

MEHANIZMI STVARANJA LIJEPLJENOG SPOJA

Bujanić B.¹, Magdalenić Bujanić J.²
¹Šestan-Busch d.o.o., Prelog, Hrvatska
²Eko Međimurje, Čakovec, Hrvatska

Sažetak: Lijepljenje je suvremena metoda spajanja dijelova koja ima značajne prednosti u usporedbi s mehaničkim metodama spajanja dijelova. U lijepljenim spojevima opterećenja se prenose cijelom površinom spoja, što osigurava veću otpornost na savijanje i vibracije nego pri mehaničkim spojevima.

U radu su prikazane teorijske osnove djelovanja kohezijskih i adhezijskih sila pri stvaranju lijepljenog spoja. U eksperimentalnom dijelu rada ispitan je utjecaj parametara lijepljenja na prekidnu silu lijepljenog spoja.

Ključne riječi: lijepljenje, adhezija, kohezija, prekidna sila

Abstract: Adhesive bonding is a modern method for joining parts, which gives significant advantages in comparison with mechanical methods of bonding. With adhesive bonding, joints load is carried over the entire surface of a joint and is providing better resistance to flexural stress and vibrations.

In the paper, theoretical basics of cohesion and adhesion forces performance during the generation of adhesive bonding joint is shown. In the experimental part of the paper, the influence of processing parameters of adhesion bonding procedure to the breaking force was investigated.

Key words: adhesive bonding, adhesion, cohesion, breaking force

1. UVOD

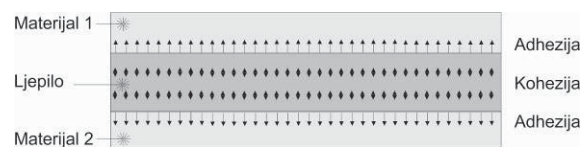
Povećanjem kompliciranosti proizvoda javlja se potreba za ekonomski prihvatljivim i jednostavnim načinima spajanja dijelova od različitih materijala i različitih geometrijskih karakteristika. Spajanje se može ostvariti na više načina, pa se spojevi mogu podijeliti u dvije grupe: rastavljive - omogućuju rastavljanje i ponovno sastavljanje spojenih dijelova bez njihovog razaranja; nerastavljive - nakon prvotnog spajanja više se ne mogu rastaviti bez razaranja dijelova koji su spojeni [1].

Postoje mnoge definicije lijepljenja, ali najprihvatljivija je definicija prema DIN-u 16 920 . Ona ljepilo definira kao nemetal koji različite dijelove može povezati površinskim prijanjanjem (adhezija) i unutrašnjom čvrstoćom (kohezija). Pritom se bitno ne mijenja struktura spojenih dijelova. Prema tome, ljepila su tvari

koje na temelju kemijskog sastava i fizikalnog stanja u trenutku nanošenja na površine omogućuju njihovo spajanje [2,3].

2. OSNOVNI PROCESI OSTVARIVANJA SPOJA PRI LIJEPLJENJU

Osnovni procesi ostvarivanja spoja pri lijepljenju zasnivaju se na međusobnim kemijskim i fizikalnim djelovanjima između molekula ljepila i molekula na površini za lijepljenje. Za stvaranje prijanjajućih sila važno je djelovanje adhezije, a pritom se stvaranjem energijski povoljnih uvjeta povezivanja u sloju ljepila mora postići što veća kohezijska čvrstoća (slika 1.). Da bi se stvorile potrebne prijanjajuće sile, površinu za lijepljenje treba unaprijed dobro pripremiti, a za stvaranje kohezijskih sila odgovoran je proces polireakcije i/ili umreživanja i/ili hlađenja ljepila [4,5].



Slika 1. Prikaz djelovanja sila u lijepljenom spoju [5]

Adhezija je stanje u kojem se dvije raznovrsne površine iz različitih materijala zajedno drže međusobnim djelovanjem privlačnih sila zbog interakcije molekula, atoma ili iona. Kohezija ili unutarnja čvrstoća je djelovanje između dviju površina istovrsnih materijala, tj. privlačnih sila istovrsnih atoma ili molekula. Kohezijska čvrstoća ovisi o materijalu i temperaturi. Najveću kohezijsku čvrstoću imaju metali, a najmanju tekućine i plinovi. Molekularna masa polimera je važan čimbenik koji određuje kohezijsku čvrstoću ljepila. Potrebno je dvostruko djelovanje optimalne adhezije i kohezije da bi se povezale sile i da bi se postigla optimalna čvrstoća lijepljenog spoja. Kada se već u pripremi materijala za lijepljenje postignu optimalne adhezijske sile, tada je kohezijska čvrstoća lijepljenog spoja odlučujući kriterij za njegovu čvrstoću [5].

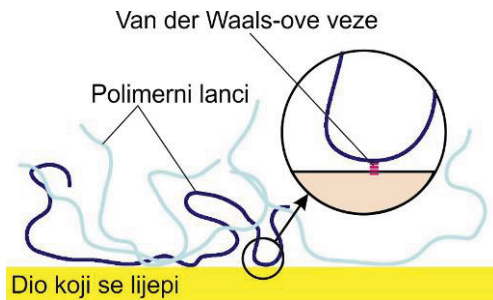
2.1. Principi adhezije

Mehanizmi adhezije intenzivno se istražuju posljednjih nekoliko godina. Postavljene su mnoge teorije kojima su

se pokušali objasniti principi adhezije. Međutim, ni jedna od njih potpuno ne objašnjava adheziju. Može se zaključiti da je prijanjanje ljepljiva na površinu dijela koji se lijepi rezultat mehaničkih, fizikalnih i kemijskih sila koje se preklapaju i utječu jedna na drugu.

2.1.1. ADSORPCIJA [6-12]

Adsorpcija je najvažniji mehanizam za postizanje adhezije. Najučestalije površinske sile koje se javljaju pri adsorpciji su *Van der Waalsove sile* (slika 2.). Uvjet dobre adsorpcije je dobro močenje površine.

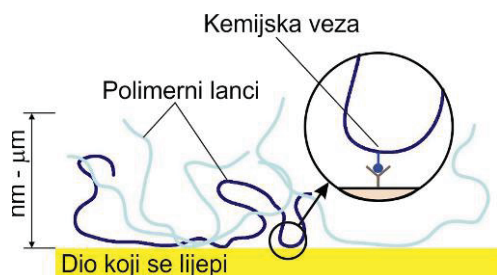


Slika 2. Van der Waalsove veze [6-12]

Prvi uvjet za dobro lijepljeni spoj je močenje koje treba promatrati kao ostvarenje kontakata dodirnih površina dijelova koji se spajaju i ljepljiva, a njegova uspješnost je omjer ostvarenog broja dodira među molekulama tih površina i ljepljiva prema maksimalno mogućem broju. Zbog nepristupačnosti mjerenja tih brojeva, ta se uspješnost ocjenjuje na temelju kuta močenja.

2.1.2. KEMIJSKO POVEZIVANJE [6-12]

Kemijsko povezivanje ljepljiva i površine dijelova objašnjava se stvaranjem primarnih kemijskih veza duž površine dodira (slika 3.). Kemijske veze doprinose adheziji. Npr., primarne kemijske veze posjeduju energiju veze iznosa 60-1100 kJ/mol, za razliku od sekundarnih veza koje posjeduju znatno manju energiju veze (0,08-5 kJ/mol).

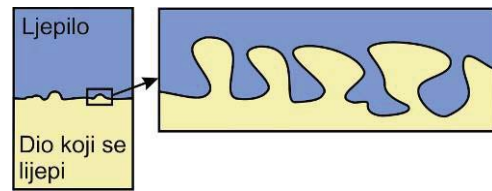


Slika 3. Kemijsko povezivanje [6-12]

2.1.3. MEHANIČKO SIDRENJE [6-12]

Ulaskom ljepljiva u pore, udubine i u ostale nepravilnosti površine ostvaruje se mehaničko povezivanje ljepljiva i površine tijela mehaničkim sidrenjem (slika 4.). Da bi došlo do mehaničkog sidrenja, moraju biti zadovoljena dva uvjeta:

- ljepljivo mora dobro močiti površinu dijela
- ljepljivo mora biti dovoljno niske viskoznosti da može lagano popuniti šupljine i iz njih istisnuti zrak



Slika 4. Mehaničko sidrenje [6-12]

Mehaničkim sidrenjem može se objasniti povezivanje gume i tekstilne ili papirnate podloge (postupak prevlačenja). Uz sve prednosti mehaničkog povezivanja, ono ne objašnjava način povezivanja glatke površine i ljepljiva koje je također moguće i što je potvrđeno i u praksi.

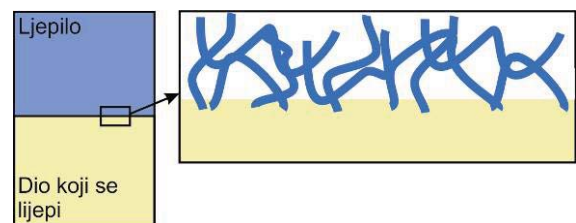
2.1.4. DIFUZIJA [6-12]

Ostvarenje veze difuzijom molekula polimera u površinu dijelova koji se zaljepljuju prikazano je na slici 5. Difuzija molekula zahtijeva gibanje polimernih lanaca ljepljiva i mora biti osigurana kompatibilnost ljepljiva i materijala dijela koji se lijepi.

Činitelji koji utječu na proces difuzije:

- vrijeme dodira
- temperatura
- molekularna masa polimera (ljepljiva)
- stanje polimera (ljepljiva)

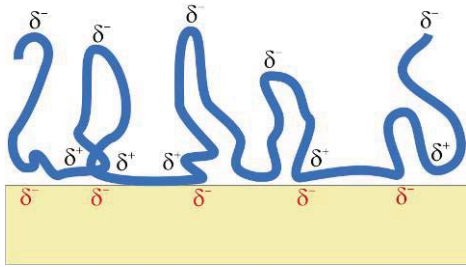
Treba napomenuti da ostvarivanje veze difuzijom nije moguće u slučajevima kada ne postoji kompatibilnost ljepljiva i materijala dijela koji se lijepi (polimer) ili kada je gibanje molekularnih lanaca ograničeno ili onemogućeno (npr. gusto umrežena struktura).



Slika 5. Difuzija [6-12]

2.1.5. ELEKTROSTATIČKO POVEZIVANJE [6-12]

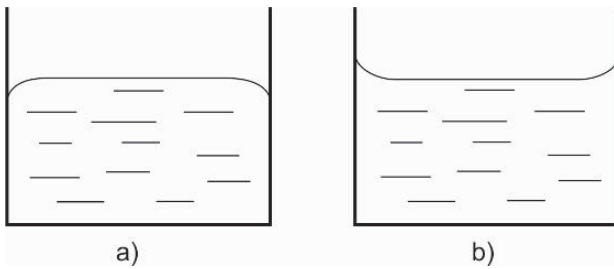
Zbog razlike u elektronegativnosti (slika 6.) između ljepljiva i materijala dijela koji se lijepi dolazi do stvaranja elektrostatičkih sila koje svojim djelovanjem doprinose čvrstoći lijepljenog spoja. Npr., pri spoju organskog polimera i metala dolazi do prijenosa elektrona iz metala u polimer i do stvaranja tzv. duplog električnog sloja – electrical double layer.



Slika 6. Elektrostatičko povezivanje [6-12]

2.2. Principi kohezije [13]

Molekule u kapljevinaama osjećaju jake međumolekularne sile, a ako međumolekularne sile djeluju između istovrsnih molekula one se zovu kohezijske sile. Tako npr. kohezijske sile drže kap vode na okupu. Na slici 2.7. prikazano je djelovanje kohezijskih i adhezijskih sila. Slika 7.a) prikazuje slučaj kada su kohezijske sile jače od adhezijskih i tada se kapljevina spušta niz stijenke posude. Slika 7.b) prikazuje slučaj kada su adhezijske sile između kapljevine i stijenke posude jače od kohezijskih sila i tada se kapljevina penje uz stijenku posude.



Slika 7. Odnos kohezijskih i adhezijskih sila između: a) žive i staklene stijenke posude; b) vode iz staklene stijenke posude [13]

2. EKSPERIMENTALNO

2.1. Opis problema

Prekidna sila lijepljenog spoja ovisi o brojnim činiteljima. To su svojstva ljepila (kohezijska i adhezijska čvrstoća), svojstva materijala koji se lijepi (slobodna površinska energija, površinska hrapavost, čistoća površina, mehanička svojstva), postupak i tijek lijepljenja (pritisak, temperatura, vrijeme, vlaga itd.), oblikovanje lijepljenog spoja (debljina sloja ljepila, debljina podloge, vrste i dimenzije spoja) i uvjeti opterećenja (vrsta opterećenja-statičko ili dinamičko-način, vrijeme, temperatura opterećenja itd.).

U istraživačkom dijelu rada provedeno je sljedeće:

1. ispitivanje ovisnosti prekidne sile o duljini preklopa lijepljenog spoja (jednostruki lijepljeni preklopni spoj)
2. ispitivanje ovisnosti prekidne sile jednostrukog lijepljenog preklopnog spoja o kombinaciji utjecaja duljine preklopa, pritiska i vremena djelovanja pritiska

2.2. Metodologija

Za izradu ispitaka upotrijebljene su aluminijske trake debljine 1,4 mm, vrsta aluminija Al 99,5. Iz traka su izrezane pločice a·b=25·100 mm. Pločice su međusobno zalijepljene dvokomponentnim epoksidnim ljepilom oznake DP 410 proizvođača 3M, Scotch-Weld.

Tijek pripreme i lijepljenje ispitaka:

- rezanje ispitaka iz traka
- izravnavanje ispitaka u preši
- skidanje srhova
- strojno brušenje ispitaka
- odmašćivanje površina odmašćivačem Loctite 7061
- ručno brušenje površina
- odmašćivanje površina odmašćivačem Loctite 7061
- nanošenje ljepila
- spajanje dijelova

Lijepljenje je provedeno pri sljedećim uvjetima:

- temperatura prostorije: 22 °C
- relativna vlažnost zraka: 42 %

Mjerenje prekidne sile lijepljenih spojeva provedeno je u laboratoriju za nemetale Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Uvjeti mjerenja bili su sljedeći:

- temperatura prostorije: 20 °C,
- relativna vlažnost zraka: 51 %
- brzina ispitivanja: 3 mm min⁻¹

3. REZULTATI I RASPRAVA

3.1. Mjerenje prekidne sile – pokus 1.

U prvom pokusu ispitivana je ovisnost prekidne sile o duljini preklopa lijepljenog spoja. Mjerenje je provedeno na jednostrukom preklopnom lijepljenom spoju. Dobiveni rezultati prikazani su u tabeli 1. Podaci su analizirani u programskom paketu *Statistica 6.0*. U tabeli 2. prikazani su rezultati analize, dok slika 8. prikazuje ovisnost prekidne sile o duljini preklopa. Vidimo da vrijednost prekidne sile raste s povećanjem duljine preklopa, što je i očekivani rezultat.

Tabela 1. Rezultati mjerenja – pokus 1.

| Duljina preklopa (mm) | Oznaka ispitnog tijela | Prekidna sila (N) | Smična čvrstoća ljepila (N/mm ²) |
|-----------------------|------------------------|-------------------|--|
| 16 | pp1-16 | 1880 | 4,7 |
| 20 | pp1-20 | 2360 | 4,72 |
| 25 | pp1-25 | 2650 | 4,24 |
| 30 | pp1-30 | 2760 | 3,68 |
| 35 | pp1-35 | 2800 | 3,2 |
| 40 | pp1-40 | 3360 | 3,36 |
| 45 | pp1-45 | 3520 | 3,12 |
| 50 | pp1-50 | 3660 | 2,928 |
| 55 | pp1-55 | 3820 | 2,778 |
| 60 | pp1-60 | 4100 | 2,733 |

pritisak 2 kg, vrijeme djelovanja pritiska 30 min

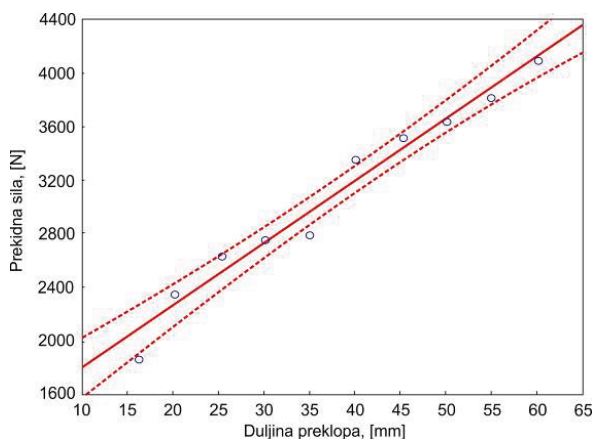
Tabela 2. Rezultati statističke analize – pokus 1.

| Statistička veličina | Vrijednost |
|----------------------------|------------|
| Broj analiziranih podataka | 10 |
| Zbroj podataka | 30910 |
| Minimalna vrijednost | 1880 |
| Maksimalna vrijednost | 4100 |
| Aritmetička sredina | 3091 |
| Geometrijska sredina | 3012,724 |
| Medijan | 3080 |
| Varijanca | 5021403,3 |
| Standardna devijacija | 708,62 |
| Standardna greška | 224,09 |

Brojka standardne devijacije (708,62) govori o velikom prosječnom odstupanju vrijednosti numeričke varijable (prekidne sile) od njene aritmetičke sredine. Da bi točnije odredili mjeru disperzije podataka izračunavamo koeficijent varijacije:

$$V = (\sigma / x) 100 = 22,93 \% \quad (1)$$

gdje su: V – koeficijent varijacije, σ – standardna devijacija, x – aritmetička sredina.



Slika 8. Ovisnost prekidne sile o duljini preklopa (regresijski pravac)

Regresijskom analizom dobivenih podataka o prekidnoj sili može se zaključiti da je smjer povezanosti duljine preklopa i prekidne sile pozitivan, oblik njihove povezanosti je linearan i jačina povezanosti je čvrsta korelacija. Regresijska jednadžba (jed. 3.2) ovisnosti prekidne sile o duljini preklopa može se napisati u obliku:

$$F = 46,578 l + 1339,6 \quad (2)$$

Koeficijent korelacije ili koeficijent koji pokazuje postoji li i u kolikoj mjeri povezanost između podataka iznosi $r = 0,98436$. Koeficijent determinacije $r^2 = 0,96896$ pokazuje da je 96,8 % dobivenih podataka objašnjeno ovim modelom, dok se za preostalih 3,2% podataka ne može utvrditi uzrok njihovog nastanka.

3.2. Mjerenje prekidne sile – pokus 2.

U drugom pokusu ispitivana je ovisnost prekidne sile jednostrukog lijepljenog preklopnog spoja o kombinaciji utjecaja duljine preklopa, pritiska i vremena djelovanja pritiska na lijepljeni spoj za vrijeme očvršćivanja ljepila. Mjerilo se na jednostrukom preklopnom lijepljenom spoju, a rezultati su prikazani u tabeli 3.

Tabela 3. Rezultati mjerenja – pokus 2.

| | Vrijeme djelovanja pritiska (h) | Duljina preklopa (mm) | Pritisak (kg) | Oznaka ispitnog tijela | Prekidna sila (N) | Smična čvrstoća ljepila (N/mm^2) |
|-----|---------------------------------|-----------------------|---------------|------------------------|-------------------|--------------------------------------|
| 1. | 1 | 16 | 0,5 | p1-1 | 2040 | 5,1 |
| 2. | 1 | 16 | 5,0 | p1-2 | 3100 | 7,75 |
| 3. | 1 | 60 | 0,5 | p1-3 | 4480 | 2,986 |
| 4. | 1 | 60 | 5,0 | p1-4 | 4500 | 3 |
| 5. | 2 | 16 | 0,5 | p1-5 | 1340 | 3,35 |
| 6. | 2 | 16 | 5,0 | p1-6 | 1840 | 4,6 |
| 7. | 2 | 60 | 0,5 | p1-7 | 4100 | 2,73 |
| 8. | 2 | 60 | 5,0 | p1-8 | 4180 | 2,786 |
| 9. | 1 | 38 | 2,75 | p1-9 | 4160 | 4,379 |
| 10. | 2 | 38 | 2,75 | p1-10 | 3740 | 3,937 |
| 11. | 1,5 | 16 | 2,75 | p1-11 | 3580 | 8,95 |
| 12. | 1,5 | 60 | 2,75 | p1-12 | 4200 | 2,8 |
| 13. | 1,5 | 38 | 0,5 | p1-13 | 3400 | 3,578 |
| 14. | 1,5 | 38 | 5,0 | p1-14 | 4040 | 4,25 |
| 15. | 1,5 | 38 | 2,75 | p1-15 | 3360 | 3,536 |
| 16. | 1,5 | 38 | 2,75 | p1-16 | 4180 | 4,4 |
| 17. | 1,5 | 38 | 2,75 | p1-17 | 3980 | 4,189 |
| 18. | 1,5 | 38 | 2,75 | p1-18 | 4180 | 4,4 |
| 19. | 1,5 | 38 | 2,75 | p1-19 | 3400 | 3,578 |

Analiza varijance za podatke prekidne sile drugog pokusa pokazala je da je važna varijabla pokusa samo duljina preklopa, dok vrijeme djelovanja pritiska na jednostruki preklopni lijepljeni spoj i iznos pritiska na spoj nisu značajne varijable. Analiza također pokazuje da je model vrijedan, dok greška modela to nije. Koeficijent determinacije $r^2 = 0,7134$ pokazuje da je ovim modelom objašnjeno 71,34 % dobivenih podataka o prekidnoj sili i njenoj ovisnosti o vremenu djelovanja pritiska, o duljini preklopa i pritisku na lijepljeni spoj.

Odzivna funkcija procesa može se napisati u obliku:

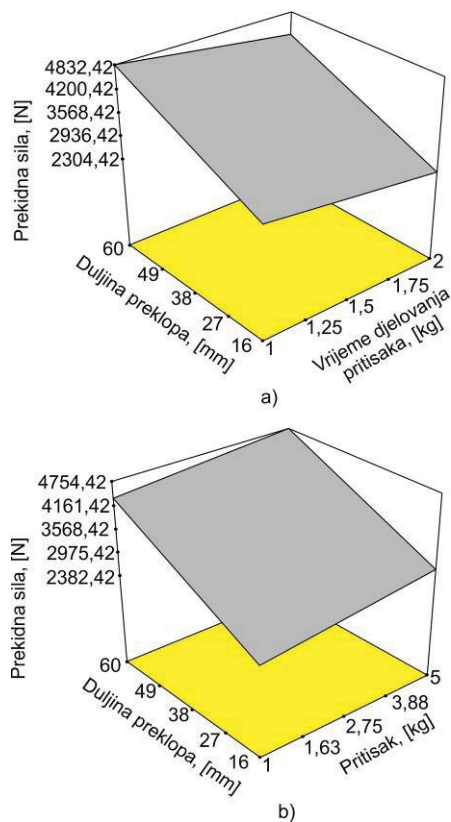
$$F = 2560,03721 - 616 A + 43,45455 B + 102,2222 C \quad (3)$$

gdje su: F – prekidna sila (N), A – vrijeme djelovanja pritiska (h), B – duljina preklopa (mm), C – pritisak (kg).

Ovisnost prekidne sile o duljini preklopa i vremenu djelovanja pritiska prikazana je na slici 9.a), dok slika 9. b) prikazuje ovisnost prekidne sile o duljini preklopa i pritisku na površinu. Sa slike se vidi da prekidna sila raste s porastom duljine preklopa i s povećanjem pritiska na preklopni spoj, dok ona opada s vremenom djelovanja pritiska.

Dobiveni rezultati:

- vrijeme djelovanja pritiska = 1 h
- duljina preklopa = 22,5 mm
- pritisak = 0,5 kg
- prekidna sila = 2972,92 N



Slika 9. Ovisnost: a) prekidne sile o duljini preklopa i vremenu djelovanja pritiska; b) ovisnost prekidne sile o duljini preklopa i pritisku

4. ZAKLJUČAK

Kohezijske i adhezijske sile zaslužne su za čvrstoću lijepljenog spoja. Iako su poznati mnogi mehanizmi koji djeluju u materijalu ljepila i između ljepila i površine dijelova koje se lijepe, još do danas se ne može točno utvrditi koji je mehanizam najzaslužniji za stvaranje lijepljenog spoja, odnosno kojim mehanizmom se postiže najveća čvrstoća spoja.

U eksperimentalnom dijelu rada razmatrana su tri činitelja: vrijeme djelovanja pritiska na lijepljeni spoj za vrijeme očvršćivanja ljepila, duljina preklopa i pritisak na lijepljeni spoj za vrijeme očvršćivanja ljepila. Mjerena je prekidna sila jednostrukog preklopnog lijepljenog spoja. U radu su za utvrđivanje veze između prekidne sile i vremena djelovanja pritiska, duljine preklopa i pritiska korišteni modeli u kojima pojedine točke pokusa nisu ponavljane niti su ispitna tijela bila izrađena prema standardu. Zato se dobiveni rezultati mogu uzeti samo kao dobri pokazatelj ovisnosti prekidne sile o trima činiteljima.

Analiza dobivenih podataka o prekidnoj sili pokazala je da duljina preklopa ima najveći utjecaj na rezultate

prekidne sile: povećanjem duljine preklopa lijepljenog spoja povećava se i veličina prekidne sile. Vrijeme djelovanja pritiska nema važan utjecaj na rezultat prekidne sile, mada je moguće primijetiti lagani pad prekidne sile s povećanjem vremena djelovanja pritiska na lijepljeni spoj za vrijeme očvršćivanja ljepila. Pritisak na lijepljeni spoj za vrijeme očvršćivanja ljepila također nema značajniji utjecaj na rezultat prekidne sile. Međutim, treba napomenuti da je u drugom pokusu zamijećen rast prekidne sile s povećanjem pritiska na lijepljeni spoj.

5. LITERATURA

- [1]. Mazumdar, S.K.; Mallick, P.K. Strength Properties of Adhesive Joints in SMC-SMC and SRIM-SRIM Composites. 9th Annual ACCE conference. Detroit, MI, April 7-10, 1997.
- [2]. Kralj, S.; Andrić, Š. Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka. Zagreb : Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb ; Sveučilište u Zagrebu, 1992.
- [3]. Anzulović, B. Zavarivanje i srodni postupci. Split : Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje ; Sveučilište u Splitu, 1990.
- [4]. Kožuh, Z.; Kralj, S.; Cvirn, Ž. Tehnologija lijepljenja : dio I. : zavarivanje 40. (1997) 3, 85-94.
- [5]. Gojić, M. Tehnike spajanja i razdvajanja materijala. Sisak : Metalurški fakultet ; Sveučilište u Zagrebu, 2002.
- [6]. Stoić, M. Doprinos istraživanju mehaničkih karakteristika nosivosti jednostrukih preklopnih lijepljenih spojeva : magistarski rad. Slavonski Brod, 2003.
- [7]. VTT, Joining Techniques. Finland, travanj 2001. www.vtt.fi/manu/val3/projects/dogma/joining/joiningtechniques.htm
- [8]. N. N., Loctite Corp., Preporuke za izbor ljepila. rujanj 2002. www.loctite.com/pdf/bondingguide.pdf
- [9]. Pocius, A.V. Adhesion and Adhesive Technology, Carl Hanser Verlag. Munich ; Vienna ; New York, 1997.
- [10]. Pašić, O; Bašić, LJ.; Đakić, J. Lijepljenje u industrijskoj strojogradnji : zavarivanje 34, 5/6. 1991. Str. 165-170.
- [11]. N. N., Bonding Solutions for Automotive Interiors. studeni 2002. www.3m.com/US/mfg_industrial/converter/product_doc/auto_bond.pdf
- [12]. www.specialchem4adhesives.com, 12.10.2004.
- [13]. http://physics.mef.hr/Predavanja/stom_pov_tek/main8.html, 19.08.2011.