

Ultrazvukové svařování vysoce plněných materiálů

Bc. Adam Pospíšil

Diplomová práce
2021



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav inženýrství polymerů

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Adam Pospíšil
Osobní číslo:	T18553
Studijní program:	N2808 Chemie a technologie materiálů
Studijní obor:	Inženýrství polymerů
Forma studia:	Kombinovaná
Téma práce:	Ultrazvukové svařování vysoce plněných materiálů

Zásady pro vypracování

Cílem diplomové práce je vypracovat literární rešerši a popsat problematiku ultrazvukového svařování. Praktická část bude zaměřena na optimalizaci procesních podmínek ultrazvukového svařování, s následným testováním mechanické pevnosti svařeného spoje, s cílem dosáhnout co největší pevnosti spoje bez povrchových vad.

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

Seznam doporučené literatury:

Troughton M. J. Handbook of plastics joining: A practical guide, William Andrew, 2008, 576 pages, ISBN: 978-0-8155-1581-4
O'Brien, A. Welding handbook, American Welding Society (AWS), 2007, 600 pages, ISBN978-0-87171-053-6

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Lukáš Maňas, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **1. února 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **14. května 2021**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

Ing. Jana Navrátilová, Ph.D.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 1. dubna 2021

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou 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;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou 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);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové 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.

Prohlašuji,

- že jsem diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne: 5. 5. 2021

Adam Pospíšil

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Ultrazvukové svařování je dnes již běžná metoda spojování polymerních materiálů. Svařování polymerů je rychlé, levné a bez nutnosti úpravy povrchu. Velice vzácné je však svařování vysoce plněných polymerních kompozitů. Vysoký obsah vyztužujícího plniva brání dobrému promísení taveniny a snižují pevnost spoje. Tato práce se tedy zabývá problematikou ultrazvukového svařování vysoce plněných materiálů. Zpracovává teoretické poznatky o ultrazvukovém svařování s následným experimentem, který pojednává o optimalizaci procesních podmínek ultrazvukového svařování vybraného vysoce plněného materiálu. Vybraným materiálem je akrylátová dvousložková termoplastická pryskyřice s vysokým plněním skelnými vlákny. Požadavkem na proces je, aby bylo dosaženo co nejvyšší pevnosti spoje bez povrchových vad. Experiment hodnotí jako největší vliv na pevnost spoje nízký čas svaření s vysokou amplitudou kmitů. Další zlepšení nastává zvýšením obsahu polymeru ve svařované oblasti a také vytvoření drážky, do které tavenina zatéká.

Klíčová slova: Kompozit, polymery, plniva, skelná vlákna, ultrazvukové svařování, frekvence

ABSTRACT

Ultrasonic welding is nowadays a common method for joining polymeric materials. Welding of polymers is fast, cheap and with no need for surface treatment. However, welding of highly filled polymer composites is very rare. High content of reinforcing filler prevents from melt blending and reduces the joint strength. This diploma thesis therefore deals with the topic of ultrasonic welding of highly filled materials. It elaborates theoretical knowledge of ultrasonic welding and further provides an experiment which deals with optimization of processing conditions for ultrasonic welding of selected highly filled material. The selected material is two-component thermoplastic acrylate resin with a high level of glass fibre filler. The process requirement is to obtain the highest possible joint strength with no surface defects. As the greatest effect on the strength of joint is proved to be low welding time with high amplitude of oscillations. Another improvement occurs by increasing the polymer content in the welded area and also by creating a groove into which the melt flows.

Keywords: Composite, polymers, fillers, glass fibers, ultrasonic welding, frequency

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

OBSAH

ÚVOD	9
I. TEORETICKÁ ČÁST	10
1 PLNĚNÉ POLYMERNÍ MATERIÁLY	11
1.1 PŘÍSAKY DO PLASTŮ	12
1.2 PLNIVA	13
1.3 PRÁŠKOVÁ PLNIVA.....	14
1.3.1 Uhličitan vápenatý (CaCO_3)	14
1.3.2 Talek (hydratovaný křemičitan hořečnatý)	14
1.3.3 Kaolin (Hydratovaný aluminum silikát)	15
1.4 VLÁKNITÁ PLNIVA.....	15
1.4.1 Skleněná vlákna	15
1.4.2 Uhlíkové vlákna	17
1.4.3 Aramidová vlákna	18
1.5 VÝROBA VLÁKNY PLNĚNÝCH POLYMERŮ VSTŘIKOVÁNÍM.....	19
1.5.1 Reakční vstřikování.....	20
1.6 LAMINACE.....	20
1.7 PULTRUZE – VÝROBA VYSOCE PLNĚNÝCH PROFILŮ.....	21
2 SVAŘOVÁNÍ ULTRAZVUKEM	23
2.1 VÝHODY A POUŽITÍ	24
2.2 ULTRAZVUK	24
2.3 POPIS ULTRAZVUKOVÉ SVÁŘEČKY.....	26
2.4 POPIS PROCESU SVÁŘENÍ ULTRAZVUKEM	28
2.4.1 Svařovací cyklus	29
2.5 PROCESNÍ PARAMETRY	30
2.5.1 Svařovací síla	30
2.5.2 Frekvence	31
2.5.3 Amplituda.....	31
2.5.4 Svařovací čas.....	32
2.6 TYPY SPOJŮ PRO ULTRAZVUKOVÉ SVÁŘENÍ.....	32
2.6.1 Návarová hrana	33
2.6.2 Typy konstrukce spojů a návarové hrany.....	34
II. PRAKTICKÁ ČÁST	38
3 CÍL PRÁCE	39
4 MĚŘENÍ A VÝSLEDKY	40

4.1	MĚŘENÍ S PODÉLNOU A PŘÍČNOU ORIENTACÍ VLÁKEN - 1. MĚŘENÍ.....	41
4.1.1	Diskuze výsledků z 1. měření	42
4.2	MĚŘENÍ S PŘÍDAVNÝM MATERIÁLEM – 2. MĚŘENÍ.....	46
4.2.1	Diskuze výsledků z 2. měření	48
4.3	ÚPRAVA VZORKU DRÁŽKOU S PŘÍDAVNÝM PLNIVEM – 3. MĚŘENÍ.....	50
4.3.1	Diskuze výsledků z 3. měření	50
4.4	ÚPRAVA VZORKU POMOCÍ LASERU.....	52
4.4.1	Diskuze výsledků ze 4. měření.....	53
4.5	VYHODNOCENÍ VÝZKUMU	55
5	NÁVRH METODIKY PRO DALŠÍ MĚŘENÍ.....	56
	ZÁVĚR	59
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	61
	SEZNAM OBRÁZKŮ	65
	SEZNAM TABULEK.....	66
	SEZNAM GRAFŮ	67

ÚVOD

Ultrazvukové svařování patří dnes již mezi běžné formy spojování dvou a více komponentů. Především se jedná o polymerní materiály, ale také textilie, či kovy. Svařování pomocí ultrazvuku se jako spojení dvou polymerních látek využívá zejména pro svoji rychlost, pevnost a čistotu. Jedná se o technologii, která je jednoduše zařaditelná do automatizovaného provozu. Problém však nastává při svařování vysoce plněných kompozitních materiálů. Tyto materiály mají ve svém složení více než 50% plniva a výztuže vůči polymeru. A právě samotný polymer hraje při svařování důležitou roli, jelikož je to ta část, která se vlivem vysokofrekvenčních vibrací zahřívá a taví. Po následném promísení taveniny a jejího ochlazení vzniká pevný spoj. S rostoucím poměrem plniva vůči polymeru klesá pevnost spoje, jelikož roztavení a promísení polymeru není dostatečné.

Teoretická část práce se nejprve zaměřuje na plniva, které se přidávají do polymerů pro zlepšení jejich vlastností. Blíže jsou specifikovány vyztužující plniva jako jsou sklená, uhlíková či aramidová vlákna, ale také i plniva nevyztužující nazývané též bílé plniva. Dále je zde popsána výroba vláknitých kompozitů. Práce se rovněž podrobněji zabývá technologií ultrazvukového svařování, jejími výhodami a použitím. V teoretické části nechybí ani popis celého procesu sváření spolu s popisem ultrazvukové svářečky a typy spojů pro ultrazvukové svařování včetně návarové hrany.

Praktická část si klade za cíl optimalizovat procesní podmínky pro ultrazvukové svařování vybraného vysoce plněného materiálu tak, aby bylo dosaženo co největší pevnosti bez povrchových vad. Použitým materiálem pro svařování je akrylátová dvousložková termoplastická pryskyřice s vysokým plněním skelnými vlákny. Výrobce uvádí, že je tento materiál vzhledem ke svému vysokému plnění takřka nesvařitelný. Svařování probíhalo na přístroji Hermann HiQ Dialog SpeedControl a měření mechanické pevnosti pak probíhalo klasickou tahovou zkouškou. Výsledky a vyhodnocení experimentu je uvedeny v závěru práce. V poslední kapitole je zahrnut i návrh metodiky pro další měření, které se opírá o články, jež se touto tematikou v současnosti zabývají.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 PLNĚNÉ POLYMERNÍ MATERIÁLY

Plněné polymerní materiály jsou nazývány též jako kompozity. Jsou složeny ze dvou a více fází. Jedna fáze je nespojitá a říkáme jí výztuž. Druhá fáze, která je spojitá a obklopuje výztuž se nazývá matrice. Obě fáze se navzájem liší v mechanických, chemických i fyzikálních vlastnostech. Výztuž je obvykle tužší a pevnější než matrice. [1, 2]

Podmínkou získání kompozitního polotovaru je dokonalé spojení všech jeho fází na jejich rozhraní a zajistit tak rovnoměrný přenos namáhání při zatěžování kompozitu. Pro matrici se nejvíce využívají polymerní materiály a to, jak termoplasty, tak termosety. Matrice slouží jako pojivo, které chrání výztuž před vnějším poškozením a umožňuje přenos zatížení na výztuž. Každá matrice i výztuž má rozdílné vlastnosti, proto je důležitá vhodná volba celého kompozitního systému, lišícího se dle konkrétní aplikace. [2, 3]

Pevnost a tuhost polymerních kompozitů zajišťují nejlépe vyztužující vlákna. Pevnost matrice je až o dva řády nižší než pevnost výztužné složky. Její vliv na pevnost celého kompozitu je tedy zanedbatelný. Při namáhání dochází ke vzniku smykových sil na rozhraní obou fází. Vlastnosti tenkých hraničních vrstev na tomto rozhraní určují velikost přenosu napětí z matrice na vlákna a tedy odolnost celé kompozitní struktury vůči napětí. Tato tenká hraniční vrstva je označována jako mezivrstva a společně s modifikovanou částí polymerní matrice tvoří kompozitní mezifázi. Pokud má matrici a výztuž mezi sebou dokonalou adhezi, tak je veškeré napětí přenášeno na výztuži a nepevná, ale deformovatelná matrice je takřka bez napětí. S narůstajícím procentem podílu vláken v kompozitu a zároveň zmenšujícím se průměrem vláken vzrůstá význam mezivrstev. Při podílu vyztužujících vláken 30 - 60 % a průměru 8 - 16 μm je pak vliv mezifáze na pevnost kompozitu nejvyšší. Nedostatečná adheze vede naopak ke ztrátě vyztužujícího efektu vláken, což má za následek dřívější poškození materiálu vlivem deformace či ztrátě stability. [1, 4, 9]

1.1 Přísady do plastů

Konvenční výroba v současnosti nevyužívá polotovary pouze z čistých polymerních materiálů, bez použití přísad. Polymery v čistém stavu jsou obvykle náchylné na tepelnou a světelnou degradaci. Mají špatnou odolnost vůči vysokým teplotám a mají vysokou hořlavost. Mohou mít také špatnou zpracovatelnost související mimo jiné s nízkou tvrdostí a houževnatostí. Přísady do plastů pak umožňují rapidně zlepšovat vlastnosti základních polymerů anebo třeba jen snížit jejich cenu. Pomocí přísad tedy lze vyrobit materiál, který má právě takové vlastnosti, které jsou potřeba pro dané aplikace. [5, 6]

Přísady do plastů se dělí dle jejich funkce na:

- Plniva (vyztužují materiál, snižují cenu)
- Stabilizátory (chrání vůči UV a tepelné degradaci)
- Barviva (dávají polymerům požadovanou barvu)
- Změkčovadla (zlepšují elasticitu a rázovou houževnatost)
- Maziva (zlepšují zpracovatelnost polymerů)
- Retardéry hoření (ochrana před hořením a vysokými teplotami)
- Antistatika (zlepšují elektrickou vodivost)
- Nadouvadla (pro výrobu lehčených hmot)
- Tvrdivla (ze-sít'ují pryskyřice, aktivují proces tvrzení)

1.2 Plniva

Plniva jsou přísady, které se přidávají k základnímu polymeru zejména ze dvou důvodů. Tím prvním je zlepšení vlastností polymerů. Především jde o lepší tvrdost a vyztužení materiálu. Také umožňuje zlepšit rázovou houževnatost a modul pružnosti. Takovým plnivům říkáme aktivní plniva, nebo též plniva vyztužující.

Druhou skupinou jsou plniva neaktivní, nebo také nevyztužující. Tyto plniva mají primárně za cíl snížit cenu výsledného produktu při zachování stejných vlastností. Protože je jejich samotná hodnota menší než hodnota polymeru a zároveň nedochází ke zhoršení vlastností polymeru. Mezi takové neaktivní plniva řadíme nejčastěji přírodní bílé plniva jako je uhličitan vápenatý, mastek (talek), nebo kaolín (slída). [6, 8]

Cílem každého výrobce je najít tzv. „ideální plnivo“, neboli takové plnivo, které dokáže zlepšit požadované vlastnosti polymeru pro danou aplikaci a zároveň snížit cenu produktu. A ačkoliv lze plniva různě kombinovat a mnohdy i získat výhodný synergický efekt, tak neexistuje žádné plnivo, které dokáže zlepšit všechny vlastnosti polymeru. Vždy je nakonec třeba volit mezi například lepšími vlastnostmi při zpracování a vlastnostmi výsledného produktu, nebo cenou.

Pro přehlednost lze plniva rozdělit do několika kategorií podle:

- funkce na *aktivní a neaktivní*
- členění na *organické a anorganické*
- výskytu v přírodě na *přírodní a syntetické*
- tvaru na *vláknité a práškové*

Jako příklad aktivního, organického, přírodního a zároveň vláknitého plniva lze uvést vlákna lnu, konopí, sisalu či kokosu. Naopak neaktivní, anorganické a práškové plnivo je uhličitan vápenatý. V podstatě všechny minerály (mastek, kaolín atd.) zpracováváme rozemleté v podobě práškových plniv. [7, 8, 9]

1.3 Prášková plniva

Prášková plniva zlepšují obecně mechanické vlastnosti a odolnost vůči povětrnosti. Jsou často využívány pro zlepšení vlastností polyolefinů. Prášková plniva jsou především anorganická (minerály, kovy), ale najdeme zástupce i mezi organickými, jako je dřevní moučka. Mezi nejvíce používané kovové prášky řadíme prášky z hliníku, bronzu, či zinku, které zajišťují vodivost tepla. Velký význam mezi práškovými plnivými mají minerální plniva. Někdy se jim podle jejich typické barvy říká též bílé plniva a řadíme sem především uhličitan vápenatý, talek a kaolin. [11]

1.3.1 Uhličitan vápenatý (CaCO_3)

Uhličitan vápenatý je jedním z nejvíce využívaných práškových plniv, který se zpočátku využíval hlavně pro snížení ceny. Používá se nejen do plastů, ale především také do gumárenských směsí a jeho spotřeba neustále roste. CaCO_3 se pro plniva zpracovává především mletím zrnitého vápence a to až z 90 %. Mletím lze vyrobit požadovanou velikost částic a to dokonce až do řádů μm . Mletí probíhá dvěma způsoby, buď mokrou, nebo suchou metodou. Suchá metoda se nazývá drcení a dosáhneme při ní velikost částic cca 10 - 30 μm . Mokrý metoda neboli mletí využívá vodu jako médium a dokážeme touto cestou připravit částice o velikosti 1 - 3 μm . Pokud by to aplikace vyžadovala, lze získat tzv. karbonatační metodou i částice v řádech nanometrů. Problematika nano-vápence je ale v jeho náročné distribuci a dispergaci v polymeru, neboť se nanočástice snadno shlukují. Čím menší částice dokážeme připravit, tím lepší vlastnosti nám dokáže vápenec nabídnout. Ovlivňují pak například krystalizaci, odolnost oděru, přilnavost, houževnatost, hořlavost a jiné mechanické a reologické vlastnosti. [10, 11, 12]

1.3.2 Talek (hydratovaný křemičitan hořečnatý)

Talek je nejměkčím minerálem. U nás se nazývá také mastek, jelikož je na omak mastný. Díky jeho nízké tvrdosti je málo abrazivní a snižuje opotřebení strojů při zpracování. Talek má destičkovitou strukturu, čehož se využívá při vytlačování hladkých profilů, kdy se destičky za toku dobře orientují i při vysokých rychlostech. Talek se dá modifikovat silanem a takové plnivo pak dodává polymerům o trochu lepší pevnost, zpracovatelnost a odolnost vůči stárnutí. Samotný talek však nemá na ztužení žádný vliv a proto se jedná o neztužující plnivo. [11, 13]

1.3.3 Kaolin (Hydratovaný aluminum silikát)

Kaolín dostal svůj název podle lokality Kao-Ling v Číně. Co do spotřeby je kaolin jeden z nejdůležitějších minerálních plniv, zvláště pak pro gumárenské směsi. Jeho spotřeba mezi minerálními plnivými se udává okolo 50 %. Kaolin v základu rozdělujeme na tvrdý a měkký. Tvrdý kaolin má destičkovitou strukturu navzájem vázanou vodíkovými můstky. Jeho distribuce a dispergace v matrici je obtížná, protože jeho velikost částic je cca 0,25 - 0,5 μm a specifický povrch 22 - 26 m^2/g . Díky tomu je ale dobrým ztužujícím plnivem a řadí se už mezi poloztužující plniva. Své uplatnění nachází především v gumárenském průmyslu. Měkký kaolin má větší částice než tvrdý kaolin (cca 1 - 2 μm) a menší specifický povrch (11 - 15 m^2/g). To znamená, že se lépe zpracovává, ale výsledné vlastnosti směsi nejsou tak dobré jako u tvrdého kaolinu. Řadíme jej tedy do kategorie neztužujících plniv. Zato jeho cena je mnohem menší a proto se využívá tam, kde je třeba ušetřit náklady, či zrychlit výrobu na úkor výsledných vlastností. [11, 13, 14]

1.4 Vlákenná plniva

Vlákna jsou ideální plnivem, pokud je potřeba dosáhnout co nejvyšší pevnosti v tahu. Napětí při napínání se přenáší po celé délce vláken a je obtížné takový materiál přetrhnout. Pro dosažení nejlepšího ztužení je zapotřebí, aby měly vlákna poměr mezi délkou a průměrem alespoň 10 : 1. Vlákna se dělí podle délky na krátká (do 1 mm) a dlouhá (do 10 mm). U dlouhých vláken může dojít při zpracování k lámání, avšak stále budou vykazovat daleko vyšší pevnost než krátká vlákna. Například pro zpracování technikou vstřikování polymerů lze použít vlákna s maximální délkou 4 mm, poté už dochází k jejich lámání. Obvykle je uváděna koncentrace vláken pro ztužující plniva mezi 5 - 50 % hmotnosti. Pokud se nachází v polymeru více než 50 % vláken nazýváme takové materiály jako vysoce plněné. Nejčastěji se používají sklená vlákna, potom také uhlíková, aramidová, či kovová. Vlákna se používají především pro navýšení pevnosti u polyolefinů, ale také u kaučuků, polyamidů a PVC podlahovin. [1, 9]

1.4.1 Skleněná vlákna

Skleněná vlákna byla objevena už v 18. století, nicméně jejich průmyslové využití v oblastech zabývajících se polymerními materiály začalo až v roce 1934 v USA. Jsou dodnes jedny z nejrozšířenějších vyztužujících plniv, protože zajišťují vysokou pevnost v tahu a modul pružnosti. V pevnosti se mnohdy vyrovnají i kovům. Například modul

pružnosti v tahu je u skelných vláken stejný jako u hliníku (70 GPa), ale třetinový oproti oceli. Pevnost v tahu vůči oceli je vyšší a to díky nižší hustotě. Průtažnost je 3 % a to znamená, že skelná vlákna nevykazují viskoelastické chování, jako je tomu u syntetických vláken. Mají také výbornou tepelnou (až do 450 °C) a chemickou odolnost, elektrické vlastnosti a jsou nehořlavé. Vlákna mají kruhový průřez o průměru cca od 3,5 do 24 μm a čím mají menší průměr, tím mají vyšší pevnost, neboť mají malý povrch a v něm jsou tudíž jen malé defekty. Na pevnosti vláken se také podílí jejich odlišná struktura jádra a povrchových vrstev. Jádro obsahuje nahodile orientovanou síť kovalentně vázaných atomů a povrch má semi - orientovanou strukturu. Na povrchu tak vzniká vysoké tlakové napětí v podélném směru, které zabraňuje snadnému šíření trhlin při zatížení vlákna. Povrch vláken je hydrofilní díky oxidům SiO_2 a Al_2O_3 . Vlhkost působí v povrchových defektech vláken jako tenzoaktivní látka, která snižuje lomovou energii skla. Vysoký podíl adsorbované vody je pak překážkou k vytvoření dobré vazby mezi vláknem a polymerní matricí. Je tedy nutné vlákna před výrobou řádně vysušit a výrobky ze skleněných vláken chránit před vzdušnou vlhkostí např. polyethylenovým obalem. [5, 15, 18]



Obrázek 1: Skelná vlákna ve formě rovingu [34]

Výroba skelných vláken probíhá rychlým tažením z roztavené skloviny směsi oxidu křemíku s příměsí oxidů vápníku, hořčíku, hliníku a boru, a následnou úpravou podle způsobu použití. Pro zvýšení adheze skleněných vláken k polymerní matrici je také nutno opatřit vlákna tenkou vrstvou laku, který zároveň chrání vlákna vůči jejich křehkosti a lámavosti. Vlákna

se dále navíjením na cívku sdružují do pramenců tzv. roving. Dále se mohou zpracovat buďto mletím, nebo sekáním. Sekáním vyrábíme vlákna dlouhá, protože můžeme snadno nastavit přesnou délku finálních vláken. Mletí se využívá pro krátká vlákna za použití kladivového mlýnu. Jednotlivá vyztužující vlákna jsou samostatně používána jen výjimečně. Spíše se dodávají formou příze, sekané příze, pramence, rohože či sekaného pramence. Vlákna ještě dělíme na základě jejich vlastností a složení na E – vlákna, S – vlákna, C – vlákna a D – vlákna. [5, 15, 18]

- E – vlákna: vykazují elektrickou nevodivost a vysokou propustnost pro plyny, bezalkalické sklo, nejnižší cenu
- S, R – vlákna: mají ze všech nejvyšší pevnost, nejvyšší cenu
- C – vlákna: mají nejlepší odolnost vůči kyselinám
- D – vlákna: borosiliátové sklo s dielektrickými vlastnostmi

Tabulka 1: Složení a vlastnosti skleněných vláken [17]

Složení	Jednotka	E-sklo	S-sklo	D-sklo	C-sklo
SiO₂	%	53-55	60	72-75	60-65
Al₂O₃	%	14-15	24	-	<6
B₂O₃	%	6-8	-	<23	<7
CaO	%	17-22	9	-	14
MgO	%	<5	6	-	<3
K₂O,Na₂O	%	<1	<0,5	<4	8-10
Ost.oxidy	%	1	-	<1	<1,5
Hustota	g/cm ³	2,6	2,53	2,14	2,45
Pev. v tahu	MPa	3400	4400	2500	3100
E-modul R_m	GPa	73	86	55	70
Tažnost	%	3,5-4	4,5	3	3,5-4

1.4.2 Uhlíkové vlákna

Uhlíková vlákna se vyznačují vysokou pevností, tuhostí a hodnotou Youngova modulu. Mají dobrou mechanickou odolnost a kluznost, takže není třeba při zpracování přidávek maziv. Mechanické vlastnosti vykazují anizotropii. Tato skutečnost znamená, že v kolmém směru

k ose mají vlákna výrazně menší modul pružnosti než v podélném směru. Vlákna mají také dobrou tepelnou a chemickou odolnost. Avšak při vystavení vyšší teplotě vykazují záporný koeficient teplotní roztažnosti což znamená, že se po zahřátí smršťují. I když jsou uhlíková vlákna oproti skelným hořlavá, tak i při vysokém plnění v kompozitu (90 %) je rychlost hoření jen velmi malá. Snášelivost uhlíkových vláken s tělesnými tkáněmi zajišťuje, že je lze použít jako implantáty např. na umělé kyčelní klouby apod. Nevýhodou uhlíkových vláken však je, že jsou velmi křehké a mají vysokou lámavost při výrobě. Proto se musí povrchově upravit směsí na bázi epoxidové pryskyřice. Ta slouží nejen jako ochrana při zpracování, ale také současně jako prostředek pro zlepšení adheze mezi vláknem a matricí. Průměr vláken se pohybuje v rozmezí 5 až 10 μm . [4, 5, 19]

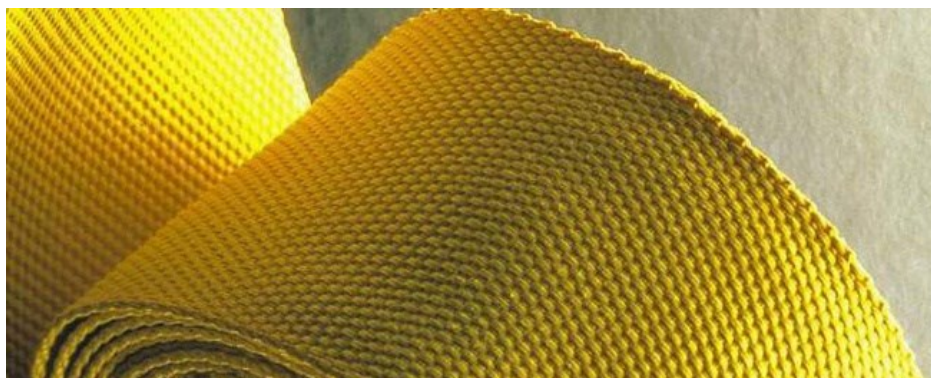
Používají se nejčastěji v matrici s epoxidovými a polyuretanovými pryskyřicemi. Své uplatnění často najdou také v komponaci s polypropylenem, polyamidy, polykarbonáty, polystyreny, či s polybutylenem. Základními surovinami, ze kterých se vyrábí uhlíková vlákna, jsou polyakrylonitril celulóza a smola. Pro výrobu se využívá proces pyrolýzy organických vláken v inertní atmosféře při teplotách mezi 1800 - 2000 $^{\circ}\text{C}$. Čím vyšší je teplota, tím vyšší dostaneme modul pružnosti, ale zároveň se pevnost vláken snižuje. Ideální teploty pro získání maximální pevnosti jsou proto cca kolem 1500 $^{\circ}\text{C}$. Vlákna, která jsou vyráběná z polyakrylonitrilu se označují jako C (PAN) a patří mezi ty nejlepší. Levnější vlákna jsou vyráběna pyrolýzou ze zbytků po destilaci ropy, či smoly. Uhlíková vlákna jsou poměrně drahá, ale díky jejich výborným mechanickým vlastnostem, spolu s nízkou hmotností a vysokou tepelnou stabilitou, se hojně využívají v leteckém a kosmickém průmyslu. Pro extrémní případy teplotního namáhání (brzdy u dopravních letadel) se využívá uhlíková matrice vyztužená uhlíkovými vlákny. [5, 18, 24]

1.4.3 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna patří mezi syntetické polymerní vlákna na bázi lineárních organických polymerů. Molekuly fenylových jader a amidových skupin jsou pravidelně propojeny vodíkovými můstky, čímž zajišťuje řetězům vysokou tuhost a zároveň vysokou hustotu struktury uspořádání. Předností těchto vláken je proto opět vysoká pevnost a tuhost. Aramidová vlákna se dodávají ve formě přízí, tkanin a pramenců.

Vytvrzené konstrukční prvky z aramidových kompozitů mají takovou pevnost, že se už velmi obtížně obrábějí. Pro aramidová vlákna se mohou použít jako matrice všechny běžné

reaktivními pryskyřice i termoplasty. Adheze vláken k matrici je ale často nižší než u ostatních vláken. V současnosti jsou vlákna používána jako náhrada azbestu v brzdových obloženích, či jako výztuž pro pneumatiky, nebo světlovodné kabely. Aramidová vlákna mají, stejně jako uhlíková vlákna, záporný součinitel teplotní délkové roztažnosti ve směru vláken. Čím je teplota vyšší, tím větší je smrštění vláken. Aramidová vlákna se vyrábějí s různými vlastnostmi pro konkrétní aplikace a pak se liší především modulem pružnosti v tahu a v tažnosti. Typy s nižším E - modulem a vyšším protažením dokáží pojmout vyšší deformace než vlákna s vyšším E - modulem a nižší tažností. [4, 19]



Obrázek 2: Kevlarová tkanina [36]

Aramidové vlákna jsou také zároveň nejlehčím vyztužujícím materiálem, díky čemuž mají tak vysokou pevnost v tahu. Pevnost v tlaku ke směru vláken je zato nižší než pevnost v tahu. Na to je třeba brát ohled při projektování konstrukcí z aramidových vláken, aby nedocházelo k zatížení tlakem v podélném směru na vlákna.

Nevýhodou může být, že aramidová vlákna pohlcují vlhkost až do 7 % a to pak ovlivňuje pevnost spoje mezi vláknem a matricí a dokonce i pevnost samotného vlákna. Proto musí být vlákna vždy před použitím řádně vysušena. Vlákna jsou také náchylné na UV záření, které vede rovněž výraznému poklesu pevnosti. Nejznámější využití aramidových vláken je Kevlar (viz. obrázek 2) a Twaron, což jsou tkaniny, které se využívají na výrobu neprůstřelných vest a žáruvzdorného oblečení. [4, 19]

1.5 Výroba vlákný plněných polymerů vstřikováním

Výroba vlákný plněných polymerů je dnes již běžně rozšířená. Mezi nejčastější technologie výroby kompozitních materiálů zahrnující vláknité výztuže patří bezesporu technologie vstřikování a také technologie vytlačování. Pro tyto technologie se standardně používají

krátká vlákna v délce mezi 0,2 a 0,6 mm, ale někdy také dlouhá vlákna o délka cca 10 až 12 mm. I když během zpracování polymerní směsi s dlouhými vlákny dochází k nalámání vláken, stále jsou mnohem delší, než klasické krátká vlákna. Důležitým cílem u této technologie je také snaha narovnat vlákna ve směru toku taveniny polymeru. Pro výrobce takových materiálů je již výhodné dávkovat nekonečná skleněná vlákna ve formě pramenců přímo do tavicí komory. Přímou zde se pak vlákna sekají na finální délku a jsou přímo součástí plastového dílu. Nevýhodou však může být nerovnoměrné rozmístění skleněných vláken, či jejich shluky. Vlákenné plniva v polymeru mají zvýšenou tuhost, nižší smrštění, ale na druhou stranu také horší kvalitu povrchu. Vlastnosti takových plastových dílů jsou pak závislé na anizotropii vlastností v důsledku orientace vláken. U vstřikování vláknitých materiálů, kde vlákna zaujímají určitý objem plastového dílu, lze oproti klasickému vstřikování zkrátit dobu chlazení. Nicméně vlivem většího vnitřního tření taveniny je doporučeno používat vyšší teploty taveniny a formy. Pro dobrý průběh je také nezbytné zvýšit vstřikovací tlak a rychlost vstřikování. Přitom je nutné počítat s daleko vyšším opotřebením vstřikovací formy, a to především při vstřikování kovových a skleněných vláken. [27]

1.5.1 Reakční vstřikování

Reakční vstřikování někdy též označována jako RTM (resin transfer molding), je speciální technologie zabývající se výrobou kompozitních materiálů. Především pak výrobou kompozitů složených z pryskyřicové matrice vyztuženou vláknitým plnivem, přičemž vlákna mohou mít různou orientaci. Během procesu se nejprve vyrobí předlisek tvořený čistě jen z vláken, který se vloží do formy pro vstřikování. Tento tvarový předlisek vzniká nejčastěji přímo pomocí některé textilní technologie. Dutina formy se také někdy ošetřuje dělicí látkou, aby se zamezila přilnavost pryskyřice k dutinám formy. Následně dojde ke klasickému vstřikování roztavené pryskyřice do formy, kde se tavenina promísí s předliskem. Pryskyřice prostupuje skrze vláknitou výztuž a postupně vytlačuje vzduch ven odvodušňovacími ventily. Po fázi dotlaku následuje chlazení a z formy vypadne hotový kompozitní výrobek. [27, 28]

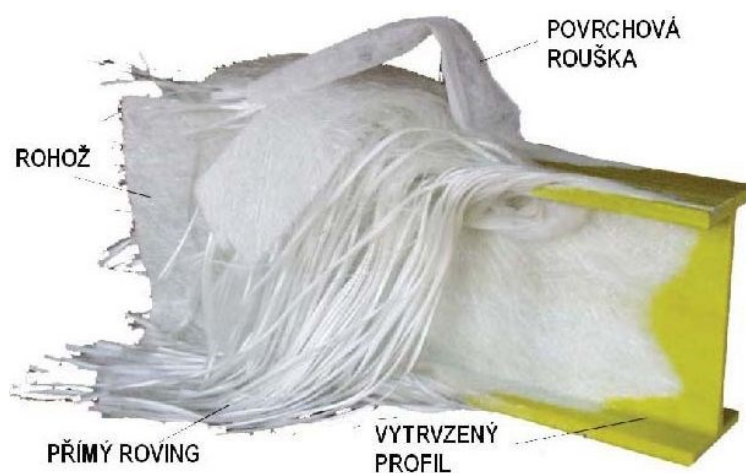
1.6 Laminace

Další poměrně jednoduchou a oblíbenou technologií na přípravu plněných polymerů je laminace. Vlákenná tkanina či rohož se uloží do formy, která je předem ošetřena separátorem a následně je prosycována tekutou pryskyřicí a vytvrzena při pokojové teplotě. Další dotvrzení pak probíhá při teplotě okolo 80 °C. Pryskyřice po nalití do formy je roztírána

pomocí štětce nebo válečku. Tato technologie se díky své jednoduchosti často využívá pro ruční a kusovou výrobu. Není ovšem žádnou výjimkou, že se dá celý proces zautomatizovat pomocí kontinuální linky. Takovou laminaci nazýváme tedy jako kontinuální a využívá se pro výrobu větší ploch a objemů, jako jsou například střešní krytiny. [4, 29]

1.7 Pultruze – výroba vysoce plněných profilů

Pultruze je kontinuální výroba vyztužených pryskyřic tažením. Základní materiál je kompozit roztavené pryskyřice s vláknitou výztuží. Směs vstupního materiálu je tažena přes vyhřívanou formu. Sklené vlákno, jakožto výztuž, je přiváděna ve formě rovingu a plošných rohoží do srovnávače, který zajišťuje jejich rovnoměrné rozmístění v průřezu. Vytlačované profily mají na povrchu tenkou netkanou vrstvu z polyesteru. Tato vrstva slouží jako obal pro skleněná vlákna, který zároveň chrání vůči vnějším vlivům jako jsou chemikálie a UV záření. Polyesterový obal zabraňuje také tomu, aby při poškození povrchu vyčnívala skleněná vlákna ven. V dalším kroku se vlákna a rohože smáčí v pryskyřici spolu s dalšími přísadami jako jsou plniva, barviva a katalyzátory, nebo dalších přísad, které zlepšují vlastností konečného produktu. V poslední fázi se profil ještě dotvaruje a vstupuje do vytvrzovací vyhřívané formy. [16]



Obrázek 3: Profil vyrobený pultruzí [33]

Díky této technologii lze dosáhnout více než 70 % plnění objemu vláknitou výztuží. Je to jedna z nejlepších technik pro vysoké plnění, v porovnání s ručním laminováním kde je to kolem 20 % a u lisování cca 40 %. Rychlost výrobní linky je zhruba 30–150 cm za minutu. Tímto procesem může vzniknout i velmi pevný a extrémně lehký dutý profil i s tloušťkou

1,5 mm. Nejčastěji se při této technologii používají skleněná vlákna, díky nimž vznikají kompozity o vysoké kvalitě s vysokými nároky na mechanické a tepelné vlastnosti. Příklad profilu a jeho složení je znázorněno na obrázku 4. Takové výrobky najdou uplatnění především v automobilovém a leteckém průmyslu, ve stavebnictví, chemickém průmyslu, nebo elektrotechnice na výrobu počítačů a mobilních telefonů. [3, 9, 16]

2 SVAŘOVÁNÍ ULTRAZVUKEM

Ultrazvukové svařování patří mezi oblíbené metody pro svařování termoplastů v průmyslu, protože se jedná o nenáročnou a zároveň nejrychlejší metodu spojování. Teplo je do svaru dodáváno pomocí mechanického kmitání, které je vyvoláno ultrazvukovou energií. Metoda využívá vysokofrekvenční ultrazvukovou energii, kde se frekvence ultrazvuku pohybuje v rozpětí 15 až 70 kHz. Ultrazvuk vytváří mechanické kmity o nízké amplitudě v rozmezí 1 až 25 μm . Tření poté generuje teplo na rozhraní svařovaných součástí a tím dochází k tavení termoplastu. Vzniklé teplo je obvykle nejvyšší na povrchu spoje. Je to způsobeno povrchovými nerovnostmi svařovaného dílu, které způsobují větší namáhání a vzniká tam větší třecí síla než v objemu materiálu. Přenos energie v dotykové ploše a chování materiálu při tavení je závislé jednak na tvaru součásti, ale také na schopnosti materiálu energii absorbovat. Následným ochlazením roztaveného plastu vzniká svar na rozhraní obou ploch, čímž dojde k pevnému spojení materiálů. [21, 22]

Často se při aplikacích ultrazvukového svařování využívá energetických usměrňovačů. Ty jsou v podobě návarové hrany umístěny na povrchu svařovaných ploch. Během svařování působí vibrace kolmo ke svařované ploše a ostrá hrana (návarová) je tlačena do svařované plochy. V tomto místě dochází k bodovému kontaktu a největší koncentraci energie. Pro dobré svařování jsou totiž nejdůležitější dvě věci. Tlak a tok taveniny. Tlak je vyvolán lisováním, ale pokud bychom jen roztavili dvě plochy a přitlačili k sobě, nedošlo by k promísení a rekrytalizaci taveniny. Proto je nutné myslet při návrhu designu na návarové hrany, které se při tlaku a zahřátí roztaví jako první a jejich objem se promísí mezi oba svařované díly. Bez toku této taveniny by nedošlo ke krystalickému propojení a pevnost sváru by byla výrazně menší. [21, 23]

Tato technika svařování je velmi rychlá a svařovací čas se pohybuje od 0,1 do 1 sekundy. Pro optimální proces přenosu ultrazvukové energie je třeba zohlednit geometrii svařované součásti, místo svaru a také schopnost materiálu absorbovat ultrazvukové vlny. Čím blíže je místo svaru ke zdroji vibrací, tím méně je energie ztraceno absorpcí v materiálu. Pokud je vzdálenost svaru od zdroje menší než 6,4 mm, nazýváme to jako metoda svařování v blízkém poli. Tato metoda se používá pro krystalické a málo tuhé termoplasty, které dokážou absorbovat velké množství energie. Pokud je však vzdálenost větší než 6,4 mm, proces se

nazývá jako metoda svařování ve vzdáleném poli. Tato metoda je vhodná pro amorfni a tuhé termoplasty. [21, 23]

2.1 Výhody a použití

Nevýhodou ultrazvukového svařování je, že má omezenou použitelnost na semikrystalické polymery. Pevnost svaru pak ovlivňuje nejvíce svařovací čas a amplituda vibrací. Další problém je hloubka sváru, který bývá často menší než jeden milimetr, takže proces funguje nejlépe u tenkých materiálů, jako jsou plasty, vodiče nebo tenké folie kovu. Dále pro tuto technologii platí, že nejlépe funguje při svařování dílu ze stejného materiálu. [30]

Výhodou může být naopak nenáročnost na čistotu svařovaných ploch, nebo zlepšení hygieny a bezpečnosti práce. Zvyšuje se také kvalita svařovaných dílů a jejich estetický vzhled. Ultrazvukové svařování se lehce mechanizuje a automatizuje pro průmyslovou výrobu. Další výhodou je, že svařování probíhá při nízkých teplotách a tak se nemusí vynakládat obrovské energie k dosažení vysokých teplot. Tato vlastnost dělá proces levnějším, rychlejším a bezpečnějším. Tato technologie nevyžaduje hořlavá paliva ani otevřený oheň, takže ve srovnání s ostatními procesy je mnohem bezpečnější. Pracovníci nejsou vystaveni hořlavým plynům nebo škodlivým látkám. Kromě svařování se energie ultrazvuku používá i pro jiné aplikace, například vkládání kovových dílů tzv. insertů do plastových, nebo tvarové spojování dílů vyrobených z odlišných a hůře svařitelných materiálů. Tento proces se nazývá ultrazvukové nýtování. [25, 30]

Technologie ultrazvukového svařování se využívá pro montáž výrobků v mnoha průmyslových odvětvích, například ve zdravotnictví, textilním průmyslu, automobilovém průmyslu a jiné. U mnoha plastů je pro spojování často používané lepidlo, které tvoří chemickou vazbu mezi samotným lepidlem a povrchy lepených plastických materiálů. [31]

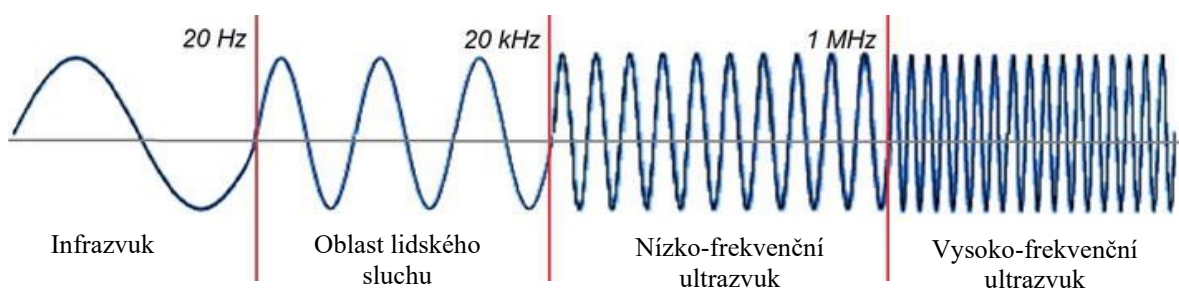
2.2 Ultrazvuk

Ultrazvukem rozumíme vlny, které se šíří na vysokých frekvencích, které již nelze slyšet lidským uchem. Oblast slyšení se udává do 20 kHz. Tyto vlny jsou způsobeny periodickým mechanickým kmitáním částic kolem své osy v důsledku energie, které jsou vystaveny. Sousední částice se svým pohybem navzájem ovlivňují a tím vzniká vlnový pohyb. Pokud se tento pohyb částic pravidelně opakuje nazýváme jej jako periodický. Frekvenci takového pohybu pak získáme jako převrácenou hodnotu periody dle vztahu:

$$f = 1/T \quad (1)$$

Jestli-že je pohyb kmitajících částic ve směru šíření vlny, pak mluvíme o podélném vlnění. Druhým typem vlny je poté příčné vlnění, kdy částice kmitají kolmo na směr pohybu vlny. Častěji se setkáváme s podélným vlněním, jelikož se dobře šíří ve všech prostředích, zatímco příčné vlnění je vidět pouze u tuhých těles. [25]

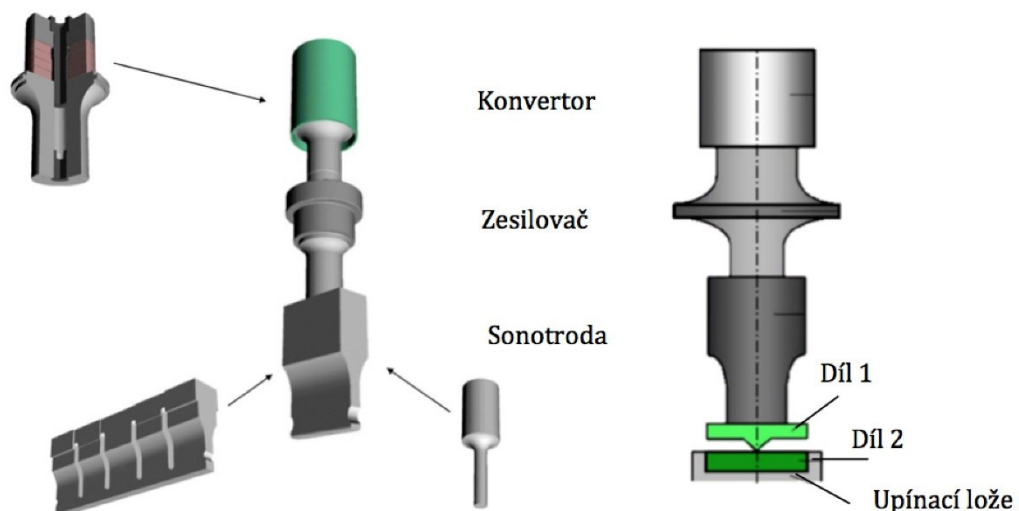
Ultrazvukové vlnění nazýváme někdy i jako mechanické, protože pro své šíření potřebuje hmotné prostředí. Neboli jakékoliv, ve kterém se nacházejí částice. Ideálně pak v takovém prostředí, která vykazují setrvačnost a pružnost. Nemůže se tedy toto vlnění šířit stejně jako například elektromagnetické vakuovým prostorem, ve kterém nejsou žádné částice. Čím vyšší je hustota prostředí, tím rychleji se v něm ultrazvuk šíří. Vyžití ultrazvuku je dnes opravdu hojné. Například v medicíně kde se využívá ultrazvuk pracující na frekvencích do 100 kHz pro chirurgii a čištění nástrojů. V průmyslu se využívá jeho schopnost vyvolat molekulové změny v materiálu. Působením vysoké amplitudy kmitů dochází při vibračním pohybu molekul ke vzájemné třecí síle, která se mění na teplo. Toto teplo při správném nastavení, dokáže rychle tavit termoplasty a po ochlazení je spojit, neboli svařit. Průmyslově se dá využít ultrazvuk tedy na svařování, ale i na čištění, šití, obrábění a nebo k úpravě povrchů. [25, 38]



Obrázek 4: Frekvence zvuku [38]

2.3 Popis ultrazvukové svářečky

Pro ultrazvukové svařování je zapotřebí takové zařízení, které dokáže převádět napětí z klasických 50 Hz na 15 - 70 kHz. Rovněž je potřeba aby zařízení dokázalo vyvinout správný tlak a amplitudu. Takové zařízení se zpravidla skládá z generátoru, konvertoru, transformátoru a sonotrody. Všechny části tohoto zařízení se obvykle vyrábějí z titanu, nebo jiné ušlechtilé oceli. Jednotlivé uspořádání částí je zobrazeno na obrázku 6. [26]



Obrázek 5: Zařízení pro přitlačné svařování plastů ultrazvukem [47]

Zařízení pro ultrazvukové sváření se skládá z několika částí:

- Generátor

Generátor je součástí zařízení, která dokáže měnit běžné nízkofrekvenční střídavé napětí o frekvenci 50 Hz na vysokofrekvenční střídavé napětí v rozsahu cca 15 - 70 kHz. Nejčastěji se však pro ultrazvukové svařování využívá frekvence okolo 20 - 35 kHz.

- Konvertor

Konvertor slouží pro převod elektrické energie z generátoru na mechanické kmity, které způsobují vibrace v materiálu. Konvertor se skládá obvykle ze dvou titanových desek, mezi kterými jsou uloženy piezoelektrické keramické kroužky spolu s kovovými destičkami, které tak tvoří elektrodu. Působením elektrické energie se keramické kroužky rozšiřují a

stahují a přenášejí tento pohyb na titanové bloky, čímž vytvářejí kmity o frekvenci 15 kHz až 70 kHz.

- Transformátor (zesilovač)

Masivní titanový blok, který je umístěn mezi konvertorem a sonotrodou. Pomocí transformátoru můžeme měnit velikost amplitudy. Amplituda je odstup mezi výkmitem a klidovou polohou a ovlivňuje samotnou pevnost spoje. Čím vyšší máme amplitudu, tím dostáváme lepší pevnost spoje.

- Sonotroda

Sonotroda je koncový nástroj, který stlačí materiál a přenáší na něj mechanické kmity. Sonotrody se vyrábějí tak, aby geometricky dosedali na výrobek. Geometrie jejich tvaru může také ovlivňovat velikost amplitudy vibrací. Sonotrody tedy mohou mít jakýkoliv tvar, ale musí se zaručit jejich funkčnost. Pro obecné použití se využívají klasické kulaté, nebo hranaté sonotrody. Různé tvary sonotrod jsou znázorněny na obrázku 7. Podle typu svařovaného materiálu může být jejich povrch hladký anebo zdrsňený. Povrch může být také pokoven, nebo povlakován, pro zajištění lepší odolnosti. Materiál, ze kterého je sonotroda vyráběna, musí mít především dobré akustické vlastnosti, aby dobře přenášel vlny. Vzhledem k podmínkám, které při svařování panují, musí mít sonotrody také vysokou odolnost povrchu. Zároveň výrobci hledají materiály, které se dají snad obrábět a jejich cena je nízká [37]

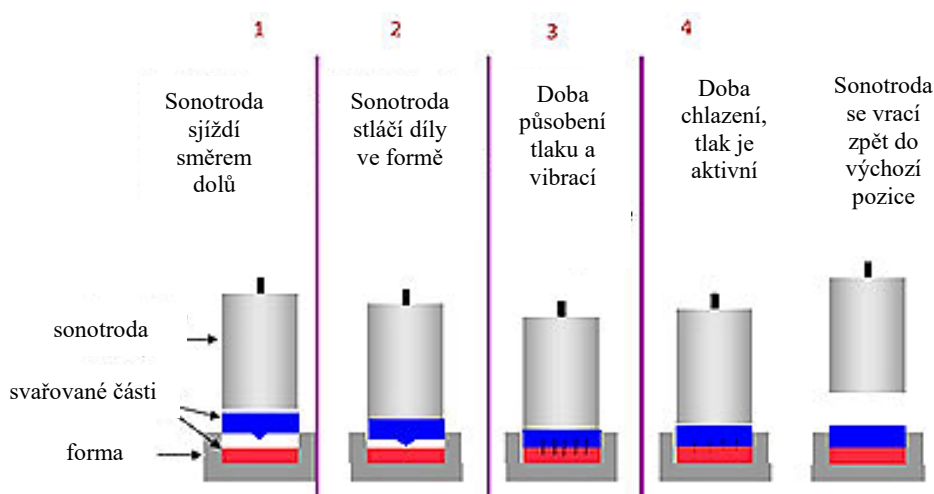


Obrázek 6: Ukázka různých tvarů a druhů sonotrod [37]

Mezi vhodné materiály pro výrobu sonotrody je titan. Má velmi dobré akustické vlastnosti a tvrdý povrch. Problém je však jeho vysoká cena a náročnost na obrábění. Sonotrody se vyrábí také z hliníku. Používají se převážně pro jejich nízkou cenu. Hliník má také dobré akustické vlastnosti, ale špatnou odolnost povrchu a proto se nehodí do sériové výroby. Dobrým kompromisem je také ocel, která zaručuje vysokou odolnost a přijatelnou cenu. Je výborná při zabudování kovových insertů, ale při sériové výrobě se dá využít jen při malé amplitudě kmitů. [25, 26]

2.4 Popis procesu svařování ultrazvukem

Hydrofilní plasty, které rády navlhají se musí nejprve před svařováním vysoušet, aby nedošlo k poklesu pevnosti svarového spoje. Není problém svařovat i termoplasty které jsou vyztuženy skelnými, či jinými vlákny avšak svar, který obsahuje více skelných vláken, než matrice má daleko nižší pevnost, která klesá s rostoucím objemem skelných vláken v kompozitu. Obtížněji se svařují polyamidy, polykarbonáty a nebo i polyolefiny. Pro svařování plastů je nezbytné napřed roztavit povrch obou vztyčných ploch svařovaných částí. Toho ultrazvuk dosáhne pomocí mechanických vibrací přinášejících ze sonotrody, která zároveň i přitlačí oba materiály k sobě. Vibrace působí s takovou intenzitou, že dokáže roztavit polymery, které se mísí a po ochlazení tvoří pevný spoj. Svařovací cyklus je velmi přesný a také velmi rychlý a podle velikosti výrobku může trvat maximálně několik sekund. Proto jej výrobci s oblibou zařazují do kontinuální výroby. [23, 25, 48]



Obrázek 7: Cyklus ultrazvukového svařování [46]

2.4.1 Svařovací cyklus

1. Upnutí svařovaných částí do upínací formy

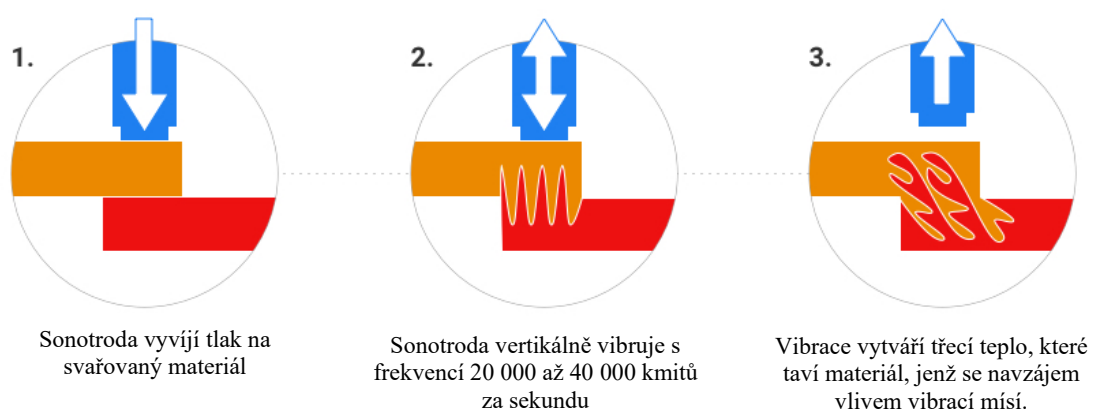
Nejprve se uchytí jednotlivé části k sobě ve formě tak, aby se nepohnuli ani při velmi velkém zatížení. Při svařování působí jednak silná přitlačná síla, ale také vibrace, které mohou způsobit posunutí některé z částí. Svařování by tak bylo neúspěšné. [22, 23]

2. Přitlačení sonotrodou

Sonotroda se dostává do kontaktu s horním svařovaným dílem a přitlačí jej přitlačnou silou spolu se spodním dílem proti formě. [25]

3. Svařování

V tomto kroku který netrvá déle než jednu vteřinu dochází k působení vibrací na obě tělese. Vibrační energie je nejvyšší na povrchu obou ploch, kde se jako první objeví teplo následkem tření obou částí. Následně se zahřívají nejslabší místa a nakonec i celé těleso vykazuje mírné zahřátí. Po rychlém zahřátí nad bod tání se začíná polymer na povrchu obou ploch tavit a díky přitlačné síle, která neustále působí se taveniny společně lehce promísí. Pro dokonalé promísení je dobré mít na jedné ze svařovaných částí energetický usměřovač, neboli návarou hranu. [22, 25, 26]



Obrázek 8: Ultrazvukové svařování, mísení taveniny. [45]

4. Dotlak a chlazení

Po zastavení vibrační tavenina chladne a tuhne. Během tuhnutí však stále působí sonotroda tlakem (přidržovací síla) na obě svařované části, dokud se obě části dostatečně nespojí. Jakmile dojde ke ztuhnutí, sonotroda se vrací zpět do původní polohy. [23]

2.5 Procesní parametry

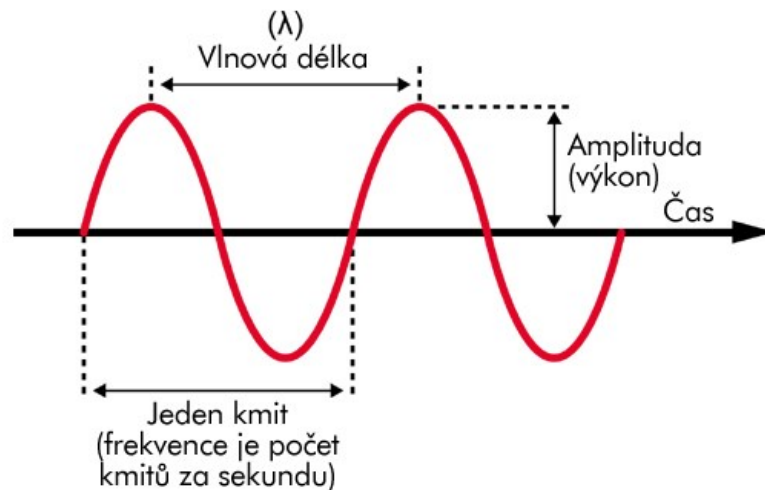
Abychom dosáhli při svařování ultrazvukem těch nejlepších výsledků, je nezbytné celý proces řádně nastavit a dle potřeby neustále seřizovat. Každý vzorek, který svařujeme, má jinou tloušťku, jiný materiál a je potřeba k tomu tak přistupovat. Naštěstí máme pro proces řízení několik parametrů, které můžeme měnit a tím dosáhnout co nejlepších výsledků. Mezi tyto řídicí parametry bezesporu patří svařovací síla, frekvence, amplituda, svařovací čas a chlazení. [25, 30, 48]

2.5.1 Svařovací síla

Svařovací síla je tlak, kterým působí sonotroda na horní svařovaný díl. Tato síla přímo ovlivňuje i rychlost svaření. Je velmi důležité dbát na správné nastavení této síly. Pokud by byla svařovací síla příliš malá, může nám horní díl odskakovat od sonotrody, čímž dochází k poškození povrchu a svařování bude neúspěšné. Poznáme to také vysokým hlukem při svařování. S malou svařovací silou bude také svařovací čas pomalejší a tok taveniny bude malý, což má za následek slabé spojení, protože tavenina nebude dobře zalisovaná. Pokud budeme mít naopak svařovací sílu příliš vysokou, už to nemusí být svařování, ale pouze lisování za studena. Navíc se oba díly mohou společně pohybovat. Svařovací čas se výrazně zrychlí a návarová hrana se nemusí dostatečně dobře roztavit a promísit. Výchozí doporučení pro svařovací sílu je zhruba 3 N/mm délky návarové hrany. Velká svařovací síla ovlivňuje negativně i rychlost toku taveniny. Tavenina teče příliš rychle a dochází k nerovnoměrnému výkonu a průběhu spojování, což vede opět ke snížení pevnosti svaru. Pokud nalezneme optimální svařovací sílu, získáme nejlepší spojení. Svařování má ideální podmínky, aby proniklo více do hloubky materiálu a mělo více prostoru na promísění tavenin. Na ideálních vzorcích také nevidíme žádné povrchové poškození od sonotrody, neboť vrchní díl je při takovém procesu takřka „přilepený“ k sonotrodě. [21, 25, 31]

2.5.2 Frekvence

Frekvence určuje, do jaké hloubky mohou vibrace prostupovat. Pokud budeme chtít svařovat do větších hloubek, třeba při svařování ve vzdáleném poli (> 8 mm), budeme pracovat na frekvenci okolo 20 kHz. Při frekvenci okolo 35 kHz jsou zase vlny brzo absorbovány a lze je tedy použít na svařování v blízkosti sonotrody nebo v tzv. blízkém poli (< 6 mm). Tyto vyšší frekvence mají výhodu v menším hluku, v menší velikosti komponentů (oproti svářečkám s 20 kHz), lepší ovládání mechanické energie, nižší svařovací síly a v rychlosti zpracování. Nevýhodou může být snížená výkonnost díky malé velikosti součástí a horší svařování na dálku v důsledku nižší amplitudy. Ultrazvukové stroje s vyšší frekvencí se obecně používají pro malé a jemné díly např. v elektrotechnice. [30, 31]



Obrázek 9: Amplituda a frekvence kmitu [39]

2.5.3 Amplituda

Vzhledem k tomu, že je napětí přímo úměrné vibrační amplitudě, může být ohřev řízen změnou amplitudy. Tím pádem je amplituda důležitým parametrem pro řízení rychlosti svařování. Pokud máme ale amplitudu příliš vysokou, roste i rychlost ohřevu a toku taveniny, což vede v důsledku špatného průběhu spojování v malou pevnost sváru. Pokud bychom však používali pouze nízkou amplitudu docházelo by u taveniny k nesouměrné iniciaci, což by vedlo k předčasnému tuhnutí. Obecně se však snažíme volit co největší amplitudu při které ještě nedochází k negativním účinkům, jelikož je u vyšší amplitudy větší pravděpodobnost pevnějšího spoje. Amplitudu měníme mechanicky změnou zesilovače, nebo sonotrody. Materiály s vysokou teplotou tavení a semikrystalické materiály obvykle

vyžadují vyšší amplitudy než například amorfni materiály. Typický rozsah amplitudy je pro amorfni polymery cca 30 - 100 μm a 60 - 125 μm pro semikrystalické polymery. [30, 31]

2.5.4 Svařovací čas

Svařovací čas je celá doba, kdy je sonotroda v kontaktu se svařovaným dílem. Svařovací čas zahrnuje jak čas vibrací, tak čas chlazení. Zvyšování svařovacích časů obecně zvyšuje pevnost svaru další zvýšení má za následek snížení pevnosti. Zvýšení času svařování zvyšuje rozptýlení energie ve svařovaných materiálech. Pokud jsou časy svařování příliš dlouhé, dochází k nadměrnému toku taveniny, což opět snižuje pevnost svaru. [30, 31]

2.6 Typy spojů pro ultrazvukové sváření

Mezi obecně nejzákladnější možnosti spojení dvou částí řadíme spoje jako je spoj tupý, šikmý, přeplátovaný či vyztužený. Tyto základní spoje se využívají v širokém rozsahu lepení, ale také svařování, a nejen u polymerů, ale i v mnoha jiných odvětvích. I takové základní typy spojů se dají úspěšně použít pro ultrazvukové sváření. Především nacházejí uplatnění v laboratorním měřítku, kde není takový prostor ke konstrukci jiných náročných geometrických zámků. Nevýhodou však je nižší pevnost v tahu. Přeplátovaný typ spoje je často využíván při laboratorních testech pro spojování dvou materiálů s následnou tahovou zkouškou. [26, 40]



Obrázek 10: Základní způsoby spojů bez použití návarové hrany [40]

Pro zvýšení účinnosti svařovaných dílů, lze navrhovat jednotlivé části tak, aby do sebe ještě před svařením zapadali. Ne vždy však tvar nebo tloušťka svařovaných dílů dovolí vytvářet takové „zámky“. V takovém případě je vhodné využít usměřovače energie neboli návarové hrany, které rovněž mohutně přispívají ke zvýšení pevnosti. Ideální řešením je pak kombinace návarové hrany spolu s zámkovým typem spoje. [20, 32]

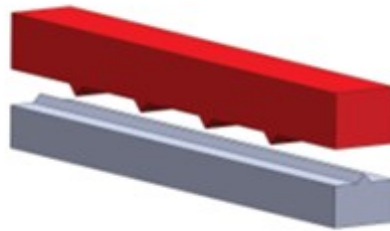
2.6.1 Návarová hrana

Návarová hrana nebo též energetický usměřovač definuje bod startu svařování. V jejím nejslabším místě na špičce dosáhne materiál nejvyšší deformace a tím vzniká v tomto místě trocha taveniny. Tato tavenina se stává lokálním zdrojem tepla, odkud se tavenina šíří dál. Návarová hrana tak vytváří při svařování tolik potřebný tok taveniny, který se dobře promísí mezi oba svařované díly. Bez toku této taveniny by nedošlo ke krystalickému propojení a pevnost sváru by byla výrazně menší. Zdroj tepla by už nebyl lokální a místa sváru by byla náhodná kontaktní a slabá místa. Bez návarové hrany taky proces svařování trvá o něco déle a je potřeba i vyšší výkon, což může vést k poškození povrchu dílů. [20, 32]



Obrázek 11: Základní schéma použití návarové hrany [47]

Návarová hrana by měla úhel 90° , který zajišťuje ideální kompromis mezi tuhostí a ostrostí. Její výška se určuje tloušťkou stěny a měla by tedy být minimálně 50 %-tní oproti tloušťce. Radius na špičce by měl být velmi ostrý alepsoň pod 0,1 mm. Toho se při dosáhne při výrobě vstřikováním pouze edokonalým naplněním v dutině formy a proto by měla být forma dobře odvdzušněná. Ostatní hrany na svařované části by měli mít radius cca 0,5 mm, aby nedocházelo k náhodným vznikům taveniny v jiných oblastech. Rovinnost na straně, která je kolmá na sonotrodu musí být menší než 1 %. [20]



Obrázek 12: Průběžná návarová hrana [41]

Další možností je využít průběžnou nebo přerušovanou návarovou hranu. Přerušovaná hrana má menší náročnost na energii, ale není vhodná pro těsné spoje. Průběžná hrana zase vykazuje nízké napětí bez tvorby trhlin. Musíme však počítat s tím, že v rocích dojde k výtokům, nebo výdutím materiálu. Tento jev se dá odstranit přerušením návarové hrany v rocích, ale pak už nemusí být sváry těsné. [20]

2.6.2 Typy konstrukce spojů a návarové hrany

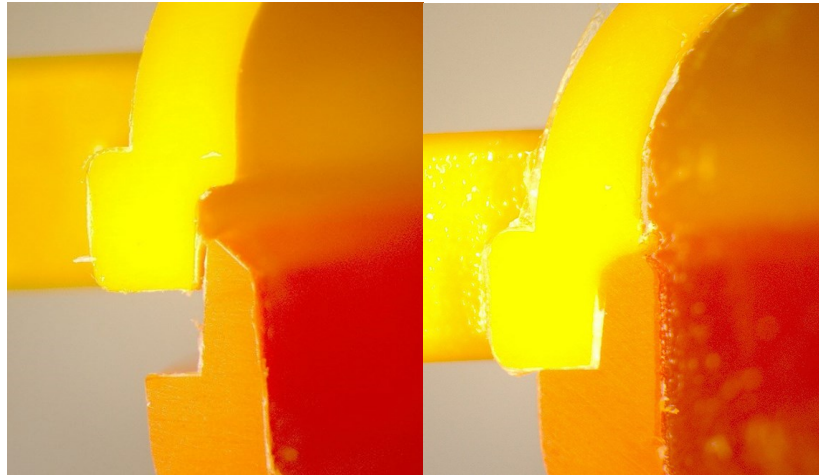
1. Stupňovitá návarová hrana (step joint)



Obrázek 13: Stupňovitá návarová hrana [32]

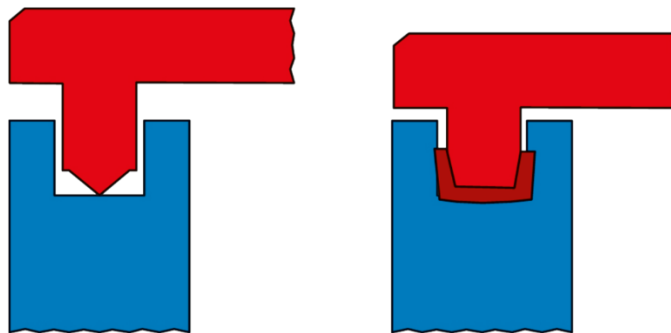
Tento typ konstrukce spoje je relativně snadno implementovatelný v nástroji pro vstřikování. Je to jedna z upřednostňovaných tvarů hrany pro ultrazvukové spojení. Pokud se používají amorfní plasty, podporuje tato konstrukce spojů výrobu viditelně bezchybných, vysoce pevných a vzduchotěsných svarů. Je to vhodný spoj pro namáhání v tahu a v krutu. Dochází k optimálnímu přenosu energie, díky zvýšené dosedací ploše sonotrody a materiál zůstává

v zóně tavení. Další výhody spočívají v tom, že stupňovitý spoj podporuje samo středění součástí a absorpci zvýšených smykových a tahových sil. [32]



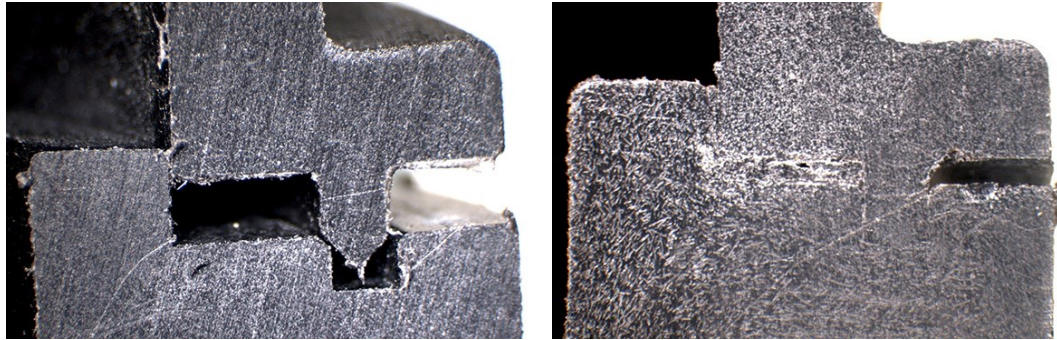
Obrázek 14: Step joint v praxi. Před a po svaření [32]

2. Spoj typu pero – drážka (Tongue and groove joint)



Obrázek 15: Konstrukce spojení typu pero-drážka [32]

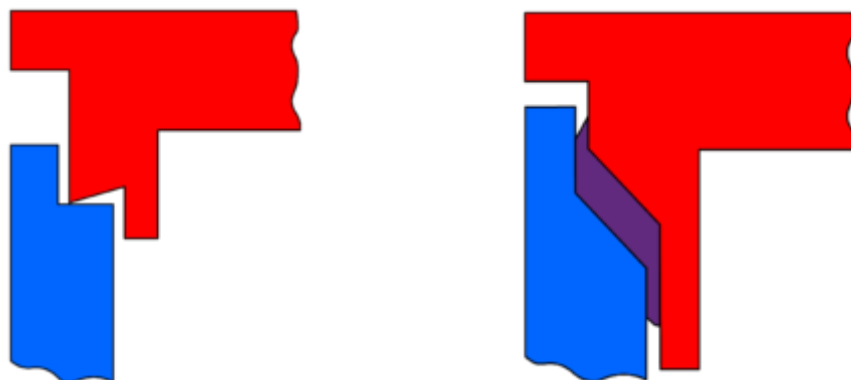
Nejlepší pevnost ze všech druhů spoje obvykle dosahujeme použitím konstrukce typu pero – drážka. Opět vykazuje vysoké hodnoty při namáhání v tahu i v krutu. Rozměry, které mají mezery s velmi malými vůlemi (max. 0,1 mm) vytvářejí kapilární efekt, který způsobuje, že generovaná tavenina proniká celou oblastí spoje a zůstává v zóně spojení. Tento návrh spoje však vyžaduje relativně silné stěny o minimální tloušťce 2,5 mm. [32]



Obrázek 16: Tongue and groove joint v praxi. Před a po svaření [32]

3. Střížný spoj (shear joint, mash joint)

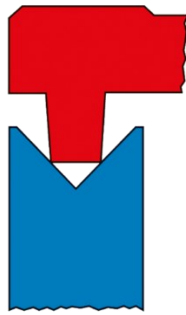
Střížný spoj se osvědčil u semikrystalických polymerů v kombinaci s tenkými stěnami. Zvláště pak pro polyamidy a polyoxymetylen. Při velkých spojovacích vzdálenostech tato konstrukce spoje obvykle vytváří vzduchotěsné a pevné svary. Vhodný pro namáhání v tahu i krutu. Je nutné udržet na obou dílech stejný úhel návarové hrany který by měl být mezi 20 až 35°. Také je třeba počítat se zvýšeným výkonem ultrazvuku. [32]



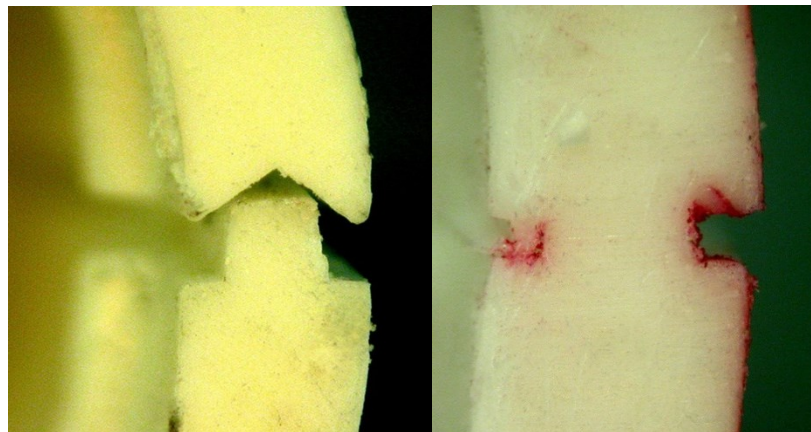
Obrázek 17: Konstrukce střížného spoje [32]

4. Tenkostěnná návarová hrana (double V joint)

Tento spoj se doporučuje pro součásti s tloušťkou stěny menší než 1,5 mm. Nutné je však mít přesné automatické centrování a přesně definované umístění spojů abychom po svařování dosáhli vysoké pevnosti. Je třeba také poznamenat, že přesné vstřikování dílů a správné nastavení tohoto spoje jsou naprosto nezbytné. Tento spoj se dá využít jen u malých dílků a při uzavírání vzduchu mohou vznikat kazy. [32]



Obrázek 18: Konstrukce spoje pro tenkostěnnou návarovou hranu [32]



Obrázek 19: Double V joint v praxi. Před a po svaření. [32]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

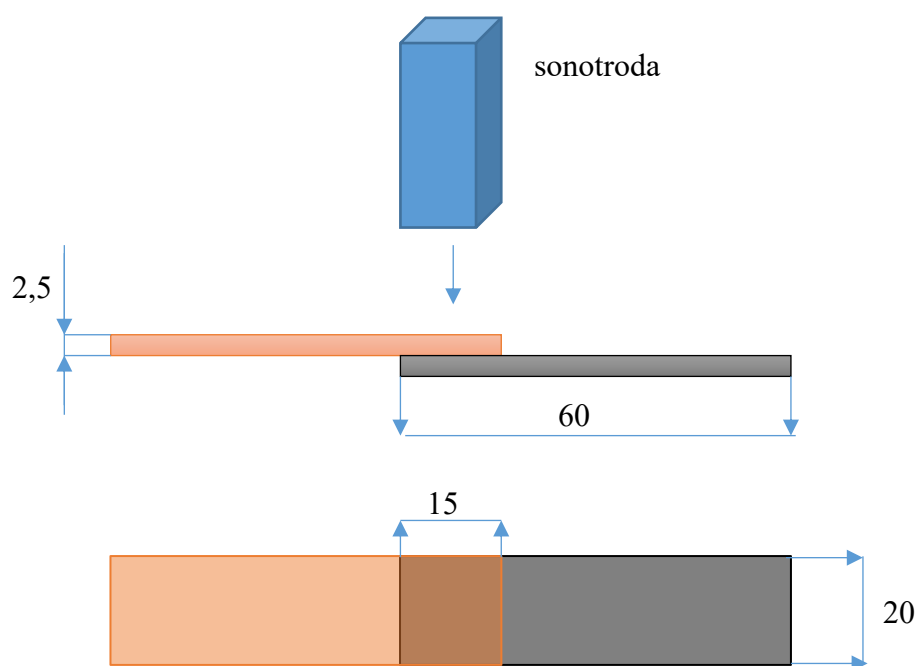
3 CÍL PRÁCE

Cílem praktické části je optimalizovat procesní podmínky pro ultrazvukové svařování vysoce plněných akrylátových pryskyřic tak, aby bylo dosaženo co největší pevnosti bez povrchových vad. Pokud svařovaný materiál obsahuje více než 50 % vyztužujícího plniva, je předpokladem, že spojování nebude probíhat snadno a i pevnost spoje bude s dalším narůstajícím podílem plniva klesat. Svařování probíhalo na přístroji Hermann HiQ Dialog SpeedControl a měření mechanické pevnosti pak probíhalo klasickou tahovou zkouškou. Použitým akrylátovým materiálem pro svařování je dvousložková termoplastická pryskyřice s vysokým plněním skelnými vlákny. Výrobce uvádí, že je tento materiál vzhledem ke svému vysokému plnění takřka nesvařitelný.

Pro dosažení nejvyšší pevnosti spoje bylo vyzkoušeno svařování při různém nastavení amplitudy kmitu a svařovacího času. Pro lepší výsledky pak byla navržena povrchová úprava vzorku. Vstupní materiál byl bohužel od výrobce dodán ve formě plochých desek a proto nebylo možné využít technologii energetického usměrňovače a návarové hrany. Pro použití návarové hrany při svařování je třeba počítat s návarovou hranou již při výrobě formy, či půltruzního profilu při vytlačování. Cílem tedy bylo najít jiný způsob, jak zlepšit pevnost spoje i bez návarové hrany. Jednou z možností je vytvoření drážky na obou vzorcích ve svařované oblasti tak, aby do nich roztavený polymer zatékal a po zchladnutí propojil obě svařované části. Zároveň je vhodné zvýšit obsah polymerního podílu v místě spojení přidáním destičky akrylátu. Tento přídatný materiál pomůže zlepšit promísení taveniny. Zároveň funguje trochu i jako plochý energetický usměrňovač, ačkoliv není přímo součástí jednoho ze svařovaných dílů. Získané poznatky a výsledky z měření jsou poté shrnuty v závěru.

4 MĚŘENÍ A VÝSLEDKY

Před samotným měřením proběhla příprava jednotlivých vzorků pro svařování. Svařovaný materiál byl od výrobce dodán ve formě plochých desek a následně rozřezán na jednotlivé vzorky. Velikost každého vzorku byla 20 x 60 x 2,5 mm a svařovaná plocha 20 x 15 mm. Schéma vzorku před svařením zobrazuje obrázek 21. Typ spojení jednotlivých vzorků před svařením bylo formou přeplátování. Vzhledem k tomu, že se velikost vzorku během měření neměnila, byla stanovena přitlačná síla při svařování pro celou dobu měření na 1000 N. Změna v nastavení pak proběhla v amplitudě, která se nastavila procentuálně na hodnoty 100, 75 a 50 %. Další parametr, který výrazně ovlivňuje svařování je čas. Ultrazvukové svařování je velmi rychlé a změny jsou pozorovatelné už v rozmezí 0,5 – 1 s. Všechny tyto změny v nastavení jednotlivých parametrů, jako je čas, amplituda a přitlačná síla, byly konzultovány s výrobcem přístroje Hermann jako doporučené pro tento typ materiálu.



Obrázek 20: Schéma vzorku před svařením. Přeplátovaný spoj.

Samotné měření probíhalo v několika krocích, při kterých docházelo ke změnám úpravy na vzorcích tak, aby byla výsledná pevnost spoje co nejvyšší. Zároveň v každém kroku probíhala také změna v amplitudě a čase. Pro každé jednotlivé vyhodnocování bylo připraveno několik vzorků pro lepší přesnost výsledků.

V prvním měření probíhalo svařování destiček, které neměli žádnou úpravu. Byly rozlišeny pouze na vzorky s podélnou a příčnou orientací vláken. V dalším kroku byl přidán mezi destičky vzorku polymerní akrylátový materiál, jehož cílem bylo zvýšení polymerního podílu ve svařované oblasti a tím zlepšit pevnost. Současně tento materiál částečně plní i roli energetického usměrňovače, ačkoliv není přímo součástí jedné ze svařovaných částí. Ve třetím měření došlo k úpravě vzorku vyfrézováním drážky, do které by měl polymer „zatéct“ formou zámku a tím zvýšit pevnost.

4.1 Měření s podélnou a příčnou orientací vláken - 1. měření

První zkouška proběhla při přítlačné síle 1000 N a změna docházela pouze v amplitudě a ve svařovacím čase. Pro každé nastavení bylo použito 5 vzorků, a to jak v podélném, tak v příčném směru. Svařené vzorky byly podrobeny zkoušce tahem. Rychlost tahové zkoušky byla 10 mm/min. Cílem tohoto měření je stanovit, jak velký má vliv orientace skleněných vláken na celkovou pevnost spoje. Důležité je také stanovit jaká je nejvhodnější velikost amplitudy a svařovacího času pro další zkoušky.

Tabulka 2: Nastavení amplitudy a svařovacího času pro ultrazvuk v podélném i příčném směru orientace vláken

měření č.	amplituda	svařovací čas [s]
1	39,6 (100 %)	1,00
2	39,6	0,75
3	39,6	0,4
4	29,7 (75 %)	1,00
5	29,7	0,75
6	29,7	0,4
7	19,8 (50 %)	1,00
8	19,8	0,75
9	19,8	0,4

Tabulka 3: Průměrné výsledky jednotlivých měření pro podélný směr (A)

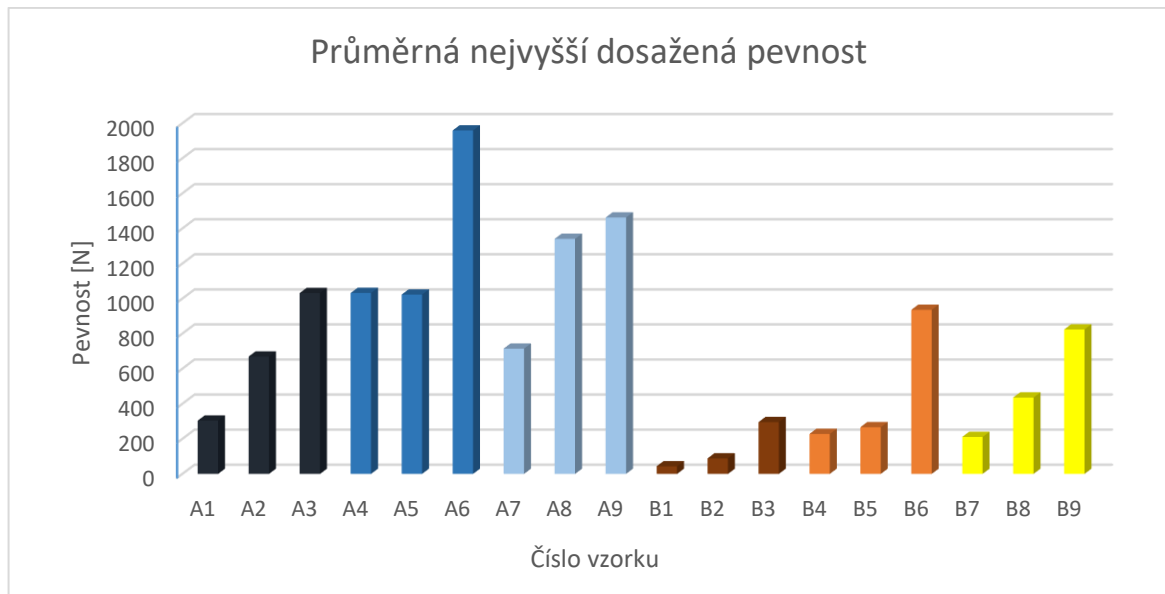
Zk.	Napeti při nejv. síle (MPa)	Napeti při pretrhu (MPa)	Nejv. Pevn. (N)	Prodl. při nejv. Pevn. (mm)	Prodl. při přetrhu (mm)	Síla při pretrhu (N)	Tažnost při nejv. pevn. (%)	Tažnost při přetrhu (%)	Young modul (MPa)	Tažnost v mezi kluzu (%)
A 1	1,01	0,81	303,80	0,41	0,86	242,49	0,41	0,86	167,42	0,40
A 2	2,23	2,03	669,35	0,32	0,52	608,32	0,32	0,52	345,80	0,31
A 3	3,44	3,43	1031,50	0,31	0,31	1030,00	0,31	0,31	1134,69	0,30
A 4	3,44	3,44	1032,07	0,52	0,52	1032,07	0,52	0,52	696,91	0,51
A 5	3,41	3,30	1022,63	0,75	0,76	990,20	0,75	0,76	375,18	0,75
A 6	6,53	6,53	1958,87	1,36	1,36	1958,87	1,36	1,36	287,18	1,35
A 7	2,38	2,35	714,47	0,91	0,91	705,37	0,91	0,91	180,08	0,90
A 8	4,47	4,47	1340,67	0,89	0,89	1340,67	0,89	0,89	511,47	0,88
A 9	4,88	4,88	1462,50	1,04	1,04	1462,50	1,04	1,04	396,31	1,03

Tabulka 4: Průměrné výsledky jednotlivých měření pro příčný směr (B)

Zk.	Napeti při nejv. síle (MPa)	Napeti při pretrhu (MPa)	Nejv. Pevn. (N)	Prodl. při nejv. Pevn. (mm)	Prodl. při přetrhu (mm)	Síla při pretrhu (N)	Tažnost při nejv. pevn. (%)	Tažnost při přetrhu (%)	Young modul (MPa)	Tažnost v mezi kluzu (%)
B 1	0,14	0,01	43,35	0,06	2,90	1,49	0,17	8,27	12,86	0,18
B 2	0,30	0,05	88,54	0,15	2,05	14,59	0,42	5,86	-32,85	0,39
B 3	0,99	0,07	295,41	0,12	2,62	20,56	0,34	7,48	267,46	0,31
B 4	0,76	0,02	227,70	0,11	1,26	5,89	0,31	3,60	234,19	0,29
B 5	0,89	0,40	266,33	0,26	0,98	120,55	0,74	2,81	200,27	0,72
B 6	3,12	3,11	935,63	0,64	0,64	931,53	1,81	1,83	309,30	1,79
B 7	0,70	0,01	210,86	0,15	0,90	4,33	0,42	2,57	251,71	0,40
B 8	1,45	1,33	435,62	0,23	0,53	398,85	0,65	1,51	226,10	0,64
B 9	2,75	2,69	823,80	0,52	0,54	807,77	1,48	1,54	332,19	1,38

4.1.1 Diskuze výsledků z 1. měření

Výsledky z prvního měření jsou zaznamenány do souhrnných tabulek 3 a 4. Tabulka 3 je dána pro podélný směr orientace vláken a tabulka 4 pro příčný směr. Nejdůležitější vlastností, která je stěžejní pro celou práci, je nejvyšší pevnost, jejíž hodnoty jsou souhrnně uvedeny v grafu č. 1. Důležitou vlastností pro pozorování je ovšem také tažnost a napětí při nejvyšší síle. Z těchto tabulek je patrné, že nejlepších výsledky jsou dosahovány při nejkratším čase svařování tj. 0,4 s. S rostoucím svařovacím časem klesá celková pevnost spoje. Orientace vláken je rovněž pro svařování důležitá. V podélném směru se totiž dosahuje mnohem lepších výsledků než v příčném směru. To je patrné i z grafu č. 1, kde jsou modře znázorněny hodnoty pevnosti pro podélnou orientaci (A) a žlutě pak pro příčnou orientaci (B).



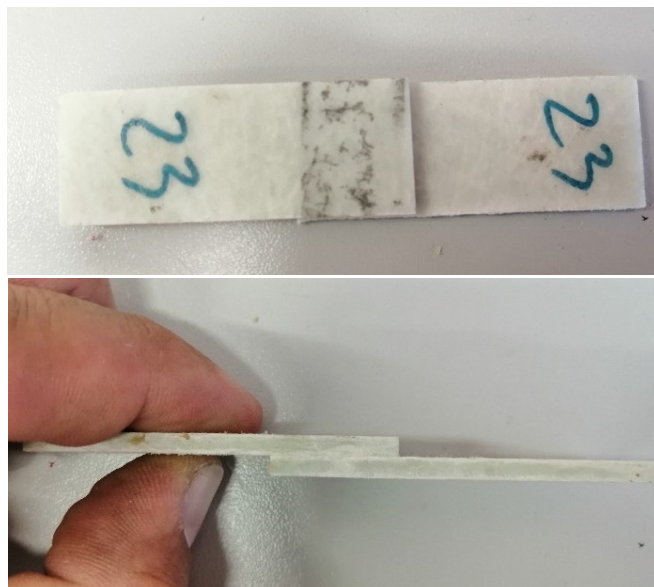
Graf 1: Průměrné srovnání nejvyšší dosažené pevnosti pro jednotlivá měření. A pro podélný směr a B pro směr s příčnou orientací.

V příčném směru (B) nedocházelo skoro k žádnému protažení a spoj ihned praskl. Čas a orientace vláken jsou proto hlavními faktory, které nejvíce ovlivnili první měření. V grafu 1 jsou na pozicích 3, 6 a 9 vzorky, které byly svařovány za čas 0,4. Ve své barevné kategorii, čili při stejné amplitudě mají vždy nejlepší pevnost. Posledním kritériem pro porovnání zůstává amplituda. Z prvního měření je se jeví, že nižší a střední amplituda vykazuje lepší výsledky než vzorky svařené při nejvyšší amplitudě.



Obrázek 21: Vzorek z měření B1.

Při velké amplitudě a svařovacím čase se polymerní část příliš “rozteče“ a přítlačná síla jej vytlačí přes okraj. Uprostřed svařované části pak zůstanou pouze skelná vlákna bez polymeru, která samotná nemají na pevnost spoje žádný velký vliv. Vzorek z B1 tzn. maximální čas a amplituda, je znázorněn na obrázku 22 před a po svaření. Čím déle působí ultrazvuk na svařovanou oblast, tím více tato plocha zčerná, což může mít negativní vliv na design výrobku. Jednoznačně tak dochází k povrchovým vadám.

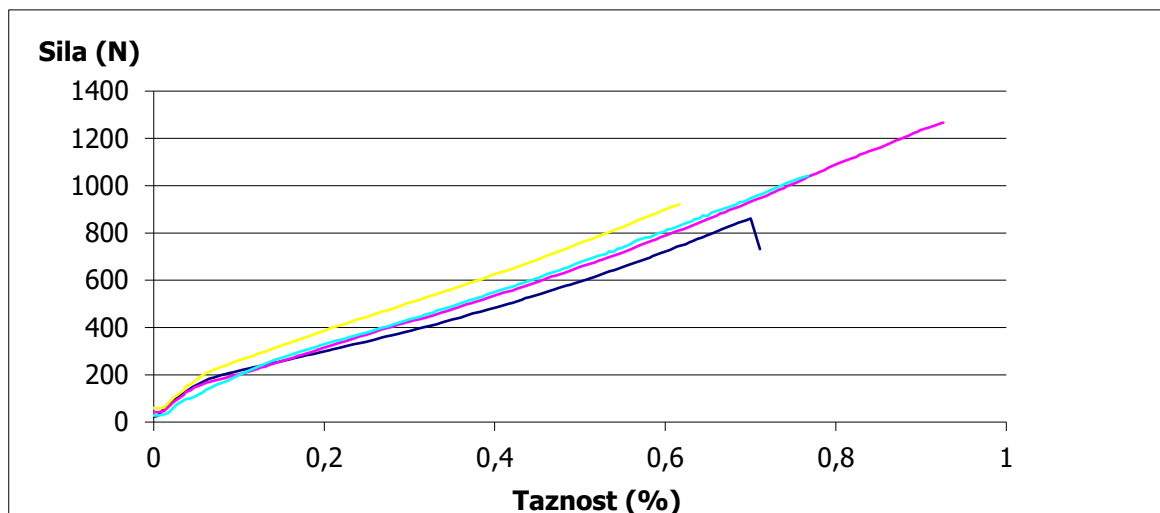


Obrázek 22: Vzorek z měření B9 po svaření (nízká ampl. krátký čas).

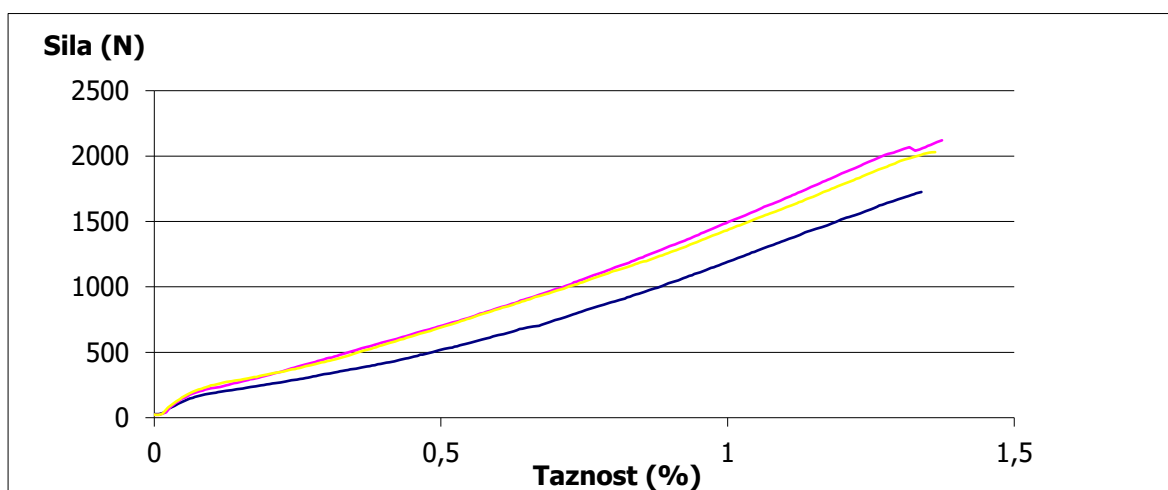


Obrázek 23: Vzorek B9 po přetržení.

Při nízké amplitudě a za nízkého času svaření lze dosáhnout relativně vyšší pevnosti. Navíc je toto spojení čisté, bez přetoků a povrchových vad jak je patrné z obrázků 23 a 24.



Graf 2: Závislost síly na tažnosti u vzorku A5 (amplituda 75 / čas 0,75 s)



Graf 3: Závislost síly na tažnosti u vzorku A6 (amplituda 75 / čas 0,4 s)

Každý jednotlivé měření bylo vyhodnoceno tahovou zkouškou a výsledkem této zkoušky je nejenom tabulka 3 a 4 (průměrné výsledky), ale také jeho grafické vyjádření, které ukazuje závislost síly vůči tažnosti. Graf 2 a 3 je ukázkou srovnání, jak se tato křivka vyvíjí při stejné amplitudě (75%), ale jiném čase. Ačkoliv mají obě křivky stejný, krásně lineární průběh tahové zkoušky, je vidět, že při nižším svařovacím čase křivka dosahuje nejen vyšší síly, která je potřeba pro přetrhnutí, ale také i vyšší tažnost.



Obrázek 24: Uchycení vzorku mezi čelisti při tahové zkoušce.

4.2 Měření s přídavným materiálem – 2. měření

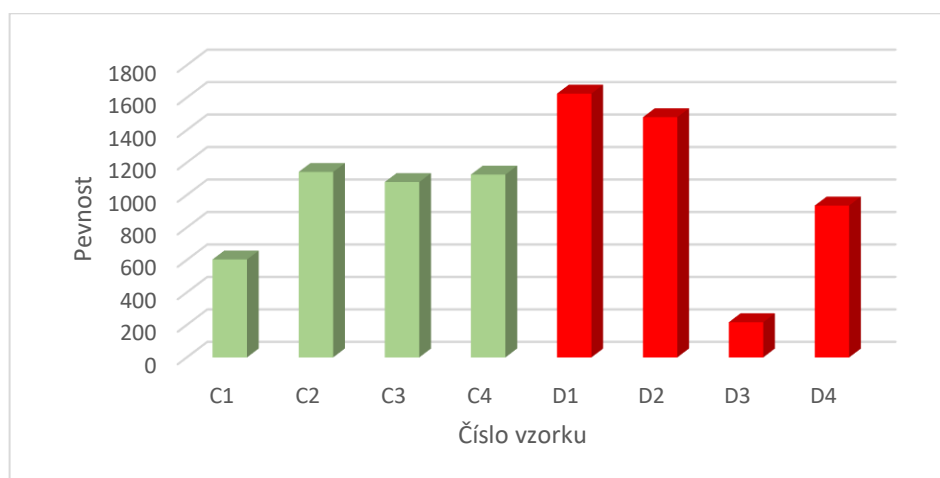
Z předchozích výsledků z prvního měření je patrné, že tento materiál lze uspokojivě svařit pouze za krátký svařovací čas a při nižší amplitudě. Při vyšších hodnotách se polymer, který je v materiálu zastoupen v menší míře, rychle roztavil a roztekl do krajů. Uprostřed hlavní svařované oblasti pak zůstala pouze skelná vlákna, která nedokáží zajistit spojení obou částí. Pro lepší výsledky je proto potřeba přidat mezi destičky vzorku také přídavný polymerní materiál, který zvýší podíl polymeru. Zároveň tento materiál částečně plní roli ploché návarové hrany, která vede opět ke zvýšení pevnosti spoje. Jako přídavné materiálem byl pro lepší homogenizaci zvolen akrylát, který je pro snadnější manipulaci rovněž vyztužen skelným vláknem, avšak poměr skla je tu zde jen velmi malý. V tomto měření se bude porovnávat vliv velikosti přidaného materiálu na celkovou pevnost. Stanoveny byly dvě šířky přídavného materiálu 5 a 15 mm. Zároveň bude posouzen vliv amplitudy a doby svaření. Vzhledem k tomu, že budou mít vzorky spolu s přidaným akrylátem vyšší tloušťku, je možné pracovat i s vyšší amplitudou. Měření probíhalo pouze se vzorky s podélnou orientací.

Tabulka 5: Srovnávací tabulka pro nastavení jednotlivých parametrů k 2. měření

Měření	Amplituda	Svařovací čas [s]	Šířka příd. mat. [mm]
C 1	29,7 (75 %)	0,40	5
C 2	29,7	0,40	15
C 3	29,7	0,75	5
C 4	29,7	0,75	15
D 1	39,6 (100 %)	0,40	5
D 2	39,6	0,40	15
D 3	39,6	0,75	5
D 4	39,6	0,75	15

Tabulka 6: Průměrné výsledky jednotlivých měření pro podélný směr s amplitudou 75 % (C) a amplitudou 100 % (D)

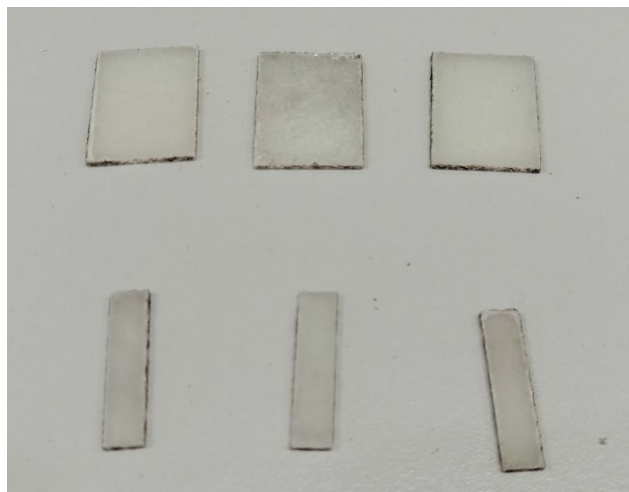
Zk.	Napeti pri nevj. sile (MPa)	Napeti pri pretrhu (MPa)	Nejv. Pevn. (N)	Prodl. při nevj. Pevn. (mm)	Prodl. při přetrhu (mm)	Síla pri pretrhu (N)	Tažnost pri nevj. pevn. (%)	Tažnost při přetrhu (%)	Young modul (MPa)	Tažnost v mezi kluzu (%)
C 1	2,01	2,01	603,36	0,70	0,70	602,49	2,00	2,01	91,98	1,97
C 2	3,81	3,66	1142,33	1,04	1,04	1098,10	2,96	2,98	116,90	2,93
C 3	3,60	3,38	1080,55	0,72	0,73	1012,80	2,04	2,08	10,87	2,01
C 4	3,75	3,73	1126,30	1,20	1,21	1117,68	3,44	3,45	288,22	3,42
D 1	5,42	5,41	1625,10	1,27	1,27	1623,35	3,62	3,64	39,60	3,60
D 2	4,93	4,88	1479,87	1,52	1,53	1463,43	4,34	4,36	201,89	4,33
D 3	0,72	0,30	216,95	0,26	1,39	90,33	0,75	3,98	182,99	0,40
D 4	3,12	3,12	935,45	1,22	1,22	935,30	3,48	3,48	147,96	3,46



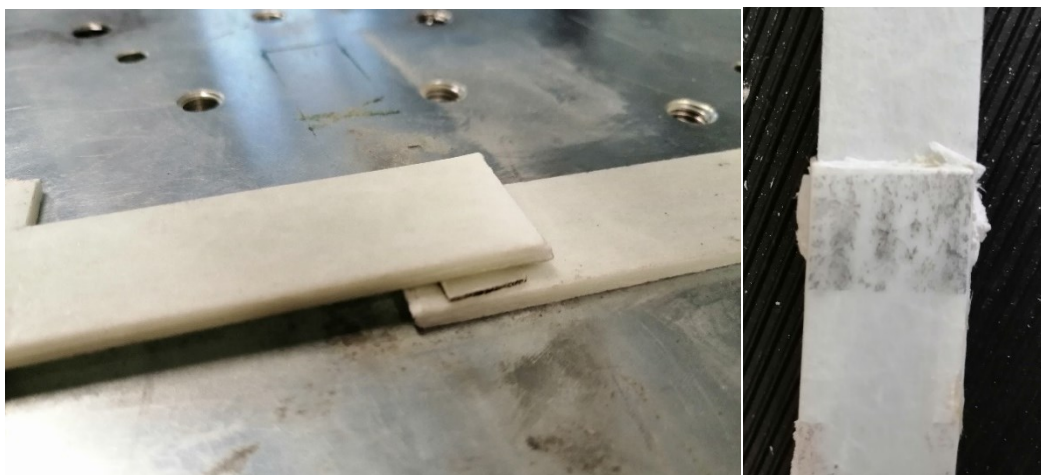
Graf 4: Průměrné srovnání nejvyšší dosažené pevnosti pro jednotlivá měření. C je pro nižší amplitudu a D pro vyšší amplitudu.

4.2.1 Diskuze výsledků z 2. měření

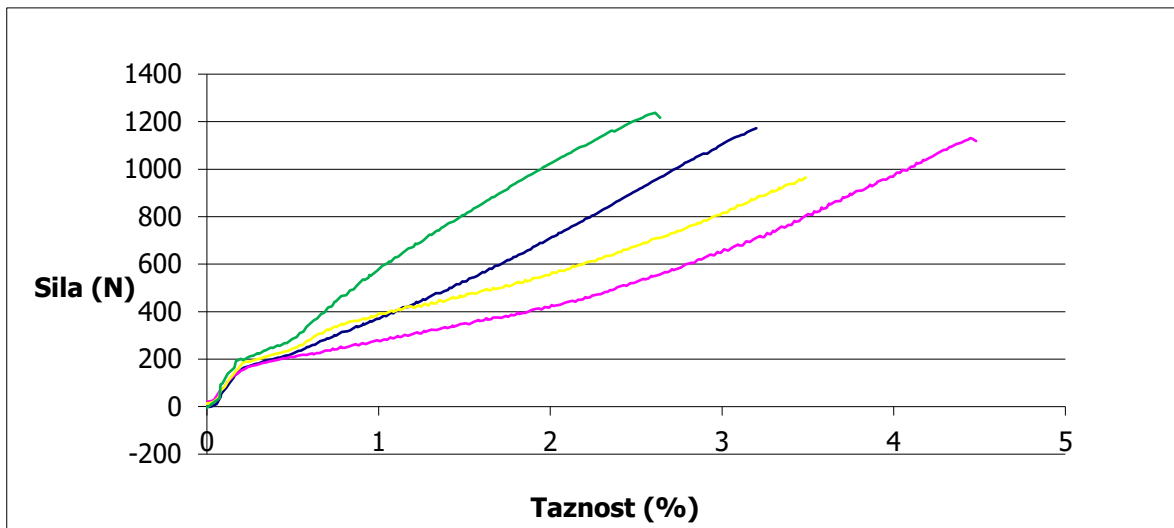
Vzorky svařené při nižší amplitudě vykazují podobné pevnostní výsledky. Měření D3 pak nelze považovat za korektní. Celkově se však nejlépe jeví, že pro lepší pevnost je potřeba nejkratší čas svaření a maximální amplituda, jak je tomu u vzorku z měření D1 a D2. Oproti prvnímu měření se jedná o značný rozdíl, jelikož velká amplituda znamenala špatnou pevnost. Je to samozřejmě dáno přidáním tloušťkou akrylátového plniva. Šířka přídatného plniva není pro pevnost nijak rozhodující. Z vizuálního pozorování je však patrné, že je lepší dobře volit tuto šířku ku šířce vzorku. Při šířce 15 mm se plnivo při svařování vytlačilo ven a bylo ho tam tedy zbytečně moc. Ideální šířka plniva pro vzorek o šířce 20 mm je cca 10 mm, tj. o 50 % menší. Výsledky pevnosti s přídatným plnivem jsou celkově lepší než bez přídatného plniva. Po přidání akrylátového materiálu vzrostla také tažnost oproti prvnímu měření dvojnásobně.



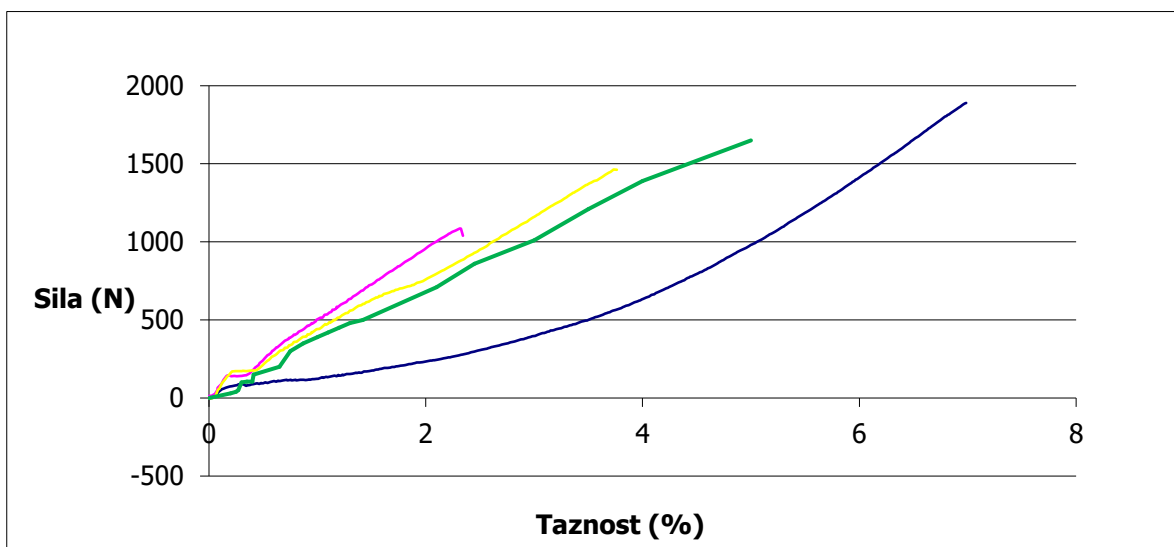
Obrázek 25: Předchystaný vyztužený akrylátový materiál ve dvou velikostech. Nahoře 10 x 15 mm, dole 10 x 5 mm



Obrázek 26: Překládaný vzorek s přidáním materiálu před a po svaření



Graf 5: Závislost síly na tažnosti u vzorku C2 (amplituda 75 / čas 0.4 s/ plnivo 15 mm)



Graf 6: Závislost síly na tažnosti u vzorku D2 (amplituda 100 / čas 0.4 s/ plnivo 15 mm)

Vzhledem k tomu, že dle tabulky 6 nenastala při změně šířky plniva žádná velká změna pevnostních vlastností a předpoklad pro nejlepší čas svaření je doba 0,4 s nabízí se tentokrát k porovnání alespoň vliv velikosti amplitudy. Grafy 5 a 6 mají při stejném svařovacím čase (0,4 s) a stejné šířce plniva (15 mm) jinou hodnotu amplitudy. Oproti prvním měření je zde vidět posun. Maximální amplituda dosahuje lepší pevnosti i tažnosti než nižší amplituda. Je to dáno tím, že se díky přidavnému plnivu zvětšila tloušťka svařované oblasti a logicky se tím musela zvýšit i amplituda.

4.3 Úprava vzorku drážkou s přídavným plnivem – 3. měření

Cílem práce je pokusit se dosáhnout co nejlepších výsledků pro svařování tohoto vysoce plněného materiálu. Další možností, jak toho dosáhnout je vytvoření drážky do vzorku, která bude mít funkci zámku, do kterého zateče roztavený polymerní materiál. Drážku jsme vytvořili dvě, a to za pomoci frézy. Jelikož je ve svařovaném materiálu malé množství polymeru, který by do drážky zatekl, je potřeba stejně jako v minulém měření přidat akrylátové plnivo, které zvýší obsah polymerní části a zateče do zámků. Tentokrát bude mít přídavný materiál ideální šířku 10 mm. Vzorky mají opět podélnou orientaci vláken a bude se sledovat i vliv amplitudy a doby svaření.

Tabulka 7: Srovnávací tabulka pro nastavení jednotlivých parametrů. Drážka + plnivo.

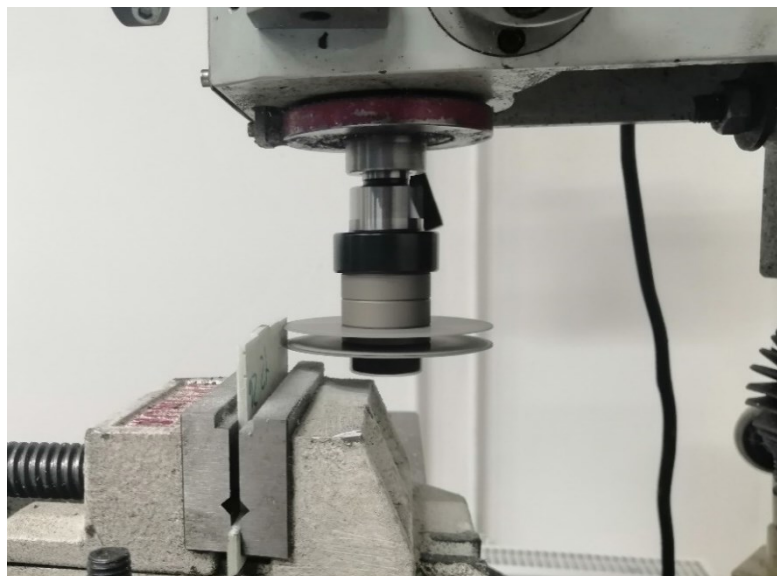
Měření	Amplituda	Svařovací čas [s]	Šířka příd. mat. [mm]
E 1	29,7 (75 %)	0,40	10
E 2	29,7	0,75	10
E 3	39,6 (100 %)	0,40	10
E 4	39,6	0,75	10

Tabulka 8: Průměrné výsledky tahových zkoušek z 3. měření

Zkouska	Napeti při nejv. síle (MPa)	Napeti při přetrhu (MPa)	Nejv. Pevn. (N)	Prodl. při nejv. Pevn. (mm)	Prodl. při přetrhu (mm)	Síla při přetrhu (N)	Tažnost při nejv. pevn. (%)	Tažnost při přetrhu (%)	Young modul (MPa)	Tažnost v mezi kluzu (%)
E1	0,76	0,43	226,89	1,50	3,02	128,71	4,29	8,64	115,56	1,60
E2	0,91	0,33	274,17	0,23	1,27	98,89	0,65	2,64	121,11	0,28
E3	0,86	0,49	257,05	0,19	0,75	146,36	0,55	2,14	243,77	0,42
E4	0,40	0,24	120,79	0,28	1,19	72,73	0,81	3,39	131,28	0,70

4.3.1 Dizkuze výsledků z 3. měření

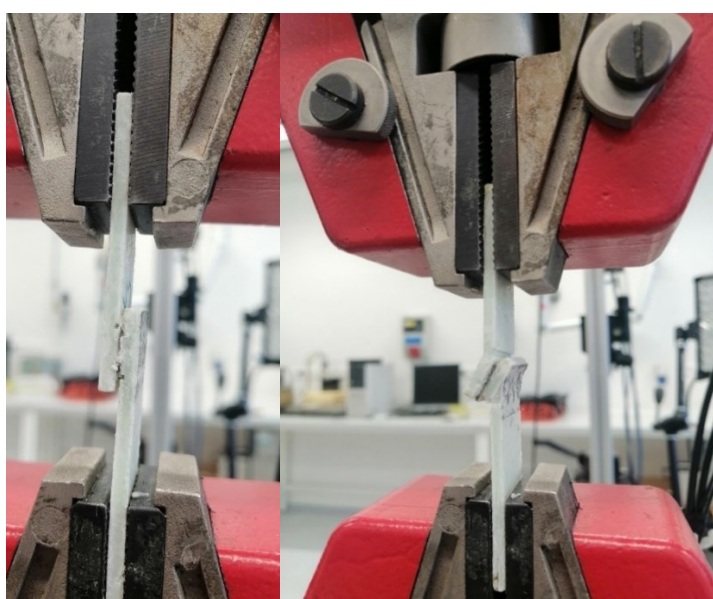
Toto měření bylo ukončeno vzhledem k předčasnému přetržení prvních vzorků při tahové zkoušce. Není problém svařit takový vzorek, ale při tahové zkoušce docházelo ke zlomení vzorku přesně v místě drážky viz. obr. č. 30. Bylo to způsobeno tím, že drážka byla nejspíš příliš hluboká a přes celou šířku vzorku.



Obrázek 27: Frézování drážky



Obrázek 28: Vzorek s dvěma drážkami a plnivem



Obrázek 29: Vlevo uchycení svařeného vzorku před tahovou zkouškou. Vpravo po tahové zkoušce.

4.4 Úprava vzorku pomocí laseru

Minulé měření mělo za cíl vytvoření drážky neboli zámku, do kterého by mohl zatéct roztavený polymer, či přídatné akrylátové plnivo. Avšak v místě, kde byla vytvořena drážka pomocí frézy docházelo k lomu vzorku. Nová drážka se tedy vyrobila s maximální přesností pomocí laseru v křížovém tvaru viz. obr. 31. Cílem tohoto měření je zjistit, jaký má vliv taková drážka na celkovou pevnost spoje.



Obrázek 30: Křížová drážka vyrobená pomocí laseru



Obrázek 31: Vzorek s drážkou a přídatným plnivem po přetržení.

Poslední možností pro srovnání je použití místo sklem vyztuženého akrylátu, pouze čistý akrylát, které není ničím již vyztužen. Jedná se o snahu zlepšit co nejvíc poměr polymeru vůči výztuži ve svařované oblasti. Pro každé nastavení F1 - F3 bylo opět použito 5 a více vzorků pro vyšší přesnost. Svařování probíhalo za nastavení při maximální amplitudě 100 % a době svaření 0,4 s. Orientace vláken byla opět podélná.

Tabulka 9: Srovnávací tabulka pro nastavení jednotlivých parametrů.

Měření	Drážka	Plnivo	Amplituda [100] / čas [s]
F1	ne	vyztužené	100 / 0,4
F2	ano	vyztužené	100 / 0,4
F3	ano	čistý	100 / 0,4

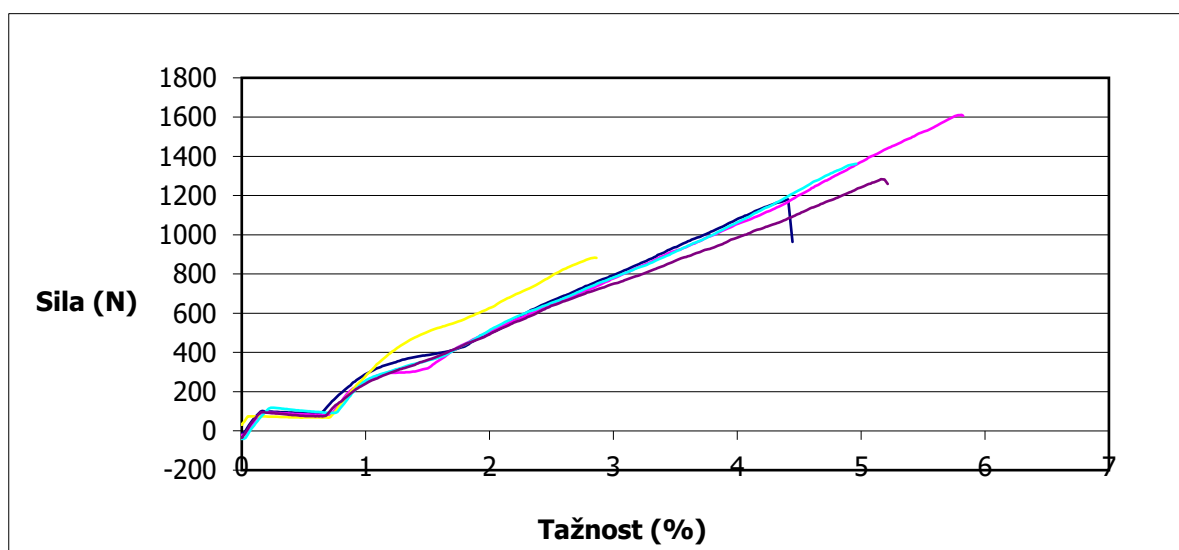
Tabulka 10: Průměrné výsledky tahových zkoušek z 4. měření

Zkouska	Napeti při nejv. síle (MPa)	Napeti při přetrhu (MPa)	Nejv. Pevn. (N)	Prodl. při nejv. Pevn. (mm)	Prodl. při přetrhu (mm)	Síla při přetrhu (N)	Tažnost při nejv. pevn. (%)	Tažnost při přetrhu (%)	Young modul (MPa)	Tažnost v mezi kluzu (%)
F1	4,21	4,05	1264,00	1,62	1,63	1214,62	4,64	4,66	127,02	4,62
F2	4,77	4,63	1429,55	1,23	1,26	1389,93	3,52	3,60	166,09	3,50
F3	8,16	8,10	2448,33	1,91	1,91	2428,47	5,45	5,47	253,99	5,42

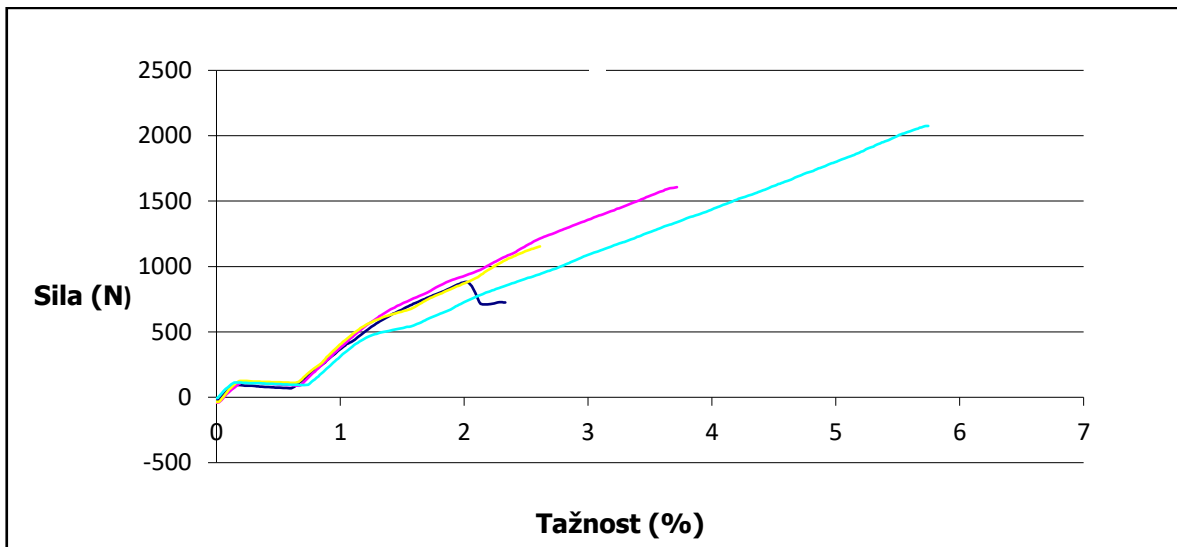
4.4.1 Diskuze výsledků ze 4. měření

Průměrně ze všech měření vyšly nejhůře vzorky, které neměli křížovou drážku a měli vyztužený přídavný materiál. O trochu lépe na tom byly dle očekávání vzorky s křížovou drážkou a vyztuženým akrylátovým plnivem. U obou skupin se pohybovala maximální tažnost okolo 6 % a síla při přetržení byla cca 1500 N maximální pak 2000 N. Což jsou podobné hodnoty, kterých se dosahovalo i bez použití drážky při předchozích měření. Ve srovnání vlivu drážky na průměrnou pevnost, má vzorek F2 (s drážkou) o 13% větší pevnost, než vzorek F1 (bez drážky). Lze tedy konstatovat, že pomocí drážky je možné dosáhnout vyšší pevnosti, avšak celkové výsledky vůči předchozím měření jsou srovnatelné.

Poslední měření F3 probíhalo opět za použití drážky, ale tentokrát s přídavkem čistého akrylátu. Tyto výsledky byly nakonec nejlepší, které se během celé práce podařilo získat. Tažnost dosahovala až 7 % a maximální síla při přetržení dokonce až za hranicí 3000 N. Veškeré dosažené pevnostní vlastnosti v tomto měření jsou shrnuty v tabulce 9. Grafické porovnání závislosti síly potřebné pro přetržení na tažnosti je vidět v grafech 7 - 9.



Graf 7: Závislost síly na tažnosti u vzorku F1. Vzorek bez drážky s přídavkem vyztuženého akrylátu



Graf 8: Závislost síly na tažnosti u vzorku F2. Vzorek s drážkou a s přídavkem vyztuženého akrylátu



Graf 9: Závislost síly na tažnosti u vzorku F3. Vzorek s drážkou a s čistým akrylátu

Největším faktorem pro dobré svaření vysoce plněného materiálu tedy hraje roli v nastavení ultrazvuku. Nejkratší doby svaření vždy vykazovaly nejlepší výsledky. Lepší pevnosti a hlavně tažnosti lze pak docílit, pokud se posílí polymerní část nějakým plnivem. Tloušťka materiálu a objem polymerní části je třeba zohlednit při nastavení amplitudy. Při větším objemu polymeru je pro lepší výsledek nutné nastavit vyšší hodnotu amplitudy. Pro lepší pevnost, se jako přídatný materiál velmi dobře osvědčil pouze čistý akrylát. U tohoto přídatného plniva hrála role toho, že se opravdu maximálně podílel na posílení polymerního poměru vůči skelným vláknům. Další zlepšení pevnosti nastává za použití drážky, či jiného povrchového zámku, do kterého roztavený polymer zatéká.

4.5 Vyhodnocení výzkumu

Cílem práce bylo najít nejlepší podmínky pro ultrazvukové svařování vysoce plněných polymerů tak, aby spoj dosahoval co nejvyšší pevnosti. Sekundárním cílem bylo také, aby nedocházelo vlivem svařování k velkým povrchovým vadám. Svařovaným materiálem byla dvousložková termoplastická pryskyřice s vysokým plněním skelnými vlákny. Při svařování těchto vzorků stejného materiálu a bez povrchové úpravy lze při správném nastavení dosáhnout maximální pevnosti až 2000 N a tažností okolo 1,3 %. Při tloušťce obou svařovaných částí 5 mm je ideální přitlačná síla 1000 N, amplituda 75% a svařovací čas 0,4 s. Při vyšší amplitudě a vyšším svařovacím čase nejenže klesá celková pevnost, ale také dochází k nežádoucím vadám na povrchu. Nutno podotknout, že při jiném nastavení amplitudy a času se průměrná pevnost pohybovala pouze okolo 1000 N.

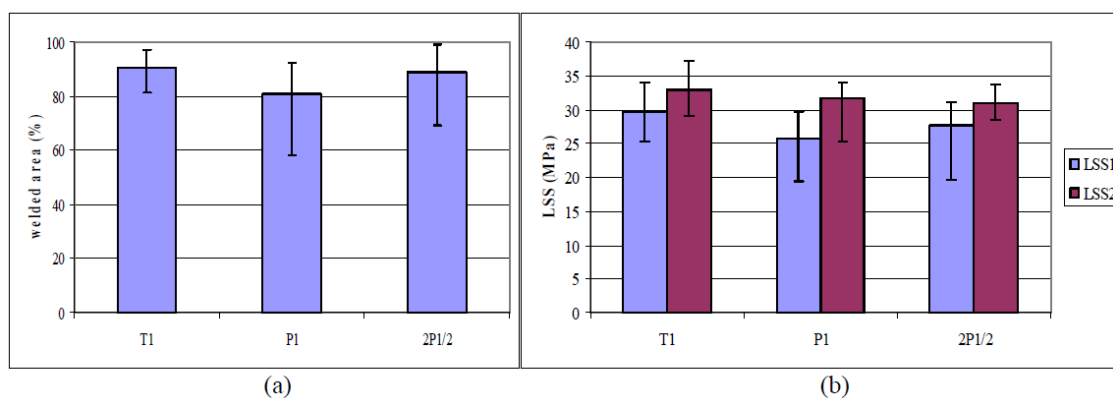
Lepší tažnosti a celkově i lepší pevnosti lze docílit, pokud posílíme polymerní složku přidáním vyztuženého akrylátového materiálu mezi svařované destičky obou vzorků. Tažnost se díky tomu zlepši až dvojnásobně na 2 - 4 % a celková průměrná pevnost u všech nastavení se pohybovala v rozmezí 1200 - 1500 N. To je určitý posun, ale i přesto nedokázaly maximální hodnoty pevnosti překročit hranici 2 000 N. Při tomto měření se však ukázalo, že pokud vzroste tloušťka svařovaného materiálu (přidáním akrylátu), tak je třeba pro lepší pevnost zvýšit amplitudu. Ovšem při zvýšení amplitudy už je třeba počítat s tím, že se objeví první povrchové vady. Velikost šířky přídavného plniva neměla na pevnost spoje žádný velký vliv. Navíc při použití přídavného materiálu o stejné šířce jako byla šířka vzorku docházelo při svařování k vytlačování přebytečného materiálu ze stran, což vedlo k nepěknému vzhledu.

Pro dosažení, co nejlepších výsledků byla tedy navržena drážka, pomocí laseru, do které by měl roztavený polymer zatéct jako zámek a tím zvýšit celkovou pevnost. Měření pevnosti s drážkou ukázalo, že se pevnost zvýší o cca 13%. Nejlepší maximální pevnosti bylo dosaženo okolo 2000 N. Nutno však podotknout, že se výrazně zlepšila maximální tažnost na rozmezí mezi 4 - 6 %. Posledním pokusem bylo přidání čistého akrylátového polymeru, který neměl žádné další příměsi, vyztužení apod. Tento přídavný materiál měl pouze funkci zvýšení poměru akrylátu vůči skelné výztuži. Ukázalo se však, že při správném nastavení ultrazvuku je toto cesta, která vede spolu se zabudovanou drážkou k nejvyšší pevnosti. Při nastavení maximální amplitudy, svařovacího času 0,4 s a přitlačné síly 1000 N lze dosáhnout maximální pevnosti až 3 000 N a tažnosti 7 %.

5 NÁVRH METODIKY PRO DALŠÍ MĚŘENÍ

Výzkum diplomové práce stanovil nejvhodnější procesní podmínky pro svařování akrylátové pryskyřice vysoce plněnou skelným vláknem. V dalších krocích byla i snaha o dosažení co nejvyšší pevnosti pomocí zakomponování přídatného akrylátového materiálu a vytvoření drážky. Jako další návrh pro zlepšení celkové pevnosti spoje by mohlo být zakomponování energetického usměrňovače v podobě návarové hrany. Touto možností se již v nedávné minulosti zabývalo několik prací. Bylo poskytnuto poměrně velké množství experimentálních studií, které ultrazvukové svařování zkoumali na různých materiálech.

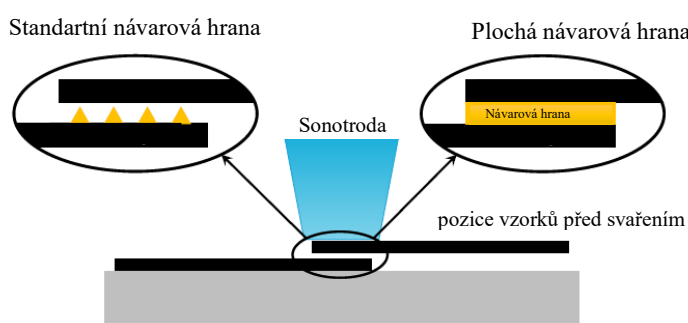
Například článek od I. Fernandez představuje experimentální studii o vlivu několika konfigurací návarové hrany a jejich vliv na kvalitu na mechanickou pevnost svaru. Studie se zabývala účinkem samotné návarové hrany, ale také účinkem vícečetné návarové hrany. Ultrazvukové svařování bylo prováděno na kompozitním materiálu složeného z polyetherimidu vyztuženého uhlíkovými vlákny. Tento materiál měl vysoký obsah plnění vlákny. Zastoupení polyetherimidu zde bylo 42,4 % hmot. Byly testovány tři typy návarové hrany a pro výrobu takových vzorků byla připravena speciální forma pro lis. Vzorek T1 je pro příčnou návarovou hranu. P1 je podélná návarová hrana a 2P1/2 jsou dvě podélné návarové hrany, které jsou o polovinu menší než P1. Celkové výsledky jsou srovnány v grafu 10. [48]



Graf 10: Výsledky testu srovnání různých typů návarové hrany [48]

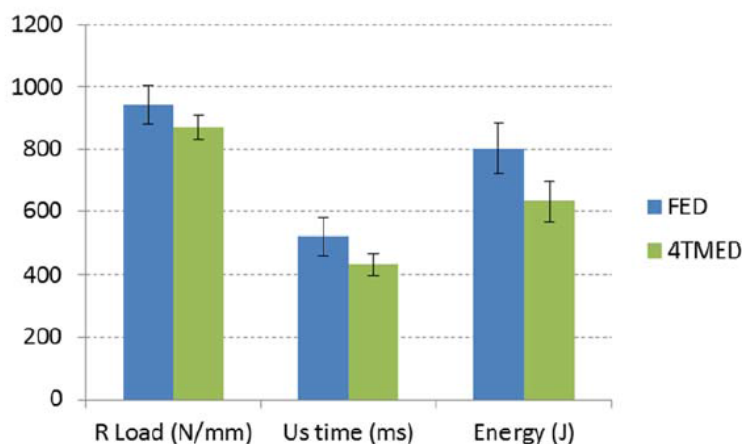
Graf 10a srovnává pouze míru zaplnění svařované oblasti roztavené návarové hrany. Graf 10b srovnává vypočítanou pevnost pouze ve svařovaném spoji (LSS1) a pak také pevnost celé svařené jednotky (LSS2). Z výsledků je patrné, že pokud se používá návarová hrana, je nejlepší použít příčnou návarovou hranu.

Srovnatelný výzkum prováděli např. Benatar a Gutowski, kteří zkoumali mimo jiné ultrazvukové svařování s pokročilými termoplastickými kompozity vyztuženými vlákny. Tento výzkum rovněž srovnával různé procesní nastavení a především vliv tvaru návarové hrany u PEEK (polyether ether keton) s uhlíkovými vlákny. Schéma typu jejich návarové hrany je zobrazeno na obrázku 32. Autoři porovnávali klasickou vícečetnou trojúhelníkovou návarovou hranu (vlevo) spolu s plochou návarovou hranou (vpravo), která byla v podstatě použita i v této diplomové práci v kapitole 4.2 Měření s přídavným materiálem. [31, 35]



Obrázek 32: Schéma použití dvou typů návarové hrany [35]

Výsledky jejich zjištění vedli k tomu, že větší pevností dosahovali u ploché návarové hrany, než už u klasické trojúhelníkové. Problém však nastal při větší přítláčné síle a době svaření. Stejně jako v naší práci i tady vedla plochá návarová hrana k vytékání přebytečného materiálu ven mimo svařovanou oblast, což vedlo k nevzhlednému stavu. Srovnané pevnosti jsou uvedeny v grafu 11.



Graf 11: Srovnání vlastností ploché návarové hrany a čtyř-trojúhelníkové návarové hrany. [35]

V grafu 11 je modře znázorněna plochá návarová hrana a zeleně trojúhelníková návarová hrana. První sloupec porovnává maximální provozní zatížení, nebo též napětí při přetržení. Ve druhém sloupci je zobrazen ideální svařovací čas. Třetí sloupec porovnává velikost dodané energie do systému. Tato studie navíc prokázala, že ideální svařovací čas pro kompozity vyztuženými vlákny je 0,4 - 0,5 s. Čili stejné čas, jaký měly i nejlepší výsledky měření v této práci. [35]

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá problematikou ultrazvukového svařování vysoce plněných materiálů. V teoretické části jsou shrnuty poznatky o vyztužujících plnivech, samotný proces svařování ultrazvukem, popis ultrazvukové svářečky i typy spojů pro ultrazvukové svařování.

Praktická část se snaží zaměřit na optimalizaci procesních podmínek ultrazvukového svařování s následným testováním mechanické pevnosti svařeného spoje s cílem dosáhnout co největší pevnosti spoje bez povrchových vad. Jako svařovaný materiál byla vybrána dvousložková termoplastická pryskyřice s vysokým plněním skelnými vlákny. I takový materiál, který je vysoce plněný skelnými vlákny, lze úspěšně svařovat. Je však nutné počítat s tím, že pevnost spoje nebude příliš vysoká. Pevnost materiálu je sice dána především pevností skelných vláken, ale pro pevnost svařeného spoje je důležité dobré promísení roztaveného polymeru, který je však v tomto v případě v malém poměru. Pro svařování je proto důležité zvolit správné procesní podmínky. Při zkoumání vlivu svařovaného času bylo zjištěno, že čím nižší čas, tím lepší pevnosti i tažnosti lze dosáhnout. Ideální je potom svařovací čas 0,4 s. Velikost amplitudy je potřeba volit dle tloušťky vzorku. Při tloušťce do 5 mm je ideální amplituda 29,7 (75%), při navýšení tloušťky je, ale třeba pro vyšší pevnost zvolit vyšší amplitudu. Obecně lze ale říci, že čím vyšší amplituda, tím lepší pevnost. Čím vyšší je však amplituda a čas svaření, tím větší jsou vidět i povrchové vady na vzorcích.

Pokud se svařují tyto vzorky bez jakékoli úpravy, lze dosahovat maximální pevnosti 1500 - 2000 N a tažnosti 1,3 %. Pro zlepšení maximální pevnosti a tažnosti je nezbytné zvýšit poměr polymeru vůči vláknité výztuži ve svařované oblasti. Toho lze docílit přidáním akrylátu mezi obě svařované části. Lepších výsledků dosáhl přídavný akrylátový materiál, který byl čistý a bez výztuže, oproti vyztuženému přídavnému materiálu. V neposlední řadě pro zvýšení pevnosti hraje důležitou roli zabudovaná drážka, do které roztavený polymer zatéká jako do zámku. Celková pevnost se srážkou zvýšila o cca 13%. Při použití drážky spolu s čistým akrylátem, jako polymeru bez přídavných plniv, výztuh apod., bylo dosaženo maximální hodnoty pevnosti okolo 3 000 N a tažnosti až 7% aniž by došlo k výrazným povrchovým vadám.

V průběhu experimentu byly objeveny další možnosti, které by mohly zvýšit pevnost spoje a daly by se využít jako předmět dalšího zkoumání. Mezi tyto možnosti lze zařadit využití návarové hrany. Mezi další teoretické možnosti, jak dosáhnout zvýšení pevnosti, je využití

návarové hrany. Návarové hrany jsou ideálním řešením pro zlepšení pevnosti u svařování neplněných polymerů. Tato hrana se celá roztaví a funguje jako pojivo mezi oběma svařovanými částmi. Otázkou, však zůstává, zda by byla funkční i v případě, kdy je tvořena z větší části skelnými vlákny než polymerem. Za zmínku také stojí možnost využití metody nýtování, neboli využití ultrazvuku k zapouzdření pinu, který by držel oba díly pohromadě, jak se toho využívá při svařování dvou nehomogenních materiálů se špatnou adhezí.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ČECH, V., Povrchové úpravy vláken pro polymerní kompozity, VUT v Brně, Ústav chemie materiálů - Technika, technologie - vydání 26/2006
- [2] DWIGHT, D. W., Comprehensives Composite Materials, Amsterdam: Elsevier, 2000, ISBN 0-080437192.
- [3] LIBRA, M., Sledování vlastností nanokompozitů na bázi epoxidových pryskyřic. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011.
- [4] EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály, 1. vyd. Praha, Scientia 2009. ISBN 978-80-86960-29-6
- [5] WYPYCH G., Handbook of Fillers, 3. vyd., ChemTec Publishing, 2010, 840 s., ISBN 978-1-895198-41-6.
- [6] KRATOCHVÍL, B. ŠVORČÍK, V. VOJTĚCH, D. Úvod do studia materiálů. 1. vyd. Praha : Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. 190 s. ISBN 80-7080-568-4.
- [7] HARPER, CH. A., Handbook of Plastics, Elastomers, and Composites. 4. vyd. New York, 2002. ISBN: 978-00-71384-76-6
- [8] JANCÁR, J., Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitu, Fakulta chemická VUT Brno, 2003, 1. vyd. ISBN 80-214-2443-5
- [9] ČECH, V., Řízená mezifáze v dlouhovláknových polymerních kompozitech. Proceedins of XXth International Conference on Reinforced P. Karlovy Vary: Dům techniky Plzeň
- [10] MONTES-HERNANDEZ G., FERNÁNDEZ-MARTÍNEZ A., CHARLET L., TISSERAND D., RENARD F., Textural properties of synthetic nano-calcite produced by hydrothermal, Oslo, Elsevier 2008
- [11] LOUDA P., Studium vlivu granulometrie jemných částic na fyzikálně-mechanické vlastnosti betonů, VUT Brno, Brno 2019
- [12] TĚHNÍK, V., NEČAS, R., Uplatnění vápencové suroviny z hlediska kvality v různých průmyslových odvětvích. Výzkumný ústav stavebních hmot, a. s. 2011
- [13] DUCHÁČEK V., HRDLIČKA Z., Gumárenské suroviny a jejich zpracování, VŠCHT Praha, Praha 2009, 200 s., ISBN 978-80-7080-713-2.

- [14] HOLUB K., Úpravnické technologie používané při těžbě a zpracování kaolinu, VŠB - Technická univerzita Ostrava, bakalářská práce, Most 2013
- [15] KIM, J.K., MAI, Y.W., Engineered Interfaces in Fibre Reinforced Composites, Amsterdam, Elsevier, 1998
- [16] ŠUBA, O., Dimenzování a navrhování výrobků z plastů. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2005
- [17] Česká společnost pro větrnou energii, Materiály pro laminování rotorových listů [online] Dostupné z: <https://csve.cz/en/clanky/materialy-pro-laminovani-rotorovych-listu/316>
- [18] BÁBÍK, A., JANEČEK, P., LASOTA, T., BURŠA, J., ČECH, V., Vliv povrchových úprav na mechanickou odezvu dlouhými vlákny vyztuženého polymerního kompozitu. Polymerní kompozity 2010. ISBN 978-80-7043-872-5
- [19] VACL, J., Polymerní vlákna, jejich aplikace, výroba a vlastnosti, UTB Zlín 2012
- [20] CHUAH, K., et al., Effects of the shape of the energy director on far-field ultrasonic welding of thermoplastics. Polymer Engineering & Science, 2000. ISSN 0032-3888.
- [21] AMANAT, N., JAMES N., MCKENZIE, D., Welding methods for joining thermoplastic polymers for the hermetic enclosure of medical devices. Medical Engineering & Physics, 2010. ISSN 13504533
- [22] VURAL, M., Welding Processes and Technologies. Comprehensive Materials Processing, Elsevier, 2014. ISBN 9780080965338.
- [23] AHMED, N., New developments in advanced welding. Cambridge, Woodhead Pub. 2005. ISBN 978-1-85573-970-3.
- [24] LEONG, K., F., BHUDOLIA, S., at al., Investigation on Ultrasonic Welding Attributes of Novel Carbon/Elium Composites, Nanyang Technological University, Singapur 2020
- [25] BECKER, U., Svařování plastických materiálů ultrazvukem: přel. z něm. orig. Praha: UVTEI, 1969.
- [26] ŠVEHLA, Š., FIGURA, Z., Ultrazvuk v technologii. Bratislava: Alfa, 1984
- [27] LENFELD, P., Technologie vstřikování [online]. © Code Creator, 2016. ISBN 978-80-88058-74-8. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/Impresum.html>
- [28] LENFELD, P., Technologie zpracování plastů [online] Technická univerzita Liberec, 2016. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/index.ht

- [29] GURIT HOLDING AG., Guide to Composites. 2004. Dostupné z: http://www.gurit.com/files/documents/Gurit_Guide_to_Composites.pdf
- [30] TROUGHTON M., Ultrasonic Welding, Handbook of Plastics Joining, Elsevier 2009. ISBN 9780815515814
- [31] BENATAR, A., Ultrasonic welding of plastics and polymeric composites. Power Ultrasonics, 2015. doi:10.1016/b978-1-78242-028-6.00012-0
- [32] HERRMANN ULTRASONICS, Ultrasonic Welding Technology – Basics of Plastics, 2014 [online] Dostupné z: <https://www.herrmannultrasonics.com/en-us/ultrasonic-welding-basics/ultrasonic-welding-of-plastics/>
- [33] Prefa kompozity [online]. Dostupné z: <https://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby/smc/>
- [34] Indiamart [online]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/glass-fiber-chopped-rovings-16279441173.html>
- [35] BENATAR A., GUTOWSKI T.G., Ultrasonic welding of PEEK graphite APC-2 composites”, Polymer Engineering and Science, 2016
- [36] Craftech [online]. Dostupné z: <https://www.craftechind.com/a-special-highlight-on-basalt-and-aramid-fiber-reinforced-plastic/>
- [37] Ultratech, Ultrasonic technology [online]. Dostupné z: <http://ultratech.cz/ultra-zvukove-svarovani/>
- [38] Intechopen, Importance and Applications of Ultrasonic Technology [online]. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/food-processing/importance-and-applications-of-ultrasonic-technology-to-improve-food-quality>
- [39] Paroc [online]. Dostupné z: <https://www.paroc.cz/knowhow/zvuk/obecne-informace-o-zvuku>
- [40] Plastum [online]. Dostupné z: <https://plastum.cz/lepeni/>
- [41] Stelray [online]. Dostupné z: <https://www.stelray.com/ultrasonic-welding-of-plastic-parts-design-considerations/>
- [45] <http://www.kormax.co.kr/en/evolution-of-ultrasonic-welding/process-principle-of-ultrasonic-welding/?ckattempt=1>
- [46] <https://plasticsdecorating.com/articles/2018/utilizing-dynamic-hold-capability-of-servo-driven-ultrasonic-welders/>
- [47] <https://publi.cz/books/183/13.html>

[48] I. FERNANDEZ, STAVROV, D., Ultrasonic welding of advanced thermoplastic composites: an investigation on energy directing surfaces, Design and Production of Composite Structures, Delft University of Technology. Delft 2010

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Skelná vlákna ve formě rovingu [34].....	16
Obrázek 2: Kevlarová tkanina [36].....	19
Obrázek 4: Profil vyrobený pŮltruží [33]	21
Obrázek 5: Frekvence zvuku [38].....	25
Obrázek 6: Zařzení pro pŮtlačné svařování plastů ultrazvukem [47]	26
Obrázek 7: Ukázka různých tvarů a druhů sonotrod [37].....	27
Obrázek 8: Cyklus ultrazvukového svařování [46]	28
Obrázek 9: Ultrazvukové svařování, mísení taveniny. [45]	29
Obrázek 10: Amplituda a frekvence kmitu [39]	31
Obrázek 11: Základní způsoby spojů bez použití návarové hrany [40]	32
Obrázek 12: Základní schéma použití návarové hrany [47]	33
Obrázek 13: Průběžná návarová hrana [41].....	34
Obrázek 14: Stupňovitá návarová hrana [32]	34
Obrázek 15: Step joint v praxi. Před a po svařování [32].....	35
Obrázek 16: Konstrukce spojení typu pero-drážka [32].....	35
Obrázek 17: Tongue and groove joint v praxi. Před a po svařování [32].....	36
Obrázek 18: Konstrukce střižného spoje [32].....	36
Obrázek 19: Konstrukce spoje pro tenkostěnnou návarovou hranu [32].....	37
Obrázek 20: Double V joint v praxi. Před a po svařování. [32]	37
Obrázek 21: Schéma vzorku před svařováním. Přeplátovaný spoj.	40
Obrázek 22: Vzorek z měření B1.	43
Obrázek 23: Vzorek z měření B9 po svařování (nízká ampl. krátký čas).	44
Obrázek 24: Vzorek B9 po přetržení.	44
Obrázek 25: Uchycení vzorku mezi čelisti při tahové zkoušce.	46
Obrázek 26: Předchystaný vyztužený akrylátový materiál ve dvou velikostech.....	48
Obrázek 27: Přeplátovaný vzorek s přidáním materiálem před a po svařování	48
Obrázek 28: Frézování drážky	51
Obrázek 29: Vzorek s dvěma drážkami a plnivem	51
Obrázek 30: Vlevo uchycení svařovaného vzorku před tahovou zkouškou. Vpravo po tahové zkoušce.....	51
Obrázek 31: Křížová drážka vyrobená pomocí laseru.....	52
Obrázek 32: Vzorek s drážkou a přidávaným plnivem po přetržení.	52
Obrázek 32: Schéma použití dvou typů návarové hrany	57

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Složení a vlastnosti skleněných vláken	17
Tabulka 2: Nastavení amplitudy a svařovacího času pro ultrazvuk	41
Tabulka 3: Průměrné výsledky jednotlivých měření pro podélný směr	42
Tabulka 4: Průměrné výsledky jednotlivých měření pro příčný směr	42
Tabulka 5: Srovnávací tabulka pro nastavení jednotlivých parametrů k 2. měření.....	47
Tabulka 6: Průměrné výsledky jednotlivých měření	47
Tabulka 7: Srovnávací tabulka pro nastavení jednotlivých parametrů	50
Tabulka 8: Průměrné výsledky tahových zkoušek z 3. měření.....	50
Tabulka 9: Srovnávací tabulka pro nastavení jednotlivých parametrů	52
Tabulka 10: Průměrné výsledky tahových zkoušek z 4. měření.....	53

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Průměrné srovnání nejvyšší dosažené pevnosti pro jednotlivá měření	43
Graf 2: Závislost síly na tažnosti u vzorku A5	45
Graf 3: Závislost síly na tažnosti u vzorku A6	45
Graf 4: Průměrné srovnání nejvyšší dosažené pevnosti pro jednotlivá měření	47
Graf 5: Závislost síly na tažnosti u vzorku C2.....	49
Graf 6: Závislost síly na tažnosti u vzorku D2	49
Graf 7: Závislost síly na tažnosti u vzorku F1	53
Graf 8: Závislost síly na tažnosti u vzorku F2.	54
Graf 9: Závislost síly na tažnosti u vzorku F3	54
Graf 10: Výsledky testu srovnání různých typů návarové hrany.....	56
Graf 11: Srovnání vlastností ploché a čtyř-trojúhelníkové návarové hrany	57