

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo

Ultrazvočno spajanje materialov

DR. DAMJAN KLOBČAR

Ljubljana, april 2009

Kaj je ultrazvok ?

Mehansko nihanje/energija elastičnega telesa (longitudinalno valovanje).
Razprostira se nad **mejo človeškega sluha** (30 – 18 000 Hz).
Ultrazvoka ne slišimo občutimo kot glavobol.

Infrazvok	< 20 Hz
Slišni zvok	20 Hz – 20 000 Hz
Ultrazvok	20 kHz – 1 000 MHz
Hiperzvok	> 1GHz

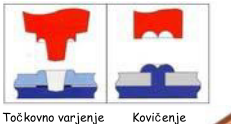
Industrijske aplikacije UZ 20 – 150 kHz
Medicinska diagnostika, terapije in neporušne preiskave 1-15 MHz

valovna dolžina () = hitrost zvoka / frekvenca
slišni zvok: **1,72 m () = 344 m s⁻¹ (zrak) / 200 s⁻¹**
ultrazvok: **0,25 m () = 5 000 m s⁻¹ (kovina) / 20 000 s⁻¹**

Spajanje, montaža in rezanje z ultrazvokom

Uporaba ultrazvoka

Varjenje (termoplasti, kovine, različne kovine med seboj).
Spajkanje na steklo sonotroda razbije površinsko plast stekla nastanejo prosti atomi kisika nanj se veže Zr in Ti iz spajke..
Točkovno varjenje.
Kovičenje.
Kovanje oz. preoblikovanje (cevi).
Vstavljanje kovinske komponente v termoplaste.
Rezanje z ultrazvokom tkanine, s plastiko prevlečene tkanine in papir (cut & seal), hrana (sendviči, sir, sladice).





Uporaba ultrazvočnega varjenja v industriji

Uporaba ultrazvoke

Pripomočki (likalnik, ohišje črpalk, ...)

Avtomobilska industrija (cevi za razvod zraka, plastični deli na avtomobilski armaturi, luči...)

Računalništvo in elektronika (diskete, avdio in video kasete, mobilni telefoni, spominske kartice, el. kontakti).

Medicina (obrazne maske; filtri za kri, zrak; rezervoarji za kri).

Pakiranje (zobna pasta; kartoni za sokove, mleko, ...).

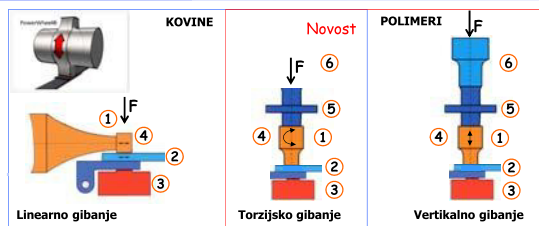
Igrače (varne igrače brez vijal, lotov).



4

Spajanje materialov z ultrazvokom

Izvedba naprave za spajanje



1 – pomično orodje (sonotroda)

2 – varjenca

3 – fiksno orodje (vpetje spodnjega varjenja)

4 – smer gibanja sonotrode

5 – ojačevalec mehanskega nihanja (booster)

6 – pretvornik (converter)

Frekvence za varjenje: 20 kHz, 30 kHz, 35 kHz, 36 kHz, 40 kHz, 70 kHz

Standard v avtomobilski industriji je 20 kHz in 35 kHz

5

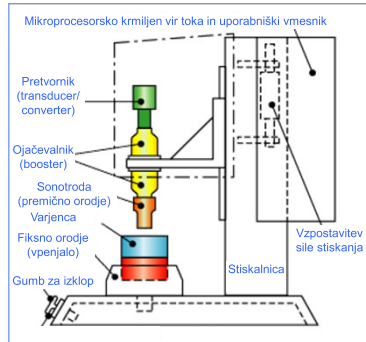
Zgradba naprave za UZ varjenje in princip delovanja

Zgradba naprave – stiskalnica

Nepremično orodje – vpetje varjenja.

Vpetje gibajočega dela orodja.

Vzpostavitev sile stiskanja pnevmatski sistem, elektromagnetni sistem – boljša kontrola približevanja orodja višja kakovost spoja).

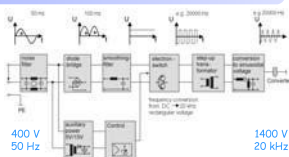


7

Vir toka (generator)

Zgradba naprave

Vir toka spreminja omrežno napetost (220 V (400 V), 50/60 Hz) v visoko frekvenco (20 kHz) in napetost (1400 V) sinusne oblike, ki je primerna za pretvornik električne energije v mehansko nihanje (converter).



Delovna frekvenca (kHz)	Moč vira toka (W)	Maksimalna amplituda pretvornika (m)	Komentar
10 – 20	6000 – 3000	40 – 20	Hrupne, visoke moči
20 – 35	3000 – 1000	20 – 10	Srednje vrednosti moči in hrupa
40 – 75	1000 – 400	10 – 5	Tihe, nizke moči, manj napak na spoju, manjši varjenci

8

Pretvornik (converter/transducer)

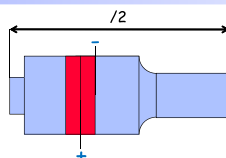
Zgradba naprave

Pretvarja električno energijo iz generatorja v mehanske vibracije. (magnetostrikcija, piezo-efekt).

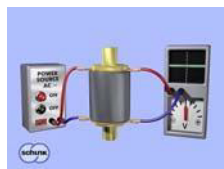
Sestavljen je iz večjega števila piezo-električnih keramičnih diskov vstavljenih med tanki kovinski plošči (Ti), ki tvorita elektrodo.

Sinusni električni tok (doveden na elektrodi) povzroča raztezanje in krčenje piezo diska. Nastane osno gibanje velikosti od 15 – 25 μ m (20 kHz).

Zaradi večje občutljivosti na el. signal in odpornosti na visoko temperaturo se največ uporablja svinec cirkanat titanat (PZT)



PZT (svinec cirkanat titanat)



9

Ojačevalnik amplitude nihanja (booster)

Zgradba naprave

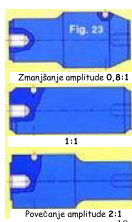
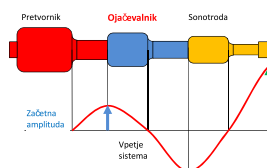
Z geometrijsko obliko ojača ali zmanjša amplitudo pretvornika.

Na njem je vpet celoten sistem (pretvornik, ojačevalnik in sonotroda).

Frekvenca nihanja ojačevalnika mora sovpadati s frekvenco generatorja.

Stične ploskve s sonotrodo in pretvornikom morajo dobro nalegati (prepreči izgube energije segrevanje, hrup, ali poškodba naprave). Izdelan iz Al ali Ti z visoko natezno trdnostjo.

Pritrjevanje izvedeno z natezno obremenjenimi vijaki privitimi z določenim momentom (navoj M16x1,5 dolžina 15 mm).



10

Gibajoče orodje (sonotroda)

Zgradba naprave

Sonotroda **pretvarja amplitudo iz ojačevalnika na delovno amplitudo** (varilni parameter).

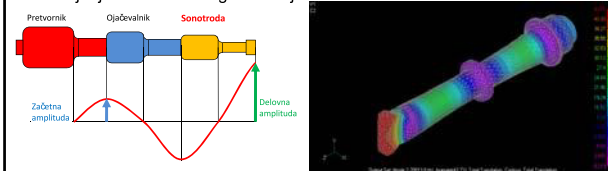
Amplitudo krmilimo preko UZ generatorja ali z **zamenjavo ojačevalnika** (z drugim razmerjem).

Življenjsko dobo sonotrode podaljšamo:

S **povečanjem** razlike v **trdoti** materiala sonotrode in varjenca (sonotroda trša), s **skrajšanjem časa varjenja**.

Življenjska doba neželezne sonotrode znaša 250 000 do 500 000 varov. S **popravilom konice** sonotrode, začne življenjska doba ponovno teči.

Popravilo sonotrode nekoliko **spremeni** resonančno **frekvenco** fino umerjanje frekvence na generatorju.



Gibajoče orodje (sonotroda)

Zgradba naprave

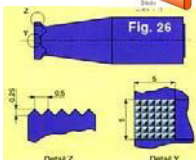
Sonotrode za varjenje:

polimerov iz Ti ali Al,
kovin iz sintranih **orodnih jekel**.

Material se **ne sme pregrevati** ali **lomiti zaradi nihanja** včasih so bile izdelane iz **treh delov** (možnost menjave konice) – težava zaradi neharmonskega nihanja poškodbe.

Delovna površina je nazobčena omogoča **visoke pospeške varjenca brez zdrsov** (prepreči izgube energije).

Potrebno veliko znanja za izdelavo zahtevnih oblik sonotrod.



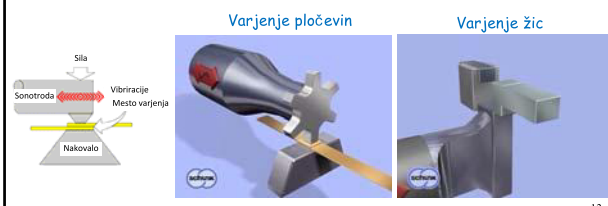
Nakovalo in vpenjala preprečita gibanje spodnjega varjenca

Zgradba naprave

Nakovalo je **nazobčeno** prepreči **premik spodnjega varjenca in poveča izkoristek energije**.

Nakovalo **absorbira pritiske in oscilacije sonotrode**. Njegova **togost omogoča konstanten pritisk** med varjenjem in **preprečuje interferenco z nihajočim sklopom**.

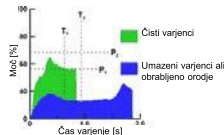
Vpenjala omogočajo **hitro vpenjanje in izpenjanje varjencev** (pnevmatska).



Okvirni varilni parametri

Varilni parametri

Amplituda vibracij (**3 – 50 m**)
 Sila stiskanja (tlak) (**10 mN – 10⁴ N**)
 Čas varjenja (**0,02**) **0,1 – 1 (5 s)**
 Hitrost trenja: **0,8 - 2 m/s** (pospeški do 10⁵ m/s²)
 Čas zadrževanja (daljši pri kovičenju).
 Frekvenca ultrazvoka je odvisna od frekvence generatorja:
 16 kHz, 20 kHz, 30 kHz, 35 kHz, 40 kHz, 70 kHz
 Moč **P** = sila **F** * amplituda **A** (W)
 Energija **E** = moč **P** * čas **t** (Ws, J)
 Prevelik vnos energije slab zvar, poškodbe varjenca.
 Premajhen vnos energije zlepljen (slaba trdnost spoja).



14

Mikroprocesorski krmilnik

Zgradba naprave

Krmili varilni cikel in daje povratne informacije na uporabniški vmesnik.

Nastavljamo varilne parametre.

Spremlja: varilno razdaljo, moč, energijo, silo in čas.

Načini varjenja:

- na razdaljo (vstavljanje, strižni spoji (polimeri),
- s spreminjanjem amplitude med varjenjem,
- s kontrolo vnosa energije,
- omejeno s časom.



Kontrola kakovosti pri varjenju žic

Predolg čas varjenja - nečiste žice

Premalo žic

15

Nastanek spoja pri ultrazvočnem varjenju kovin

Varjenje kovin

Površina varjencev je običajno prekrita z oksidi ter nečistočami (maščobe, nečistoče).

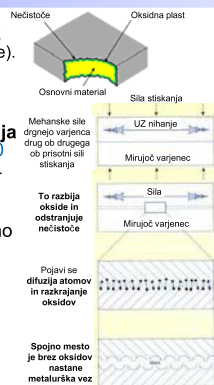
Vibracije, sila stiskanja in čas varjenja povzročajo drgnjenje varjencev, kar razbija okside in odstranjuje nečistoče.

Toplota generirana zaradi drsnega trenja doseže temperature v spoju od 35 – 50 % T_{tališča} (pravilni varilni parametri ni taljenja).

Istočasno poteka difuzija atomov in rekristalizacija nastajajo fina zrna.

Očiščeni kontaktni površini sta s pritiskom silo stisnjeni na medatomarno razdaljo nastane metalurški spoj (vez).

Spoj je trden, homogen, vzdržljiv in električno prevoden.



16

Kovinski materiali primerni za UZ varjenje

Varjenje kovin

Dobro se varijo različne kombinacije **Cu, Al in medí**.

Zaradi **mazalnih lastnosti** ne moremo variti **svinca, cinka in kositra**. Težave povzročajo tudi če so prisotni v površinskih prevlekah.

Varjenci v stiku s sonotrodo so lahko težki **do 10 g** (visoki pospeški, omejitev moči stroja). **Masa varjenca** je lahko **večja** **materiali mehkejši** in je deformacija absorbirana v varnem spoju.

Masa varjenca pri fiksnem orodju ni omejena.

Izogibamo se **mastnim ali oksidiranim površinam**, saj je predhodno določena **energija** za varjenje **premajhna** tudi ob **podaljšanju časa varjenja**.

Površinske prevleke iz **niklja, srebra, bakra ali aluminija pozitivno** vplivajo na varivost uporabljamo za izboljšanje varivosti.

Negativen vpliv imajo prevleke iz **kositra, cinka in kroma**.

Lakirane bakrene žice za navitja transformatorjev se težko varijo brez **predhodne odstranitve prevleke**.

17

Varivost kovin

Varjenje kovin

Primernost za varjenje	Slaba	Srednja	Dobra	Odlična
aluminium				
gold				
silver				
copper				
nickel				
platinum				
iron				
tantal				
un alloyed steel				
stainless steel				
brass				
bronze				
copper/nickel				
iron/nickel				
molybdenum				
magnesium				
titanium				
zinc				
tungsten				
beryllium				
silicon				
tin				
glass				
ceramic				

■ Ni varivo
 ■ Varivo
 ■ Odlična varivost
 □ Ni testirano

18

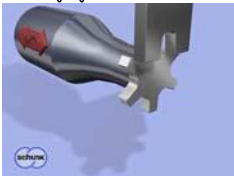
Primeri izvedb varjenja

Varjenje kovin

Varjenje kontaktov



Varjenje kontakta na žico



Varjenje z rotacijo



Kolutno varjenje



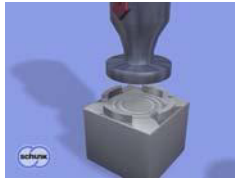
19

Nastanek spoja ultrazvočno varjenje polimerov

Varjenje polimerov

Na spojnem mestu se polimera **stalita** zaradi toplotne energije posledica trenja in absorpcije mehanskih vertikalnih vibracij sila stiskanja ju stisne skupaj. Varjenje je uspešno skoraj **enako tališče obeh polimerov**.

Varjenje polimerov



Polimerno oblikovanje



Varjenje tube

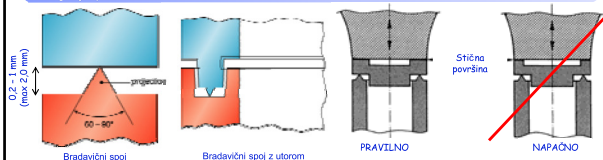


(vmesna PE folija prepreči poškodbe na površini izdelka)

20

Oblikovanje spoja za UZ varjenje - bradavični spoj

Varjenje polimerov



Usmerjevalec (koncentrator) energije - UE (energy director) **fokusira sproščanje toplote (taljenje) v konici**. To povzroča začetek taljenja materiala trikotnega prereza, ki steče po spojnem mestu in tvori var.

Amorfni polimeri zahtevajo **90°** kot UE, **delno kristalinični** pa **60°**. Višina UE znaša med 0,2 – 1 mm (odvisna od materiala).

Bradavični spoj **amorfne** polimere (ABS, PC, PS) spoj ni **hermetičen**.

Bradavični spoj z utorom talina vara **skrita**, varjenja se **sama pozicionirata**. Različne variante omogočajo tok taline notri ali ven.

Potrebna **zadosti velika stična površina** sonotrode in zgornjega varjenca, da se **zvok** dobro prenaša na spoj in se površina varjenca ne poškoduje (PE folije).

21

Oblikovanje spoja za UZ varjenje - strižni spoj

Varjenje polimerov

Strižni spoj se uporablja tam, kjer potrebujemo **močne hermetične spoje**.

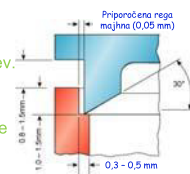
Omogoča **samostojno pozicioniranje** varjencev.

Taljenje se **prične** na majhnem začetnem kontaktnem območju in se nadaljuje s **kontroliranim pretaljevanjem vzdolž** vertikalne stene.

Zaradi **odstranitve razpok, por in praznin** močan hermetičen spoj, **nedostopnost zraka prepreči** prehitro strjevanje taline.

Za **delno kristalinične** polimere, ki **hitro spreminjajo agregatno stanje** (staljeno-trdno) in so izdelani v ozkih tolerancah.

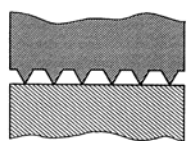
Debelina spodnjega varjenca mora biti dovolj **velika**, da **prepreči odpiranje (zvižanje)** varjenca.



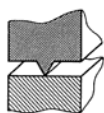
22

Vrste koncentradorjev energije

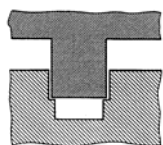
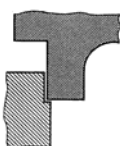
Varjenje polimerov



Stožčasta oblika ali zračna oblika



Oblika strehe

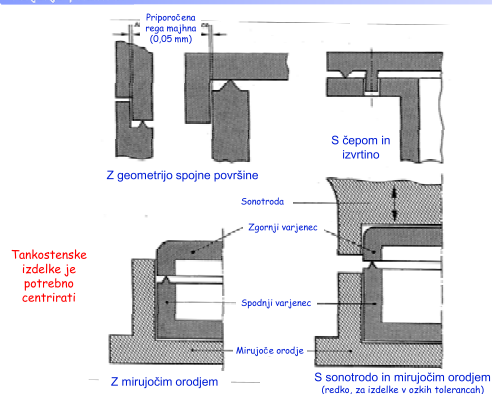


Vogalni kontakt

23

Variante centriranja varjencev

Varjenje polimerov



Tankostenske izdelke je potrebno centrirati

24

Varjenje poteka lažje v near field ali bližnjem varjenju

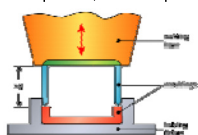
Varjenje polimerov

Razdalja med **spojnim mestom in sonotrodo** je pomembna s stališča varivosti in določa način varjenja: **"near field"** ali bližnje $< 6 \text{ mm}$ ter **"far field"** ali oddaljeno varjenje $> 6 \text{ mm}$. Spoj naj bo v eni ravnini.

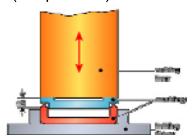
Pri **"far field"** ali oddaljenem varjenju se ultrazvok prenaša preko zgornjega varjenca na mesto spoja. Za **trdne amorfne polimere** PS, ABS, AB in PMMA, ki dobro prenašajo (prepuščajo) ultrazvok. Varijo se tudi **delno kristalinični polimeri** (POM, PETP, PBTB, PA) – ustrezen spoj!

Večina **delno kristaliničnih polimerov** kot je PP **slabo prenašajo energijo ultrazvoka** spoj blizu sonotrode (**bližnje** ali **near field** varjenje).

Varjenci naj imajo v vogalih minimalni radij $0,2 - 0,5 \text{ mm}$, da ne nastanejo lokalne napetosti, ki lahko povzročajo prelom (trdi polimeri).



Oddaljeno ali "Far field" varjenje

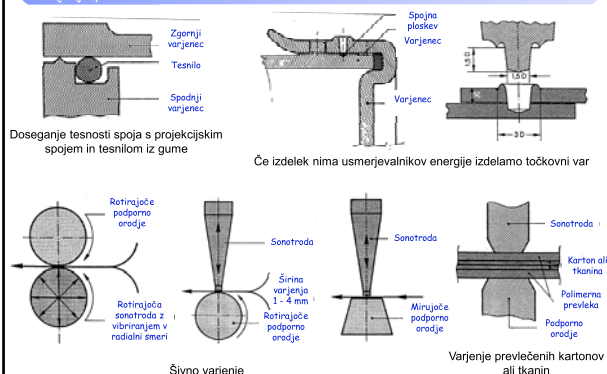


Bližnje ali "Near field" varjenje – varjenec je prevodnik zvoka

25

Točkovno ter šivno varjenje folij in prevlečenih tkanin ali kartona

Varjenje polimerov

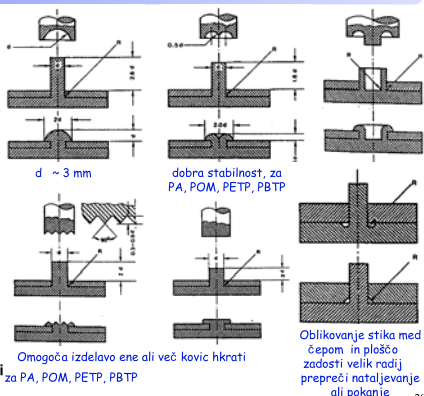


27

Ultrazvočno kovičenje traja od 1-3 s

Varjenje polimerov

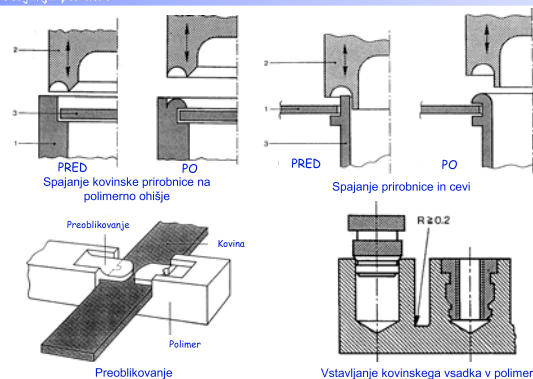
Pomembna je **velikost čepa**.
Počasno približevanje sonotrode.
Manjši tlaki in večje amplitude, kot pri varjenju.
 Čas zadrževanja daljši — da se **kovica strdi**.
 Z radijem pri čepu **preprečimo nataljevanje ali pokanje**.
 Velika **obrada sonotrode** pri kovičenju polimerov ojačanih s **steklenimi vlakni**.



28

Ultrazvočno spajanje, preoblikovanje in vstavljanje

Varjenje polimerov



29

Vsi termoplasti niso varivi z ultrazvokom

Varjenje polimerov

	ABS	PMMA	PA	PS	PVC	SAN-NAS	PP	PE	Temperatura tališča
ABS	V	V		PV		PV			
PMMA	V	V				PV			130-140 °C
PA			V						
PS	PV			V		PV			240 °C
PVC					V				80 °C
SAN-NAS	PV	PV		PV		V			
PP							V		
PE								V	105-130 °C

V - varivo, PV - pogojno varivo

Običajno so med sabo varivi samo enaki termoplasti (enako tališče).

(vmesna folija prepreči poškodbo izdelka)

Varivost različnih termoplastov med seboj ugotavljamo s testi.

Akilonitril butadien stirene (ABS)	A	Polivinil klorid (PVC)	A	A - amorfni
Akri (PMMA)	A	Stiren-acilonitril (SAN)	A	DK - delno kristalinični
Poliamid (PA ali Nylon)	DK	Polipropilen (PP)	DK	
Polistiren (PS)	A	Polietilen (PE)		

30

Prednosti ultrazvočnega varjenja

Prednosti in slabosti

Hitrost, učinkovitost, **dobro kakovost vara**, ne potrebuje **dodajnega materiala**, dolga **življenjska doba** orodja in možnost **avtomatizacije**.
Ni predpriprave varjencev in čiščenja (žlindra) ali obdelave po varjenju.
Porabi malo energije (1/30 energije potrebne za varjenje s taljenjem).
 Za varjenje **ne** potrebujemo zdravju škodljivih **kemikalij, talil ali lepil**.
 Med varjenjem se ne **sproščajo** zdravju škodljivi **dimi ali plini**.
 Enostavno **zagotavljanje kakovosti vara** natančno krmljenje varjenja.
 Postopek poteka pri nizkih temperaturah od ~ 35 - 50 % $T_{\text{tališča kovin}}$.
 Pri varjenju kovin **ni taljenja**
 ni popuščanja mat. sonotrode **orodja ne hladimo**.
 varimo kovine z različnim tališčem (Al-Cu).
 Stabilne mehanske lastnosti in korozijska obstojnost spoja.
Odlična električna prevodnost spoja.
 Krhka intermetalna plast ali litina ne nastaja, ni vmesnih tehnoloških korakov.

33

Slabosti ultrazvočnega varjenja

Prednosti in slabosti

Draga investicija.
 Zahtevna izdelava sonotrod drage.
 Skrbno rokovanje s sonotrodo poškodbe uničenje.
 Omejitve glede varivosti različnih materialov.
 Ustrezno oblikovan spoj/izdelek iz polimerov za varjenje z UZ potrebni usmerjevalniki energije (energy director).
 Med obratovanjem se pojavi hrup poškodbe sluha, glavobol.

34

Varstvo pri delu

Priloga 1: Priporočila za varno delo

Opekline:

stik kože z vročim varjencem,

stik kože z vibrirajočo sonotrodo povzroča segrevanje tkiva zaradi trenja (opekline, poškodbe tkiva). Gostote do 2 W/cm² niso nevarne.

Dovoljen hrup v slišnem območju (16 Hz – 16 kHz (DIN 45645)) znaša **90 dB**.

Hrup v neslišnem področju povzroča glavobole, ...

Hrup v slišnem območju **zmanjšamo** z: **obliko izdelka, obliko sonotrode, vpetjem spodnjega dela varjenca, ...**

35

Primerjava stroškov varjenja električnega kontakta

Primerjava stroškov spajanja

	Spajkanje	Uporovno varjenje	Mehansko spajanje	Mehansko spajanje in spajkanje	Ultrazvočno varjenje
Investicija	5	3	4	4	2
Življenjska doba orodij	3	2	3	3	5
Poraba energije (hlajenje, ...)	3	1	5	2	4
Čas varjenja (predpriprava, dodelava vara)	1	3	5	1	4
Okoljski faktor in produktivnost	1	2	4	1	4
Fleksibilnost proizvodnje (čas menjave orodja, potrebna orodja)	5	3	2	2	4
Kompleksnost varilnih parametrov, ki vplivajo na kakovost vara	5	2	3	3	4
Dodajni material	1	5	1	1	5
Zagotavljanje kakovosti vara	1	3	2	2	5
Dolgotrajna trdnost spoja	3	3	2	4	5
Odpornost na vibracije	4	3	2	4	4
Odpornost proti upogibanju (krhkost)	5	1	5	5	5
Odpornost proti koroziji	2	4	1	2	4
Električna prevodnost	3	4	3	3	5
SKUPAJ	42	39	42	37	60
POVPREČNA OCENA	3,00	2,79	3,00	2,64	4,29

5 – zelo dobro/prednost; 4 – dobro; 3 – zadovoljivo 2 – zadostno; 1 – neustrezno/slabost

36