

Obsah:

1. Úvod.....	13
2. Plasty	15
2.1 Charakteristika plastů a jejich rozdělení	15
2.2 Polarita plastů	15
2.3 Navlhavost plastů.....	16
2.3.1 Účinky vody v polymerech.....	16
2.3.2 Sušení	17
3. Způsoby spojování plastových dílů.....	18
3.1 Nerozebíratelné spojení plastů.....	19
3.1.1 Lepené spoje	19
3.1.2 Svařované spoje.....	20
4. Ultrazvukové svařování plastů	21
4.1 Ultrazvuk	21
4.1.1 Piezoelektrický zdroj ultrazvuku	22
4.1.2 Magnetostrikční zdroj ultrazvuku.....	22
4.2 Princip technologie ultrazvukového svařování.....	23
4.3 Mechanismus vzniku svarového spoje	23
4.4 Vliv materiálu na ultrazvukové svařování	27
4.4.1 Svařitelnost termoplastů	27
4.4.2 Nadmolekulární struktura	30
4.4.3 Modul pružnosti.....	32
4.4.4 Navlhavost	33
4.4.5 Plniva.....	33
4.5 Využití ultrazvukového svařování v průmyslu	34
4.5.1 Automobilový průmysl.....	34
4.5.2 Zdravotnictví	35
4.5.3 Balící a obalová technika.....	36
4.5.4 Zpracování technických textilií	36
4.5.5 Výroba spotřebního zboží a elektronika.....	37
4.6 Ultrazvuková svařovací technika.....	37
4.6.1 Popis ultrazvukového zařízení.....	38
4.6.2 Přenos energie a popis ultrazvukového svařovacího systému.....	39

4.6.3	Upínací přípravek	44
4.7	Svařovací parametry	45
4.7.1	Frekvence svařování	45
4.7.2	Amplituda	46
4.7.3	Svařovací čas	48
4.7.4	Rychlost svařování	48
4.7.5	Spouštěcí svařovací síla	49
4.7.6	Svařovací tlak	49
4.7.7	Velikost a doba přidržovacího tlaku	50
4.8	Porovnání pneumatického a servosystému řízení ultrazvukového svařování	50
4.9	Svarová plocha	51
4.9.1	Požadavky na svarovou plochu	51
4.9.2	Svařovací rovina	51
4.9.3	Energetický usměřovač	53
4.9.4	Druhy spojů	55
4.10	Ostatní ultrazvukové spojovací technologie	60
4.10.1	Ultrazvukové zalisování	61
4.10.2	Ultrazvukové tváření	62
4.10.3	Bodové svařování	63
4.10.4	Ultrazvukové nýtování	64
4.10.5	Ultrazvukové lepení	65
5.	Cíle předkládané disertační práce	66
6.	Zkušební těleso	67
6.1	Materiál pro výrobu	67
6.2	Geometrie zkušebního tělesa	68
6.3	Usměřovač energie	68
6.4	Výroba zkušebních těles	70
6.4.1	Vstřikovací forma	70
6.4.2	Vstřikovací parametry	71
7.	Upínací přípravek	72
7.1	Návrh přípravku	72
7.2	Zhotovení a popis přípravku	73
8.	Ultrazvukové svařovací zařízení	75

8.1	Popis stroje.....	75
8.1.1	Napájecí zdroj – iQ generátor.....	76
8.1.2	Ultrazvukový rezonátor	76
8.1.3	Počítač – iQ Explorer	77
8.2	Výhody ultrazvukových strojů ovládaných servosystémem.....	78
8.3	Svařovací metoda (řízení procesu použitého zařízení)	78
8.4	Svařovací parametry	80
9.	Určení pevnosti spoje	81
9.1	Tahové vlastnosti PA6	81
9.2	Popis měření pevnosti překlátovaného tupého spoje	82
9.3	Hodnocení pevnosti svarového spoje	82
10.	Popis experimentu a provedená měření	84
11.	Sušení vzorků před svařováním	85
12.	Monitorizace svařovacích parametrů	87
12.1	Spouštěcí síla svařování.....	87
12.1.1	Energetický usměrňovač o vrcholovém úhlu 60°	88
12.1.2	Energetický usměrňovač o vrcholovém úhlu 75°	90
12.1.3	Porovnání spouštěcí síly pro obě velikosti energetických usměrňovačů.....	93
12.2	Svařovací amplituda	95
12.2.1	Energetický usměrňovač o vrcholovém úhlu 60°	96
12.2.2	Energetický usměrňovač o vrcholovém úhlu 75°	98
12.2.3	Porovnání svařovací amplitudy pro obě velikosti usměrňovačů	101
12.3	Svařovací rychlost – konstantní během cyklu	103
12.3.1	Energetický usměrňovač o vrcholovém úhlu 60°	104
12.3.2	Energetický usměrňovač o vrcholovém úhlu 75°	107
12.3.3	Porovnání svařovací rychlosti pro obě velikosti usměrňovačů.....	111
12.4	Svařovací rychlost – proměnná během cyklu	114
12.4.1	Nastavení rychlostního profilu.....	115
12.4.2	Naměřená data vybraných rychlostních profilů.....	116
12.5	Porovnání konstantní rychlosti s rychlostním profilem	117
12.5.1	Svařovací síla	117
12.5.2	Porovnání pevnosti	119
13.	Porovnání odlišných způsobů řízení svařovacího nástroje	120



14. Dílčí vyhodnocení výsledků monitorizace svařovacích parametrů.....	122
14.1 Spouštěcí síla	122
14.2 Amplituda	123
14.3 Konstantní svařovací rychlost	124
14.4 Rychlostní profil svařování	127
15. Diskuze výsledků disertační práce	128
16. Přínosy disertační práce	130
17. Doporučení pro další výzkum	132
18. Závěr.....	132
18. Seznam použité literatury.....	135
19. Publikáční činnost spojená s tématem disertační práce	138
20. Seznam příloh a přílohy	141

Seznam použitých zkratk a symbolů:

Označení	Rozměr	Význam
®		ochranná známka
A	μm	Amplituda
A, B	$^{\circ}$	Úhel
ABS		Akrylonitril-butadien-styrén
ASA		Akrylonitril-styren-akrylát
b	m, "	Šířka usměrňovače
B	m, "	Šířka
C		Uhlík
COOH		Karboxylová skupina
ČSN EN ISO		České technické normy, Evropské normy
d	m	Průměr
E	MPa	Modul pružnosti v ohybu
E _s	J	Svařovací energie
F		Fluor
f	Hz	Frekvence kmitů
F	N	Síla
F _T	N	Tahová síla
F _{max}	N	Maximální tahová síla
F _p	N	Spouštěcí svařovací síla
G	N/mm ²	Modul pružnosti ve smyku
GmbH		Společnost s ručeným omezením
H		Vodík
h	m, "	Výška usměrňovače
KS		Koeficient svařitelnosti
L	mm	Dráha příčnicku
LCD		Displej z tekutých krystalů
LCP		Liquid crystal polymer
L _{sv}	m	Svařovací vzdálenost
N		Dusík

NH		Amidová skupina
O		Kyslík
$\varnothing$	m	Průměr
OH		Hydroxylová skupina
PA		Polyamid
PA6		Polyamid 6
PBTP		Polybutylentereftalát
PC		Polykarbonát
PE		Polyetylén
PEEK		Polyéteréterketon
PEI		Polyéterimid
PES		Polyéthersulfon
PET		Polyetyléntereftalát
PMMA		Polymethylmetakrylát
POM		Polyoxymetylén
PP		Polypropylén
PPO		Polyfenyloxid
PPS		Polyfenylénsulfid
PS		Polystyrén
PSU		Polysulfon
PTFE		Polytetrafluorethylen
PVC		Polyvinylchlorid
R^2		Hodnota spolehlivosti vypočtené rovnice
SAN		Styrén-akrylonitril
SB		Houževnatý polystyrén
T	s	Perioda kmitů
$\tan \delta$	1	Mechanický ztrátový činitel
t_d	s	Čas dotlaku
T_g	°C	Teplota zesklenní
T_m	°C	Teplota tání
USB		Univerzální sériová sběrnice dat
v	m/s	Velikost fázové rychlosti vlnění



X		Symbol o provedení měření
λ	m	Vlnová délka
σ	MPa	Napětí v tahu

1. Úvod

V současné době již není problém pomocí moderních technologií a materiálů vyrobit konstrukčně velmi složitý plastový díl, otázkou ale zůstává, za jakou cenu. Proto je nutné s novými a neustále se rozvíjejícími metodami výroby plastových dílů brát ohled nejen na kvalitu výrobku, na jeho estetiku, na mechanické nebo fyzikální vlastnosti, ale v neposlední řadě i na spotřební náklady na výrobu jednoho kusu produktu. Zjednodušeně řečeno, aby měl nový plastový díl či technologie výroby úspěch v tak již nabitém a technologicky vyspělém strojírenském průmyslu, je bezpodmínečně nutné skloubit výborné vlastnosti s nízkou výrobní cenou.

Ve většině aplikací lze výrazně uspořit náklady použitím většího množství méně konstrukčně složitých dílů (s výrazně nižší výrobní cenou) spojených k sobě navzájem pomocí určitého upevnění. Spojováním jednodušších plastových dílů může vzniknout i velmi složitá sestava, která by byla jinak velmi obtížně vyrobitelná z jednoho kusu. Zde je tedy velmi důležité zvážit, zda nižší výrobní cena tvarově a konstrukčně jednodušších dílů je natolik příznivá, aby i po technologii spojení plastových dílů byl výsledek cenově přijatelný.

Disertační práce se zabývá moderní technologií pevného a nerozebíratelného spojování plastových dílů – technologií ultrazvukového svařování. Tato technologie svařování nachází čím dál větší uplatnění ve strojírenském průmyslu, zejména pak v automobilovém a textilním průmyslu, při výrobě elektrických přístrojů, v obalové technice apod. Například v průměrném moderním automobilu je již více než 100 součástí spojených technologií ultrazvukového svařování.

Výzkum byl zadán firmou DUKANE, která zapůjčila Technické univerzitě nejnovější ultrazvukový svařovací systém z modelové řady IQ series vybavený tzv. Melt-Match® technologií. Vzhledem k problematice a doposud velmi omezeným znalostem této moderní technologie svařování pro konkrétní druhy materiálů je hlavním cílem předkládané disertační práce monitorizace svařovacích parametrů pro - firmou DUKANE navržený - silně polární semikrystalický plast a dále vyhodnocení jednotlivých technologických parametrů svařování a jejich vliv na pevnost svarového spoje. Výsledkem je tedy nalezení takových svařovacích parametrů, při kterých svarový spoj vykazuje maximální pevnost s přihlédnutím ke svařovacímu času a spotřebě energie. Pevnost svarového spoje je posuzována ze zkoušky tahem, ale výsledkem není absolutní hodnota meze pevnosti, nýbrž maximální síla potřebná k deformaci svaru (neboli destrukční tahová síla). Jelikož

svařovaná tělesa jsou pouze zkušební tyčinky, není za potřeby tuto deformační sílu přepočítávat na mez pevnosti. Deformační síla zaznamenaná ze zkoušky tahem je pro porovnání různého nastavení svařovacích parametrů zcela dostačující, neboť jak je uvedeno výše, cílem je vzájemné porovnání svařovacích parametrů a jejich vliv na pevnost svaru a nikoliv absolutní hodnota meze pevnosti pro porovnání s jinými materiály. Jednotlivé svařovací parametry jsou v závěrečné části práce vyhodnoceny a pomocí grafů vzájemně porovnány mezi sebou. Výsledkem je vyhodnocení všech monitorizovaných parametrů a určení, kterým parametrem lze do jaké míry ovlivňovat pevnost spoje.

Cíle předkládané disertační práce by se daly shrnout do následujících bodů:

- 1) Výzkum konstrukce a návrhu tvaru svařovaných těles s různou geometrií energetických usměřňovačů pro silně polární polymer;
- 2) Konstrukční úprava vstřikovací formy pro použití různé geometrie usměřňovačů;
- 3) Výroba dostatečného počtu zkušebních těles na vstřikovacím stroji ENGEL VICTORY 80/25;
- 4) Konstrukční návrh a realizace svařovacího přípravku s důrazem na minimalizaci energetických ztrát a jednoduchost zakládání / vyjímání svařovaných těles;
- 5) Monitorizace a parametrizace vybraných svařovacích parametrů včetně vyhodnocení vlivu jednotlivých parametrů na pevnost svaru;
- 6) Výzkum optimálních svařovacích parametrů a jejich verifikace s ohledem na jednotný svařovací čas a optimální poměr pevnost / spotřeba energie;
- 7) Verifikace získaných výsledků s konvenční metodou svařování pomocí pneumatického systému;
- 8) Potvrzení či vyvrácení předkládaných výhod aplikovaného inovačního svařovacího zařízení

Doktorská práce vznikla na základě podpory studentského projektu studentské grantové soutěže, označené na Technické univerzitě v Liberci 2822.

2. Plasty

2.1 Charakteristika plastů a jejich rozdělení

Plasty jsou makromolekulární látky vyráběné buď synteticky, nebo jsou modifikovány z přírodních látek. Synteticky připravované makromolekulární látky vznikají polymerními reakcemi, mezi které patří polymerace, polyadice a polykondenzace. Ve své podstatě to jsou jednoduché chemické reakce, které se vícekrát opakují. Opakování této chemické reakce je umožněno chemickou strukturou výchozí nízkomolekulární sloučeniny nazývaní se monomer. Z této látky se během polyreakcí stává vysokomolekulární látka, která se nazývá polymer. Aby se z polymeru stal plast, je nutné tuto látku smíchat s aditivy, jejichž účelem je specifická úprava vlastností. Z výše popsaných dějů lze říci, že plast je technický materiál, zatímco polymer je chemická látka. Přírodně připravované plasty jsou získávány z přírodních polymerních látek nejčastěji na bázi bílkovin, škrobu, celulózy nebo kaučuku.

Plastové materiály lze členit do několika skupin podle různých hledisek. Např. podle teplotního chování se plasty dělí na termoplasty, reaktoplasty a elastomery. Další skupina plastů se člení podle nadmolekulární struktury na amorfní a semikrystalické nebo dle molekulární struktury na lineární, rozvětvené a zesítěné. Podle chemického složení je možné plastové materiály pojmenovávat jako polyolefiny, polystyreny, chloroplasty, fluoroplasty, polyestery, akryláty nebo vinylové polymery. Z hlediska zaměření disertační práce patří k důležitému členění plastů jejich polarita, podle níž se plasty dělí na polární a nepolární. [1]

2.2 Polarita plastů

Polarita je definována jako posun elektrického náboje mezi jednotlivými atomy v molekule nebo v chemické funkční skupině. Je charakterizována vznikem dipólového momentu, který popisuje nesymetrické rozdělení elektrického náboje v makromolekule nebo ve skupině atomů. Různá elektronegativita chemických prvků, ze kterých je polymer složen, způsobuje odlišnou afinitu elektronů k atomům vytvářejících mezi sebou kovalentní vazbu. Následným posunem elektronů na atomy s větší elektronegativitou vznikají dipóly. Avšak jsou-li monomerní jednotky polymerů symetrické a navíc je utváří stejné funkční skupiny atomů, uvnitř vzniklé dipóly se navzájem kompenzují. Takové polymery se nazývají nepolární (např. PP, PE, PS apod.) a používají se jako dielektrika.

Oproti tomu polární polymery (např. polyamidy) vykazují tzv. trvalý dipól, který nemůže být vykompenzován analogickými skupinami monomerů. Nejvýznamnější dipóly polymerů tvoří skupiny C-H (dipólový moment $1,3 \cdot 10^{30}$), C-F ($6,3 \cdot 10^{30}$) a nejpevnější vazbu vykazuje skupina C-N s hodnotou dipólového momentu přibližně $13,3 \cdot 10^{30}$. V polymerech běžně vyskytující se prvky jako uhlík, dusík, kyslík nebo fluor tudíž vykazují největší afinitu vazeb k elektronům. [1], [2]

2.3 Navlhavost plastů

Navlhavost je schopnost materiálu absorbovat vodu v podobě páry z ovzduší. Voda může být vázána buď pouze k povrchu polymeru (jedná se o povrchovou vlhkost) nebo v jeho celém objemu (kapilární vlhkost). Nejvíce absorbují vzdušnou vlhkost polární plasty, které obsahují hydrofilní skupinu v makromolekule podporující sorpci vody. Mezi tyto skupiny patří -OH, -COOH, -NH, -O-. Polární plasty absorbují vodní vlhkost přímo ze vzduchu, přičemž některé molekuly vody se navážou na řetězec polymeru pomocí mezimolekulárních sil. Množství vlhkosti, které absorbuje polární plast, závisí na teplotě a relativní vlhkosti vzduchu. Navlhavý polymer absorbuje vodu z atmosféry do takové míry, než nastane rovnováha vlhkosti s okolním vzduchem. Tento proces maximálního nasycení polymeru vodou může trvat až několik dní, záleží na typu polymeru a relativní vlhkosti okolního prostředí. [3]

2.3.1 Účinky vody v polymerech

V praktickém používání jsou polymerní materiály vystavovány okolním vlivům, které mohou zapříčinit znehodnocení materiálu a tím i nevhodnost k dané aplikaci. Voda je jedním z hlavních faktorů způsobujících ztrátu užitných vlastností plastů. Voda působící přímo na polymer nebo na jeho přísady jej může ovlivňovat z chemického, mechanického i fyzikálního hlediska.

Z chemického hlediska je největším negativem účinku vody difuze vlhkosti do polymeru, kde voda zvětšuje vzdálenost mezi molekulami a způsobuje tak vznik hydrolyzy. Tento chemický děj vede ke snížení polymeračního stupně polymeru a také k vytvoření nových koncových skupin v řetězci. Dochází tak k poklesu relativní molekulové hmotnosti a tím i k poklesu pevnosti polymeru. Voda může také způsobit hydrolyzu plniv (typickým příkladem jsou dřevěná plniva) a přísad projevující se negativně na změně vlastností plastu. Hydrolyzu významně urychluje zvýšená teplota (nad

100 °C), kyselé nebo zásadité prostředí. Nejvíce náchylné jsou na vznik hydrolýzy polymery obsahující v řetězci hydrolyzovatelné skupiny – esterové, amidové a nitrilové.

Z fyzikálního hlediska je negativní účinek vody spojován s botnáním polymeru, dále se změnou jeho krystalinity a vyluhováním přísad a plniv. Přítomnost vody může způsobit vymývání antioxidantů a světelných stabilizátorů. Tento proces poté významně urychluje korozi polymeru a zhoršuje jeho stabilitu.

Voda taktéž může působit v navlhavých plastech jako změkčovaadlo. V tomto případě výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti plastu, především pevnost a houževnatost. Se změnou teploty se voda obsažená v plastu může vypařovat nebo zamrzat, dochází tím ke změně rozměrů za vzniku vnitřního pnutí. Důsledkem je porušení celistvosti materiálu vznikem trhlinek, roste pórovitost a může se zvýšit i nasákavost. Vypařování vody negativně ovlivňuje např. svařovací proces, naopak zamrzání vody způsobuje zvětšení objemu způsobené změnou skupenství. [4]

2.3.2 Sušení

Negativní účinky vody lze eliminovat procesem sušení, při kterém je navlhlý polymer vystaven nejčastěji proudění horkého vzduchu v sušicím zařízení. Sušicí zařízení lze dělit do různých skupin podle několika hledisek. Příkladem je dělení na vakuové a atmosférické sušicí zařízení (tzn. podle vnitřního tlaku), dále na souprroudé, protiproudé nebo se zkříženými proudy (tzn. podle vzájemného pohybu sušeného materiálu a sušícího média), případně dělení podle oběhového systému na zařízení s uzavřeným, otevřeným, nuceným nebo přirozeným oběhem. Doba a teplota sušícího procesu je odlišná pro různé druhy plastů. Hodnoty bývají uvedeny v materiálovém listě daného výrobce. Zjednodušeně lze říci, že použitím vyšších sušících teplot je dosaženo rychlejšího odvodu vlhkosti z plastu. Sušicí teplota má pro každý materiál svoji limitní hranici, při jejímž překročení může docházet až k degradaci materiálu (oxidace, změna barevného odstínu, změna mechanických vlastností, vylučování aditiv apod.). Navlhlý materiál musí být sušen pozvolna, aby horký vzduch prostoupil celým objemem plastu. Se zvyšující se teplotou uvnitř sušeného plastu dochází k difuzi vlhkosti, molekuly vody postupně prostupují k povrchu, kde následně dochází k uvolňování těchto molekul do okolního prostředí. Proces sušení i navlhání je vratný, tudíž po vysušení a nevhodném skladování navlhavý plast opět absorbuje vodu a je nutné jej znovu sušit. [2]

3. Způsoby spojování plastových dílů

Z hlediska používání tvarově složitějších plastových dílů nabývá neustále na významu nutnost procesně spolehlivé a zároveň ekonomicky efektivní spojovací metody. Spojení plastových dílů lze uskutečnit několika způsoby, jejichž určujícím faktorem je možnost takto spojený díl po montáži znovu rozebrat či nikoliv. Na základě tohoto limitního faktoru jednotlivých spojovacích metod lze rozdělit spoje na rozebíratelné a nerozebíratelné. Použití každé z metod spojování je dáno konstrukcí spoje a jeho přednostmi, popřípadě eliminací záporných vlastností.

Co se týče rozebíratelného spojení plastových dílů, již samotná konstrukce spoje určuje hlavní výhodu a tou je možnost opakovaně spojit a rozpojit sestavu. K dalším výhodám patří možné použití normovaných dílů a cenová výhoda z hlediska přímých nákladů na díly. Nevýhodou je poté čas potřebný k montáži spoje spolu s možností chyby při montáži. Takto vytvořený spoj také není samosvorný, zejména u plastových závitových spojení dochází k pozdějšímu uvolňování napětí a po jistém čase můžou dojít k povolení spoje.

Použití nerozebíratelného spojení je aplikováno v těch případech, kde není požadováno pozdější rozebrání např. z hlediska bezpečnosti (např. airbagy v automobilovém průmyslu) nebo je snahou zkrátit čas montáže u velkosériové výroby, popř. kde je vyžadována vysoká procesní spolehlivost. Výhody i nevýhody tohoto typu spojování dílů jsou samozřejmě dány jednotlivými technologiemi. Z hlediska zaměření disertační práce jsou následující odstavce zaměřeny spíše na nerozebíratelné spojování plastů. [5]



Obr. 1 Rozdělení běžných způsobů spojování plastových dílů [5]

3.1 Nerozebíratelné spojení plastů

Nerozebíratelné spojení plastových dílů je často realizováno svařováním, lepením, nýtováním nebo nalisováním. Tyto druhy spojů vykazují výhodu oproti rozebíratelnému spojení především ve (zpravidla) vyšší pevnosti spoje, který mnohdy překonává pevnost základního materiálu. Na rozdíl od rozebíratelného spojení nedochází k uvolnění napětí a tím k poklesu pevnosti spoje.

3.1.1 Lepené spoje

Lepení plastových dílů lze charakterizovat jako technologický proces umožňující pevné a nerozebíratelné spojení dvou nebo více komponentů pomocí dodatečné složky – lepidla neboli adheziva. Proces lepení plastů se vcelku podobá lepení kovů, avšak procedura je značně komplikovanější. Plasty jsou totiž polymerní materiály, které se liší nejen molekulovou hmotností (rozdílná distribuce částic s odlišnou délkou řetězce), ale i množstvím nejrůznějších přísad jako barviva, změkčovadla nebo stabilizátory vlastností. A právě tyto přísady mohou velmi zkomplikovat proces lepení. Mezi klady technologie lepení plastů se řadí široký rozsah možností při lepení, jelikož je možné spojovat téměř jakékoliv polymerní materiály o různé velikosti a tloušťce. Postup lepení je navíc velmi jednoduchý a nedochází k ovlivnění struktury okolí spoje jako je tomu např. u svařování či nýtování. Pevnost spoje je při zachování nízké hmotnosti relativně vysoká, navíc při dynamickém namáhání lepený spoj rozvádí rovnoměrněji napětí a spoje jsou nepropustné pro plyny i páry. Zápory tohoto procesu vytvoření nerozebíratelného spoje tkví v nutnosti dokonalé přípravy povrchu, v době potřebné pro ztuhnutí nebo vytvrzení lepidla nebo v nižší tepelné odolnosti lepeného spoje oproti základnímu materiálu.

Důležitou vlastností pro kvalitní lepený plastový spoj je dostatečná adheze základního materiálu k použitému lepidlu. Pro správný výběr lepidla je nutné vědět, že lepidlo by se svými vlastnostmi mělo co nejvíce přibližovat vlastnostem spojovaných plastů. Jedná se především o pevnost a tažnost, dále navlhavost, velikost smrštění, teplotní roztažnost apod.

K základním druhům lepených spojů patří spoje zkosené, přeplátované, tupé nebo stupňovité. Při mechanickém namáhání lepeného spoje dochází v první řadě k deformaci základního materiálu (lepidlo má zpravidla větší pevnost) a následně i k deformaci lepidla. Nejméně příznivý způsob namáhání lepených spojů je ohyb, při kterém spoj vykazuje nejnižší pevnost. Naopak nejvíce lepené spoje odolávají smykovému namáhání. [5], [6]

3.1.2 Svařované spoje

Spolu s lepením je nejčastěji používaným způsobem velmi pevného a nerozebíratelného spojení plastových dílů technologie svařování. Svařování plastů je obdobou technologie svařování kovů. Princip většiny technologií svařování je totožný jak pro plasty, tak i pro kovy. Technologii svařování plastů je možné použít pouze pro termoplasty, jelikož se tyto materiály dají převést do tekutého stavu pomocí přivedeného tepla. Naopak reaktoplasty svařovat nelze, protože po zpracování jsou dále již netavitelné, a tudíž jej nelze převést zpět do plastického stavu.

Technologie svařování plastů prochází neustálým vývojem. Po klasických postupech svařování, jako je např. svařování horkým plynem, přicházejí dnes ke slovu nové, inovativní technologie. Mezi nejmodernější technologie patří svařování ultrazvukem, vysokofrekvenční svařování nebo svařování laserem. Všechny tyto moderní metody svařování dílů mají za úkol nějakým způsobem zlepšit jakost svaru, okolí svarového spoje a v neposlední řadě také pomocí vysokého stupně automatizace ušetřit drahocenný čas výrobního cyklu. Jednotlivé typy svařovacích technologií jsou uvedeny na následujícím schématu (viz obr. 2). [5], [6]



Obr. 2 Základní rozdělení technologií pro svařování plastů

4. Ultrazvukové svařování plastů

4.1 Ultrazvuk

Ultrazvuk je akustické vlnění (neboli periodická změna tlaku) s frekvencí vyšší než 20 kHz, tj. vyšší než je frekvence zvuku. Nižší frekvence jsou označovány jako infrazvuk, naopak akustické vlnění o frekvencích vyšších než 10^{10} Hz jsou nazývány nadzvukové. Základními veličinami popisující ultrazvuk jsou frekvence, perioda a vlnová délka. Vztahy mezi těmito veličinami popisují vzorce (1) a (2).

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

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

Kde je:

f ... frekvence kmitů [Hz];

T ... perioda kmitů [s];

λ ... vlnová délka [m];

v ... velikost fázové rychlosti vlnění [m/s].

Vlnová délka charakterizuje vzdálenost, kterou urazí mechanické vlnění během jedné periody. Vlnové délky ultrazvukových vln jsou velmi malé (např. frekvenci 20 kHz odpovídá ve vzduchu vlnová délka přibližně 1,7 cm/s), a tudíž se ultrazvuk postupující kolem běžných přírodních překážek téměř neláme. To znamená, že ze směru šíření ultrazvuku lze velice přesně určit polohu jeho zdroje nebo tělesa, od něhož se odrazil.

Ultrazvuk nachází uplatnění v různých odvětvích průmyslu, ve stavebnictví, ve vojenské technice, v lodní dopravě a samozřejmě ve zdravotnictví. Pomocí ultrazvuku je dále možné zkoušet také vlastnosti materiálů. Jedním z nejčastějších a nejznámějších způsobů využití ultrazvuku je použití při lékařském vyšetření (sonografie) nebo v gynekologii.

K nejčastějším zdrojům ultrazvuku patří piezoelektrické nebo magnetostrikční generátory. V obou případech se jedná o přeměnu elektrické energie na energii akustickou při použití již z názvu vyplývajících fyzikálních jevů – piezoelektrického a magnetostrikčního. Dalším zdrojem ultrazvuku jsou např. mechanické ladičky nebo píšťaly, ty však dosahují pouze malých výkonů při nízkých frekvencích. Posledním

využívaným zdrojem ultrazvuku může být proudící tekutina nebo plyn. Generátory s tímto zdrojem ultrazvuku využívají různé hydrodynamické efekty. [7], [8]

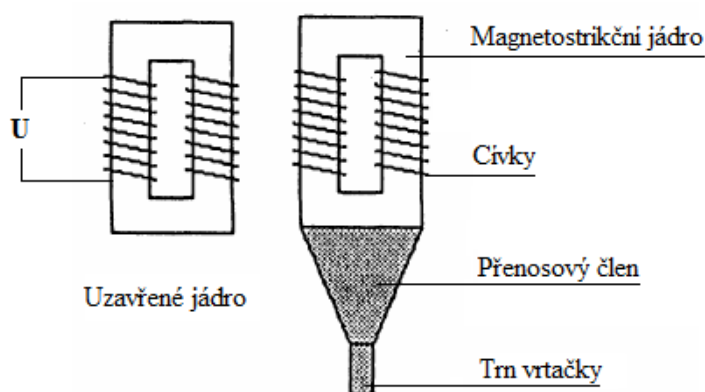
4.1.1 Piezoelektrický zdroj ultrazvuku

Piezoelektrina je elektřina vytvořená vlivem mechanického tlaku. Však také piezo znamená v řečtině tlak. V dnešní době je nejznámější piezoelektrickou látkou křemen. Jestliže na piezoelektrickou destičku spojenou s tenkými kovovými elektrodami přivedeme elektrické napětí, destička začne periodicky měnit svůj tvar a začne vibrovat. Při dostatečně vysoké frekvenci začne být sama zdrojem ultrazvuku. Elektrická energie se mění na mechanickou, která rozkmitá okolní prostředí. Šíření vln je možné při přitlačení destičky k povrchu cizího tělesa. Piezoelektrický zdroj ultrazvuku se nejčastěji používá pro diagnostické a terapeutické účely. [8]

4.1.2 Magnetostrikční zdroj ultrazvuku

Magnetostrikčním jevem je nazývána změna rozměrů feromagnetických látek vyvolanou jejich magnetizací. Nejběžnějším magnetostrikčním materiálem nacházející největší technické uplatnění je nikl a jeho slitiny s železem, popř. kobaltem. Princip magneto-strikčního zdroje ultrazvuku je následující. Přivedeme-li střídavý proud do cívky navinuté na niklovou tyč, vytvoří cívka ve své dutině magnetické pole. Magnetické pole vyvolává periodickou změnu délky niklové tyče umístěné v dutině cívky. Tyč začíná vibrovat a při dostatečné frekvenci proudu se stává zdrojem ultrazvuku.

Nejjednodušším magnetostrikčním měničem ultrazvuku je niklová tyč, zdroj může mít ale i složitější tvar. Typickým příkladem je měnič transformátorového typu s uzavřeným jádrem používaný např. pro napájení ultrazvukové vrtačky (viz obr. 3). [8]



Obr. 3 Schéma napájení ultrazvukové vrtačky pomocí magnetostrikčního zdroje [8]

4.2 Princip technologie ultrazvukového svařování

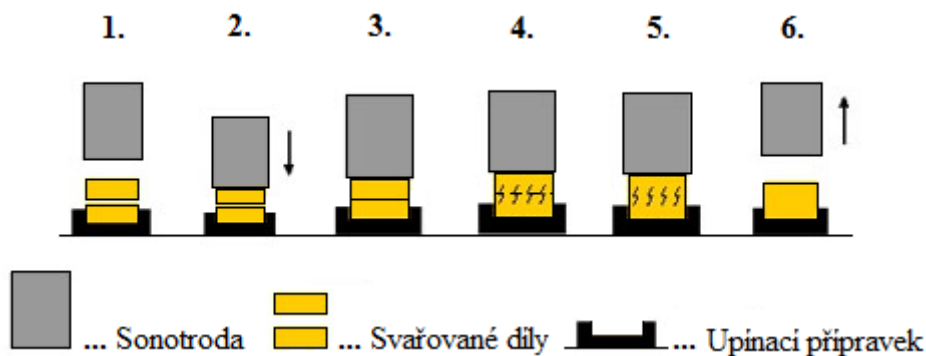
Ultrazvukové svařování je technologie spojování plastových komponentů využívající mechanických kmitů o vysoké frekvenci pro natavení základního materiálu a vytvoření svarového spojení. Zdrojem kmitů je ultrazvukový měnič, který je napájen vysokofrekvenčním generátorem proudu a poskytuje frekvenci v rozsahu nejčastěji od 20 kHz do 40 kHz. Ke svařování pomocí ultrazvukových vln se nejčastěji používá frekvence okolo 20 kHz. Avšak je možné svařovat i s frekvencí vln okolo 10 kHz, ale tato zařízení jsou velmi hlučná, neboť již pracují ve slyšitelném frekvenčním spektru lidského ucha. Naopak vysoké frekvence kolem 35 kHz se používají jen pro malé spoje a menší série (takto vysoké frekvence ultrazvukových vln se používají spíše u svařování kovových materiálů).

K tomu, aby byly dva díly vzájemně spojeny technologií ultrazvukového svařování, je nutné je nejdříve upnout do přípravku tak, aby se dotýkaly navzájem svými svařovanými plochami. Pomocí generátoru svařovacího zařízení se nejdříve změní elektrická energie odebíraná ze sítě (50 Hz) na elektrickou energii o velikosti 20 kHz. Tato elektrická energie je transformována na energii mechanickou pomocí konvertoru. Mechanická energie znamená kmitání o velikosti 20 kHz a tento kmitavý pohyb se pomocí speciálního nástroje, kterému se říká sonotroda, přivede na jednu ze svařovaných součástí. Ultrazvukové kmity se poté šíří skrz materiál do místa styku obou spojovaných dílů. Zde se tyto kmity mění v teplo vlivem vzájemného tření molekul o sebe a po překročení teploty tání materiál přechází do plastického stavu a „teče“. V tomto okamžiku začne sonotroda působit na místo spoje tlakem, jenž způsobí vzájemné zatečení molekul svařovaných dílů do sebe. Následným ukončením mechanického pohybu sonotrody a přidržetím dílů pod určitým tlakem po stanovenou dobu je umožněno chladnutí nataveného místa dotyku spojovaných materiálů a vytvořit tak pevný svarový spoj. [9], [10]

4.3 Mechanismus vzniku svarového spoje

Při ultrazvukovém svařování plastů vzniká svarový spoj postupně během několika fází. Jednou z hlavních výhod ultrazvukového svařování je velmi krátký čas potřebný ke spojení dvou dílů, tzn., že jednotlivé fáze svařovacího procesu trvají řádově několik desetin sekundy, maximálně pak jednotky sekund. Následující obrázek zjednodušeně znázorňuje svařovací proces od upnutí dílů do přípravku až po vyjmutí a navrácení nástroje do původní polohy (viz obr. 4). Tento cyklus svařování je popsán jako strojní, kde všechny

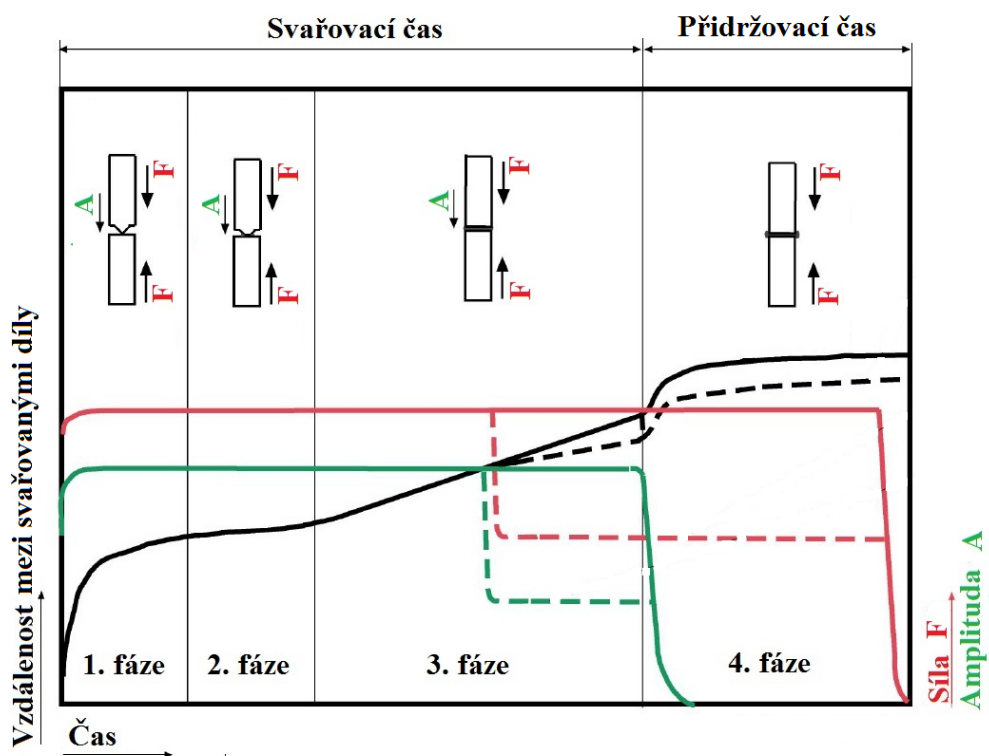
úkony zpravidla mimo vložení a vyjmutí plastových dílů z přípravku jsou prováděny strojově. Při ručním svařování je nástroj (sonotroda) vedena rukou pracovníka.



Obr. 4 Schematické znázornění svařovacího cyklu [11]

1. Vložení spojovaných dílů do upínacího přípravku, který zajistí pevné sevření plastových dílů během procesu svařování z důvodu minimalizace ztrát vlivem vibrací;
2. Svařovací nástroj (sonotroda) se přiblíží k budoucímu svařenci, až dojde ke kontaktu mezi spodní plochou sonotrody a horním dílem svařovaných dílů;
3. Vyvinutí předem nadefinovaného tlaku mezi sonotrodou a svařovanými plastovými díly;
4. Počátek svařovacího procesu, kdy po překročení nadefinovaného tlaku (viz bod 3) začíná sonotroda vertikálně vibrovat s přednastavenou frekvencí (většinou 20 – 40 kHz) v rozsahu odpovídající amplitudě (zpravidla do 100 μm) po stanovenou dobu odpovídající svařovacímu času. Mechanické kmity od sonotrody jsou přenášeny skrz horní plastový díl a pomocí tzv. usměrňovače energie (neboli energetické linky) jsou vedeny k místu dotyku svařovaných dílů, tj. ke svarové ploše. Přenášené vibrace způsobují vnitřní tření molekul plastových dílů a tím vytváří frikční teplo. Jakmile teplota na rozhraní svařence dosáhne teploty tavení plastových dílů, energetická linka začne „téci“ a vibrační pohyb sonotrody se ukončí.
5. Sonotroda působí nadefinovaným tlakem po stanovený čas na natavené svařované díly, které mezitím chladnou a vzájemně se spojují v jeden celek;
6. Po ukončení přitlačného cyklu (bod 5) se sonotroda navrátí do původní polohy a svařený díl je možné vyjmout z upínacího přípravku. [11]

Jednotlivé etapy tvorby svaru v závislosti na vzdálenosti mezi svařovanými díly a čase schematicky popisuje diagram svařovacího procesu na obr. 5. Jedná se o ultrazvukové svařování tupým spojem s trojúhelníkovým usměřňovačem energie. Svařovací cyklus je rozdělen na dvě doby, svařovací čas a čas držení dílců pod tlakem (= přidržovací čas). Svařovací čas obsahuje tři etapy (fáze) tvorby svaru, během přidržovacího času se již vzdálenost mezi svařovanými komponenty příliš nemění a tvorbu svaru popisuje pouze jedna fáze. Červenou barvou je označena velikost svařovací síly během procesu, která se během cyklu udržuje na konstantní hodnotě. Zeleně je vyznačena křivka hodnoty amplitudy. Výslednou vzdálenost svařovaných komponentů po procesu spojení ultrazvukovým svařováním je možné zmenšit snížením síly a amplitudy během 3. fáze tvorby svaru, v diagramu znázorněno pomocí čárkovaných čar.



Obr. 5 Diagram svařovacího procesu [12]

Popis jednotlivých fází tvorby svaru:

- 1. Fáze – Natavení - na počátku svařovacího procesu je hrot energetického usměřňovače vtlačován do povrchu protilehlého dílu, kde se vytváří vlivem ultrazvukových vibrací od sonotrody největší teplo. Plocha usměřňovače je malá a tudíž velmi rychle taje a teče ve směru kolmém k působící síle, tzn. svar se

rozprostírá po povrchu protilehlého dílce. Vzdálenost mezi svařovanými díly je dána tokem taveniny usměřovače, v prvním okamžiku kontaktu prudce roste a se snižující se rychlostí tavení energetické linky již není růst mezery mezi díly tak výrazný;

- 2. Fáze – Spojení - ve druhé fázi následuje spojení obou svařovaných dílů. Rychlost tavení usměřovače se neustále snižuje s rostoucí kontaktní plochou svařovaných dílů. Vzdálenost mezi komponenty se zvětšuje jen nepatrně. Rychlost tavení usměřovače ještě není během této fáze konstantní;
- 3. Fáze – Trvalé roztavení - je charakteristické ustáleným stavem tání usměřovače, roztavená vrstva taveniny má konstantní tloušťku. V této fázi je již celá plocha energetického usměřovače roztavena. Pro optimalizaci tloušťky svaru je možné v této fázi snížit amplitudu nebo svařovací sílu (viz čárkované čáry v diagramu na obr. 5). Třetí fáze tvorby svaru končí s ukončením vibračního pohybu sonotrody;
- 4. Fáze – Přidržení – Na počátku fáze sonotroda dokmitává a ještě krátký okamžik se zpracovává tavenina. Po ukončení šíření ultrazvukových vibrací začíná sonotroda působit na tuhnoucí svar pouze přednastaveným tlakem, přičemž nastává doba tuhnutí svaru a teplota v této fázi spolu s tahovou a smykovou deformací určují morfologii svaru. Tloušťka svaru a vzdálenost mezi spojovanými díly se stává po prvotním impulzu tlaku sonotrody téměř konstantní. [12], [13]

Jednotlivé fáze tvorby svaru úzce souvisí s dosaženou pevností spoje. Největších rozdílů v pevnosti lze dosáhnout řízenou optimalizací třetí fáze svařovacího procesu, tj. fáze roztavení. Pevnost svaru vždy závisí na podmínkách tečení v rovině svarové plochy a na teplotě tavení. Zjednodušeně lze říci, že rychlost tvorby svaru (tzn. rychlost svařování) předurčuje výslednou tloušťku vrstvy svaru a tím i konečnou pevnost spojení. Ve většině případů lze očekávat, že čím větší tloušťka vrstvy svaru, tím větší je i výsledná pevnost spoje.

V ideálním případě by měla být rychlost odtavování usměřovače po celou dobu procesu konstantní. Toho lze dosáhnout regulací rychlosti posuvu sonotrody s použitím speciálního softwaru. Ostatní způsoby – regulace síly a amplitudy během 3. fáze (viz obr. 5) – se snaží o vytvoření co nejsilnější tloušťky tavené vrstvy. Tzv. profilování amplitudy je v současnosti běžné pro konvenční pneumatické svařovací lisy, naproti tomu profilování svařovací síly je možné aplikovat pouze pomocí servopohonu svařovacího zařízení. [12]

4.4 Vliv materiálu na ultrazvukové svařování

Při ultrazvukovém svařování dochází k místnímu natavení základního materiálu vlivem vibrační energie, které je docíleno kmitavým pohybem sonotrody. Ke spojení dojde přivedením energetického usměrňovače do plastického stavu a následným přidržením dílů sonotrodou pod určitým tlakem. Technologie je tudíž vhodná pouze pro termoplasty, neboť tato skupina polymerních materiálů je schopná dostat se do plastického stavu pomocí přivedeného tepla od ultrazvukové vibrační energie. Naopak reaktoplasty není možné svařovat pomocí ultrazvuku, jelikož po zpracování nejsou znovu tavitelné a tudíž je nelze přivést opět do plastického stavu.

Na svařitelnost termoplastů pomocí ultrazvuku působí řada faktorů. Mezi nejdůležitější faktory ovlivňující svařitelnost termoplastů patří struktura polymeru, teplota tání, index toku taveniny, modul pružnosti a chemické složení termoplastu. U polyamidových skupin termoplastů značně komplikuje proces svařování jejich vysoká navlhavost. Dalšími vlastnostmi plastů mající vliv na svařitelnost jsou např. součinitel tření, molekulová hmotnost nebo stálost ve fázi měknutí.

4.4.1 Svařitelnost termoplastů

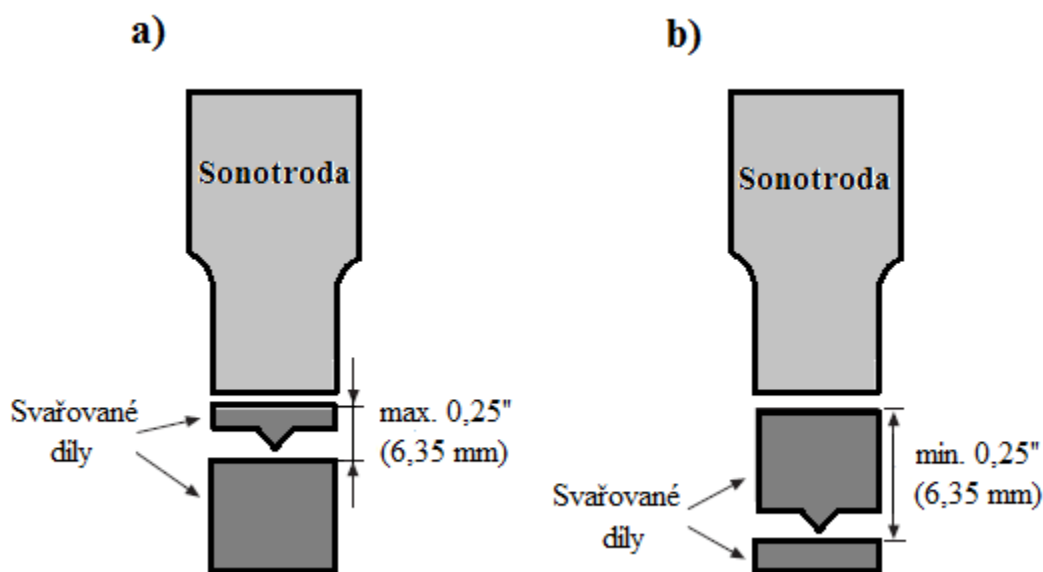
Kromě již výše zmíněných faktorů ovlivňujících kvalitu a pevnost svarového spoje je nezbytné brát v úvahu chemické složení samotného svařovaného materiálu. Lépe se samozřejmě svařují dva naprosto totožné plasty, nejlépe i zhotovené od jednoho výrobce z jedné výrobní šarže. Jen tak lze nejvíce eliminovat nežádoucí vlivy spojené se svařovacím procesem a vyvarovat se tak nepředvídatelným výsledkům. Dva odlišné termoplasty lze ultrazvukově svařovat pouze tehdy, jestliže jsou chemicky kompatibilní a schopné vytvoření molekulové vazby.

Svařitelnost totožných termoplastů

Svařování stejných druhů termoplastů vykazuje výrazně příznivější výsledky nejen, co se týče pevnosti, ale i jakosti povrchu svaru a složitosti nastavení svařovacích parametrů. Značný vliv na svařitelnost má struktura polymeru s modulem pružnosti a ztrátovým činitelem. Všechny tyto vlastnosti termoplastů tlumí do jisté míry vibrační kmity sonotrody a způsobují tím energetické ztráty. Z tohoto důvodu by se měla sonotroda při svařování nacházet co nejblíže svarové ploše. Dle tlumící schopnosti plastů lze

svařování rozčlenit do dvou skupin, na svařování v blízkém poli a v dalekém poli. Dělicí hodnotou vzdálenosti sonotrody od místa svaru je 0,250 palce, tzn. 6,35 mm.

Jestliže je vzdálenost mezi pracovní (tj. čelní) plochou sonotrody a rovinou svaru menší než 0,25" (6,35 mm), jedná se o svařování v blízkém poli. Tato metoda svařování je vhodná zejména pro semikrystalické plasty, které mají větší tlumící schopnost než amorfny plasty a tudíž hůře vedou ultrazvukovou energii od sonotrody. Svařování ve vzdálenosti mezi sonotrodou a svařovací rovinou větší než 0,25" (6,35 mm) se považuje za svařování ve vzdáleném poli. Vzhledem k tlumícím schopnostem plastů, je tato metoda použitelná pouze pro amorfny termoplasty, které jsou tužší a lépe přenášejí ultrazvukové kmity. Pro dosažení srovnatelné kvality svaru jako u svařování v blízkém poli je nutné použít vyšší amplitudu kmitů, vynaložit větší sílu sonotrody (větší tlak) a svařovat po delší čas. Všechny tyto parametry zvyšují i celkovou spotřebovanou energii. Proto pokud je to možné, vždy je doporučováno svařovat v co nejkratší vzdálenosti mezi sonotrodou a svarovou plochou. [13], [14]



Obr. 6 Ultrazvukové svařování – a) v blízkém poli, b) ve vzdáleném poli [14]

Každý svar klade různé nároky na svařovací parametry nebo svařovací vzdálenosti. Kvalifikace svařitelnosti se běžně označuje čísly od jedné (tj. nejlepší svařitelnost) do pěti (nejhůře svařitelné). Základní rozčlenění svařitelnosti v blízkém a vzdáleném poli je uvedeno v tab. 1. Podrobnější rozdělení včetně doporučení ke svařování je k nalezení v příloze 1.

Tab. 1 Svařitelnost termoplastů v blízkém a dalekém poli (1-nejlepší, 5-nejhorší) [15]

	Druh plastu	Svařitelnost	
		v blízkém poli	v dalekém poli
Amorfní plasty	ABS	1	2
	ASA	1	1
	PC	2	2
	PC/ABS	2	2
	PC/Polyester	2	4
	PEI	2	4
	PES	2	4
	PMMA	2	3
	PPO	2	2
	PS	1	1
	PSU	2	3
	PVC	3	4
	SAN	1	1
Semikrystalické plasty	LCP	3	4
	POM	2	4
	PA	3	4
	PBT	3	4
	PET	3	4
	PEEK	3	4
	PE	4	5
	PPS	3	4
	PP	3	4

Svařitelnost odlišných termoplastů

Aby bylo možné dva odlišné termoplasty spojit technologií ultrazvukového svařování, musí se co nejvíce podobat jejich chemické složení. Materiály musí obsahovat podobné molekulární skupiny ve struktuře, musí být schopné vytvořit molekulovou vazbu a mít podobné chování při tečení. Rozdíl v teplotě tečení nesmí překročit hodnotu 22 °C. Chemická kompatibilita je mnohem pravděpodobnější u amorfních termoplastů než u semikrystalických termoplastů. Typickými příklady amorfních termoplastů, které je možné

kombinovat a spojit ultrazvukem, jsou ABS, PC, PS nebo akryl. Možné kombinace amorfních termoplastů jsou uvedeny na obr. 7. Semikrystalické termoplasty nevykazují známky chemické kompatibility a proto není vhodné díly z této skupiny plastů svařovat. Příkladem může být svařování PP s PE. Ačkoli mají oba semikrystalické plasty podobné chemické složení, hustotu a jen mírně odlišné fyzikální vlastnosti, nejsou chemicky kompatibilní a nelze je svařovat ultrazvukem. Taktéž nevyhovující výsledky pevnosti vykazují pokusy svařovat semikrystalický a amorfni plast dohromady. [14], [15]

	ABS	ABS/PC	Akryl	BS	PC	PES	PS	PVC	SAN-NAS-ASA	PBT/PC
ABS	■	■	■		■			■	■	
ABS/PC	■	■	■		■					
Akryl	■	■	■		■				■	
BS				■			■			
PC	■	■	■		■	■				■
PES					■	■				
PS							■			
PVC	■							■		
SAN-NAS-ASA	■		■				■		■	
PBT/PC					■					■

... Dobře svařitelné
 ... Hůře svařitelné
 ... Nesvařitelné

Obr. 7 Svařitelnost amorfních termoplastů [15]

4.4.2 Nadmolekulární struktura

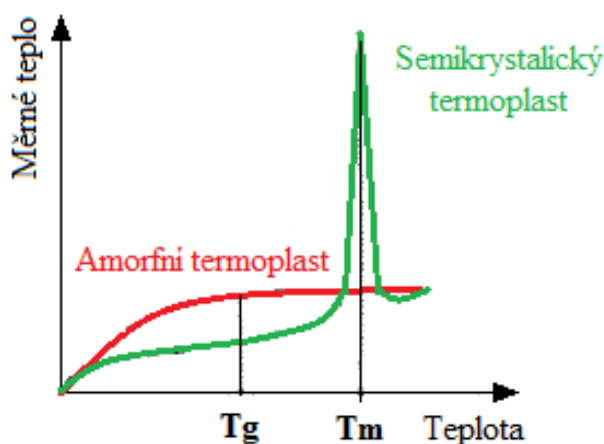
Amorfni termoplasty

Amorfni termoplasty nemají přesně definovaný bod tání T_m , ale jsou charakterizovány teplotou skelného přechodu T_g . Při zahřívání postupně měknou a přecházejí z pevného stavu přes teplotu T_g do kaučukovitého stavu a následně již do stavu v oblasti viskózního toku. Amorfni termoplasty mají široký rozsah teploty měknutí, který umožňuje polymeru postupně přicházet do tekutého stavu a poté téci bez předčasného zpevnění. Zmíněné vlastnosti umožňují zpravidla velmi dobrou svařitelnost ultrazvukem, podpořenou navíc výbornou schopností přenášet ultrazvukové vibrace. Tato schopnost je dána nahodilým uspořádáním molekul ve struktuře termoplastu. Výsledkem je dobrá

svařitelnost s možností široké škály nastavení amplitudy a svařovací síly. Taktéž vyšší součinitel tření napomáhá amorfním termoplastům k lepší svařitelnosti ultrazvukem. [15]

Semikrystalické termoplasty

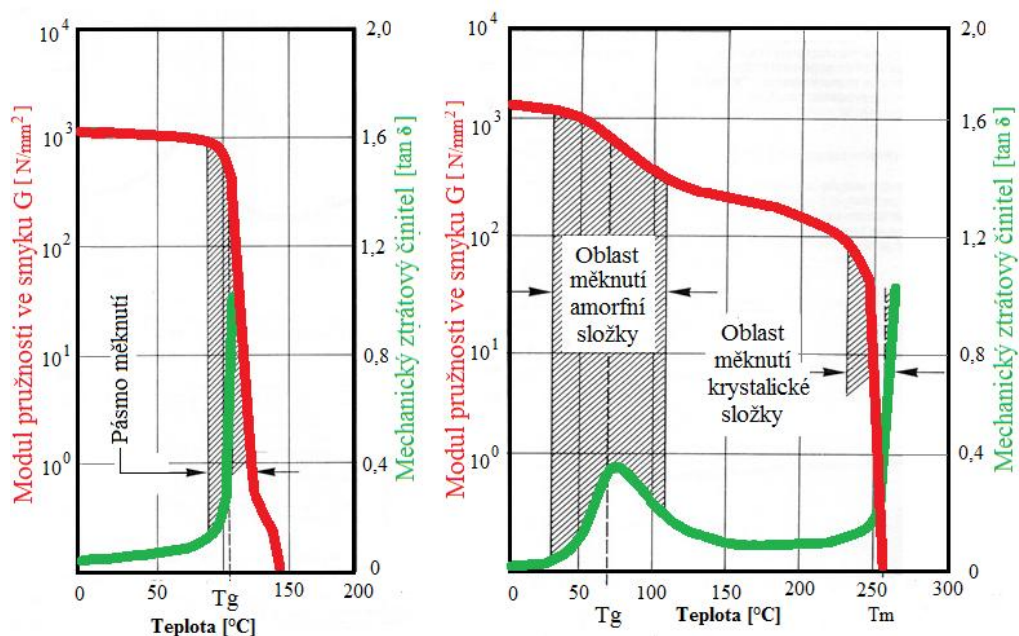
Semikrystalické termoplasty jsou charakterizovány skokovým přechodem z pevného do tekutého stavu po dosažení teploty tání označované jako T_m . Vysoká hodnota a úzký interval teploty tání zapříčiňuje zvýšenou spotřebu energie potřebné k rozrušení semikrystalické struktury umožňující následný tok materiálu. Z důvodu částečné uspořádanosti struktury molekuly také snáze absorbují vibrační energii. Tato vlastnost výrazně stěžuje přenos vibračních kmitů od sonotrody skrz svařovaný díl do místa svaru. Další negativní vlastnost semikrystalických plastů z hlediska ultrazvukového svařování je velice rychlé tuhnutí v důsledku náhlé krystalizace molekul. Všechny tyto vlastnosti komplikují proces ultrazvukového svařování semikrystalických plastů a proto je důležité dbát na správnou geometrii a tvar energetického usměrňovače, vzdálenost sonotrody od svarového spoje a pevné upnutí komponentů do přípravku. V porovnání s amorfními termoplasty je také zapotřebí vynaložit větší energii kvůli vyšší teplotě tání a použít větší amplitudu sonotrody pro zhotovení odpovídajícího svaru. Množství tepla, které je za potřeby k dosažení (z hlediska ultrazvukového svařování stěžejního bodu) teploty tání pro amorfni a semikrystalický plast, je uvedeno na obr. 8. Charakteristické křivky ukazují mnohem větší množství tepla potřebného k natavení semikrystalického plastu (zelená křivka), než je tomu u amorfního plastu (červená křivka). Z tohoto důvodu je zřejmé, že amorfni termoplasty vyžadují menší množství svařovací energie. [15]



Obr. 8 Závislost měrného tepla semikrystalického a amorfního termoplastu na teplotě [14]

4.4.3 Modul pružnosti

Tuhost polymeru (modul pružnosti) značně ovlivňuje schopnost přenášet ultrazvukovou energii od sonotrody k místu svaru na rozhraní svařovaných komponentů. Obecně lze říci, že čím tužší materiál, tím lépe je schopen přenášet ultrazvukové kmity do místa svaru. Na obr. 9 jsou znázorněny křivky modulu pružnosti G spolu se ztrátovým činitelem $\tan \delta$ v závislosti na teplotě pro amorfnní termoplast a semikrystalický termoplast. Ztrátový činitel udává, jak je materiál schopný tlumit vibrace. Ideální materiál pro ultrazvukové svařování by měl mít modul pružnosti co největší současně s co nejnižším ztrátovým činitelem. Po překročení teploty zesklenní (amorfnní termoplast) nebo teploty tání (semikrystalický termoplast) prudce roste ztrátový činitel a termoplasty začínají více tlumit ultrazvukové vibrace přenášené skrz materiál během svařování. Z průběhu křivek je patrné, že amorfnní podíl semikrystalického plastu (obr. 9 vpravo) měkne již při relativně nižší teplotě. Čím níže je tato oblast v teplotní škále položena a zároveň čím výše stoupá mechanický ztrátový činitel, tím vyšší je potřeba svařovací energie. Ve většině případů semikrystalické plasty více tlumí ultrazvukové vibrace, tzn. energetické ztráty jsou větší než u tvrdých amorfnních termoplastů. Z těchto důvodů vyplývá nutnost použití vyšších svařovacích výkonů (popř. delšího svařovacího času) a větší amplitudy při svařování shodného dílu ze semikrystalického plastu oproti amorfnnímu plastu. Uvedené parametry zvyšují výslednou spotřebovanou energii během procesu svařování. [15], [16], [17]



Obr. 9 Závislost smykového modulu pružnosti G a ztrátového činitele δ na teplotě (vlevo amorfnní termoplast SB, vpravo semikrystalický termoplast PBTP) [13]

4.4.4 Navlhavost

Navlhavost, neboli hydroskopičnost, je schopnost materiálu vázat na sebe molekuly vody z atmosféry (viz kap. 2.3). Některé druhy plastů zadržují a pohlcují vlhkost ze vzduchu, a proto se nazývají navlhavé. Typickým příkladem jsou polyamidy, dále také polykarbonáty a polysulfidy. Absorbovaná vlhkost v polymeru negativně ovlivňuje svařitelnost, neboť při svařovacím procesu po překročení bodu varu (100 °C) se voda začne z plastu odpařovat. Plyny poté vytváří pórovitou strukturu svaru, která snižuje pevnost spoje. Dalším důsledkem odpařování vody během procesu může být netěsnost spoje, zhoršená kvalita povrchu spoje (nevzhlednost) či částečná degradace svaru spojená s nižší pevností. Z těchto negativních důsledků vlhkosti je nutné u zmíněných skupin plastů dbát na důkladné vysušení materiálu před procesem svařování nebo svařovat ihned po vystříknutí z formy. Je také možné díly ihned po vystříknutí skladovat v uzavřených polyetylenových vacích spolu s vysoušecí látkou. [13], [15], [16]

4.4.5 Plniva

Plniva obsažená v plastech mají za úkol zlepšit vlastnosti základního materiálu. Vzhledem k problematice ultrazvukového svařování plastů je vhodné použití organických plniv, například uhličitanu vápenatého, mastku, kaolinu, oxidu křemičitého, vápníku nebo slídy. Všechna tato plniva zvyšují tuhost a tím i zlepšují přenos ultrazvukových kmitů od nástroje. Tato skutečnost se týká především semikrystalických plastů s obsahem plniva do 20 %. Při obsahu plniva mezi 20 až 40 % již ale mohou nastat komplikace s hromaděním plniva v určitých oblastech plastu a způsobená nehomogenita struktury negativně ovlivňuje výslednou kvalitu svaru. Může dojít k hromadění plniva v místě svarové plochy, kde přítomnost organických částic na povrchu svařovaného dílu má za následek nadměrné opotřebení sonotrody a vytvoření netěsného svaru s nízkou pevností. Jestliže plast obsahuje 40 % plniva a více, materiál se stává téměř nesvařitelným. Vlákná se totiž mohou natolik hromadit na povrchu styčné plochy svařovaných komponentů, že naprosto zamezí tečení plastu a vytvoření vazeb potřebných ke spojení dvou dílů. Obdobné chování vykazují také skleněná vlákna přidávaná do semikrystalických plastů z důvodu zvýšení pevnosti. Dlouhá skleněná vlákna se mohou shlukovat již během procesu vstřikování a nahromadění vláken v místě energetického usměrňovače zkomplikuje nebo naprosto znemožní vytvoření svaru. Tento jev je možné eliminovat vyztužením plastu krátkými skleněnými vlákny

namísto dlouhých. Krátká vlákna lépe umožňují pojivu (plastu) téci i v oblastech s hromaděním plniva v místě energetické linky. [13], [16]

4.5 Využití ultrazvukového svařování v průmyslu

Ultrazvukové svařování je neustále rozšiřující se spojovací technologií nejen ve strojírenském průmyslu. Široké spektrum použití nachází ultrazvuková svařovací technika především v těch oblastech, kde se produkují velké výrobní série a je snahou dosáhnout co nejkratších výrobních časů. Celkové využití této technologie předurčují především hlavní přednosti, mezi které patří:

- Rychlost procesu;
- Krátký čas cyklu (maximálně jednotky sekund);
- Vysoká opakovatelnost procesu;
- Vysoká pevnost svaru;
- Čistota technologie;
- Nízká spotřeba energie;
- Minimální údržba;
- Nenáročnost na připojení;
- Kompaktnost zařízení;
- Vysoká životnost nástrojů;
- Široká možnost použití.

Hlavní nevýhoda spočívá ve vyšších investičních nákladech, nutnosti výroby upínacího přípravku pro konkrétní svařenec nebo nemožnost svařovat či kombinovat většinu druhů semikrystalických plastů. Za jistý handicap ultrazvukového svařování lze považovat také nemožné nebo jen velmi komplikované zhotovení více svarů během jedné operace.

Všechny zmíněné vlastnosti svařování jej předurčují k širokému spektru aplikací, při kterých je vhodné spojení dílů ultrazvukem. Dominantními odvětvími průmyslu využívajícího této technologie jsou automobilový průmysl, lékařství, potravinářství, obalová technika, elektronika, výroba spotřebního zboží či zpracování textilií. [9]

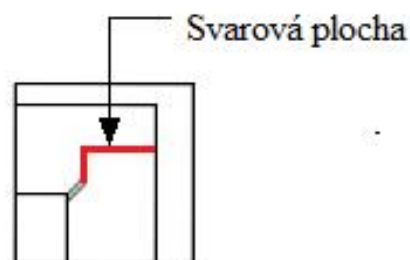
4.5.1 Automobilový průmysl

V moderním osobním automobilu současnosti se nachází již více než 100 různých dílů spojených ultrazvukovým svařováním. Jedná se především o díly, které by se jen obtížně nýtovaly, nebo není žádoucí zápach způsobený lepením. Rovněž je zde přínosem vysoká opakovatelnost procesu ve spojení s velkosériovou výrobou. Například u čelních i

koncových reflektorů automobilu se ultrazvukového svařování využívá při připojení čoček, odrazových ploch a objímek žárovek nebo při spojení čočky a pouzdra. Mnoho aplikací se nachází pod kapotou automobilu, např. víko hlavy válců, malé nádržky, sací potrubí, výměník tepla nebo vzduchový filtr. Interiérové díly jsou taktéž svařovány ultrazvukem (reproduktory, dveřní panel, opěrky hlavy, středová konzole, část vnitřního zrcátka). Typickými zástupci větších automobilových dílů vhodných pro použití ultrazvukové techniky jsou palivové nádrže, víko zavazadlového prostoru, přední mřížka nebo nárazník (viz obr. 10, 11). [17], [18], [19]



Obr. 10 Příklady použití ultrazvukového svařování – automobilový průmysl [19]



Obr. 11 Příklady použití ultrazvukového svařování – palivový filtr (PA 6.6) [17]

4.5.2 Zdravotnictví

Ve zdravotnictví je na spojované díly kladen větší důraz především z hlediska čistoty svaru, přesnosti a opakovatelnosti procesu. Tím, že se během svařování ultrazvukem nepoužívají žádné dodatečné látky (žádná lepidla, spojovací materiál apod.), nevytváří se spaliny ani výpary, je mnohem snazší získat v lékařství pro tuto spojovací

technologii schválení. Vzhledem k možnému řízení posuvu sonotrody mikroprocesorem, je mnohem jednodušší kalibrovat všechny zásadní svařovací parametry a dosáhnout tak vysoké míry kontroly nad procesem. Ve zdravotnictví je ultrazvukového svařování využíváno například pro uzavírání a spojování syntetických látek a tenkých fólií nebo při svaření dvou dílů infuzní jehly. Další aplikací v lékařství jsou například krycí sklíčka, ve kterých se pomocí ultrazvuku spojuje polykarbonátová svrchní vrstva spolu s destičkou za vytvoření několika váčků na laboratorní vzorky. Objem váčku je zde zcela zásadní, a proto je nutné docílit velké přesnosti a opakovatelnosti. [17], [20]

4.5.3 Balící a obalová technika

Rozšíření ultrazvukového svařování rychle nahrazuje dříve obvyklejší způsoby spojování obalů, především obalové materiály z fólií, laminované nebo potahované materiály používané k balení potravin, léků, nebo dalšího netrvanlivého zboží. Využívá se zde především čistota a hospodárnost procesu. Ke spojení dochází působením vibrační energie a třecího tepla pouze ve styčné ploše dvou komponentů, tzn. tepelná energie nijak neovlivňuje okolí svaru a nehrozí tak znečištění nebo dokonce znehodnocení baleného produktu. Aplikací ultrazvukového svařování v balící a obalové technice je velmi mnoho, jsou to například plastové nálevky, nástavce a uzávěry papírových krabic/boxů, plastová držadla větších sáčků nebo vaků, tuby, pouzdra nebo dvoudílné obaly (viz obr. 12). [21]



Obr. 12 Příklady použití ultrazvukového svařování – balící a obalová technika [21]

4.5.4 Zpracování technických textilií

Ultrazvuk nachází široké možnosti aplikací také při zpracovávání textilií. V současné době je možné ultrazvukovou techniku využívat například při rotačním nebo průběžném spojování textilií (nemocniční pláště, sterilní pomůcky, pleny a další zdravotnické potřeby), při ultrazvukovém dělení (výhodou je „zapečení“ okrajů zabraňující samovolnému uvolňování vláken), ražení nebo při traverzování. Tkané, netkané i pletené textilie, potahované materiály, laminované materiály i folie lze taktéž jednoduše a efektivně spojovat pomocí ultrazvukové techniky. [22]



Obr. 13 Zpracování technických textilií pomocí ultrazvukové techniky [22]



Obr. 14 Příklady použití ultrazvukového svařování – technické textilie [22]

4.5.5 Výroba spotřebního zboží a elektronika

Nejvíce dílů spojovaných ultrazvukem lze najít v elektrotechnice nebo při výrobě spotřebního zboží. V těchto aplikacích se uplatňuje především vysoká rychlost procesu a dlouhá životnost ultrazvukového nástroje. Ze spotřebního zboží lze považovat za typické výrobky konstrukčně spojitelné ultrazvukovou technikou složité díly praček, myček na nádobí nebo mrazáků. V elektrotechnice lze uplatnit krátký čas cyklu ultrazvuku například při svařování elektrických přípojek, vypínačů, krytů mobilních telefonů, rádií, televizorů nebo počítačů či notebooků. [17], [23]

4.6 Ultrazvuková svařovací technika

Zařízení pro ultrazvukové svařování se dělí v zásadě podle toho, jaký používá ultrazvukový měnič, jaký je systém pohonu a jestli je určené pro svařování kovů nebo plastů, tzn., s jakou pracuje frekvencí nástroje.

Co se týče pohonu, v současnosti nejběžnější způsob řízení dráhy posuvu ultrazvukového nástroje spočívá ve využití stlačeného vzduchu, a tudíž tato svařovací zařízení se nazývají pneumatické svařovací lisy. Dalším typem jsou svařovací lisy se servo systémem řízení posuvu sonotrody. Servo systém řízení umožňuje přesnější kontrolu dráhy svařovacího nástroje než je tomu u pneumatického systému a z tohoto důvodu servo-svařovací lisy vykazují lepší výsledky zejména v oblasti procesní opakovatelnosti a spolehlivosti.



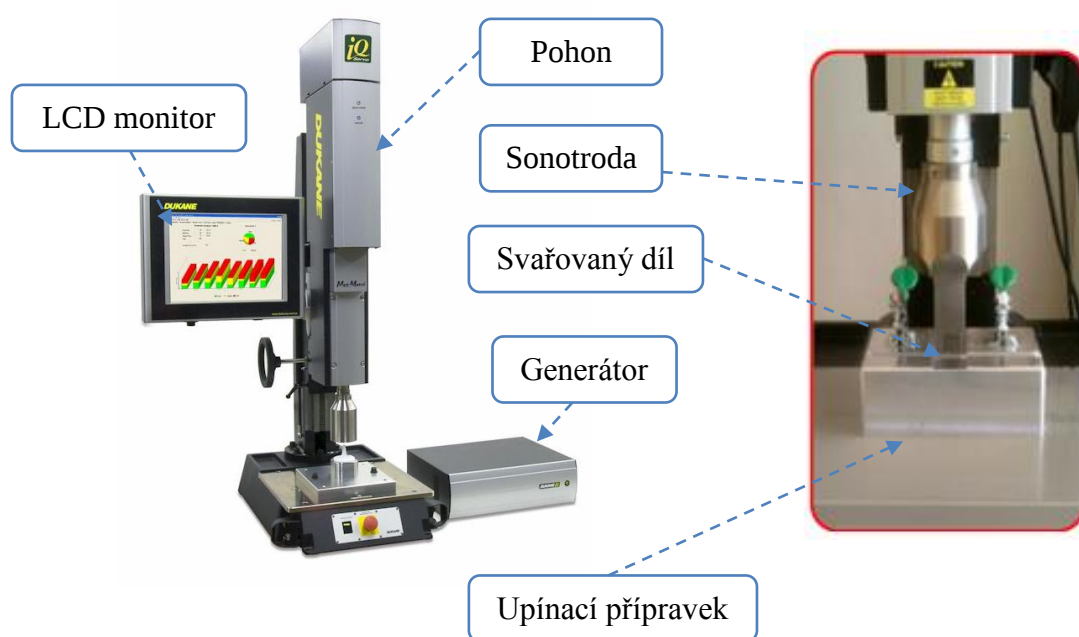
Obr. 15 Ruční ultrazvukový systém [24]

Poslední skupinou ultrazvukových zařízení určených ke svařování plastů jsou ruční svářečky (viz obr. 15). Tato zařízení jsou vhodná spíše pro menší aplikace nebo pro opravárenství. Ruční ultrazvukové svařování se používá zejména pro bodové svařování, řezání nebo nýtování. Odlišný způsob dělení svařovací techniky zohledňuje použité pracovní frekvence a výkony zařízení. Běžně používané frekvence jsou 15 kHz, 20 kHz, 30 kHz a 40 kHz. Výhody použití frekvence sonotrody 15 kHz spočívají především v největší rychlosti svařování. Nižší frekvence znamená použití sonotrod s větší rezonanční délkou a umožňuje dosažení vyšší amplitudy kmitů. Tyto parametry zapříčiní svařitelnost i mnohem měkčích plastů a dosažení schopnosti svařovat na velké vzdálenosti mezi sonotrodou a svarovou plochou. Hlavní nevýhodou je vysoký hluk při procesu, jelikož pracovní frekvence 15 kHz leží v rozsahu slyšitelnosti lidského ucha. Nejvíce ultrazvukových zařízení pracuje s frekvenčním rozsahem 20 kHz, tedy těsně nad hranicí slyšitelnosti lidského ucha. Tato frekvence umožňuje relativně velkou volnost při dimenzování sonotrody a nabízí největší dostupné svařovací výkony (1000 – 4000 W). Frekvence 30 kHz znamená svařovací výkony kolem 1500 W a nejvyšší používané frekvence 40 kHz používají výkony okolo 700 W. Výhodou použití vyšších frekvencí je nižší hladina hluku a téměř o polovinu menší rozměry svařovacích komponentů. Nižší výkon ale značí možnost použití pouze především pro malé díly, např. drobné části elektrických spínačů. [16], [24]

4.6.1 Popis ultrazvukového zařízení

Ultrazvukový svařovací lis se skládá z generátoru elektrické energie a lisovací jednotky s pohonem, která zahrnuje systém řízení (pneumatický nebo servo systém), konvertor, zesilovač a svařovací nástroj - sonotrodu. Generátor se může nacházet v systému jako samostatná jednotka nebo může být součástí svařovacího přístroje. Moderní svařovací jednotky obsahují dotykový LCD displej se softwarem, pomocí kterého je možné

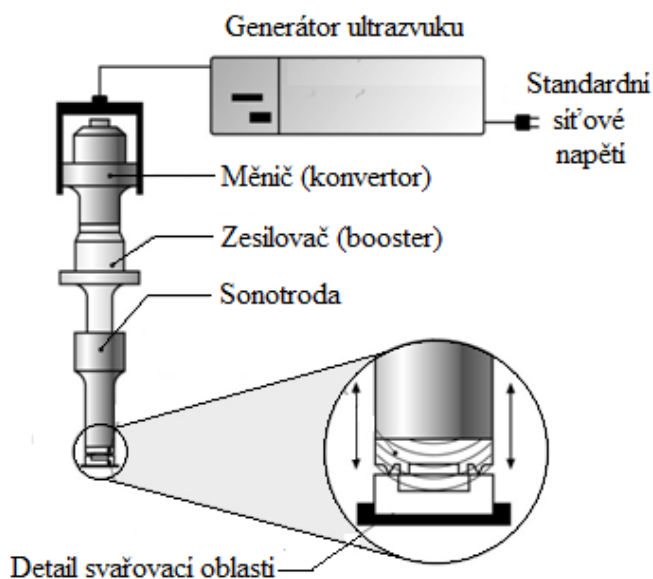
nastavovat svařovací parametry a zároveň sledovat proces včetně záznamu veškerých dat. U jednodušších zařízení se nastavování svařovacích parametrů provádí na displeji generátoru. Je však možné spojit generátor s externím počítačem a data zadávat ručně na klávesnici pomocí vhodného softwaru. Zaznamenaná data lze poté vyvolat v počítači a zobrazit příslušné grafy svařovacích cyklů. Sestava s popisem základních součástí moderního ultrazvukového svařovacího zařízení firmy Dukane včetně upínacího přípravku je zobrazena na obr. 16. Jedná se o svařovací lis se servopohonem s označením 43S220 iQ series pracující o frekvenci kmitů sonotrody 20 kHz. [13], [25]



Obr. 16 Sestava ultrazvukového svařovacího zařízení firmy Dukane (vlevo servo systém Dukane iQ series, vpravo detail sonotrody s upínacím přípravkem) [25]

4.6.2 Přenos energie a popis ultrazvukového svařovacího systému

Proces techniky ultrazvukového svařovacího systému lze zjednodušeně popsat ve čtyřech krocích. Nejdříve je přeměněna standardní elektrická energie dodávaná ze sítě na energii o frekvenci ultrazvuku. Poté je elektrická energie přetransformována na energii mechanickou, která je vedena přes rezonanční díl až k ploše horního plastového dílu. Mechanické kmity jsou posléze pomocí energetické linky usměrněny do místa styku dvou svařovaných těles, kde se vlivem mechanické energie utvoří teplo potřebné k natavení a vytvoření svarového spoje. Proces transformace energie je schematicky znázorněn na následujícím obrázku (viz obr. 17). [17], [26]



Obr. 17 Přenos energie při ultrazvukovém svařování [26]

Měnič (konvertor), zesilovač (booster) a sonotroda jsou mechanicky spojeny v jeden celek nazývaný ultrazvukový rezonátor (viz obr. 18).



Obr. 18 Ultrazvukový rezonátor

Pro transformaci a vedení energie k místu svaru jsou zásadní tyto přenosové články:

- Generátor

Generátor ultrazvuku je napájecí zdroj svařovacího zařízení měnící standardní elektrickou energii dodávanou ze sítě o frekvenci 50 Hz na elektrickou energii o frekvenci ultrazvuku, pro který je navržen a zkonstruován (nejčastěji tedy 15, 20, 30 a 40 kHz). Generátor může být součástí svařovacího přístroje a integrován do těla lisu nebo může sloužit jako

samostatná jednotka. Samostatný generátor určený pro servosystém je zobrazen na následujícím obrázku (viz obr. 19). [27]



Obr. 19 Generátor ultrazvuku jako samostatná jednotka [27]

○ Měnič (konvertor)

Měnič transformuje elektrickou energii generátoru o frekvenci ultrazvuku na mechanickou energii (neboli kmity), frekvence zůstává stejná. Kmity však mají nízkou hodnotu amplitudy. Frekvence 20 kHz odpovídá amplitudě 20 μm (= 0,0008 palce) a 40 kHz již odpovídá amplitudě o velikosti pouze 9 μm (= 0,00035 palce). S takto nízkou hodnotou amplitudy by bylo velmi obtížné (ne-li nemožné) svařovat, proto je nutné hodnotu amplitudy zvýšit. [16]



Obr. 20 Hermeticky uzavřený měnič pracující s frekvencí 20 kHz [28]

○ Zesilovač (booster)

Zesilovač je zařízení, které zpravidla mění hodnotu amplitudy dodanou z měniče. V průmyslové praxi se používá několik typů zesilovačů, které mají různý koeficient změny amplitudy. Aby bylo možné zesilovače jednoduše rozpoznat, jsou standardně barevně označeny. Stupeň změny amplitudy se běžně pohybuje v rozsahu od 1,0 (nemění hodnotu amplitudy, slouží pouze jako spojovací mezičlánek rezonátoru – zelená barva) do 3,0 (trojnásobně zvýší hodnotu amplitudy), existují ale i zesilovače s koeficientem menším než 1, tzn. tyto zesilovače snižují hodnotu amplitudy. V těchto případech má stupeň zeslabení

hodnoty 0,4, 0,5 a 0,6 (fialová barva). Barevné označení se stupněm zesílení udává následující obrázek (viz obr. 21). [29]



Obr. 21 Nejčastěji používané zesilovače [29]

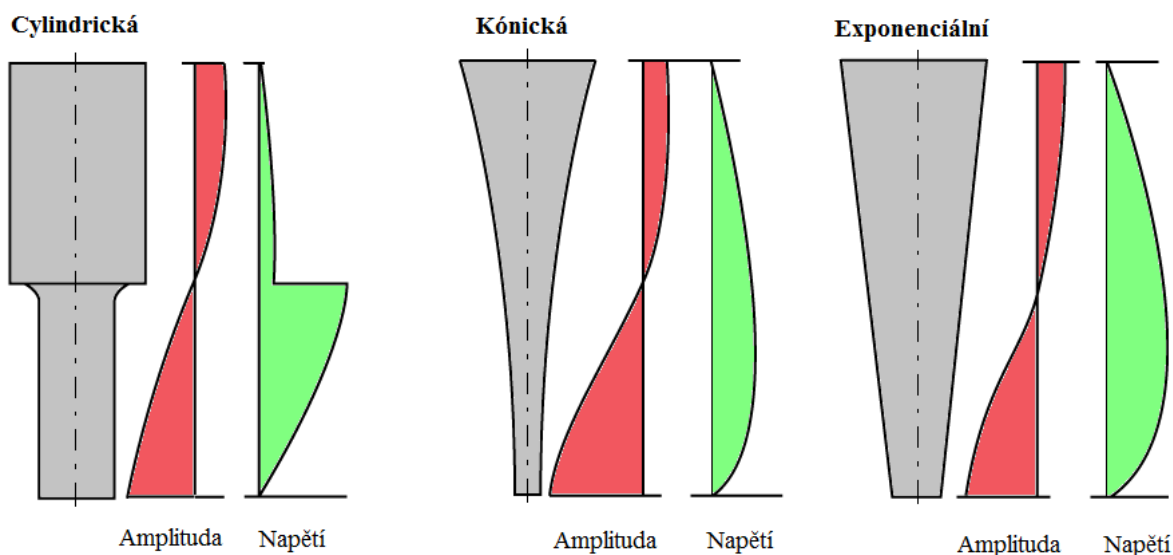
○ Sonotroda

Jedním z nejdůležitějších dílů ultrazvukového zařízení je ultrazvukový nástroj odborně nazývaný sonotroda. Úkolem sonotrody je převést měničem upravenou vysokofrekvenční mechanickou energii na svařovaný díl. Tvar a rozměry sonotrod jsou odlišné podle aplikací, ke kterým jsou určeny. Pro optimální přenos vibrační energie musí být rezonance sonotrody a zesilovače shodná s budicí frekvencí měniče. Vibrace od zesilovače způsobí pohyb molekul uvnitř kovové sonotrody. Molekuly se začnou roztahovat a smršťovat v podélném směru a na vstupu i výstupu sonotrody vzniká vrchol kmitů neboli amplituda kmitů. Ultrazvuková frekvence 20 kHz odpovídá roztahování a zkracování molekul 2000 krát za sekundu. Délka sonotrody se tedy neustále zkracuje a prodlužuje podle amplitudy kmitů.

Jelikož na sonotrodu působí tahové a tlakové namáhání, je velmi důležitá správná volba materiálu pro výrobu sonotrody. Materiály pro výrobu sonotrod jsou vybírány podle hodnoty zatížení střídavého tlaku (pokud možno co největší), podle únavy při zatížení střídavým tlakem z důvodu docílení dlouhé životnosti a podle schopnosti absorbovat energii zvuku. Nejčastějšími materiály pro výrobu sonotrod jsou oceli, hliníkové a titanové slitiny. Nejvhodnější vlastnosti nabízí titanová slitina a z tohoto důvodu jsou i nejvíce používané titanové sonotrody.

Tvar sonotrody předurčuje nástroj ke konkrétní aplikaci. Záleží především na tvaru vnějšího vybrání, které má zásadní vliv na odolávání střídavému namáhání a šíření amplitudy kmitů. Vnější vybrání se v praxi nejčastěji vyskytuje v podobě přímé, obloukové, exponenciální nebo katanoidní křivky. Tři nejčastěji používané rotačně

symetrické sonotrody včetně křivek průběhu amplitud kmitů a napětí jsou zobrazeny na obr. 22. Z křivek je patrné, že pouze u cylindrického tvaru sonotrody odpovídá délka L polovině hodnoty vlnové délky λ . U všech ostatních tvarů sonotrod jsou délky pro sladění



Obr. 22 Nejpoužívanější rotačně symetrické sonotrody s vyznačením křivky amplitudy kmitů [17]

rezonance odlišné. Tvar křivek amplitud, respektive jejich vychýlení od osy sonotrody, také naznačuje, jaký je poměr mezi amplitudou na vstupu a na výstupu sonotrody. Tento poměr se nazývá transformační vztah mezi sonotrodou (amplituda na výstupu) a zesilovačem (amplituda na vstupu). Pouze u cylindrického tvaru sonotrody je tento vztah roven 1. [16], [17]



Obr. 23 Běžné tvary sonotrod [30]

4.6.3 Upínací přípravek

Prakticky jedinou velkou nevýhodou ultrazvukového svařování je nutnost vyrobit speciální upínací přípravek podle požadavků na každou aplikaci. Upínací přípravek musí splňovat dvě základní funkce. První funkcí je přesné vymezení polohy obou svařovaných materiálů zaručující opakovatelnost procesu a druhým účelem přípravku je pevné upnutí svařovaných dílů z důvodu minimalizace ztrát vlivem přenosu vibrací. Pro výrobu kvalitního svaru je nezbytné, aby přenos vibrační energie byl co nejefektivnější, jelikož případné pohlcování energie vlivem nedokonale upevněných dílů zvyšuje spotřebu vynaložené energie.

V praxi se běžně konstruuje dva základní typy přípravků, tuhý a pružný. Pružný upínací přípravek (viz obr. 20 vlevo) je nejčastěji používán pro svařování velice tuhých amorfních termoplastů zpravidla s usměřovačem energie. Je opatřen tlumící vrstvou nejčastěji z odlitého polyuretanu (popř. z PTFE, korku nebo kůže), která disponuje elastickými vlastnostmi. Výhodou použití pružného upínacího přípravku je minimalizace případného znehodnocení povrchu svařovaných dílů (typické pro lesklé povrchové části) a nižší náklady na výrobu. Elastické vlastnosti polyuretanu napomáhají také absorbovat náhodné vibrace, které mohou vést až k popraskání extrémně tvrdých, nepoddajných dílů. Nevýhodou je částečné pohlcení vibrační energie od sonotrody. Tuhý upínací přípravek (viz obr. 24 vpravo) se používá především při svařování pružnějších dílů s požadovaným střížným spojením nebo při svařování semikrystalických plastů vybavených usměřovačem energie. Dalšími aplikacemi, kde je nezbytné použití tuhého upínacího přípravku, jsou např. nýtování, přechování, zalisování nebo bodové svařování. Nejběžněji používané materiály k výrobě tuhých přípravků jsou ocel a hliník. [16], [31]



Obr. 24 Základní typy upínacích přípravků (pružný - vlevo, tuhý - vpravo) [31]

4.7 Svařovací parametry

Svařovací proces je řízen několika důležitými parametry. Kromě frekvence svařování a svařovacího výkonu, které jsou dány konstrukcí svařovacího zařízení, lze většinu parametrů programovat pro dosažení optimální jakosti svarového spoje.

Mezi základní svařovací parametry patří:

- Frekvence;
- Amplituda;
- Svařovací čas;
- Rychlost svařování;
- Svařovací tlak;
- Iniciační svařovací síla
- Přidržovací čas (čas dotlaku)

Výběr vhodných svařovacích parametrů se řídí podle druhu spojovaného termoplastu, dle geometrie svařovaných dílů a tvaru energetického usměrňovače, konstrukce svarové plochy (tvar a vzdálenost od sonotrody) a v neposlední řadě také podle svařovacího zařízení (frekvence, amplituda, tvar sonotrody).

4.7.1 Frekvence svařování

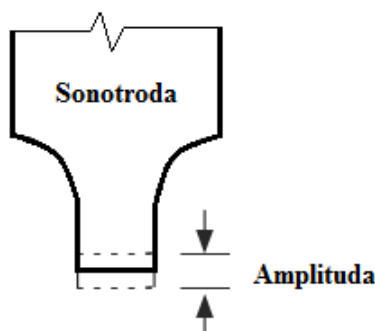
Frekvence svařování je dána konstrukcí a vybavením svařovacího zařízení. V praxi se nejčastěji používají frekvence 20, 30 a 40 kHz, méně běžné je použití nižších frekvencí, které již způsobují značný hluk během procesu svařování (15 kHz). Výhodou takto nízké frekvence je největší rychlost svařování a možnost svařovat na větší vzdálenosti mezi sonotrodou a svarovou plochou. V praxi je nejběžnější aplikovaná frekvence kmitů 20 kHz, jejíž výhoda spočívá v relativně velké volnosti při dimenzování sonotrody a nabízí největší dostupné svařovací výkony. Použití nejvyšší frekvence 40 kHz je opodstatněné při svařování rozměrově menších dílů (např. elektrické spínače). Důvodem je nižší svařovací výkon u takto vysoké frekvence a až o polovinu menší rozměry svařovacích komponentů. Orientační porovnání svařovacích výkonů s frekvencí kmitů sonotrody uvádí tab. 2. [17]

Tab. 2 Orientační tabulka svařovacích výkonů [17]

Svařovací frekvence [kHz]	20	30	40
Svařovací výkon [W]	1000-4000	1500	700

4.7.2 Amplituda

Svařovací amplituda je popisována jako vzdálenost mezi maximální a minimální hodnotou posunu délky sonotrody na jejím čele. Prodloužení, respektive zkrácení délky sonotrody, je způsobeno roztahováním a smršťováním molekul v podélném směru vlivem ultrazvukových vibrací (viz kap. 4.6.2). Schematické znázornění výkmitu délky sonotrody je uvedeno na obr. 25. Hodnota amplitudy se odvíjí od svařovaného materiálu a frekvence svařovacího zařízení.

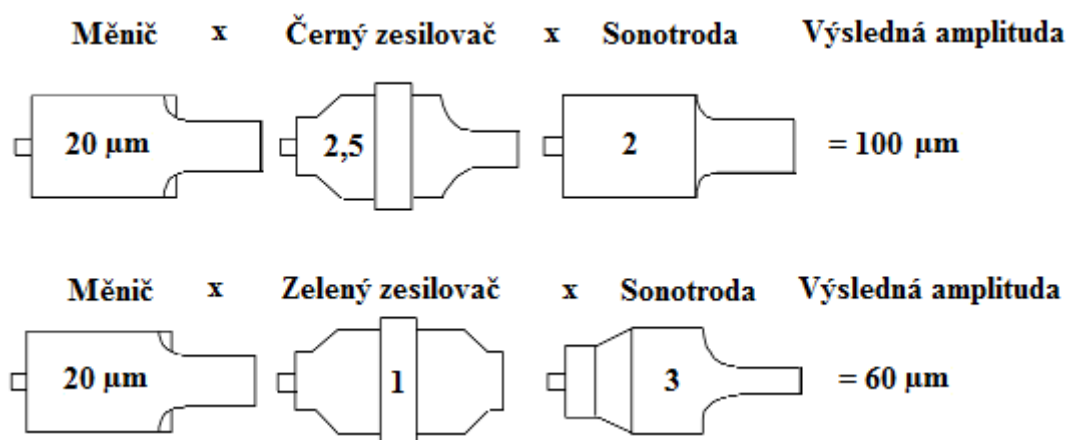


Obr. 25 Zobrazení velikosti amplitudy na výstupu sonotrody [15]

Zpravidla vyšší hodnotu amplitudy výkmitu sonotrody vyžadují semikrystalické plasty než amorfny plasty. Je to dáno vyšší teplotou tavení semikrystalických termoplastů, pro kterou je za potřeby větší dodaná energie. Dalším určujícím faktorem pro volbu velikosti amplitudy je vzdálenost mezi čelem sonotrody a svarovou plochou. Ke svařování ve vzdáleném poli je nutné použít vyšší amplitudy než u svařování v blízkém poli. Pro svařování semikrystalických termoplastů nebo pro svařování ve vzdáleném poli se hodnota amplitudy pohybuje většinou v rozmezí 50 – 140 μm , ke svařování amorfnych termoplastů a v blízkém poli postačí velikost amplitudy v rozsahu 20 – 100 μm . Přesnější hodnoty rozmezí používaných amplitud pro různé materiály jsou uvedeny v příloze 2.

Svařovací amplituda je určena konstrukcí svařovacího zařízení. Výslednou hodnotu amplitudy na čele sonotrody stanovuje použitý rezonátor, tedy soustava měniče, zesilovače a sonotrody. Každý člen je konstruován s určitým koeficientem zesílení (u zesilovače popř. i zeslabení) amplitudy, pomocí kterého se stanovuje koncová hodnota amplitudy. Ta je počítána vynásobením koeficientů měniče, zesilovače a sonotrody mezi sebou. Příklady výpočtu celkové hodnoty amplitudy jsou znázorněny na obr. 26. Hodnota amplitudy se ve většině případů udává v mikrometrech, avšak lze se setkat i s hodnotou v palcích (přepočet - 0.001" = 25 μm). [15], [16], [32], [33]

$$\text{Svařovací amplituda (výstup)} = \text{amplituda (měnič)} \times \text{amplituda (zesilovač)} \times \text{amplituda (sonotroda)}$$



Obr. 26 Schéma výpočtu amplitudy na výstupu sonotrody [33]

Velikost amplitudy má značný vliv na tvorbu svaru, neboť amplitudou je řízena rychlost a uspořádání molekul ve svarové vrstvě. Příliš vysoká hodnota amplitudy způsobí rychlejší ohřev svarové plochy, natavený materiál teče rychleji a může dojít k výronku roztavené vrstvy materiálu. Výsledkem je poté nejen nekvalitní vzhled svaru, ale i nižší pevnost, neboť část svarové vrstvy je bez užitku vytlačena mimo místo svarové plochy. Naopak příliš nízká hodnota amplitudy může způsobit nedokonalé natavení celého objemu energetického usměrňovače a předčasné tuhnutí vrstev svaru. Negativem je poté netěsnost spoje sdružená s nižší pevností svaru.

Během svařovacího cyklu je hodnota amplitudy zpravidla konstantní. Moderní svařovací stroje ale již umožňují i profilování amplitudy během procesu tvorby svaru. Ve třetí fázi tvorby svaru (fáze trvalého roztavení, viz obr. 5, kap. 3.3), kdy je již celý objem energetického usměrňovače roztaven, je vhodné amplitudu snížit. V této fázi není za potřebí tolik tepelné energie a pomalejší tuhnutí taveniny má pozitivní vliv na uspořádání molekul a vytvoření pevných vazeb důležitých pro výslednou pevnost svaru. Experimentální měření ukázala navýšení pevnosti svaru zpravidla mezi 10 – 30 % při použití profilované hodnoty amplitudy oproti konstantní hodnotě během svařovacího cyklu. Největšího nárůstu pevnosti svaru bylo dosaženo profilováním amplitudy při ultrazvukovém svařování polykarbonátu a ABS. Negativem nestejnoměrné hodnoty amplitudy během procesu je poté prodloužení svařovacího cyklu. [32], [33]

4.7.3 Svařovací čas

Svařovací čas je doba, po kterou působí sonotroda vibračními kmity na plochu kontaktního dílu spojovaných komponentů. Svařovací čas začíná překročením iniciační síly sonotrody a končí počátkem doby držení (dotlakem). Spolu s dotlakem (neboli přidržovacím časem) určuje výslednou délku svařovacího cyklu. Doba svařování se liší v závislosti na svařovaném materiálu, geometrii energetického usměřovače a vzdálenosti čelní plochy sonotrody od místa svaru. Zpravidla se svařovací čas pohybuje v řádech desítek setin sekundy až po jednotky sekund, záleží především na aplikaci. Delší čas svařování obecně zvyšuje pevnost svaru, neboť rychlost tavení je nižší a při tuhnutí mají molekuly více času pro vhodné uspořádání a vytvoření pevných vazeb. Po dosažení optimálního svařovacího času se již pevnost svaru příliš nemění, v některých případech může pevnost dokonce i klesat. Nižší pevnost při příliš dlouhém svařovacím času je způsobena vytlačení části natavené vrstvy z místa svaru. Přesné určení optimální doby, po kterou vibruje sonotroda, lze určit pouze na základě zkušebních testů. U pneumatického ultrazvukového systému se čas svařování řídí tlakem sonotrody, u servosystémů je doba svařování určena rychlostí posuvu svařovacího nástroje. [16]

4.7.4 Rychlost svařování

Svařovací rychlost je dána rychlostí vertikálního posuvu sonotrody, zpravidla je vyjádřena v milimetrech za sekundu. Svařovací rychlost je úměrná svařovacímu času. Čím větší je rychlost svařování, tím kratší je svařovací čas. Tato úměra určuje i nastavení svařovací rychlosti. Platí stejná pravidla jako pro stanovení svařovacího času, tzn. experimentální zjištění optimální rychlosti svařování (= svařovacímu času) vede k dosažení požadované jakosti svaru. U pneumatických svařovacích zařízení se rychlost svařování nastavuje pomocí tlaku, u servořízení posuvu sonotrody je možné nastavit svařovací rychlost přímo v milimetrech za sekundu. Konvenční způsoby svařování pneumatickým systémem pohonu ponechávají ve většině případů svařovací rychlost konstantní během procesu. Moderní servopohony umožňují rychlost během svařování měnit (profilovat křivku rychlosti) a tím lze docílit rovnoměrnějšího tavení usměřovače mající za následek nárůst pevnosti svarového spoje. Rovnoměrnější tavení objemu usměřovače redukuje množství taveniny vytlačené mimo místo svaru a poskytuje příznivější podmínky pro mezimolekulovou difuzi a orientaci molekul. [16]

4.7.5 Spouštěcí svařovací síla

Spouštěcí svařovací síla (nebo také spínací síla, iniciační síla) je předzatížení, kterým působí sonotroda na plochu kontaktního spojovaného dílu před procesem svařování. Během působení tohoto předzatížení sonotroda nevibruje, ale pouze tlačí na materiál. Po překročení předem nastavené iniciační svařovací síly začíná sonotroda působit mechanickými kmity a tím spustí proces tavení materiálu. Hodnota iniciační svařovací síly se nastavuje experimentálně.

4.7.6 Svařovací tlak

Při ultrazvukovém svařování pneumatickým systémem pohonu je svařovací tlak určujícím parametrem, kterým lze řídit rychlost a tudíž zároveň i čas procesu. Svařovací tlak je síla vyvinutá sonotrodou působící na plochu horního spojovaného dílu po celou dobu svařovacího času. Poskytuje kontakt mezi čelem sonotrody a plochou svařovaného dílu a je nezbytný k optimálnímu přenosu vibrační energie z rezonátoru přes horní svařovaný díl až k usměrňovači energie. Po ukončení vibrací je svařovací tlak vypnut a na tuhnoucí spojované komponenty působí přidržovací sonotroda pouze přidržovacím tlakem.

Běžné konvenční metody využívající k pohonu ultrazvukového svařovacího zařízení pneumatický systém pracují s konstantním svařovacím tlakem během procesu. Optimální hodnota tlaku se odvíjí od svařovaných materiálů, vzdálenosti svařování a konstrukci svaru (geometrie usměrňovače apod.). Příliš nízký svařovací tlak zapříčiní nedostatečný kontakt mezi sonotrodou a spojovanými díly nutný pro přenos vibrační energie. Nedostatečný kontakt může způsobit neúplné propojení svarových vrstev mající na následek pokles pevnosti svaru. Dalším negativem je zbytečné prodloužení svařovacího času bez potřebného účinku. Zbytečně vysoký svařovací tlak (síla) má za následek vytvoření většího množství objemu taveniny vedoucího ke srovnání molekul ve směru toku materiálu. Nedokonalé vytvoření pevných vazeb poté snižuje pevnost spoje. V krajních případech může dojít i k vtlačování nedokonale roztaveného energetického usměrňovače (z důvodu příliš vysoké rychlosti posuvu sonotrody) do spodního spojovaného dílu v místě styčné plochy a tím k vytvoření vrubu vedoucího k nižší pevnosti spoje. Dalším negativem je nadměrné opotřebení sonotrody. Moderní způsoby ultrazvukového svařování využívající servo řízení pohonu sonotrody umožňují profilováním rychlosti svařování měnit svařovací tlak během cyklu a tím docílit rovnoměrnějšího tavení usměrňovače. [16]

4.7.7 Velikost a doba přidržovacího tlaku

Druhou částí svařovacího cyklu je doba, po kterou sonotroda nevibruje, ale pouze působí tlakem na spojované díly. Tato část svařovacího cyklu je označována jako čas držení nebo přidržovací čas (hold time). Po tuto dobu roztavená vrstva materiálu tuhne, molekuly se navzájem propojují za vzniku vazeb a utvářejí tak výslednou podobu svaru a pevnost spojení. Tloušťka svaru se již příliš nemění. Délka přidržovacího času musí být tak dlouhá, dokud svar plně neztuhne. U moderních svařovacích lisů lze nastavit i tlak, s jakým sonotroda působí na tuhnoucí spoj po celou dobu držení.

4.8 Porovnání pneumatického a servosystému řízení ultrazvukového svařování

V praxi nejvíce používaným typem ultrazvukového zařízení je pneumatický svařovací lis. Pneumatický lis využívá k řízení posuvu sonotrody stlačený vzduch uzavřený ve vzduchovém válci. Množství tlaku je zpravidla řízeno regulátorem tlaku s jedním nebo dvěma ventily. Hodnota tlaku se zpravidla volí konstantní. Základními parametry, které lze na pneumatickém lisu nastavit a optimalizovat tak kvalitu svarového spoje, jsou svařovací amplituda, spouštěcí a svařovací tlak, doba a velikost přidržovacího tlaku. U pokročilejších pneumatických lisů je možné nastavit také svařovací vzdálenost, která zvyšuje úroveň kontroly svaru. Další inovativní technologií vedoucí k výhodnějšímu průběhu tvorby svaru je programování svařovací amplitudy, popřípadě programování hodnoty svařovacího tlaku.

Modernější způsob ultrazvukového svařování využívá k pohonu servosystém, neboli elektricky řízený posuv sonotrody. Hlavním rozdílem obou typů svařovacích lisů je způsob řízení svařování. Na rozdíl od pneumatického lisu, servo-svařovací lis umožňuje řídit přímo rychlost posuvu sonotrody (v milimetrech za sekundu) a tím i svařovací proces. Navíc pomocí příslušného softwaru lze svařovací rychlost nastavit v deseti krocích, přičemž každému kroku lze přiřadit různou rychlost. Výsledkem je libovolné naprogramování rychlosti svařování a docílení tak optimálního průběhu svařovací síly. Dalšími přednostmi řízení svařovací rychlosti servomechanismem je vyšší přesnost svařování a lepší opakovatelnost procesu, nižší spotřeba energie a jednoduchost připojení (není zapotřebí přivádět stlačený vzduch do oběhu). Parametry, které lze nastavit a optimalizovat jakost svaru, jsou amplituda, svařovací vzdálenost, rychlost svařování a tím i svařovací čas, iniciační síla svařování, doba a velikost přidržovacího tlaku. [31]

4.9 Svarová plocha

4.9.1 Požadavky na svarovou plochu

Ještě před samotným procesem ultrazvukového svařování je nutné zvážit všechny faktory ovlivňující výslednou svařitelnost a jakost svaru. Jedním z určujících faktorů pro dosažení požadované kvality spoje je geometrie svarové plochy. Geometrie svarové plochy závisí v první řadě na materiálu, který je svařován, poté na geometrii svařovaných dílů a v neposlední řadě na požadavcích kladených na svar (např. způsob zatížení). V praxi je používáno mnoho druhů spojení, přičemž každý spoj sebou nese určité výhody a nevýhody a tím je předurčen ke konkrétní aplikaci.

Pro zajištění optimálních svařovacích podmínek musí tvar svarové plochy plnit tři důležité funkce:

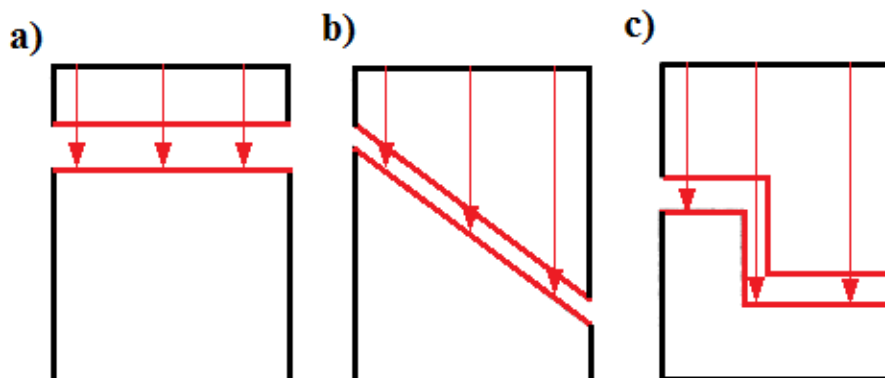
1. Jednotná kontaktní plocha mezi svařovanými díly;
2. Malá kontaktní plocha na počátku svařování mezi díly;
3. Zajištění vzájemné polohy svařovaných dílů během procesu.

Jednotná kontaktní plocha znamená dosažení těsného kontaktu mezi díly po celé délce svaru, a pokud je to možné, měl by svar ležet v jedné svařovací rovině. Malá kontaktní plocha na počátku svařování mezi díly zaručuje nižší spotřebu energie a kratší čas potřebný k natavení materiálu. Je doporučeno také zajistit vzájemnou polohu svařovaných dílů fixačními prvky (kolíky, pera, příruby apod.), aby byl vyloučen vzájemný posun dílů vlivem ultrazvukových vibrací. [16], [31]

4.9.2 Svařovací rovina

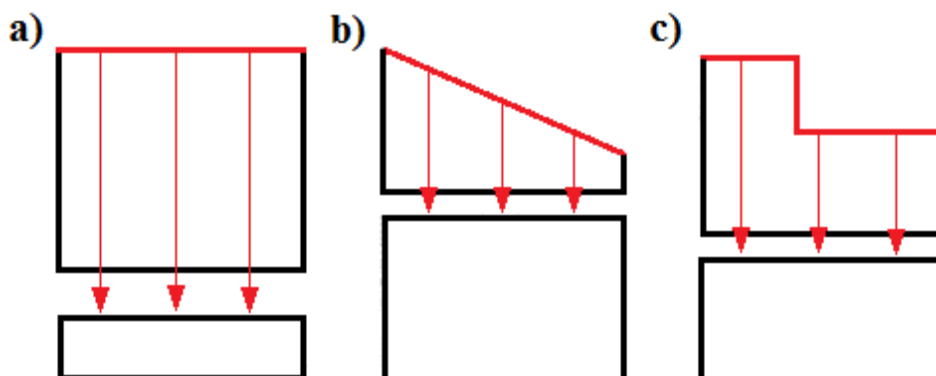
Pro zajištění optimálních svařovacích podmínek je vhodné navrhnout svar tak, aby styčná plocha svařovaných dílů ležela v jedné rovině, rovnoběžně s čelní plochou sonotrody. Takovéto uspořádání svarové plochy a funkční plochy svařovacího nástroje zabezpečí vždy stejnou vzdálenost, kterou musí urazit ultrazvuková energie při přechodu skrz díl k místu svaru. Příklady konstrukčního uspořádání svařovací roviny a čelní (pracovní) plochy sonotrody jsou uvedeny na obr. 27 a 28. Na obr. 27 je znázorněno vhodné a nevhodné řešení svařovací roviny. Pouze varianta a) je přípustná, jelikož svařovací plocha leží v jedné rovině a zároveň je rovnoběžná s funkční plochou sonotrody. Varianty b) a c) jsou obě nevhodné. V případě b) sice nachází svarová plocha v jedné rovině, ale neleží rovnoběžně s čelem sonotrody. Nerovnoběžnost svarové plochy s čelem

sonotrody způsobí, že ultrazvuková energie urazí od sonotrody k různým místům svařové plochy rozdílnou vzdálenost (viz červené šipky) a tím dochází k nerovnoměrnému zahřívání a tavení. Výsledkem je poté nekvalitní spoj s příliš tenkou vrstvou svaru na jedné straně a s přetoky na straně druhé.



Obr. 27 Příklady řešení svařovací roviny s vyznačenou dráhou energie – a) vhodné uspořádání (konstantní vzdálenost), b) a c) nevhodné uspořádání (rozdílná vzdálenost dráhy energie) [31]

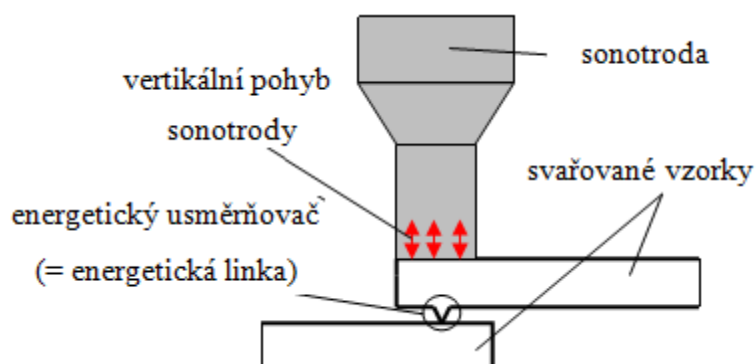
Obr. 28 představuje příklady řešení kontaktní plochy sonotrody a svařovaného dílu. Optimální konstrukční řešení zastupuje varianta a). Plocha sonotrody a svařovací roviny je rovnoběžná, ve všech místech svaru urazí energie stejnou vzdálenost. Varianty b) a c) jsou pro svařování nevhodné, neboť není zabezpečen rovnoměrný přenos energie ke svařové ploše (energie urazí různou dráhu). [16], [31]



Obr. 28 Příklady řešení kontaktní plochy čela sonotrody a dílu – a) vhodné uspořádání, b) a c) nevhodné uspořádání (rozdílná vzdálenost dráhy energie) [31]

4.9.3 Energetický usměrňovač

Energetický usměrňovač neboli energetická linka je výstupek nečastěji trojúhelníkového tvaru nacházející se na zpravidla svařovaném díle, který přichází do kontaktu se sonotrodou (viz obr. 29). Tento výstupek slouží k poskytnutí objemu, který se během svařování taví a vytváří tak svarovou vrstvu. Tvar energetického usměrňovače napomáhá k vedení ultrazvukové energie do místa svaru. Na počátku svařování se spojované díly vzájemně dotýkají jen velmi malou plochou (plocha hrotu energetického usměrňovače), kde dochází ke koncentraci ultrazvukové energie. Malá plocha hrotu usměrňovače zapříčiní vlivem dodané energie rychlé generování frikčního tepla ve styčné ploše dílů a energetická linka se začne tavit. Natavený materiál usměrňovače teče přes společné rozhraní dílů, kde vytváří molekulovou vazbu mezi oběma svařovanými díly. Tím vznikají jednotlivé vrstvy svaru vlivem postupného tání usměrňovače.

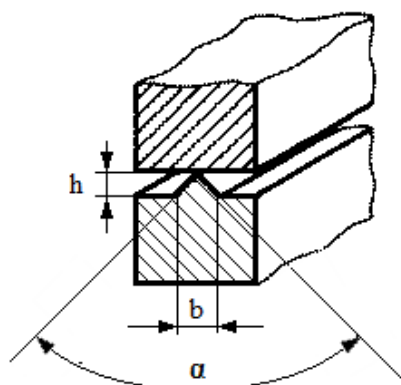


Obr. 29 Poloha energetického usměrňovače během svařování

Energetický usměrňovač trojúhelníkového typu splňuje hned dvě kritéria požadované pro konstrukci optimální svarové plochy. Těmi jsou malá styčná plocha mezi svařovanými díly a jednotná plocha (viz kap. 3.9.1). Rozměry usměrňovače se liší především podle toho, zda je svařován amorfnní nebo semikrystalický plast (viz obr. 30). Pro tvrdé amorfnní termoplasty je doporučován trojúhelníkový profil s vrcholovým úhlem 90°. Výška usměrňovače se pohybuje zpravidla v rozmezí od 0,005“ (0,127 mm) do 0,030“ (0,762 mm). Šířka základny se rovná dvojnásobku výšky usměrňovače (pravoúhlý trojúhelník), tzn. 0,010“ (0,254 mm) až 0,060“ (1,524 mm). Pro semikrystalické termoplasty, polykarbonáty a akryláty se používá usměrňovač s rovnostranným trojúhelníkovým profilem, tj. s vrcholovým úhlem 60°. Šířka základny se pohybuje v rozmezí 0,010“ (0,254 mm) až 0,050“ (1,27 mm). Ostřejší úhel a strmější profil

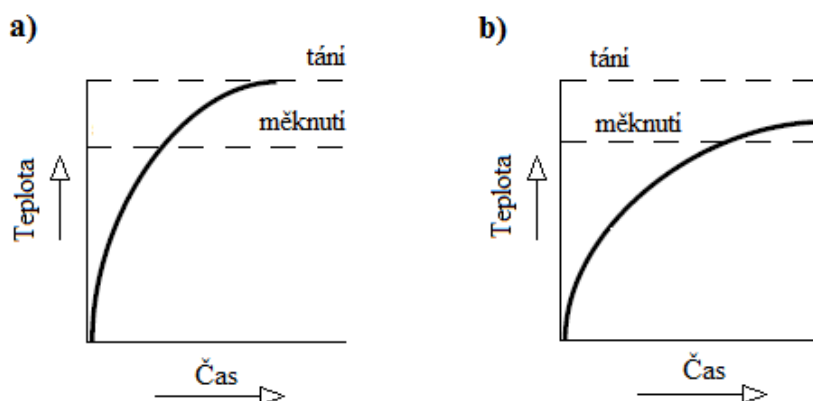
usměřovače vhodného ke svařování semikrystalických plastů způsobí částečné zapuštění jeho špičky do povrchu protikusu v první fázi svařování, sníží možnost předčasného tuhnutí a degradaci svaru vlivem přístupu vzduchu. Zvyšuje se tak možnost získat vzduchotěsný svar s vyšší pevností. [16], [31], [34]

	Amorfnní plasty	Semikrystalické plasty, PC, Akryl
Vrcholový úhel [°]	90	60
Šířka [mm]	0,254 - 1,524	0,254 - 1,270
Výška [mm]	0,127 - 0,762	0,220 - 1,100



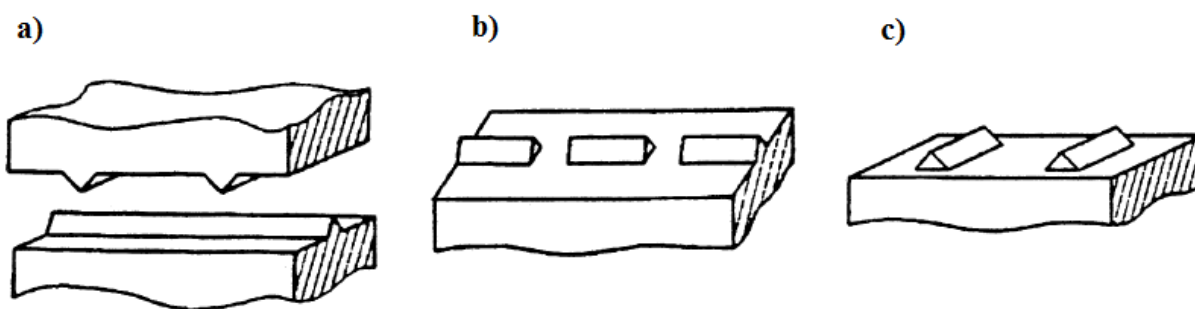
Obr. 30 Geometrie usměřovače energie [34]

Vliv usměřovače na svařitelnost tupým spojem znázorňují grafy na obr. 31. Průběh teplotní křivky v závislosti na čase naznačuje dřívější dosažení teploty tání u tupého spoje s usměřovačem energie (viz obr. 31a) než u spoje bez usměřovače (viz obr. 31b). Spoj s usměřovačem výrazně zkracuje dobu svařovacího cyklu. [31]



Obr. 31 Průběh teplotní křivky v závislosti na čase pro tupý spoj s energetickým usměřovačem (a), bez energetického usměřovače (b) [31]

V praxi se vyskytují různé konstrukční varianty použití usměrňovače trojúhelníkového typu. Obr. 32a znázorňuje případ použití tzv. křížového spojení. Energetický usměrňovač se nachází na obou svařovaných dílech v místě svarové plochy a polohou jsou si usměrňovače navzájem kolmé. Při prvním kontaktu dílů na počátku svařování je styčná plocha minimální (pouze body), čím se dosáhne velmi rychle teploty tání a následně se objem materiálu uzpůsobený pro tvorbu svaru výrazně zvětšuje. Velikost takto konstruovaných usměrňovačů dosahuje zpravidla 60% velikosti standardního energetického usměrňovače. Dalším příkladem nevšední konstrukce jsou přerušované usměrňovače (viz obr. 32b), které slouží k redukci celkové svarové plochy. Výhodou je taktéž nižší potřebná svařovací energie. Přerušované usměrňovače se používají především pro konstrukční svary. Největší odolnost svaru proti odlupujícím silám poskytuje uspořádání usměrňovačů kolmo k délce svařovaného dílu (viz obr. 32c).



Obr. 32 Různé konstrukční varianty uspořádání energetických usměrňovačů – a) křížové uspořádání, b) přerušované uspořádání, c) kolmé uspořádání [16]

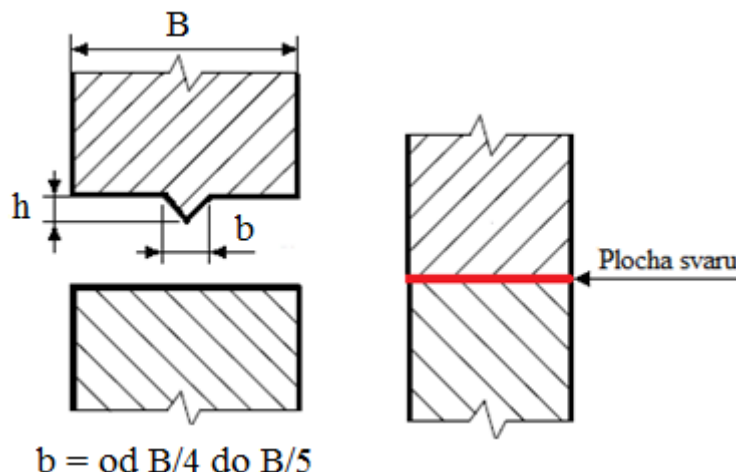
4.9.4 Druhy spojů

Obdobně jako u svařování kovů, také při ultrazvukovém svařování plastů existují různé typy spojů určené k odlišným aplikacím a odolávající různým druhům namáhání.

Tupý spoj

Tupý spoj s energetickým usměrňovačem je nejjednodušší a proto také velmi využívaný druh spojení dvou termoplastů svařováním. Vzhledem k tomu, že tvar tupého spoje nijak nezaručuje dokonalé vystředění svařovaných dílů, je nezbytné použití přípravků s dokonalým zajištěním vzájemné polohy. Pro dosažení hermetického spoje musí být svarové plochy naprosto rovné a pokud možno rovnoběžné s čelem sonotrody. Šířka usměrňovače se pohybuje v rozmezí od 20 % do 25 % tloušťky stěny dílu. Při svařování dílů s větší tloušťkou stěny se používají dva paralelní usměrňovače, neboť by vypočítaná velikost šířky usměrňovače byla větší než maximální doporučená hodnota.

Tupý spoj je výhodný především pro amorfní plasty, které pozvolněji tuhnou a vytvoří tak velmi dobrou těsnost spoje. Pro semikrystalické plasty není tupý spoj nevhodnější, jelikož roztavený objem usměrňovače tuhne rychleji a není zabezpečena dokonalá těsnost spojovaných dílů. Tento efekt minimalizuje ostřejší vrcholový úhel usměrňovače (viz kap. 3.9.3). [16], [31], [35]

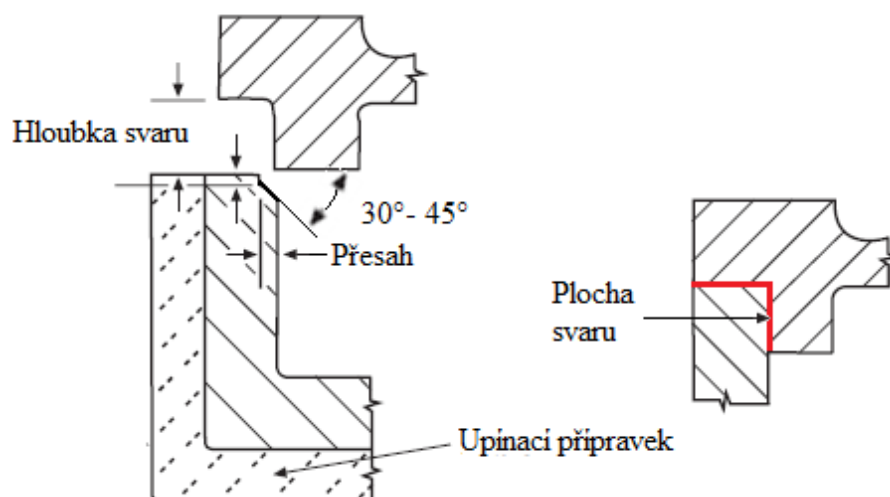


Obr. 33 Tupý spoj – vlevo před svařením, vpravo po svaření [31]

Střížný spoj

Střížný spoj je vhodný především ke svařování semikrystalických plastů s úzkým intervalem teploty tavení a pro aplikace, kde je vyžadován velmi těsný spoj zaručující dokonalou nepropustnost. Ke svařování semikrystalických plastů střížným spojem není zapotřebí energetický usměrňovač, jelikož natavený objem usměrňovače by degradoval nebo rekrystalizoval dříve, než by dotekl na celou styčnou plochu a utvořil tak kvalitní svar.

Z hlediska konstrukce svarové plochy je velice důležitý dodržet přesah mezi díly (viz tab. 3). Svařování začíná při kontaktu první styčné plochy (horizontální rovina) a pokračuje postupným tavením svislých stěn během vzájemného zasouvání dílů do sebe (viz obr. 34). Přesah mezi díly umožňuje jejich vzájemné natavování a promíchávání ve styčné ploše (plocha svaru). Přesah zabezpečuje utváření velice těsného spoje, eliminuje případné netěsnosti nebo zamezuje vzniku pórovité struktury svaru. Postupné zasouvání dílů po jejich svislých stěnách také výrazně eliminuje předčasné tuhnutí semikrystalických plastů a oxidační degradaci. Vzájemné promíchávání materiálu během svařování zaručuje získání velice pevného a hermetického konstrukčního spoje.



Obr. 34 Střížný spoj – vlevo před svařením, vpravo po svaření [31]

Svarová plocha střížného spoje poskytuje všechny tři základní požadavky kladené na konstrukci spoje (viz kap. 3.9.1). Malá počáteční kontaktní plocha je zabezpečena prvotním kontaktem v místě přesahu, jednotnou kontaktní plochu zaručuje vhodné navržení a přesné zhotovení dílů a vzájemné zajištění polohy během svařování zajišťuje konstrukce svaru (vedení svaru po svislých stěnách dílů). U střížného spoje je důležité, aby upínací přípravek podepíral svařované díly až do výšky, kde dochází k prvotnímu kontaktu a počátku svařování. Pevné bočnice přípravku zajišťují tuhost a podporu svařence, eliminují také případnou deformaci dílů během svařovacího procesu.

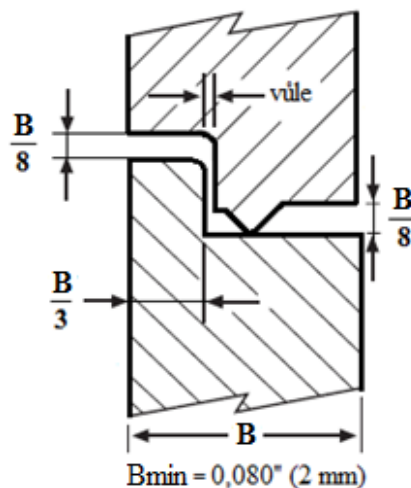
Z hlediska procesu vyžaduje svařování semikrystalických plastů střížným spojem větší množství energie potřebné k natavení rozměrnější svarové plochy. Svařovací čas se volí přibližně 3 až 4 krát delší než u ostatních druhů spojů. Další možností je zvýšit svařovací amplitudu nebo použít vyšší svařovací výkon. [16], [31]

Tab. 3 Doporučené hodnoty přesahu dílů vztažené k maximálnímu rozměru [34]

Průměr dílu	Přesah jedné strany	Tolerance rozměru dílu
max. 0,75" (18 mm)	0,008" - 0,012" (0,2 - 0,3 mm)	± 0,001" (± 0,025mm)
0,75" - 1,50" (18 - 35mm)	0,012" to 0,016" (0,3 to 0,4mm)	± 0,002" (± 0,050mm)
min. 1,5" (min. 35mm)	0,016" to 0,020" (0,4 to 0,5mm)	± 0,003" (± 0,075mm)
Min. tloušťka stěny dílu - 0,075" (1,8 mm)		

Osazený spoj

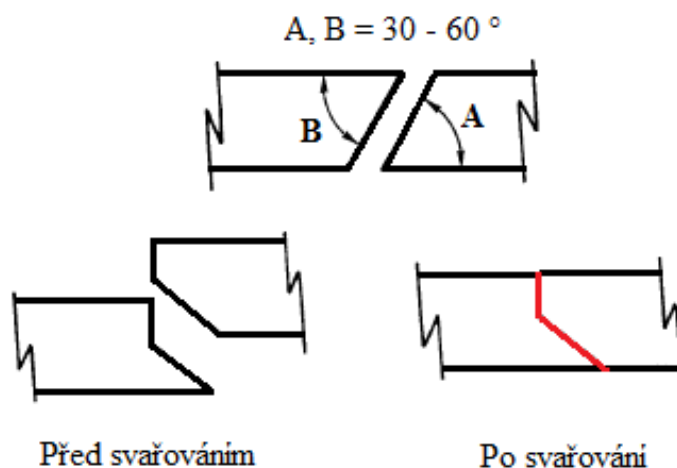
Osazený spoj je další varianta spoje s usměrňovačem energie. Splňuje dva ze tří základních požadavků kladených na konstrukci svarové plochy, a sice malou počáteční kontaktní plochu (hrot usměrňovače) a jednotnou plochu. Spoj poskytuje velmi dobrou pevnost ve smyku a v tahu, ale vzhledem k tomu, že do svarové plochy zasahuje pouze část stěny, je výsledná pevnost nižší než u tupého spoje s usměrňovačem energie. Typickým příkladem použití osazeného spoje jsou aplikace, kde je kladen velký důraz na vzhled povrchu spoje. Rozměry energetického usměrňovače jsou totožné jako u tupého spoje. Doporučená tloušťka stěny se pohybuje v rozmezí od 0,080" (2,03mm) do 0,090" (2,29mm). [16], [31]



Obr. 35 Geometrie osazeného spoje – vlevo před svařováním, vpravo po svařování [31]

Zkosený spoj

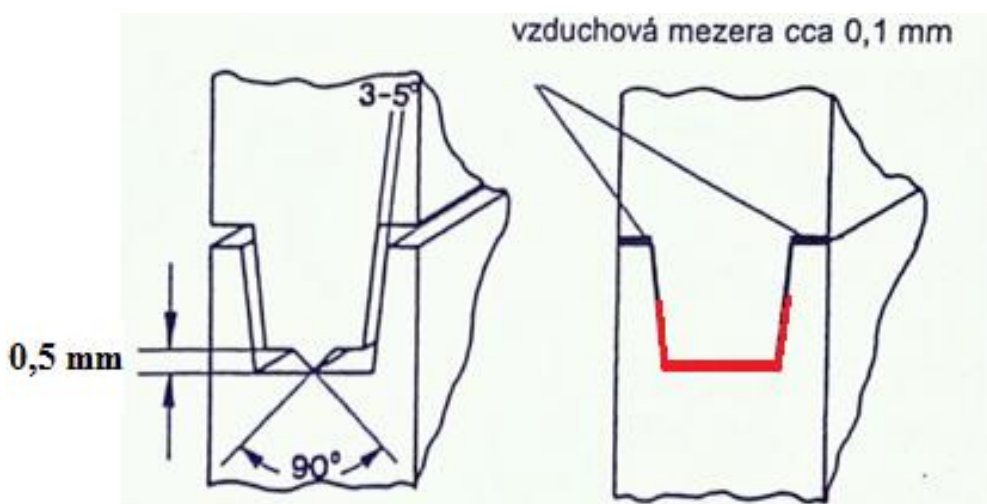
Zkosený spoj je určen především ke svařování semikrystalických plastů, které lze po částečném natavení snadno formovat do požadovaného tvaru svarové plochy (např. PBT, PS/PBT). Výborná pevnost svaru je dosažena důsledkem tání celé plochy svaru najednou, natavená vrstva neteče z jedné oblasti do další. Pro dosažení kvalitního svaru použitím zkoseného spoje je důležité, aby úkos svarové plochy ležel v rozmezí 30 – 60° a rozdíl na obou dílech nebyl větší než 1,5°. Velikost úhlu zkosení se určuje dle tloušťky stěn svařovaných dílů. Pro tenčí díly s tloušťkou menší než 0,025" (0,63 mm) se doporučuje použít úkos 60°, u svařování dílů s tloušťkou větší než 0,60" (1,52 mm) je doporučován úkos 30°. Zkosený spoj se používá jako náhrada osazeného spoje u aplikací, u kterých je limitním rozměrem tloušťka stěny. [16]



Obr. 36 Zkosený spoj [16]

Spojení pero – drážka

Spojení pero – drážka využívá ke spojení dvou dílů usměrňovač energie, který má shodné rozměry a tvar jako při svařování tupým spojem. Je to ideální varianta spoje, neboť konstrukce spoje zabezpečuje všechny tři základní požadavky kladené na konstrukci svarové plochy. Geometrie usměrňovače zajišťuje minimální počáteční kontaktní plochu (hrot usměrňovače), tvar drážky vymezuje vzájemnou polohu dílů během svařování a zaručuje stejnou kontaktní plochu. Tvar svarové plochy zamezuje případnému výronku taveniny, jelikož je přebytečný materiál zachycen na stěnách drážky pera. Nevýhodou jsou značné nároky na výrobu (tolerance, smrštění). [17]



Obr. 37 Spojí pero – drážka, vlevo před svařením, vpravo po svaření [17]

4.10 Ostatní ultrazvukové spojovací technologie

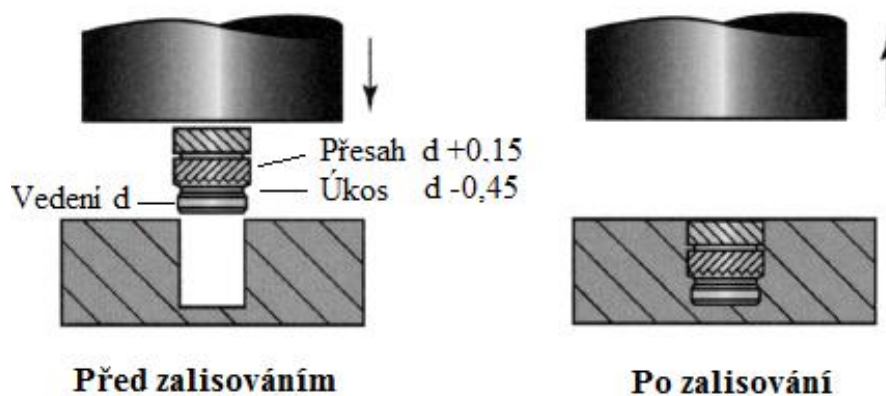
Ultrazvuková energie je využívána v celé řadě spojovacích technologií. Princip všech metod je velmi podobný svařování. Základním dějem je přenos ultrazvukové energie (tj. vysokofrekvenčních kmitů) ze sonotrody přes kontaktní díl do styčné plochy, ve které se vlivem tření generuje teplo a následně pomocí tlaku sonotrody vzniká buď molekulová vazba mezi dvěma plastovými díly, nebo se vytvoří mechanický zámek formováním plastového tělesa. Svařitelnost plastů danou technologií závisí především na schopnosti vést ultrazvukovou energii s minimální ztrátou, tudíž amorfny plasty jsou vzhledem ke svým vlastnostem lépe použitelnější než většina semikrystalických plastů (viz tab. 4).

Tab. 4 Vhodnost běžných termoplastů ke spojování ultrazvukem, 1 – dobře svařitelné, 2 – svařitelné, 3 – obtížně svařitelné [31], [36]

Skupina plastů	Druh plastu	Ultrazvukové spojovací technologie					
		Svařování	Zalisování	Nýtování	Tváření	Lepení	Bodové svařování
Amorfny	ABS	1	1	1	1	1	1
	ABS/PC	1	1	1	1	1	1
	Akryl	1	1	1	1	1	1
	PC	1	1	1	1	1	1
	PC/PES	1	1	1	1	1	1
	PS	1	1	1	1	1	1
	PVC	1	1	1	1	1	1
	SAN/NAS	1	1	1	1	1	1
	polysulfon	1	1	1	1	1	1
Semikrystalické	PA6	1	1	2	2	1	1
	PBT	1	1	2	2	1	1
	PET	1	1	2	2	2	1
	PEEK	2	1	2	2	1	2
	PE	1	2	1	1	3	1
	PPS	1	1	2	2	1	2
	PP	1	1	1	1	2	1

4.10.1 Ultrazvukové zalisování

Ultrazvukové zalisování je technologie pevného a nerozebíratelného upevnění zpravidla kovové vložky do plastové objímky. V plastovém dílu je vytvořena dutina s tvarem vkládané vložky, avšak rozměry dutiny jsou menší, než je rozměr vkládaného tělesa. Princip technologie je schematicky znázorněn na obr. 38. Ultrazvukový nástroj se nazývá sonotroda jako u svařování. Kontaktem čelní plochy sonotrody s plochou kovové vložky začíná proces, kdy sonotroda tlačí kovové těleso do dutiny plastové objímky a zároveň na něj působí kmity o frekvenci ultrazvuku. Kovová vložka je postupně vsazována do plastového tělesa a ultrazvuková energie způsobí vzájemné tření mezi oběma materiály. Třecí teplo nataví stěny dutiny plastového tělesa a tím je umožněno dokonalé zalisování kovové vložky. Vnější stěny vložek mají uzpůsobený tvar napomáhající jednak vedení do otvoru plastové objímky a jednak slouží k nepohyblivému ukotvení (drážkování, vroubkování apod., tvary vložek viz obr. 39). Po ukončení ultrazvukových vibrací je vložka dokonale obklopena nataveným plastem, který po ztuhnutí zamezí jakémukoliv vzájemnému pohybu. Velkou výhodou této technologie je rychlost procesu (spojovací cyklus trvá zpravidla do jedné sekundy), opakovatelnost a celková torzní tuhost spoje.



Obr. 38 Ultrazvukové zalisování kovových vložek do plastu [16]

Ve styčné ploše mezi kovovou vložkou a dutinou plastové objímky se po ztuhnutí vytvoří tenká vrstva, která eliminuje rozdílnou tepelnou smrštivost obou materiálů a sníží tím vznikající napětí. Princip technologie může být i zcela opačný, kdy sonotroda působí na plastovou objímku a tlačí jej do kovové vložky upevněné v přípravku. Tento způsob zvyšuje trvanlivost sonotrody, neboť nedochází ke kontaktu kovu na kov. Sonotrody jsou

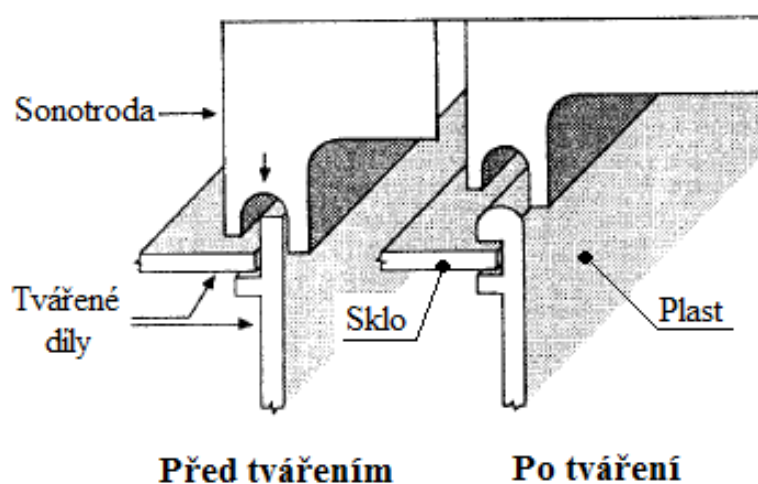
nejčastěji vyráběny z tvrzené oceli pro větší trvanlivost, nebo z titanu, který má vyšší pevnost a umožňuje vynaložit větší sílu při lisování. Typickými aplikacemi ultrazvukového zalisování jsou například pacičky brýlí, elektrické spotřebiče a pouzdra, elektrické ruční nářadí nebo počítačové a televizní kryty. [16], [31]



Obr. 39 Příklady tvarů ultrazvukových vložek [16]

4.10.2 Ultrazvukové tváření

Cílem ultrazvukového tváření je vytvoření mechanického zámku mezi dvěma díly řízeným přetvořením plastové desky. Tato metoda spojuje dva materiálově odlišné díly bez molekulární vazby, taveným materiálem je vždy termoplast, spojovaným materiálem bývá většinou sklo. Tvářecím nástrojem je sonotroda s funkční plochou upravenou dle požadovaného tvaru zámku (viz obr. 40). K hlavním výhodám technologie patří vysoká rychlost spojovacího procesu, vytvoření velmi těsného spoje dvou rozdílných materiálů a eliminace všech upínacích členů nebo lepidel.

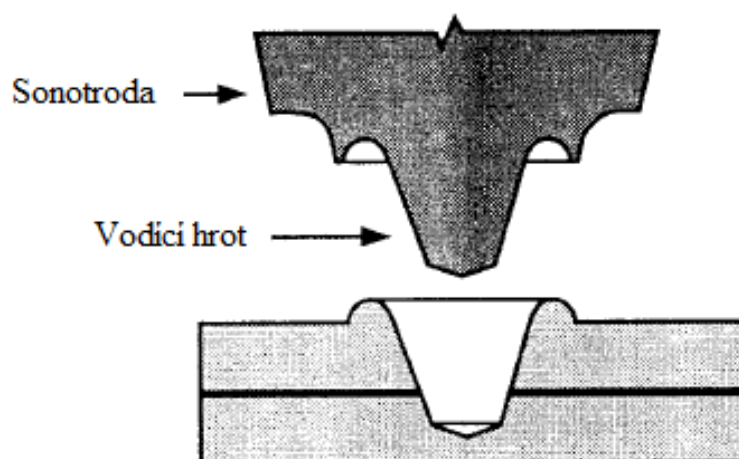


Obr. 40 Ultrazvukové tváření [16]

4.10.3 Bodové svařování

Ultrazvukové bodové svařování je technologie spojování termoplastů bez nutnosti použití usměřovače energie. Spojení je realizováno speciální sonotrodou vybavenou hrotem, která působí vibrační energií na povrch termoplastického dílu. Pomocí tření se termoplast nataví a hrot sonotrody je protlačen skrz horní svařovaný díl až do předem stanovené hloubky. Ta je zpravidla větší než tloušťka horního svařovaného dílu, tím dochází i k částečnému natavení druhého svařovaného dílu. Po ukončení vibrací se taveniny obou svařovaných částí mísí a tuhnou, čímž vznikne svar tvaru prstence (hrot sonotrody). Horní svařovaný díl je ovlivněn vniknutím sonotrody do materiálu, po ukončení svařování na něm zůstává viditelný prstenec způsobený hrotem ultrazvukového nástroje. Z hlediska svařovacích parametrů je vhodné použít střední až vyšší amplitudu (podle svařovaného materiálu) kvůli snadnějšímu pronikání hrotu sonotrody plastem a nižší tlak, aby do svaru vstupoval pouze přiměřený objem materiálu.

Bodové svařování lze aplikovat na většinu běžných termoplastů. K výhodám patří rychlý proces spojení nebo možnost ručního i strojního svařování. Plusem je také jednoduchá montáž, protože není potřeba žádných spojovacích prvků ani upínacího přípravku. V praxi se tato metoda používá především ke spojení velkých dílů, rozměrných litých desek nebo ke svaření tvarově složitějších těles a v těžko přístupných místech. Schematické znázornění technologie bodového svařování je uvedeno na následujícím obrázku (obr. 41). [16], [31]

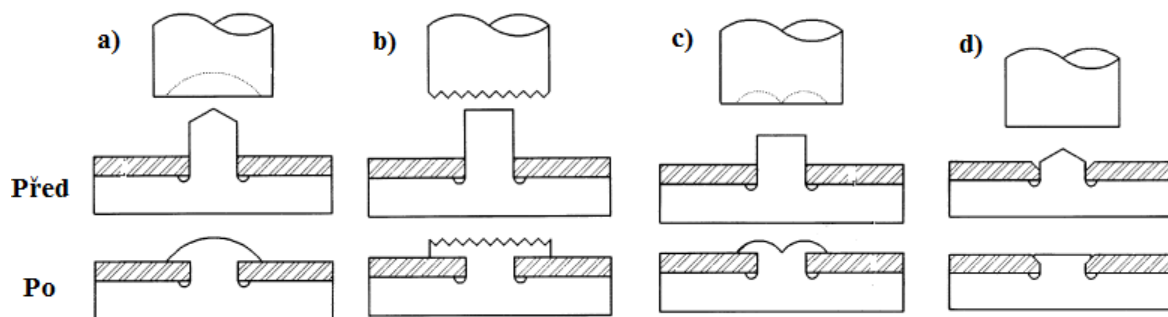


Obr. 41 Bodové svařování [16]

4.10.4 Ultrazvukové nýtování

Ultrazvukové nýtování je technologie založená na řízeném tavení a přetváření plastového díčku do podoby pracovní plochy sonotrody, čímž je zaručeno pevné mechanické uzamknutí dvou spojovaných těles. Tato technologie je vhodná především pro svařování dvou rozdílných materiálů jako kov a plast nebo dva vzájemně nesvařitelné plasty. Další aplikací jsou méně namáhané spoje, u kterých není nutná molekulová vazba mezi oběma materiály. Hlavní výhody této technologie spočívají ve vysoké rychlosti procesu a tím krátké doby cyklu, jednoduchosti montáže, opakovatelnosti a v odstranění všech dodatečných spojovacích členů jako šroubů, lepidel, apod.

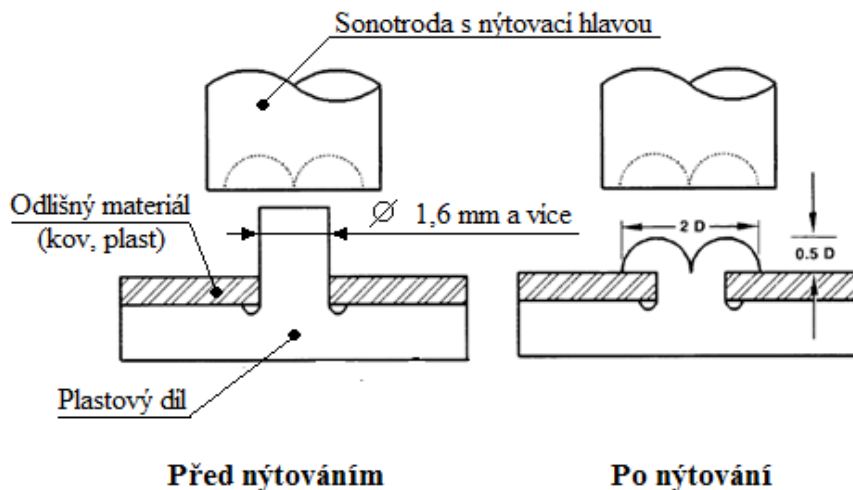
Princip technologie je založen na tavení plastového díčku působením vibrační energie od tvarově speciálně upravené funkční části sonotrody. Jakmile se vlivem tření začne materiál tavit, sonotroda začne působit tlakem na plastový dík a ten je vymodelován do tvaru dutiny sonotrody. Po ukončení vibrací plastový materiál ztuhne a vytvoří hlavu nýtu, která pevně spojí oba materiály dohromady. Tvar hlavy nýtu může být různý, záleží pouze na vymodelování dutiny sonotrody. Příklady odlišných tvarů nýtů jsou zobrazeny na obr. 42. Kvalitních svarů je dosaženo především při nýtování měkkých semikrystalických plastů nebo amorfních plastů s nižší teplotou tavení.



Obr. 42 Příklady ultrazvukového nýtování [16]

Každý profil nýtovací hlavy je určen pro jinou aplikaci. Standardní profil nýtovací hlavy splňuje většinu požadavků kladených na spojení a řadí se k nejuniverzálnějším druhům nýtů. Standardní profil nýtu je ideální pro méně tuhé a neabrazivní termoplasty s průměrem díčku 1,6 mm a více. Kopulový nýt (viz obr. 42a) je vhodný pro semikrystalické plasty plněné skleněnými vlákny, neboť sklo výrazně opotřebovává funkční plochu sonotrody a tento tvar díčku a dutiny je nejsnáze opravitelný. Vroubkovaný nýt (viz obr. 42b) se vyznačuje jednoduchostí a rychlostí spojení s možností ručního

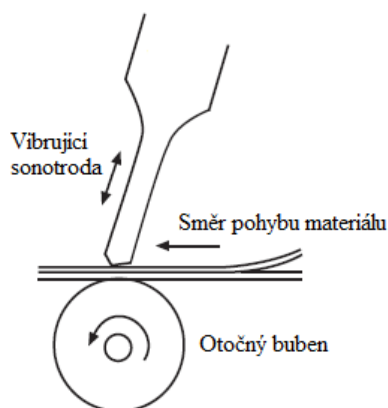
nýtování. Je použitelný pro všechny druhy termoplastů, kde příliš nezáleží na vzhledu spoje. Rovinný nýt (viz obr. 42d) je naopak určen pro spoje, u kterých je žádoucí dokonale rovná plocha po procesu nýtování. [16], [31]



Obr. 43 Standardní profil nýtovací hlavy [16]

4.10.5 Ultrazvukové lepení

Technologie ultrazvukového lepení je nejčastěji využívána při spojování dvou nebo více vrstev netkaných materiálů (textilií). Hlavními částmi spojovacího zařízení jsou vibrující sonotroda a ocelový rotační buben s povrchovým reliéfem. Princip technologie spočívá v protahování textilie mezerou mezi vibrující sonotrodou a otáčejícím se bubnem. Vysokofrekvenční mechanický pohyb sonotrody spolu s tlakovou silou bubnu vytváří třecí teplo v místě styčné plochy sonotrody, bubnu a textilie. Tento proces lepení je praktický především v textilním průmyslu, například nemocniční pláště, sterilní oděvy, pleny a další aplikace používané ve sterilním prostředí a ve zdravotnictví. [16]



Obr. 44 Princip ultrazvukového lepení [16]

5. Cíle předkládané disertační práce

Cílem a hlavním úkolem disertační práce byl výzkum, monitorizace a následné vyhodnocení vlivu vybraných svařovacích parametrů na pevnost spoje pro silně polární semikrystalický polymer (PA). Výzkum byl prováděn na svařovacím zařízení, které na rozdíl od standardních pneumatických svařovacích strojů využívá elektrický servopohon k řízení pohybu svařovacího nástroje. Závěrem a hlavním cílem předkládané disertační práce bylo nalezení a nastavení optimální kombinace parametrů vedoucích k nejpříznivějšímu poměru mezi pevností překládaného spoje, svařovacího času a dosažené spotřeby energie. Součástí výzkumu bylo i aplikační ověření předpokládaných výhod elektrického systému řízení (přesnost procesu, opakovatelnost, nižší spotřeba energie při vyšší pevnosti spoje) v porovnání s běžným svařovacím strojem ovládaným pneumatickým systémem řízení. Výsledná data budou použita firmou Dukane jako doporučení zákazníkům používajícím elektrický servosystém řízení svařovacího lisu Dukane iQ series.

Hlavní cíle výzkumné části jsou:

- Návrh tvaru svařovaných těles s různou geometrií energetických usměřovačů včetně výběru silně polárního polymeru pro jejich výrobu;
- Konstrukční úprava vstřikovací formy pro použití různé geometrie usměřovačů;
- Výroba dostatečného množství vzorků s příslušnou geometrií energetických usměřovačů na vstřikovacím stroji ENGEL VICTORY 80/25;
- Konstrukční návrh a realizace svařovacího přípravku s důrazem na minimalizaci energetických ztrát a jednoduchost zakládání / vyjímání svařovaných těles;
- Monitorizace a parametrizace vybraných svařovacích parametrů včetně vyhodnocení vlivu jednotlivých parametrů na pevnost svaru;
- Výzkum optimálních svařovacích parametrů a jejich verifikace s ohledem na jednotný svařovací čas a optimální poměr pevnost / spotřeba energie;
- Verifikace získaných výsledků s konvenční metodou svařování pomocí pneumatického systému.

6. Zkušební těleso

6.1 Materiál pro výrobu

Pro výrobu zkušebních těles byl dle požadavků firmy Dukane zvolen silně polární semikrystalický plast polyamid 6 s označením ALTECH PA6 A 1000/209 od výrobce ALBIS PLASTIC GmbH. Vzhledem k minimalizaci negativních faktorů ovlivňujících svařování se jedná o čistý polyamid bez jakýkoliv plniv nebo barviv. Zejména skleněná vlákna by značně zkreslovala výsledky svařování, neboť případné hromadění vláken na povrchu vstřikovaného tělesa negativně ovlivňuje průchod ultrazvukové energie materiálem nehledě na nadměrné opotřebovávání funkční plochy sonotrody. Jediným negativním faktorem komplikujícím svařovací proces je polarita polyamidu a s ní spojená vlastnost silně na sebe vázat vlhkost ze vzduchu. Absorpce vody značně komplikuje svařovací cyklus, neboť při zahřívání materiálu se voda začíná odpařovat a způsobí pórovitost svaru spojenou s poklesem pevnosti spoje. Z tohoto důvodu je nutné zkušební tělesa před každým svarem důkladně vysušit.

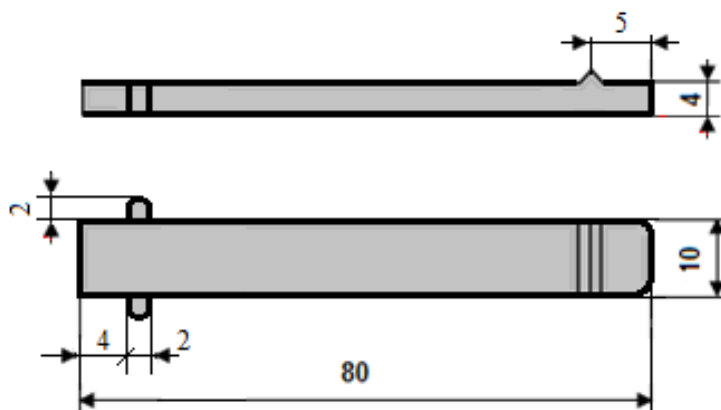
Polyamid 6 je využívaný materiál především ve strojírenském a textilním průmyslu. Používá se například pro výrobu hedvábných nebo kobercových vláken a kordů do pneumatik, kde se upotřebí především velká pevnost a otěruvzdornost materiálu. Nízký koeficient tření se uplatňuje také pro výrobu ozubených kol nebo ložisek. V průmyslu bývá tento konstrukční materiál označován jako Nylon 6. Základní vlastnosti použitého polyamidu 6 jsou uvedeny v následující tabulce. Kompletní materiálový list je k nalezení v příloze č. 3.

Tab. 3 Základní vlastnosti polyamidu 6 s označením ALTECH PA6 A 1000/209

Fyzikální vlastnosti	Hustota	1,13	g/cm ³	ISO 1183
	Absorpce vody ze vzduchu	3	%	DIN EN ISO 62
	Absorpce vlhkosti	9,5	%	DIN EN ISO 62
Mechanické vlastnosti	Napětí na mezi kluzu	85 / 45	MPa	ISO 527
	Tažnost	50 / 200	%	ISO 527
	E-Modul pružnosti v tahu	3200 / 1500	MPa	ISO 527
	E-Modul pružnosti v ohybu	2800	MPa	DIN EN ISO 178
Teplotní vlastnosti	Teplota tavení	220	°C	DIN EN ISO 11357
	Tepelná vodivost	0,23	W/K.m	DIN 52 612

6.2 Geometrie zkušební tělesa

Pro účel disertační práce byl vybrán velmi jednoduchý tvar tělesa, který ale musel splňovat některé důležité aspekty. Tvar tělesa byl navržen tak, aby po svaření obou dílů navzájem přeplátovaným spojem je bylo možné použít ke zkoušce mechanických vlastností (ke zkoušce tahem). Z těchto důvodů byla nejvhodnějším tvarem zkušební tělesa zvolena tyčinka o rozměrech 80 x 10 x 4 mm. Rozměry odpovídají rozměrům zkušebních těles určených ke zkoušce tahem (délka a šířka). Tloušťka 4 mm byla zvolena s ohledem na svařovaný materiál a z důvodu svařování v blízkém poli (viz kap. 4.4.1). Těleso přicházející do kontaktu se sonotrodou bylo vybaveno usměrňovačem energie, protikus ke svaření měl tvar i rozměry shodné, pouze neobsahoval usměrňovač energie. Rozměry usměrňovače energie jsou uvedeny v kap. 6.3. Na obou stranách zkušební tělesa se nacházejí malé výstupky o rozměru 2 x 2 mm, které jsou pozůstatkem po vtokové soustavě vstřikovací formy (viz kap. 6.4.4, obr. 48, 49). Tyto výstupky dokonale pomáhají k vzájemnému vystředění polohy při vkládání do upínacího přípravku a zamezují podélnému posuvu během svařování. Tento jednoduchý konstrukční prvek napomáhá k přesnosti celého procesu, neboť je vždy zabezpečena přesná poloha obou svařovaných vzorků. Navíc nebyla potřeba tvarově upravit vstřikovací formu, jelikož výstupky jsou součástí vtokové soustavy.

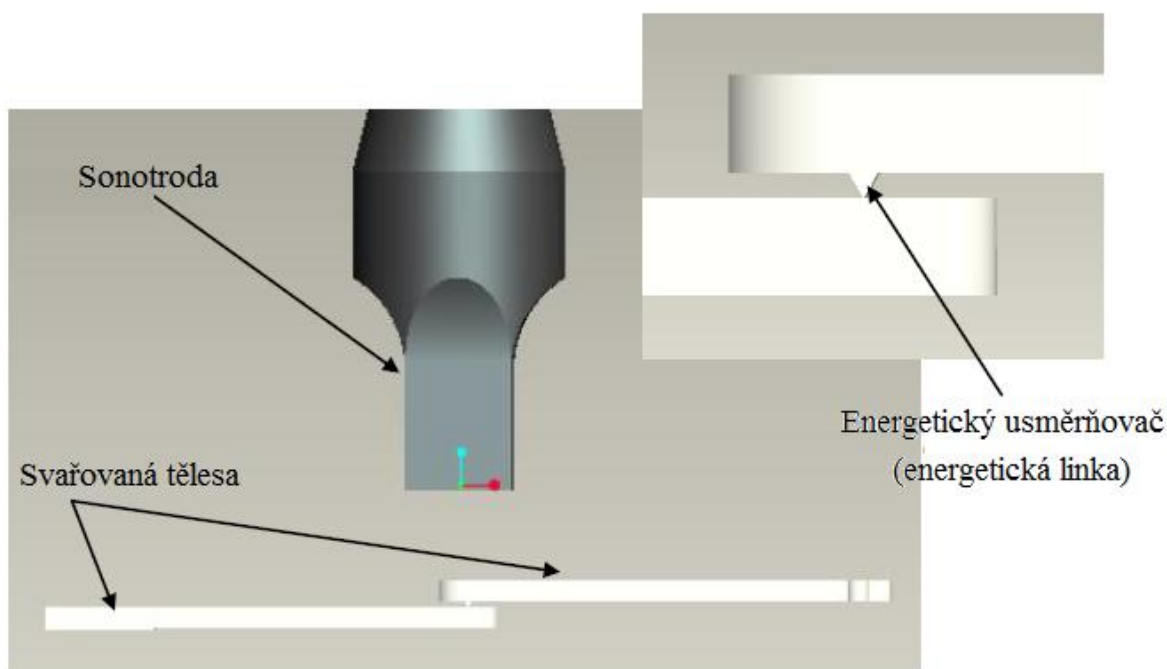


Obr. 45 Geometrie zkušební tělesa

6.3 Usměrňovač energie

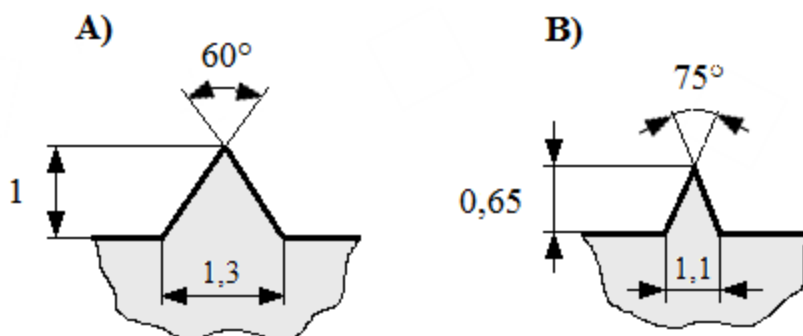
Zkušební tělesa byla vybavena usměrňovačem energie. Spoj byl řešen jako přeplátovaný, tyčinka s usměrňovačem byla vždy umístěna v horní pozici kvůli kontaktu se sonotrodou, vzorek bez usměrňovače představoval spodní díl. Poloha obou těles během

svarování s detailním pohledem na usměrňovač je na obr. 46. Princip usměrňovače je uveden v kapitole 4.9.3.



Obr. 46 Poloha zkušebních těles během svařování

Pro semikrystalické termoplasty je doporučován energetický usměrňovač trojúhelníkového tvaru s vrcholovým úhlem 60° (viz kap. 4.9.3). Vzhledem k možnostem použité vstřikovací formy, která byla konstrukčně upravena pro použití výměnných vložek sloužících k vytvoření dutiny usměrňovače, byly zhotoveny vzorky nejen s doporučeným vrcholovým úhlem 60° , ale i s úhlem 75° . Záměrně byla zvolena i odlišná výška obou usměrňovačů, aby objem materiálu tvořícího svar pokrýval jak doporučené maximum (viz obr. 47A), tak spíše menší objem materiálu pro tvorbu svaru (viz obr. 47B).



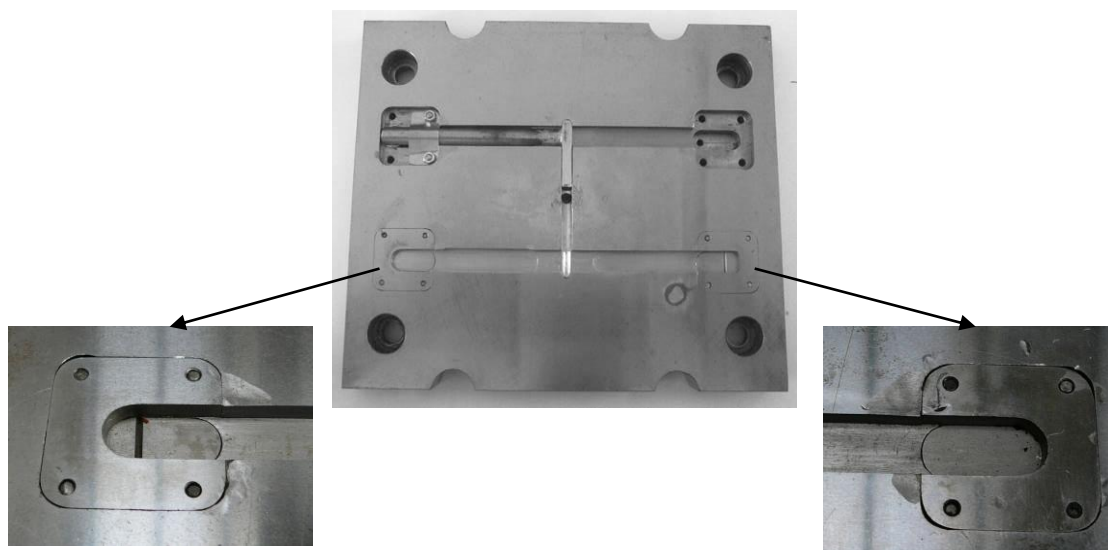
Obr. 47 Rozměry použitých energetických usměrňovačů v experimentu

6.4 Výroba zkušebních těles

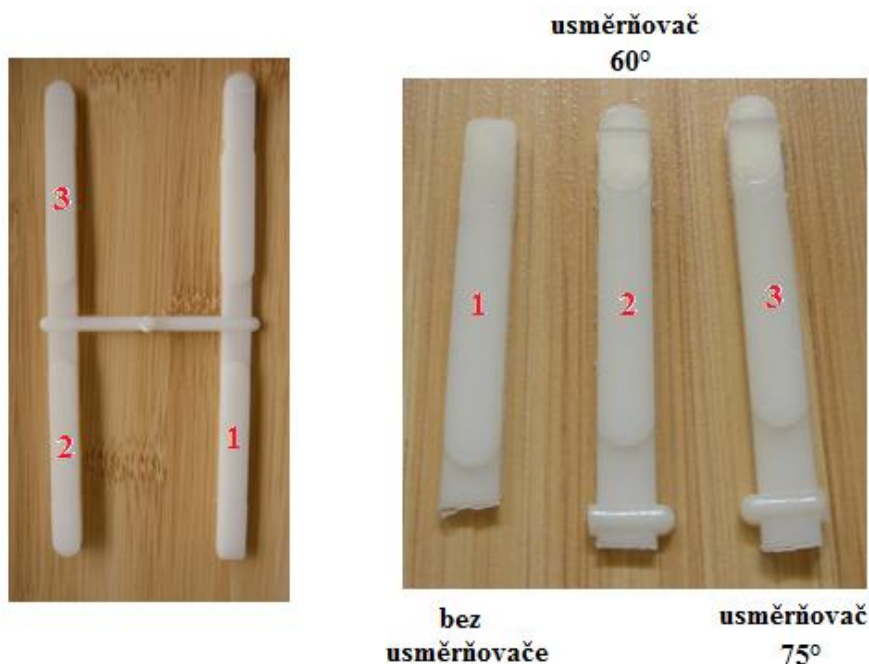
Zkušební tělesa určená ke svařování byla vyráběna technologií vstřikování do čtyřnásobné vstřikovací formy na Katedře strojírenské technologie v Liberci.

6.4.1 Vstřikovací forma

Pro výrobu zkušebních těles byla použita čtyřnásobná vstřikovací forma s jednou dělicí rovinou a jedním centrálním vtokem. Konstrukce formy byla uzpůsobena možnostem a potřebám katedry. Vyjmutí výstřiku zajišťoval jeden centrální vyhazovač, tvárník a tvárnice byli chlazení pomocí připevněné temperační desky, zde proudila temperačními kanály voda o teplotě 40 °C. Tvárník, tvárnice a temperační desky byly vzájemně vystředěny dvěma úhlopříčně umístěnými vodícími sloupky. Tvárnice obsahovala čtyři dutiny s rozváděcím kanálem a otvory pro vodící sloupky (viz obr. 48). Požadovaná geometrie energetického usměrňovače byla dosažena pomocí výměnných vložek, které byly přišroubovány ke tvárnici. Prostřednictvím elektrojiskrového obrábění byl ve vložkách zhotoven vrub s rozměry požadovaných energetických usměrňovačů. Tvárník obsahoval pouze otvor pro vstřik taveniny do dutiny formy. Na jeden vstřikovací cyklus byly možné zhotovit všechny tři požadované tvary zkušebních tělísek pro svařování (viz obr. 49), tzn. jedna tyčinka bez usměrňovače, jedna tyčinka s usměrňovačem o vrcholovém úhlu 75° a jedno tělísko s rovnostranným usměrňovačem (vrcholový úhel 60°).



Obr. 48 Vstřikovací forma – tvárnice s detailními pohledy na výměnné vložky pro energetický usměrňovač (detail vlevo) a bez usměrňovače (detail vpravo)



Obr. 49 Zkušební tělesa určená k ultrazvukovému svařování, 1 - tyčinka bez usměrňovače, 2 - tyčinka s usměrňovačem o vrch. úhlu 60° , 3 - tyčinka s usměrňovačem o vrch. úhlu 75°

6.4.2 Vstřikovací parametry

Zkušební tělesa byla vyráběna technologií vstřikování na vstřikovacím stroji Engel Victory 80/25. Vzhledem k silné navlhavosti vstřikovaného materiálu bylo nutné před procesem vstřikování nejdříve granulát důkladně vysušit. Dle materiálového listu (viz příloha 3) je nutné granulát důkladně vysušit v horkovzdušném sušicím zařízení o teplotě 80°C . Doba sušení závisí na předchozích skladovacích podmínkách a tudíž na počáteční vlhkosti. Vstřikovací teplota se pohybuje v rozmezí $250 - 270^\circ\text{C}$. Teplota chladicího média je doporučována v rozmezí $40 - 80^\circ\text{C}$.

Po celou dobu výroby zkušebních těles byl granulát sušen v horkovzdušné sušičce při 80°C po dobu 6 hod. Technologické parametry vstřikování bylo nutné částečně upravit oproti doporučeným hodnotám. Kritickým faktorem byl tvar vstřikovaných těles, neboť kombinoval rovné plochy s větší tloušťkou materiálu a ostré hrany usměrňovače spojené s velmi malými rozměry. Bylo nutné především eliminovat vznik propadlin na hraně energetického usměrňovače, jelikož právě tato část vstřikovaného tělesa je pro ultrazvukové svařování rozhodující. Z tohoto důvodu byla použita vysoká vstřikovací rychlost a s časem klesající dotlak. Teplotu na trysce nebylo možné zvýšit, neboť materiál začínal při více než 260°C degradovat. Technologické parametry vstřikování jsou uvedeny v tab. 4.

Tab. 4 Technologické parametry vstřikování zkušebních těles

Technologické parametry vstřikování		
Parametr	Hodnota	Jednotka
Teplota temperačního média	40	°C
Teplota-válec	250-240-230	°C
Teplota-tryska	260	°C
Teplota-násypka	35	°C
Max. vstřikovací tlak	130	bar
Uzavírací síla	230	kN
Zdvih dávkování	54	mm
Vstřikovací rychlost	100-125-140-155	mm/s
Doba dotlaku	12	s
Dotlak	45-30-15	bar
Polštář	max. 15,5	mm
Doba chlazení	8	s

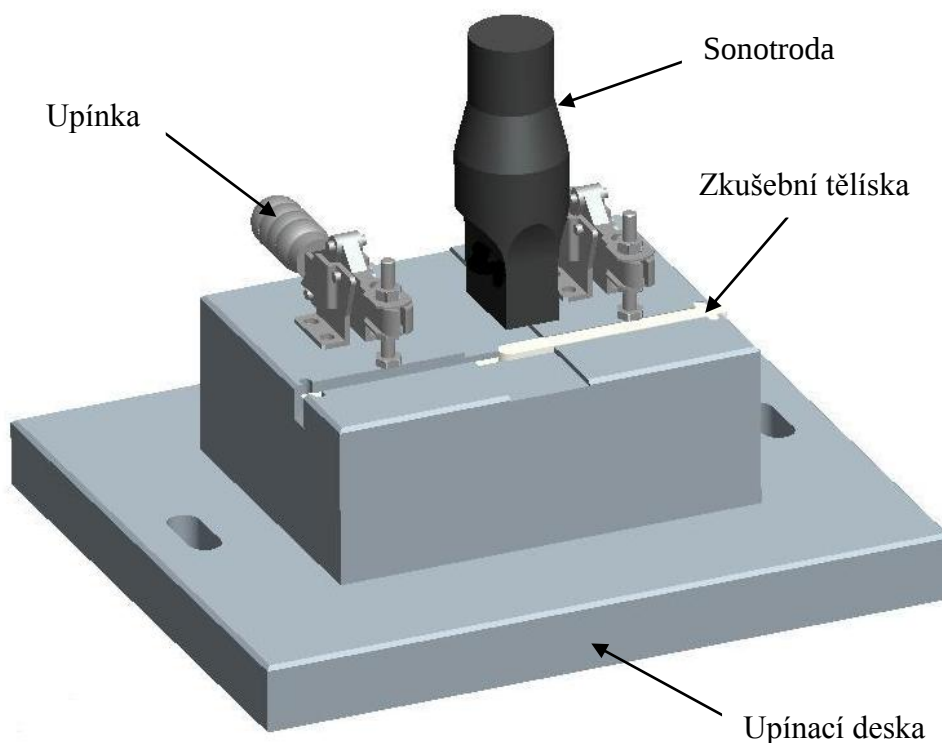
7. Upínací přípravek

7.1 Návrh přípravku

Upínací přípravek slouží k vzájemnému vymezení polohy a k pevnému sevření dílů během ultrazvukového svařování (viz kap. 4.6.3). Pro každý svařovaný díl je nutné zhotovit vlastní přípravek. Cílem bylo navrhnout a poté vytvořit zcela nový typ přípravku pro uchycení plastových těles určených k testování vybraných parametrů ultrazvukového svařovacího stroje. Konstrukční řešení přípravku muselo umožňovat plnou fixaci svařovaných těles a zároveň zabránit výtoku taveniny z místa svarového spoje. Svarový spoj zkušebních těles byl řešen jako tupý přeplátovaný, usměrňovačem energie bylo vybaveno těleso přiléhající k sonotrodě, druhé těleso neobsahovalo energetický usměrňovač. Záměrem bylo navržení svařovacího přípravku umožňujícího co nejjednodušší systém jak vkládání, tak vyjímání zkušebních těles z důvodu zkrácení manipulačního času na minimum. Také bylo snahou omezit mechanické upínací členy, které zbytečně komplikují jednak manipulaci se vzorky a jednak přenášejí mechanické vibrace od sonotrody. Tím se zvyšují ztráty vedoucí často až k poklesu frekvence kmitů

pod ultrazvukovou hranici do oblasti slyšitelnosti lidským uchem a značně znepříjemňují práci s ultrazvukovým zařízením.

Ve spolupráci s firmou Dukane byl navržen přípravek skládající se z bloku materiálu, který obsahoval dutiny pro vložení zkušebních tělísek zamezující jejich příčnému pohybu, zářezy zamezující podélnému pohybu a dvě mechanické upínky sloužící k eliminaci případného vertikálního posunu dílů během svařování.



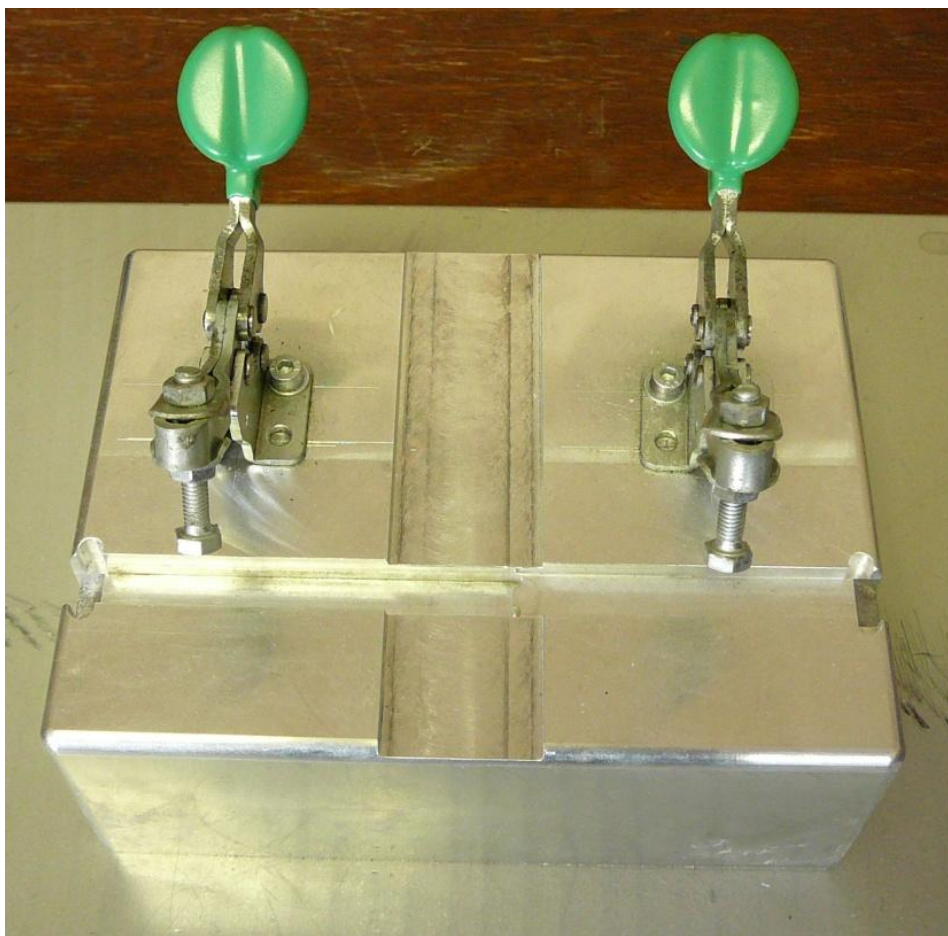
Obr. 50 Sestava upínacího přípravku s vloženými vzorky a sonotrodou

7.2 Zhotovení a popis přípravku

Navržený přípravek byl zhotoven z masivního bloku slitiny hliníku se základovou deskou, která slouží k přímému uchycení na pracovní desku svařovacího zařízení (viz obr. 51). V tomto bloku je vyfrézována drážka kopírující tvar budoucího svařence. Šířkou odpovídá šířce zkušebního tělesa – 10 mm. Hloubka drážky je rozdělena na dvě části. Z čelního pohledu na levé straně přípravku se hloubka drážky rovná 8 mm, na pravé straně je hloubka drážky 4 mm. Tyto rozměry odpovídají tloušťce jednoho (pravá strana), resp. dvou na sebe položených svařovaných tělísek (levá strana). Výsledné osazení v hloubce

drážky přesně ohraničuje polohu spodního vzorku pod sonotrodou. Drážka naprosto zamezuje příčnému posuvu vzorků během svařování. Podélné posunutí a zároveň i vymezení vzájemné přeplátované polohy svařence zabezpečují na každé straně dvě malé drážky kolmé k centrální dutině přípravku. Následná fixace v horizontálním směru je realizována prostřednictvím mechanických vodorovných upínek přišroubovaných k tělu přípravku. Středem přípravku kolmo na centrální dutinu je vedena drážka zabraňující případné kolizi sonotrody s přípravkem. Hloubkou 2 mm nepřekračuje tloušťku tyčinky s usměrňovačem, šířka překračuje šířku funkční plochy sonotrody (v tomto případě 20 mm).

Výhoda této konstrukce spočívá ve snadném uchycení a vyjímání zkušebních těles z těla přípravku s přesným vymezením vzájemné polohy ve všech třech směrech. Masivní blok materiálu přípravku také eliminuje případné ztráty energie způsobené nedokonalou tuhostí sestavy. Navržený přípravek je chráněn užitným vzorem číslo 23810 ze dne 17. 5. 2012.



Obr. 51 Upínací přípravek – detail tvarových částí s upínkami

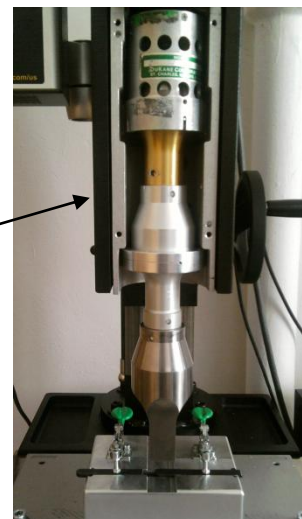
8. Ultrazvukové svařovací zařízení

Výzkum a monitorizace svařovacích parametrů byly uskutečněny na nejnovějším typu ultrazvukového svařovacího zařízení firmy Dukane, modelu 43S220 z tzv. iQ series. Hlavní inovací svařovacího lisu Dukane 43S220 je Melt-match® technologie. Tato naprostá novinka v řízení svařovacího nástroje využívá kompletně elektrické servopohony, které výrazně eliminují odchylky způsobené pohybem nástroje a tím zkvalitňují především opakovatelnost a přesnost procesu.

8.1 Popis stroje

Ultrazvukový svařovací stroj Dukane 43S220 iQ series (viz obr. 52) pracuje s frekvencí 20 kHz. Součástí ultrazvukového zařízení je elektricky řízený svařovací lis iQ, průmyslový počítač s 15" LCD monitorem vybaveným uživatelským rozhraním iQ Explorer a plně digitálně řízený napájecí zdroj - iQ generátor. Svařovací lis 43S220 umožňuje vyvinout svařovací výkony 1200, 1800, 2400 nebo 3600 W v závislosti na použitém generátoru. Součástí svařovacího stroje je také plně vyměnitelný ultrazvukový rezonátor skládající se z měniče, zesilovače a sonotrody. Součin těchto tří členů poskytoval svařovacímu nástroji (sonotrodě) celkovou amplitudu kmitů 100 μm (viz kap. 4.7.2). [21]

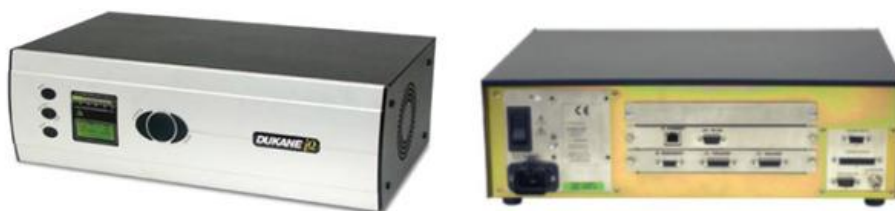
Průmyslový počítač
s ovládacím softwarem



Obr. 52 Servo-svařovací zařízení firmy Dukane 43S220 iQ series [25]

8.1.1 Napájecí zdroj – iQ generátor

Jako zdroj ultrazvukové energie byl použit napájecí generátor z řady iQ o poskytované frekvenci 20 kHz (viz obr. 53). Tento generátor umožňuje bezproblémovou a úplnou konfigurovatelnost díky digitálnímu řízení všech funkcí a parametrů. Další předností iQ generátoru je značně vysoká rychlost přenosu dat (0,5 m/s) dosažená progresivní vícejádrovou architekturou, čímž je možné zpracovávat až dvojnásobek datových bodů během jednoho svařovacího cyklu ve srovnání se současnou generací zdrojů ultrazvukových svářeček. Vyšší rychlost zpracování zlepšuje opakovatelnost a zvyšuje spolehlivost svařovacího procesu. [24]



Obr. 53 iQ generátor – přední panel s digitálním displejem (vlevo), zadní panel s konektory (vpravo) [24]

8.1.2 Ultrazvukový rezonátor

Pro svařování zkušebních tyčinek vyrobených z polyamidu 6 byl používán ultrazvukový rezonátor (viz obr. 54) o maximální amplitudě 100 μm . Rezonátor se skládal z měniče, zesilovače a sonotrody. Měnič generoval nominální amplitudu o velikosti 20 μm . Ke zvýšení amplitudy byl použit zesilovač se stupněm zesílení 2,5 a celkových 100 μm bylo dosaženo pomocí titanové sonotrody s dvojnásobným zesílením. Přesnost vypočítané hodnoty amplitudy byla potvrzena přeměřením ve firmě Dukane. Funkční plocha sonotrody měla obdélníkový tvar o pracovní ploše 26,36 x 55,12 mm.



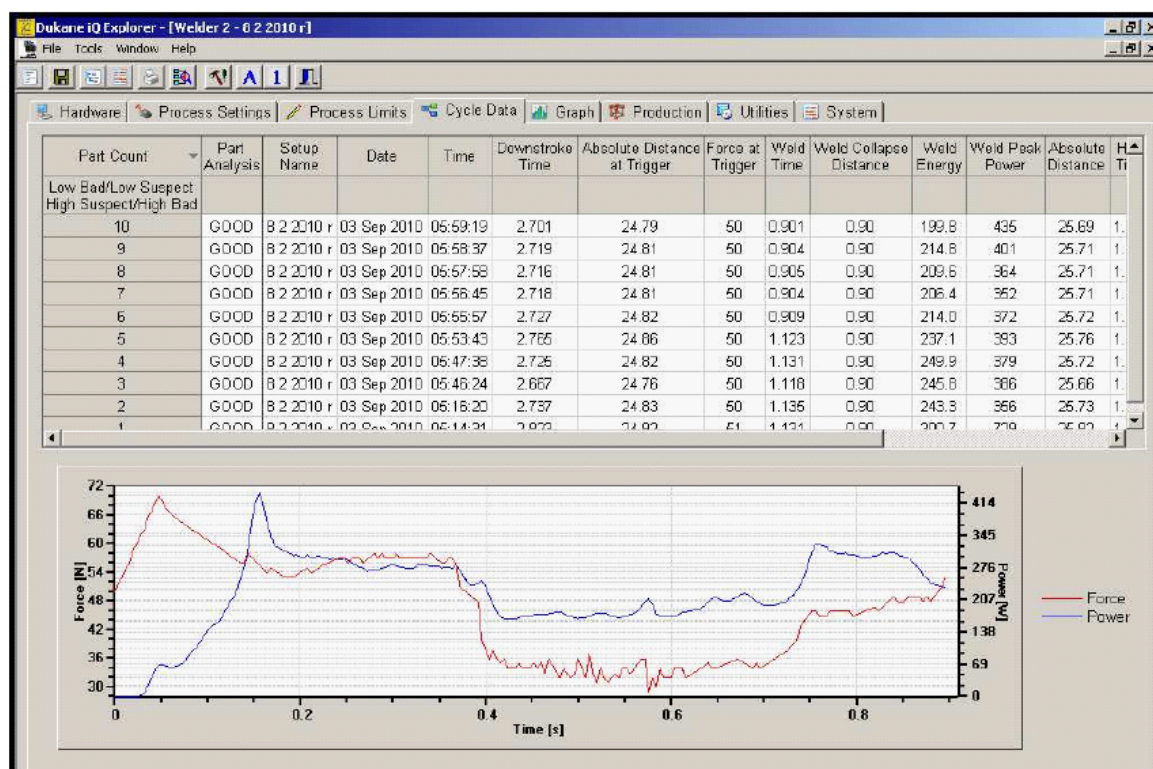
Obr. 54 Ultrazvukový rezonátor

8.1.3 Počítač – iQ Explorer

Nastavování svařovacího zařízení Dukane 43S220 iQ probíhalo výhradně skrze průmyslový počítač pomocí dotykového 15“ LCD monitoru připevněného k tělu lisu. Počítač pracoval skrze operační systém Windows Embedded Standard s ovládacím uživatelským rozhraním iQ Explorer. Výhoda rozhraní iQ Explorer spočívá v kompatibilitě s většinou počítačových platforem (desktop, tablet, notebook nebo průmyslový PC) a nevyžaduje žádný speciální hardware od společnosti Dukane.

Pomocí dotykového displeje nebo přes USB port připojené myši a klávesnice je možné nastavit všechny řídicí parametry potřebné ke svaření vzorků. Struktura rozhraní iQ obsahuje osm základních panelů, od nastavení procesních parametrů přes okamžité zobrazené grafy jednotlivých svařovacích veličin až po podrobnou diagnostiku svařovací soustavy obsahující grafy frekvence a výkonu napomáhající k odstranění případných problémů. Samozřejmostí je export dat ze systému na paměťové médium sloužící k pozdější důkladné analýze v osobním počítači.

Použitím jednoduchého rozhraní ovládaného pomocí dotykového LCD displeje odpadá nutnost jakýkoliv seřizovacích procesů na těle přístroje. [24]



Obr. 55 Uživatelské rozhraní iQ Explorer se zobrazeným panelem grafů [24]

8.2 Výhody ultrazvukových strojů ovládaných servosystémem

Hlavní výhoda svařovacích zařízení z iQ series spočívá v samotném systému řízení. Oproti pneumatickému systému elektricky řízené svařovací lisy se servopohonem nepotřebují žádný stlačený vzduch, řízení posuvu sonotrody probíhá výhradně skrze elektroniku. Elektronický systém řízení eliminuje odchylky související s pneumatickým systémem lisu a zkvalitňuje tím opakovatelnost a přesnost procesu. Technologie dynamického servořízení poskytuje přesné ovládání rychlosti ultrazvukové soustavy, síly a polohy sonotrody. Tento způsob řízení je ideální do automatizovaných montážních linek vyžadujících především vysokou přesnost procesu spojenou s reprodukovatelností, a kde nevádí o něco nižší variabilita systému.

Další výhoda plně digitalizovaného elektrického ovládání spočívá ve výrazném zjednodušení kalibrace zařízení. K plné kalibraci slouží pouze jeden přístroj – snímač spouštěcí síly. Není zapotřebí seřizovat jakékoliv součástky pneumatického systému, všechny ostatní parametry jsou ověřovány elektronicky během funkčního testu, ve kterém se přeměřuje vzdálenost, čas a rychlost.

Jednou z důležitých předností je také ekonomičnost provozu. Náklady na provoz jsou u servosystémů nižší než u pneumatických systémů, neboť odpadá nutnost přívodu stlačeného vzduchu pro pneumatické řízení, odpadají jakékoliv ztráty netěsnostmi v rozvodech apod. [24]

8.3 Svařovací metoda (řízení procesu použitého zařízení)

Výběr svařovací metody je závislý na několika faktorech, které ve výsledku ovlivňují jakost svaru. Jedná se především o svařovaný materiál a jeho schopnost tečení (polyamid 6), tvar svarové plochy (druh spoje – tupý přeplátovaný) a rozměry svařovaných dílů (svařování v blízkém poli). Výhodou plně elektronicky řízeného procesu je možnost kontroly svařování ve více fázích. IQ správa procesu umožňuje kontrolu řízení procesu celkem ve třech fázích:

1. Řízení přípravné fáze – nabízí 3 varianty kontroly
 - Programovatelná parkovací poloha;
 - Dvoustupňová programovatelná rychlost klesání – umožňuje rychlé přiblížení sonotrody ke svařovaným dílům před aktivací procesu a zkracuje tak pracovní cyklus;
 - Spuštění podle výkonu – předspuštění procesu v režimech podle vzdálenosti;

2. Řízení svařovací fáze/režim svařování – nabízí výběr svařovací metody

- Start pohybu po poklesu síly – rychlost svařování je konstantní, dokud systém nedetekuje roztavení materiálu. Tím se redukuje zatížení součástí vedoucí ke zvýšení pevnosti spoje;
- Programovatelné režimy řízení pohybu sonotrody – Melt-Match technologie®
 - Rychlostní režim – konstantní nebo profilovaný v 10 krocích v průběhu svařovací fáze (rychlostní profil);
 - Silový režim - konstantní nebo profilovaný v 10 krocích v průběhu svařovací fáze (silový profil);
- Svařování podle času – po dosažení předem nastavené doby se svařovací proces ukončí;
- Svařování podle energie – po dosažení nastavené maximální dodané energie se svařovací proces ukončí;
- Svařování podle vzdálenosti – sleduje se změna vzdálenosti, aby bylo zkontrolováno, zda se na obou součástech taví stejné množství materiálu a spoj je konzistentní;
- Svařování podle absolutní vzdálenosti – kontroluje se celková výška součásti kvůli dosažení shodných výrobků;
- Svařování podle špičkového výkonu – ultrazvuk je vypnut při dosažení konkrétní hodnoty svařovacího výkonu (když je materiál ve spoji zcela roztaven);

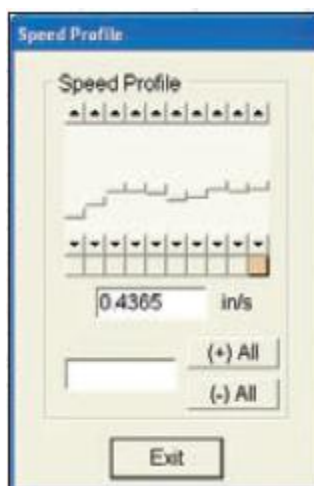
3. Řízení závěrečné fáze

- Metoda dynamické prodlevy – umožňuje přesné programování délky a rychlosti smrštění, čímž je přesně definované celkové smrštění součástí;
- Metoda statické prodlevy – ukončuje pohyb sonotrody v určité poloze při programovatelném časovém intervalu během přidržovací fáze.

Pro monitorizaci svařovacích parametrů byla zvolena metoda svařování na absolutní vzdálenost, při které je svařovací proces ukončen po dosažení přednastavené hodnoty polohy sonotrody. Tím je dosaženo teoreticky konstantní výšky svařence. Ve fázi svařovacího režimu byly dle možností aplikovaného zařízení kontrolovány veškeré svařovací parametry mající vliv na tvorbu svaru (viz kap. 4.5). [24]

8.4 Svařovací parametry

Jednou z výhod elektrického servořízení je snadné přeprogramování svařovacích parametrů během procesu. Hlavními parametry, které lze v systému iQ Explorer nastavit a mající vliv na tvorbu svaru, jsou spouštěcí (iniciační) síla, amplituda, vertikální rychlost posuvu sonotrody, velikost dotlaku a doba dotlaku. Vertikální rychlost posuvu sonotrody stanovuje svařovací rychlost a tím i svařovací čas. Tzv. Melt-Match® technologie umožňuje nastavení konstantní nebo proměnné vertikální rychlosti posuvu sonotrody během jednoho svařovacího cyklu. Výsledkem je přesné řízení a přizpůsobení rychlosti ultrazvukové soustavy s rychlostí postupu tavení materiálu, čímž se dosáhne optimálního promísení molekul během tvorby svarové vrstvy. Rychlost svařování lze rozdělit do deseti segmentů, přičemž pro každý segment lze nastavit různou rychlost (viz obr. 56). [24]



Obr. 56 Melt-Match® technologie – rozčlenění svařovací rychlosti do 10 segmentů [24]

Při výzkumu byly ponechány tyto parametry svařování konstantní:

- **Svařovací frekvence** – 20 kHz (dána svařovacím zařízením);
- **Svařovací vzdálenost** – odlišná pro oba druhy energetického usměřovače;
- **Velikost dotlaku (držící tlak);**
- **Doba dotlaku.**

Proměnné byly během experimentu následující parametry:

- **Amplituda**
- **Spouštěcí svařovací síla**
- **Rychlost posuvu sonotrody:** a) konstantní
b) profilovaná.

Všechny parametry byly monitorovány a optimalizovány z hlediska dosažení maximální pevnosti svaru při zachování vzhledových vlastností svarové plochy a povrchu spojovaných dílů. Monitorování svařovací rychlosti bylo rozčleněno do dvou skupin – optimalizace konstantní svařovací rychlosti a hledání vhodného rychlostního profilu. Svařovány byly vzorky s oběma energetickými usměrňovači, jak se standardním profilem (vrcholový úhel 60°, výška 1 mm) tak i s profilem o výšce 0,6 mm a úhlu hrotu 75°.

9. Určení pevnosti spoje

9.1 Tahové vlastnosti PA6

Tahovou zkouškou byly zjištěny základná mechanické vlastnosti materiálu PA6, které byly porovnány s materiálovým listem dodaným od výrobce Altech. Zkouška byla provedena na víceúčelovém trhacím zařízení TiraTest 2300 se snímací hlavou měřící sílu do velikosti 10 kN. Postup měření probíhal v souladu s normou ČSN EN ISO 527-1,2. Výstupem ze zkoušek byly křivky závislosti síly F na dráze příčniku L , které byly přepočítány na křivky závislosti napětí v tahu σ a poměrného prodloužení ε pomocí příslušného softwaru.

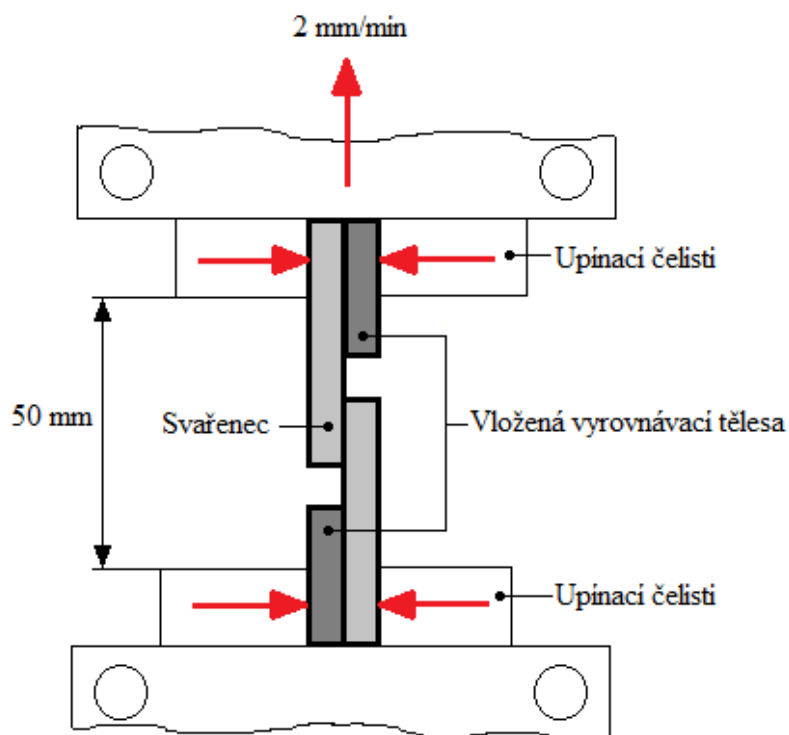
Nejdříve byla provedena zkouška tahem pro normovanou zkušební tyčinku (průběh křivky napětí viz příloha č. 4) a poté i pro vzorek používaný pro svařování. Materiál vykazuje značnou houževnatost danou navlhavostí polyamidu, pevnost v tahu se pohybovala na úrovni 72 MPa což odpovídá tabulkové hodnotě zjištěné z materiálového listu (viz příloha 3). Poměrné prodloužení dosahovalo hodnot až 200 %.



Obr. 57 Trhací zařízení TiraTest 2300

9.2 Popis měření pevnosti překlátovaného tupého spoje

Pevnost překlátovaného svařeného spoje těles byla zjišťována prostřednictvím tahové zkoušky. Postup měření probíhal v souladu s normou ČSN EN ISO 527-1,2. Po upnutí svařence do upínacích čelistí byl vzorek tahově namáhán v podélné ose tak, že horní čelist se pohybovala předepsanou konstantní rychlostí vzhůru a zaznamenána byla závislost změny délky vzorku na síle, která byla vyvinuta. Vzhledem k osazenému tvaru svařence bylo nutné vypodlození obou svařených tyčinek v čelistech trhačího stroje (viz obr. 59). Při každém měření byla do obou čelistí vložena spolu se svařencem i náhradní tyčinka se stejnou tloušťkou jako svařovaná tělesa (4 mm). Tím bylo dosaženo naprosto kolmého upnutí rovnoběžné s osou tahového namáhání. Vzdálenost mezi čelisti byla nastavena na 50 mm, rychlost zatěžování byla pro větší přesnost snížena na 2 mm/min.

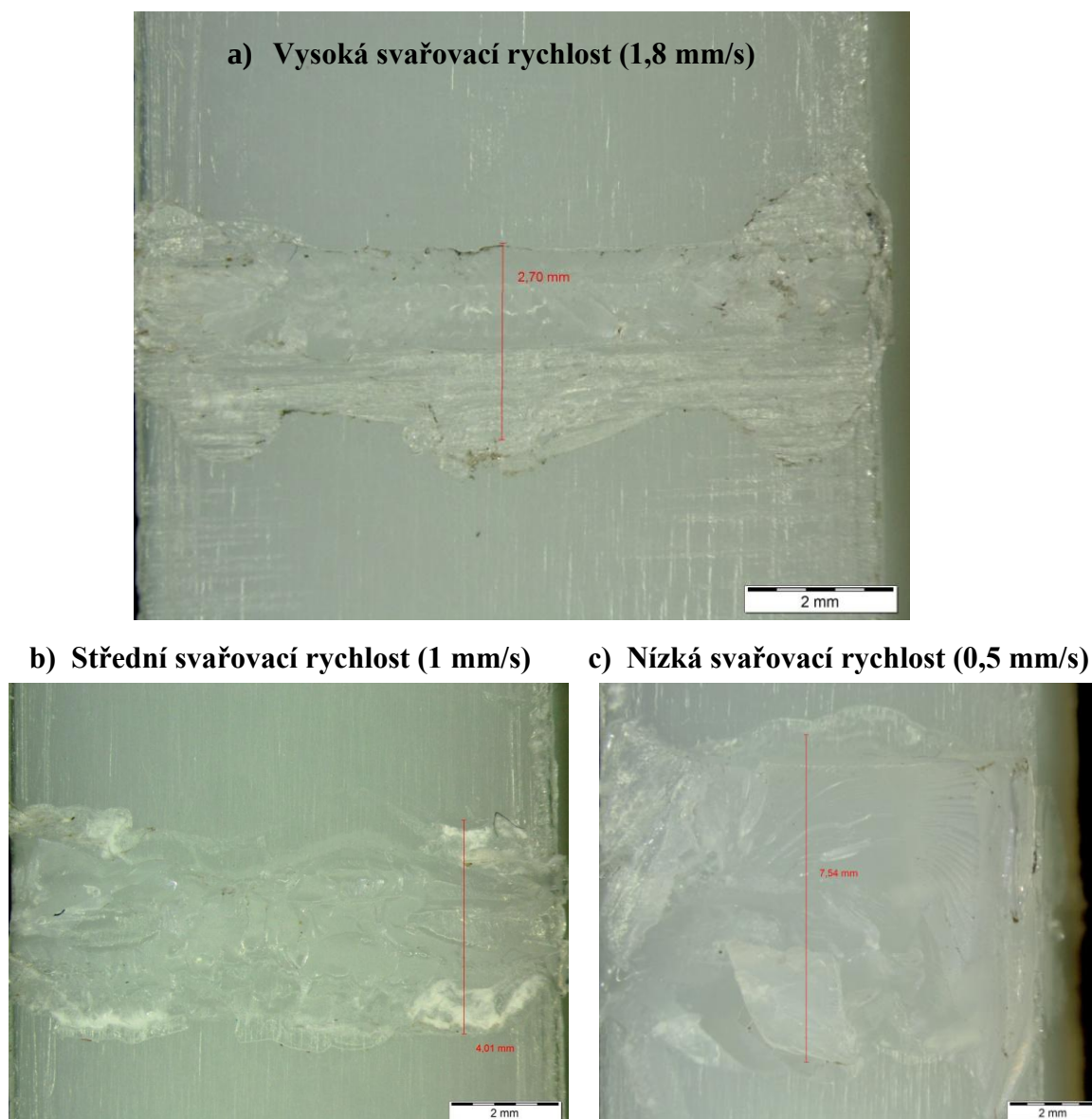


Obr. 59 Vypodložení svařence v upínacích čelistech při zkoušce tahem

9.3 Hodnocení pevnosti svarového spoje

Pevnost svarového spoje byla hodnocena prostřednictvím maximální síly dosažené během zkoušky tahem (destrukční síla). Sílu nebylo vhodné přepočítávat na napětí, neboť se (pro výpočet nutná plocha svaru) značně měnila už během svařování s konstantními parametry. Tento fakt byl ověřen mikroskopickým měřením, jehož vzorové příklady při svařování různou rychlostí jsou zobrazeny na obr. 60. Pro porovnání je však maximální

síla, která byla vyvinuta během zkoušky tahem, výhodnější. Přepočet na napětí by výrazně zkreslovala přesnost změření plochy svaru, kterou nelze jednoznačně vypočítat vynásobením délky a šířky (typický příklad viz obr. 60a). Taktéž způsob namáhání by zvyšoval nepřesnost měření, neboť se nejedná o čistý tah, ale projevuje se zde i ohybová složka napětí. S přihlédnutím k těmto praktickým argumentům a rovněž z důvodu svařování zkušebních tyčinek (a nikoliv dílu z výroby) je v předkládané práci pevnost svaru spojena výhradně s velikostí maximální síly zjištěné ze zkoušky tahem.



Obr. 60 Mikroskopické snímky plochy svaru s vyznačenou šířkou – a) 2,7 mm, b) 4,01 mm, c) 7,54 mm)

10. Popis experimentu a provedená měření

V nejrozsáhlejší části předkládané disertační práce je prezentováno měření o monitorizaci tří základních svařovacích parametrů (spouštěcí síla, amplituda, svařovací rychlost), přičemž svařovací rychlost byla monitorizována jednak konstantní během cyklu a jednak byl hledán optimální rychlostní profil umožňující využít výhod servopohonu používaného svařovacího zařízení (tzn. technologie Metl-Match®). Monitorizace spočívala v prvotním nastavení parametrů, svaření vzorků těmito parametry a následném vyhodnocení pevnosti spoje pomocí zkoušky tahem včetně zaznamenání a vyhodnocení důležitých dat během svařovacího procesu. Nastavení svařovacích parametrů probíhalo experimentálně, neboť v současné době neexistují pro daný typ svařovacího zařízení a materiálu doporučené hodnoty. Monitorizace každého parametru byla uskutečněna v maximálním možném rozsahu, který byl ohraničen limitními hodnotami produkující ještě vzhledově přijatelný svar. Svařovací parametry vykazující známky nepřiměřeného poškození styčné plochy svařence od sonotrody (např. natavení, přílišné otlacení apod.) nebyly dále uvažovány a ani vyšší pevnost spoje v těchto případech nebyla započítávána do experimentu.

Vzhledem ke svařovanému materiálu, kterým byl silně navlhavý polyamid 6, bylo nutné zjistit optimální dobu sušení před svařováním. Polyamid 6 absorbuje vlhkost ze vzduchu a přítomná voda by znehodnotovala výsledky pevnosti spoje. Prvotním měřením bylo tedy nalezení vhodné doby sušení před svařováním. Po zjištění optimální doby sušení byla všechna tělesa určena ke svařování sušena v horkovzdušném sušícím zařízení po tuto dobu, ihned po vyjmutí ze zařízení byla tělesa vložena do uzavíratelných polyetylenových sáčků a přenesena do laboratoře, kde následoval proces svaření. Doba mezi vyjmutím vzorků ze sušícího zařízení a svařováním se pohybovala vždy do 5 minut (tzn. svaření 10 vzorků). Pomocí iQ Explorer softwaru byla zaznamenána procesní data ukládající se na přenosné paměťové médium. S těmito daty bylo možné pozdější vyhodnocování v programu Microsoft Excel. Po svaření byly vzorky ponechány v laboratorním prostředí při teplotě 23 ± 2 °C a relativní vlhkosti 45 ± 5 % po dobu 24 hodin. Po uplynutí jednoho dne byla provedena zkouška tahem, přičemž nejdůležitější zaznamenanou hodnotou byla destrukční síla (maximální síla vyvinutá během tahové zkoušky). Každou hodnotou všech monitorizovaných parametrů bylo svařeno a poté ze zkoušky tahem vyhodnocováno vždy 10 vzorků, pouze měření opakovatelnosti procesu probíhalo po svaření 100 vzorků. V tab. 5 jsou pod symbolem X uvedena všechna provedená měření během výzkumu. Avšak

vzhledem k množství dat nejsou některá měření předložena v experimentu disertační práce. Tato měření jsou v tab. 5 označena černým X, červeným X jsou označena měření dále uvedená ve výzkumné části disertační práce.

Tab. 5 Přehled uskutečněných experimentálních měření

Přehled měření				
Svařovací systém	Proces	Parametr	Energetický usměrňovač	
			60°	75°
Servosystém řízení	Monitorizace parametrů	Doba sušení	X	neprovedeno
		Spouštěcí síla	X	X
		Amplituda	X	X
		Konst. rychlost	X	X
		Rychlostní profil	X	neprovedeno
	Porovnání	Rychlost konst. + profil.	X	neprovedeno
	Vyhodnocení	Opakovatelnost procesu	X	neprovedeno
Pneumatický systém	Monitorizace	Rychlost	X	X
Servo x pneumatika	Porovnání	Pevnost	X	X
		Energie	X	X

11. Sušení vzorků před svařováním

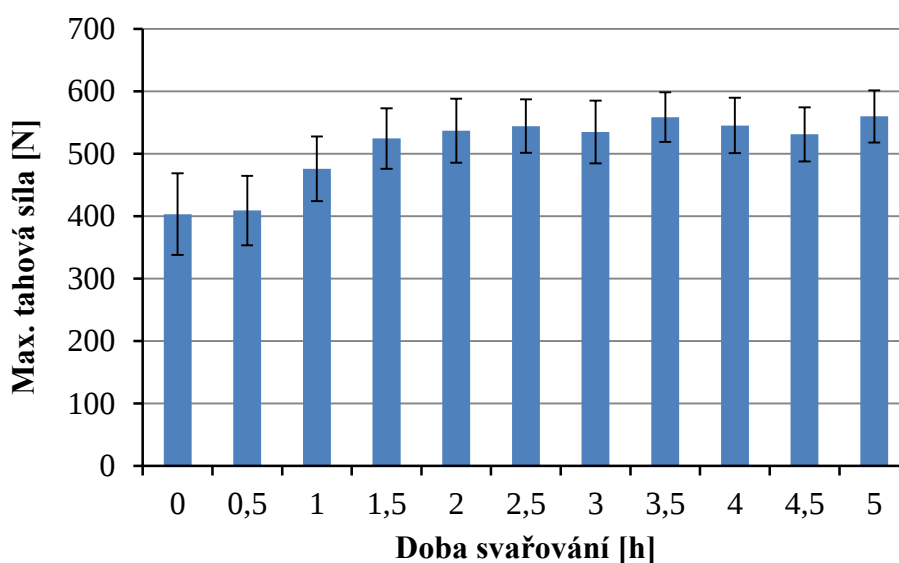
Pro výzkum byl dle požadavků firmy Dukane zvolen materiál polyamid 6. Tento silně navlhavý semikrystalický termoplast (viz kap. 4.1.1) je nutné před vstřikováním důkladně vysušit. Granulát byl před každým vstřikovacím cyklem sušen v horkovzdušném sušicím zařízení při teplotě 80 °C po dobu 6 h (viz kap. 6.4.2). Vzhledem k problematice navlhavosti spojené s procesem svařování (viz kap. 4.4.4) je velice důležité materiál vysušit i před svařováním.

Pro stanovení optimální doby sušení bylo provedeno měření na zkušebních tělesech s doporučeným usměrňovačem energie (tj. rovnostranný trojúhelník, vrcholový úhel 60°). Svařování probíhalo při nastavení spouštěcí síly 30 N, amplitudě 100 % (= 100 μm), svařovací rychlosti 1 mm/s a době působení dotlaku 1 s. První měření probíhalo při svařování nevysušených těles, poté při zachování svařovacích parametrů byla svařována postupně vysušená tělesa. Sušení probíhalo v horkovzdušném sušicím zařízení při teplotě

80 °C, doba sušení byla postupně zvyšována v intervalech po půl hodině. Ihned po sušení byly zkušební vzorky zabaleny do uzavíratelných polyetylenových sáčků a nejdéle do 5 minut od vyjmutí ze sušicího zařízení následoval proces svaření. Po svaření vzorků byly svařence uloženy do přepravek a ponechány v laboratoři při konstantních podmínkách po dobu 24 hod. Po uplynutí této doby následovalo zjišťování pevnosti spoje pomocí zkoušky tahem. Výsledky tahové zkoušky jsou uvedeny v tabulce a grafu (viz tab. 6 a obr. 61).

Tab. 6 Naměřené hodnoty pevnosti svaru po stanovenou dobu sušení

Doba sušení [h]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
Max.tahová síla [N]	403,4	409,1	476	524,5	537,2	544,3	535	558,7	545,4	531,2	559,8
Výb. směrodatná odchylka [-]	35,6	28,6	30,9	48,6	51,3	42,8	50,3	39,8	44,5	43,2	41,7



Obr. 61 Vliv doby sušení na pevnost svaru polyamidu 6

Z grafu je patrné, že svařované vzorky byly dostatečně vysušené již po 2,5 až 3 hodinách při teplotě 80 °C. Při překročení této doby byla pevnost svaru přibližně na stejné úrovni, dále se výrazněji nesnižovala ani nerostla. Vzorky sušené více než 6 h již vykazovali první známky degradace materiálu, tudíž nejsou ve výsledcích dále uvažovány. Rozdíl v pevnosti mezi nevysušenými vzorky a sušenými po dobu 5 hod. činil téměř 38 %. Největší nárůst pevnosti spoje byl zaznamenán při počátku sušení, tj. mezi 0,5 – 1,5 hod.

Výsledkem tohoto měření bylo stanovení minimální doby sušení potřebné k nejvyšší dosažitelné pevnosti svaru. Vzhledem k naměřené pevnosti byly během všech dalších měření zkušební tyčinky vždy sušeny po dobu pěti hodin při 80 °C v horkovzdušné sušičce. Tato doba zaručuje dostatečné vysušení těles před svařováním a tím eliminuje negativní vliv vody na tvorbu svaru.

12. Monitorizace svařovacích parametrů

Monitorizace svařovacích parametrů spočívá v rozboru nastavovaných procesních parametrů na svařovacím stroji Dukane 43S220 (tzn. spouštěcí síla, amplituda, svařovací rychlost), v analyzování dat získaných ze svařovacího procesu (tzn. průběh svařovací síly, maximální svařovací výkon, spotřebovaná energie) a v neposlední řadě ve vyhodnocení pevnosti spoje tahovou zkouškou. Při vyhodnocování je používán také koeficient svařitelnosti, který udává poměr mezi pevností spoje a spotřebou energie (viz vzorec 3). Pevnost spoje je v disertační práci hodnocena velikostí maximální síly zaznamenané během zkoušky tahem. Důležitost hodnoty spotřebované energie během svařovacího cyklu je dána jednou z předkládaných výhod použitého svařovacího zařízení, která vyzdvihuje nižší spotřebu energie oproti konkurenčním pneumatickým svařovacím systémům.

$$KS = \frac{F_{max}}{E_s} \quad (3)$$

Kde je:

KS ... koeficient svařitelnosti [-];

F_{max} ... maximální tahová síla [N];

E_s ... spotřebovaná energie během svařování [J].

12.1 Spouštěcí síla svařování

Spouštěcí síla je předzatížení těles působící před zahájením svařovacího procesu (viz kap. 4.7.5). Hodnota spouštěcí síly se nastavuje experimentálně, v současné chvíli není k dispozici žádná tabulková hodnota pro konkrétní materiál nebo tvar energetického usměrňovače. Při monitorizaci tohoto parametru byly postupně zvyšovány hodnoty síly, přičemž ostatní svařovací parametry zůstaly konstantní. Takto nastavený proces svařování byl uskutečněn pro oba typy energetického usměrňovače.

12.1.1 Energetický usměrňovač o vrcholovém úhlu 60°

Nejdříve bylo provedeno měření spouštěcí svařovací síly na vzorcích s energetickým usměrňovačem o vrcholovém úhlu 60°. Svařovací parametry, které byly nastaveny při monitorizaci spouštěcí síly, jsou uvedeny v tab. 7. Při nulové spouštěcí síle nebyla tělesa spojena vůbec a při nastavení spouštěcí síly na hodnotu 10 N vykazoval svar jen minimální pevnost s nepřipustným vzhledem spoje, a tudíž tyto hodnoty nejsou uvedeny v měření.

Tab. 7 Nastavení svařovacích parametrů během monitorizace spouštěcí síly svařování

Parametry svařování		
Parametr	hodnota	jednotka
Frekvence	20	kHz
Amplituda	100	%
Spouštěcí síla svařování	20-70	N
Svařovací rychlost	1	mm/s
Doba držení	1	s
Svařovací vzdálenost	1	mm
Svařovací čas	1	s

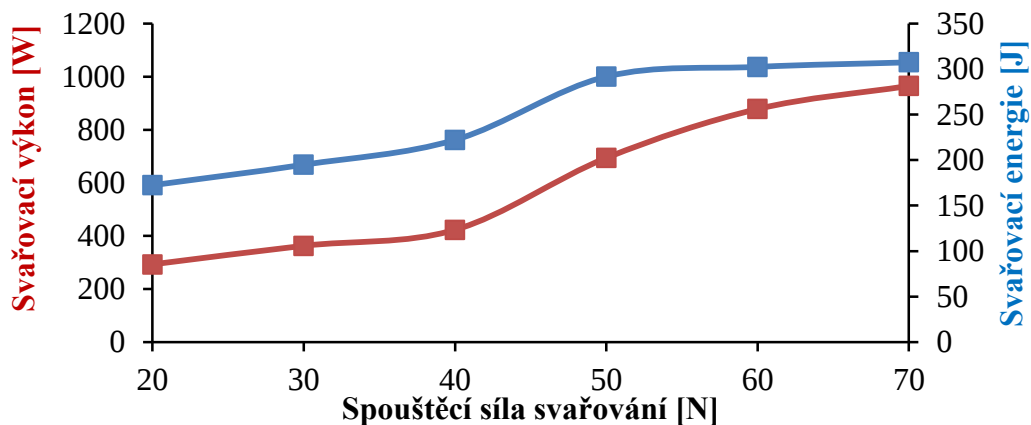
Svařovací síla

Charakteristickým jevem průběhu křivek je narůstající vrchol svařovací síly od počátku spuštění ultrazvukových vibrací s následným poklesem a ustálením se na hodnotě přibližně rovnající se nastavené spouštěcí síle. Po překročení přibližně 80 % svařovacího času je již energetický usměrňovač dokonale roztaven a nastává fáze tečení svaru. Tím dochází ke zvětšování svarové plochy a vzrůstá odpor proti vertikálnímu posunu sonotrody. Sonotroda je nucena zvýšit svařovací sílu, aby bylo dosaženo nastavené svařovací vzdálenosti (viz příloha 6).

Svařovací výkon a energie

Hodnoty svařovacího výkonu a vynaložené energie byly zaznamenány a pro lepší zobrazení vloženy do grafů (viz obr. 62). Oba průběhy křivek se chovají obdobně, se zvyšující se spouštěcí silou rostou hodnoty jak výkonu, tak energie. Rozdíl je patrný

především po překročení spouštěcí síly 50 N, kdy již nedochází k nárůstu energie, ale výkon neustále stoupá.



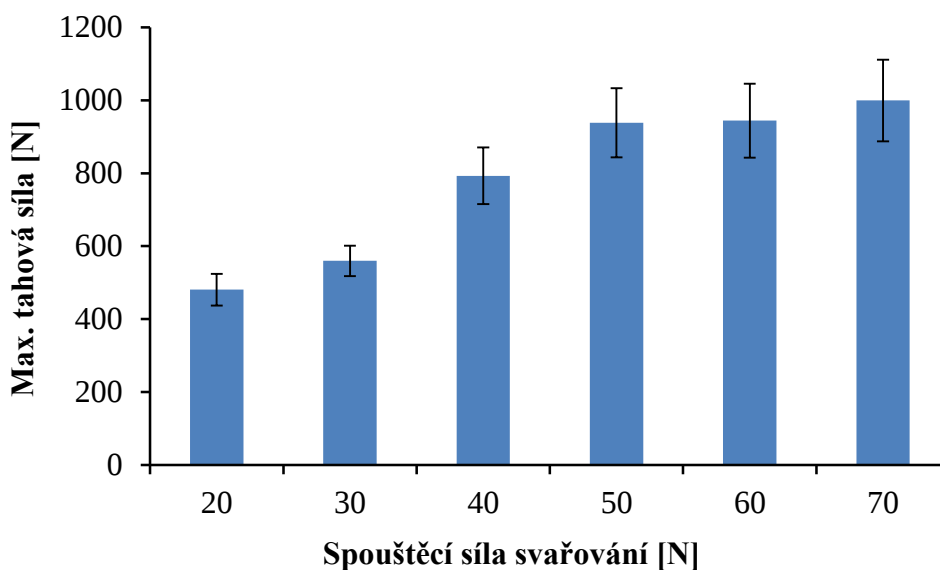
Obr. 62 Vliv spouštěcí svařovací síly na svařovací výkon a energii

Pevnost spoje

Po provedení zkoušky tahem byla zjištěna pevnost svarového spoje při monitorizaci spouštěcí síly v rozsahu 20 – 70 N. Zkouška tahem byla provedena vždy pro 10 vzorků, z naměřených hodnot maximální tahové síly byla vypočítána průměrná hodnota a výběrová směrodatná odchylka. Souhrn všech podstatných hodnot je uveden v tab. 8. Vliv spouštěcí síly na pevnost svaru je pro přehlednost znázorněn ve sloupcovém grafu na obr. 63.

Tab. 8 Naměřené hodnoty při monitorizaci spouštěcí síly

Spouštěcí síla svařování [N]	20	30	40	50	60	70
Max. tahová síla [N]	480,5	559,8	792,9	938,2	944,3	999,6
Výběrová směrodatná odchylka [-]	43,5	41,7	77,8	94,9	101,7	112,2
Svařovací energie [J]	172,4	194,9	222,2	291,8	302,5	307,5
Svařovací výkon [W]	292,8	362,8	423	694	878,3	965,4
Koeficient svařitelnosti [-]	2,8	2,9	3,6	3,7	3,1	3,3



Obr. 63 Vliv spouštěcí síly na pevnost spoje a svařovací energii

Z naměřených hodnot pevnosti spoje je znatelný velký nárůst pevnosti spoje při použití větší spouštěcí síly svařování. Např. rozdíl v pevnosti mezi spouštěcí silou 20 N a 70 N je více než 100 %! Největší nárůst pevnosti svarového spoje byl zaznamenán mezi hodnotami spouštěcí síly 30, 40 a 50 N. Rozdíl v pevnosti mezi spouštěcí silou 50 a 70 N je jen 6 %, oproti tomu mezi 30 a 50 N je rozdíl v pevnosti téměř 40 %. Při použití vyšších spouštěcích sil než 50 N se pevnost spoje příliš neměnila, navíc vlivem vyšší směrodatné odchylky byla většina dat na shodné úrovni pevnosti. Z hlediska poměru pevnost / energie dle koeficientu svařitelnosti nejlépe vychází nastavení spouštěcí síly na hodnotu 50 N.

12.1.2 Energetický usměrňovač o vrcholovém úhlu 75°

Monitorizace spouštěcí síly svařování pokračovala změnou zkušebních tyčinek, kde doporučený tvar usměrňovače (rovnostředný trojúhelník) byl nahrazen usměrňovačem s vrcholovým úhlem 75°. Výška usměrňovače je nižší než u 60° usměrňovače, v tomto případě činí 0,6 mm. Z tohoto důvodu bylo nutné změnit svařovací vzdálenost z 1 mm na 0,6 mm. Aby byla zachována porovnatelnost měření při zachování stejných svařovacích parametrů, bylo nezbytné upravit svařovací rychlost tak, aby se svařovací čas rovnal 1 s, jako tomu bylo u 60° usměrňovače. Při výšce usměrňovače 0,6 mm se dráha posuvu sonotrody (neboli svařovací vzdálenost) rovná taktéž 0,6 mm a výsledná rychlost svařování byla nastavena na hodnotu 0,6 mm/s. Ostatní parametry svařování zůstali naprosto shodné u obou typů energetických usměrňovačů (parametry svařování viz tab. 9).

Tab. 9 Nastavení svařovacích parametrů během monitorizace spouštěcí svařovací síly

Parametry svařování		
Parametr	hodnota	jednotka
Frekvence	20	kHz
Amplituda	100	%
Spouštěcí síla	20-70	N
Svařovací rychlost	0,6	mm/s
Doba držení	1	s
Svařovací vzdálenost	0,6	mm
Svařovací čas	1	s

Svařovací síla

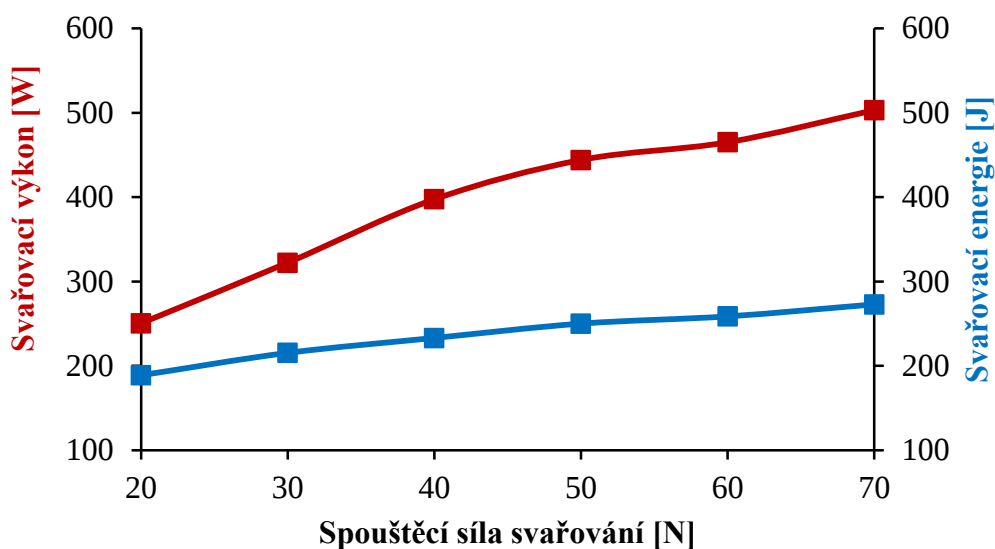
Obdobně jako u 60° usměrňovače, ani zde při svařování s nulovou spouštěcí počáteční silou nedošlo ke spojení dílů. Přijatelný vzhled spoje vykazoval svar při použití spouštěcí síly o velikosti 20 N a vyšší. Postupným zvyšováním spouštěcí síly bylo dosaženo stejného rozmezí monitorizace u obou typů usměrňovačů, tj. 20 – 70 N. Vyšší hodnoty spouštěcích sil (80 a 90 N) již způsobili opotřebení čelní plochy horního vzorku, který přicházel do styku se sonotrodou. Z tohoto důvodu nejsou tyto síly zahrnuty ve výsledcích, jelikož nesplňují požadavek na kvalitní vzhled svařence.

Průběh sil je podobný jako u prvního měření s 60° usměrňovačem. Křivka opět nabývá určitého vrcholu ihned po počátku spuštění ultrazvukových vibrací, poté následuje pokles na hodnoty nižší než velikost spouštěcích sil, ustálení na těchto hodnotách trvá zpravidla až do dosažení 80 % svařovacího času (viz příloha č. 7). Poté je usměrňovač dokonale roztaven a následuje tečení svaru a zvětšování svarové plochy mající za následek prudké zvýšení svařovací síly před dosažením nastavené svařovací vzdálenosti (tj. svařovací čas 0,8 – 1 s). Nižší spouštěcí síly (především 20 N, ale i 30 N) vykazují průběhy lehce odlišné, zpravidla bez vrcholu na počátku svařování. Průběh síly je od spuštění vibrací až po fázi tečení téměř rovnoběžný, rovnající se hodnotě spouštěcí síly svařování.

Svařovací výkon a energie

Hodnoty maximálního svařovacího výkonu a spotřebované energie jsou převedeny do grafů a znázorněny na obr. 64. Obě hodnoty rostou spolu se zvyšující se spouštěcí silou.

Růst probíhá téměř lineárně u obou analyzovaných veličin, avšak maximální výkon vzrůstá prudčeji a svařovací energie pozvolněji. Rozdíl ve výkonu mezi spouštěcí silou 20 N a 70 N je více než 100 %, kdežto u spotřebované energie pouze 30 %. Absolutní hodnoty maximálního výkonu a spotřebované energie během svařování jsou uvedeny v tab. 10.



Obr. 64 Vliv spouštěcí svařovací síly na svařovací výkon a energii

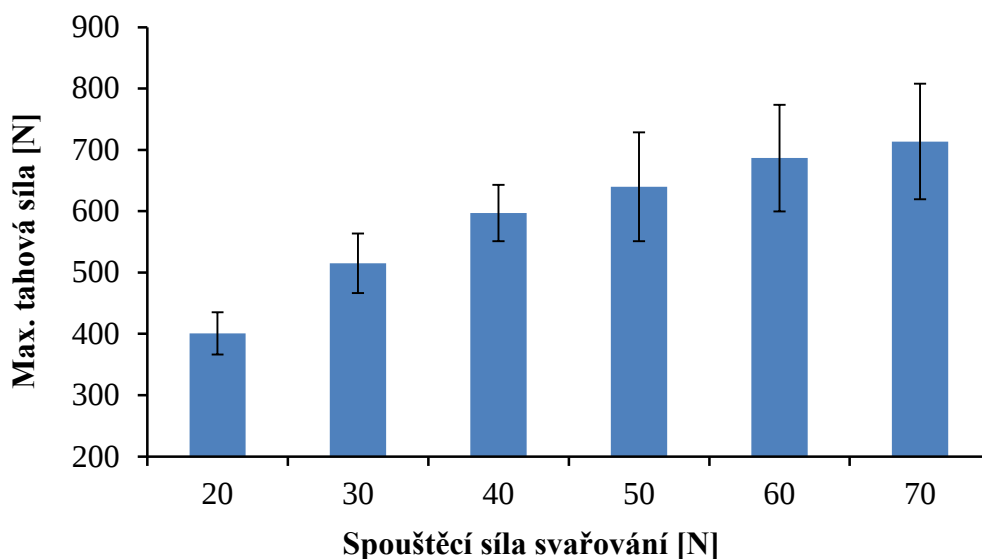
Pevnost spoje

Ze zkoušky tahem zaznamenané hodnoty pevnosti svaru včetně vypočtené výběrové směrodatné odchylky jsou uvedeny v tab. 10. Kromě pevnosti spoje jsou dále v tabulce zaznamenány i hodnoty energie a výkonu dodané svařovacím zařízením během procesu. Souvislost mezi spouštěcí silou svařování a pevností spoje je pro názornost zanesena do grafu na obr. 65.

Tab. 10 Naměřené hodnoty při monitorizaci spouštěcí síly

Spouštěcí síla svařování [N]	20	30	40	50	60	70
Max. tahová síla [N]	400,8	515	597	639,8	686,7	713,6
Výběrová směrodatná odchylka [-]	34,5	48,4	45,8	88,9	87	94,2
Svařovací energie [J]	188,8	215,3	233	250	258,6	272,8
Svařovací výkon [W]	250,4	322,2	397,4	444	465	503,1
Koeficient svařitelnosti [-]	2,1	2,4	2,6	2,6	2,7	2,6

Z naměřených dat je patrný nárůst pevnosti spoje při použití vyšší spouštěcí síly. Zvyšování pevnosti má logaritmický charakter, se zvyšující se pevností svaru roste i směrodatná odchylka, viz obr. 65. Největší rozdíly v pevnosti byly zaznamenány při nižších hodnotách spouštěcích sil (20 a 30 N), konkrétně 28 %. Rozdíly mezi spouštěcími silami 40, 50, 60 a 70 N se pohybovaly do 7 %. Dle koeficientu svařitelnosti vykazuje spouštěcí síla 60 N nejlepší poměr mezi pevností spoje a vynaloženou svařovací energií.



Obr. 65 Vliv spouštěcí síly na pevnost spoje a svařovací energii

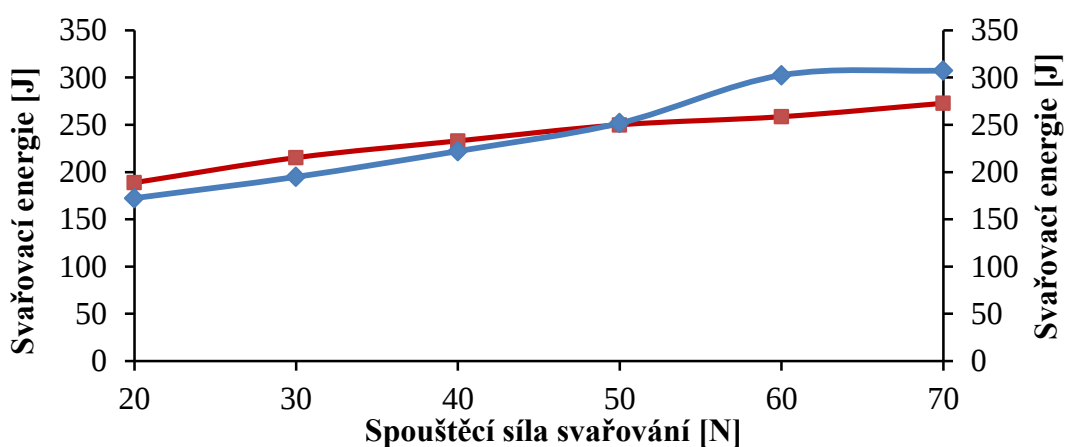
12.1.3 Porovnání spouštěcí síly pro obě velikosti energetických usměrňovačů

Jedním ze závěrů monitorizace spouštěcí síly je i vzájemné porovnání obou rozměrově odlišných energetických usměrňovačů. Hodnoceny byly nejdůležitější veličiny získané ze svařovacího procesu (výkon a energie) a pevnost spoje (viz tab. 11).

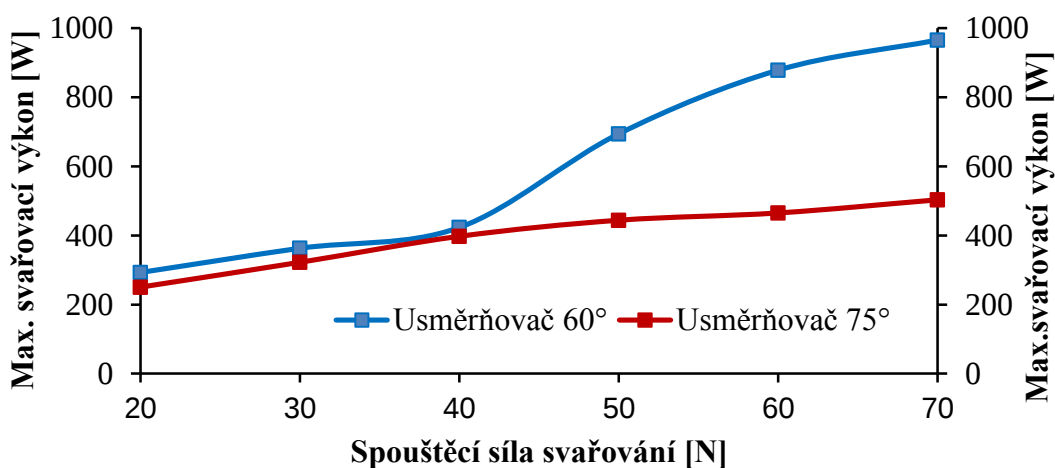
Tab. 11 Data získaná monitorizací spouštěcí síly svařování

Spouštěcí síla svařování [N]		20	30	40	50	60	70
Usměrňovač 60°	Max. tahová síla [N]	480,5	559,8	792,9	938,2	944,3	999,6
	Směrodatná odchylka [-]	43,5	41,7	77,8	94,9	101,7	112,2
	Svařovací energie [J]	172,4	194,9	222,2	251,4	302,5	307,5
	Koeficient svařitelnosti [-]	2,8	2,9	3,6	3,7	3,1	3,3
Usměrňovač 75°	Max. tahová síla [N]	400,8	515	597	639,8	686,7	713,6
	Směrodatná odchylka [-]	34,5	48,4	45,8	88,9	87	94,2
	Svařovací energie [J]	188,8	215,3	233	250	258,6	272,8
	Koeficient svařitelnosti [-]	2,1	2,4	2,6	2,6	2,7	2,6

Hodnoty svařovací energie a výkonu v závislosti na spouštěcí síle při svařování odlišných usměrňovačů jsou graficky znázorněny na obr. 66, 67. Při nastavení spouštěcí síly do 40 N vykazuje nižší spotřebu energie při srovnatelném výkonu svařování s 60° usměrňovačem. Rozdíly jsou vždy do 10 %. Při překročení spouštěcí síly 40 N se poměr obrací a nižší spotřebu zajišťuje vrcholový úhel usměrňovače 75°. Zajímavostí je téměř shodná spotřeba energie při – z hlediska koeficientu svařitelnosti – optimální hodnotě spouštěcí síly. Větších odlišností je dosaženo u maximálního výkonu, kde při použití nejvyšších spouštěcích sil dosahuje rozdíl hodnot od 36 % (50 N) až po 47 % (70 N).



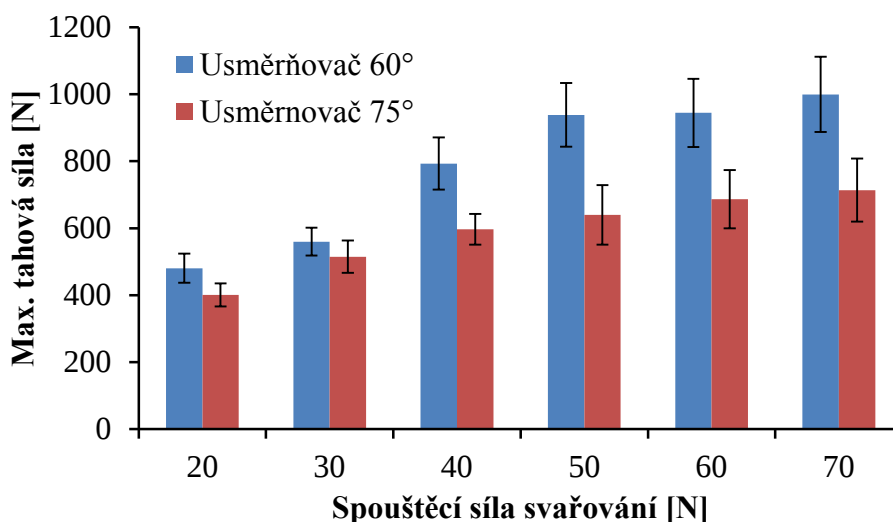
Obr. 66 Vliv spouštěcí síly na svařovací energii



Obr. 67 Vliv spouštěcí síly na svařovací výkon

Porovnání pevnosti spoje v závislosti na spouštěcí síle u obou energetických usměrňovačů zobrazuje graf na obr. 68. V grafu jsou uvedeny průměrné hodnoty pevnosti přepřátovaného spoje získané ze zkoušky tahem včetně vypočtené výběrové směrodatné

odchylky. Ve všech případech nastavení spouštěcí síly vykazuje vyšší pevnost spoj těles vybavených energetickým usměrňovačem o vrcholovém úhlu 60° . Rozdíly jsou nejmenší zejména u nižších hodnot spouštěcí síly. Např. spouštěcí síla 30 N vykazuje odlišnost v pevnosti spoje 8 %. Nastavením spouštěcí síly na 40 N a více znamená výraznější nárůst pevnosti u 60° usměrňovače. Maximální rozdíl v pevnosti (32 %) ve prospěch 60° usměrňovače byl naměřen při použití spouštěcí síly 50 N. Vyšší spouštěcí síly znamenají odlišnost v pevnosti pohybující se na hranici 27 %.



Obr. 68 Porovnání pevnosti spoje

12.2 Svařovací amplituda

Svařovací amplituda je jedním ze základních parametrů, kterými lze výrazně ovlivnit svarový spoj (viz kap. 4.7.2). Hodnota svařovací amplitudy závisí na konkrétní aplikaci (vzdálené nebo blízké pole), velikosti ultrazvukové frekvence a na materiálu (viz příloha 2). Pro ultrazvukové svařování polyamidu s frekvencí 20 kHz je doporučeno volit amplitudu v rozmezí 70 – 120 μm . Při experimentu byl používán ultrazvukový rezonátor se jmenovitou amplitudou 100 μm (viz kap. 8.1.2). Elektrické servořízení svařovacího stroje umožňuje snížit amplitudu a pomocí iQ Eplorer softwaru nastavit hodnotu v procentech, přičemž 100 % se rovná maximální amplitudě 100 μm .

Při monitorizaci tohoto parametru byly postupně snižovány hodnoty amplitudy a zjišťován vliv na pevnost spoje při zaznamenávání důležitých procesních parametrů jako jsou svařovací síla, energie nebo výkon. Kromě amplitudy byly všechny svařovací parametry ponechány konstantní s přihlédnutím ke svařovacímu času 1 s. Takto nastavený proces svařování byl realizován pro oba typy energetického usměrňovače.

12.2.1 Energetický usměrňovač o vrcholovém úhlu 60°

Monitorizace amplitudy probíhala při obdobných parametrech svařování jako u monitorizace spouštěcí síly. Hodnota amplitudy byla postupně snižována ze 100 % (tj. 100 μm) až k 70 %. Při pokusu o svaření s 60 % amplitudou již nedošlo k dokonalému spojení obou svařovaných těles, jelikož nebylo dosaženo svařovací vzdálenosti rovnající se výšce energetického usměrňovače. Z tohoto důvodu nejsou dále amplitudy nižší než 70 % v experimentu uváděny.

Tab. 12 Nastavení svařovacích parametrů během monitorizace svařovací amplitudy

Parametry svařování		
Parametr	hodnota	jednotka
Frekvence	20	kHz
Amplituda	70 - 100	%
Spouštěcí síla	50	N
Svařovací rychlost	1	mm/s
Doba držení	1	s
Svařovací vzdálenost	1	mm
Svařovací čas	1	s

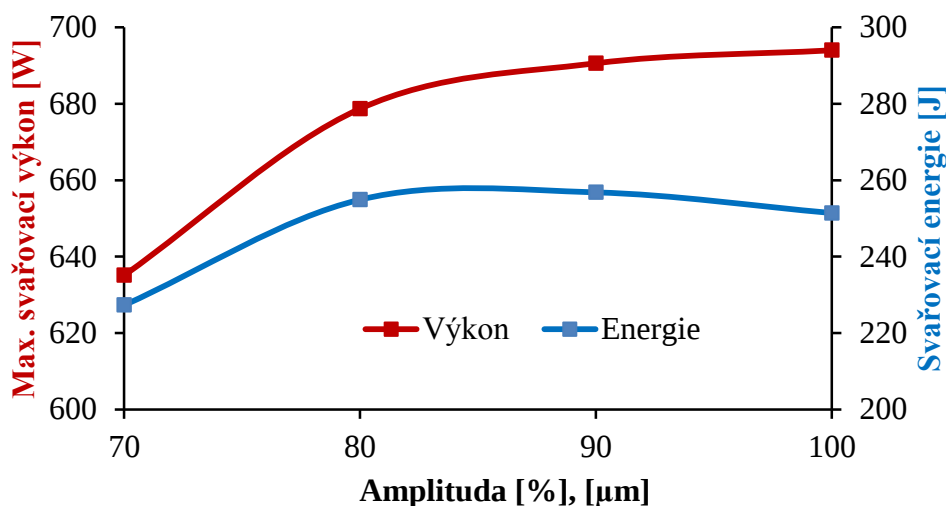
Svařovací síla

Jako referenční průběh svařovací síly je brán cyklus svařování se 100 % amplitudou, tedy výkmit sonotrody $\pm 50 \mu\text{m}$. Při postupném snižování amplitudy nedochází k výrazné změně tvaru křivky svařovací síly, stejně jako u 100 % amplitudy dochází k nárůstu síly ihned po spuštění ultrazvukových vibrací, poté k poklesu na původní hodnotu spouštěcí síly a k ustálení (zhruba od 0,2 do 0,8 s svařování). Na hranici 0,8 s svařovacího cyklu dochází k prudkému nárůstu síly u všech měřených amplitud (z důvodu zvětšování svarové plochy), přičemž konečná velikost svařovací síly po dosažení svařovací vzdálenosti a času je znatelně vyšší u amplitud 70 a 80 μm . Tvar všech křivek průběhu svařovací síly v závislosti na změně amplitudy je k nalezení v příloze 8.

Svařovací výkon a vynaložená energie

Průměrné hodnoty svařovací energie a maximálního výkonu jsou uvedeny v tab. 13 a graficky znázorněny na obr. 69. Obě křivky mají logaritmický charakter, se snižující se amplitudou nejdříve pozvolna (amplituda do 80 μm), poté razantněji klesají jak hodnoty

energie, tak i výkonu. Při velikosti amplitudy 80 – 100 μm byly naměřeny hodnoty výkonu i spotřeby téměř konstantní, odchylky se pohybovaly vždy do 3 %. Největší změny bylo dosaženo při poklesu amplitudy z 80 na 70 μm , zde se výkon i amplituda snížila téměř o 10 % u spotřebované energie a o 8 % u maximálního dosaženého výkonu.



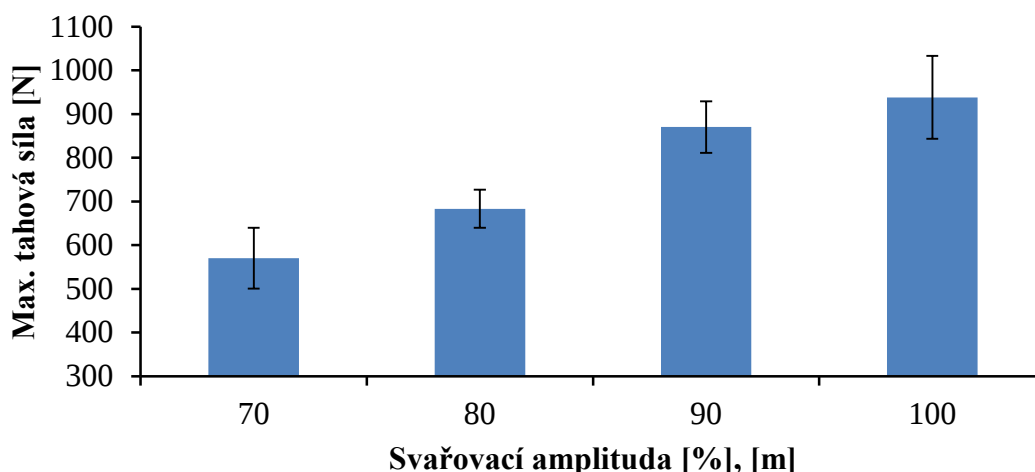
Obr. 69 Vliv svařovací amplitudy na svařovací výkon a energii

Pevnost spoje

Dle naměřených výsledků ze zkoušky tahem (viz tab. 13) je prokazatelný značný vliv amplitudy na pevnost svarového spoje. Se snižující se hodnotou amplitudy téměř lineárně klesá i pevnost překlátovaného spoje. Celkový naměřený pokles pevnosti při snížení amplitudy ze 100 μm na 70 μm činí 64 %. Postupným snižováním amplitudy ze 100 μm na 90, 80, a 70 μm se snižuje pevnost o 8, 27 a 19 %. Největší skokový pokles pevnosti byl tedy naměřen u snížení amplitudy z 80 na 70 μm (27 %). Koeficient svařitelnosti udávající nejlepší poměr mezi pevností spoje a spotřebovanou energií dosahuje nejvyšších hodnot při svařování s amplitudou 100 μm .

Tab. 13 Naměřené hodnoty při monitorizaci svařovací amplitudy

Svařovací amplituda [%], [μm]	70	80	90	100
Max. tahová síla [N]	570	683,2	870,3	938,2
Výběrová směrodatná odchylka [-]	69,5	43,5	59,2	94,9
Svařovací energie [J]	227,3	254,9	256,8	251,4
Svařovací výkon [W]	635,1	678,7	690,6	694
Koeficient svařitelnosti [-]	2,5	2,7	3,4	3,7



Obr. 70 Vliv svařovací amplitudy na pevnost svarového spoje

12.2.2 Energetický usměrňovač o vrcholovém úhlu 75°

Stejný postup monitorizace amplitudy probíhal také při změně svařovaných těles na vzorky obsahující energetický usměrňovač o vrcholovém úhlu 75°. Amplituda byla snižována postupně ze 100 μm , přičemž po nastavení na hodnotu nižší než 70 μm (tj. minimální doporučenou hodnotu udávanou pro ultrazvukové svařování polyamidu s frekvencí kmitů 20 kHz) nedošlo k dokonalému spojení obou těles, nebylo totiž dosaženo konečné svařovací vzdálenosti rovnající se výšce energetického usměrňovače 0,6 mm. Stejně jako u energetického usměrňovače s úhlem 60° je možné svařovat pouze s amplitudou kmitů vyšší než 70 μm . Nastavené svařovací parametry během celé monitorizace amplitudy jsou uvedeny v tab. 14. Měřítkem porovnatelnosti byl opět svařovací čas. Z tohoto důvodu bylo nutné přenastavit svařovací vzdálenost a svařovací rychlost tak, aby svařovací proces trval vždy 1 s (tzn. svařovací rychlost 0,6 mm/s).

Tab. 14 Nastavení svařovacích parametrů během monitorizace svařovací amplitudy

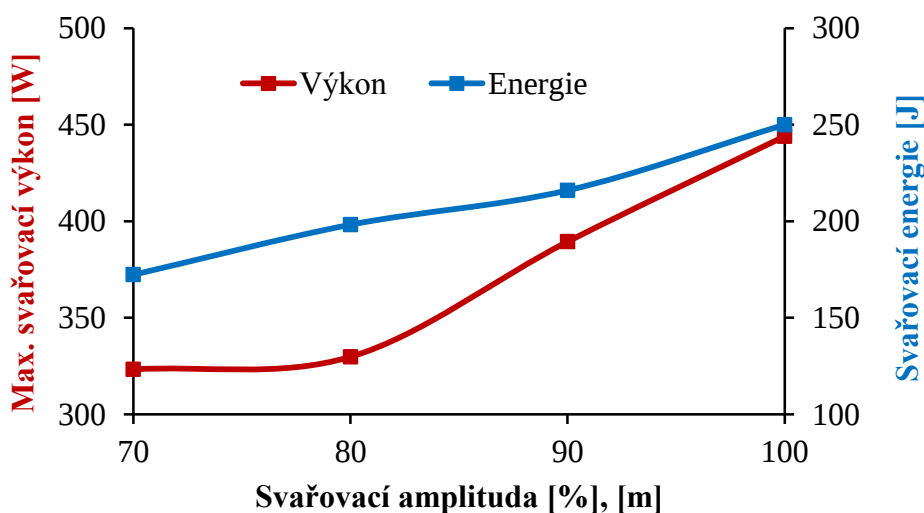
Parametry svařování		
Parametr	hodnota	jednotka
Frekvence	20	kHz
Amplituda	70 - 100	%
Spouštěcí síla	50	N
Svařovací rychlost	0,6	mm/s
Doba držení	1	s
Svařovací vzdálenost	0,6	mm
Svařovací čas	1	s

Svařovací síla

Průběh svařovací síly během cyklu se se změnou svařovací amplitudy téměř vůbec neměnil, křivky síly jsou graficky znázorněny v příloze 9. Změna amplitudy tedy nemá na průběh svařovací síly prakticky žádný vliv. Průběh je obdobný jako u 60° usměrňovače, pouze konečná fáze nárůstu svařovací síly není tak prudká, ale nastává pozvolněji a přibližně o 0,2 s dříve. Tzn. tečení svaru a rozprostírání se do větší svarové plochy nastává již přibližně po 0,6 s od počátku cyklu svařování. Maximální síla vyvinutá sonotrodou na konci svařovacího procesu je přibližně 3x vyšší než spouštěcí síla, která byla nastavena na hodnotu 50 N.

Svařovací výkon a energie

IQ Explorer softwarem zaznamenané hodnoty maximálního svařovacího výkonu a spotřebované energie jsou uvedeny v tab. 15, grafické znázornění je zobrazeno na obr. 71. Průběh obou analyzovaných parametrů je lehce odlišný. Jak energie, tak výkon se snižující se hodnotou svařovací amplitudy klesá, avšak energie téměř lineárně, výkon lineárně pouze do amplitudy 80 μm . Snižováním amplitudy z 80 μm na 70 μm nevyvolá u svařovacího výkonu prakticky žádnou změnu. Snižováním amplitudy ze 100 μm na 90 μm znamená úsporu energie o 14 % a pokles maximálního výkonu o necelých 13 %. Celkový pokles energie a výkonu při snížení amplitudy ze 100 μm na 70 μm činí 32 % (energie) a 28 % (výkon).



Obr. 71 Vliv amplitudy na svařovací výkon a energii

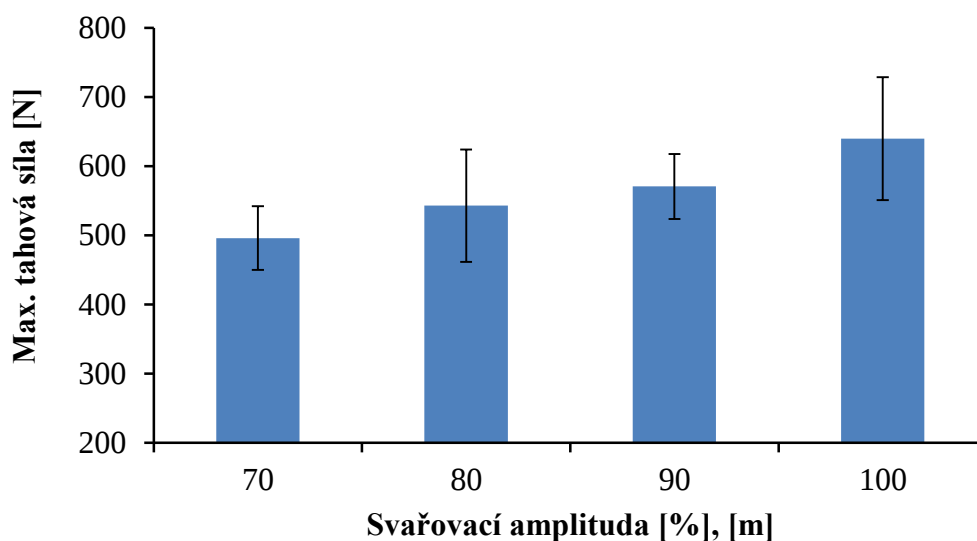
Pevnost spoje

Monitorizací amplitudy při svařování vzorků s energetickým usměrňovačem o vrcholovém úhlu 75° byl zjištěn nepatrný vliv na pevnost spoje. Spolu se snižující se amplitudou klesá pevnost přeplátovaného spoje, avšak rozdíly nejsou znatelné jako u 60° usměrňovače. Hodnoty pevnosti jsou uvedeny v tab. 15, grafické znázornění na obr. 72.

Tab. 15 Naměřené hodnoty při monitorizaci svařovací amplitudy

Svařovací amplituda [%], [μm]	70	80	90	100
Max. tahová síla [N]	495,9	542,8	570,5	639,8
Výběrová směrodatná odchylka [-]	45,9	81,2	47,1	88,9
Svařovací energie [J]	172,3	198,2	216	250
Svařovací výkon [W]	323,3	329,8	389,4	444
Koeficient svařitelnosti [-]	2,9	2,7	2,6	2,6

Pevnost spoje klesá se snižující se hodnotou amplitudy exponenciálně (viz obr. 72). Celkový pokles pevnosti při snížení amplitudy ze 100 μm na 70 μm činí 24 %. Postupným snižováním amplitudy o 10 μm bylo docíleno poklesu pevnosti spoje o 11, 5 a 8 %. Hodnota výběrové směrodatné odchylky nevykazuje žádnou spojitost se změnou amplitudy. Koeficient svařitelnosti dosahuje nejvyšších hodnot při amplitudě 70 μm (2,9), vyšší amplitudy mají tento poměr pevnosti a energie na úrovni 2,6 – 2,7.



Obr. 72 Vliv amplitudy na pevnost přeplátovaného spoje s usměrňovačem 75°

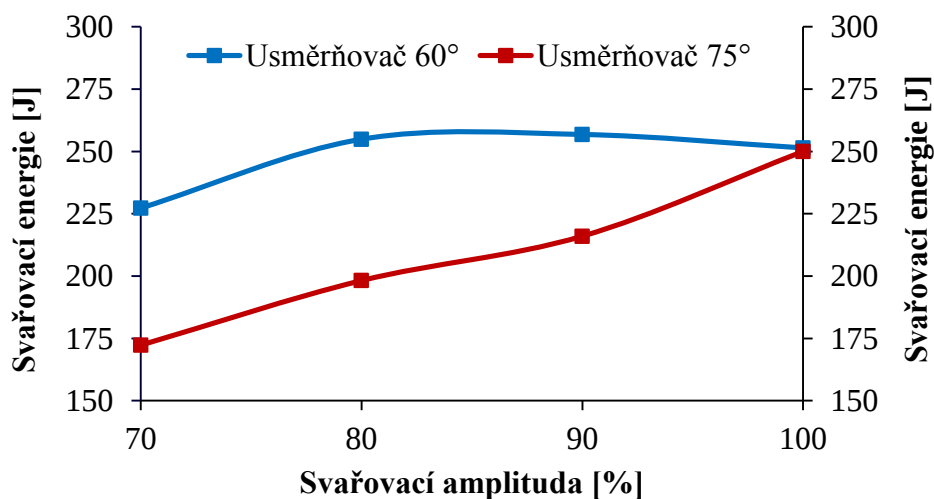
12.2.3 Porovnání svařovací amplitudy pro obě velikosti energetických usměrňovačů

Posledním rozbořem při monitorizaci svařovací amplitudy je vzájemné porovnání výsledků svařování u obou energetických usměrňovačů. Výsledná data jsou k nalezení v tab. 16, grafické hodnocení na obr. 73, 74 a 75.

Tab. 16 Data získaná monitorizací svařovací amplitudy

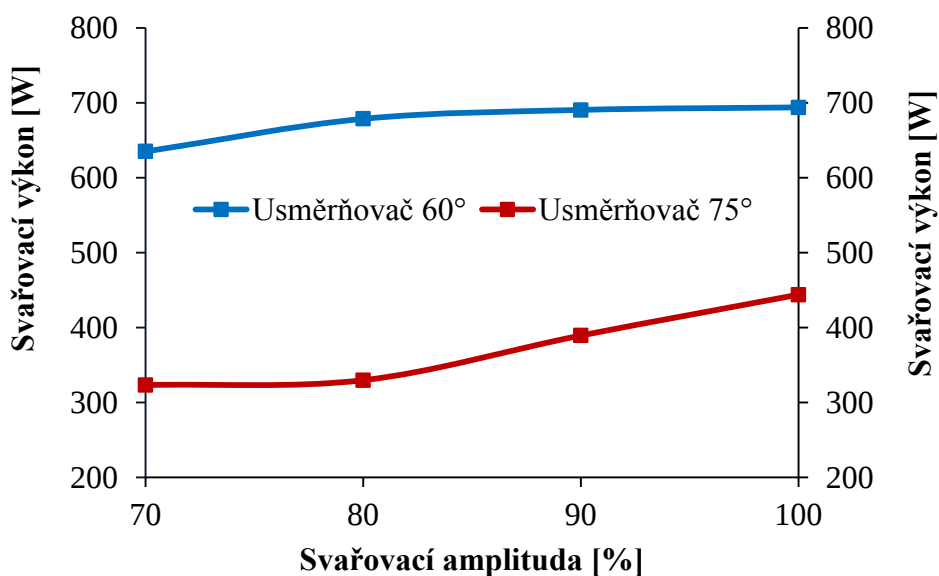
Amplituda svařování [%], [μm]		70	80	90	100
Usměrňovač 60°	Max. tahová síla [N]	570	683,2	870,3	938,2
	Výběrová směrodatná odchylka [-]	69,5	43,5	59,2	94,9
	Svařovací energie [J]	227,3	254,9	256,8	251,4
	Koeficient svařitelnosti [-]	2,5	2,7	3,4	3,7
Usměrňovač 75°	Max. tahová síla [N]	495,9	542,8	570,5	639,8
	Výběrová směrodatná odchylka [-]	45,9	81,2	47,1	88,9
	Svařovací energie [J]	172,3	198,2	216	250
	Koeficient svařitelnosti [-]	2,9	2,7	2,6	2,6

Grafické znázornění svařovací energie v závislosti na amplitudě (viz obr. 73) dokazuje, že úspora energie je s poklesem amplitudy mnohem výraznější u 75° usměrňovače než u usměrňovače s hrotem 60°. Zatímco u 75° usměrňovače dosahuje úspora energie okolo 10 % při každém snížení amplitudy o 10 μm , 60° usměrňovač vykazuje úsporu přibližně 10 % až při maximálním snížení amplitudy ze 100 na 70 μm .



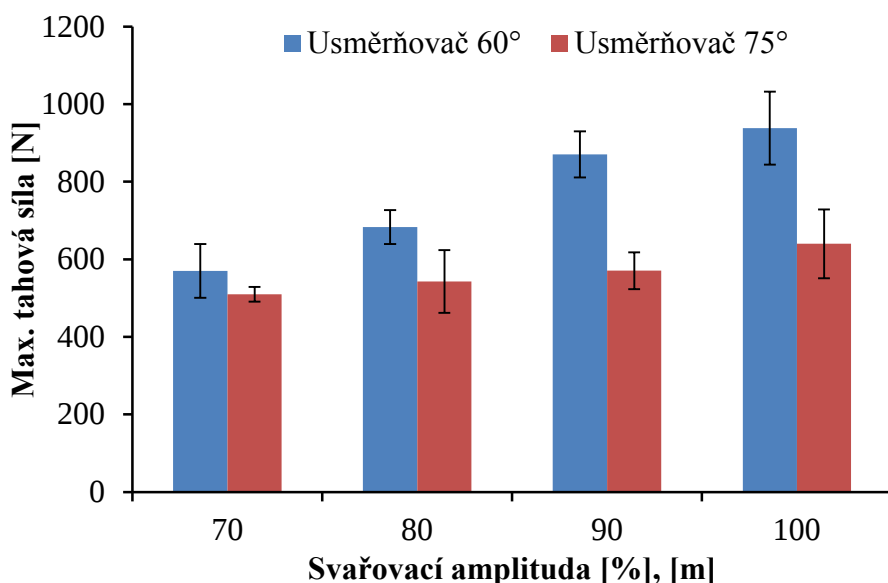
Obr. 73 Vliv svařovací amplitudy na energii pro oba typy energetických usměrňovačů

Maximální dosažený výkon během svařovacího cyklu vykazuje stejný charakter u obou energetických usměřňovačů. Křivky výkonu spolu se snižující se amplitudou nepatrně klesají, hlavní rozdíl spočívá v absolutních hodnotách. Křivka výkonu 60° usměřňovače je posazena mnohem výše, pohybuje se v rozmezí 600 – 700 W v závislosti na použité amplitudě. Oproti tomu výkon u svařování 75° usměřňovače se pohybuje až o 50 % níže, v rozmezí 300 – 450 W.



Obr. 74 Vliv svařovací amplitudy na výkon pro oba typy energetických usměřňovačů

Sloupkový graf na obr. 75 představuje vliv svařovací amplitudy na pevnost spoje u obou energetických usměřňovačů. Ve všech případech nastavení svařovací amplitudy vykazuje větší pevnost svar s energetickým usměřňovačem o vrcholovém úhlu 60°. Nejnižší rozdíl v pevnosti byl zaznamenán při amplitudě 70 μm , se zvyšující se amplitudou byl nárůst pevnosti spoje u 60° usměřňovače výraznější. Při zachování maximální pevnosti spoje, tzn. amplituda rovnající se 100 μm , dosahuje rozdíl v pevnosti spoje 32 % ve prospěch 60° usměřňovače. Naopak při použití nejnižší možné amplitudy (70 μm) činí rozdíl v pevnosti spoje „jen“ 13 %.



Obr. 75 Vliv svařovací amplitudy na pevnost svaru u obou typů energetických usměrňovačů

12.3 Svařovací rychlost – konstantní během cyklu

Třetím monitorizovaným parametrem předkládané práce je svařovací rychlost, která by dle teoretických předpokladů měla mít největší vliv na utváření svarové plochy a tím i na pevnost spoje. Svařovací rychlost je dána rychlostí vertikálního posuvu sonotrody a je úměrná svařovacímu času. Čím větší je rychlost svařování, tím kratší je svařovací doba (viz kap. 4.7.4). Svařovací rychlost je nastavována experimentálně, pro konkrétní aplikaci a materiál. Elektrické servořízení pohybu sonotrody umožňuje nastavit svařovací rychlost přímo v milimetrech za sekundu, není tudíž potřeba rychlost přepočítávat z tlaku jako u pneumatického systému.

Základem pro volbu rozsahu při monitorizaci svařovací rychlosti byl svařovací čas 1 s. (shodný s monitorizací amplitudy a spouštěcí síly), tzn. rychlost 1 mm/s pro 60° usměrňovač a 0,6 mm/s pro 75° usměrňovač. Z této hodnoty byla svařovací rychlost nejdříve snižována, poté zvyšována až do krajních hodnot, které ještě produkovali vzhledově přijatelný svar. Kromě svařovací rychlosti (a tím i času) byly ostatní parametry ponechány konstantní.

Takto nastavený proces svařování byl realizován pro oba typy energetického usměrňovače. Všechna tělesa určená ke svařování byla vysušena v horkovzdušném sušicím zařízení při teplotě 80 °C po dobu 5 h (viz závěr kap. 11).

12.3.1 Energetický usměrňovač o vrcholovém úhlu 60°

Monitorizace svařovací rychlosti probíhala při parametrech uvedených v tab. 17. Rozsah svařovací rychlosti byl volen s ohledem na přijatelný vzhled součásti. Při velmi nízkých svařovacích rychlostech pod 0,5 mm/s již začínala být horní plocha svařovaného dílu přicházející do kontaktu s funkční plochou sonotrody mírně rozvařená, tudíž nižší hodnoty nebyly dále monitorizovány. Naopak při velmi vysokých rychlostech docházelo k neustálému zvyšování svařovacího výkonu, při překročení původní hodnoty výkonu (při rychlosti 1 mm/s) o více než 100 % byl proces zastaven. Z těchto určujících hledisek byla monitorizace svařovací rychlosti provedena v rozsahu 0,5 – 2 mm/s. Analyzovaný rozsah svařovacích rychlostí odpovídá svařovacímu času od 0,5 s při rychlosti 2 mm/s až do 2 s při rychlosti 0,5 mm/s.

Tab. 17 Nastavení svařovacích parametrů během monitorizace svařovací rychlosti

Parametry svařování		
Parametr	hodnota	jednotka
Frekvence	20	kHz
Amplituda	100	%
Spouštěcí síla	50	N
Svařovací rychlost	0,5 - 2	mm/s
Doba držení	1	s
Svařovací vzdálenost	1	mm
Svařovací čas	0,5 - 2	s

Svařovací síla

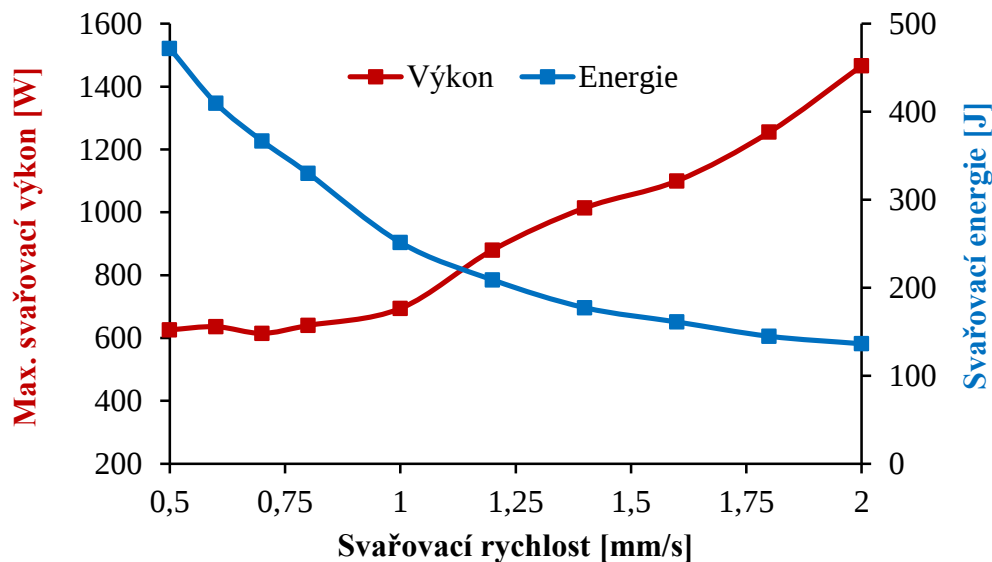
Z průběhu svařovací síly (viz příloha 9) je patrný značný vliv svařovací rychlosti. Tvar křivky je obdobný s předem určeným referenčním vzorkem (při rychlosti 1 mm/s), avšak absolutní hodnoty se mění velmi výrazně. Snížením svařovací rychlosti se prodlužuje doba svařování a křivka průběhu svařovací síly se vyrovnává. Nejzřetelnější rozdíl je viditelný u nejnižších svařovacích rychlostí (viz příloha 9 – červená a zelená křivka) 0,5 a 0,6 mm/s, které znamenají svařovací čas 1,6 a 2 s. Při takto pomalém svařování téměř nedochází k počátečnímu nárůstu síly, průběh je více rovnoměrný a ustálený na hodnotě nižší než je počáteční hodnota spouštěcí síly 50 N. K tavení

usměrňovače dochází velmi pozvolna a není zapotřebí vynakládat takové množství síly, jako je tomu u vyšších rychlostí. Na druhé straně při nejvyšších svařovacích rychlostech kolem 2 mm/s dochází k velmi prudkému nárůstu svařovací síly (na více než 1,5 násobek spouštěcí síly) ihned po spuštění ultrazvukových vibrací a i následný pokles daný natavením usměrňovače nesníží potřebnou svařovací sílu na méně než 100 N, což znamená 100 % nárůst síly oproti počátku svařování. Nejvyšší monitorizované rychlosti výrazně zkrátí svařovací proces, ale průběh síly napovídá nerovnoměrnému roztavení usměrňovače a následnému tečení do svarové plochy. K dosažení požadované svařovací vzdálenosti je při vysokých svařovacích rychlostech nutné vyvinout značnou sílu, v konečné fázi přitlačení obou těles znamenající hodnotu až 300 N.

Svařovací výkon a energie

Absolutní hodnoty maximálního svařovacího výkonu a spotřebované energie jsou uvedeny v tab. 18. Grafické srovnání obou veličin v závislosti na svařovací rychlosti znázorňuje obr. 76. Obě snímané veličiny vykazují logaritmický charakter křivky, avšak s opačným smyslem. Křivka výkonu (červená barva) roste se zvyšující se hodnotou svařovací rychlosti, přičemž zhruba do rychlosti 1 mm/s pozvolna, poté již výrazněji. Přibližně od rychlosti 1 mm/s roste výkon lineárně. Tento průběh naznačuje nutnost vyvinout zdatelně vyšší výkon při vysokých rychlostech svařování, což se vzájemně shoduje se svařovací silou. Vyšší rychlostí je dosaženo kratšího svařovacího času, negativem je namáhání sonotrody kvůli vynaložení vysokého svařovacího výkonu a síly. Při snížení svařovací rychlosti z 1 mm/s na 0,5 mm/s činí pokles výkonu 10 %, oproti tomu zvýšením rychlosti o 0,5 mm/s na přibližných 1,5 mm/s vzroste výkon o více než 35 %. Zvyšování svařovací rychlosti bylo ukončeno po dosažení hodnoty 2 mm/s spojené s více než dvojnásobným zvýšením maximálního dosaženého výkonu. Průběh křivky spotřebované energie (modrá barva) naznačuje souvislost se svařovacím časem. Čím déle působí sonotroda vibračními kmity na svařované díly, tím je spotřeba energie vyšší. Na rozdíl od maximálního výkonu spotřebovaná energie klesá spolu se zvyšující se svařovací rychlostí. Při použití nejnižších svařovacích rychlostí je spotřebováno největší množství energie, při největší rychlosti svařování je docíleno nejnížší spotřeby energie. Největší skokové úspory energie bylo dosaženo zvýšením rychlosti z 0,8 na 1 mm/s, kde úspora energie činí 24 %. Úspora energie je výraznější při nízkých svařovacích rychlostech, při rychlostech nad 1,2 mm/s není pokles energie tolik zdatelný. Průsečík v grafu neznačí

ideální poměr mezi výkonem a energií, tvar křivek pouze napomáhá k objasnění vztahu mezi výkonem a energií při různých nastavovaných svařovacích rychlostech.



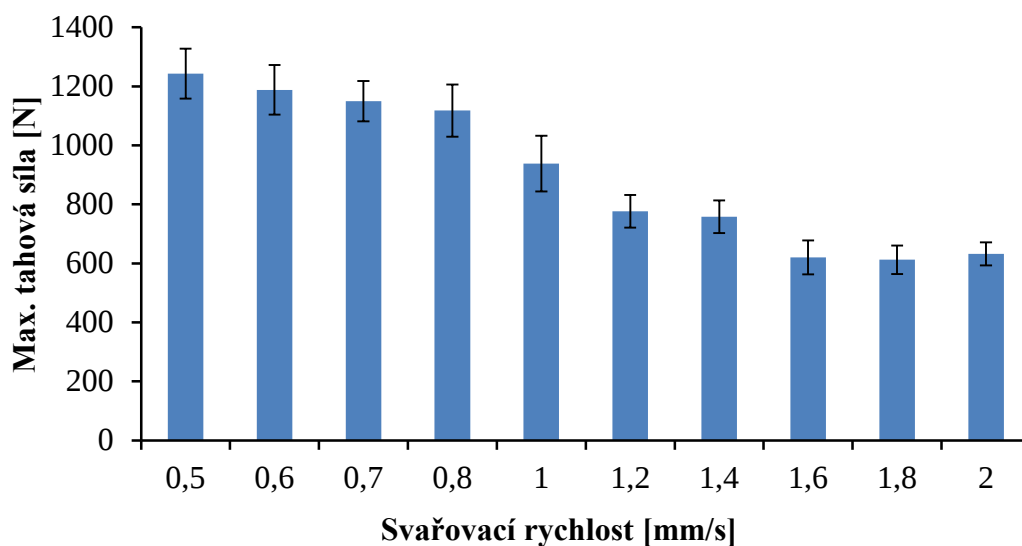
Obr. 76 Vliv svařovací rychlosti na svařovací výkon a energii

Pevnost spoje

Naměřené hodnoty tahové síly (včetně výběrové směrodatné odchylky) přeplátovaného spoje s 60° usměrňovačem v závislosti na svařovací rychlosti, respektive svařovacímu času, jsou uvedeny v tab. 18. Grafické znázornění pevnosti svaru je uvedeno na obr. 77. Dle teoretických předpokladů nižší svařovací rychlost a tím delší doba cyklu způsobují nárůst pevnosti svaru, neboť usměrňovač taje rovnoměrněji a tavenina má dostatek času dokonale se rozprostřít a zvětšit tak svarovou plochu (viz obr. 60c). Pokles pevnosti svaru je nejméně znatelný při velmi nízkých (0,5 – 0,8 mm/s) nebo naopak při velmi vysokých (1,6 – 2 mm/s) svařovacích rychlostech. Ze sloupcového grafu na obr. 77 je patrné, že v okolí svařovací rychlosti 1 mm/s je možné nejvíce měnit pevnost svaru. Změna svařovací rychlosti $\pm 0,2$ mm/s v této oblasti vyvolá zvýšení pevnosti spoje o 17 %, resp. pokles o 20 %. Při svařovacích rychlostech vyšších než 1,6 mm/s již nenastává téměř žádná změna v pevnosti spoje. Rozdíl v pevnosti mezi rychlostmi 1,6 a 2 mm/s činí 2 %. Výhodou vysokých svařovacích rychlostí jsou nejpříznivější poměry mezi spotřebovanou energií a pevností svarového spoje.

Tab. 18 Naměřené hodnoty při monitorizaci svařovací rychlosti

Svařovací rychlost [mm/s]	0,5	0,6	0,7	0,8	1
Svařovací čas [s]	2	1,67	1,43	1,25	1
Max. tahová síla [N]	1243	1188	1150	1118	938,2
Výběrová směrodatná odchylka [-]	84,3	84,3	68,4	88,2	94,9
Svařovací energie [J]	472	409,6	366,8	330	251,4
Svařovací výkon [W]	626	636	615	640	694
Koeficient svařitelnosti [-]	2,6	2,9	3,1	3,4	3,7
Svařovací rychlost [mm/s]	1,2	1,4	1,6	1,8	2
Svařovací čas [s]	0,83	0,71	0,63	0,56	0,5
Max. tahová síla [N]	776,4	758	620,3	612,3	632
Výběrová směrodatná odchylka [-]	55,3	55,3	57,5	48,6	39
Svařovací energie [J]	208,9	177,3	161,1	144,8	136,3
Svařovací výkon [W]	880	1014	1100	1255	1466
Koeficient svařitelnosti [-]	3,7	4,3	3,9	4,2	4,6



Obr. 77 Vliv svařovací rychlosti na pevnost spoje

12.3.2 Energetický usměrňovač o vrcholovém úhlu 75°

Jako výchozí měřítko pro monitorizaci svařovací rychlosti vzorků s energetickým usměrňovačem o vrcholovém úhlu 75° byl zvolen spoj svařený rychlostí 0,6 mm/s. To značí dodržení svařovacího času 1 s, obdobně jako je tomu u monitorizace ostatních

parametrů. Z rychlosti 0,6 mm/s byla nejdříve snižována a poté i zvyšována svařovací rychlost až do dosažení kritické hranice způsobující vzhledově nevyhovující svar. Touto metodou bylo dosaženo minimální rychlosti svařování 0,2 mm/s a tím svařovacího času 3 s. Maximální rychlost byla naměřena 1,2 mm/s odpovídající svařovacímu času 2 s. Nastavení svařovacích parametrů dodržovaných během monitorizace svařovací rychlosti je uvedeno v tab. 19.

Tab. 19 Nastavení svařovacích parametrů během monitorizace svařovací rychlosti

Parametry svařování		
Parametr	hodnota	jednotka
Frekvence	20	kHz
Amplituda	100	%
Spouštěcí síla	50	N
Svařovací rychlost	0,2 – 1,2	mm/s
Doba držení	1	s
Svařovací vzdálenost	0,6	mm
Svařovací čas	0,5 - 3	s

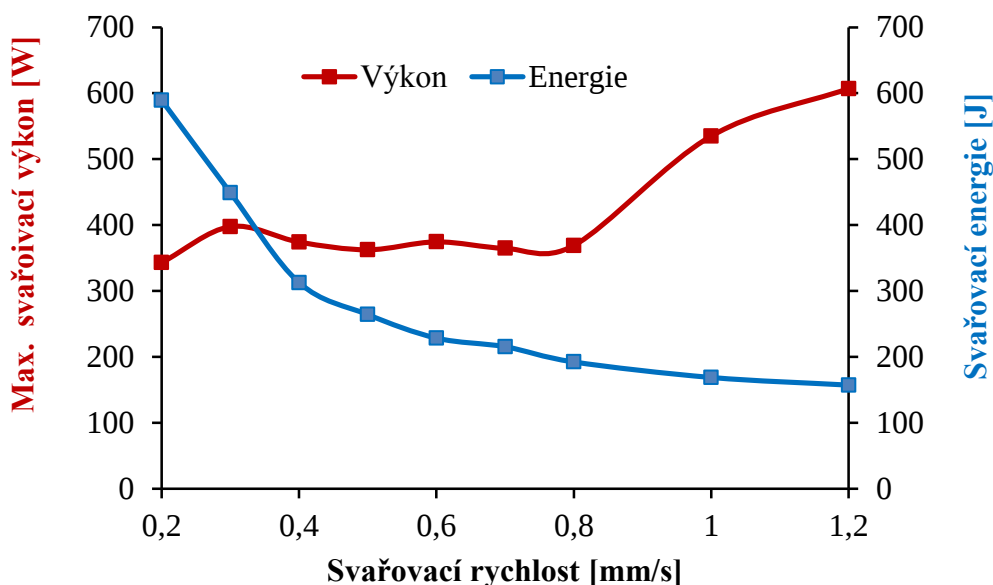
Svařovací síla

Z grafu uvedeného v příloze 11 je patrný vliv svařovací rychlosti, respektive svařovacího času na průběh svařovací síly. Při svařování velmi nízkými svařovacími rychlostmi (0,2 – 0,3 mm/s) je zapotřebí jen velmi malá svařovací síla působící rovnoměrně po celou dobu svařování. Při těchto rychlostech byla naměřena svařovací síla během cyklu nižší než spouštěcí síla (50 N), mírný nárůst síly byl zaznamenán pouze před ukončením svařování při dosažení konečné svařovací vzdálenosti. Střední svařovací rychlosti pohybující se v okolí svařovacího času 1 s jsou charakteristické ustálením svařovací síly (zhruba po 0,2 s) na přibližné hodnotě spouštěcí síly a prudkým zvýšením síly před dosažením konečné svařovací vzdálenosti. Nejvyšší analyzované svařovací rychlosti (1 a 1,2 mm/s) značně uspoří čas, ale za cenu nutnosti vynaložit mnohem větší svařovací sílu než u středních rychlostí. Svar má jen velmi krátkou dobu na formování

vrstev a síla se prakticky po celou dobu cyklu nestabilizuje. Finální nárůst síly ke konci cyklu poté dosahuje hodnot téměř 200 N, tj. tři násobek spouštěcí síly.

Svařovací výkon a energie

Průběh maximálního svařovacího výkonu a spotřebované energie je graficky znázorněn na obr. 78. Červená křivka výkonu signalizuje především při nízkých a středně vysokých svařovacích rychlostech jen minimální vliv na vynaložený svařovací výkon pohybující se na hranici $370 \text{ W} \pm 8 \%$. Až při maximálních rychlostech 1 a 1,2 mm/s je nutné vynaložit výrazně větší výkon pro urychlení svařovacího cyklu. Změna svařovací rychlosti z 0,8 na 1 mm/s znamená snížení svařovací fáze cyklu o pouhých 0,15 s, ale je zapotřebí vynaložit o 45 % více výkonu. Další zvýšení rychlosti na hranici 1,2 mm/s způsobí navýšení výkonu o dalších 13 % a snížení svařovacího času o 0,1 s. Spotřebovaná energie jasně koresponduje s délkou svařovací fáze cyklu a tím dobou působení vibrační energie. Zatímco při svařovacích rychlostech nad 0,5 mm/s energie velmi pozvolna klesá, snížením rychlosti z 0,4 mm/s energie prudce roste, neboť při těchto rychlostech se značně prodlužuje svařovací čas (z důvodu krátké svařovací vzdálenosti). Z hlediska spotřeby energie a svařovacího výkonu je pro daný případ vhodné volit rozsah svařovací rychlosti mezi 0,5 – 0,8 mm/s znamenající dobu trvání svařovací fáze 1,2 až 0,75 s. Při těchto rychlostech jsou spotřebovaná energie i maximální svařovací výkon nejnížší.



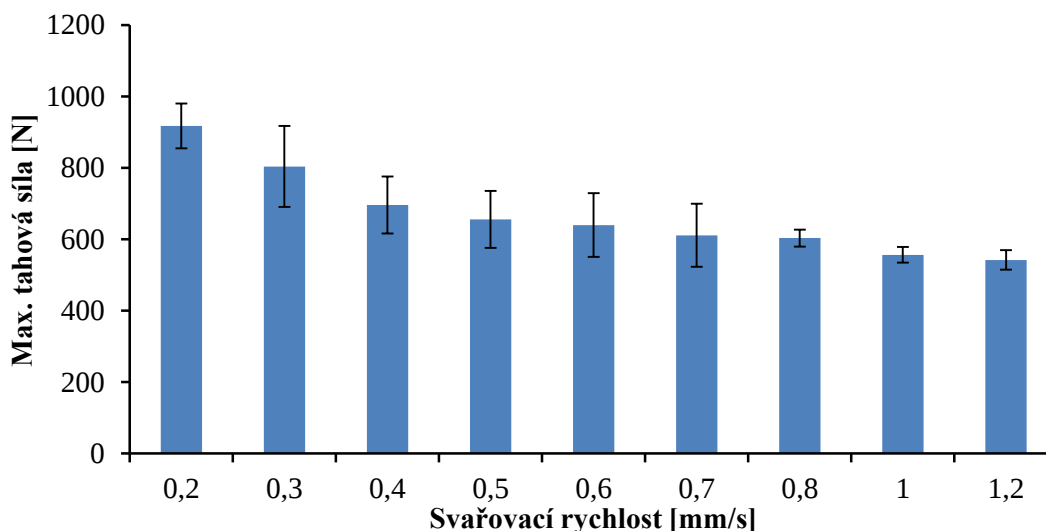
Obr. 78 Vliv svařovací rychlosti na svařovací výkon a energii

Pevnost spoje

Ze zkoušky tahem naměřené hodnoty pevnosti včetně hodnot svařovacího výkonu a energie jsou uvedeny v tab. 21. Grafické znázornění je k nalezení na obr. 79. Především ze sloupčového grafu na obr. 79 je jasně patrný vliv svařovací rychlosti na pevnost svaru. Největší pevnosti svaru je dosaženo při nejnižší svařovací rychlosti znamenající nejdelší dobu cyklu a naopak. Nárůst pevnosti není rovnoměrný, prodloužení svařovací doby z 1 s na 2 s znamená navýšení pevnosti o 25 %, přičemž další prodloužení svařovacího času o 1 s vyvolá vzrůst pevnosti spoje o 14 %. Při svařování rychlostmi rovnající se svařovacímu času $1 \pm 0,25$ s vykazují spoje téměř shodnou pevnost, rozdíl mezi rychlostí 0,5 a 0,8 mm/s činí 8 %. Další zvyšování svařovací rychlosti o 0,2 mm/s má za následek jen nepatrné snížení pevnosti zhruba okolo 2 - 6 %. Výsledky koeficientu svařitelnosti naznačují příznivější poměr mezi pevností spoje a vynakládanou energií při vyšších svařovacích rychlostech. Nejlepšího poměru bylo dosaženo při svařovacích rychlostech okolo 1 mm/s.

Tab. 21 Naměřené hodnoty při monitorizaci svařovací rychlosti

Svařovací rychlost [mm/s]	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1	1,2
Svařovací čas [s]	3	2	1,5	1,2	1	0,8	0,75	0,6	0,5
Max. tahová síla [N]	917,5	803,8	696,2	655,6	639,8	611,2	603,2	556,5	542
Výb. směrodatná odchylka [-]	62,7	113,4	79,8	80	88,9	88,7	23,6	22,1	27,1
Svařovací energie [J]	589,3	449,1	312,7	264,2	228,5	215,4	192,3	168,8	157,2
Svařovací výkon [W]	343	397,6	374,2	362,5	374,5	364,7	369	535	607
Koeficient svařitelnosti [-]	1,6	1,8	2,2	2,5	2,8	2,8	3,1	3,3	3,4



Obr. 79 Vliv svařovací rychlosti na pevnost spoje

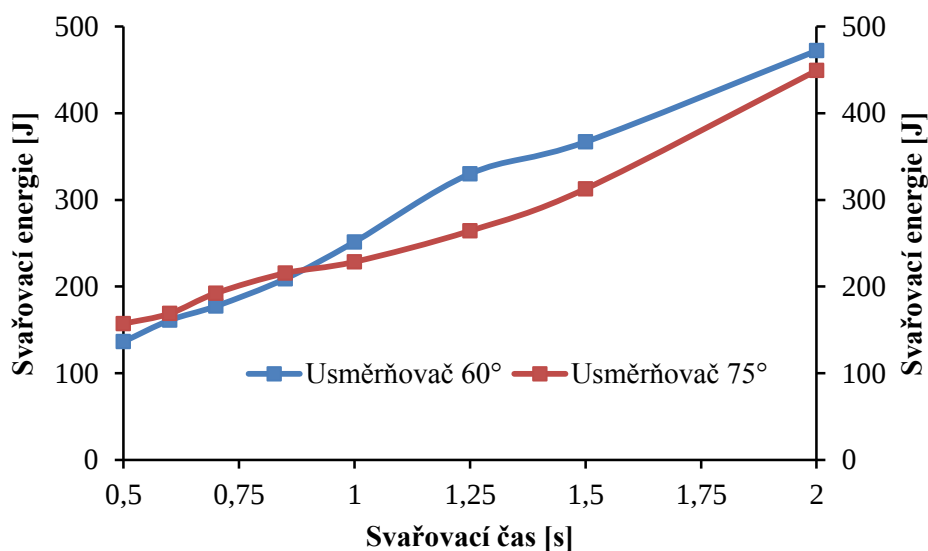
12.3.3 Porovnání svařovací rychlosti pro obě velikosti energetických usměrňovačů

Porovnání svařovací rychlosti není možné pomocí nastavených hodnot rychlostí, neboť se liší svařovací vzdálenost obou usměrňovačů. Neobjektivnější porovnávací parametr je v tomto případě svařovací čas, který je měřítkem jak svařovací rychlosti, tak i vzdálenosti. V tab. 22 jsou uvedeny svařovací časy, při kterých byly svařeny oba typy usměrňovačů, a dále ostatní měřitelné hodnoty pevnosti spoje, svařovací energie, výkonu a koeficientu svařitelnosti. Spolu se svařovacím časem je pro každý usměrňovač uvedena i příslušná svařovací rychlost.

Tab. 22 Data získaná monitorizací svařovací rychlosti

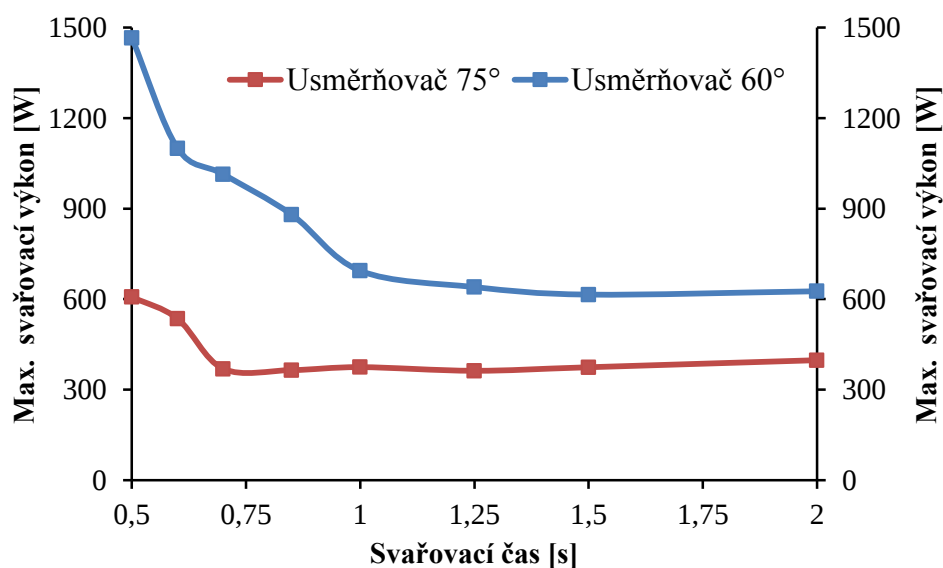
Svařovací čas [s]		2	1,5	1,25	1	0,85	0,7	0,6	0,5
Usměrňovač 60°	Rychlost [mm/s]	0,5	0,7	0,8	1	1,2	1,4	1,6	2
	Max. tahová síla [N]	1243	1150	1118	938,2	776,4	758	620,3	632
	Výb. směr. odchylka [-]	84,3	68,4	88,2	94,9	55,3	55,3	57,5	39
	Svařovací energie [J]	472	366,8	330	251,4	208,9	177,3	161,1	136,3
	Koef.svařitelnosti [-]	2,6	3,1	3,4	3,7	3,7	4,3	3,9	4,6
Usměrňovač 75°	Rychlost [mm/s]	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1	1,2
	Max. tahová síla [N]	803,8	696,2	655,6	639,8	611,2	603,2	556,5	542
	Výb. směr. odchylka [-]	113,4	79,8	80	88,9	88,7	23,6	22,1	27,1
	Svařovací energie [J]	449,1	312,7	264,2	250	215,4	192,3	168,8	157,2
	Koef.svařitelnosti [-]	1,8	2,2	2,5	2,6	2,8	3,1	3,3	3,4

Vzájemným porovnáním spotřebované svařovací energie na základě svařovacího času byl zjištěn jen nepatrný rozdíl mezi vzorky obsahující 60° nebo 75° energetický usměrňovač. Pouze při vyšších svařovacích rychlostech znamenajících svaření do 0,8 s vykazovaly nepatrně nižší spotřebu energie vzorky s 60° usměrňovačem. V ostatních případech, tzn. při svařování rychlostmi nižšími než 1,2 mm/s pro 60° usměrňovač a 0,7 mm/s pro 75° usměrňovač, vykazovaly svary se 60° usměrňovačem větší spotřebu energie. Příčinou je větší objem doporučeného 60° usměrňovače, který je za potřebí během svařovacího procesu roztavit a rozprostřít po svarové ploše. Největšího rozdílu, téměř 25 %, bylo dosaženo svařováním po dobu 1,25 s znamenající rychlost 0,8 mm/s pro 60° usměrňovač a 0,5 mm/s pro 75° usměrňovač (viz obr. 80).



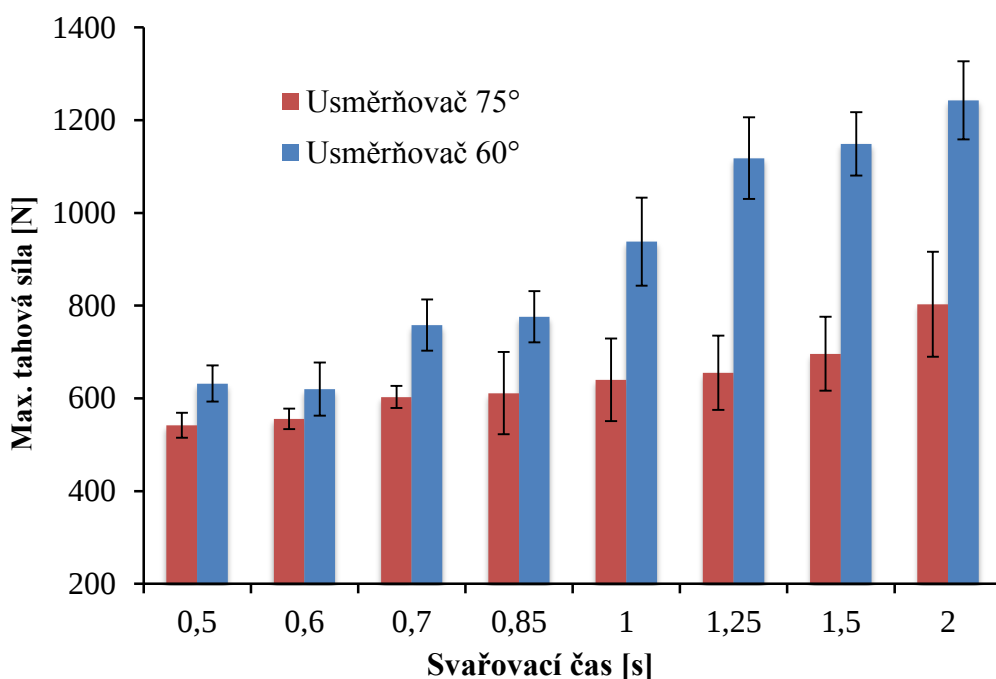
Obr. 80 Vliv svařovacího času/rychlosti na energii pro oba typy energetických usměřňovačů

Oproti spotřebované energii jsou hodnoty maximálního svařovacího výkonu značně odlišné pro obě velikosti usměřňovačů. V celém rozsahu monitorizované svařovací rychlosti bylo dosaženo nižšího svařovacího výkonu u svařenců vybavených 75° usměřňovačem (viz graf na obr. 81). Při rychlostech znamenajících svaření během 1 s a déle stačil ke svaření vzorků s 75° usměřňovačem o polovinu nižší svařovací výkon než u vzorků s 60° usměřňovačem. Se zvyšující se svařovací rychlostí se poté rozdíl ve svařovacím výkonu neustále zvětšoval, maxima dosáhl na hranici svařovacího času 0,5 s.



Obr. 81 Vliv svařovacího času/rychlosti na špičkový svařovací výkon pro oba typy energetických usměřňovačů

Rozdíl v pevnosti spojů s oběma rozměry usměrňovačů je patrný z grafu na obr. 82. Postupným snižováním svařovací rychlosti (a tím prodlužování svařovacího času) roste pevnost přelátovaného spoje, avšak strmost růstu pevnosti je u obou monitorizovaných usměrňovačů odlišná. Zatímco pevnost spoje vybaveného usměrňovačem energie o vrcholovém úhlu 75° stoupá pozvolna (červené sloupce v grafu na obr. 82), pevnost svařenců vybavených 60° usměrňovačem roste strměji (modré sloupce). Použitím velmi vysokých rychlostí znamenajících svaření za 0,5 a 0,6 s ještě lze dosáhnout podobné pevnosti spojů oběma usměrňovači (rozdíl v pevnosti 16 a 11 %). Po snížení svařovacích rychlostí znamenajících prodloužení svařovací doby (svařování okolo 1 s. a déle), výrazně vyšších pevností dosahoval svar zhotovený z těles vybavených 60° usměrňovačem. Již při svařovacím čase 1 s vykazoval svar s 60° usměrňovačem téměř o polovinu vyšší pevnost než spoj s 75° usměrňovačem, dalším snížením rychlosti a prodloužením svařovacího času o 0,25 s se rozdíl v pevnosti obou svarů lišil dokonce o 70 %. Větší rozdíl v pevnosti nebyl naměřen, nejnižší svařovací rychlosti vykazovali nepatrně nižší hodnoty pevnostního rozdílu ve prospěch 60° usměrňovače, konkrétně 65 % při době svařování 1,5 s a 54 % při svařovacím čase 2 s.



Obr. 82 Vzájemné porovnání pevnosti spojů zkušebních těles na základě geometrie energetických usměrňovačů v závislosti na svařovacím čase

12.4 Svařovací rychlost – proměnná během cyklu

Jednou z hlavních předností ultrazvukového svařovacího zařízení Dukane 43S220 iQ series je technologie Melt-Match®, pomocí které lze svařovat jak konstantní, tak i proměnnou rychlostí během svařování (viz kap. 8.4). Elektrické servořízení svařovacího nástroje umožňuje naprogramovat rychlostní profil v 10 krocích během jednoho svařovacího cyklu. Výsledkem je produkce pevnějších svarů ve spojení s nižší spotřebou energie ve srovnání s pneumatickými systémy, které umožňují pouze svařování konstantní rychlostí.

Jelikož je tato technologie naprostou novinkou v reálném provozu, neexistuje prozatím žádný návod jakým způsobem naprogramovat rychlostní profil. Hledání optimálního rychlostního profilu je avšak velmi obsáhlé téma zasluhující vlastní samostatný experiment. Poněvadž je předkládaná disertační práce zaměřena především na monitorizaci všech dostupných svařovacích parametrů, je cílem výzkumu pouze vyzkoušení této metody včetně potvrzení předkládaných teoretických předpokladů o vyšší pevnosti spoje spojené se spolehlivostí a opakovatelností procesu oproti pneumatickému svařovacímu systému.

Aby bylo možné metodu programování rychlostního profilu objektivně porovnat jednak s konstantní rychlostí svařování na totožném svařovacím zařízení a jednak s pneumatickým svařovacím lisem, bylo nutné stanovit parametry na všech zařízeních pokud možno shodné. Kromě základních svařovacích parametrů jako je frekvence 20 kHz a amplituda 100 μm byl zvolen jako určující parametr hodnotící vliv rychlosti na pevnost svaru svařovací čas, neboť právě tento parametr má největší vliv na pevnost spoje. Z monitorizace svařovací rychlosti bylo zjištěno, při jakých svařovacích rychlostech a časech je dosaženo optimálního poměru mezi pevností spoje, spotřeby energie a vynaloženého špičkového výkonu. Z těchto hledisek a také pro snazší porovnání byla jako optimální svařovací čas nastavena hodnota 1 s. Pro jednodušší nastavení svařovacích parametrů a vhodnější rozpoznání vlivu svařovací rychlosti je měření monitorizováno pouze pro vzorky vybavené standardním (doporučeným) energetickým usměrňovačem o výšce 1 mm a úhlu 60°. Z ostatních již analyzovaných svařovacích parametrů byly ponechány hodnoty totožné jako při všech měření, tzn. spouštěcí svařovací síla o velikosti 50 N, svařovací vzdálenost nastavena na 1 mm a doba držení (neboli dotlaku) sonotrodou po ukončení vibračních kmitů byla 1 s. Nastavení rychlostního svařovacího profilu bylo tedy podmíněno maximálním dosaženým časem svařování 1 s.

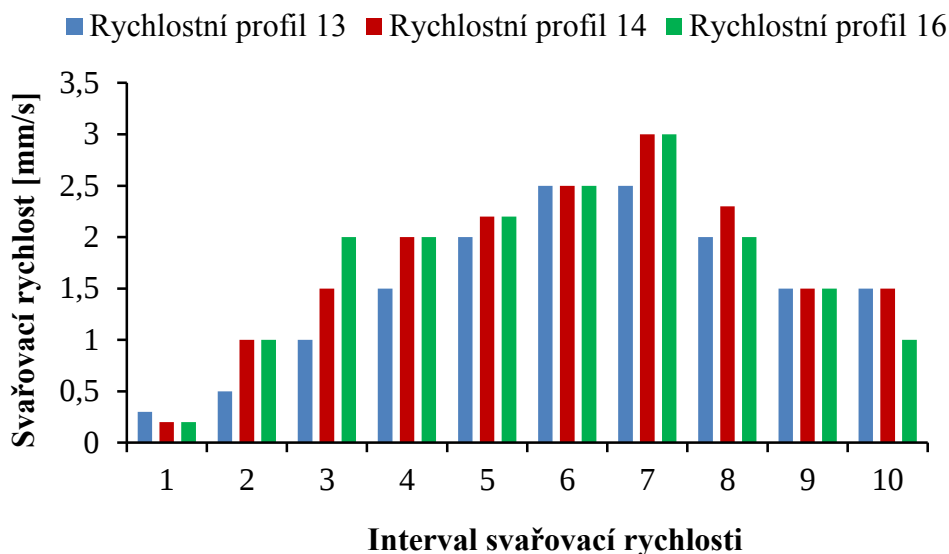
Tab. 23 Nastavení parametrů během monitorizace rychlostního svařovacího profilu

Parametry svařování		
Parametr	hodnota	jednotka
Frekvence	20	kHz
Amplituda	100	%
Spouštěcí síla	50	N
Svařovací rychlost	profil	mm/s
Doba držení	1	s
Svařovací vzdálenost	1	mm
Svařovací čas	1	s

12.4.1 Nastavení rychlostního profilu

Svařovací rychlost lze na aplikovaném zařízení naprogramovat v 10 intervalech, přičemž pro každý interval lze nastavit různou hodnotu svařovací rychlosti. Při prvních pokusech o nastavení libovolného rychlostního profilu bylo nejdůležitější sledovat svařovací čas, aby bylo možné porovnání s konstantní rychlostí 1 mm/s. Vzhledem ke tvaru křivek svařovací síly u konstantních rychlostí (viz příloha 10) a následném vyhodnocení pevnosti svaru (viz kap. 12.3.3) bylo účelem programování rychlosti také zrovnoměnit průběh svařovací síly, jelikož tyto svary vykazovaly největší dosaženou pevnost. Celkem bylo naprogramováno 18 rychlostních profilů splňujících základní podmínku, kterou je dosažený čas svařování 1 s. Snahou při tvorbě rychlostního profilu bylo pokrýt u všech 10 intervalů rychlost od 0,5 do 2 mm/s, tedy rychlosti dříve monitorované během měření konstantních rychlostí. Graficky i tabulkově znázorněné intervaly jednotlivých rychlostních profilů jsou k nalezení v příloze 12 a 13.

U všech 18 rychlostních profilů byly zaznamenány hodnoty svařovací síly, energie i výkonu během svařování. Pevnost svařených těles byla zaznamenána ze zkoušky tahem. Avšak vzhledem k množství příslušných dat a zaměření disertační práce nejsou všechny hodnoty zde uvedeny. Z analyzovaných rychlostních profilů byly vybrány pouze tři, které vykazovali maximální pevnost spoje s minimální výběrovou směrodatnou odchylkou. Označení vybraných profilů je ponecháno původní, jak je k nalezení v příloze 12 a 13. Maximální pevnosti spoje bylo dosaženo při svařování rychlostními profily 13, 14 a 16, jejichž nastavení jednotlivých intervalů rychlosti je graficky znázorněno na obr. 83.



Obr. 83 Nastavení tří nejlepších rychlostních profilů vykazujících nejvyšší pevnost svaru

Průběh všech tří nejlepších rychlostních profilů je velice podobný. Na počátku svařovacího cyklu byla naprogramována velmi nízká svařovací rychlost, konkrétně 0,2 a 0,3 mm/s. Postupně byla rychlost zvyšována, až dosáhla maximálních hodnot 2,5 a 3 mm/s v šestém a sedmém intervalu. Razantní zvýšení rychlosti je zde za potřeby kvůli zkrácení svařovacího cyklu a tím k dosažení předem určeného svařovacího času 1 s. Ke konci cyklu, kde je již usměřovač plně roztaven a jednotlivé vrstvy tečou po svarové ploše, je rychlost opět snížena až na hranici 1, popř. 1,5 mm/s v devátém a desátém intervalu. Snížení rychlosti ke konci cyklu napomáhá jednak tekoucímu svaru k celistvějšímu pokrytí svarové plochy a jednak snižuje potřebný svařovací výkon, který dosahuje maximálních hodnot právě na konci cyklu.

12.4.2 Naměřená data vybraných rychlostních profilů

Rychlostní profily 13, 14 a 16 vykazovaly nejvyšší dosaženou pevnost ze všech 18 naprogramovaných rychlostních profilů. Hodnoty pevnosti svaru včetně příslušné výběrové směrodatné odchylky, svařovací energie a maximálního výkonu jsou uvedeny v tab. 24. Vzhledem k velice podobnému nastavení jednotlivých rychlostí v příslušných deseti intervalech (viz obr. 83) vykazují všechny tři rychlostní profily srovnatelných výsledků ve všech měřených parametrech. Pevnost je téměř totožná, stejně tak spotřebovaná svařovací energie. Rozdíl v hodnotě maximálního svařovacího výkonu mezi

profily 13 a 16 je 10 %. Výsledný poměr mezi pevností a energií dosahuje ve všech případech velmi vysokých hodnot, koeficient svařitelnosti se pohybuje okolo hodnoty 6,5.

Tab. 24 Naměřené hodnoty pevnosti, výkonu a energie u vybraných rychlostních profilů

Označení rychlostního svařovacího profilu	13	14	16
Max. tahová síla [N]	1639,7	1652,3	1662,1
Výběrová směrodatná odchylka [-]	251,9	349,9	242,2
Svařovací energie [J]	251,6	249	258,6
Svařovací výkon [W]	1064,2	989	962,6
Koeficient svařitelnosti [-]	6,5	6,6	6,4

12.5 Porovnání konstantní rychlosti s rychlostním profilem

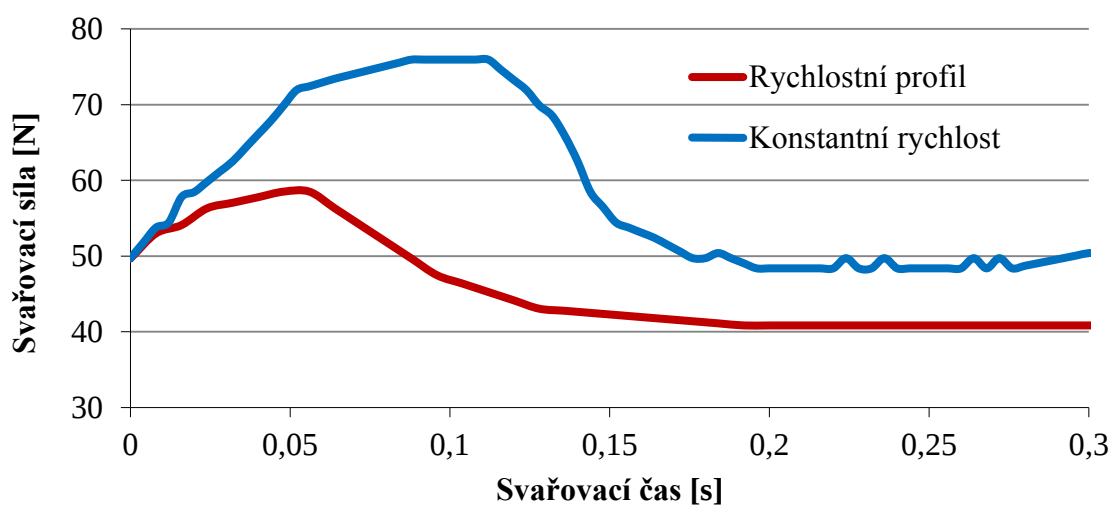
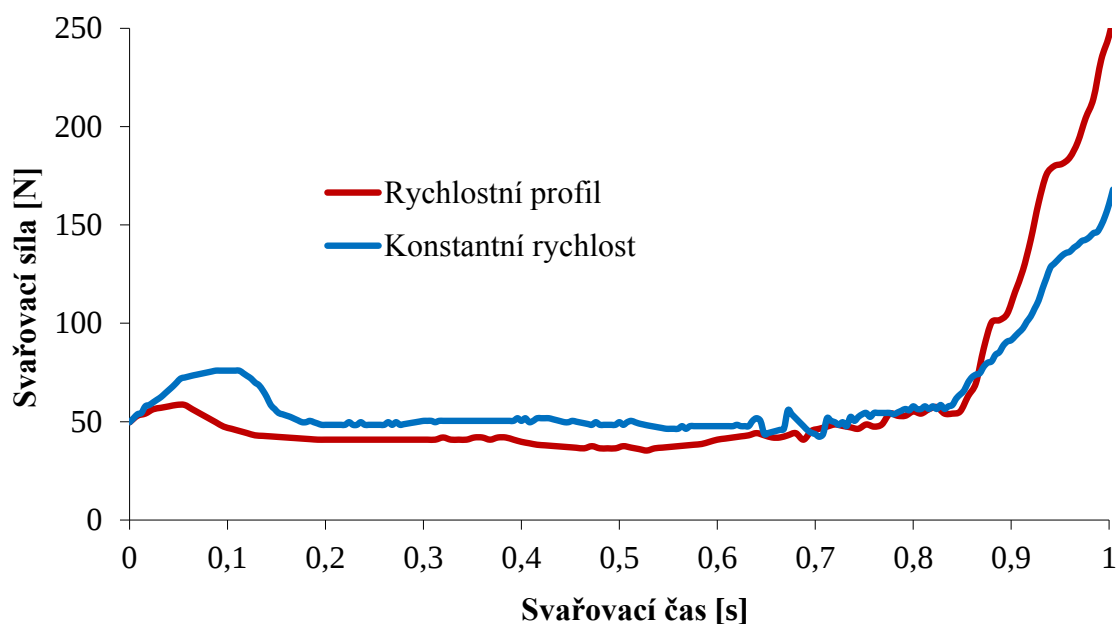
Dle teoretických předpokladů má vhodné naprogramování rychlostního svařovacího profilu vést ke zvýšení pevnosti svaru v porovnání s konstantní svařovací rychlostí. Jedním z dílčích cílů předkládané disertační práce je potvrzení či vyvrácení tohoto tvrzení, které je jedním z hlavních benefitů použitého svařovacího zařízení.

Porovnání svařovací rychlosti je vztaženo k naměřené pevnosti spoje. Svařovací proces probíhal při zachování naprosto shodných parametrů (frekvence, amplituda, spouštěcí síla, svařovací vzdálenost, doba a velikost dotlaku). Jelikož svařovací rychlost ovlivňuje čas cyklu, bylo nutné také dodržet stejný svařovací čas pro obě měření (tj. 1s).

12.5.1 Svařovací síla

Průběhy svařovací síly získané ze svařování konstantní rychlostí a rychlostního profilu 16 jsou k nalezení na obr. 84. Modrá křivka představuje konstantní rychlost svařování 1 mm/s, červená křivka zastupuje rychlostní profil. Z průběhu síly je patrný rozdíl především v počátku svařovacího cyklu (viz spodní graf na obr. 84). Při svařování rychlostním profilem byla na počátku cyklu nastavena velmi nízká svařovací rychlost, která byla postupně zvyšována. Nízká svařovací rychlost na počátku svařovacího cyklu umožnila pozvolné tavení usměrňovače bez nutnosti vynaložit výrazně větší sílu než je hodnota spouštěcí síly. Celkově je poté průběh svařovací síly rovnoměrnější a plynulejší při svařování rychlostním profilem než konstantní rychlostí. Počáteční nárůst síly způsobený tavením usměrňovače je téměř o 20 N menší u rychlostního profilu, po zhruba

0,15 s dochází k ustálení (usměrňovač rovnoměrně „teče“) na hodnotách nižších než je spouštěcí síla. Po nejdelší část cyklu (tečení usměrňovače do svarové plochy v časech od 0,2 do 0,6 s od počátku svařování) vykazuje rychlostní profil o téměř 10 N nižší potřebnou sílu. K závěrečnému navýšení svařovací síly v důsledku dosažení konečné svařovací vzdálenosti dochází u obou svařovacích rychlostí v naprosto shodnou dobu, po 0,85 s od spuštění vibračních kmitů sonotrody.



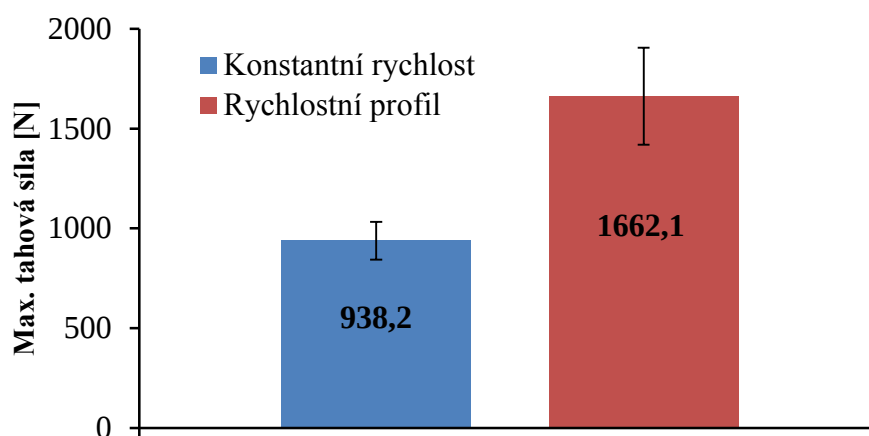
Obr. 84 Průběh svařovací síly při konstantní a proměnné svařovací rychlosti po celý čas cyklu (horní graf) a v počátku svařování (dolní graf)

12.5.2 Porovnání pevnosti

Data vhodná k porovnání získaná monitorizací konstantní (viz kap. 12.4) a proměnné (viz kap. 12.5) svařovací rychlosti jsou uvedena v tab. 25. Pevnost spojů svařených rozdílnými rychlostními profily se pohybovala v rozmezí velikosti max. tahové síly od 800 N až po více než 1600 N, přičemž vždy bylo dosaženo shodného svařovacího času 1 s a proces probíhal při stejných svařovacích parametrech. V závěrečném porovnání pevnosti svaru (viz obr. 85) větší pevnost vykazuje spoj svařený rychlostním profilem 16, který dosáhl navýšení průměrné pevnosti oproti konstantní rychlosti 1 mm/s o 77 %! Nevýhodou je vyšší výběrová směrodatná odchylka, která způsobuje značný rozptyl hodnot pevnosti svaru od průměrné hodnoty maximální tahové síly 1662,1 N. Z teoretických předpokladů lze potvrdit znatelný nárůst pevnosti spoje vhodně naprogramovaným rychlostním profilem oproti konstantní rychlosti svařování. Předpoklad o nižší spotřebě energie dané rovnoměrnějším profilem svařovací síly během cyklu nebyl potvrzen, neboť celkovou spotřebovanou energii dorovnal vyšší potřebný svařovací výkon.

Tab. 25 Porovnání konstantní a proměnné svařovací rychlosti

Svařovací rychlost [mm/s]	1	Profil 16
Svařovací čas [s]	1	1
Max. tahová síla [N]	938,2	1662,1
Výběrová směrodatná odchylka [-]	94,9	242,2
Svařovací energie [J]	251,4	258,6
Svařovací výkon [W]	694	962,6
Koeficient svařitelnosti [-]	3,7	6,4



Obr. 85 Dosažená pevnost svaru při svařování konstantní rychlosti a rychlostním profilem

13. Porovnání odlišných způsobů řízení svařovacího nástroje

Jedním z dílčích cílů je porovnání v disertaci aplikovaného inovačního svařovacího systému řízení servopohonem s konvenčním pneumatickým systémem. Výhody a nevýhody obou systémů jsou popsány v kap. 4.8, resp. v kap. 8.2.

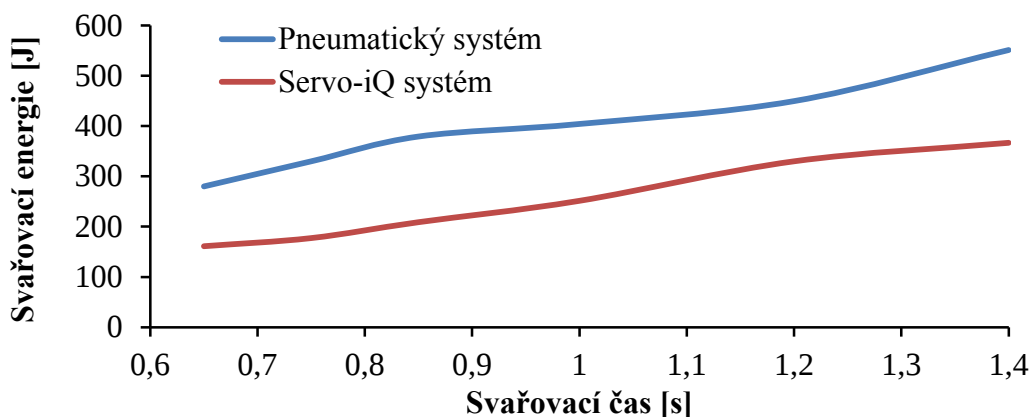
Z důvodu odlišných systémů řízení pohybu svařovacího nástroje (viz kap. 4.8) nebyla pro porovnání použita absolutní velikost svařovací rychlosti, ale hodnota svařovacího času. Řídící svařovací parametry byly v rámci možností ponechány u obou zařízení na stejných hodnotách, tzn. ultrazvuková frekvence $f=20$ kHz, amplituda $A=100$ μm (sonotroda byla použita stejná pro svařování na obou zařízeních), předzatížení $F_p=50$ N, dotlak $t_d=1$ s a svařovací vzdálenost $L_s=1$ mm. Ke svařování byla použita vždy pouze tělesa s 60° usměrňovačem o výšce 1 mm. U pneumatického zařízení byly odečteny hodnoty svařovacího času na základě velikosti tlaku sonotrody (závislost je uvedena v příloze 14), u elektrického zařízení rychlost odpovídá svařovacímu času (viz kap. 12.3). Výsledná data získaná ze svařovacího procesu včetně pevností svarů s výběrovou směrodatnou odchylkou jsou uvedeny v tab. 26.

Tab. 26 Naměřená data při porovnání servo-iQ a pneumatického systému řízení

Svařovací systém	Svařovací čas [s]	Pevnost svaru [N]	Výb. směr. odchylka [-]	Svařovací energie [J]	Svařovací výkon [W]	Koef. svařitelnosti [-]
pneumatický servo-iQ	0,65	678	168,4	280,1	672	2,4
		620,3	57,5	161,1	1100	3,9
pneumatický servo-iQ	0,75	719,6	162,9	330	675,4	2,2
		758	55,3	177,3	1014	4,3
pneumatický servo-iQ	0,85	801,5	180,7	379,3	630,5	2,1
		776,4	55,3	208,9	880	3,7
pneumatický servo-iQ	1	800,4	274,2	404,3	573,8	2,0
		938,2	94,9	251,4	694	3,7
pneumatický servo-iQ	1,2	808	159,4	449,8	513	1,8
		1118	88,2	330	640	3,4
pneumatický servo-iQ	1,4	892	175,2	551,4	533,5	1,6
		1149,6	68,4	366,8	615	3,1

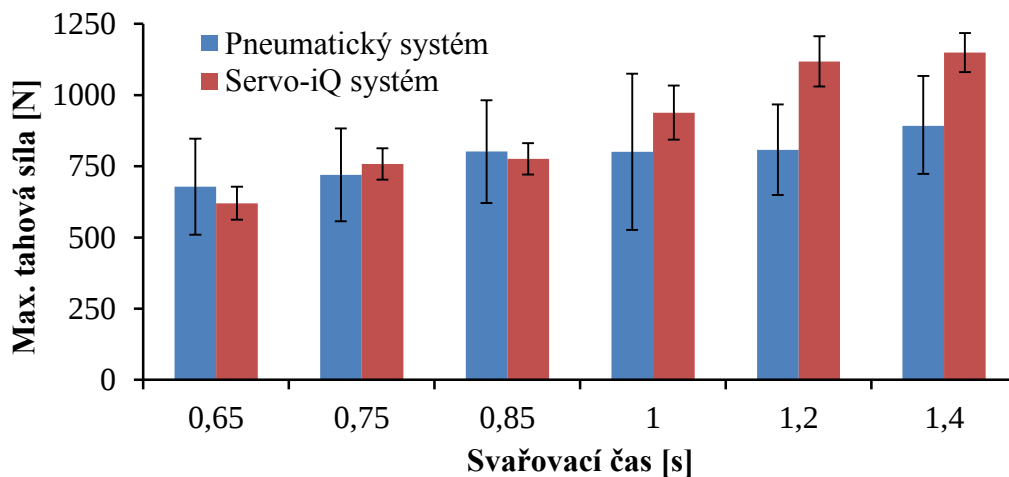
Jednou z předkládaných výhod svařovacího systému s technologií Melt-Match® je úspora energie při dosažení srovnatelné pevnosti spoje. Tento předpoklad byl ověřen měřením, jehož grafická podoba vyhodnocení výsledků je k nalezení na obr. 86. U obou technologií řízení svařovací rychlosti je patrný shodný vliv svařovacího času na energii. S prodlužující se dobou svařování roste i spotřeba svařovací energie. Ve všech

zkoumaných svařovacích rychlostech vykazuje výrazně nižší spotřebu energie inovační systém iQ svařovacího zařízení. Úspora energie se v pásmu svařovacího času od 0,7 s do 1,4 s pohybuje nad hranicí 30 %. Také poměr mezi spotřebovanou energií a pevností spoje vyjádřený koeficientem svařitelnosti vychází ve všech analyzovaných svařovacích časech lépe pro moderní servo-iQ svařovací systém.



Obr. 86 Porovnání svařovacích systémů na základě vynaložené energie

Výsledky pevnosti spojů jsou graficky znázorněny na obr. 87. Při nejvyšších svařovacích rychlostech znamenajících svaření do 0,85 s vykazují obě technologie řízení pohybu nástroje podobné výsledky pevnosti spoje. Snížení svařovací rychlosti a tím prodloužení doby na více než 1 s znamená výraznější nárůst pevnosti spoje u servo-iQ systému než u pneumatického řízení. Maximální rozdíl v pevnosti byl naměřen při svařovacím čase 1,2 s. Spoj svařený servo-iQ zařízením zde produkoval svary až o 38 % pevnější než pneumatické svařovací zařízení.



Obr. 87 Pevnost spoje při svařování různými systémy pohonu sonotrody

14. Dílčí vyhodnocení výsledků monitorizace svařovacích parametrů

14.1 Spouštěcí síla

Monitorizací spouštěcí síly svařování bylo zjištěno, jakým způsobem je možné ovlivňovat počátek svařovacího procesu a následný průběh svařovací síly během cyklu. Křivky svařovacích sil (viz příloha 6 a 7) naznačují, jak se mění průběh vynakládané síly nutné ke spojení dvou dílů definovanou rychlostí svařování. Nejnižší monitorizované spouštěcí síly vykazují téměř rovnoměrný průběh svařovací síly během procesu s jen nepatrným navýšením na konci cyklu. Naopak vyšší hodnoty spouštěcí síly způsobují počáteční skokový nárůst svařovací síly s vrcholem přibližně v čase do 10 % z celkové doby svařování. Tento nárůst je způsoben počátečním tavením usměřovače. Následuje pokles síly na hodnotu rovnající se přibližně velikosti spouštěcí síly (usměřovač je již nataven), přičemž ustálení na této hodnotě trvá až do uplynutí přibližně 80 % z celkového svařovacího času. V této nejdelší části svařovacího cyklu se natavený objem usměřovače působením síly pomalu rozprostírá po styčné ploše obou svařovaných těles. Poté následuje prudký nárůst síly způsobený dotvářením svarové plochy při dosažení předem nastavené svařovací vzdálenosti. Vyšší hodnoty spouštěcích sil vykazují celkově nutnost vynaložit více síly během cyklu a tím negativně ovlivňují množství spotřebované svařovací energie. Taktéž maximální okamžitý svařovací výkon vynakládaný vždy na konci svařovacího cyklu při dosažení absolutní vzdálenosti svařování nabývá největších hodnot při vyšších spouštěcích silách. Tvar křivek svařovacích sil je velmi obdobný pro oba monitorizované typy energetických usměřovačů.

Po svaření a následném vyhodnocení pevnosti spoje zkouškou tahem byl zjištěn značný vliv velikosti spouštěcí síly na pevnost svaru. Po analýze výsledků lze říci, že čím vyšší je hodnota spouštěcí síly, tím vyšší je i dosažená pevnost spoje. Závislost však není lineární, ale logaritmická. Při nižších hodnotách spouštěcích sil roste pevnost svaru výrazněji, s vyššími spouštěcími silami se pevnost svaru již příliš nemění. Jako limitní se pro obě velikosti usměřovačů ukázala být hodnota spouštěcí síly 20 N, neboť nižší síla nezajistila dostatečné předzatížení a tím i nutný kontakt obou svařovaných dílů. Výsledkem byl vznik příliš velkých ztrát při přenosu vibrační energie ze sonotrody k místu svaru, energetický usměřovač dokonale neplnil svou funkci a tělesa nebyla svařena. Postupné zvyšování spouštěcí síly od 20 N až k 50 N znamenal značný nárůst pevnosti spoje, přičemž rozdíl v pevnosti mezi spouštěcí silou 30 N a 50 N činil téměř 40 % u 60° usměřovače. Při

použití vyšších spouštěcích sil než 50 N se pevnost spoje příliš neměnila, navíc vlivem zvyšující se výběrové směrodatné odchylky byla většina dat na shodné úrovni pevnosti. Střední hodnota pevnosti svaru daná destrukční tahovou silou při velikosti spouštěcích sil 50 N a 70 N se zvýšila pouze o 6 %.

Ve všech případech nastavení spouštěcí síly vykazuje vyšší pevnost spoj vzorků vybavených energetickým usměrňovačem o vrcholovém úhlu 60° . Rozdíly jsou malé zejména u nižších hodnot spouštěcí síly, např. spouštěcí síla 30 N vykazuje odlišnost v pevnosti spoje obou usměrňovačů 8 %. Nastavením spouštěcí síly 40 N a vyšší však znamená výraznější nárůst pevnosti u 60° usměrňovače. Spouštěcí síla 50 N znamená rozdíl v pevnosti 32 % mezi oběma usměrňovači (viz obr. 68). Pro další měření byla zvolena hodnota spouštěcí síly 50 N pro oba energetické usměrňovače, neboť při této hodnotě dosahuje spoj vysoké pevnosti a zároveň přijatelné směrodatné odchylky. Rovněž poměr mezi pevností svaru a spotřebou energie vychází nejlépe při použití spouštěcí síly na hodnotě 50 N pro obě geometrie energetických usměrňovačů.

14.2 Amplituda

Jediným parametrem, pro který existují doporučené hodnoty týkající se konkrétních druhů plastů, je svařovací amplituda. Hodnota svařovací amplitudy záleží na konkrétní aplikaci (svařování v blízkém nebo ve vzdáleném poli), velikosti ultrazvukové frekvence a samozřejmě na svařovaném materiálu. Při ultrazvukovém svařování polyamidu s frekvencí kmitů o velikosti 20 kHz je doporučeno volit amplitudu v rozsahu od 70 do 120 μm . Při experimentu byl používán ultrazvukový rezonátor o jmenovité amplitudě 100 μm , tudíž vyšší hodnoty nebylo možné nastavit a analyzovat. Během výzkumu byla postupně snižována svařovací amplituda až k dosažení kritické hodnoty, při které nebyla zkušební tělesa svařena. Monitorizováním svařovací amplitudy byl potvrzen doporučený rozsah, neboť minimální hodnota amplitudy, při které byla tělesa ještě dokonale svařena, se ukázala být hodnota 70 μm pro obě geometrie energetických usměrňovačů. Při svařování s amplitudou o velikosti 60 μm již nevykazoval svar hermetické utěsnění, již pouhým okem byly viditelné nedokonalosti svarové vrstvy u obou typů usměrňovačů (pórovitá struktura svaru). Co se týče tvorby svaru, nevykazuje změna amplitudy výraznější vliv na průběh vynakládané síly během svařovacího cyklu. Všechny monitorizované hodnoty amplitudy vykazují prakticky shodný průběh svařovací síly charakteristický počátečním nárůstem hodnot, dosažením vrcholu po uplynutí přibližně 10 % svařovacího času,

následným poklesem na hodnotu rovnající se velikosti spouštěcí síly a ustálením na této hodnotě. Konečný nárůst síly pro dosažení svařovací vzdálenosti rovnající se výšce energetických usměřňovačů taktéž není jasně ovlivněn změnou svařovací amplitudy (viz příloha 8 a 9).

Dle naměřených výsledků ze zkoušky tahem (viz tab. 13) byla zjištěna závislost mezi hodnotou svařovací amplitudy a pevností spoje. Se snižující se hodnotou amplitudy téměř lineárně klesá i pevnost svarového spoje. Strmost poklesu pevnosti je však velmi rozdílná při svařování s 60° usměřňovačem anebo se 75° usměřňovačem. Snížení amplitudy ze $100\text{ }\mu\text{m}$ na $70\text{ }\mu\text{m}$ vyvolalo pouze minimální pokles pevnosti spoje u těles vybavených 75° usměřňovačem, zatímco u těles s 60° usměřňovačem byl naměřen znatelnější rozdíl. Pokles pevnosti při tomto maximálním snížení amplitudy činil 64 % u 60° usměřňovače, zatímco u 75° usměřňovače „pouze“ 29 %. Tzn. tupější vrcholový úhel 75° usměřňovače lépe odolává změně svařovací amplitudy než ostřejší 60° úhel usměřňovače. Při porovnání pevnosti spojů s 60° nebo 75° usměřňovačem bylo zjištěno, že ve všech případech nastavení amplitudy vykazuje větší pevnost svar se energetickým usměřňovačem o velikosti vrcholového úhlu 60° . Při nízkých hodnotách amplitudy ($70\text{ }\mu\text{m}$) dosahovala pevnost spojů podobných hodnot (rozdíl ve velikosti destrukční tahové síly do 13 %), avšak postupným zvyšováním amplitudy vykazovaly vzorky s 60° usměřňovačem znatelněji pevnější svar. Při maximální hodnotě amplitudy $100\text{ }\mu\text{m}$ byl naměřen svar pevnější o 32 % u těles obsahující 60° usměřňovač. Výhodou vzorků s 75° usměřňovači byla nižší spotřebovaná energie při svařování s amplitudou $70 - 90\text{ }\mu\text{m}$, avšak při maximální amplitudě $100\text{ }\mu\text{m}$ se již spotřebované energie rovnaly. Při všech monitorizovaných hodnotách amplitudy postačoval ke svaření těles s 75° usměřňovači pouze poloviční svařovací výkon oproti vzorkům s 60° usměřňovači.

Z výsledků měření svařovací amplitudy vyplývá vhodnost použití 60° usměřňovačů s nastavením co nejvyšší hodnoty amplitudy, v daném případě $100\text{ }\mu\text{m}$. Výhoda energetických usměřňovačů s vrcholovým úhlem 75° spočívá pouze v nižší spotřebované energii a výkonu, avšak ani tato úspora nedokáže ovlivnit vyšší hodnotu koeficientu svařitelnosti u 60° usměřňovačů.

14.3 Konstantní svařovací rychlost

Svařovací rychlost by měla dle teoretických předpokladů nejvýrazněji ovlivňovat tvorbu svaru a tím i pevnost spoje. Hodnota rychlosti je nastavována experimentálně, liší

se pro konkrétní aplikaci a materiál. Monitorizace konstantní svařovací rychlosti tento fakt potvrdila, přičemž vysvětlení spočívá především ve svařovacím čase. Nižší svařovací rychlosti znamenají delší dobu svařování, tudíž objem usměrňovače taje pomaleji a vytváří se tak více vazeb mezi molekulami produkující pevnější a hermetičtější spojení dvou těles. Naopak při velmi vysokých rychlostech je sice ušetřen svařovací čas, ale usměrňovač taje velmi rychle s následné tečení natavené vrstvy je nedokonale rozprostřeno po svarové ploše (viz obr. 60a). Nerovnoměrné pokrytí svarové plochy vrstvou svaru má za následek menší styčnou plochu a tím i méně pevný spoj. Při svařování vzorků s 60° usměrňovači byla zjištěna minimální použitelná rychlost 0,5 mm/s. Ještě nižší rychlosti znamenající příliš dlouhý svařovací čas způsobovaly nepříjemný vzhled svaru, neboť horní plocha svařovaného dílu přicházející do kontaktu s funkční plochou sonotrody začínala být mírně rozvařená a docházelo tak i k nadbytečnému opotřebovávání sonotrody. Naopak při velmi vysokých rychlostech docházelo k neustálému zvyšování svařovacího výkonu, při překročení původní hodnoty výkonu (tj. při rychlosti znamenající dobu svařování 1 s) o více než 100 % byl proces zastaven. Z těchto určujících hledisek byla monitorizace svařovací rychlosti provedena v rozsahu 0,5 – 2 mm/s u těles obsahujících 60° usměrňovač a 0,3 – 1,2 mm/s u vzorků s 75° usměrňovači. Obojí monitorizovaný rozsah znamená svařování v intervalu od 0,5 do 2 s. Při svařování se vzorky obsahující 75° usměrňovač bylo možné použít i nižší svařovací rychlosti znamenající prodloužení svařovacího času až k 3 s aniž by došlo k výraznějšímu provaření, avšak takto dlouhý čas je již zbytečný, neboť nedocházelo k potřebnému navýšení pevnosti spoje, pouze výrazně rostla spotřeba energie.

Naměřené výsledky pevnosti potvrdily teoretický předpoklad související s dobou svařování. Postupným snižováním svařovací rychlosti (a tím prodlužováním svařovacího času) roste pevnost přeplátovaného spoje, avšak strmost růstu pevnosti je u obou monitorizovaných usměrňovačů značně odlišná. Křivku pevnosti svarového spoje obsahujícího 60° usměrňovač nejlépe vystihuje polynom 3. stupně s inflexním bodem na hranici svařovací rychlosti okolo 1 mm/s (viz obr. 77). V této oblasti svařovacích rychlostí se nejvíce projevovala jakákoliv změna, již nepatrné navýšení nebo snížení svařovací rychlosti znamenalo skokovou změnu v pevnosti spoje. Změna svařovací rychlosti $\pm 0,2$ mm/s v této oblasti vyvolala zvýšení nebo pokles pevnosti spoje o přibližně 20 %. Naopak při velmi nízkých (0,5 – 0,8 mm/s) nebo velmi vysokých rychlostech (1,6 – 2 mm/s) nebyla již zaznamenána výraznější změna v pevnosti spoje. Při svařovacích rychlostech vyšších než 1,6 mm/s již nenastala prakticky žádná změna v pevnosti spoje, rozdíl v

pevnosti mezi rychlostmi 1,6 a 2 mm/s činil pouhé 2 %. Taktéž při velmi nízkých svařovacích rychlostech (0,5 – 0,7 mm/s) znamenajících dobu svařování až 2 s nevykazovaly svary velké odlišnosti v pevnosti, prodloužení svařovacího času o půl sekundy zapříčinilo navýšení pevnosti spoje o 8 %.

Spoje vybavené 75° usměrňovači vykazovaly nepatrně odlišný charakter nárůstu či poklesu pevnosti. Samozřejmě byl zachován efekt nižší svařovací rychlosti znamenající prodloužení svařovacího času a tím narůstající pevnost spoje, avšak největší změny v pevnosti byly zaznamenány v naprosto opačných mezích oproti tělesům s 60° usměrňovači. Ve středních rychlostech znamenajících svaření okolo $1 \pm 0,25$ s byly naměřeny téměř konstantní pevnosti spojů s přihlédnutím ke směrodatným odchylkám (pravý opak proti 60° usměrňovačům), např. rozdíl v pevnosti spoje mezi rychlostí 0,5 a 0,8 mm/s činí 8 %. Razantnějšího nárůstu pevnosti svaru bylo dosaženo až při velmi nízkých rychlostech 0,2 – 0,3 mm/s, nevýhoda však spočívala ve zvýšené spotřebě energie, vynaložení vyššího svařovacího výkonu a také ve větší hodnotě výběrové směrodatné odchylky. Také velmi vysoké rychlosti zapříčinily větší odchylky v pevnosti, avšak při dodržení velmi přesné opakovatelnosti, neboť byla naměřena velmi nízká výběrová směrodatná odchylka (nejnižší ze všech měření).

Porovnání obou monitorizovaných usměrňovačů ukázalo opět menší náchylnost na změnu parametru u vzorků s 75° usměrňovačem. Zatímco pevnost spoje vybaveného usměrňovačem energie o vrcholovém úhlu 75° stoupá pozvolna se snižující se svařovací rychlostí, pevnost svařenců vybavených 60° usměrňovačem roste výrazně strměji. Použitím velmi vysokých rychlostí znamenajících svaření okolo půl sekundy ještě lze dosáhnout velmi podobné pevnosti spojů oběma usměrňovači (rozdíl v pevnosti okolo 15 %). Jakmile byly ale nastaveny rychlosti atakující ukončení svařování okolo 1 s a déle, výrazně vyšších pevností dosahoval svar zhotovený z těles obsahující standardní 60° usměrňovač. Již při svařovacím čase 1 s vykazoval svar s 60° usměrňovačem téměř o polovinu vyšší pevnost než spoj s 75° usměrňovačem, dalším snížením rychlosti a prodloužením svařovacího času o 0,25 s se rozdíl v pevnosti obou svarů lišil dokonce o 70 %.

Monitorizace svařovací rychlosti ukázala, jakým způsobem lze měnit pevnost spoje. Při zachování nejlepšího poměru pevnost/čas se jeví jako optimální hodnota svařovací rychlosti znamenající svaření okolo 1 s, tzn. 0,8 – 1,2 mm/s pro 60° usměrňovač o výšce 1 mm a 0,5 – 0,7 mm/s pro 75° usměrňovač o výšce 0,6 mm.

14.4 Rychlostní profil svařování

Výsledky měření naprosto potvrdily teoretické předpoklady, které naznačovaly výrazný nárůst pevnosti spoje vhodně naprogramovaným rychlostním profilem svařování. Při experimentu bylo naprogramováno celkem 18 různých rychlostních profilů pokrývajících v každém intervalu svařovacího času rychlosti od 0,5 mm/s do 2,5 mm/s, tedy maximální rychlostní rozptyl zjištěný během monitorizace konstantní svařovací rychlosti. Největší pevnosti spoje bylo dosaženo při naprogramování rychlostního profilu využívajícího na počátku svařování velmi nízké rychlosti (0,2 – 0,3 mm/s v prvním intervalu). Postupně byla rychlost zvyšována až na maximální hodnoty 2,5 – 3 mm/s v šestém a sedmém intervalu, přičemž pro dosažení konečné svařovací vzdálenosti a času byla rychlost opět snížena na hodnotu mezi 1 – 1,5 mm/s v devátém a desátém intervalu. Tento průběh svařovací rychlosti napomáhá počátečnímu pomalejšímu tavení energetického usměrňovače a napomáhá ke snížení spotřeby energie, neboť není zapotřebí vyvinout vyšší svařovací sílu potřebnou k rychlému natavení materiálu. Nižší počáteční rychlost svařování spojená se spouštěcí silou na hranici 50 N také šetří opotřebování sonotrody. Negativní důsledek pomalého tavení spočívající v delším svařovacím čase je eliminován prostřední částí svařovacího procesu, kdy je rychlost značně zvýšena. Zkrátí se tím svařovací čas, a jelikož je již usměrňovač dokonale roztaven, svařovací síla zůstává na nízké úrovni a nezvyšuje se tím spotřeba energie. Pro finální fázi tvorby svaru je svařovací rychlost snížena na střední hodnoty, které zabezpečí dosažení svařovací vzdálenosti a zaručí dokonalé rozprostření taveniny po svarové ploše.

Výsledná pevnost svaru dosahuje hodnot o 77 % vyšších než u časově srovnatelného svařování konstantní rychlostí 1 mm/s. Nevýhodou je vyšší výběrová směrodatná odchylka, která způsobuje rozptyl hodnot pevnosti svaru od průměrné hodnoty max. tahové síly 1662,1 N. Předpoklad o nižší spotřebě energie dané rovnoměrnějším profilem svařovací síly během cyklu nebyl potvrzen, neboť celkovou spotřebovanou energii dorovnal vyšší potřebný svařovací výkon dosažený ke konci svařovacího cyklu. Koeficient svařitelnosti určující poměr mezi pevností spoje a spotřebovanou energií při svařovacím procesu vychází výrazně lépe pro rychlostní profil svařování než pro konstantní rychlost. Zatímco konstantní rychlost produkuje svary o koeficientu svařitelnosti 3,7, vhodný rychlostní profil zvýší poměr mezi pevností a energií až na 6,6.

15. Diskuze výsledků disertační práce

Výzkumná část předkládané disertační práce je složena z několika kapitol, přičemž hlavní téma disertační práce – monitorizace svařovacích parametrů – je již podrobněji vyhodnoceno v kap. 14. Diskuze výsledků disertační práce je souhrnem vyhodnocení parametrizace svařovacích veličin a ostatních částí měření, která jsou schematicky znázorněna v kap. 10, tab. 5.

Prvními zaznamenanými výsledky jsou hodnoty doby sušení, která je za potřeby k odstranění vody u již navlhklých těles určených ke svařování. Doba sušení byla stanovena na základě výsledků pevnosti svařených těles. Pevnost svaru byla určena s ohledem k velikosti destrukční síly zaznamenané během zkoušky tahem. Nevysušené svařené vzorky byly během zkoušky tahem porušeny při dosažení maximální síly těsně nad hranicí 400 N. Po třech hodinách sušení v horkovzdušném sušícím zařízení při teplotě 80 °C již byla za potřeby max. tahová síla o velikosti 535 N. Další prodloužení doby sušení stabilizovalo pevnost svarového spoje na hranici velikosti tahové síly 550 N a tento výsledek značí nárůst pevnosti svaru o 38 % oproti navlhklým polyamidovým tělesům. Další prodloužení doby sušení již nepřineslo tížený efekt v podobě nárůstu pevnosti a z tohoto důvodu byl stanoven čas sušení v horkovzdušném sušícím zařízení na 5 h při teplotě 80 °C pro všechna výzkumná měření (viz kap. 11).

Největší podíl výzkumné části je věnován monitorizaci svařovacích parametrů. Výsledky naznačily, jakým způsobem a do jaké míry lze ovlivnit především pevnost svaru vhodným nastavením procesních parametrů svařování. Postupně byly analyzovány všechny tři nastavitelné svařovací veličiny – spouštěcí síla svařování, svařovací amplituda a svařovací rychlost. Vzhledem k možnostem iQ systému svařovacího zařízení byl zjišťován vliv nejen konstantní svařovací rychlosti, ale dokonce i proměnné (profilované) svařovací rychlosti. Kromě absolutních hodnot pevnosti svarového spoje (podrobněji viz kap. 14) zjištěných z velikosti max. tahové síly je z výsledků také zajímavý poměr mezi pevností a vynaloženou svařovací energií. Tento poměr je v předkládané disertační práci vyjádřen pomocí tzv. koeficientu svařitelnosti. Maximální zjištěné hodnoty tohoto koeficientu jsou uvedeny v tab. 27. Z výsledků je patrné, do jaké míry ovlivňuje odlišná geometrie energetického usměrňovače koeficient svařitelnosti a také kterým parametrem lze nejlépe hospodařit s energií při dosažení dostatečné pevnosti svarového spoje. U všech analyzovaných svařovacích parametrů bylo dosaženo vyšších hodnot poměru pevnost/energie svařováním těles vybavených 60° energetickým usměrňovačem než 75°

Tab. 27 Maximální hodnoty koeficientů svařitelnosti svařovacích parametrů

KOEFIČIENT SVAŘITELNOSTI (poměr pevnost/energie)		
Svařovací parametr	Energetický usměrňovač	
	60°	75°
Spouštěcí síla	3,7	2,9
Amplituda	3,7	2,7
Konstantní svařovací rychlost	4,6	3,4
Rychlostní svařovací profil	6,5	neprovedeno

usměrňovačem. Rozdíl v koeficientu se pohybuje vždy okolo 1, což v daném poměru znamená přibližně 30 %. Z výsledků koeficientu svařitelnosti bylo zjištěno, že pro daný materiál (PA6), typ spoje (tupý přeplátovaný) a aplikaci (svařování v blízkém poli) je mnohem výhodnější použití energetického usměrňovače disponujícího hrotem o vrcholovém úhlu 60°.

Porovnání maximálních koeficientů svařitelnosti všech monitorizovaných parametrů naznačuje, kterým parametrem a při jakých hodnotách lze docílit nejlepšího poměru mezi pevností spoje a vynaloženou svařovací energií. Spouštěcí síla svařování a amplituda vykazují obdobné hodnoty koeficientů svařitelnosti pro obě geometrie energetických usměrňovačů. Řízením svařovací rychlosti jak proměnné, tak profilované, lze ale výrazně zvýšit tento poměr, jak ukazují výsledky v kap. 14. Konstantní rychlostí je možné poměr zvýšit až o čtvrtinu, rychlostním profilem dokonce téměř o $\frac{3}{4}$ při svařování těles vybavených 60° usměrňovačem. Tento výsledek potvrdil předpoklad o vlivu svařovacího času na tvorbu svaru, neboť amplituda i spouštěcí síla neovlivňují dobu svařovacího procesu, kdežto rychlost je přímo funkcí času.

Především výsledky koeficientů svařitelnosti u analýzy svařovací rychlosti příliš nekorespondují s maximální dosažitelnou pevností svarového spoje. Zatímco největší pevnosti svaru bylo dosaženo při nastavení nejnižších rychlostí znamenajících nejdelší čas cyklu, koeficient svařitelnosti je při těchto rychlostech nejmenší. Záleží tedy na prioritách při výrobě, zda chce technolog upřednostnit kvalitu svaru s maximální pevností nebo upřednostní náklady na výrobu a tím je prospěšnější se řídit dle koeficientu svařitelnosti. Pokud je cílem dosažení maximální pevnosti spoje, je nutné svařovat s nejnižšími rychlostmi. Tím pádem ale vzroste spotřebovaná energie a výrazně se prodlouží doba cyklu. Nejvhodnější poměr mezi pevností a energií zaručuje naopak nejvyšší svařovací rychlost. Nastavení ostatních parametrů je jednoznačnější, neboť pevnost i koeficient

svařitelnosti se ve většině případů shodují pro obě geometrie usměrňovačů (viz kap. 14). Tyto závěry tak jednoznačně specifikují možnosti řízení pevnosti svaru ve spojení s vynaloženou energií a jsou tak vodítkem pro technology nastavující svařovací proces na servo-svařovacím zařízení.

Během výzkumu byly dále ověřeny předpoklady o výhodách aplikovaného svařovacího zařízení oproti stávajícímu, v praxi používanějšímu pneumatickému systému ultrazvukového svařování. Podrobné porovnání výsledků (viz kap. 13) zcela potvrzuje výhodu inovačního zařízení znamenající vyšší pevnost spojů při dosažení výrazně nižší spotřeby energie. Výhoda elektricky řízeného svařovacího zařízení spočívající ve vyšším koeficientu svařitelnosti byla verifikována při všech zkoušených svařovacích rychlostech, úspora energie byla zaznamenána v rozmezí od 30 % až do téměř 90 %. Další potvrzenou výhodou elektrického řízení je přesnost a opakovatelnost procesu, neboť při všech měření byla zjištěna výrazně nižší výběrová směrodatná odchylka (viz kap. 13).

16. Přínosy disertační práce

Disertační práce přináší významné poznatky v oblasti ultrazvukového svařování plastů a především uceluje a konkretizuje možnosti zvyšování pevnosti svarového spoje vhodným nastavením svařovacích parametrů. Spolu s již dvěma vypracovanými disertacemi na téma ultrazvukové svařování plastů komplexně shrnuje svařitelnost zcela odlišných typů polymerních materiálů (plasty s dlouhými a krátkými skelnými vlákny, plasty s nanočásticemi a silně polární plast) a uzavírá tím rozsáhlý výzkum provedený ve spolupráci s firmou Dukane, pro kterou jsou naměřená data a zjištěné poznatky primárně určeny.

Přínosy pro vědu jsou stručně charakterizovány v následujících bodech:

- Ucelení poznatků o technologii ultrazvukového svařování plastů;
- Podání informací týkajících se nové inovativní technologie ultrazvukového svařování, tzv. Melt-Match® technologie;
- Rozšíření poznatků týkajících se pneumatického svařování plastů;
- Souhrnné porovnání konvenčního a inovačního systému svařování;
- Zavedení nové veličiny nazvané Koeficient svařitelnosti, pomocí které je možné dosáhnout nízké spotřeby energie při zachování vysoké pevnosti svarového spoje;

- Podání poznatků týkajících se svařitelnosti silně navlhavého polymeru;
- Konkretizování vlivu navlhavosti na svařitelnost plastů.

Přínosy pro praxi jsou vzhledem k zaměření práce na specifickou technologii svařování a konkrétní druh materiálu spjaté především s firmou Dukane, která si tento výzkum vyžádala. Konkrétní data by měla pomoci především technologům při nastavování svařovacího procesu na servo-iQ svařovacím zařízení.

Přínosy pro praxi lze charakterizovat následujícími body:

- Navržení nového typu upínacího přípravku - na rozdíl od stávajících způsobů upevnění svařovaných těles nově koncipovaný přípravek umožňuje snadné vyjmutí a vložení vzorků, dále přesně zabezpečuje polohu těles během svařování, zamezuje výtoku taveniny při svařování a minimalizuje ztráty způsobené přenosem vibrační energie od sonotrody;
- Podání kompletního přehledu ohledně nastavení svařovacích veličin (spouštěcí svařovací síla, amplituda, rychlost) – doporučení intervalu hodnot pro nastavení jednotlivých procesních veličin zabezpečující jednak dosažení maximální pevnosti spoje a jednak s přihlédnutím ke koeficientu svařitelnosti zabezpečující nejlepší poměr mezi pevností a spotřebou energie;
- Rozšíření poznatků týkajících se svařitelnosti odlišné geometrie energetických usměrňovačů o energetický usměrňovač s vrcholovým úhlem hrotu 75° - doposud se svařitelnost semikrystalických plastů hodnotila pouze s 60° usměrňovači;
- Zjištění optimální doby sušení polyamidu před svařováním zabezpečující nejlepší výsledky pevnosti spoje;
- Navržení způsobu profilování svařovací rychlosti produkující svary výrazně pevnější ve srovnání s konstantní svařovací silou;
- Potvrzení předkládaných výhod inovačního svařovacího zařízení s Melt-Match® technologií oproti konvenčnímu svařovacímu systému – nižší spotřeba energie dosažená při shodné době svařování, zpřesnění procesu a opakovatelnosti (nižší směrodatná odchylka), zvýšení pevnosti svarů vhodným naprogramováním rychlostního svařovacího profilu.

17. Doporučení pro další výzkum

Během monitorování ultrazvukového svařování byla zjištěna řada problematických jevů, které lze doporučit pro následující výzkum. V první řadě se jedná o geometrii energetických usměrňovačů. V disertační práci jsou posuzovány dvě geometrie usměrňovačů, lišící se vrcholovým úhlem hrotu (60° a 75°). Tématem pro následující výzkum je rozšíření znalostí o usměrňovače s vrcholovým úhlem 45° . Výzkum by měl naznačit, zda existuje určitá posloupnost s měnící se geometrií energetického usměrňovače. Další výzkum je důležitý provést také pro různé semikrystalické termoplasty a jejich kombinace především z důvodu různé schopnosti tlumení ultrazvukových vibrací. Vzhledem k obsáhlosti tématu monitorizace čtyř svařovacích parametrů a dvou geometrií energetických usměrňovačů není v práci zahrnuta struktura svaru. Způsob, jakým se postupně deformuje usměrňovač a jak „teče“ po svarové ploše při různých podmínkách zatížení je tudíž další možností, kudy směřovat výzkum této moderní technologie svařování.

18. Závěr

Disertační práce se zabývá moderní technologií spojování plastů pomocí ultrazvukového svařování. Výzkum byl proveden z důvodu nedostatku informací v oblasti ultrazvukového svařování plastů a především v nastavování svařovacích parametrů na servo-svařovacím zařízení využívající Melt-Match® technologii. Hlavním úkolem bylo monitorizovat a parametrizovat svařovací veličiny během ultrazvukového svařování těles z polyamidu. Výzkum byl zadán fy. Dukane, která zapůjčila univerzitě své nejnovější ultrazvukové svařovací zařízení vyznačující se inovativním řešením ovládání pohybu svařovacího nástroje servopohonem. Svařovaným materiálem byl dle zadaných požadavků určen polyamid 6. Disertační práce se ale neskládá pouze z výzkumu svařování, prvotními úkoly bylo zhotovení dostatečného množství zkušebních tělísek s různou geometrií vstřikováním do upravené formy a také navržení a zkonstruování přípravku pro upnutí tělísek během svařovacího procesu.

V době vypracovávání výzkumné práce nebyla k dispozici žádná data ohledně nastavení svařovacích parametrů a existovalo jen velmi málo podrobnějších informací týkajících se parametrizace během ultrazvukového svařování plastů. Základní informace jako princip technologie apod. je všeobecně známý (neboť vychází z principu svařování

kovů), ale způsoby jakým lze docílit vyšší pevnosti svaru nebo jakým způsobem se tvar během procesu utváří, nejsou k nalezení. Jediným parametrem, který je již částečně parametrizován z předcházejících výzkumů, je svařovací amplituda. Z těchto důvodů bylo principem práce především monitorizovat svařovací proces a na základě výsledků pevnosti svarového spoje poskytnout bližší informace k tomuto tématu. Úkolem bylo analyzovat, do jaké míry jednotlivé procesní parametry ovlivňují pevnost svarového spojení a na základě výsledků navrhnout optimální nastavení všech svařovacích veličin. Celkem byly monitorizovány čtyři parametry pro dvě různé geometrie energetických usměrňovačů. Výsledky byly navzájem porovnány jednak z hlediska pevnosti a jednak z hlediska optimálního poměru mezi pevností spoje a vynaloženou svařovací energií. Tento poměr vyjadřuje v předkládané práci tzv. koeficient svařitelnosti.

Během výzkumu bylo zjištěno, jakým parametrem a do jaké míry lze nejvíce ovlivňovat pevnost svarového spoje. Naměřené výsledky ukázaly, že nejvhodnějším parametrem pro zvyšování pevnosti svaru je svařovací rychlost. Čím nižší je použita svařovací rychlost, tím více času má tavenina na dokonalé rozprostření po svarové ploše a zvyšuje se tím pevnost spoje. Ovšem pouze do určité hranice, po jejímž překročení nastává degradace styčné plochy mezi sonotrodou a svařovaným dílem. Optimální rychlost daná poměrem mezi pevností spoje, svařovacím časem a vynaloženou energií se ukázala hodnota způsobující svaření okolo 1 s pro obě geometrie energetických usměrňovačů. Ostatní parametry, spouštěcí síla i svařovací amplituda, již nemají takový vliv na pevnost svaru, neboť nijak neovlivňují dobu svařování. Nejpevnější svary vykazovalo nastavení amplitudy na maximální hodnotu (v daném případě 100 μm) u obou geometrií usměrňovačů. Jako optimální velikost spouštěcí síly byla vyhodnocena hodnota 50 N. Tato hodnota nejlépe vystihuje dosažení kvalitního pevného spoje při současně nízké spotřebě energie. Z posouzení různé geometrie energetických usměrňovačů bylo zjištěno, že pro daný materiál (PA6), aplikaci (svařování v blízkém poli) a ultrazvukovou frekvenci 20 kHz, je výhodnější použít vždy usměrňovače vybavené hrotem o vrcholovém úhlu 60°. Svary vybavené těmito usměrňovači vykazovaly ve všech případech vyšší pevnost a zároveň i lepší hodnoty koeficientu svařitelnosti (poměr pevnost/energie) než svary s 75° usměrňovači. Výhoda 75° usměrňovačů spočívala v částečně nižší spotřebě energie během procesu, ale tato úspora nedosahovala takových hodnot, aby vyvážila pokles pevnosti svaru.

Dalším závěrem předkládané disertační práce je potvrzení předpokladu o vyšší dosažitelné pevnosti svaru použitím vhodně naprogramovaného rychlostního profilu v porovnání s konstantní svařovací rychlostí během jednoho cyklu. Během výzkumu bylo dosaženo až o 77 % pevnějšího svaru zhotoveného při vhodně naprogramovaném rychlostním profilu svařování. Zároveň ale zůstal svařovací čas na úrovni 1 s, tzn. shodný s dobou svařování konstantní rychlostí. Tento výsledek předčil samotné očekávání, neboť jakékoliv navýšení pevnosti bez nutnosti prodloužení svařovacího času je velkým benefitem aplikované technologie.

Výzkum rovněž potvrdil řadu výhod aplikovaného inovačního svařovacího zařízení v porovnání s konvenčním pneumatickým systémem řízení. Jedná především o výraznou úsporu ve spotřebované energii během svařovacího cyklu a také v zpřesnění procesu svařování. Úspory energie bylo dosaženo zpravidla okolo 30 % a vlivem elektrického řízení pohybu nástroje se snížila i výběrová směrodatná odchylka znamenající přesnější opakovatelnost procesu. Tyto výhody byly zaznamenány při dodržení naprosto shodných procesních parametrů nastavených na obou technologicky odlišných svařovacích zařízeních.

Dílčím úspěchem aplikované moderní technologie oproti konvenčnímu způsobu svařování je i částečné navýšení pevnosti svarového spoje především při nižších svařovacích rychlostech znamenajících dobu svařování okolo 1 s a více.

18. Seznam použité literatury

- [1] LENFELD, Petr. Technologie II. In: [online]. [cit. 2011-09-16]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/index.htm
- [2] BĚHÁLEK, Luboš. Teorie zpracování nekovových materiálů. Výukový materiál, 2010, Technická univerzita v Liberci.
- [3] POSPÍCHAL, Jan. Polymerní materiály. In: [online]. [cit. 2011-09-17]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt
- [4] KUČEROVÁ, Irena. Faktory způsobující korozi a degradaci polymerních materiálů. In: [online]. [cit. 2011-09-19]. Dostupné z: http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/predmety/koroze_materialu_pro_restauratory/kadm/pdf/3_2.pdf
- [5] AUTOMOBIL INDUSTRY. Rozebíratelné a nerozebíratelné plastové spoje. 2010, č. 2, s. 36-37.
- [6] KADĚRA, Jakub. *Možnosti spojování plastových dílců vyráběných vstřikováním do forem*. Brno, 2008. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=4611.
Bakalářská. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Bohumil Kandus.
- [7] *Ultrazvuk ve strojírenství*. [online]. [cit. 2012-02-15]. Dostupné z: www.ultrazvuk.cz
- [8] *Ultrazvuk a jeho využití* [online]. [cit. 2012-10-12]. Dostupné z: http://web.svf.stuba.sk/kat/FYZ/fyzika_ta_vola/skripta/other/ultrazvuk.pdf
- [9] MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. Technologie zpracování pryže/ plastů. 2002, č. 6, s. 42
- [10] KUBÍČEK, Jan. Technologie svařování. In: [online]. [cit. 2011-11-16]. Dostupné z: <http://www.svarak.cz/Technologie-svarovani-Kubicek.pdf>
- [11] Technologie spojování plastů: Ultrazvukové svařování. DUKANE. [online]. [cit. 2012-07-17]. Dostupné z: <http://www.dukcorp.eu/cz/technologie/ultrazvukove-svarovani/>
- [12] Branson informs about Plastics Joining: Ultrasonic Welding. BRANSON. [online]. [cit. 2012-02-17]. Dostupné z: <http://plasticswelding.eu/eng/>

-
- [13] HUŠEK, Daniel. *Ultrazvukové svařování polypropylenu plněného nanojilem*. Liberec, 2011. Disertační, Technická Univerzita v Liberci. Vedoucí práce Prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
- [14] Ultrasonic Welding. BRANSON. [online]. [cit. 2012-02-17]. Dostupné z: <http://www.bransoneurope.eu/products/ultrasonic-welding/>
- [15] Polymers: Characteristics and Compatibility for Ultrasonic Assembly. BRANSON. [online]. [cit. 2011-10-17]. Dostupné z: <http://www.bransoneurope.eu>
- [16] *Handbook of Plastics Joining: A Practical Guide*. New York: Plastics Design Library, 1997. ISBN 1-884207-17-0.
- [17] SEDLOŇOVÁ, Barbora. BRANSON. *Ultrazvuk pro spojování plastů*. 2003.
- [18] Technologie spojování plastů: Automobilový průmysl. DUKANE. [online]. [cit. 2012-03-10]. Dostupné z: <http://www.dukcorp.eu/cz/technologie/automobilovy-prumysl/>
- [19] Market Segments: Automotive. BRANSON. [online]. [cit. 2012-03-11]. Dostupné z: <http://www.bransoneurope.eu/markt-segmente/automobil>
- [20] Technologie spojování plastů: Lékařství. DUKANE. [online]. [cit. 2012-03-11]. Dostupné z: <http://www.dukcorp.eu/cz/technologie/lekarstvi/>
- [21] Technologie spojování plastů: Balící a obalová technika. DUKANE. [online]. [cit. 2012-03-15]. Dostupné z: <http://www.dukcorp.eu/cz/technologie/balici-a-obalova-technika/>
- [22] Technologie spojování plastů: Zpracování technických textilií. DUKANE. [online]. [cit. 2012-04-12]. Dostupné z: <http://www.dukcorp.eu/cz/technologie/zpracovani-technickych-textilii/>
- [23] Technologie spojování plastů: Výroba spotřebního zboží a elektronika. DUKANE. [online]. [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: <http://www.dukcorp.eu/cz/technologie/vyroba-spotrebniho-zbozi-a-elektronika/>
- [24] Ultrazvukové stroje: Ruční ultrazvukový systém. DUKANE. [online]. [cit. 2011-11-25]. Dostupné z: <http://www.dukcorp.eu/cz/produkty/iq-rucni-ultrazvukovy-system/>
- [25] Ultrazvukové stroje: IQ Ultrazvuková svářečka ovládaná servo systémem. DUKANE. [online]. [cit. 2012-04-19]. Dostupné z: <http://www.dukcorp.eu/cz/produkty/iq-ultrazvukova-svarecka-ovladana-servo-systemem/>
-

- [26] Ultrasonic Welding: Technology. BRANSON. [online]. [cit. 2012-04-20]. Dostupné z: <http://www.bransoneurope.eu/products/ultrasonic-welding/technology>
- [27] Ultrazvukové stroje: IQ Generátor ultrazvuku/napájecí zdroj. DUKANE. [online]. [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: <http://www.dukcorp.eu/cz/produkty/iq-generator-ultrazvuku-napajeci-zdroj/>
- [28] Ultrazvukové stroje: Hermeticky uzavřený měnič 20 kHz. DUKANE. [online]. [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: <http://www.dukcorp.eu/cz/produkty/hermeticky-uzavreny-menic-20-khz/>
- [29] Sonitek Ultrasonic Welding: Converters & Boosters. In: [online]. [cit. 2012-04-25]. Dostupné z: <http://www.sonitek.com/ultrasonics/converters-boosters.html>
- [30] Ultrasonic Welding: Tooling. BRANSON. [online]. [cit. 2012-04-25]. Dostupné z: <http://www.bransoneurope.eu/products/ultrasonic-welding/tooling/>
- [31] DUKANE. *Guide to Ultrasonic Plastics Assembly* [online]. St. Charles, 2011. [cit. 2012-04-28]. Dostupné z: <http://www.dukane.com/us/Downloads.asp>
- [32] BRANSON. *Amplitude ProfilingTM and Weld Strength* [online]. Danbury, 2011 [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: www.Branson-PlasticsJoin.com
- [33] *Ultrasonic welding of plastics*. [online]. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.emersonindustrial.com/documentcenter/BransonUltrasonics>
- [34] TICONA GMBH. *Ultrasonic welding and assembly of engineering plastics* [online]. 7th edition. Kelsterbach: © 2004 Ticona GmbH, 1996 [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: www.ticona.com/downloads/
- [35] Ultrasonic Welding Design Guidelines: Sonic Joint Design. [online]. [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: <http://www.heatstaking.com/technical-ultrasonic-welding.htm>
- [36] KHMELEV, Vladimir a Alexey ABRAMOV. *Research of Parameter Influence of Ultrasonic Welding Process on Conjunction of Polymeric Thermoplastic Materials* [online]. 9th INTERNATIONAL WORKSHOP AND TUTORIALS EDM'2008. ERLAGOL, 2008 [cit. 2012-06-11]. ISBN 978-5-7782-0893-3. Dostupné z: www.ieeexplore.ieee.org/xpl

19. Publikační činnost spojená s tématem disertační práce

1. KOPÁČ, D. KOTERA, O.: Influence of injection moulding parameter on the weld strength of part from polypropylene. In: Mezinárodní Baťova konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky 2010, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta managementu a ekonomiky, Zlín, ČR, ISBN 978-80-7318-922-8 (CD).
2. KOPÁČ, D. KOTERA, O.: Influence of drying time on weld strength of polyamide with use of ultrasonic welding. In: ERIN 2010, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, Plzeň, ČR, ISBN 978-80-7043-866-4 (CD).
3. KOTERA, O., KOPÁČ, D.: FEM analysis of test specimens used for ultrasonic welding. In: Mezinárodní Baťova konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky 2010, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta managementu a ekonomiky, Zlín, ČR, ISBN 978-80-7318-922-8 (CD).
4. KOTERA, O., KOPÁČ, D.: Influence of settings of ultrasonics feed on welds strength of parts from polypropylene. In: ERIN 2010, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, Plzeň, ČR, ISBN 978-80-7043-866-4 (CD).
5. KOPÁČ, D. KOTERA, O.: Influence of ultrasonic welding speed on weld strength of polyamide. In: Mechanical engineering 2010, Slovenská technická univerzita v Bratislavě, Strojnická fakulta, Bratislava, ČR, S5 - s. 53, ISBN 978-80-227-3304-5.
6. KOPÁČ, D. KOTERA, O.: Influence of welding velocity regulation on the welded joint quality at the ultrasonic welding of plastics. In: ICMEM 2010, Technická univerzita v Košicích, Fakulta výrobních technologií, Prešov, SR, ISBN 978-80-553-0572-1 (CD).
7. KOTERA, O., KOPÁČ, D.: Comparison of weld strength made by with the pneumatically ultrasonic welder and the welder with servo drive. In: Mechanical engineering 2010, Slovenská technická univerzita v Bratislavě, Strojnická fakulta, Bratislava, ČR, S5 - s. 57, ISBN 978-80-227-3304-5.

8. KOTERA, O., KOPÁČ, D.: Influence of setting of non-linear ultrasonic tool feed on weld strength of parts from polypropylene. In: ICMEM 2010, Technická univerzita v Košicích, Fakulta výrobních technologií, Prešov, SR, ISBN 978-80-553-0572-1 (CD).
9. KOPÁČ, D. KOTERA, O.: Influence of force a trigger on weld strength at ultrasonic welding of plastics. In: Mezinárodní Baťova konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky 2011, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta managementu a ekonomiky, Zlín, ČR, ISBN 978-80-7454-013-4 (CD).
10. KOPÁČ, D. KOTERA, O.: Dependence of weld amplitude on weld strength at ultrasonic welding of plastics. In: Mezinárodní Baťova konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky 2011, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta managementu a ekonomiky, Zlín, ČR, ISBN 978-80-7454-013-4 (CD).
11. KOTERA, O., KOPÁČ, D.: The weld strength in depending on setting of velocity conditions during ultrasonic welding process of plastics. In: Mezinárodní Baťova konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky 2011, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta managementu a ekonomiky, Zlín, ČR, ISBN 978-80-7454-013-4 (CD).
12. KOTERA, O., KOPÁČ, D.: The Ultrasonic welding of plastics – possibility of a welding process modification. In: Mezinárodní Baťova konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky 2011, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta managementu a ekonomiky, Zlín, ČR, ISBN 978-80-7454-013-4 (CD).
13. KOPÁČ, D. KOTERA, O.: Comparison of two different energy director joint during ultrasonic welding of plastics. In: TECHNOLOGY 2011 12th International Conference Bratislava, 13 September 2011, SR, ISBN 978-80-227-3545-2 (CD).
14. KOPÁČ, D. KOTERA, O.: Influence of welding pressure on the joint strength at ultrasonic welding of plastics. In: International Masaryk conference for Ph.D.

students and young researchers 2011, 12-16 Dezember 2011, Czech Rep., ISBN 978-80-904877-7-2.

15. KOTERA, O., KOPÁČ, D.: Influence of mould temperature on mechanical properties of compounds PP with rubber. In: TECHNOLOGY 2011 12th International Conference Bratislava, 13 September 2011, SR, ISBN 978-80-227-3545-2 (CD).
16. KOTERA, O., KOPÁČ, D.: Ultrasonic welding systems for a plastics welding – a comparison of the servo and pneumaticall drive of the ultrasonic tool. In: International Masaryk conference for Ph.D. students and young researchers 2011, 12-16 Dezember 2011, Czech Rep., ISBN 978-80-904877-7-2.
17. KOPÁČ, D., KOTERA, O.: Přípravek pro uchycení plastových těles pro podélné ultrazvukové svařování. Užiténý vzor č. 23810. Datum zápisu 17. 5. 2012. Praha.

20. Seznam příloh a přílohy

Seznam příloh:

- Příloha 1 - Tabulka svařitelnosti plastických materiálů a kompozitů
- Příloha 2 - Hodnoty amplitud [μm] používaných pro danou frekvenci
- Příloha 3 - Materiálový list PA6 od výrobce
- Příloha 4 - Geometrie upínacího přípravku
- Příloha 5 - Tahová zkouška zkušební tyčinky z materiálu PA6
- Příloha 6 - Průběh svařovací síly při odlišné spouštěcí síle pro usměrňovač energie o vrcholovém úhlu 60°
- Příloha 7 - Průběh svařovací síly při odlišné spouštěcí síle pro usměrňovač energie o vrcholovém úhlu 75°
- Příloha 8 - Průběh svařovací síly při svařování s různou amplitudou pro usměrňovač energie o vrcholovém úhlu 60°
- Příloha 9 - Průběh svařovací síly při svařování s různou amplitudou pro usměrňovač energie o vrcholovém úhlu 75°
- Příloha 10 - Průběh svařovací síly při rozdílné svařovací rychlosti pro usměrňovač energie o vrcholovém úhlu 60°
- Příloha 11 - Průběh svařovací síly při rozdílné svařovací rychlosti pro usměrňovač energie o vrcholovém úhlu 75°
- Příloha 12 - Rozpis naprogramovaných rychlostních profilů svařování
- Příloha 13 - Grafické znázornění naprogramovaných rychlostních profilů s označením rychlostního rozsahu 0,5 – 2,5 mm/s
- Příloha 14 - Závislost svařovacího tlaku na době svařování u pneumatického ultrazvukového zařízení

Příloha 1 – Tabulka svařitelnosti plastických materiálů a kompozitů [14]

Svařování plastických materiálů a kompozitu			
Materiál	Sváření v blízkém poli	Sváření ve vzdáleném poli	Doporučení
Krystalický polystyrén	Excelentní	Excelentní	Jedná se o materiál, který umožňuje nejlepší svařování. Kritická vzdálenost: 12 cm.
Standardní polystyrén	Excelentní	Excelentní	Velmi dobré akustické vlastnosti. Nadbytek energie rozbíjí kus na polovinu.
Částečně rázuvzdorný polystyrén	Excelentní	Dobré	Je vyžadováno více energie než standardní polystyrén. Kritická vzdálenost: 3 cm.
Rázuvzdorný polystyrén	Dobré	Dostatečně dobré	Nedostatečné výsledky, když je obsah butadienu příliš vysoký.
Styrén-akrylonitril (polystyrén a styrenakrylonitrilové kopolymery)	Velmi dobré	Dobré	Kritická vzdálenost: 4 cm.
Standardní ABS	Velmi dobré	Dobré	Totožné vlastnosti jako u nárazuvzdorného polystyrenu.
Rázuvzdorný ABS	Obtížné	Nemožné	Obsah butadienu způsobuje vysokou absorpci. Plocha sonotrody vymezuje opěrnou plochu.
Vstřikovaný polymethylmetakrylát (plexisklo)	Velmi dobré	Dostatečně dobré	Velký přítlak sonotrody je nezbytný pro zabránění zanoření.
Rázuvzdorný polymethyl methacrylát	Dobré	Dostatečně dobré	Obsah butadienu omezuje svařování.
Extrudovaná nebo vstřikovaná Akrylová pryskyřice (plexisklo)	Špatné	Špatné	Esteticky nevzhledné. Téměř nemožné svařování.
Polykarbonát (Makrolén)	Excelentní	Špatné	Vyžaduje hodně energie. Kritická vzdálenost: 2 cm.
Acetal (Debuin nebo Hostaform - polyformaldehyd)	Dobré	Dostatečně dobré	Porézní spojení, svařování je dosaženo se speciálně navrženým spojem.

Polyamid (silon)	Dobré (závislé na geometrii)	Špatné	Je požadován speciální svářecí spoj. Svařování je možné až po předcházejícím procesu sušení, vyžaduje velkou sílu.
Trogamid	Velmi dobré	Dobré	Kritická vzdálenost: 1 cm. Je to důležité pro polyamidy (silony). Proces sušení zlepšuje výsledky.
Polamid s obsahem skelných vláken	Velmi dobré	Dostatečně dobré	Velmi pevné spojení. Vyžaduje velmi vysoký výkon.
Polypropylén	Dobré	Dostatečně dobré	Vyžaduje dostatek energie. Různé výsledky podle tvaru spoje. Každý problém vyžaduje své vlastní řešení. Obsah skleněného vlákna zlepšuje výsledky.
Acetát	Dobré	Nemožné	Omezené možnosti pro pevný acetát.
Celulósa Acetylbutyrol	Dostatečně dobré	Nemožné	
Vysoko hustotní BP polyetylén	Dobré	Nemožné	Omezené možnosti při svařování desek a uzavírání lahví nebo tub.
Nízkohustotní AP polyetylén	Dobré	Nemožné	
Kompozitní filmy polyetylén - aluminium - polypropylén	Dobré	Nemožné	Je možné kontinuální svařování.
Polyfenyl oxid PPO	Dobré	Omezené	Kritická vzdálenost: 1 cm. Je požadován dostatečný výkon.
Polysulfon	Dobré	Omezené	Je požadován dostatek výkonu.
NORYL	Dobré	Omezené	Kritická vzdálenost: 2 cm.
NORYL s obsahem skelných vláken	Velmi dobré	Omezené	Obsah skelných vláken výrazně zlepšuje spojení.
CELANEX Polybutyl - butyl	Dobré	Omezené	Kritická vzdálenost: 2 cm.
PVC	Dobré	Dostatečně dobré	Dobré výsledky na pevném PVC

Příloha 2 – Hodnoty amplitud [μm] používaných pro danou frekvenci [14]

	Druh plastu	Svařitelnost		Frekvence			
		v blízkém poli	v dalekém poli	15 [kHz]	20 [kHz]	30 [kHz]	40 [kHz]
Amorfní plasty	ABS	1	2	36-84	30-70	24-56	18-42
	ASA	1	1	36-84	30-70	24-56	18-42
	PC	2	2	72-120	60-100	48-80	36-60
	PC/ABS	2	2	72-120	60-100	48-80	36-60
	PC/PES	2	4	60-120	50-100	40-80	30-60
	PEI	2	4	84-120	70-100	56-80	42-60
	PES	2	4	84-120	70-100	56-80	42-60
	PMMA	2	3	48-84	40-70	32-56	24-42
	PPO	2	2	60-108	50-90	40-72	30-54
	PS	1	1	36-84	30-70	24-56	18-42
	PSU	2	3	84-120	70-100	56-80	42-60
	PVC	3	4	48-96	40-80	32-64	24-48
	SAN	1	1	36-84	30-70	24-56	18-42
Semikrystalické plasty	LCP	3	4	84-144	70-120	56-96	42-72
	POM	2	4	84-144	70-120	56-96	42-72
	PA	3	4	84-144	70-120	56-96	42-72
	PBT	3	4	84-144	70-120	56-96	42-72
	PET	3	4	96-144	80-120	64-96	48-72
	PEEK	3	4	84-144	70-120	56-96	42-72
	PE	4	5	108-144	90-120	72-96	54-72
	PPS	3	4	96-144	80-120	64-96	48-72
	PP	3	4	108-144	90-120	72-96	54-72

1 – nejlepší 5 – nejhorší

Příloha 3 – Materiálový list PA6 od výrobce Altech



Technisches Merkblatt

ALTECH PA6 A 1000/209

Polymerbasis:	Polyamid 6
Füllstoffsystem:	-
Verarbeitung:	Spritzgießen (Masstemperatur: 250 - 270 °C, Werkzeugtemperatur: 40 - 80 °C)
	Trocknung: Das Granulat wird werksseitig verarbeitungsbereit abgefüllt. Je nach Lagerungsbedingungen muss auf die zulässige Granulatfeuchtigkeit geachtet werden.
	Trocknungstemperatur 80 °C, 2 - 20 Stunden im Trockenlufttrockner (abhängig von der Ausgangsfeuchtigkeit)
Besondere Merkmale:	hohe Wärmebeständigkeit, gute Fließeigenschaften, gute Entformbarkeit
Anwendungsbeispiele:	technische Teile mit Wandstärke > 2 mm, z.B. Maschinenelemente, Lüfter, Gehäuse

Eigenschaften	Prüfwert	Dimension	Prüfverfahren
Physikalische Werte			
Dichte	1,13	g/cm ³	ISO 1183
Feuchtigkeitsaufnahme	3,0	%	DIN EN ISO 62
Wasseraufnahme	9,5	%	DIN EN ISO 62
Mechanische Werte tr/f			
E-Modul (Zugversuch)	3.200 / 1.500	MPa	DIN EN ISO 527
Bruchdehnung	3,5	%	DIN EN ISO 527
Bruchspannung	85 / 45	MPa	DIN EN ISO 527
Nominelle Bruchdehnung	50 / >50	%	DIN EN ISO 527
E-Modul (Biegeversuch)	2.800	MPa	DIN EN ISO 178
Biegefestigkeit	105 / 55	MPa	DIN EN ISO 178
Charpy-Schlagzähigkeit (23°C)	o.B.	kJ/m ²	DIN EN ISO 179/1eU
Charpy-Kerbschlagzähigkeit (23°C)	4,0	kJ/m ²	DIN EN ISO 179/1eA
Thermische Werte			
Schmelztemperatur (DSC)	220	°C	DIN EN ISO 11357
Wärmeformbeständigkeit HDT A (1,8 MPa)	65	°C	DIN EN ISO 75
Wärmeformbeständigkeit HDT B (0,45 MPa)	175	°C	DIN EN ISO 75
Vicat-Erweichungstemperatur VST B/50	>200	°C	DIN EN ISO 306
Elektrische Werte tr/f			
Vergleichszahl der Kriechwegbildung (Lsg. A)	600	-	IEC 112
Oberflächenwiderstand	1E14 / 1E12	Ohm	IEC 93
Spezifischer Durchgangswiderstand	1E15 / 1E12	Ohm·cm	IEC 93
Sonstige Werte			
Brennbarkeit UL 94 (1,6; 3,2 mm)	V-2	Klasse	UL 94

Sämtliche Informationen über chemische und physikalische Eigenschaften unserer Produkte sowie die anwendungstechnische Beratung in Wort, Schrift und durch Versuche geben wir nach bestem Wissen. Sie befreien den Käufer nicht von eigenen Prüfungen und Versuchen, um die konkrete Eignung der Produkte für den beabsichtigten Einsatz festzustellen. Allein der Käufer ist für Anwendung, Verwendung und Verarbeitung der Produkte verantwortlich und hat dabei die gesetzlichen und behördlichen Vorschriften sowie etwaige Schutzrechte Dritter zu beachten. Im Übrigen gelten unsere Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen. Die angegebenen Prüfwerte sind Richtwerte, keine verbindlichen Mindest- oder Höchstwerte, die an genormten Prüfkörpern ermittelt wurden und durch Einfärbungen, Werkzeuggestaltung sowie Verarbeitungsbedingungen beeinflusst werden können.

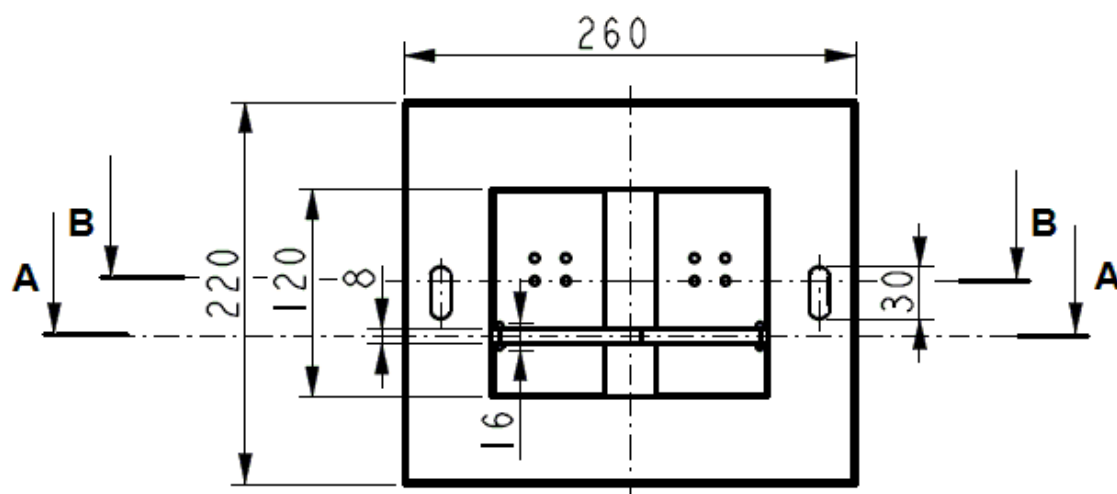

ALBIS PLASTIC GMBH · 20531 HAMBURG
Tel: (040) 7 81 05-0/Fax: 361·INFO@ALBIS.COM

Ausgabedatum: 21.06.2005

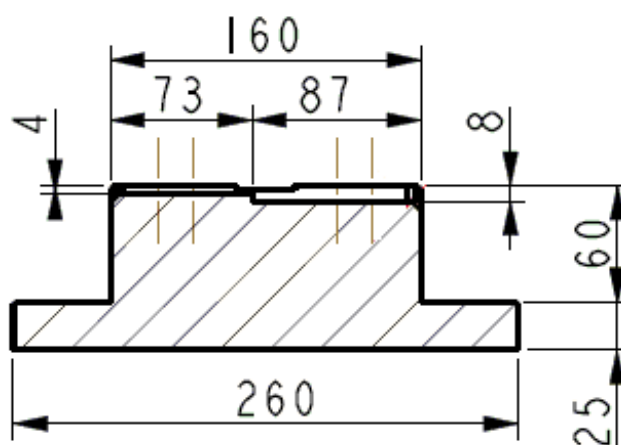
Druckdatum: 21.06.2005

Seite 1 von 1

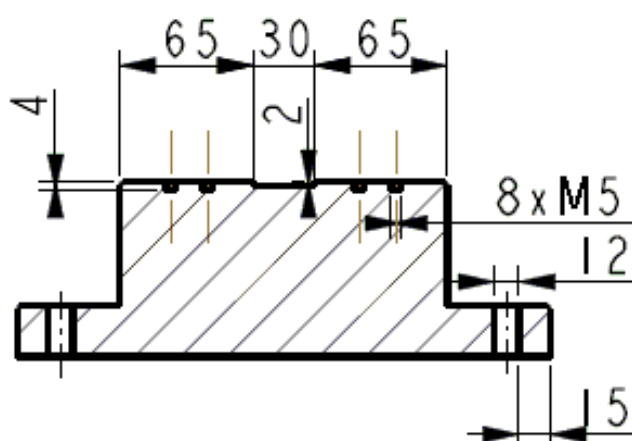
Příloha 4 – Geometrie upínacího přípravku



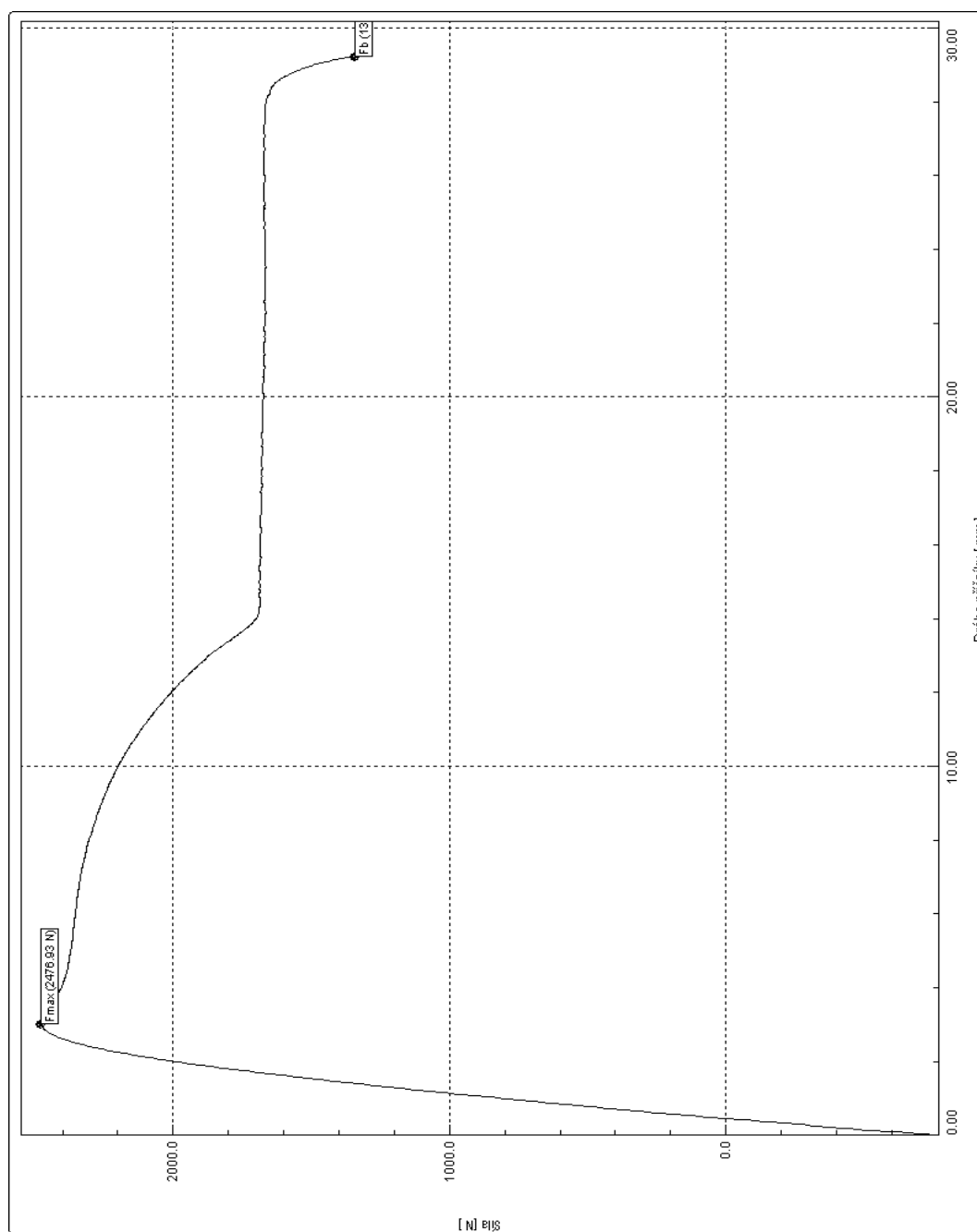
SECTION A-A

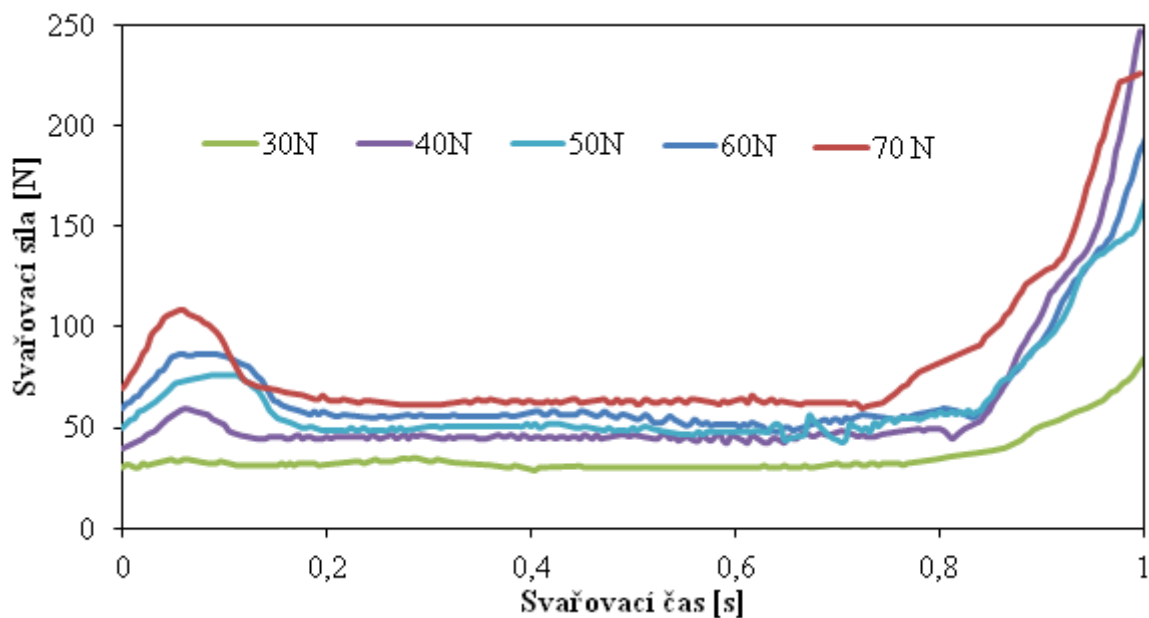
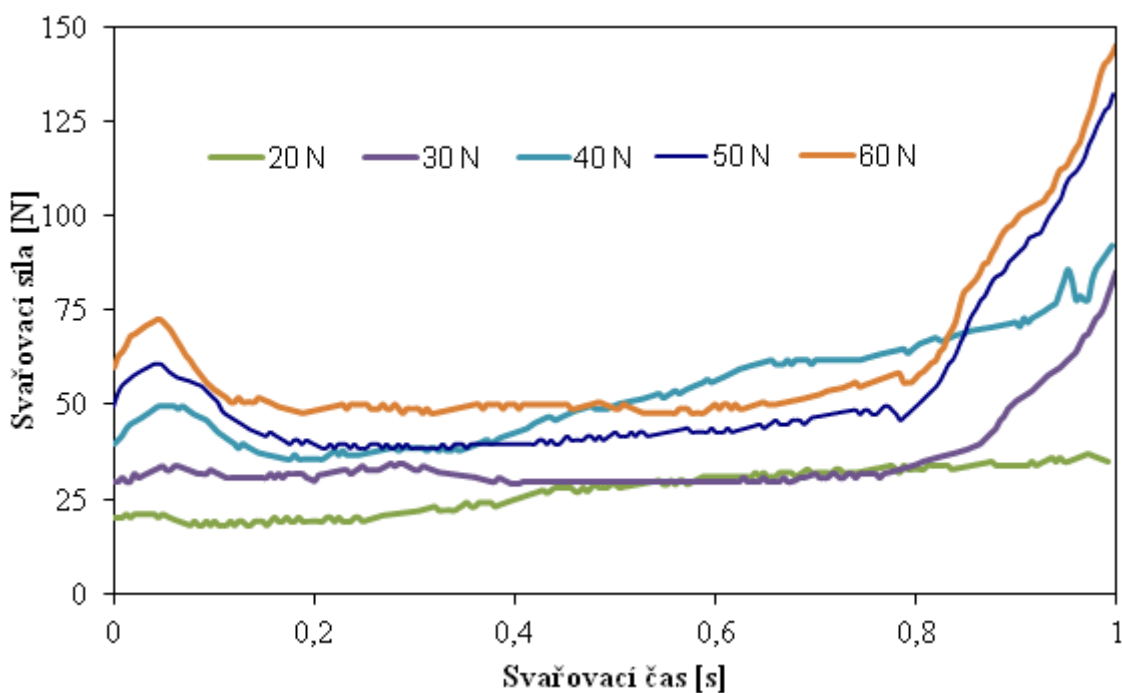


SECTION B-B

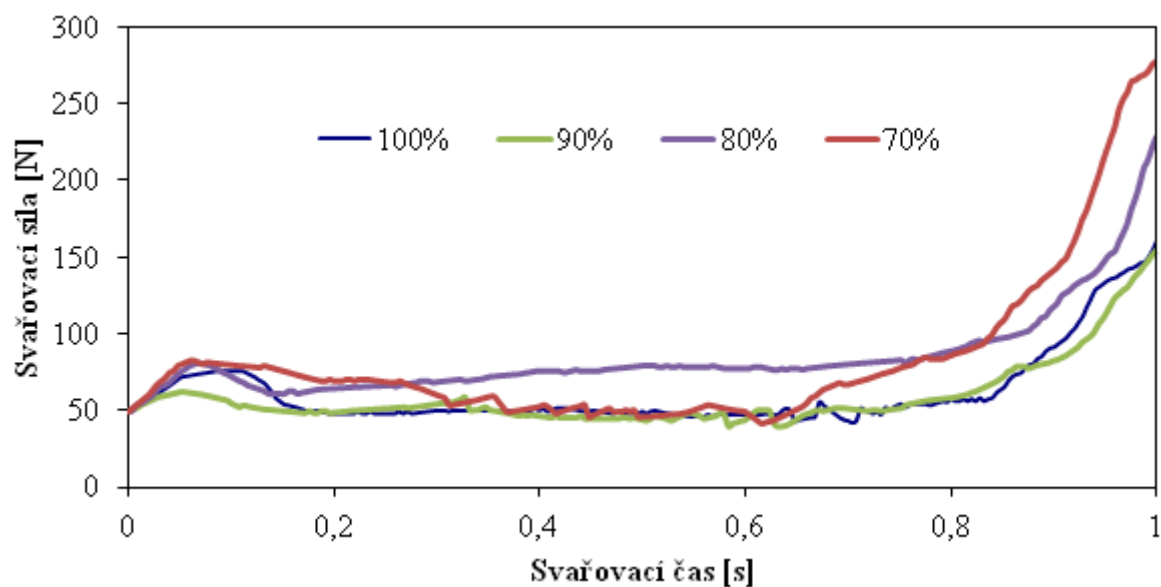


Příloha 5 – Tahová zkouška zkušební tyčinky z materiálu PA6

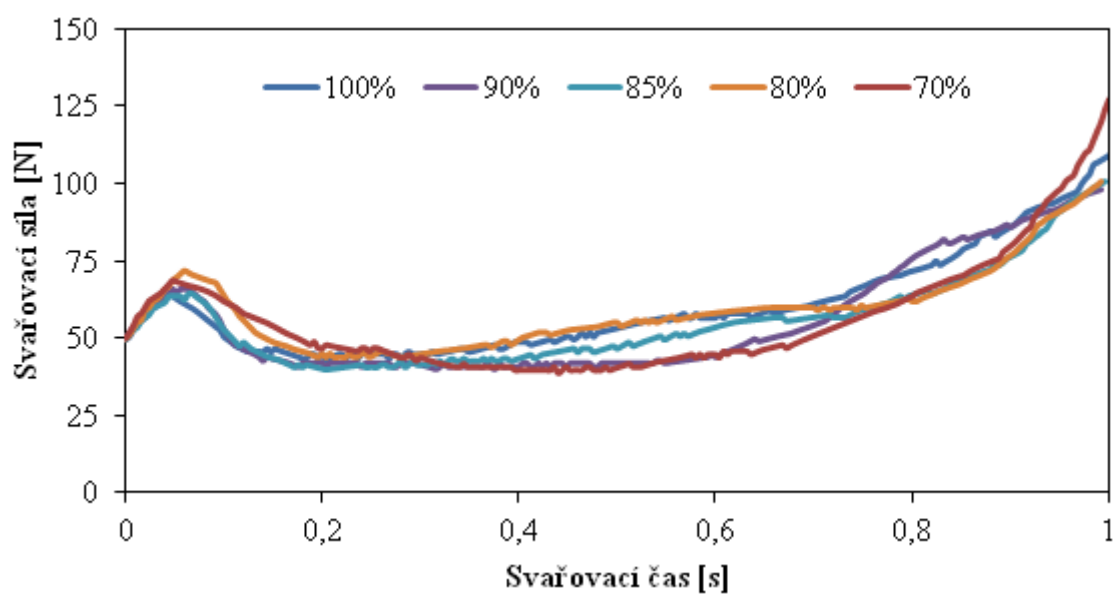


Příloha 6 – Průběh svařovací síly při odlišné spouštěcí síle pro usměrňovač energie o vrcholovém úhlu 60° **Příloha 7** – Průběh svařovací síly při odlišné spouštěcí síle pro usměrňovač energie o vrcholovém úhlu 75° 

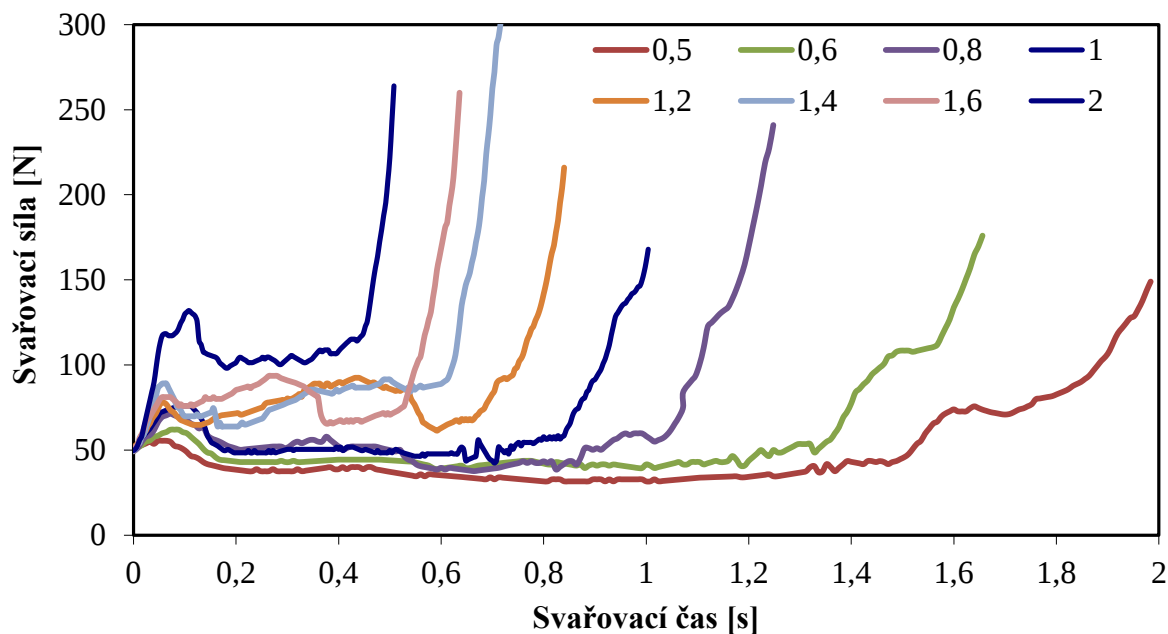
Příloha 8 – Průběh svařovací síly při svařování s různou amplitudou pro usměřovač energie o vrcholovém úhlu 60°



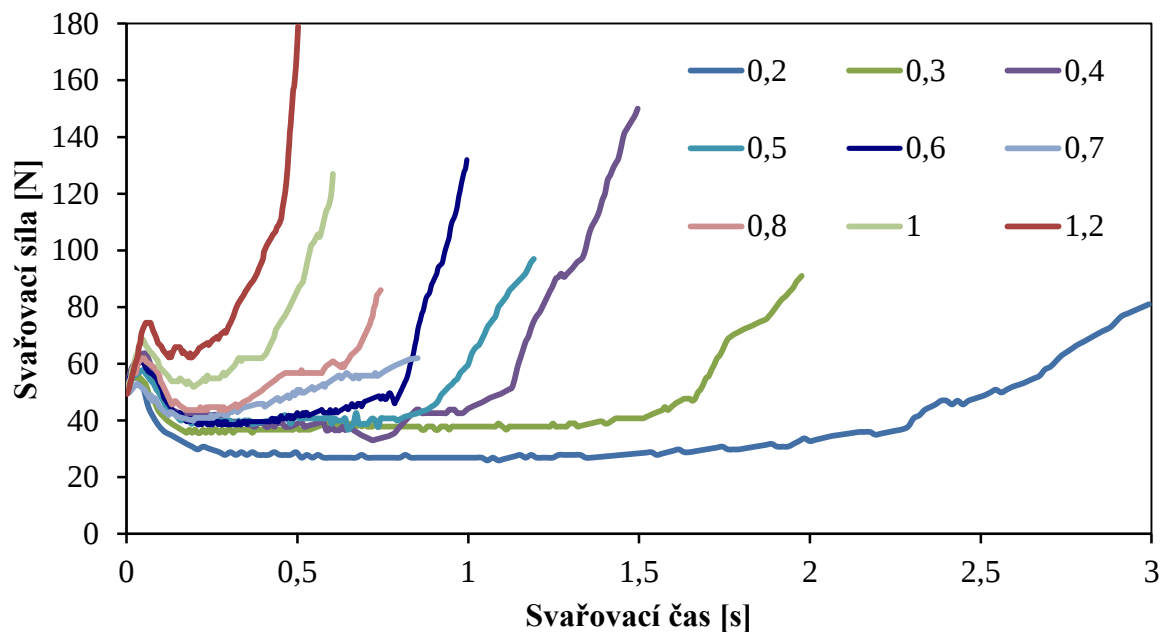
Příloha 9 – Průběh svařovací síly při svařování s různou amplitudou pro usměřovač energie o vrcholovém úhlu 75°



Příloha 10 – Průběh svařovací síly při rozdílné svařovací rychlosti pro usměřovač energie o vrcholovém úhlu 60°



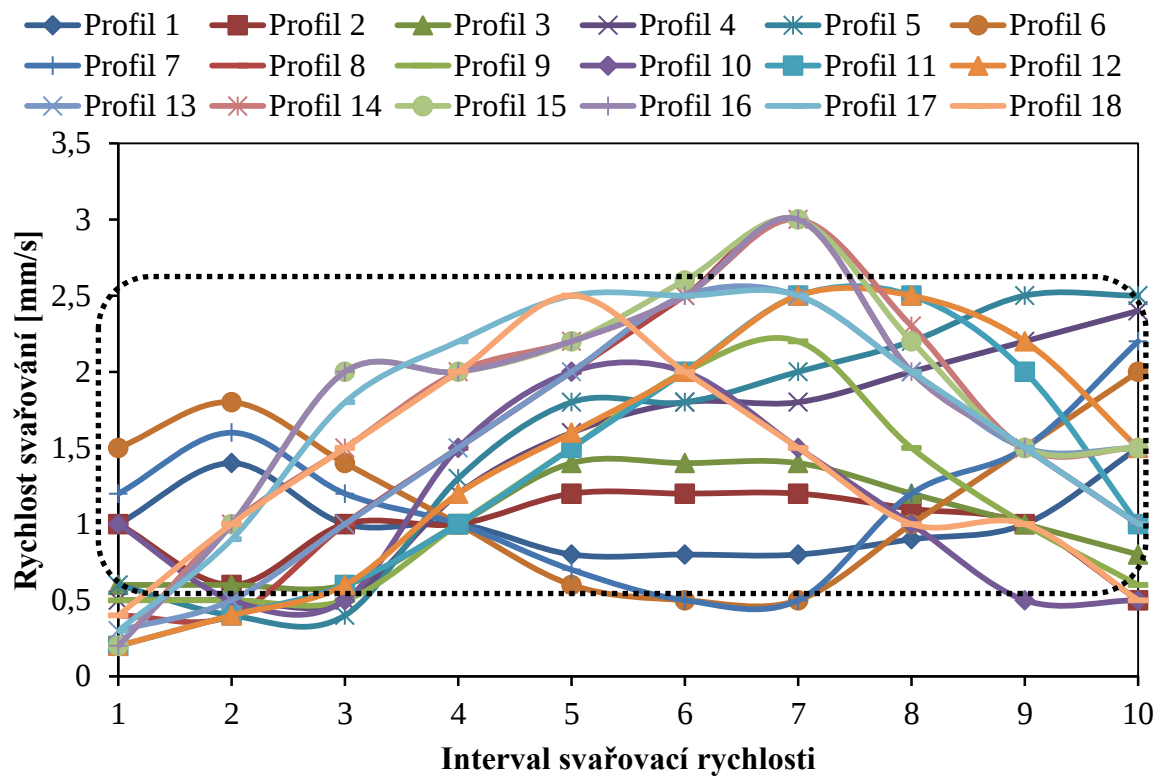
Příloha 11 – Průběh svařovací síly při rozdílné svařovací rychlosti pro usměřovač energie o vrcholovém úhlu 75°



Příloha 12 - Rozpis naprogramovaných rychlostních profilů svařování včetně jednotlivých rychlostí v daném segmentu

Označení profilu	Číslo intervalu									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.	1	1,4	1	1	0,8	0,8	0,8	0,9	1	1,5
2.	1	0,6	1	1	1,2	1,2	1,2	1,1	1	0,5
3.	0,6	0,6	0,6	1	1,4	1,4	1,4	1,2	1	0,8
4.	0,5	0,5	0,5	1,2	1,6	1,8	1,8	2	2,2	2,4
5.	0,6	0,4	0,4	1,3	1,8	1,8	2	2,2	2,5	2,5
6.	1,5	1,8	1,4	1	0,6	0,5	0,5	1	1,5	2
7.	1,2	1,6	1,2	1	0,7	0,5	0,5	1,2	1,5	2,2
8.	0,4	0,4	1	1,5	2	2,5	3	2	1,5	1
9.	0,5	0,5	0,5	1	1,5	2	2,2	1,5	1	0,6
10.	1	0,5	0,5	1,5	2	2	1,5	1	0,5	0,5
11.	0,2	0,4	0,6	1	1,5	2	2,5	2,5	2	1
12.	0,2	0,4	0,6	1,2	1,6	2	2,5	2,5	2,2	1,5
13.	0,3	0,5	1	1,5	2	2,5	2,5	2	1,5	1,5
14.	0,2	1	1,5	2	2,2	2,5	3	2,3	1,5	1,5
15.	0,2	1	2	2	2,2	2,6	3	2,2	1,5	1,5
16.	0,2	1	2	2	2,2	2,5	3	2	1,5	1
17.	0,3	0,9	1,8	2,2	2,5	2,5	2,5	2	1,5	1
18.	0,4	1	1,5	2	2,5	2	1,5	1	1	0,5

Příloha 13 – Grafické znázornění naprogramovaných rychlostních profilů s označením rychlostního rozsahu 0,5 – 2,5 mm/s



Příloha 14 – Závislost svařovacího tlaku na době svařování u pneumatického ultrazvukového zařízení

