

Ultrazvukové svařování termoplastů

Bc. Michal Valenta

Diplomová práce
2018



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal Valenta**
Osobní číslo: **T16256**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Ultrazvukové svařování termoplastů**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární studie na dané téma
2. Experimentální svařování vybraných polymerních materiálů
3. Statistické vyhodnocení naměřených výsledků
4. Závěr

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 2018


Termín odevzdání diplomové práce:

18. května 2018

Ve Zlíně dne 5. února 2018



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



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

Příjmení a jméno: MICHAL VALENTA

Obor: KTZ

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 užít 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 9. 5. 2018

Valenta

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 nevydělčně 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 přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou svařování termoplastů. Převážná část je věnována ultrazvukovému svařování, jeho popisu, parametrům používaných zařízení, tvaru a velikosti svaru. Popsány jsou jednotlivé materiály vhodné pro ultrazvukové svařování.

Praktická část je zaměřena na úpravu a dokončení svařovacího přípravku, přípravu zkušebních vzorků a optimalizaci svařovacího procesu. U vybraných druhů termoplastů byly provedeny šikmé a přelátované svary s rozdílnou velikostí přesahů a úpravou konců zkušebních vzorků. Takto svařované vzorky byly podrobeny tahovým zkouškám pro vyhodnocení jejich únosnosti. Výsledky práce podávají ucelený pohled na teoretické a praktické aspekty ultrazvukového svařování vybraných typů termoplastů.

Klíčová slova: ultrazvuk, svařování, termoplasty, procesní parametry, pevnost spoje

ABSTRACT

Master's thesis deals with welding of thermoplastics. The bulk of the thesis is devoted on ultrasonic welding, description of the device, process parameters, shape and size of the weld. Individual materials are described as appropriate for ultrasonic welding.

The practical part is focused on the preparation and finishing of the welding tool, the preparation of test specimens and optimization of the welding process. For selected types of thermoplastics were made sloped and overlapped welds with different overlap sizes and modified at the end of test specimens. The welded samples were subjected to tensile tests to evaluate joint strength. The results of the thesis give a comprehensive view of the theoretical and practical aspects of ultrasonic welding for selected types of thermoplastics.

Keywords: ultrasound, welding, thermoplastic, process parameters, joint strength

Touto cestou bych rád poděkovat vedoucí mé diplomové práce doc. Ing. Libuši Sýkorové Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a ochotu, kterou mi poskytovala během psaní této práce. Rodině a přítelkyni za podporu během celého studia. Poděkování patří také panu Ing. Janu Volejníkovi za zprostředkování a možnost využití ultrazvukového svařovacího zařízení ve firmě Plastika a.s. Kroměříž.

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

OBSAH

| | |
|--|-----------|
| ÚVOD..... | 9 |
| I TEORETICKÁ ČÁST..... | 10 |
| 1 SVAŘOVÁNÍ PLASTŮ | 11 |
| 1.1 SVAŘOVÁNÍ HORKÝM TĚLESEM | 14 |
| 1.2 SVAŘOVÁNÍ EXTRUDEREM | 15 |
| 1.3 SVAŘOVÁNÍ INFRAČERVENÝM PAPSKEM | 16 |
| 1.4 SVAŘOVÁNÍ ULTRAZVUKEM | 17 |
| 2 ULTRAZVUK | 18 |
| 2.1 FYZIKÁLNÍ PODSTATA | 18 |
| 2.2 ULTRAZVUKOVÉ SVAŘOVÁNÍ | 20 |
| 2.3 METODY SVAŘOVÁNÍ | 24 |
| 2.4 MATERIÁLY | 28 |
| 3 ZAŘÍZENÍ PRO SVAŘOVÁNÍ ULTRAZVUKEM..... | 33 |
| 3.1 SVAŘOVACÍ SYSTÉM..... | 33 |
| II PRAKTICKÁ ČÁST | 36 |
| 4 CÍL PRÁCE | 37 |
| 5 EXPERIMENT | 38 |
| 5.1 DOKONČENÍ SVAŘOVACÍHO PŘÍPRAVKU | 38 |
| 5.2 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ | 41 |
| 6 SVAŘOVÁNÍ A TESTOVÁNÍ | 43 |
| 6.1 SVAŘOVACÍ SESTAVA | 43 |
| 6.2 MECHANICKÁ ANALÝZA TAHOVÉ ZKOUŠKY | 48 |
| 6.3 TAHOVÁ ZKOUŠKA | 51 |
| 7 VÝSLEDKY A HODNOCENÍ..... | 55 |
| 7.1 STATISTICKÉ PROSTŘEDKY | 55 |
| 7.2 NAMĚŘENÉ HODNOTY | 57 |
| 8 DISKUZE VÝSLEDKŮ..... | 68 |
| ZÁVĚR | 74 |
| SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY..... | 76 |
| SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK..... | 78 |
| SEZNAM OBRÁZKŮ | 80 |
| SEZNAM TABULEK..... | 82 |
| SEZNAM PŘÍLOH..... | 83 |

ÚVOD

S rozvojem polymerních materiálů se vyvíjí nejrůznějších technologie pro jejich zpracování a úpravu do požadovaných tvarů. Jednou z těchto technologií je svařování vycházející ve své podstatě z procesu svařování kovů. Jedná se o efektivní technologii, pomocí které lze vytvořit velmi pevný, nepropustný a nerozebíratelný spoj. Jednotlivé metody svařování polymerů se od sebe liší podle způsobu dodání energie do místa svaru. Požadavek na rozvoj ultrazvukové technologie svařování vychází ze skutečnosti, že některé složité a velké tvary nelze vyrobit v jednom kuse. Z tohoto důvodu se spojují menší polotovary do složitějších celků.

Teoretická část práce se zaměřuje zejména na aktuální metody ultrazvukového svařování a vysvětluje fyzikální podstatu vzniku mechanicko-akustického vlnění. Popisuje možnosti využití ultrazvukového svařování při výrobě dílů z vhodných typů termoplastů.

Experimentální část se zabývá návrhem a úpravou svařovacího přípravku, přípravou vzorků, optimalizací procesu svařování, charakterizací vzhledu a vlastností vytvořených svarů. Vlastní spojování zkušebních vzorků bylo provedeno za pomoci svařovacího přípravku osazeného ručním svařovacím zařízením s nastavitelnými procesními parametry. V rámci experimentálních výsledků jsou diskutovány optimální svařovací parametry pro vybrané druhy polymerů. Hodnocena je svařitelnost jednotlivých materiálů za daných podmínek, velikost svařované plochy a úprava konce svařovaných vzorků. Pomocí tahových zkoušek byly u jednotlivých spojů zjištěny maximální únosnosti, které jsou v rámci diskuze dány do souvislosti s použitým typem spojovaného materiálu a nastavením procesu svařování.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 SVAŘOVÁNÍ PLASTŮ

Svařování plastů je technologie trvalého spojení součástí a dílců z termoplastických umělých hmot za použití tepla. Tato technologie se hojně využívala už v 60. letech 20. století pro domovní přípojky. Později se začaly svařovat podlahové krytiny zejména do laboratoří a zdravotnických zařízení. Podstatný rozvoj používání plastů v České republice nastal v 90. letech 20. století, kdy se na zdejším trhu objevila celá řada nových materiálů a technického zařízení. Vedle svařování se plasty mohou spojovat lepením nebo mechanickým spojováním, přičemž každá z těchto technologií má opodstatnění pro určitou aplikaci a typ materiálu. [1]

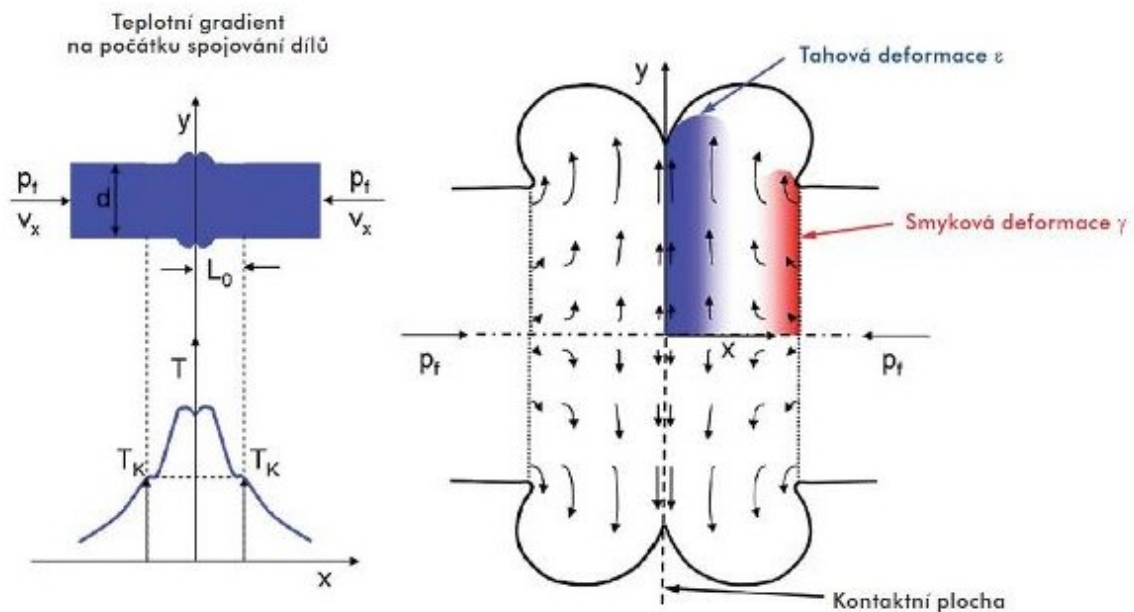
Svařováním termoplastických materiálů se rozumí vytvoření nerozebíratelného spoje při použití tepla a tlaku v určeném čase. Při spojování musí být plastické hmoty v tvárném stavu. Využití technologie svařování termoplastů přináší snížení investičních nákladů za náročné technologie nebo technologické modifikace stávajících nástrojů. Výroba tvarově a rozměrově složitých plastových dílů je nahrazena podstatně zjednodušenou výrobou polotovarů, které se následně svařují. Výběr konkrétní metody svařování plastů závisí především na hospodárnosti, dosažitelné pevnosti svarových spojů a přesnosti svařenců. S plastovými svařenci se lze setkat ve všech odvětvích průmyslu. Ve stavebnictví jsou nejčastěji používané technologie svařování pomocí extrudéru, topnou spirálou, horkým tělesem nebo horkým plynem. Automobilní průmysl nejčastěji využívá vibrační svařování, ultrazvukové, ale i svařování horkým tělesem. Svařování ultrazvukem se nasazuje také u techniky používané v medicíně, za předpokladu využití svařenců v biologicky aktivních prostředích, kde lepené spoje z hlediska zdravotní nezávadnosti nelze použít, nebo nevykazují požadovanou životnost. Dalšími technologiemi, které k ohřevu svarových ploch využívají záření, jsou svařování infračerveným paprskem a laserového svařování. [2, 3]

Svařitelnost

Použití konkrétní technologie je závislé především na velikosti série, geometrii dílců, materiálu nebo kombinaci svařovaných materiálů. Z fyzikálního hlediska je možné svařovat pouze termoplasty, až na výjimky kombinace reaktoplastů a termoplastů tvořící pevnou vazbu mezi svařovanými díly. Vzájemně lze svařovat různé termoplasty, ale většinou není dosaženo pevnosti jako u stejných materiálů. Nadmolekulární struktura nedovoluje vzájemně svařovat materiály s amorfni a semikrystalickou strukturou. [1]

Svarová zóna

Svařování je tepelně reologický proces, který se skládá z ohřevu na danou teplotu a spojení dílů pod tlakem. Zvyšující se teplotou dochází k tečení taveniny, ta se pak pod tlakem ochlazuje a tuhne, tím dochází k tvorbě struktury materiálu, dochází k tepelné kontrakci, rekrytalizaci, vnitřního pnutí a staženin. Při tlakovém svařování dílů dochází k deformaci v místě spoje. [2]



Obr. 1. Teplota a napětí ve svarové zóně [3]

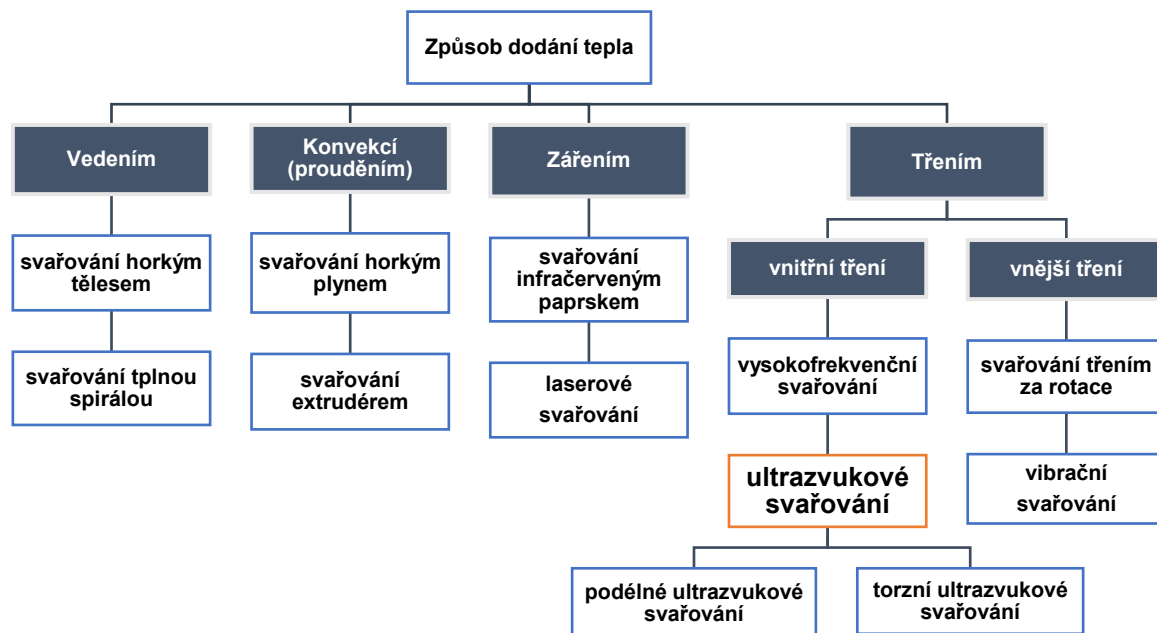
V místě spoje dochází ke vzniku charakteristických napěťových oblastí. Smykové napětí a deformace vznikají na kontaktní ploše. S rostoucí vzdáleností od osy symetrie tloušťky svařovaného dílu rostou také tahové deformace. Ty jsou způsobeny rozdílným stupněm orientace makromolekul. Smykové deformace tvoří kritickou oblast na rozhraní taveniny a tuhého materiálu. Dochází k toku taveniny kolmo od neutrální osy směrem ke krajním vrstvám, následkem je výrazná orientace makromolekul, které nemohou krystalizovat v běžných krystalických útvarech, nebo nemohou zaujmout energeticky výhodnější postavením ve formě globulí.

Pevnost

Při správně provedeném svaru dochází k porušení svařence v oblasti blízké smykové deformaci. Pevnost svarového spoje určuje nejen technologie, ale i typ svařovaného materiálu, přičemž není dosaženo pevnosti původního materiálu. Původní pevnosti se lze nejvíce přiblížit u neplněných polymerů při optimálních procesních podmínkách. Rozhodující napěťový stav ve svarové zóně je dán podmínkami svařovacího stroje, v případě ruční metody podmínkami zadané obsluhou. Vysokými svařovacími tlaky se zvyšuje smykové napětí a také výronky taveniny ze svarové zóny. Materiály plněné vlákny s orientací kolmo k rovině svaru mají sníženou pevnost svaru. [3]

Rozdělení

Technologie svařování lze rozlišit podle způsobu dodání tepla do místa svaru. Při výběru konkrétní metody svařování závisí na druhu použitého materiálu, geometrii svarových dílů, požadované kvalitě spoje a hospodárnosti.



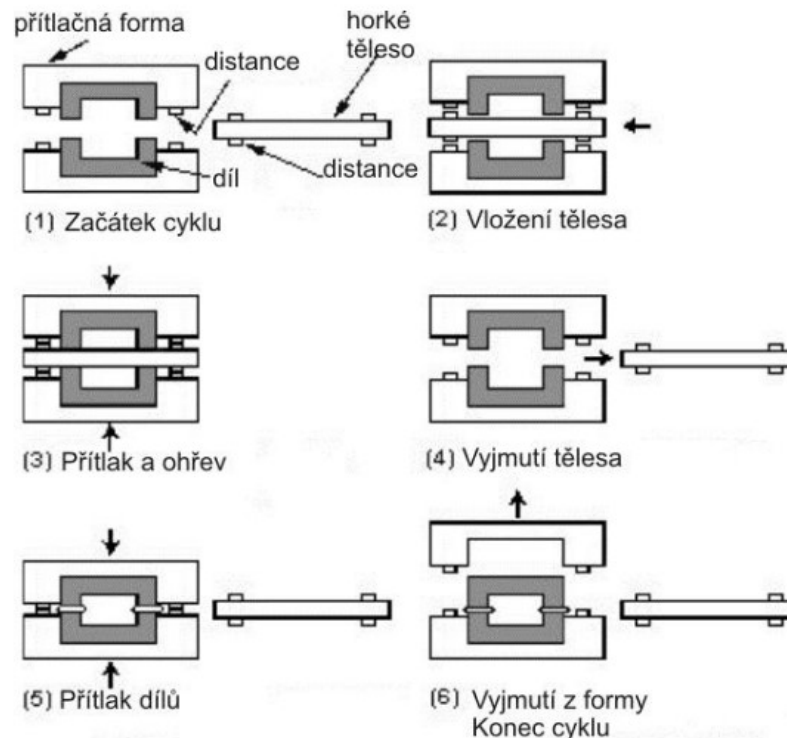
Obr. 2. Rozdělení dle způsobu dodání tepla

1.1 Svařování horkým tělesem

Při svařování horkým tělesem je potřebného tepla generováno pomocí tepelných patron. Topné tělesa musí zajišťovat rovnoměrné rozložení teplot po celé pracovní ploše. Z tohoto důvodu jsou použity materiály s nejvyšší hodnotou tepelné vodivosti. V závislosti na podmínkách a svařovaném dílu jsou využívány různé druhy telených nástavců. Při svařování jsou tvarové plochy nejdříve nahřívány pomocí kontaktního nebo radiálního tepla a následně tlakovou silou spojeny. Nejčastěji používaná metoda je pomocí kontaktního ohřevu. Jedná se o proces rozložený do více kroků, kdy ohřev a následné svaření je časově oddělené. Svařované díly se uchytí do fixačních loží a ohřejí elektrickým tepelným tělesem. Proces svařování začíná kontaktem svařovaných ploch na tepelném tělese. Svařování se dělí na fáze ohřevu, oddálení od tělesa a spojení.

Při kontaktním ohřevu se teploty pohybují v rozmezí od 180 °C do 270 °C. Jako nástroje se používají nástavce nebo výměnné desky s PTFE povrchovou úpravou. Pohon svařovacích strojů s horkou deskou zajišťují hydraulické, pneumatické nebo servomotorové jednotky.

[2, 11]



Obr. 3. Princip svařování horkým tělesem [2]

Výhody:

- vysoká pevnost svarů, nízké pnutí
- vhodné pro svařování rozdílných materiálů
- stejnoměrný přetok materiálu
- vhodné pro velké série

Nevýhody:

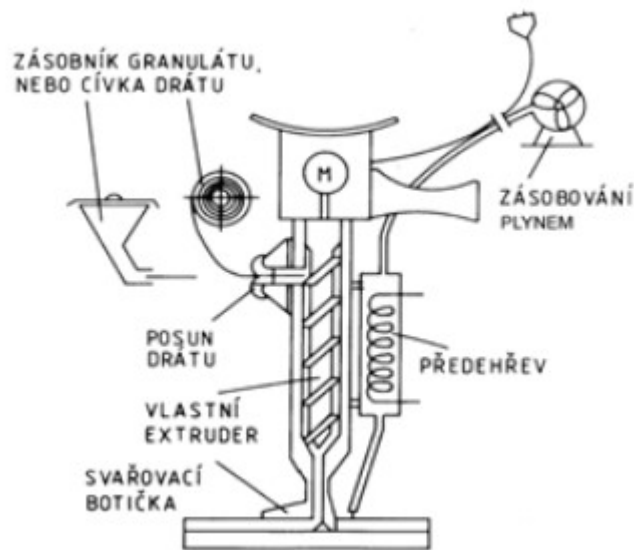
- dlouhé procesní časy
- nákladná výroba nástrojů
- vysoká spotřeba energie
- ulpívání materiálu na horkém tělese

1.2 Svařování extruderem

Podstatou metody je ohřev svařovaného materiálu horkým plynem a vtlačování zplastikovaného přídavného materiálu do místa svaru pod tlakem. Svařuje se za pomoci druhově shodného přídavného polymeru, který se vtlačuje jako proud taveniny z plastikační jednotky extrudéru. Přídavný materiál musí být dokonale homogenní a zplastifikovaný. Pro kvalitní svár je nutné správné generování tlaku, které se liší podle různých postupových variant.

Vytlačovacím svařováním se spojuje velká skupina polotovarů z termoplastů, jako jsou potrubí, potrubní tvarovky, konstrukce z desek, utěšňovací pásy, nejběžněji z materiálů PP, PE, PVC. Tato metoda je vhodná k opravám plastových dílů automobilů a motocyklů.

Základem vytlačovacího svařovacího stroje je plastikační jednotka, kde dochází k ohřevu a homogenizaci přídavného materiálu na svařovací teplotu. Vytlačování přídavného materiálu se provádí pomocí přítlačné botičky, u některých konstrukcí ručně. Současně s vytlačováním zplastikovaného přídavného materiálu a vyvíjením tlaku ve svaru je nutné předeřhřivat základní materiál horkým vzduchem nebo jiným tepelným zdrojem. [2, 11]



Obr. 4. Princip svařování extruderem [2]

1.3 Svařování infračerveným paprskem

Infračervené záření se může odrážet, absorbovat nebo procházet skrz materiál. Záření, které je absorbováno se nazývá infračervené spektrum. To je shodné s vlnovou délkou molekulárního kmitočtu materiálu, a tím dochází k zahřívání materiálu. Výsledek svařování tedy závisí na velikosti absorbovaného záření. Absorpční vlastnosti jsou závislé na materiálu plastu, jeho tloušťce, obsahu plniv a přítomnosti pigmentu. Krátkovlnné záření proniká hluboko do materiálu a zajišťuje rovnoměrné ohřívání. Středně vlnné záření je absorbováno povrchovou vrstvou materiálu, a tím dochází k ohřevu povrchu svařovaného dílu.

Technické plasty ABS, PA, PP, PMMA nebo PC z hlediska svého složení dostatečně absorbují infračervené záření. Platí pravidlo, čím je materiál tmavší a černější, tím dochází k větší absorpci.

Zdrojem infračerveného záření mohou být keramické, halogenové nebo fóliové zářiče. Výběr zdroje závisí na konstrukci svařovacího nástroje a materiálu plastu. Technologie se používá pro velkoplošné díly, jako jsou přístrojové desky, dveřní obložení, díly se složitými 3D svařovacími geometriemi, nádrže na palivo, vzduchové filtry, světla a domácí spotřebiče. [2]

Výhody:

- vysoká pevnost svarů
- vhodné pro svařování rozdílných materiálů
- bezkontaktní ohřev (nedochází k přichytávání taveniny)
- vhodné pro komplikované geometrie

Nevýhody:

- málo rozšířená technologie
- mírně delší časy (oproti ultrazvukovému svařování)
- životnost IČ zářičů

1.4 Svařování ultrazvukem

Při ultrazvukovém svařování termoplastických hmot dochází v místě svaru k natavení cíle- nou přeměnou ultrazvukové energie na teplo a tlak v jejich styčných plochách. Plastové díly fungují jako nosiče energie samotným dílem. Nejvhodnější jsou druhy plastů, které bezztrátově přenášejí vibrační energii až na styčné plochy.

Priváděná elektrická energie o vysoké frekvenci je v konvertoru převáděna na mechanické vibrace. Amplituda vibrací je pro svařování příliš malá. Zvětšení amplitudy je dosaženo zmenšením průřezu v jedné polovině sonotrody. Hmotnost dolní poloviny sonotrody je nižší než hmotnost horní poloviny.

Svařování ultrazvukem je v mnoha ohledech podobné vysokofrekvenčním metodám nebo svařování třením. Jsou zde však výhody v podobě nezávislosti od dielektrických ztrát a dielektrické konstanty svařovaných materiálů. Další předností tohoto procesu je nezávis- lost na čistotě a vlhkosti svařovaných ploch v podobě vody, oleje, krému, šamponu. [5, 11]

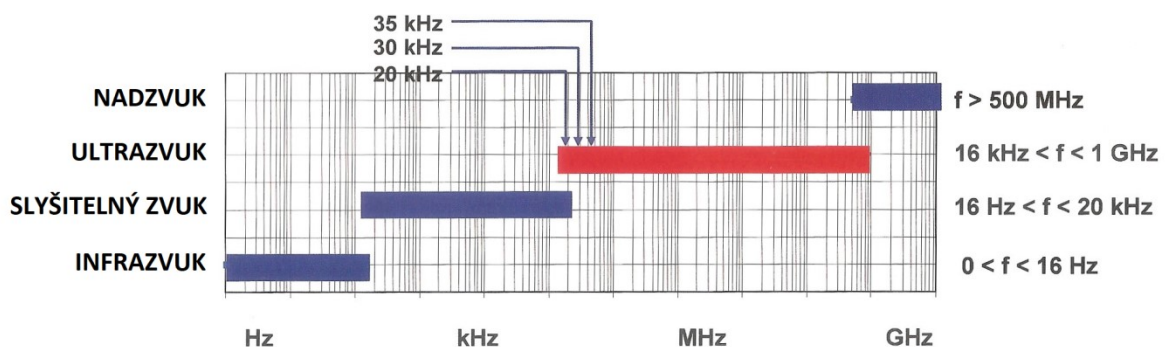
Výhody:

- nenáročnost na čistotu svařovaných ploch
- zlepšení hygieny a bezpečnosti práce
- zvýšené kvalita svařovaných dílů a jejich estetický vzhled
- možnost spojování i nesvařitelných materiálů pomocí ultrazvukového nýtování a vtlačování kovových součástí
- možnost mechanizace a automatizace práce

2 ULTRAZVUK

Ultrazvuk spadá do oblasti akustiky a je popsán jako kmitavá mechanicko-akustická energie, která se nachází ve frekvenčním pásmě nad slyšitelností lidského ucha. V ultrazvukové technice se tato hranice stanovila přibližně na 20 kHz. Účinky ultrazvukové energie při šíření ve sledovaném prostředí závisí na intenzitě (amplitudě výchylky), frekvenci kmitů a vlastnostech prostředí. Selektivní absorpce ultrazvukové energie při svařování plastů představuje úsporu energie v širokém rozpětí ultrazvukových strojů a zařízení nahrazujících lepení nebo svařování teplem. [4]

V přírodě jej využívají netopýři k orientaci v prostoru a delfini k vzájemné komunikaci. V technické praxi se ultrazvuk osvědčil při lékařské diagnostice, kontrole jakosti materiálů, měření, orientaci lodí na moři, čištění, svařování kovů a svařování plastů.



Obr. 5. Rozdělení zvuku [6]

2.1 Fyzikální podstata

V ultrazvukovém poli částice hmoty konají periodické kmitavé pohyby, které jim jsou vnuceny zdrojem energie. Každá částice je ovlivňována kmitavým pohybem sousedních částic, které se navenek projevují jako vlnový pohyb všech částic. Pokud se kmitavý pohyb opakuje v určitém časovém intervalu, označuje se jako periodický nebo harmonický pohyb. [4]

Převrácená hodnota periody T je označována jako frekvence f , jež je definována jako počet kmitů hmotného bodu za jednotku času.

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

T (s) – perioda

f (Hz) – frekvence

Vzdálenost jednoho kmitu vlnění se nazývá vlnová délka λ , vypočítá se pomocí vztahu (2).

$$\lambda = \frac{v}{f} = v \cdot T \quad (2)$$

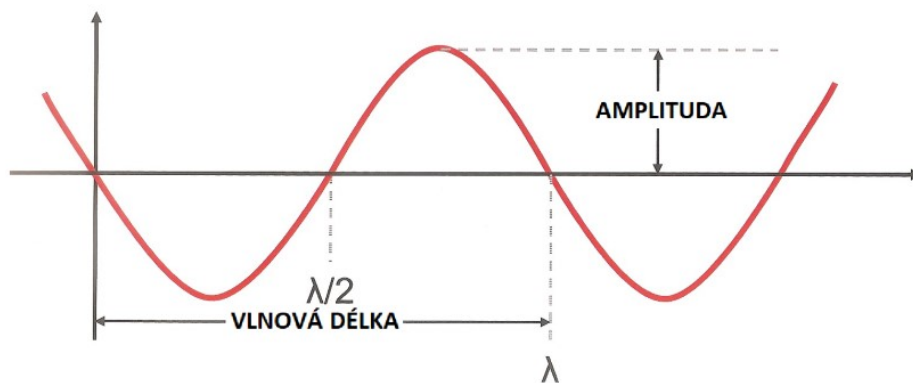
λ (m) – vlnová délka

T (s) – perioda

f (Hz) – frekvence

v ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) – fázová rychlost

- rychlost, kterou se šíří vlnění daným prostředím
- závisí na vlastnostech pružného prostředí
- u příčného vlnění má vliv na rychlost šíření modul pružnosti ve smyku
- u podélného vlnění má vliv na rychlost šíření hodnota modulu pružnosti v tahu [7]



Obr. 6. Vlnový pohyb [6]

Tvar a druhy vln

Podle směru kmitání částic prostředím je vlnění rozdělováno na podélné a příčné. Podle tvaru vyzářující plochy zdroje vlnění a způsobu šíření vln vznikají tři základní tvary vln: rovinné, kulové a vlnové. V ohraničeném prostředí vznikají další typy ultrazvukových vln transformací podélných nebo příčných vln.

Ohybové vlny

Vyvolávají namáhání v ohybu a šíří se v prostředí ohraničeném jedním nebo dvěma rozměry. Tohoto jevu se využívá pro odstraňování nečistot z dílů, která mají tloušťku menší, než

je vlnová délka kmitů. Ohybové vlny se využívají také pro svařování tyčí o průměru menším, než je vlnová délka.

Radiální vlny

Šíří se v ohraničeném prostředí dvěma rozměry. Vznikají a šíří se ve válkách, tyčích a kruhových deskách s konečným průměrem. V některých případech mohou být zdrojem válcových vln. Při šíření v tyčích vznikají také podélné vlny.

Torzni vlny

Mohou se vybudit a šířit v prostředí ohraničeném dvěma rozměry. Těmito prostředím mohou být tyče, válce, trubky a podobné útvary vyvolávající torzní namáhání. Využití nacházení v oblasti výkonného ultrazvuku při ultrazvukovém svařování obvodového svaru. [5, 7]

2.2 Ultrazvukové svařování

Ultrazvukové svařování patří mezi známé postupy spojování plastických hmot, při kterém dochází k podstatnému zkrácení výrobního procesu. Od ostatních svařovacích a spojovacích postupů se liší tím, že teplo potřebné ke spojení dvou plastických materiálů je získáváno čistě mechanickými kmity mezi spojovanými díly. Určujícím faktorem při použití ultrazvukového svařování je absorpční schopnosti svařovaného materiálu. Mechanické ultrazvukové kmity určují svařovací schopnosti jednotlivých druhů polymerních materiálů. Tato metoda může být použita i pro takové polymerní materiály, které doposud s ohledem na tloušťku mohly být jen stěží svařeny nebo vůbec. Absorpční možnosti většiny termoplastů jsou vynikající, umožňují přeměnu mechanických kmitů na teplo. Lze tedy většinu těchto materiálů vzájemně spojovat, v některých případech také mezi sebou. [5]

Technologické parametry

Z fyzikální podstaty ultrazvukového svařování termoplastů kvalita provedeného spoje závisí na:

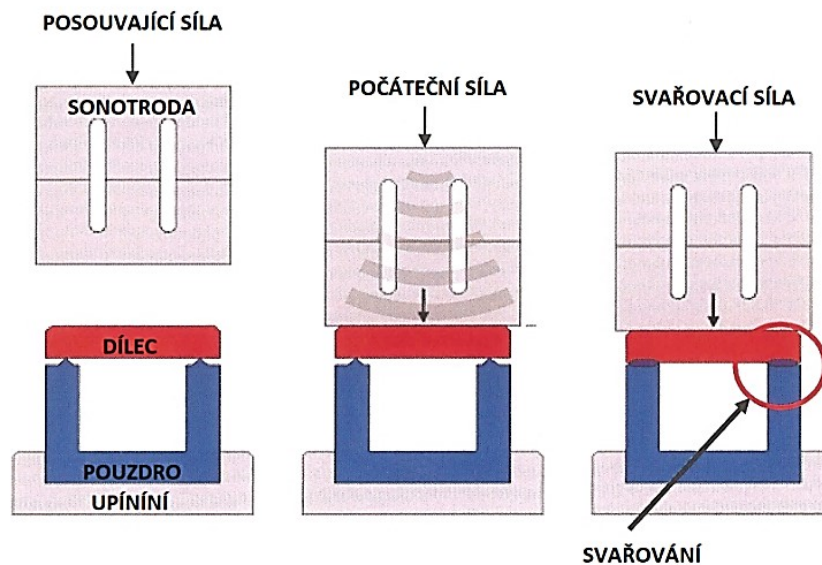
- svařitelnosti materiálů
- velikosti amplitudy výchylky svařovacího nástroje
- velikosti akustické vazby svařovaného nástroje se svařovaným materiálem

Tyto veličiny při dané frekvenci určují množství přivedené akustické energie po dobu svařovacího procesu.

Veličiny, které určují svařovací podmínky:

- amplituda výchylky svařovacího nástroje A
- přítláčná síla F
- frekvence f
- svařovací čas t

Těmito hlavními parametry je možné v určitém rozsahu regulovat svařovací proces. Cílem je optimalizace, reprodukovatelnost a kvalita provedeného spoje. Při zvoleném druhu svařovacího nástroje jsou tyto zvolené parametry nejdůležitějšími veličinami ve svařovacím procesu, jelikož určují mechanický výkon rozptýlený v zátěži v místě svaru. Spotřebovaný mechanický výkon na spojení dvou materiálů je závislý na druhé mocnině amplitudy svařovacího hrotu a frekvence ultrazvukové svařovací soustavy. Tento vztah určuje vhodnou frekvenci kmitavé soustavy pro svařování velmi tenkých nebo širokých dílů. Musí platit podmínka, že jeden rozměr ze svařovaných dílů musí být podstatně větší, než je maximální hodnota amplitudy výchylky svařovacího nástroje. [5]

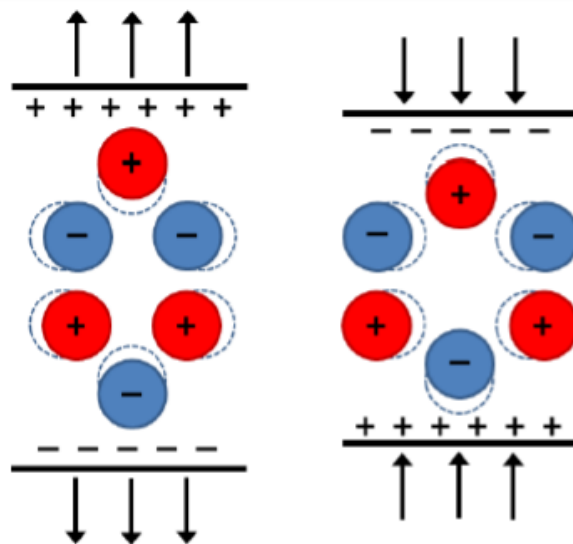


Obr. 7. Postup svařování [6]

Ultrazvukové zařízení pracuje převážně na frekvencích kolem 20 kHz, 30 kHz a 35 kHz. Amplituda nástroje bývá v rozsahu 5 μm až 50 μm . Energie o požadované frekvenci je vyráběna vysokofrekvenčním generátorem, a je přiváděna do měniče kmitů, který převádí elektrické kmitů v mechanické. Měnič kmitů bývá založen na principu piezoelektrickém nebo magnetostrikčním. Uzpůsobením měniče lze dosáhnout směrového účinku toku mechanických kmitů. [3]

Piezoelektrický princip

Jedná se o schopnost krystalu při jeho deformaci generovat elektrické napětí. Případně opačný jev, kdy se krystal pod elektrickým napětím deformuje. Vyskytuje se pouze u středově nesymetrických krystalů. Deformací krystalu se ionty s opačnými náboji posouvají v krystalické mřížce, a tím dochází k přesunu elektrického těžiště kladných a záporných iontů. V nedeformovaném stavu jsou tyto těžiště ve stejném bodě. Přesunem těžiště vznikne na plochách krystalu elektrický náboj. V opačném piezoelektrickém jevu, který se nazývá elektrostriktce, působí elektrické pole na ionty, což vede k deformaci krystalu. Vlivem vysokých teplot dochází u materiálů ke ztrátě piezoelektrických vlastností, jelikož dochází k narušení uspořádání iontů. Tato změna nastává skokově. Každý materiál má charakteristickou přechodovou teplotu nazývanou Curieova teplota. Přímý i obrácený piezoelektrický jev se využívá při generování ultrazvuku. [8]



Obr. 8. Postup svařování [8]

Magnetostrikční jev

Princip magnetostrikce spočívá ve změně rozměrů feromagnetických materiálů, jako jsou železo, nikl a kobalt, umístěné v magnetickém poli. Vychází ze dvou magnetomechanických jevů. Magnetostrikční Wiedemannův jev způsobuje namáhání krtem dlouhé a tenké tyče z feromagnetického materiálu umístěné v podélném magnetickém poli. Villariho jev spočívá ve změně magnetických vlastností materiálu feromagnetické tyče, které jsou vyvolány její deformací v podélném směru. [9]

Konstrukce svarového místa

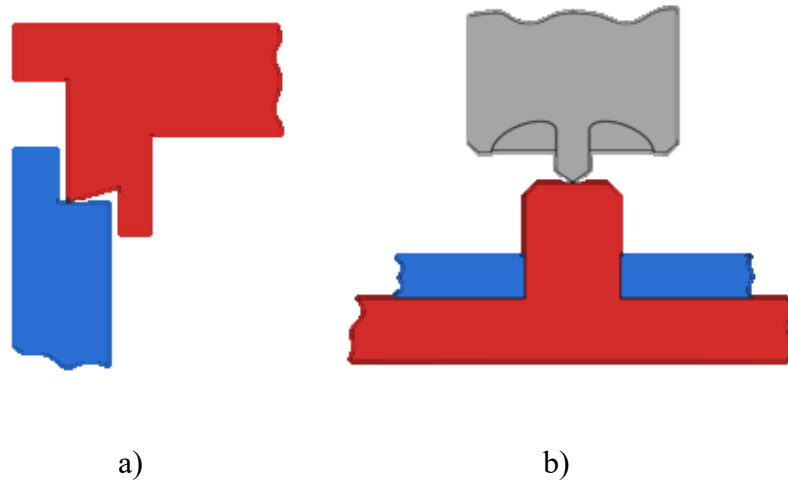
Dobré výsledky svařování s ohledem na pevnost, nepropustnost a vizuální dojem, lze dosáhnout zejména tehdy, když jsou spojované díly navrženy v souladu s procesem a materiálem. To znamená, že díly jsou od počátku navrženy tak, aby zaostřovaly ultrazvukové vlny na požadované místo. Mechanická energie přenášená od měniče na sonotrody má obvykle formu stojaté, longitudiální vlny a projevuje se jako bržděná vibrace ve směru podél nástroje na svařovaný materiál. Kolmým působením ultrazvukových kmitů na rovinu spoje při současném působení přitlačné síly se vytváří nerozebíratelný spoj. Přitlačná síla se nechává působit ještě po ukončení ultrazvukových kmitů, tak aby spoj přešel z plastického stavu do tuhého. Celkový čas obou operací je velmi krátký, obvykle nepřesahuje 2 až 3 s. [14]

Oblast svaru

Při svařování plastických hmot ultrazvukem lze pozorovat v místě svaru roztavený materiál. Molekuly se vlivem vibrací zahřívají a dochází k jejich rozkládání. Při tom vzniká značné teplo, které umožňuje jednostranné svařování. Část plastického materiálu, která je v přímém kontaktu se sonotrodou se rychleji a silněji ohřívá než ostatní části materiálu. Tohoto jevu se využívá při svařování materiálu s rozdílným bodem tání. Materiál s vyšším bodem tání bývá v přímém kontaktu se sonotrodou. Nárůst teploty materiálu ležícího přímo pod sonotrodou je velmi rychlý. [4]

Zaměřovač energie

Pro rychlejší a cílenou iniciaci svařovacího procesu se používají tvarové zaměřovače energie. Velká styčná plocha je kontraproduktivní, jelikož vyžaduje vysoký výkon a dochází k nerovnoměrnému svařování po ploše, což způsobuje menší pevnost spoje. Dle možností a požadavků lze zvolit různé tvary nebo rozměry zaměřovače. Zaměřovač energie ve tvaru kužele nebo smyčky, zaměřovač ve tvaru stříšky, hranové kontakty pro jednoduché nebo dvojité smykové spoje. Zaměřovače lze také kompenzovat vhodnou úpravou sonotrody. Objem výstupku se určuje s ohledem na svařovanou plochu, přičemž však hmota nesmí vytéct mimo spoj. Klasický typ svařovacího výstupku je trojúhelníkového tvaru s vrcholovým úhlem 60° a výškou v rozsahu 0,3 až 0,6 mm. Lépe předcházejí vytékání roztaveného materiálu mimo spoj. Svařovací výstupek se volí pouze na díl, který je ve styku se svařovacím nástrojem. [10]



Obr. 9. Tvarové úpravy kontaktní plochy [6]

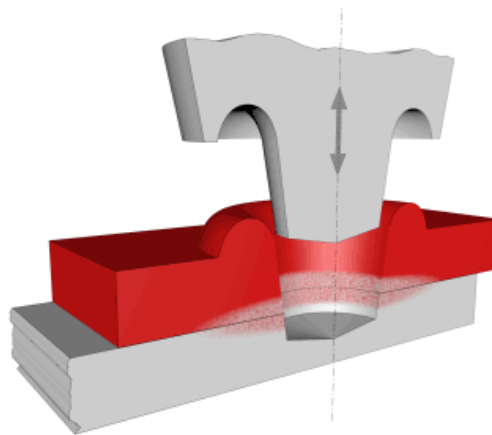
a) energetický zaměřovač b) vhodná úprava sonotrody

2.3 Metody svařování

Obrobky ze semikrystalických plastů se při svařování chovají odlišně od amorfních plastů. Podélnými a torzními metodami lze dostáhnout velmi rozdílných svarů. Ultrazvukové svařování splňuje všechny požadavky na zpracování vícevrstvých materiálů. Zvláštní výhodou je přímý přenos ultrazvukové energie přes nejrůznější vrstvené konstrukce až na vnitřní těsnicí vrstvu. V důsledku třecího tepla vzniká mikroskopická tavenina představující vibrační bariéru, ve které dochází k pohlcování vibrační energie a její přeměně na teplo. To následně způsobí roztavení oblasti svaru, a tedy vznik molekulárního spojení. Svařované plastové díly musí mít zpravidla obrysy svarů, které odpovídají druhu materiálu a požadavkům na svarový šev. Při zatařování pomocí ultrazvukové technologie se potřebné teplo generuje výlučně v blízkém okolí zatařovaného dílu. Teplo se generuje přímo mezi spojovanými díly, což znamená, že není potřebný externí přísun tepla. Nástroje používané během svařovacího procesu se nezahřívají. Odvod tepelné energie do výrobku je velmi malý. Přestup teploty mezi spojovanými díly probíhá velmi rychle. Výsledkem je velmi dobrá pevnost provedeného svaru. [15]

Bodové svařování

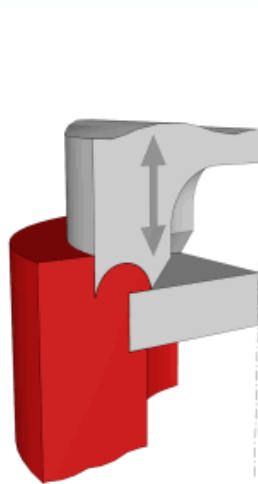
Ultrazvukové bodové svařování se používá převážně v případech, kdy se svařují ploché výlisky bez přípravy svaru. Jsou to například polotovary vyráběné vyfukováním, protlačováním, velkoplošným lisováním a výlisky tvarované za tepla. Hrot sonotrody proniká horním dílem do spodního. Na styčných plochách se vytváří teplo, v důsledku čehož dochází k plastifikaci a následnému svaření materiálu. Vytlačený plast částečně teče směrem nahoru, kde vytváří kruhovou vyvýšeninu, a částečně se shromažďuje v rovině mezi vzorky a dochází k selektivnímu spojení. Na zadní straně spodního dílu nejsou téměř žádné známky svařování. Díly je nutné před svařováním vhodně chytit pomocí přípravku nebo upínacího zařízení. Tloušťka dílu, který je v kontaktu se sonotrodou nesmí překročit 8 mm. Bodové svařování lze provádět pomocí přenosné ruční svařovací pistole. [10]



Obr. 10. Bodové svařování [10]

Přírubové svařování

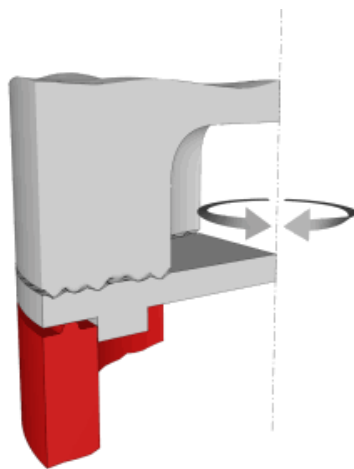
Stejně jako při zpracování kovů lze také díly z plastů spojovat přírubami. Tímto způsobem lze navzájem spojovat komponenty z různých materiálů s různými vlastnostmi. Sonotrodu je potřeba vést v ose se svařovanými díly, aby došlo k plastifikaci dané části. Příruby lze vytvořit několika způsoby, například vytvarováním hran, kolíků, výstupků a jiných spojovacích prvků. Příruby vytvářené ultrazvukem jsou mimořádně hospodárné. Doby zpracování jsou srovnatelné s obvyklými cykly ultrazvukového svařování výlisků. Při přírubovém připojování skleněných dílů se sonotroda nesmí dostat se skleněným dílem do styku. [10]



Obr. 11. Přírubové svařování [10]

Torzni svařování

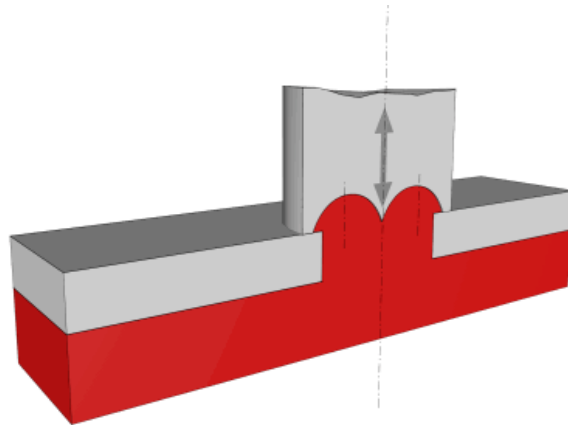
Také při této metodě je uspořádání sonotrody a svařovaných dílů svislé, ale proces svařování je odlišný od klasické metody. Jedná se o druh vysokofrekvenčního třecího svařování, kde se vibrace aplikují tangenciálně. Vodorovný pohyb horního dílu způsobuje tření mezi oběma spojovanými díly a díky vysokofrekvenčním vibracím, amplitudě a tlaku vzniká tavenina. Tangenciálním pohybem horního dílu nedochází k ultrazvukovému namáhání spodního dílu. Z tohoto důvodu je torzní metodu možné použít v aplikacích, kde dochází k dodatečným vibracím v bezprostředním okolí ultrazvukového sváru, které by mohly poškodit citlivé součástky, například tenké fólie, látky nebo elektroniku. Za určitých podmínek lze tuto metodu použít i ke vzájemnému spojení různých druhů plastů. [15]



Obr. 12. Torzní svařování [15]

Nýtování

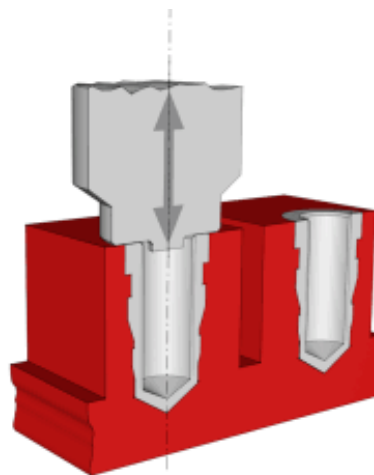
U ultrazvukového nýtování slouží sonotroda podobně jako u ultrazvukového svařování k přenosu mechanické vibrační energie na trn sonotrody. Jedná se o nýtovací nástroj vyrobený podle požadovaného počtu kolíků, které je potřeba snýtovat jediným zdvihem. Přípravky s více hlavami se používají k nýtování velkých součástí, jako jsou například palubní desky automobilu.



Obr. 13. Nýtování [10]

Zatavování kovových dílů

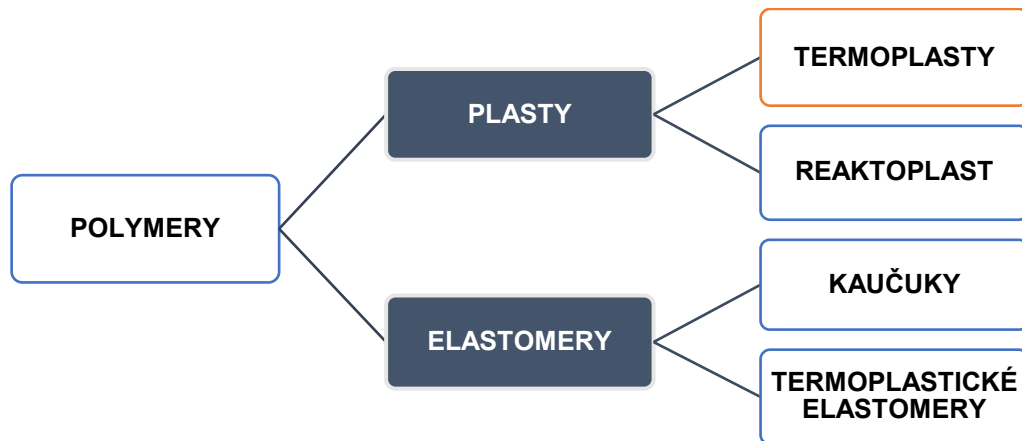
Do termoplastů lze ultrazvukově zatavit závrtné šrouby, závitové vložky nebo jiné kovové díly. V závislosti na velikosti a tvaru těchto kovových dílů lze dosáhnout vysoké stability a pevnosti v krutu. U více dílů je možné v rámci jediné operace zatavit současně několik součástí pomocí sestavené sonotrody.



Obr. 14. Zatavování kovových dílů [10]

2.4 Materiály

Polymerní materiály jsou chemické látky s velkou škálou vlastností. Ve svých makromolekulách obsahují zejména atomy uhlíku, vodíku, kyslíku a dalších prvků jako jsou dusík nebo chlór.



Obr. 15. Rozdělení polymerů

Polymery se rozdělují na plasty a elastomery. Plasty se dále dělí na reaktoplasty a termoplasty. Termoplasty jsou zpracovávány tavením a tvarování. Jsou snadno svařitelné pomocí ultrazvuku. Reaktoplasty, které se vyrábí vytvrzováním, nejsou ultrazvukově svařitelné. Elastomery jsou plasty zpracované síťováním, proto na ultrazvuk nereagují.

Při svařování plastů je důležitým kritériem použitý materiál. Termoplastické materiály mohou být homogenně spojeny. Ale výjimku tvoří například termoplast PTFE, který není svařitelný.

Některé termoplasty jako jsou PC, PMMA a ABS mohou být podmíněně svařeny mezi sebou. Při nýtování, vroubkování nebo přírubovém spojování se mohou používat různé kombinace materiálů s termoplasty. Rovněž je možné spojovat tenké materiály, jako jsou PET filmy nebo membrány s pevnými plastovými díly. [15]

Pevnost svarů závisí na energii kmitů, době jejich působení, velikosti přitlačné síly a na čistotě svařovaných ploch. Aby nedocházelo ke ztrátě energie při průchodu materiálem, musí být sonotroda co nejbliže u místa svaru. U amorfních plastů je dovolená vzdálenost až 20 mm od místa svaru, tím se rozumí svařování v dalekém poli. Svařování v blízkém poli je vhodné pro součásti z krystalických plastů, kde je maximální dovolená vzdálenost 5 mm. [19]

Tab. 1. Svařitelnost vybraných druhů termoplastů ultrazvukem [4]

| Materiál | Svařování | | Nýtování | Zalisování |
|-------------------------------------|----------------|----------------|-------------|-------------|
| | V blízkém poli | V dalekém poli | | |
| Polystyrén PS | velmi dobře | velmi dobře | velmi dobře | velmi dobře |
| Akrylonitrilbutadien- styren ABS | velmi dobře | dobře | velmi dobře | velmi dobře |
| Polymethylmetakrylát PMMA | velmi dobře | velmi dobře | velmi dobře | dobře |
| Polykarbonát PC | velmi dobře | velmi dobře | velmi dobře | velmi dobře |
| Polyamid PA | dobře | dostatečně | dobře | dobře |
| Polyvinylchlorid PVC | dobře | dostatečně | velmi dobře | velmi dobře |
| Polyetylen PE | dobře | nedostatečně | dobře | dostatečně |
| Polypropylen PP | dobře | nedostatečně | dobře | dostatečně |

Předpokladem pro vytvoření kvalitního spoje při kombinaci materiálů je jejich přibližně stejná teplota tavení a chemická slučitelnost materiálů.

Rozhodující vlastnosti materiálu:

- E – modul pružnosti: určuje množství přijaté energie
- Utlumení: určuje množství přijatého tepla
- Bod tání: určuje množství potřebného tepla
- Tekutost taveniny: určuje vytékání taveniny ze svarové zóny

Negativně ovlivňují svařování:

- přísady (retardéry hoření)
- vlhkost (zejména u polyamidu)

Pozitivně ovlivňuje svařování:

- skleněná vlákna
- skleněná kuličky

Tyto výztužné materiály zlepšují zvukovou vodivost zejména u semikrystalických plastů. U skleněných vláken je důležitá orientace v místě svaru. Nevhodná orientace může způsobit zmenšenou pevnost svarového spoje. [6]

Termoplasty

Polypropylen – PP

Jedná se o semikrystalický středně pevný a houževnatý materiál s hustotou $\rho = 900\text{--}910 \text{ kg/m}^3$. Často bývá modifikován pomocí výstužných plniv, převážně pak skelnými vlákny nebo kuličkami, které zajišťují zvýšení mechanických vlastností. Z tohoto důvodu v posledních letech vzrůstá využití polypropylenu. Dalším důvodem je také snadná recyklovatelnost. Kompozity na bázi polypropylenu dosahují mechanických vlastností konstrukčních plastů.

Jedná se o tuhý materiál, vykazující kríp. Kolem 0°C prudce klesá houževnatost a rázová pevnost. Použitelný do teploty 130°C . Odolává chemickým látkám, nenavlhá, lze barvit a je ekonomicky dostupný.

Mezi nevýhody polypropylenu patří zejména hořlavost, pod bodem mrazu křehne, podléhá oxidaci a není vhodný k lepení.

Využívá se pro běžné nenáročné aplikace, jako jsou vlákna, obalová technika, domácí spotřebiče, v automobilním průmyslu zejména na přístrojové desky, nárazníky, lopatky ventilátoru, komponenty klimatizační jednotky, víka zavazadlového prostoru. Vhodný i pro některé konstrukční aplikace. [12, 13]

Polyethylén – PE

Při výrobě polyethylénu lze docílit dvou variant. Nízkohustotní, měkký, rozvětvený polyethylen (LDPE) se vyrábí vysokotlakou polymerací. Nízkotlakou polymerací lze vyrobit tvrdý lineární vysokohustotní polyetylen (HDPE).

Charakteristika – semikrystalický plast s nižší pevností a tuhostí, ale s velkou houževnatostí, spotřebitelský i konstrukční plast, $\rho = 920\text{--}960 \text{ kg/m}^3$.

Vlastnosti – je hořlavý, odkapává, vykazuje značný kríp. Vyniká velmi dobrými elektroizolačními vlastnostmi. Je možné ho modifikovat velkou řadou přísad. Výborně odolává rozpouštědlům. Má nízkou odolnost vůči UV záření a povětrnostním vlivům. Není vhodný k lepení.

Použití – v domácnosti pro misky, lahve, trubky, folie, palivové nádrže (HDPE), vhodný ke svařování. [12]

Polyvinylchlorid - PVC

Polymer s amorfni strukturou. Vyznačuje se vyšší pevností a tuhostí. Za nízkých teplot výrazně klesá tažnost a vrubová houževnatost. Hustota $\rho=1300-1400 \text{ kg/m}^3$. Teplota skleného přechodu T_g okolo $80 \text{ }^\circ\text{C}$. Neměkčený PVC je tvrdý, nažloutlý a průsvitný. Měkčený pak ohebný a tažný. Hoří obtížně a je samozhášivý. Nevyniká dobrými elektroizolačními vlastnostmi a není odolný vůči rozpouštědlům. Odolnost proti povětrnostním vlivům je lepší než u PE a PP. Je vhodný k lepení, není navlhavý a může se barvit. Lze svařovat pomocí horkého plynu nebo extrudérem.

Neměkčený PVC se používá pro výrobu trubek na dopravu kapalných látek, obaly potravin, izolační materiály, díly automobilu. Z měkčeného PVC se vyrábí fólie, desky, podlahové krytiny koženka. [12]

Akrylonitrilbutadienstyren – ABS

Jedná se o amorfni terpolymer. Kopolymerací akrylonitrilu, butadienu a styrenu je možné vytvořit materiál, který díky akrylonitrilové složce zvyšuje chemickou odolnost a současně vlivem butadienové složky zvyšuje houževnatost polystyrenu. Stále zůstává dostatečně pevný i tuhý. Je navlhavý. Stavbou a poměrem jednotlivých složek lze připravit kopolymer s velmi odlišnými vlastnostmi. Vyznačuje se dobrou odolností proti elektrostatickému náboji. Neprůhlednost ABS je způsobena heterogenní strukturou, přestože se jedná o amorfni plast.

Využití ABS je velmi široké. Používá se jako konstrukční plast ve strojírenství, automobilovém průmyslu a spotřebním průmyslu. Například skříně počítačů, monitorů, domácích spotřebičů. Speciálním použitím je stavba domovních odpadů díky tlumícím účinkům kaučuku. Je vhodný pro plnění ztužujícími přísadami, které zvýší mechanické vlastnosti. [12]

Polymethylmetakrylát – PMMA

Amorfni termoplast, známý jako organické sklo, tuhý a velmi pevný s nízkou tažností. Vyznačuje se výbornými optickými vlastnostmi s dokonalou propustností světla. Výrobně zdoluhavý proces se promítá i do nákladů.

Má dobré mechanické, optické vlastnosti a malý sklon ke krípu. Teplotní odolnost $65-70^\circ\text{C}$. Vyznačuje se dobrou odolností proti UV záření a povětrnostním vlivům.

Používá se pro výrobu krytů přístrojů, světlometů a ostatních světel, střechy hal nebo pro stavbu průhledných protihlukových stěn. [12]

Polykarbonát – PC

Amorfní termoplast s vyšší pevností, středně tuhý, dokonale průhledný konstrukční plast.

Vyznačuje se dobrými mechanickými vlastnostmi, vysokou rázovou a vrubovou houževnatostí. Nesnadno se zapálí. Odolává UV záření. Má trvalou teplotní odolnost do 100° C. Chemicky je méně odolný.

Využití pro panely karoserie, střešní lampy a dveřní osvětlení, zadní brzdová světla. Nově se aplikuje na boční okna automobilů. [12]

Polyamidy - PA

Jsou semikrystalické termoplasty s krystalickým podílem 20 - 40 %. Vynikají dobrou tuhostí a pevností. Teplotní odolnost je kolem 80° C. Polyamidy jsou navlhavé. Po vysušení vzrůstá tuhost a pevnost, ale klesá houževnatost a tažnost. Jsou méně odolné proti UV záření a povětrnosti. Konstrukční vlastnosti lze zlepšit přidáním skleněných nebo uhlíkových vláken. Polyamidy se vyznačují dobrými kluznými vlastnostmi. Číslicové označení polyamidů vyjadřuje počet uhlíkových atomů ve výchozích monomerech.

Používají se pro výrobu ozubených kol, kladek, řemenic. Vyztužené polyamidy lze použít na kryty motorů, ruční vrtačky, pedály. [12,13]

3 ZAŘÍZENÍ PRO SVAŘOVÁNÍ ULTRAZVUKEM

3.1 Svařovací systém

Kompletní ultrazvukový svařovací systém je složen z aktivních a pasivních součástí. Aktivní součásti generují zvukové vlnění a přenášejí ho na svařované součásti. Mezi aktivní členy patří ultrazvukový generátor, konvertor, amplitudová transformační jednotka a svařovací nástroj. Pasivní díly absorbují vytvořené vlnění a udržují svařované díly v dané poloze. Pasivním členem je pak držák svařovaných dílů. [5]

Generátor

Přeměňuje nízkofrekvenční energii střídavého síťového elektrického proudu na požadovanou vysokofrekvenční energii v oblasti ultrazvuku. Rozsah výstupní frekvence ultrazvukového generátoru je od 20 Hz do 40 Hz. Generátor chrání vibrační systém před přetížením, udržuje konstantní amplitudu a kompenzuje měnící se chování vibrací různých svařovacích nástrojů. Dokáže generovat výstupní výkony v rozsahu od 400 do 5000 W.



Obr. 16. Generátor [10]

Převodník – konvertor

Přeměňuje elektrickou energii na mechanickou vibrační energii. Měníče obsahují centrální strukturu s pevnou piezokeramickou čtyřdiskovou technologií. V důsledku elektrických impulzů dochází ke smršťování a roztahování křemíku. Pevný oddělovací princip umožňuje vysoké axiální a příčné síly. Speciálními výrobními postupy se dosahuje extrémně vysoké životnosti všech ultrazvukových měničů s konstantní amplitudou na výstupu. [5]



Obr. 17. Konvertor [6]

Amplitudový transformátor (booster)

Část, kde dochází k transformaci amplitudy, se často označuje jako posilovač. Zvyšuje nebo snižuje amplitudu, která přichází z převodníku. Slouží pro připojení sonotrody.



Obr. 18. Booster [6]

Sonotrody

Přenos kmitů na svařovaný díl zajišťuje mezičlen, kterým je svařovací nástroj. Nástroje pro ultrazvukové svařování se nazývají sonotrody. Jejich úloha není jen převod mechanické energie z měniče na zpracovávaný předmět, ale musí umožňovat zesílení přiváděných kmitů. Sonotrody mohou být různého druhu. Hlavní důraz je kladen na konstrukci a hlavně na použitý materiál. K výrobě se používají materiály jako je titan, slitiny olovo-zirkonititan, nerezová oceli nebo zvonová bronz. Úkolem sonotrod je zesílení amplitudy, a proto může při svařování docházet k rezonanci nástroje. Všechna moderní zařízení jsou vybavena automatickým doladovacím zařízením, která rezonance kompenzují. Sonotrody musí být podle potřeby vyměnitelné. Zvláštní požadavky jsou kladeny na spojení sonotrody a zesilovače. Vysoké mechanické zatížení vyžaduje, aby spojení bylo co nejméně ztrátové. Pevné spojení měniče a sonotrody může být provedeno letováním, při tom je nutné dbát na kvalitu stykových ploch. Ve spoji se nesmí nacházet nečistoty a bubliny po letování. Vlivem špatného spojení může dojít k zničení svařovacího nástroje. Pro snadnější výměnu nástroje může být použito spojení pomocí závitů nebo klínů. Exaktně propočtené sonotrody umožňují až desetinásobné zesílení amplitudy. [3, 4]



Obr. 19. Sonotrody [6]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍL PRÁCE

Cílem diplomové práce je srovnání procesních parametrů při svařování ultrazvukem na vybraných polymerních materiálech. Bude provedena úprava a kompletace přípravku pro osazení ultrazvukového svařovacího zařízení, optimalizace ultrazvukového svařovacího procesu a příprava zkušebních vzorků pro různé varianty spojů. Výstupem práce by mělo být hodnocení jednotlivých svarů na základě použitých svařovacích parametrů a vyhodnocení únosnosti jednotlivých spojů pomocí tahové zkoušky.

Stanovené cíle diplomové práce:

1. Vypracování literární studie na dané téma.
2. Experimentální svařování vybraných polymerních materiálů.
3. Statistické vyhodnocení získaných výsledků.

5 EXPERIMENT

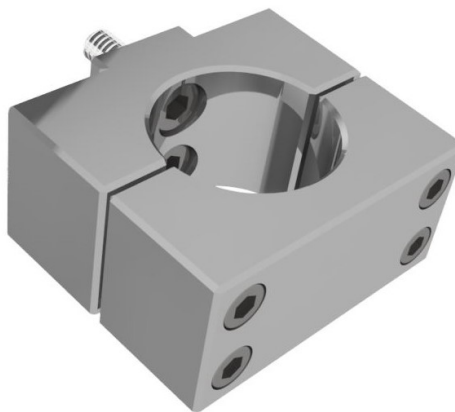
Experimentální část je zaměřena na proces svařování ultrazvukem. V první části je popsáno dokončení přípravku pro ultrazvukové svařování a zhotovení držáku pro konkrétní ultrazvukové svařovací zařízení plastů. Druhá část se zabývá optimalizací svařovacích parametrů a geometrii vzorků vybraných druhů polymerních materiálů, u kterých je hodnocena kvalita provedeného svaru. Hlavním ukazatelem kvality spoje je únosnost zjišťovaná pomocí tahové zkoušky. V třetí části této práce jsou diskutovány výsledky přeplátovaného a šikmého spoje na základě zjištěné maximální únosné síly při jednoosém tahu a kvality provedeného svaru.

5.1 Dokončení svařovacího přípravku

Držák

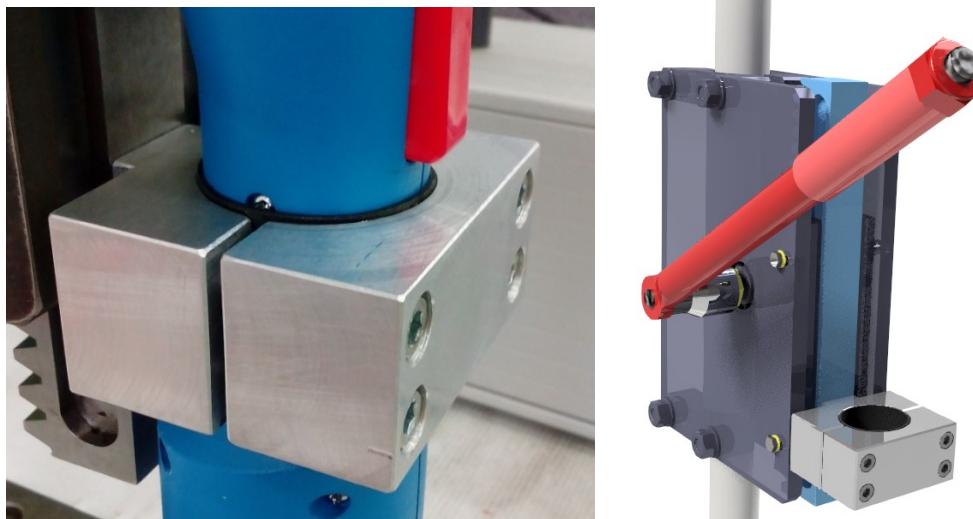
Prvním úkolem bylo dokončení přípravku určeného pro upínání ručního ultrazvukového svařovacího zařízení. Přípravek se skládal z podstavy, nosné trubky, ozubeného hřebene a tělesa s hřídelí, na které byla umístěna rohatka a ozubené kolo.

Pro osazení svařovacího zařízení do přípravku bylo nutné navrhnout a zhotovit držák s ohledem na hmotnost a jednoduchost osazení a vyjmutí svařovacího zařízení z přípravku. Držák byl zhotoven dle výkresové dokumentace frézováním ze slitiny hliníku 42 4203. Skládá se ze dvou částí. Ve vnitřní části jsou dvě průchozí díry s osazením pro zápustné šrouby M8, kterými se držák připevní k přípravku. Vnější část slouží ke stažení svařovacího zařízení do držáku pomocí čtyř zápustných šroubů M6.



Obr. 20. Model držáku

Pro upevnění držáku ke svařovacímu přípravku bylo potřebné demontovat ozubený hřeben a vyvrtat do něj díry se závity M8. Při upínání svařovacího zařízení do držáku jsme použili pryžový pásek o tloušťce 1 mm.



Obr. 21. Držák svařovacího zařízení

Momentový klíč

Pro zajištění konstantního přitlaku byl vybrán momentový klíč s nastavitelným rozsahem 2-24 Nm s velikostí čepu 3/8" od výrobce PROTECO. Slouží pro utažení šroubů a matic stanoveným momentem. Klíč je vyroben z chrom-vanadiové oceli. Je vhodný k použití v dílenském a servisním prostření. Nastavení utahovacího momentu je snadné a přesné. Rádlovaná rukojeť zajišťuje komfortní úchop.



Obr. 22. Momentový klíč

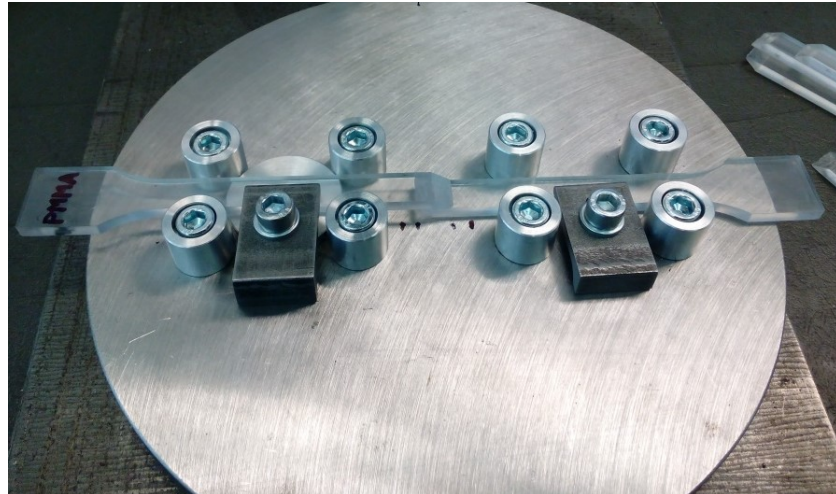
Běžně dostupné momentové klíče jsou konstruovány pro měření utahovacího momentu pravotočivých šroubů. Z tohoto důvodu jsme museli tělo přípravku otočit, a tím jsme docílili posuv ozubeného hřebenu proti základně. Pro snazší manipulaci při svařování vzorků byl momentový klíč upraven tak, aby nedocházelo k protáčení rohatky a byl zajištěn přítlak i zvedání svařovacího zařízení v přípravku.



Obr. 23. Úprava momentového klíče

Aretační přípravek

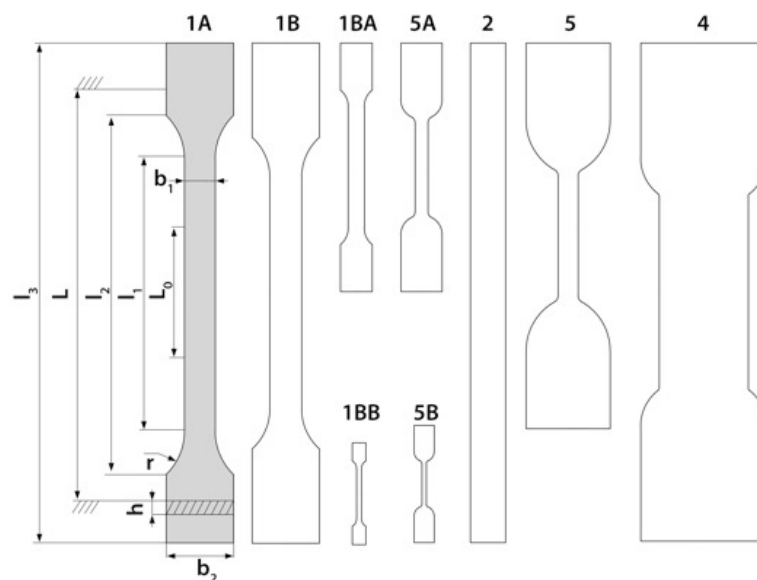
Bez dostatečné aretace by nebylo možné docílit přesné vzájemné polohy a opakovatelnost svařování. Pro uchycení svařovaných vzorků byl zkonstruován aretační přípravek. Ultrazvukové kmity působící na vnější tělesa mají snahu tyto tělesa rozkmitat. Bez technologického osazení dochází vlivem vibrací při ultrazvukovém svařování dílů ke klouzání svařovaných vzorků z místa svaru. Přípravek zajišťuje souosost obou dílů a zároveň pomocí dvou třmenů jsou vzorky pevně uchyceny tak, aby nedocházelo k jejich posuvu.



Obr. 24. Aretační přípravek

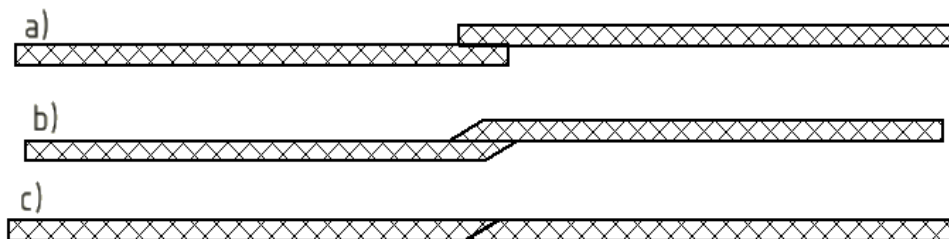
5.2 Příprava zkušebních vzorků

Zkušební vzorky byly vyrobeny vstříkáním pomocí formy pro výrobu normalizovaných zkušebních těles termoplastů. Rozměry zkušebních těles jsou dány normou ČSN EN ISO 527-1, tvar 1A.



Obr. 25. Rozměry zkušebních těles

Volba typu použitého spoje závisela na technologických možnostech ultrazvukového svařování. Výchozím typem byl překlátovaný spoj s možností změny délky překlátování. První modifikací byl zkosený překlátovaný spoj. Velikost zkosení jsme zvolili 30° , velikost překlátování se může měnit. Druhou modifikací byl šikmý spoj. Použité vzorky byly zkoseny pod úhlem 30° . Změna velikosti styčné plochy je u této varianty umožněna pouze změnou úhlu.

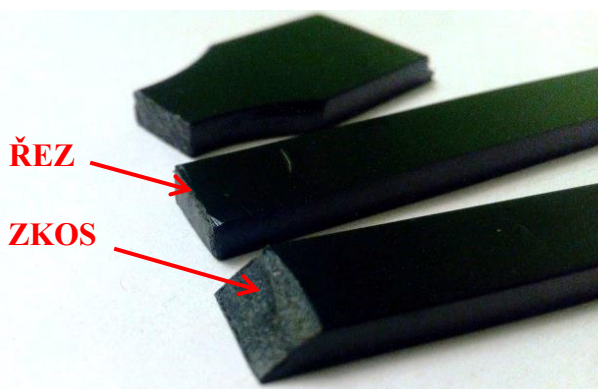


Obr. 26. Typy použitých spojů

a) překlátovaný spoj, b) zkosený překlátovaný spoj c) šikmý spoj

Pro potřeby hodnocení svarového spoje bylo nutné vzorky před svařováním upravit. Odřezáním jedné upínací části ve vzdálenosti l_1 , byla získána jednostranná lopatka, která je vhodná ke svaření s možností změny velikosti překlátování. Pomocí ruční pilky s jemným pilovým listem jsme provedli řez, který jsme následně zabrousili do roviny.

Pro hodnocení šikmého a zkoseného překlátovaného svaru byly vzorky zkoseny pod úhlem 30° .



Obr. 27. Úprava zkušebních těles

6 SVAŘOVÁNÍ A TESTOVÁNÍ

6.1 Svařovací sestava

Kompletně dokončená a funkční svařovací sestava je složena z přípravku pro svařování ultrazvukem, momentového klíče, aretačního přípravku pro uchycení svařovaných vzorků, generátoru kmitů, vysokofrekvenčního propojovacího kabelu, ručního svařovacího zařízení a svařovacího nástroje (sonotrody).

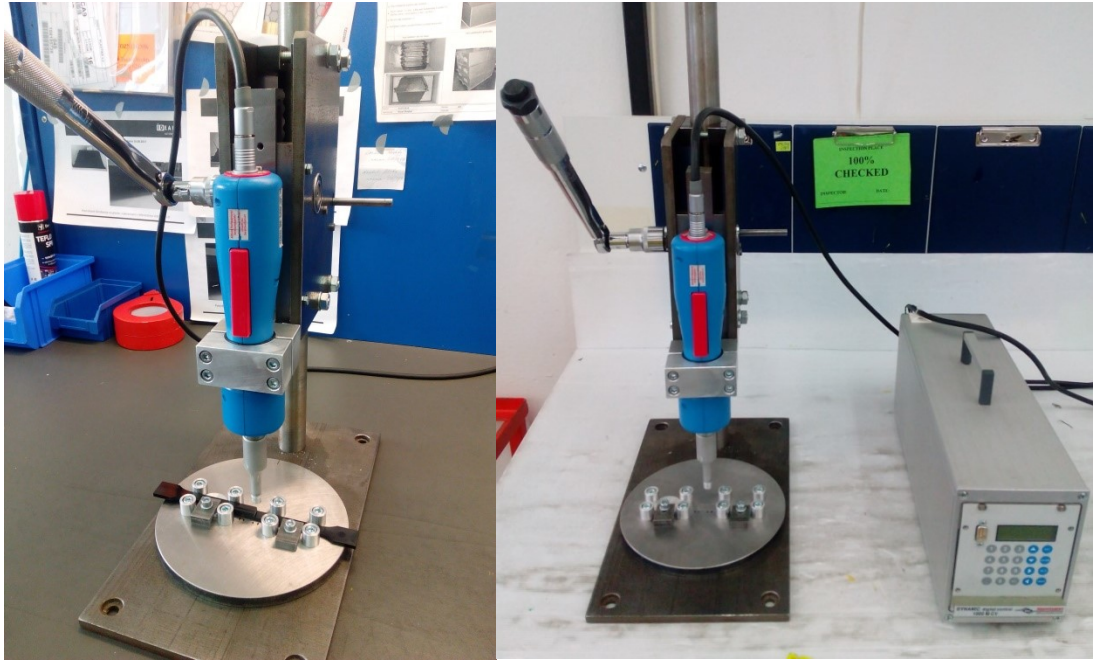
Ruční ultrazvukové svařovací zařízení

Ruční svařovací zařízení s označením HSG od firmy HERRMANN je navrženo pro svařování malých sérií nebo k opravám přímo ve výrobě. Tohle nízkonákladové řešení má ergonomicky upravenou rukojeť a je uživatelsky bezpečné. V horní části je konektor pro vysokofrekvenční kabel sloužící k rychlému a bezpečnému připojení ke generátoru. Zabudovaný vzduchový ventil slouží k připojení tlakového vzduchu pro účinnější chlazení sonotrody. Připojení sonotrody pomocí závitu zajišťuje její jednoduchou výměnu.



Obr. 28. Ruční ultrazvukové zařízení Herrmann HSG osazené svařovací sonotrodou

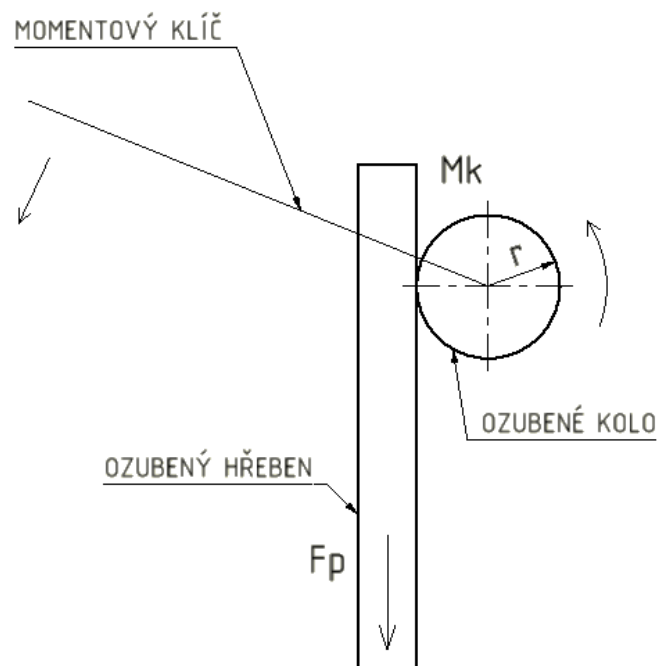
Přípravek pro svařování slouží k převodu síly vyvolané obsluhou přes převodový mechanismus na svařovací zařízení. Přípravek bylo nutné dokončit a upravit pro daný typ svařovacího zařízení. Jeho bytelná konstrukce zajišťuje tuhost celé soustavy. Rohatka se západkou umístěná na hřídeli umožňuje aretaci svařovacího zařízení v horní poloze. Za pomoci momentového klíče je možné nastavit přítlačnou sílu působící při svařování. Síla je přenášena z momentového klíče přes ozubené kolo na ozubený hřeben, na kterém je připevněn držák svařovacího zařízení.



Obr. 29. Svařovací sestava

Určení přítlačné síly

Velikost přítlačné síly F_p zjistíme přepočtem z krouticího momentu M_k nastaveného na momentovém klíči. K síle vyvozené obsluhou připočítáme sílu vyvolanou hmotností pohyblivé části svařovací soustavy. Zanedbáváme ztráty třením ve vodicím mechanismu.



Obr. 30. Schematické rozložení sil

M_k – krouticí moment

r – poloměr roztečné kružnice ozubeného kola

F_p – přítláčná síla

Velikost krouticího momentu vypočítáme jako sílu vyvozenou obsluhou na svařovací zařízení vynásobenou délkou ramene.

$$M_k = F_v \cdot r \text{ (Nm)} \quad (3)$$

Z tohoto vztahu vyjádříme sílu vyvozenou obsluhou jako:

$$F_v = \frac{M_k}{r} \text{ (N)} \quad (4)$$

$$F_v = \frac{2}{0,026} = 76,9 \text{ (N)}$$

Nesmíme zapomenout, že přítláčná síla F_p obsahuje gravitační složku síly F_g vyvozenou hmotností pohyblivé části svařovacího přípravku (ozubený hřeben, držák svářečky, ultrazvuková svařovací zařízení), kterou vypočítáme ze vztahu:

$$F_g = m \cdot g \text{ (N)} \quad (5)$$

$$F_g = 3,6 \cdot 9,81 = 35,3 \text{ (N)}$$

Kde gravitační zrychlení g je rovno hodnotě $9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Hmotnost pohyblivé části jsme změřili pomocí laboratorní váhy. Ke svařovacímu zařízení je připojen vysokofrekvenční kabel, který může do jisté míry hmotnost ovlivnit. Z tohoto důvodu jsme výslednou hmotnost zaokrouhlili na jedno desetinné místo. Hmotnost pohyblivé části svařovacího zařízení byla $m = 3,6 \text{ kg}$.

Přítláčná síla působící na svařované vzorky pak bude:

$$F_p = F_v + F_g \text{ (N)} \quad (6)$$

$$F_c = 76,9 + 35,3 = 112,2 \text{ (N)}$$

Pro zjednodušení můžeme vyjádřit přepočet přítláčné síly pomocí vzorce:

$$F_p = \frac{M_k}{r} + F_g \text{ (N)} \quad (7)$$

Tab. 2. Přepočet krouticího momentu na přitlačnou sílu

| M_k (Nm) | m (kg) | r (mm) | F_g (N) | F_p (N) |
|------------|----------|----------|-----------|-----------|
| 2 | 3,6 | 26 | 35,3 | 112 |
| 4 | | | | 189 |
| 6 | | | | 266 |
| 8 | | | | 343 |
| 10 | | | | 420 |
| 12 | | | | 497 |
| 14 | | | | 574 |
| 16 | | | | 651 |
| 18 | | | | 728 |
| 20 | | | | 805 |
| 22 | | | | 881 |
| 24 | | | | 958 |

Z tabulky lze jednoduše vyčíst, jaká bude velikost přitlačné síly při možném nastavení daného momentu. Nastavením krouticího momentu v rozsahu 2-24 Nm můžeme dosáhnout vyvození přitlačné síly v rozsahu 112-958 N.

Postup svařování

V první fázi zajistíme ozubený hřeben v horní poloze pomocí západkou. Na svařovací přípravek nasadíme příslušným momentový klíč s nástrčnou hlavicí 22 mm. Odpojené ruční svařovací zařízení upneme do držáku přes gumový pásek pomocí čtyř šroubů. Příslušnými klíči osadíme vhodnou sonotrodu ke svářečce. Generátor a svářečku propojíme vysokofrekvenčním kabelem, a poté generátor připojíme do sítě elektrického vedení.

V hlavním menu na displeji generátoru zvolíme funkci „Test/Zaučit“, pokud jsme správně připojili sonotrodu test proběhne úspěšně. Vrátime se do hlavního menu a vybereme funkci „Programování“ zvolíme číslo programu a nastavíme potřebné svařovací parametry. Nastavit můžeme následující parametry: „Amplituda, maximální energie, minimální energie, maximální výkon, minimální výkon a svařovací čas“. Nastavené parametry potvrdíme tlačítkem „Enter“ a přejdeme do režimu svařování, který se nachází v hlavním menu pod názvem „Automatika“. Do přípravku pro aretaci vzorků vložíme svařované díly a upneme.

Odjistíme západku a nastaveným momentem tlačíme na spoj, zároveň pomocí tlačítka spustíme svařovací zařízení. Po svaření zvedneme zařízení do horní polohy, kde drží vahou momentového klíče nebo lze zajistit západkou. Svařené díly po ochlazení vyjmeme z přípravku.

Svařovací parametry

Amplituda kmitů

Zvyšující se amplituda výchylky sonotrody lineárně zvyšuje pevnost spoje. Naopak vysoká amplituda má za následek narušování povrchu dílce, který je v kontaktu se sonotrodou. Dochází ke vnikání a obtisku sonotrody do povrchu dílu. Maximální amplituda použité sonotrody byla 11 μm . Amplitudu jsme nastavili na 80% maximální amplitudy sonotrody, což představuje amplitudu o velikosti 8,8 μm . Tloušťka svařovaných vzorků byla 4 mm.

Svařovací čas

Svařovací čas spolurozhoduje o kvalitě svaru. Doporučuje se používat co nejkratší svařovací časy, jinak může docházet k přehřívání, a tím zmenšení pevnosti.

Frekvence kmitů

Při vyšších frekvencích se zvětšují ztráty energie v přenosových člancích. Dochází k zahřívání sonotrody a zmenšuje se amplituda. Použitá svařovací techniky pracuje na frekvenci 35 kHz. Daná frekvence se při svařování liší v řádech desítek Hz, a je zobrazována na displeji generátoru. Její velikost závisí na energii, výkonu a čase svařování.

Přítlačná síla

Přítlačná síla působící na spoj zabezpečuje přenos UZ kmitů ze sonotrody na svařovaný materiál. Zvyšuje tření mezi díly a dochází k rozrušování oxidové vrstvičky. Přítlačnou sílu jsme volili na základě několika zkušebních svařování, tak aby nedocházelo k přetížení svařovacího zařízení a zároveň zaručili dostatečný přítlak vzorků. Po dobu všech svařování byla na momentovém klíči nastavena hodnota 6 Nm, což při připočtení hmotnosti pohyblivé části svářečky představuje sílu o velikosti 266 N.

Svařovací energie

Energií dodávanou svaru jsme během svařování sérií měnili a prováděli optimalizaci svařovaných vzorků. Změnu jsme prováděli na základě velikosti výronku ve svaru.

Tab. 3. Specifikace použité sonotrody

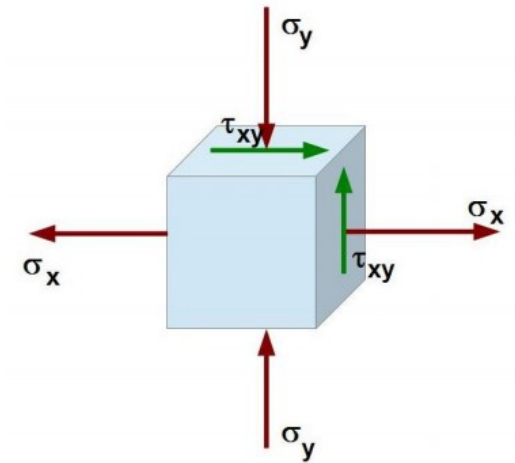
| | |
|---------------------------------------|----------|
| Označení | 46 113/1 |
| Transformační poměr | 1:4,2 |
| Maximální amplituda (μm) | 11 |
| Frekvence (kHz) | 35 |
| Průměr styčné plochy (mm) | 10 |



Obr. 31. Použitá sonotroda

6.2 Mechanická analýza tahové zkoušky

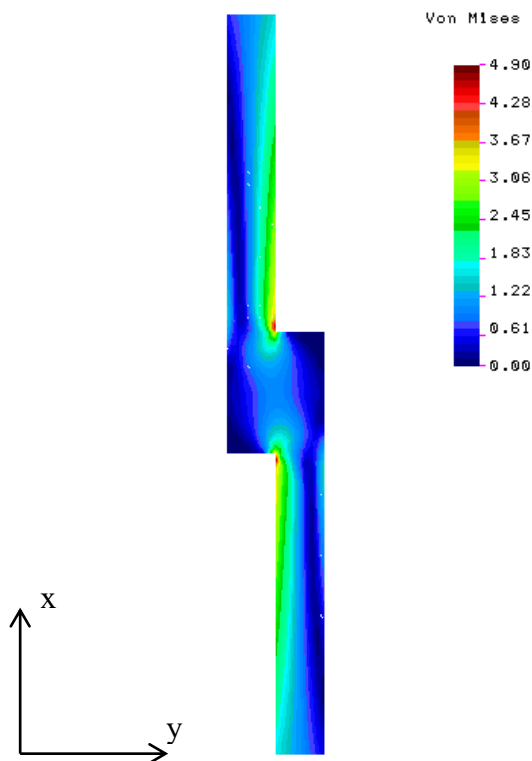
Napjatost působící ve zkušebním vzorku při tahové zkoušce je nazývána rovinná napjatost. Je definována podmínkou, že jedno z hlavních napětí je nulové. Jedná se tedy o dvojosou napjatost, která obsahuje dvě normálová napětí působící kolmo ke zkoumanému průřezu a sdružené smykové napětí působící rovnoběžně se zkoumaným průřezem.



Obr. 32. Dvouosá napjatost [16]

Simulace napětí v oblasti svaru

V případě ideálního svaru lze uvažovat o dokonale pevném spojení svařovaných vzorků. Pro tento případ byl vytvořen model konečných prvků v programu Cosmos GEOstar. Šířka vzorku byla 4 mm a velikost přeplátování 10 mm. Model byl zatížen v ose x jednotkovou silou působící na okrajích vzorku.



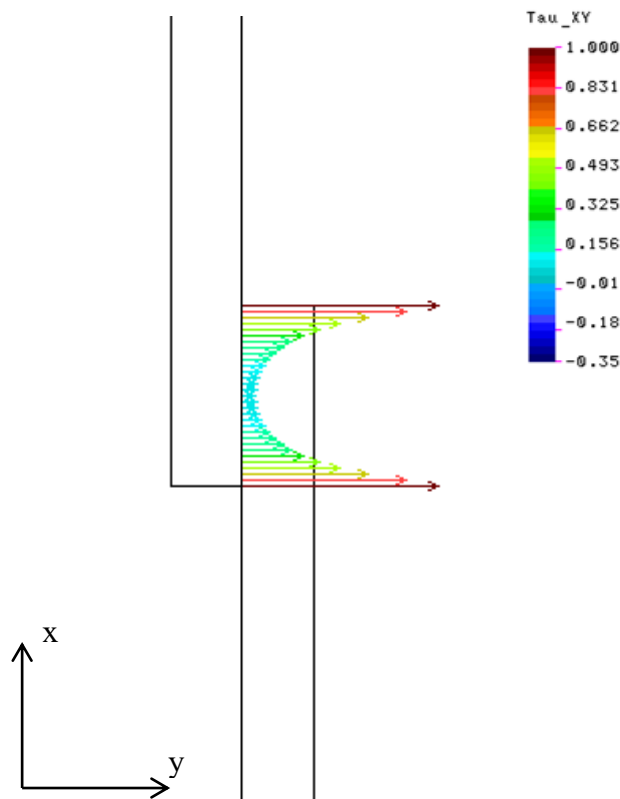
Obr. 33. Von Misesovo napětí

U von Misesova napětí je kritériem pro srovnání prostorové a jednoosé napjatosti hustota deformační energie pro změnu tvaru. Z celkové hustoty deformační energie se odečte objemová složka hustoty deformační energie a získá se pouze distorzní napjatost, což je hustota deformační energie pro změnu tvaru. [17]

Pro rovinou napjatost počítáme von Misesovo napětí pouze pomocí hlavních napětí σ_1 , σ_2 :

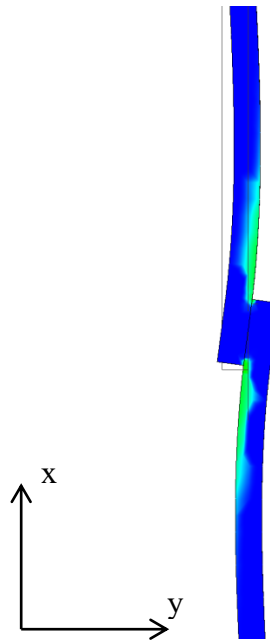
$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2} \quad (8)$$

Maximální hodnoty von Misesova napětí ($\sigma_{red} = 4,9$ MPa) lze pozorovat v místě vrubu, což je místo s náhlou změnou tloušťky. Od tohoto místa se napětí snižuje směrem k okraji vzorku.



Obr. 34. Smykové napětí τ_{xy}

Obrázek znázorňuje grafické vyjádření průběhu smykového napětí τ_{xy} po délce překlátovaného spoje zatíženého jednotkovou silou. Nejvyšší hodnoty smykového ($\tau_{xy} = 1$ MPa) se nachází v místě konce překlátování vzorku. Při dobře provedeném svařovaném spoji s největší pravděpodobností dojde k porušení vzorku v místě s největší koncentrací smykového napětí.



Obr. 35. Průběh deformace

Svařovaný vzorek je během tahové zkoušky deformován. U přeplátovaného spoje dochází k tvorbě ohybového momentu v místě svaru. Tento jev nelze odstranit, pouze eliminovat vypořádáním upínacích částí, aby nedocházelo k tvorbě deformace již při upnutí vzorku do čelistí zkušebního zařízení. Většina svařených vzorků se porušovala v místě změny tloušťky vzorku. Což je způsobeno hned několika faktory. První je technologický faktor. Při svařování dochází k natavení vrstvy materiálu a stlačení spoje, tudíž dojde k nepatrnému snížení tloušťky vzorku v místě spoje. Druhý faktor je konstrukční. V místě náhlého přechodu tloušťky svařeného vzorku vznikne vrub, který je iniciátorem porušení vzorku. Třetím faktorem je typ použitého spoje, kde excentricita přeplátovaného spoje způsobuje tvorbu ohybového momentu v místě svaru.

6.3 Tahová zkouška

Nezákladnější mechanickou charakteristikou materiálu je tahová zkouška. Zkušební těleso je vystaveno jednoosému namáhání v tahu. Průběh deformace je zaznamenáván v podobě deformační křivky, která je ukazatelem mechanických vlastností daného materiálu. Deformační křivka je grafické znázornění závislosti působící síly F , resp. napětí na poměrném prodloužení zkušebního vzorku. Největší síla naměřená v průběhu zkoušky (F_{\max}) odpovídá maximálnímu napětí v tahu (σ_m), které je označováno jako mez pevnosti. [18]

Popis zkoušky

Jednoosé tahové zkoušky se provádí na trhacím. Zařízení provádí mechanickou deformaci vzorku až po jeho destrukci. Měření je zaznamenáváno do grafů a zjišťované parametry zapisovány do tabulky. Měření lze provádět za normální i zvýšené teploty.

Tahovou zkoušku jsme prováděli na trhacím stroji ZWICK Roell 1456. Zkouška byla provedena dle normy ČSN EN ISO 527-2/1A/10. Měření probíhalo při pokojové teplotě 22°C. Před zahájením zkoušky jsme nastavili posuvovou rychlost, výchozí vzdálenost čelistí a průřez zkušební tělesa. Vzdálenost čelistí jsme volili v závislosti na velikosti vzorků. Přepřátované spoje jsme vypodkládali v upínacích částech tak, abychom eliminovali vznik ohybového momentu v místě svaru.

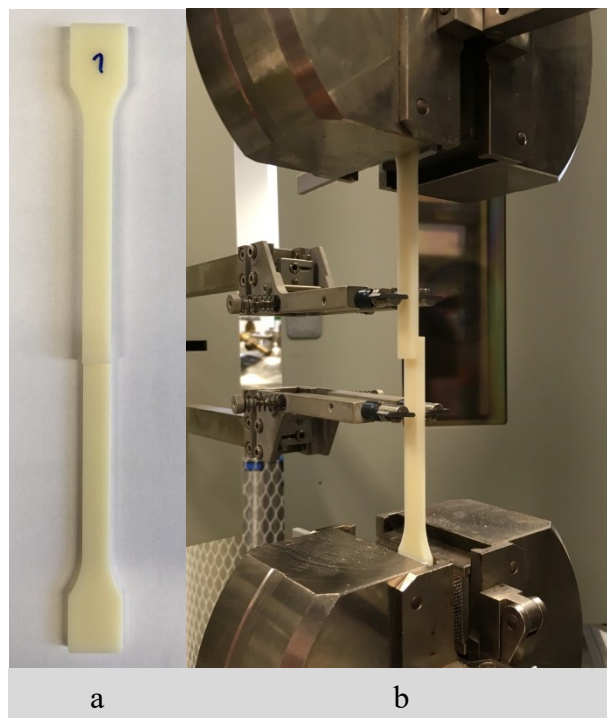


Obr. 36. Zkušební zařízení ZWICK 1456

Tab. 4. Specifikace trhacího zařízení ZWICK 1456

| | |
|---------------------------------|--------------------------|
| Maximální posuv příčnicku | 800 mm·min ⁻¹ |
| Snímače síly | 2,5 a 20 kN |
| Pracovní výška | 1284 mm |
| Pracovní šířka | 420 mm |
| Extenzometry - měření protažení | macro (přídavné) |

Upínání vzorku do zkušebního stroje bylo prováděno pomocí samosvorných upínacích čelistí. Přeplátované vzorky byly v upínacích částech vypořádány, aby nedocházelo k nechtěné deformaci vzorku již při upínání. Vzdálenost čelistí byla volena na základě velikosti přeplátování a typu spoje.



Obr. 37. Svařený vzorek ABS

a) zkušební svařený vzorek ABS, b) svařený vzorek upnutý v čelistech zkušebního stroje

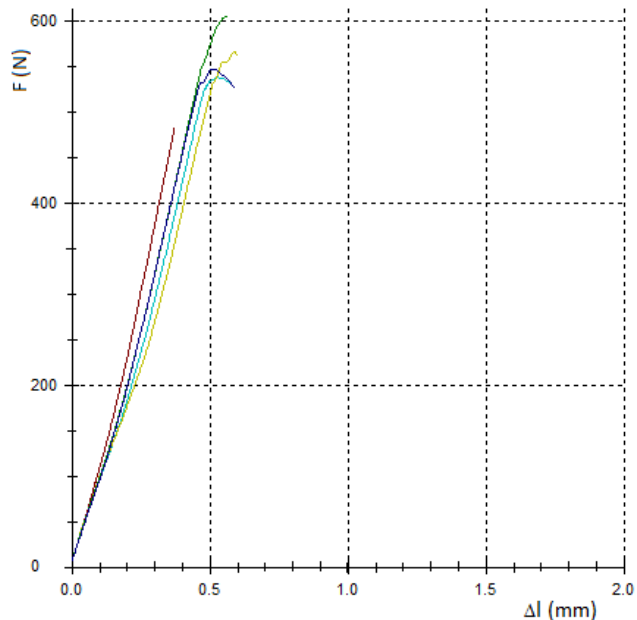
Výsledky zkoušky

Výsledky jednotlivých měření byly zaznamenávány v programu testXpert II. Jedná se o jednoduchý, flexibilní a výkonný software pro zkoušení mechanických vlastností materiálů. Průběh měření je vykreslován graficky v podobě deformační křivky. Výsledné hodnoty jsou po dokončení jednotlivých měření zapsány do tabulky.

Tab. 5. Výsledky měření překlátovaného spoje PMMA

| PMMA | | | | | | |
|---------------------------|---------|-------|--------------------|----------|-------|----------------------|
| překlátovaný spoj a=10 mm | | | | E = 15 J | | |
| číslo měření | f (kHz) | A (%) | F _p (N) | P (W) | t (s) | F _{MAX} (N) |
| 1 | 35,5 | 80 | 266 | 550 | 0,048 | 457 |
| 2 | | | | 643 | 0,043 | 506 |
| 3 | | | | 674 | 0,043 | 522 |
| 4 | | | | 443 | 0,053 | 417 |
| 5 | | | | 712 | 0,043 | 548 |

Deformační křivka vykresluje závislost velikosti působící síly na velikosti změny délky zkušebního tělesa. Slouží jako základní charakteristika mechanických vlastností materiálu.



Obr. 38. Deformační křivka překlátovaného spoje PMMA svařeného energií 25 J

7 VÝSLEDKY A HODNOCENÍ

7.1 Statistické prostředky

Naměřené hodnoty jsem zpracoval a vyhodnocoval pomocí programu Minitab 17 a Microsoft Excel s využitím vztahů pro statistické vyhodnocování.

- Aritmetický (výběrový) průměr \bar{x} :

Vyjadřuje typickou hodnotu popisující soubor mnoha hodnot. Suma výsledků je dělena jejich počtem n .

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (9)$$

- Rozptyl s^2 :

Je definován jako střední hodnota čtverců odchylek jednotlivých hodnot od aritmetického průměru.

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (10)$$

- Směrodatná odchylka s :

Vyjadřuje kvadratický průměr odchylek hodnot od aritmetického průměru.

$$s = \sqrt{s^2} \quad (11)$$

- Střední kvadratická chyba aritmetického průměru σ :

Je kritériem pro hodnocení přesnosti měření.

$$\sigma = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (12)$$

Testování hypotéz

- Slouží k ověření předem stanovených hypotéz
- $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_m$ \times $H_A: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \dots \neq \mu_m$
- Testování \rightarrow buď H_0 zamítneme nebo H_0 nezamítneme
- Použití: porovnávání středních hodnot dvou a více souborů
- Předpoklady: nezávislost, normalita, shoda rozptylů

\rightarrow zamítáme hypotézu o shodě středních hodnot na hladině významnosti $\alpha = 0,05$

ANOVA

Z anglického Analysis Of Variance

One-way ANOVA - jednocestná ANOVA, analýza rozptylu jednoduchého třídění

Analýzou rozptylu se rozumí statistický test ověřující shodu středních hodnot sledované veličiny mezi nezávislými soubory. Je-li rozdělení této veličiny v rámci každého souboru normální a mají-li soubory shodné rozptyly. [20]

Test rovnosti rozptylu

- Formulace nulové hypotézy $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_m^2$
- Alternativní hypotéza $H_A: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2 \neq \dots \neq \sigma_m^2$
- Pravděpodobnost $(1 - \alpha) = 0,95$
- Hladina významnosti $p > \alpha \rightarrow$ nezamítáme H_0 (rozptyly se od sebe liší pouze náhodně)

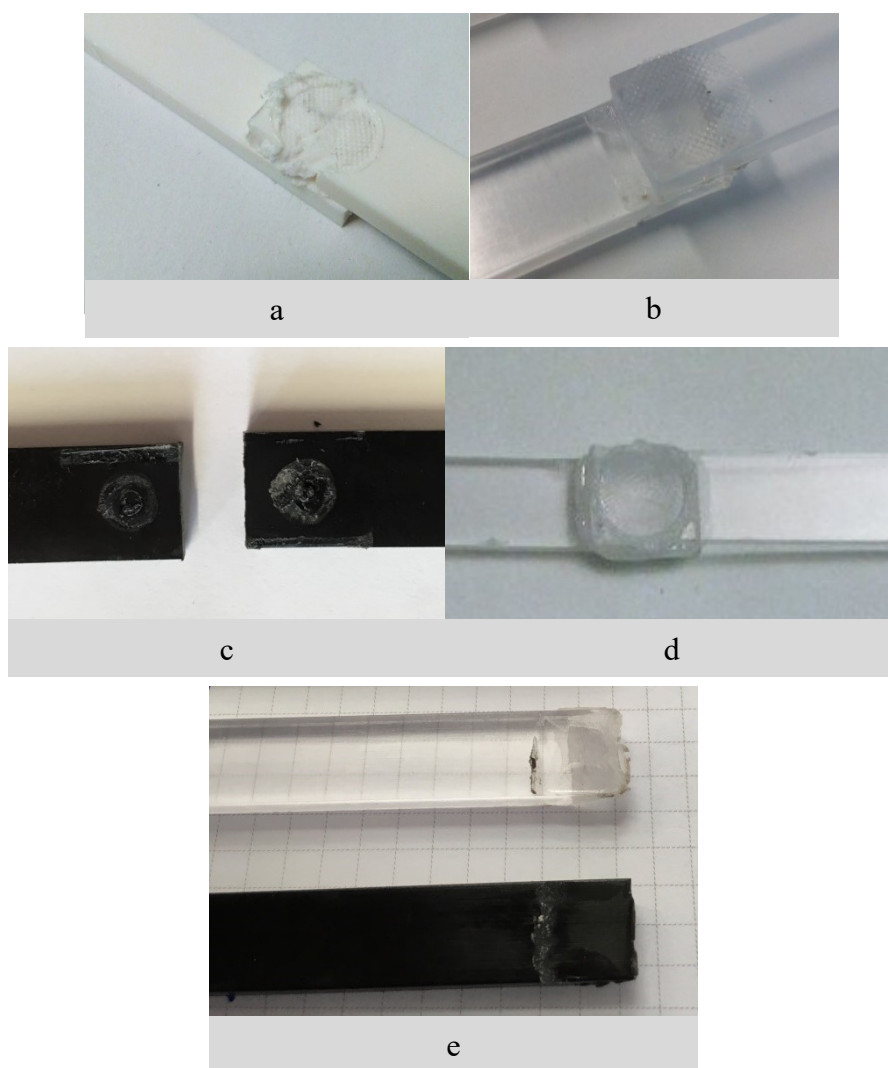
Jednocestná ANOVA

- Formulace nulové hypotézy $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_m$
- Alternativní hypotéza $H_A: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \dots \neq \mu_m$
- Pravděpodobnost $(1 - \alpha) = 0,95$
- Hladina významnosti $p < \alpha \rightarrow$ zamítáme H_0 a přijmeme H_A

7.2 Naměřené hodnoty

Proces optimalizace

Před zahájením svařování jednotlivých materiálů bylo nutné nejprve zjistit, jaké parametry jsou nejvhodnější pro daný materiál. Pro snadné porovnání typů svarů a svařovaných materiálů mezi sebou byla zvolena proměnná energie svaru. Proces optimalizace zahrnoval i několik nevhodně svařených vzorků.



Obr. 39. Nevhodně svařené vzorky

- a) materiál není vhodný pro ultrazvukové svařování, b) vlivem vibrací došlo při svařování k posuvu vzorků c) bodové svařování pomocí dodatečně vytvořeného výstupku v místě svaru d) příliš vysoká energie svaru, dlouhý svařovací čas e) nevhodná kombinace materiálů (PMMA a PC 30% recyklátu)

Základní materiály PMMA, ABS, PC 30% R, PP

Tab. 6. Mechanická vlastnosti základních materiálů

| Základní materiály | | | | | | | | |
|--------------------|---------|----------------------|---------|----------------------|----------|----------------------|---------|----------------------|
| | PMMA | | ABS | | PC 30% R | | PP | |
| číslo měření | E (MPa) | F _{MAX} (N) | E (MPa) | F _{MAX} (N) | E (MPa) | F _{MAX} (N) | E (MPa) | F _{MAX} (N) |
| 1 | 3350 | 1640 | 2290 | 1530 | 2240 | 2660 | 192 | 1070 |
| 2 | 3060 | 1630 | 2480 | 1560 | 2620 | 2660 | 227 | 1100 |
| 3 | 3340 | 1640 | 2300 | 1550 | 2220 | 2650 | 215 | 1090 |
| průměr \bar{x} | 3250 | 1637 | 2357 | 1547 | 2360 | 2657 | 211 | 1087 |
| chyba σ | 60 | 2 | 39 | 6 | 82 | 2 | 6 | 6 |

V tabulce 4 je uveden modul pružnosti E (MPa) a maximální únosná síla F_{\max} (N) vybraných druhů polymerních materiálů. Vzorky polykarbonátu obsahovaly 30% recyklátu, zkráceně označováno jako R. Z důvodu omezeného počtu vzorků připravených pro svařování jsme provedli měření základních materiálů pouze na třech vzorcích. Naším cílem nebylo hodnocení základních materiálů, ale naměřené hodnoty slouží pouze jako porovnávací ukazatel mechanických vlastností.

Polymethylmetakrylát - PMMA

Tab. 7. Přeplátovaný spoj PMMA 15 J, 25 J

| PMMA | | | | | | | | | |
|---------------------------|---------|-------|--------------------|-----------------------|-------|----------------------|-----------------------|--------|----------------------|
| přeplátovaný spoj a=10 mm | | | | E _s = 15 J | | | E _s = 25 J | | |
| číslo měření | f (kHz) | A (%) | F _p (N) | P (W) | t (s) | F _{MAX} (N) | P (W) | t (s) | F _{MAX} (N) |
| 1 | 35,5 | 80 | 266 | 550 | 0,048 | 457 | 885 | 0,0510 | 539 |
| 2 | | | | 643 | 0,043 | 506 | 882 | 0,0520 | 568 |
| 3 | | | | 674 | 0,043 | 522 | 660 | 0,0600 | 484 |
| 4 | | | | 443 | 0,053 | 417 | 717 | 0,0560 | 605 |
| 5 | | | | 712 | 0,043 | 548 | 721 | 0,0630 | 548 |
| průměr \bar{x} | | | | 604 | 0,046 | 490 | 773 | 0,056 | 549 |
| chyba σ | | | | 43 | 0,002 | 21 | 41 | 0,002 | 18 |

Polymer PMMA je velmi dobře svařitelný. Zkušební vzorky obsahovaly propadliny způsobené smrštěním materiálu. Pro ultrazvukové svařování byly tyto propadliny užitečné, jelikož docházelo k zaměření ultrazvukové energie do okrajů přeplátovaného vzorku. I při nízké dodané energii svaru docházelo k porušení svařeného vzorku na okraji svarové zóny.



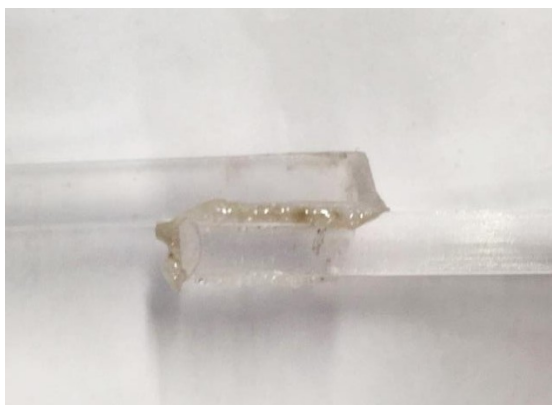
Obr. 40. Přeplátovaný svar polymeru PMMA
svařeného energií 15 J

a) svařený vzorek, b) roztržený vzorek

Tab. 8. Přeplátovaný spoj PMMA 50 J, 100 J

| PMMA | | | | | | | | | |
|---------------------------|---------|-------|--------------------|-----------------------|-------|----------------------|------------------------|-------|----------------------|
| přeplátovaný spoj a=10 mm | | | | E _s = 50 J | | | E _s = 100 J | | |
| číslo měření | f (kHz) | A (%) | F _p (N) | P (W) | t (s) | F _{MAX} (N) | P (W) | t (s) | F _{MAX} (N) |
| 1 | 35,5 | 80 | 266 | 383 | 0,178 | 650 | 536 | 0,296 | 507 |
| 2 | | | | 523 | 0,141 | 579 | 510 | 0,287 | 658 |
| 3 | | | | 790 | 0,178 | 667 | 432 | 0,300 | 554 |
| 4 | | | | 531 | 0,121 | 592 | 543 | 0,262 | 587 |
| 5 | | | | 543 | 0,119 | 489 | 506 | 0,266 | 562 |
| průměr \bar{x} | | | | 554 | 0,15 | 595 | 505 | 0,282 | 574 |
| chyba σ | | | | 59 | 0,01 | 28 | 18 | 0,007 | 22 |

Při vyšších energiích byly vzorky z PMMA svařeny po celé ploše přeplátování, ale docházelo k výrazným přetokům a přehřátí taveniny v místě svaru. Také stopa po svařovací nástroji byla výraznější. Se zvyšující se energií svaru se prodlužoval i svařovací čas, naopak výkon při vyšších energiích klesal.



Obr. 41. Přeplátovaný svar polymeru PMMA
svařeného energií 100 J

Tab. 9. Zkosený přeplátovaný spoj PMMA 25 J

| PMMA | | | | | | |
|-----------------------------------|---------|-------|--------------------|-----------------------|-------|----------------------|
| zkosený přeplátovaný spoj a=10 mm | | | | E _s = 25 J | | |
| číslo měření | f (kHz) | A (%) | F _p (N) | P (W) | t (s) | F _{MAX} (N) |
| 1 | 35,5 | 80 | 266 | 619 | 0,061 | 552 |
| 2 | | | | 864 | 0,051 | 523 |
| 3 | | | | 623 | 0,061 | 587 |
| 4 | | | | 678 | 0,060 | 618 |
| 5 | | | | 648 | 0,590 | 598 |
| průměr \bar{x} | | | | 686 | 0,16 | 576 |
| chyba σ | | | | 41 | 0,10 | 15 |

Pro vzorky se zkosením byla zvolena velikost přesahu 10 mm. Zkosení bylo provedeno pod úhlem 30° a slouží k eliminaci napětí koncentrující se v místě náhlé změny tloušťky. U zkoseného přeplátovaného svaru jsme sonotrodou působili mimo zkosenou část vzorku. Tím došlo k prodloužení vzdálenosti mezi působením nástroje a svarovou plochou.

K porušení vzorků docházelo převážně mimo svar, jak lze vidět na obrázku 42. Výsledná pevnost tímto nebyla ovlivněna.

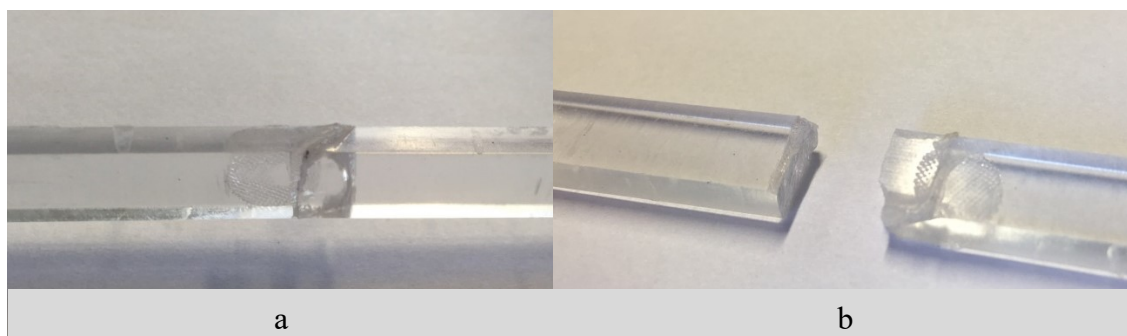


Obr. 42. Zkosný přeplátovaný svar polymeru
PMMA svařeného energií 25 J

Tab. 10. Šikmý spoj PMMA 50 J

| PMMA | | | | | | |
|-------------------|---------|-------|--------------------|-----------------------|-------|----------------------|
| šikmý spoj a=8 mm | | | | E _s = 50 J | | |
| číslo měření | f (kHz) | A (%) | F _p (N) | P (W) | t (s) | F _{MAX} (N) |
| 1 | 35,5 | 80 | 266 | 648 | 0,110 | 1090 |
| 2 | | | | 627 | 0,111 | 763 |
| 3 | | | | 511 | 0,128 | 645 |
| 4 | | | | 589 | 0,116 | 694 |
| 5 | | | | 635 | 0,117 | 513 |
| průměr \bar{x} | | | | 602 | 0,116 | 741 |
| chyba σ | | | | 22 | 0,003 | 86 |

Polymer PMMA patří mezi velmi křehké materiály. Při svařování šikmým svarem může docházet k odlomení tenké sbíhavé části vzorku, jelikož je v tomto místě v přímém styku se svařovacím nástrojem. Tento typ svaru není úplně vhodný pro technologii svařování ultrazvukem. Výsledný svar byl po vizuální stránce v pořádku. Díky zdrsňenému povrchu po broušení došlo k iniciaci ultrazvukové energie ve více místech, a tím k zplastifikování celé plochy bez výrazných přetoků. Porušení vzorků docházelo v místě nejmenšího průřezu. Výhodou šikmého svaru je, že při namáhání tahem nedochází k tvorbě ohybového momentu v místě svaru jako u přeplátovaných svarů.



Obr. 43. Šikmý svar polymeru PMMA svařené-
ho energií 50 J

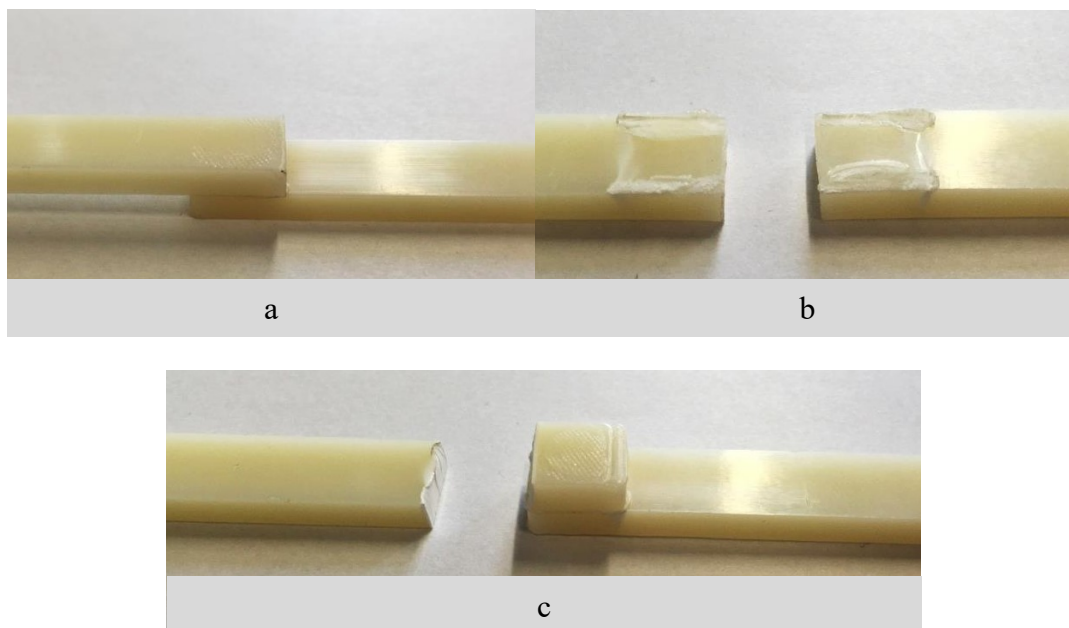
a) svařený vzorek, b) roztržený vzorek

Akrylonitrilbutadienstyren – ABS

Tab. 11. Přeplátovaný spoj ABS 15 J, 25 J

| ABS | | | | | | | | | |
|---------------------------|------------|----------|-----------------------|-----------------------|----------|-------------------------|-----------------------|----------|-------------------------|
| přeplátovaný spoj a=10 mm | | | | E _s = 15 J | | | E _s = 25 J | | |
| číslo mě- ření | f (kHz) | A (%) | F _p (N) | P (W) | t (s) | F _{MAX} (N) | P (W) | t (s) | F _{MAX} (N) |
| 1 | 35,5 | 80 | 266 | 438 | 0,057 | 454 | 434 | 0,098 | 797 |
| 2 | | | | 380 | 0,062 | 683 | 462 | 0,093 | 617 |
| 3 | | | | 558 | 0,048 | 730 | 507 | 0,094 | 564 |
| 4 | | | | 493 | 0,051 | 753 | 489 | 0,076 | 798 |
| 5 | | | | 524 | 0,050 | 734 | 448 | 0,081 | 787 |
| průměr \bar{x} | | | | 479 | 0,054 | 671 | 468 | 0,088 | 713 |
| chyba σ | | | | 28 | 0,002 | 50 | 12 | 0,004 | 45 |

ABS vykazuje dobrou svařitelnost i při použití nízké energie. Stopa po sonotrodě je nepatrná. Přetoky v místě svaru nejsou tak výrazné jako u polymeru PMMA. Vlivem propadlin na zkušebních vzorcích nedošlo při nízkých energiích ke svaření po celé ploše. Při energii 15 J docházelo k roztřížení v místě svaru. U vzorku svařeného energií 25 J docházelo k lomu materiálu v místě vrubu.



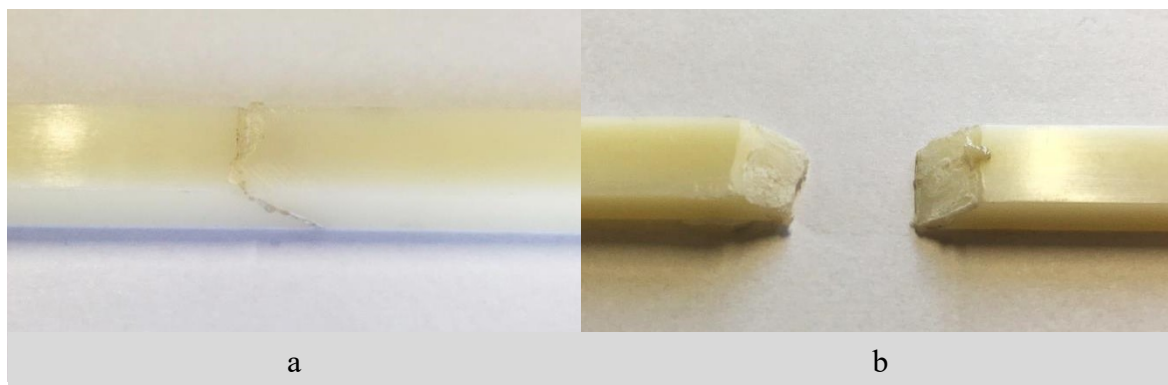
Obr. 44. Překládaný svar polymeru ABS
svařeného energií 15 J, 25 J

a) svařený vzorek, b) roztržený vzorek $E_s=15$ J c) roztržený vzorek $E_s=25$ J

Tab. 12. Šikmý spoj ABS 50 J, 100 J

| ABS | | | | | | | | | |
|-------------------|---------|-------|-----------|--------------|-------|---------------|---------------|-------|---------------|
| šikmý spoj a=8 mm | | | | $E_s = 50$ J | | | $E_s = 100$ J | | |
| číslo měření | f (kHz) | A (%) | F_p (N) | P (W) | t (s) | F_{MAX} (N) | P (W) | t (s) | F_{MAX} (N) |
| 1 | 35,5 | 80 | 266 | 466 | 0,146 | 293 | 502 | 0,244 | 943 |
| 2 | | | | 635 | 0,126 | 811 | 594 | 0,204 | 488 |
| 3 | | | | 404 | 0,186 | 343 | 433 | 0,345 | 642 |
| 4 | | | | 582 | 0,152 | 564 | 495 | 0,264 | 525 |
| 5 | | | | 534 | 0,138 | 496 | 527 | 0,283 | 672 |
| průměr \bar{x} | | | | 524 | 0,150 | 501 | 510 | 0,27 | 654 |
| chyba σ | | | | 37 | 0,009 | 82 | 23 | 0,02 | 72 |

Zkušební tělesa z polymeru ABS upravené pro svaření šikmým spojem byly svařeny energiemi 50 a 100 J. Zkosení bylo provedeno pod úhlem 30° , což představuje délku zkosené strany 8 mm. U svařovaných vzorků docházelo k porušení ve svaru.



Obr. 45. Šikmý spoj ABS 50 J

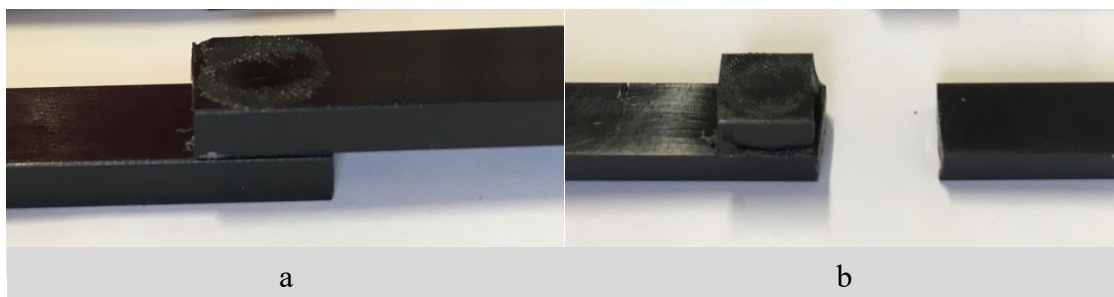
a) svařený vzorek, b) roztržený vzorek

Polykarbonát – PC 30% recyklátu

Polykarbonát je velmi pevný amorfni plast. Svařitelnost tohoto materiálu byla dobrá. Při energii do 100 J nedocházelo k tvorbě velkých výronků polymeru ze svarové zóny. Stopa po sonotrodě byla viditelná. Přesto, že při energii 50 J nedocházelo vlivem propadlin ke svaření po celé ploše, vzorky byly porušovány v místě vrubu.

Tab. 13. Přeplátovaný spoj PC 30% recyklátu 50 J, 100 J

| PC 30% R | | | | | | | | | |
|---------------------------|---------|-------|-----------|----------------------|-------|---------------|-----------------------|-------|---------------|
| přeplátovaný spoj a=10 mm | | | | $E_s = 50 \text{ J}$ | | | $E_s = 100 \text{ J}$ | | |
| číslo měření | f (kHz) | A (%) | F_p (N) | P (W) | t (s) | F_{MAX} (N) | P (W) | t (s) | F_{MAX} (N) |
| 1 | 35,5 | 80 | 266 | 684 | 0,107 | 812 | 770 | 0,186 | 936 |
| 2 | | | | 682 | 0,106 | 998 | 759 | 0,183 | 947 |
| 3 | | | | 726 | 0,100 | 785 | 650 | 0,199 | 885 |
| 4 | | | | 558 | 0,124 | 758 | 863 | 0,184 | 1090 |
| 5 | | | | 625 | 0,113 | 1040 | 704 | 0,182 | 932 |
| průměr \bar{x} | | | | 655 | 0,110 | 879 | 749 | 0,187 | 958 |
| chyba σ | | | | 26 | 0,004 | 52 | 32 | 0,003 | 31 |



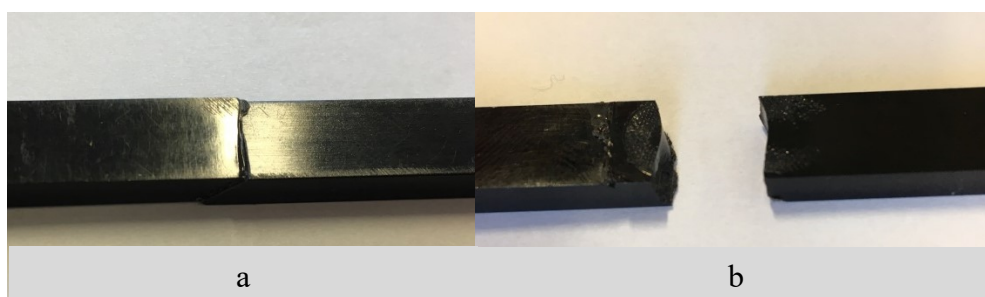
Obr. 46. Překlátovaný spoj PC 30% R 50 J

a) svařený vzorek, b) roztržený vzorek

Tab. 14. Šikmý spoj PC 30% recyklátu 50 J, 100 J

| PC 30% R | | | | | | | | | |
|-------------------|---------|-------|-----------|--------------|-------|---------------|---------------|-------|---------------|
| šikmý spoj a=8 mm | | | | $E_s = 50 J$ | | | $E_s = 100 J$ | | |
| číslo měření | f (kHz) | A (%) | F_p (N) | P (W) | t (s) | F_{MAX} (N) | P (W) | t (s) | F_{MAX} (N) |
| 1 | 35,5 | 80 | 266 | 494 | 0,127 | 324 | 391 | 0,422 | 369 |
| 2 | | | | 407 | 0,169 | 448 | 612 | 0,217 | 653 |
| 3 | | | | 354 | 0,174 | 490 | 425 | 0,326 | 899 |
| 4 | | | | 456 | 0,158 | 451 | 548 | 0,406 | 755 |
| 5 | | | | 437 | 0,163 | 486 | 602 | 0,293 | 684 |
| průměr \bar{x} | | | | 430 | 0,158 | 440 | 516 | 0,333 | 672 |
| chyba σ | | | | 21 | 0,007 | 27 | 41 | 0,034 | 78 |

Polykarbonát se zkosením svařovaný šikmým svarem nevykázal vyšší únosnost, než polykarbonát svařený překlátovaným spojem. Při porovnání s materiálem PMMA nedocházelo vlivem vibrací k odlamování sbíhavé části konce vzorku. Z tohoto důvodu by bylo možné energii svaru zvýšit, a tím docílit pevnějšího svaření.



Obr. 47. Šikmý spoj PC 30% R 50 J

a) svařený vzorek, b) roztržený vzorek

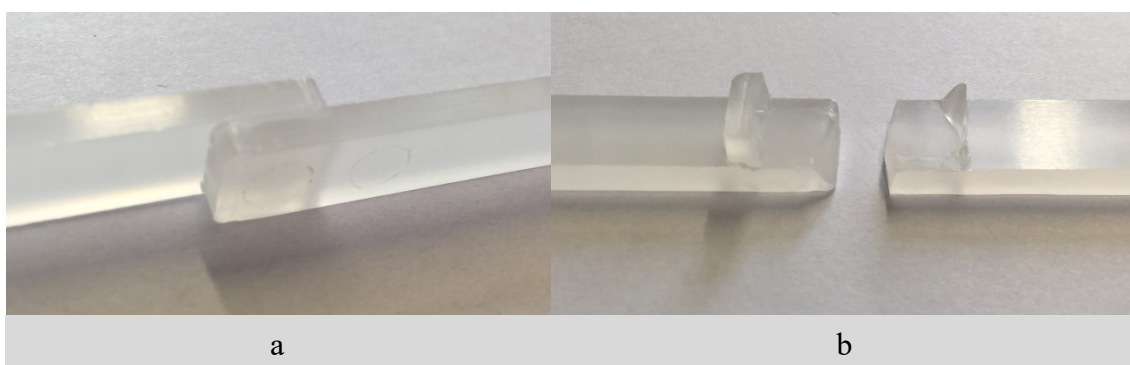
Polypropylen – PP

Polypropylen je semikrystalický středně pevný a houževnatý materiál. Je vhodný ke svařování horkým plynem nebo topným tělesem. Ultrazvukové svařování pro tento polymer je méně vhodné.

Tab. 15. Přeplátovaný spoj PP 50 J

| PP | | | | | | | | | |
|--|---------|-------|-----------|-----------|-------|---------------|-----------|-------|---------------|
| přeplátovaný spoj $E_s = 50 \text{ J}$ | | | | a = 10 mm | | | a = 20 mm | | |
| číslo měření | f (kHz) | A (%) | F_p (N) | P (W) | t (s) | F_{MAX} (N) | P (W) | t (s) | F_{MAX} (N) |
| 1 | 35,5 | 80 | 266 | 850 | 0,100 | 511 | 900 | 0,085 | 590 |
| 2 | | | | 786 | 0,102 | 497 | 850 | 0,083 | 679 |
| 3 | | | | 850 | 0,100 | 537 | 973 | 0,083 | 527 |
| 4 | | | | 801 | 0,102 | 506 | 928 | 0,085 | 620 |
| 5 | | | | 852 | 0,102 | 541 | 942 | 0,084 | 679 |
| průměr \bar{x} | | | | 828 | 0,101 | 518 | 919 | 0,084 | 619 |
| chyba σ | | | | 13 | 0,001 | 8 | 19 | 0,001 | 26 |

Při svařování polypropylenů docházelo ke svaření i při relativně nízkých energiích. Použité vzorky polypropylenů se lišily v tom, že se jednalo o vzorky používané pro zkoušky rázové houževnatosti. Tyto vzorky byly na koncích zaobleny, což mohlo zapříčinit, že nedocházelo k porušení vzorku v místě konce spoje, ale ve svaru nebo došlo k porušení materiálu v místě přeplátování. Při velikosti přeplátování 20 mm byl svařovací čas nižší a docházelo k porušení ve svaru.



Obr. 48. Přeplátovaný spoj PP 50 J

a) svařený vzorek, b) roztržený vzorek

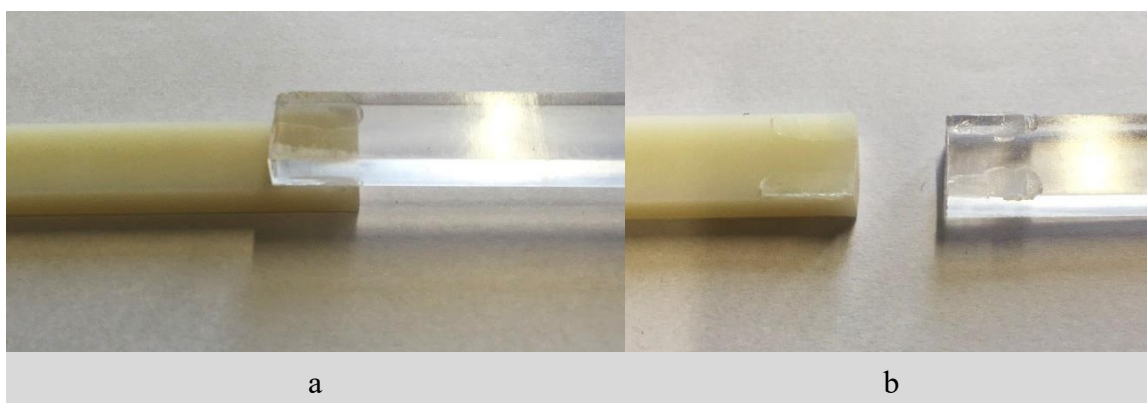
Kombinace materiálu PMMA a ABS

Polymery PMMA a ABS jsou vzájemně svařitelné. Jedná se o jednu z nejvýhodnějších kombinací materiálů při svařování ultrazvukem.

Tab. 16. Přeplátovaný spoj PMMA a ABS

| PMMA a ABS | | | | | | |
|------------------------------------|------------------|-----------------|------------------|---------------------|----------------|----------------------|
| přeplátovaný spoj $a=10\text{ mm}$ | | | | $E_s = 25\text{ J}$ | | |
| číslo měření | $f\text{ (kHz)}$ | $A\text{ (\%)}$ | $F_p\text{ (N)}$ | $P\text{ (W)}$ | $t\text{ (s)}$ | $F_{MAX}\text{ (N)}$ |
| 1 | 35,5 | 80 | 266 | 532 | 0,068 | 403 |
| 2 | | | | 755 | 0,055 | 260 |
| 3 | | | | 764 | 0,057 | 263 |
| 4 | | | | 702 | 0,059 | 269 |
| 5 | | | | 731 | 0,052 | 356 |
| průměr \bar{x} | | | | 697 | 0,058 | 310 |
| chyba σ | | | | 38 | 0,002 | 26 |

Při svařování různých druhů polymerů je nutné dodržet pravidlo, že v kontaktu se sonotrodou musí být polymer s vyšší přechodovou teplotou. Polymer PMMA má nepatrně vyšší teplotu skleného přechodu ($T_g=110\text{ °C}$) než polymer ABS ($T_g=105\text{ °C}$). Vzorky nebyly vlivem propadlin svařeny po celé ploše. Při zatížení vzorku docházelo k porušení ve svaru. U této kombinace by bylo vhodné použití vyšší svařovací energie.



Obr. 49. Přeplátovaný spoj PMMA a ABS

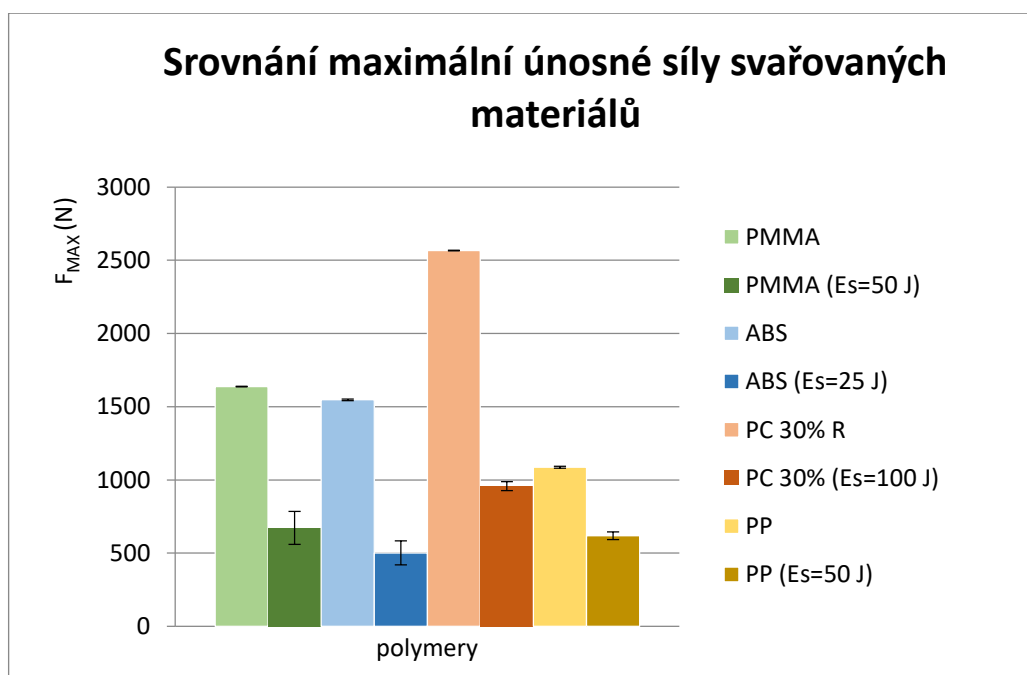
a) svařený vzorek, b) roztržený vzorek

8 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Praktická část práce se zaměřuje na optimalizaci procesních parametrů pro jednotlivé druhy svarů. Výchozím typem spoje byl přeplátovaný spoj, který byl následně modifikován zkosením konce vzorku. Dalším použitým typem byl spoj šikmý.

Pomocí ultrazvukového svařovacího zařízení bylo provedeno svaření vybraných druhů termoplastů (PMMA, ABS, PC 30% R, PP), u kterých byla hodnocena kvalita provedeného spoje. Následně jsou srovnány zjištěné hodnoty maximální únosné síly a zakresleny do grafů. Pro srovnávané veličiny jsou stanoveny hypotézy, a na základě jednocestné ANOVy jsou zpracované data vyhodnoceny.

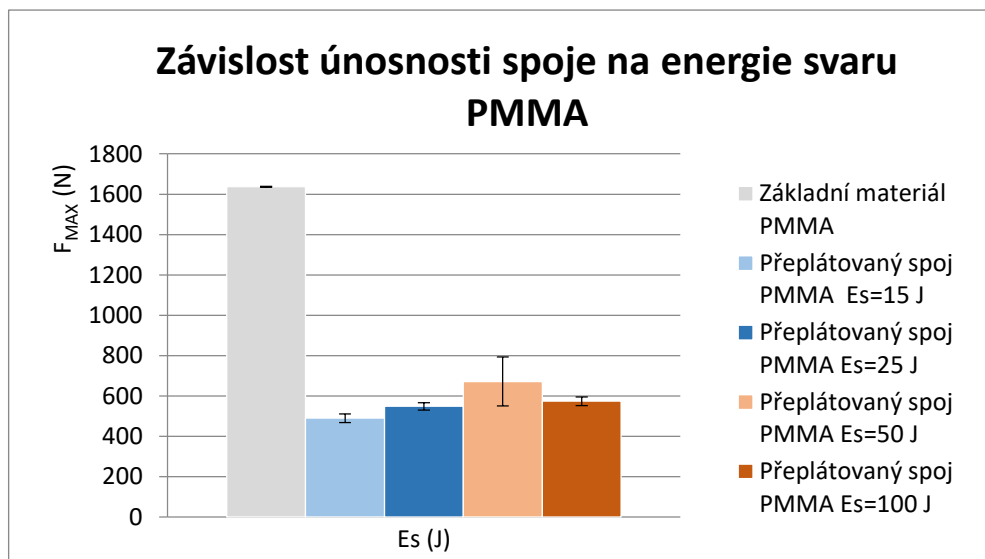
Srovnání vybraných druhů termoplastů



Obr. 50. Srovnání maximální únosné síly na svařovaných materiálech

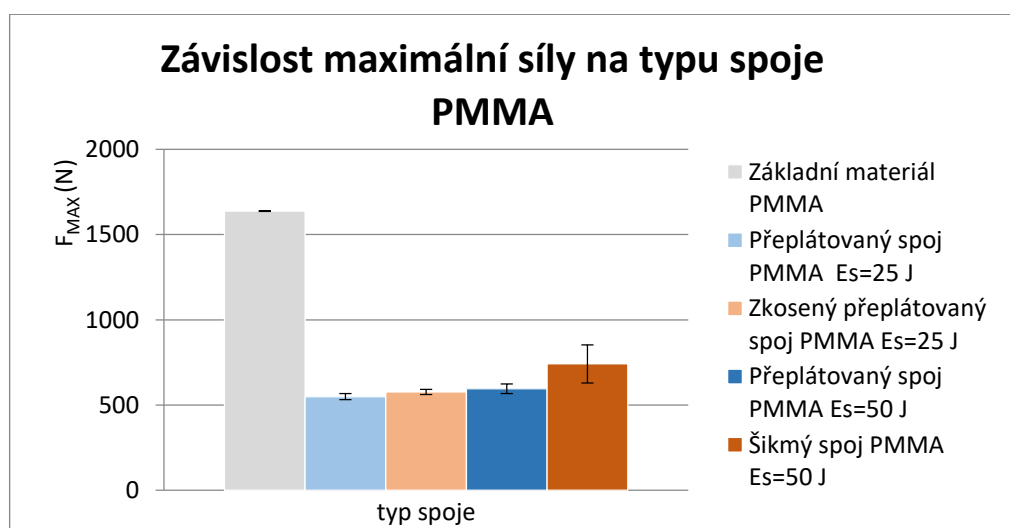
U vybraných druhů materiálů byla zjištěna maximální únosná síla pomocí tahové zkoušky. Tyto hodnoty jsou vyneseny do grafu a následně jsou srovnány s průměrnými hodnotami maximální únosné síly jednotlivých ultrazvukem svařovaných materiálů. Pro každý materiál je vybrána průměrná hodnota maximální únosné síly pro danou sérii svarů. U polymerů PMMA, ABS a PC 30% R je dosahovaná pevnost svařovaných vzorků nad 30%. Polypropylen vykázal více než 50% únosnost svařovaného spoje při porovnání se základním materiálem.

Výsledky svařovaného PMMA



Obr. 51. Závislost únosnosti spoje na energie svaru PMMA

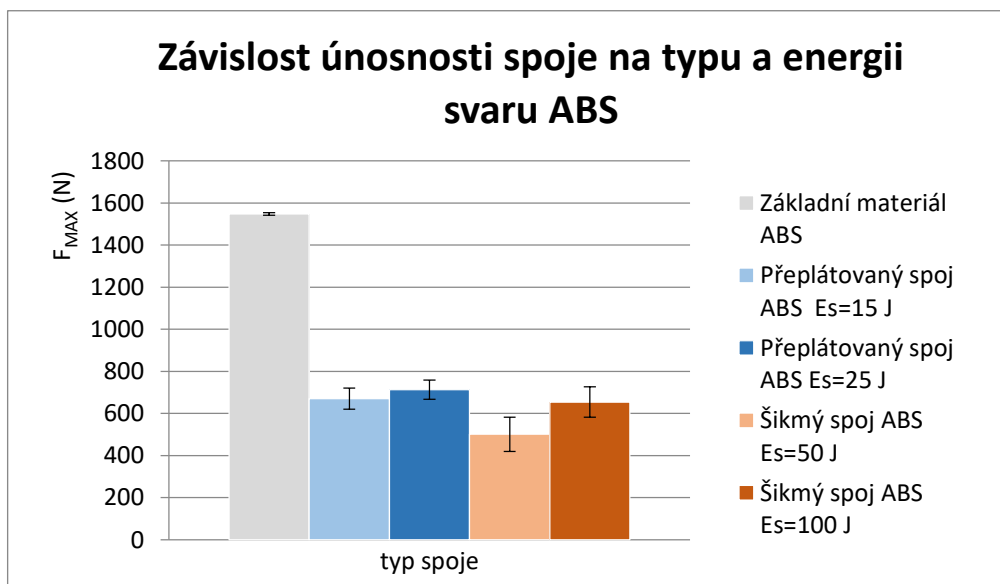
Z výsledků měření maximální síly svařovaných vzorků z PMMA při různých energiích svaru bylo zjištěno, že se zvyšující se energií svaru byla dosahována vyšší pevnost spoje. U vzorků svařených energií 50 J byly naměřeny hodnoty s velkým rozptylem, který může být způsoben nekvalitním provedením některých ze svarů v této sérii. Při energii 100 J došlo k poklesu maximální síly, což mohlo být pravděpodobně způsobeno velkým natavením materiálu nebo velkou přitlačnou silou.



Obr. 52. Závislost maximální síly na typu spoje PMMA

U polymeru PMMA byly testovány různé varianty spoje. Výchozím typem byl přeplátovaný spoj. První modifikací byla úprava konce vzorku provedená zkosením pod úhlem 30° za účelem snížení smykového napětí v místě náhlé změny tloušťky. U této modifikace došlo k nepatrnému zlepšení únosnosti oproti variantě bez zkosení. Druhou modifikací bylo vytvoření šikmého spoje, kde bylo dosaženo vyšší průměrné pevnosti, než u spoje přeplátovaného. S největší pravděpodobností je to dáno odstraněním excentricity jednostranně přeplátovaného spoje, kde vznikají napěťové špičky v oblasti změny tloušťky vzorku.

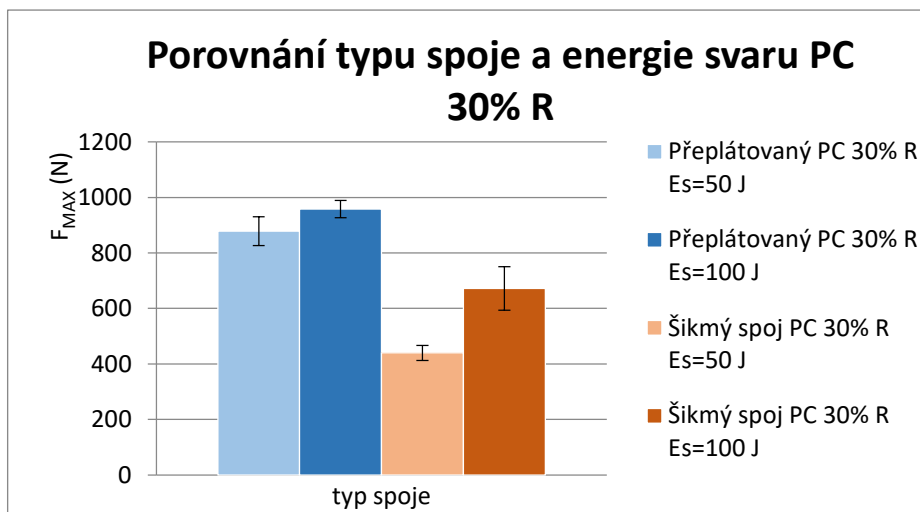
Výsledky svařovaného ABS



Obr. 53. Závislost únosnosti spoje na typu a energii svaru ABS

Zkušební tělesa z polymeru ABS byly svařovány ve dvou provedeních. Přeplátovaným spojem při energiích 15 J a 25 J. U většiny přeplátovaných svarů docházelo k porušení vzorku v místě vrubu, proto jsme tento polymer svařovali nižšími energiemi a pozorovali, zda dojde k porušení ve svaru. Při energii 15 J docházelo k porušení ve svaru a při energii 25 J k porušení mimo svar. Šikmý svar jsme pak svařovali energiemi 50 a 100 J. V obou variantách docházelo převážně k porušení vzorku ve svaru. I při použití vyšších energií nebylo u šikmého svaru dosaženo větší pevnosti než u svaru přeplátovaného. Z důvodu nedostatku vzorků nebylo možné provést další varianty pro tento materiál.

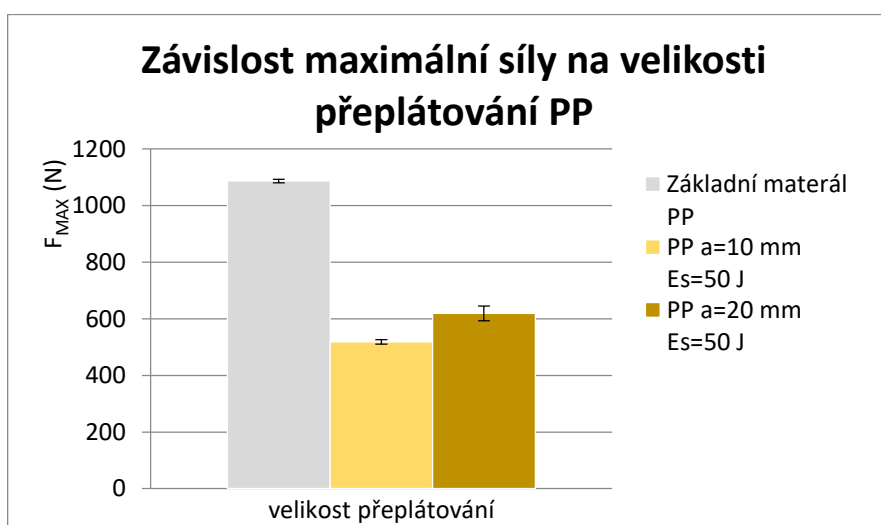
Výsledky svařovaného PC 30 % R



Obr. 54. Porovnání typu spoje a energie svaru PC 30% R

Polykarbonát obsahující 30% recyklátu byl dobře svařitelný při přeplátovaném svaru. Recyklát nejspíše obsahoval vysoké procento skelných vláken, což bylo viditelné při řezání a broušení polymeru. Skelná vlákna jsou dobrými vodiči akustické energie, ale při natavení a spojení může dojít k nechtěné orientaci vláken, a tím snížení pevnosti svařeného materiálu. Na základě stanovené hypotézy lze říci, že se zvyšující se energií svaru se zvyšuje také jeho pevnost.

Výsledky svařovaného PP



Obr. 55. Závislost maximální síly na velikosti přeplátování PP

Polypropylen patří mezi méně pevné, ale více houževnaté plasty. Svařování ultrazvukem je do jisté míry omezené. Vzorky jsme svařovali při energii 50 J s různou velikostí přeplátování. V obou případech docházelo k poruše vzorku ve svaru, což může být pravděpodobně způsobeno houževnatostí PP.

Stanovení hypotézy:

Má velikost přeplátování u polypropylenu vliv na výslednou únosnost spoje F_{\max} ?

S ohledem na malý počet měření a velikost směrodatné odchylky je vhodné použít statistického prostředku jednocestná ANOVA

- Formulace nulové hypotézy $H_0: \mu_1 = \mu_2$
- Alternativní hypotéza $H_A: \mu_1 \neq \mu_2$
- Pravděpodobnost $(1 - \alpha) = 0,95$
- Hladina významnosti $p < \alpha \rightarrow$ zamítáme H_0 a přijmeme H_A

Tab. 17. Výsledky statistického prostředku jednocestná ANOVA

| ANOVA | | | | | | |
|-------------------|-------|--------|-------|--------|-----------|--------|
| Zdroj variability | SS | Rozdíl | MS | F | Hodnota P | F krit |
| Mezi výběry | 25301 | 1 | 25301 | 11,227 | 0,010 | 5,318 |
| Všechny výběry | 18029 | 8 | 2254 | | | |
| Celkem | 43330 | 9 | | | | |

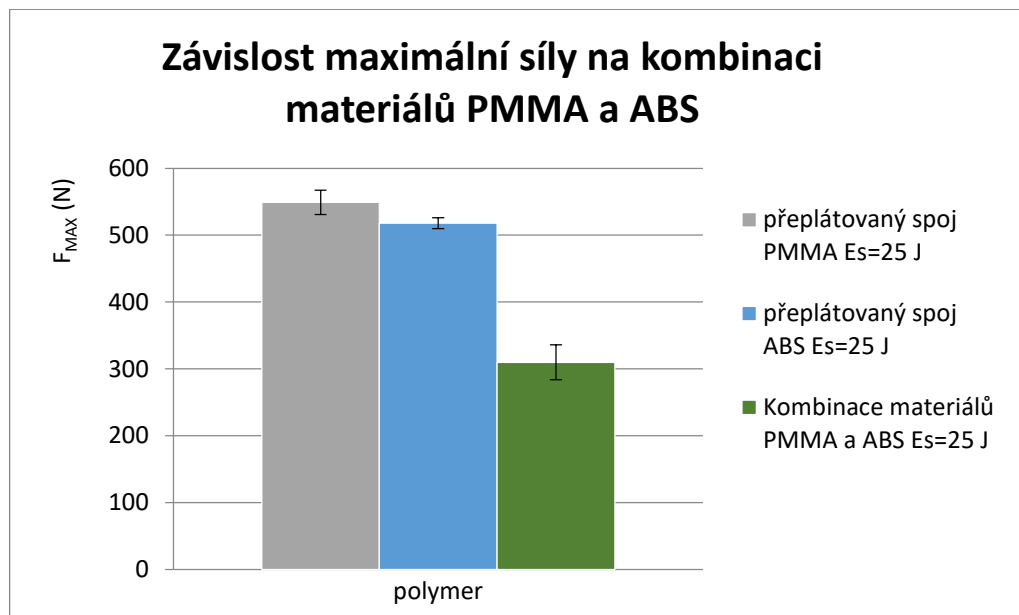
- $p=0,010 < \alpha=0,050$

Hladina významnosti $p=0,010 < \alpha=0,050 \rightarrow$ zamítáme H_0 a tvrdíme, že velikost přeplátování má statistický vliv na únosnost spoje F_{\max} .

Na základě vyvrácení nulové hypotézy můžeme tedy tvrdit, že při zvětšení velikosti přeplátování došlo k menšímu nárůstu únosnosti svaru, kde s největší pravděpodobností došlo k rozložení stejného množství energie svaru do větší plochy, a tím se zmenšila hloubka svaru, která má za následek tvorbu vrubu v materiálu.

Výsledky kombinace materiálů PMMA a ABS

Termoplasty lze vzájemně svařovat, ale není dosaženo pevnosti jako u stejných materiálů.



Obr. 56. Závislost maximální síly na kombinaci materiálů PMMA a ABS

Polymery ABS a PMMA patří mezi ultrazvukem vzájemně svařitelné materiály. Polymery PMMA i ABS svařené za stejných procesních podmínek vykazovaly přibližně stejnou hodnotu maximální únosné síly. Při kombinaci těchto materiálů došlo ke snížení únosnosti spoje o více než 30% z průměrné hodnoty materiálu ABS svařeného energií 25 J.

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá problematikou ultrazvukového svařování polymerních materiálů. V teoretické části jsou rozebrány hlavní používané technologie svařování plastů, které jsou rozděleny dle působení energie. Popsána je technologie svařování ultrazvukem, kde jsou vysvětleny fyzikální principy vzniku mechanicko-akustického vlnění. Práce klade důraz na využití ultrazvukového svařování plastů při praktických aplikacích. Jsou zde popsány materiály vhodné pro ultrazvukové svařování. Závěr teoretické část popisuje složení svařovací soustavy a vysvětluje funkce jednotlivých součástí.

Experimentální část práce je zaměřena na dokončení a upravení svařovacího přípravku pro osazení ultrazvukového svařovacího zařízení používané ve firmě Plastika a.s. Kroměříž. Na vybraných druzích termoplastů byla provedena optimalizace svařovacích parametrů. Hodnocena byla kvalita provedených svarů a jednotlivé vzorky byly podrobeny tahové zkoušce za účelem zjištění maximální únosnosti spoje.

U polymerů PMMA, ABS a PC 30% R dosahovala pevnost svařovaných vzorků 30% pevností základních materiálů, u polypropylenu dosahovala únosnost svařovaného spoje přibližně 50% při porovnání se základním materiálem.

Z výsledků měření svařovaných vzorků z PMMA při různých energiích svaru bylo zjištěno, že nejvyšší únosnosti spoje bylo dosaženo u vzorků svařených energií 50 J. Zkosením konce vzorku pod úhlem 30° v místě spoje se prokázalo nepatrné zlepšení mechanických vlastností zjišťovaných při tahové zkoušce. Druhou modifikací bylo vytvoření šikmého spoje, kde bylo dosaženo vyšší průměrné hodnoty pevnosti, než u spoje přelátovaného. S největší pravděpodobností je to dáno odstraněním excentricity jednostranně přelátovaného spoje, kde vznikají napěťové špičky v oblasti změny tloušťky svařeného vzorku.

U polymeru ABS byly provedeny přelátované spoje svařené energií 15 J a 25 J. Šikmé svary byly svařeny energiemi 50 J a 100 J. I při použití vyšších energií nebylo u šikmého svaru dosaženo větší únosnosti než u svaru přelátovaného.

Polykarbonát obsahující 30% recyklátu byl dobře svařitelný při použití přelátovaného svaru. Recyklát obsahoval vysoké procento skelných vláken, které jsou dobrými vodiči akustické energie, a proto polykarbonát vykazoval kratší svařovací časy oproti polymerům PMMA a ABS.

Vzorky PP byly svařeny přeplátovaným svařem, kde byl zjišťován vliv velikosti přesazení zkušebních vzorků. Svařování probíhalo při energii 50 J. Velikost přesazení byla stanovena na 10 mm a 20 mm. V obou případech došlo k přetržení ve svaru. Pro statistické vyhodnocení byla u tohoto materiálu stanovena hypotéza, zdali má velikost přeplátování vliv na výslednou únosnost spoje. Na základě testování pomocí jednocestné ANOVy, a následného srovnání hladin významnosti, byla vyvrácena nulová hypotéza a přijata alternativní hypotéza. Můžeme tedy tvrdit, že při zvětšení velikosti přeplátování došlo k nárůstu únosnosti svaru. Tato skutečnost může být způsobena rozložením stejného množství energie svaru do větší plochy, a tím ke zmenšení hloubky svaru.

Polymery PMMA i ABS svařené za stejných procesních podmínek vykazovaly přibližně stejnou hodnotu maximální únosné síly. Při kombinaci těchto materiálů došlo ke snížení únosnosti spoje o více než 30% z průměrné hodnoty materiálu ABS svařené energií 25 J.

Poznatky získané zpracováním mé diplomové práce mohou být využity jednak při praktických aplikacích, a rovněž mohou posloužit při orientaci v problematice ultrazvukového svařování polymerních materiálů. Pro další výzkum by bylo vhodné zaměřit se na konkrétní materiál, prozkoumat teplotně ovlivněnou oblast svaru a s tím související možnosti strukturálních změn v materiálu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LOYDA, Miloslav; ŠPONER, Vlastimil; ONDRÁČEK, Ladislav. Svařování termoplastů. 2. vyd. Praha: UNO Praha, 2011.
- [2] *Technologie zpracování plastů: Svařování plastů* [online]. 2014 [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/183/13.htm>
- [3] Ondřej Kotera. *Problematika dějů při svařování plastů vybranými technologiemi* [online]. 2016 [cit. 2018-03-06]. Dostupné z: <http://www.digitovarna.cz/clanek-84/problematika-deju-pri-svarovani-plastu-vybranymi-technologie-mi.html>
- [4] ŠVEHLA, Štefan a Zdenko FIGURA. *Ultrazvuk v technológii*. Bratislava: Alfa, 1984, 521 s.
- [5] BECKER, Ulrich. Svařování plastických materiálů ultrazvukem: přel. z něm. orig. Praha: UVTEI, 1969.
- [6] *Ultraschallschweißen – die Basics. HerrmannUltraschall* [online]. [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <https://www.herrmannultraschall.com/de/ultraschall-grundlagen/kunststoffe-schweissen/>
- [7] Vznik a druhy vlnění. *Fyzika007* [online]. [cit. 2018-03-08]. Dostupné z: <http://www.fyzika007.cz/mechanicke-kmitani-a-vlneni/vznik-a-druhy-vlneni>
- [8] SCHMID, D. a kol. Řízení a regulace pro strojírenství a mechatroniku. 1. vyd. Praha: Eu-ropa - Sobotáles, 2005. ISBN 80-86106-10-9.
- [9] Magnetostriction. *MTSsensors* [online]. 2001 [cit. 2018-03-08]. Dostupné z: <http://www.mtssensors.com/fileadmin/media/pdfs/551019.pdf>
- [10] Ultrazvukové svařování plastů. *Wiretech* [online]. [cit. 2018-03-06]. Dostupné z: <https://www.wiretech.cz/c/ultrazvukova-technologie/ultrazvukove-svarovani-plastu>
- [11] LENFELD, Petr. *Zpracování plastů: Svařování plastů* [online]. Liberec [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/12.htm#121

- [12] BĚHÁLEK, Luboš. *Přehled základních termoplastů, reaktoplastů a termoplastických elastomerů* [online]. Technická univerzita v Liberci, 2006 [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/vip/VIP%20PLASTY.pdf
- [13] ŠUBA, Oldřich. *Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů*. Vyd. 3. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 112 s. ISBN 978-80-7318-948-8.
- [14] Ultrazvukové svařování plastů – princip, 2014. *ULTRATECH* [online]. [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: <http://ultratech.cz/ultrazvukove-aplikace/ultrazvukove-svarovani-plastu/>
- [15] Podrobné vysvětlení svařování plastů. *WIRETECH* [online]. [cit. 2018-04-05]. Dostupné z: <https://www.wiretech.cz/c/ultrazvukova-technologie/ultrazvukove-svarovani-plastu/obecne-informace>
- [16] Rovinná napjatost – rovinné přetvoření. *Plasticita* [online]. [cit. 2018-04-05]. Dostupné z: http://www.kmp.tul.cz/system/files/p_17_03_2015rovin_napj.pdf
- [17] ŠUBA, Oldřich. *Mechanické chování těles*. 5. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 101 s. ISBN 978-80-7318-907-5.
- [18] BĚHÁLEK, Luboš.: *Mechanické vlastnosti polymerů – statické namáhání* [online]. [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/09.html>
- [19] LUKÁŠEK, Jaromír. *Svařování ultrazvukem*. *Welding.cz* [online]. 2006 [cit. 2018-04-05]. Dostupné z: <http://www.welding.cz/ultrazvuk/ultrazvuk.htm>
- [20] ZLÁMAL, Filip. *Pokročilé statistické metody* [online]. In: . 2013, s. 41 [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <http://www.med.muni.cz/patfyz/stat.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| | |
|-----------|----------------------------|
| A | Amplituda |
| ABS | Akrylonitrilbutadienstyren |
| E | Modul pružnosti |
| E_s | Energie svaru |
| f | Frekvence |
| F_g | Gravitační síla |
| F_{max} | Maximální síla |
| F_p | Přítlačná síla |
| F_v | Obsluhou vyvozená síla |
| H_0 | Nulová hypotéza |
| H_A | Alternativní hypotéza |
| HDPE | Vysokohustotní polyethylen |
| Hz | Hertz |
| IČ | Infračervené |
| J | Joule |
| LDPE | Nízkohustotní polyethylen |
| mm | Milimetr |
| M_k | Krouticí moment |
| N | Newton |
| Nm | Newton metr |
| p | Hladina významnosti |
| P | Výkon |
| PA | Polyamid |
| PC | Polykarbonát |

| | |
|----------------|---------------------------|
| PE | Polyethylen |
| PET | Polyethylentereftalát |
| PP | Polypropylen |
| PMMA | Polymetylmetakrylát |
| PS | Polystyrén |
| PTFE | Polytetrafluorethylen |
| PVC | Polyvinylchlorid |
| R | Recyklát |
| s | Sekunda |
| t | Svařovací čas |
| T | Perioda |
| T_g | Teplota skelného přechodu |
| UV | Ultrafialové |
| UZ | Ultrazvuk |
| v | Fázová rychlost |
| W | Watt |
| °C | Celsiův stupeň |
| α | Hladina testu |
| λ | Vlnová délka |
| τ_{xy} | Smykové napětí |
| μm | Mikrometr |
| ρ | Hustota |
| σ | Střední kvadratická chyba |
| σ_{red} | Redukované napětí |
| \bar{x} | Aritmetický průměr |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|---|----|
| <i>Obr. 1. Teplota a napětí ve svarové zóně [3]</i> | 12 |
| <i>Obr. 2. Rozdělení dle způsobu dodání tepla</i> | 13 |
| <i>Obr. 3. Princip svařování horkým tělesem [2]</i> | 14 |
| <i>Obr. 4. Princip svařování extruderem [2]</i> | 16 |
| <i>Obr. 5. Rozdělení zvuku [6]</i> | 18 |
| <i>Obr. 6. Vlnový pohyb [6]</i> | 19 |
| <i>Obr. 7. Postup svařování [6]</i> | 21 |
| <i>Obr. 8. Postup svařování [8]</i> | 22 |
| <i>Obr. 9. Tvarové úpravy kontaktní plochy [6]</i> | 24 |
| <i>Obr. 10. Bodové svařování [10]</i> | 25 |
| <i>Obr. 11. Přírubové svařování [10]</i> | 26 |
| <i>Obr. 12. Torzní svařování [15]</i> | 26 |
| <i>Obr. 13. Nýtování [10]</i> | 27 |
| <i>Obr. 14. Zatařování kovových dílů [10]</i> | 27 |
| <i>Obr. 15. Rozdělení polymerů</i> | 28 |
| <i>Obr. 16. Generátor [10]</i> | 33 |
| <i>Obr. 17. Konvertor [6]</i> | 34 |
| <i>Obr. 18. Booster [6]</i> | 34 |
| <i>Obr. 19. Sonotrody [6]</i> | 35 |
| <i>Obr. 20. Model držáku</i> | 38 |
| <i>Obr. 21. Držák svařovacího zařízení</i> | 39 |
| <i>Obr. 22. Momentový klíč</i> | 39 |
| <i>Obr. 23. Úprava momentového klíče</i> | 40 |
| <i>Obr. 24. Aretační přípravek</i> | 41 |
| <i>Obr. 25. Rozměry zkušebních těles</i> | 41 |
| <i>Obr. 26. Typy použitých spojů</i> | 42 |
| <i>Obr. 27. Úprava zkušebních těles</i> | 42 |
| <i>Obr. 28. Ruční ultrazvukové zařízení Herrmann HSG osazené svařovací sonotrodou</i> | 43 |
| <i>Obr. 29. Svařovací sestava</i> | 44 |
| <i>Obr. 30. Schematické rozložení sil</i> | 44 |
| <i>Obr. 31. Použitá sonotroda</i> | 48 |
| <i>Obr. 32. Dvouosá napjatost [16]</i> | 49 |

| | |
|--|----|
| <i>Obr. 33. Von Misesovo napětí</i> | 49 |
| <i>Obr. 34. Smykové napětí τ_{xy}</i> | 50 |
| <i>Obr. 35. Průběh deformace</i> | 51 |
| <i>Obr. 36. Zkušební zařízení ZWICK 1456</i> | 52 |
| <i>Obr. 37. Svařený vzorek ABS</i> | 53 |
| <i>Obr. 38. Deformační křivka přeplátovaného spoje PMMA svařeného energií 25 J</i> | 54 |
| <i>Obr. 39. Nevhodně svařené vzorky</i> | 57 |
| <i>Obr. 40. Přeplátovaný svar polymeru PMMA svařeného energií 15 J</i> | 59 |
| <i>Obr. 41. Přeplátovaný svar polymeru PMMA svařeného energií 100 J</i> | 60 |
| <i>Obr. 42. Zkosený přeplátovaný svar polymeru PMMA svařeného energií 25 J</i> | 61 |
| <i>Obr. 43. Šikmý svar polymeru PMMA svařeného energií 50 J</i> | 62 |
| <i>Obr. 44. Přeplátovaný svar polymeru ABS svařeného energií 15 J, 25 J</i> | 63 |
| <i>Obr. 45. Šikmý spoj ABS 50 J</i> | 64 |
| <i>Obr. 46. Přeplátovaný spoj PC 30% R 50 J</i> | 65 |
| <i>Obr. 47. Šikmý spoj PC 30% R 50 J</i> | 65 |
| <i>Obr. 48. Přeplátovaný spoj PP 50 J</i> | 66 |
| <i>Obr. 49. Přeplátovaný spoj PMMA a ABS</i> | 67 |
| <i>Obr. 50. Srovnání maximální únosné síly na svařovaných materiálech</i> | 68 |
| <i>Obr. 51. Závislost únosnosti spoje na energii svaru PMMA</i> | 69 |
| <i>Obr. 52. Závislost maximální síly na typu spoje PMMA</i> | 69 |
| <i>Obr. 53. Závislost únosnosti spoje na typu a energii svaru ABS</i> | 70 |
| <i>Obr. 54. Porovnání typu spoje a energie svaru PC 30% R</i> | 71 |
| <i>Obr. 55. Závislost maximální síly na velikosti přeplátování PP</i> | 71 |
| <i>Obr. 56. Závislost maximální síly na kombinaci materiálů PMMA a ABS</i> | 73 |

SEZNAM TABULEK

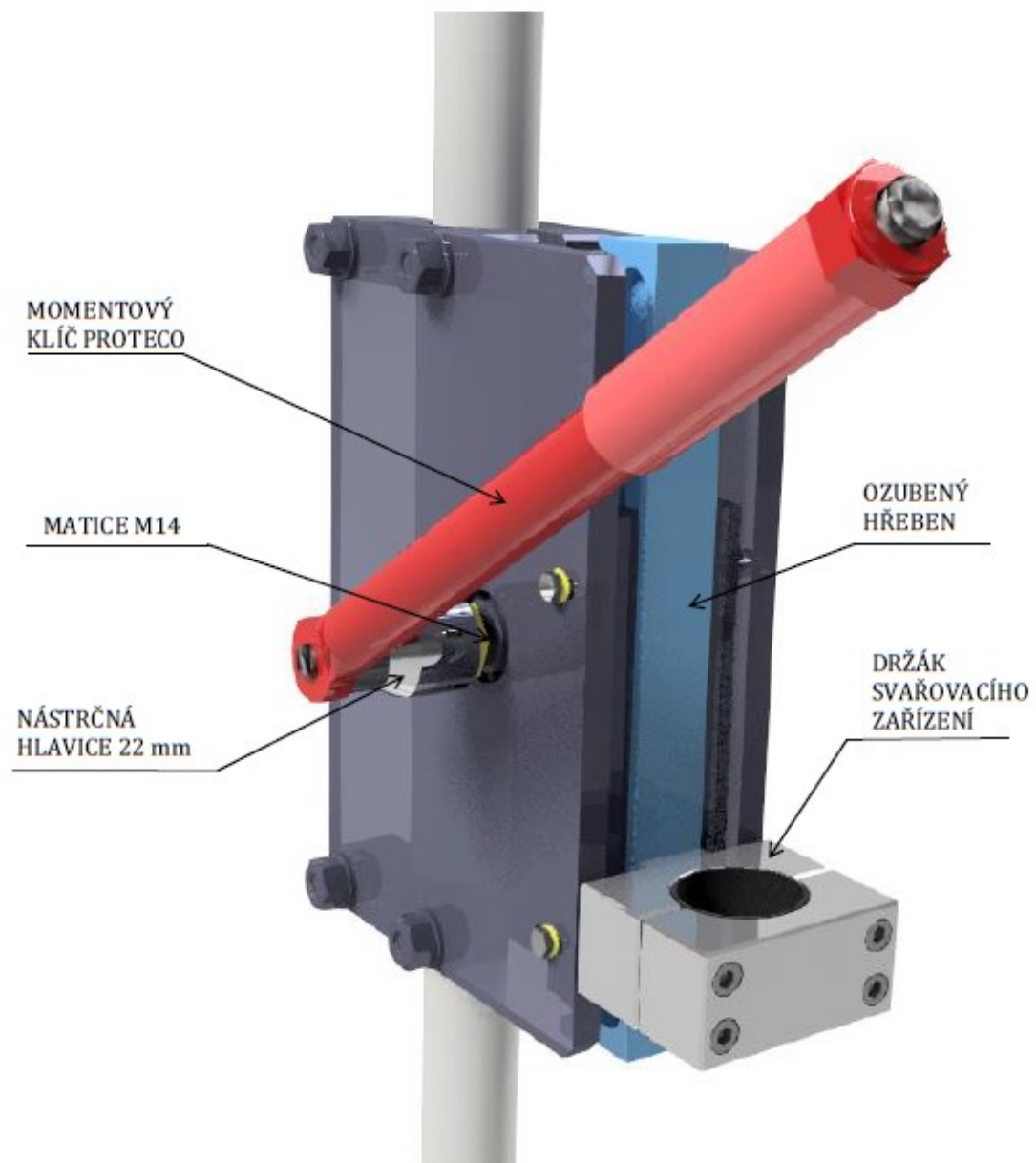
| | |
|--|-----------|
| <i>Tab. 1. Svařitelnost vybraných druhů termoplastů ultrazvukem [4].....</i> | <i>29</i> |
| <i>Tab. 2. Přepočet krouticího momentu na přítláčnou sílu</i> | <i>46</i> |
| <i>Tab. 3. Specifikace použité sonotrody</i> | <i>48</i> |
| <i>Tab. 4. Specifikace trhacího zařízení ZWICK 1456.....</i> | <i>53</i> |
| <i>Tab. 5. Výsledky měření překlátovaného spoje PMMA</i> | <i>54</i> |
| <i>Tab. 6. Mechanická vlastnosti základních materiálů</i> | <i>58</i> |
| <i>Tab. 7. Překlátovaný spoj PMMA 15 J, 25 J</i> | <i>58</i> |
| <i>Tab. 8. Překlátovaný spoj PMMA 50 J, 100 J</i> | <i>59</i> |
| <i>Tab. 9. Zkosený překlátovaný spoj PMMA 25 J</i> | <i>60</i> |
| <i>Tab. 10. Šikmý spoj PMMA 50 J.....</i> | <i>61</i> |
| <i>Tab. 11. Překlátovaný spoj ABS 15 J, 25 J.....</i> | <i>62</i> |
| <i>Tab. 12. Šikmý spoj ABS 50 J, 100 J.....</i> | <i>63</i> |
| <i>Tab. 13. Překlátovaný spoj PC 30% recyklátu 50 J, 100 J</i> | <i>64</i> |
| <i>Tab. 14. Šikmý spoj PC 30% recyklátu 50 J, 100 J</i> | <i>65</i> |
| <i>Tab. 15. Překlátovaný spoj PP 50 J</i> | <i>66</i> |
| <i>Tab. 16. Překlátovaný spoj PMMA a ABS.....</i> | <i>67</i> |
| <i>Tab. 17. Výsledky statistického prostředku jednocestná ANOVA.....</i> | <i>72</i> |

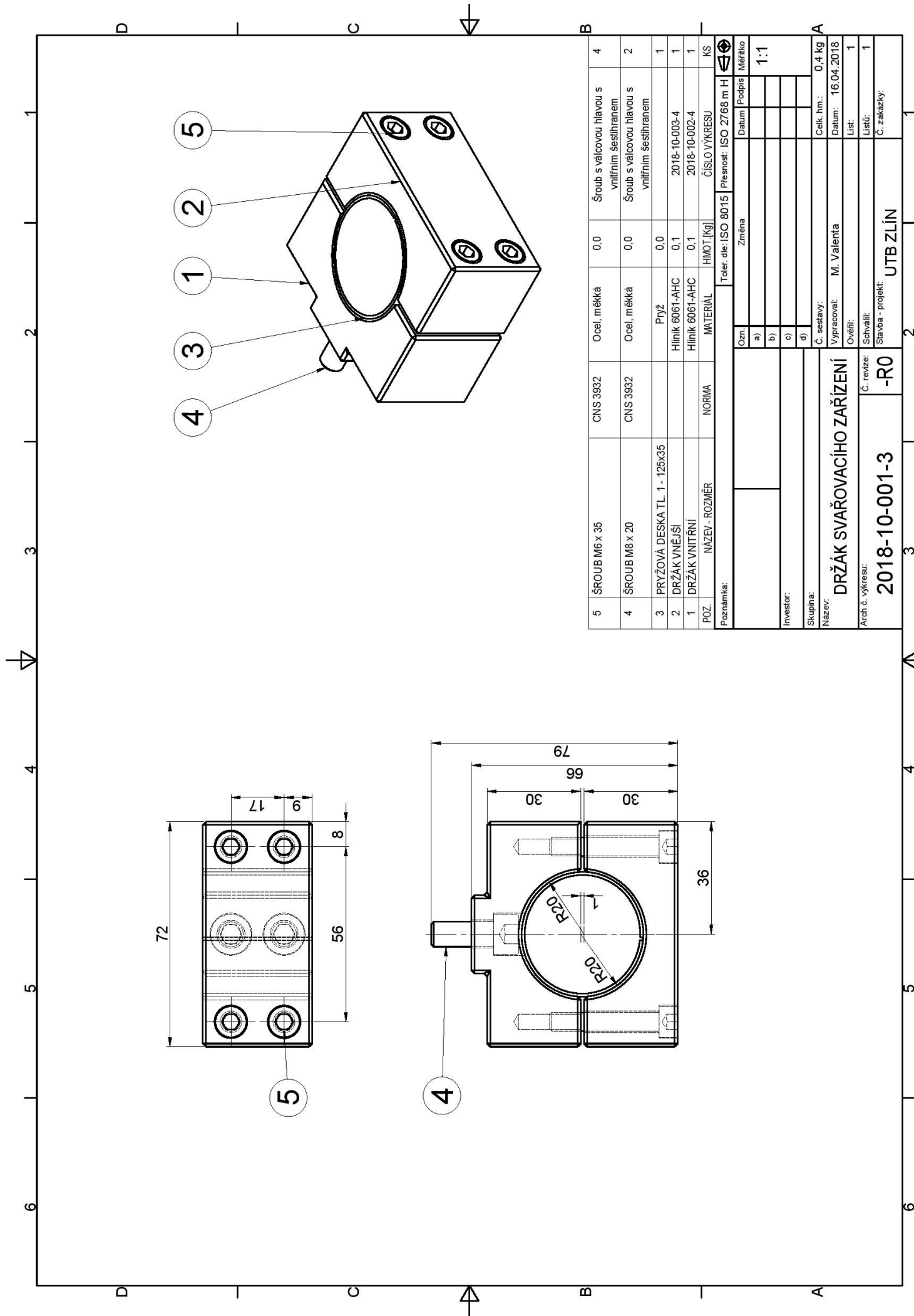
SEZNAM PŘÍLOH

P I Sestava přípravku

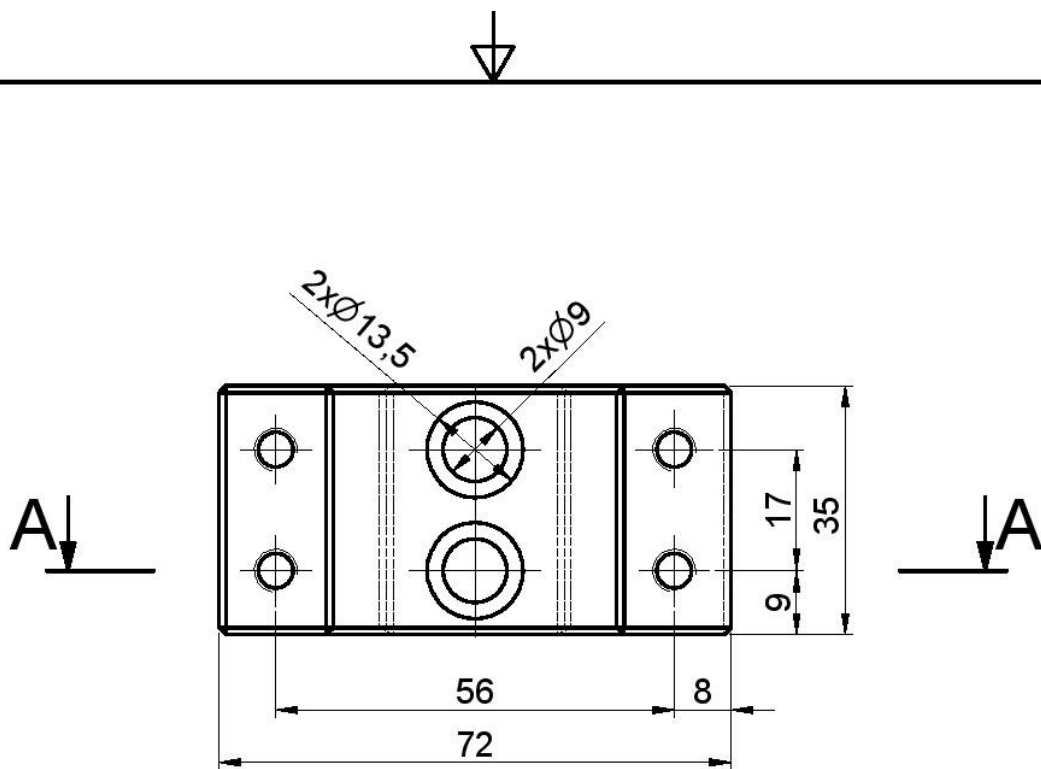
P II Výkresy držáku

PŘÍLOHA P I: SESTAVA PŘÍPRAVKU

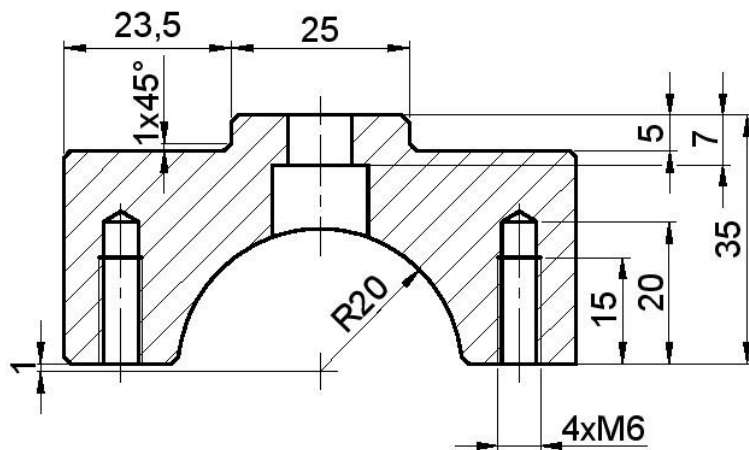




| | | | | | | |
|-------------------|------------------------------|---------------------|-----------------|------------------------|--|------------|
| 5 | ŠROUB M6 x 35 | CNS 3932 | Ocel, měkká | 0,0 | Šroub s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem | 4 |
| 4 | ŠROUB M6 x 20 | CNS 3932 | Ocel, měkká | 0,0 | Šroub s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem | 2 |
| 3 | PRYŽOVÁ DESKA TL. 1 - 125x35 | | Přůž | 0,0 | | 1 |
| 2 | DRŽÁK VNĚJŠÍ | | Hliník 6061-AHC | 0,1 | 2018-10-003-4 | 1 |
| 1 | DRŽÁK VNITŘNÍ | | Hliník 6061-AHC | 0,1 | 2018-10-002-4 | 1 |
| POZ. | NÁZEV - ROZMĚR | NORMA | MATERIÁL | HMOT. [kg] | ČÍSLO VÝKRESU | KS |
| Poznámka: | | Toler. dle ISO 8015 | | Přesnost: ISO 2768 m H | | |
| | | Ozn. | Změna | | Datum | Podpis |
| | | a) | | | | |
| | | b) | | | | |
| | | c) | | | | |
| | | d) | | | | |
| Investor: | | | | Č. sestavy: | Celk. hm.: | 0,4 kg |
| Skupina: | | | | Vypracoval: | Datum: | 16.04.2018 |
| Název: | | | | Ověřil: | Líst: | 1 |
| Arch. č. výkresu: | | | | Č. revize: | Lístů: | 1 |
| 2018-10-001-3 | | | | Stavba - projekt: | Č. zakázky: | |
| | | | | UTB ZLÍN | | |



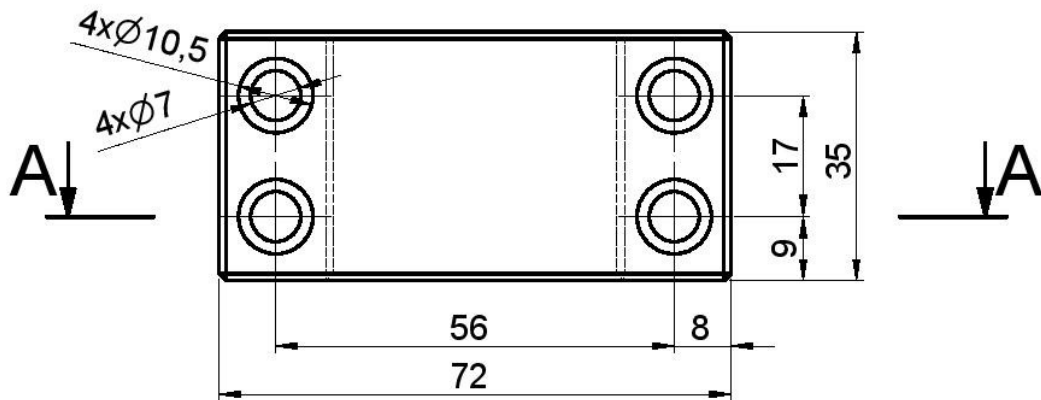
A-A (1:1)



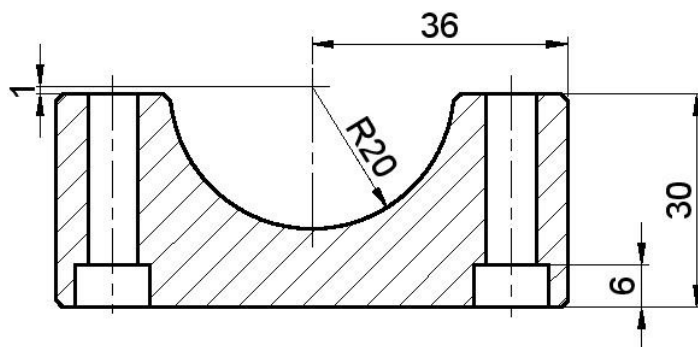
Ra 3,2

VNĚJŠÍ HRANY SRAŽENY 1x45°

| | | | |
|---------------------|-------------------|----------------------|------------------------|
| TYČ 35x35 - 72 | Hliník | 0,1 | 1 |
| POZ. NÁZEV - ROZMĚR | NORMA | MATERIÁL | HMOT.[Kg] |
| Poznámka: | | Toler. dle: ISO 8015 | Přesnost: ISO 2768 m H |
| Investor: | Ozn. | Změna | Datum |
| Skupina: | a) | | Podpis |
| Název: | b) | | Měřitko |
| DRŽÁK VNITŘNÍ | c) | | 1:1 |
| Arch. č. výkresu: | d) | | |
| 2018-10-002-4 | Č. sestavy: | | Celk. hm.: 0,1 kg |
| Č. revize: | Wypracoval: | M. Valenta | Datum: 16.04.2018 |
| -R0 | Ověřil: | | List: 1 |
| | Schválil: | | Listů: 1 |
| | Stavba - projekt: | UTB ZLÍN | Č. zakázky: |



A-A (1 : 1)



Ra 3,2

VNĚJŠÍ HRANY SRAŽENY 1x45°

| | | | | | | |
|------------------|----------------|----------------------------|----------------------|------------------------|-------------------|---------|
| POZ. | TYČ 35x30 - 72 | NORMA | Hliník | 0,1 | ČÍSLO VÝKRESU | 1 |
| | NÁZEV - ROZMĚR | | MATERIÁL | HMOT.[Kg] | | KS |
| Poznámka: | | | Toler. dle: ISO 8015 | Přesnost: ISO 2768 m H | ☞ | |
| | | Ozn. | Změna | Datum | Podpis | Měřítko |
| | | a) | | | | 1:1 |
| | | b) | | | | |
| Investor: | | c) | | | | |
| | | d) | | | | |
| Skupina: | | Č. sestavy: | | | Celk. hm.: 0,1 kg | |
| Název: | DRŽÁK VNĚJŠÍ | Vypracoval: M. Valenta | | | Datum: 16.04.2018 | |
| Arch č. výkresu: | 2018-10-003-4 | Ověřil: | | | List: 1 | |
| | Č. revize: -R0 | Schválil: | | | Listů: 1 | |
| | | Stavba - projekt: UTB ZLÍN | | | Č. zakázky: | |