasonics.com/en-us/products/ultrasonic-welding-machines/weld-machines-hiq-production-series/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PMMA	polymethylmethakrylát
SAN	styren-akrylonitril
ABS	akrylonitrilbutadienstyren
T_g	teplota skelného přechodu
T_f	teplota viskózního toku
T_m	teplota tání
UV	ultrafialové záření
PVC	polyvinylchlorid
PSU	polysulfon
PES	polyester
ASA	akrylonitrilstyrénakrylát
SB	styrenbutadien
PA	polyamid
PP	polypropylen
PE	polyethylen
PTFE	polytetrafluorethylen
PS	polystyren
POM	polyoxymethylen
PC	polycarbonát
PBTP	polybutylentetefalát
PPO	polyfenylenoxid
PI	polyimid
PS	polysulfid
PE-LD	nízkohustotní polyethylen

\bar{x}	aritmetický průměr
σ	směrodatná odchylka

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Rozdělení polymerů [6]	12
Obr. 2 Strukturní vzorec PMMA [16]	15
Obr. 3 Strukturní vzorec PMMA [17]	20
Obr. 4 Rozdělení technologie svařování plastů [7].....	28
Obr. 5 Svařovací sonotroda pro konkrétní spojované součásti [19].....	29
Obr. 6 Princip metody [11]	31
Obr. 7 Schéma ultrazvukové svářečky [12].....	32
Obr. 8 Různé typy sonotrod [13]	33
Obr. 9 Ruční ultrazvuková svářečka [14]	33
Obr. 10 Svářečka s pneumatickým vedením sonotrody [15].....	34
Obr. 11 Svařování klouzajícím nástrojem [19].....	35
Obr. 12 Břítový styk [1].....	36
Obr. 13 Střížný styk [1]	37
Obr. 14 Díly výstražného trojúhelníku z materiálu PMMA (červený) a ABS (černý)	40
Obr. 15 Svařená část základny výstražného trojúhelníku.....	40
Obr. 16 Návrh návarové hrany č. 1	43
Obr. 17 Schéma návarové hrany č. 1	44
Obr. 18 Návrh návarové hrany č. 2.....	44
Obr. 19 Schéma návarové hrany č. 2	45
Obr. 20 Návrh protikusu	45
Obr. 21 Schéma protikusu návarové hrany.....	46
Obr. 22 Vstřikovací stroj Mitsubishi 180 MET3 [21]	46
Obr. 23 Obrobený protikus z materiálu PMMA	48
Obr. 24 Obrobený díl s návarovými hranami z materiálu ABS.....	48
Obr. 25 CNC frézka s upnutým přípravkem pro obrábění tělísek	49
Obr. 26 HIQ Dialog 35 kHz [22].....	50
Obr. 27 Připravené díly ke svaření umístěné v přípravku	51
Obr. 28 Zobrazení svařených vzorků s detailními záběry svarů.....	52
Obr. 29 Použitý univerzální zkušební stroj.....	53
Obr. 30 Otestované zkušební tělísko	54
Obr. 31 Zkušební tělesa po tahové zkoušce.....	55

Obr. 32 Závislost průměrné hodnoty maximální zatěžující síly.....	56
Obr. 33 Vložka do vstříkovací formy pro vzorky návrhu č. 1	58

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Možnosti ultrazvukového svařování některých plastů [11].....	30
Tab. 2 Základní parametry vstřikovacího stroje	47
Tab. 3 Parametry vstřikování.....	47
Tab. 4 Parametry použité svářečky	50
Tab. 5 Parametry svařování	52
Tab. 6 Síla při přetržení při tahové zkoušce pro vzorky A – G	55

SEZNAM PŘÍLOH

PI CD ROM