

3. LEMLJENI SPOJEVI

LÖTVERBINDUNGEN
SOLDERING AND BRAZING

Lemljenje je postupak spajanja pretežno metalnih dijelova sa dodatkom rastaljene slitine kao veziva. Za razliku od zavarivanja koje je isto tako termički postupak, ovdje se radi o temperaturama koje su znatno niže od tališta materijala koji se spajaju. U odnosu na zavarivanje prednost postupka lemljenja je u tome da se mogu spajati i metali različite vrste, a nakon spajanja nema zaostalih naprezanja kao kod zavarivanja, ili ne u tolikoj mjeri. Izuzetak su lemljeni spojevi dva materijala s velikom razlikom koeficijenta toplinskog rastezanja. U mane postupka ubrajamo relativno nisku nosivost koja se kod većine leмова i vremenski smanjuje, zatim niske dopuštene pogonske temperature (kod mekih leмова), te skuplju tehnologiju (priprema dijelova prije lemljenja, relativno skupi materijal lema). Iako su u principu svi metalni pa i neki nemetalni materijali zalemljivi kod nekih metalnih materijala postoje teškoće u lemljenju (aluminij, visokolegirani čelici). Lemljenje je kao postupak spajanja dijelova zastupljeno u obrtu, automobilskoj, elektronskoj industriji te općem strojarstvu.

3.1. Vrste i postupci lemljenja

Prema talištu lema (materijala koji se dodaje kao vezivo) lemljenje dijelimo na tri velike skupine :

- meko** lemljenje koje se odvija na temperaturama do oko 450°C
- tvrd** lemljenje koje se provodi na temperaturama približno od 450 do 900°C.
- visokotemperaturno** lemljenje, na temperaturama od preko 900°C

Meko lemljenje je postupak spajanja metala pri relativno niskom talištu lema. Služi najčešće za spajanje čelika, bakra i bakrenih slitina. Kao materijali lema koriste se slitine olova, kositra, antimona, cinka i kadmija. Za aluminijske materijale upotrebljava se lem od slitina cinka, kositra i kadmija.

Tvrdo lemljenje se upotrebljava za odgovornije spojeve od mekog jer je nosivost spoja puno veća. Metale koji se leme treba prethodno zagrijati, plamenom ili električnom strujom (većinom elektrootporno). Radi eliminacije metalnih oksida potrebno je površine koje će se lemiti prethodno tretirati sredstvima za dezoksidaciju. Najčešće se koriste sredstva na bazi bora (boraks- $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) sa dodatkom florida, fosfata i silikata (DIN 8511). Ova vrsta lemljenja se provodi i u zaštićenoj atmosferi.

Visokotemperaturno se lemljenje obavlja u vakuumu ili u zaštitnoj atmosferi, a služi za lemljenje obično skupljih ili plemenitijih materijala ili kombinacija materijala koji su nezavarivi ili bi se zavarivanjem bitno promjenila neka njihova svojstva. Kao lemovi se koriste legure na bazi nikla, kobalta, zlata ili drugih plemenitih metala kao i posebnih legura čije su osnove berilij, cirkonij, titan, vanadij, niobij, tantal itd.

Na ovaj je način moguće spajati i keramičke materijale na tvrde metale te opet njih na obične čelike kao što su naprimjer nosači reznih oštrica alata za skidanje strugotine. Ova je tehnologija vrlo osjetljiva na greške u provedbi postupka.

Po obliku spoja dijelimo lemljenje na **šavno, kapilarno i polemljivanje** površina.

Šavno lemljenje se po obliku ne razlikuje od zavarivanja taljenjem. Redovito se izvodi kao tvrdo lemljenje, a oblik šava je takozvani V-oblik, koji se popunjava rastopljenim lemom. Ova se vrsta lemljenja primjenjuje relativno rijetko. Moguće su i druge podjele (naprimjer prema izvoru topline-plameno, elektrootporno, potapanjem i sl.)

Kapilarno lemljenje se provodi tako da se koristi kapilarni efekt taline lema. U tom su slučaju adhezione sile između lema i osnovnog materijala veće nego kohezione sile u samom rastaljenom lemu pa lem biva kapilarno uvučen u uske raspore između dijelova koji se leme (vidi slike 3.1 i 3.2).

Polemljivanje je postupak presvlačenja pretežno metalnih površina materijalom lema u svrhu poboljšavanja svojstava površine općenito, pa ne predstavlja postupak spajanja.

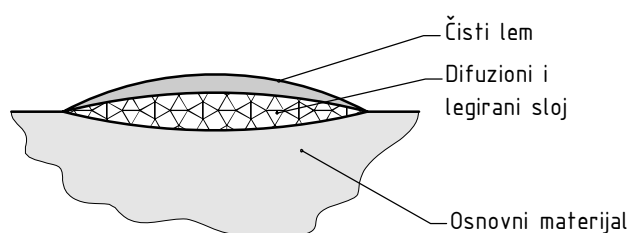
Obzirom na način dovođenja topline prema DIN 8505 razlikujemo:

- plameno lemljenje**, gdje se toplina dovodi na mjesto lemljenja sagorjevanjem nekog plina,
- lemljenje potapanjem**, koje se vrši tako da se dijelovi koji se spajaju urone u rastaljeni materijal lema koji onda popunjava spojna mjesta. Obično se prethodno raznim premezima zaštite mjesta koja se ne leme,
- lemljenje sa lemlicama** se primjenjuje samo za meko lemljenje. Zagrijavanje lemlice može biti električnom strujom kao i sa plinom,
- lemljenje u pećima** se vrši tako da se u pripremljena spojna mjesta stavlja materijal lema a onda se spoj zagrijava na temperaturu taljenja lema u nekoj peći. Sve ovo se može odvijati u kontroliranoj atmosferi, što se redovito provodi kod visokotemperaturnog lemljenja.
- elektrootporno lemljenje** se provodi tako da se između dijelova koji se leme stavi materijal lema i otapalo. Zatim se dijelovi međusobno pritisnu nekom silom vanjskim elektrodama uz istovremeno dovođenje električne struje. Zbog Jouleove topline dolazi do taljenja materijala lema. Naravno obadva dijela koji se leme moraju biti električki vodljiva.
- induktivno lemljenje** se vrši obično u zaštićenoj atmosferi, za sve vrste lemljenja. Zagrijavanja se vrši u indukcionim pećima pomoću čega se inducira struja u materijalu lema a time i toplina taljenja lema.
- lemljenje svjetlosnim snopom** se provodi tako da se svjetlosni snop fokusira a absorpcijom energije se tali materijal lema. Spada u specijalne postupke lemljenja a vrši se u vakuumu ili u zaštićenoj atmosferi i to za tvrdo lemljenje.
- lasersko lemljenje** se provodi laserskim snopom a služi za tvrdo lemljenje ili za visokotemperaturno lemljenje. Provodi se u vakuumu ili u zaštitnoj atmosferi.

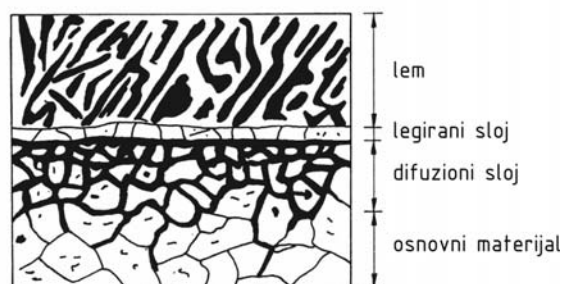
3.2. Princip lemljenja

Spajanje lemljenjem se temelji na adhezionim vezama lema i osnovnog materijala. Adhezione sile nastaju na nivou atoma. Pritom rastaljeni lem i osnovni materijal izmjenjuju međusobno atome čime dolazi do difuzije odnosno do legiranja (vidi slike 3.1. i 3.2.).

Veličina difuzijskog sloja je od nekoliko mikrometara do oko jednog milimetra pa je zato važno da površina osnovnog materijala bude što glatkija (ne previše, vidi poslije) i što čišća pogotovu od oksida. Mehaničko čišćenje površina je nedostavno jer se prilikom zagrijavanja tako očišćene površine odmah stvaraju nove oksidne prevlake koje sprečavaju tečenje i difuziju lema u osnovni materijal. Zbog toga se u tehnologiji lemljenja redovito koriste sredstva za pripremu površina prije lemljenja koja čiste i dezoksidiraju površine, a zovu se još i otapala. Osnovni je zahtjev na ova sredstva da djeluju za vrijeme cijelog postupka lemljenja. Ta su sredstva pretežno na bazi klora, bora i flora, a kod jačih onečišćenja prethodno se površine ipak moraju mehanički očistiti. Difuzijski sloj direktno utječe na nosivost lemljenog spoja.

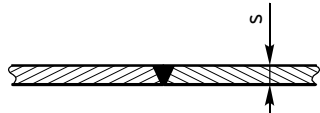


Slika 3.1. Tvorba difuzijskog sloja (shema)

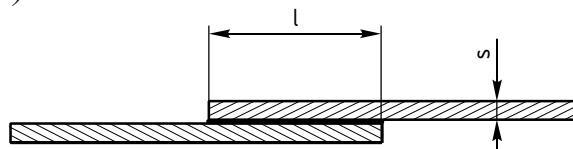


Slika 3.2. Metalografski prikaz zalemljenog spoja

a)



b)



Slika 3.3 Šavno (a) i kapilarno lemljenje (b)

3.3. Proračun nosivosti lemljenih spojeva

Lemljenjem se ostvaruju nosivi spojevi ili se radi samo o postupku spajanja (pričvršćenja) materijala.

Kada se radi o nosivim spojevima, čvrstoća lemljenog spoja ovisna je o više faktora. Prije svega to je pravilan izbor materijala lema u odnosu na materijale koji se spajaju odnosno ostvarivanje dobre difuzije lema sa osnovnim materijalom. Pogonska temperatura kao i način opterećenja su od velikog utjecaja. Isto tako su bitni i debljina lema nakon spajanja (ne bi trebala biti veća od 0,02 mm, izuzetno do 0,5mm), kao i hrapavost površina te smjer rasprostiranja tragova površinske obrade. Nosivost lemljenih spojeva je ovisna i vremenski. Na slici 3.5. su dati ovi utjecaji za jednu vrstu lema, a u tablici 3.1. neke mehaničke osobine važnijih materijala lemovi.

- Proračun se temelji na površini spajanja A_L (površini lemljenog spoja) i opterećenju F . Za sučeone lemljene spojeve i debljine limova veće od 2 mm računa se:

- normalno naprezanje

$$\sigma_L = \frac{K_A F}{A_L} \leq \sigma_{dop}, \text{ N/mm}^2; \quad \sigma_{dop} = \frac{\sigma_{LB}}{S} \quad (3.1)$$

- Kod većine lemljenih spojeva se radi o preklopnim spojevima. U tom slučaju računamo sa srednjim tangencijalnim naprezanjima:

-srednje tangencijalno naprezanje je

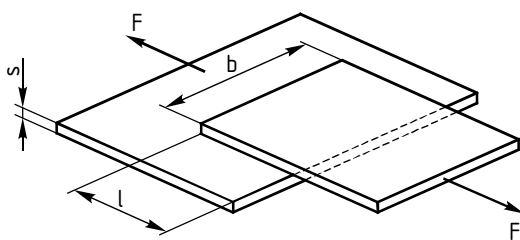
$$\tau_L = \frac{K_A F}{A_L} \leq \tau_{dop}, \text{ N/mm}^2; \quad \tau_{dop} = \frac{\tau_{LB}}{S}, \quad (3.2)$$

U tablici 3.1 su date vrijednosti mehaničkih značajki materijala lema i osnovnog materijala (materijala koji se spaja) za kapilarno lemljenje.

Faktor sigurnosti S se zbog velikih rasipanja vrijednosti mehaničkih svojstava materijala odabire dosta visok i kreće se u granicama od $S = 2$ do 4 ($S_{\min}=2$). U tablici su sadržane i vrijednosti dinamičkih izdržljivosti materijala nekih tipičnih lemova.

U gornjim su jednadžbama:

- σ_L normalno naprezanje u materijalu lema, N/mm^2
- K_A faktor primjene (udara)
- A_L površina zalemljenog spoja, mm^2
- σ_{LB} vlačna čvrstoća materijala lema, N/mm^2 (tab.3.1)
- τ_L srednje tangencijalno naprezanje u spoju, N/mm^2
- τ_{LB} odrezna čvrstoća lema, N/mm^2
- S faktor sigurnosti



Slika 3.4. Parametri za proračun lemljenog spoja

- Kod preklopnih spojeva limova, jednakih debljina materijala koji se spajaju (s), i koji se kako je rečeno često koriste, dužina preklopa (l) se određuje na temelju jednadžbe 3.3.:

$$l = S \frac{K_A R_m}{\tau_{LB}} = S \frac{K_A \sigma_{dopM}}{\tau_{dopL}} \quad (3.3)$$

Ovdje je:

- l (l_p) potrebna dužina preklopa, mm
- s debljina osnovnog materijala, mm
- R_m vlačna čvrstoća osnovnog materijala, N/mm²
- σ_{dopM} dopušteno naprezanje osnovnog materijala, N/mm²
- τ_{dopL} dopušteno naprezanje materijala lema, N/mm²

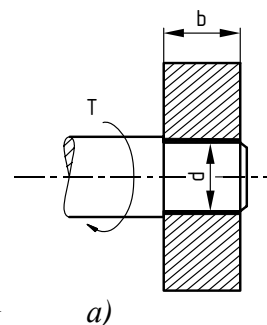
Pretpostavka je da se zadržava nosivost osnovnog materijala ($lb \tau_{LB} = sbR_m$). Obično se izvodi dužina preklopa sa $l/s = 4$ do 6. Kod većih preklopa je teško postići jednolik raspored lema po cijeloj površini spoja.

U slučaju većih debljina limova koji se spajaju dolazi do izražaja i opterećenje lema na savijanje pa bi trebalo računati sa kombiniranim opterećenjem (savijanje i smik).

U slučaju kad je spoj opterećen torzionim momentom računamo sa naprezanjem (slika 3.5a):

$$\tau_L = \frac{2T/d}{d\pi b} = \frac{2T}{d^2\pi b}, \text{ N/mm}^2; \quad (3.4)$$

$$\tau_L < \tau_{Ldop} = \tau_{LB}/S$$



Ovdje su:

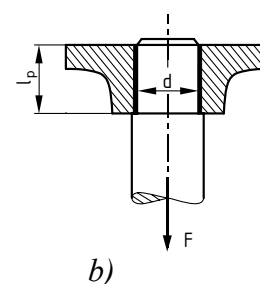
- τ_L smično naprezanje u spoju, N/mm²
- T okretni moment koji treba prenijeti lemljeni spoj, Nmm
- b, d širina odnosno promjer spoja, mm
- R_m Vlačna čvrstoća osnovnog materijala

Za slučaj čepa u provrtu, opterećenog aksijalnom silom (slika 3.5.b) vrijedi:

$$d\pi l_p \tau_{LB} = d^2 \pi R_m / 4 \quad (3.5)$$

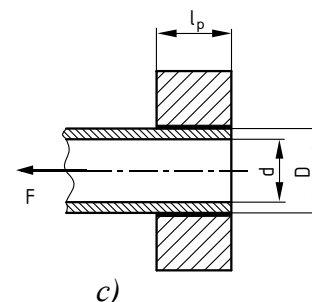
Iz gornje jednadžbe slijedi potrebna dužina preklopa l_p :

$$l_p = \frac{K_A R_m d}{\tau_{LB} 4} \quad (3.6)$$



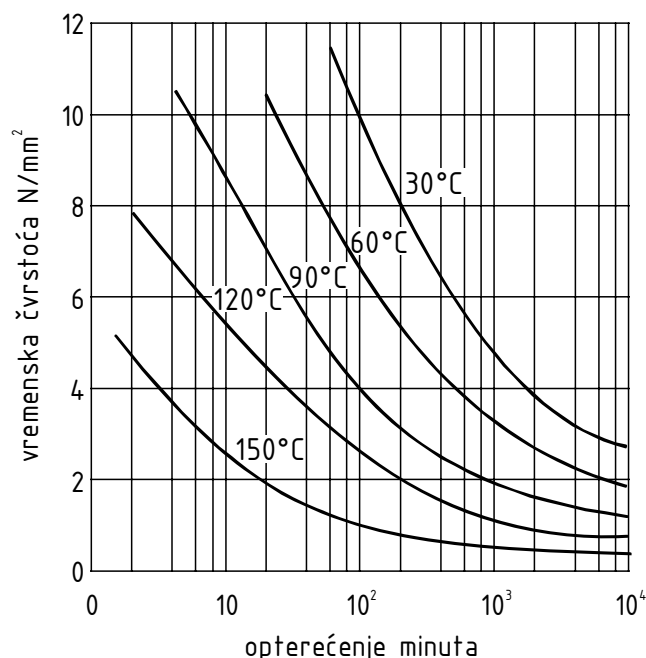
Ako se u prethodnom slučaju upotrijebi umjesto punog materijala čepa cijev na osnovu istih postavki bit će potrebni preklop:

$$l_p = \frac{K_A R_m (D^2 - d^2)}{\tau_{LB} 4d} \quad (3.7)$$



Slika 3.5. Slučajevi opterećenja lemljenih spojeva

U gornjim su jednadžbama sve dužinske mjere u mm.



Slika 3.6. Pad vremenske čvrstoće lemljenog spoja sa temperaturom i trajanjem opterećenja za meko lemljeni čelik za materijalom lema Pb50Sn50

Tablica 3.1 : Čvrstoće nekih materijala za tvrde lemове prema DIN 8525

Vrsta lema (DIN8525)	Radna temperatura °C	Vlačna čvrstoća lema za spajanje osnovnog materijala σ_{LB}					Čvrstoća na odrez τ_{LB}	
		S235	E295	E335	X10CrNi18	CuZn37	S235	E335
L-Ag40Cd	610	410	540	640	520	230	170	250
L-Ag30Cd	680	380	470	480	510	250	200	240
L-Ag44	730	390	480	520	530	280	205	280
L-Ag20Cd	750	370	420	440	500	260	170	260
L-Ag12	830	370	460	460	440	210	170	200

Vrijednosti su za srednju veličinu raspora $h=0,1$ mm

Za odnos vlačne čvrstoće i čvrstoće na odrez može se uzeti grubi odnos: $\sigma_L=(1,5...2,5)\tau_L$

3.4. Osnove oblikovanja lemljenih spojeva

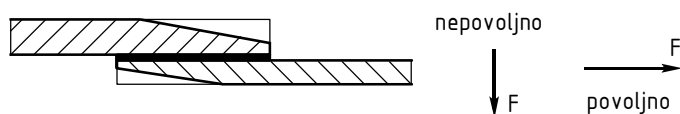
Prije svega treba nastojati da zalemljena mjesta budu opterećena na smik, a ne na vlak ili savijanje. Također treba paziti na diskontinuitete presjeka, tako da je bolje kad je to moguće, rubove u spoju skositi kao što prikazuje slika 3.7.

Treba nastojati da prilikom procesa lemljenja dijelovi koji se leme zadrže isti položaj do skrućivanja lema. Ako postoji mogućnost otkazivanja lemljenog spoja prije svega zbog dinamičkog opterećenja, treba zalemljena mjesta osigurati različitim naslonima, zaticima i slično.

Radi lakše tvorbe difuzionog spoja površine je dobro lagano nahrapaviti ($R_a = 1,6...3,2$ μm), odnosno izbjegavati jako uglačane ili polirane površine.

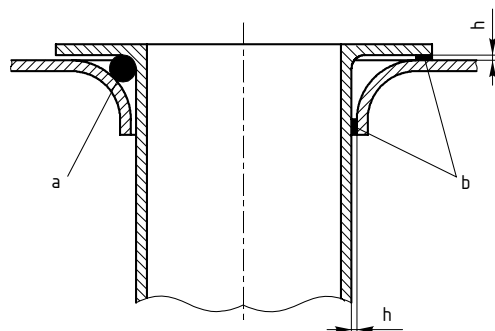
Tablica 3.2. Podaci o lemovima i lemljenju

Radna temperatura		Materijal koji se lemi (osnovni mat.)	Primjer upotrebe	Lem	
				DIN oznaka	DIN-standard
° C	1100	Čelik, nelegiran	Aparati, uredaji	8513	
	900	Čelik, Cu	Cijevni vodovi, vozila		
	845	„novo srebro“	Hvataljke, nosači		
	890	Čelik, Ni, Ni - legure	Aparati		
	810	Čelik	Čelični dijelovi do 1mm debljine	1733	Tvrdi
	860..620	Fe, Čelik, Cu, Cu-legure s najmanje 56% Cu	Koroziono postojani dijelovi	1734	
	620...830	Plemeniti metali	Kontakti nehrđajući	1735	
	590	Al, Al - Leg.	Al odljevci	8512	
	560				
	305	Čelik, Cu Cu - legure	Hladnjaci općenito, pocinčani i cinkovi limovi Kositrenje, fino lemljenje, elektroindustrija	1707	Meki
	270				
	235				
	215 190				



Slika 3.7 Oblik prijelaza spoja i način djelovanja opterećenja.

Radi kapilarnog djelovanja rastaljenog materijala lema treba u zavisnosti od osnovnog materijala te vrste lema pravilno odabrati veličinu raspora odnosno zračnosti lemljenog spoja. U tabeli 3.3 su date preporučljive vrijednosti veličine raspora u funkciji lema i materijala koji se lemi.



Slika 3.8. Raspore kod lemljenja (h). Sa a je označen prsten od legure lema prije zagrijavanja spojnog mjesta a sa b nakon taljenja i kapilarnog djelovanja

Tablica 3.3: Smjernice za izbor veličine raspora (zračnosti) lemljenih spojeva

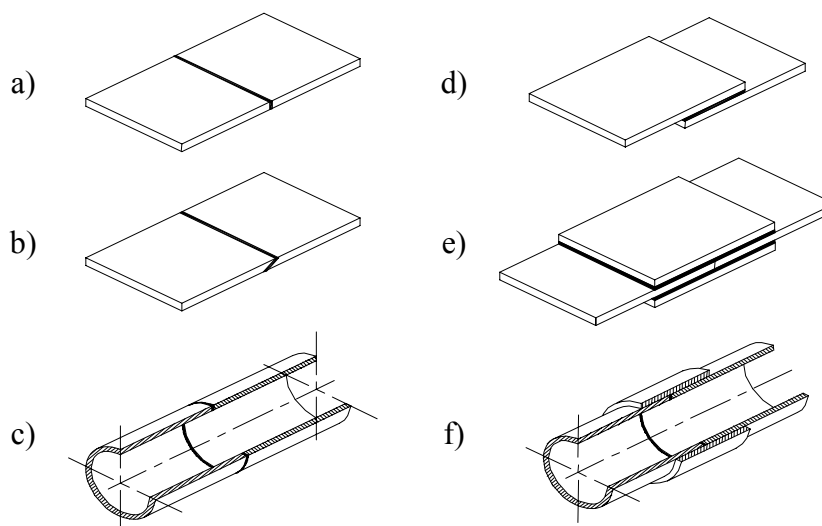
Vrsta lema	Veličina raspora h [mm]	Osnovni materijal
Meki lemovi	0,20	lake kovine
	0,10	čelik
	0,10...0,20	teške kovine
Bakreni lemovi L-Cu	0,05...0,10	čelik/čelik
	0,25...0,40	čelik/teške kovine
Mjedeni lemovi L-CuZn	0,10...0,25	čelik
	0,10...0,40	teške kovine
Lemovi lakih kovina L-Al	0,10...0,15	lake kovine
	0,15...0,65	lake kovine
Srebrni lemovi L-Ag	0,05...0,20	čelik
	0,05...0,25	teške kovine
	0,05...0,25	teške kovine

Osim što pravilan izbor zračnosti utječe na nosivost spoja treba napomenuti da su zračnosti kao i površina tehnološki bitni. Pritom u nekim slučajevima treba voditi računa i o različitom koeficijentu rastezanja metala. Zračnost mora u cijelom spoju biti jednaka jer će se samo tako ostvariti ispravno kapilarno djelovanje. Brazde od strojne obrade koje su okomite na kapilarni tok rastaljenog materijala lema otežavaju njegov protok. Obrnuto, ako su u smjeru tečenja materijala lema, oni ga pospješuju. Ponekad se namjerno usmjeravaju tragovi obrade da bi se postupak lemljenja poboljšao (slika 3.10). U tom slučaju neke vrste bakrenih leмова mogu kapilarno ući i u stezne spojeve (spojeve sa preklopom!).

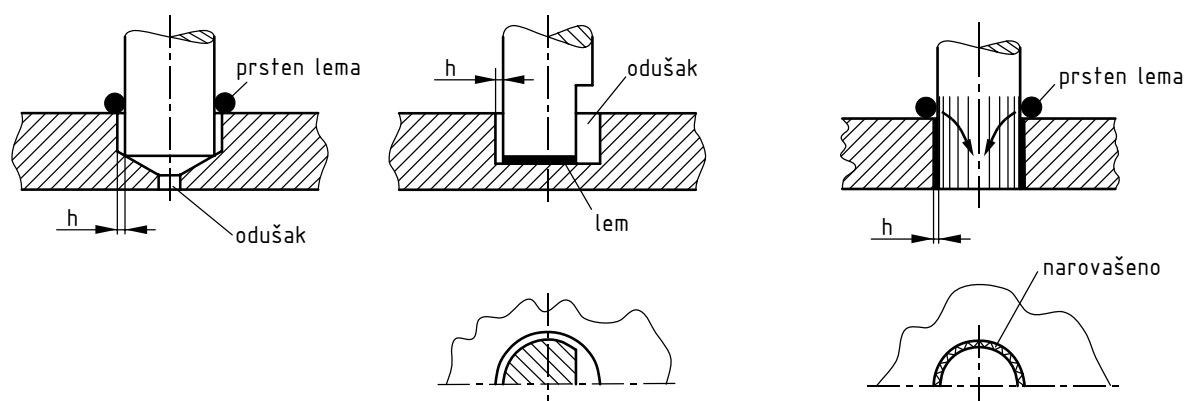
Na slici 3.9. prikazane su različite vrste i oblici lemljenih spojeva. Ravni čeonni spojevi (slika 3.9. a, 3.9c nisu u načelu pogodni za kapilarno lemljenje, već više za šavno. Kosi spojevi (slika 3.9.b) poboljšavaju uvjete lemljenja ali ne bitno, a nekakvog učinka ima samo za limove debljine veće od 2 mm. Obzirom da redovito osnovni materijal i lem imaju različite module elastičnosti čeonni su spojevi veoma osjetljivi na savijanje, zato jer na uskom spoju dolazi do nagle promjene krutosti što izaziva veliku koncentraciju naprezanja. Izuzetak su spojevi gdje osnovni materijal i lem imaju slične karakteristike kao na primjer lemljenje bakra sa mjedenim lemom ili aluminijskih legura sa aluminijskim lemom. Prednost uvijek treba

dati preklopnim spojevima (slika 3.9.d) pogotovu sa stičnicama (slika 3.9.e i 3.9.f), koji su opterećeni smično.

Oblik završetka spoja je također bitan. Na krajevima spoja dolazi uslijed povećanja krutosti i zareznog djelovanja (nagli skok presjeka) do koncentracije naprezanja što može dovesti do inicijalne pukotine.



Slika 3.9. Prikaz oblika lemljenog spoja: a) i c) čisto stični, nepovoljan, treba ga izbjegavati; b) kosi stični (veća površina) bolji ali ga isto treba izbjegavati; d) preklopni, povoljan; e) i f) stični sa stičnicom, povoljan.



Slika 3.10. Tvorba kapilarnih raspora kod lemljenih spojeva

Kada se radi o slijepim rupama kao mjestima lemljenja potrebno je osigurati istek zraka iz raspora (odušak) radi nesmetanog kapilarnog djelovanja.

Proračunski primjer:

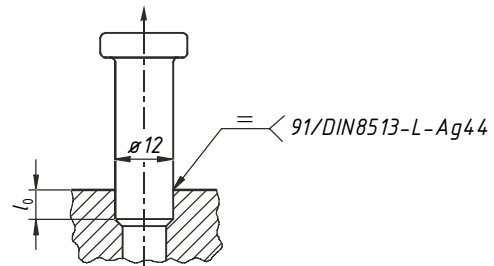
Zatik prikazan na slici tvrdo je zalemljen za postolje i opterećen je aksijalnom silom F . Zatik i postolje su izrađeni od čelika S235JR (EN). Potrebno je izračunati:

- dužinu lemljenog spoja l_p pod uvjetom da se zadrži nosivost zatika, odnosno da zalemljeni spoj i zatik imaju jednaku čvrstoću,
- maksimalnu silu F koju može prenijeti spoj uz faktor sigurnosti $S=3$, za slučaj mirnog opterećenja ($K_A=1$)

Rješenje:

- prema jednadžbi (3.6) dužina preklopa je:

$$l_p = \frac{K_A R_m d}{\tau_{LB} 4} = \frac{1 \times 340 \times 12}{205 \times 4} = 5 \text{ mm}$$



(za čelik S235JR je minimalna čvrstoća $R_m=340 \text{ N/mm}^2$ (tab.); čvrstoća na odrez materijala lema (L-Ag44) $\tau_{LB}=205 \text{ N/mm}^2$ (tab. 3.1). Ostalo sa crteža.

- Maksimalna sila kojom možemo opteretiti spoj dobije se na temelju jednadžbe:

$$F_{\max} = \frac{\tau_{LB} A_L}{K_A S} = \frac{\tau_{LB} d \pi l_p}{K_A S} = \frac{205 \times 12 \times \pi \times 5}{1 \times 3} = 12,87 \text{ kN}$$

Isti rezultat bi dobili i preko maksimalne nosivosti zatika, obzirom da je dužina preklopa dobivena preko te vrijednosti.

Literatura:

Niemann