

UDK 621.792.3

O uporabnosti lepljenja kovin v strojništvu

JULIJ BERTONCELJ

1.0. UVOD

Postopek spajanja dveh delov v eno celoto pozna človeštvo že zelo dolgo, saj je našlo prve zgleda lepljenja že v naravi sami. Znano je, da odlične primere zlepitve najdemo v morskem svetu, človeku pa, kljub vztrajnemu iskanju, za sedaj še ni uspelo najti lepila enakovredno tistemu, kakršno uporablja npr. morská zvezda, da se pritrdi na spólzko dno. Takšnemu naravnemu zgledu lahko pridružimo tudi onega iz faraonovih časov o že tisočletja tako dovršeno zlepljenih okrasnih biseri, da temu še vedno ni kos nobena sodobna tehnologija lepljenja. To kaže, da je imelo lepljenje v davni preteklosti izredno pomembno vlogo, ki se je s pojavom drugih možnosti za združitev dveh delov (kovičenja, vijčenja ipd.) znatno zmanjšala. Omeniti pa velja, da so lepila po vzoru izpred tisoč let (lepila organskega izvora) še vedno v rabi v knjigarski tehniki.

Sodobno lepljenje kovin se je začelo šele z razvojem sintetičnih veziv. Pionirsko delo lahko pripišemo N. A. de Bruyneu, ki je l. 1943 izdelal lepilo s takšno praktično vrednostjo, da je bilo mogoče zlepliti letalsko konstrukcijo angleškega lovca »Hornet«. Tej izredni drznosti, ki jo je terjala vojna, so se zelo hitro pridružile tudi druge konstrukcije, kar kaže na veliko uspešnost lepljenja kovin. Celó 56 m dolga mostna konstrukcija, ki so jo l. 1955 zleplili iz jeklenih cevi, po sedmih letih ni kazala poškodb na spojih in zato ni čudno, da je lepljenje prodrlo zelo hitro v skoraj vse industrijske panoge.

Pozitivni rezultati preizkusov, ki so se izvajali z leplili v zadnjih tridesetih letih (v Švici in Veliki Britaniji), so omajali še zadnje pomisleke o uporabnosti lepljenja tako zelo, da so lepljenje kovin uporabili tudi v programu Apollo.

Problematika lepljenja je postala tako obširna, da je nemogoče kratko zapisati vse posebnosti tega tehnološkega postopka od fizikalnih osnov pa do priprave lepljencev in kontrole spojev. Ustavili bi se predvsem pri vprašanju, zakaj se je lepljenje tako hitro uveljavilo, katera so osnovna pravila pri konstruiranju in kaj moramo upoštevati pri dimenzioniranju takih spojev.

2.0. ZAKAJ SE JE UVELJAVILO LEPLJENJE

Zahteve sodobnega časa upravičujejo obstoj samo še takih konstrukcij, ki združujejo optimalne rešitve tako tehnološke kakor tudi oblikovne narave, kar pa v nobenem primeru ne sme biti v škodo osnovnemu namenu konstrukcije. To jasno kaže, da je sodobna konstrukcijska zasnova tista, ki omogoča pri zahtevanih funkcijah in obratovalnih pogojih minimalne dimenzije.

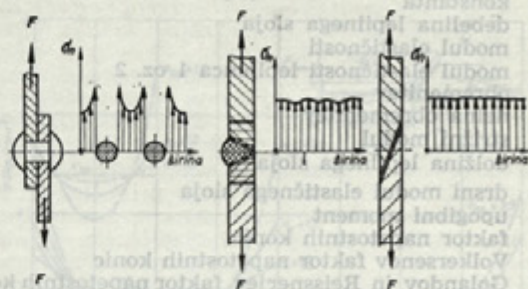
Z gotovostjo lahko trdimo, da so najpoglavitejši vzroki za uveljavitev lepljenja izraženi prav s

- prihrankom materiala,
- zmanjšanjem stroškov izdelave ter
- možnostjo popravljanja oblikovnih in površinskih napak.

Zgornje lastnosti so pomembnejše za presojo o uporabnosti lepljenja kakor pa

- toplotna občutljivost,
- občutljivost za atmosferske vplive in kemikalije ter
- še vedno nezanesljiva kontrola spoja.

Prihranek materiala izdelka je omogočen s skoraj enakomernim potekom napetosti po širini spoja v lepilni plasti brez izrazitih lokalnih osla-



Sl. 1. Potek napetosti nerazdružljivih zvez

bitev, kar ima pri racionalnem konstruiranju za ugodno posledico zelo dober izkoristek trdnostnih lastnosti povezujočih materialov tako pri statičnih kakor tudi dinamičnih obremenitvah (sl. 1).

Pri kovičenih zvezah je nosilni prerez zaradi lukenj oslabiljen, kar je treba upoštevati v proračunu. Ob robu se pojavljajo še koncentracije napetosti, ki vplivajo na dimenzioniranje; ploščinski pritisk med stebrom kovine in luknjo pa trdnostne razmere še poslabša. Take razmere bistveno vplivajo na trajno trdnost osnovnega materiala, zato ni mogoče popolnoma izkoristiti trdnostnih lastnosti nosilnega prereza, kar povzroča masivnejšo in tudi težjo ter večkrat negospodarno konstrukcijo.

Varjeni spoj omogoča — glede na kovičeno zvezo — bistveno boljši potek napetosti, stično področje zvara pa je zaradi vpliva zvara zelo prizadeto s spremembo strukture. Zvarno mesto je zaradi tega v nosilnem prerezu motnja, ki zmanjšuje nosilnost zvarjenega elementa.

Lepljenje omogoča — pri upoštevanju pravil lepljenja — zelo ugodno spojitev dveh kosov v eno nosilno celoto. Potek napetosti prek spoja, zlasti še kratkega, je skoraj enakomeren, kar omogoča gospodarnейše konstruiranje.

Konstrukter lahko s pridom uporablja možnost lepljenja skoraj vseh kovin in zlitin z nekovinskimi snovmi, kar omogoča svobodnejšo izbiro materiala in s tem bolj smotrno konstruiranje.

Lepljenje omogoča zmanjšanje stroškov izdelave zlasti še v tistih primerih, ko se zahtevajo posebne ali aerodinamične oblike konstrukcije. Z uporabo lepila je mogoče izdelovati večplastne elemente, ki se odlikujejo po veliki nosilni sposobnosti. Lepilo lahko zapolni tudi morebitne vrzeli ali neravnosti, kar zmanjšuje izmet izdelkov. Ne nazadnje pa obdelava lepljenih mest ne terja večjih stroškov niti drugih naprav ter jo v mnogih primerih lahko izvaja priučena delovna sila.

3.0. OSNOVNA PRAVILA NAČRTOVANJA LEPLJENIH SPOJEV

3.1. Prvo pravilo: Poznati moramo napetostno sliko

Lepljeni spoji so primerni predvsem za strižne obremenitve. Zaradi takšnih lastnosti mora konstrukter, ki hoče graditi gospodarno, dobro poznati napetost v lepilnem sloju. Najbolje so se pokazali enostavni prekriti spoji in spoji z zaplatami. Omeniti velja, da uporabljamo v lepljenih konstrukcijah še največ enostavni prekriti spoj.

3.1.1. Označevanje

a	debelina lepljenca
a _{1,2}	debelina lepljenca 1 oz. 2
A	konstanta
b	širina lepljivega sloja
B	konstanta
d	debelina lepljivega sloja
E	modul elastičnosti
E _{1,2}	modul elastičnosti lepljenca 1 oz. 2
F	obremenitev
F _{1,2}	delna obremenitev
G	strižni modul
l _p	dolžina lepljivega sloja
K	drsní modul elastičnega sloja
M	upogibni moment
n	faktor napetostnih konic
n _v	Volkersenov faktor napetostnih konic
n _{GR}	Golandov in Reissnerjev faktor napetostnih konic
Δ	okrajševalni simbol
δ	obojestranski premik lepljencev
δ _{sr}	poprečni obojestranski premik lepljencev
δ _{max}	maksimalni obojestranski premik lepljencev
ε _{1,2}	raztezek lepljenca 1 oz. 2
λ	okrajševalni simbol
ν	varnostni faktor
σ _n	natezna napetost
σ _r	meja plastičnosti lepljenca
τ	strižna napetost
τ _{dop}	dopustna strižna napetost
τ _{max}	maksimalna strižna napetost
τ _{sr}	poprečna strižna napetost
τ _M	vezivna (strižna) trdnost
τ _{ML}	časovna vezivna trdnost
τ _{MD}	dinamična vezivna trdnost
ω	okrajševalni simbol

3.1.2. Potek napetosti v lepljivem sloju preprostega prekritega spoja

Če obravnavamo lepljivo plast med obema lepljencema kot idealni elastični vmesni sloj, kjer se vsi v spoju sodelujoči elementi deformirajo elastično, lahko izračunamo medsebojni odnos med premikom lepljivega sloja in raztežkom povezujočih delov.

Za premik δ_x na mestu x , slika 2, lahko zapišemo

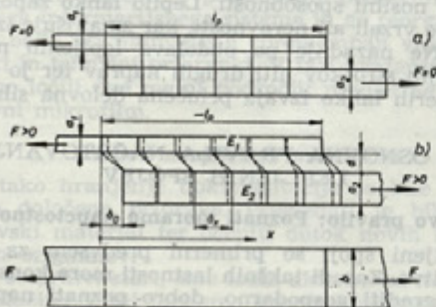
$$\delta_x = \delta_{x=0} + \int_0^x \varepsilon_{1x} dx - \int_0^x \varepsilon_{2x} dx \quad (1)$$

Če še upoštevamo, da je

$$a_1 + a_2 + d = \text{const}, \quad E_1, E_2 = \text{const in}$$

$M = \text{const}$ oziroma ničlen, slika 3, znaša raztezek v prvem lepljencu

$$\varepsilon_{1x} = \frac{F_{1x}}{a_1 b E_1} \quad (2a)$$



Sl. 2. Premik spoja zaradi obremenitve F

v drugem pa

$$\varepsilon_{2x} = \frac{F_{2x}}{a_2 b E_2} \quad (2b)$$

Velikost nateznih sil F_{1x} in F_{2x} na opazovani dolžini lahko izrazimo za prvi lepljenec z

$$F_{1x} = b \int_0^x \tau_x dx \quad (2c)$$

pri drugem pa je ostala razlika obremenitve

$$F_{2x} = F - F_{1x} \quad (2d)$$

S tem smo razširili enačbo (1) tako, da dobimo za premik sloja obliko

$$\delta_x = \delta_{x=0} + \left(\frac{1}{a_1 E_1} + \frac{1}{a_2 E_2} \right) \int_0^x \int_0^x \tau_x dx dx - \frac{1}{a_2 b} \int_0^x F dx \quad (3)$$

pri čemer bomo morali za τ_x in F poiskati boljše formulo. To najdemo, če upoštevamo, da so premiki v elastičnem področju proporcionalni strižnim napetostim tako, da v splošnem velja

$$\tau_x = \delta_x \cdot K \quad (3a)$$

kjer je s K označen drsní modul lepljivega sloja, ki je v elastičnem področju tudi konstanten.

Zaradi možne preureditve enačb 2c in 2d ter z upoštevanjem

$$F = \delta_{sr} \cdot K \cdot b \cdot l_p \quad (3b)$$

in

$$\delta_{x=0} = \delta_0$$

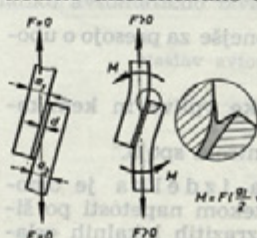
dobimo iz enačbe (3) obliko

$$\delta_x = \delta_0 + \left(\frac{K}{a_1 E_1} + \frac{K}{a_2 E_2} \right) \int_0^x \int_0^x \delta_x dx dx - \frac{K}{a_2 E_2} \delta_{sr} l_p x \quad (4)$$

To je splošna enačba za premike v idealnem elastičnem sloju, ki se v večini primerov zaradi spajanja enakih materialov še dodatno poenostavi:

$$\delta_x = \delta_0 + \frac{K}{a_2 E} \frac{a_1 + a_2}{a_1} \int_0^x \int_0^x \delta_x dx dx - \frac{K}{a_2 E} \delta_{sr} l_p x \quad (5)$$

Z dvakratnim diferenciranjem enačbe (5) dobimo linearno diferencirano enačbo 2. reda za premike v elastičnem področju



Sl. 3. Deformacija spojnega mesta zaradi delovanja dvojice sil

stičnem sloju, ki se glasi

$$\frac{d^2 \delta_x}{dx^2} = \lambda^2 \delta_x \quad (6)$$

kjer z λ^2 nadomestimo vse konstantne člene

$$\lambda^2 = \frac{K}{a_2 E} \cdot \frac{a_1 + a_2}{a_1} \quad (6a)$$

Splošna rešitev enačbe (6) se glasi

$$\delta_x = A \sin h(\lambda x) + B \cos h(\lambda x) \quad (7)$$

kjer se matematični konstanti A in B izračunata z enačbo (5), ki z upoštevanjem simbola

$$\Delta = \frac{K}{a_2 E} l_p^2 \quad (7a)$$

in razmerja debeline lepljencev

$$\omega = \frac{a_1 + a_2}{a_1} \quad (7b)$$

dobi nekoliko spremenjeno obliko

$$\delta_x = \delta_0 + \frac{\Delta}{l_p^2} \omega \int_0^x \int_0^x \delta_x dx dx - \frac{\Delta}{l_p} \delta_{sr} x \quad (8)$$

Ker pa smo izhajali iz tega, da so premiki proporcionalni strižnim napetostim, pomeni enačba (8) tudi velikost strižne napetosti v vmesnem sloju, če le upoštevamo konstanto K .

Posebna rešitev enačbe (8) v brezdimenzijski obliki se glasi

$$\frac{\delta_x}{\delta_{sr}} = \frac{\tau_x}{\tau_{sr}} = \frac{\sqrt{\Delta}}{\sin h \sqrt{\Delta \omega}} \left\{ (\omega - 1) \cos h \left(\frac{x}{l_p} \sqrt{\Delta \omega} \right) + \cos h \left[\sqrt{1 - \frac{x}{l_p}} \cdot \sqrt{\Delta \omega} \right] \right\} \quad (9)$$

kjer je

$$\delta_{sr} = \frac{F}{b l_p K} \quad (9a)$$

in

$$\tau_{sr} = \frac{F}{b l_p} \quad (9b)$$

Ker pričakujemo največje premike in s tem strižne napetosti na začetku in koncu spoja, vstavimo v enačbo (9) $x = 0$ oziroma $x = l_p$, kar potrjuje, da se na teh mestih pojavlja maksimalna vrednost kvocienta $\frac{\delta_x}{\delta_{sr}}$ ki znaša

$$\frac{\delta_{max}}{\delta_{sr}} = \sqrt{\frac{\Delta}{\omega}} \frac{(\omega - 1) + \cos h \sqrt{\Delta \omega}}{\sin h \sqrt{\Delta \omega}} \quad (10)$$

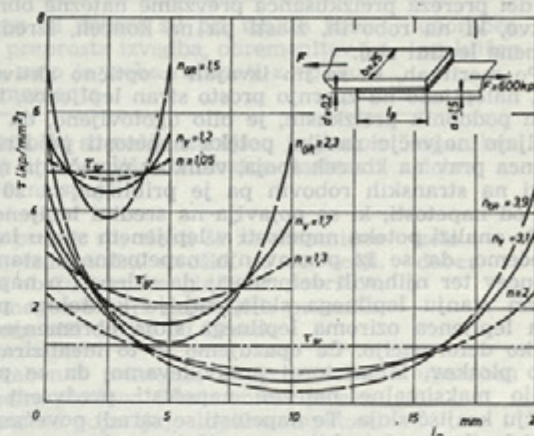
Ce spoj izvedemo še iz enako debelih lepljencev, dobi enačba (10) še enostavnejšo obliko, ker je tedaj $\omega = 2$ in

$$\frac{\delta_{max}}{\delta_{sr}} = \frac{\tau_{max}}{\tau_{sr}} = \sqrt{\frac{\Delta}{2}} \cot h \sqrt{\frac{\Delta}{2}} = n \quad (11)$$

Za konstrukterja, ki največkrat predvidi konstantno širino lepljenca in s tem lepilnega sloja, niso več

toliko zanimive napetosti vzdolž spoja, pač pa velikost faktorja napetostnih konic n . Ta je poleg konstant materiala lepljencev in lepila, $a^2 E$ in K , odvisen samo še od kvadrata lepljene dolžine l_p .

Slika 4 kaže potek napetosti po vsej dolžini spoja za tri različne dolžine spoja.



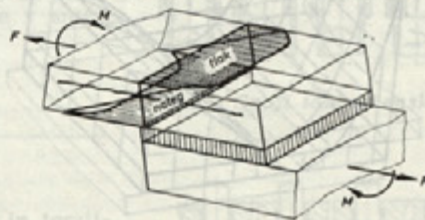
Sl. 4. Potek napetosti v lepljenem spoju

Iz grafične ponazoritve različnih teorij o velikosti strižne napetosti vzdolž spoja je dobro vidno, da imajo kratki spoji prednost pred dolgimi, vpliva upogibnega momenta pa ne smemo povsem zanemariti, ker se s tem zelo povečajo lupilne napetosti, ki so največje na koncih spoja.

Za sedaj še ni uspelo natančno rešiti problema poteka napetosti v lepljenem spoju, vzroke pa je treba iskati v predpostavkah izračunov. Po Volkersenu bi veljalo, da se strižna napetost proporcionalno veča z debelino lepilnega sloja; preizkusi pa kažejo, da je prav obratno. To je samo eno od protislovij, s katerimi je treba računati, in tako lahko sklenemo, da so obravnavane enačbe uporabne le pogojno.

Potek strižne napetosti v lepilnem sloju smo analizirali v ravnini, ki razpolavlja lepljeni spoj simetrično in v smeri obremenitve, ne glede na vplive, ki izhajajo iz sprememb prereznih ploskev lepljencev. Že preprost model lepljenega spoja pa je pokazal, da je smiselno vključiti v analizo napetosti tudi vpliv širine spoja.

S fotoelastičnimi preizkusi, ki so jih izvajali po dveh poteh, so potrdili domnevo, da ne moremo računati z enakomernim potekom natezne kakor tudi tlačne in strižne napetosti po širini spoja, in sicer zato, ker prerezne ploskve lepljencev, ki leže pravokotno na smer delovanja obremenilne sile, ne ostanejo ravne in konstantne, kakor predvideva s Bernoullijeve hipoteze, temveč se izbočijo. Vzrok za to je upogibni moment, ki ga povzroča že omenjena dvojica sil (sl. 3). Upogibne napetosti kot posledica tega momenta pa se skladajo z nateznimi napetostmi, ki jih povzroča obremenitev spoja. Rezultat tega je, da se v vlaknih, ki leže na zunanji ploskvah lepljencev, pojavljajo tlačne napetosti z maksimalnim iznosom na sredini ploskve, medtem ko so maksimalne natezne napetosti v vsakem primeru



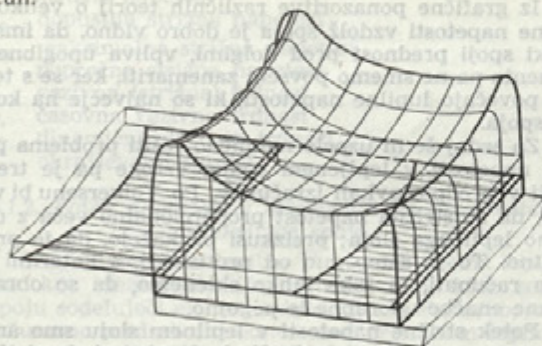
Sl. 5. Vpliv upogibnega momenta

na zunanjih robovih lepilne strani (sl. 5). Največji vplivi teh napetosti se pojavljajo zopet na koncih spoja. Za boljše predstavo napetostnega stanja je smiselno zasledovati lego nevtralnih vlaken, ki ločijo tlačno od natezne cone.

Nevtralna os leži bliže tlačnemu območju, tako da večji del prereza preizkušanca prevzame natezne obremenitve, ki na robovih, zlasti pa na koncih, izredno obremenjene lepilni sloj.

Po meritvah, ki so jih izvajali z optično aktivno folijo, nalepljeno na zgornjo prosto stran lepiljenca, ter drugih podobnih preizkusih, je bilo ugotovljeno, da se pojavljajo največje razlike poteka napetosti po širini lepiljenca prav na koncih spoja, velikost povečanja napetosti na stranskih robovih pa je približno za 20 % večja od napetosti, ki se pojavlja na sredini lepiljenca.

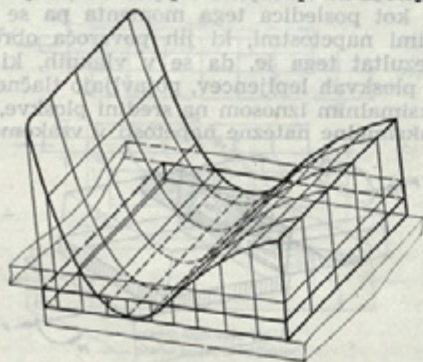
Po analizi poteka napetosti v lepjenem spoju lahko rečemo, da se iz poznavanja napetostnega stanja lepiljenca ter njihovih deformacij da sklepati o napetostnem stanju lepilnega sloja, saj je kontaktna površina lepiljenca oziroma lepilnega sloja obremenjena z enako deformacijo. Če opazujemo le to idealizirano mejno ploskev, lahko torej predvidevamo, da se pojavljajo maksimalne natezne napetosti predvsem v območju krajišč sloja. Te napetosti se zaradi povečanja togosti lepilnega sloja hitro zmanjšajo, na koncu pa se zaradi vpliva drugega lepiljenca nekoliko povečajo (sl. 6). Vpliv togosti potrjuje Braigov poenostavljeni račun.



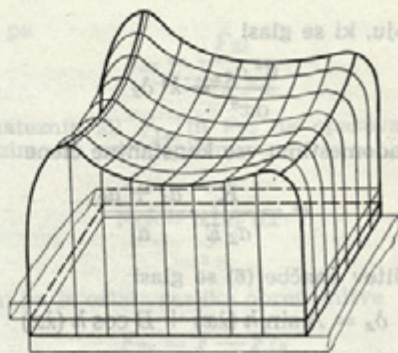
Sl. 6. Potek nateznih napetosti

Namestitve optično aktivne folije na stranske površine lepiljenca pa omogoča tudi ugotovitev poteka tlačnih in nateznih (lupilnih) napetosti po širini (in debelini) lepilnega sloja. Največji vpliv lupljenja je na koncu spoja, v srednjem delu pa prej natezne napetosti spremene smer in postanejo tlačne, toda na robu pridejo — zaradi deformacij spodnjega lepiljenca — zopet v natezno obliko (sl. 7). Preizkus tudi potrjuje, da je potek teh napetosti po širini praktično konstanten.

Iz poteka natezne napetosti lahko sklepamo, da se tudi največje strižne napetosti v lepilnem sloju pojav-



Sl. 7. Potek nateznih (lepilnih) in tlačnih napetosti

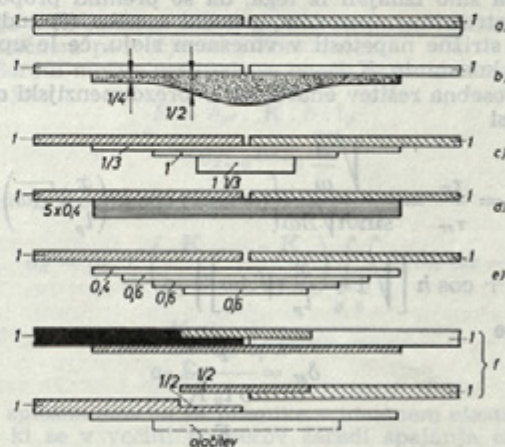


Sl. 8. Potek strižnih napetosti

ljajo na mestih največjih deformacij (sl. 2), ki so zopet krajišča spoja (sl. 8).

3.2. Drugo pravilo: oblikovanje spoja se mora prilagajati napetostni sliki

Lepljenje prinaša nekatere posebne probleme, kajti spoji morajo biti za lepjenje konstrukcijsko pravilno oblikovani. Pri načrtovanju spoja moramo nujno združiti znanje o poteku napetosti v predvidenem spoju z ugotovitvijo, da je trdnost lepila na splošno stoti del trdnosti povezujočih se materialov, za kar je potrebna večja zlepnna površina. Pri tem mora oblikovalec izbrati le tisto obliko spoja (sl. 9), ki je v danih razmerah v konstrukcijskem sklopu najbolj gospodarna.



Sl. 9. Konstrukcijske izvedbe spojev

Najboljša, vendar najdražja, je izvedba s simetrično zaplato kontinuirano spremenljive debeline. Prvi približek, ki je tudi cenejši, je stopničasta ali tudi večslojna zaplata. Zaradi izdelovalnih problemov pa je težko izdelati teoretično zaželen lepilni spoj. V splošni praksi se največ uporabljajo spoji, kakršne prikazuje tabela 1 in 2, če gre za ravne elemente; za cilindrična telesa, kakor so cevi, zatiči, sorniki in podobno, pa po slikah 10 do 14.

Spoje z zavihki je mogoče oblikovati na več načinov, dobri pa so le tisti, ki preprečujejo ali omejujejo pojav lupljenja, in pa tisti, pri katerih leže spoji v ravnini delovanja obremenitev.

Variante, ki jih prikazuje slika 10, so uporabne za debelostenske cevi, sposobne pa so prenašati natezne, tlačne in torzijske obremenitve. Za tankostenske cevi se priporočajo predvsem spoji, ki jih kaže slika 11.

Poleg lepjenja cevni zvez se lahko uspešno lepijo tudi prirobnice, pokrovi in dna, puše in zatiči (sl. 12).

Tabela 1: Ploščate oblike spojev

Primer	Vrsta spoja	Analiza nošenja	Ocena
	soležni spoj	Zaradi majhne zlepnne ploskve ter majhne trdnosti lepila je spoj neugoden. Hitro se pojavljajo lupilne sile	neuporaben
	prekrovnji spoj	Zelo primeren za prenos sil pri tankih povezanih kosih, preprosta izvedba, obremenitev je ekscentrična, zato je treba računati z vplivom upogibnega momenta	uporaben, praktičen
	prekrovnji spoj z obdelanimi robovi	Izdelovalni stroški so večji, izboljšanje je pretok sil. Ta spoj ima boljše trdnostne lastnosti kakor prekrovnji spoj	uporaben, dober
	poševni spoj	Zelo ugoden pretok sil, zlasti še za dinamične obremenitve, izdelovalni stroški pa so večji. Priporoča se obojestranska gladkost površine. Ta spoj je mogoč le pri debelejših prerezihi. Prekritje mora biti daljše od 10 mm	zelo dober
	spoj z eno zaplato	Spoj je uporaben v primerih, ko je potrebna vsaj ena gladka ploskev. Obremenitev je ekscentrična, zato se pojavljajo lupilne napetosti	uporaben
	spoj z dvema zaplatama	Simetrična obremenitev, trdnost spoja je zelo dobra, zato je uporaben za največje, tudi dinamične obremenitve. Slabost: ni gladkih ploskev. Razmerje debelin 1:2:1	uporaben, dober
	ošiljeni spoj z dvema zaplatama	Dobro pretok sil, dobre trdnostne lastnosti spoja. Spoj je uporaben samo pri razpoložljivih zaplatnih profilih, sicer je izvedba predraga	zelo dober
	dvojni prekrovnji spoj	Zelo dober spoj, majhni izdelovalni stroški. Izraba materiala je najboljša pri razmerju debelin 1:2:1	zelo dober
	stopničasti spoj	Izdelovalni stroški se povečajo močneje kakor pa trdnost spoja, ker se nosilnost spojenih delov zmanjša na polovico. Spoj je neprimeren	slab
	dvojni stopničasti spoj	Podobno kakor dvojni prekrovnji spoj, toda negativne lastnosti so še izrazitejše	nepraktično, slabo

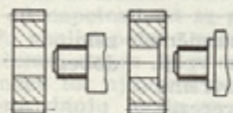
Tabela 2: Spoji z zavijki

	Spoj je primeren za natezne obremenitve, ker je samonosen. Zelo dober je za strižne obremenitve vzdolž osi spoja. Slabost spoja je v tem, da so tri plasti lepila, treba je računati z notranjimi napetostmi v lepilnih slojih. Zaradi tega so za take spoje primerna le tista lepila, ki se pri sušenju ne skrčijo izraziteje. Spoj je drag		Sl. 10. Spoji debelostenskih cevi
	Uporaben je le za strižne obremenitve v smeri spoja		Sl. 11. Spoji tankostenskih cevi
	Primerna oblika za prenos nateznih, tlačnih in torzijskih obremenitev v smeri spoja		Sl. 12. Lepljenje zatičev

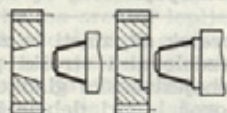
V vsakem primeru mora biti predviden prostor za lepilni sloj, kar pa lahko povzroča montažne napake. Zaradi tega so primernejše tiste variante, pri katerih je — kljub uporabi lepljenja — mogoče tesen kovinski prilag.

Podoben problem se pojavlja tudi v primeru, ko želimo zlepiti npr. zobnik z gredjo (sl. 13). Navadno ima gred ustrezno manjšo mero, sloj lepila pa je neenakomeren; to povzroča nujno ekscentričnost, mogoče pa so tudi poškodbe sloja. Take probleme moremo reševati le s pravilnim oblikovanjem spoja, tj. z uvedbo centriranega nastavka.

Zelo dobra, a znatno dražja je izvedba s konusnim nasedom (sl. 14), ki dopolnjuje centrini obroč.



Sl. 13. Lepljenje gredne zveze



Sl. 14. Lepljenje gredne zveze (konusni nased)

Uporabnost lepljenja z doslej navedenimi oblikami spojev še ni izčrpana. Poleg omenjenih elementarnih spojev uporablja sodobna tehnologija pogosto kombinirane spoje z željo, da bi čimbolj izkoristili dobre lastnosti posameznih oblik združevanja delov. Tako se lahko lepljeni, sicer elastični spoj, kombinira z dodatno bolj togo zvezo npr.: s točkovnim varjenjem, kovičenjem ali vijčno zvezo. V skoraj vseh primerih lahko z zanesljivostjo računamo le z nosilnostjo toge zveze, saj bi v večini primerov prišlo zaradi značilne udarne občutljivosti lepljenega spoja do porušitve.

Taki kombinirani spoji pa imajo lahko kljub vsemu ugodne lastnosti, prvič s kovičenjem, točkovnim varjenjem ali vijčenjem že med utrjevalnim procesom onemogočamo nastanek lupljenja, zaradi česar niso potrebna sicer nujna držala, drugič pa se poveča nosilnost spoja, če dodatna zveza dopolnjuje sposobnosti lepljenega spoja.

Vsi omenjeni preizkusi, kako bi zmanjšali napetostno konico, niso edini. V praksi je znanih več drugih postopkov, ki temelje npr. na uporabi več lepil v istem spoju z različnimi strižnimi moduli. Tako lahko »mehkejša« lepilo, ki ga uporabimo na robovih, bolj prisili k nošenju sredino lepljenega spoja. S tem se obremenitev enakomerneje porazdeli prek celotnega zlepljenega sloja, kar je tudi osnovni namen tega postopka.

Znane so še druge metode, pri vseh pa je potrebno veliko delovnih izkušenj.

3.3. Tretje pravilo: Upoštevati moramo posebne vplive na trdnost spoja

S številnimi preizkusi je bilo dokazano, da je trdnost spoja zelo odvisna od priprave površine, kajti izkazalo se je, da vezivnost lepil na osnovi umetnih smol temelji predvsem na adheziji med lepilom in lepljeno površino, a znatno manj na mehanski povezavi zaradi hrupavosti površine. Nadalje je vezivnost odvisna od oblikovanja spoja in od vseh v spoju sodelujočih materialov, temperature in trajanja utrjevanja spoja ter obratovalne temperature. Pogostokrat je treba upoštevati še prisotnost vlage ali drugega za spoj agresivnega okolja.

3.3.1. Vezivna trdnost

Ce hočemo definirati pojem vezivne trdnosti lepljenega spoja, ki je najbolj dragocen podatek za dimenzioniranje spoja, velja omeniti podobnost z natezno trdnostjo pri kovinskih materialih. Ker pa je trdnost gradiv odvisna še od trajanja in načina obremenitve, lahko sklepamo, da mora biti tudi trdnost lepljenega spoja zelo kompleksna lastnost.

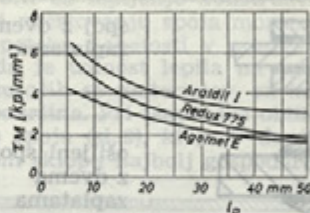
Prva, zelo pomembna značilnost vezivne trdnosti je ta, da znatna neodvisnost natezne trdnosti kovinskih materialov od oblike preizkušancev ne velja za lepljene spoje.

Vezivna trdnost τ_M je računsko srednja vrednost strižne napetosti, ki žal ne pove veliko o dejanskih lokalnih obremenitvah, ki povzročajo natezne in lupilne, zaradi oblike pa predvsem strižne napetosti. Zato lahko pričakujemo, da napetost na mestih konic že lahko doseže trdnost oziroma se izčrpa deformacijska sposobnost lepila, in sicer kljub majhni srednji računski napetosti τ_{sp} . Morebitne lokalne porušitve, ki se lahko pojavijo v takem stanju, pospešijo porušitev celotnega spoja; zato postane prevladovanje strižnih napetosti trdnostno merilo za lepljeni spoj.

3.3.1.1. Vpliv geometrije spoja

Podatek o vezivni trdnosti določenega spoja se ne da uporabiti pri spoju drugih dimenzij, tudi če uporabimo enako lepilo in gradivo lepljencev.

Dolžina lepilnega sloja zelo vpliva na nosilnost, vendar ne sorazmerno s povečanjem lepilne površine, kar pomeni zmanjšanje vezivne trdnosti in s tem slabši trdnostni izkoristek spoja (sl. 15).



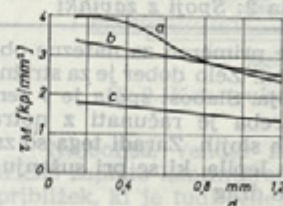
Sl. 15. Vpliv dolžine lepilnega sloja na vezivno trdnost spoja pri uporabi različnih lepil

Širina lepilnega sloja nima pomembnejšega vpliva na vezivno trdnost.

Debelina lepilnega sloja zelo vpliva na vezivno trdnost, kajti z naraščajočo debelino lepilnega sloja se zmanjšuje oviranje strižne deformacije, kar povzroča upadanje vezivne trdnosti (sl. 16).

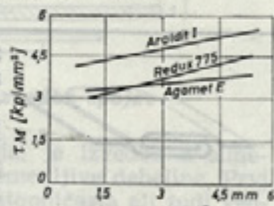
V praksi so se pokazale dobro debeline sloja 0,1...0,3 mm, kar vpliva na izbiro tolerančnega polja.

Debelino lepljencev je treba upoštevati, ker se z večanjem debeline zmanjšuje vpliv dvojice sil, s tem pa se povečuje vezivna trdnost (sl. 17).



Sl. 16. Vpliv debeline lepilnega sloja na vezivno trdnost spoja pri uporabi različnih lepil

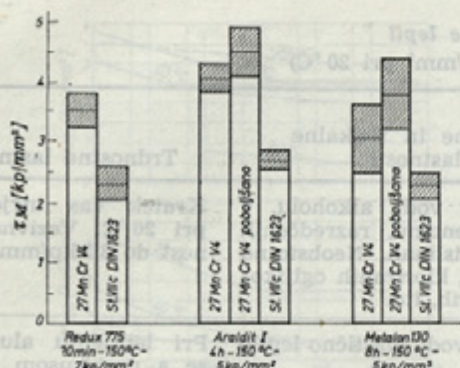
a — mešani polimerji, b — toplo utrjene epoksidne smole, c — hladno utrjene epoksidne smole



Sl. 17. Vpliv debeline lepljencev na vezivno trdnost pri uporabi različnih lepil

3.3.1.2. Vpliv materiala lepljencev

Iz ugotovitve, da je vezivna trdnost odvisna od debeline lepljencev oziroma njihovih deformacijskih lastnosti te pa od elastičnih modulov, vpliva material lepljencev posredno na velikost vezivne trdnosti. Preizkusi so pokazali, da med modulom elastičnosti in vezivno trdnostjo ni preproste odvisnosti, ker je npr. pri alumi-

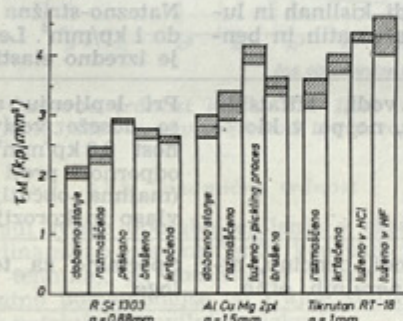


Sl. 18. Vpliv materiala leplencev na vezivno trdnost spoja

nijev zlitini kljub manjšemu modulu elastičnosti mogoče doseči bistveno večjo vezivno trdnost kakor pri jeklu, ki ima boljše trdnostne lastnosti (sl. 18).

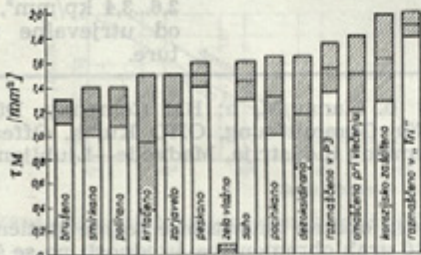
3.3.1.3. Vpliv priprave površine

Na velikost vezivne trdnosti izredno vpliva stanje površine pred lepilnim procesom. Praksa je pokazala, da se pri lepljenju lahkih kovin (npr. tikrutan RT-18) bolje obnesejo kemični postopki (npr. proces »pickling«), za jeklo pa še vedno mehanski postopki, kakor npr. pekanje (sl. 19). Ta ugotovitev velja tudi za baker in njegove zlitine.



Sl. 19. Vpliv priprave površine na velikost vezivne trdnosti pri lepljenju različnih materialov in uporabi lepila Araldit I.

Ker je površina leplencev pred začetkom lepilnega procesa lahko v različnem stanju, je pomembno, da vemo, kaj je tudi lahko vzrok neuspelemu spoju (sl. 20).

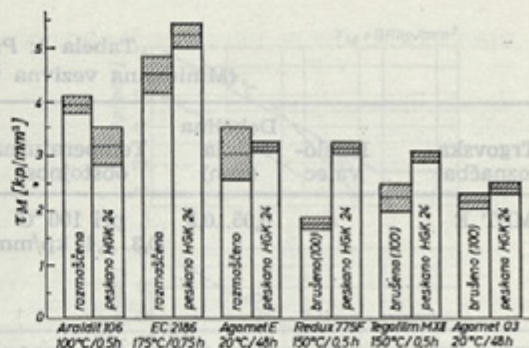


Sl. 20. Vpliv stanja površine na vezivno trdnost lepljenega spoja

3.3.1.4. Vpliv vrste lepila

Problem lepljenja je še obširnejši, ko ugotovimo, da je poleg opisanih vplivov treba upoštevati še vpliv druženja različnih materialov in lepil pri različnih stanjih površine leplencev (sl. 21).

Očitno je, da je za konstrukterja smiselno zasledovati individualne lastnosti lepil in ne samo lastnosti



Sl. 21. Vpliv vrste lepila na stanje površine na vezivno trdnost medenineaste pločevine

temeljnih skupin, kakršne so epoksidne, fenolne ali polimerizacijske smole, ker je medsebojna odvisnost med lepilnimi lastnostmi, lepilom in stanjem površine še vedno premalo jasna. Lepilo mora biti čimmanj občutljivo za staranje, uporabniku pa je na voljo že mnogo dobrih lepil.

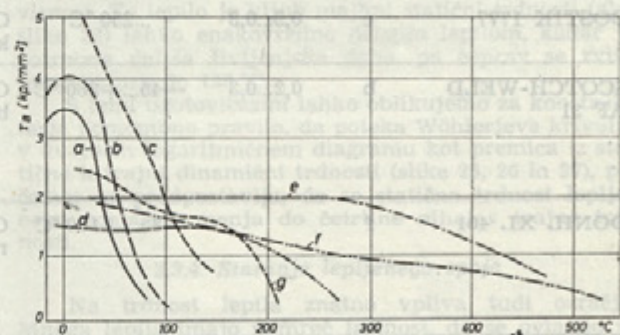
Tabela 3 prikazuje samo del lepil, ki so uporabna pri lepljenju kovin, pojavljajo pa se vedno nova in učinkovitejša lepila.

3.3.1.5. Vpliv temperature

Značilna slabost lepljenega spoja je temperaturna občutljivost, ki pa se je pri sodobnih lepilih že znatno zmanjšala.

Splošno je temperaturna obstojnost lepilnega sloja — v primerjavi s kovino — majhna, navadna lepila pa le dopuščajo temperaturo do 60 °C, ne da bi bila ogrožena nosilna sposobnost spoja.

Meritve so izvedene za vse značilne predstavnike posameznih kemičnih osnov (sl. 22), velik vpliv temperature pa se pojavi prav pri navadnih lepilih na osnovi epoksidnih in fenolnih smol, kjer pri temperaturi nad 80 °C ne moremo več pričakovati, da bo vez trdna.



Sl. 22. Vpliv temperature na vezivno trdnost lepil različnih kemičnih osnov

a — epoksid-poliaminamid, b — fenol-polivinilformal, c — epoksid-najlon, d — epoksidna smola, e — polibencimidazol (preizkusni vzorec), f — poliamid, g — polisulfon

Če zasledujemo še druge krivulje, vidimo, da predstavnika epoksidnonajlonskih (FM 1000) in epoksidnih smol (X 183/2315) že omogočata temperaturo nad 100 °C, v nekaterih primerih (preizkusni vzorec CIBA, FM 34 B) pa celo nad 400 °C. Taka lepila niso posebno elastična, kar povzroča majhno vezivno trdnost, ta pa je odvisna od notranje kemične zgradbe lepila.

Tako lahko sklepamo, da je pri lepljenih kovinskih spojih le mogoče s primerno izbiro lepila vplivati na toplotno obstojnost spoja, če upoštevamo lastnosti s slike 22, kar omogoča konstrukterju večjo izbiro nerazdružljivih zvez tudi pri višjih obratovalnih temperaturah.

Tabela 3: Primeri uporabe lepil
(Minimalna vezivna trdnost 0,6 kp/mm² pri 20 °C)

Trgovska označba	Izdelo- valec	Debelina sloja (mm)	Temperaturna obstočnost	Kemične in fizikalne lastnosti	Trdnostne lastnosti
AGOMET E	a	0,05...0,5	pri 100 °C 0,3...0,4 kp/mm ²	Obstojno v vodi, alkoholu, v oljih in bencinu, razredčenih lugih in kislinah. Neobstojno v aromatih, kloriranih ogljiko- vodikih, etrih, itd.	Kratek čas utrjevanja pri 20 °C. Vezivna trd- nost do 3,5 kp/mm ² .
EC 1472 EC 1473	b	0,05...0,1	-45...+50 °C	Obstojno v vodi, elastično lepilo	Pri lepljenju aluminija se s preizkusom doseže tudi več ko 2,5 kp/mm ² .
SICOMET A	c	0,1...0,5	-70...+110 °C	Obstojno v vodi, bencinu, mi- neralnih oljih, pogojno obstoj- no v alkoholu in bencolu.	Pri lepljenju aluminija se z nateznostriznim pre- izkusom doseže trdnost 4,6 kp/mm ² pri 20 °C.
ARALDIT I	č	0,05...0,5	-60...+100 °C	Obstojno v vodi, alkoholu, ki- slinah in lugih, alifatskih in aromatskih ogljikovodikih.	Vezivna trdnost na pre- izkušancih iz Al: 2...3,5 kp/mm ² pri 20 °C; iz je- kla: 5...5,5 kp/mm ² (od- visno od trdnosti osnov- nega materiala in temp. utrjevanja).
METALLKLEBER 901	d	0,2...0,6	...200 °C	Obstojno v vodi, kislinah in lu- gih, ne pa v aromatih in ben- cinu.	Natezno-strižna trdnost do 1 kp/mm ² . Lepilni sloj je izredno elastičen.
BOSTIK 776	e	0,05...0,1	...90 °C	Obstojno v vodi, alifatskih ogljikovodikih, ne pa v kloro- vodikih.	Pri lepljenju aluminija se doseže vezivna trd- nost 3,8 kp/mm ² . Velika odpornost proti staranju (majhna občutljivost za vlago in korozijo).
BOSTIK 1777	e	0,2...0,3	...250 °C	Obstojno v vodi, bencinu, al- kohololu in mineralnih oljih.	Specialno za torne ob- loge.
SCOTCH-WELD AF 31	b	0,2...0,3	-45...+260 °C	Obstojno v vodi, morski vodi, bencinu in alkoholu.	Pri lepljenju aluminija se lahko doseže vezivna trdnost 2,7 kp/mm ² pri 20 °C in 0,3 kp/mm ² pri 260 °C.
DONIL XL 401	f		-35...+150 °C	Obstojno v vodi, bencinu, olju, razredčenih kislinah in lugih.	Vezivna trdnost spoja jeklenega preizkušanca 2,6...3,4 kp/mm ² , odvisno od utrjevalne tempera- ture.

IZDELOVALCI: a: Atlas-Ago Chemische Fabrik GmbH, Wolfgang b. Hanau/M, b: BM Company, Düsseldorf, c: Sichel-Werke AG, Hannover-Limmer, č: Ciba, Basel, d: Fabrik für Gummilösung, OHO Kurth, Offenbach/M, e: Boston Blacking Company GmbH, Oberursel/Taunus, f: Donit, Kemična industrija, Medvode—Ljubljana.

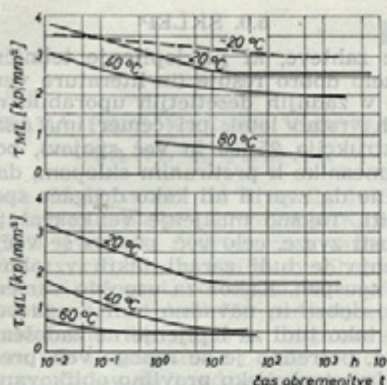
3.3.2. Statična trdnost

V lepljenem spoju se lahko pojavljajo plastične deformacije že pri sobni temperaturi, kar vodi k lezenju lepilnega sloja. V nasprotju s kovinami se namreč pri umetnih masah ne pojavlja oporno delovanje, ker velike lokalne koncentracije napetosti pretrgajo notranje vezi substance. Zaradi take lastnosti pa lahko pričakujemo, da bo trajna statična trdnost lepljenega spoja τ_M , ki je za konstrukterja izredno pomembna, manjša od časovne trdnosti (sliki 23 in 24).

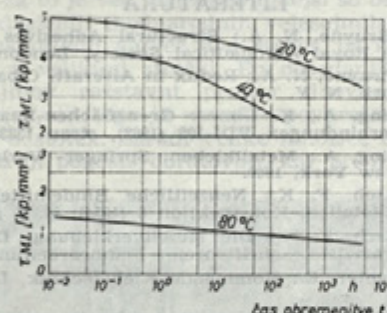
Meritve so pokazale, da se pri lepilih na osnovi fenolnih in epoksidnih smol (npr. Redux 775 in Araldit

106) pojavlja opazno zmanjšanje trajne statične trdnosti že po 10 urah obremenitve, vrednosti pa se še znatno zmanjšajo s povišanjem temperature. Pri temperaturi nad 80 °C ni več smiselno izvajati meritev, nasprotno temu pa ugodno delujejo nizke temperature.

Podobne razmere se pojavljajo tudi pri epoksidno-najlonskih lepilih (npr. FM 1000 in X 183/2315), kar pa ne more biti pravilo za vsa lepila enake kemične osnove. Tako se tudi pri teh lepilih s povišanjem temperature zelo zmanjša trdnost lepila, ugodneje je le pri tistih, ki imajo slabše plastične lastnosti oziroma pri takih, ki so toplotno obstojnejša (X 183/2315) (sl. 24).



Sl. 23. Časovna trdnost lepila Redux 775 (zgoraj) in Araldit 106 v odvisnosti od temperature

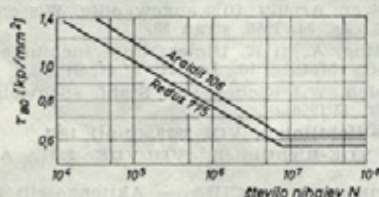


Sl. 24. Časovna trdnost lepila FM 1000 (zgoraj) in X 183/2315 v odvisnosti od temperature

3.3.3. Dinamična trdnost

Zaradi velike uporabe lepljenja v ekstremno lahkih in dinamično obremenjenih konstrukcijah (letala, raketna tehnika), je poznavanje dinamičnih trdnosti lepil znatno pomembnejše od trajne statične trdnosti, kar tudi potrjujejo številni preizkusi.

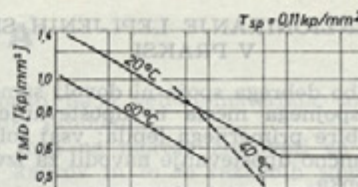
Dinamično trdnost lepljenega spoja τ_{MD} prikazujemo z Wöhlerjevo krivuljo, ki kaže, da so lepila z dobrimi elastičnimi lastnostmi, pa čeprav z majhno lastno trdnostjo, za dinamične obremenitve boljše od trdih in togih lepil (npr. lastna trdnost lepila Araldit 106 dosega komaj četrtino trdnosti lepila Redux 775, kljub temu pa je dinamično uspešnejše, sl. 25).



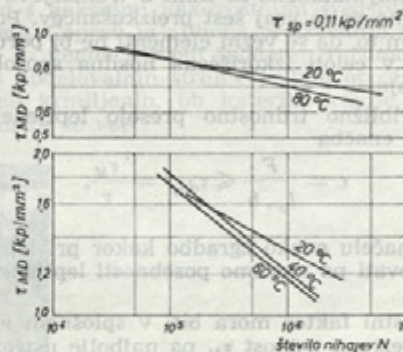
Sl. 25. Wöhlerjevi krivulji lepljenega spoja lahke kovine

Nadalje je razvidno, da se pojavlja izrazita trajna dinamična trdnost pri 10^7 nihajih, z višanjem temperature pa se tudi v tem primeru obremenitve trdnostne razmere hitro spremenijo (sl. 26).

Temu nasprotno se relativno dobro pokažejo toplotno obstojnejša lepila (sl. 27), vendar samo do temperature 60°C. Nadaljnje višanje temperature toliko omehča spoj, da ni več mogoče meriti. Primerjava teh rezultatov (FM 1000) z rezultati epoksidno-najlonskega lepila (X 183/2315) kaže, da ima slednje sicer manjšo dinamično trdnost, toda manjšo tudi temperaturno od-



Sl. 26. Dinamična trdnost lepljenega spoja lahke kovine pri uporabi lepila Redux 775 (zgoraj) in Araldit 106



Sl. 27. Dinamična trdnost lepljenega spoja lahke kovine v odvisnosti od 110 lepila X 183/2315 (zgoraj) in FM 1000

visnost. To lepilo je kljub majhni statični trdnosti (glej sliko 22) lahko enakovredno drugim lepilom, kadar je potrebna daljša življenjska doba, pa čeprav se zviša temperatura do 150°C.

S temi ugotovitvami lahko oblikujemo za konstrukterja pomembno pravilo, da poteka Wöhlerjeva krivulja v dvojnem logaritmičnem diagramu kot premica iz statične k trajni dinamični trdnosti (slike 25, 26 in 27), pri čemer se predpostavlja, da se statična trdnost lepljenega spoja ne menja do četrtine nihajev trajne trdnosti.

3.3.4. Staranje lepljenega spoja

Na trdnost lepila znatno vpliva tudi ozračje. Mnoga lepila imajo namreč lastnost, da se ovlažijo in pri tem se zmanjša lastna trdnost, pojavijo pa se lahko tudi negativne kemične spremembe v lepilu, ki poleg korozije na kovinskih stikih še poslabšajo razmere.

Glede staranja so se posebno izkazala lepila na osnovi fenolnih smol. V času opazovanja, ki traja praviloma 30 do 42 mesecev, se v nekaterih primerih niso zmanjšale adhezijske lastnosti, pač pa se je za približno 35 % zmanjšala vezivna trdnost spoja, ki je bil v vodi več ko 36 mesecev. Trdnost se je zmanjšala po prvih 12 mesecih in se nadalje ni več spremenila. Glede na fenolne smole pa so epoksidne znatno bolj občutljive, dvokomponentne so slabše od enokomponentnih toplih smol. Izkazalo se je, da se zmanjša vezivna trdnost v enakem časovnem obdobju za 20 %, v vodi pa po 18 mesecih opazovanja celo za 30 %.

Se slabše je pri hladnih epoksidnih lepilih, ki vsebujejo kot utrjevalno komponento poliaminamid, trdnost se zmanjša za 50 %, v vodi pa za 60 do 70 %. Razmere se ne izboljšajo s toplim utrjevanjem.

4.0. DIMENZIONIRANJE LEPLJENIH SPOJEV V PRAKSI

Za izvedbo dobrega spoja ni dovolj samo pravilno oblikovanje spojnega mesta in upoštevanje posebnih vplivov in izbire primerne lepila; vsaj toliko je pomembno natančno upoštevanje navodil za izvajanje lepilnega postopka.

Le v redkih primerih, in še to tam, kjer so izkušnje, izvajamo lepljeni spoj direktno na mestu uporabe. V vseh drugih primerih se prepričamo o kakovosti spoja s predhodno analizo preizkušancev (npr. po DIN 53281 do DIN 53286), izdelanih kar iz enakega materiala, ki se bo praktično uporabil. Če še simuliramo obremenitev, ki bo obremenjevala spoj, se lahko zelo približamo realnim razmeram obratovanja spoja.

Za čimbolj varno dimenzioniranje je treba imeti dovolj izčrpno informacijo o trdnostnih lastnostih vseh sodelujočih elementov in če je potrebno, tudi termične in kemične lastnosti, dinamično trdnost pa lahko določimo dovolj natančno že sami z Wöhlerjevo krivuljo, če imamo na voljo vsaj šest preizkušancev. Pomembno je predvsem to, da se vezni elementi ne bi porušili prej, preden ni v celoti izkoriščena nosilna sposobnost lepilnega sloja.

Za približno trdnostno presojo lepljenega spoja dobro rabi enačba

$$\tau = \frac{F}{l_p \cdot b} \leq \tau_{dop} = \frac{\tau_M}{\nu},$$

ki ima v načelu enako zgradbo kakor pri lotanih spojih. Upoštevati pa moramo posebnosti lepljenega spoja, ki so:

Varnostni faktor mora biti v splošnem $\nu \geq 2$, padek za vezivno trdnost τ_M pa najbolje ustreza v primeru kratkotrajnih statičnih obremenitev, ker je tako tudi nastal. Vpliv dinamičnih obremenitev izrazimo približno tako, da upoštevamo največ do 30 % τ_M . Priporoča se, da pri lepljenju cilindričnih teles ter lepljenju jekla z jeklom predvidimo največ $\tau_M = 2 \dots 3,5 \text{ kp/mm}^2$, pri AlCuMg/AlCuMg pa skoraj za polovico manj, torej $1,3 \dots 1,6 \text{ kp/mm}^2$.

Velja tudi pravilo, da je pri lepilni širini b , ki je največkrat kar enaka širini lepilnice, optimalna dolžina spoja $10 \dots 15$ -kratna debelina veznega elementa (lepilencev). Za računsko presojo pa se navaja še enačba

$$l_p = 0,2 \sigma_p (a^2 + 1)$$

kjer pomenita σ_p — mejo plastičnosti lepilencev [kp/mm^2], a pa debelino [mm].

Z natančnejšo kontrolo predvidenega spoja je še vedno najboljša, če poskusimo čimbolj natančno ugotoviti velikost vezivne trdnosti τ_M za obravnavani primer obremenitve z upoštevanjem vseh omenjenih vplivov.

Ocenjeno je, da znaša statična vezivna trdnost glede na izbrano lepilo $1 \dots 2 \text{ kp/mm}^2$, natančnejšo vrednost pa lahko napovemo iz znanih diagramov in tabel.

Statična natezna trdnost, ki je za dimenzioniranje znatno manj pomembna, ker imamo predvsem spoje, kjer se pojavljajo strižne napetosti, za znaša $2 \dots 8 \text{ kp/mm}^2$.

Posebej velja poudariti, da se sme v primeru večjih časovnih obremenitev izkoristiti le $50 \dots 60$ %, pri dinamičnih pa celo $10 \dots 20$ % zgornjih vrednosti. Ti podatki veljajo za normalne temperature (20°C) in jih je treba pri višjih temperaturah ali korozijskih lastnostih vseh povezanih delov ustrezno zmanjšati.

5.0. SKLEP

Izredne zahteve, ki jih lepljenje tehnično in gospodarsko zelo dobro rešuje (iz literature vemo, da se je lepljenje v zadnjih desetletjih uporabilo na več kot sto različnih vrstah letal, pri čemer ima vsaka posamezna konstrukcija 25 000 in več spojev), pogostokrat zavaja posameznike k pretiranim sklepom, da se lahko vse, kar se ne da zvariti ali kako drugače spojit, prav gotovo zlepi. Takšno mišljenje velikokrat pripomore k neuspešnosti zveze, celo več, poskus še večje uveljavitve lepljenja je tudi zaradi takih vzrokov večkrat obsojen na neuspeh. Kakor za uspešno varjenje ni potrebna samo dobra in navadno tudi draga varilna naprava, prav tako tudi za lepljenje ne zadošča samo lepilo in čopič, potrebno je še mnogo več, predvsem pa izkušnje in konstrukcijsko pravilno oblikovanje spoja, ker konstrukcija namenjena varjenju ne more nikdar dobro ustrezati lepljenju in nasprotno.

LITERATURA

- [1] De Bruyne, N. A.: Structural Adhesives for Metal Aircraft. The Royal Aeronautical Society, London W. 1.
- [2] De Bruyne, N. A.: Redux in Aircraft. Ciba — Comp., Inc., New York, N. Y.
- [3] Matting, A., K. Ulmer: Grenzflächen-Reaktionen in Metall-Klebeverbindungen VDI-105 (1963), stran 1333/41.
- [4] Matting, A.: Metallkleben. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1969.
- [5] Trietsch, F. K.: Neuzzeitliche Bindemittel und das Kleben von Metallen, Konstruktion 6 (1954), št. 4, str. 135/45.
- [6] Trietsch, F. K.: Die Metallverklebung: Deva Fachverlag, Stuttgart 1960, Schriftenreihe Feinbearbeitung.
- [7] Tschanter, E.: Kommende Klebetechnik, Installation, 90, str. 25/56.
- [8] Rüeggsegger, H.: River — souder ou coller? «Journal de la Soudres», No 12, 1966, str. 463/69.
- [9] Benninghoff, H.: Kunststoff gegen Korrosion, Maschinenmarkt, 1970, št. 8.
- [10] V. Schulthess, A.: Metallkleben, Industrielle Organisation, CIBA-Basel.
- [11] Müller, R.: Das Kleben in der metallverarbeitenden Industrie. Sonderdruck aus «Haus der Technik», H. 42, Vulkan Verlag, Dr. V. Classen, Essen.
- [12] Fauner, G.: Anwendung und Eigenschaften quasi anaerob-aushärtender organischer Kunststoff-Bindemittel. «Konstruktion Elemente Methoden», H. 3 in 4 (1969), Konradin Verlag, Stuttgart.
- [13] Fauner, G.: Quasi anaerob aushärtende Kunststoff-Bindemittel. «Konstruktion Elemente Methoden», H. 4, 5 in 6 (1970), Konradin Verlag, Stuttgart.
- [14] Tschanter, E.: Verbinden durch Kleben. «Feinwerktechnik», No 74, 1970, H. 4, stran 177/79.
- [15] Tschanter, E.: Klebetechnik in der Fertigung. «Industrie-Elektrik + Elektronik», 15. Jg., 1970, Nr. 9, stran 224/226.
- [16] Eichhorn, F.: Metallklebeverbindungen unter besonderer Berücksichtigung des Alters- und Zeitstandverhaltens. «Schweizer Archiv für angewandte Wissenschaft und Technik», H. 2, Jg. 34, 1968, stran 50.
- [17] Matting, A. in K. Ulmer: Untersuchungen zum Kleben von Titan, «Metall», 16. Jg., H. 1, stran 1/6.
- [18] Hettich, W.: Kleben von Stahl. «Schweizer Maschinenmarkt», Nr. 13/1966.
- [19] VDI-Richtlinien, VDI 2229, junij 1961.
- [20] VDI/VDE-Richtlinien, VDI/VDE 2251, August 1970, list 5.
- [21] Prospekti firme CIBA — Aktiengesellschaft, Wehr/Baden, Vulkan Verlag Dr. W. Classen, Essen.
- [22] Prospekti firme GUSSOLIT, München.
- [23] Hertel, H.: Leichtbau. Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1960.
- [24] Dubbels Taschenbuch für den Maschinenbau, Erster Band, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1966.
- [25] Brockmann, W.: Grundlagen und Stand der Metallklebtechnik, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1971.
- [26] Krist, T.: Metallkleben. Theorie und Praxis der Anwendung von Metallklebstoffen bei klarer Abgrenzung der Einsatzgebiete. Vogel-Verlag, Würzburg 1970.

Avtorjev naslov:

dipl. ing. Julij Bertoncelj
Fakulteta za strojništvo
Univerze v Ljubljani