

Návrh přípravku pro technologii svařování ultrazvukem

Bc. Martin Laga

Diplomová práce
2017



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin Laga**
Osobní číslo: **T15337**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Návrh přípravku pro technologii svařování ultrazvukem**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracování literární studie na dané téma**
- 2. Návrh konstrukčních řešení vhodných variant řešení**
- 3. Realizace a testování zvolené varianty**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucí práce

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Libuše Sýkorová, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

2. ledna 2017

Termín odevzdání diplomové práce:

12. května 2017

Ve Zlíně dne 26. ledna 2017



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



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

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně

.....

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá problematikou ultrazvuku a ultrazvukového svařování polymerních materiálů. V teoretické části popisuje fyzikální principy ultrazvuku, jeho základní parametry a způsoby tvorby ultrazvukových vln. Praktická část je poté zaměřena na návrh a konstrukci přípravku dle požadavků firmy Plastika a.s. Kroměříž, umožňujícího ultrazvukové svařování polymerních výrobků.

Klíčová slova: Ultrazvuk, ultrazvukové svařování polymerů, svařovací přípravek

ABSTRACT

This thesis deals with ultrasound and ultrasonic welding of polymeric materials. In the theoretical part describes the physical principles of ultrasound, the basic parameters and methods for generating ultrasonic waves. The practical part is then focused on the design and construction of the jig as required by the company Plastika Inc. Kroměříž, allowing him ultrasonic welding of polymer products.

Keywords: Ultrasound, ultrasonic welding of polymers, welding preparation

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce paní doc. Ing. Libuši Sýkorové, Ph.D. a panu Ing. Františku Volkovi, CSc. za jejich ochotu a trpělivost při zpracovávání této diplomové práce. Rád bych také poděkoval Firmě Plastica a.s. za možnost použití jejich zařízení. Děkuji také panu Františku Káňovi, za spolupráci při výrobě a montáži přípravku.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 PROGRESIVNÍ TECHNOLOGIE	12
1.1 KLASIFIKACE NEKONVENČNÍCH TECHNOLOGIÍ DLE HLAVNÍHO ZDROJE ENERGIE OBRÁBĚNÍ	12
1.2 MECHANICKÉ PROCESY	13
1.2.1 Obrábění vodním paprskem (WJM, AWJM).....	13
1.2.2 Obrábění abrazivním paprskem (AJM, AFM)	13
1.2.3 Obrábění ultrazvukem (USM).....	13
2 ULTRAZVUK	15
2.1 FYZIKÁLNÍ PRINCIP	15
2.1.1 Vznik ultrazvukových vln	15
2.1.2 Tvary a druhy akustických vln	17
2.1.2.1 Tvary vln.....	17
2.1.2.2 Druhy vln	18
2.2 MECHANICKÉ VLNĚNÍ	18
2.2.1 Vlnová délka	19
2.2.2 Rychlost ultrazvuku	19
2.3 JEVY SPOJENÉ S APLIKACÍ ULTRAZVUKU	20
2.3.1 Piezoelektrický jev	20
2.3.2 Dopplerův jev.....	21
2.3.3 Ultrazvuková kavitace.....	22
3 ULTRAZVUKOVÉ SVAŘOVÁNÍ	23
3.1 HISTORIE ULTRAZVUKOVÉHO SVAŘOVÁNÍ	24
3.2 MECHANISMUS VZNIKU SVAROVÉHO SPOJE.....	25
3.3 TVORBA SVAROVÉHO SPOJE	25
3.4 TEPelné PROCESY PŘI SVAŘOVÁNÍ ULTRAZVUKEM.....	26
3.5 SVAŘOVÁNÍ PLASTŮ	26
3.6 VÝHODY A NEVÝHODY ULTRAZVUKOVÉHO SVAŘOVÁNÍ	29
4 ULTRAZVUKOVÁ SVÁŘEČKA	31
4.1 GENERÁTOR	33
4.2 KONVERTOR (PŘEVODNÍK).....	33
4.3 SONOTRODY	34
4.4 KONSTRUKCE SVAŘOVACÍCH PLOCH	34
II PRAKTICKÁ ČÁST	38
5 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE	39
6 NÁVRH PŘÍPRAVKU	40
6.1 NÁVRH VARIANT A VÝBĚR OPTIMÁLNÍ VARIANTY	40
6.1.1 varianta A	40
6.1.2 varianta B	41
6.1.3 Varianta C	42
6.1.4 Výběr optimální varianty	44
7 KONSTRUKCE PŘÍPRAVKU	45
7.1 PRVKY SVAŘOVACÍHO PŘÍPRAVKU	45
7.1.1 Stojan.....	45
7.1.2 Skříň	46

7.1.3	Bočnice.....	47
7.1.4	Objímka.....	48
7.1.5	Ovládací čep.....	48
7.1.6	Rohatka se západkou.....	48
7.1.7	Kolejnice.....	49
7.1.8	Hřídel.....	49
7.1.9	Ozubené kolo a hřeben.....	50
7.1.10	Momentový klíč.....	50
7.2	PŘEPOČET NASTAVENÉHO KROUTICÍHO MOMENTU NA PŘÍTLAČNOU SÍLU.....	51
7.2.1	Stanovení koeficientu „k“.....	51
7.3	ZÁKLADNÍ PARAMETRY.....	53
7.4	MONTÁŽ PŘÍPRAVKU.....	54
7.5	TESTOVÁNÍ FUNKČNOSTI PŘÍPRAVKU.....	57
7.6	VÝSLEDKY TESTOVÁNÍ.....	59
	ZÁVĚR.....	60
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	61
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	63
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	64
	SEZNAM TABULEK.....	66
	SEZNAM PŘÍLOH.....	67

ÚVOD

Cílem této práce je navrhnout prototyp přípravku podle parametrů zadaných firmou Plastika a.s., jenž by usnadňoval práci s ruční svařovací sonotrodou a zároveň umožňoval zpřesnění vstupních parametrů jako je velikost a doba přitlaku. Pro firmu Plastika a.s. bylo důležité, aby byl přípravek konstrukčně jednoduchý, a aby měl nastavitelnou přitlačnou sílu.

První část práce je zaměřena na problematiku nekonvenčních technologií a jejich základní rozdělení, dále pak na technologie ultrazvuku a jejich fyzikální principy.

Další část práce se věnuje popisu navržených variant a jejich výhod, výběru vhodné varianty a také detailnímu popisu konstrukce zvolené varianty.

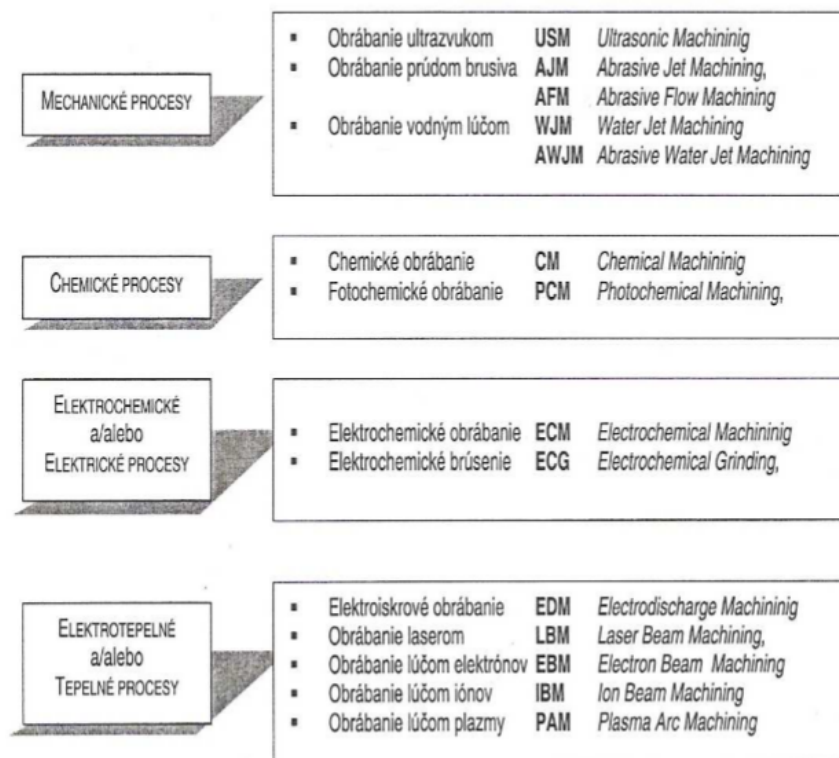
Poslední část práce se zabývá montáží zvolené varianty, experimentálním svaření zkušebních vzorků a nakonec hodnocením kvality svaření vzorků.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 PROGRESIVNÍ TECHNOLOGIE

Progresivní technologie jsou také někdy nazývány jako nekonvenční technologie obrábění. Využívají se v případech, kdy by byl materiál běžnými způsoby obrábění neobrobitelný (např. monolitické a kompozitní materiály). Tyto technologie můžeme s úspěchem použít v případech, kdy by mohly vzniknout těžkosti při obrábění způsobené tvrdostí, křehkostí, žáruvzdorností, chemickou reaktivitou s řezným nástrojem, nehomogenní mikrostrukturou.

1.1 Klasifikace nekonvenčních technologií dle hlavního zdroje energie obrábění



Obr. 1 Klasifikace nekonvenčních technologií [1]

1.2 Mechanické procesy

Mezi základní mechanické procesy patří:

1.2.1 Obrábění vodním paprskem (WJM, AWJM)

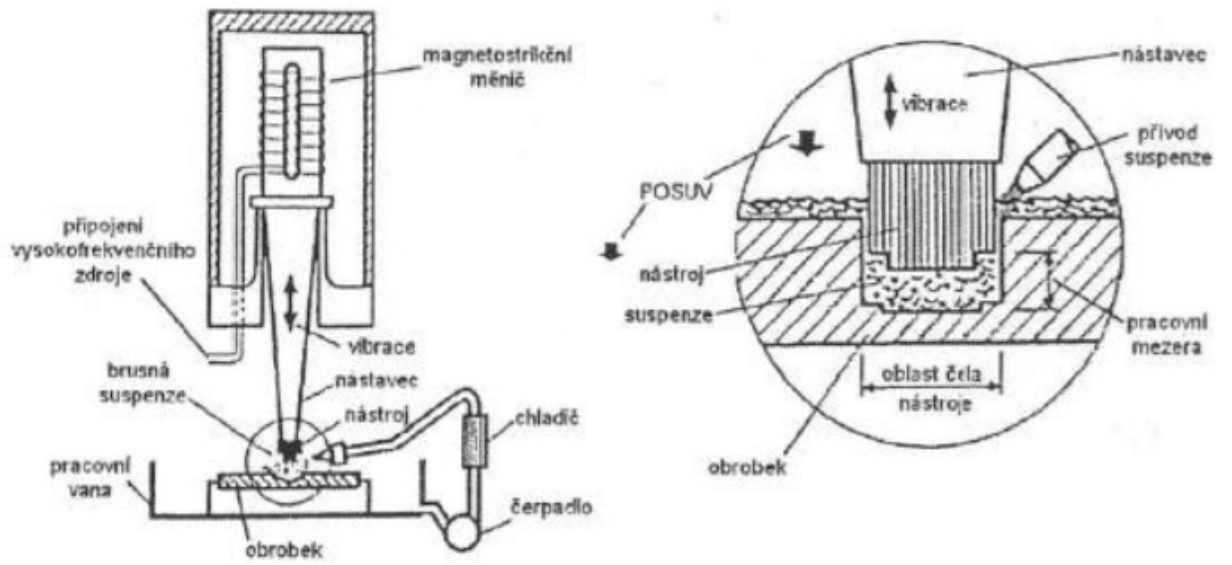
Podstatou dělení materiálů je obrušování děleného materiálu tlakem vodního paprsku. Tento proces je v podstatě stejný jako vodní eroze ale značně zrychlený a soustředěný do jednoho místa. Řezání probíhá nejčastěji na CNC řízených stolech. Pracovní tlak vody se pohybuje v rozmezí 2000 - 6200 Bar. Tlakovým zdrojem jsou speciální vysokotlaká čerpadla, která se liší příkonem a průtokem vody. Paprsek vzniká v řezací hlavě zakončené řezací tryskou. Při zpracování měkkých materiálů se používá čistý vodní paprsek, pro ostatní případy je třeba použít abrazivní paprsek. Pohyb řezací hlavy a tedy i dráha řezu je řízena počítačem na základě předem sestaveného programu. Je možné tedy provést i ten tvarově nejnáročnější řez během jedné operace.

1.2.2 Obrábění abrazivním paprskem (AJM, AFM)

Technologie je založena na abrazivních účincích brusiva, které je unášeno vysokou rychlostí pomocí proudu vzduchu. Při dopadu částic na povrch součásti dochází k vylamování materiálu. Jako brusiva se využívá oxid hlinitý nebo karbid křemíku. Vzhledem k velmi malému úběru materiálu a k dobré jakosti povrchu je využívána spíše jako dokončovací metoda.

1.2.3 Obrábění ultrazvukem (USM)

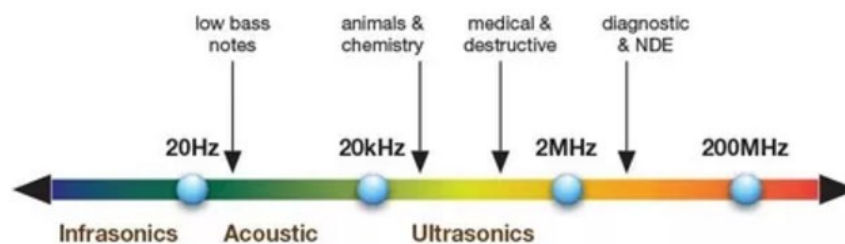
Ultrazvuk by se dal popsat jako akustické vlnění nad s frekvencí nad hladinou slyšitelnosti lidského sluchu. Nástroj kmitá vlivem ultrazvukových vln frekvencí okolo 20 – 30 kHz. Mezi nástroj a obrobek jsou přiváděna brusná zrna, která vylamují mikročástice obráběného materiálu, ale také nástroje. Brusná zrna jsou rozptýlena ve vodě, která je odplavuje z obráběné oblasti a zároveň odplavuje odebraný materiál. Navíc proudící voda spolu s kmitáním nástroje způsobuje kavitaci, což ještě zvyšuje účinnost obrábění. Vytvořený otvor má tvar čela nástroje. Na čele nástroje je úběr minimální, i proto je rozměr otvoru zpravidla větší než nástroj o střední velikost zrn brusiva.



Obr. 2 - Ultrazvukové obrábění

2 ULTRAZVUK

Ultrazvuk, tedy vlny kmitající na frekvencích vyšších než je maximální kmitočet slyšitelný lidským uchem, se v praxi využívá v celé řadě zařízení. Podle používaných výkonů lze aplikace rozdělit do dvou skupin. Ultrazvukové vlny nízkých výkonů se používají například v medicíně při zobrazování, diagnostice a terapii, v technických aplikacích pak pro přenos signálů nebo v nedestrukční defektoskopii. V těchto případech se vždy využívá pouze malá energie, která nezpůsobuje změny ozařovaných materiálů.



Obr. 3 - Rozdělení zvukového spektra

Druhá oblast - vysoké výkony - se používají pro čištění, obrábění, formování, letování, stříhání, svařování, šití. Oproti aplikacím v předchozích případech zde působení energie má za cíl vyvolat změny materiálů. Používají se frekvence na spodní hranici ultrazvukového spektra, tj. v oblasti 20 - 100 kHz. Důvodem pro to je skutečnost, že jsou do pohybu uváděny mechanické díly, což lze realizovat tím snadněji, čím nižší je frekvence jejich pohybu. Aby byla účinnost co nejvyšší, volí se co možná největší amplitudy. Nejčastěji se používá rozpětí 5 - 50 mikrometrů. To se na první pohled nezdá mnoho, nicméně je třeba si uvědomit, že mechanická součást kmitá frekvencí 20 kHz, tedy dvacet tisíckrát za sekundu. Standardní systémy pak používají výkony od stovek do několika tisíc wattů.

Z hlediska svařovaných materiálů lze použití rozdělit na svařování kovů (bodové svary barevných kovů) a na svařování plastů. Tato práce se zabývá principy a technologiemi pro svařování plastů.

2.1 Fyzikální princip

2.1.1 Vznik ultrazvukových vln

Částice, jenž jsou vystavené ultrazvukovému poli konají kmitavý periodický pohyb, způsobený zdrojem energie (ultrazvukovým zářičem). Každá částice je přímo ovlivňována

pohybem sousedních částic, což se ve výsledku projevuje jako vlnový pohyb všech částic. Můžeme tedy uvažovat, že ultrazvukové vlny jsou tvořeny nekonečným množstvím hmotných oscilujících částic, které dohromady vytváří jakousi elastickou pružinu. Jestliže se kmitavý pohyb opakuje s periodou T a nepřesahuje konečnou vzdálenost os své klidové polohy, pak tento pohyb označujeme jako harmonický či periodický.

Převrácenou hodnotu periody T , nazýváme frekvencí f , výpočet dle vztahu (2.1).

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.1)$$

kde: f [Hz] – frekvence,

T [s] – perioda.

V průběhu jednoho kmitu vlnění překoná vzdálenost nazývanou vlnová délka λ , výpočet dle vztahu (2.2).

$$\lambda = \frac{c}{f} = c \cdot T \quad (2.2)$$

kde: λ [m] – vlnová délka,

c [m.s-1] – rychlost šíření vlnění v prostředí,

f [Hz] – frekvence,

T [s] – perioda.

Ve vzduchu se, při běžných podmínkách rychlost šíření vlnění vypočítá dle vztahu (2.3).

$$c = 331,8 + 0,6 \cdot T \quad (2.3)$$

kde: c [m.s-1] – rychlost šíření vlnění v prostředí,

T [°C] – teplota vzduchu.

Standardizovaná hodnota 340 m.s-1 odpovídá teplotě 13,6 °C. Pro představu je rychlost šíření vlnění ve vodě 1484 m.s-1 a v oceli dokonce 5 000 m.s-1.

2.1.2 Tvary a druhy akustických vln

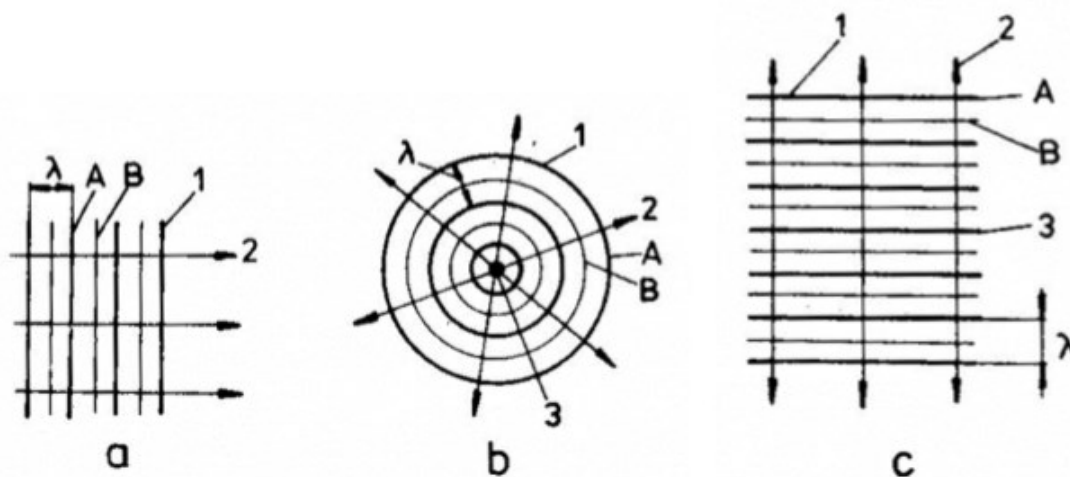
Vlnění můžeme rozdělit na dva hlavní druhy, a sice podélné a příčné. Jestliže ve všech bodech prostředí částice kmitají ve stejném směru v jakém se vlnění šíří, mluvíme o podélném vlnění. Pokud však kmitají v kolmém směru na směr vlnění, označujeme tento jev jako vlnění příčné. Způsob vlnění je přímo závislý na druhu prostředí. S příčným vlněním se můžeme setkat pouze u tuhých těles, zatímco podélné vlnění se může vyskytnout u všech druhů prostředí. [2]

2.1.2.1 Tvary vln

Dle tvaru vyzařující plochy zdroje vlnění lze tvary vln rozlišit na tři základní druhy:

- rovinné
- kulové
- válcové

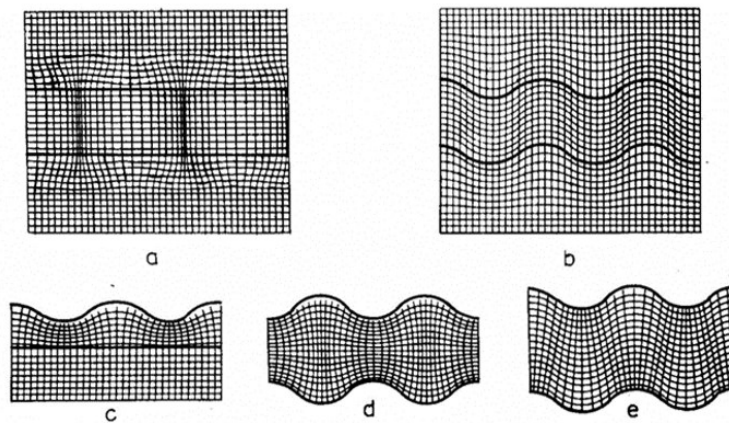
Směry, do kterých se vlnění šíří pak nazýváme paprsky. Částice, které kmitají ve stejné fázi, poté vytvářejí vlnoplochy. V izotropním prostředí (vlastnosti prostředí jsou nezávislé na směru) jsou vznikající vlnoplochy kolmé k paprskům. Jestliže v určitém časovém okamžiku vykreslíme vlnoplochy, pak v bodech, ve kterých částice kmitají ve stejné fázi, bude vzdálenost vlnoploch rovná vlnové délce λ [2].



Obr. 4 - Tvary vln: a – rovinná vlna, b – kulová vlna, c – válcová vlna, 1 – vlnoplocha, 2 – paprsek, 3 – zdroj vlnění, A – místo zhuštění částic, B – místo zředění částic, λ – délka vlny [2].

2.1.2.2 Druhy vln

Jestliže jsou podélné a příčné vlny aplikovány v prostředí, jenž má jeden nebo dva rozměry ohraničené, vznikají další typy ultrazvukových vln (obr. 3). Tohoto efektu se poté využívá v ultrazvukové technice. Na obr. 3a, b, lze vidět podélné a příčné vlny šířící se v ohraničeném prostředí. Právě tyto vlny se nejčastěji používají u aplikací aktivního a pasivního ultrazvuku. Ohybové vlny, jenž vyvolávají ohybové namáhání (obr. 3e), se šíří v prostředí, které je ohraničeno v jednom nebo ve dvou rozměrech. Radiální vlny (obr. 3d) se šíří v prostředí ohraničeném ve dvou rozměrech. Povrchové Rayleighovy vlny (obr. 3c) znázorňují speciální případ příčných vln, které obsahují jak příčnou složku, tak i složku podélnou. V podpovrchové oblasti však podélná složka zaniká rychleji než příčná. [2]



Obr. 5 - Druhy vln: a – podélná vlna, b – příčná vlna, c – povrchová vlna, d – objemově radiální vlna v tyči, symetrická desková vlna, e – ohybová vlna v tyči nebo desce, asymetrická desková vlna [2].

2.2 Mechanické vlnění

Ultrazvuk je mechanické vlnění, které ke svému šíření potřebuje hmotné prostředí. Při jeho propagaci nedochází k transportu hmoty, ale přenáší se kinetická či potenciální energie, která vzniká kmitáním částic kolem svých rovnovážných poloh. Tímto se mechanické vlnění zásadně odlišuje od vlnění elektromagnetického, které ke své propagaci hmotu nepotřebuje. Z toho vyplývá, že ultrazvukové vlnění se na rozdíl od elektromagnetické energie nemůže šířit vakuem, kde se žádné částice nenacházejí.

Kmitání částic hmotného prostředí je možné díky existenci pružných sil, kterými jsou vázány ke své rovnovážné poloze a k částicím sousedním. Pokud na atomy a molekuly nepůsobí žádná síla, nachází se v rovnovážné poloze. Působí-li na ně sinusově proměnná síla, indukuje

se harmonické kmitání, které se prostřednictvím těchto elastických sil přenáší i na všechny částice v okolí.

Díky těmto pružným vazbám se jednotlivé kmity rozšíří na částice ve všech rovinách prostředí a díky elastickým vazbám mezi sousedními partikulí je propagace kmitavého pohybu časově závislá. Částice se tedy nepohybují současně, a zatímco se partikulí první roviny vychylují z klidového stavu např. doleva, provádí částice druhé roviny výkmit z rovnovážné polohy doprava. Částice, které kmitají stejnou fází, vytváří tzv. vlnoplochu a vlnoplocha, která odděluje kmitající částice od těch v klidovém stádiu, se nazývá čelo vlny. Dále jsou popsány veličiny, kterými je harmonické kmitání částic charakterizováno.

2.2.1 Vlnová délka

Vzdálenost dvou nejbližších kmitajících částic v rámci jedné vlnoplochy se označuje jako vlnová délka. Tato veličina se značí písmenem řecké abecedy lambda (λ) a její základní jednotkou je metr (m). Vlnová délka je matematicky vyjádřena poměrem rychlosti šíření zvuku a frekvencí vlnění jak ukazuje vztah 2.4.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.4)$$

Z uvedeného vztahu vyplývá, že vlnová délka je nepřímo úměrná frekvenci vlnění. Jinak řečeno, čím bude vlnová délka delší, tím bude frekvence vlnění nižší. Vlnová délka ultrazvukového vlnění je tedy mnohem kratší než vlnová délka zvuku.

Frekvence (kmitočet) udává počet kmitů, který částice vykoná za daný časový úsek. Tato fyzikální veličina se označuje písmenem f a její základní jednotkou je s^{-1} , neboli Hz (Hertz).

2.2.2 Rychlost ultrazvuku

Rychlost šíření mechanického vlnění je charakteristická veličina, která je ovlivňována fyzikálními vlastnostmi a teplotou hmotného prostředí, v němž propagace probíhá (Tab.1). Rychlost ultrazvuku nese označení c a je vyjádřena následujícím vztahem 2.5.

$$c = \frac{Z_s}{a} \quad (2.5)$$

Specifická akustická impedance prostředí (Z_s) je vlastností každého média, která významně ovlivňuje rychlost šíření ultrazvuku. Vyjadřuje akustický odpor prostředí vztažený k jednotkové ploše. Matematické vyjádření této veličiny odvozujeme z předcházejícího vztahu jako součin rychlosti šíření ultrazvuku a měrné hustoty prostředí, kterým se pohybuje. Měrná hmotnost prostředí (ρ) vyjadřuje akustickou vodivost média. Čím je prostředí hmotnější, tím je akusticky vodivější.

Materiál	Rychlost podélných vln m/s
ocel feritická	5920
litina	3500 až 5600
titan	6100
hliník	6320
měď	4600
plasty	1800 až 2680
voda	1480 až 1500

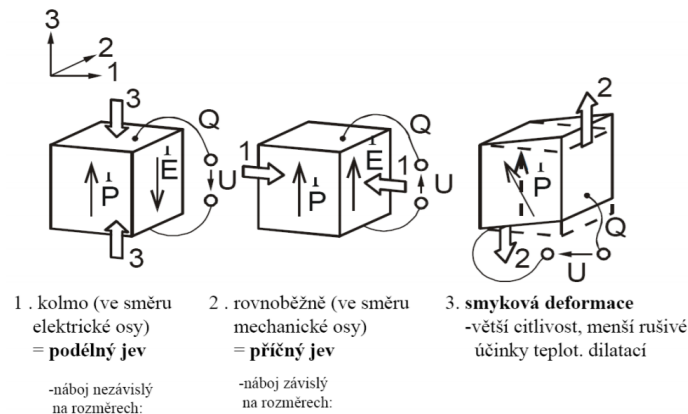
Tab. 1 - Rychlost šíření ultrazvuku v závislosti na prostředí

2.3 Jevy spojené s aplikací ultrazvuku

Při použití ultrazvukových vln dochází k několika jevům, kterých se poté využívá v praxi.

2.3.1 Piezoelektrický jev

Piezoelektrina byla objevena již v roce 1880 bratry Pierrem a Jacquesem Curieovými na krystalech turmalínu, vzápětí pak také křemene. Objevitelé vypožorovali jev, který znamenal „vznik“ (shromáždění) elektrických nábojů na plochách (středově nesymetrických) krystalů těchto a některých dalších látek v důsledku jejich mechanického namáhání. Vygenerovaný elektrický náboj je tomuto tlaku přímo úměrný. Jev byl nazván (přímý) piezoelektrický jev, podle řeckého slova *piedzó* (tlačit). Dielektrická polarizace některých látek je tedy vázána na jejich elastickou deformaci - tlak, tah, ohyb, stříh nebo krut.



Obr. 6 - Deformace krystalu

O tom, zda piezoelektrický jev nastane nebo nikoli rozhoduje poloha středu symetrie základní buňky krystalové mřížky. Deformací se ionty opačných nábojů posunou v krystalové mřížce tak, že elektrická těžiště záporných a kladných iontů, která v nezdeformovaném krystalu souhlasí, se od sebe vzdálí. Na určitých plochách krystalu se objeví elektrický náboj.

2.3.2 Dopplerův jev

Dopplerův jev popisuje změnu frekvence a vlnové délky přijímaného oproti vysílanému signálu, způsobenou nenulovou vzájemnou rychlostí vysílače a přijímače.

Jev byl poprvé popsán Christianem Dopplerem v roce 1842 v monografii *Über das farbige Licht der Doppelsterne und einige andere Gestirne des Himmels*.

Jestliže se zdroj vysílajícího signálu s frekvencí f_0 pohybuje směrem k přijímači (pozorovateli), pak stojící pozorovatel jej přijímá s frekvencí f :

$$f = f_0 \frac{v}{v - v_{s,r}} \quad (2.6)$$

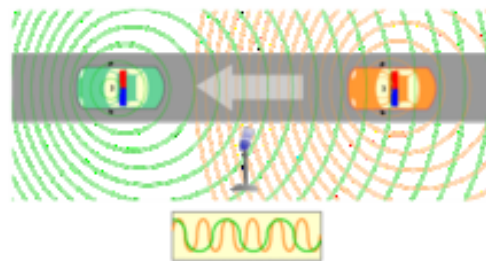
Jestliže se zdroj vysílajícího signálu s frekvencí f_0 pohybuje směrem od přijímače (pozorovatele), pak stojící pozorovatel jej přijímá s frekvencí f :

$$f = f_0 \frac{v}{v + v_{s,r}} \quad (2.7)$$

kde v je rychlost vln v dané látce a $v_{s,r}$ relativní radiální rychlost zdroje vůči pozorovateli (kladná rychlost znamená přibližování, záporná vzdalování). Pro stacionární zdroj a pohyblivý přijímač je situace obdobná.

$$f = f_0 \left(1 + \frac{v_0}{v} \right) \quad (2.8)$$

kde je v_0 rychlost přijímače a pro přibližující se přijímač je kladná, pro vzdalující se je pak záporná.



Obr. 7 - Dopplerův efekt

Jedním z nejběžnějších příkladů, jak lze Dopplerův jev pozorovat, je změna výšky tónů vydávaných sirénou na vozidle projíždějícím okolo pozorovatele. Dopplerova jevu využívá řada měřicích přístrojů a zařízení, např. radary pro měření rychlosti vozidel nebo lékařské sonografy.

V astronomii se Dopplerův jev projevuje posuvem spektrálních čar vyzařovaných vesmírnými tělesy; pokud se tato tělesa vzdalují od Země, lze pozorovat takzvaný rudý posuv. Při vyšších rychlostech se však projevuje i dilatace času, je proto třeba brát v úvahu relativistický Dopplerův jev.

2.3.3 Ultrazvuková kavitace

Ultrazvuková kavitace se vyskytuje všude tam, kde dochází vlivem působení ultrazvukových vln k lokálnímu poklesu tlaku v kapalině. To způsobuje lokální mikroskopické roztržení kapaliny. Příčinou kavitace jsou harmonicky proměnné tlaky, vznikající působením vibrací na kapalinu. Vysoká frekvence vibrací poté způsobuje narušení celistvosti kapaliny, které má za následek vznik dutinek zvaných též kavern, a jejich následné uzavření, které způsobuje mikroskopické imploze. Imploze mohou dosáhnout tlaku až 100 MPa [2].

3 ULTRAZVUKOVÉ SVAŘOVÁNÍ

Svařování ultrazvukem patří mezi jedny z nejčastějších metod pro spojování termoplastů, jenž používá energii o vysokých frekvencích (20-40 kHz) k vytvoření mechanických kmitů s nízkou amplitudou (1-25 μm). Vibrace se na svařovaný materiál přenáší pomocí sonotrody, čímž se vlivem tření generuje teplo na styčných plochách spojovaných dílů, které způsobuje natavení materiálu a po následném ochlazení vytvoření svarového spoje. Sonotrody jsou tedy nezbytně nutné pro ultrazvukové svařování. Jejich hlavice mohou mít rozdílné tvary, v závislosti na tvar a materiál svařovaných dílců. Svařování ultrazvukem patří mezi nejrychlejší svařovací technologie. Například v porovnání s tepelným tvarováním je až dvakrát rychlejší.

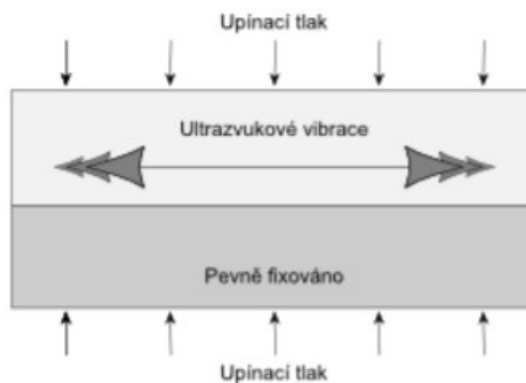
Kromě svařování se energie ultrazvuku používá i pro jiné aplikace, například vkládání kovových dílů (tzv. insertů) do plastových, nebo tvarové spojování dílů vyrobených z odlišných materiálů přeformováním termoplastů (nýtování)

Jestliže je termoplastický materiál vystaven účinkům ultrazvukových vibrací, v materiálu jsou generovány stacionární sinusové vlny. Určitá část energie je poté přetvořena na mezimolekulární tření, které vytváří teplo v přetvářeném materiálu. Následně je část tohoto tepla přenášena na spojovanou plochu, kde tření způsobí lokální ohřev materiálu. Přenos energie v dotykové ploše a chování materiálu při tavení je závislé jednak na tvaru součásti, ale také na schopnosti materiálu energii absorbovat.



Obr. 8 - Sonotroda pro ultrazvukové svařování

Čím blíže je zdroj vibrací k místu svaru, tím méně energie je ztraceno kvůli schopnosti materiálu ultrazvukovou energii absorbovat. Jestliže je zdroj vibrací od místa svaření vzdálen do 6,4 mm, jedná se o svařování v blízkém poli, které se používá například pro krystalické materiály, nebo materiály s nízkou tuhostí. Pokud je však zdroj vzdálen více než 6,4 mm, jedná se o svařování ve vzdáleném poli, které se převážně používá pro amorfní materiály, nebo pro materiály s vysokou pevností a schopností absorbovat energii.



Obr. 9 - Princip ultrazvukového svařování

3.1 Historie ultrazvukového svařování

Svařování ultrazvukem je technika, při které je vysoká frekvence zvuku aplikována skrze vibrace na svařovaný díl, jenž je tlakem přidržován tak, aby vytvořil pevný spoj. Nejčastěji se používá na vytvoření nerozebíratelného spoje bez nutnosti použití lepidel, hřebíků a šroubů tak, aby vznikl pevný spoj, který vydrží léta.

Historie ultrazvukové svařování sahá do 60. let 20. století, kdy byla v Americe postavena první ultrazvuková svářečka známá pod názvem Aerojects.

V té době byla veřejnosti představena první svářečka fungující na principu ultrazvuku, kterou se však daly svařovat pouze tvrdé plasty.

Až teprve v roce 1965 navařili ve firmě Branson pani Sollof a Linselly pomocí ultrazvukové svářečky tenký plastový film na tubus a tašku. Přitom bylo zjištěno, že se nemusí pohybovat svařovaným dílem, ale že ultrazvuk se šíří celým dílem. Na základě těchto skutečností byl sestaven první ultrazvukový lis tak, jak je známý dnes – byl použit na hračky. První použití ultrazvuku v automobilovém průmyslu bylo zaznamenáno na začátku 70. let 20. století. Masově se začal ultrazvuk pro svařování v automobilovém odvětví používat na počátku 80.

let 20. století. Dnes se pomocí ultrazvuku spojují nejrůznější díly tvarů, použitelných pro interiéry i exteriéry.

3.2 Mechanismus vzniku svarového spoje

Mechanismus vzniku spoje je analogický jako u technologie svařování třením s vibracemi. Ultrazvukové svařování má stejnou podstatu vzniku spoje jako ostatní druhy svařování v tuhém stavu a liší se pouze kinetikou jednotlivých stádií procesů tvorby spoje. Proces tvorby spoje můžeme rozlišit na tři po sobě jdoucí stádia:

- Tvorba kontaktů – fyzikální přiblížení atomů na vzdálenost působení van der Waalsových sil nebo vzdálenost, při které jsou možné slabé chemické interakce
- Aktivace dotkových povrchů – tvorba aktivních center, těmi jsou strukturní poruchy (dislokace, vakance). Při svařování dvou rozdílných materiálů se tvoří centra na povrchu tvrdšího materiálu. Při svařování stejných materiálů probíhá první a druhé stádium současně.
- Objemové procesy – začínají po utvoření aktivních center. Začíná interakce svařovaných materiálů v rovině kontaktu s tvorbou pevných vazeb s objemem zóny dotyku materiálů. Výsledkem procesů je tvorba mikrosvarů s vazbami, relaxace napětí, samodifuze a difuze prvků, vznik nových fází atd.

Fáze svařování z jiného pohledu

1. Tření narušuje vrstvu oxidů. Pokud zůstanou nějaké oxidy na povrchu předmětu, nevznikne svarový spoj – teplo se zvyšuje.
2. Zarovnání povrchových nerovností – teplo se stále zvyšuje
3. Vznik a zánik vazebních ploch mezi spojovanými materiály, teplota se ustálí.
4. Vazební plocha se rozšíří na celou spojovanou plochu a dojde k vytvoření spoje pomocí plastické deformace a difúze, zvýší se koncentrace vakancí a dislokací

3.3 Tvorba svarového spoje

Tvorba svarového spoje je fyzikálně poměrně složitý proces. Přiblížením povrchů svařovaných materiálů za působení přitlačné síly se vytváří předpoklad pro realizaci vazeb v dotýkajících se plochách. Za čas 0,2 až 0,3 s se zakončí úplný cyklus fyzikálního procesu tvorby svarového spojení. S prodlužujícím se časem se zvyšuje počet zón mechanického promísení. Povaha struktury tvořícího se spojení závisí na určitém poměru výkonu kmitací

soustavy, přítláčné síly a amplitudy výchylky svařovacího hrotu. V závislosti na vlastnostech svařovaných materiálů jsou možné dva základní režimy ultrazvukového svařování:

- první režim – poměrně velké amplitudy a nevelké přítláčné síly, velké plastické deformace materiálu, nastává rychlé zvýšení teploty v místě svaru,
- druhý režim – malá amplituda a velká přítláčná síla v podmínkách mikroskluzu, umožňuje získat spoje s mikrostrukturou beze stop opotřebení a s velkými plastickými deformacemi.

Svarové spoje svařené druhým režimem mají lepší pevnostní vlastnosti než spoje vyrobené prvním režimem. Změnou poměru velikostí amplitudy a přítláčné síly při svařování daného materiálu je možno vyrobit spoje s podstatně rozdílnou strukturou, pevností a plasticitou.[3]

3.4 Tepelné procesy při svařování ultrazvukem

Do materiálů, jenž mají být svařeny se přivádí ultrazvukem energie – v oblasti spojení materiálů se zvyšuje teplota materiálů. Koncentrace tepla se však může projevit v procesu vzniku spoje. U technologie ultrazvukového svařování existují dva základní zdroje tepla:

- v místě kde se svařovací hrot dotýká s horním materiálem,
- v oblasti svaření materiálů

Teplota v oblasti svaru podle některých autorů dosahuje maximálně 60% teploty tavení materiálu. Maximální teploty ve svařovaném místě do značného stupně závisí na tepelně-fyzikálních vlastnostech svařovaných materiálů, tj. na tepelné vodivosti a tepelné kapacitě kovů. [3]

3.5 Svařování plastů

Svařování pomocí ultrazvuku je výhodné obzvláště pro termoplasty, které mají nízkou hodnotu utlumení ultrazvukových kmitů a také nízkou teplotu tavení. Plasty se sklonem k navlhavosti se musí před samotným svařováním vysušit, jinak klesá pevnost svarového spoje až o 50%. Lze však svařovat i termoplasty které jsou plněné skelnými vlákny, avšak svar obsahuje jenom velmi málo skelných vláken, a tak je jeho pevnost podstatně menší, než pevnost základního materiálu. Obtížně se svařují polyolefiny (PE, PP). Výhodou svařování

ultrazvukem je hlavně jeho rychlost, malá spotřeba energie, možnost ručního či strojního svařování a velké množství aplikací kde jej lze uplatnit. Nevýhodou je například nutnost použití speciálně tvarované elektrody – sonotrody, nebo nutnost přesné úpravy svařovaných ploch.[3]

Svařování plastů ultrazvukem nastává za pomoci tepla, jenž vzniká přeměnou z vysokofrekvenčních mechanických kmitů. V první řadě se však musí elektrická energie přeměnit na vysokofrekvenční mechanický pohyb. Tento pohyb společně s přítlačnou silou vytváří frikční teplo na rozhraní spojovaných součástí (svarová plocha). Plastický materiál poté taje a vytváří tak molekulový svar mezi částmi. Následující obrázky popisují základní princip ultrazvukového svařování [3]:

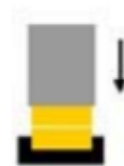
1. Upnutí části do lůžka

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



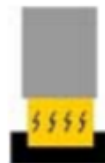
2. Kontakt se sonotrodou

Dojde ke kontaktu horního termoplastu a titanového, ocelového nebo hliníkového komponentu zvaného sonotrody



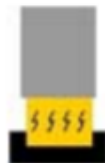
3. Působení tlaku

Kontrolovaný tlak působí na obě spojované součásti proti lůžku



4. Svařovací cyklus

Svařovací cyklus je děj kdy sonotroda vertikálně vibruje s frekvencí 15 000 (15 kHz) až 75 000 (75 kHz) kmitů za sekundu, ve vzdálenosti měřených v tisícinách milimetru a předem daném časovém intervalu. Vibrační mechanická energie je nasměrována na dotykové plochy mezi dvěma částmi. Mechanické kmitání je přenášeno skrz termoplastické materiály na rozhraní součásti (svarová plocha), kde vytváří frikční teplo. Když teplota na rozhraní spojovaných dílů dosáhne bodu tání, plast taje a teče a kmitání se zastaví. To umožní roztavenému plastu začít chladnout.



5. Přítlačný cyklus

Zatímco roztavený plast chladne a tuhne, udržujeme sevření součástí tak, aby došlo ke spojení. Toto je tzv. přítlačný cyklus. Zlepšení pevnosti a neprodyšnosti svaru může být dosaženo použitím vyšší přítlačné síly během cyklu (použitím dvojitého tlaku)



6. Vracení sonotrody do původní polohy

Jakmile dojde ke ztuhnutí spojených plastů, sevření povolí a sonotroda se vrací zpět do původní polohy. Obě části jsou v tomto okamžiku spojeny a z lůžka jsou vyjmuty jako jedna část.



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

Tab. 2 - Možnost svařování ultrazvukem pro jednotlivé druhy plastu

Parametry svařování jsou:

1. Přítlačná síla působící na spoj – umožňuje přenos ultrazvukových kmitů ze svařovacího hrotu na svařované materiály a také tření, které je potřebné na rozrušení tenkých oxidických vrstviček. Vazba mezi hrotem a svařovaným materiálem je velmi důležitá
2. Amplituda kmitu – základní parametr, se zvětšováním amplitudy výchylky svařovacího hrotu roste pevnost spojů lineárně. Naopak menšení amplitudy výchylky svařovacího hrotu vyvolá zmenšení pevnosti spoje.
3. Frekvence kmitů – určuje použité ultrazvukové zařízení a soustavu. Při vyšší frekvenci kmitů se zvětšují ztráty energie v přenosových člancích, svařovací hlava se intenzivněji zahřívá a amplituda vlnění je úměrně menší.
4. Čas svařování – je časový interval působení ultrazvukové energie na svařované materiály. Spolurozhoduje o pevnosti ultrazvukového bodového svaru. V závislosti na ostatních parametrech je třeba používat svařovací časy co nejkratší. Zbytečně dlouhé časy mohou způsobovat značné přehřátí místa spoje a zapříčiňují únavové porušení materiálu.

3.6 Výhody a nevýhody ultrazvukového svařování

Technika svařování ultrazvukem se za posledních dvacet let prosadila jako důležitá spojovací technologie. Široké spektrum použití našla obzvláště při konstrukci elektrických přístrojů, domácích spotřebičů, v automobilovém a textilním průmyslu, kde se vyskytují velké výrobní série, protože aby bylo svařování úspěšné, je nutné pro každý spoj na míru vyrobit příslušné nástroje a přípravky, což je zároveň prakticky jediná nevýhoda této technologie. Jejimi největšími výhodami jsou vysoká rychlost (desetiny, maximálně jednotky sekund), čistota a kompaktnost (zařízení zabírá málo místa a nepotřebuje speciálně upravené pracovní místo, lze jej umístit kdekoliv ve výrobní hale), nenáročnost na připojení (běžné napájení 220 V a přívod tlakového vzduchu), prakticky žádná údržba a to, že nevyžaduje žádný spotřební materiál, jako pájky apod. Velkou předností je rovněž vysoká životnost nástrojů, zpravidla statisíce svarů.[3]

Výhody:

- Tepelné ovlivnění svarového místa je obvykle nižší než u tavných metod svařování, díky čemuž nenastává změna vlastností materiálu
- svařované plochy nevyžadují před procesem svařování nákladnou a zdlouhavou přípravu
- umožňuje svařit i vytvrditelné slitiny jako je Al, Mg, Ti,
- svařování ultrazvukem je vysoce produktivní metoda, svařovací časy jsou velmi nízké,
- u svařovaných materiálů nejsou elektrické vlastnosti rozhodující, dají se například svařit i kovové materiály s nekovovými, (Al na sklo, keramiku atd.),
- u plastů není potřebná čistota svarových ploch, svařovat se dají i plochy od prachu, vody nebo mastnoty

Nevýhody:

- Lze svařit spíše menší díly, podle konstrukce ultrazvukové svářečky
- je nutné pro každý spoj na míru vyrobit příslušné nástroje a přípravky.

Použití:

Ultrazvukové svařování je s úspěchem použitelné i tam, kde jsou jiné technologie nevyhovující, a ultrazvukové spojování je jedinou možnou metodou. Nejčastější použití:

- v elektrotechnice
- elektronice
- speciální měřicí přístroje
- sondy
- letecká a kosmická technika
- lze svařit také hliníkové a stříbrné dráty s napařenou tenkou vrstvou kovu
- torzní svařování ve tvaru prstence
- švové svařování se používá pro hermetické uzavírání obalů chemikálií, léčiv, výbušnin a radioaktivních látek,
- obalová technika (plastické hmoty, ABS na výrobu potrubí, strojírenství, potravinářství...)

4 ULTRAZVUKOVÁ SVÁŘEČKA

Zařízení pro svařování ultrazvukem se dělí na několik skupin dle toho, jaké mají ultrazvukové měniče, jaké kmitavé soustavy využívají, nebo zda se používají na svařování kovů nebo plastů. Měníče mohou být piezoelektrické, magnetostrikční, měniče z plechu s uzavřeným magnetickým jádrem.

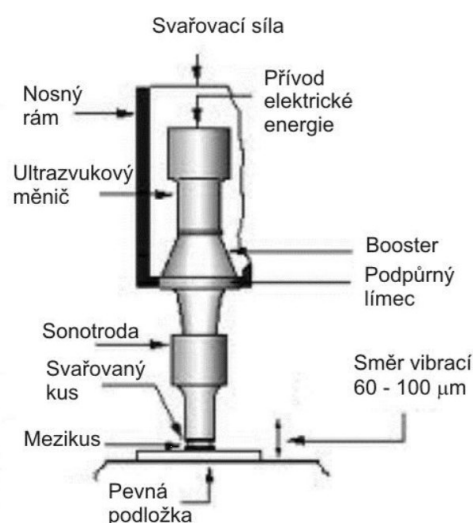
Nástroj je nutné zvolit tak, aby nerozladřoval podstavec. Konstrukce nástrojů vychází ze snahy dodat do místa svaru co největší množství ultrazvukové energie. Protože výkon jednoho měniče bývá limitován, v některých případech je třeba svařovací nástroje konstruovat tak, aby byly buzené více měniči. Nástroj se budí více měniči i v případě, kdy to požaduje zvolený tvar svaru.

Vhodné materiály na výrobu ultrazvukových nástrojů jsou hliník, dural a titan.

Svařovací hrot však nemají dostatečnou životnost. Při použití oceli jako materiálu nástroje se velká část akustického vlnění ztrácí v samotném materiálu nástroje, čímž se snižuje účinnost celé kmitavé soustavy, nástroj se nadměrně zahřívá a technologický efekt je nízký.

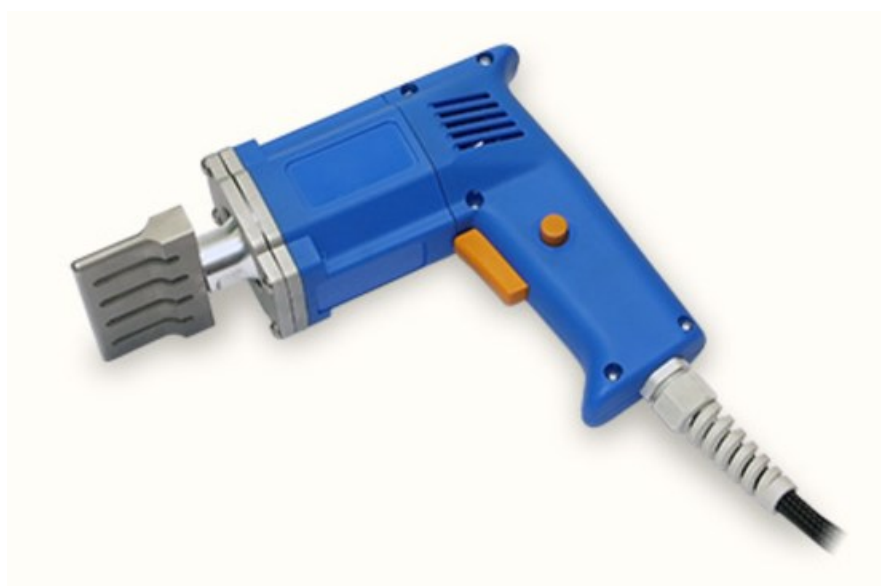
Svářečky mohou být:

- s příčnými kmity
- s podélnými kmity – neumožňuje zvýšit výkon, zapojen pouze jeden magnetostrikční měnič
- s ohybovými kmity
- s torzními kmity



Obr. 10 - Schéma zařízení

Stroje pro ultrazvukové svařování mohou být ruční, stojanové – univerzální i skříňové – jednoúčelové.



Obr. 11 - Ultrazvuková svářečka - ruční



Obr. 12 - Ultrazvuková svářečka - stojanová



Obr. 13 - Ultrazvuková svářečka - skříňová

4.1 Generátor

Slouží k přeměně nízkofrekvenční energie střídavého síťového elektrického proudu na vysokofrekvenční energii v ultrazvukové oblasti. Výstupní frekvence ultrazvukových generátorů je v rozsahu od 20 do 40 kHz. Výstupní výkony od 400 do 5000 Watt. Skutečná pracovní frekvence generátoru je dána mechanickou rezonanční frekvencí konvertoru a sonotrody.

4.2 Konvertor (Převodník)

Slouží k přeměně elektrické energie na mechanickou vibrační energii. Proces převodu je zajištěn prostřednictvím piezoelektrických materiálů (speciální keramické kotouče). Precizním zpracováním těchto materiálů lze vyrobit konvertor s účinností přes 95 %. Vytvořená vysokofrekvenční energie je v určité definované frekvenci impulzně vedena do křemíkových (piezoelektrických) kotoučků. Křemík se v důsledku elektrických impulzů roztahuje a smršťuje (se stejnou frekvencí jaká je aplikována). Prostřednictvím speciální konstrukce konvertoru jsou tyto mechanické kmity přeneseny do kovu (titanu), čímž jsou k dispozici na dolní části převodníku jako mechanické kmity. Průměrná amplituda je 4 μm .



Obr. 14 - Konvertor pro ultrazvukové svařování

4.3 Sonotrody

Cílem sonotrody je zesílit konvertorem vytvořené mechanické kmity a přenést je na svařovanou oblast (linii). Standardní materiál: hliník, titan nebo ocel.

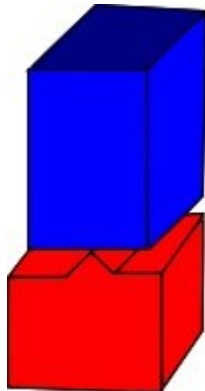


Obr. 15 - Sonotrody pro ultrazvukové svařování.

4.4 Konstrukce svařovacích ploch

Na výsledek svařování má největší vliv geometrie svařovaných ploch. Je nutné konstruovat na dílech energetické usměřovače, jimiž je dosaženo cíleného a koncentrovaného přenosu energie (obr. 14). V případě nerealizovatelného (chybějícího) energetického usměřovače

by byl zbytečně prodloužen čas svařování. Tím by namísto vytvoření sváru (švu) došlo k plošnému svaření, což by mělo za následek nedostatečnou pevnost a nehomogenní výsledek svařování. Nelze též vyloučit tepelné poškození materiálu.



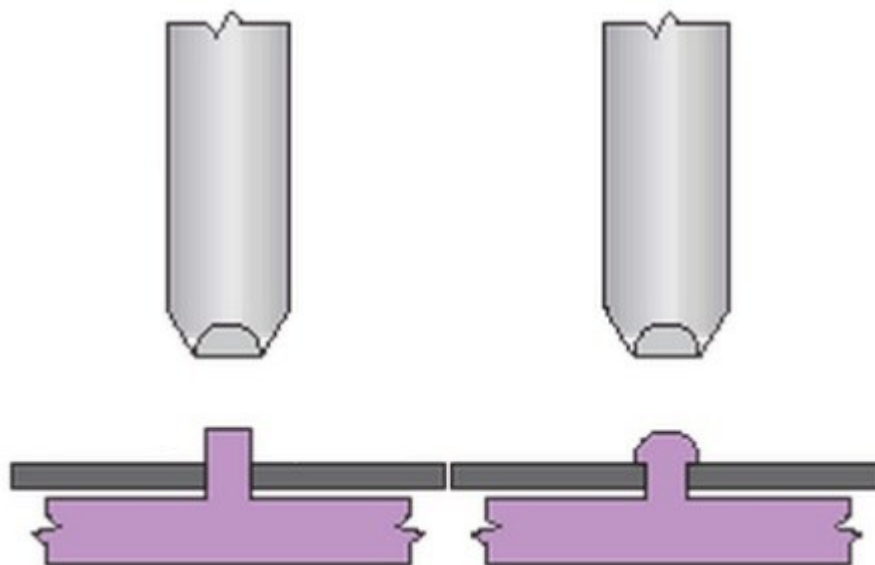
Obr. 16 - Možná konstrukce energetického usměřňovače na plastovém dílu.

Při konstrukci dílů je proto zapotřebí zohlednit následující body:

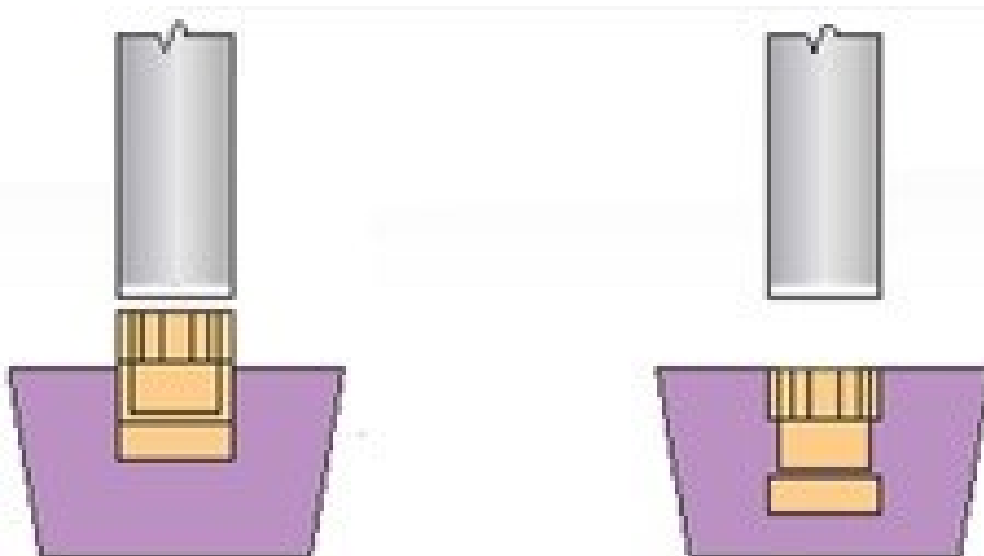
- Zatížení sváru.
- Propustnost.
- Vzhled.
- Přetok taveniny dovnitř a navenek.
- Materiál.
- Umístění a interakce/tolerance mezi oběma díly.
- Funkční plocha sonotrody.
- Styčná plocha ve fixačních lůžku.
- Poloha svařovaných ploch.

Ultrazvukové svařování lze také využít k:

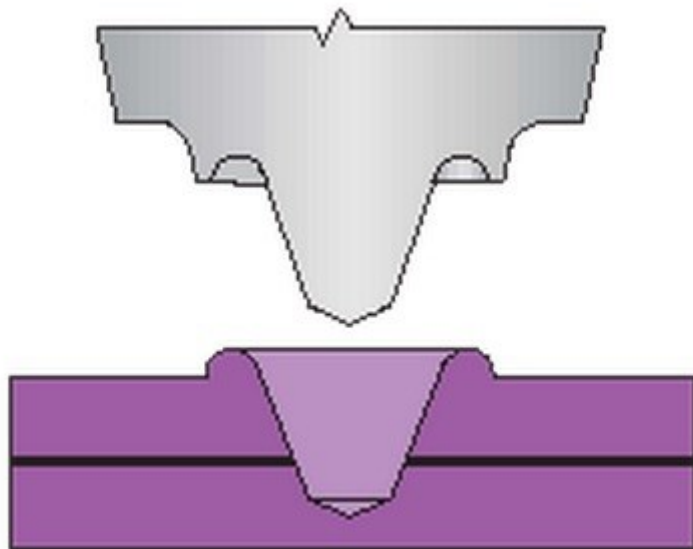
- Vytvoření nýtových spojů (obr. 15).
- Zapuštění kovových vložek až do M 6 (obr. 16).
- Bodové svařování (obr. 17).
- Přetvarování tenkostěnných plastových materiálů pro sevření dílů (obr. 18).
- Řezání / dělení plastů.



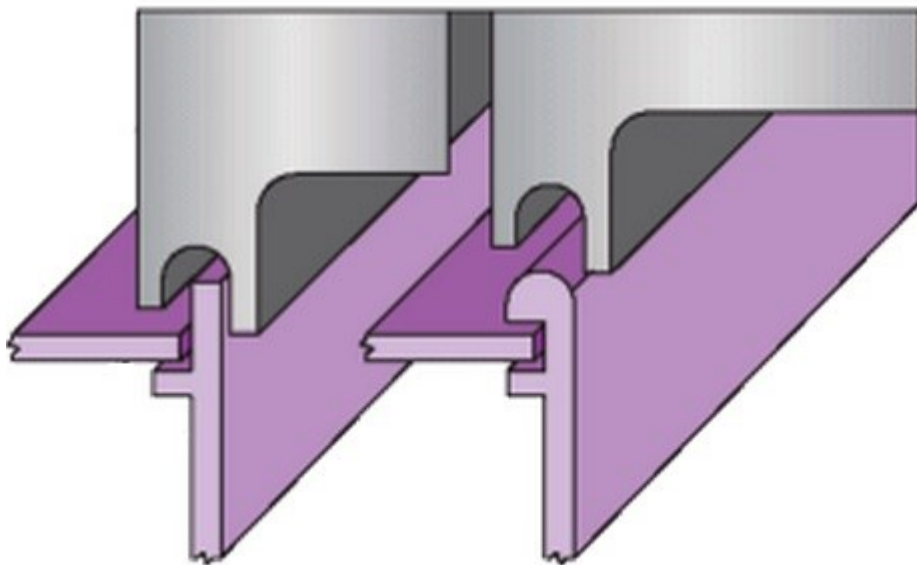
Obr. 17 - Nýtování pomocí ultrazvuku



Obr. 18 - Zapuštění kovových vložek pomocí ultrazvuku



Obr. 19 - Bodové svařování pomocí ultrazvuku



Obr. 20 - Lemování pomocí ultrazvuku

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE

Cílem této diplomové práce bylo navržení a následná konstrukce svařovacího přípravku dle parametrů požadovaných firmou Plastika a.s., jenž by umožňoval a zjednodušil práci s ruční ultrazvukovou svářečkou a zároveň umožňoval lepší kontrolu vstupních parametrů při svařování plastových výrobků. Praktická část práce byla věnována návrhu vhodné varianty, jejímu detailnímu rozboru a také vytvoření patřičné modelové a výkresové dokumentace. V závěru práce byl přípravek odzkoušen na sérii testovacích vzorků.

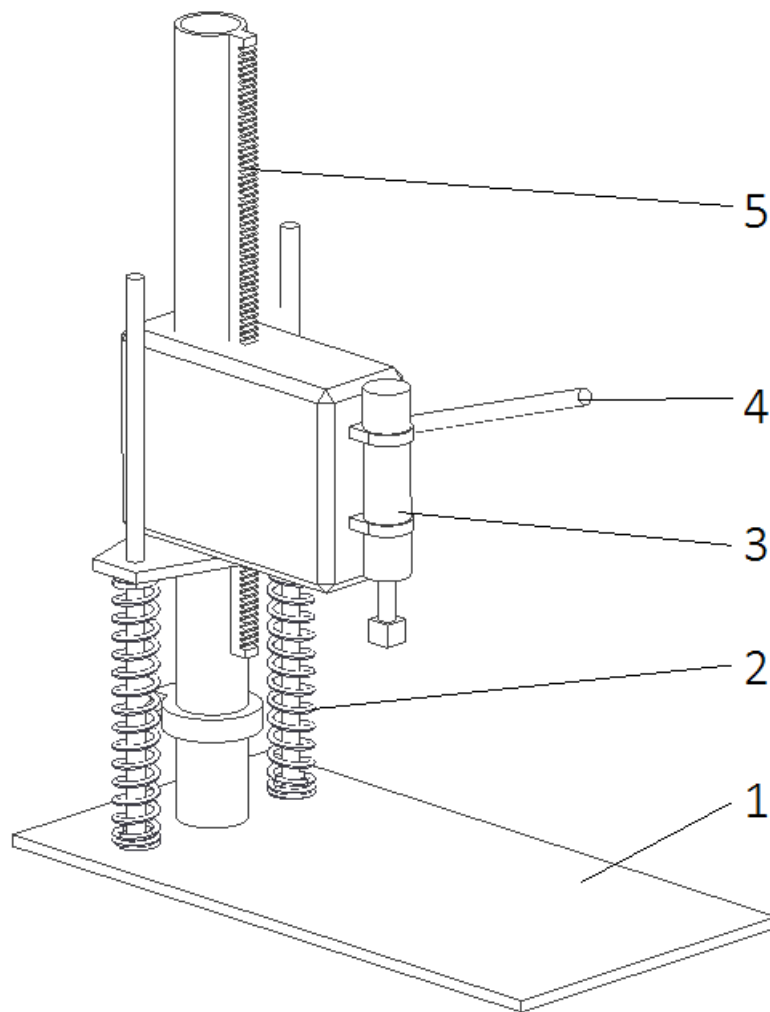
6 NÁVRH PŘÍPRAVKU

6.1 Návrh variant a výběr optimální varianty

Konstrukce svařovacího přípravku byla řešena na principu sloupového stojanu, jenž by umožňoval vertikální posuv tělesa ultrazvukové svářečky do svařovací polohy, vyvinutí příčinné přitlačné síly, fixaci ve svařovací poloze, a následné odlehčení a posuv zpět do výchozí polohy.

6.1.1 varianta A

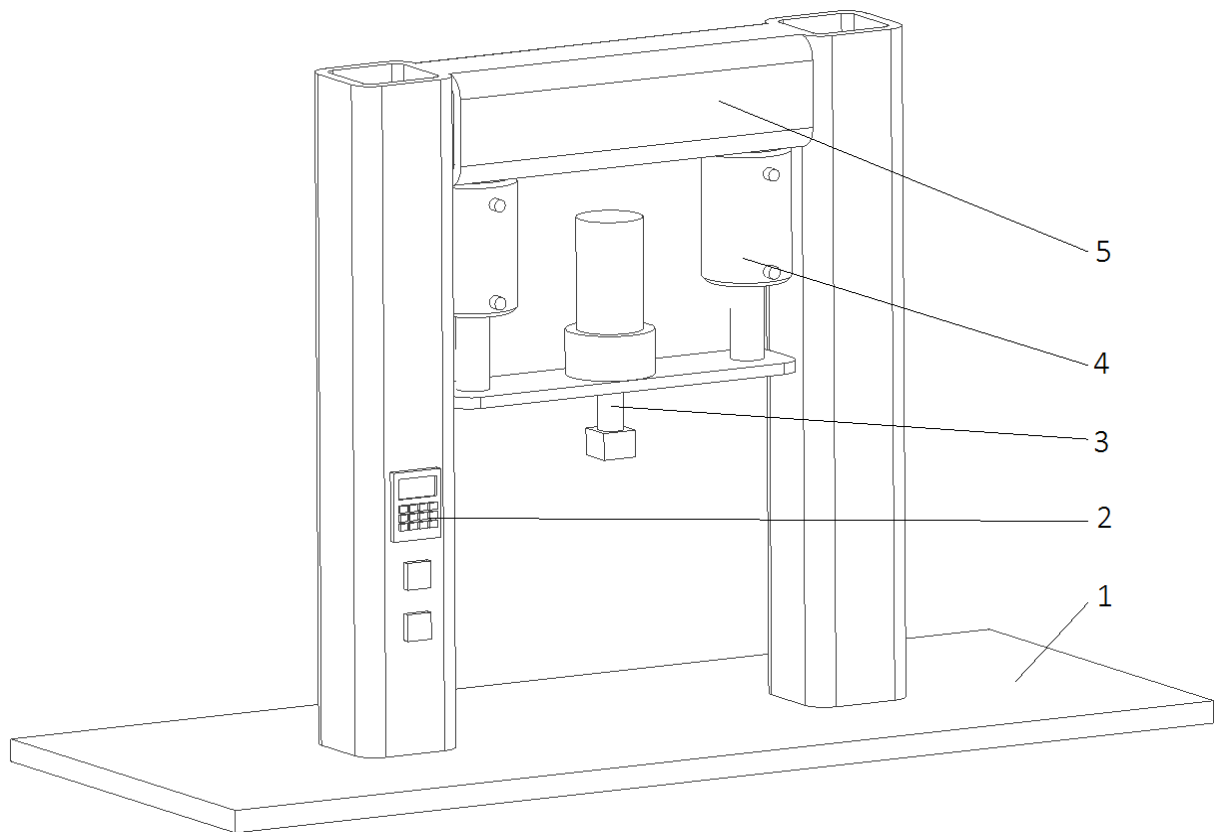
Varianta A funguje na principu soustavy pružin, které kladou odpor vůči pohybu. Svislý pohyb je obstarán pomocí ovládací páky, která otáčí ozubeným kolem, jenž zapadá do ozubeného hřebenu připevněného na sloupu stojanu. Požadovaná přitlačná síla se nastavuje posunutím zarážky na sloupu do výšky stanovené podle charakteristiky pružin. Výhodou této verze je jednoduchost mechanismu. Nevýhodou je nutnost prvotní kalibrace a cejchování poloh zarážky.



Obr. 21- Varianta A: 1 – základna, 2 – soustava pružin, 3 – svářečka, 4 – ovládací páka, 5 – ozubený hřeben

6.1.2 varianta B

Tato varianta obsahuje dva hydraulické písty, jenž jednak posouvají svářečku ve vertikální ose a také vytvářejí požadovanou přitlačnou sílu. Oba písty jsou řízeny skrze centrální řídicí jednotku. Díky pevné portálové konstrukci vyniká tato varianta velkou tuhostí rámu, je tedy vhodná i pro velké přitlačné síly. Velkou nevýhodou je jednak vysoká cena některých dílů, a také, na rozdíl od ostatních variant vyšší spotřeba energie.

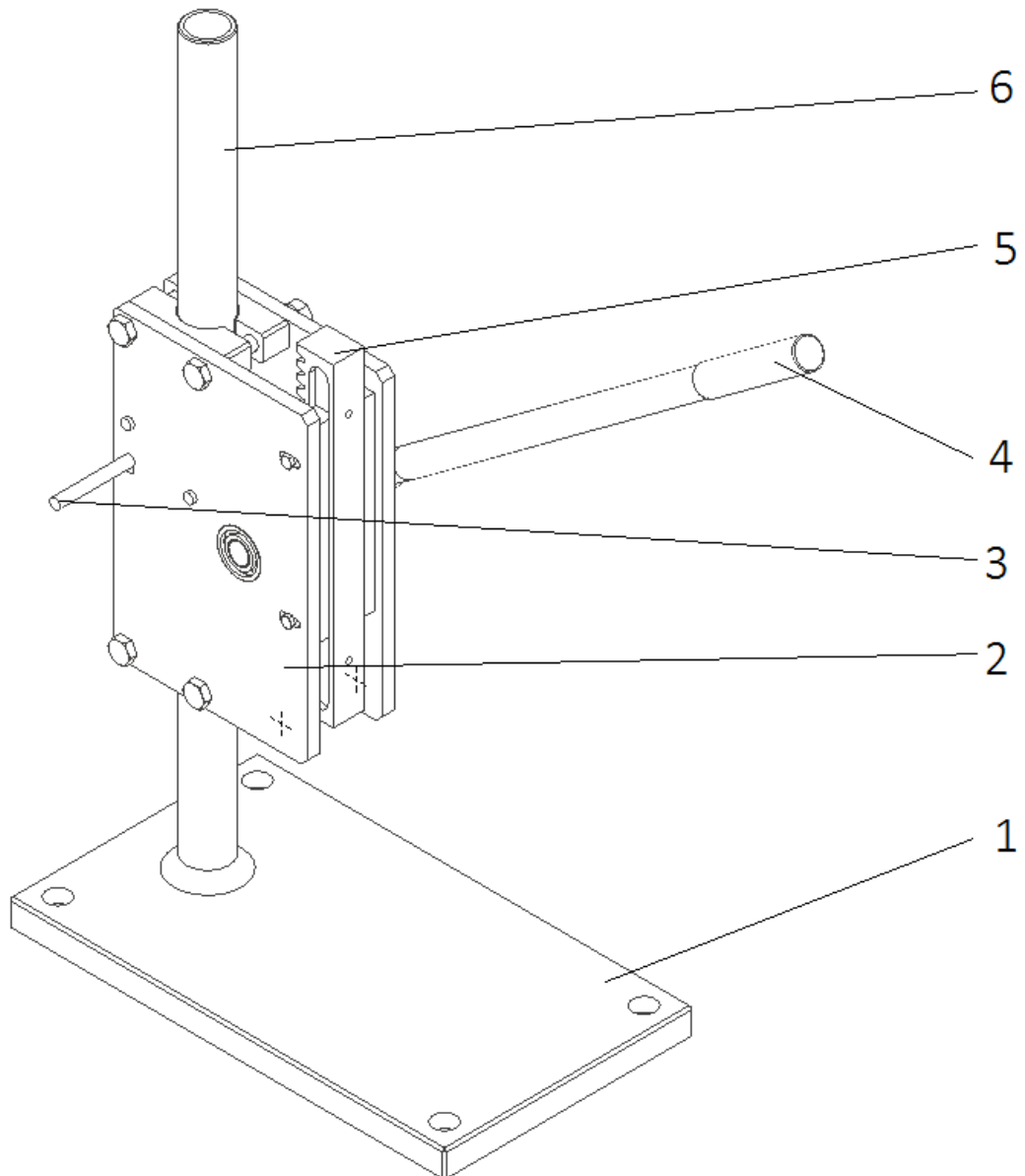


Obr. 22 - Varianta B: 1 – základna, 2 – ovládací panel, 3 – svářečka, 4 –
pneumatický píst, 5 – rám stroje

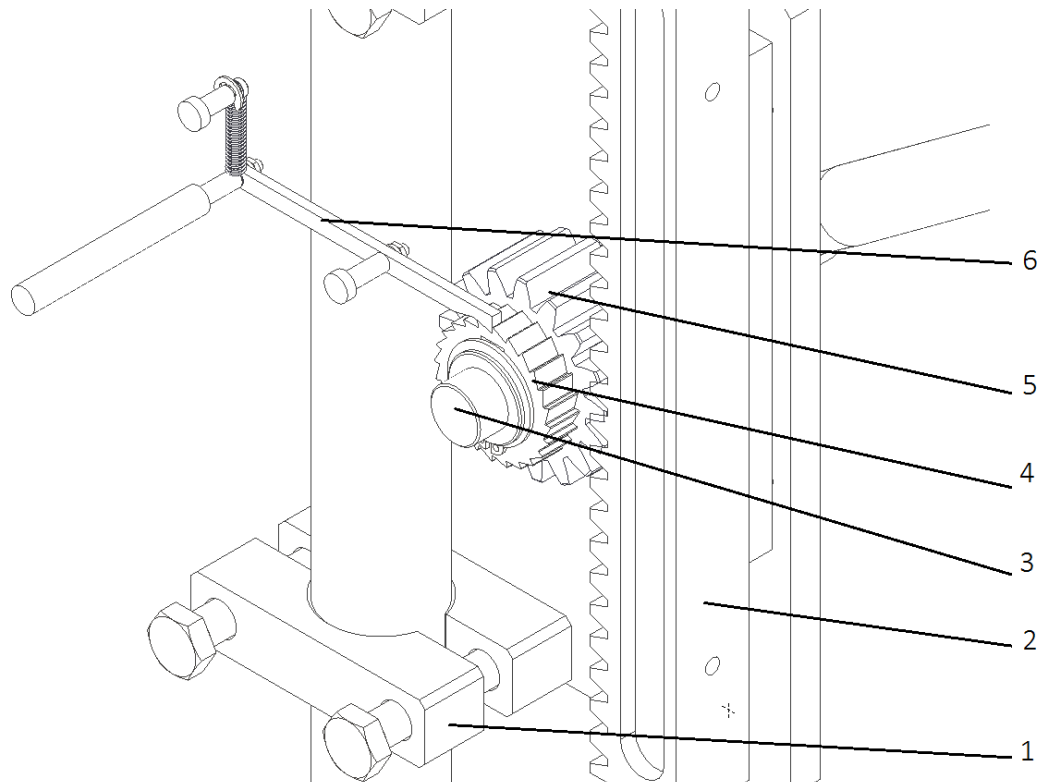
6.1.3 Varianta C

Základní myšlenkou u varianty C je použití tzv. momentového klíče jakožto páky pro vytvoření potřebného krouticího momentu a zároveň jako indikátor, který oznámí dosažení požadované hodnoty momentu. Krouticí moment je následně za pomoci soustavy ozubeného kola a hřebenu transformován na vertikální přitlačnou sílu. Momentový klíč obvykle slouží k utahování šroubů na předepsaný moment a v případě překročení nastaveného momentu vnitřní mechanismus klíče zabrání dalšímu zvyšování utahovacího momentu. Obdobnou funkci má klíč i u tohoto svařovacího přípravku. Obsluha přípravku podle přiložené tabulky

přepočte požadovanou přítlačnou sílu na krouticí moment a tento mezní moment poté nastaví na momentovém klíči.



Obr. 23 - Varianta C: 1 – základna, 2 – skříň, 3 – páka aretace, 4 – ovládací páka, 5 – ozubený hřeben, 6 - stojan



Obr. 24 - Detail principu varianty C: 1 – objímka, 2 – ozubený hřeben, 3 – hřídel, 4 – rohatka, 5 – ozubené kolo, 6 - západka

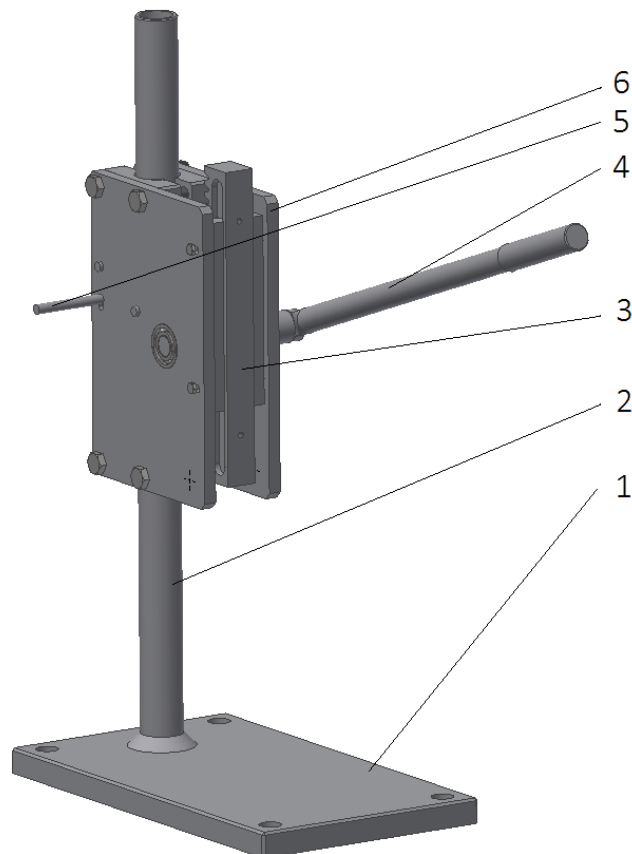
6.1.4 Výběr optimální varianty

Jako nejvhodnější řešení byla zvolena varianta C, kvůli jednoduchosti konstrukce a nízké ceně použitých dílů. Varianta umožňuje snadný posuv mechanismu po vertikální ose díky dvojici objímek na nosném sloupu. Výhodná je také možnost aretace mechanismu při vyvozování přítlačné síly díky soustavě rohatky se západkou, ovládané pomocí ovládacího čepu.

7 KONSTRUKCE PŘÍPRAVKU

Finální konstrukce vychází ze zvolené varianty C. Dále jsou popsány jednotlivé prvky konstrukce přípravku.

7.1 Prvky svařovacího přípravku



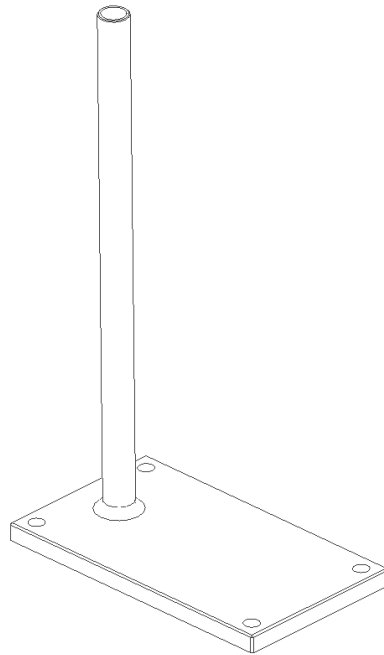
Obr. 25 - Finální varianta přípravku

1- základna, 2- sloup, 3- ozubený hřeben, 4- páka, 5- ovládací čep západky, 6- bočnice

Celková sestava přípravku se skládá ze dvou podsestav, a sice stojanu a skříně. Tyto podsestavy jsou detailně popsány níže.

7.1.1 Stojan

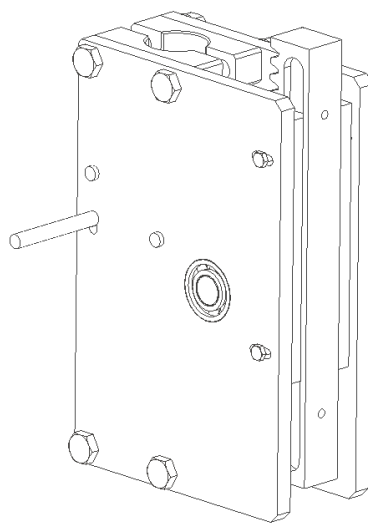
Stojan představuje nosnou kostru celého přípravku. Je to nerozebíratelný svařenec základny a sloupu. V základní desce přípravku se nacházejí čtyři díry o průměru 11 mm, které slouží k ukotvení svařovacího přípravku k pracovnímu stolu.



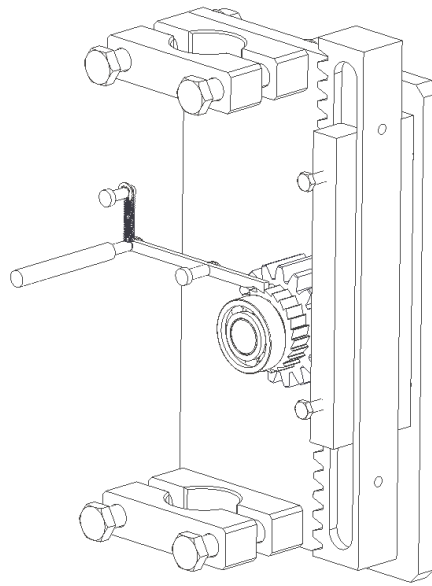
Obr. 26 - Stojan

7.1.2 Skříň

Skříň přípravku slouží jako nosný prvek celého mechanismu svařovacího přípravku. Skříň je ke stojanu připojena pomocí pohyblivých objímek. Se skříní lze tedy posouvat nahoru a dolů, podle výšky svařovaných dílů.



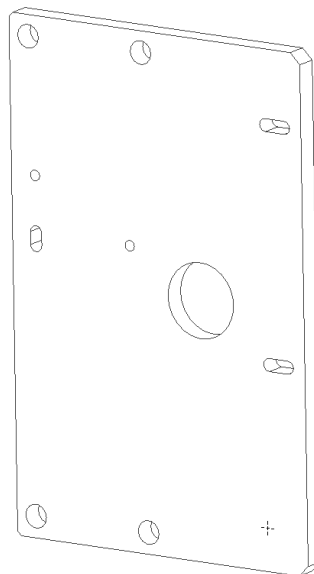
Obr. 27- Skříň



Obr. 28 - Detail skříňe

7.1.3 Bočnice

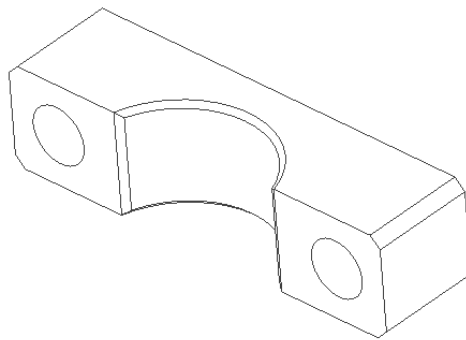
Bočnice jsou vyrobené z oceli třídy 11, z polotovaru o tloušťce 10 mm. Jejich funkce je jednak nosná, a také krycí, neboť částečně zabraňují přístupu nečistot, nebo případnému zranění obsluhy přípravku. Levá bočnice (z pohledu obsluhy) navíc nese aretační mechanismus rohatky se západkou a čep, jenž slouží k ovládní této aretace.



Obr. 29 - Bočnice

7.1.4 Objímka

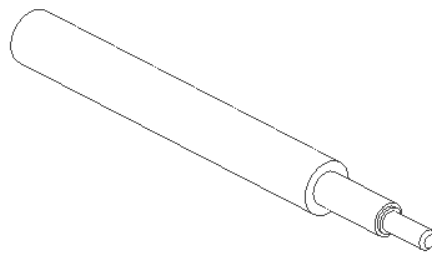
Objímka propojuje bočnice se stojanem konstrukce. Dva kusy jsou proti sobě staženy pomocí šroubů, čímž se vytvoří tření na rozhraní objímky a sloupu. To zajišťuje fixaci skříně v požadované poloze.



Obr. 30 - Objímka

7.1.5 Ovládací čep

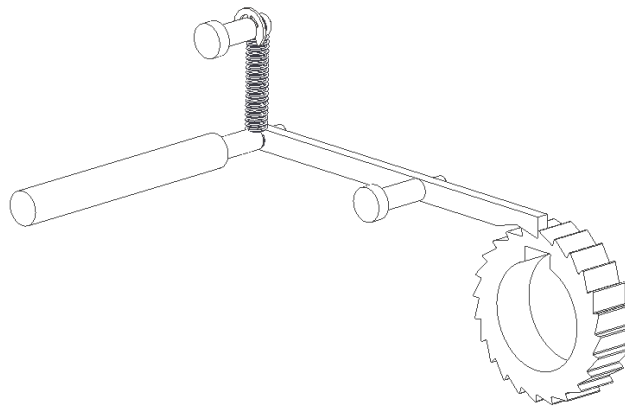
Obsluha řídí aretaci pomocí ovládacího čepu. Ten je připevněn k západce, která blokuje ozubení rohatky a zabraňuje tak zpětnému pohybu.



Obr. 31 - Ovládací čep

7.1.6 Rohatka se západkou

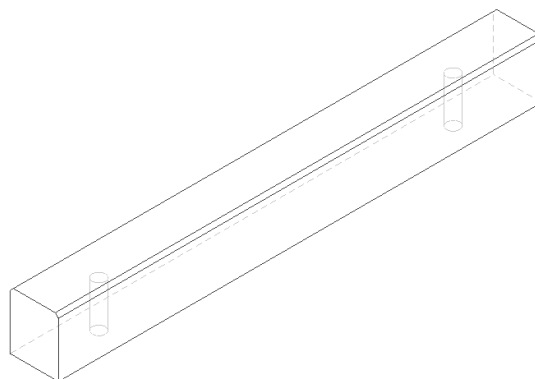
Sestava rohatky se západkou slouží k aretaci celého mechanismu. Západka funguje na principu dvouramenné páky, přičemž na jeden konec páky působí tažná pružina ukotvená na čepu. Při odblokování aretace obsluha zatáhne za ovládací čep, čímž překoná sílu pružiny a nadzvedne zobáček západky a rohatka se tak může otáčet i proti směru zubů.



Obr. 32 - Rohatka se západkou

7.1.7 Kolejnice

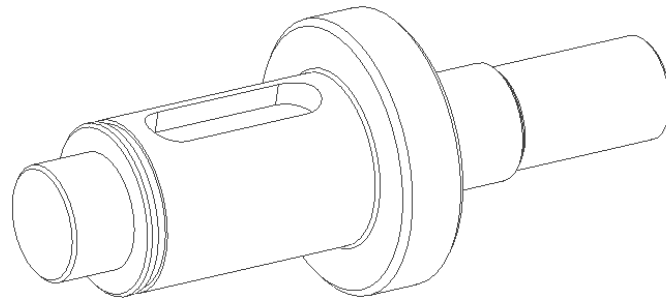
Kolejnice slouží k vedení ozubeného hřebenu po vertikální ose. Obě kolejnice jsou ukotveny pomocí šroubů v drážkách bočnic, kvůli nastavení vůle mezi ozubeným hřebenem a kolem.



Obr. 33 - Kolejnice

7.1.8 Hřídel

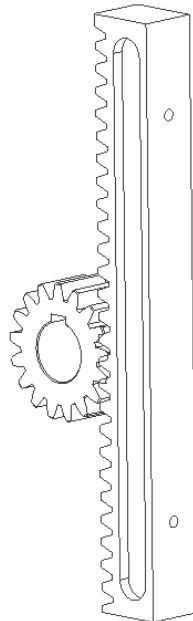
Hřídel umožňuje rotační pohyb ozubeného kola, se kterým je spojena pomocí přesného pera 8x7x28. Uložena je v bočnicích pomocí dvojice kuličkových ložisek 6003 2Z ZKL o rozměrech 17x35x10



Obr. 34 - Hřídel

7.1.9 Ozubené kolo a hřeben

Mechanismus ozubeného kola a hřebenu je základním prvkem celého svařovacího přípravku. Hlavní úlohou soustavy je převedení rotačního pohybu na translační, neboli převedení otočení páky na svislý pohyb ultrazvukové svářečky.

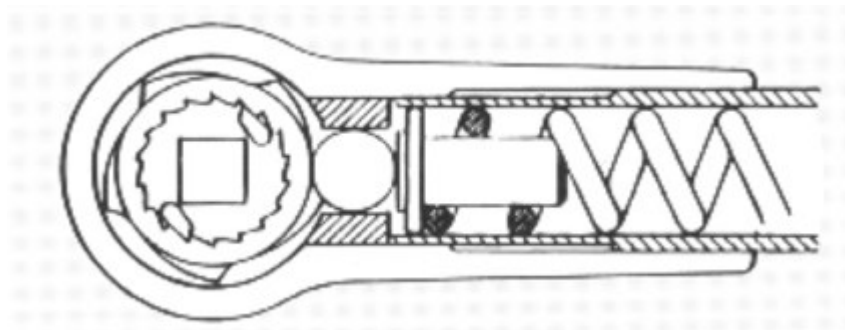


Obr. 35 - Ozubené kolo a hřeben

7.1.10 Momentový klíč

Momentový klíč má v přípravku dvojí funkci. Jednak slouží jako páka k vytvoření potřebného krouticího momentu, a také jako indikátor jeho velikosti. Momentový klíč je konstruován tak, aby při překročení mezního momentu, který se buď nastaví na stupnici

rukojeti, nebo displeji (podle konstrukce klíče), zabránil dalšímu zvyšování krouticího momentu. Mechanický momentový klíč funguje na principu kuličky, která je pomocí pružiny přitlačována na ozubení. Mezní moment se nastavuje tak, že pomocí závitu a šroubu zvýší, nebo sníží přítlak pružiny. Při překročení nastaveného momentu pak kulička překoná odpor pružiny a začne přeskakovat ozubení.

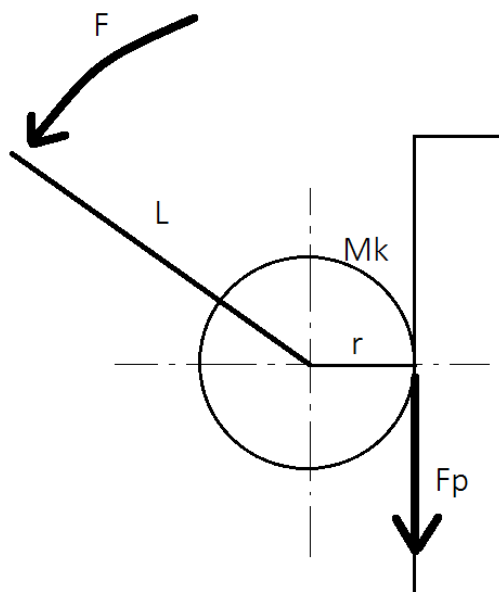


Obr. 36 - Princip momentového klíče

7.2 Přepočítání nastaveného krouticího momentu na přítlačnou sílu

7.2.1 Stanovení koeficientu „k“

Vzhledem k tomu, že mechanismus přípravku obsahuje ozubené kolo a hřeben, je nutné zjistit koeficient přepočtu vstupního krouticího momentu M_k na výslednou přítlačnou sílu F_p . Rozložení sil zobrazuje obr. 37.



Obr. 37 - Rozložení sil

kde: F -síla vyvozená obsluhou přípravku

L -délka momentového klíče

M_k - krouticí moment

r - poloměr ozubeného kola

F_p - výsledná přitlačná síla

Vzhledem k tomu, že momentový klíč indikuje velikost momentu, je brána jako vstupní hodnota velikost krouticího momentu. V tabulce hodnot je však uvedena i přibližná síla jakou musí obsluha působit na klíč, aby vznikl požadovaný moment.

Krouticí moment se obecně vypočítá jako působící síla vynásobená délkou ramena.

$$M_k = F_p \cdot r \text{ [Nm]} \quad (7.1)$$

výsledná přitlačná síla tedy bude:

$$F_p = \frac{M_k}{r} \text{ [N]} \quad (7.2)$$

koeficient přepočtu „ k “ pak můžeme vyjádřit jako:

$$k = \frac{1}{r} \text{ [-]} \quad (7.3)$$

v našem případě je poloměr roztečné kružnice ozubeného kola $r=26$ mm. Koeficient „ k “ tedy bude:

$$k = \frac{1}{26} \doteq 0,0385 \text{ [-]} \quad (7.4)$$

jestliže pak tímto koeficientem vynásobíme velikost krouticího momentu, dostaneme přímo hodnotu síly, jakou bude ultrazvuková svářečka přitlačována ke svařovanému materiálu.

V našem případě byl pro měření použit momentový klíč o délce $L=300$ mm, s rozsahem nastavitelných kroutících momentu 2 – 24 Nm. V tabulce jsou uvedeny příklady možných nastavení momentového klíče a odpovídající přitlačné síly.

F [N]	L [mm]	Mk [Nmm]	r [mm]	Fp [N]
6,7	300	2000	26	76,9
10,0	300	3000	26	115,4
13,3	300	4000	26	153,8
16,7	300	5000	26	192,3
20,0	300	6000	26	230,8
23,3	300	7000	26	269,2
26,7	300	8000	26	307,7
30,0	300	9000	26	346,2
33,3	300	10000	26	384,6
36,7	300	11000	26	423,1
40,0	300	12000	26	461,5
43,3	300	13000	26	500,0
46,7	300	14000	26	538,5
50,0	300	15000	26	576,9
53,3	300	16000	26	615,4
56,7	300	17000	26	653,8
60,0	300	18000	26	692,3
63,3	300	19000	26	730,8
66,7	300	20000	26	769,2
70,0	300	21000	26	807,7
73,3	300	22000	26	846,2
76,7	300	23000	26	884,6
80,0	300	24000	26	923,1

Tab. 3 - Možnosti nastavení momentového klíče

kde : F – síla vyvolaná obsluhou

L – délka momentového klíče

Mk – krouticí moment

r – poloměr roztečné kružnice oz. kola

Fp – výsledná přitlačná síla

7.3 Základní parametry

Přípravek pro svařování ultrazvukem má základní rozměry 600x200x350 mm (vxšxd).

Na přípravku lze nastavit mezní krouticí moment v rozsahu 2-24 Nm, který vyvolá přitlačnou sílu v rozsahu 77 – 923N.

7.4 Montáž přípravku

Prvním krokem při kompletaci a montáži přípravku bylo vytvoření pevné kostry (osy), na kterou by bylo možné přidávat další dílce. Tato kostra vznikla svařením základní desky a sloupu. Vzhledem k tomu, že byla základna obráběna technologií drátového vyřezávání s tolerancí do mínusu, bylo zapotřebí otvor pro sloup dodatečně zvětšit, aby mezi sloupem a základnou vznikla vůle a sloup se dal vložit do základny a přivařit.



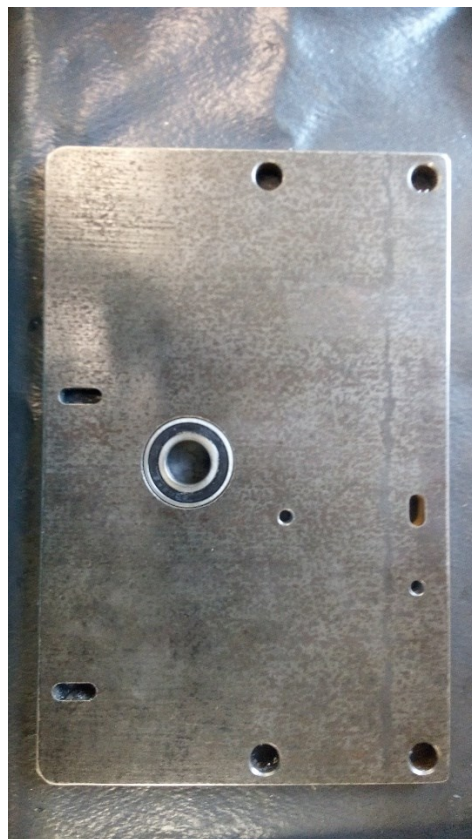
Obr. 38 - Sestava stojanu

Další fází byla kompletace skříně a samotného mechanismu přípravku. Na hřídel bylo nejprve nasazeno těsné pero, poté ozubené kolo a rohatka. Tato sestava byla poté zajištěna vnějším pojistným kroužkem.



Obr. 39 - Nasazení prvků na hřídel

Následovalo zahřátí ložisek pomocí horkovzdušné pistole, jenž vlivem teplotní roztažnosti, usnadnilo nalisování obou ložisek do bočnic přípravku.



Obr. 40 - Zalisování ložisek do bočnic

Na bočnice přípravku byl poté namontován aretační mechanismus složený z čepů, západky a pružiny.



Obr. 41 - Montáž aretačního mechanismu

Následně byla zkompletovaná hřídel zalisována do bočnic. K bočnicím byly poté přišroubovány objímky a takto vzniklá sestava byla nasazena na stojan.



Obr. 42 - Nalisování hřídele do bočnice

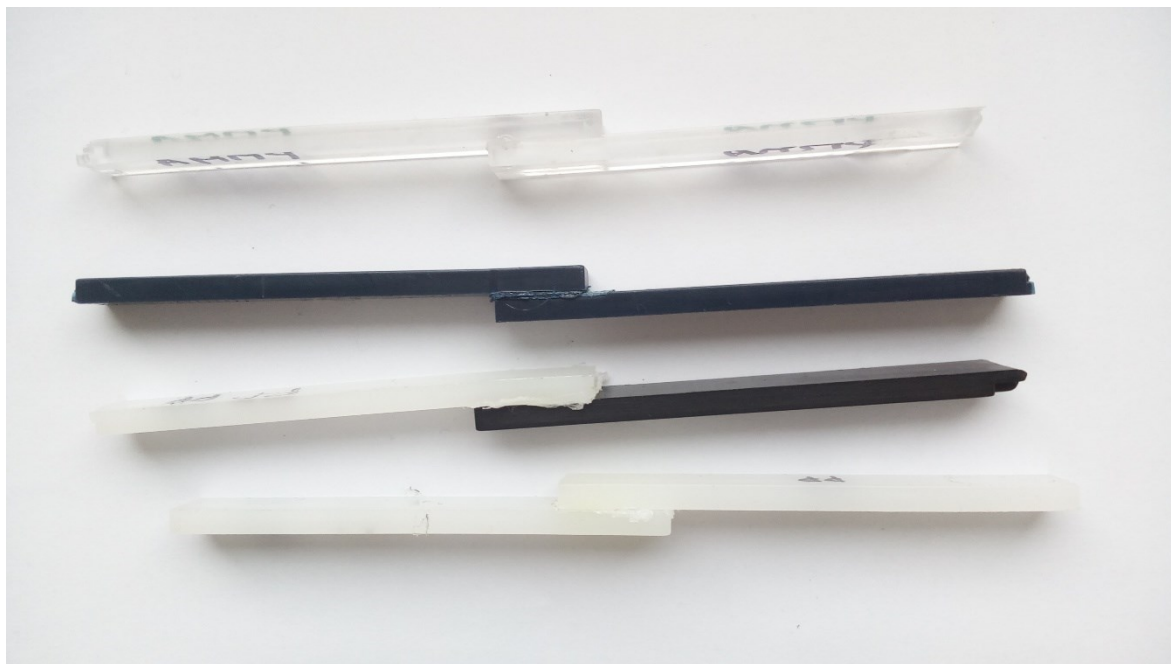
Poté byl doplněn systém aretace, tedy soustava čepů a západky. Do ozubeného hřebenu byly nasazeny obě kolejnice a pomocí nich byl následně hřeben upevněn k bočnicím. Posledním krokem pak bylo vymezení potřebné vůle hřebenu a kola.



Obr. 43 - Celková sestava

7.5 Testování funkčnosti přípravku

Testování svařovacího přípravku spočívalo v experimentálním svaření 20 plastových vzorků ze čtyř různých materiálů (ABS, PMMA, PP, PA), s různým nastavením přitlačné síly a různým svařovacím časem, přičemž byla sledována pouze funkčnost svařovacího přípravku a praktičnost jeho ovládání. Kvalita jednotlivých svarů je závislá na použitých parametrech přitlaku a času, a jako taková sledována nebyla. Pro účely testování funkčnosti byla k přípravku připevněna pomocí objímek ruční ultrazvuková svářečka (obr. 44) od firmy Herrmann Ultrasonics, zapůjčená firmou Plastika a.s. z Kroměříže.



Obr. 44 – Testované vzorky



Obr. 45 - Ruční svářečka od firmy Herrmann Ultrasonics

7.6 Výsledky testování

V průběhu testování byly svařeny čtyři kombinace (ABS+ABS, PMMA+ABS, PP+PP, PA+PA) plastových vzorků s rozdílným svařovacím časem a přitlačnou silou. Svařovací frekvence byla 20 kHz. Po úspěšném svaření vzorků byla zjišťována hloubka svaru (Tab. 4). V průběhu testování byla ověřena funkčnost celého přípravku a lze tedy konstatovat, že byl navržen správně a že zvolená varianta je vyhovující.

Číslo vzorku	Materiál dílů	Svařovací čas	Přítlačná síla	Hloubka svaru	Frekvence
		t [s]	F [N]	H [mm]	f [kHz]
1	ABS + ABS	0,2 - 0,5	230,8	0,18	20
2	ABS + ABS	0,5 - 0,7	307,7	0,15	20
3	ABS + ABS	0,7 - 1	500,0	0,22	20
4	ABS + ABS	1 - 1,5	653,8	0,45	20
5	ABS + ABS	0,2 - 0,5	730,8	0,51	20
6	PMMA + ABS	0,5 - 0,7	230,8	0,16	20
7	PMMA + ABS	0,7 - 1	307,7	0,17	20
8	PMMA + ABS	1 - 1,5	500,0	0,25	20
9	PMMA + ABS	0,2 - 0,5	653,8	0,39	20
10	PMMA + ABS	0,5 - 0,7	730,8	0,48	20
11	PP + PP	0,7 - 1	230,8	0,17	20
12	PP + PP	1 - 1,5	307,7	0,14	20
13	PP + PP	0,2 - 0,5	500,0	0,20	20
14	PP + PP	0,5 - 0,7	653,8	0,35	20
15	PP + PP	0,7 - 1	730,8	0,42	20
16	PA + PA	1 - 1,5	230,8	0,21	20
17	PA + PA	0,2 - 0,5	307,7	0,19	20
18	PA + PA	0,5 - 0,7	500,0	0,20	20
19	PA + PA	0,7 - 1	653,8	0,32	20
20	PA + PA	1 - 1,5	730,8	0,44	20

Tab. 4 - Parametry použité pro testování

ZÁVĚR

Téma této práce spadá mezi nekonvenční technologie. V první části se práce zabývá popisem progresivních technologií, teorií ultrazvuku, ultrazvukového svařování a také popisem základních částí ultrazvukových svářeček. Ve druhé části jsou poté navrženy tři varianty, jenž se snažily vyhovět základním požadavkům zadaným firmou Plastika a.s.

Mechanismus první varianty fungoval na principu soustavy pružin a dorazu. Tato varianta, ač jednoduchá na konstrukci, byla zavržena z důvodu složitého nastavování různých přítláčných sil. Ve druhé variantě bylo svářečkou pohybováno pomocí dvojice pneumatických pístů. Přestože tato varianta umožňuje mnohem přesněji kontrolovat vstupní parametry svařovacího procesu, byla zavržena z důvodu větší pořizovací ceny a také nutnosti použití řídicí elektroniky. Třetí varianta byla navržena opět na čistě mechanickém principu. Obsluha přípravku vyvine potřebnou sílu na momentový klíč, jenž slouží jako páka. Při překročení mezního krouticího momentu nastaveného na klíči se začne klíč protáčet a zabrání dalšímu zvyšování momentu. Zpětnému pohybu zabráňuje aretační systém složený z rohatky a západky. Tato varianta nejlépe vystihovala požadavky firmy., jak z pohledu jednoduchosti konstrukce a výroby, tak i případné údržby.

Zvolená varianta byla poté zpracována jako komplexní 3D model v parametrickém modeláři Autodesk Inventor 2017 a z těchto modelů byla poté vytvořena kompletní výkresová dokumentace, jenž byla zadána do výroby.

Díly přípravku byly navrženy převážně z konstrukční oceli třídy 11, kromě ozubeného kola, které bylo vyrobeno z oceli 14 220 a hřebenu, který byl vyroben z oceli 12 060. Konstrukce svařovacího přípravku byla navržena s ohledem na jednoduchost výroby a dostupnost jednotlivých dílů. S výjimkou ložisek, na jejichž montáž je potřeba lis, je montáž i demontáž možná bez speciálních přípravků, pouze s běžným dílenským nářadím.

V závěru práce byl poté přípravek testován, aby byla vyzkoušena jeho praktičnost a funkčnost. Předmětem testu bylo experimentální svaření dvaceti vzorků ze čtyř různých plastů (ABS, PMMA, PA, PP). Testování bylo úspěšné a svařovací přípravek byl shledán funkčním a použitelným pro technologii ultrazvukového svařování. Svařovací přípravek však může být použit nejen pro praxi ve firmě, ale například i pro měření studenty, jenž se budou zabývat technologií ultrazvukového svařování.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Sýkorová Libuše: *Úvod do nekonvenčních technologií* přednáška, UTB FT Zlín, 2011,
- [2] ŠVEHLA, Štefan a Zdenko FIGURA. *Ultrazvuk v technológii*. 1.vyd. Bratislava: Alfa, 1984, 521 s.
- [3] idoc.vsb.cz - Teorie a technologie svařování - Ultrazvukové svařování [online].
<http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-06-41.pdf>
- [4] TURŇA, M. *Špeciálne metódy zvarovania*. 1.vyd. Bratislava: Alfa, 1989. 384 s. ISBN 80-05-00097-9.
<https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1659>
- [5] *Ultrasonic welding* [online].[cit.2012-0505]. Dostupný na WWW:
http://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasonic_welding>
- [6] MAŇKOVÁ, I.*Progresívne technológie*. Vienala Košice, 2000.ISBN 80-7099-430-4
- [7] Ultraschall, Herrmann. *Ultrasonic welding technology: Basics* Plastics. [PDF] 2014.
- [8] TROUGHTON, Michael John. *Handbook of plastics joining: a practical guide*. 2nd ed. Cambridge, UK : TWI/The Welding institute, 2008. ISBN 978-081-5515-814.
- [9] Solutins, Dukane Intelligent Assembly. *Guide to Ultrasonic Plastics Assembly*. 2009 Dukane Drive, St. Charles, Illinois 60174 USA : Dukane. 403-536-02.
- [10] Encyklopedie fyziky, Jaroslav Reichl, Martin Všeticka - Mechanické kmitání a vlnění - Dopplerův jev [online].
<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/419-vysvetleni-jevu>
- [11] Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie - *HSV speciální metody svařování - Svařování ultrazvukem* [online].
http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__svarovani_ultrazvukem__mrna.pdf
- [12] Fakulta dopravní CVUT - *Ultrazvuk v robotice* [online].
<https://www.fd.cvut.cz/department/k620/ROD/CVICENI/texty/uzvkrob.pdf>
- [13] WMS s.r.o. *Ultrazvukové svařování* DUKANE [online]. URL:

<http://www.dukcorp.eu/cz/technologie/ultrazvukove-svarovani/>

[14] dlabos.wz.cz - Elektroakustické měniče [online].

http://dlabos.wz.cz/en/Eletkroakusticke_menice.html

[15] hielscher.com - Hielscher - Ultrasound Technology [online].

https://www.hielscher.com/400s_p.htm

[16] Elektronická učebnice - Fyzika - Mechanické vlnění - Mechanické vlnění na vodní hladině [online].

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

f	frekvence	[Hz]
T	perioda	[s]
λ	vlnová délka	[m]
c	rychlost šíření vlnění v prostředí	[m.s ⁻¹]
T	teplota vzduchu	[°C]
Z _s	akustická impedance prostředí	[Pa.s.m ⁻¹]
v	rychlost vlny	[m.s ⁻¹]
F	vstupní síla	[N]
L	délka momentového klíče	[mm]
M _k	kroučící moment	[Nm]
r	poloměr roztečné kružnice ozubeného kola	[mm]
F _p	přítlačná síla	[N]
k	koeficient přepočtu kroučícího momentu na přítlačnou sílu	[-]

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Klasifikace nekonvenčních technologií</i>	12
<i>Obr. 2 - Ultrazvukové obrábění</i>	14
<i>Obr. 3 - Rozdělení zvukového spektra</i>	15
<i>Obr. 4 - Tvary vln.</i>	17
<i>Obr. 5 - Druhy vln.....</i>	18
<i>Obr. 6 - Deformace krystalu</i>	21
<i>Obr. 7 - Dopplerův efekt</i>	22
<i>Obr. 8 - Sonotroda pro ultrazvukové svařování</i>	23
<i>Obr. 9 - Princip ultrazvukového svařování</i>	24
<i>Obr. 10 - Schéma zařízení.....</i>	31
<i>Obr. 11 - Ultrazvuková svářečka - ruční</i>	32
<i>Obr. 12 - Ultrazvuková svářečka - stojanová</i>	32
<i>Obr. 13 - Ultrazvuková svářečka - skříňová.....</i>	33
<i>Obr. 14 - Konvertor pro ultrazvukové svařování</i>	34
<i>Obr. 15 - Sonotrody pro ultrazvukové svařování.</i>	34
<i>Obr. 16 - Možná konstrukce energetického usměrňovače na plastovém dílu.</i>	35
<i>Obr. 17 - Nýtování pomocí ultrazvuku.....</i>	36
<i>Obr. 18 - Zapuštění kovových vložek pomocí ultrazvuku</i>	36
<i>Obr. 19 - Bodové svařování pomocí ultrazvuku</i>	37
<i>Obr. 20 - Lemování pomocí ultrazvuku</i>	37
<i>Obr. 21- Varianta A</i>	41
<i>Obr. 22 - Varianta B</i>	42
<i>Obr. 23 - Varianta C.....</i>	43
<i>Obr. 24 - Detail principu varianty C</i>	44
<i>Obr. 25 - Finální varianta přípravku.....</i>	45
<i>Obr. 26 - Stojan</i>	46
<i>Obr. 27- Skříň</i>	46
<i>Obr. 28 - Detail skříňe</i>	47
<i>Obr. 29 - Bočnice.....</i>	47
<i>Obr. 30 - Objímka.....</i>	48
<i>Obr. 31 - Ovládací čep</i>	48
<i>Obr. 32 - Rohatka se západkou.....</i>	49

<i>Obr. 33 - Kolejnice</i>	49
<i>Obr. 34 - Hřídel</i>	50
<i>Obr. 35 - Ozubené kolo a hřeben</i>	50
<i>Obr. 36 - Princip momentového klíče</i>	51
<i>Obr. 37 - Rozložení sil</i>	51
<i>Obr. 38 - Sestava stojanu</i>	54
<i>Obr. 39 - Nasazení prvků na hřídel</i>	55
<i>Obr. 40 - Zalisování ložisek do bočnic</i>	55
<i>Obr. 41 - Montáž aretačního mechanismu</i>	56
<i>Obr. 42 - Nalisování hřídele do bočnice</i>	56
<i>Obr. 43 - Celková sestava</i>	57
<i>Obr. 44 – Testované vzorky</i>	58
<i>Obr. 45 - Ruční svářečka od firmy Herrmann Ultrasonics</i>	58

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 - Rychlost šíření ultrazvuku v závislosti na prostředí.....</i>	<i>20</i>
<i>Tab. 2 - Možnost svařování ultrazvukem pro jednotlivé druhy plastu.....</i>	<i>28</i>
<i>Tab. 3 - Možnosti nastavení momentového klíče</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 4 - Parametry použité pro testování</i>	<i>59</i>

SEZNAM PŘÍLOH

Číslo přílohy	Název přílohy	Číslo výkresu
1.	SESTAVA	DP-01
2.	SKŘÍŇ	DP-01-01
3.	STOJAN	DP-01-02
4.	HŘEBEN	DP-01-01-01
5.	OZUBENÉ KOLO	DP-01-01-02
6.	HŘÍDEL	DP-01-01-03
7.	BOČNICE PRAVÁ	DP-01-01-04
8.	BOČNICE LEVÁ	DP-01-01-05
9.	OBJÍMKA	DP-01-01-06
10.	KOLEJNICE PRAVÁ	DP-01-01-07
11.	KOLEJNICE LEVÁ	DP-01-01-08
12.	ZÁPADKA	DP-01-01-09
13.	ROHATKA	DP-01-01-10
14.	ČEP PRUŽINY	DP-01-01-11
15.	ČEP	DP-01-01-12
16.	OVLÁDACÍ ČEP	DP-01-01-13
17.	ZÁKLADNA	DP-01-02-01
18.	SLOUP	DP-01-02-02

