

Studium pevnosti svařovaných spojů

Bc. Vladislav Sekanina

Diplomová práce
2018

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Vladislav Sekanina**
Osobní číslo: **T16255**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Studium pevnosti svařovaných spojů**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte rešerši na dané téma
2. Provedte experimentální svařování různých polymerních materiálů danou technologií
3. Provedte experimentální vyšetření pevnosti spojů
4. Sestavte FEM modelové studie spojů a porovnejte výsledky s výsledky experimentů

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Literatura dle doporučení vedoucího diplomové práce.

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Libuše Sýkorová, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

2. ledna 2018

Termín odevzdání diplomové práce:

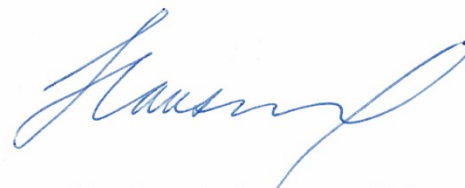
18. května 2018

Ve Zlíně dne 5. dubna 2018



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.

děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.

ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně4.5.2018.....



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je studium pevnosti svařovaných spojů polymerních materiálů vybranou technologií.

Teoretická část je věnována problematice svařování termoplastů. Jsou zde uvedeny základní pojmy a vysvětleny základní principy svařování, podrobněji pak svařování ultrazvukem. Zmíněny jsou zde také základní metody hodnocení pevnosti svarových spojů.

V praktické části je provedeno experimentální svařování zkušebních vzorků. Vzorky vybraných materiálů jsou svařeny za různých podmínek. Závěrem praktické části je porovnání pevnosti svařovaných spojů v závislosti na různých faktorech, jako jsou: délka svarů, způsob provedení svarů, parametry procesu svařování nebo vliv svařovaného materiálu.

Klíčová slova: svařování termoplastů, svařování ultrazvukem, svařitelnost, zkouška tahem

ABSTRACT

The aim of the thesis is the study of strength of weld joints of polymeric materials by a specific technology.

The theoretical part is concerned with welding of thermoplastics. Basic concepts and principles of welding are stated and explained, ultrasonic welding is dealt with in more detail. Basic evaluation methods of solidity and strength of weld joints are mentioned.

In the practical part experimental welding of test samples are carried out. The samples of selected materials are welded under different conditions. In conclusion of the practical part the strength of weld joints are compared depending on various factors such as: length of welds, methods of welding, parameters of the welding process or influence of the welded material.

Key words: welding of thermoplasts, ultrasonic welding, weldability, tensile test

Děkuji paní doc. Ing. Libuši Sýkorové, Ph.D. za odborné vedení a pomoc při vypracování této diplomové práce. Dále chci tímto poděkovat panu doc. Ing. Oldřichovi Šubovi, CSc. za odborné konzultace, rady a připomínky.

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

OBSAH

ÚVOD.....	10
I TEORETICKÁ ČÁST.....	11
1 SVAŘOVÁNÍ.....	12
1.1 SVAŘOVÁNÍ KOVŮ.....	12
1.2 SVAŘOVÁNÍ TERMOPLASTŮ.....	13
1.3 VÝHODY / NEVÝHODY TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ.....	13
2 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ TERMOPLASTŮ.....	14
2.1 SVAŘOVÁNÍ HORKÝM TĚLESEM.....	14
2.2 SVAŘOVÁNÍ TOPNOU SPIRÁLOU.....	15
2.3 SVAŘOVÁNÍ HORKÝM PLYNEM.....	16
2.4 SVAŘOVÁNÍ EXTRUDEREM.....	17
2.5 SVAŘOVÁNÍ INFRAČERVENÝM PAPSREM.....	18
2.6 SVAŘOVÁNÍ LASEREM.....	19
2.6.1 Konturové průchozí svařování.....	19
2.6.2 Konturové svařování.....	20
2.7 VYSOKOFREKVENČNÍ (DIELEKTRICKÉ) SVAŘOVÁNÍ.....	20
2.8 SVAŘOVÁNÍ TŘENÍM.....	21
2.8.1 Rotační svařování.....	22
2.8.2 Vibrační svařování.....	22
2.9 SVAŘOVÁNÍ ULTRAZVUKEM.....	25
2.9.1 Zařízení.....	25
2.9.2 Průběh procesu.....	27
2.9.3 Charakteristiky procesu.....	29
2.9.4 Řízení procesu.....	29
2.9.5 Fokusace energie.....	30
2.9.6 Procesy svařování termoplastů ultrazvukem.....	30
2.9.7 Materiálem podmíněné vlivy.....	33
2.9.8 Výhody / nevýhody technologie.....	35
3 PROBLEMATIKA DĚJŮ PŘI SVAŘOVÁNÍ TERMOPLASTŮ VYBRANÝMI TECHNOLOGIEMI.....	36
3.1 SVAŘITELNOST TERMOPLASTŮ.....	36
3.2 SVAROVÁ ZÓNA.....	36
3.3 PARAMETRY SVAŘOVÁNÍ A PEVNOST SVAROVÉHO SPOJE.....	38
3.4 VLIV HISTORIE A PODMÍNEK SKLADOVÁNÍ.....	38
3.5 RIZIKA TECHNOLOGIE ULTRAZVUKOVÉHO SVAŘOVÁNÍ.....	39
4 POSUZOVÁNÍ PEVNOSTI SVAROVÝCH SPOJŮ.....	40
4.1 DESTRUKTIVNÍ ZKUŠEBNÍ POSTUPY.....	40
4.1.1 Zkouška tahem.....	40
4.1.2 Rázová tahová zkouška.....	42
4.1.3 Zkouška ohybem.....	44
4.1.4 Dlouhodobá tahová zkouška.....	45

4.2	NEDESTRUKTIVNÍ ZKUŠEBNÍ POSTUPY.....	47
4.2.1	Vizuální kontrola.....	47
4.2.2	Zkouška ultrazvukem.....	47
4.2.3	Zkouška rentgenem.....	47
4.3	DEFINICE CHYB SVAROVÝCH SPOJŮ.....	48
II	PRAKTICKÁ ČÁST	49
5	STANOVENÍ CÍLŮ PRAKTICKÉ ČÁSTI.....	50
6	POUŽITÉ NÁSTROJE A ZAŘÍZENÍ.....	51
6.1	ZAŘÍZENÍ PRO SVAŘOVÁNÍ ULTRAZVUKEM	51
6.2	SVAŘOVACÍ PŘÍPRAVEK.....	52
6.3	PŘÍPRAVEK PRO ZAJIŠTĚNÍ POLOHY VZORKŮ BĚHEM SVAŘOVÁNÍ.....	53
6.4	UNIVERZÁLNÍ ZKUŠEBNÍ STROJ PRO ZKOUŠKU TAHEM	56
7	EXPERIMENT	57
7.1	POUŽITÉ MATERIÁLY	57
7.1.1	Polypropylen (PP).....	57
7.1.2	Akrylonitril-butadien styren (ABS)	58
7.1.3	Polymethylmethakrylát (PMMA)	58
7.1.4	Polykarbonát (PC).....	58
7.2	EXPERIMENTÁLNÍ SVAŘOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES	59
7.2.1	Výchozí zkušební tělesa.....	59
7.2.2	Varianty svarových spojů.....	60
7.2.3	Volba procesních parametrů svařování.....	60
7.3	HODNOCENÍ VLIVŮ NA PEVNOST SVAŘOVANÝCH SPOJŮ	61
7.3.1	Vliv velikosti plochy svaru	63
7.3.2	Vliv plniv	70
7.3.3	Vliv vrubů	73
7.3.4	Vliv parametrů svařování.....	76
7.3.5	Vliv kombinace materiálů	80
7.3.6	Šikmý svar.....	82
7.4	TEST HYPOTÉZ.....	83
7.4.1	Závislost únosnosti svarového spoje na jeho délce.....	84
7.4.2	Závislost únosnosti svarového spoje na obsahu vyztužujícího plniva	85
7.4.3	Vliv modifikace svarového spoje na únosnost.....	86
7.4.4	Závislost únosnosti svarového spoje na dodané svařovací energii	87
	ZÁVĚR	88
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	92
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	94
	SEZNAM OBRÁZKŮ	97
	SEZNAM TABULEK.....	100
	SEZNAM PŘÍLOH.....	101

ÚVOD

V současnosti se v průmyslovém spojování materiálů používá široké spektrum technologií, jako např. lepení, svařování, nýtování apod.

Zaměříme-li se na spojování termoplastů, tak použití technologie svařování s sebou nese řadu výhod. Tato technologie znamená především snížení investičních nákladů oproti náročným procesům jiných technologií. Teoreticky je možná výroba tvarově a rozměrově komplikovaných plastových dílů zjednodušením na výrobu nejdříve polotovarů, které se poté svaří do jednoho celku.

V bývalém Československu se technologie svařování termoplastů používala již v 60. letech 20. století. Technologie se používala především na přípojky do domů a rozvody, přičemž potřebnou svářecí technikou disponovaly pouze firmy. Později se svařovaly i podlahové krytiny, zejména v laboratořích a zdravotnických zařízeních. Podstatný rozvoj ve svařování termoplastů v České Republice nastal v 90. letech 20. století, kdy se na zdejším trhu objevila celá řada materiálů, které mohly být s technickou podporou široce uplatňovány.

Během posledního desetiletí se jako důležitá prosadila ultrazvuková svařovací technika, která stále prochází prudkým vývojem. S vývojem technologie se také rozrůstá skupina materiálů, které mohou být tímto způsobem svařovány. Nejprve bylo možno svařovat jen nepříliš flexibilní plasty, jejichž materiálové vlastnosti umožnili přenos akustické energie mezi svařovanými díly. V dnešní době se již běžně tato technologie používá ke svařování téměř veškerých plastů, případně kovů. Vlivem vysoké rychlosti procesu a reprodukovatelnosti svařovacích výsledků se technologie ultrazvukového svařování prosadila ve velkosériové výrobě automobilů, elektroniky, lékařské techniky a v řadě dalších.

Nasazení technologie ultrazvukového svařování plastů je dáno hospodárností, přesností svařovaných dílů, a především dosažitelnou pevností svarových spojů. Při svařování některých typů plastů je to právě pevnost spojů, která může představovat úskalí. [1,2,3,6]

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 SVAŘOVÁNÍ

Svařování je proces, který slouží k vytvoření trvalého, nerozebíratelného spoje dvou a více součástí. Obecným požadavkem na proces svařování je vytvoření termodynamických podmínek, při kterých je umožněn vznik vazeb mezi atomy.

Jelikož prakticky není možné dosáhnout spojení na úrovni meziatomových vazeb za běžných podmínek (teplota prostředí, tlak apod.), kdy je termodynamický stav materiálu stabilní, resp. metastabilní, je nutné tento termodynamický stav spojovaných materiálů změnit. Proto je během svařování nutné působit tlakem, nebo teplem, případně oběma faktory současně. Obecně platí závislost mezi působícím tlakem a dodaným teplem, tedy čím vyšší je tlak, tím nižší množství tepla je třeba k vytvoření svarového spoje požadovaných vlastností, a naopak.

Svařovat lze kovové i nekovové materiály, materiály podobných i odlišných vlastností, přičemž pro různé typy spojů jsou vhodné jiné metody svařování. V okolí svaru dochází vždy ke změně fyzikálních nebo mechanických vlastností základního (spojovaného) materiálu. Alternativní metody nerozebíratelného spojování materiálu jsou: např. pájení nebo lepení. [4]

1.1 Svařování kovů

Svařování probíhá za působení tepla, resp. tlaku a za případného použití přídavného materiálu obdobného složení, jako má základní materiál. Vzniká nerozebíratelné spojení strojních částí i celých konstrukcí ze součástí jednoduchých tvarů, které jsou většinou z tvářených hutních polotovarů (tyče, pásy, plechy, trubky apod.), z výkovků, nebo odlitků. Tímto způsobem vzniklým polotovarům říkáme svařence, resp. svarky, které se často dále zpracovávají. Technologie výroby svařenců je zejména u složitých konstrukcí z obtížně svařitelných materiálů sice náročná, nicméně často vede k efektivnímu řešení, kdy z většího množství jednodušších (snadno vyrobitelných) dílů svaříme celek, jehož výroba by jinou technologií byla materiálově i časově náročnější, tedy i nákladnější. [5]

Existuje široké portfolio technologií, kterými lze svařovat kovové materiály. Protože předmětem této diplomové práce je především svařování termoplastů, dále se tedy budu podrobněji věnovat právě této problematice, zvláště pak technologii ultrazvukového svařování.

1.2 Svařování termoplastů

Svařování plastů je technologie trvalého nerozebíratelného spojování součástí a dílců z termoplastických polymerů za působení tepla, resp. tlaku v určitém čase. Svařované součásti se přiloží k sobě, v místě styku se zahřejí a po dosažení plastického stavu se tlakem spojí. Protože se z celého spektra různých plastů svařují takřka výhradně termoplasty, hovoříme dnes o svařování termoplastů. [6]

S plastovými svařenci se setkáváme ve všech oblastech průmyslu, jako je např. automobilový, stavební, elektrotechnický aj.



Obr. 1. Příklady plastových svařenců [7]

Nejčastěji svařovaným polotovarem jsou trubky, které se používají ve vnitřních rozvodech pitné vody, užitkové vody, v průmyslových rozvodech kapalných médií a ve vnějších rozvodech vody, kanalizací a rozvodech plynů. Pro nádrže, jímky, šachty a celou řadu konstrukcí (např. při stavbě lodí, pontonů) se používají desky a tvarové profily. Také izolační pásy a fólie tvoří velmi širokou oblast použití technologie svařování (izolace tunelů, střech, jezírek, bazénů, izolace staveb apod.). [6]

1.3 Výhody / nevýhody technologie svařování

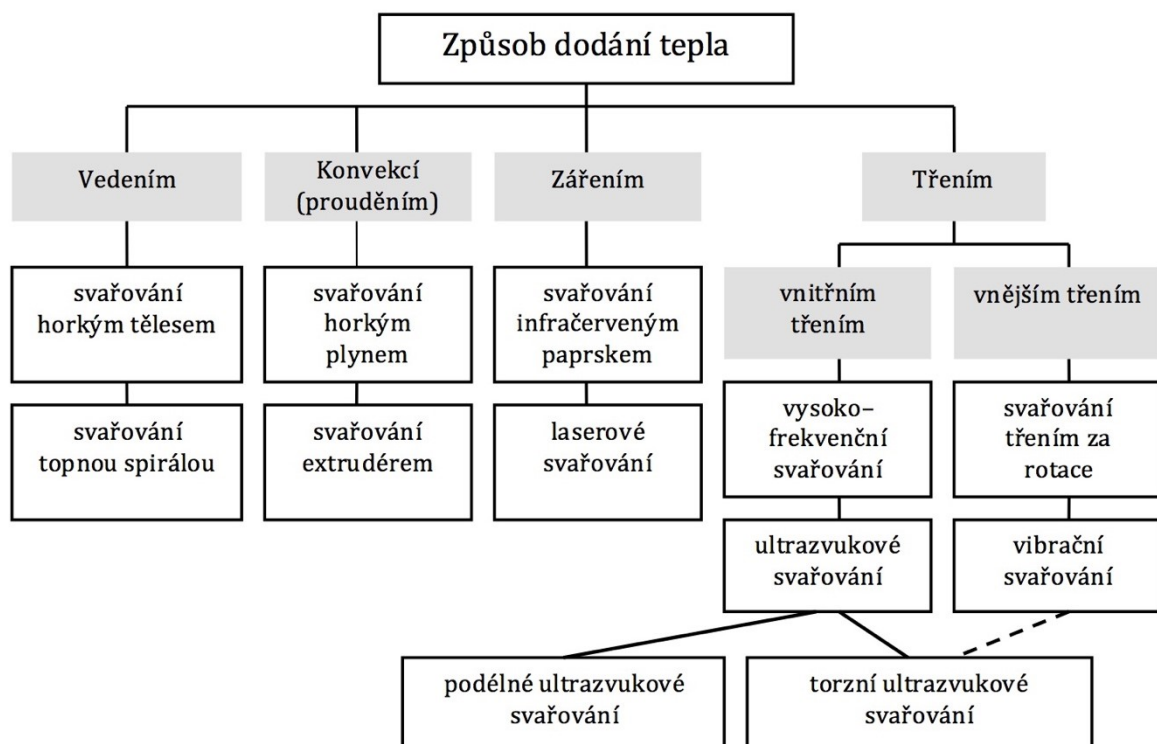
Výhodou tohoto spojení je velká pevnost, trvanlivost a také těsnost. Svařované konstrukce jsou jednoduché a materiálově úsporné. Svařování také zvyšuje produktivitu práce, podstatně zkracuje výrobní časy a zejména v kusové a malosériové výrobě umožňuje rychlou realizaci konstrukčních návrhů.

Nevýhodou může být nerozebíratelnost spojů, změna struktury, a tím i změna mechanických vlastností svarových spojů a také vznik deformací. [5]

2 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ TERMOPLASTŮ

Svařování termoplastů je tepelně-reologický proces, kdy dochází nejprve k ohřevu spojovaných dílů, poté k vzájemnému spojení dílů za působení tlaku (tečení taveniny) a následnému chladnutí materiálu za stále působícího tlaku (tuhnutí taveniny, tvorba struktury materiálu, tepelná kontrakce, rekrystalizace, orientace, stažení, bubliny).

Dle způsobu dodání tepla do místa svaru, tj. vedením, konvekcí nebo prouděním, zářením, třením, lze rozlišit základní technologie svařování termoplastů (viz. Obr. 2.). [7]



Obr. 2. Základní rozdělení technologií svařování termoplastů [7]

Při výběru konkrétní technologie svařování je nutné vzít v úvahu svařovaný polymerní materiál, geometrii (tvar) svařovaných dílů, a především požadovanou kvalitu svarů. V neposlední řadě rozhoduje o volbě vhodné technologie také hospodárnost procesu. [7]

2.1 Svařování horkým tělesem

Svařování horkým tělesem má v praxi mnoho pojmenování: hot plate, horká deska, svařování na zrcadlo. Při svařování jsou spojovací plochy svařovaných dílů nahřaty kontaktním, nebo radičním teplem a následně tlakem spojeny. U této technologie se jedná o vícestup-

ňový proces, neboť ohřev a následné svaření dílů probíhá časově odděleně. Poté, co jsou svařované díly uchyceny do fixačních loží, najedou na elektricky vyhřívané tepelné těleso. Kontaktem svařovaných ploch a tepelného tělesa začíná proces svařování, který se v praxi rozděluje na fázi ohřevu, oddálení od tepelného tělesa a spojení dílů. V praxi se můžeme setkat s těmito typy: kontaktní (ohřev při teplotách od 180 °C do 170 °C), vysokoteplotní (svařování při teplotách do max. 400 °C), radiační (ohřev až do 600 °C). [7]



Obr. 3. Postup svařování horkým tělesem [7]

Potřebné teplo je generováno obvykle prostřednictvím tepelných patron. Při konstrukci topných těles je nutné dbát na rovnoměrné rozložení teplot po celé pracovní ploše nástroje (nástavce). Pro efektivní přestup tepla jsou používány materiály s co možná nejlepší tepelnou vodivostí. V závislosti na druhu ohřevu a tvaru svařovaných dílů je možno použít různé tepelné nástavce.

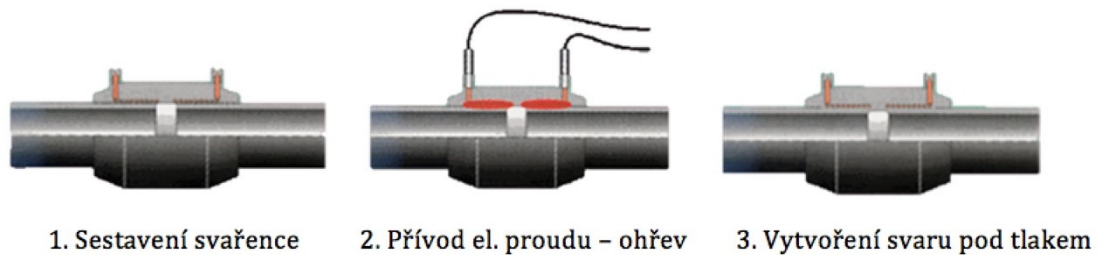
Výhody: jedná se o jednoduchý a lehce kontrolovatelný proces, vysoká reprodukovatelnost, vysoká pevnost svarů a nízké vnitřní pnutí, vhodnost pro svařování rozdílných materiálů (nutnost dvou topných těles), stejnoměrný přetok materiálu.

Nevýhody: 3D kontury svarů vyžadují složité a nákladné nástroje, velký přetok materiálu, dlouhé procesní časy, možné ulpívání materiálu na horkém tělese, vysoká energetická náročnost. [7]

2.2 Svařování topnou spirálou

Svařování topnou spirálou se nejčastěji používá u tzv. elektrotvarovek při spojování a napojování potrubních systémů. Topná elektrická spirála je součástí plastové tvarovky a je umístěna co nejbližší k místu svaru. Po svaření zůstává topná spirála součástí svařovaného celku. [7]

Tedy sestaví se celý svařenec, jehož součástí je topná spirála (elektrotvarovka), umístěná v blízkém okolí svarového spoje. Po sestavení se topná spirála zapojí do elektrického obvodu a zavede se elektrický proud. Vlivem tepla produkovaného spirálou se materiál v místě spoje roztaví a za působení tlaku dojde ke spojení.

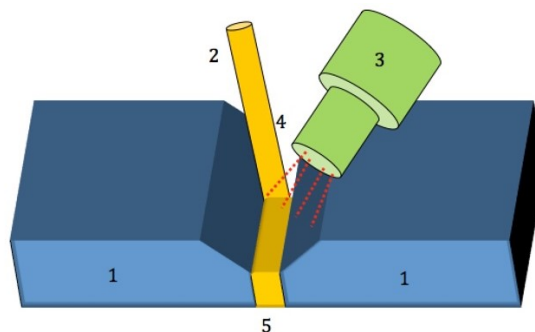


Obr. 4. Postup svařování topnou spirálou [7]

2.3 Svařování horkým plynem

Svařování horkým plynem lze rozdělit na ruční svařování s použitím horkovzdušné pistole a na svařování strojní za použití tvarového rozvaděče, které se používá pro svařování technických dílů.

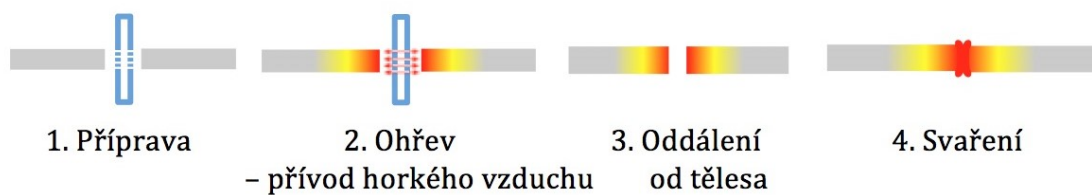
Ruční svařování horkým plynem s použitím přídavného materiálu lze použít téměř u všech termoplastů a v technologické praxi je poměrně rozšířené. Spoj se vytváří pomocí přídavného materiálu, který se stejně jako spojovací plochy svařovaných dílů, ohřívá proudem horkého plynu na teplotu, při které je materiál za působení tlaku schopen vytvořit dostatečně pevný spoj. Základní i přídavný materiál se působením tepla plastifikuje. [7]



1 – základní materiál, 2 – přídavný materiál, 3 – tryska horkovzdušné pistole, 4 – horký vzduch, 5 - svar

Obr. 5. Princip ručního svařování horkým plynem s přídavným materiálem [7]

Během strojního svařování technických dílů horkým plynem jsou spojovací plochy jednotlivých dílů bezkontaktně ohřaty horkým vzduchem, nebo inertním plynem (zpravidla dusík) a následně jsou za působícího tlaku spojeny. Poté, co jsou svařované díly založeny do fixačních přípravků, jsou dopraveny k elektricky vytápěné rozvodné desce osazené tryskami. Tryskami proudící horký plyn ohřívá materiál, který pak přechází do plastického stavu. [7]



Obr. 6. Postup strojního svařování horkým plynem [7]

Výhody: vysoká pevnost svaru i u technických plastů (např. polyamidů).

Nevýhody: nutnost použití inertního plynu při některých aplikacích, vysoké energetické náklady, investice do odsávání plynu z okolí. [7]

2.4 Svařování extruderem

Podstatou metody je ohřev základního materiálu horkým plynem a vytlačování zplastikovaného přídavného materiálu do svařovací zóny obvykle pod tlakem. Přídavný materiál bývá shodný s materiálem základním a tento je vytlačován jako proud taveniny z plastikační jednotky extruderu do místa svaru. Takto vytlačovaný přídavný materiál je zcela homogenní a dokonale zplastifikovaný. Pro vytvoření dostatečného tlaku v místě spoje, tedy pro vytvoření svaru požadované pevnosti, je nutné, aby byl přídavný materiál přitlačován dostatečným tlakem do svarové zóny. [7]



Obr. 7. Ruční svařování extruderem [7]

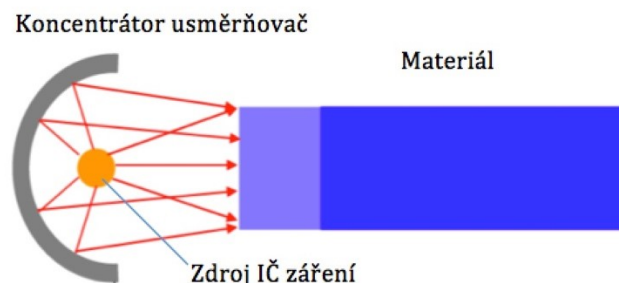
Základem vytlačovacího svařovacího nástroje je plastikační jednotka, tj. vyhřívaný válec se šnekem nebo pístem, kde dojde k ohřevu přídavného materiálu na požadovanou svařovací teplotu a jeho homogenizaci. Vytlačení přídavného materiálu do svarové zóny se uskutečňuje pomocí tzv. přitlačné botičky, u některých konstrukcí se přídavný materiál pěchuje ručně, nebo je součástí stroje systém přitlačných válečků. V případě přitlaku botičkou se tlak vyvozuje vlastní vahou extruderu, proto je při ručním svařování v některých

pozicích vyvinout stejný tlak silou pracovníka. Současně s přiváděním základního materiálu do místa svaru je nutný předehřev základního materiálu. Základní materiál se předehřívá většinou horkým plynem, případně lze použít jiný tepelný zdroj. [7]

2.5 Svařování infračerveným paprskem

Svařování probíhá za působení infračerveného záření. Toto záření je materiálem částečně odraženo, částečně absorbováno, případně část prochází skrze materiál. Absorbováno je infračervené spektrum, které se shoduje s vlnovou délkou molekulárního kmitočtu materiálu. Materiál je ohříván díky absorpci, tedy čím více záření je absorbováno, tím lepší je výsledek svařování. Absorpci ovlivňuje základní materiál svařovaných dílů, dále pak přítomnost pigmentů, obsah aditiv nebo tloušťka stěn materiálu. Platí, že čím je materiál tmavší barvy, tím vyšší je absorpce a naopak. Záření relativně krátké vlnové délky prochází hluboko do materiálu a zajišťuje rovnoměrný ohřev. Záření střední vlnové délky je absorbováno již venkovní vrstvou a ohřívá tak převážně povrchové vrstvy materiálu.

Zvláště vhodné materiály pro svařování infračerveným paprskem jsou např. ABS, PA, PP, PMMA nebo PC, které mají z hlediska svého složení velmi dobré absorpční vlastnosti. [7]



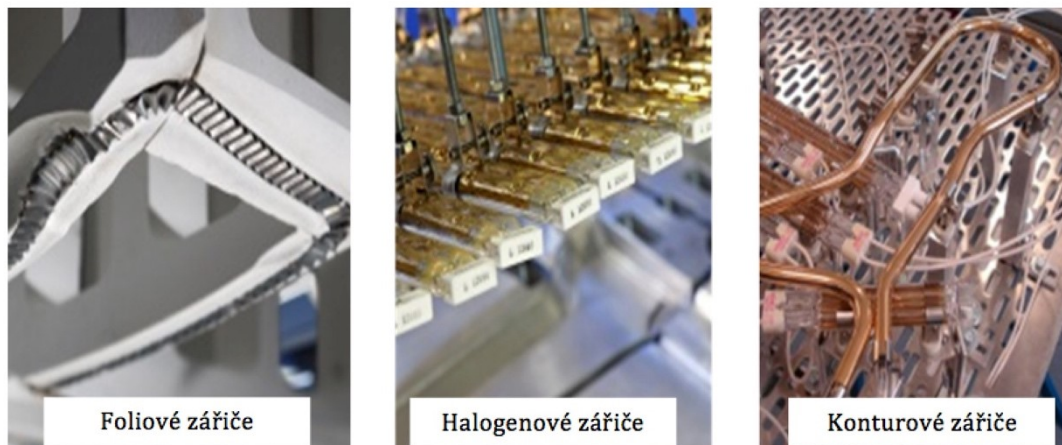
Obr. 8. Princip svařování infračerveným paprskem [7]

Zdrojem infračerveného záření mohou být fóliové (fólie opatřené speciálním niklovým legováním, které jsou uchyceny v drážce na keramickém základu), halogenové nebo konturové zářiče.

Svařování infračerveným paprskem je hojně používanou technologií v automobilovém průmyslu a má uplatnění především při svařování velkoplošných dílů, např. přístrojových desek, palivových nádrží, světlometů, krytů autobaterií. Také při výrobě sanitární a zdravotní techniky nalézá tato technologie své uplatnění.

Výhody: vysoká pevnost svarů, možnost sváření různých materiálů, možnost sváření i velmi komplexních geometrií, nehrozí ulpívání taveniny na nástroji (bezkontaktní ohřev), minimální přetoky taveniny, nízké nároky na přesnost geometrie svaru.

Nevýhody: mírně delší časy cyklu oproti jiným technologiím, relativně krátká životnost infračervených zářičů. [7]



Obr. 9. Typy infračervených zářičů [7]

2.6 Svařování laserem

Při svařování laserovým paprskem je k natavení svařovaného materiálu využito tepla, které vzniká absorpcí laserového záření materiálem. Jelikož je pohyb laserového systému ve většině případů zajištěn průmyslovými roboty, může být proces svařování exaktně řízen a průběžně vyhodnocován výpočetní technikou. Jako zdroj laserového paprsku se u této technologie používá převážně diodový laser.

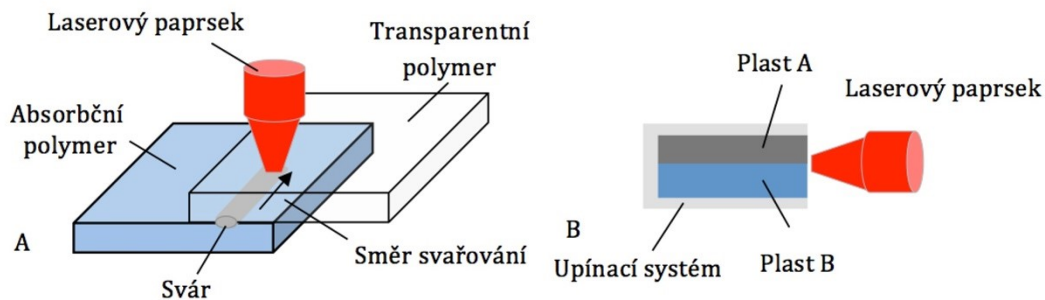
Velkou výhodou je, že na rozdíl od jiných technologií lze svařovat mezivrstvy v sestavách, v nichž jsou kombinovány transparentní a barevné (absorpční) termoplasty.

2.6.1 Konturové průchozí svařování

Na barevný (absorpční) plastový díl je pomocí přípravku zafixován transparentní plastový díl. Laserový paprsek projde skrze transparentní polymer a je absorbován v mezivrstvě, tedy na úrovni absorpčního polymeru. Vzniklým teplem se nataví jak barevný, tak i transparentní díl a vlivem tlaku dojde k jejich spojení.

2.6.2 Konturové svařování

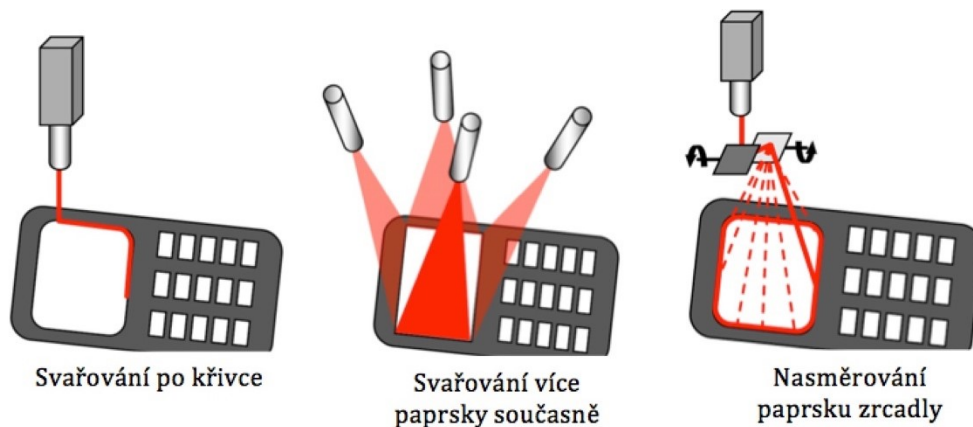
Při běžném konturovém svařování laserem jsou proti sobě upnuty oba díly a laser je veden podél spoje, čímž nastaví obě dotykové hrany spoje. [7]



A – konturové průchozí svařování, B – konturové svařování

Obr. 10. Princip svařování laserem [7]

Svařování termoplastů laserem umožňuje optimalizaci procesu vzhledem k požadované produktivitě, či požadované jakosti svaru. Lze svařovat pomocí úzkého svazku řízeného po křivce, nebo vychylovaného pomocí soustavy zrcadel. Pro svařování některých sestav lze také použít více laserů současně.



Obr. 11. Možnosti laserového svařování [7]

2.7 Vysokofrekvenční (dielektrické) svařování

Podstatou vysokofrekvenčního svařování je ohřev materiálu elektrickým proudem o vysoké frekvenci, který prochází mezi dvěma elektrodami za současného působení tlaku. Svařovaný termoplast plní funkci dielektrika a společně s elektrodami ve své podstatě tvoří kondenzátor. Generátory vysokofrekvenčních svářecích strojů pracují nejčastěji s frekvencí 27,12 MHz, která je stanovena předpisem o radiotelekomunikačním odrušení. Tato frek-

vence je zvláště optimální pro svařování měkčeného i neměkčeného PVC, kopolymerů PVC a všech materiálů, které jsou s PVC kombinovány, jako např. různé druhy textilií. Svářecí stroje se vyznačují různými typy konstrukčního provedení. Jsou konstruovány např. jako stacionární, s posuvným dvoupólovým stolem opatřeným spodní elektrodou, s karuselovým uspořádáním apod. Základním parametrem procesu svařování je doba působení elektrického pole, tlak a chlazení.

Použití vysokofrekvenčního svařování je omezeno pouze na polární polymery. Jejich dielektrické vlastnosti jsou silně ovlivněny různými modifikacemi základního polymeru, druhem plniv a změkčovadel. Nejvhodnějším plastem pro vysokofrekvenční svařování je PVC, nicméně touto technologií lze svařovat i některé další typy polymerů, jako např. polyvinylidenchlorid (PVDC) a jeho kopolymer, kopolymer etylenu s vinylacetátem (EVA), terpolymery ABS nebo PET. U těchto materiálů lze splnit požadavky na vysokou pevnost případně vodotěsnost spojů. V posledních letech byly vyvinuty technologie, které umožňují vysokofrekvenčně svařovat také polyolefiny.

Vysokofrekvenčním způsobem se svařují především plošné polotovary, jako jsou fólie nebo tkané či netkané textilie z polymerních vláken (polyesterových nebo polyamidových), laminované PVC nebo PUR.

Výhody: zdrojem tepla je vlastní svařovaný materiál (teplo není dodáváno externě), teplo je koncentrováno pouze v místě svaru (mimo svar materiál není tepelně zatěžován), svařovací proces je velmi rychlý (v řádech několika sekund), ohřev svařovaného materiálu ustává s odpojením elektrického proudu (materiál je nadále pod tlakem studených elektrod), pevnost svarového spoje je na úrovni základního materiálu, lze vytvořit svary s různými reliéfy (např. imitace stehu).

Nevýhody: ne všechny polymery jsou touto technologií svařitelné. [7]

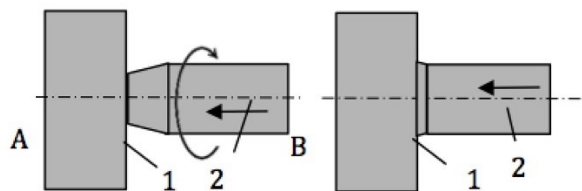
2.8 Svařování třením

Při svařování třením je teplo potřebné k natavení materiálu získáno třením styčných ploch mezi svařovanými díly. Ve srovnání s technologií svařování ultrazvukem je zde využito nižších pracovních frekvencí.

2.8.1 Rotační svařování

Jeden ze svařovaných dílů koná otáčivý pohyb, zatím co druhý je pevně uchycen, a zajištěn proti otáčení. Rotující díl je upevněn do rotujícího unášeče pomocí vhodných konstrukčních úprav, jako jsou můstky, nosy nebo žebra. Termoplasty jsou tak prostřednictvím vzniklého tření styčných ploch mezi oběma díly a z toho vyplývajícího smykového ohřevu postupně nataveny. Pro vytvoření spoje působí na díly během svařování také axiální síla, která zajišťuje dostatečný tlak mezi styčnými plochami.

Tato technologie je vhodná pouze pro díly rotačně-symetrického tvaru svařovacích ploch. Geometrie styčných ploch by v tomto případě měla být konstruována stupňovitě, nebo do tvaru klínu. [7]



1, 2 – svařované díly, A – fáze ohřevu třením, B – fáze svařování a chlazení

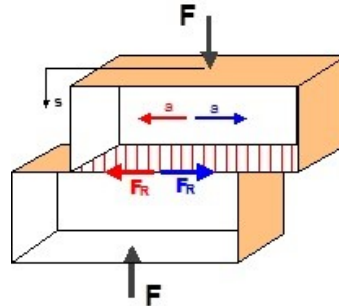
Obr. 12. Princip rotačního svařování třením [7]

Rotační svařování se často používá u termoplastů, které z důvodu nevhodných tepelných vlastností jsou komplikovaně svařitelné jinými technologiemi (např. polyamidy s vysokým podílem skelných vláken, plněné či neplněné polyolefiny). Svary vykazují vysokou pevnost a neprodyšnost. K dosažení optimálního svaření je rozhodující procesně orientovaná geometrie svaru. Dále je kvalita spoje ovlivněna také reologickými vlastnostmi polymerní taveniny. K tomu je zapotřebí co nejlepší kontroly svařovacích parametrů daného stroje a jejich empirického vyhodnocování a vzájemného odladění. [7]

2.8.2 Vibrační svařování

Při vibračním svařování jeden ze dvou spojovaných dílů lineárně kmitá v daném směru, přičemž druhý díl je zajištěn vůči pohybu. Zároveň jsou tyto díly k sobě vzájemně přitlačovány působící silou. Působením tepla, které vzniká povrchovým třením mezi plochami svařovaných dílů, dojde k natavení materiálu a následně ke spojení dílů za působícího tlaku. Vibrace zajišťují svářecí hlavy vibračních svářecích strojů, které se vyznačují vysokou spolehlivostí a vysokou odolností proti opotřebení.

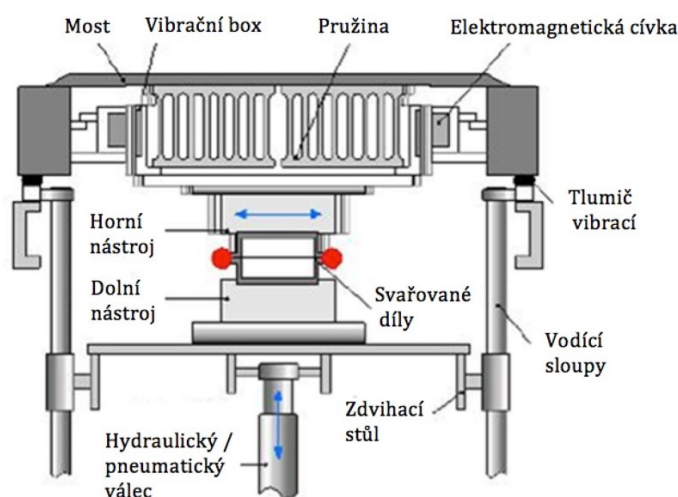
Hlavním parametrem je směr a smysl kmitání (lineární, příčné, podélné, kruhové), přítlačná síla, amplituda kmitání, doba vibrací, svařovací dráha, čas držení (doba dotlaku), kontaktní tlak a třecí síla. [7]



Obr. 13. Princip vibračního svařování [7]

Princip svařování se vyznačuje zejména možností vytvářet průběžné svary velkých součástí s příslušnou větší plochou spoje, tedy svařování rozměrných součástí v rámci sériové výroby. Dále je tato technologie vhodná pro svařování termoplastů s vysokým obsahem plniva, případně termoplastů vyztužených dlouhými vlákny.

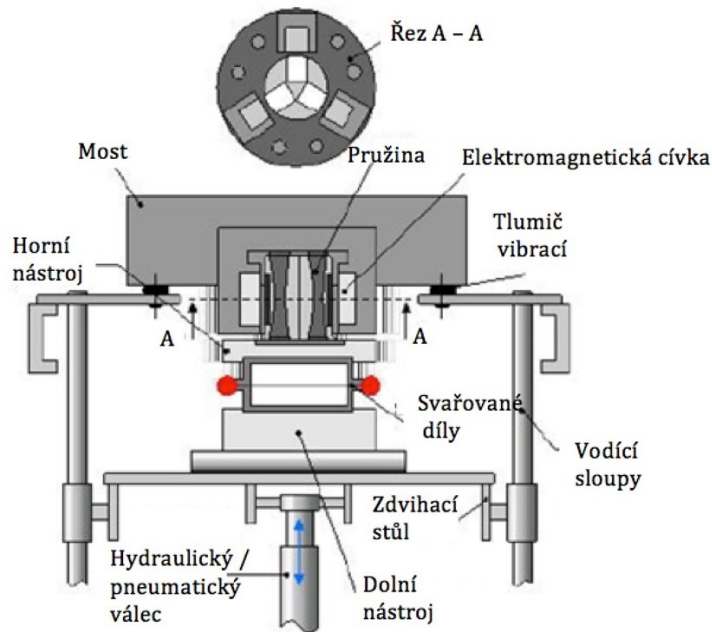
Lineárně-vibrační svařování, jehož vibrační pohyb je dán elektromagnetickým pohonem, se v praxi prosadilo nejvíce. Pro uvedení vibrační hlavy do pohybu byly dříve používány také hydraulické pohony, nicméně dnes jsou nahrazovány již zmíněným elektromagnetickým pohonem (kmitání jádra v elektromagnetickém poli vinutí cívky). Přítlak je realizován soustavou pružin. [7]



Obr. 14. Princip lineárně-vibračního svařování [7]

Orbitálně-vibrační svařování umožňuje konstantní rychlost tření po celé ploše svaru. Minimální výchylky umožňují vysokou míru volnosti při konstrukci dílu. Svařovací vibra-

ce o velmi malé amplitudě jsou předností zejména při svařování součástí obsahujících citlivou elektroniku, kterou by vibrace o velké amplitudě mohly poškodit. [7]



Obr. 15. Princip orbitálně-vibračního svařování [7]

Dle požadavků svařovací operace může být amplituda upravena v závislosti na parametrech konkrétního zařízení: u strojů s pracovní frekvencí 100 Hz lze amplitudu korigovat v rozmezí 1 – 2 mm, u strojů s pracovní frekvencí 260 Hz v rozmezí 0,35 – 1 mm. Při určování amplitudy je nutno zohlednit také konstrukční podmínky svařovaných dílů. Frekvence musí být nastavena dle rezonanční frekvence oscilačního systému. Frekvence a amplituda ovlivňují třecí rychlost a tím také energii zaváděnou do svařovacích ploch. Zvýšením frekvence nebo amplitudy roste množství energie a tím se zkracuje čas tavení termoplastu, tedy i zkrácení doby svařovacího cyklu.

Výhody: relativně krátké procesní časy (obvykle 3 až 10 s), dobře reprodukovatelná a opakovatelná kvalita svaru.

Nevýhody: částečný úběr materiálu na začátku procesu svařování, méně vhodná technologie pro svařování malých dílů, nelze použít u dílců obsahujících tenké a vysoké stěny (namáhání stěn na vzpěr). [7]

2.9 Svařování ultrazvukem

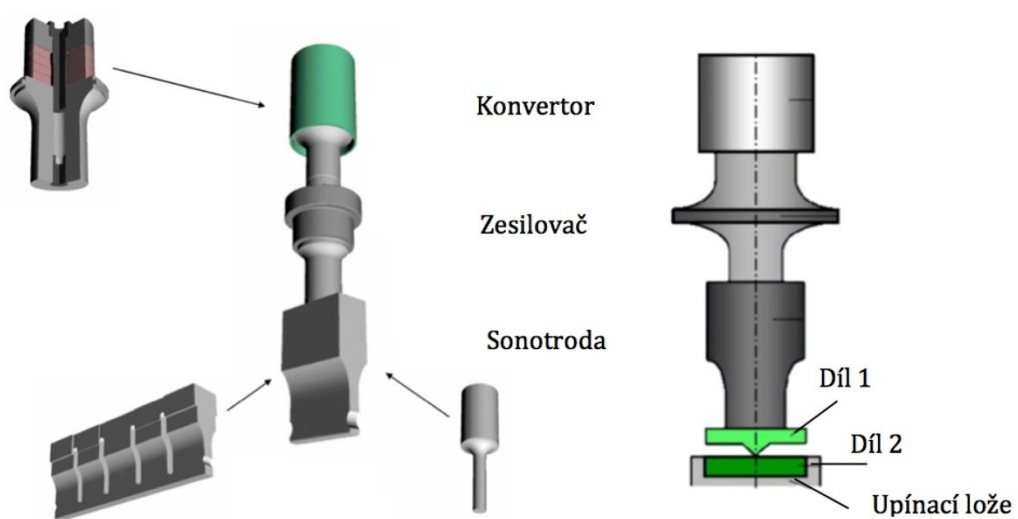
Ultrazvukové svařování plastů je metoda zajištění pevného spojení termoplastů, plněných termoplastů, kompozitních materiálů a některých jiných materiálů za použití kmitavé ultrazvukové energie v místech spoje. Spojení ultrazvukem je dosaženo převedením elektrické energie na vysokofrekvenční mechanický pohyb. Tento mechanický pohyb společně se silou působící na materiál vytváří teplo v místě kontaktu, díky čemuž se daný materiál začne v kontaktním bodě tavit a vytvoří pevné spojení na molekulární úrovni.

Vlastního spojení součástí se dosahuje v zásadě dvojnásobným způsobem a s ohledem na to jej lze zařadit do kategorie tavného a tlakového svařování. [2,8]

2.9.1 Zařízení

Ultrazvukové kmitání je vytvořeno generátorem, který proměňuje střídavé síťové napětí na vysokofrekvenční energii. Tato vysokofrekvenční energie je následně proměněna konvertorem na mechanickou vibrační energii o stejné frekvenci. Tedy svařovací proces je realizován pomocí soustavy skládající se z konvertoru (např. piezoelektrický krystal), zesilovače (amplitudový transformační díl) a sonotrody (svařovací nástroj).

Zařízení pro svařování ultrazvukem se dělí podle typu konvertoru, dle použitých kmitavých soustav a dle použití na svařování kovů nebo plastů. Konvertory mohou být piezoelektrické nebo magnetostrikční. [2,3,7]



Obr. 16. Základní části ultrazvukové svářečky [7]

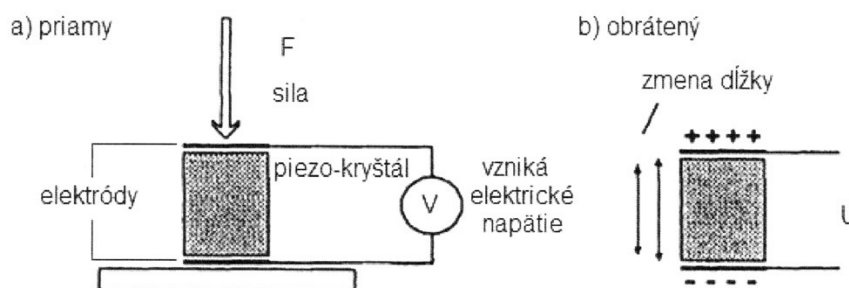
Generátor slouží k přeměně nízkofrekvenční energie střídavého síťového elektrického proudu na vysokofrekvenční energii ultrazvukových vln. Výstupní frekvence ultrazvukových generátorů je v rozsahu (20 až 40) kHz při výstupním výkonu (400 až 5000) W. Skutečná pracovní frekvence generátoru je dána mechanickou rezonanční frekvencí konvertoru a sonotrody.

Konvertor slouží k přeměně elektrické oscilační energie na energii mechanickou vibrační. Konvertor, často piezoelektrický, je konstrukčně přizpůsoben pro přenos kmitů do kovu (např. titanu), čímž jsou k dispozici na dolní části konvertoru v podobě mechanických kmitů o průměrné amplitudě 4 μm . Postupem zpracování speciálních keramických materiálů lze vyrobit konvertor s účinností přes 95 %. [7]



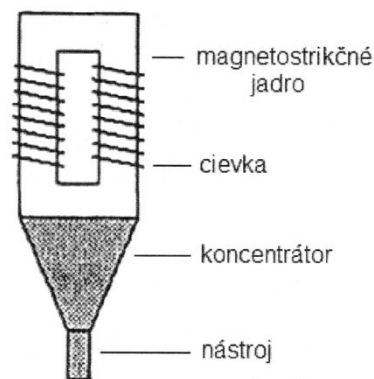
Obr. 17. Některé typy konvertorů [7]

Piezoelektrický konvertor je založen na piezoelektrickém prvku (piezokrystal). Při mechanickém stlačení piezokrystalu vznikají na jeho povrchu elektrické náboje. Tyto látky však vykazují také opačný účinek. Tedy přivedeme-li na tento prvek střídavé elektrické napětí, bude periodicky měnit svou délku. Pokud jde o dostatečně vysokou frekvenci (nad 20 kHz), bude tento prvek zdrojem ultrazvuku a v kontaktu s jinou částí v takto sestavené zvukové soustavě, bude kmitů vysílat dál. Nejznámější piezoelektrickou látkou je křemen, nicméně piezoelektrický jev vykazuje také turmalín, báriumtitanát aj. [10]



Obr. 18. Piezoelektrický jev [10]

Magnetostrikční konvertor využívá magnetostrikčního jevu, čímž se rozumí změna rozměrů feromagnetických látek vyvolaná jejich magnetizací. Typickým magnetostrikčním materiálem jsou slitiny železa, niklu a kobaltu. Technické zhotovení konvertoru je tyč uložená v cívce, jež vytváří střídavé magnetické pole. Konvertor z magnetostrikčního materiálu je preferován u robustněji zhotoveného akustického systému a celého stroje. [10]



Obr. 19. Magnetostrikční konvertor s uzavřeným jádrem [10]

Zesilovač (koncentrátor) je amplitudový transformační díl, který zesiluje konvertorem generované vibrace, resp. jejich amplitudu, a odevzdává je dále pracovnímu nástroji, tedy sonotrodě.

Sonotroda zajišťuje přenos vibrací do svařované oblasti. Standardně se vyrábí z materiálů jako je např. hliník, titan nebo ocel. [7]

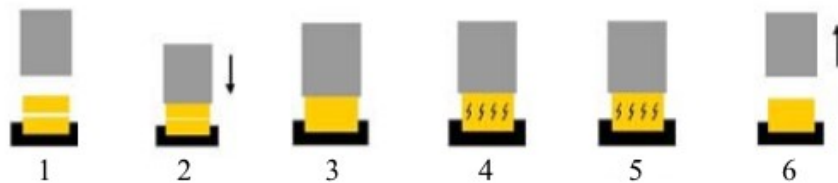


Obr. 20. Některé typy sonotrod [7]

2.9.2 Průběh procesu

Spojované díly jsou založeny do přípravku tak, aby se vzájemně dotýkali svařovanými plochami. Generátor svářečky generuje elektrické kmity ultrazvukových frekvencí, které jsou transformovány na kmity mechanické a prostřednictvím nástroje jsou soustředěny do místa budoucího spoje. Mechanické kmity se přenáší pod tlakem na svařované díly

z termoplastu. Vlivem molekulárního tření a tření na styčných plochách vzniká teplo, polymer se místně ohřívá a začíná měknout. Spojované se tak v místě styku plastifikují a jsou do sebe působením kolmé přitlačné síly natlačeny tak, že jejich molekuly se navzájem propletou. Tato reakce se neustále urychluje, protože vlivem zvyšování tlumících faktorů plastifikovaného materiálu se stále větší podíl vibrační energie přeměňuje na teplo. Po ukončení působení ultrazvukových vln je nutná krátká ochlazovací fáze při ještě existujícím spojovacím tlaku, aby plastifikovaný materiál mohl ztuhnout a vytvořit tak pevný spoj. [3,9]



Obr. 21. Průběh svařování ultrazvukem [2]

Krok 1: Dva spojované termoplasty se umístí jeden na druhý do tzv. lůžka.

Krok 2: Dojde ke kontaktu horního termoplastu a titanového, ocelového nebo hliníkového komponentu zvaného sonotroda.

Krok 3: Kontrolovaný tlak působí na obě spojované součásti proti lůžku.

Krok 4: Nastává svařovací cyklus, tedy děj, kdy sonotroda vertikálně vibruje s frekvencí (15 až 75) kHz, amplitudě o velikosti v řádu mikrometrů a v předem daném časovém intervalu. Vibrační mechanická energie je nasměrována na styčné plochy mezi dvěma svařovanými částmi. Mechanické kmitání je přenášeno skrze termoplastické materiály na rozhraní součástí (svarová plocha), kde vytváří frikční teplo. Když teplota na rozhraní spojovaných dílů dosáhne bodu tání, termoplast taje a teče a kmitání se zastaví. To umožní roz-tavenému plastu začít chladnout.

Krok 5: Zatímco roztavený termoplast chladne a tuhne, jsou součásti udržovány pod tlakem tak, aby došlo ke spojení. Jde o tzv. přitlačný cyklus. Použitím vyšší přitlačné síly může být dosaženo vyšší pevnosti a lepší neprodyšnosti.

Krok 6: Jakmile dojde ke ztuhnutí termoplastu v oblasti spoje, sonotroda již nemusí dále působit tlakem a svařené součásti lze z lůžka vyjmout. [2]

2.9.3 Charakteristiky procesu

Působení kmitů i přítláčné síly se u termoplastů děje kolmo na spojované plochy. Směr působení kmitů je největším rozdílem oproti svařování kovů, kde ultrazvuková energie působí na spoj ve směru spojovaných ploch a ve směru kolmém působí pouze přítláčná síla. V souladu s obecnými principy využití ultrazvuku v oblasti vysokých výkonů se pro svařování nejčastěji používá frekvence 20 kHz, méně pak frekvence 10 kHz (zařízení jsou hlučná, neboť pracují ve slyšitelném frekvenčním spektru) a 35 kHz (pro malé spoje a menší série), výjimečně i jiné. [9]

Přítláčná síla působící na spoj zabezpečuje přenos ultrazvukových kmitů ze sonotrody na svařované materiály a také tření potřebné na rozrušení tenkých oxidických vrstviček nebo nerovností. Vazba mezi sonotrodou a svařovaným materiálem je velmi důležitá. V závislosti na svařovaném materiálu se hodnota měrného tlaku pohybuje v rozmezí (0,4 až 1,2) MPa.

Amplituda kmitu je základní parametr. Se zvětšováním amplitudy výchylky sonotrody roste pevnost spojů lineárně. Naopak zmenšení amplitudy výchylky sonotrody vede ke snížení pevnosti svarového spoje. Velikost amplitudy se pohybuje v řádech mikrometrů.

Frekvence kmitů určuje použité ultrazvukové zařízení a soustavu. Při vyšší frekvenci kmitů se zvětšují ztráty energie v přenosových člancích, svařovací hlava se intenzivněji zahřívá a amplituda vlnění je úměrně menší. Frekvence kmitů se pohybuje v rozsahu (15 až 75) kHz.

Čas svařování je časový interval působení ultrazvukové energie na svařované materiály. Spolurozhoduje o pevnosti ultrazvukového svaru. V závislosti na ostatních parametrech je třeba používat svařovací časy co nejkratší. Nepřiměřeně dlouhé časy mohou způsobovat značné místní přehřátí spoje a zapříčinit tak únavové porušení kovů, případně degradaci materiálu u polymerů. Svařovací časy jsou velmi krátké a dosahují obvykle (3 až 6) s, maximálně však do 10 s v závislosti na svařovaném materiálu. [2]

2.9.4 Řízení procesu

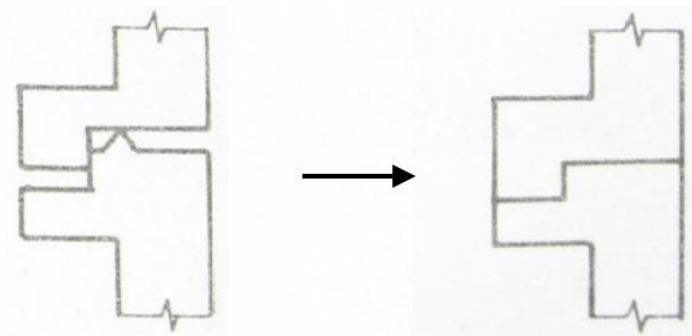
Pro řízení svařovacího procesu se používají celkem čtyři metody. Jejich názvy jsou odvozeny podle toho, jaká veličina je při svařování primárně sledována a podle které je průběh procesu řízen. Jedná se tedy o metody svařování podle času, energie, relativní pozice a absolutní pozice. Od momentu kontaktu nástroje s dílcem (v případě času, energie, relativ-

ní pozice) nebo od předepsané pozice (při svařování podle absolutní pozice) je díl svařován až do dosažení předepsané hodnoty kontrolované veličiny. Přitom jsou zároveň sledovány také ostatní parametry, což slouží k detekci odchylek a chyb. Pokud by například při svařování podle absolutní pozice nebyl do přípravku založen svařovaný díl, zařízení toto odhalí, neboť zaznamená, že nebyla odebrána odpovídající energie. [9]

2.9.5 Fokusace energie

V případě svařování plastů určité úpravy svařovaných ploch velmi ovlivňují nejen svařovací čas, ale i kvalitu spoje. Na výsledek svařování má velký vliv geometrie svařovaných ploch. V mnoha případech je nutné konstruovat energetické usměrňovače, jimiž je dosaženo cíleného a koncentrovaného přenosu energie. V případě nerealizovaného energetického usměrňovače by mohlo dojít k výraznému prodloužení času svařování. Tím by např. při švovém svařování mohlo dojít ke svaření plošnému, což může mít za následek snížení pevnosti a homogenity svařování. V přehřátých oblastech by také mohlo dojít k degradaci polymeru.

Je tedy výhodné, když je na jednom svařovaném dílu vytvořena styčná plocha rovná a na protilehlém vytvořen výstupek ve tvaru např. klínového průřezu. Tímto způsobem je vytvořen ideální kontakt, který minimalizuje potřebnou spotřebu energie na svařování. Podobného efektu lze docílit také tvarovou úpravou pracovní části sonotrody, např. zvrásněním jejího povrchu. [2,3,7]

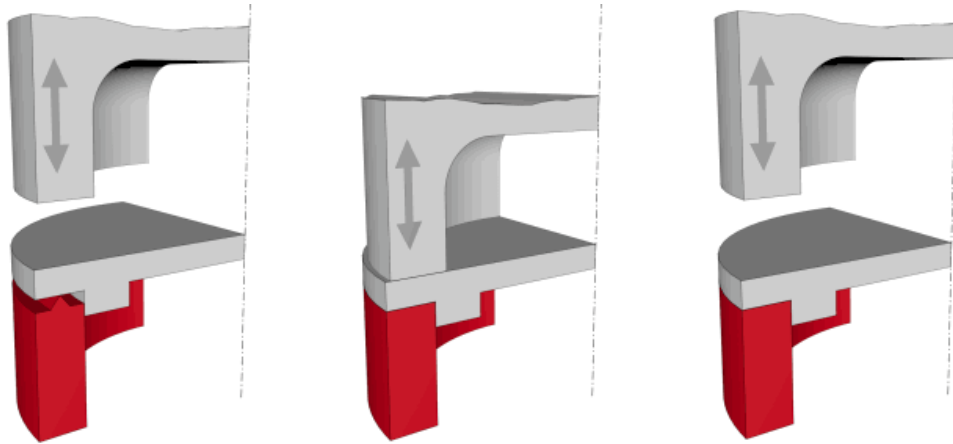


Obr. 22. Tvarová úprava styčných ploch [2]

2.9.6 Procesy svařování termoplastů ultrazvukem

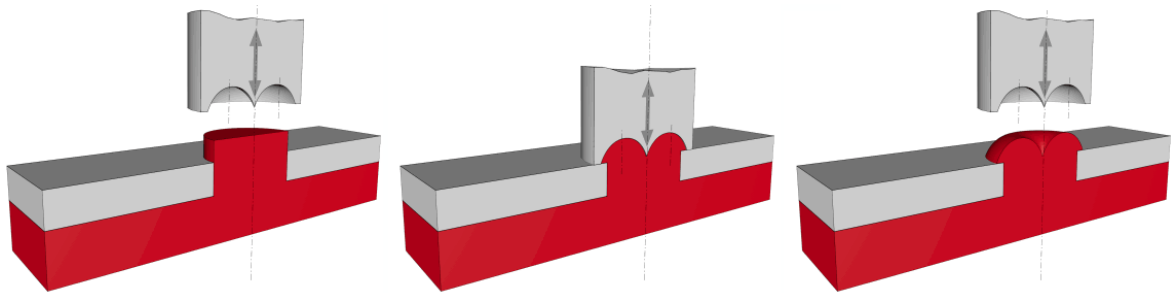
Svařování plastových dílů s využitím fokusace energie, tedy s rychlou inicializací procesu plastifikace spojovaných ploch koncentrací energie. V určitých mezích lze zvolit jakýkoliv tvar nebo rozměr usměrňovače energie. Rozlišujeme následující základní tvary: us-

měřňovač energie ve tvaru kužele nebo smyčky, usměřňovač energie ve tvaru stříšky, hranové kontakty pro jednoduché nebo dvojité smykové spoje. [11]



Obr. 23. Svařování plastových dílů [11]

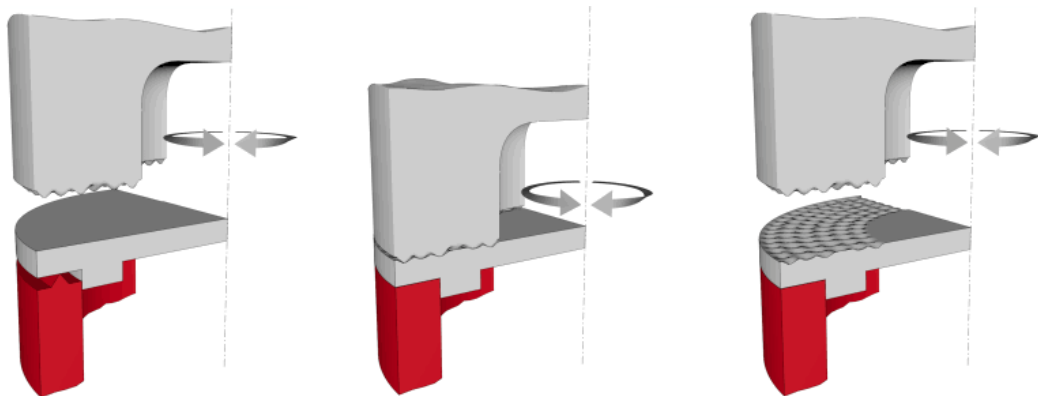
Nýtování termoplastů stejně jako u ultrazvukového svařování je realizováno sonotrodou, která je nositelkou mechanické vibrační energie na nýt. Jedná se o nýtovací nástroj, který je vyroben podle požadovaného provedení nýtu a podle a podle počtu nýtů, které je třeba nýtovat jediným zdvihem. Pomocí jedné sonotrody tedy lze provádět několik nýtování. Přípravky s více hlavami se používají k nýtování velkých součástí (např. palubních desek v automobilovém průmyslu). [11]



Obr. 24. Nýtování termoplastů [11]

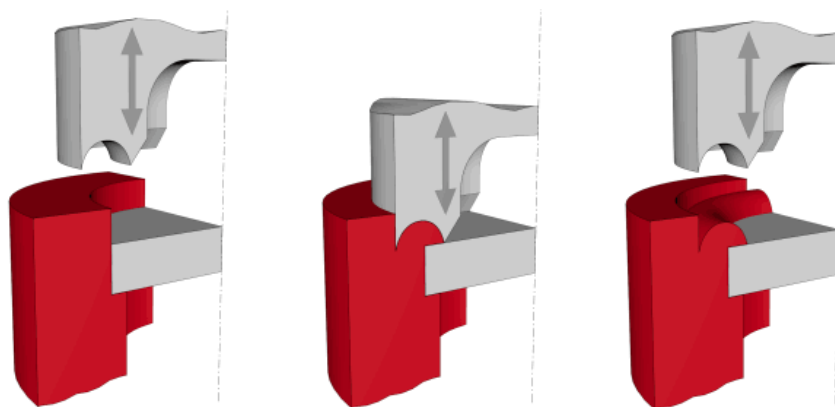
Torzni metoda pro náročné aplikace je naprosto odlišný proces ultrazvukového svařování. Tato metoda představuje druh vysokofrekvenčního svařování, kdy se vibrace aplikují tangenciálně, zatímco sonotroda pohybuje horním spojovaným dílem vodorovně vzhledem ke spodnímu spojovanému dílu. Třením vzniká mezi oběma spojovanými díly tavenina. Vzhledem k tangenciálnímu pohybu horního spojovaného dílu není spodní díl ultrazvukem prakticky namáhán. Proto je tato metoda obzvláště vhodná pro aplikace v místech, kde jsou dodatečné vibrace v blízkém okolí budoucího svaru nežádoucí z důvodu poškození citlivých součástí, fólií, látek, tenkých vstříkovaných komponent (pružiny, síta), elektroniky

atd. Technologie je používána převážně pro svařování kovů, nicméně za určitých okolností lze tuto metodu použít pro spojování plastů. [11]



Obr. 25. Ultrazvukové svařování torzní metodou [11]

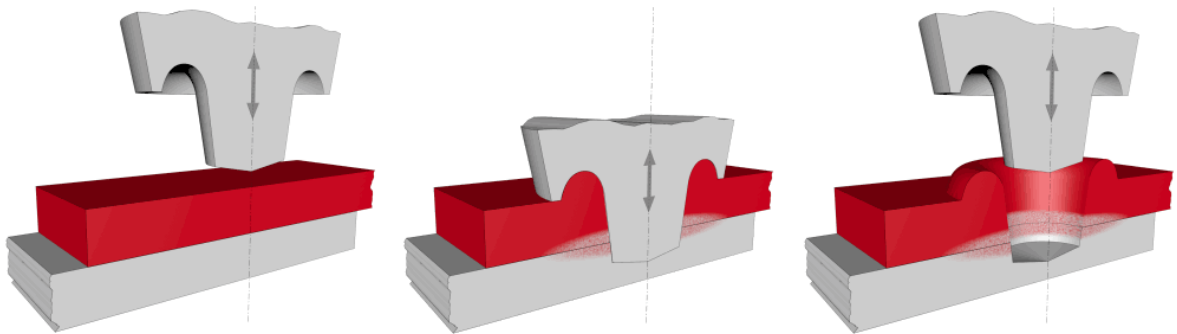
Přírubová spojení termoplastů jsou způsobem, jakým lze plastové komponenty vzájemně spojovat a také kombinovat materiály nejrůznější povahy. Podle prováděné operace je třeba navádět sonotrodu po povrchu obrobku, aby došlo k plastifikaci a vytvarování hran, kolíků, výstupků a jiných spojovacích prvků. Ultrazvukově vyráběné příruby jsou mimořádně hospodárné. Doby zpracování jsou srovnatelné s obvyklými cykly ultrazvukového svařování. Touto technologií lze připojovat také skleněné díly, ovšem je důležité zamezit kontaktu sonotrody se sklem. [11]



Obr. 26. Přírubová spojení termoplastů [11]

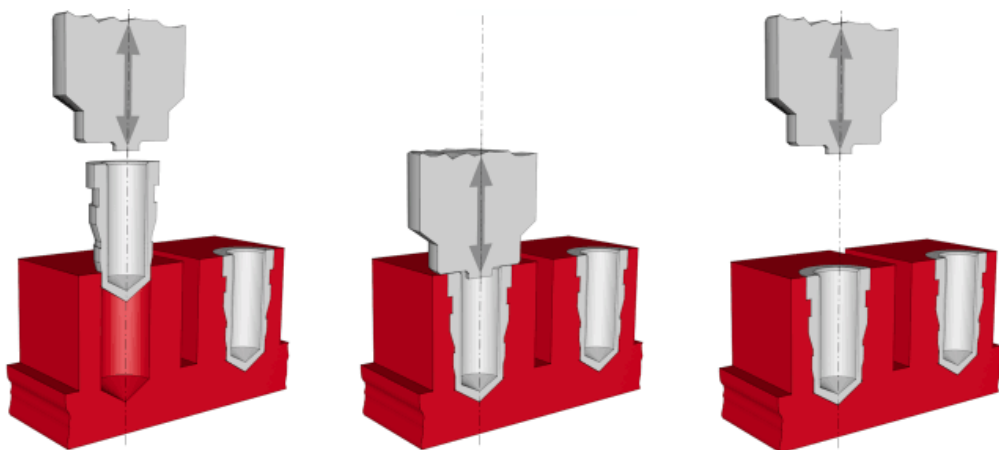
Ultrazvukové bodové svařování se používá v případech, kdy je třeba svařit ploché díly bez přípravy svařovaných ploch (polotovary, tvarované díly, vyfukované díly, vytlačované díly, velkoplošné výstřiky aj.). Hrot sonotrody proniká horním dílem do dílu spodního. Na styčných plochách spojovaných dílů vzniká teplo, a v důsledku toho dochází k plastifikaci a k následnému spojení obou dílů. Vytlačený polymer teče směrem nahoru a vytváří kruhovou vyvýšeninu. Při dostatečné tloušťce spodního dílu by na jeho zadní straně neměly

být patrné téměř žádné známky přítomného svaru. Spojované díly lze vhodným způsobem uchytit pomocí přitlačných a upínacích přípravků. Tloušťka dílu v kontaktu se sonotrodou by neměla překročit 8 mm. Bodové svařování lze provádět také pomocí přenosné ruční ultrazvukové svářečky. [11]



Obr. 27. Bodové svařování ultrazvukem [11]

Ultrazvukové zatavování kovových dílů slouží k vzájemnému pevnému spojení těchto dílů a základního polymeru. Jedná se o kovové díly, jako jsou např. závitové vložky, závrtné šrouby, kluzná pouzdra apod. V závislosti na velikosti a tvaru těchto kovových částí lze dosáhnout vysoké pevnosti v krutu a stability. V případě příznivých výškových rozdílů úrovně sestavení u více dílů je možné v rámci jediné operace zatavit současně několik součástí pomocí sestavy sonotrod, které lze nastavit na různé úrovně spojování. [11]



Obr. 28. Ultrazvukové zatavování kovových dílů [11]

2.9.7 Materiálem podmíněné vlivy

Tvrdé amorfnní polymery, jako např. PC, PS, SAN nebo PMMA, mají příznivé vlastnosti pro přenos ultrazvuku, a to i na větší vzdálenosti. Částečně krystalické polymery, jako

např. PA, PE nebo POM mají vysoký tlumící faktor, který zavedené kmity silně tlumí. Tyto materiály jsou svařitelné jen v bezprostřední blízkosti sonotrody.

Obě skupiny materiálu se liší ve spotřebě energie. Amorfni termoplasty nemají žádný definovaný bod tání. S přibývajícím teplotou přechází oblast svařování do plastického stavu dřívě, než se vytvoří tavenina. Spotřeba specifického tepla, a tedy i přiváděné ultrazvukové energie je relativně malá. Částečně krystalické termoplasty mají definovaný bod tavení a vysokou specifickou spotřebu tepla. Přivedená ultrazvuková energie, a tím svařovací amplituda, musí být proto vyšší než při svařování amorfni termoplastů.

U částečně krystalických termoplastů musí být v některých případech dodržena minimální doba uskladnění 24 hodin po svařování, aby se vyloučilo strukturou podmíněné zbytkové pnutí. Při výrobě podmíněných, např. automatizovaných procesech, kde je vyžadováno okamžité ultrazvukové svaření, jsou díly předehřátý na odpovídající vyšší teplotu. V takovém případě je důležitá kontrola procesu, pro dodržení požadované kvality.

Přidávky plnidel, jako např. dřevěné moučky nebo textilní vlákna, mají na ultrazvukové vlny tlumící účinek a zhoršují tak svařovací proces. Zpevňující látky, jako jsou skleněná vlákna, uhlíková vlákna apod. zvyšují modul pružnosti materiálu, tedy jeho tuhost. Tím je příznivě ovlivněna zvuková vodivost materiálu a v důsledku toho i jeho svařitelnost. Změkčovadla, aditiva, retardéry hoření, pigmenty atd. mohou svařitelnost ovlivnit více či méně. Dekorační vrstvy, jako je lakování nebo metalizace parami, je možno zpravidla provařit. Tvrdě chromované díly však nejsou svařitelné, pokud není spojovací zóna chráněna krycím lakem před poškozením.

U polyamidů má obsah vlhkosti mimořádný význam. Vysoká vlhkost způsobuje odpařování a zhoršuje svařitelnost. Tím je např. znemožněno těsné svařování tvarových dílů, jestliže se vlivem obsahu vlhkosti tvoří během svařování ve svařovací zóně bubliny.

Bezchybná konstrukce dílů je však předpokladem pro vysokou kvalitu ultrazvukového svařování. Zásadně musí být konstrukce dílů, uspořádání spojovací zóny a volba svařovacích parametrů přizpůsobeny vlastnostem materiálů. Pomocí odpovídajících zkušebních svarů (referenčních vzorků) se definují optimální okrajové podmínky pro správný průběh svařovacího procesu. Zejména pak tolerance rozměrů při velkých svařovaných dílech nebo svařování složitými nástroji jsou nejčastěji příčinami chybných svarů v sériové výrobě. Kromě toho mohou kvalitu svarů ovlivňovat dělicí prostředky a nečistoty ve spojovací zóně. [3]

2.9.8 Výhody / nevýhody technologie

Mimo svařování polymerních materiálů lze tuto technologii s výhodou použít k opravě prasklin a porušených nebo jiným způsobem opotřebovaných forem. Široké použití lze také nalézt při konstrukci elektrických přístrojů, domácích spotřebičů, v automobilovém a textilním průmyslu, kde se vyskytují velké výrobní série. Konkrétně sériovost výroby hraje při rozhodování o zařazení uvedené technologie velkou roli, protože pro úspěšné svařování je nutno pro každý spoj na míru vyrobit příslušné nástroje a přípravky. Nutnost výroby jedinečných nástrojů je také prakticky jediná nevýhoda této technologie.

Největšími přednostmi jsou naopak vysoká produktivita (desetiny, maximálně jednotky sekund), čistota a kompaktnost (zařízení zabírá málo místa a nepotřebuje speciálně upravené pracovní prostory, lze jej umístit kdekoliv ve výrobní hale), nenáročnost na připojení (běžné napájení 230 V a přívod tlakového vzduchu), prakticky žádná údržba a v neposlední řadě se nespotřebovává žádný dodatečný materiál. [2]

3 PROBLEMATIKA DĚJŮ PŘI SVAŘOVÁNÍ TERMOPLASTŮ VYBRANÝMI TECHNOLOGIEMI

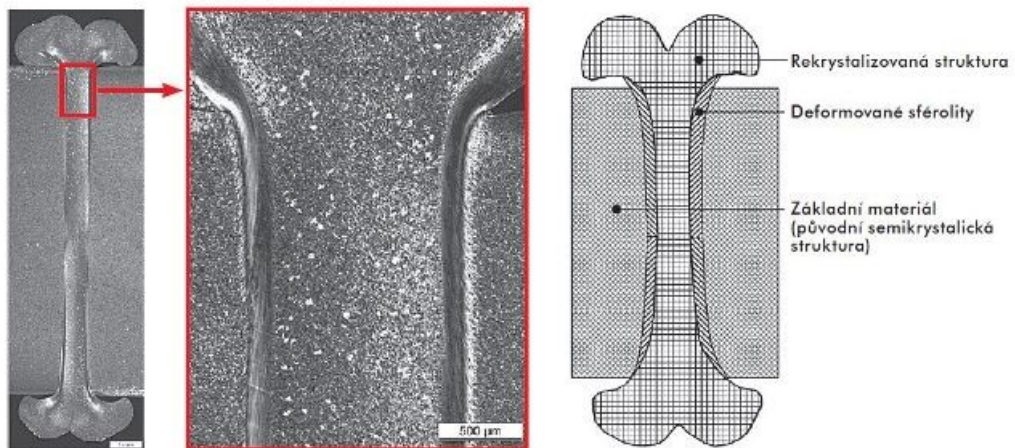
V závislosti na průmyslovém odvětví se často setkáváme například ve stavebnictví se svařováním pomocí extrudéru, topnou spirálou nebo se svařováním horkým tělesem nebo horkým plynem. V automobilovém průmyslu je využíváno vibrační svařování, a také již uvedené svařování horkým tělesem. Svařování ultrazvukové se nasazuje např. u techniky pro medicínu, předpokládá-li se využití svařenců v biologicky aktivních prostředích, kde lepené spoje nedosahují požadované doby životnosti, nebo je z hlediska zdravotní nezávadnosti nelze použít. Technologie využívající k ohřevu svarových ploch záření, jako jsou technologie svařování infračerveným paprskem a technologie laserového svařování, mohou být za určitých předpokladů využity jako alternativy nebo doplnění výše zmíněných technologií. [1]

3.1 Svařitelnost termoplastů

Uvedené a jiné technologie svařování polymerů mohou nabídnout své výhody vždy s ohledem na velikost sérií, svařovaný materiál nebo kombinaci materiálů, geometrii svarové zóny a geometrii svařovaných dílů. Z fyzikálního hlediska jsou všechny zmíněné technologie použitelné výhradně pro svařování termoplastů, nicméně existuje několik výjimek zahrnujících kombinace termoplastů a reaktoplastů za vzniku mechanické vazby mezi svařovanými díly. Obecně jsou všechny termoplasty svařitelné, dokonce i některé jejich kombinace. Nejlepších výsledků je však dosaženo v případě svařování stejných materiálů. Z hlediska nadmolekulární struktury nelze vzájemně svařovat materiály s amorfní strukturou a materiály částečně krystalické. Princip svařování termoplastů je u všech metod stejný, tj. dodat do svarové zóny potřebné množství tepla a za působením tlaku zajistit tok taveniny. [1]

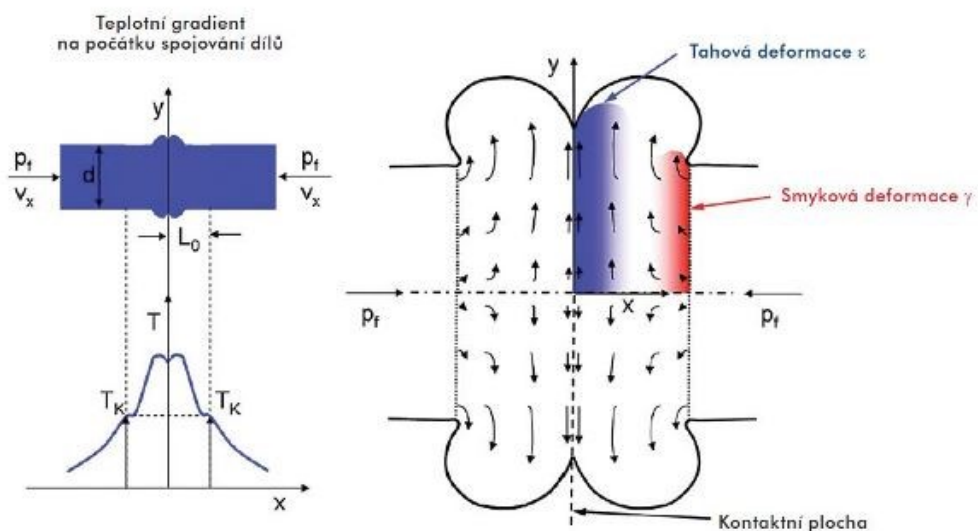
3.2 Svarová zóna

Svarovou zónou rozumíme oblast spojení svařovaných dílů, kde dochází k lokálnímu natavení a následně toku materiálu pod působícím tlakem. V této zóně vznikají při optimálním osově symetrickém spojení dvě charakteristické napěťové oblasti včetně odpovídajících tahových a smykových deformací. [1]



Obr. 29. Mikrotomový řez svarovou zónou semikrystalického termoplastu [1]

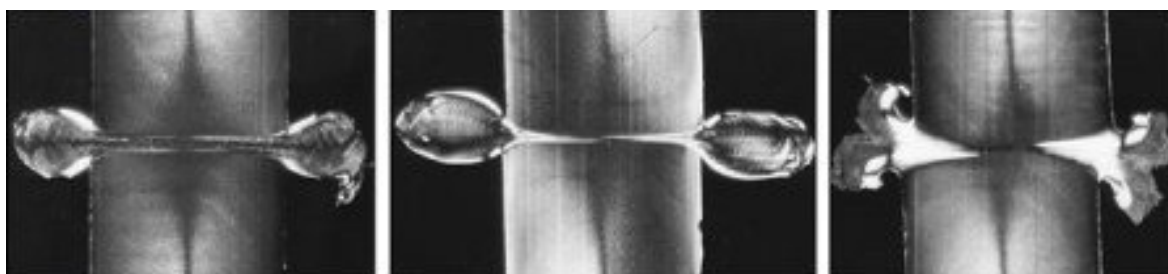
Oblast tahových deformací vzniká v okolí spojení svařovaných dílů. Deformace narůstají od osy symetrie stěny svařovaných dílů, kde jsou nulové. Jejich nestejnornost má za následek rozdílný stupeň orientace makromolekul v místě spojení. Pokud jsou teplota a tlak dostatečné, může dojít k určitému vyrovnání napětí v jednotlivých vrstvách a zároveň ke snížení smrštění, které vzniká tepelnou kontrakcí materiálu. Kritická je ovšem oblast smykových deformací vznikající na přechodu pevného základního materiálu a taveniny. Díky toku taveniny termoplastu kolmo od neutrální osy směrem k okrajovým vrstvám dochází na tomto přechodu k výrazné orientaci makromolekul, které nemohou krystalizovat ve standardních krystalických útvarech (sférolitech) anebo zaujímat energeticky výhodnější postavení v podobě globulí. [1]



Obr. 30. Tepelné a napětové poměry ve svarové zóně [1]

3.3 Parametry svařování a pevnost svarového spoje

Za předpokladu správně provedeného svaru dochází při porušení svařence k lomu v oblastech blízkých smykovým deformacím. Pevnost svarového spoje je určena nejen technologií, ale i typem svařovaného materiálu, přičemž obvykle nedosahuje pevnosti základního materiálu. Pouze v případě neplněných termoplastů a za optimálních procesních podmínek se lze přiblížit pevnosti odpovídající základnímu materiálu. Rozhodující pro napěťové stavy ve svarové zóně jsou podmínky, které jsou nastaveny na svařovacím stroji, resp. takové podmínky, které jsou dané obsluhou svařovacího stroje v případě ručních metod. Velmi vysoké svařovací tlaky enormně zvyšují smyková napětí a zároveň mají za následek zbytečný výtok polymerní taveniny ze svarové zóny. [1]



*Svařovací tlak: 0,5 MPa
Doba svařování: 10 s
Pevnost v tahu: 32 MPa
Tažnost: 7,5 %*

*Svařovací tlak: 2 MPa
Doba svařování: 4 s
Pevnost v tahu: 27 MPa
Tažnost: 3,5 %*

*Svařovací tlak: 8 MPa
Doba svařování: 1 s
Pevnost v tahu: 24 MPa
Tažnost: 2,5 %*

Obr. 31. Svarové zóny zhotovené za různých podmínek [1]

U materiálů plněných vláknou způsobuje napětí vznikající ve svarové zóně silnou orientaci. Jsou-li k sobě vzájemně svařovány díly s orientací vláken kolmou k rovině svarového spoje, dochází jejich vlivem k významnému snížení pevnosti svarového spoje. [1]

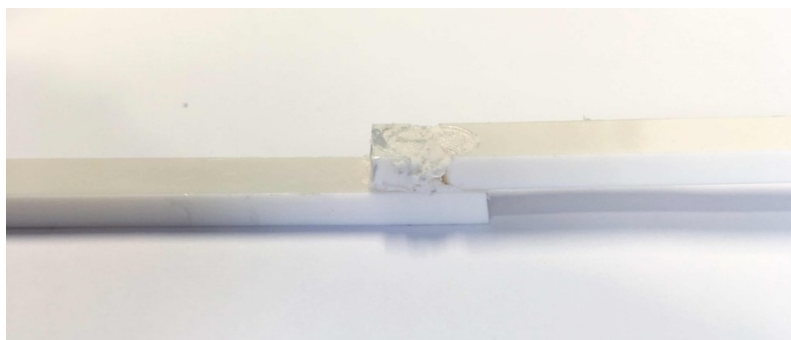
3.4 Vliv historie a podmínek skladování

Mechanické vlastnosti svarových spojů nejsou určeny pouze tepelnými a tlakovými podmínkami v oblasti svarových zón. Rozhodující pro kvalitu svarového spoje je také historie dílu, tzn. jakou technologií a při jakých parametrech byly svařovány díly vyrobeny a při jakých podmínkách byly tyto díly před svařením skladovány. U navlhavých plastů je důležitá výchozí vlhkost dílu, která se může projevit porézni strukturou nebo hydrolyzou materiálu ve svarové zóně. Nelze také zanedbat účinky fotooxidace (působení kyslíku a UV záření) a dalších kombinací fyzikálních a chemických dějů. Především u citlivých metod, jako je například ultrazvukové svařování, mohou drobné odchylky vstříkovaných dílů

(např. modul pružnosti materiálu ovlivněn různými parametry fáze dotlaku) způsobovat kolísání pevnosti svaru, přestože opakovatelnost spoje je na velmi dobré úrovni. [1]

3.5 Rizika technologie ultrazvukového svařování

U dílů s vyšším modulem pružnosti může při nevhodném nastavení svařovacího tlaku dojít k poškození svařovaných dílů vlivem mechanických kmitů působících kolmo k rovině svaru. V tomto případě musí být toto kmitání přeneseno přímo do svarové zóny. V případě, že tomu tak není, nástroj poškodí kontaktní plochu svařovaného dílu a také může dojít k poškození vnitřní struktury materiálu, což vede ke snížení pevnosti svařence. Při pevnostních zkouškách potom dochází k lomu mimo svarovou zónu. Toto bývá mylně interpretováno jako svarový spoj s pevností vyšší než základní materiál. V tomto ohledu se zdají být výhodné stroje, které umožňují variabilní nastavení rychlosti nebo síly v závislosti na dráze, resp. na čase. [1]



Obr. 32. Materiál poškozený silnými kmity a velkým svařovacím tlakem

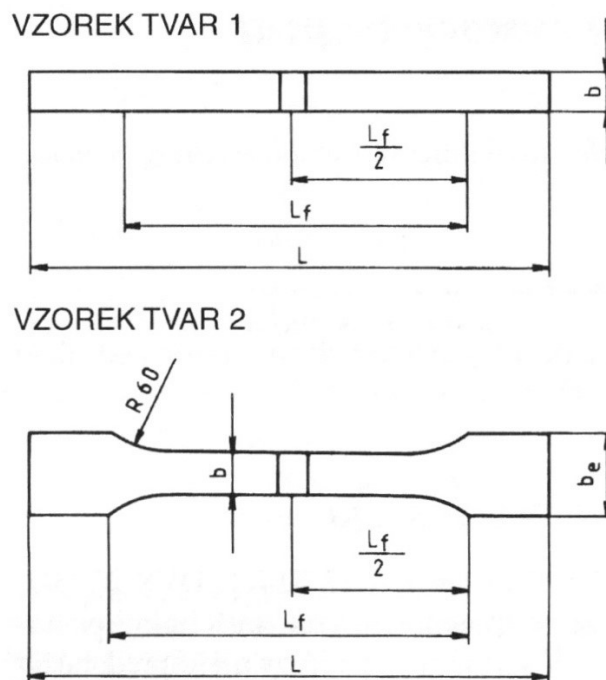
4 POSUZOVÁNÍ PEVNOSTI SVAROVÝCH SPOJŮ

Vyřezané a obrobené vzorky se svary porovnáváme s etalony téhož základního materiálu. Zkušební postupy obecně rozdělujeme na destruktivní a nedestruktivní. Destruktivní a nedestruktivní zkušební postupy svarových spojů jsou podrobně rozpracovány v rámci daných norem a směrnic. [12]

4.1 Destruktivní zkušební postupy

4.1.1 Zkouška tahem

Tahová zkouška je krátkodobá zkouška dle ČSN 05 6821 (EN 12 814-2, DIN 53 455), která často bývá prováděna současně s jinými zkušebními postupy pro posuzování svařovaného spoje. V každém případě by mělo předcházet vizuální posouzení svaru před zahájením samotné zkoušky. Tvary a rozměry zkušebních těles jsou uvedeny níže. [12]



Obr. 33. Tvary vzorků pro tahovou zkoušku [12]

Tab. 1. Rozměry zkušebních těles [12]

Tloušťka h [mm]	VZOREK TVARU 1 [mm]			VZOREK TVARU 2 [mm]			
	b	L_f	L	b	L_f	L	b_e
≤ 10	15	120	≥ 170	10	115	≥ 170	20
> 10	30	120	≥ 300	30	115	≥ 300	40
> 20	1,5 h	200	≥ 400	1,5 h	200	≥ 400	80

Při tahové zkoušce se zkušební tělesa protahují až k přetržení a zjišťují se síly k tomu potřebné. Jestliže se vztahy mezi silou a změnou délky zakreslují pomocí zapisovacího přístroje, obdrží se tzv. diagram síla/změna délky, který se musí pro vyhodnocení převést na diagram napětí/protažení.

Z poměru síly při přetržení svařovaného vzorku F_v k síle při přetržení nesvařovaného srovnávacího vzorku F_B lze vypočítat krátkodobý svařovací faktor f_z :

$$f_z = \frac{F_v}{F_B}$$

Při prodloužení vzorků před dosažením síly při přetržení se jako vztažná veličina při výpočtu krátkodobého faktoru dosazuje místo F_v a F_B příslušná síla na mezi kluzu.

Dojde-li u vzorku tvaru 1 k lomu v upínací části, použije se tvar vzorku 2. Vzorky, které prasknou v upínací části, se nevyhodnocují.

Zkouška probíhá podle praktického nasazení se svařovacím výronkem nebo bez svařovacího výronku. Zkouší se nejméně pět svařených a pět nesvařených (porovnávacích) vzorků. Pokud není dohodnuto jinak, provedou se všechny zkoušky v normovaném klimatu.

Žádoucí je porušení vzorků ve svaru. Pokud se porušení ve svaru u vzorkových těles podle obrázku nedosahuje, použijí se vzorky s okrouhlým otvorem např. průměru 3 mm. V tomto případě je třeba kruhovými otvory (vruby) opatřit také srovnávací vzorky. Zkoušky ukázaly, že u vzorků bez okrouhlého vrubu je možné pouze posouzení typu „dobrý – špatný“. Naproti tomu u vzorků s okrouhlým vrubem je možná diferencovaná výpověď o kvalitě spojení. Platí empirické pravidlo pro průměr otvoru = 0,3 x šířka vzorku (zvolený průměr nezávisí na tloušťce vzorku). Při obou zkušebních variantách se provádí následně vizuální posouzení lomu.

Ze vzorkovacích těles rozdílné tloušťky se vztáhne síla na součin $b \times h$ (šířka vzorku \times tloušťka vzorku, měřený ve středu vzorku, příp. těsně vedle svaru). Vychází pak krátkodobý svařovací faktor:

$$f_z = \frac{F_v}{F_B} \cdot \frac{b_B \cdot h_B}{b_v \cdot h_v}$$

kde: index v: svařený vzorek

index B: srovnávací vzorek

Potom výsledný krátkodobý svařovací faktor f_z musí odpovídat minimálním požadovaným hodnotám pro daný materiál. Příklady krátkodobých tahových svařovacích faktorů pro některé materiály svařené danou technologií jsou uvedeny v následující tabulce. [12]

Tab. 2. Požadavky na krátkodobý tahový svařovací faktor [12]

Technologie svařování	Krátkodobý tahový svařovací faktor f_z				
	PE-HD	PP	PVC-C	PVC-HI PVC-U	PVDF
Svařování horkým tělesem	0,9	0,9	0,8	0,9	0,9
Extruzní svařování	0,8	0,8	-	-	-
Svařování horkým plynem	0,8	0,8	0,7	0,8	0,8

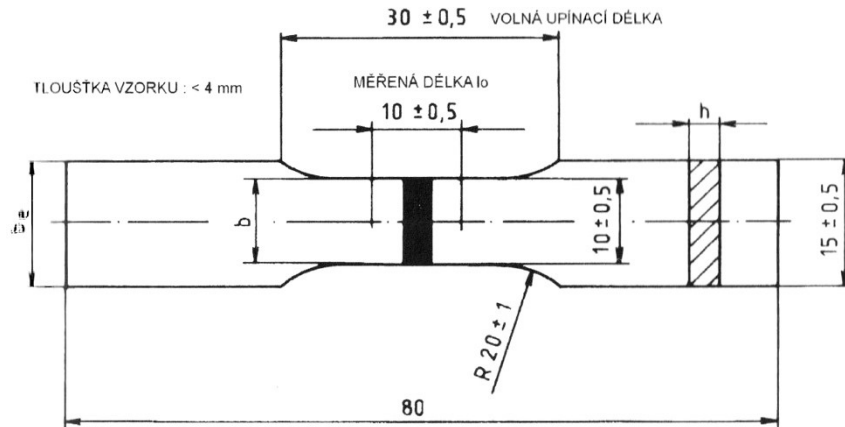
Krátkodobé svařovací faktory platí pouze pro stavební díly, jejichž praktická doba nasazení nepřesahuje jednu hodinu. Pro hodnocení svařovaných rozvodů a konstrukcí pro delší použití se musí vycházet z dlouhodobých svařovacích faktorů, které vychází z dlouhodobých zkoušek.

Samotná tahová zkouška nestačí k posouzení kvality svařovaného spoje. Doporučují se proto další krátkodobé zkoušky. Srovnání poznatků získaných z pokusů dovoluje výpověď o profilu vlastností dotyčného svařovaného spojení v krátkodobém zatížení.

Aplikace na dlouhodobé chování, zakládající se na výsledcích krátkodobého tahového pokusu, nejsou možné (viskoelasticita!). Ostatně vstupují do příslušného vzorce pro krátkodobý svařovací faktor pouze tahové síly příp. tahové napětí, ne však právě u plastických hmot důležitá odpovídající protažení. [12]

4.1.2 Rázová tahová zkouška

Tato zkouška dle ČSN 05 1160 (EN 12814-7, DIN 53448) může být provedena společně s jinými zkouškami k posouzení krátkodobé, rázové deformace, a tím kvality svařovaného spojení. Opět předchází vizuální posouzení svaru. Jako v případě tahové zkoušky se používají vzorky dle norem buď se svarovým výronkem, nebo bez. Vzhledem k tomu, že měření má relativně velký rozptyl, se pro větší statistickou jistotu použije nejméně 10 svařovaných a srovnávacích vzorků. [12]

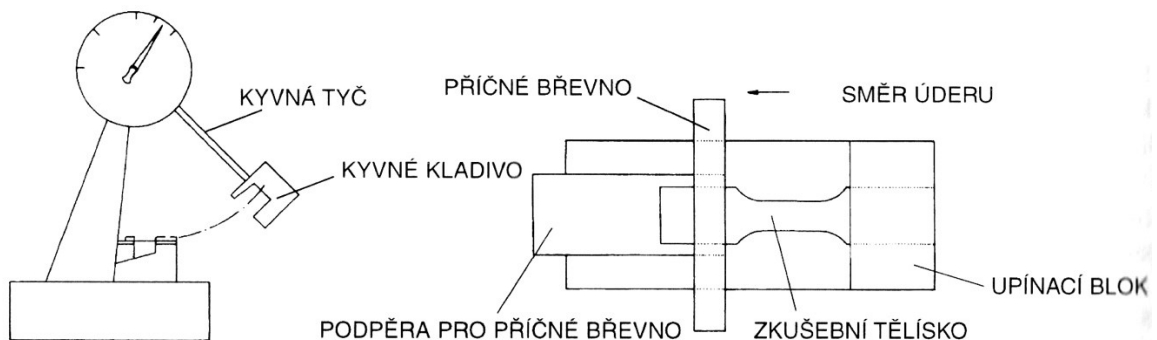


Obr. 34. Zkušební těleso pro rázovou tahovou zkoušku [12]

Tahové namáhání působí rázem (náhle). Dojde-li při tom k lomu jinde než v oblasti svaru, doporučuje se použít vzorků s kruhovým otvorem. Toto opatření umožňuje lepší rozlišení rozdílných jakostí svarů.

Pokud nebylo dohodnuto jinak, zkouška se provádí v normálním klimatu na kyvadlovém rázovém přístroji třídy 1 pro rázové ohybové zkoušky. Kyvadlový přístroj má dodatečně zařízení pro rázové tahové zkoušky. Volba kyvadlového rázového přístroje a rázového kyvadla je závislá na zkoušeném materiálu a tloušťce vzorku. Obecně platí, že korigovaná rázová práce by se měla pohybovat mezi 20 a 80 % maximální rázové práce kyvadlového kladiva. Kladivo střetne vzorek na nejnižším položeném bodě své kruhové dráhy, současně dvěma úderníky.

Analogicky jako u rázové ohybové zkoušky se zjišťuje energie (práce) nutná pro přetržení vzorku. Práce odečtená na unášeném kotouči zahrnuje vedle této práce rázově tahové, také tzv. nadbytečnou práci, která musí být vynaložena na odhození příčného břevna a části vzorku. Proto se tato hodnota musí korigovat. [12]



Obr. 35. Kladivo pro rázovou tahovou zkoušku [12]

Na základě korigovaných rázových prací pro svařované vzorky W_{zV} a porovnávací vzorky W_{zB} se vypočítá krátkodobý svařovací faktor f_{sz} pro rázovou tahovou zkoušku:

$$f_{sz} = \frac{W_{zV}}{W_{zB}}$$

U zkušebních vzorků rozdílné tloušťky a šířky se rázová práce vztahuje na součin šířky vzorku a tloušťky vzorku. Potom pro vzorky rozdílné tloušťky platí:

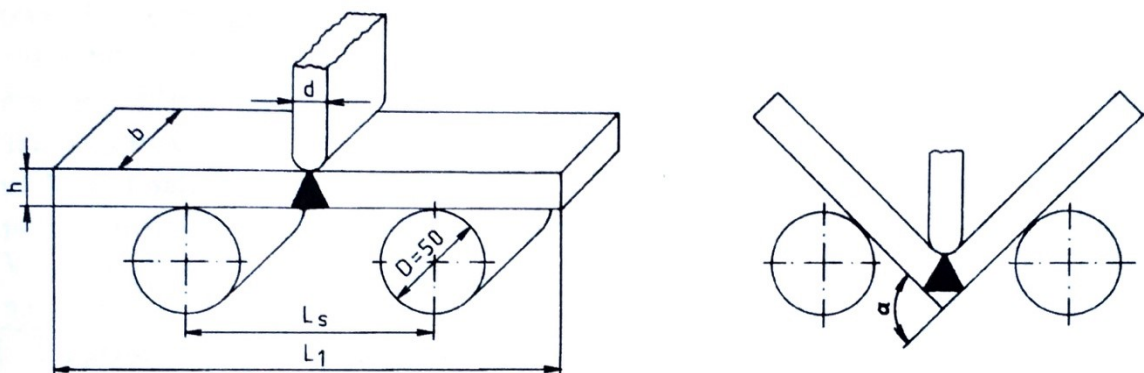
$$f_{sz} = \frac{W_{zV}}{W_{zB}} \cdot \frac{b_B \cdot h_B}{b_V \cdot h_V}$$

4.1.3 Zkouška ohybem

Zkoušky svarových spojů termoplastů popisují normy ČSN 05 6822 a ČSN 05 6823, nově pak norma EN 12 814-1 bude obdobou normy DIN 50 121. Ve spojení s jinými zkouškami přináší výpověď o jakosti svařovaných spojů desek a trubek.

Zkouška je vhodná pro vzorky do tloušťky 30 mm. Rychlost posuvu ohýbacího razníku je např. 50 mm/min pro PE-HD. Určuje se úhel, při kterém zkušební těleso praskne nebo dojde k úplnému lomu, případně se stanovuje dráha, kterou urazí ohýbací razník až do doby vzniku trhliny nebo úplného lomu. Minimální přípustný ohybový úhel je dán normou.

Na následujícím obrázku je schematicky znázorněna poloha zkušebního vzorku před zahájením a na konci zkoušky s vyznačenými veličinami ohybového úhlu a ohybové dráhy. [12]



h – tloušťka vzorku, b – šířka vzorku, L_1 – celková délka vzorku, L_s – vzdálenost podpěrných válečků, α – ohybový úhel, d – tloušťka ohýbacího razníku, D – průměr podpěrných válečků

Obr. 36. Schéma uspořádání technologické ohybové zkoušky [12]

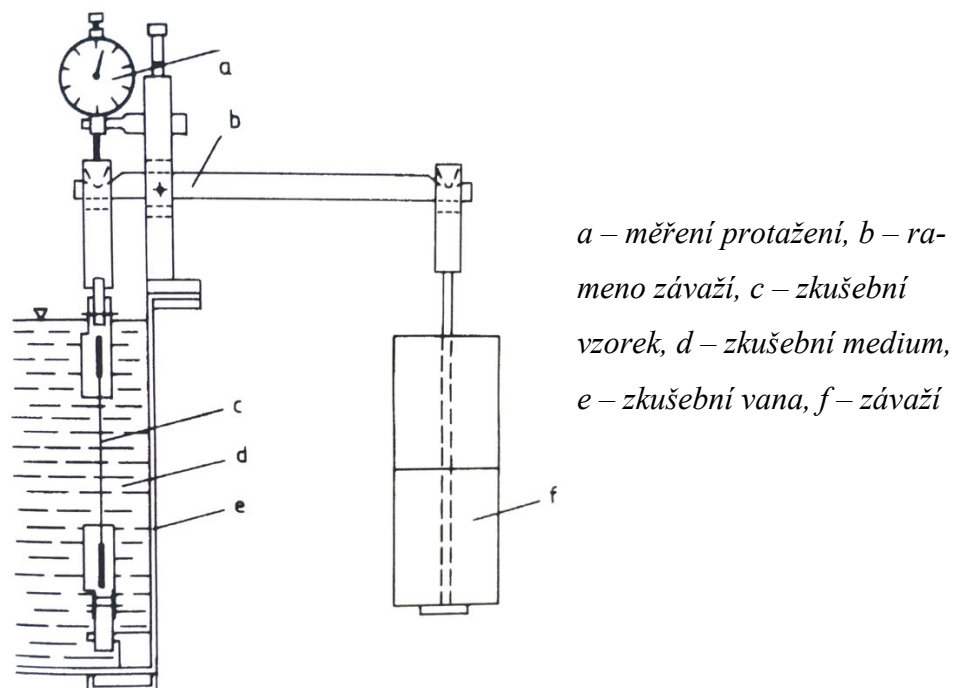
4.1.4 Dlouhodobá tahová zkouška

Dlouhodobá tahová zkouška vypovídá o dlouhodobé pevnosti svařovaných spojů podle ČSN 05 1162 (EN 12 814-3, DIN 53 444). Zkušebním prostředím (zkušební médium) bývá vzduch nebo voda. Použitím médií uvolňujících napěťové trhlinky (smáčedla) lze dosáhnout zkrácení doby trvání zkoušky. Při tom je třeba dbát na použití takových smáčedel, které nemohou způsobit žádné chemické změny zkoušeného polymeru.

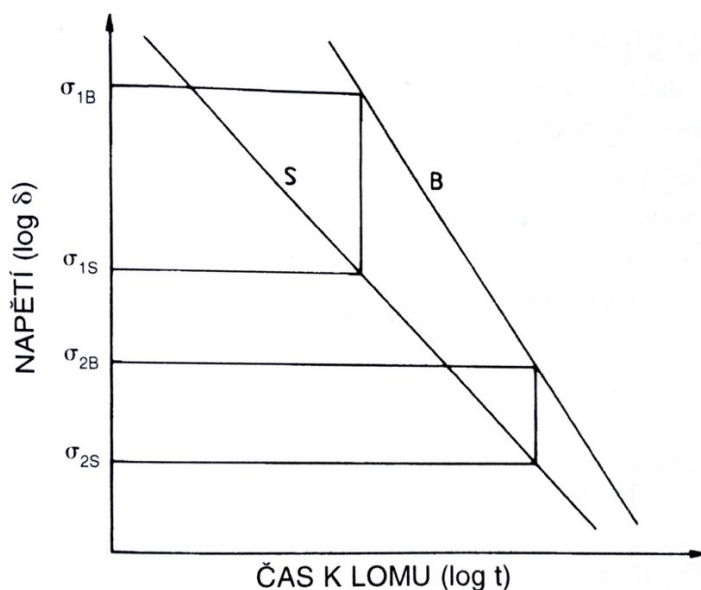
Zkouška je prováděna jako retardační, tzn. že napětí zůstává konstantní (hmotnost závaží se nemění). Měří se doba k dosažení lomu nebo odpovídajícího protažení v oblasti svaru. Podle praktického nasazení se volí: zkušební teplota, zkušební médium, provedení vzorku (se svařovacím výronkem nebo bez).

Zkušební závaží určuje napětí působící v průřezu vzorku. Zkušební síla se při zahájení zkoušky zavádí pozvolna (bez rázů) během 3 až 5 s a v průběhu zkoušky je udržována konstantní. Pro každou úroveň napětí se zkouší nejméně 6 svařených a 6 porovnávacích zkušebních vzorků. Svar se nachází uprostřed vzorku kolmo na směr působící síly.

Tvary a rozměry vzorků se volí analogicky ke krátkodobé tahové zkoušce. Výsledky zkoušky se zanáší do diagramu v logaritmickém znázornění. Protože přímka je jednoznačně definovaná, je-li proložena dvěma body, musí se zkoušet zatížením nejméně o dvou různých úrovních. [12]



Obr. 37. Schéma uspořádání pro dlouhodobou tahovou zkoušku [12]



S – svařované vzorky, *B* – srovnávací vzorky

Obr. 38. Schematické znázornění definice dlouhodobého svařovacího faktoru [12]

Křivky dlouhodobého chování se objevují jako přímky pro svařované (index S) tak i porovnávací (index B) vzorky a často se vyznačují různými sklony. Z toho vyplývají na čase závislé rozdílné dlouhodobé svařovací faktory. Pro určení dlouhodobých svařovacích faktorů se z diagramu zjišťují napětí σ_S a σ_B vzhledem ke zvolenému času. Potom dlouhodobý tahový svařovací faktor f_S bude:

$$f_S = \frac{\sigma_S}{\sigma_B}$$

Tento podíl je časově nezávislý (konstantní), jestliže obě přímky probíhají vzájemně paralelně. Další jakostní kritérium pro svařované spoje je oblast rozptýlu jednotlivých časových zlomků u každé oblasti napětí. Poloha přímek určená dvěma body představuje zjednodušené řešení, tedy poloha přímek je tím přesnější, čím více je k dispozici měřených bodů $\sigma_{(t)}$. Protože není k dispozici nekonečný počet měřených bodů, z ekonomického hlediska se pro přesnější určení polohy přímek používají regresní výpočty na základě 5 bodů. [12]

Tab. 3. Požadavky na dlouhodobý tahový svařovací faktor [12]

Technologie svařování	Dlouhodobý tahový svařovací faktor f_S				
	PE-HD	PP	PVC-C	PVC-HI PVC-U	PVDF
Svařování horkým tělesem	0,8	0,8	0,6	0,6	0,6
Extruzní svařování	0,6	0,6	-	-	-
Svařování horkým plynem	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4

4.2 Nedestruktivní zkušební postupy

4.2.1 Vizuální kontrola

Vizuální kontrola svařovaného spoje představuje jednoduché, ale neopominutelné opatření, které zajišťuje jakost posuzováním dle EN 13100-1 (DIN 32 502). Tato norma doporučuje posuzování svarů na základě daných zkušebních kritérií. Následující zkušební kritéria lze použít obecně:

- U PP a PE musí být při svařování horkým plynem znatelný výronek na přechodu k základnímu materiálu, který musí být hladký, bez bublin.
- Nepřípustné jsou vruby mezi výronky.
- Příliš vysoké svařovací teploty jsou indikovány viditelnými lesklými okrajovými pásy.
- Svary s patrnými prasklinami, vadnými místy, vměstky, černým zbarvením případně s termickým rozkladem se vylučují.
- Skutečné provedení a poloha svaru jakož i použitý svařovací postup musí souhlasit s údaji výkresu.
- Dobré svary lze poznat podle stejnoměrného prostupu svařovaného materiálu po celé délce svaru. [12]

4.2.2 Zkouška ultrazvukem

Pro zkoušky svarových spojů termoplastů nejsou zavedeny samostatné normy, nicméně lze obecně aplikovat normy pro zkoušky svarů kovů ČSN EN 1712, ČSN EN 1713, ČSN EN 1714.

Zkoušení ultrazvukem představuje nedestruktivní postup stanovení chybných míst ležících pod povrchem, jako jsou staženiny, vměstky, póry aj. Zachycuje se při tom celý průřez vzorku. Podle postupů zkoušek se rozeznává: postup s pronikáním ultrazvukových vln, postup impulzní ozvěnový. [12]

4.2.3 Zkouška rentgenem

Prozáření rentgenem je od počátku tohoto století známý postup nedestruktivního zkoušení materiálu. Jedná se o záření krátkovlnného spektra o vlnové délce 50 až 0,01 nm. Oproti viditelnému světlu má krátkovlnné záření mnohem vyšší energii, proto snadno proniká tuhými tělesy. Chybná místa v objemu tělesa jsou tímto postupem snadno prokazatelná.

4.3 Definice chyb svarových spojů

Pro posuzování chyb a vad svarových spojů není v České Republice zavedena žádná norma, která by umožnila obecně platné ohodnocení svarů vzhledem k odstupňovaným požadavkům na jakost a zřetelnou definici chyb. Toto hodnocení pro svařování termoplastů je založeno na definici stanovené v DIN 32 502. Chyby se podle DIN 32 502 rozdělují do šesti skupin:

Skupina chyb 1 – trhliny (mikrotrhliny, podélné a příčné trhliny, rozvětvené trhliny, nahromadění trhlín).

Skupina chyb 2 – dutiny (pór, skupina pórů, poréznost, podélné póry, povrchové póry, bubliny, staženiny).

Skupina chyb 3 – pevné vměstky (cizí látky ve svaru, oxidovaný materiál ve svaru, složky rozkladných produktů ve svaru).

Skupina chyb 4 – chyby spojení a nedostatečné provaření (např. nedostatečná vazba mezi svarem a základním materiálem).

Skupina chyb 5 – tvarové chyby (vruby ve svaru, přetok materiálu, zvlnění svaru).

Skupina chyb 6 – ostatní chyby (rozměrové odchylky svarů, tepelné poškození svarů).

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 STANOVENÍ CÍLŮ PRAKTICKÉ ČÁSTI

Cílem praktické části této diplomové práce je hodnocení pevnosti svařovaných termoplastických dílů. Zkušební vzorky různých polymerních materiálů (termoplastů) budou svařeny vybranou technologií (v tomto případě ultrazvukem) a následně budou tyto vzorky podrobeny tahové zkoušce. Svařované vzorky budou jak stejného materiálu, tak i kombinací materiálů odlišných. Výsledná pevnost svařovaných vzorků bude v některých případech porovnána také s pevností výchozích (nesvařených) vzorků téhož materiálu, což umožní stanovit míru ztráty pevnosti vůči pevnosti výchozího materiálu. Vzájemným porovnáním zkušebních vzorků lze také určit vliv některých faktorů (např. volba svařovaného materiálu, volba svařovacích procesních parametrů atd.) na pevnost svarového spoje.

Aby bylo možné připravit zkušební vzorky požadované jakosti, je nutné zvolit, případně zkonstruovat adekvátní nástroje a zařízení, které umožní opakovatelnost daných podmínek procesu svařování.

Při hodnocení experimentu budeme vycházet z teoretických předpokladů, které vyplývají z FEM analýzy konkrétních případů spojení. Tato analýza bude probíhat v aplikaci COSMOS/M. Výsledky FEM analýzy lze na závěr porovnat s výsledky skutečného experimentu.

Vytyčíme-li cíle experimentu v jednoduchých bodech, potom náplní experimentální části diplomové práce bude:

- Výběr a příprava materiálu.
- Volba a konstrukce vhodných nástrojů a zařízení.
- Experimentální svařování ultrazvukem.
- Provedení tahové zkoušky u svařených a porovnávacích zkušebních vzorků.
- Vypracování FEM modelů konkrétních případů svařování.
- Zpracování a vyhodnocení výsledků.

6 POUŽITÉ NÁSTROJE A ZAŘÍZENÍ

V této kapitole jsou uvedeny a charakterizovány nástroje a zařízení, které byly použity v rámci experimentu, tj. výroba upínacího přípravku pro zajištění vzájemné polohy svařovaných částí, ultrazvukové svařování zkušebních těles pro zkoušku tahem a následné provedení tahové zkoušky pro získání informací vypovídajících o pevnosti zhotovených svarů.

6.1 Zařízení pro svařování ultrazvukem

Pro svařování zkušebních těles byla použita ruční ultrazvuková svářečka **Herrmann HSG**. Jedná se o přenosnou svářečku navrženou pro svařování výrobků menších rozměrů. Zařízení je ideální pro různé aplikace, jako např. bodové svařování. Toto zařízení také umožňuje připojení tlakového vzduchu, jehož nuceným prouděním v oblasti sonotrody je zajištěno její aktivní chlazení.

Generování elektrických impulzů o vysoké (ultrazvukové) frekvenci pro řízení ultrazvukové svářečky zajišťoval ultrazvukový generátor **Herrmann 1000 M CV**.

Hliníková sonotroda má kontaktní část kruhového tvaru s mírně zvrásněným povrchem a je použitelná do frekvence 35 kHz.

Kompletní ultrazvukové zařízení bylo zapůjčeno od firmy PLASTIKA a.s.



Obr. 39. Použité zařízení pro svařování ultrazvukem

6.2 Svařovací přípravek

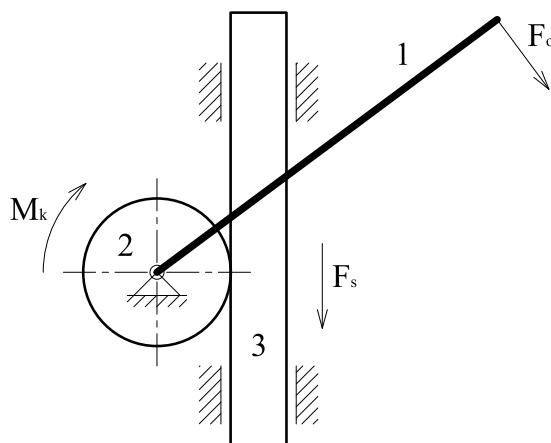
S ruční svářečkou Herrmann HSG nelze za běžných podmínek docílit pokaždé stejných svařovacích podmínek, protože především velikost přitlačné síly je závislá na obsluze. Každý svar je tedy jedinečný a rozdíly v jakosti jednotlivých svarů záleží na zručnosti a zkušenostech obsluhy.

Svařovací přípravek, k němuž je svářečka Herrmann HSG pevně připevněna pomocí objímky, umožňuje nastavení požadované přitlačné síly a zároveň tak zajistí stejnou přitlačnou sílu pro každý svar. Tedy každý svar je vytvořen za velmi podobných podmínek.



Obr. 40. Svařovací přípravek

Přitlačná síla je vyvozena silou působící na rameno momentového klíče a skrze ozubený převod, který převádí otáčivý pohyb na přímočarý, je přenesena do požadovaného působišť. Tedy výsledná síla, kterou působí sonotroda na svařovaný materiál je dána mezním momentem nastaveným na momentovém klíči **1** a převodovým poměrem soustavy ozubeného kola **2** a ozubeného hřebenu **3**.



Obr. 41. Schéma převodu svařovacího přípravku

Protože výsledná svařovací síla je ovlivněna mechanickým převodem a také samotnou vahou pohyblivé části přípravku včetně instalované svářečky, je třeba tuto sílu stanovit na základě přepočtu. Přepočet vychází uvedeného zjednodušeného schématu převodové části svařovacího přípravku.

Zdánlivou svařovací sílu F_{sz} lze určit na základě mezního kroutícího momentu M_k nastaveného na momentovém klíči, jenž otáčí ramenem o délce odpovídající poloměru r ozuběného kola ($r = 26 \text{ mm} = 0,026 \text{ m}$), tedy:

$$M_k = F_{sz} \cdot r \Rightarrow F_{sz} = \frac{M_k}{r}$$

Přestane-li obsluha působit na momentový klíč silou F_o , zjistíme, že svařovací síla F_s není nulová, což je způsobeno vlastní tíhou pohyblivé části přípravku. Tato počáteční síla byla označena F_p a lze ji stanovit jako součin hmotnosti pohyblivé části přípravku m_p (uvažují $m_p \approx 3,6 \text{ kg}$, včetně svářečky) a tíhového zrychlení g (uvažují $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$):

$$F_p = m_p \cdot g$$

Potom reálná svařovací síla F_s je dána součtem zdánlivé síly F_{sz} a počáteční síly F_p :

$$F_s = F_{sz} + F_p = \frac{M_k}{r} + m_p \cdot g$$

Protože svařovací síla F_s je přímo úměrná kroutícímu momentu M_k , tedy momentu nastavenému na momentovém klíči, lze výše uvedený přepočet zjednodušit na základní tvar lineární funkce:

$$y = kx + q$$

$$\text{kde: } y = F_s; k = \frac{1}{r}; x = M_k; q = F_p$$

Po dosazení a úpravě je výsledná svařovací síla F_s dána zjednodušeným přepočtovým vztahem:

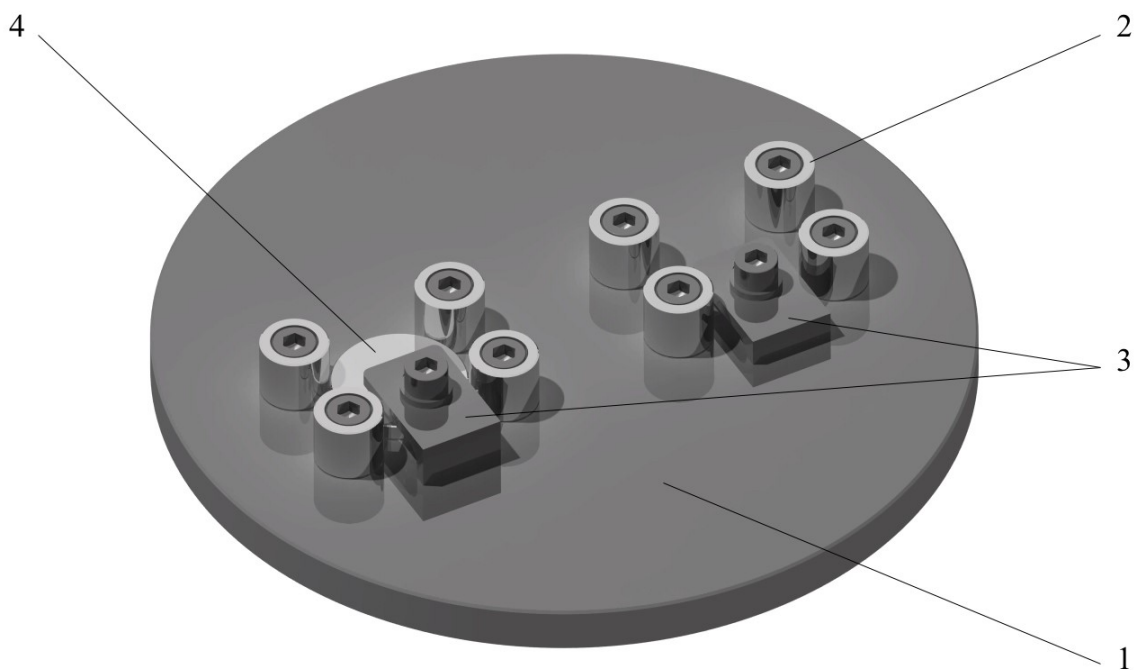
$$\boxed{F_s = 38,5 M_k + 35,3}$$

6.3 Přípravek pro zajištění polohy vzorků během svařování

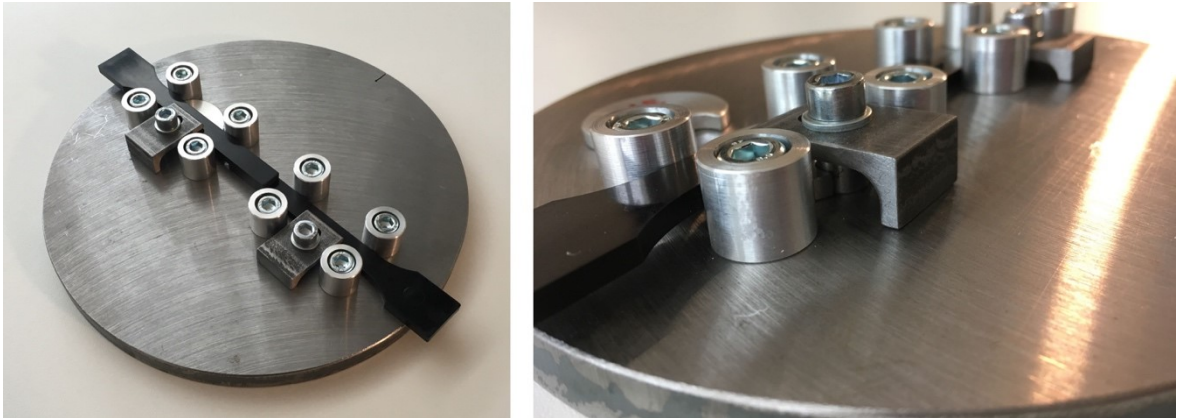
Protože ultrazvukové vibrace sonotrody, spolu s působící přitlačnou silou, způsobují vzájemný pohyb dvou nezajištěných svařovaných částí zkušební tělesa, bylo nutné navrh-

nout a zkonstruovat upínací přípravek. Tento přípravek umožní pevné zajištění svařovaných částí zkušebního tělesa proti pohybu, tzn. především v příčném a podélném směru. Přípravek také zajišťuje souosost svařovaných částí, která je důležitá, mimo jiné, z hlediska správného chování zkušebního tělesa během tahové zkoušky a tím také získání vypovídajících výsledků o pevnosti svarového spoje.

Byl tedy zhotoven přípravek, který je znázorněn na následujícím obrázku. Základní kruhová deska přípravku **1** je z oceli a je opatřena otvory se závitem, které slouží k montáži upínacích, středících a opěrných prvků. Vzájemnou polohu svařovaných částí definují opěrné válečky **2**, které jsou opatřeny otvory s vůlí, čímž je umožněno jejich přené nastavení, resp. nastavení prostoru pro vkládání svařovaných částí. Hlavním důvodem použití nastavitelných opěrných prvků (válečků) je možnost vkládání vstříkovaných zkušebních těles s minimální vůlí, jejichž rozměry jsou do určité míry ovlivněny materiálovými vlastnostmi a procesními podmínkami vstříkování. Pevné uchycení, a především zajištění svařovaných částí vůči osovému pohybu je realizováno pomocí upínek **3**, jejichž utažením vzniká mezi upínacími plochami a upínanými tělesy dostatečné tření, které brání tomuto pohybu. Protože se jedná o přeplátovaný spoj, je nutné výškově nastavit jednu svařovanou část zkušebního tělesa vůči druhé, a to o jednu její tloušťku. K tomuto slouží distanční podložka **4**, jejíž výška odpovídá tloušťce výchozího zkušebního tělesa. Výkresy sestavy a dílčích součástí upínacího přípravku jsou obsaženy v příloze.

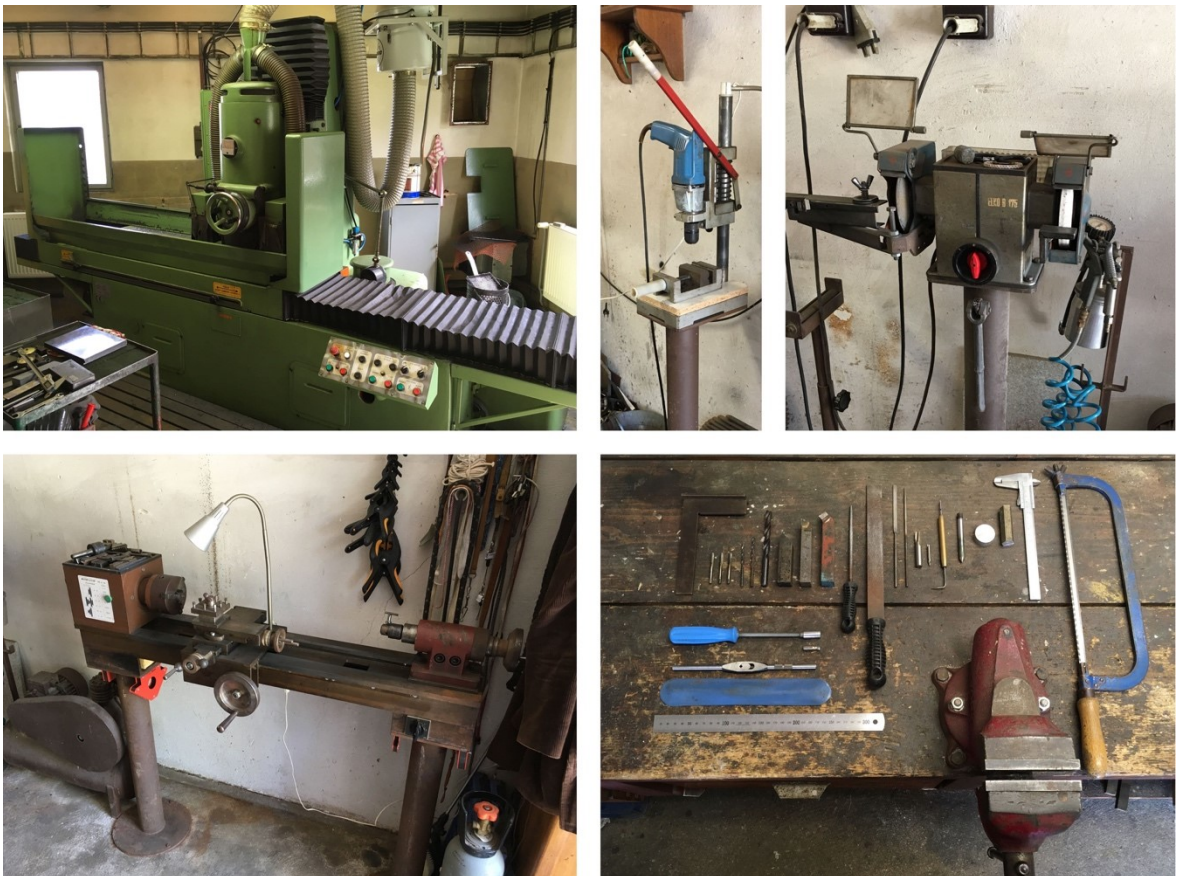


Obr. 42. 3D model upínacího přípravku



Obr. 43. Hotový upínací přípravek

Funkční plochy ocelové základny upínacího přípravku byly broušeny na rovinné brusce BPV 300/1000, která je součástí strojového vybavení firmy Zálesí a.s. K výrobě ostatních součástí bylo použito vybavení domácí dílny, jako je univerzální soustruh, stojanová bruska, ruční vrtačka upevněná ve vrtacím přípravku a jiné ruční nářadí včetně vhodných měřidel.



Obr. 44. Nástroje a zařízení použité pro výrobu upínacího přípravku

6.4 Univerzální zkušební stroj pro zkoušku tahem

Zkouška tahem byla provedena na univerzálním zkušebním stroji **Zwick 1456**. Tento zkušební stroj je kvůli jeho maximální síle v tahu/tlaku 20 kN určen především pro zkoušení plastů, plechů a některých neželezných kovů. Průběh zkoušky je řízen a zaznamenáván prostřednictvím aplikace TestExpert, která je součástí programového vybavení připojeného řídicího počítače. Základní technické údaje jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 4. Základní parametry zkušebního stroje Zwick 1456 [13]

Výrobce	Zwick
Typ	1456
Rychlost protahování	0,001 až 750 mm/min
Jmenovité zatížení	20 kN
Snímání síly	1 až 20 kN
Statické zkoušky	tah, tlak, ohyb
Software	TestExpert



Obr. 45. Univerzální zkušební stroj Zwick 1456

7 EXPERIMENT

V této kapitole jsou zaznamenány veškeré okolnosti experimentálního svařování vybraných polymerních materiálů. Jsou zde shrnuty informace týkající se vlastností použitých materiálů, přípravy zkušebních těles, parametry svařování a vyhodnocení tahové zkoušky.

7.1 Použité materiály

Byly použity různé polymerní materiály, přičemž každý z nich je charakteristický svými mechanickými vlastnostmi a strukturou. Pevnost svarového spoje u polymerů závisí na typu svařovaného polymeru (amorfní, semikrystalický), obsahu a podílu plniv, reologických vlastnostech atd.

Reaktoplasty svařovat nelze, protože po zpracování nejsou již tavitelné, tedy nelze je zpětně převést do plastického stavu. Termoplasty s širokou oblastí viskózního stavu a termoplasty s pozvolným přechodem do tekutého stavu (např. PP) jsou velmi dobře svařitelné. Oproti těmto jsou termoplasty se strmým přechodem (např. PA) jsou svařitelné hůře. [14]

Tedy s ohledem na povahu samotného procesu svařování, jehož podstatou je vznik taveniny v místě styčných ploch, byly voleny pouze termoplastické materiály. Zvolené materiály pro experimentální svařování jsou uvedeny níže.

7.1.1 Polypropylen (PP)

Jedná se o semikrystalický termoplast, jehož vlastnosti jsou značně závislé na indexu izotakticity. Běžně dostupné produkty polypropylenu obsahují vždy určitý podíl ataktické složky, čímž je ovlivněna teplota tání, která je v porovnání s čistým polypropylenem nižší. [15]

Tab. 5. Typické vlastnosti polypropylenu [15]

Typ polypropylenu	Hustota [g.cm ⁻³]	Teplota tání [°C]	Mez pevnosti [MPa]
Izotaktický (čistý)	0,905 – 0,920	176	34 – 38
Syndiotaktický	0,890 – 0,910	135	< 34
Ataktický (kašovitého stavu)	0,850 – 0,900	-	-

Jedná se o nepolární polymer, který odolává polárním rozpouštědlům, kyselinám, zásadám a solím. Je hořlavý a jeho teplota skelného přechodu je asi -15 °C. Vyznačuje se nejnižší hustotou ze všech nelehčených plastů. Naopak má relativně vyšší pevnost, tuhost, tvrdost a

odolnost proti oděru. Vzhledem k vyšší teplotě tání má lepší tvarovou stálost za zvýšených teplot (dlouhodobě až 100 °C). Vyznačuje se také dobrou odolností vůči vzniku napětových trhlinek. [15]

Použit byl čistý polypropylen a polypropylen s různým stupněm plnění skelnými vlákny. Obsah skelných vláken u jednotlivých skupin vzorků je: 10 %, 20 %, 30 %.

7.1.2 Akrylonitril-butadien styren (ABS)

Jedná se o amorfni termoplast. Kopolymerací akrylonitrilu, butadienu a styrenu (kaučuková složka se připravuje zvlášť) je dosaženo vyšší houževnatosti a chemické odolnosti polystyrenu a to současně při zachování dostatečné pevnosti a tuhosti materiálu. Z hlediska rázové houževnatosti předčí houževnatý polystyren (HIPS). Poměrem jednotlivých složek a jejich stavbou lze připravit kopolymer s velmi odlišnými vlastnostmi (někteří výrobci nabízí více než 50 typů ABS). Vlivem heterogenního složení ve struktuře (přítomnost butadienu) je neprůhledný. Je také navlhavý. [15]

7.1.3 Polymethylmethakrylát (PMMA)

Jedná se o amorfni termoplast s propustností světla až 92 %. V technické praxi je známý jako organické sklo. Vzhledem k jeho chemickému složení se jedná o polární plast s výbornými mechanickými vlastnostmi, protože obsahuje kyslík, který má za následek větší mezimolekulární síly. Dobré mechanické vlastnosti tento materiál řadí mezi konstrukční plasty. Kyslík obsažený v makromolekule je také příčinou jeho částečnou navlhavostí a nižší odolností vůči silným kyselinám a rozpouštědlům. Velmi dobře odolává povětrnostním podmínkám a UV záření.

Teplota skelného přechodu je asi 110 °C, není náchylný na kříp, za běžných podmínek je křehký a odolává trvalému teplotnímu zatížení až 100 °C. [15]

7.1.4 Polykarbonát (PC)

Jedná se o amorfni, dokonale průhledný termoplast, který se vyznačuje dobrými mechanickými vlastnostmi. Polykarbonát je z chemického hlediska polyester, nicméně často je řazen do samostatné skupiny. Má nejen dobrou pevnost a tuhost, ale také tvrdost a houževnatost. Vzhledem k teplotě skelného přechodu 150 °C je odolný proti křípu a dlouhodobě teplotně stálý do 135 °C. Má velmi dobré elektroizolační a dielektrické vlastnosti. Částečně polární charakter je příčinou navlhavosti, která sice neovlivňuje jeho mechanické vlastnos-

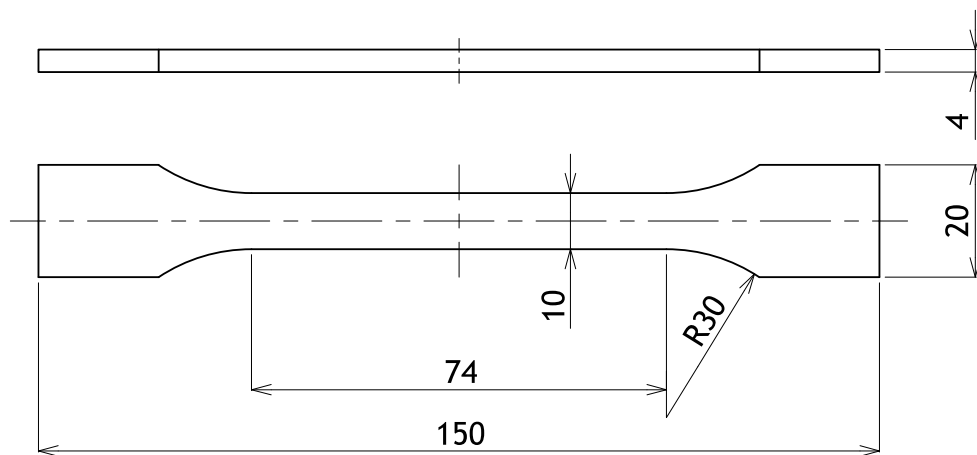
ti, ale při teplotách zpracování by mohla způsobit jeho degradaci. Patří k samozhášivým plastům. [15]

Použit byl polykarbonát s různým stupněm plnění skelnými vlákny, kdy podíl skelných vláken u jednotlivých skupin je: 20 %, 30 %.

7.2 Experimentální svařování zkušebních těles

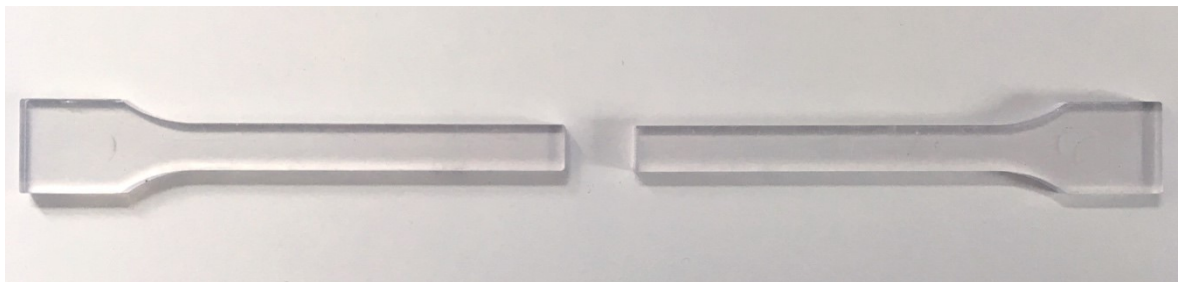
7.2.1 Výchozí zkušební tělesa

Vzorčky materiálů pro experimentální svařování vychází ze vstřikovaných těles tvaru normalizovaných „lopatek“. Tato tělesa jsou svým tvarem a svými rozměry vhodná pro zkoušku tahem dle ČSN EN 12 814-2. Výchozí zkušební těleso včetně rozměrů je znázorněno na následujícím obrázku.



Obr. 46. Výchozí zkušební těleso

Pro experimentální svařování musí být výchozí vstřikovaná zkušební tělesa náležitě přizpůsobena. Toto přizpůsobení spočívá v oddělení jedné z rozšířených upínacích částí. Místo řezu musí být tvarově upraveno dle požadovaného typu svaru a tato oblast musí být zbavena otřepů, které by mohly ovlivnit kvalitu výsledného svarového spoje.

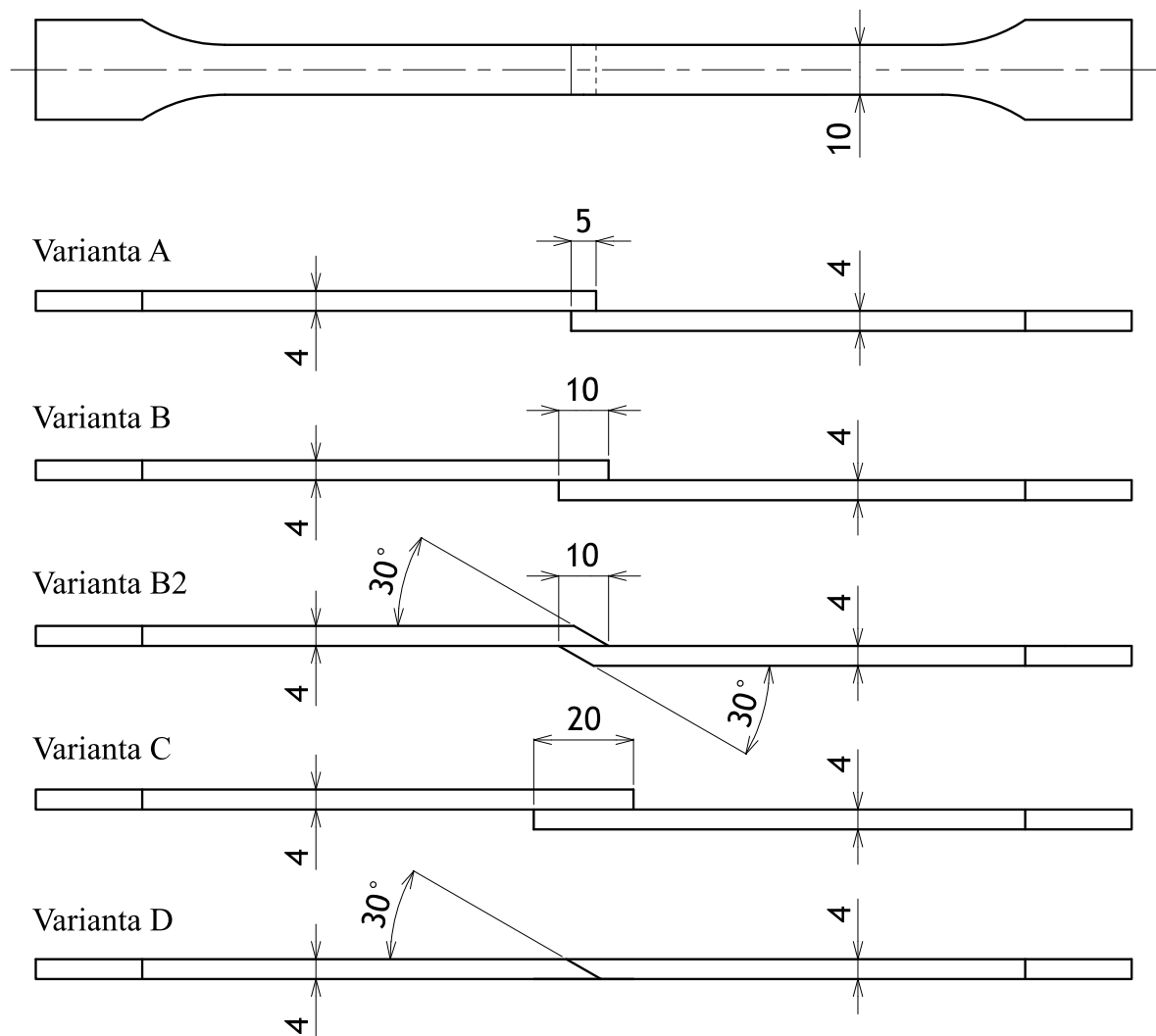


Obr. 47. Upravené části svařovaného zkušebního tělesa

7.2.2 Varianty svarových spojů

Předem bylo navrženo několik variant svarových spojů. Jednotlivé varianty se liší délkou, resp. velikostí plochy spoje a některými konstrukčními úpravami, které z teoretického hlediska mají vliv na výslednou pevnost spoje. Zda tyto úpravy mají reálný vliv na pevnost spoje, bude zjištěno v rámci experimentu.

Pozn. Pro zjednodušení budou jednotlivé svarové varianty dále označovány velkými písmeny A až D dle obrázku.



Obr. 48. Varianty svarových spojů

7.2.3 Volba procesních parametrů svařování

Pro dosažení svaru požadované jakosti je třeba určit dobu působení ultrazvukových vibrací, velikost amplitudy, velikost přítláčné síly atd. Pro každý typ materiálu byly experimen-

tálně stanoveny procesní podmínky svařování, protože každý materiál reaguje na ultrazvukové vibrace odlišně.

Použité svařovací zařízení umožňuje širokou škálu nastavení procesu. První pokusné svary probíhaly za konstantní doby svařování a konstantního svařovacího výkonu. Experimentální svařování prováděné s tímto nastavením nebylo příliš úspěšné, protože v tomto pevně daném časovém úseku se energie dodaná do místa svaru velmi lišila a svary vykazovaly příliš velké rozdíly (odlišné výronky, neúplné svary, praskliny v materiálu apod.). Po mnoha pokusech došlo ke změně nastavení, kdy jako konstantní byla nastavena již zmíněná energie. Při tomto nastavení použité svařovací zařízení vyhodnocuje množství energie dodané svařovanému materiálu a po dosažení požadovaného stavu se proces automaticky ukončí. Po ukončení procesu přístroj umožní odečíst ostatní parametry. Na základě odečtených parametrů si lze ověřit, do jaké míry jsou si jednotlivé svařovací cykly podobné. Z hlediska porovnání jednotlivých svarů se právě toto nastavení jeví jako výhodné.

Hovoříme-li o konstantní energii, jde o energii neměnnou pro konkrétní materiál. Protože pro každý materiál jsou vhodné jiné procesní parametry, je hodnota energie stanovena experimentálně pro každý materiál zvlášť. Pro omezení velkého množství variací nastavených parametrů, jsou některé parametry (velikost amplitudy, frekvence vibrací) nastaveny stejně pro všechny materiály. Nastavená **hodnota amplitudy je $A = 80 \%$** z limitní hodnoty přístroje, stejně tak **frekvence kmitů $f = 35 \text{ kHz}$** vychází z limitních hodnot. Potom limitní parametry přístroje jsou dány použitou sonotrodou, na kterou je přístroj automaticky „zaučen“.

Svařovací síla je nepřímo dána momentem nastaveným na momentovém klíči. Použitím momentového klíče je docíleno pokaždé stejné svařovací síly, která je dána přepočtovým vztahem. Uvažuj-li nastavený kroutící moment $M_k = 6 \text{ Nm}$, potom svařovací síla bude:

$$F_s = 38,5 M_k + 35,3$$

$$F_s = 38,5 \cdot 6 + 35,3 = 266,3 \text{ N}$$

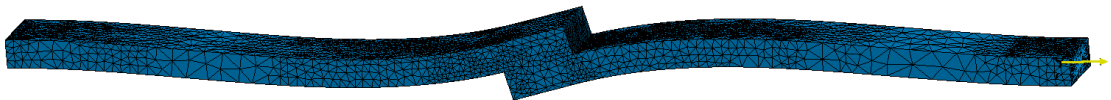
7.3 Hodnocení vlivů na pevnost svařovaných spojů

Při hodnocení jednotlivých vlivů budeme vycházet z výsledků tahové zkoušky. Tahová zkouška dle ČSN EN 12 814-2 nám poskytne výpověď o pevnosti zkoušených svarových spojů v závislosti na typu svaru, ploše svaru a typu případně modifikaci svařovaného mate-

riálu. Následující naměřená data a jejich vyhodnocení nám umožní porovnat zmíněné parametry a jejich vliv na pevnost svarového spoje.

Výstupem tahové zkoušky je závislost síly F [N] na prodloužení Δl [mm] zkušebního vzorku, nebo závislost tahového napětí σ [MPa] na poměrném prodloužení ε [%]. V rámci této zkoušky bude odkazováno spíše na závislost F na Δl . Mírou pevnosti svarového spoje bude maximální síla F_{\max} , které bylo v průběhu protahování zkušebního tělesa dosaženo.

Aby měření probíhalo správně, musí tahová síla působit v rovině přepřátovaného svarového spoje. V opačném případě vzniká v okolí svaru silová dvojice, která má za následek natáčení roviny svaru a tím je výrazně ovlivněno jeho namáhání (vzrůstá složka síly, která namáhá spoj na tah).



Obr. 49. Analýza deformace zkušebního tělesa během tahové zkoušky

Tento jev nelze omezit, nicméně lze jej v rámci možností částečně eliminovat vhodným upnutím. Každé zkušební těleso, které je opatřeno svarovou variantou A až C, tedy přepřátovaným svarovým spojem, se v upínacích čelistech vhodně vypořádá.



Obr. 50. Vzorek upnutý ve zkušebním stroji

Pozn. Výsledky zkoušky jsou zaznamenány v tabulkách, kde ke každému vzorku jsou přiřazeny procesní parametry daného svařovacího cyklu, jako je čas svařování t [s] a svařovací výkon P [W]. Energie svařování E_s [J], která je pro danou skupinu vzorků konstantní, je uvedena v popisku dané tabulky. Popisek tabulky také obsahuje informaci o typu svaru (označeno „Varianta A až D“). Ostatní procesní parametry jsou stanoveny v předchozí kapitole a jsou pro všechny skupiny vzorků shodné.

7.3.1 Vliv velikosti plochy svaru

K posouzení vlivu velikosti plochy svaru na pevnost spoje jsou použity vzorky z čistého PP. Protože se jedná o přeplátovaný svar, je jeho plocha ovlivňována délkou přeplátování, resp. délkou svaru. Svary vzorků odpovídají variantám: **A** (délka svaru 5 mm), **B** (délka svaru 10 mm), **C** (délka svaru 20 mm).



Obr. 51. Svařený vzorek: PP, Varianta B

Vzorky této série byly svařeny stejnými procesními podmínkami, které byly zvoleny s ohledem na požadované výsledky tahové zkoušky, nikoliv na maximální pevnost spoje. Pokud chceme vzájemně porovnávat vlastnosti svarového spoje, je žádoucí, aby zkušební tělesa byla přetržena přímo ve svarovém spoji. Mírou pevnosti bude maximální dosažená tahová síla, kterou budeme v rámci všech měření porovnávat.

Tab. 6. Výsledky experimentu: PP, Varianta A, $E_s = 50 J$

Vzorek č.	P [W]	t [s]	F_{\max} [N]
1	559	0,123	429
2	751	0,098	362
3	787	0,097	346
4	628	0,081	321
5	844	0,094	304
\bar{x}	714	0,099	352
s	118	0,016	49

Tab. 7. Výsledky experimentu: PP, Varianta B, $E_s = 50 J$

Vzorek č.	P [W]	t [s]	F_{\max} [N]
1	850	0,100	511
2	786	0,102	497
3	850	0,100	537
4	801	0,102	506
5	852	0,102	541
\bar{x}	828	0,101	518
s	32	0,001	20

Tab. 8. Výsledky experimentu: PP, Varianta C, $E_s = 50 J$

Vzorek č.	P [W]	t [s]	F_{\max} [N]
1	900	0,085	590
2	850	0,083	679
3	973	0,083	527
4	928	0,085	620
5	942	0,084	679
\bar{x}	919	0,084	619
s	47	0,001	65

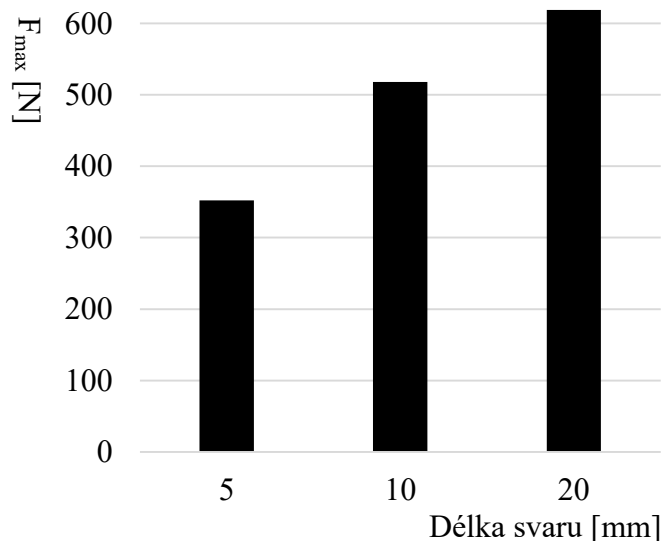
Během tahové zkoušky docházelo u všech vzorků k přetržení ve svaru, tedy na základě měření lze stanovit vliv velikosti svařovacích ploch na pevnost výsledného spoje. Po přetržení spoje je patrné, že vzorek je svařen spíše po vnějších okrajích, což je způsobeno nerovným povrchem svařovaných ploch, kde je iniciována energie ultrazvuku. Tyto nerovnosti souvisí s propadlinami, které vznikly smrštěním materiálu během procesu vstřikování. Tedy spíše jak o konkrétní svarové ploše lze hovořit o násobcích výchozí nedefinované svarové plochy. Pro porovnání výsledků je z uvedených důvodů vhodnější uvažovat délku svarového spoje nežli jeho plochu. Neúplné provaření (různorodost) svaru pravděpodobně bude také příčinou relativně velkých odchylek naměřených hodnot.



Obr. 52. Přetržený vzorek: PP, Varianta B

Tab. 9. Porovnání výsledků v závislosti na délce svaru

Délka svaru [mm]	E_s [J]	P [W]	t [s]	F_{max} [N]
5	50	714	0,099	352 ± 49
10	50	828	0,101	518 ± 20
20	50	919	0,084	619 ± 65



Obr. 53. Závislost únosnosti svarového spoje na jeho délce

Na základě naměřených hodnot tahové zkoušky lze odhadnout, do jaké míry má vliv délka přepletování svaru na jeho únosnost. Z experimentu vyplývá, že čím delší je svarový spoj, resp. jeho plocha, tím větší je jeho únosnost při mechanickém zatížení.

Z teorie vyplývá, že od jisté délky svaru by neměla únosnost záviset na jeho délce. Jestliže je svar bezchybný, nastupuje zde vliv vrubu v okrajových oblastech svaru. Konkrétně námi měřená varianta svaru představuje z hlediska vrubu velké úskalí. Vliv vrubu lze omezit vhodnou konstrukční úpravou svařovaných částí, což bude také ověřeno.

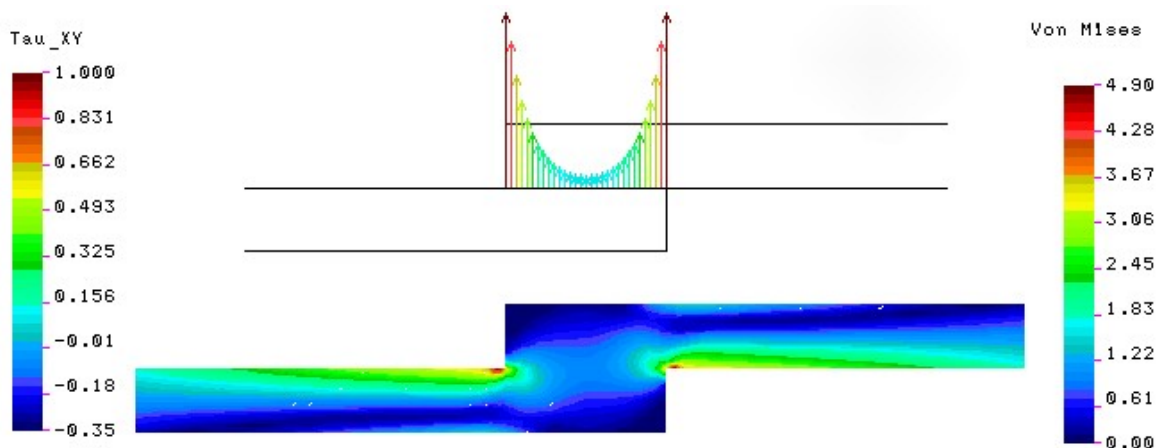
Tedy příčinou, že síla s délkou svaru roste, jsou nízké parametry svařování, kdy samotný svar nedosahuje takové kvality a pevnosti, aby se projevil vliv okrajových částí svaru. V opačném případě by zřejmě docházelo k přetržení vzorků na okraji svaru, kde je pevnost výrazně snížena vruby. Je možné, že předpokládaného výsledku by bylo dosaženo dalším měřením vzorků, svařovaných při výrazně vyšších procesních parametrech.

Protože vzorky byly přetrženy ve svaru, nikoliv mimo svar, lze toto měření považovat za obecný popis pevnosti svaru, která se zvyšuje s jeho rostoucí délkou, resp. plochou.

Vliv velikosti plochy svaru bude hodnocen také na základě FEM modelu v aplikaci COSMOS/M, V rámci tohoto hodnocení se budeme zabývat striktně přeplátovanými svary, bez jakýchkoliv konstrukčních uprav svarových ploch.

V aplikaci COSMOS/M byly vytvořeny modely, které odpovídají případům, kdy každý vzorek je totálně svařen postupně při jiné délce přeplátování (dále označeno jako délka svaru). Nutno podotknout, že oproti skutečným vzorkům podrobených tahové zkoušce, které se vždy porušily ve svaru v důsledku již zmíněných faktorů, je FEM model idealizovaným případem svaru. Tento svar za daných okolností přesahuje svou pevností samotný základní materiál. Uvedené modely nám tedy poslouží pro posouzení napěťových poměrů v oblasti ideálního svaru.

V rámci FEM modelu byly zvoleny tyto délky svaru: (10, 15, 20, 25, 30, 40, 50) mm.



Obr. 54. Průběh napětí ve svaru o délce 10 mm

Na obrázku je graficky znázorněn průběhů smykového a Von Misesova napětí ve svarovém spoji, který je zatížen jednotkovou tahovou silou.

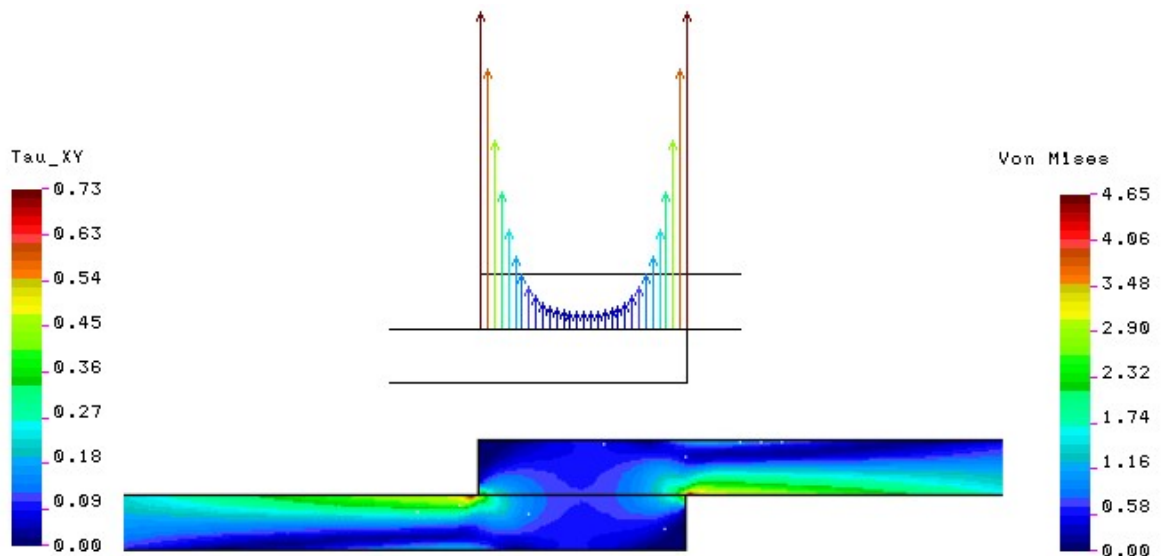
Z výsledků je patrné, že na začátku a na konci svarového spoje jsou hodnoty smykového napětí maximální a směrem ke střední délce svaru nelineárně klesá až po jeho minimum. Zároveň maximální hodnota smykového napětí odpovídá velikosti aplikované tahové síly právě v okrajových částech svaru a tuto hodnotu nepřekračuje.

Také hodnota Von Misesova napětí je nejvyšší na začátku a na konci svarového spoje. Tato hodnota je téměř 5x vyšší než maximální hodnota smykového napětí. V těchto místech je tedy značná koncentrace napětí, což naznačuje výrazné snížení pevnosti (únosnosti) materiálu vlivem přítomnosti ostrých přechodů, tedy vrubů. Toto je pravděpodobně příčinou praskání bezchybně svařených zkušebních těles mimo zónu svarového spoje. Nelze tedy

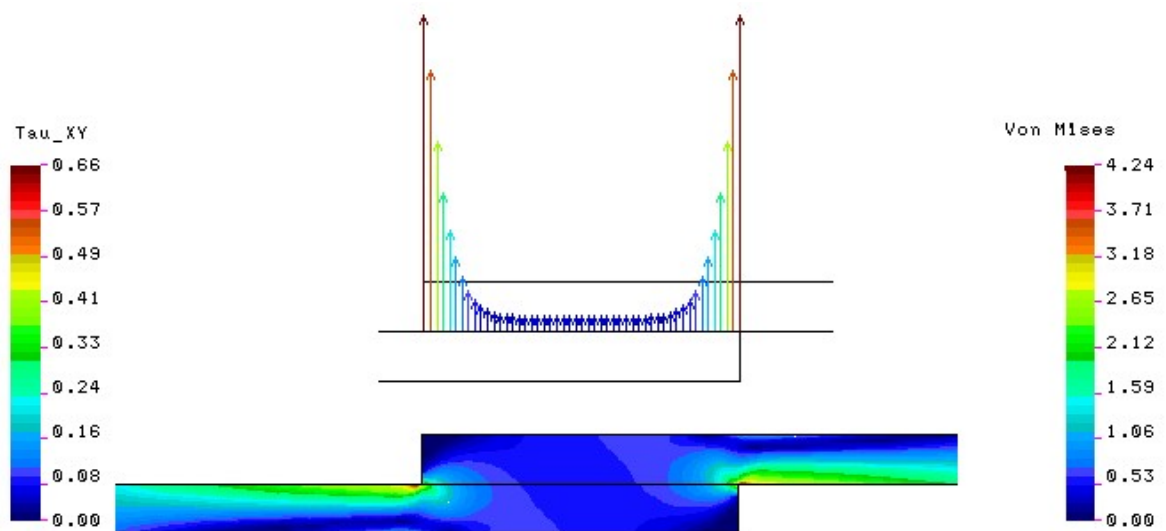
tento svar hodnotit jako svar s pevností vyšší, než je pevnost základního materiálu, protože vliv vrubů je značný a nelze jej zanedbat.

Jelikož svar je zatížen jednotkovou silou, lze na základě lineární závislosti mezi působící silou a napětím stanovit, že skutečný svar tohoto typu a odpovídajících rozměrů bude vykazovat přibližně 5x nižší pevnost v porovnání s pevností základního materiálu.

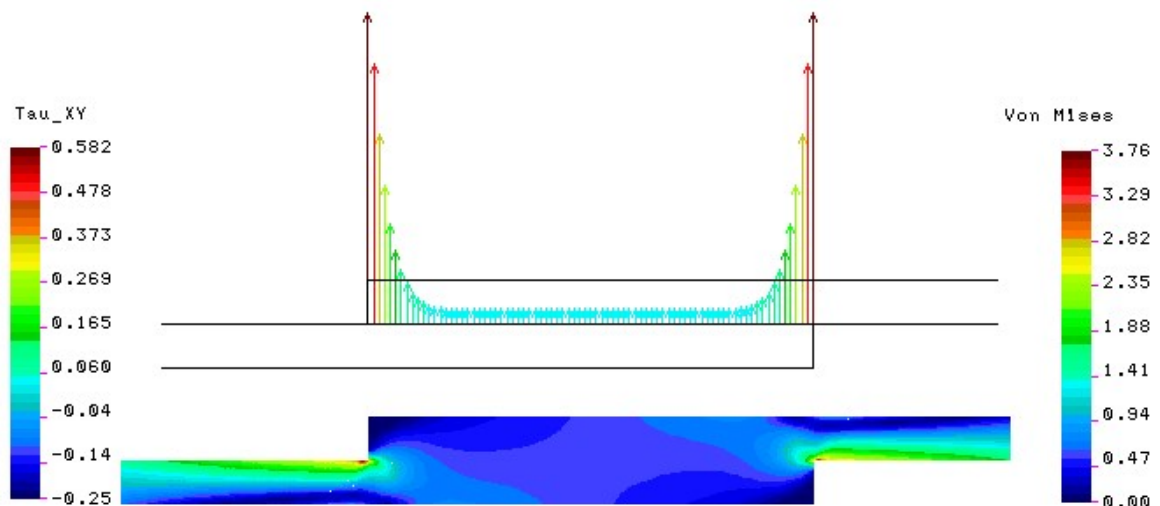
Ověřme tedy, do jaké míry je tento výsledek závislý na délce svaru. K tomu poslouží další analýzy svarových spojů o různých délkách.



Obr. 55. Průběh napětí ve svaru o délce 15 mm



Obr. 56. Průběh napětí ve svaru o délce 25 mm



Obr. 57. Průběh napětí ve svaru o délce 40 mm

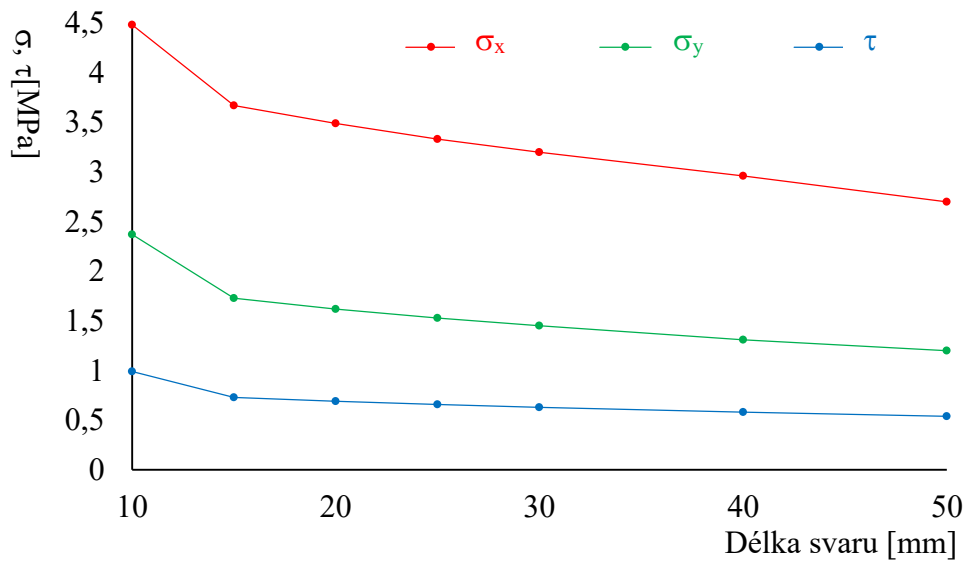
Z uvedených obrázků reprezentujících vybrané výsledky analýz různě dlouhých svarů vyplývá, že okrajové špičky smykového napětí se výrazněji snížily při délce svaru 15 mm (viz Obr. 55.), nicméně prodlužuje-li se dále svar, toto napětí již klesá nepatrně. S rostoucí délkou svaru se také rozšiřuje oblast konstantního smykového napětí kolem středních délek svaru. V těchto oblastech se jeho hodnota jeví jako zanedbatelná.

Podobně se vyvíjí průběh Von Misesova napětí, hovoříme-li o okrajových oblastech svaru. Toto napětí sice klesá s rostoucí délkou svaru, ale jeho pokles vzhledem k délce svaru je nepříliš významný.

Na základě analýzy byly také ověřeny svary ostatních délek, jejichž výsledky jsou uvedeny v následující tabulce. Jsou zde zaznamenány jednotlivé složky napětí, z nichž nejvyšších hodnot nabývá normálová složka σ_x . Hodnoty jednotlivých složek napětí jsou vzájemně porovnány v závislosti na délce svarového spoje (viz Obr. 58.).

Tab. 10. Napěťové poměry ve svaru v závislosti na jeho délce

Délka svaru [mm]	σ_x [MPa]	σ_y [MPa]	τ [MPa]
10	4,48	2,37	0,99
15	3,67	1,73	0,73
20	3,49	1,62	0,69
25	3,33	1,53	0,66
30	3,20	1,45	0,63
40	2,96	1,31	0,58
50	2,70	1,20	0,54



Obr. 58. Závislost napětí na délce svarového spoje

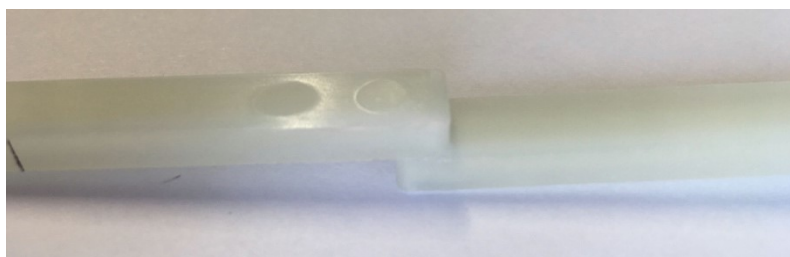
Graf závislosti napětí na délce svarového spoje umožňuje přímé srovnání jednotlivých složek napjatosti a stanovit, jak významný vliv má volba samotné délky svarového spoje na jeho únosnost. Je zde patrný výraznější pokles napětí v rozmezí zvoleného přeplátování 10 až 15 mm. Poté je pokles velmi pozvolný. Zdá se tedy, že od určité délky nehraje přeplátování z hlediska únosnosti svaru významnou roli.

To znamená, že další prodlužování svaru už není příliš efektivní. Výhodným řešením v tomto případě může být konstrukční úprava svařovaných částí. Příkladem takové modifikace je svarová varianta B2 (viz Obr. 48.), kdy konce svařovaných částí jsou opatřeny úkosy. Teoreticky by toto řešení mohlo mít pozitivní vliv na účinky vrubů.

Nicméně je třeba brát v úvahu, že tato teorie se opírá o výsledky analýzy, která uvažuje model jako homogenní těleso a která nezahrnuje další vlivy. K ověření této teorie by bylo zapotřebí dalších experimentů na skutečných zkušebních tělesech.

7.3.2 Vliv plniv

K posouzení, jaký vliv má určitý obsah plniv na pevnost svarového spoje jsou použity opět vzorky z PP s různým stupněm plnění krátkými skelnými vlákny (zkratka GF). Obsah skelných vláken v základním materiálu je 10 %, 20 % a 30 %. Zkušební vzorky jsou opatřeny svarem, který odpovídá variantě A (překlátovaný svar o délce 5 mm).



Obr. 59. Svařený vzorek: PP 30 % GF, Varianta A

Vzorky byly svařeny procesními podmínkami, které byly zvoleny shodně pro každou skupinu vzorků tohoto experimentu. Opět požadujeme, aby zkušební tělesa byla přetržena přímo ve svarovém spoji, což umožní vzájemné porovnání naměřených výsledků. Stejně jako v předchozím případě bude v rámci všech měření porovnána maximální dosažená tahová síla.

Tab. 11. Výsledky experimentu: PP 10 % GF, Varianta A, $E_s = 50 J$

Vzorek č.	P [W]	t [s]	F_{\max} [N]
1	949	0,094	430
2	686	0,108	433
3	848	0,094	313
4	622	0,125	301
5	800	0,100	357
\bar{x}	781	0,104	367
s	130	0,013	63

Tab. 12. Výsledky experimentu: PP 20 % GF, Varianta A, $E_s = 50 J$

Vzorek č.	P [W]	t [s]	F_{\max} [N]
1	931	0,091	403
2	848	0,097	313
3	702	0,104	424
4	865	0,093	412
5	960	0,087	503
\bar{x}	861	0,094	411
s	101	0,007	68

Tab. 13. Výsledky experimentu: PP 30 % GF, Varianta A, $E_s = 50 \text{ J}$

Vzorek č.	P [W]	t [s]	F_{\max} [N]
1	901	0,089	497
2	592	0,150	408
3	868	0,094	450
4	795	0,106	403
5	622	0,124	423
\bar{x}	756	0,113	436
s	142	0,025	39

Během tahové zkoušky byly všechny vzorky porušeny ve svaru. Stejně jako u neplněného PP je vzorek svařen spíše po vnějších okrajích. Toto je způsobeno nerovným povrchem svařovaných ploch, kde je iniciována energie ultrazvuku. Ačkoliv obsah plniva má pozitivní vliv na smršťení materiálu, propadliny jsou stále značné. Navíc podíl plniva je u každé skupiny vzorku jiný, tedy i smršťení bude rozdílné.



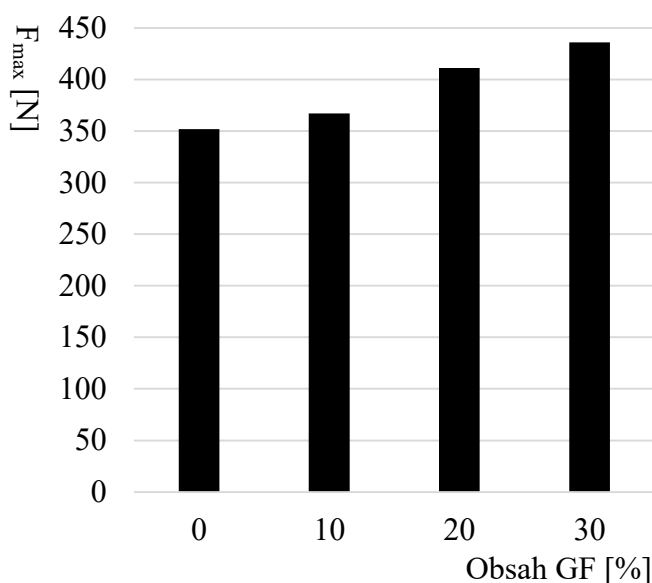
Obr. 60. Přetržený vzorek: PP 30 % GF, Varianta A

Lepších výsledků svařování u tohoto materiálu bylo dosaženo právě úpravou délky svaru na hodnotu 5 mm. Svar je tak vytvořen na malé okrajové ploše, na které se zakřivení povrchu vzorku tak výrazně neprojeví a ve středu svaru již nevzniká dutina.

Výchozím předpokladem může být, že zpevňující látky, jako jsou skleněná vlákna, uhlíková vlákna apod., zvyšují modul pružnosti materiálu, tedy jeho tuhost. Tyto plniva mohou příznivě ovlivnit zvukovou vodivost materiálu a v důsledku toho i jeho svařitelnost.

Tab. 14. Porovnání výsledků v závislosti na podílu plniva

Podíl GF [%]	E_s [J]	P [W]	t [s]	F_{\max} [N]
0	50	714	0,099	352 ± 49
10	50	781	0,104	367 ± 63
20	50	861	0,094	411 ± 68
30	50	756	0,113	436 ± 39



Obr. 61. Závislost únosnosti svarového spoje na obsahu plniva (GF)

Z uvedené závislosti únosnosti svarového spoje na obsahu vyztužujícího plniva (GF) vyplývá, že určitý podíl GF má pravděpodobně pozitivní vliv na výslednou únosnost svarového spoje. To znamená, že výsledky experimentu odpovídají předpokladu, tedy že přidáním vyztužujících plniv se zvyšuje tuhost materiálu, čímž je podmíněna lepší vodivost ultrazvukových vln. Výsledkem je svarový spoj vyznačující se vyšší únosností v porovnání s neplněným materiálem, současně při dodržení shodných svařovacích parametrů.

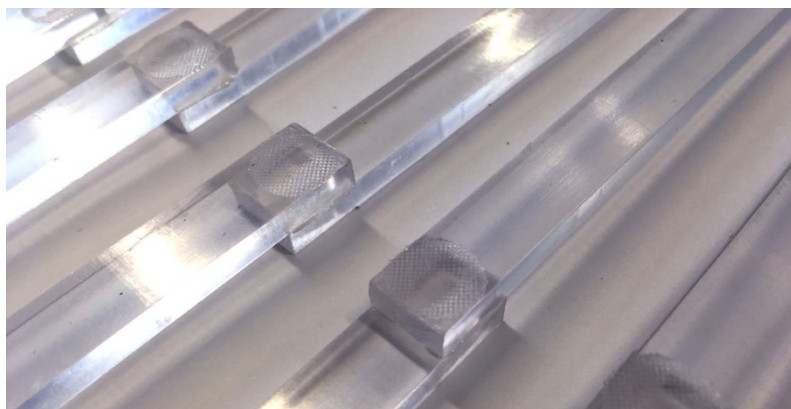
Je otázkou, jak by se vyvíjela pevnost spoje u PP s vyšším obsahem GF, tedy s obsahem vyšším než 30 %. Vlivem tavení a působícího tlaku je v oblasti svaru intenzivně vytlačován materiál směrem k okrajovým oblastem svaru (vznik výronku). Jestliže je materiál vyztužen např. krátkými skelnými vlákny, dochází během tohoto procesu k jejich orientaci, která nemusí být s ohledem na únosnost spoje příznivá. Důsledkem by mohlo být ustálení únosnosti na konstantní hodnotě, nebo její další růst v závislosti na tuhosti materiálu. Ověření tohoto tvrzení by ovšem vyžadovalo další experimentální svařování a studium vzorků s vyšším podílem GF.

Závěrem tohoto měření tedy může být, že určitý podíl GF v základním materiálu má vliv na únosnost svarového spoje. Předpokládejme tedy, že se zvyšujícím se podílem GF roste únosnost svarového spoje.

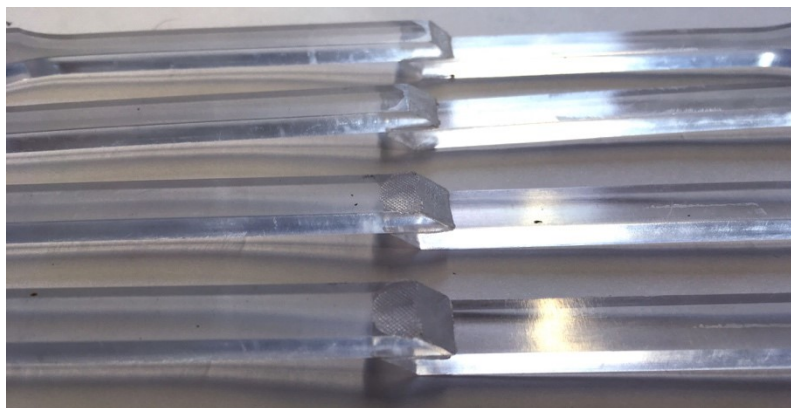
7.3.3 Vliv vrubů

K posouzení vlivu přítomných vrubů v krajních oblastech svaru na pevnost spoje jsou použity vzorky z PMMA. Nejdříve jsou zkušební tělesa opatřena svarem, který odpovídá variantě **B** (délka přeplátování 10 mm). Další skupina vzorků je opatřena modifikovaným svarem, který odpovídá variantě **B2** (délka přeplátování 10 mm + úprava svařovaných částí). Tedy rozdíl mezi svarovými variantami spočívá v úpravě svařovaných částí. Tato úprava by teoreticky mohla vést k alespoň částečné eliminaci vlivu okrajových vrubů, které vznikají v okrajových oblastech svaru.

V kapitole 7.3.1 bylo na základě FEM analýzy zjištěno, že tyto vruby mají významný vliv na únosnost svařeného zkušebního tělesa, přestože toto těleso je opatřeno zdánlivě bezchybným svarem. Toto se projevuje porušením, tahem namáhaného, zkušebního tělesa mimo samotný svarový spoj. K tomuto porušení dochází z pravidla na okraji svaru, tedy v místě předpokládaného vrubu. Pokusme se tedy ověřit, zda navržená varianta svaru B2 (viz Obr. 48.) má žádaný vliv na pevnost, resp. únosnost svarového spoje.



Obr. 62. Svařený vzorek: PMMA, Varianta B



Obr. 63. Svařený vzorek: PMMA, Varianta B2

Tab. 15. Výsledky experimentu: PMMA, Varianta B, $E_s = 25 J$

Vzorek č.	P [W]	t [s]	F_{\max} [N]
1	885	0,051	539
2	882	0,052	568
3	660	0,060	484
4	717	0,056	605
5	721	0,063	548
\bar{x}	773	0,056	549
s	104	0,005	45

Tab. 16. Výsledky experimentu: PMMA, Varianta B2, $E_s = 25 J$

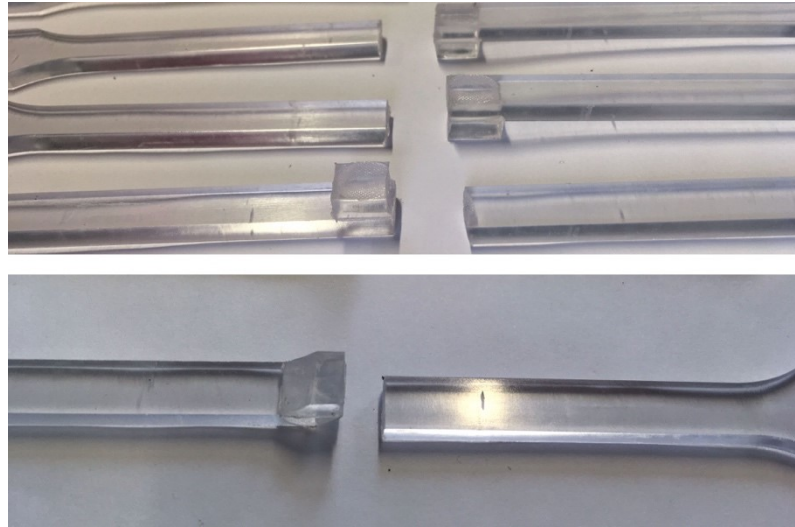
Vzorek č.	P [W]	t [s]	F_{\max} [N]
1	619	0,061	552
2	864	0,051	523
3	623	0,061	587
4	678	0,060	618
5	643	0,060	598
\bar{x}	685	0,059	576
s	103	0,005	38

Tab. 17. Výsledky experimentu: PMMA, Beze svaru

Vzorek č.	E [MPa]	F_{\max} [N]
1	3350	1640
2	3060	1630
3	3340	1640
\bar{x}	3350	1637
s	165	6

Všechny vzorky byly svařeny za stejných podmínek. Vzhledem k vysoké tuhosti PMMA byla zvolena nižší energie svařování, s čímž také souvisí kratší svařovací časy. Tyto parametry vyhovovaly pro vytvoření pevného svarového spoje.

Vzhledem k transparentnosti materiálu bylo možné kontrolovat svary již před přetržením, což bylo také provedeno. Vzorky každé skupiny byly svařeny s velmi dobrou opakovatelností, nicméně opět se projevily nerovnosti styčných ploch. Vlivem těchto nerovností nebyl svar zcela homogenní.

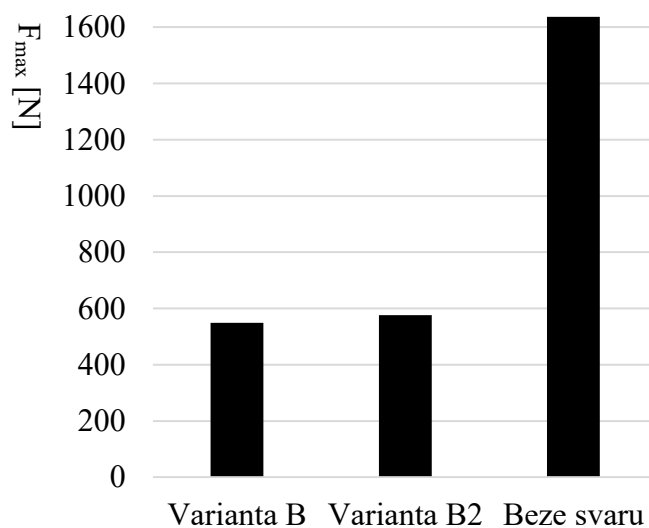


Obr. 64. Přetržený vzorek: PMMA, Varianta B/B2

Každé zkušební těleso bylo porušeno mimo oblast svaru, tedy zdá se, že jednotlivé svary vykazují dostatečnou pevnost. V rámci tohoto měření bude pevnost svařených zkušebních těles porovnána také s pevností etalonového (nesvařeného) zkušebního tělesa pro určení míry ztráty únosnosti v důsledku koncentrace napětí v přítomných vrubech.

Tab. 18. Porovnání výsledků v závislosti na modifikaci svarového spoje

Varianta svaru	E_s [J]	P [W]	t [s]	F_{max} [N]
B	25	773	0,056	549 ± 45
B2	25	685	0,059	576 ± 38
Beze svaru	-	-	-	1637 ± 6



Obr. 65. Vliv modifikace svarového spoje na únosnost

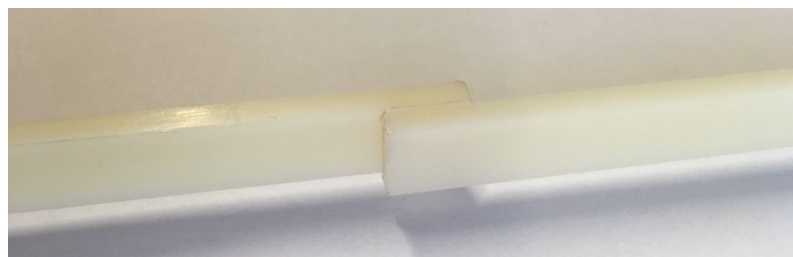
Na základě experimentu nelze jednoznačně určit, zda konstrukční úprava svařovaných částí má vliv na únosnost svařeného zkušební tělesa. Z grafické závislosti, která porovnává únosnost jednotlivých variant svarového spoje, lze pozorovat nepatrné zvýšení únosnosti u konstrukčně upravené varianty B2. Toto zvýšení únosnosti sice vyhovuje předpokladu, nicméně jde o tak malý rozdíl, že nelze tento výsledek považovat za zcela průkazný.

Z porovnání naměřených výsledků tahové zkoušky provedené nejdříve na svařených zkušebních tělesech, poté na výchozích zkušebních tělesech, je patrné, že snížení únosnosti v důsledku vrubů je výrazné. V tomto případě je únosnost svařeného tělesa přibližně 3x nižší v porovnání s výchozím nesvařeným tělesem.

Odchylka od předpokládaného výsledku může být způsobena mnoha vlivy. Použitý PMMA je relativně křehkým materiálem a jako takový je velmi náchylný na působení koncentrovaného napětí podmíněného vruby. U takového materiálu mají významný vliv také okrajové oblasti svarové zóny. Tyto oblasti jsou v průběhu procesu svařování tepelně namáhány, tedy prochází fyzikálními změnami, které samy o sobě mohou být určitou formou vrubu. Za významné ovlivnění lze považovat také výronky vytlačeného materiálu ze svarové zóny. Pravděpodobně také u materiálů plněných krátkými skelnými vlákny lze mluvit o určité formě vrubu v podobě místně orientovaného plniva.

7.3.4 Vliv parametrů svařování

K posouzení vlivu svařovacích parametrů na pevnost svarového spoje jsou použity vzorky z ABS. Vzorky jsou opatřeny přeplátovaným svarem, který odpovídá variantě B (délka svaru 10 mm). Svar byl realizován při odlišných svařovacích parametrech, které se lišily v závislosti na zvolené energii svařování, tedy energii dodané svařovanému spoji. Množstvím dodané energie do místa svaru je ovlivněn stupeň tavení materiálu, čímž je ovlivněna také pevnost výsledného svarového spoje. Zkušební tělesa jednotlivých skupin byla postupně svařena při rostoucím parametru energie E_s , která nabývala hodnot: **10 J, 15 J, 25 J**.



Obr. 66. Svařený vzorek: ABS, Varianta B

Tab. 19. Výsledky experimentu: ABS, Varianta B, $E_s = 10 J$

Vzorek č.	P [W]	t [s]	F_{\max} [N]
1	734	0,034	583
2	707	0,034	506
3	484	0,041	524
4	652	0,036	576
5	628	0,035	551
\bar{x}	641	0,036	548
s	98	0,003	33

Tab. 20. Výsledky experimentu: ABS, Varianta B, $E_s = 15 J$

Vzorek č.	P [W]	t [s]	F_{\max} [N]
1	438	0,057	695
2	380	0,062	683
3	558	0,048	730
4	493	0,051	753
5	524	0,050	734
\bar{x}	479	0,054	719
s	71	0,006	29

Tab. 21. Výsledky experimentu: ABS, Varianta B, $E_s = 25 J$

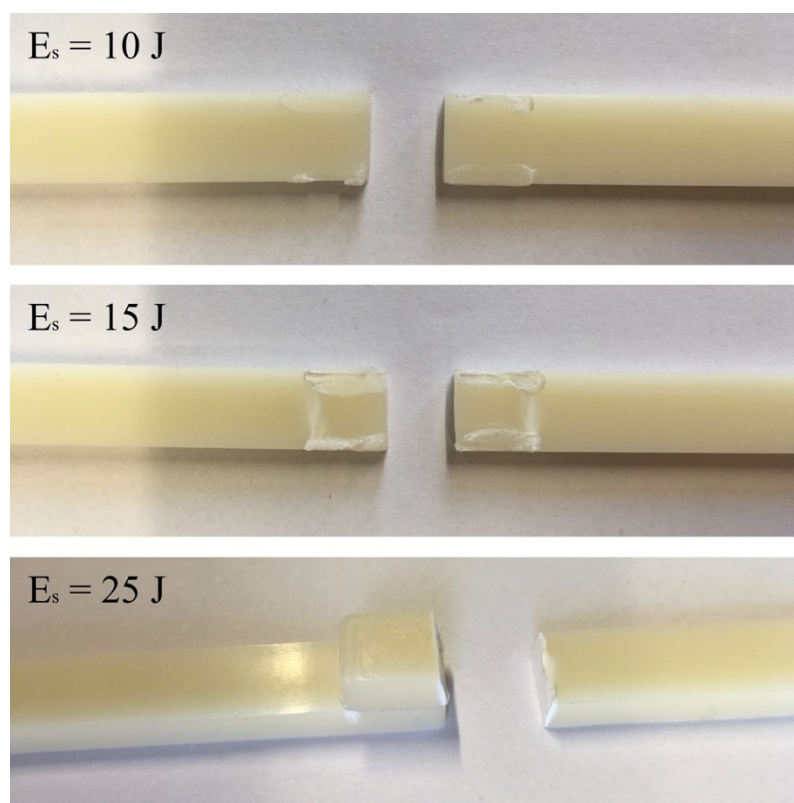
Vzorek č.	P [W]	t [s]	F_{\max} [N]
1	434	0,098	797
2	462	0,093	724
3	507	0,094	786
4	489	0,076	798
5	448	0,081	787
\bar{x}	468	0,088	778
s	30	0,010	31

Tab. 22. Výsledky experimentu: ABS, Beze svaru

Vzorek č.	E [MPa]	F_{\max} [N]
1	2290	1530
2	2480	1560
3	2340	1550
\bar{x}	2370	1547
s	99	16

Množstvím dodané energie do místa svaru je ovlivněn stupeň tavení materiálu, čímž je ovlivněna také pevnost výsledného svarového spoje. Předpokladem je zvyšující se únosnost svarového spoje budeme-li zvyšovat parametr energie E_s .

Na následujícím obrázku jsou přetržené vzorky jednotlivých skupin svařených postupně při různém stupni dodané svařovací energie. Změnou parametru E_s jsou ovlivněny jiné procesní parametry (viz Tab. 23.), jako je čas t a svařovací výkon P , přičemž svařovací síla, amplituda a frekvence zůstávají konstantní.



Obr. 67. Přetržený vzorek: ABS, Varianta B

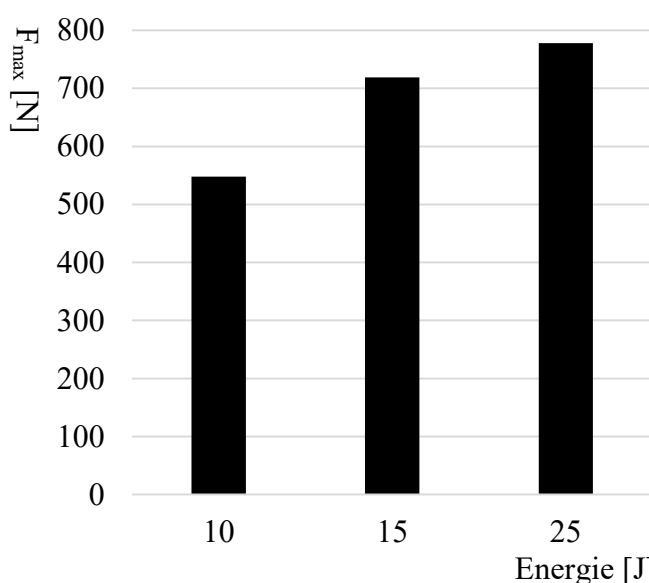
Z obrázku je patrné, že zvyšuje-li se procesní parametr E_s svařovacího cyklu, dochází k výraznějšímu natavení základního materiálu. To se v našem případě projevuje zvětšením celkové plochy svaru. Všechna tělesa svařena při $E_s < 25$ J byla porušena přímo ve svaru. Již při $E_s = 25$ J dosahuje svar takové pevnosti, že některá zkušební tělesa svařena při této energii jsou přetržena mimo oblast svaru.

Ačkoliv jsou zkušební tělesa porušena mimo svarový spoj, jejich pevnost, resp. únosnost neodpovídá únosnosti výchozích nesvařených zkušebních těles. Z výsledků experimentu uvedených v tabulkách (Tab. 22. a Tab. 23.) vyplývá, že únosnost svařených těles je přibližně 2x nižší v porovnání s výchozími tělesy. Porušení těles mimo svar může poukazovat

na problematiku vrubů, která byla zmíněna v předchozí kapitole. To by znamenalo, že další zvyšování parametrů by pravděpodobně nevedlo k výraznému zvýšení únosnosti tohoto typu svaru.

Tab. 23. Porovnání výsledků v závislosti na svařovacích parametrech

Energie E_s [J]	P [W]	t [s]	F_{\max} [N]
10	641	0,036	548 ± 33
15	479	0,054	719 ± 29
25	468	0,088	778 ± 31



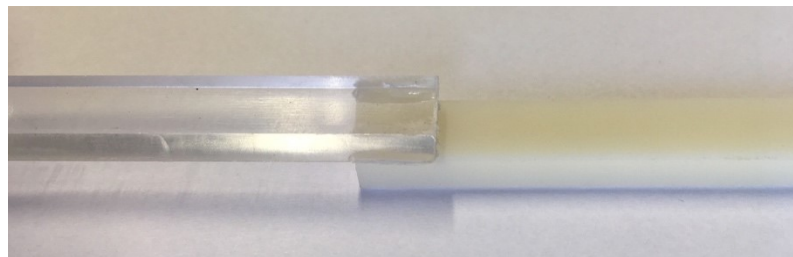
Obr. 68. Závislost únosnosti svarového spoje na dodané svařovací energii

Z uvedené grafické závislosti únosnosti svarového spoje na dodané svařovací energii E_s vyplývá, že zvyšujeme-li procesní parametr E_s , zvyšuje se pevnost, resp. únosnost svarového spoje. U překlátovaného svarového spoje dle varianty B mají parametry svařování významný vliv na pevnost svaru, ale pouze do určité meze. Pravděpodobně další zvyšování pevnosti je limitováno vlivem vrubů v okrajových oblastech svaru. Pokud by se vycházelo z této úvahy, tak dalšího zvýšení pevnosti by bylo možné dosáhnout vhodnou konstrukční úpravou svarového spoje (viz kapitola 7.3.3).

7.3.5 Vliv kombinace materiálů

V rámci experimentu byla také svařena zkušební tělesa, skládající se ze dvou různých materiálů, což umožní posoudit, do jaké míry má vliv zvolená kombinace materiálů na únosnost svarového spoje, která vychází ze vzájemné svařitelnosti těchto použitých materiálů. Protože svařitelnost kombinovaných materiálů je otázkou širšího studia, lze tento experiment brát spíše jako určitou demonstraci významnosti výběru kombinovaných materiálů.

Pro vzájemnou kombinaci byly zvoleny amorfnní termoplasty, z nichž některé již byly použity v rámci předchozích experimentů. Byly zvoleny tyto kombinace: **ABS + PMMA** (porovnáno v souvislosti s výsledky předchozího experimentu, kapitola 7.3.4), **PMMA + PC**. Ačkoliv PC obsahuje 30 % skelných vláken, nemá toto plnění významný vliv na výsledek experimentu. Obecně již samotná matrice, tedy PC, je nevhodnou variantou pro kombinaci s PMMA, jak je následně ověřeno.



Obr. 69. Svařený vzorek: Kombinace ABS + PMMA, Varianta B

Pro možnost porovnání, jaký vliv má kombinace materiálů na samotný proces svařování a na únosnost svarového spoje, bylo třeba stanovit jednotný parametr procesu svařování. Zkušební tělesa všech kombinací byla svařena za konstantního parametru energie E_s , z něhož vychází čas svařovacího cyklu t a svařovací výkon P . U všech vzorků docházelo k porušení přímo ve svarovém spoji, což může být důsledkem zhoršené svařitelnosti vybraných materiálů.

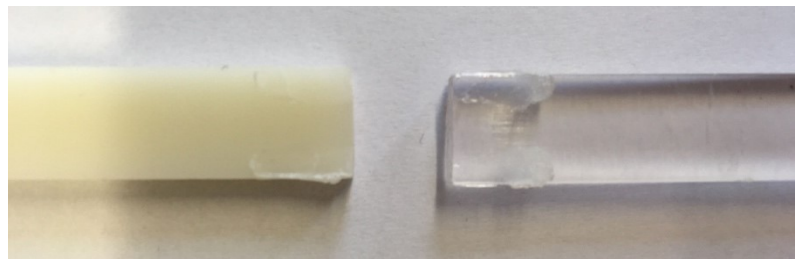
Tab. 24. Výsledky experimentu: ABS + PMMA, Varianta B, $E_s = 25 J$

Vzorek č.	$P [W]$	$t [s]$	$F_{max} [N]$
1	532	0,068	403
2	755	0,055	260
3	764	0,057	263
4	702	0,059	269
5	731	0,052	356
\bar{x}	697	0,058	310
s	96	0,006	66

Tab. 25. Porovnání výsledků v závislosti na kombinaci materiálu

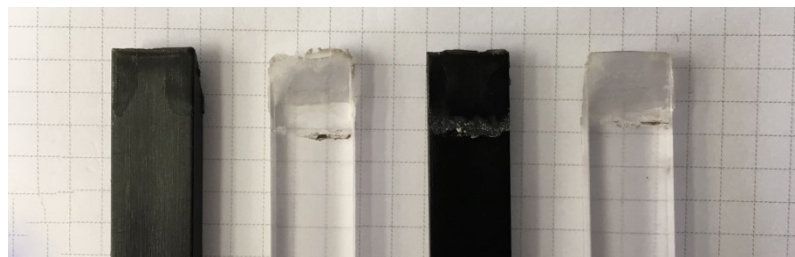
Kombinace	E_s [J]	P [W]	t [s]	F_{max} [N]
ABS + ABS	25	468	0,088	778 ± 31
ABS + PMMA	25	697	0,058	310 ± 66
PMMA + PC 30 % GF	25	640	0,062	-

ABS + PMMA: Tato kombinace je obecně klasifikována jako dobrá. Při shodných procesních parametrech došlo u této kombinace materiálů k výraznému snížení únosnosti v porovnání s nekombinovaným ABS (viz Tab. 25.), přestože materiál byl značně nataven. Příčin tohoto výrazného snížení únosnosti může být mnoho. V tomto případě mohou hrát významnou roli zvolené procesní parametry, mechanické nebo chemické vlastnosti svařovaného materiálu aj. Nelze s jistotou předpokládat, že dalším zvyšováním parametrů by došlo k dalšímu zvýšení únosnosti svaru, jelikož významný vliv zde má svařitelnost zvolených vzájemně kombinovaných materiálů.



Obr. 70. Přetržený vzorek: Kombinace ABS + PMMA, Varianta B

PMMA + PC: Tato varianta se jeví, jako naprosto nevhodná. Únosnost svarového spoje je prakticky nulová. Již bezprostředně po dokončení procesu svařování docházelo k separaci svařovaných částí.



Obr. 71. Přetržený vzorek: Kombinace PMMA + PC, Varianta B2

7.3.6 Šikmý svar

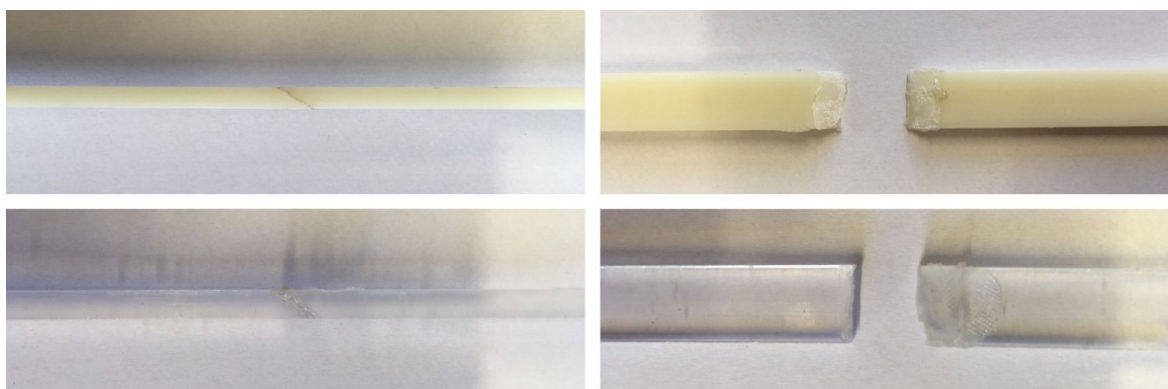
Zajímavým návrhem může být šikmý svar dle návrhové varianty **D** (viz Obr. 48). Tato varianta umožňuje svaření zkušebního tělesa v jedné rovině. V tomto ohledu by se dalo hovořit o jisté náhradě tupého svaru. Nicméně o ekvivalentním svaru nelze v tomto případě hovořit vzhledem k odlišnému působení ultrazvuku vlivem nakloněné svařovací roviny, jiné velikosti styčných ploch a celkově odlišných silových a napěťových poměrů.

Tab. 26. Porovnání únosnosti vybraných vzorků v závislosti na variantě svaru

Materiál	Svar	E_s [J]	P [W]	t [s]	F_{max} [N]
ABS	B	25	489	0,076	798
	D	100	502	0,244	943
PMMA	B2	25	678	0,060	618
	D	50	394	0,102	1090

V porovnání s přeplátovaným svarem varianty B vyžaduje tato modifikace zvýšení parametru E_s . Uvedená varianta je také náročnější na upínání v důsledku působící osové síly, která vzniká rozkladem svařovací síly působící na šikmou plochu svaru.

Jelikož svary této konstrukce nedosahovaly vždy srovnatelné kvality, byly porovnány pouze vzorky vykazující nejvyšší dosaženou únosnost (viz Tab. 26.). Jestliže porovnáme naměřené hodnoty únosnosti vybraných vzorků opatřených svarem varianty B a D, zjistíme, že právě druhá zmiňovaná varianta vykazuje zvýšení únosnosti zkušebních těles z ABS, potom výrazné zvýšení únosnosti zkušebních těles z PMMA. Tedy tato varianta je pravděpodobně méně náchylná na působení vrubů v oblasti svarové zóny. Jak již bylo naznačeno, podmínky tohoto experimentu nebyly zcela přizpůsobeny tomuto typu svaru, nicméně lze tuto variantu označit jako potenciálně vhodné řešení.



Obr. 72. Svařený / Přetržený vzorek: ABS, PMMA, Varianta D

7.4 Test hypotéz

Protože naměřené hodnoty tahové zkoušky vykazují velké rozptyly, nelze s jistotou prohlásit, zda výsledky pokusu jsou, či nejsou průkazné. K ověření jednotlivých vlivů nám poslouží analýza rozptylu (ANOVA).

ANOVA je statistický nástroj, který umožňuje zjistit, zda na hodnotu závislé veličiny má statisticky významný vliv hodnota nezávislé veličiny (označuje se jako faktor). Faktory nabývají pouze malého počtu obměn (úrovní), podle nichž lze hodnoty závislých proměnných rozdělit do skupin. Dle počtu působících faktorů se analýza rozptylu dělí na:

- Jednofaktorová ANOVA – vliv pouze jednoho faktoru na závislou proměnnou
- Vícefaktorová ANOVA – vliv více faktorů

Prokázat závislost vysvětlované (závislé) proměnné Y na vysvětlujících (nezávislých) proměnných, tedy faktorech, znamená prokázat rozdílné úrovně proměnné Y v jednotlivých skupinách, vzniklých tříděním podle faktorů X . Označíme-li střední hodnoty veličiny Y v jednotlivých skupinách $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k$, testujeme hypotézu:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$$

proti alternativě

$$H_A: \text{non } H_0$$

kteřá znamená, že alespoň některá rovnost mezi středními hodnotami neplatí.

Východiskem jsou naměřené hodnoty proměnné Y rozříděné do k skupin podle úrovní (variant) faktoru X . [16]

Pro ověření vlivu jednotlivých parametrů na výsledky tahové zkoušky v kapitole 7.3 bude aplikován test „Jednofaktorová ANOVA“. Tento test bude proveden pomocí statistického nástroje v aplikaci Microsoft Excel. Výstupem této aplikace bude výsledková tabulka, která obsahuje základní statistické charakteristiky všech výběrů (počet hodnot, součet hodnot, průměr a rozptyl atd.), z nichž pro interpretaci výsledků je nejdůležitější hodnota p .

Je-li hodnota $p > \alpha$, potom nezamítám H_0 a tvrdím, že nezávislá hodnota nemá statisticky významný vliv na hodnotu závislou (závislá hodnota se liší pouze náhodně).

Je-li hodnota $p < \alpha$, potom zamítám H_0 a tvrdím, že nezávislá hodnota má statisticky významný vliv na hodnotu závislou.

7.4.1 Závislost únosnosti svarového spoje na jeho délce

$$H_0: \mu_{F_{\max,A}} = \mu_{F_{\max,B}} = \mu_{F_{\max,C}}$$

$$H_A: \mu_{F_{\max,A}} \neq \mu_{F_{\max,B}} \neq \mu_{F_{\max,C}}$$

$$\alpha = 0,05$$

	A	B	C	D	E	F	G
1	Anova: Single Factor						
2							
3	SUMMARY						
4	<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
5	Fmax,A	5	1762	352,4	2332,3		
6	Fmax,B	5	2592	518,4	380,8		
7	Fmax,C	5	3095	619	4126,5		
8							
9							
10	ANOVA						
11	<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
12	Between Groups	181253,2	2	90626,6	39,7508334	5,0876E-06	3,88529383
13	Within Groups	27358,4	12	2279,86667			
14							
15	Total	208611,6	14				

Obr. 73. Výsledková tabulka – ANOVA (závislost F_{\max} na délce svarového spoje)

$$p = 0,000 < \alpha = 0,050$$

Protože $p < \alpha$, zamítám H_0 na hladině statistické významnosti $\alpha = 0,05$ a tvrdím, že délka svaru má statisticky významný vliv na únosnost svarového spoje.

7.4.2 Závislost únosnosti svarového spoje na obsahu vyztužujícího plniva

$$H_0: \mu_{F_{\max},0 \% GF} = \mu_{F_{\max},10 \% GF} = \mu_{F_{\max},20 \% GF} = \mu_{F_{\max},30 \% GF}$$

$$H_A: \mu_{F_{\max},0 \% GF} \neq \mu_{F_{\max},10 \% GF} \neq \mu_{F_{\max},20 \% GF} \neq \mu_{F_{\max},30 \% GF}$$

$$\alpha = 0,05$$

	A	B	C	D	E	F	G
1	Anova: Single Factor						
2							
3	SUMMARY						
4	<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
5	Fmax,0% GF	5	1762	352,4	2332,3		
6	Fmax,10 % GF	5	1834	366,8	3924,2		
7	Fmax,20 % GF	5	2055	411	4575,5		
8	Fmax,30 % GF	5	2181	436,2	1489,7		
9							
10							
11	ANOVA						
12	<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
13	Between Groups	22586	3	7528,66667	2,44403505	0,10165836	3,23887152
14	Within Groups	49286,8	16	3080,425			
15							
16	Total	71872,8	19				

Obr. 74. Výsledková tabulka – ANOVA (závislost F_{\max} na obsahu GF)

$$p = 0,102 > \alpha = 0,050$$

Protože $p > \alpha$, nezamítám H_0 na hladině statistické významnosti $\alpha = 0,05$ a tvrdím, že obsah krátkých skelných vláken v základním materiálu nemá statisticky významný vliv na únosnost svarového spoje.

7.4.3 Vliv modifikace svarového spoje na únosnost

$$H_0: \mu_{F_{\max,B}} = \mu_{F_{\max,B2}}$$

$$H_A: \mu_{F_{\max,B}} \neq \mu_{F_{\max,B2}}$$

$$\alpha = 0,05$$

	A	B	C	D	E	F	G
1	Anova: Single Factor						
2							
3	SUMMARY						
4	<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
5	Fmax,B	5	2744	548,8	1955,7		
6	Fmax,B2	5	2878	575,6	1438,3		
7							
8							
9	ANOVA						
10	<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
11	Between Groups	1795,6	1	1795,6	1,05810253	0,33374193	5,31765507
12	Within Groups	13576	8	1697			
13							
14	Total	15371,6	9				

Obr. 75. Výsledková tabulka – ANOVA (vliv modifikace svarového spoje na F_{\max})

$$p = 0,334 > \alpha = 0,050$$

Protože $p > \alpha$, nezamítám H_0 na hladině statistické významnosti $\alpha = 0,05$ a tvrdím, že modifikace konstrukčního provedení svarového spoje nemá statisticky významný vliv na únosnost tohoto spoje.

7.4.4 Závislost únosnosti svarového spoje na dodané svařovací energii

$$H_0: \mu_{F_{\max},E10} = \mu_{F_{\max},E15} = \mu_{F_{\max},E25}$$

$$H_A: \mu_{F_{\max},E10} \neq \mu_{F_{\max},E15} \neq \mu_{F_{\max},E25}$$

$$\alpha = 0,05$$

	A	B	C	D	E	F	G
1	Anova: Single Factor						
2							
3	SUMMARY						
4	<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
5	Fmax,E10	5	2740	548	1089,5		
6	Fmax,E15	5	3595	719	843,5		
7	Fmax,E25	5	3892	778,4	955,3		
8							
9							
10	ANOVA						
11	<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
12	Between Groups	143089,2	2	71544,6	74,3114635	1,7388E-07	3,88529383
13	Within Groups	11553,2	12	962,766667			
14							
15	Total	154642,4	14				

Obr. 76. Výsledková tabulka – ANOVA (závislost F_{\max} na E_s)

$$p = 0,000 < \alpha = 0,050$$

Protože $p < \alpha$, zamítám H_0 na hladině statistické významnosti $\alpha = 0,05$ a tvrdím, že míra energie, kterou dodáváme svaru v průběhu procesu svařování má statisticky významný vliv na únosnost svarového spoje.

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo hodnocení různých vlivů na pevnosti svařovaných termoplastických dílů. Zkušební vzorky různých polymerních materiálů byly vzájemně spojeny s použitím technologie svařování ultrazvukem. Následně byly tyto vzorky podrobeny tahové zkoušce. Svařované vzorky byly kombinací stejného materiálu i kombinací materiálů odlišných. Výsledná pevnost některých svařovaných vzorků byla porovnána s pevností výchozích (nesvařených) vzorků téhož materiálu, což umožnilo stanovit míru ztráty pevnosti vůči pevnosti výchozího materiálu. Vzájemným porovnáním zkušebních vzorků byly hodnoceny jednotlivé vlivy na únosnost svarového spoje, jako např. vliv materiálu nebo nastavených svařovacích procesních parametrů.

Pro přípravu zkušebních vzorků požadované jakosti, bylo nutné zvolit, případně zkonstruovat adekvátní nástroje a zařízení, které umožnily opakovatelnost daných podmínek procesu svařování. Důležitým bodem bylo také stanovení vhodných procesních podmínek svařování. Pro dosažení svaru požadované jakosti byla stanovena doba působení ultrazvukových vibrací, velikost amplitudy, velikost přitlačné síly atd., přičemž pro každý typ materiálu byly procesní podmínky svařování stanoveny experimentálně.

Hodnocení jednotlivých vlivů vycházelo z výsledků tahové zkoušky. Tahová zkouška dle ČSN EN 12 814-2 nám poskytla výpověď o pevnosti testovaných svarových spojů v závislosti na typu svaru, ploše svaru a typu případně modifikaci svařovaného materiálu. Na základě naměřených dat a jejich vyhodnocení bylo možné porovnat zmíněné parametry a jejich vliv na pevnost svarového spoje. Hodnocení experimentu vycházelo také z teoretických předpokladů, které vyplynuly z FEM analýzy konkrétních případů spojení. Tato analýza probíhala v aplikaci COSMOS/M. Potom výsledky FEM analýzy byly porovnány s výsledky skutečného experimentu.

Bylo navrženo několik variant svarových spojů, které se liší délkou, resp. velikostí plochy spoje a některými konstrukčními úpravami, které z teoretického hlediska mají vliv na výslednou pevnost svarového spoje. Zda tyto úpravy mají reálný vliv na pevnost spoje, bylo předmětem studie.

K posouzení vlivu velikosti plochy svaru na jeho pevnost byly použity vzorky z čistého PP. Protože se jedná o přeplátovaný svar, je jeho plocha ovlivňována délkou přeplátování, resp. délkou svaru. Jednotlivé skupiny vzorků byly opatřeny svary odpovídajícími variantám: A (délka svaru 5 mm), B (délka svaru 10 mm), C (délka svaru 20 mm).

Z experimentu vyplývá, že čím delší je svarový spoj, resp. jeho plocha, tím větší je jeho únosnost při mechanickém zatížení. Teoreticky by od jisté délky svaru neměla únosnost záviset na jeho délce vlivem vrubů v okrajových oblastech svaru, nicméně v takovém případě by docházelo k porušení zkušebních vzorků mimo svarový spoj. Protože u všech vzorků došlo k přetržení ve svaru, nikoliv mimo svar, lze toto měření považovat za obecný popis pevnosti svaru, která se zvyšuje s jeho rostoucí délkou, resp. plochou.

K posouzení vlivu určitého obsahu plniv na pevnost svarového spoje byly použity opět vzorky z PP s různým stupněm plnění krátkými skelnými vlákny (zkratka GF). Obsah GF v základním materiálu byl 10 %, 20 % a 30 %. Zkušební vzorky byly opatřeny přeplátovaným svarem o délce 5 mm, který odpovídá variantě A.

Určitý podíl GF má pravděpodobně pozitivní vliv na výslednou únosnost svarového spoje. To znamená, že přidáním vyztužujících plniv se zvyšuje tuhost materiálu, čímž je podmíněna lepší vodivost ultrazvukových vln. Výsledkem je svarový spoj vyznačující se vyšší únosností v porovnání s neplněným materiálem, současně při dodržení shodných svařovacích parametrů.

K posouzení vlivu přítomných vrubů v krajních oblastech svaru na jeho pevnost byly použity vzorky z PMMA. Nejdříve byla zkušební tělesa opatřena svarem, který odpovídá variantě B (délka přeplátování 10 mm). Další skupina vzorků byla opatřena modifikovaným svarem, který odpovídá variantě B2 (délka přeplátování 10 mm + úprava svařovaných částí). Tedy rozdíl mezi svarovými variantami spočíval v úpravě svařovaných částí, kdy konce těchto částí byly opatřeny úkosem. Tato konstrukční úprava by dle úvahy mohla vést k alespoň částečné eliminaci vlivu vrubů, které vznikají v okrajových oblastech svaru.

Nelze jednoznačně určit, zda konstrukční úprava svařovaných částí má vliv na únosnost svařeného zkušebního tělesa. U jednotlivých variant svarového spoje, bylo pozorováno nepatrné zvýšení únosnosti u konstrukčně upravené varianty B2. Toto zvýšení únosnosti sice vyhovuje předpokladu, nicméně jde o tak malý rozdíl, že nelze tento výsledek považovat za zcela průkazný.

Z porovnání naměřených výsledků tahové zkoušky provedené nejdříve na svařených zkušebních tělesech, poté na výchozích (nesvařených) zkušebních tělesech, bylo patrné, že snížení únosnosti v důsledku vrubů je výrazné. V tomto případě byla únosnost svařeného tělesa přibližně 3x nižší v porovnání s výchozím nesvařeným tělesem.

K posouzení vlivu svařovacích parametrů na pevnost svarového spoje byly použity vzorky z ABS. Vzorky byly opatřeny opět přeplátovaným svarem, který odpovídá variantě B (délka svaru 10 mm). Svar byl realizován při odlišných svařovacích parametrech, které se lišily v závislosti na zvolené energii svařování E_s , tedy energii dodané svařovanému spoji. Množstvím dodané energie do místa svaru byl ovlivněn stupeň tavení materiálu, v důsledku čehož byla ovlivněna také pevnost výsledného svarového spoje. Zkušební tělesa jednotlivých skupin byla postupně svařena při rostoucím parametru energie E_s , která nabývala těchto hodnot: 10 J, 15 J, 25 J.

Zvyšuje-li se procesní parametr E_s , dochází k výraznějšímu natavení základního materiálu. To se v našem případě projevilo zvětšením celkové plochy svaru. Všechna tělesa svařena při $E_s < 25$ J byla porušena přímo ve svaru. Již při $E_s = 25$ J dosahoval svar takové pevnosti, že některá zkušební tělesa svařena při této energii byla přetržena mimo oblast svaru. Ačkoliv byla zkušební tělesa porušena mimo svarový spoj, jejich pevnost, resp. únosnost neodpovídá únosnosti výchozích (nesvařených) zkušebních těles. Únosnost svařených těles je přibližně 2x nižší v porovnání s výchozími tělesy. Porušení těles mimo svar může poukazovat na problematiku vrubů, která byla zmíněna již dříve. To by znamenalo, že další zvyšování parametrů by pravděpodobně nevedlo k výraznému zvýšení únosnosti tohoto typu svaru. Lze tedy říci, že u přeplátovaného svarového spoje dle varianty B mají parametry svařování významný vliv na pevnost svaru, ale pouze do určité meze. Pravděpodobně další zvyšování pevnosti je limitováno vlivem vrubů v okrajových oblastech svaru. Pokud by se vycházelo z této úvahy, tak dalšího zvýšení pevnosti by bylo možné dosáhnout vhodnou konstrukční úpravou svarového spoje.

V rámci experimentu byla také svařena zkušební tělesa, skládající se ze dvou různých materiálů. Toto umožnilo posoudit, do jaké míry má vliv zvolená kombinace materiálů na únosnost svarového spoje, která vychází ze vzájemné svařitelnosti těchto použitých materiálů.

Byly zvoleny tyto kombinace: ABS + PMMA a PMMA + PC. Ačkoliv PC obsahuje 30 % skelných vláken, nemá toto plnění významný vliv na výsledek experimentu, protože obecně již samotná matrice, tedy PC, je nevhodnou variantou pro kombinaci s PMMA, jak bylo následně ověřeno.

Kombinace ABS + PMMA je obecně klasifikována jako dobrá. Při shodných procesních parametrech došlo u této kombinace materiálů k výraznému snížení únosnosti v porovnání

s nekombinovaným ABS, přestože materiál byl značně nataven. Nelze s jistotou předpokládat, že dalším zvyšováním parametrů by došlo k dalšímu zvýšení únosnosti svaru, jelikož významný vliv zde má svařitelnost zvolených vzájemně kombinovaných materiálů.

Varianta PMMA + PC se jeví, jako naprosto nevhodná. Únosnost svarového spoje je prakticky nulová. Již bezprostředně po dokončení procesu svařování docházelo k separaci svařovaných částí.

Zajímavým řešením může být šikmý svar varianty D, který umožňuje svaření zkušebního tělesa v jedné rovině. V tomto ohledu by se dalo hovořit o jisté náhradě tupého svaru. Nicméně o ekvivalentním svaru nelze v tomto případě hovořit vzhledem k odlišnému působení ultrazvuku vlivem nakloněné svařovací roviny, jiné velikosti styčných ploch a celkově odlišných silových a napěťových poměrů.

Jelikož svary této konstrukce nedosahovaly vždy srovnatelné kvality, byly porovnány pouze vzorky vykazující nejvyšší dosaženou míru únosnosti. Vzájemně byly porovnány naměřené hodnoty únosnosti vybraných vzorků opatřených svarem varianty B a D. Z tohoto porovnání vyplývá, že právě druhá zmiňovaná varianta vykazuje zvýšení únosnosti zkušebních těles z ABS, potom také výrazné zvýšení únosnosti zkušebních těles z PMMA. Podmínky tohoto experimentu nebyly zcela přizpůsobeny tomuto typu svaru, nicméně lze tuto variantu označit jako potenciálně vhodné řešení, jenž by mohlo být předmětem širší studie.

Protože naměřené hodnoty tahové zkoušky vykazovaly velké rozptyly, nelze s jistotou prohlásit, zda výsledky pokusu jsou, či nejsou průkazné. Tedy jednotlivé vlivy byly ověřeny na základě analýzy rozptylu (ANOVA). V závěrečné části experimentu byly výsledky interpretovány formou testovaných statistických hypotéz.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MMspektrum, Dr. Ing. Ondřej Kotera, Problematika dějů při svařování plastů vybranými technologiemi [online]. [cit. 7.1.2018]. Dostupné z:
<https://www.mmspektrum.com/clanek/problematika-deju-pri-svarovani-plastu-vybrany-mi-technologiemi.html>
- [2] Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, učební texty, Ultrazvukové svařování [online]. [cit. 7.1.2018]. Dostupné z:
<http://homen.vsb.cz/~hla80/2009svarovani/2-06-41.pdf>
- [3] Ing. Jaromír Lukášek, CSc., Svařování ultrazvukem [online]. [cit. 7.1.2018]. Dostupné z:
<http://www.welding.cz/ultrazvuk/ultrazvuk.htm>
- [4] Wikipedia, Svařování [online]. [cit. 10.1.2018]. Dostupné z:
<https://cs.wikipedia.org/wiki/Svařován%C3%AD>
- [5] České vysoké učení technické v Praze – Fakulta strojní, učební texty, Svařování [online]. [cit. 10.1.2018]. Dostupné z:
http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/UT_01_Prehled_svarovani_T08.pdf
- [6] Wikipedia, Svařování plastů [online]. [cit. 10.1.2018]. Dostupné z:
https://cs.wikipedia.org/wiki/Svařován%C3%AD_plastů
- [7] Internetové stránky publi.cz, Technologie zpracování plastů, Svařování plastů [online]. [cit. 18.1.2018]. Dostupné z:
<https://publi.cz/books/183/13.html>
- [8] Internetové stránky firmy PAVES color magic s.r.o, Ultrazvukové svařování [online]. [cit. 21.1.2018]. Dostupné z:
<http://www.paves.info/sluzby/ultrazvukove-svarovani/>
- [9] MMspektrum, Využití ultrazvuku při svařování plastů [online]. [cit. 22.1.2018]. Dostupné z:
<https://www.mmspektrum.com/clanek/vyuziti-ultrazvuku-pri-svarovani-plastu.html>

- [10] Doc. Ing. Vojtěch Geleta, Ph.D.: Progresívne Technológie Obrábania, Vydala Slovenská technická univerzita v Bratislavě v nakladatelství STU, Bratislava, Vazovova 5, v roce 2013, ISBN 978-80-227-3997-9
- [11] Internetové stránky firmy WIRETECH s.r.o, Ultrazvukové svařování plastů [online]. [cit. 24.1.2018]. Dostupné z:
<https://www.wiretech.cz/c/ultrazvukova-technologie/ultrazvukove-svarovani-plastu>
- [12] Ing. Miloslav Loyda, Vlastimil Šponer, Ladislav Ondráček a kolektiv: Svařování termoplastů, Vydalo UNO Praha, spol. s.r.o., Šaldova 28, 186 00 Praha 8, v roce 2001, ISBN 80-238-6603-6
- [13] Internetové stránky wsp.hs-mannheim.de, Universalprüfmaschine statisch Zwick [online]. [cit. 27.3.2018]. Dostupné z:
<https://www.wsp.hs-mannheim.de/waagerechte-navigation/institut/ausstattung/mechanische-pruefung/universalpruefmaschine-statisch-zwick.html>
- [14] Doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D, Svařované konstrukce z plastů [online]. [cit. 14.4.2018]. Dostupné z:
<http://homen.vsb.cz/~hla80/2009svarovani/3-7.pdf>
- [15] Internetové stránky publi.cz, Termoplasty – základní druhy [online]. [cit. 17.4.2018]. Dostupné z:
<https://publi.cz/books/180/18.html>
- [16] Jiří Neubauer, Katedra ekonometrie FEM UO Brno, Analýza rozptylu [online]. [cit. 27.4.2018]. Dostupné z:
http://k101.unob.cz/~neubauer/pdf/analyza_rozptylu.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ABS	Akrylonitril-butadien styren
PA	Polyamid
PP	Polypropylen
PC	Polykarbonát
PMMA	Polymethylmethakrylát
PVC	Polyvinylchlorid
PVC-C	Chlorovaný polyvinylchlorid
PVC-HI	Houževnatý polyvinylchlorid
PVC-U	Neměkčený polyvinylchlorid
PVDC	Polyvinylidenchlorid
PVDF	Polyvinylidenfluorid
EVA	Etylvinylalkohol
PET	Polyethylentereftalát
PUR	Polyuretan
PE-HD	Vysokohustotní polyethylen
HIPS	Houževnatý polystyren
f_z	Krátkodobý tahový svařovací faktor
f_{sz}	Krátkodobý rázový svařovací faktor
f_s	Dlouhodobý tahový svařovací faktor
F_v	Síla při přetržení svařeného vzorku
F_B	Síla při přetržení nesvařeného srovnávacího vzorku
b_B	Šířka nesvařeného srovnávacího vzorku
h_B	Tloušťka nesvařeného srovnávacího vzorku
b_v	Šířka svařeného vzorku
h_v	Tloušťka svařeného vzorku

W_{zv}	Korigovaná rázová práce pro svařené vzorky
W_{zB}	Korigovaná rázová práce pro nesvařené srovnávací vzorky
σ	Napětí
σ_s	Dlouhodobé tahové napětí svařovaných vzorků
σ_B	Dlouhodobé tahové napětí nesvařovaných srovnávacích vzorků
τ	Smykové napětí
F	Síla
F_s	Svařovací síla
M_k	Kroutící moment
ε	Poměrné prodloužení
Δl	Prodloužení
E	Modul pružnosti v tahu
N	Newton
kN	Kilonewton
MPa	Megapascal
P	Výkon svařování
t	Čas svařovacího cyklu
E_s	Energie svařování
A	Amplituda
f	Frekvence
W	Watt
s	Sekunda
min	Minuta
J	Joule
Hz	Hertz
kHz	Kilohertz

MHz	Megahertz
m	Metr
mm	Milimetr
μm	Mikrometr
nm	Nanometr
$^{\circ}\text{C}$	Stupeň celsia
GF	Skelná vlákna (Glass Fiber)
%	Procento
FEM	Metoda konečných prvků (Finite Element Method)
ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma
DIN	Německá národní norma (Deutsche Industrie-Norm)
A...D	Varianta svarového spoje
H_0	Nulová hypotéza
H_A	Alternativní hypotéza
$\mu_{F\text{max}}$	Skupina naměřených hodnot
α	Hladina statistické významnosti
p	Pravděpodobnost „nulové hypotézy“

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Příklady plastových svařenců [7]</i>	13
<i>Obr. 2. Základní rozdělení technologií svařování termoplastů [7]</i>	14
<i>Obr. 3. Postup svařování horkým tělesem [7]</i>	15
<i>Obr. 4. Postup svařování topnou spirálou [7]</i>	16
<i>Obr. 5. Princip ručního svařování horkým plynem s přídavným materiálem [7]</i>	16
<i>Obr. 6. Postup strojního svařování horkým plynem [7]</i>	17
<i>Obr. 7. Ruční svařování extruderem [7]</i>	17
<i>Obr. 8. Princip svařování infračerveným paprskem [7]</i>	18
<i>Obr. 9. Typy infračervených zářičů [7]</i>	19
<i>Obr. 10. Princip svařování laserem [7]</i>	20
<i>Obr. 11. Možnosti laserového svařování [7]</i>	20
<i>Obr. 12. Princip rotačního svařování třením [7]</i>	22
<i>Obr. 13. Princip vibračního svařování [7]</i>	23
<i>Obr. 14. Princip lineárně-vibračního svařování [7]</i>	23
<i>Obr. 15. Princip orbitálně-vibračního svařování [7]</i>	24
<i>Obr. 16. Základní části ultrazvukové svářečky [7]</i>	25
<i>Obr. 17. Některé typy konvertorů [7]</i>	26
<i>Obr. 18. Piezoelektrický jev [10]</i>	26
<i>Obr. 19. Magnetostrikční konvertor s uzavřeným jádrem [10]</i>	27
<i>Obr. 20. Některé typy sonotrod [7]</i>	27
<i>Obr. 21. Průběh svařování ultrazvukem [2]</i>	28
<i>Obr. 22. Tvarová úprava styčných ploch [2]</i>	30
<i>Obr. 23. Svařování plastových dílů [11]</i>	31
<i>Obr. 24. Nýtování termoplastů [11]</i>	31
<i>Obr. 25. Ultrazvukové svařování torzní metodou [11]</i>	32
<i>Obr. 26. Přírubová spojení termoplastů [11]</i>	32
<i>Obr. 27. Bodové svařování ultrazvukem [11]</i>	33
<i>Obr. 28. Ultrazvukové zatahovávání kovových dílů [11]</i>	33
<i>Obr. 29. Mikrotomový řez svarovou zónou semikrystalického termoplastu [1]</i>	37
<i>Obr. 30. Tepelné a napěťové poměry ve svarové zóně [1]</i>	37
<i>Obr. 31. Svarové zóny zhotovené za různých podmínek [1]</i>	38
<i>Obr. 32. Materiál poškozený silnými kmity a velkým svařovacím tlakem</i>	39

<i>Obr. 33. Tvary vzorků pro tahovou zkoušku [12]</i>	40
<i>Obr. 34. Zkušební těleso pro rázovou tahovou zkoušku [12]</i>	43
<i>Obr. 35. Kladivo pro rázovou tahovou zkoušku [12]</i>	43
<i>Obr. 36. Schéma uspořádání technologické ohybové zkoušky [12]</i>	44
<i>Obr. 37. Schéma uspořádání pro dlouhodobou tahovou zkoušku [12]</i>	45
<i>Obr. 38. Schematické znázornění definice dlouhodobého svařovacího faktoru [12]</i>	46
<i>Obr. 39. Použité zařízení pro svařování ultrazvukem</i>	51
<i>Obr. 40. Svařovací přípravek</i>	52
<i>Obr. 41. Schéma převodu svařovacího přípravku</i>	52
<i>Obr. 42. 3D model upínacího přípravku</i>	54
<i>Obr. 43. Hotový upínací přípravek</i>	55
<i>Obr. 44. Nástroje a zařízení použité pro výrobu upínacího přípravku</i>	55
<i>Obr. 45. Univerzální zkušební stroj Zwick 1456</i>	56
<i>Obr. 46. Výchozí zkušební těleso</i>	59
<i>Obr. 47. Upravené části svařovaného zkušební tělesa</i>	59
<i>Obr. 48. Varianty svarových spojů</i>	60
<i>Obr. 49. Analýza deformace zkušební tělesa během tahové zkoušky</i>	62
<i>Obr. 50. Vzorek upnutý ve zkušebním stroji</i>	62
<i>Obr. 51. Svařený vzorek: PP, Varianta B</i>	63
<i>Obr. 52. Přetržený vzorek: PP, Varianta B</i>	64
<i>Obr. 53. Závislost únosnosti svarového spoje na jeho délce</i>	65
<i>Obr. 54. Průběh napětí ve svaru o délce 10 mm</i>	66
<i>Obr. 55. Průběh napětí ve svaru o délce 15 mm</i>	67
<i>Obr. 56. Průběh napětí ve svaru o délce 25 mm</i>	67
<i>Obr. 57. Průběh napětí ve svaru o délce 40 mm</i>	68
<i>Obr. 58. Závislost napětí na délce svarového spoje</i>	69
<i>Obr. 59. Svařený vzorek: PP 30 % GF, Varianta A</i>	70
<i>Obr. 60. Přetržený vzorek: PP 30 % GF, Varianta A</i>	71
<i>Obr. 61. Závislost únosnosti svarového spoje na obsahu plniva (GF)</i>	72
<i>Obr. 62. Svařený vzorek: PMMA, Varianta B</i>	73
<i>Obr. 63. Svařený vzorek: PMMA, Varianta B2</i>	73
<i>Obr. 64. Přetržený vzorek: PMMA, Varianta B/B2</i>	75
<i>Obr. 65. Vliv modifikace svarového spoje na únosnost</i>	75

<i>Obr. 66. Svařený vzorek: ABS, Varianta B</i>	76
<i>Obr. 67. Přetržený vzorek: ABS, Varianta B</i>	78
<i>Obr. 68. Závislost únosnosti svarového spoje na dodané svařovací energii</i>	79
<i>Obr. 69. Svařený vzorek: Kombinace ABS + PMMA, Varianta B</i>	80
<i>Obr. 70. Přetržený vzorek: Kombinace ABS + PMMA, Varianta B</i>	81
<i>Obr. 71. Přetržený vzorek: Kombinace PMMA + PC, Varianta B2</i>	81
<i>Obr. 72. Svařený / Přetržený vzorek: ABS, PMMA, Varianta D</i>	82
<i>Obr. 73. Výsledková tabulka – ANOVA (závislost F_{max} na délce svarového spoje)</i>	84
<i>Obr. 74. Výsledková tabulka – ANOVA (závislost F_{max} na obsahu GF)</i>	85
<i>Obr. 75. Výsledková tabulka – ANOVA (vliv modifikace svarového spoje na F_{max})</i>	86
<i>Obr. 76. Výsledková tabulka – ANOVA (závislost F_{max} na E_s)</i>	87

SEZNAM TABULEK

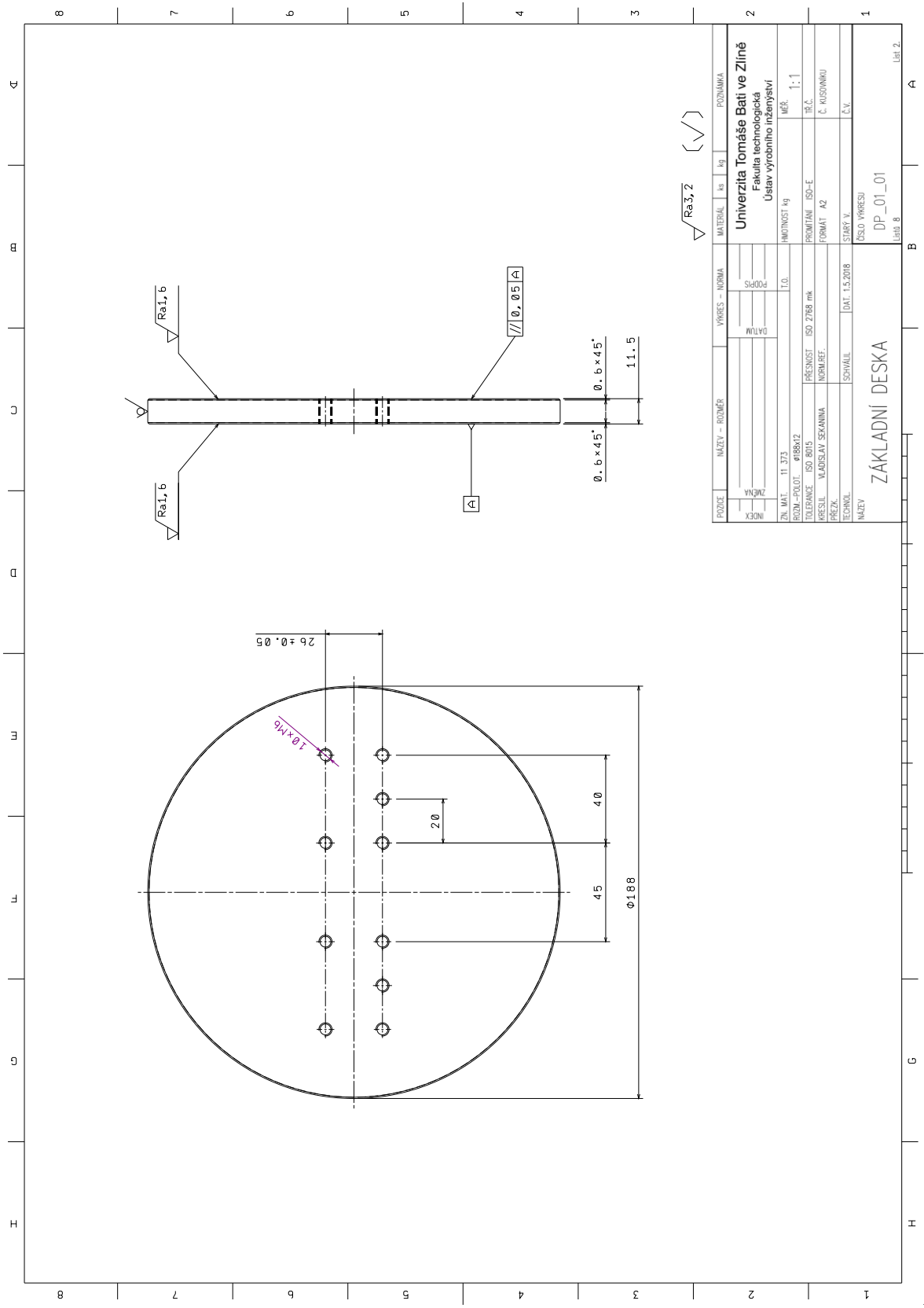
<i>Tab. 1. Rozměry zkušebních těles [12]</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 2. Požadavky na krátkodobý tahový svařovací faktor [12]</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 3. Požadavky na dlouhodobý tahový svařovací faktor [12]</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 4. Základní parametry zkušebního stroje Zwick 1456 [13]</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 5. Typické vlastnosti polypropylenu [15]</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 6. Výsledky experimentu: PP, Varianta A, $E_s = 50 J$</i>	<i>63</i>
<i>Tab. 7. Výsledky experimentu: PP, Varianta B, $E_s = 50 J$</i>	<i>64</i>
<i>Tab. 8. Výsledky experimentu: PP, Varianta C, $E_s = 50 J$</i>	<i>64</i>
<i>Tab. 9. Porovnání výsledků v závislosti na délce svaru</i>	<i>65</i>
<i>Tab. 10. Napěťové poměry ve svaru v závislosti na jeho délce</i>	<i>68</i>
<i>Tab. 11. Výsledky experimentu: PP 10 % GF, Varianta A, $E_s = 50 J$</i>	<i>70</i>
<i>Tab. 12. Výsledky experimentu: PP 20 % GF, Varianta A, $E_s = 50 J$</i>	<i>70</i>
<i>Tab. 13. Výsledky experimentu: PP 30 % GF, Varianta A, $E_s = 50 J$</i>	<i>71</i>
<i>Tab. 14. Porovnání výsledků v závislosti na podílu plniva</i>	<i>71</i>
<i>Tab. 15. Výsledky experimentu: PMMA, Varianta B, $E_s = 25 J$</i>	<i>74</i>
<i>Tab. 16. Výsledky experimentu: PMMA, Varianta B2, $E_s = 25 J$</i>	<i>74</i>
<i>Tab. 17. Výsledky experimentu: PMMA, Beze svaru</i>	<i>74</i>
<i>Tab. 18. Porovnání výsledků v závislosti na modifikaci svarového spoje</i>	<i>75</i>
<i>Tab. 19. Výsledky experimentu: ABS, Varianta B, $E_s = 10 J$</i>	<i>77</i>
<i>Tab. 20. Výsledky experimentu: ABS, Varianta B, $E_s = 15 J$</i>	<i>77</i>
<i>Tab. 21. Výsledky experimentu: ABS, Varianta B, $E_s = 25 J$</i>	<i>77</i>
<i>Tab. 22. Výsledky experimentu: ABS, Beze svaru</i>	<i>77</i>
<i>Tab. 23. Porovnání výsledků v závislosti na svařovacích parametrech</i>	<i>79</i>
<i>Tab. 24. Výsledky experimentu: ABS + PMMA, Varianta B, $E_s = 25 J$</i>	<i>80</i>
<i>Tab. 25. Porovnání výsledků v závislosti na kombinaci materiálu</i>	<i>81</i>
<i>Tab. 26. Porovnání únosnosti vybraných vzorků v závislosti na variantě svaru</i>	<i>82</i>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha PI Výkres sestavy upínacího přípravku

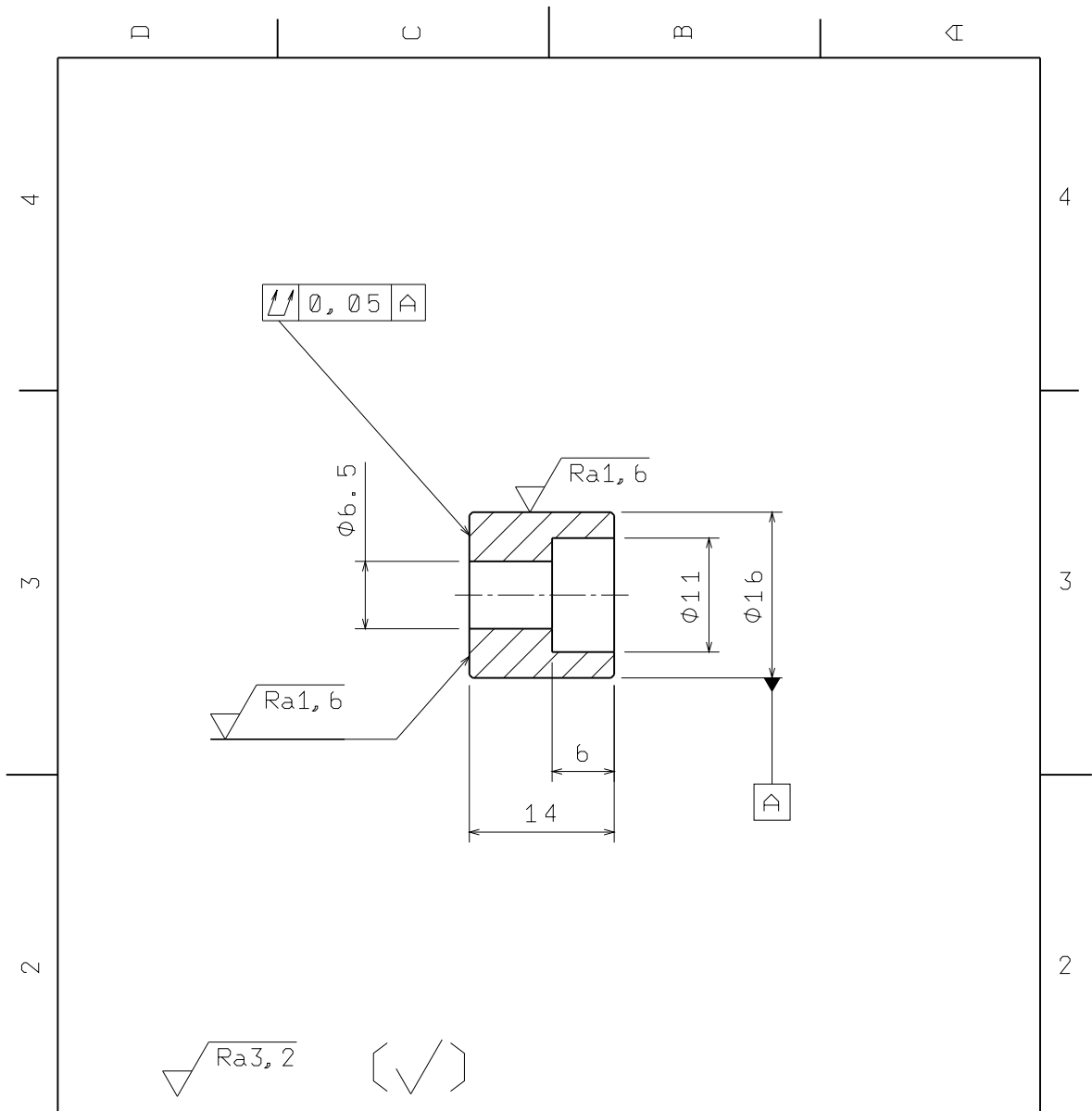
Příloha PII Výkresy dílčích součástí sestavy upínacího přípravku

PŘÍLOHA P II: VÝKRESY DÍLČÍCH SOUČÁSTÍ SESTAVY UPÍNACÍHO PŘÍPRAVKU

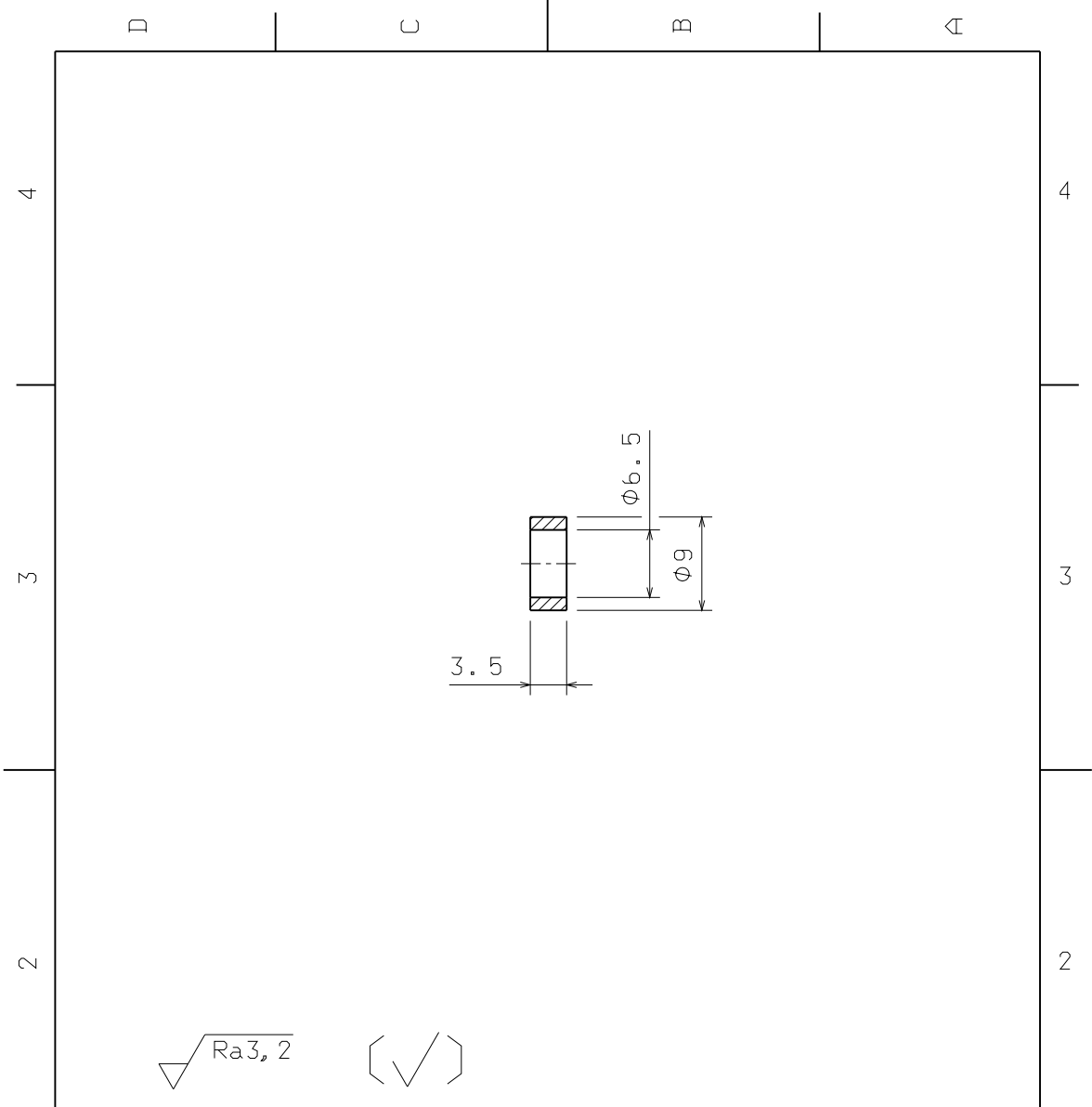


√ Ra3,2 (√)

POZICE	NAZEV - ROZMĚR	VÝKRES - NORMA	MATERIÁL	ks	kg	POZNÁMKA
1	ZÁKLADNÍ DESKA	SIG004	St004			
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně Fakulta technologická Ústav výrobního inženýrství						
ZN. MAT. 11.373			HMOTNOST kg		MĚR. 1:1	
ROZM.-POLOH. #188412			PŘESNOST ISO 2768 mK		TR.Č.	
TOLERANCE ISO 8015			NORM.REF.		Č. KUSOVNIKU	
KRESLIL MĀDISLAV ŠKAVANNA			SCHWALL		STÁRY V.	
PŘEZK.			DAT. 1.5.2018		Č.V.	
TECHNOL.			ČÍSLO VÝKRESU		ČÍSLO VÝKRESU	
NAZEV			DP_01_01		Lit. 2.	
			str. 8		A	



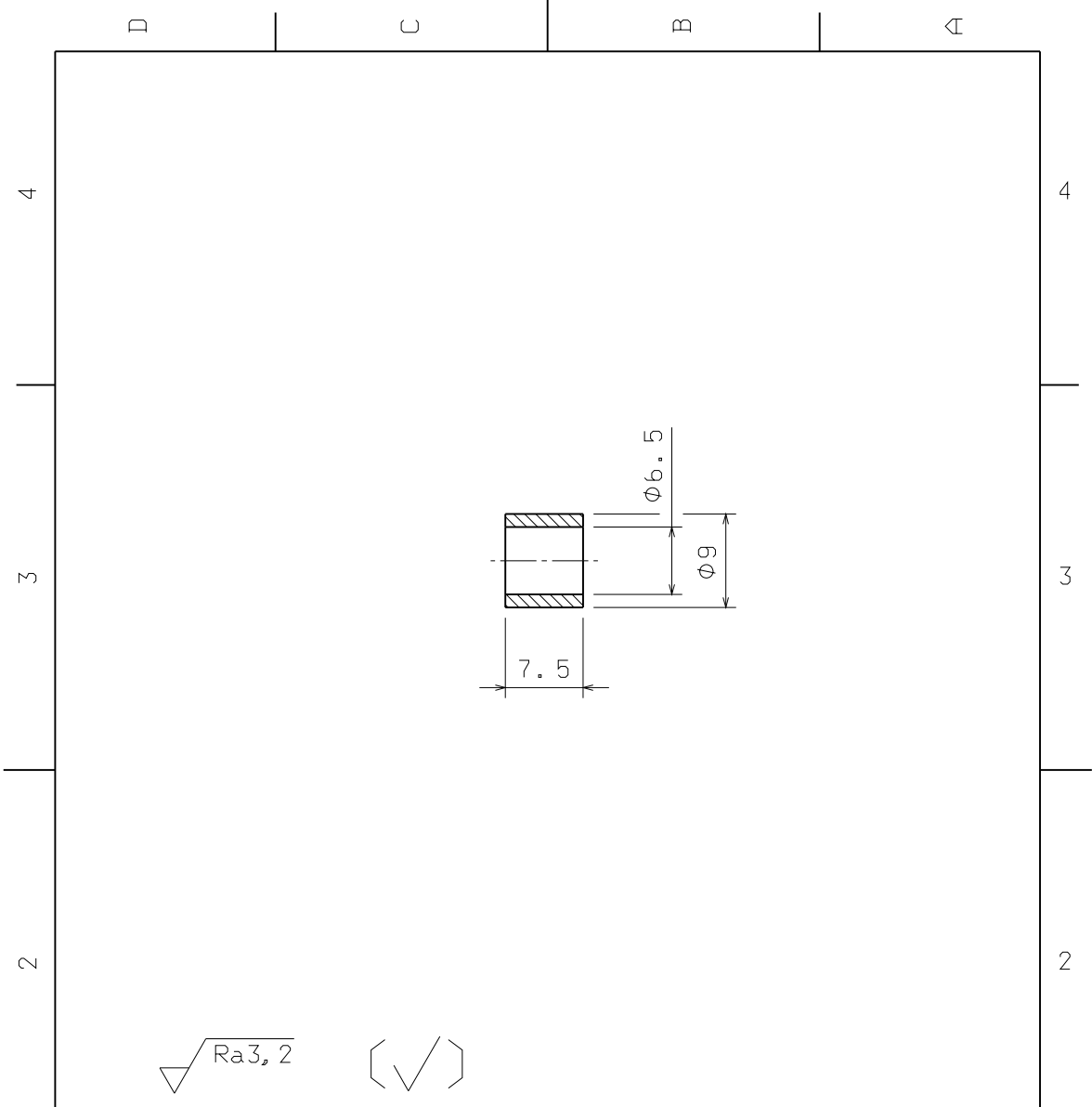
POZICE	NÁZEV - ROZMĚR	VÝKRES - NORMA	MATERIÁL	ks	kg	POZNÁMKA
INDEX	ZMĚNA	DATUM	PODPIS	Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně Fakulta technologická Ústav výrobního inženýrství		
ZN. MAT.	42 4201	T.O.				
ROZM.-POLOT.					2:1	
TOLERANCE	ISO 8015	PŘESNOST	ISO 2768 mk	PROMÍTÁNÍ	ISO-E	TŘ.Č.
KRESLIL	VLADISLAV SEKANINA	NORM.REF.		FORMÁT	A4	Č. KUSOVNIKU
PŘEZK.						
TECHNOL.	SCHVÁLIL	DAT.	1.5.2018	STARÝ V.		Č.V.
NÁZEV	OPĚRNÝ VÁLEČEK			ČÍSLO VÝKRESU	DP_01_02	
				Listů 8		List 3.



$\sqrt{Ra3,2}$
($\sqrt{\quad}$)

POZICE	NÁZEV - ROZMĚR	VÝKRES - NORMA	MATERIÁL	ks	kg	POZNÁMKA
INDEX	ZMĚNA	DATUM	PODPIS	Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně Fakulta technologická Ústav výrobního inženýrství		
ZN. MAT.	11 373	T.O.				
ROZM.-POLOT.					2:1	
TOLERANCE	ISO 8015	PŘESNOST	ISO 2768 mk	PROMÍTÁNÍ	ISO-E	TŘ.Č.
KRESLIL	VLADISLAV SEKANINA	NORM.REF.		FORMÁT	A4	Č. KUSOVNIKU
PŘEZK.						
TECHNOL.	SCHVÁLIL	DAT.	1.5.2018	STARÝ V.		Č.V.
NÁZEV	OPĚRNÁ PODLOŽKA NÍZKÁ			ČÍSLO VÝKRESU	DP_01_03	
				Listů 8	List 4.	

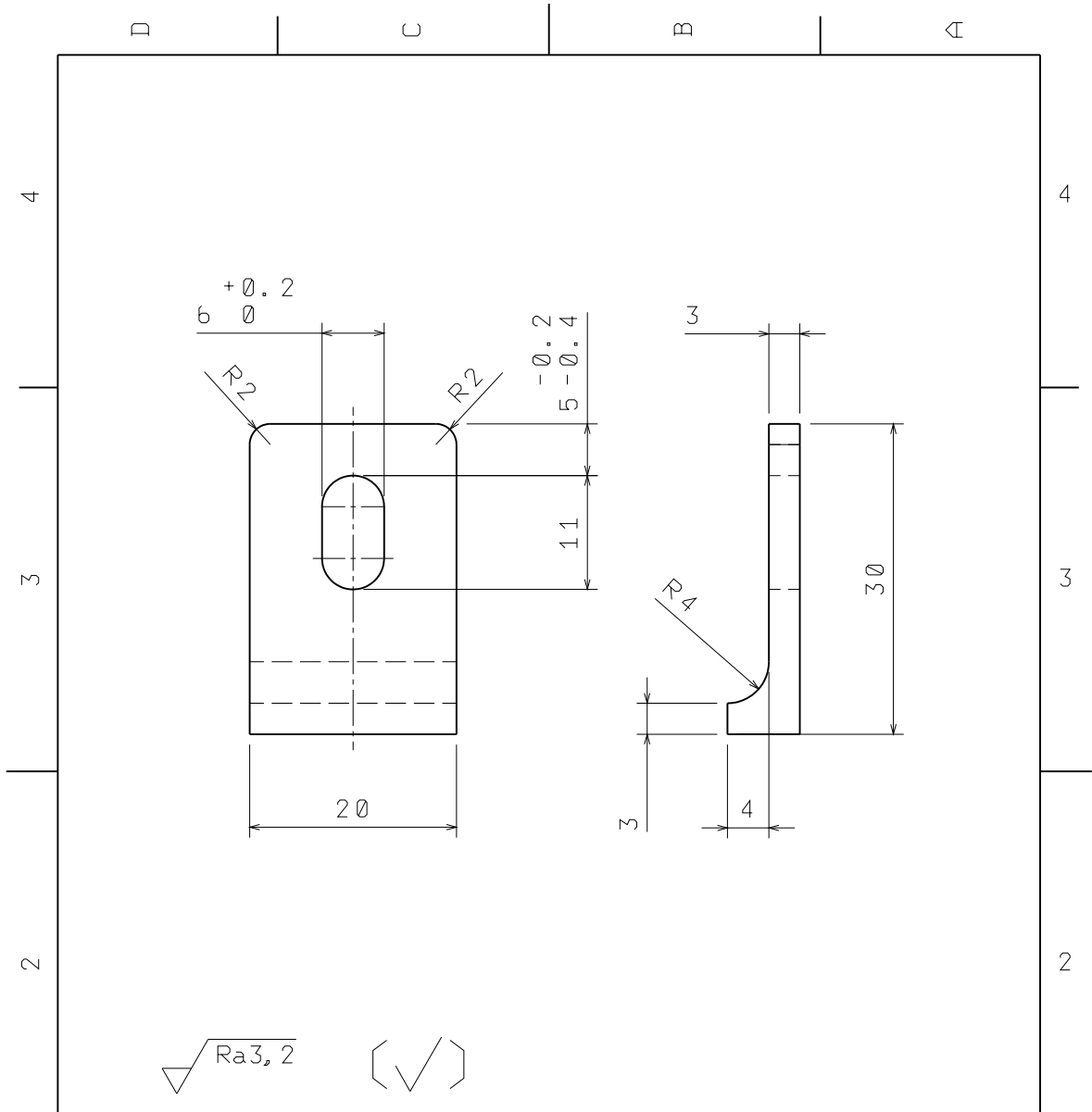




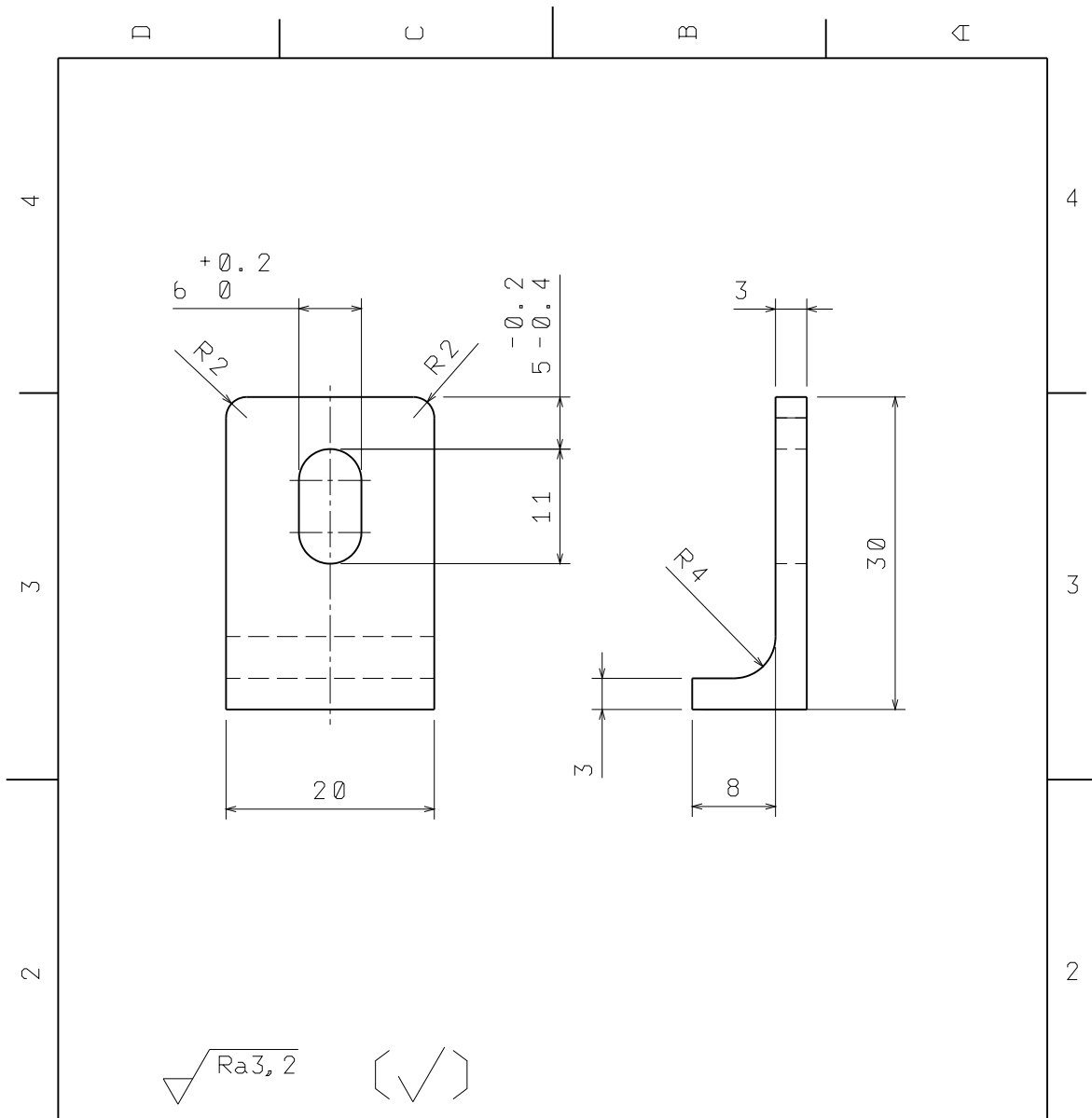
$\sqrt{Ra3,2}$ $\left(\sqrt{\quad} \right)$

POZICE	NÁZEV - ROZMÉR	VÝKRES - NORMA	MATERIÁL	ks	kg	POZNÁMKA
INDEX	ZMĚNA	DATUM	PODPIS	Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně Fakulta technologická Ústav výrobního inženýrství		
ZN. MAT.	11 373	T.O.				
ROZM.-POLOT.					2:1	
TOLERANCE	ISO 8015	PŘESNOST	ISO 2768 mk	PROMÍTÁNÍ	ISO-E	TŘ.Č.
KRESLIL	VLADISLAV SEKANINA	NORM.REF.		FORMÁT	A4	Č. KUSOVNIKU
PŘEZK.						
TECHNOL.	SCHVÁLIL	DAT.	1.5.2018	STARÝ V.		Č.V.
NÁZEV	OPĚRNÁ PODLOŽKA VYSOKÁ			ČÍSLO VÝKRESU	DP_01_04	
				Listů	8	List 5.





POZICE	NÁZEV - ROZMĚR	VÝKRES - NORMA	MATERIÁL	ks	kg	POZNÁMKA
INDEX	ZMĚNA	DATUM	PODPIS	Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně Fakulta technologická Ústav výrobního inženýrství		
ZN. MAT.	11 373	T.O.				
ROZM.-POLOT.			HMOTNOST kg	MĚŘ. 2:1		
TOLERANCE	ISO 8015	PŘESNOST	ISO 2768 mk	PROMÍTÁNÍ	ISO-E	TŘ.Č.
KRESLIL	VLADISLAV SEKANINA	NORM.REF.		FORMÁT	A4	Č. KUSOVNIKU
PŘEZK.		SCHVÁLIL	DAT. 1.5.2018	STARÝ V.		Č.V.
TECHNOL.						
NÁZEV	UPÍNKA NÍZKÁ			ČÍSLO VÝKRESU	DP_01_05	
				Listů 8		List 6.



POZICE	NÁZEV - ROZMĚR	VÝKRES - NORMA	MATERIÁL	ks	kg	POZNÁMKA
INDEX	ZMĚNA	DATUM	PODPIS	Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně Fakulta technologická Ústav výrobního inženýrství		
ZN. MAT.	11 373	T.O.				
ROZM.-POLOT.			HMOTNOST kg	MĚŘ. 2:1		
TOLERANCE	ISO 8015	PŘESNOST	ISO 2768 mk	PROMÍTÁNÍ	ISO-E	TŘ.Č.
KRESLIL	VLADISLAV SEKANINA	NORM.REF.		FORMÁT	A4	Č. KUSOVNIKU
PŘEZK.		SCHVÁLIL	DAT. 1.5.2018	STARÝ V.		Č.V.
TECHNOL.				ČÍSLO VÝKRESU	DP_01_07	
NÁZEV	UPÍNKA VYSOKÁ			Listů 8	List 8.	