

**Факултет инжењерских наука**



**Назив студијског програма: Машинско инжењерство**

**Ниво студија: Мастер академске студије**

**Модул: Индустријски инжењеринг**

**Предмет: Неконвенционални поступци обраде**

**Број индекса: 327/2008**

**Јована М. Донић**

**Ултразвучно заваривање пластичних маса**  
**мастер рад**

**Комисија за преглед и одбрану:**

1. проф. др Богдан Недић
2. \_\_\_\_\_
3. \_\_\_\_\_

Датум одбране: \_\_\_\_\_

Оцена: \_\_\_\_\_

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ

ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА

Катедра за: ИНДУСТРИЈСКИ ИНЖЕЊЕРИНГ

Предмет: **Неконвенционални поступци обраде**

## **МАСТЕР РАД**

са темом:

### **Ултразучно заваривање пластичних маса**

За кандидата: **Донић Јована**, број индекса **327/2008**

У оквиру дипломског рада кандидат треба да размотри технолошке поступке примене ултразучне обраде. Посебан акценат дати ултразвучном заваривању пластичних маса. У посебном делу рада треба извршити експериментална испитивања заваривања фолија од пластичних маса различитих карактеристика.

Мастер рада треба да садржи следеће целине:

1. Уводна разматрања.
2. Приказ технологија ултразвучне обраде.
3. Ултразвучно заваривања пластичних маса.
4. Експериментална испитивања.
5. Закључци.
6. Литература.

ШЕФ КАТЕДРЕ

Проф. др Милентије Стефановић

ПРЕДМЕТНИ НАСТАВНИК

Проф. др Богдан Недић

Крагујевац, 2011. год.

## УЛТРАЗВУЧНО ЗАВАРИВАЊЕ ПЛАСТИЧНИХ МАСА

**Резиме:** Пластичне масе су појам који се користи као заједнички термин за термопласте и дурупласте. Ултразвучно заваривање је процес који се примењује код термопласта. При заваривању термопласта електричне осцилације се претварају у механичке осцилације. Оне се преносе на предмет обраде преко трансформатора и сонотроде. Доведена енергија се претвара у топлотну за пластифицирање односно растапање. Комбинујући ултразвучно загревање и притисак омогућује се заваривање, односно спајање делова од пластичних маса. У оквиру рада извршена су испитивања могућности ултразвучног заваривања фолија од различитих пластичних маса.

**Кључне речи:** пластичне масе, полимери, термопласти, ултразвучно заваривање, пластифицирање, сонотрода.

## ULTRASONIC PLASTIC WELDING

**Summary:** Plastics are a term that is used for thermoplasts and duroplaste. Ultrasonic welding is a process that is used for thermoplastics. For welding thermoplastics electrical oscillations are converted into mechanical oscillation. They are transferred to the workpiece through the transformer and the sonotrode. Brought energy is converted into heat for melting or powder coating. Combining ultrasound heating and pressure welding is allowed, or merge parts of plastics. The work includes research of the possibilities of ultrasonic welding foils of different plastics.

**Key words:** plastics, polymers, thermoplastics, ultrasonic welding, powder coating, sonotroda.

# САДРЖАЈ

## 1. УВОД

## 2. ВРСТЕ ПЛАСТИЧНИХ МАСА И ЊИХОВЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ

- 2.1 Пластичне масе и њихова класификација
  - 2.1.1 Температурни режим прераде термопласта
  - 2.1.2 Температурни режим прераде дуропласта
- 2.2 Технолошко понашање пластичних маса
  - 2.2.1 Понашање термопласта
  - 2.2.2 Понашање дуропласта
- 2.3 Карактеристике пластичних маса
  - 2.3.1 Механичке особине
  - 2.3.2 Физичке особине
  - 2.3.3 Термичке особине
  - 2.3.4. Електричне особине
- 2.4 Врсте пластичних маса
  - 2.4.1 Полипропилен – PP
  - 2.4.2 Полиетилен – PE
  - 2.4.3 Полистирен – PS
  - 2.4.4 Акрилонитрил бутадиен стирен – ABS
  - 2.4.5 Акрилни термопласти
  - 2.4.6 Полиацетат – POM
  - 2.4.7 Полиамид – PA
  - 2.4.8 Поликарбонат – PC
  - 2.4.9 Полифенилен оксид – PPO
  - 2.4.10 Поливинил – хлорид – PVC
- 2.5 Систем означавања пластичних маса

## 3. ТЕХНОЛОГИЈЕ ЗАВАРИВАЊА ПЛАСТИЧНИХ МАСА

- 3.1 Класификација поступака заваривања
- 3.2 Жлебови за заваривање
- 3.3 Контактнo топлотнo заваривање
  - 3.3.1 Суштина процеса
  - 3.3.2 Основни параметри контактнo топлотнoг заваривања
- 3.4 Гасно заваривање
  - 3.4.1 Суштина процеса
  - 3.4.2 Основни параметри гасног заваривања
- 3.5 Екструзионо заваривање
  - 3.5.1 Суштина процеса
  - 3.5.2 Основни параметри екструзионог заваривања
- 3.6 Високофреквентно заваривање
  - 3.6.1 Суштина процеса
  - 3.6.2 Основни параметри високофреквентног заваривања
- 3.7 Заваривање трењем
  - 3.7.1 Суштина процеса
  - 3.7.2 Основни параметри заваривања трењем

### 3.8 Заваривање зрачењем

#### 3.8.1 Суштина процеса

#### 3.8.2 Основни параметри заваривања зрачењем

## **4. УЛТРАЗВУЧНО ЗАВАРИВАЊЕ ПЛАСТИЧНИХ МАСА**

### 4.1 Ултразвук

### 4.2 Врсте таласа

### 4.3 Генератори ултразвука

### 4.4 Ултразвучно заваривање термопласта

#### 4.4.1 Суштина процеса

#### 4.4.2 Уређаји за ултразвучно заваривање

#### 4.4.3 Подела ултразвучног заваривања

#### 4.4.4 Параметри процеса ултразвучног заваривања

#### 4.4.5 Радни циклуси при ултразвучном заваривању

### 4.5 Утицај услова производње делова на ултразвучно заваривање

#### 4.5.1 Утицај влажности

#### 4.5.2 Утицај услова прераде

#### 4.5.3 Време складиштења и утицај регенерата

#### 4.5.4 Средства за одвајање делова из алата за бризгање

### 4.6 Конструктивно обликовање делова за ултразвучно заваривање

#### 4.6.1 Конструкција делова за ултразвучно заваривање

### 4.7 Алат за ултразвучно заваривање (сонотрода)

#### 4.7.1 Израда сонотрода

## **5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА**

## **6. ЗАКЉУЧАК**

## **ЛИТЕРАТУРА**

## 1. УВОД

Пластичне масе, захваљујући могућностима прилагођавања различитим захтевима, примењују се у практично свим областима људске делатности. Користе се за израду производа различите намене, од производа широке потрошње до најсавременије телекомуникационе и свемирске опреме.

Правилан избор пластичних маса, као конструкционог материјала, могућ је само ако су познате све релевантне конструкцијске карактеристике пластичних маса. Поглавље 2 садржи преглед пластичних маса које се најчешће користе, са основним особинама, поступцима прераде и применом.

У поглављу 3 је дат кратак преглед свих технологија заваривања пластичних маса. Сваки поступак има своје предности подручја примене. Процес заваривања је могућ код готово свих термопласта и изводи се у термопластичном стању. Познато је да заваривање термопласта има низ предности у односу на друге поступке спајања. То не значи да су наведени поступци замена за класичне поступке спајања. Они допуњавају друге поступке спајања, односно треба их применити тамо где су тешко или потпуно неизводљиви.

Поглавље 4 је посвећено ултразвучном заваривању пластичних маса. Описан је настанак и пренос ултразвучних таласа, суштина процеса ултразвучног заваривања, конструкција уређаја за заваривање, дата је подела ултразвучног заваривања и утицај услова производње делова (бризгањем и екструдирањем) на заваривање. Са циљем остваривања рационалне производње спојених делова, треба имати у виду не само конкретно извођење поступка ултразвучног заваривања, већ извршавање задатака који том поступку могу или треба да претходе. Један од тих задатака је и конструисање. Конструкцијско обликовање је једна фаза конструисања. Исправно конструкцијско обликовање треба да одговара материјалу дела конструкције и поступку његове производње.

У поглављу 5 су приказана експериментална испитивања. Вршено је ултразвучно заваривање различитих фолија од пластичних маса. Варирани су параметри, као што су учестаност, време хлађења, време заваривања и притисак.

На крају рада дат је закључак и преглед коришћене литературе.

## 2. ВРСТЕ ПЛАСТИЧНИХ МАСА И ЊИХОВЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ

### 2.1 ПЛАСТИЧНЕ МАСЕ И ЊИХОВА КЛАСИФИКАЦИЈА

Пластичне масе су појам који се користи као збирни термин за термопласте и duroпласте, односно полупрерађевине или прерађевине добијене из две групе вештачких материја, приказане у табели 2.1 [5].

Вештачки полимерни материјали деле се на:

- модификоване природне и
- синтетичке полимере.

Синтетички полимери се деле на три групе: поликондензати, полимеризати и полиадукти.

| Вештачке материје              |                                                                |                                                                  |                                                           |                               |                                                                                                          |                                  |                      |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------|
| Модификоване природне материје |                                                                | Синтетичке материје                                              |                                                           |                               |                                                                                                          |                                  |                      |
|                                |                                                                | Поликондензати                                                   |                                                           | Полимеризати                  |                                                                                                          | Полиадукти                       |                      |
| Дуроласти                      | Термоласти                                                     | Дуроласти                                                        | Термоласти                                                | Дуроласти                     | Термоласти                                                                                               | Дуроласти                        | Термоласти           |
| Казеинске                      | Целулозни нитрат<br>Целулозни ацетат<br>Целулозни ацетобутират | Феноласти<br>Аминоласти (уреа и метаминске)<br>Алкиди<br>Силкони | Линеарни засићени полиестри<br>Полиамиди<br>Поликарбонати | Умрежени незасићени полиестри | Полиметилен<br>Полипропилен<br>PVC<br>Полиметакрилати<br>Полистерол<br>Полиацетали<br>Полифлуоркарбонски | Епоксиди<br>Умрежени полиуретани | Линеарни полиуретани |

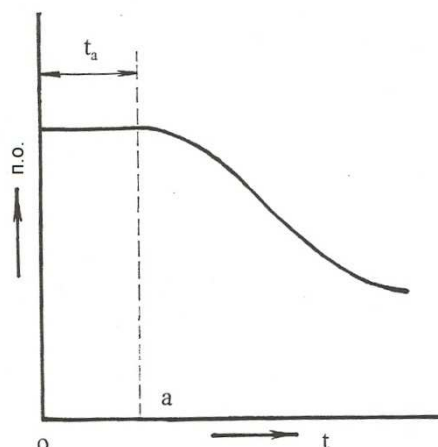
Табела 2.1 Вештачке полимерни материјали [5]

Да би се омогућила прерада вештачких материја потребно је савладавати међумолекуларне силе. Што су макромолекули ближи један другом међумолекуларна сила је већа.

#### 2.1.1 ТЕМПЕРАТУРНИ РЕЖИМ ПРЕРАДЕ ТЕРМОПЛАСТА

Температурни режим прераде термопласта разликује се за аморфне и делимично кристалне термопласте. Код аморфних термопласта промена

облика првенствено зависи од температуре и може се приказати дијаграмом (слика 2.1 [5]).

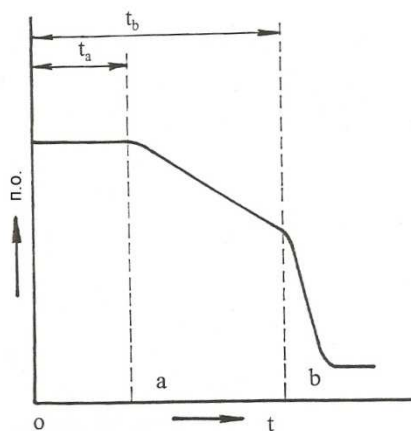


*Слика 2.1 Температурни режим прераде аморфних термопласта [5]*

Могућност прераде аморфних термопласта: п.о. – постојаност облика,  $t$  – температура, од 0 до  $a$  – тврдо,  $a$  – почетак омекшавања, десно од  $a$  – могућност промене облика расте.

Прерада аморфних термопласта се врши при већој температури и нижем вискозитету. Наглим хлађењем спречава се унутрашње напрезање у готовом производу.

Делимично кристални термопласти при повећању температуре понашају се као аморфни. Са достизањем температуре топљења кристала долази до наглог пада вискозитета (слика 2.2 [5]). Код делимично кристалних термопласта, услед наглог хлађења, долази до тзв. замрзавања, које доводи до промене особина готовог производа (услед накнадне кристализације).

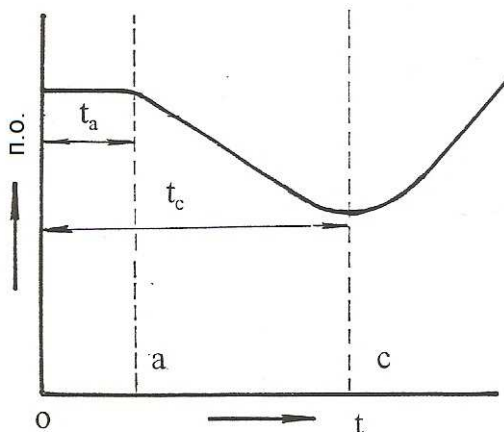


*Слика 2.2 Температурни режим прераде делимично кристалних термопласта [5]*

Могућност прераде делимично кристалних термопласта: п.о. – постојаност облика,  $t$  – температура, од 0 до  $a$  – тврдо,  $a$  – почетак омекшавања аморфног дела,  $b$  – температура топљења кристала.

### 2.1.2 ТЕМПЕРАТУРНИ РЕЖИМ ПРЕРАДЕ ДУРОПЛАСТА

Код прераде дуропласта деловањем повишене температуре долзи до снижавања вискозитета. Код одређених температура долази до реакције умрежавања, вискозитет нагло расте и губи се пластичност масе (слика 2.3).



Слика 2.3 Температурни режим прераде аморфног дуропласта [5]

Прерада аморфног дуропласта: п.о. – постојаност облика,  $t$  – температура, од 0 до  $a$  – тврдо,  $a$  – почетак омекшавања,  $c$  – температура почетка реакције умрежавања.

Код прераде дуропласта режим обраде треба тако подесити да до умрежавања дође тек након постизања жељеног облика.

## 2.2 ТЕХНОЛОШКО ПОНАШАЊЕ ПЛАСТИЧНИХ МАСА

Технолошко понашање пластичних маса зависи од облика макромолекула и међумолекуларних сила. Према облику макромолекула вештачких, односно високомолекуларних једињења, могуће су две структуре:

- ланчана (кончаста) и
- умрежена форма.

На основу основне структурне грађе, полимерни материјали се деле у две основне групе:

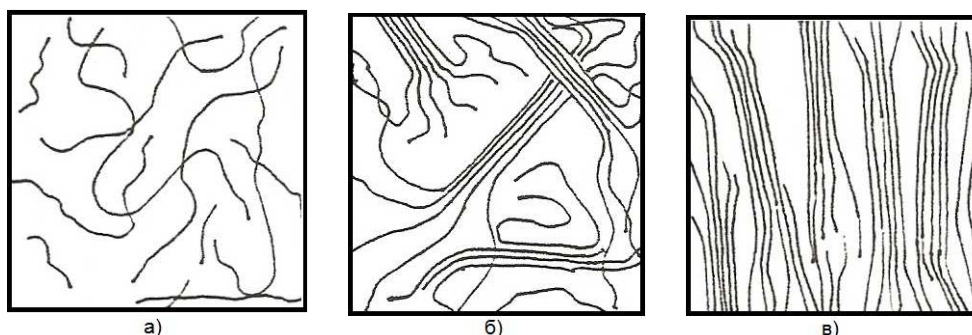
1. полимерни материјали са ланчаним линеарним макромолекулима (термопласти),
2. полимерни материјали са макромолекулима просторно умрежене форме (дуропласти).

Између ове две идеалне структуре налази се низ варијанти што омогућује велике варијације технолошког понашања различитих полимерних материјала.

Материје у чврстом агрегатном стању се деле на:

- кристалне и
- аморфне.

Код природних материјала, нарочито код метала преовлађује кристални карактер. Међутим, већина вештачких материјала налази се у аморфном стању, у стању у ком молекули нису сређени у геометријске облике односно по одређеном систему, као што је случај код кристалних. На слици 2.4 [3] дат је шематски приказ стања термопласта.



Слика 2.4 Шематски приказ стања термопласта: а) аморфно, б) делимично кристално, в) молекули су орјентисани [3]

## 2.2.1 ПОНАШАЊЕ ТЕРМОПЛАСТА

Три основна стања термопласта су:

- чврсто,
- термоеластично и
- термопластично.

Код претежно аморфних термопласта као што су: полиакрилати, полистирол, PVC, поликарбонати, целулозни деривати и слично, прелаз из једног стања у друго догађа се унутар ширег или ужег температурног интервала. Тај интервал се назива подручје омекшавања, односно температура омекшавања или температура прелаза у стакласто стање. То је тзв. температура прелаза другог реда ( $T_g^I$ ) и температура течења односно температура прелаза првог реда ( $T_f$ ).

Код делимично кристалних термопласта као што су полиетилен, полипропилен, полиамид, полиуретани, прелазно подручје се сужава на

интервал од неколико степени. То значи да не постоји прелазна тачка  $T_{kl}$  – температура топљења кристала.

Термопласти показују, у нормалном стању, механичке особине сличне особинама осталих чврстих тела, имају одговарајући геометријски облик, тврдоћу и тако даље. То важи за подручје од врло ниских температура до температура омекшавања  $T_g^l$ . Ипак и у том подручју долази до промене особина. Полазећи од собне температуре према нижим температурама настаје кртост, а према вишим омекшавање. Температура омекшавања  $T_g^l$  технички важних, тврдых термопласта, је између 70 и 150°C. За меке термопласте она се помера према нижим температурама.

Ако се повећањем температуре пређе температура омекшавања  $T_g^l$ , материјал прелази у термоеластично стање и понаша се слично гуми. У таквом стању материјал се може подврћи еластичној промени геометријског облика, а хлађењем испод  $T_g^l$  он се замрзава и задржава нови геометријски облик. Термопластично подручје је врло важно за прераду, јер омогућује промену облика без механичке обраде. Даљим повећањем температуре, преко термопластичног подручја, долази се до подручја течења  $T_f$ . У том подручју материјал губи постојаност геометријског облика и прелази у стање слично течности. Термопластично стање индустријски се користи за израду полупрерађевина и готових производа, ливењем под притиском, екструзијом, заваривањем итд. Даљим повећањем температуре изнад температуре течења долази се до температуре распада  $T_r$ . Сва три подручја су код аморфних термопласта изразита.

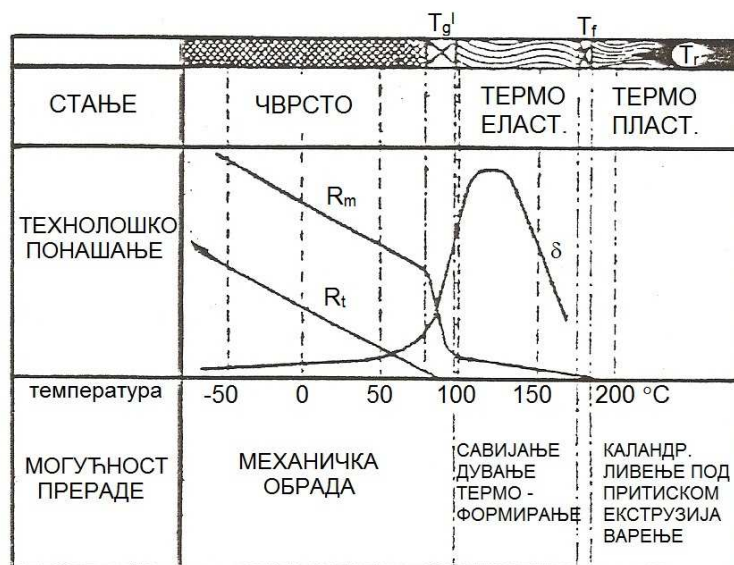
У чврстом стању на температури испод  $T_g^l$ , нема кретања молекула. Кретање молекула је могуће само деловањем спољашњих сила.

У термопластичном стању постоји слободно микро – Брауново кретање. То значи да се крећу само сегменти макромолекула, а макромолекули као целина се не крећу.

У термопластичном стању се јавља микро и макро-Брауново кретање, што значи да су макромолекули покретни.

Положај и ширина појединих подручја су различити у зависности од конституције термопласта. Термопласти могу бити тврди и меки, зависно од вредности температуре омекшавања  $T_g^l$ .

На слици 2.5 [3] приказан је дијаграм стања термопласта и могућност њихове прераде.



Слика 2.5 Дијаграм стања термопласта:  $R_m$  – јачина на кидање;  $\delta$  – издужење;  $R_t$  – граница течења;  $T_g^l$  – температура омекшавања;  $T_f$  – температура течења;  $T_r$  – температура распада [3]

## 2.2.2 ПОНАШАЊЕ ДУРОПЛАСТА

Дуропласти су саграђени од тродимензионалних умрежених макромолекула. Због јаких међумолекуларних сила сегменти се практично не могу кретати па чак ни на повишеној температури. Зато су ови материјали практично само у чврстом стању. Деловањем температуре долази до малог термоеластичног омекшавања које се при преради не може користити, јер је премало. Ако се температура сувише повећа долази до делимичног или потпуног распада. Већина дуропласта, према својој конструкцији, одговара карактеру стакла, по природи су крти и тек у комбинацији са одговарајућим пунилима (додаци органског или неорганског порекла, који побољшава неке особине пластичних маса) добијају особине које их чине практично употребљивим. Заваривање дуропласта није могуће па се спајање најчешће врши лепљењем.

## 2.3 КАРАКТЕРИСТИКЕ ПЛАСТИЧНИХ МАСА

Карактеристике пластичних маса се деле на:

- механичке особине,
- физичке особине,
- термичке особине и
- електричне особине.

### 2.3.1 МЕХАНИЧКЕ ОСОБИНЕ

У механичке особине пластичних маса спадају:

- чврстоћа на истезање,
- отпорност на савијање,
- отпорност на удар,
- пузање материјала и
- тврдоћа.

Истежање је деформација која настаје дејством сила истог правца и супротног смера у правцу уздужне осе тела. Таквим деловањем сила, долази до појаве уздужне дилатације и попречне контракције. Најважнији показатељ чврстоће материјала је чврстоћа на истезање. Она се дефинише као максимално напрезање при истезању, које неки материјал може да издржи пре пуцања. Приликом испитивања се одређује максимално оптерећење (сила истезања) и издужење у моменту пуцања узорка. Чврстоћа на истезање је однос максималног оптерећења и минималне почетне површине узорка. Модул еластичности је однос силе и напрезања у подручју линеарног истезања.

Савијање је деформација која настаје када је предмет учвршћен на једном крају а други му се оптерети или када су оба краја учвршћена а оптерећење делује на средини. Резултат испитивања се изражава као оптерећење у  $N/cm^2$  које је потребно да истегне доњу површину узорка за 5%.

Отпорност на удар је карактеристика пластичних маса која се своди на одређивање релативне склоности кидања узорка услед наглог удара. Стандардни узорци су зарезани, чиме се постиже концентрација оптерећења и спречава пластична деформација. Дијаграмски се отпорност на удар, као мерило жилавости материјала, може приказати површином испод криве сила – напрезање.

Када се пластични материјал оптерети одређеном силом наступа тренутно деформисање. У случају да је оптерећење материјала постепено, наступа постепено деформисање које осим оптерећења, зависи од времена и типа пластичног материјала. Део деформације, добијен као разлика укупне и тренутне деформације, назива се пузање материјала и изражава се у процентима. Пластичне масе са већим издужењем показују, због већег молекуларног клизања, већу деформацију пузања.

Тврдоћа се дефинише као отпорност материјала према продирању другог тела. Најбоља метода за одређивање тврдоће материјала је Бринелова. Бринелов број је однос силе у  $N$  према површини удубљења у  $mm^2$ , изазваног куглицом којом се врши оптерећење. У пракси се тврдоћа одређује

и по Роквелу. На тврдоћу утиче температура, влага, претходна обрада узорка и тако даље.

### 2.3.2 ФИЗИЧКЕ ОСОБИНЕ

У физичке особине спадају:

- густина,
- горивост,
- скупљање,
- апсорпција воде,
- мутноћа и
- светлосна пропустљивост.

Густина је маса јединице запремине при одређеној температури. Густина пластичних маса је важан податак за идентификацију врсте и типа пластичних маса.

Горивост пластичних маса се испитује постављањем узорка одређених димензија у уређај са хватаљкама. Узорак се учврсти на једном крају хватаљкама и изврши обележавање на одређеним дужинама. Затим се узорак држи 30 секунди у пламену Бунсеновог пламеника. Пламеник се уклони и уколико се узорак не запали, поступак се понови. Ако се ни тада узорак не запали, узорак је "негорив". Ако пластични материјал гори до одређене дужине узорка онда је испитивани материјал "горив". Уколико се запаљени узорак угаси пре него што достигне ознаку на узорку онда је тај материјал "самогасив".

Скупљање пластичних маса долази услед губитака влаге, пластификатора или због смањења унутрашњих напрезања насталих за време прераде. Последица скупљања је кривљење предмета.

Материјали који апсорбују веће количине воде димензионо су нестабилни, имају лоше диелектричне особине и тешко се прерађују. За одређивање апсорпције воде, узорак, одређених димензија, се суши најчешће 24 часа на температури 323 K, охлади се и измери. После тога узорак се урони у воду са константном температуром од 296 K за време од 24 часа. Након тога вода се уклони брисањем површине узорка, а узорак измери. Повећање тежине у процентима се назива апсорпција воде.

Мутноћа се дефинише као проценат пролазне светлости, која пролази кроз узорак, скреће улазни сноп зрака светлости за више од 2,5°. Ако неки материјал има мутноћу од 30% каже се да је тај материјал прозачан. Већина пластичних маса је безбојна или слабо жућкаста, а одговарајући обојени ефекти се постижу додатком боја или пигмената.

Светлосна пропустљивост се дефинише као однос интензитета улазне и излазне светлости. Многе пластичне масе поседују велику пропустљивост ултравиолетног светла. У неким случајевима ова особина је непожељна, јер под утицајем ултравиолетног светла материјал пожути што умањује декоративни ефекат необојеног материјала.

### 2.3.3 ТЕРМИЧКЕ ОСОБИНЕ

У термичке особине спадају:

- специфична топлота,
- топлотна проводљивост,
- температурна проводљивост,
- топлотна продорност и
- температура постојаности облика.

Термичке особине директно зависе од температуре, притиска и врсте пластичне масе.

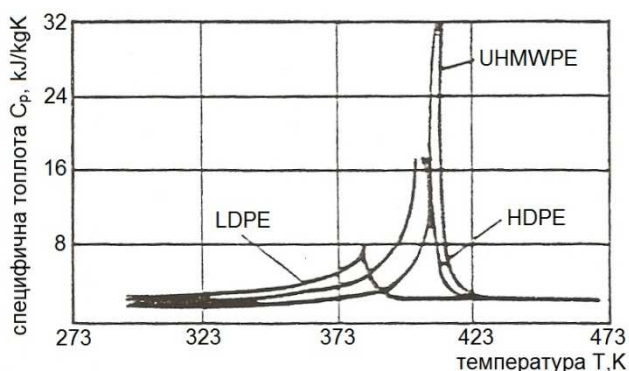
Специфична топлота је количина топлоте коју треба довести јединици масе при изабраном загревању да би температура порасла за 1 K.

$$c_p = \frac{dQ}{m \cdot dT}, \text{ kJ/kgK},$$

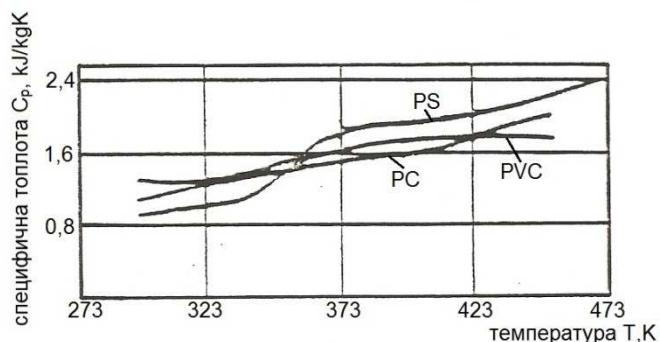
где је:

$Q$  – количина топлоте,  $\text{kJ}$ ,  
 $T$  – температура,  $\text{K}$ ,  
 $m$  – маса,  $\text{kg}$ .

Специфична топлота пластичних маса зависи и од структуре. Зато је обавезно одвојено разматрање  $c_p$  аморфних и кристалних пластичних маса, приказано на слици 2.6 [5] и на 2.7 [5].

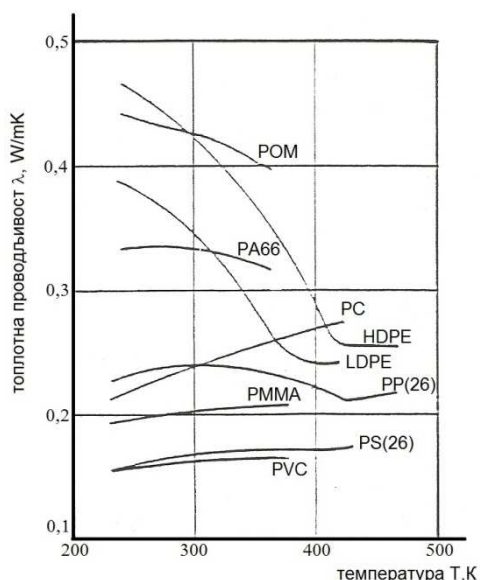


Слика 2.6 Промена специфичне топлоте са температуром за неке аморфне термопласте [5]



Слика 2.7 Промена специфичне топлоте са температуром за кристални термопласт [5]

Топлотна проводљивост је особина материјала која одређује коју је количину топлоте могуће провести кроз пресек материјала при задатом температурном паду и у одређеном времену.



Слика 2.8 Промена топлотне проводљивости са температуром за неке пластомере (термопласте) [5]

Са слике 2.8 може се закључити да на вредност топлотне проводљивости битно утиче структура термопласта.

Код аморфних пластомера (термопласта), којима су вредности топлотне проводљивости у границама од  $0,125 - 0,21 \text{ W/mK}$  показује се мали утицај температуре на промену тих вредности. Код кристалних термопласта утицај температуре на промену топлотне проводљивости је очигледан што се може објаснити структуром термопласта тј. боље провођење топлоте кроз сређена кристална подручја.

Температурна проводљивост представља брзину мењања температуре тела или ток ширења топлоте. Ширење топлоте и промена температуре су

истовремени процеси, који се изражавају сложенom величином која повезује топлотну проводљивост, специфичну топлоту и густину термопласта. То је температурна проводљивост која је једнака:

$$\alpha = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \cdot \frac{m^2}{10^3 \cdot s},$$

где је:

$\rho$  – густина,  $kg/m^3$ ,

$c_p$  – специфична топлота,  $kJ/kgK$ ,

$\lambda$  – топлотна проводљивост,  $W/mK$ .

Из напред изложеног произлази да температурна проводљивост директно зависи од температуре, јер сва три члана зависе од ње.

Топлотна продорност представља меру брзине продирања топлоте у тело или способност акумулације брзине у времену  $t$ . Топлотна продорност је веома важна особина и од велике је практичне вредности за бројне прорачуне. Топлотна продорност је једнака:

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \frac{c_p}{V(T)} \cdot \frac{Ws^{\frac{1}{2}}}{m^2K}},$$

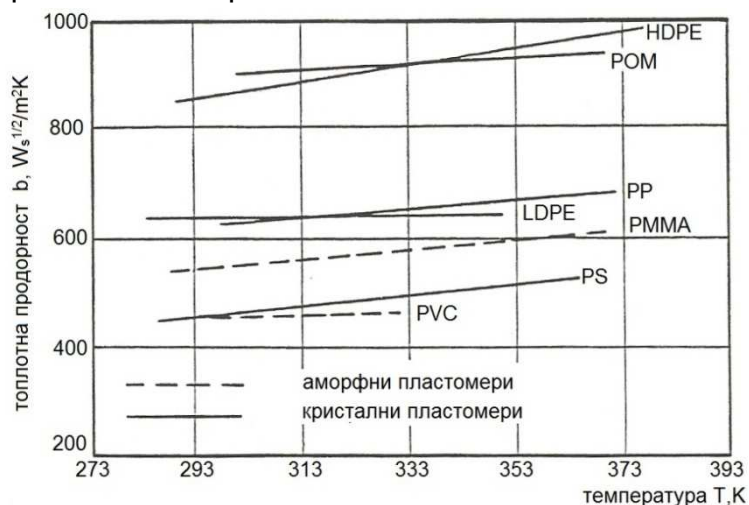
где су:

$V(T)$  – специфична запремина термопласта при температури  $T$ ,  $m^3/kg$ ,

$\lambda$  – топлотна проводљивост,  $W/mK$ ,

$c_p$  – специфична топлота термопласта,  $J/kgK$ .

Под температурном постојаности облика подразумева се температура при којој се под задатим оптерећењем постиже одговарајућа деформација. Познавање температуре постојаности облика потребно је за одређивање потребног времена хлађења термопласта. На слици 2.9 приказана је топлотна продорност неких термопласта.



Слика 2.9 Топлотна продорност неких термопласта [5]

## **2.3.4. ЕЛЕКТРИЧНЕ ОСОБИНЕ**

У електричне особине спадају:

- диелектрична чврстоћа,
- диелектрична константа и
- фактор снаге.

Диелектрична чврстоћа је максимална вредност напона струје коју изолациони материјал може поднети пре пробоја а изражава се у волтима на јединицу дебљине. Одређује се тако што се одговарајући узорак тачно измерене дебљине, постави између две електроде, а напон се контролисано повећава све док не наступи пробијање узорка. Диелектрична чврстоћа зависи од дебљине узорка, температуре и заосталих напрезања у материјалу.

Диелектрична константа је величина која показује колико се пута повећава капацитет кондензатора ако се уместо вакуума или ваздуха, стави између плоча неки диелектрик (изолатор), или колико је пута слабије електрично поље у изолатору него у вакууму. Уношењем диелектрика међу плоче долази до повећања капацитета због поларизације. Мерење ове константе се врши тако што се одреди капацитет електродног система са испитним узорком и без њега па се из разлике израчуна вредност за диелектричну константу. Фактор снаге представља корекциону вредност, а показује за колико је умањена укупна електрична енергија пренешена из неког извора, након пролаза кроз диелектрик. У случају идеалног изолатора, наизменична струја пролази кроз диелектрик без расипања енергије.

## **2.4 ВРСТЕ ПЛАСТИЧНИХ МАСА**

### **2.4.1 ПОЛИПРОПИЛЕН – РР**

*Најважније карактеристике*

Полипропилен има изузетну комбинацију маханичких, топлотних и електричних особина. Заузима све значајније место у примени. Полипропилен је безбојан термопласт. У природном стању је прозиран и може се бојити у разне нијансе. Има најнижу густину од свих комерцијалних термопласта. Одликује га велика чврстоћа на истезање, велика тврдоћа површине и велика отпорност на савијање. Постојан је на високим температурама, код 100°C не омекшава и задржава крутост. Има добре диелектричне особине. Хемијска постојаност полипропилена је одлична чак и при температурама где се неки термопласти не могу користити. Полипропилен је веома постојан према води. Апсорпција воде након 24 часа

је мања од 0,5%. Киселине и базе у концентрованој форми не делују на полипропилен чак и на температури од 333 К. Загревањем на ваздуху полипропилен је подложен оксидацији чија је вредност већа што је виша температура. Додавањем различитих пунилаца и стабилизатора развијен је велики број различитих типова полипропилена за посебне намене.

#### *Начин прераде*

Полипропилен се успешно прерађује пресовањем, екструдирањем (плоче, шипке, профили, цеви, облагање каблова, траке за палете, текстилна влакна), каландрирањем, термоформирањем, ротоливењем, дувањем (дувана амбалажа и шупља тела) и бризгањем. Заварује се ултразвуком.

#### *Примена полипропилена*

Значајна је употреба у аутомобилској индустрији, где све више замењује друге материјале. Употребљава се за израду метализираних делова, пресвлака и тепиха, па и виталних делова мотора. У новије време се очекује замена ABS – а полипропиленом при изради сигурносних појасева, волана и плоча за инструменте. У грађевинарству се употребљава за израду водоводних цеви за хладну и топлу воду. Користи се за израду водоводних цеви за топлу и хладну воду. Користи се за израду делова у електро и радио индустрији.

### **2.4.2 ПОЛИЕТИЛЕН – РЕ**

#### *Најважније карактеристике*

Полиетилени су нетоксични термопласти, без мириса и укуса, отпорни на уља, масти и многе хемикалије. Флексибилни су, лагани и у танком слоју прозачни. Имају велику жилавост и флексибилност прераде код релативно ниских температура. PENG и PEVG се лако прерађују и могу се бојити.

#### *Полиетилен ниске густине – PENG (LDPE)*

Осим добрих електричних особина, LDPE има добру хемијску отпорност, отпорност на влагу, добру флексибилност прераде и отпорност на ударе. Физичке особине нису много зависне од температуре, тако да је флексибилност прераде сачувана и код врло ниских температура.

#### *Начин прераде*

LDPE се прерађује бризгањем, екструдирањем, дувањем, вакумирањем, ротоливењем, пресовањем и заваривањем. Тешко се лепи.

### *Примена LDPE – а*

Има широку примену за: посуде (контејнере) за прехранбене и остале производе, делове у електротехници, електроници и грађевинарству, играчке, делове за хемијску, аутомобилску и текстилну индустрију, разне кућне апарате, округле и плъоснате профиле, мале и велике цеви.

### *Полиетилен високе густине – PEVG (HDPE)*

Механичке, топлотне и хемијске особине су функција густине. Са порастом густине расте степен кристалинитета, чврстоћа на истезање, крутост, тврдоћа, модул еластичности, постојаност према растворима и непропустљивости за гасове и паре. Висока тврдоћа и крутост, добра чврстоћа и жилавост су функција температуре, а температура омекшавања је функција густине.

### *Начин прераде*

Прерађује се бризгањем, вакуумирањем, дувањем екструдирањем, ротоливењем и заваривањем. Производи и полупроизводи (профили, цеви), лако се машински обрађују и погодни су за даљу примену у индустрији.

### *Примена HDPE – а*

HDPE се примењује у прехранбеној индустрији, индустрији за израду кућних апарата, грађевинарству, текстилној индустрији, електроиндустрији, аутоиндустрији, као и за производњу играчака.

## **2.4.3 ПОЛИСТИРЕН – PS**

### *Најважније карактеристике*

Полистирен је безбојни термопласт који се одликује кристалном прозирношћу, врло добрим сјајем и изгледом. Под дејством ултраљубичастог светла жути и постаје крт, па се не препоручује употреба на отвореном простору. Карактеришу га изванредне механичке особине, као што су висока чврстоћа на истезање. Има добре диелектричне особине.

Модификовани типови се одликују одличном отпорношћу на удар, димензионалном стабилношћу, отпорношћу на повишене температуре и до извесног степена отпорношћу на хемикалије.

### *Начин прераде*

Прерађује се свим уобичајним технологијама: бризгањем, екструдирањем, ротоливењем, вакумирањем. Може се метализирати, заваривати ултразвуком и лепити.

### *Примена полистирена*

Примењује се у прехранбеној индустрији (разне посуде), у сектору амбалаже, у индустрији електричних кућних апарата, у сектору играчака, у електронској индустрији, у осветној техници, у сектору намештаја и уређења стана, у обућарској индустрији, индустрији топлотне и звучне изолације. Најширу употребу има у изради дечијих играчака, јер се лако и добро обликује, има добар сјај и добро се боји.

## **2.4.4 АКРИЛОНИТРИЛ БУТАДИЕН СТИРЕН – ABS**

### *Најважније карактеристике*

ABS се састоји од три компоненте: акрилонитрила, бутадиена и стирена. То је материјал чије су особине такве да се може користити као замена за метале. Одликује га висока жилавост и крутост у широком температурном подручју, као и димензионална стабилност. Жилавији је од полистирена, има бољу отпорност на високе температуре и хемикалије. Обично је непровидан и може се бојити запремински или површински. ABS се користи као модификатор PVC чиме се постиже побољшана отпорност PVC на удар.

### *Начин прераде*

Прерада ABS може се вршити бризгањем, екструдирањем, дувањем, вакумирањем. ABS се добро обрађује стругањем, глодањем и утискивањем. Добро се штампа, лепи и може се ултразвучно заваривати.

### *Примена ABS*

Примењује се у хемијској, електро, аутомобилској индустрији, у индустрији за израду разних уређаја и техничких делова за радио и телевизију, за израду играчака, апарата за домаћинство, батерија за купатило, хемијских оловака и друге техничке робе, јер има врло добру топлотну и механичку ударну жилавост. Ударна жилавост је добра и код ниских температура.

## **2.4.5 АКРИЛНИ ТЕРМОПЛАСТИ**

### *Полиметилметакрилат – PMMA – најважније карактеристике*

PMMA је најпрозирнији од свих термопласта, има изврсне оптичке особине, отпорност на атмосферске утицаје и хемикалије, стабилност боја и димензија. Производе се типови посебно отпорни на високе температуре. Побољшање појединих особина је на рачун других које су слабије.

### *Стирен акрилонитрил – SAN – најважније карактеристике*

Одликује га одлична прозирност, отпорност на хемикалије и атмосферске утицаје. Чврстоћа, крутост и тврдоћа површине су му бољи од нормалних и модификованих полистирена. Производе се у више типова који се разликују по способности течења, брзини очвршћавања и хемијским и механичким особинама.

### *Начин прераде и примена SAN и PMMA*

SAN и PMMA се прерађују бризгањем, дувањем, екструдирањем. Одлично се металзирају. Могу се лепити и заваривати ултразвуком. Лако се обрађују разним механичким поступцима.

Главна примена им је у изради прозирних плоча, неломљивог стакла, светлећих реклама и знакова, у прехранбеној индустрији, за израду разних посуда, за намештај, у радио индустрији, у изради украса и техничких производа, играчака, делова за телевизор, хладњаке, као и за делове у аутомобилској индустрији.

## **2.4.6 ПОЛИАЦЕТАТ – РОМ**

### *Најважније карактеристике*

Целулозни деривати се убрајају у најстарије термопласте. Због своје велике прозирности и хомогене обојености наилазе на разноврсну примену у индустрији и домаћинству. Одликује их велика чврстоћа на удар и савијање, отпорност према хабању и лому, добра постојаност облика и добра својства течења. Постојаност према бензину, уљима и мастима је добра. Има добре диелектричне особине. Лако се накнадно механички обрађује. Врло добар површински сјај и низ других својстава омогућују овом термопласту многострану употребу.

### *Начин прераде и примена*

Целулозни деривати се прерађују бризгањем, дувањем, ротоливењем, екструдирањем. Производи се могу машински обрађивати, а полирање се врши раствором ацетона – етилацетата. Целулозни ацетат СА се заварује ултразвуком.

Употребљава се у изради четкица за зубе, ручки за бицикле, ветробрана за моторе, дршки за резне алате, оквира за наочаре, делова за телефон итд.

### **2.4.7 ПОЛИАМИД – РА**

#### *Најважније карактеристике*

Полиамид се одликује изванредним механичким особинама. Стаклом ојачани полиамиди имају високу жилавост, отпорност на истезање и димензионалну стабилност. Ако су пуњени молибденбисулфидом или тефлоном погодни су за израду лежачева, због веома малог коефицијента трења и високе отпорности на хабање. Врло су жилави и задржавају облик и тврдоћу код високих температура (до 150°C). Осетљиви су и лако се ломе након зарезивања. Отпорни су на раст бактерија и гљивица и нешкодљиви у контакту са храном. Необојени полиамид је млечно беле боје, може се и бојити. Нема мириса и укуса, тешко је запаљив и самогасив је. Садржај воде знатно утиче на његове особине. Посебно се РА 66 одликује великом тврдоћом, добром отпорношћу на хабање и лакоћом обликовања танких зидова бризгањем.

#### *Начин прераде и примена*

РА се прерађује бризгањем, дувањем, ротоливењем. Екструдирањем се производе текстилна влакна, филмови, плоче, профили и цеви. РА 6 и РА 66 се заварују ултразвуком.

Полиамид 6, 66, 610 се користе за израду нарочито тврдих, чврстих и на хабање отпорних производа, зупчаника, лежишта, клизних елемената, у радио, електро и телефонској индустрији за спојнице, подложне плочице за веће притиске, вентиле, засуне, делове за индустрију возила.

Полиамид 11, 12, 612 се користе за израду делова високих захтева у индустрији машина и уређаја (сферни ваљци, водећи ваљци свих величина, зупчаници, лежачеви итд.).

#### **2.4.8 ПОЛИКАРБОНАТ – РС**

##### *Најважније карактеристике*

Главне особине поликарбоната су висока прозирност (до 90% прозирности стакла), висока отпорност на удар, отпорност на пузање, могућност употребе у широком температурском подручју, димензионална стабилност, добре диелектричне особине и самогасивост. Врло су крути, отпорни на хабање и хемикалије.

##### *Начин прераде и примена*

Поликарбонат се прерађује бризгањем, дувањем, екструдирањем. Може се лепити, вакуумирати и заваривати. Полупроизводи се могу лако механички обрађивати, такође и метализирати. Поликарбонат има одличне механичке и топлотне особине, као и димензиону стабилност. Од посебне важности је сушење овог термопласта и прерада у сувом стању. Гранулат не сме бити прашњав или прљав.

Користи се у пољопривреди, у индустрији воћних сокова (због нешкодљивости у додиру са храном), затим у мерној и техници управљања за показне инструменте, за израду делова за фото апарате и филмске камере итд.

#### **2.4.9 ПОЛИФЕНИЛЕН ОКСИД – РРО**

##### *Најважније карактеристике*

РРО постоји као модификован и као немодификован.

Немодификован РРО има повећану хемијску отпорност, није токсичан, може се много пута стерилисати па се доста примењује у медицини, где замењује делове од високо квалитетних челика. Одликују га добре диелектричне особине, димензионална стабилност, самогасивост, отпорност на високу температуру и удар. Иако има добре особине мало се употребљава због високе цене.

Модификовани РРО се одликује одличним механичким особинама у температурном подручју од 313 до 373 K., великом димензионалном стабилношћу, малом склоношћу ка пузању, високом модулом еластичности и малом апсорпцијом воде (0.066% у 24 часа при 296 K), а самогасивост му обезбеђује још ширу примену.

### *Начин прераде и примена*

Модификовани РРО се лако прерађује бризгањем, екструдирањем и ултразвучним заваривањем.

Немодификовани РРО се веома тешко прерађује. Најчешће се прерађује бризгањем.

Немодификовани се примењује у хирургији (за предмете који замењују нерђајући челик), за изолацију каблова и високо квалитетних кондензатора.

Модификовани РРО се користи за израду делова за телевизоре и компјутере, има примену код прекидних склопова у електротехници, затим за делове који су изложени трајној температури до 358 K уз континуално оптерећење или до 373 K за делове који нису оптерећени итд.

### **2.4.10 ПОЛИВИНИЛ – ХЛОРИД – PVC**

#### *Најважније карактеристике*

PVC је без адитива тврд и ломљив, а уз додатак адитива (пластификатора) мекан. Отпоран је према воденим растворима, а отпорност према сунцу је задовољавајућа. Отпорност на температуре је мала. Температурно подручје примене PVC је између 243 и 353 K. Основна карактеристика PVC је термопластичност. Деловањем температуре PVC постаје све мекши а код одређене температуре је сличан гуми. Самогасив је, отпоран на хемикалије, хабање, има неограничену могућност бојења, има добру димензиону стабилност и отпоран је на атмосферске утицаје.

#### *Начин прераде и примена*

Највећи део PVC прерађује се каландровањем за израду флексибилних фолија, екструдирањем и бризгањем. Заварује се ултразвуком.

Примењује се у аутомобилској индустрији за израду пресвлака, готово је потисну гуму, асфалт код израде подова, кожу код пресвлака намештаја, као и друге материјале у грађевинарству. У новије време потискује стакло код израде провидних боца. Тврди PVC је врло добар изолатор.

## 2.5 СИСТЕМ ОЗНАЧАВАЊА ПЛАСТИЧНИХ МАСА

Да би се преко 50 различитих врста или група пластичних маса, са стотинама различитих варијација, могле идентификовати и рециклирати данас се у свету користи више система означавања. Може се рећи да је најчешћи и најраширенији начин помоћу идентификационог кода пластичне масе (енг. Plastic Identification code – PIC) који се базира на стандарду ISO 1043 – 1 и са малим модификацијама изгледа као у табели 2.2 [9]. Идентификациони код има двоструку улогу, показује да се производ од ове пластичне масе може рециклирати, а субјектима који се баве рециклажом олакшавају препознавање типа полимера. Овај начин означавања је развило Удружење за индустрију прераде пластичних маса (Society of Plastics Industry – SPI) са седиштем у Вашингтону.

| Симбол                                                                              | Значење                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   | <b>Полиетилен терефталат (PET или PETE) – (енг. <i>polyethylene terephthalate</i>)</b><br>Најраширенија врста, користи се углавном полиестерска влакна; боце за воду, газирани сокови и друге напитке; посуде за прехранбене производе; осталу амбалажу.                     |
|  | <b>Полиетилен високе густине (HDPE) – (енг. <i>high – density polyethylene</i>)</b><br>Користи се за боце за млеко, јогурт, сокове, воду, детерџенте и друге хемијске препарате, кесе за трговину, канте за смеће, цеви у пољопривреди, пластични грађевински материјал итд. |
|  | <b>Поливинил хлорид (PVC или V) – (енг. <i>polyvinyl chloride</i>)</b><br>Користи се за цеви, ограде, боце за детерџенте, шампоне и друге хемијске препарате, каблове, столарију и други грађевински материјал.                                                              |
|  | <b>Полиетилен ниске густине (LDPE) – (енг. <i>low-density polyethylene</i>)</b><br>Користи се за флексибилне боце (за мед, сенф и слично), кесе за хлеб, кесе за смрзнуту храну, посуде за храну и разна лабораторијска опрема...                                            |
|  | <b>Полипропилен (PP) – (енг. <i>polypropylene</i>)</b><br>Користи се за боце за јогурт, сирупе, кечап, медицинске боце, затвараче за боце, посуде за микроталасне пећи, ауто делове, индустријска влакна итд.                                                                |
|  | <b>Полистирен (PS) – (енг. <i>polystyrene</i>)</b><br>Користи се за чвршћу амбалажу, тањире, чаше, кутије за лекове, канцеларијски прибор, играчке, изолационе табле од пене или као ситан пенасти амбалажни материјал за паковање производа...                              |
|  | <b>Остало (енг. <i>Other</i> или O)</b><br>Пластична амбалажа и други производи претходно не поменути (најчешће су то поликарбонати и ABS).                                                                                                                                  |

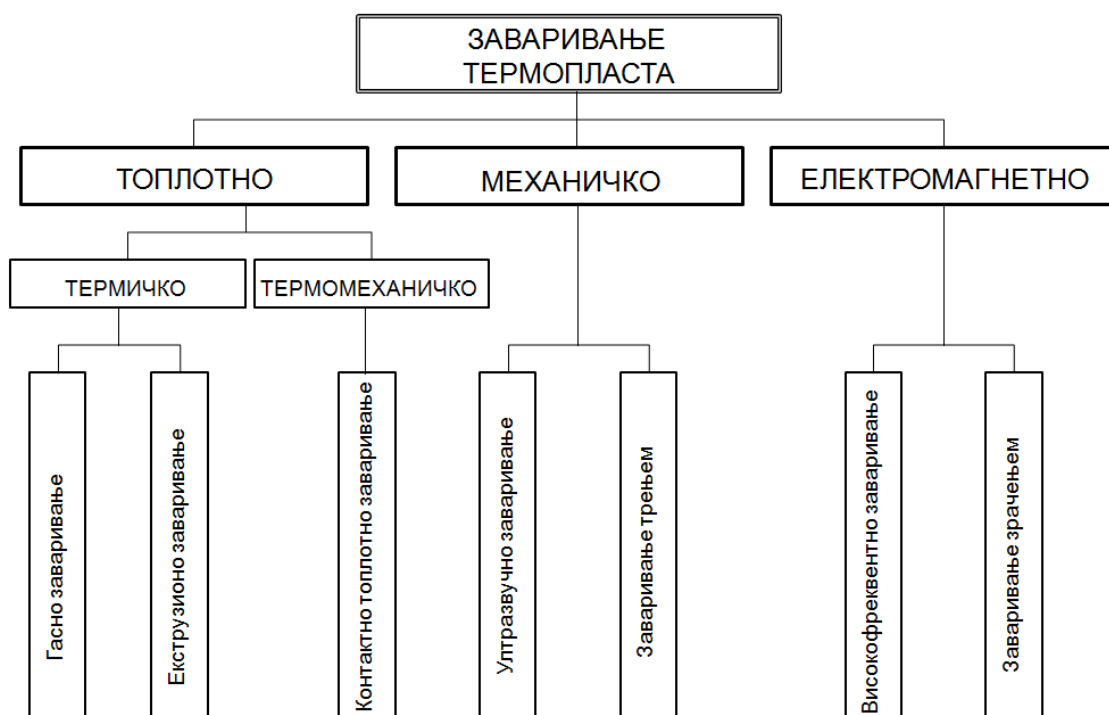
Табела 2.2 Означавање пластичних маса [9]

### 3. ТЕХНОЛОГИЈЕ ЗАВАРИВЊА ПЛАСТИЧНИХ МАСА

#### 3.1 КЛАСИФИКАЦИЈА ПОСТУПАКА ЗАВАРИВАЊА

Процеси заваривања термопласта остварује се коришћењем топлотне, механичке и електромагнетне енергије. На основу ова три вида енергије, заваривање термопласта (слика 3.1) се дели на:

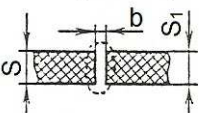
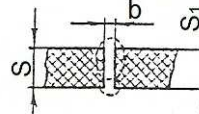
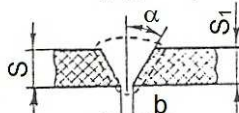
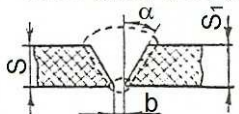
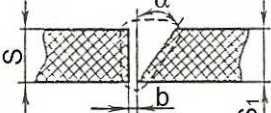
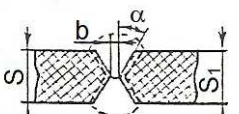
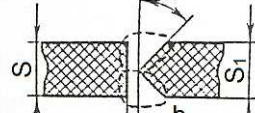
- Контактнo топлотнo заваривање,
- Гасно заваривање,
- Екструзионо заваривање,
- Ултразвучно заваривање,
- Заваривање трењем,
- Високофреквентно заваривање и
- Заваривање зрачењем.



Слика 3.1 Класификација поступака заваривања термопласта [4]

### 3.2 ЖЛЕБОВИ ЗА ЗАВАРИВАЊЕ

Најчешће коришћени жлебови за контактено топлотно, гасно и екструзионо заваривање су приказани у табели 3.1 [4].

| Врста жлеба                                                                                                   | Начин заваривања | $S=S_1$ | $b(+1)$ | $\alpha^0(\pm 3^0)$ |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|---------|---------|---------------------|
| I - жлеб (једностранни)<br>  | К                | 8 – 100 | 1.5     | –                   |
|                                                                                                               | Г                | 2 – 4   | 1       | –                   |
| I - жлеб (двострани)<br>     | Г                | 2 – 4   | 2       | –                   |
|                                                                                                               | Е                | 6 – 10  | 2       | –                   |
| V - жлеб (једностранни)<br> | Г                | 4 – 12  | 0       | 30                  |
|                                                                                                               | Е                | 13 – 20 | 0       | 30                  |
| V - жлеб (двострани)<br>   | Г                | 4 – 12  | 0       | 30                  |
|                                                                                                               | Е                | 13 – 20 | 0       | 30                  |
| 1/2 - V жлеб<br>           | Г                | 4 – 12  | 0       | 45                  |
|                                                                                                               | Е                | 13 – 20 | 0       | 45                  |
| X - жлеб<br>               | Г                | 8 – 16  | 0       | 35                  |
|                                                                                                               | Е                | 17 – 20 | 0       | 35                  |
| К - жлеб<br>               | Г                | 8 – 13  | 0       | 45                  |
|                                                                                                               | Е                | 14 – 20 | 0       | 45                  |

Табела 3.1 Основне врсте жлебова: К – контактено, Г – гасно заваривање, Е – екструзионо заваривање [4]

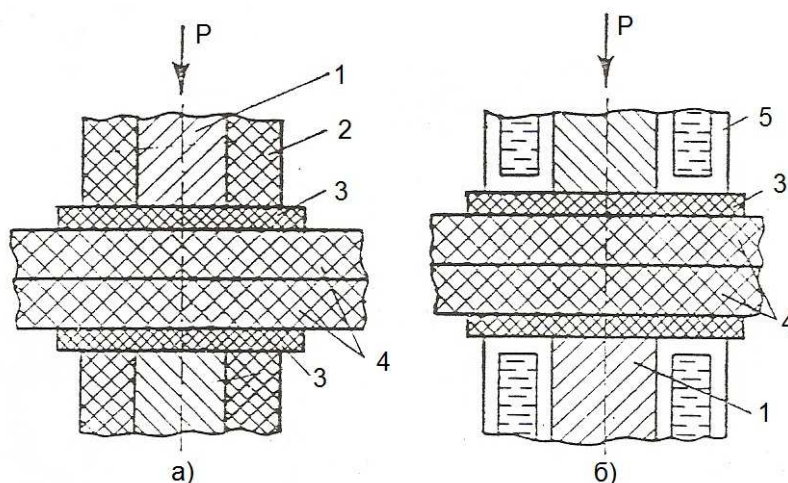
### 3.3 КОНТАКТНО ТОПЛОТНО ЗАВАРИВАЊЕ

#### 3.3.1 СУШТИНА ПРОЦЕСА

Заваривање грејним телом је најуниверзалнији посупак заваривања термопласта. При заваривању ивице делови се загревају до термопластичног стања и дејством притиска спајају у нераздвојни спој. Контактна загревања ивица врши се на два начина:

- грејно тело је у контакту са спољашњом површином горњег дела и преко њега врши загревање оба дела и
- грејно тело је у непосредном контакту са површинама делова који се заварују.

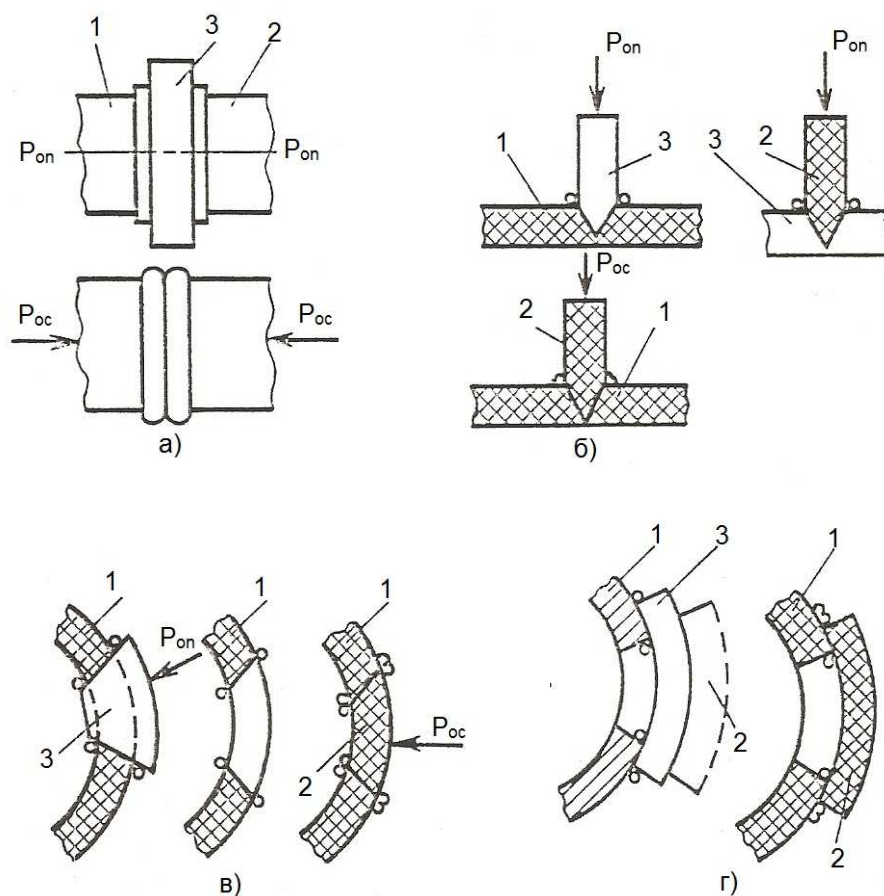
Када је грејно тело у контакту са спољашњом површином горњег дела (слика 3.2 [4]) топлота се преноси кроз дубину материјала. Интензитет загревања зависи од топлопроводљивости материјала делова који се заварују.



Слика 3.2 Шема контактне топлотне заваривања пресовањем са грејним телом: а) без хлађења; б) са хлађењем; 1 – грејно тело, 2 – топлоизолациона пластика, 3 – подлошка, 4 – делови који се заварују, 5 – систем хлађења [4]

Грејно тело је масивно, и поред загревања, истовремено врши притисак на делове који се заварују. Брзина загревања материјала по дубини зависи од степена загрејаности грејног тела. Распоред температуре по дубини материјала је неравномеран. Доведена топлота треба да обезбеди термопластичност ивица које се спајају. У циљу образовања што бољег споја, после загревања, врши се хлађење спољашњих површина делова који се заварују (слика 3.2 а). Овим поступком заваривања заварују се плоче и траке на пресама од PP, PVC, PE и PA – 6.

Када је грејно тело у непосредном контакту са површинама делова који се заварују (слика 3.3 [4]), долази до растапања ивица односно преласка у термопластично стање уз дејство притиска  $p_{on}$ . По достизању термопластичног стања грејно тело се удаљава а ивице делова се заварују уз притисак  $p_{oc}$ . Притисак  $p_{oc}$  делује и за време хлађења делова. Максимална температура грејног тела ограничена је температуром разлагања термопласта. Што је дужи контакт термопласта са грејним телом, потребна температура је мања и обрнуто. Са слике 3.3 се види да у неким случајевима грејно тело има облик и димензије сличне основном материјалу који се заварује. За побољшање квалитета завареног споја примењује се заваривање грејним телом која остаје у шаву. Недостатак овог заваривања је висока цена заварених делова због једнократне употребе грејног тела.



Слика 3.3 Шема контактнo топлотног заваривања при непосредном контакту: а) сучеоно; б) угаоно; в) заваривање цеви уметком; г) заваривање преклопом; 1, 2 – делови који се заварују, 3 – грејно тело,  $p_{on}$  – сила притиска при загревању,  $p_{oc}$  – сила притиска при заваривању [4]

Овим поступком заваривања заварују се цеви од РР и РЕ, траке и плоче од PVC, РР, РА – 6, LDPE и HDPE.

Услед растапања термопласта долази до промене облика ивица делова који се заварују (слика 3.4). Дате су следеће ознаке:

$T_1, T_2$  – температура грејног тела,

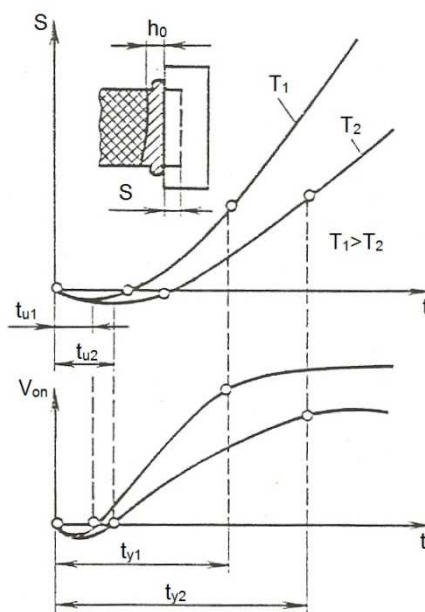
$S$  – дужинско скраћење,

$h_0$  – ширина зоне растапања,

$V_{on}$  – брзина растапања,

$t_{u1}, t_{u2}$  – време инкубације,

$t_{y1}, t_{y2}$  – време растапања.



Слика 3.4 Промена облика ивица термопласта при загревању грејним телом [4]

Промена величине  $S$  у функцији времена дата је на слици 3.4. На почетку овог процеса услед запреминског ширења материјала при загревању долази до издужења (време инкубације).

### 3.3.2 ОСНОВНИ ПАРАМЕТРИ КОНТАКТНО ТОПЛОТНОГ ЗАВАРИВАЊА

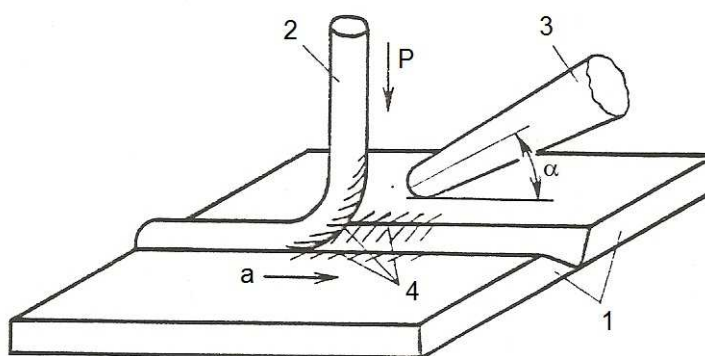
Основни параметри заваривања су:

- температура грејног тела  $T$ , °C,
- време загревања  $t_z$ , s,
- притисак при загревању  $p_{on}$ , МПа,
- притисак при заваривању  $p_{oc}$ , МПа и
- време хлађења  $t_h$ , s.

## 3.4 ГАСНО ЗАВАРИВАЊЕ

### 3.4.1 СУШТИНА ПРОЦЕСА

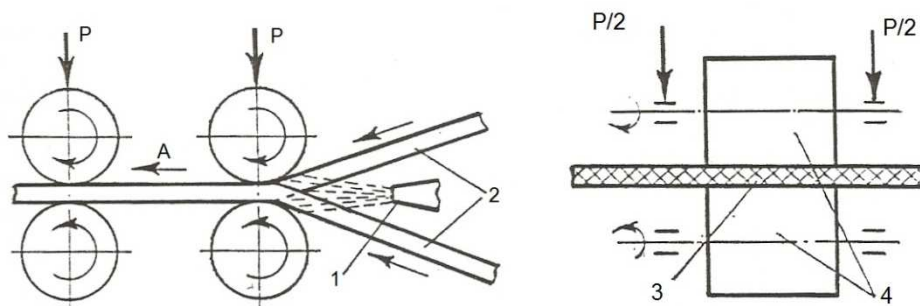
Гасно заваривање термопласта се заснива на загревању површина које се заварују до температуре преласка у термопластично стање струјом загрејаног гаса. Загрејани гас излази из горионика, загревајући уједно делове који се заварују и додатни материјал (обично у виду жице). Растопљени додатни материјал и растопљене ивице основног материјала стапају се и образују заварени шав. За образовање чврстог споја неопходан је притисак на додатни материјал (слика 3.5).



*Слика 3.5 Шема гасног заваривања термопласта са додатним материјалом; 1 – плоче које се заварују, 2 – додатни материјал у облику жице, 3 – горионик, 4 – зона загревања,  $\alpha$  – правац заваривања,  $P$  – сила притиска [4]*

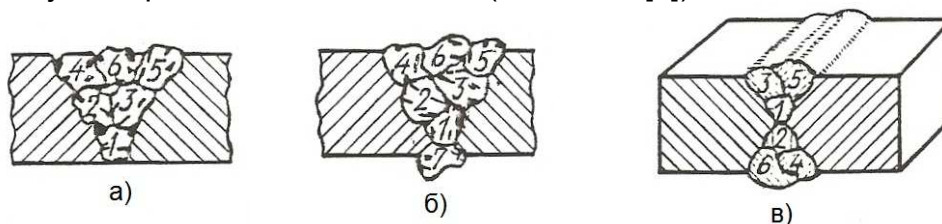
Гасно заваривање је универзалан поступак и може се применити за заваривање термопласта различите дебљине, не захтевајући сложену опрему. За заваривање танких трака користи се гасно заваривање без додатног материјала уз помоћ притисних ваљака (слика 3.6 [4]). Струјом загрејаног гаса загревају се траке до температуре термопластичности, а дејством притиска на ваљке остварује се чврст заварен спој. Брзина заваривања је велика и постоји могућност аутоматизације.

Поступак гасног заваривања са или без додатног материјала омогућава добијање шавова сложене конфигурације при различитим положајима у простору. Гасним заваривањем је могуће заваривање већине познатих термопласта као што су: PVC, LDPE, HDPE, PP, PMMA, PC, PA итд. Избор типа шави условљен је дебљином материјала, особинама конструкције која се заварује и условима оптерећења у процесу експлоатације.



Слика 3.6 Шема гасног заваривања без додатног материјала;  
1 – горионик, 2 – траке које се заварују, 3 – шав, 4 – притисни ваљци, А –  
правац заваривања,  $P$  – сила притиска [4]

Сучеоно заваривање са досатним материјалом делова дебљине до 4  $mm$  може се изводити без припреме ивица. При заваривању делова дебљине веће од 4  $mm$  неопходна је претходна припрема ивица. Ивице се обрађују механичким путем, најчешће стругањем и глодањем. Пре заваривања обрађене ивице и додатни материјал се чисте од прљавштине, уља и других материјала. Припрема ивица се изводи у облику I,  $\frac{1}{2}$  V, X и K жлеба (табела 3.1). Шавови добијени при заваривању делова са X-жлебом имају предност примене у односу на остале, јер обезбеђују већу чврстоћу вара и мању деформацију. Због тога се за делове од термопласта дебљине веће од 5  $mm$  користи заваривање са обе стране (X – жлеб). За умањење деформација делова који се заварују, додатни материјал се умеће са обе стране жлеба. Делови се при заваривању обавезно фиксирају да би се избегла деформација. Код дебљих материјала заваривање се изводи у неколико пролаза. При гасном заваривању у више пролаза, следећи пролаз се изводи после хлађења претходног на око 40°C (слика 3.7 [4]).



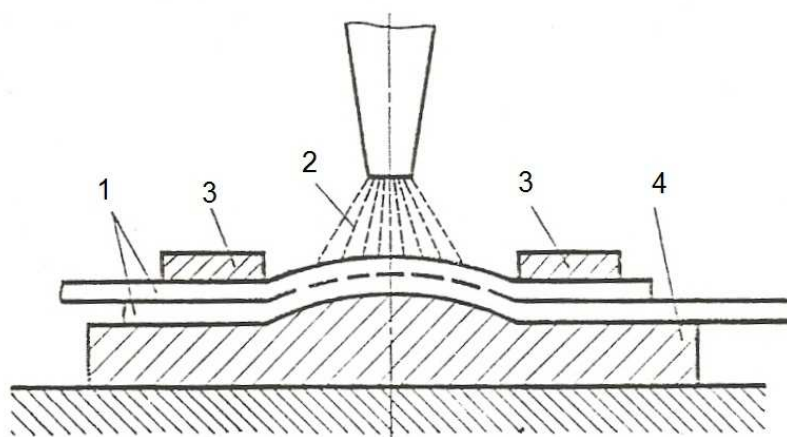
Слика 3.7 Шема вишепролазног гасног заваривања: а) V шав без провара корена; б) V шав са проваром корена; в) X шав [4]

Од велике важности је да се равномерно загревају површине које се заварују. Правилан распоред топлоте при заваривању, постиже се при одржавању константног угла нагиба горионика у односу на површину шавова. За већину термопласта угао износи 45° (угао  $\alpha$  на слици 3.5). При заваривању LDPE, PMMA и PA додатни материјал је под углом од 90° у односу на површину шавова. Ако је угао нагиба мањи од 90° додатни материјал се загрева у зони веће дужине. Количина растопљеног додатног материјала се повећава у зони шавова, што не обезбеђује добре карактеристике шавова. Уколико је угао нагиба

додатног материјала већи од  $90^\circ$  количина растопљеног додатног материјала се смањује у зони шава што такође није добро са аспекта чврстоће шава.

При заваривању PVC и PMMA као гас се користи ваздух а при заваривању LDPE, HDPE и PP азот. Температура гаса треба да буде константна у току заваривања. Оптимална температура гаса одређује се за сваки термопласт посебно.

Гасно заваривање без додатног материјала могуће је извести и једностраним загревањем трака од термопласта струјом загрејаног гаса (слика 3.8 [4]). При достизању температуре термопластичности заварен спој се образује на рачун еластичности подлошке, која врши притисак на траке у контакту.



Слика 3.8 Шема гасног заваривања трака преко еластичне подлошке:  
1 – траке које се заварују, 2 – струја гаса, 3 – граничне траке,  
4 – еластична подлошка [4]

На процес гасног заваривања значајно утиче и састав додатног материјала, његов облик и попречни пресек. При гасном заваривању веома је важно одржавање константног растојања између горионика и делова који се заварују. Уколико растојање варира долази до већег или мањег растапања додатног материјала, што није добро. Додатни материјал треба да има добру пластичност, и треба да буде од истог материјала као и делови који се заварују. Добија се у облику жице пречника 2 до 6 *mm*. Попречни пресек додатног материјала може бити још и троугани и квадратни. Код додатног материјала у облику жице пречник се бира у зависности од дебљине основног материјала, геометрије жлеба, захтеваних брзина заваривања и чврстоће споја. Корен шава се заварује жицом пречника 2 *mm*. При дебљини материјала мањој од 4 *mm* користи се жица пречника 3 *mm*, а при дебљини већој од 4 *mm* користи се жица пречника 4 *mm*.

### 3.4.2 ОСНОВНИ ПАРАМЕТРИ ГАСНОГ ЗАВАРИВАЊА

Основни параметри гасног заваривања су:

- температура гаса  $T$ , °C,
- потрошња гаса  $q$ ,  $m^3/h$ ,
- притисак на додатни материјал  $p$ , МПа,
- притисак на основни материјал (заваривање без додатног материјала)  $p$ , МПа и
- брзина заваривања  $V$ , m/s.

Температура и потрошња гаса зависе од типа и дебљине основног материјала као и од величине попречног пресека додатног материјала. Притисак на додатни материјал зависи од температуре гаса и особина додатног материјала. Брзина заваривања углавном зависи од температуре гаса.

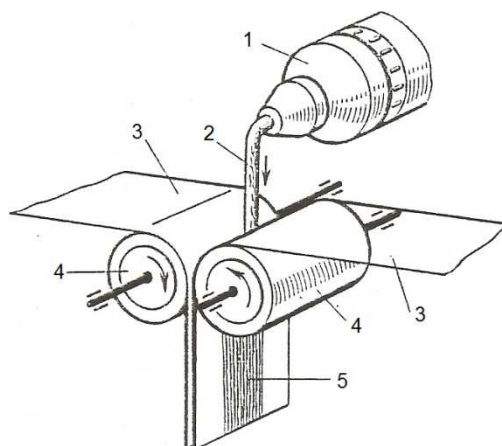
### 3.5 ЕКСТРУЗИОНО ЗАВАРИВАЊЕ

#### 3.5.1 СУШТИНА ПРОЦЕСА

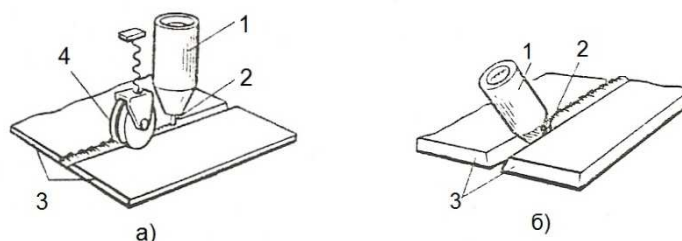
Суштина екструзионог заваривања термопласта састоји се у томе да растопљени материјал (екструдат) излази из екструдера, континуално пада у зазор међу површине које се заварују, загрева их до температуре термопластичности и стапајући се са њима образује заварени шав. Метод је једноставан, а одликује се високом производношћу и широким технолошким могућностима. При екструзионом заваривању добијају се висококвалитетни заварени спојеви.

Екструзионо заваривање је слично гасном заваривању са додатним материјалом у облику жице. За добијање чврстог споја неопходан је притисак на површине које се заварују. Притисак се најчешће остварује ваљцима и сличним притисним елементима. Топлота која се доведе преко додатног материјала (екструдата) треба да преведе ивице основног материјала у термопластично стање, као и да очува вискозно стање додатног материјала. Ако се узму у обзир губици топлоте екструдата, при проласку кроз ваздух, температура екструдата при изласку из екструдера треба да буде већа од температуре при којој се екструдат уноси у зону стапања (слика 3.9).

Екструзионо заваривање се може применити за заваривање термопласта као што су: LDPE, HDPE, PP, итд. Најбоље заваривање трака екструзијом остварује се при великим брзинама екструзије и максимално могућим пречницима екструдата, јер је у том случају губитак топлоте најмањи (слика 3.9 [6]).



Слика 3.9 Екструзионо заваривање трака од термопласта:  
1 – екструдер, 2 – екструдат, 3 – траке, 4 – ваљци, 5 – шав [6]

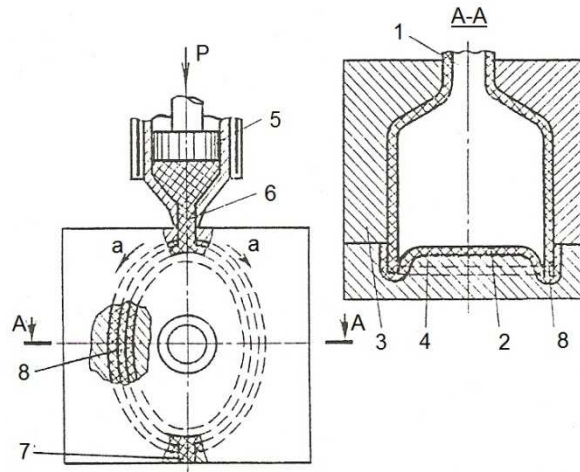


Слика 3.10 Шема екструзионог заваривања: а) екструзионо заваривање;  
б) екструзионо контактено заваривање; 1 – екструдер,  
2 – глава екструдера, 3 – делови који се заварују, 4 – притисни ваљчић [6]

Поступак екструзионог заваривања при ком екструдат непрекидно стиже у зону стапања из главе екструдера, која се налази на неком растојању од површине делова који се заварују, добио је назив безконтактно екструзионо заваривање или само екструзионо (слика 3.10 а [6]) за обезбеђивање чврстог завареног споја користи се притисни ваљчић који прати главу за заваривање.

Поступак екструзионог заваривања при коме загрејана глава екструдера улази у жлеб до контакта са ивицама основног материјала, и креће се под углом од 10 до 15° у односу на вертикалу, попуњавајући га растопљеним екструдатом назива се екструзионо контактено заваривање (слика 3.10 б). Код овог заваривања губици топлоте при проласку екструдата кроз ваздух су сведени на минимум.

Посебан поступак екструзионог заваривања је заваривање ливењем термопласта под притиском (слика 3.11). При заваривању растопљени екструдат се периодично доводи у зону заваривања из ливачке машине. Заваривање се остварује у специјалном калупу који има канале, постављене по линији раздвајања, којима се доводи растопљени екструдат неопходан за загревање и заваривање, поступак се користи при заваривању делова на недоступним местима, тј. када заваривање другим поступцима није могуће.



Слика 3.11 Шема заваривања ливењем под притиском тела и дна боце:

- 1 – тело боце, 2 – дно, 3,4 – горњи и дои део калупа,  
 5 – ливачка машина, 6 – екструдат, 7 – контролни отвори,  
 8 – шав, а – правац кретања екструдата [6]

Припрема ивица код екструзионог заваривања остварује се механичким путем, најчешће стругањем и глодањем. Од шавова најчешће се користи V и X шав. При дебљини материјала од 6 *mm* заваривање је могуће извести једним пролазом, а за дебљине веће од 6 *mm* у неколико пролаза.

### 3.5.2 ОСНОВНИ ПАРАМЕТРИ ЕКСТРУЗИОНОГ ЗАВАРИВАЊА

Поступак безконтактнoг екструзиoнoг заваривања је сложен и карактерише га велики број параметара:

- температура екструдата на излазу из екструдера  $T_i$ , °C,
- притисак потребан за заваривање  $p$ , МПа,
- брзина заваривања  $V$ , m/s,
- брзина кретања екструдата у јединици времена  $V_0$ , m/s,
- количина екструдата који се уноси у зону шава  $Q$ , kg/s,
- пречник екструдата  $d$ , mm,
- температура екструдата који се уноси у зону шава  $T_s$ , °C,
- растојање између главе екструдера и основног материјала  $S$ , mm.

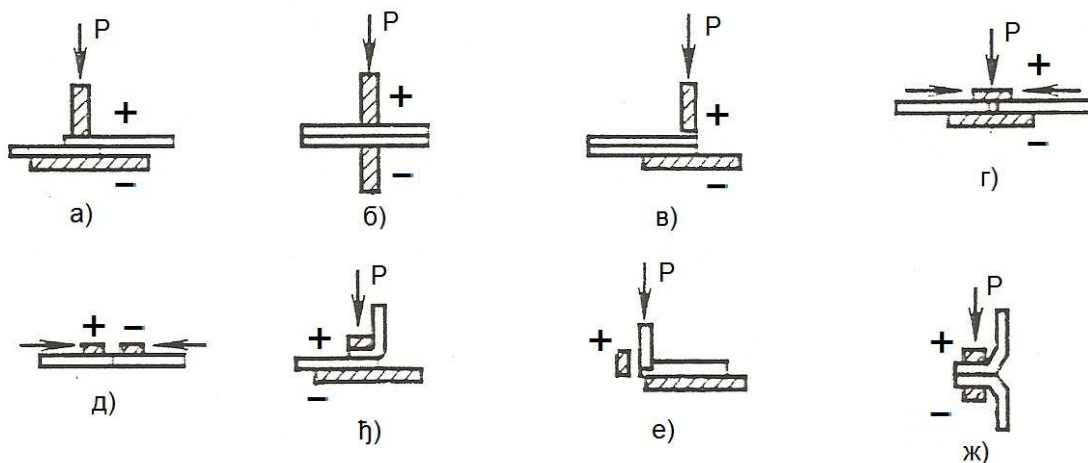
Набројани параметри су у узајамној вези. Температура екструдата зависи од брзине заваривања, пречника екструдата и растојања између главе екструдера и основног материјала. Температура екструдата на излазу из екструдера одређује температура екструдата који се уноси у зону шава. Брзина заваривања зависи од количине екструдата у јединици времена и количине екструдата који се уноси у зону шава. Количина екструдата који се уноси у зону шава зависи од дебљине основног материјала, облика шава

итд. Оптимально растојање екструдера и основног материјала је  $0,1\text{ mm}$ . Његово повећање доводи до топлотних губитака.

## 3.6 ВИСОКОФРЕКВЕНТНО ЗАВАРИВАЊЕ

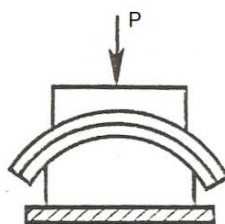
### 3.6.1 СУШТИНА ПРОЦЕСА

Заваривање у електричном пољу високе фреквенције или високофреквентно заваривање или заваривање високофреквентном струјом је поступак заваривања код кога се загревање термопласта остварује уз помоћ енергије електричног поља високе фреквенције. По загревању термопласта на температуру загревања, деловањем притиска остварује се чврст заварен спој. При високофреквентном заваривању делови који се заварују налазе се између металних електрода преко којих се остварује притисак неопходан за заваривање. По деловању притиска спојени делови се хладе (слика 3.12).



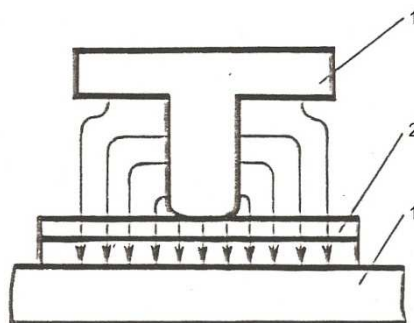
Слика 3.12 Шеме високофреквентног заваривања: а, б, в) преклопно, г, д) сучеоно, ђ, е) угаоно, ж) прирубно [6]

Електроде се израђују од месинга, могу имати различите облике и користе се за добијање дугих праволинијских и криволинијских шавова. Код криволинијског високофреквентног заваривања кривина горње електроде треба да буде мања за величину дебљине пакета делова који се заварују (слика 3.13 [6]).



Слика 3.13 Електрода за криволинијско високофреквентно заваривање [6]

У циљу смањења поља расипања висина електроде не прелази 25 – 30 *mm* (слика 3.14).



Слика 3.14 Профил електроде и карактер електричног поља:  
1 – електроде, 2 – делови који се заварују [6]

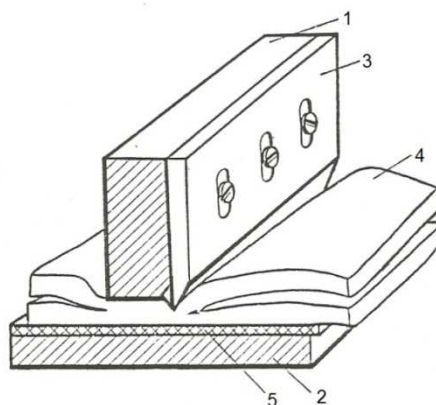
Електроде треба да буду лако заменљиве, а дозвољена непаралелност електрода се израчунава по формули:

$$\delta = (0.15 - 0.25)d_m, \text{ mm},$$

где је:

$d_m$  – дебљина материјала у зони шава, *mm*

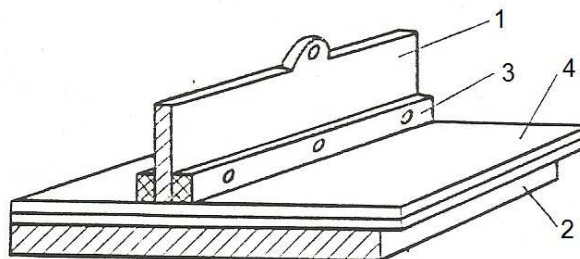
Све оштре ивице на електродама се заобљавају. Постоје разне конструкције електрода у зависности од врсте и дебљине делова који се заварују. На месингану электроду, механичким путем, може се причврстити нож за одсецање (слика 3.15 [6]).



Слика 3.15 Електроде за заваривање са одсецањем:  
1 – горња електрода, 2 – доња електрода, 3 – нож за одсецање,  
4 – делови који се заварују, 5 – изолациона подлошка [6]

Активна горња електрода има поршину за заваривање и механички причвршћен нож од челика за одсецање. Угао нагиба ножа износи 30°. Материјал подлошке је специјална врста картона или пластични изолациони материјал и има заштитну улогу доње електроде.

Код заваривања танким електродама, да би се умањило „пробијање“ основног материјала, на активну электроду са стране се причвршћују механичким путем, летве (слика 3.16 [6]).



Слика 3.16 Електрода са летвама: 1, 2 – електроде, 3 – летва, 4 – делови који се заварују [6]

За одржавање стабилне температуре при високофреквентном заваривању, користе се специјално хлађене електроде. Електроде имају шупљине у унутрашњости које су спојене са прикључцима кроз које протиче вода.

Основни недостатак високофреквентног заваривања је немогућност заваривања термопласта који немају одговарајуће диелектричне особине (тангес угла диелектричних губитака треба да је већи од 0.015). Најчешћи материјал који се заварује овим поступком заваривања је PVC.

### 3.6.2 ОСНОВНИ ПАРАМЕТРИ ВИСОКОФРЕКВЕНТНОГ ЗАВАРИВАЊА

Основни параметри високофреквентног заваривања су:

- време загревања делова који се заварују  $t$ , s,
- притисак електрода на делове  $p$ , МПа и
- напон електричног поља  $U$ , V.

Сви наведени параметри одређују температуру и њен распоред у материјалу који се заварује, од чега у основи зависи квалитет шава. Вредност притиска који се отвараје преко електрода зависи од механичких особина материјала који се заварује и одређује се експериментално. Траке од PVC – а претежно се заварују при фреквенцији 27,12 и 40,68 MHz са притиском од 0,1 – 0,5 МПа.

## 3.7 ЗАВАРИВАЊЕ ТРЕЊЕМ

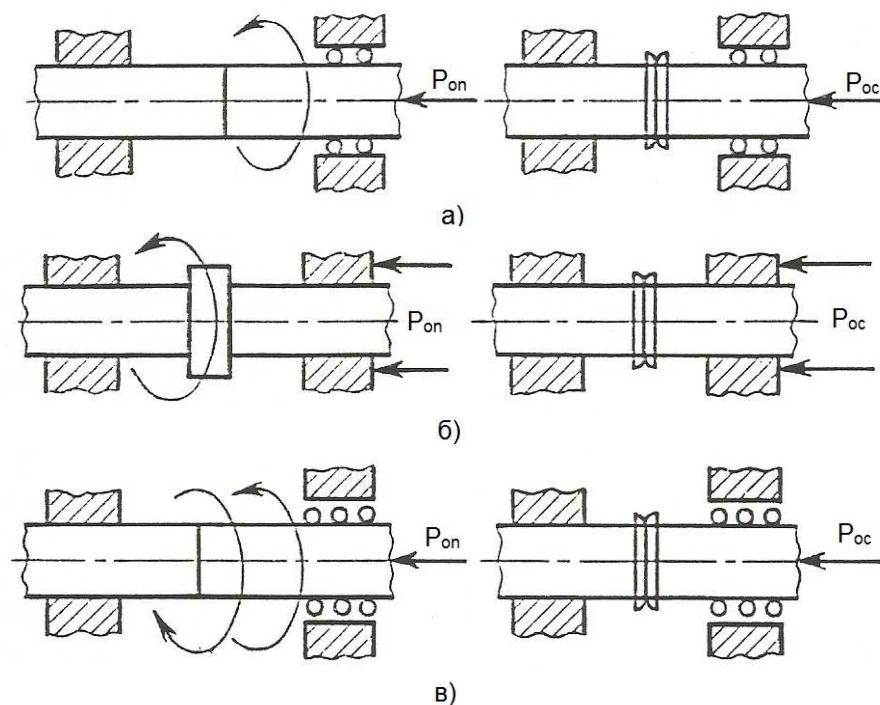
### 3.7.1 СУШТИНА ПРОЦЕСА

Заваривање термопласта трењем заснива се на загревању површина које се заварују претварањем механичке енергије трења у топлотну енергију.

Доведена топлотна енергија преводи у термопластично стање површине делова који се заварују. За образовање чврстог споја неопходан је притисак на површине делова који се заварују. Пошто пластичне масе имају ниску топлопроводљивост, из зоне контакта делова који се излажу трењу одводи се незнатна количина топлоте, па до загревања површина долази брзо. Код заваривања трењем разликују се два основна поступка:

1. Заваривање ротацијом делова који се заварују (ротационо заваривање трењем) и
2. Заваривање осцилаторним кретањем делова који се заварују (вибрационо заваривање трењем).

Код ротационог заваривања трењем загревање површина у контакту, до температуре заваривања, остварује се ротацијом делова који се заварују уз неопходан притисак  $p_{on}$  при загревању. По достизању температуре заваривања процес трења се прекида, а делови се сабијају уз притисак  $p_{oc}$  који делује и при хлађењу делова (слика 3.17 а). Ротационо заваривање трењем се користи код делова који могу да се обрћу око своје осе. Кинематски, ротационо заваривање трењем се може изводити обртањем једног од делова који се заварују (слика 3.17 б) или обртањем оба (слика 3.17 в) .

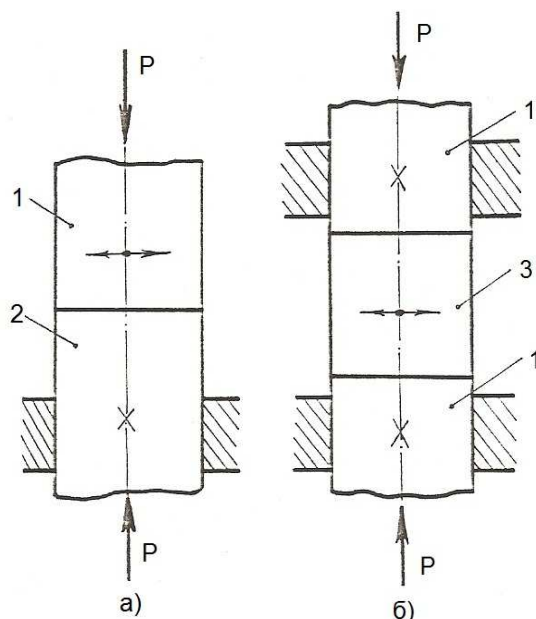


Слика 3.17 Ротационо заваривање трењем: а) ротацијом једног дела, б) ротацијом обртног елемента, в) ротацијом оба дела [6]

Обртни елемент може бити саставни део заварене конструкције. Израђује се од истог материјала као и основни материјал. Заварена конструкција има два

шава. Уколико обртни елемент није саставни део заварене конструкције, по достизању температуре заваривања, исти се удаљава. Заварен спој се добија дејством притиска на делове који се заварују. Недостатак овог поступка заваривања је што, после удаљења обртног елемента, растопљене површине долазе у контакт са атмосфером. Највећу практичну примену има шема заваривања ротацијом при којој је један од делова непокретан.

Код вибрационог заваривања трењем, делови који се заварују, се релативно померају један у односу на други са дефинисаном амплитудом и фреквенцијом. Два основна начина су приказана на слици 3.18 [4].

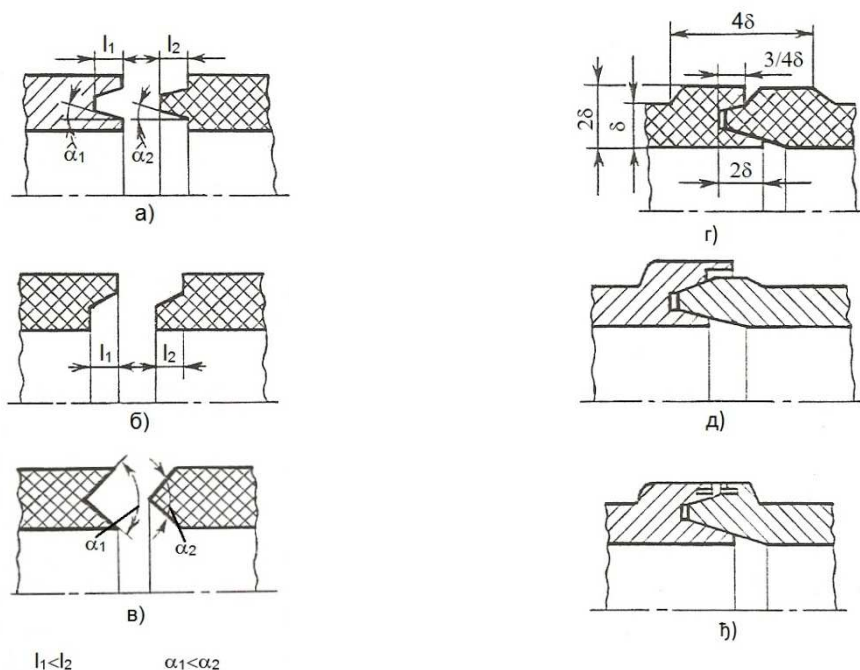


Слика 3.18 Вибрационо заваривање трењем:

а) вибрацијом једног дела, б) вибрацијом уметнутог елемента  
1 – непокретни део, 2 – покретни део, 3 – уметнути елемент [4]

Код првог начина покретан је само горњи део. По растапању површина у контакту, притисак делује на оба дела све до хлађења делова. При том настаје чврст заварени спој. Други начин је уз вибрације обртног елемента, који после заваривања постаје саставни део заварене конструкције. Код вибрационог заваривања трењем могу се заварити несиметрични делови било које конфигурације.

У процесу загревања делова који се заварују неопходно је обезбедити њихово центрирање, избећи промену облика површина у контакту и истицање термопласта при растапању под дејством силе земљине теже. Ово се односи највише на заваривање танкозидних судова. Због свега напред реченог ивице делова који се заварују имају специјалан облик. Један од делова треба да има жлеб у који улази испуст другог дела (слика 3.19 [4]).



Слика 3.19 Конструкција ивица танкозидних делова при ротационом заваривању трењем:  $l_1$  – висина упушта,  $l_2$  – висина испуста,  $\delta$  – дебљина зида,  $\alpha_1$  – угао нагиба упушта,  $\alpha_2$  – угао нагиба испуста [4]

Код вибрационог заваривања трењем конфигурација ивица делова је једноставна, како би постојала могућност узајамног осциловања.

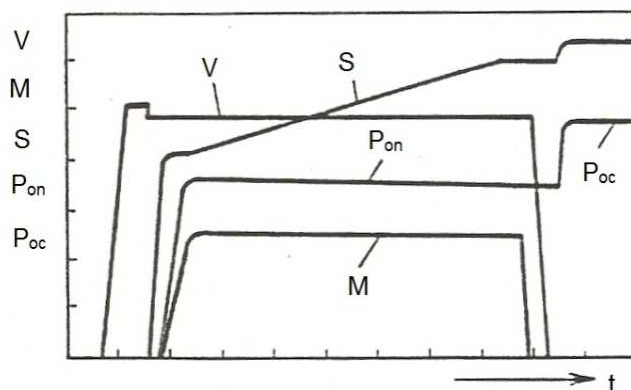
### 3.7.2 ОСНОВНИ ПАРАМЕТРИ ЗАВАРИВАЊА ТРЕЊЕМ

Основни параметри заваривања трењем су:

- број обртаја  $n$ ,  $o/min$ ,
- притисак при загревању  $p_{on}$ ,  $MPa$ ,
- притисак при заваривању  $p_{oc}$ ,  $MPa$ ,
- време загревања (трења)  $t_t$ ,  $s$ .

Поред основних постоји и низ других параметара. Од правилног избора како основних тако и допунских параметара зависи чврстоћа шава. Повећање температуре у зони контакта зависи и од топлофизичких својстава материјала који се заварује, као и од коефицијента трења. Овим поступком се успешно заварују LDPE, HDPE, PP, PA и PMMA.

На слици 3.20 [6] је приказана промена неких параметара при ротационом заваривању у функцији од времена. Ознаке на слици су:  $M$  – обртни момент,  $S$  – дужинско скраћење делова при загревању,  $p_{on}$  – притисак при загревању,  $p_{oc}$  – притисак при заваривању,  $V$  – брзина обртања делова



Слика 3.20 Промена параметара ротационог заваривања [6]

Оријентационе вредности параметара вибрационог заваривања трењем са амплитудом вибрација од  $1,5 \text{ mm}$  су:

- фреквенција  $50 \text{ Hz}$  и
- брзина померања делова  $0,15 \text{ m/s}$ .

После заваривања делови се хладе  $5 - 15$  минута.

## 3.8 ЗАВАРИВАЊЕ ЗРАЧЕЊЕМ

### 3.8.1 СУШТИНА ПРОЦЕСА

Заваривање термопласта зрачењем заснива се на способности термопласта да апсорбује светлосну енергију и исту претвори у топлотну енергију неопходну за заваривање. Ако се та топлотна енергија доведе ивицама (површинама) делова који се заварују, долази до њиховог растапања а уз неопходан притисак и до образовања чврстог завареног споја.

Према типу извора и карактеру генерисања енергије зрачења разликује се:

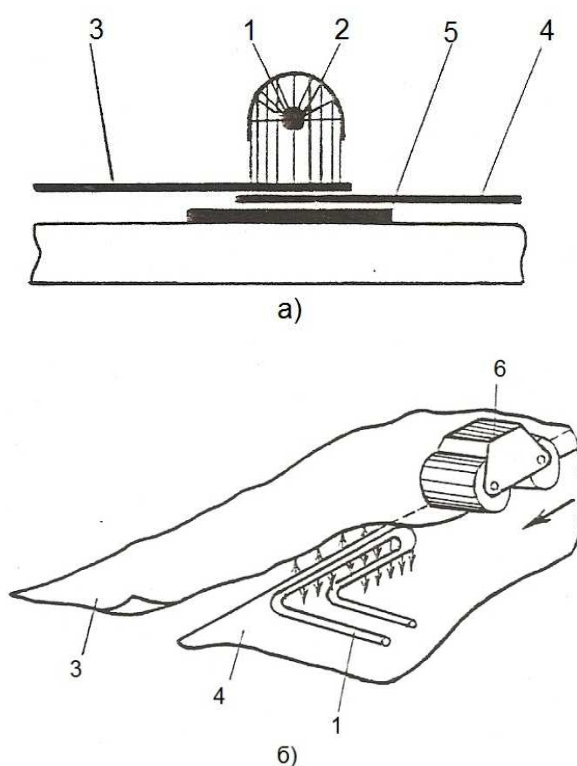
1. Заваривање инфрацрвеним зрачењем (IC – зрачење),
2. Заваривање светлошћу видљивог спектра и
3. Заваривање ласером.

Код ових поступака заваривања термопласта нема непосредног контакта извора зрачења са површинама које се заварују. Процес загревања делова лако се регулише променом снаге светлосног извора зрачења и променом растојања између извора зрачења и делова који се заварују. Практично, способност апсорпције зрачења зависи од тога да ли термопласт садржи пластификаторе, стабилизаторе (додаци који одржавају првобитне особине пластичних маса), боје итд. За заваривање зрачењем користе се извори зрачења чији грејни елементи достижу температуру и до  $2200^\circ\text{C}$ .

Конструкција завареног споја и шема заваривања зрачењем су узајамно повезани. Плоче и траке од термопласта најчешће се заварују преклопно, а цеви и цилиндрични делови сучеоно.

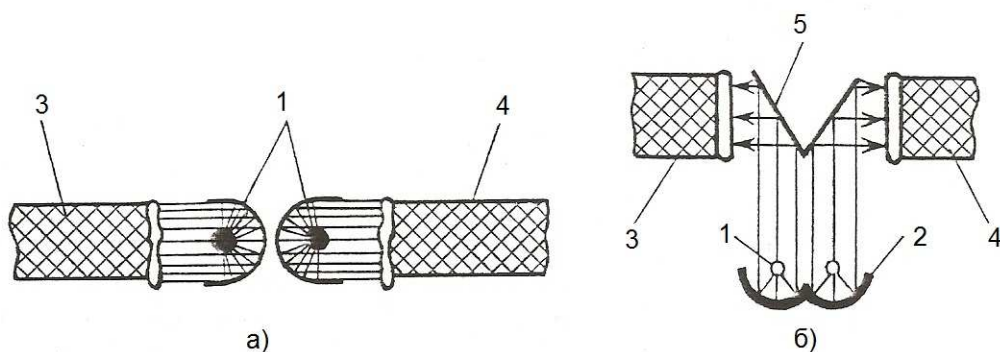
На слици 3.21 а) приказано је заваривање зрачењем трака од термопласта. До загревања површина у контакту олази на разун топлопроводљивости делова који се заварују. Топлота се у овом случају преноси кроз дубину материјала.

На слици 3.21 б) дато је заваривање зрачењем фолија од термопласта. Извор светлости се налази између површина фолија, тако да се истовремено загревају обе површине. По растапању површина које се загревају, притисни ваљци остварују неопходан притисак за формирање чврстог завареног споја.



Слика 3.21 Заваривање зрачењем: а) преклопно заваривање трака, б) преклопно заваривање фолија, 1 – извор светлости, 2 – рефлектор, 3, 4 – делови који се заварују, 5 – подложка, 6 – притисни ваљци [4]

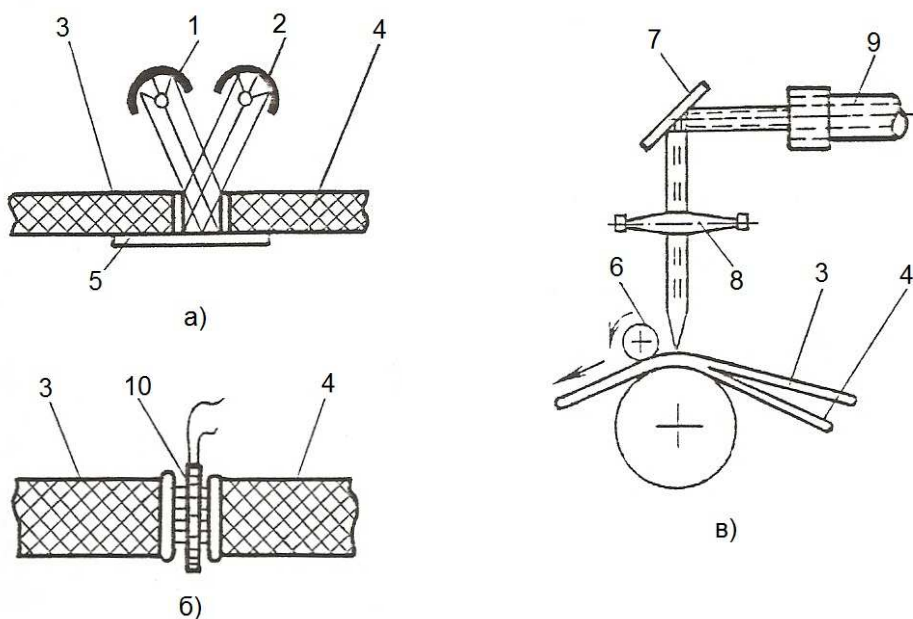
На слици 3.22 а) приказано је сучеоно заваривање са директним загревањем ивица који се заварују, а под б) са индиректним загревањем уз помоћ огледала за скретање снопа светлости. На слици 3.22 [4] су дате следеће ознаке: 1 – извор светлости, 2 – рефлектор, 3, 4 – делови који се заварују, 5 – огледало за скретање снопа светлости.



Слика 3.22 Заваривање зрачењем: а) сучеоно са директним загревањем, б) сучеоно са индиректним загревањем [4]

На слици 3.23 а) приказано је сучеоно заваривање зрачењем са загревањем површина под углом, а под б) директно заваривање ИС – зрачењем. Заваривање фолија ласером приказано је на слици 3.24 в).

Ознаке које су да те на слици испод су: 1,2 – извор светлости, 3,4 – делови који се заварују, 5 – подлошка, 6 – притисни ваљак, 7 – огледало, 8 – сабирно сочиво, 9 – излазна цев ласера, 10 – извор ИС – зрачења.



Слика 3.23 Остали поступци заваривања зрачењем: а) сучеоно заваривање зрачењем под углом, б) сучеоно заваривање ИС – зрачењем, в) заваривање фолија ласером [4]

Недостатак посупка заваривања зрачењем је што су површине које се заварују у директном контакту са атмосфером. Успешно се заварују LDPE, HDPE, PVC и PP. Заваривање CO<sub>2</sub> ласером обезбеђује велике брзине заваривања и висок квалитет завареног споја.

### 3.8.2 ОСНОВНИ ПАРАМЕТРИ ЗАВАРИВАЊА ЗРАЧЕЊЕМ

Основни параметри заваривања зрачењем су:

- температура у зони заваривања  $t_z$ , °C,
- притисак заваривања  $p$ , МПа,
- брзина заваривања  $V$ , m/s и
- температура извора зрачења  $t_i$ , °C.

Температура у зони заваривања зависи од врсте термопласта и температуре извора зрачења. Притисак заваривања зависи од врсте и димензија термопласта и одређује се експериментално.

## 4. УЛТРАЗВУЧНО ЗАВАРИВАЊЕ ПЛАСТИЧНИХ МАСА

### 4.1 УЛТРАЗВУК

Ултразвуком се називају механичке осцилације са фреквенцијама изнад 20 *kHz*, изнад горње границе чујности људског ува. Доња граница чујности износи 16 *Hz*. Осцилације испод 16 *Hz* се називају инфразвук. Класична акустика се бави претежно физичким проблемима чујног звука, односно настајањем, преношењем и пријемом звучних сигнала. Суштину акустичних (звучних) таласа било које фреквенције, представљају еластичне промене средине које се шире од једне зоне према другој, брзином која зависи од механичких својстава средине. Осцилације које се јављају у чврстим телима (нпр. у ултразвучним претварачима) преносе се на друга тела, течности и гасове који их окружују. Као резултат настају еластични звучни и ултразвучни таласи.

У процесу осцилаторних кретања честице се сударају са суседним честицама предајући им део осцилаторне енергије. На тај начин се осцилаторно кретање шири на све стране од места извора. Преношење енергије са једних материјалних честица на друге изазива померање из положаја равнотеже, због чега у одређеним зонама средине густине честица расте или се смањује.

Карактеристика осцилаторних процеса је у томе што честице средине непрекидно врше само осцилаторно кретање око свог равнотежног положаја. Узајамно периодично кретање назива се таласом. При простирању таласа не врши се пренос материје, јер се положаји равнотеже, око којих се врши осциловање честица, не премештају. Осцилаторна енергија изазива еластичне промене средине. Енергија еластичне деформације није локализована у једном подручју већ се кроз средину простире одређеном брзином. Талас и његова преносна енергија ограничени су величином осцилаторног тела (нпр. ултразвучног претварача).

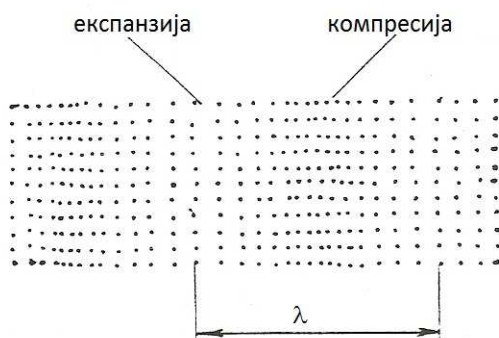
Геометријско место тачака до кога талас допире у одређеном тренутку времена назива се фронтом или челом таласа. Аналогно геометријско место тачака чија је фаза осциловања једнака зове се таласна површ. Фронт таласа је прва таласна површ.

Примене у ултразвучном подручју су сасвим друге врсте од чујног звука. Грубо се може извршити подела примене ултразвука на пасивну и активну.

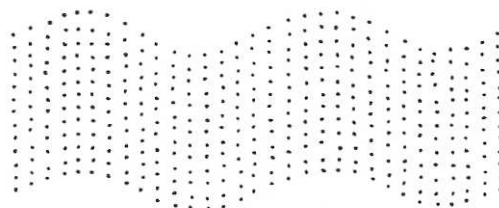
Код пасивне примене ултразвук се користи за испитивање материјала, дијагностику у медицини, мерење дубина у морима итд. А код активне примене ултразвучна енергија осциловања се користи за извођење одређених радова или побољшање радних процеса: заваривање, чишћење, обраде и обликовање.

## 4.2 ВРСТЕ ТАЛАСА

Врсте таласа се одређује обликом трајекторија по којима се крећу честице средине под дејством извора звука. Ако је трајекторија кретања честица нормална правцу простирања таласа, такав талас се назива трансверзални (попречни), приказан на слици 4.2 [1]. Ако честице средине осцилују у правцу ширења таласа (слика 4.1[1]), јављају се лонгитудинални (уздужни) таласи. Треба напоменути да "чист" трансверзални и лонгитудинални талас постоји у простору неограниченој средини или у средини чије димензије знатно премашују таласну дужину  $\lambda = c/f$  (пут који пређе фронт таласа за време једне осцилације), где је  $c$  брзина простирања таласа, а  $f$  фреквенција.



Слика 4.1 Лонгитудинални талас [1]



Слика 4.2 Трансверзални талас [1]

При другим условима, ако су једна или две димензије средине у којој се простира талас ограничене, могу се јавити мешовити облици осциловања. У течностима и гасовима могућа су лонгитудинална осциловања честица. У течностима и гасовима не могу настати трансверзални таласи, јер се такве средине у нормалним условима не противе промени облика. Округле шипке, које се најчешће користе као проводници код ултразвучних уређаја, обично су знатно тање од таласне дужине. У оваквим шипкама, ако се побуди лонгитудинални талас, настаје мешовит облик лонгитудиналних и трансверзалних осцилација, тзв. дилатациони или компресиони талас (слика 4.3 [2]). Због великих и затезних и притисних сила и незнатне стишљивости метала, настаје принудна контракција односно експанзија по попречном пресеку штапа. Дакле, лонгитудиналне и трансверзалне компоненте осциловања крећу се заједно истом брзином. Процес је аксијално симетричан. Брзина звука (брзина ширења поремећаја односно фронта таласа) дилатационог таласа зависи од пречника штапа и фреквенције, као и од материјала штапа.



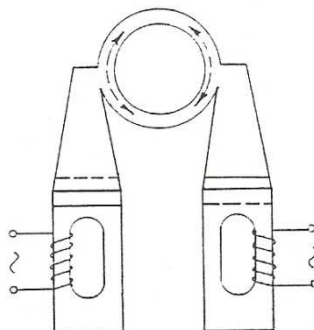
Слика 4.3 Дилатациони талас [2]



Слика 4.4 Флексиони талас [2]

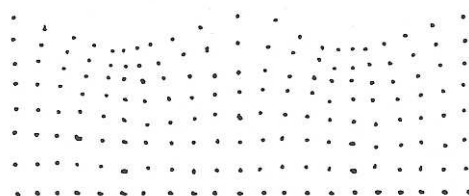
Даљи могући облик осциловања штапа је флексионо (савојно) осциловање приказан је на слици 4.4 [2]. Оно настаје код чеоног побуђивања штапа лонгитудиналним таласом, ако се штап несиметрично оптерети у односу на ту дужну осу (ексцентрично оптерећење). Сваки материјал је веома осетљив на овакво осциловање. Осциловање ужета не треба мешати са флексибилним осциловањем, јер уже није круто на савијање као метални штап. Сила која се супроставља савијању код ужета потиче од напрезања на истезање, уже мора бити затегнуто, а метални штап не. Значи, уже је неосетљиво на кривљење, а штап поседује крутост на савијање. Оваква осциловања могу настати и у плочи чија је дебљина знатно мања од таласне дужине. Флексиона осциловања су корисна за ултразвучна испитивања, а непожељна код активне примене ултразвука.

У штаповима и цевима могу се побудити и торзиони таласи. Процес побуде је сложен и врши се са два звучна претварача који су тангенцијално постављени на штап или цев на супротним странама (слика 4.5 [2]). Претварачи раде у супротним фазама. Таласи ове врсте се користе за ултразвучно заваривање округлих или прстенастих спојева. Сви облици осциловања (компресиони, флексиони, торзиони) се могу укратко назвати таласима у штаповима. Они се простиру линијски тј. аксијално дуж штапа. Сходно томе, овде нема опадања интензитета са повећањем удаљености од извора осциловања.



Слика 4.5 Шема побуђивања торзионог таласа [2]

Јавља се још и површински талас, који се шири по површини полубесконачног простора (слика 4.6 [1]). У основи то је трансверзални талас који садржи и компоненту лонгитудиналног таласа. Амплитуда таквог таласа опада експоненцијално са дужином продирања, тако да исчезава после продирања у дубину реда таласне дужине. Према томе, простирање таласа се врши углавном по слободној површини полубесконачног простора.



Слика 4.6 Површински талас [1]

Од свих описаних типова таласа у пракси највећу примену имају лонгитудинални таласи.

### 4.3 ГЕНЕРАТОРИ УЛТРАЗВУКА

Ултразвучни генератори (претварачи) су уређаји у којима се врши претварање електричне или механичке енергије у ултразвучну. У подручју чујне фреквенције претварач електричних у механичке вибрације је звучник. Његова обележја у погледу квалитета су углавном репродуковање тона без изобличења. Емитовање се врши у ваздуху чији је таласни отпор ( $p_c$ ) мали, па снага емитовања не прелази 100 W. У подручју ултразвука скоро увек се ради у резонантном подручју, јер се захтева висок степен корисног дејства за велике снаге. За претварање енергије користе се различити физички принципи који се могу сврстати у следеће групе:

- магнетни и
- електромеханички (електродинамички, магнетнострикциони и пиезоелектрични).

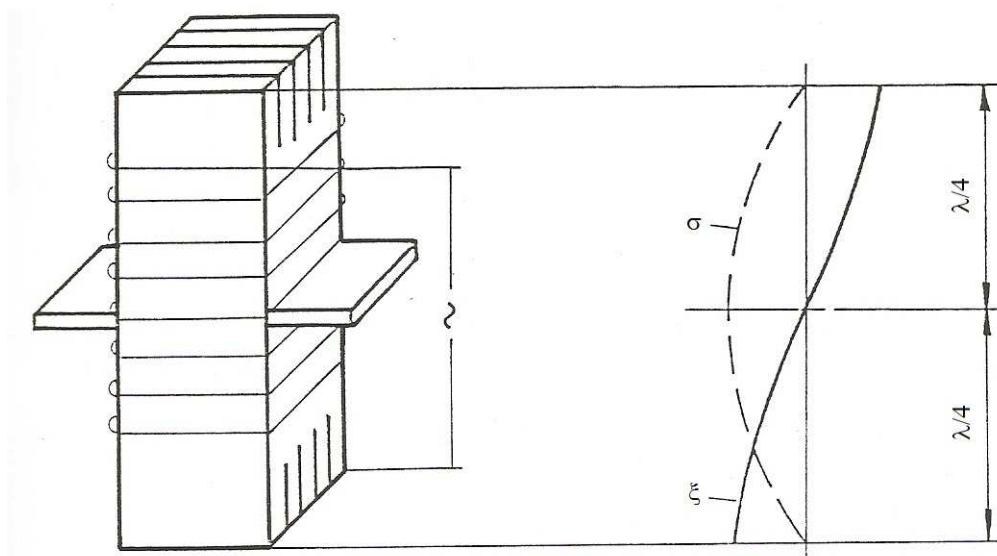
Најчешће се за заваровање користе магнетнострикциони и пиезоелектрични претварачи.

#### **Магнетнострикциони претварач**

Код магнетнострикционих претварача користи се особина феромагнетних материјала, који под утицајем одређеног магнетног поља мењају своју дужину. При томе фреквенција струје напајања одговара механичкој резонантној фреквенцији магнетнострикционог претварача. Најједноставнији

магнетострикциони претварач представља штап дужине  $\lambda/2$ , израђе од материјала који поседује магнетострикционе особине (са побудним калемом, слика 4.7).

При протицању наизменичне струје, кроз намотаје одређене јачине и фреквенције, у штапу се усмерава наизменично магнетно поље. Као последица магнетострикционог ефекта у штапу се јављају еластични напони који се испољавају у виду лонгитудиналних осцилација штапа. Крајеви штапа емитују енергију у радну средину. Осцилаторни чвор се налази у средини штапа у коме је амплитуда напона максимална. Штап се формира од међусобно изолованих плочица.



Слика 4.7 Магнетострикциони претварач [4]

Магнетострикциони претварач, као резонатор, обезбеђује велике акустичне јачине. Евентуално преоптерећење не оставља битне последице (прелази у топлоту). Оптерећење је ограничено чврстоћом и замором материјала. Електроакустични коефицијент корисног дејства везан је за електричне и механичке губитке. Те компоненте показују који се део електричне енергије претвара у механичку, а механичке у акустичну енергију која се емитује у средину. Код ове врсте претварача коефицијент корисног дејства се креће од 40 – 80% и смањује се са повећањем фреквенције осциловања.

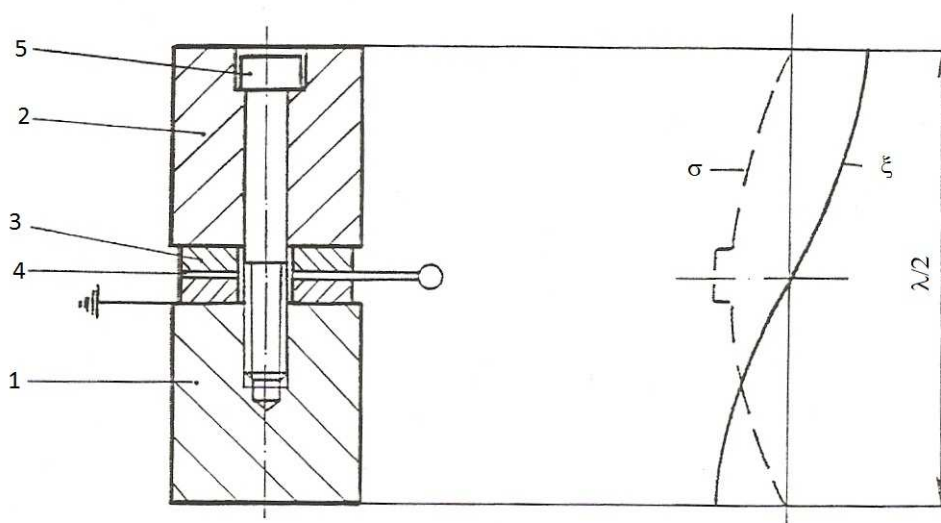
### **Пиезоелектрични претварач**

Претварање електричне енергије у механичку заснива се на инверзном пиезоелектричном ефекту. Променљиво електрично поље изазива деформацију кристала,  $\varepsilon = kE_e$ , где је  $k$  пиезоелектрична константа зависна од материјала. Пиезоелектрична својства од природних материјала има нпр. кварц. Поред природних та својства имају и неки вештачки кристали, као и

поликристални материјали добијени синтеровањем. Најпознатији поликристални керамички материјали су баријум-титанати и циркон-титанат олова.

При повезивању пиезоелектричних плочица са извором електричног наизменичног напона плочице механички осцилују у ритму наизменичног напона. Овај ефекат се користи при изради пиезоелектричних претварача. Максимална амплитуда осциловања добија се када фреквенција електричног побуђујућег поља одговара фреквенцији механичке резонанце претварача.

Конструкција и израда претварача је веома једноставна. Степен искоришћења претварача је висок и креће се око 90%. Претварач на слици 4.8 се састоји од два керамичка диска (3) чије су површине метализирани са обе стране. На поршине се прикључује високофреквентни генератор. Керамички дискови се смештају у осцилаторном чвору. За напајање се употребљава електрода дебљине од 0,1 до 5 *mm*, која уједно може да служи за одвођење топлоте са унутрашњих страна дискова. Дискови су паралелно спојени.



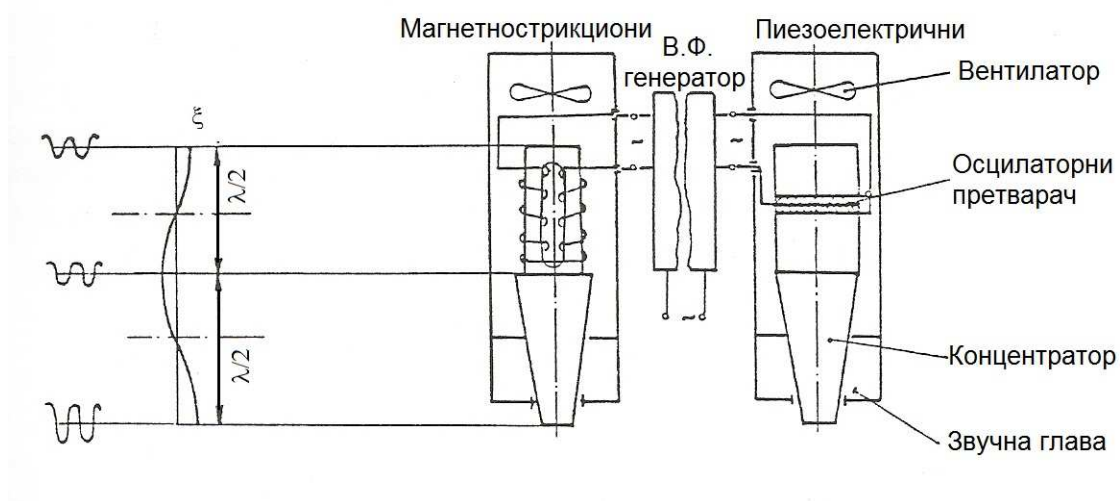
Слика 4.8 Пиезокерамички претварач са основним карактеристикама:  
 $\xi$  – амплитуда,  $\sigma$  – напон,  $\lambda$  – таласна дужина [4]

Цилиндрични додатци (1 и 2) спајају се са завртњем (5). Тиме се у пиезоелементу ствара преднапон, који обезбеђује да се променљиво механичко напрезање изводи у области чистог притиска. Амплитуда механичког наизменичног напона, који се ствара при раду претварача, не сме да прекорачи вредност статичког преднапона (30 – 35 *MPa*) постигнутог при склапању претварача. Контактне површине претварача су високог квалитета израде и обезбеђују равномеран контакт целом површином, а тиме и чврсту механичку везу.

Цилиндрични додаток (1) назива се и емитер (одашиљач). Преко њега се ултразвучни таласи преносе директно средини или се пренос изводи преко трансформатора (концентратора) и сонотроде. Задњи цилиндрични додаток (2) назива се и рефлектор. Ако се узме у обзир таласни отпор ( $p_c$ ) пиезоелектричног диска и додатка (1 и 2), долази се до тога да претварач емитује енергију претежно у једном смеру, у смеру емитера са већом амплитудом померања. Емитер се обично израђује од легуре алуминијума, а рефлектор од челика и месинга.

Да би се претварач користио за ултразвучна заваривања треба да се комплетира како би се добио ултразвучни емисиони систем, тзв. ултразвучна глава (слика 4.9 [4]).

Цео ултразвучни систем (слика 4.9) ради са резонатном фреквенцијом  $20\text{ kHz}$  и више, што проузрокује знатна специфична оптерећења. Зато се води разуна да не дође до преоптерећења и то тако што се предвиђају елементи за усклађивање како би променљиви механички напони у целом систему остали у дозвољеним границама. Ултразвучни претварачи за заваривање термопласта израђују се са снагом од  $100$  до  $2500\text{ W}$  и излазном амплитудим око  $10\text{ }\mu\text{m}$ .



Слика 4.9 Осцилаторни ток у ултразвучној глави [4]

## 4.4 УЛТРАЗВУЧНО ЗАВАРИВАЊЕ ТЕРМОПЛАСТА

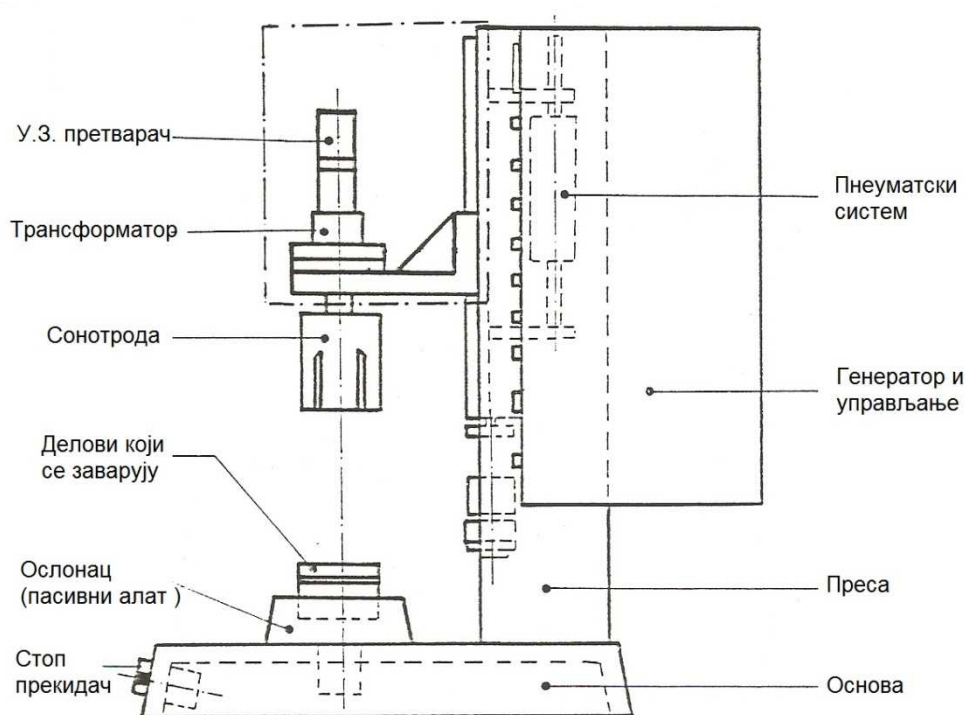
### 4.4.1 СУШТИНА ПРОЦЕСА

При заваривању термопласта претварају се електричне осцилације, које производи генератор, фреквенције  $20 - 25\text{ kHz}$  у ултразвучном претварачу у механичке осцилације исте фреквенције. Осцилације се преносе на предмет обраде преко амплитудног трансформатора и сонотроде под одређеним притиском. Доведена енергија се, услед молекуларног трења и трења на спојним површинама до кога долази у термопласту у зони спајања, претвара

у топлоту потребну за пластифицирање-растапање. Поступак је веома ефектан и траје једну до три секунде. Да би се постигао добар репродуктивни квалитет заваривања од битне важности је избор уређаја за ултразвучно заваривање и оптимизирање параметара заваривања.

#### 4.4.2 УРЕЂАЈИ ЗА УЛТРАЗВУЧНО ЗАВАРИВАЊЕ

Конструкција једног стандардног уређаја за заваривање термопласта приказана је на слици 4.10 [7] структуру уређаја чине углавном преса, генератор, ултразвучни претварач са трансформатором и алатом за заваривање – сонотродом и ослоном. Сонотрода је активни алат, а ослонац пасивни.



Слика 4.10 Структура ултразвучног уређаја за заваривање [7]

Има више врста уређаја, почев од ручних тзв. ултразвучних пиштоља, уређаја са пнеуматским управљањем (стандардни уређаји), па до специјалних машина и постројења.

Најчешће се користе уређаји са пнеуматским управљањем, код којих је генератор интегрисан са машином или се монтира посебно. Ови апарати имају предност тамо где се траже компактна постројења за заваривање. Апарати имају могућност подешавања притиска односно силе притезања радног комада (6 bar – а тј. 4000 N), подесиви радни ход, подесиво време укључивања ултразвука, механичко грубо подешавање висине звучне главе итд.

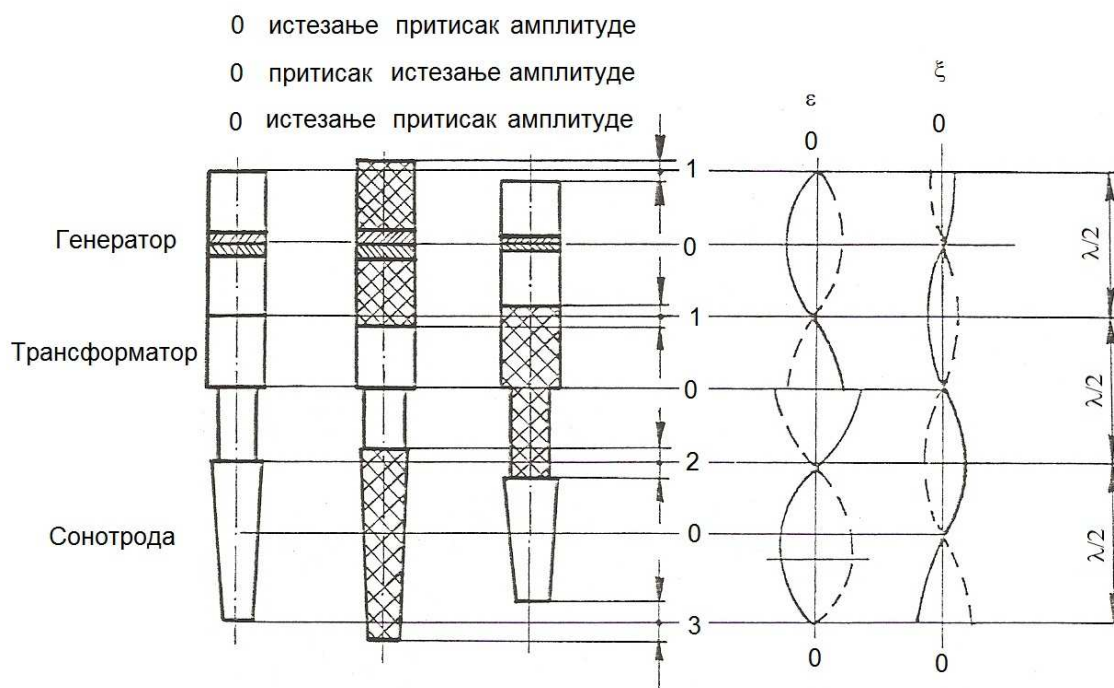
Генератор претвара енергију из мреже у неопходну фреквенцију потребну за механичку резонантну јединицу. Потребна снага генератора зависи од врсте термопласта и величине спојног шава. Снага празног хода генератора састоји се од сопствених губитака електричног система и губитака механичке резонантне јединице (реактивни отпори). Снага треба да буде што нижа. Под снагом пуног оптерећења подразумева се снага коју генератор предаје механичкој јединици под оптерећењем и при константној амплитуди.

Механичка резонантна јединица ултразвучног система се састоји од ултразвучног претварача, трансформатора и сонотроде. Слика 4.11 приказује осцилаторни ток и ток деформације механичке резонантне јединице. Лево је положај мировања у средини осцилује сонотрода у фази истезања, а десно у фази притиска.

Трансформатор доводи механичку енергију осциловања до сонотроде и трансформише амплитуду осциловања, коју предаје ултразвучни претварач, на потребну амплитуду коју предаје сонотроди.

Сонотрода као активни алат треба да испуни следеће задатке:

- да пренесе енергију осциловања у зону заваривања,
- да пренесе притисак и
- да изврши трансформацију амплитуде на потребну амплитуду за заваривање.



Слика 4.11 Механизам осциловања механичке резонантне јединице [5]

Ослонац (пасивни алат) је геометријски подешен да прими део који се заварује и да га центрира у односу на сонотроду. Треба да буде масиван и по могућности да не осцилује. Израђује се од челика, алуминијума, месинга итд. Његова контактна површина може бити обложена (плутом, гумом, кожом итд.) у циљу заштите осетљивих површина које се заварују.

Управљачки део уређаја за ултразвучно заваривање омогућује подешавање свих неопходних параметара за заваривање. На слици 4.12 [8] дат је комплетан приказ стандардног уређаја за ултразвучно заваривање са пнеуматским управљањем.



Слика 4.12 Уређај за ултразвучно заваривање [8]

#### 4.4.3 ПОДЕЛА УЛТРАЗВУЧНОГ ЗАВАРИВАЊА

Ултразвучна заваривања термопласта се изводе на разне начине. Различитост начина условљено је својствима и структуром завариваног материјала, конструкцијом и величином делова, близином зоне заваривања у односу на сонотроду итд.

Подела ултразвучног заваривања врши се према:

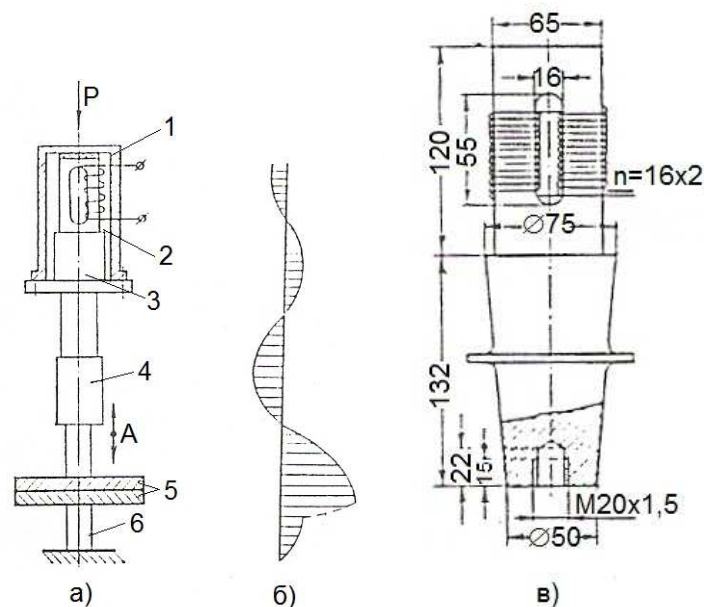
- доводу механичке енергије ултразвучних осцилација,
- предаји механичке енергије ултразвучних осцилација,
- концентрацији механичке енергије ултразвучних осцилација и
- узајамном померању уређаја за ултразвучно заваривање и делова који се заварују.

### **Довод механичке енергије ултразвучних осцилација**

Довод механичке енергије ултразвучних осцилација може бити:

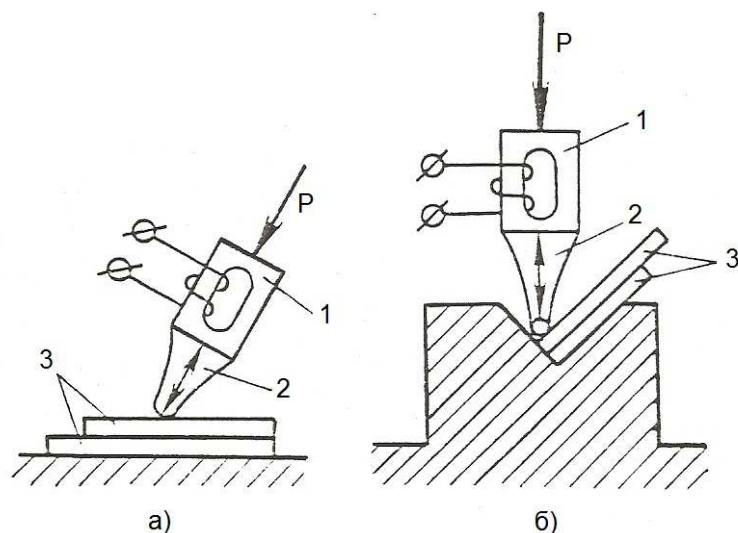
- нормалан,
- једностран,
- под углом (у зависности од положаја уређаја за заваривање или од положаја делова који се заварују) и
- двострани

Слика 4.13 [4] представља шему нормалног довода механичке енергије ултразвучних осцилација, која се највише користи код заваривања ултразвуком. Под а) је дата шема уређаја где је: 1 – телопретварча, 2 – претварач, 3 – трансформатор, 4 – сонотрода, 5 – делови који се заварују, 6 – ослонац, А – амплитуда, Р – сила притиска.



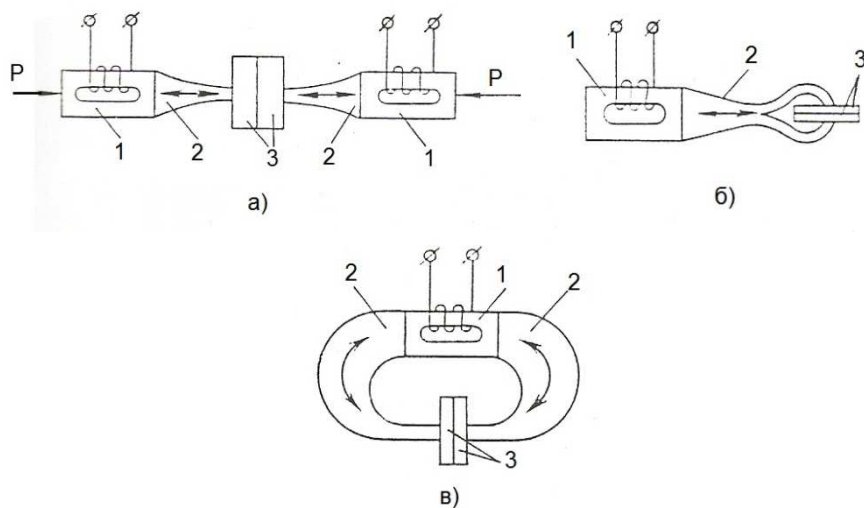
**Слика 4.13 Шема ултразвучног заваривања са нормалним доводом осцилација: а) шема уређаја; б) промена амплитуде таласа; в) претварач са трансформатором [4]**

Ова шема ултразвучног заваривања уједно представља и једностранни довод механичке енергије ултразвука. Да би се механичка енергија ултразвука могла довести у зону спајања остварује се контакт сонотроде са једним од завариваних делова. Овај контакт се може остварити и под неким углом како уређаја за заваривање тако и постављањем делова који се заварују на пример постављањем у призму (слика 4.14 [4]). По овој шеми заваривање термопласта се врши ручно уз помоћ ултразвучних пиштоља.



Слика 4.14 Шема ултразвучног заваривања под углом:  
а) уређај је под углом; б) делови су под углом; 1 – претварач,  
2 – сонотрода, 3 – делови који се заварују [4]

За повећање механичке енергије у зони контакта користи се двострани довод механичке енергије ултразвучних осцилација. За ултразвучно заваривање потребне су две ултразвучне главе са две сонотроде. Једна сонотрода је у контакту са једним делом, а друга са другим делом који се заварује (слика 4.15 а).



Слика 4.15 Шема двостраног довода енергије ултразвучних осцилација:  
1 – претварач, 2 – сонотрода, 3 – делови који се заварују [5]

Овим поступком ултразвучног заваривања доведена механичка енергија ултразвучних осцилација у зони спајања се повећава и до четири пута у односу на једнострану довод. Губици енергије у ослонцу (пасивни алат) су сведени на минимум. Заваривање по овој шеми карактерише симетрично температурно поље, због симетричности сонотрода, што даје боље особине шави.

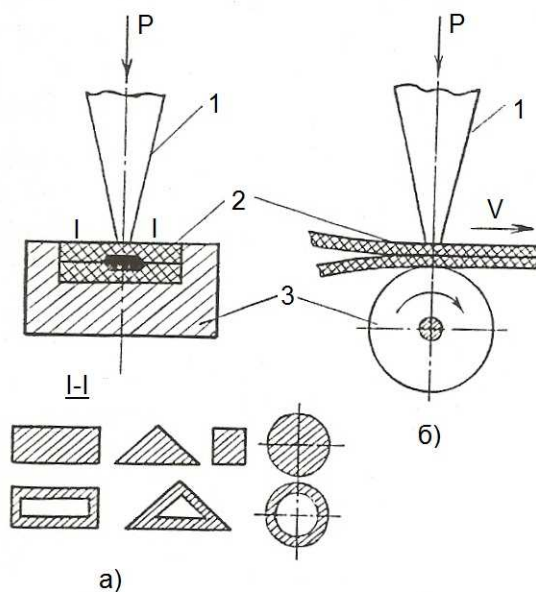
Ултразвучно заваривање термопласта са двостраним доводом механичке енергије ултразвучних осцилација, могуће је остварити са једном ултразвучном главом и специјално конструисаном сонотродом, која омогућује, двострани довод механичке енергије осциловања (слика 4.15 б, в). Неопходан акустички контакт између делова који се заварују обезбеђује се тако што је зазор између радних површина сонотроде мањи од збирне дебљине делова. Системи са двостраним доводом механичке енергије осциловања обезбеђују мању амплитуду осциловања врха сонотроде у односу на системе са једностраним доводом.

### **Предаја механичке енергије ултразвучних осцилација у зони заваривања**

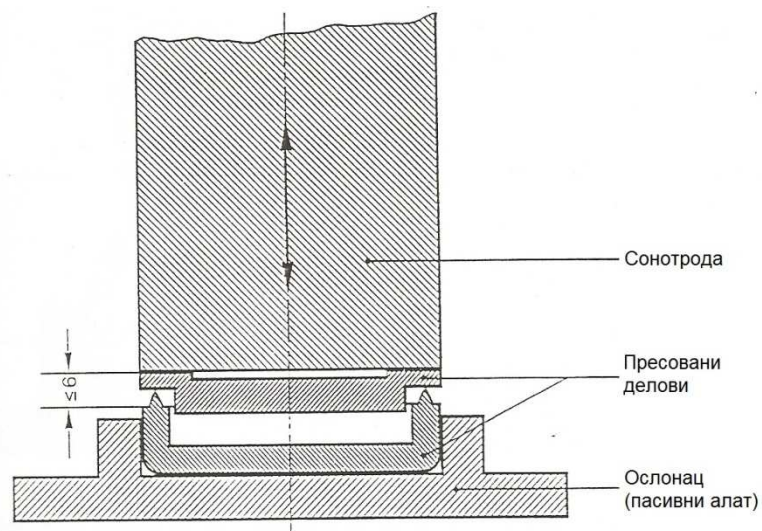
Карактер предаје енергије ултразвучних осцилација на граници споја и њен распоред у односу на површине које се заварују може бити различит и у зависности од тога ултразвучно заваривање се дели на:

1. директно ултразвучно заваривање (заваривање блиских зона) и
2. индиректно ултразвучно заваривање (заваривање удаљених зона).

Директно ултразвучно заваривање термопласта се користи за заваривање меких термопласта као што су РР и РЕ због великог коефицијента пригушења осцилација. За равномеран распоред енергије ултразвука по равни контакта неопходно је да радна површина сонотроде (чело сонотроде), која је у контакту са спољашњим делом горњег дела који се заварује, има облик идентичан равни контакта (слика 4.16 а) пресек  $I-I$ . Код овог поступка ултразвучног заваривања растојање од радне површине сонотроде до зоне спајања не прелази 6 mm (слика 4.17 [4]).

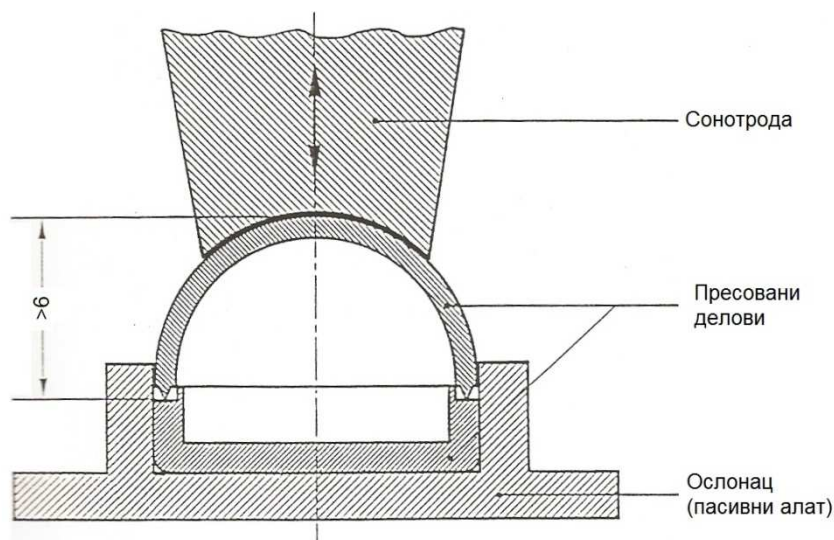


Слика 4.16 Директно ултразвучно заваривање: а) трака; б) фолија;  
1 – сонотрода, 2 – делови који се заварују, 3 – ослонац [4]



Слика 4.17 Директно ултразвучно заваривање (заваривање блиских зона) [4]

Ако се термопласт одликује већим модулом еластичности и малим коефицијентом пригушења осцилација, заварен спој се може добити на већем растојању од 6 mm. Осцилације незнатно слабе при проласку кроз материјал који је у контакту са сонотродом, што омогућује индиректно ултразвучно заваривање (слика 4.18 [5]).

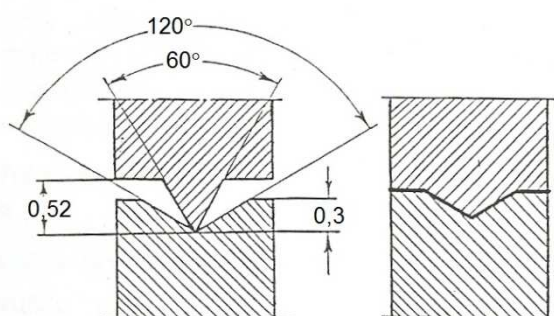


Слика 4.18 Индиректно ултразвучно заваривање (заваривање удаљених зона) [5]

Овим поступком ултразвучног заваривања заварују се тврди термопласти као PS, ABS, PMMA, као и један део делимично кристалних термопласта POM и PA, али уз одговарајућу геометрију делова који се заварују.

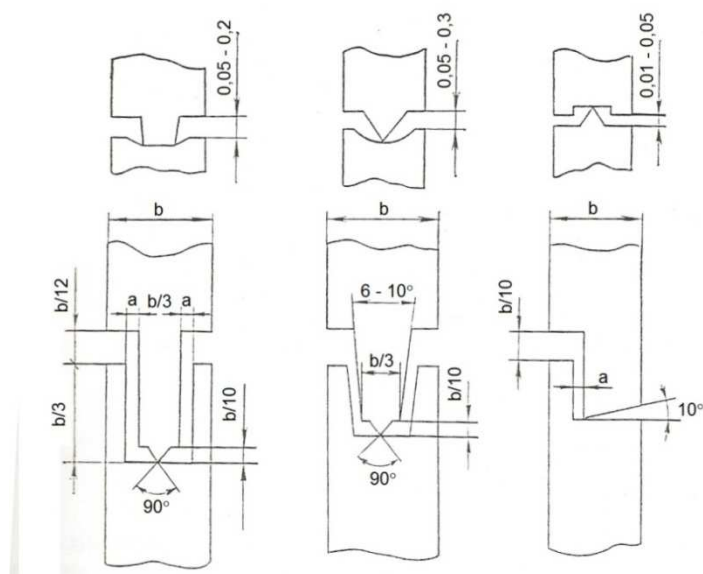
### Концентрација енергије у зони заваривања

При заваривању материјала са добрим акустичким својствима, као нпр. заваривање делова од PS који има равне контактне површине и при равномерном расподелом притиска који се остварује преко сонотроде, добија се заварени спој лоших карактеристика. Заваривање се у овом случају не изводи по целокупној површини већ по одређеним тачкама или зонама површине. Проучавањем ове појаве дошло се до резултата који указују на то да се добар заварени спој добија уколико се пре заваривања изврше припреме ивица, при чему једна од њих најчешће има V-облик (слика 4.19).



Слика 4.19 Давач смера енергије (концентратор) [5]

Концентрација механичке енергије ултразвука остварује се посебним обликом ивица које се заварују. Различити облици ивица делова који се заварују називају се давачима смера енергије или концентраторима. Концентратор може бити урађен на делу који је у контакту са сонотродом или на делу који је у контакту са ослонцем. На слици 4.20 [5] приказани су неки облици концентратора.



Слика 4.20 Облици концентратора за заваривање тврдых термопласта [5]

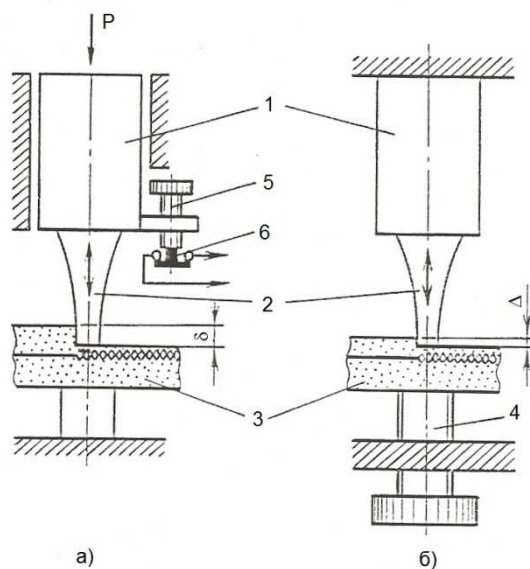
### **Количина доведене механичке енергије ултразвучних осцилација**

Могућност заваривања ултразвуком зависи и од количине доведене механичке енергије ултразвука која прелази у топлоту у зони контакта делова који се заварују. Количина топлотне енергије у зони контакта зависи од времена деловања ултразвучних осцилација, па се може разликовати:

1. ултразвучно заваривање са задатим временом трајања ултразвучног импулса и
2. ултразвучно заваривање по деформационом критеријуму

Ултразвучно заваривање са задатим временом трајања ултразвучног импулса се практично највише користи и може се применити код свих серија ултразвучних урежаја. Време трајања ултразвучног дејства одређује се за конкретан део експерименталним путем. Кратко време трајања ултразвучног импулса доводи до лоших карактеристика споја, као и дуго време трајања ултразвучног импулса. Притисак неопходан за заваривање делује и после искључења ултразвука.

Ултразвучно заваривање по деформационом критеријуму приказано је на слици 4.21 [5], где су: 1 – трансформатор, 2 – сонотрода, 3 – делови који се заварују, 4 – ослонац у облику регулационог вијка, 5 – регулациони вијак, 6 – прекидач.



**Слика 4.21 Шема ултразвучног заваривања по деформационом критеријуму: а) са задатом дужином; б) са задатим зазором [5]**

На слици 4.21 а) задата је дубина упуштања сонотроде у део који се заварује под дејством притиска  $p$  и под дејством ултразвука. Дубина  $\delta$  регулише се вијком (5) који је причвршћен за трансформатор. Растојање чела вијка (5) и прекидача (6) једнако је дубини  $\delta$ . То значи када се достигне вредност задате

дубине  $\delta$  вијак ће бити у контакту са прекидачем (6) и доћи ће до искључења ултразвука. Притисак неопходан за заваривање делује и по искључењу ултразвука.

На слици 4.21 б) уређај за заваривање нема могућност вертикалног померања, то значи да нема притиска на делове у току заваривања. Зазор између радне површине сонотроде и ослонца (регулационог вијка који има могућност вертикалног померања) дефинисан је тако да се заваривање делова остварује дејством само ултразвучних осцилација. Деформација делова који се заварују по овој шеми не прелази двоструку вредност амплитуде осциловања сонотроде ( $\Delta \leq 2A$ ) и зависи од дебљине материјала и његових својстава.

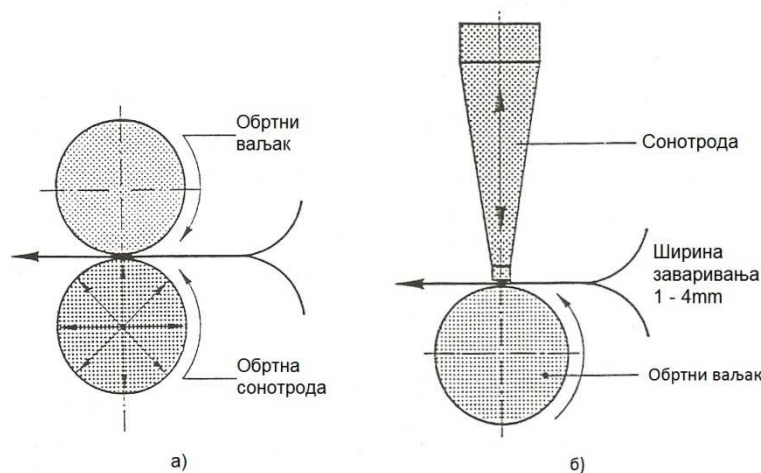
### **Узајамно померање уређаја за ултразвучно заваривање и делова који се заварују**

Ултразвучно заваривање у овом случају се дела на:

1. Притисно ултразвучно заваривање (преса) и
2. Неприкидно ултразвучно заваривање (континуално).

Притисно ултразвучно заваривање се завршава са једним кретањем сонотроде. Чврст спој настаје деловањем притиска и ултразвука (слика 4.17 и 4.18).

Неприкидним ултразвучним заваривањем (слика 4.21) заваривање настаје померањем ултразвучног уређаја у правцу заваривања или померањем делова који се заварују (слика 4.16 б). Код овог заваривања добијају се шавови великих дужина. На слици 4.22 [4] приказано је механизовано неприкидно ултразвучно заваривање код кога је уређај за заваривање непокретан, а делови се померају уз помоћ ваљка који уједно служи као ослонац (слика 4. 22 б) или као сонотрода (слика 4.22 а).



**Слика 4.22 Примери неприкидног ултразвучног заваривања [4]**

#### 4.4.4 ПАРАМЕТРИ ПРОЦЕСА УЛТРАЗВУЧНОГ ЗАВАРИВАЊА

Параметри процеса ултразвучног заваривања деле се на:

- основне и
- допунске.

Основни параметри ултразвучног заваривања су:

- амплитуда осциловања  $A$ ,  $\mu m$ ,
- фреквенција осциловања  $f$ ,  $kHz$ ,
- време дејства ултразвука  $t_u$ ,  $s$ ,
- време хлађења  $t_h$ ,  $s$ ,
- време заваривања  $t$ ,  $s$ ,
- притисак  $p$ ,  $Pa$  и
- брзина заваривања  $V$ ,  $m/s$  (за непрекидно заваривање).

Допунски параметри ултразвучног заваривања су:

- димензије, облик и материјал ослонца,
- материјал сонотроде,
- материјал термоизолационих подлошки итд.

Оптималне вредности параметара ултразвучног заваривања зависе од врсте материјала који се заварује, од дебљине и облика делова, од положаја и припреме контактних површина и других карактеристика. Одређује се експериментално за сваки случај заваривања посебно.

Основни параметри ултразвучног заваривања су узајамно повезани. Време неопходно за заваривање зависи од амплитуде осциловања и притиска на делове који се заварују. При већим амплитудама неопходна својства завареног споја се могу добити при краћем времену трајања заваривања и обратно. Амплитуда осциловања је повезана са притиском. Време трајања ултразвучног импулса зависи од амплитуде осциловања и притиска и износи од 1 до 3 секунде.

Утврђивање потребне амплитуде осциловања за заваривање

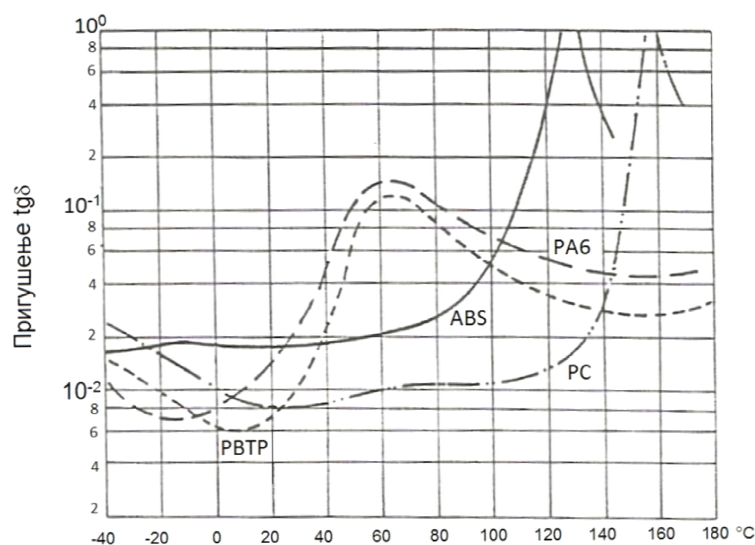
Амплитуда осциловања зависи од геометрије делова који се заварују, њихове дебљине, врсте термопласта и материјала ослонца. Као општа смерница важи следеће:

- за аморфне термопласте амплитуда осциловања је  $10 - 30 \mu m$ ,
- за кристалне термопласте амплитуда осциловања је  $25 - 50 \mu m$ .

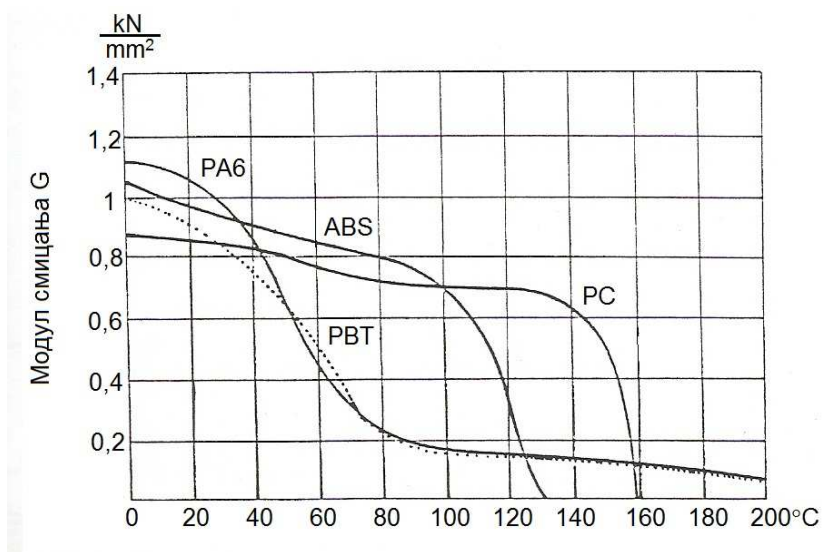
Потребна амплитуда се може најбоље одредити применом трансформатора са различитим преносним односом. При оптимизирању амплитуде осциловања треба почети са најмањим преносним односом.

Кад је у питању материјал, повољне ефекте заваривања треба очекивати код константног модула смицања  $G$  до температуре омекшавања. Истовремено фактор дисипације (расипања)  $\tan \delta$  треба да буде што мањи и константан. Ово је неопходно да би се звучни таласи без већих губитака довели до површине спајања. Јаче опадање криве модула смицања до температуре омекшавања, односно пораст криве фактора дисипације ствара веће пригушење ултразвучних таласа на путу према спојној површини.

На слици 4.23 дате су криве фактора расипања у зависности од температуре за неке врсте термопласта, а на слици 4.24 криве модула смицања.



Слика 4.23 Фактор расипања енергије  $\tan \delta$  [4]



Слика 4.24 Модул смицања  $G$  [4]

Губици енергије код термопласта са делимично кристалном структуром су углавном већи у односу на термопласте са аморфном структуром. Ово значи

да је за заваривање термопласта са делимично кристалном структуром потребна већа амплитуда и снага, као и дуже време заваривања.

У табели 4.1 дате су вредности амплитуда осциловања за ултразвучно заваривање разних термопласта.

У табели 4.2 дата је оцена заварљивости разнородних термопласта.

Легенда: + → добра веза, \* → никаква веза, О → лоша веза, (+) → може али се не препоручује.

У табели 4.3 [5] дати су оквирни подаци о заварљивости појединих врсте термопласта, као и потребне амплитуде заваривања.

Легенда: + → добра веза, \* → никаква веза.

|       | ABS     | PA 6    | PA66    | PC      | PMMA    | SAN     |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| ABS   |         |         |         | 25 – 40 | 20 – 35 | 25 – 60 |
| PA 6  |         |         | 35 – 55 |         |         |         |
| PA 66 |         | 35 – 55 |         |         |         |         |
| PC    | 25 – 40 |         |         |         | 25 – 40 |         |
| PMMA  |         |         |         | 25 – 40 |         |         |
| SAN   | 25 – 60 |         |         |         |         |         |

Табела 4.1 Опсег амплитуда осциловања за ултразвучно заваривање разних термопласта [5]

|       | ABS | CA | PA 6 | PA 66 | PC  | HDPE | LDPE | PMMA | POM | PP | PPO | PS | PVC | SAN |
|-------|-----|----|------|-------|-----|------|------|------|-----|----|-----|----|-----|-----|
| ABS   | +   |    | *    | *     | +   | *    | *    | +    |     | *  | *   | *  | O   | (+) |
| CA    |     | +  |      |       |     | *    | *    |      |     |    |     |    |     |     |
| PA 6  | *   |    | (+)  | +     | *   |      |      | *    |     |    |     | *  |     |     |
| PA 66 | *   |    | (+)  | +     | *   |      |      | *    |     |    |     | *  |     |     |
| PC    | +   |    |      |       | +   | *    | *    | (+)  |     | *  |     | *  |     |     |
| HDPE  | *   | *  |      |       | *   |      |      |      |     |    |     |    |     |     |
| LDPE  | *   | *  |      |       | *   |      |      |      |     |    |     |    |     |     |
| PMMA  | +   |    | *    | *     | (+) |      |      | +    |     |    |     |    | O   | O   |
| POM   |     |    |      |       |     |      |      |      | +   |    |     |    |     |     |
| PP    | *   |    |      |       | *   |      |      |      |     | +  |     |    |     |     |
| PPO   | *   |    |      |       |     |      |      |      |     |    | +   |    |     |     |
| PS    | *   |    | *    | *     | *   |      |      |      |     |    |     | +  |     | O   |
| PVC   | O   |    |      |       |     |      |      | O    |     |    |     |    | +   |     |
| SAN   | (+) |    |      |       |     |      |      | O    |     |    |     | O  |     | +   |

Табела 4.2 Оцена заварљивости разних термопласта [5]

| Ознака термопласта | Е<br>модул еластичности<br>$\text{Pa} \times 10^6$ | Густина<br>$\text{g/cm}^3$ | Температура омекшавања<br>$^{\circ}\text{C}$ | Пригушење |        |        | Заварљивост |              | Потребна амплитуда<br>$\mu\text{m}$ | Потребна снага |      |
|--------------------|----------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------------------------|-----------|--------|--------|-------------|--------------|-------------------------------------|----------------|------|
|                    |                                                    |                            |                                              | Мало      | Средње | Велико | Блиско поље | Удаљено поље |                                     | велика         | мала |
| ABS                | 20 – 28                                            | 1,02 – 1,21                | 185                                          | *         | *      |        | Веома добра | Добра        | 150 – 20                            |                | +    |
| CA                 | 20                                                 | 1,28 – 1,32                | 180                                          |           | +      |        | Условна     | Условна      | –                                   |                |      |
| PA                 | 13 – 30                                            | 1,00 – 1,35                | 235                                          |           |        | +      | Добра       | Условна      | 35 – 55                             | +              |      |
| PC                 | 22                                                 | 1,19 – 1,40                | 230                                          |           | +      |        | Веома добра | Добра        | 25 – 40                             |                | +    |
| PE                 | 3 – 10                                             | 0,92 – 0,96                | 150 – 180                                    |           |        | +      | Добра       | Условна      | 25 – 60                             | +              |      |
| PMMA               | 30                                                 | 1,10 – 1,18                | 160                                          |           | +      |        | Веома добра | Добра        | 20 – 35                             |                | +    |
| POM                | 30                                                 | 1,42 – 1,56                | 170                                          |           |        | +      | Добра       | Добра        | 40 – 45                             | +              |      |
| PP                 | 8 – 15                                             | 0,90 – 0,91                | 180                                          |           |        | +      | Добра       | Не           | 30 – 60                             | +              |      |
| PPO                | 25 – 27                                            | 1,05 – 1,35                | 185                                          | +         |        |        | Добра       | Условна      | 25 – 40                             |                | +    |
| PS                 | 31 – 33                                            | 1,05                       | 170                                          | +         |        |        | Веома добра | Веома добра  | 15 – 30                             |                | +    |
| PVC                | 30                                                 | 1,15 – 1,39                | 165                                          |           |        |        | Добра       | условна      | 20 – 40                             | +              |      |

Табела 4.3 Оцена заварљивости термопласта и потребне амплитуде осциловања [5]

## **Притисак**

При ултразвучном заваривању термопласта за обезбеђење чврстог споја неопходан је притисак на делове који се заварују. Дејством ултразвука на термопласт који се заварује долази до његовог омекшавања и преласка у термопластично стање. Дејством притиска који делује и неко време по престанку ултразвука (време хлађења) долази до заваривања.

При малим притисцима на термопласт долази до пада чврстоће споја услед неповољне механичке енергије у зони контакта. Сувише велики притисци могу довести до лома делова који се заварују. Амплитуда и притисак су узајамно повезани. Као груба смерница важи:

- мала амплитуда – велики притисак,
- велика амплитуда – мали притисак.

Код оптимизације параметара заваривања повећава се притисак од најмање вредности до вредности која обезбеђује сигуран квалитет заваривања. Притисак зависи и од геометрије делова који се заварују.

## **Време заваривања**

Време заваривања се састоји од времена ултразвука и времена потребног да растопљени материјал у зони вара очврсне (време хлађења). Време хлађења је углавном краће од времена дејства ултразвука. У принципу треба тежити да време буде што краће (мање од 1,5 секунде). Време заваривања зависи од:

- излазне снаге генератора,
- материјала који се заварује,
- величине површине спајања,
- времена дејства ултразвука,
- амплитуде и
- притиска.

Време заваривања се у пракси одређује експериментално. Време дејства ултразвука треба да је што краће и зависи од притиска, величине површине спајања и материјала делова који се заварују.

### **4.4.5 РАДНИ ЦИКЛУСИ ПРИ УЛТРАЗВУЧНОМ ЗАВАРИВАЊУ**

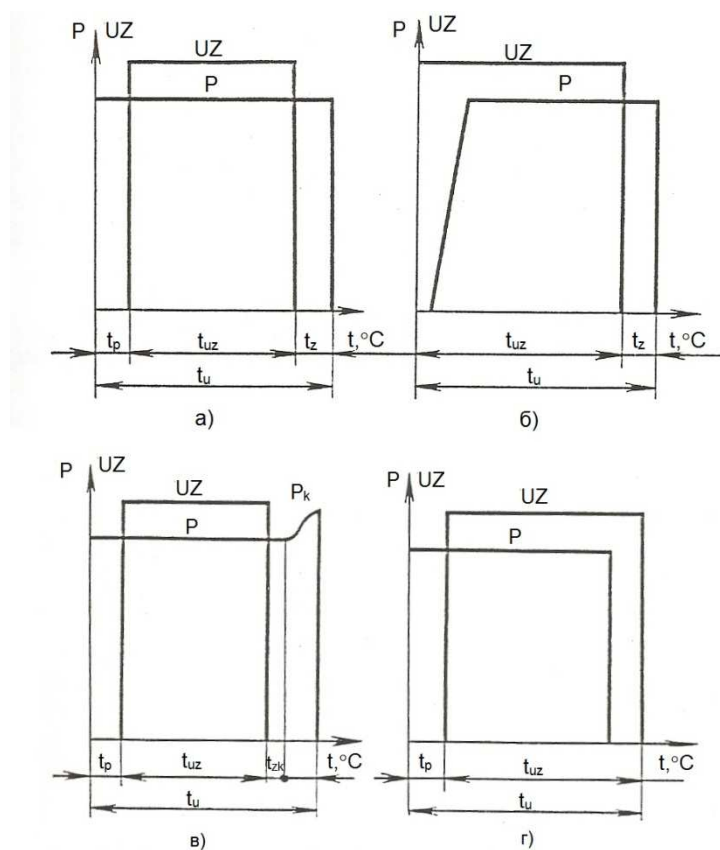
Ултразвучно заваривање термопласта изводи се по одређеним радним циклусима (слика 4.25). Од радног циклуса заваривања у значајној мери зависи квалитет заваривања.

Највише коришћен радни циклус је прикатан на слици 4.25 а). У том случају притисак делује до укључења ултразвука (време  $t_p$ ) , за време укључења

ултразвука и његовог дејства (време  $t_{uz}$ ) и после искључења ултразвучних осцилација (време  $t_z$ ). Од почетка до краја радног циклуса притисак је константан. Ултразвучне осцилације се уводе у виду једног импулса. Хлађење материјала настаје по престанку ултразвучних осцилација. Укупно време заваривања је:

$$t_u = t_p + t_{uz} + t_z$$

За заваривање термопласта на чијим површинама се налазе разни видови нечистоћа користи се радни циклус приказан на слици 4.25 б). Код овог радног циклуса ултразвучне осцилације се укључују пре деловања притиска. Тиме се обезбеђује чишћење површина које се спајају. Притисак у току заваривања је константан и делује и по искључењу ултразвучних осцилација (време  $t_z$ ). Хлађење делова настаје по престанку ултразвучних осцилација.



Слика 4.25 Радни циклуси при ултразвучном заваривању [5]

За заваривање делова од тврдых термопласта (PS, PMMA итд.) користи се радни циклус приказан на слици 4.25 в). Код овог радног циклуса са циљем "сабијања" и повећања чврстоће завареног шав, непосредно после искључења ултразвука, повећава се притисак на сонотроди. Притисак  $P_k$  се повећава у кратком временском интервалу ( $t_{zk}$ ). Радни циклус се користи за формирање херметичних шавова. Укупно време заваривања је:

$$t_u = t_p + t_{uz} + t_z + t_{zk}$$

На слици 4.25 г) приказана је нежељена варијанта радног циклуса ултразвучног заваривања. Искључење ултразвука настаје после престанка дејства притиска, што не обезбеђује заваривање.

## **4.5 УТИЦАЈ УСЛОВА ПРОИЗВОДЊЕ ДЕЛОВА НА УЛТРАЗВУЧНО ЗАВАРИВАЊЕ**

Делови добијени бризгањем претежно се заварују ултразвуком. У основи лошег заваривања леже често неодговарајући услови израде тих делова.

### **4.5.1 УТИЦАЈ ВЛАЖНОСТИ**

Због сувише великог садржаја влаге одређених термопласта добијених бризгањем при ултразвучном заваривању настају оштећења у виду мехура или порозне структуре. То умањује радну способност и естетски изглед делова, као и квалитет завареног споја. Сувише влажан термопласт треба осушити пре ултразвучног заваривања.

Код неких термопласта, на пример типа РА, максимална жиљавост се добија кондиционирањем упијања влаге. Поред повећања садржаја влаге неки термопласти упијају и нежељену влагу из атмосфере. Пошто ултразвучно заваривање влажних делова у оба случаја доводи до лоших резултата, порозне структуре, дужег времена заваривања итд., потребно је предузети кондинционирање тек после ултразвучног заваривања.

### **4.5.2 УТИЦАЈ УСЛОВА ПРЕРАДЕ**

Погрешно одабрани услови прераде могу довести до лоших резултата при ултразвучном заваривању. Грешке које могу да се појаве у деловима добијених бризгањем су:

- одступање мера (скупљање, накнадно скупљање, кривљење),
- тежинске промене,
- површинска грешка (лоша контура површине спајања, места преклапања),
- сувише велика унутрашња напрезања итд.

### **4.5.3 ВРЕМЕ СКЛАДИШТЕЊА И УТИЦАЈ РЕГЕНЕРАТА**

Неке делове од термопласта не треба одмах заваривати по вађењу из алата за бризгање, јер може да се појави накнадно скупљање па и разарање делова при ултразвучном заваривању. Уколико и дође до заваривања такав шав ће бити са лошим карактеристикама (појава прскотина због накнадног

скупљања). Због тога је неопходно да протекне најмање 24 часа од момента израде до заваривања ултразвуком.

Додавање већих количина регенерата деловима при бризгању може неповољно утицати на ултразвучно заваривање.

#### **4.5.4 СРЕДСТВА ЗА ОДВАЈАЊЕ ДЕЛОВА ИЗ АЛАТА ЗА БРИЗГАЊЕ**

Да би се део што лакше извадио из алата за бризгање, алат се подмазује разним средствима за одвајање. По вађењу дела из алата за бризгање долази до таложења средстава за одвајање као и нечистоћа на површинама (површина спајања делова) које су од битног значаја за ултразвучно заваривање. Пре ултразвучног заваривања површине треба очистити.

### **4.6 КОНСТРУКТИВНО ОБЛИКОВАЊЕ ДЕЛОВА ЗА УЛТРАЗВУЧНО ЗАВАРИВАЊЕ**

Делови добијени бризгањем и екструдирањем најчешће се заварују ултразвуком. Да би се при ултразвучном заваривању добиле добре карактеристике споја треба створити неопходне претпоставке већ у фази планирања, и конструкцију усмерити између осталог и на:

- дозвољено оптерећење завареног шави,
- непропустљивост према течностима и гасовима,
- одговарајући естетски изглед,
- избегавање изласка растопине итд.

Поред параметара ултразвучног заваривања на квалитет завареног споја утичу следећи фактори:

- врста материјала,
- конструкција делова,
- положај и конструкција површине спајања,
- тип и распоред концентратора (давача смера енергије),
- слободан пут упуштања итд.

#### **4.6.1 КОНСТРУКЦИЈА ДЕЛОВА ЗА УЛТРАЗВУЧНО ЗАВАРИВАЊЕ**

Делови за које се предвиђа ултразвучно заваривање треба да буду тако конструисани да не постоји могућност оштећења при ултразвучном заваривању. Треба предвидети довољно дебеле зидове, јер код сувише танких зидова постоји могућност оштећења.

Све углове и ивице на деловима који су предвиђени за ултразвучно заваривање треба заоблити. Минимални радијуси се крећу у границама од

0,2 до 0,5 mm . Сувише оштри прелази могу довести до напрслина при ултразвучном заваривању.

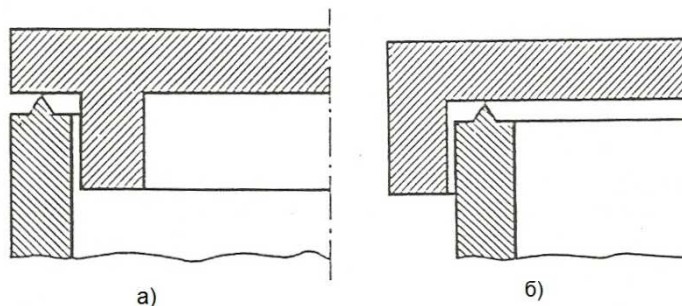
Положај површине спајања треба да буде нормалан на осу сонотроде и да лежи у истој равни. На површини спајања треба предвидети одговарајуће даваче смера енергије (концентраторе) за постизање краћих циклуса заваривања и елиминисање оштећења. Концентратор има задатак да убрза процес растапања ивица које се заварују, концентрацијом топлотне енергије. У одређеним границама величина и облик концентратора су слободни по избору. Разни типови ових концентратора су дати на слици 4.20. Највише примењени давачи смера енергије су конусни давачи и давачи у облику крова (слика 4.26 [4]).



Слика 4.26 Давачи смера енергије [4]

Конусни давачи смера енергије се не употребљавају уколико се тражи непропустљивост завареног споја. Угао  $\alpha$  износи  $60 - 90^\circ$ . Висина давача смера енергије  $h$  је од 0,2 – 1 mm, а у специјалним случајевима и 2 mm. Симетрично распоређен давач смера енергије има предност у односу на несиметрични. Давач смера енергије би требао да пада на средину наспрамне површине спајања.

На слици 4.27 [4] дати су неки облици површина спајања са кровним давачем смера енергије. Могући су и специјални облици давача смера енергије.

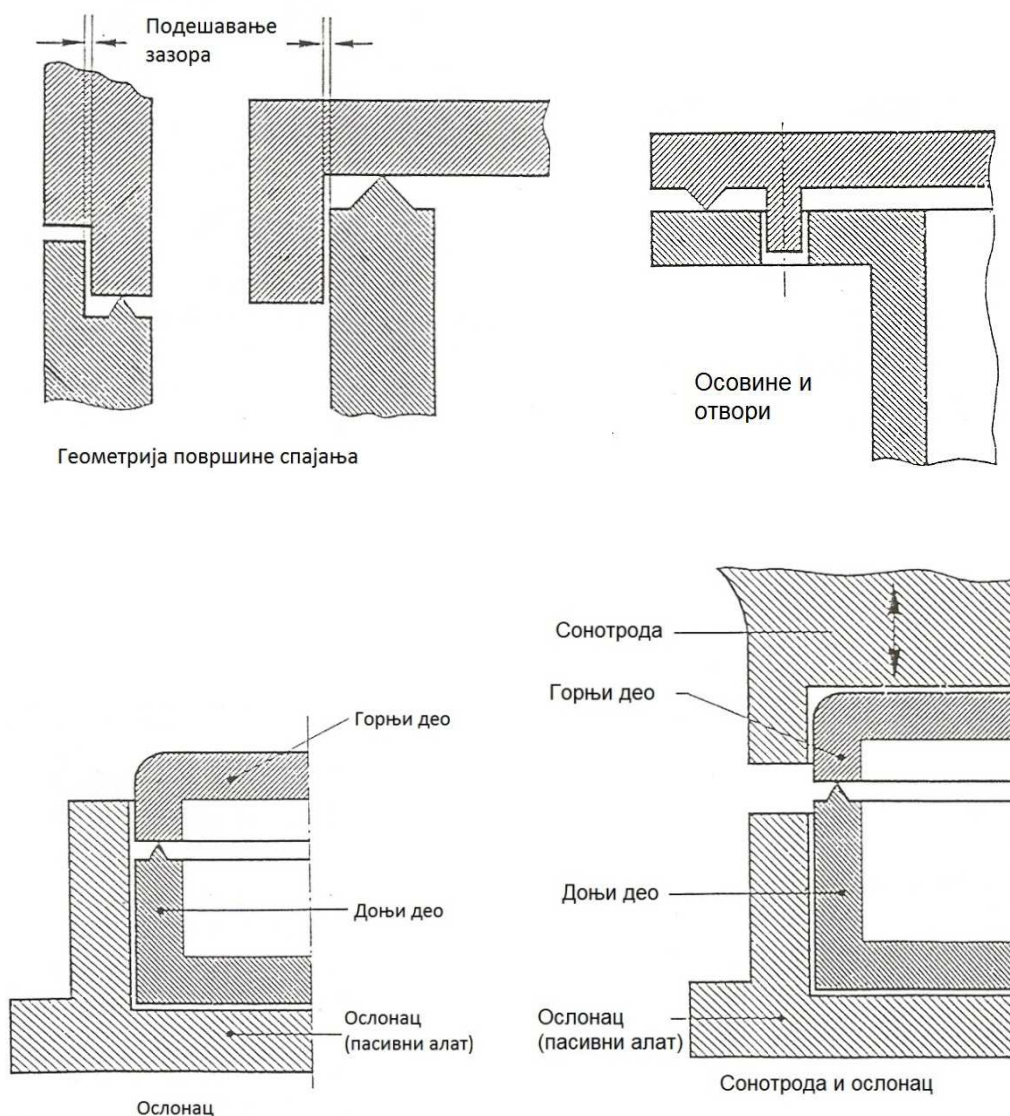


Слика 4.27 Давач смера енергије у облику крова:  
а) шав је споља; б) шав је унутра [4]

При ултразвучном заваривању горњи и доњи део треба тако центрирати да у току заваривања задрже своју позицију. Центрирање делова се најчешће изводи:

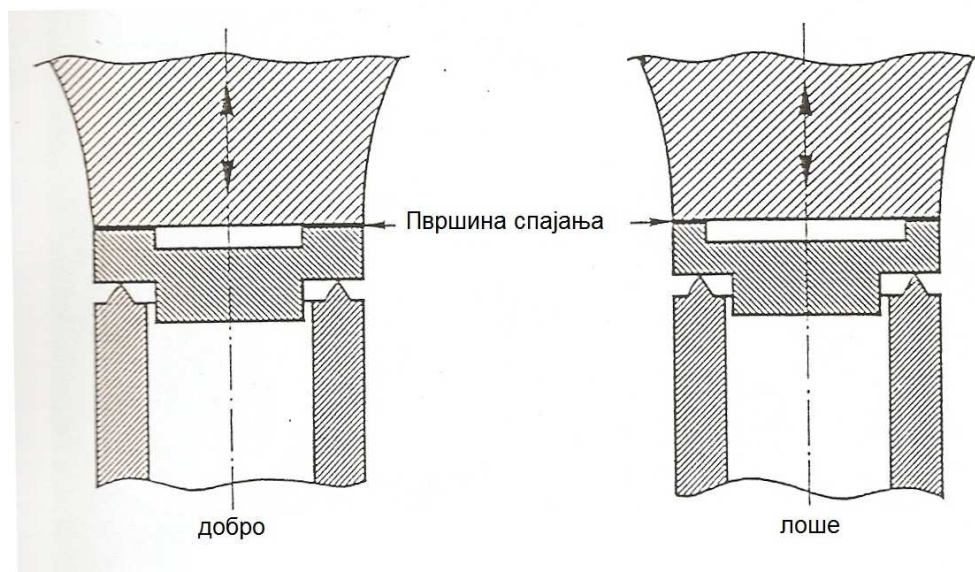
- геометријом површина спајања,
- осовиницама и отворима,
- ослонцем и
- сонотродом и ослонцем (у специјалним случајевима, при посебно високој тачности делова).

На слици 4.28 [5] дате су могућности центрирања делова за заваривање. Део који се поставља у ослонац (пасивни алат) треба довољно учврстити и центрирати у односу на горњи део. Ослонац се конструише за сваки део посебно.



Слика 4.28 Центрирање делова при ултразвучном заваривању [5]

Површина контакта сонотроде и горњег дела треба да буде равна. Код сувише малих површина контакта ограничава се увођење ултразвука. Последице тога су лоше спојене површине (слика 4.29 [5]).



Слика 4.29 Утицај величине површине спајања на ултразвучно заваривање [5]

## 4.7 АЛАТ ЗА УЛТРАЗВУЧНО ЗАВАРИВАЊЕ (СОНОТРОДА)

Сонотрода треба да испуни следеће задатке:

- да пренесе енергију осциловања у зону заваривања,
- да пренесе притисак и
- да изврши трансформацију амплитуде коју прима од трансформатора на потребну амплитуду за заваривање.

Нетачно прорачуната и израђена сонотрода (неадекватна фреквенција, неповољна трансформација итд.) може довести до оштећења резонантне јединице или генератора.

Облици сонотрода су различити и прилагођени су делу са којим су у контакту. За конструкцију и прорачун сонотроде од битног су значаја облик и димензије површине дела који је у контакту са челом сонотроде. На слици 4.30 приказани су неки облици сонотрода. Најчешће су у употреби степенасте, конусне, правоугаоне (урезане) и експоненцијалне сонотроде.



Слика 4.30 Облици сонотрода [7]

#### 4.7.1 ИЗРАДА СОНОТРОДА

Пре прорачуна и израде сонотрода бира се материјал сонотроде. Избор материјала зависи од примене. За заваривање термопласта најчешће се користе сонотроде од легура алуминијума и титана. При томе се легуре алуминијума користе за малосеријску, а легуре титана за серијску производњу. Осим наведених материјала за израду сонотроде могу се користити квалитетни челици и алуминијумске бронзе. У табели 4.4 дат је преглед најчешће коришћених материјала за израду сонотрода, брзина звука и модул еластичности.

| Бројна ознака по DIN – у | Ознака по DIN – у | Ознака по JUS – у        | $C_o$ , m/s    | $E$ , N/m <sup>2</sup> |
|--------------------------|-------------------|--------------------------|----------------|------------------------|
| 3.7165                   | Ti Al V 64        |                          | $4900 \pm 100$ | $114000 \cdot 10^6$    |
| 3.1355.51                | Al Cu Mg 2        | Al Cu 4 Mg 1             | $5100 \pm 100$ | $68670 \cdot 10^6$     |
|                          | Al                |                          | $5100 \pm 200$ |                        |
| 1.15.50                  | OC 100            | C105U<br>Č1940(побољшан) | $5200 \pm 50$  |                        |
| 2.4360                   | Monel             |                          | $4350 \pm 150$ |                        |

Табела 4.4 Брзине звука за поједине материјале при односу  $D/L = 1/3$  и модул еластичности [5]

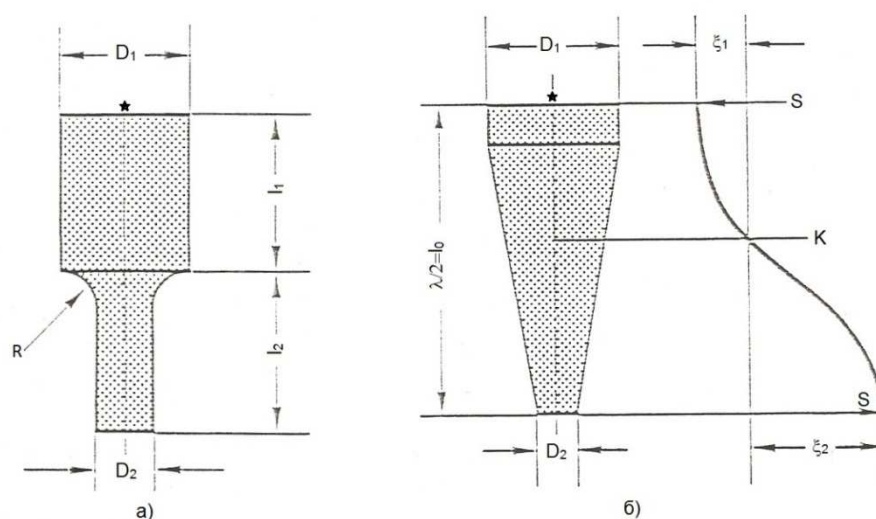
Материјали за сонотроде треба да су хомогени, без заосталих напона, шупљина и напрслина, како не би долазило до губитака односно апсорпције ултразвучне енергије. Расипање ултразвучне енергије је последица рефлексије и преламања таласа. Сонотроде су изложене динамичком оптерећењу истезање – притисак са веома великом учестаношћу. Зато и најмањи дефекти у материјалу доводе до напрслина и неупотребљивости сонотроде. Због тога је неопходно да се материјал пре употребе подвргне испитивању ултразвуком.

Као мера за повећање динамичке издржљивости поред квалитетне обраде препоручује се и бомбардовање омотача сонотроде челичним куглицама. Као резултат је дужи век трајања сонотроде.

Произвођачи ултразвучних апарата углавном израђују и сонотроде. Корисници сонотрода могу сами израђивати неке сонотроде једноставнијег облика.

У пракси су се добро показали следећи типови сонотрода:

- степенаста са кружним попречним пресеком (слика 4.31 а),
- конусна (слика 4.31б), правоугаона урезана и
- експоненцијална.



Слика 4.31 Алат за ултразвучно заваривање (сонотрода):  
а) степенаста; б) конусна;  $\xi$  – амплитуда, \* - прикључна завојница,  
К – чворна тачка [5]

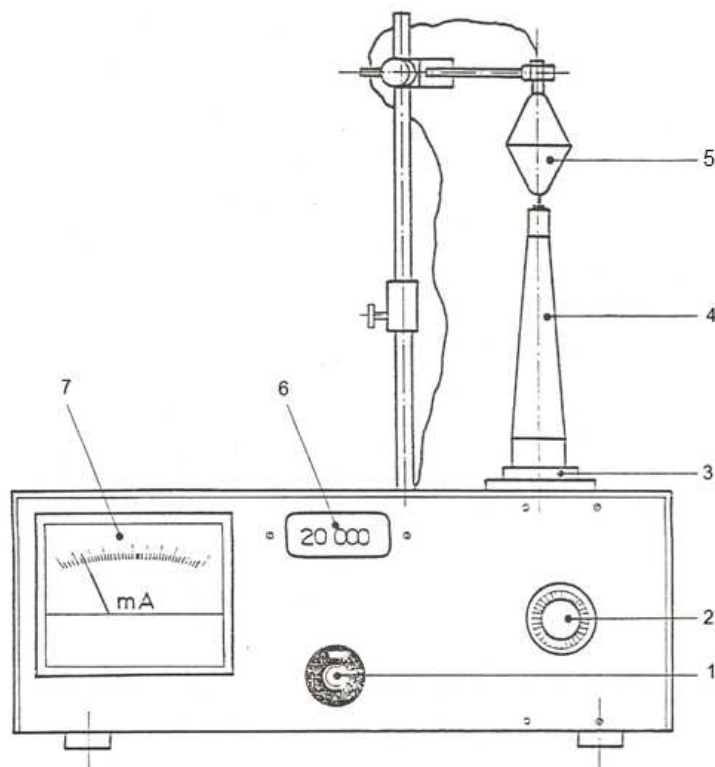
Параметри сонотрода су:

- брзина звука  $c_0$ ,
- дужина сонотроде  $l_0 = \lambda/2$ ,
- фреквенција  $f$ ,
- улазни пречник сонотроде  $D_1$ ,
- излазни пречник сонотроде  $D_2$ ,
- улазна површина сонотроде  $A_1$ ,
- излазна површина сонотроде  $A_2$ ,
- излазни пречник трансформатора  $D_3$ ,
- излазна површина трансформатора (површина споја трансформатора и сонотроде)  $A_3$ ,
- излазна амплитуда трансформатора  $\xi_3$ ,
- излазна амплитуда сонотроде  $\xi_2$ ,
- улазна амплитуда сонотроде  $\xi_1$ , и
- коефицијент појачања  $\beta$ .

По избору материјала сонотроде утврђује се брзина звука дотичне шарже материјала. Зато је потребан уређај за мерење фреквенције. Један такав уређај приказан је на слици 4.32 [5]. Од материјала који се испитује израђује се цилиндар чији је однос пречника 1:3 до 1:4. Чеоне површине цилиндра треба квалитетно обрадити. Цилиндар се ставља на осцилатор (побуђивач), а на другој чеоној површини поставља се мерна сонда која је повезана са осцилографом. На високо фреквентном генератору, који напаја осцилатор, треба истражити подручје фреквенција у коме се вероватно налази резонантна фреквенција. Ако је пробни комад цилиндар пречника 40 mm и дужине 120 mm, резонантна фреквенција је између 15 и 20 kHz, зависно од врсте материјала. Брзина звука се израчунава из израза:

$$c_0 = 2fl$$

где је:  $f$  – очитана фреквенција при највећем отклону казаљке,  $l$  – дужина цилиндра који се испитује.



Слика 4.32 Уређај за мерење фреквенције: 1 – регулатор снаге, 2 – бирач фреквенције, 3 – давач осцилација, 4 – сонотрода, 5 – мерна сонда, 6 – индикатор фреквенције, 7 – скала [5]

Одређивање дужине код степенасте сонотроде

Према слици 4. 31 а) следи:

$$l_0 = l_1 + l_2$$

Прелаз према мањем пресеку лежи у равни чвора. Прелаз се изводи у виду радијуса јер постоји опасност настајања прскотина. Код сонотрода максималних димензија пресека од 60 mm узима се  $R = 10 \text{ mm}$ .

Прорачун дужине  $l_0$  се изводи преко израза:

$$l_0 = l_1 + l_2 = k_1 \cdot \frac{c_0}{4f} + k_2 \cdot \frac{c_0}{4f},$$

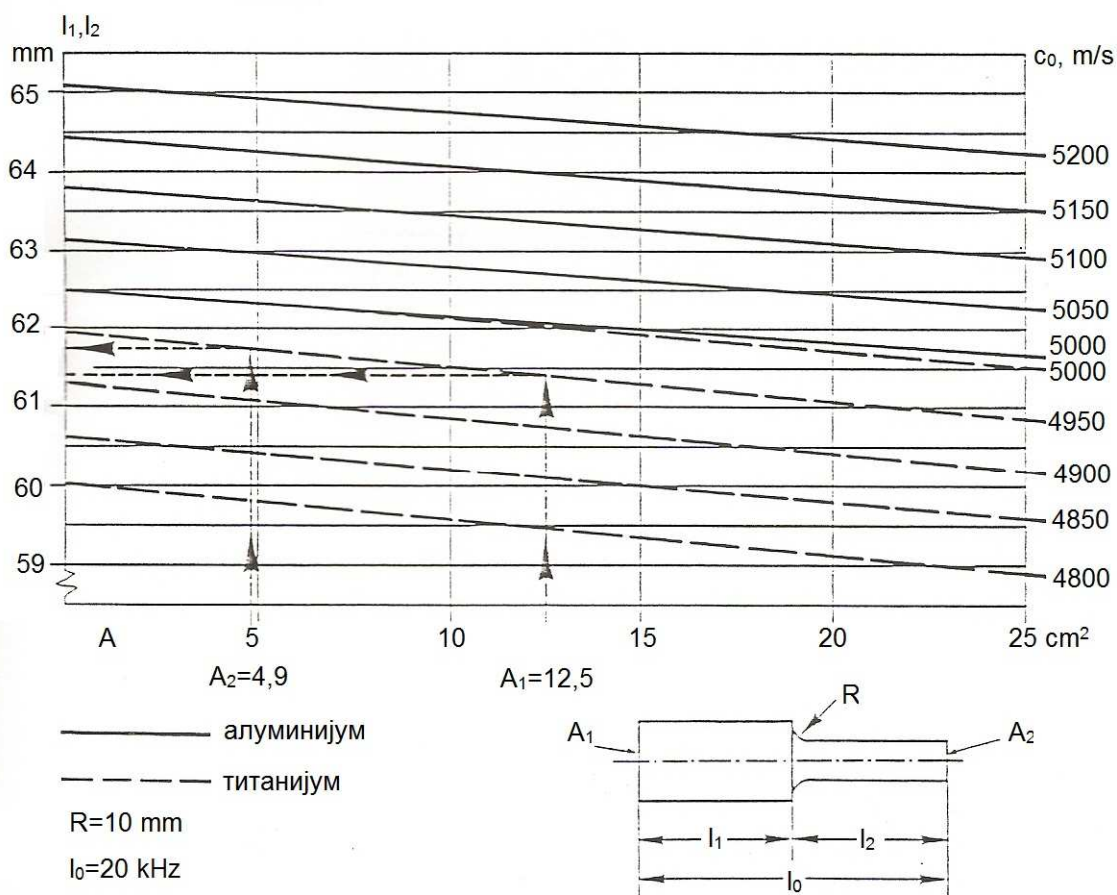
где су:

$k_1, k_2$  – фактори корекције у функцији од попречног пресека.

Коефицијент појачања износи:

$$\beta = \frac{A_1}{A_2} = \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^2$$

Брзина звука  $c_0$  се одређује из табеле 4.4, а дужине  $l_1$  и  $l_2$  слике 4.33.



Слика 4.33 Графичко одређивање  $l_1$  и  $l_2$  код степенастих сонотрода [5]

Израчуната дужина  $l_0$  се повећава за 2 до 3 mm ради сигурности. Уколико постоје већа искуства у пракси, овај додатак дужине се може смањити.

## 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА

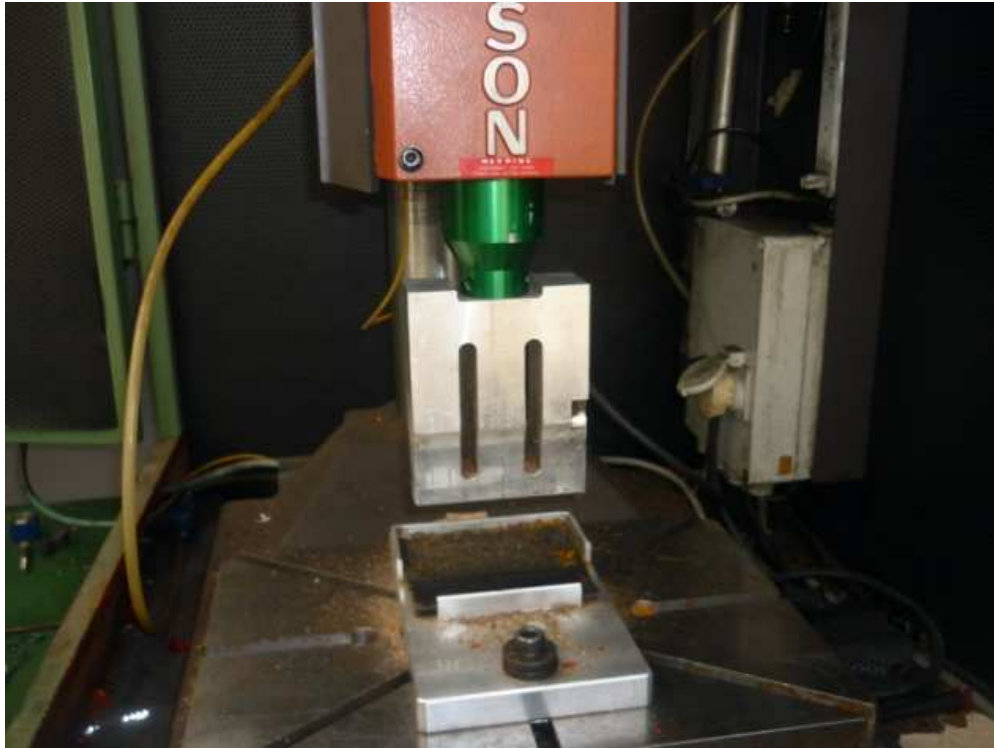
Експериментална испитивања су вршена у предузећу "21. Октобар" у Крагујевцу. Коришћене су неколико врста фолија: PVC, PMMA, PET, поликарбонат и полиетилен ниске густине. Сва испитивања су вршена на "Branson" ултразвучном уређају за заваривање. Циљ овог истраживања је да се провери, да ли су одређене врсте фолије од пластичних маса заварљиве ултразвуком. На слици 5.1 је приказан изглед "Branson" управљачки део машине, а на слици 5.2 је приказана глава, појачавач и сонотрода. Сонотроде су од алуминијума. Слика 5.3 представља изглед сонотроде, а слика 5.4 приказује сонотроду са доњим делом алата.



Слика 5.1 "Branson" управљачки део машине



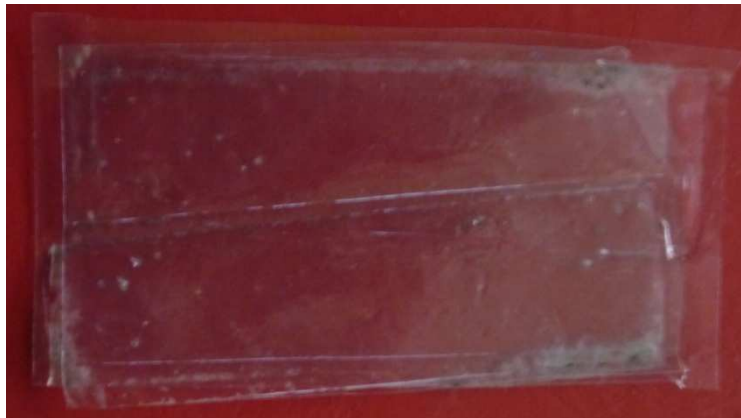
Слика 5.2 Глава, појачавач и сонотрода



*Слика 5.3 Сонотрода*



*Слика 5.4 Сонотрода са доњим делом алата*

| Експеримент 1.                                                                       |                           |                 |
|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|-----------------|
| Назив фолија                                                                         | Графофолија               | Графофолија     |
| Врста пластичне масе                                                                 | Поликарбонат РС           | Поликарбонат РС |
| Дебљина фолије                                                                       | 0,15 mm                   | 0,15 mm         |
| Режими рада                                                                          |                           |                 |
| Време варења                                                                         | 1s, 2 s, 3 s, 4 s         |                 |
| Време притиска                                                                       | 1s, 2 s, 3 s, 4 s         |                 |
| Притисак                                                                             | 30 mbar, 50 mbar, 80 mbar |                 |
| Учестаност                                                                           | 80 kHz                    |                 |
| Слика                                                                                |                           |                 |
|  |                           |                 |
| Коментар                                                                             |                           |                 |
| Фолије нису међу собом ултразвучно завариве ни са једним коришћеним режимом.         |                           |                 |

| Експеримент 2.                                                                                                                                                                          |                             |                             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Назив фолија                                                                                                                                                                            | Фасцикла<br>(ситно рељефна) | Фасцикла<br>(ситно рељефна) |
| Врста пластичне масе                                                                                                                                                                    | Поливинил – хлорид<br>PVC   | Поливинил – хлорид<br>PVC   |
| Дебљина фолије                                                                                                                                                                          | 0,11 mm                     | 0,11 mm                     |
| Режими рада                                                                                                                                                                             |                             |                             |
| Време варења                                                                                                                                                                            | 1s, 2 s, 3 s, 4 s           |                             |
| Време притиска                                                                                                                                                                          | 1s, 2 s, 3 s, 4 s           |                             |
| Притисак                                                                                                                                                                                | 30 mbar, 50 mbar, 80 mbar   |                             |
| Учестаност                                                                                                                                                                              | 80 kHz                      |                             |
| Слика                                                                                                                                                                                   |                             |                             |
|                                                                                                     |                             |                             |
| Коментар                                                                                                                                                                                |                             |                             |
| Фолије нису међу собом ултразвучно завариве ни са једним коришћеним режимом. На местима обода сонотроде дошло је до делимичног заваривања и деформације (набирање) доње и горње фолије. |                             |                             |

| Експеримент 3.                                                                       |                           |                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|------------------------|
| Назив фолија                                                                         | Фасцикла (бела)           | Фасцикла (бела)        |
| Врста пластичне масе                                                                 | Поливинил – хлорид PVC    | Поливинил – хлорид PVC |
| Дебљина фолије                                                                       | 0,18 mm                   | 0,18 mm                |
| Режими рада                                                                          |                           |                        |
| Време варења                                                                         | 1 s, 2 s, 3 s, 4 s        |                        |
| Време притиска                                                                       | 1 s, 2 s, 3 s, 4 s        |                        |
| Притисак                                                                             | 30 mbar, 50 mbar, 80 mbar |                        |
| Учестаност                                                                           | 80 kHz                    |                        |
| Слика                                                                                |                           |                        |
|  |                           |                        |
| Коментар                                                                             |                           |                        |
| Фолије нису међу собом ултразвучно завариве ни са једним коришћеним режимом.         |                           |                        |

| Експеримент 4.                                                                                                                                                                  |                             |                           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Назив фолија                                                                                                                                                                    | Фасцикла<br>(ситно рељефна) | Фасцикла<br>(бела)        |
| Врста пластичне масе                                                                                                                                                            | Поливинил – хлорид<br>PVC   | Поливинил – хлорид<br>PVC |
| Дебљина фолије                                                                                                                                                                  | 0,11 mm                     | 0,18 mm                   |
| Режими рада                                                                                                                                                                     |                             |                           |
| Време варења                                                                                                                                                                    | 1s, 2 s, 3 s, 4 s           |                           |
| Време притиска                                                                                                                                                                  | 1s, 2 s, 3 s, 4 s           |                           |
| Притисак                                                                                                                                                                        | 30 mbar, 50 mbar, 80 mbar   |                           |
| Учестаност                                                                                                                                                                      | 80 kHz                      |                           |
| Слика                                                                                                                                                                           |                             |                           |
|                                                                                             |                             |                           |
| Коментар                                                                                                                                                                        |                             |                           |
| Фолије су делимично ултразвучно завариве. На појединим местима контакта фолија дошло је до спајања, међутим након одређеног времена уз малу силу дошло је до раздвајања фолија. |                             |                           |

| Експеримент 5.                                                                       |                           |                           |
|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Назив фолија                                                                         | Исечак од боце            | Исечак од боце            |
| Врста пластичне масе                                                                 | Полиетилен терефталат PET | Полиетилен терефталат PET |
| Дебљина фолије                                                                       | 0,2 mm                    | 0,2 mm                    |
| Режими рада                                                                          |                           |                           |
| Време варења                                                                         | 1 s, 2 s, 3 s, 4 s        |                           |
| Време притиска                                                                       | 1 s, 2 s, 3 s, 4 s        |                           |
| Притисак                                                                             | 30 mbar, 50 mbar, 80 mbar |                           |
| Учестаност                                                                           | 80 kHz                    |                           |
| Слика                                                                                |                           |                           |
|  |                           |                           |
| Коментар                                                                             |                           |                           |
| Фолије нису међу собом ултразвучно завариве ни са једним коришћеним режимом.         |                           |                           |

| Експеримент 6.                                                                       |                               |                               |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Назив фолија                                                                         | Фолија за пластенике          | Фолија за пластенике          |
| Врста пластичне масе                                                                 | Полиетилен ниске густине LDPE | Полиетилен ниске густине LDPE |
| Дебљина фолије                                                                       | 0,09 mm                       | 0,09 mm                       |
| Режими рада                                                                          |                               |                               |
| Време варења                                                                         | 1s, 2 s, 3 s, 4 s             |                               |
| Време притиска                                                                       | 1s, 2 s, 3 s, 4 s             |                               |
| Притисак                                                                             | 30 mbar                       |                               |
| Учестаност                                                                           | 80 kHz                        |                               |
| Слика                                                                                |                               |                               |
|  |                               |                               |
| Коментар                                                                             |                               |                               |
| Фолије нису међу собом ултразвучно завариве ни са једним коришћеним режимом.         |                               |                               |

| Експеримент 7.                                                                       |                               |                               |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Назив фолија                                                                         | Фолија за пластенике          | Фолија за пластенике          |
| Врста пластичне масе                                                                 | Полиетилен ниске густине LDPE | Полиетилен ниске густине LDPE |
| Дебљина фолије                                                                       | 0,09 mm                       | 0,09 mm                       |
| Режими рада                                                                          |                               |                               |
| Време варења                                                                         | 1s, 2 s, 3 s, 4 s             |                               |
| Време притиска                                                                       | 1s, 2 s, 3 s, 4 s             |                               |
| Притисак                                                                             | 80 mbar                       |                               |
| Учестаност                                                                           | 80 kHz                        |                               |
| Слика                                                                                |                               |                               |
|  |                               |                               |
| Коментар                                                                             |                               |                               |
| Фолије нису међу собом ултразвучно завариве ни са једним коришћеним режимом.         |                               |                               |

| Експеримент 8.                                                                       |                           |                           |
|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Назив фолија                                                                         | Црна фолија               | Црна фолија               |
| Врста пластичне масе                                                                 | Поливинил – хлорид<br>PVC | Поливинил – хлорид<br>PVC |
| Дебљина фолије                                                                       | 0,15 mm                   | 0,15 mm                   |
| Режими рада                                                                          |                           |                           |
| Време варења                                                                         | 1s, 2 s, 3 s, 4 s         |                           |
| Време притиска                                                                       | 1s, 2 s, 3 s, 4 s         |                           |
| Притисак                                                                             | 30 mbar, 50 mbar, 80 mbar |                           |
| Учестаност                                                                           | 80 kHz                    |                           |
| Слика                                                                                |                           |                           |
|  |                           |                           |
| Коментар                                                                             |                           |                           |
| Фолије нису међу собом ултразвучно завариве ни са једним коришћеним режимом.         |                           |                           |

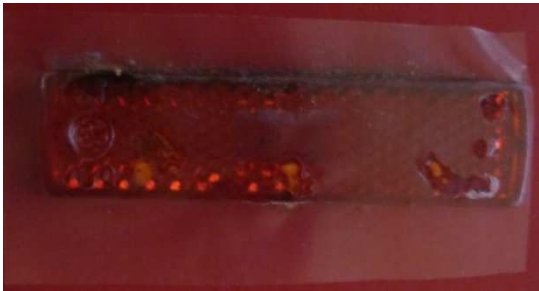
| Експеримент 9.                                                                       |                           |                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|------------------------|
| Назив фолија                                                                         | Графофолија               | Црна фолија            |
| Врста пластичне масе                                                                 | Поликарбонат PC           | Поливинил – хлорид PVC |
| Дебљина фолије                                                                       | 0,15 mm                   | 0,15 mm                |
| Режими рада                                                                          |                           |                        |
| Време варења                                                                         | 1s, 2 s, 3 s, 4 s         |                        |
| Време притиска                                                                       | 1s, 2 s, 3 s, 4 s         |                        |
| Притисак                                                                             | 30 mbar, 50 mbar, 80 mbar |                        |
| Учестаност                                                                           | 80 kHz                    |                        |
| Слика                                                                                |                           |                        |
|  |                           |                        |
| Коментар                                                                             |                           |                        |
| Фолије нису међу собом ултразвучно завариве ни са једним коришћеним режимом.         |                           |                        |

| Експеримент 10.                                                                      |                           |                    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|--------------------|
| Назив фолија                                                                         | Графофолија (тања)        | Графофолија (тања) |
| Врста пластичне масе                                                                 | Поликарбонат РС           | Поликарбонат РС    |
| Дебљина фолије                                                                       | 0,1 mm                    | 0,1 mm             |
| Режими рада                                                                          |                           |                    |
| Време варења                                                                         | 1s, 2 s, 3 s, 4 s         |                    |
| Време притиска                                                                       | 1s, 2 s, 3 s, 4 s         |                    |
| Притисак                                                                             | 30 mbar, 50 mbar, 80 mbar |                    |
| Учестаност                                                                           | 80 kHz                    |                    |
| Слика                                                                                |                           |                    |
|  |                           |                    |
| Коментар                                                                             |                           |                    |
| Фолије нису међу собом ултразвучно завариве ни са једним коришћеним режимом.         |                           |                    |

| Експеримент 11.                                                                                                                                                                                                                                              |                           |                    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|--------------------|
| Назив фолија                                                                                                                                                                                                                                                 | Графофолија (тања)        | Графофолија (тања) |
| Врста пластичне масе                                                                                                                                                                                                                                         | Поликарбонат РС           | Поликарбонат РС    |
| Дебљина фолије                                                                                                                                                                                                                                               | 0,1 mm                    | 0,1 mm             |
| Режими рада                                                                                                                                                                                                                                                  |                           |                    |
| Време варења                                                                                                                                                                                                                                                 | 1s, 2 s, 3 s, 4 s         |                    |
| Време притиска                                                                                                                                                                                                                                               | 1s, 2 s, 3 s, 4 s         |                    |
| Притисак                                                                                                                                                                                                                                                     | 30 mbar, 50 mbar, 80 mbar |                    |
| Учестаност                                                                                                                                                                                                                                                   | 80 kHz                    |                    |
| Слика                                                                                                                                                                                                                                                        |                           |                    |
|                                                                                                                                                                          |                           |                    |
| Коментар                                                                                                                                                                                                                                                     |                           |                    |
| <p>Испитивање је вршено са кружном сонотродом, на другој машини. Фолије нису међу собом ултразвучно завариве ни са једним коришћеним режимом. На местима обода сонотроде дошло је до делимичног заваривања и деформације (набирање) доње и горње фолије.</p> |                           |                    |

| Експеримент 12.                                                                                                                                                                                                                                              |                           |                           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Назив фолија                                                                                                                                                                                                                                                 | Црна фолија               | Црна фолија               |
| Врста пластичне масе                                                                                                                                                                                                                                         | Поливинил – хлорид<br>PVC | Поливинил – хлорид<br>PVC |
| Дебљина фолије                                                                                                                                                                                                                                               | 0,15 mm                   | 0,15 mm                   |
| Режими рада                                                                                                                                                                                                                                                  |                           |                           |
| Време варења                                                                                                                                                                                                                                                 | 1s, 2 s, 3 s, 4 s         |                           |
| Време притиска                                                                                                                                                                                                                                               | 1s, 2 s, 3 s, 4 s         |                           |
| Притисак                                                                                                                                                                                                                                                     | 30 mbar, 50 mbar, 80 mbar |                           |
| Учестаност                                                                                                                                                                                                                                                   | 80 kHz                    |                           |
| Слика                                                                                                                                                                                                                                                        |                           |                           |
|                                                                                                                                                                          |                           |                           |
| Коментар                                                                                                                                                                                                                                                     |                           |                           |
| <p>Испитивање је вршено са кружном сонотродом, на другој машини. Фолије нису међу собом ултразвучно завариве ни са једним коришћеним режимом. На местима обода сонотроде дошло је до делимичног заваривања и деформације (набирање) доње и горње фолије.</p> |                           |                           |

| Експеримент 13.                                                                                                                                                                                                                                              |                           |                           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Назив фолија                                                                                                                                                                                                                                                 | Фасцикла (бела)           | Фасцикла (бела)           |
| Врста пластичне масе                                                                                                                                                                                                                                         | Поливинил – хлорид<br>PVC | Поливинил – хлорид<br>PVC |
| Дебљина фолије                                                                                                                                                                                                                                               | 0,18 mm                   | 0,18 mm                   |
| Режими рада                                                                                                                                                                                                                                                  |                           |                           |
| Време варења                                                                                                                                                                                                                                                 | 1s, 2 s, 3 s, 4 s         |                           |
| Време притиска                                                                                                                                                                                                                                               | 1s, 2 s, 3 s, 4 s         |                           |
| Притисак                                                                                                                                                                                                                                                     | 30 mbar, 50 mbar, 80 mbar |                           |
| Учестаност                                                                                                                                                                                                                                                   | 80 kHz                    |                           |
| Слика                                                                                                                                                                                                                                                        |                           |                           |
|                                                                                                                                                                          |                           |                           |
| Коментар                                                                                                                                                                                                                                                     |                           |                           |
| <p>Испитивање је вршено са кружном сонотродом, на другој машини. Фолије нису међу собом ултразвучно завариве ни са једним коришћеним режимом. На местима обода сонотроде дошло је до делимичног заваривања и деформације (набирање) доње и горње фолије.</p> |                           |                           |

| Експеримент 14.                                                                                                                                                                                                                                                           |                             |                             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Назив фолија                                                                                                                                                                                                                                                              | Фасцикла<br>(ситно рељефна) | Сенило показивача правца    |
| Врста пластичне масе                                                                                                                                                                                                                                                      | Поливинил – хлорид<br>PVC   | Полиметилметакрилат<br>PMMA |
| Дебљина фолије                                                                                                                                                                                                                                                            | 0,11 mm                     |                             |
| Режими рада                                                                                                                                                                                                                                                               |                             |                             |
| Време варења                                                                                                                                                                                                                                                              | 1s, 2 s, 3 s, 4 s           |                             |
| Време притиска                                                                                                                                                                                                                                                            | 1s, 2 s, 3 s, 4 s           |                             |
| Притисак                                                                                                                                                                                                                                                                  | 30 mbar, 50 mbar, 80 mbar   |                             |
| Учестаност                                                                                                                                                                                                                                                                | 80 kHz                      |                             |
| Слика                                                                                                                                                                                                                                                                     |                             |                             |
| <div></div> <div></div>                                                                           |                             |                             |
| Коментар                                                                                                                                                                                                                                                                  |                             |                             |
| <p>Заваривање је вршено постављањем фолије на равну страну показивача правца. Фолије нису међу собом ултразвучно завариве ни са једним коришћеним режимом. На местима обода сонотроде дошло је до делимичног заваривања и деформације (набирање) доње и горње фолије.</p> |                             |                             |

| Експеримент 15.                                                                                                                                                                                                                                                           |                           |                             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Назив фолија                                                                                                                                                                                                                                                              | Фасцикла (бела)           | Сенило показивача правца    |
| Врста пластичне масе                                                                                                                                                                                                                                                      | Поливинил – хлорид<br>PVC | Полиметилметакрилат<br>PMMA |
| Дебљина фолије                                                                                                                                                                                                                                                            | 0,18 mm                   |                             |
| Режими рада                                                                                                                                                                                                                                                               |                           |                             |
| Време варења                                                                                                                                                                                                                                                              | 1s, 2 s, 3 s, 4 s         |                             |
| Време притиска                                                                                                                                                                                                                                                            | 1s, 2 s, 3 s, 4 s         |                             |
| Притисак                                                                                                                                                                                                                                                                  | 30 mbar, 50 mbar, 80 mbar |                             |
| Учестаност                                                                                                                                                                                                                                                                | 80 kHz                    |                             |
| Слика                                                                                                                                                                                                                                                                     |                           |                             |
| <div></div> <div></div>                                                                           |                           |                             |
| Коментар                                                                                                                                                                                                                                                                  |                           |                             |
| <p>Заваривање је вршено постављањем фолије на равну страну показивача правца. Фолије нису међу собом ултразвучно завариве ни са једним коришћеним режимом. На местима обода сонотроде дошло је до делимичног заваривања и деформације (набирање) доње и горње фолије.</p> |                           |                             |

| Експеримент 16.                                                                                                               |                           |                           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Назив фолија                                                                                                                  | Фасцикла (бела)           | Црна фолија               |
| Врста пластичне масе                                                                                                          | Поливинил – хлорид<br>PVC | Поливинил – хлорид<br>PVC |
| Дебљина фолије                                                                                                                | 0,18 mm                   | 0,15 mm                   |
| Режими рада                                                                                                                   |                           |                           |
| Време варења                                                                                                                  | 4 s                       |                           |
| Време притиска                                                                                                                | 4 s                       |                           |
| Притисак                                                                                                                      | 80 mbar                   |                           |
| Учестаност                                                                                                                    | 100 kHz                   |                           |
| Слика                                                                                                                         |                           |                           |
|                                           |                           |                           |
| Коментар                                                                                                                      |                           |                           |
| Испитивање је вршено са максималном учестаношћу. Фолије нису међу собом ултразвучно завариве ни са једним коришћеним режимом. |                           |                           |

## 6. ЗАКЉУЧАК

Механичке, термичке и електричне особине као и хемијска постојаност представљају основу за практичну примену пластичних маса. Постоји веома мали број пластичних маса које се могу, након производње, прерадити у готове производе. Најчешће се морају помешати са разним додацима, који делују на особине и на ток прераде пластичних маса.

Ултразвучно заваривање пластичних маса је веома ефектан поступак и траје од 1 до 3 секунде. Да би се постигао тражени квалитет заваривања од битне важности је избор уређаја за ултразвучно заваривање и оптимизирање параметара заваривања.

Оптималне вредности параметара ултразвучног заваривања зависе од дебљине и облика делова, од положаја и припреме контактних површина итд. Одређују се експериментално за конкретан случај ултразвучног заваривања.

При малим притисцима на површине које се заварују долази до пада чврстоће споја, а при великим притисцима може доћи до оштећења производа. Притисак се постепено повећава док се не добије оптимална вредност притиска, која обезбеђује сигуран квалитет завареног споја.

Време заваривања се састоји од времена дејства ултразвука и времена хлађења. Време заваривања се одређује експериментално. Експериментално одређивање оптималних вредности параметара ултразвучног заваривања је понекад тежак и дуготрајан поступак добијања квалитетног шава, али зато и неопходан.

Експерименталним испитивањем показано је да одређене врсте фолија од пластичних маса нису завариве, како међусобно тако и са различитим фолијама. Међутим, само је код појединих фолија дошло до делимичног споја.

На крају се може закључити да сам процес прераде пластичних маса има добру перспективу због релативно ниских улагања у опрему, флексибилности програма производње и могућности брзог обрта капитала, с обзиром да је велики број производа и амбалаже намењен широкој потрошњи.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Агрант, А. Б., Дубровин, Н. М., Хаваский, Н.Н., Эскин, И. Г.: Основы физики и техники ультразвука, Высшая школа, Москва, 1987.
- [2]. Болосатов, В.А. Ультразвуковая обработка, Лениздат, 1973.
- [3]. Машковић, Љ., Максимовић, Р., Јововић, В.: Полимерни материјали, Полицијска академија, Београд, 1997.
- [4]. Јовановић, З.: Прорачун сонотрода за ултразвучно заваривање термопластичних маса, дипломски рад, Машински факултет, Крагујевац, 1986.
- [5]. Недић Б., Ђукић В. Пластичне масе, Скрипта, Машински факултет, Крагујевац, 2004.
- [6]. Аничич, Г.: Анализа поступака спајања пластичних маса ултразвучним зацаривањем, дипломски рад, Машински факултет, Крагујевац, 1999.
- [7]. [http://www.visiooimage.com/en/products/ir/ndt\\_ultrasound\\_thermography.htm](http://www.visiooimage.com/en/products/ir/ndt_ultrasound_thermography.htm)
- [8]. <http://www.twiprofessional.com/content/jk61.html>
- [9]. [http://www.qrbiz.com/buy\\_Ultrasonic-Welding](http://www.qrbiz.com/buy_Ultrasonic-Welding)
- [10]. <http://www.mfe.govt.nz/publications/waste/devt-regional-waste-recovery-sector/html/figure5-4.html>