

Pero RAOS, Franjo MATEJIČEK, Mirjana LUCIĆ
Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu
Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

Eksperimentalna i numerička analiza jednostrukih preklopnih lijepljenih spojeva

ISSN 0351-1871

UDK 621.792:519.6

Prethodno priopćenje / Preliminary communication

Primljeno / Received: 24. 9. 2003.

Prihvaćeno / Accepted: 15. 12. 2003.

Sažetak

Veći broj faktora utječe na mehaničke karakteristike nosivosti lijepljenoga spoja. Čimbenici oblika i dimenzija spoja s najvećim utjecajem jesu ostvarena duljina preklopa i debljina sloja ljepila. U eksperimentalnom su dijelu rada analizirani ti faktori te definirane njihove optimalne vrijednosti pri kojima se uz najmanji utrošak materijala podloge i ljepila postiže najveća nosivost lijepljenoga spoja. U numeričkom dijelu rada provedene su simulacije opterećivanja spojeva metodom konačnih elemenata (FEM). Simulacije su provedene uporabom komercijalnoga programskog paketa ANSYS.

KLJUČNE RIJEČI

jednostruki preklopnii spoj
lijepljenje
metoda konačnih elemenata (MKE)

KEYWORDS

single-lap joint
adhesive bonding
finite-elements method (FEM)

Experimental and numerical analysis of single lap adhesively bonded joints

Summary

The load bearing capacity of adhesively bonded joints depends on many factors. The most decisive designing factors are lap length and thickness of the adhesive layer. In the experimental part of the present research these factors were analysed and their optimal values were defined. At these optimum values it is possible to reach the maximum load bearing capacity by using a minimum quantity of applied adhesive. In the numerical part of the paper, loading simulations based on the finite-elements method were carried out. The simulations were performed by using the commercial FEA code ANSYS.

Uvod / Introduction

Lijepljenje se u novije vrijeme sve češće upotrebljava za spajanje raznih elemenata konstrukcija. Stalan razvoj novih vrsta ljepila omogućuje njihovu primjenu kod spajanja različitih materijala (npr. metal/keramika, metal/guma, metal/plastika itd.) i u slučajevima kada

klasične tehnike nepovoljno utječu na mehaničko-tehnološke karakteristike spojeva.

Nosivost lijepljenih spojeva ovisi o brojnim čimbenicima. To su svojstva ljepila (adhezijska i kohezijska čvrstoća), svojstva materijala koji se lijepe (slobodna površinska energija, površinska hrapavost, čistoća površina, mehanička svojstva), postupak i tijek lijepljenja (tlak, temperatura, vrijeme, vlaga itd.), oblikovanje lijepljenoga spoja (debljina sloja ljepila, debljina podloge, vrsta i dimenzije spoja) i uvjeti opterećenja (vrsta opterećenja – statičko, dinamičko, način opterećivanja, vrijeme opterećivanja, temperatura itd.).¹

U radu se razmatraju jednostruki preklopnii spojevi kao jedna od najčešćih konstrukcijskih izvedbi lijepljenih spojeva. U eksperimentalnom dijelu posebice se analizira utjecaj duljine preklopa i debljine sloja ljepila na ostvarenu nosivost i čvrstoću spoja. Ispitane su podloge izrađene od dvije vrste materijala: aluminijska i austenitnoga nehrđajućeg čelika, zalijepljene konstrukcijskim dvokomponentnim epoksidnim ljepilom.

S obzirom da simulacija samo jedne vrste ispitivanja zahtijeva kompleksno pretprocesiranje, u radu su prikazane simulacije opterećivanja spojeva s podlogama od austenitnoga nehrđajućeg čelika i aluminijska pri jednoj duljini preklopa.

Analiza naprezanja u jednostrukom preklopnom spoju / Stress analysis in a single-lap joint

Jednostruki lijepljeni spojevi najčešća su izvedba lijepljenih spojeva u praksi. Pri njihovom rasteznom opterećivanju (usporedno s podlogom) u sloju ljepila nastaje stanje naprezanja koje je kombinacija smičnih naprezanja paralelnih s površinom lijepljenja i rasteznih (normalnih) okomitih na tu površinu (slika 1). Takva koncentracija naprezanja u jednostrukim preklopnim spojevima nastaje zbog ekscentrično djelujućih sila. Pri kontinuiranom povećanju rastezne sile F sva se naprezanja superponiraju u rubnom području preklapanja do dosizanja kritičnoga naprezanja pri kojemu popušta sloj ljepila.¹

U sloju ljepila jednostrukoga preklopnog spoja nastaju (slika 1):

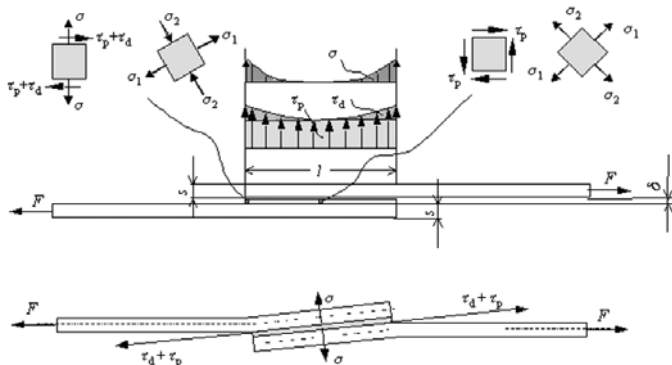
τ_p - smična naprezanja paralelna s lijepljenom površinom uvjetovana pomicanjem dijelova za lijepljenje

τ_d - smična naprezanja paralelna s lijepljenom površinom uvjetovana naprezanjem (deformacijom) dijelova za lijepljenje

σ - normalna naprezanja okomita na lijepljenu površinu uvjetovana momentom savijanja.

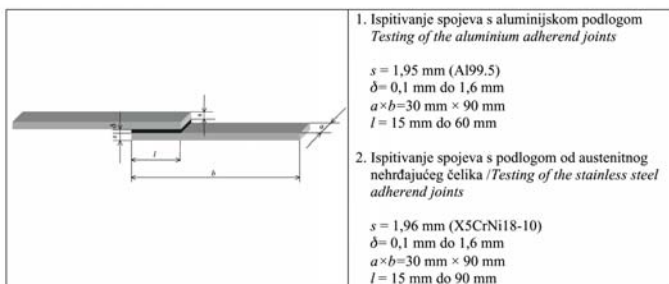
Priprema ispitnih tijela / Preparation of specimens

Površina materijala podloge pripremljena je u skladu s uputama proizvođača ljepila.² Potom su za provedbu pokusa jednoosnoga



SLIKA 1. Naprezanja u jednostrukom preklopnom spoju¹
 FIGURE 1. Stresses in a single-lap joint¹

rastezanja izrađena ispitna tijela oblika i dimenzija prema slici 2. Za izradu podloga upotrijebljene su dvije vrste materijala – aluminij i austenitni nehrđajući čelik. Pločice su međusobno zalijepljene dvokomponentnim epoksidnim ljepilom *Loctite 3421*.²



SLIKA 2. Oblik i dimenzije ispitnih tijela
 FIGURE 2. Geometry and dimensions of specimens

Temeljna mehanička svojstva oba materijala podloge utvrđena su jednoosnim rastezanjem odgovarajućih epruveta prema normi DIN 50114. Ispitni su podaci najvažnijih svojstava dani u tablici 1.

TABLICA 1. Svojstva materijala podloge
 TABLE 1. Properties of adherend materials

Materijal Material	Rastezna čvrstoća Tensile Strength R_m , N/mm ²	Granica razvlačenja Yield Stress $R_{p0,2}$, N/mm ²
Al99.5	114,12	100 ³
X5CrNi18-10	653,09	190 ⁴

Sve površine predviđene za lijepljenje očišćene su acetonskim odmaščivačem *Loctite 7061*. Nakon laganoga brušenja površina s pomoću brusnih krpica uslijedilo je završno odmaščivanje istim sredstvom. Na tako pripremljene površine nanošen je sloj dobro izmiješanoga dvokomponentnoga epoksidnog ljepila *Loctite 3421*. Potom je provedeno spajanje pločica uz ostvarivanje određene debljine sloja ljepila i osiguranje od pomicanja. Kontrolirana debljina sloja ljepila ostvarena je umetanjem žice odgovarajućega promjera u sloj ljepila. Svi spojevi ostavljeni su učvršćeni u priručnim napravama 24 sata, tj. do postizanja manipulativne čvrstoće. Radi postizanja maksimalne, od proizvođača iskazane čvrstoće ljepila, tako pripremljena ispitna tijela ostavljena su najmanje 36 sati prije opte-

rećivanja. Ukupno su načinjena po tri ispitna tijela za svako stanje pokusa.

Izvođenje pokusa / Experimental research

Tijekom provedbe ispitivanja upotrijebljena je sljedeća oprema:
 – kidalica: *Carl Schenk AG 1000 kN*,
 – registracija snimljenih krivulja: X-Y pislač,
 – prijenos i obrada signala iz kidalice na računalo: *Intelligent Instrumentation PCI-20428W* (frekvencija uzorkovanja 8 s⁻¹) s pratećom programskom podrškom,
 – računalo: PC na bazi P II procesora.

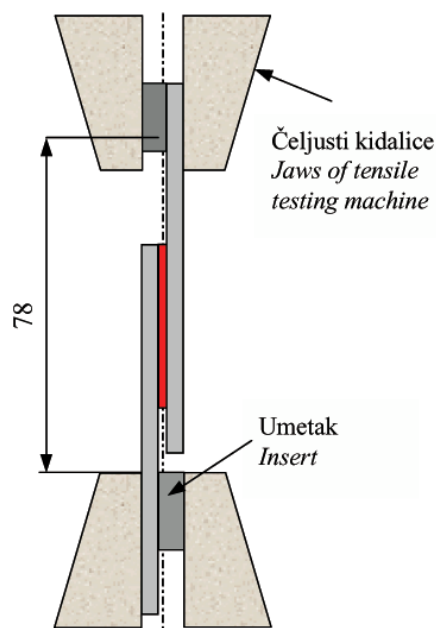
Svi priređeni spojevi ispitivani su pri uvjetima monotono rastućega jednoosnog rastezanja u kidalici pri prosječnoj brzini pomaka čeljusti oko 0,2 mm/min. Zbog izbjegavanja naglih pomaka i trzanja čeljusti te osiguravanja dovoljno pouzdanih uvjeta kvazistatičkoga opterećivanja, početna brzina čeljusti podešena je na znatno manje vrijednosti. Brzina čeljusti se nakon toga kratkotrajnog trzaja radi pritezanja čeljusti kontinuirano povećavala do dosizanja navedenih vrijednosti. Ovaj je trzaj neznatan i iznosi svega nekoliko stotinki milimetra u smjeru opterećenja. Ovo je posljedica regulacije PID pod kontrolom pomaka.

U svrhu simetričnoga opterećivanja u čeljust se umetala pločica debljine jednake zbroju debljine sloja ljepila i debljine pločice (slika 3).

Numerička analiza / Numerical analysis

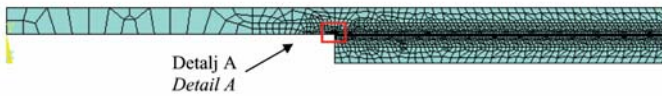
S obzirom da simuliranje samo jednoga tipa pokusa (jedna duljina preklopa, jedna vrsta materijala podloge i ljepila) zahtijeva iscrpno pretprocesiranje, područje ispitivanja svedeno je na jednu duljinu preklopa pri istoj debljini ljepila za oba materijala podloge.

Provedena je simulacija odabrane skupine pokusa i to one iz grupe ispitivanja optimalne duljine preklopa, a za duljinu preklopa je uzeta vrijednost $l = 30$ mm. Debljina sloja ljepila je $d = 0,15$ mm. Ukupna je duljina ispitnoga tijela 78 mm, jer je uzet u obzir samo onaj dio tijela koji nije bio u čeljustima kidalice (slika 3).

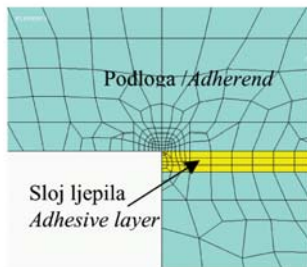


SLIKA 3. Duljina probe uzeta za simulaciju
 FIGURE 3. Specimen length used for simulation

U svim provedenim simulacijama statičkoga opterećivanja ispitnih tijela s pomoću metode konačnih elemenata (MKE) upotrijebljen je komercijalno dostupan softverski paket ANSYS 6.0.⁵ Slika 4 prikazuje mrežu konačnih elemenata raspoređenih u spoju. Slikom 5 prikazan je uvećani dio očekivanoga mjesta koncentracije napreznja.

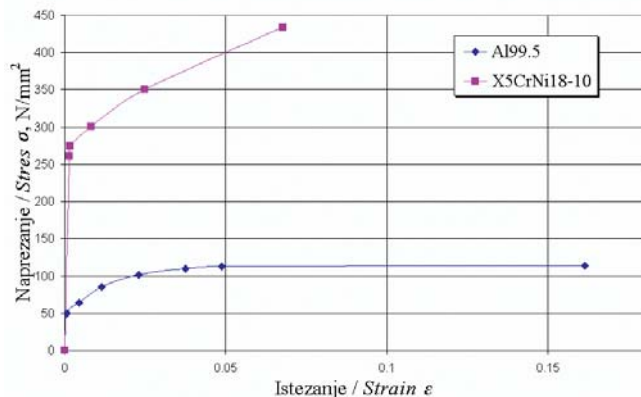


SLIKA 4. Mreža konačnih elemenata u lijevoj strani spoja
FIGURE 4. Finite elements scheduled on the left side of joints



SLIKA 5. Uvećani dio očekivanoga mjesta koncentracije napreznja
FIGURE 5. Enlarged part of expected location of stress concentration

U ulaznoj datoteci uneseni su podaci o osnovnom materijalu (materijalu podloge) i o ljepilu. Pritom su podaci za podlogu ($\sigma - \epsilon$ dijagram) uzeti iz pokusa rastezanja (slika 6 i tablica 2).



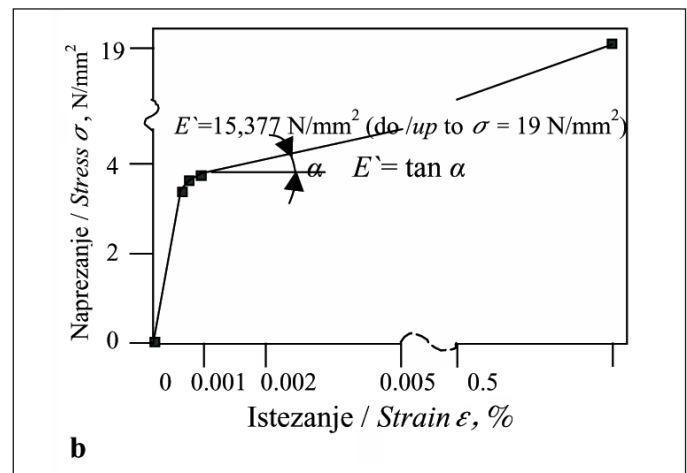
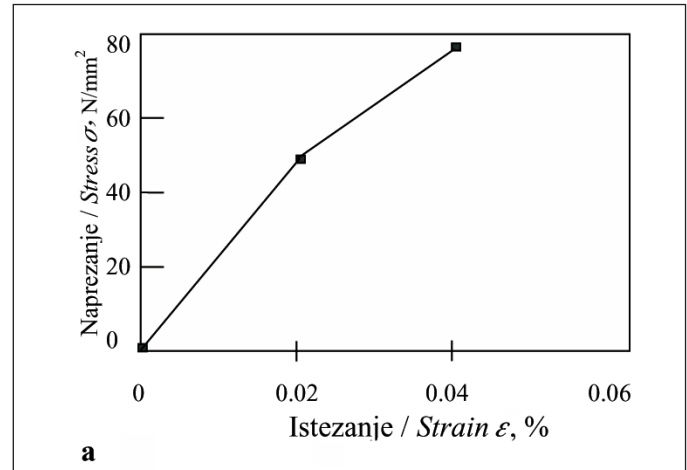
SLIKA 6. Stvarni dijagram napreznja-istezanja za materijale podloge
FIGURE 6. True stress-strain diagram for adherends

TABLICA 2. Mehanička svojstva materijala potrebna za simulaciju
TABLE 2. Mechanical properties of the materials used for simulation

Ulazni podatci / Input data		
Ljepilo / Adhesive	Materijal podloge / Adherend material	
	Al99.5	X5CrNi18-10
$E = 4\,000\text{ N/mm}^2$ $\nu = 0,35$ $\sigma_m \cong 17\text{ N/mm}^2$	$E = 70\,000\text{ N/mm}^2$ $\nu = 0,3$ $\sigma_m \cong 120\text{ N/mm}^2$	$E = 200\,000\text{ N/mm}^2$ $\nu = 0,3$ $\sigma_m \cong 430\text{ N/mm}^2$

Model se sastoji od 8964 čvora i 2907 elemenata. U svrhu dobivanja što više podataka o izmjerenoj sili, u pretprocesirajućoj je fazi zadano 9 koraka gdje je zadani početni pomak od 0,005 mm, a svakim sljedećim korakom povećavan je do ukupno 0,055 mm. Ovime se postiže stabilnost proračuna i bolja kontrola podataka.

Otežavajuća je okolnost bila nedostupnost $\sigma - \epsilon$ dijagrama za primijenjeno ljepilo, pa su ovi podaci preuzeti iz literature⁶ (slika 7a). Pri simulaciji se pokazalo da ovaj dijagram ne nalazi primjenu u ovom slučaju, odnosno da ljepilo ni u kom slučaju ne može podnijeti napreznja koja prikazuje ovaj dijagram. Zbog toga se natražnim putem išlo u pronalaženje primjerenih podataka kroz veliki broj simulacija, metodom pokušavanja. Kao rezultat toga rada došlo se do dijagrama koji je prikazan na slici 7 b, koji je dao dobre rezultate za austenitni nehrđajući čelik, a potvrdio je i svoju primjenu u slučaju aluminija kao podloge.



SLIKA 7. Dijagram napreznja-istezanja za ljepilo: a⁶, b- eksperiment
FIGURE 7. Stress-strain diagram for adhesive: a⁶, b- experiment

Olakšavajuća je okolnost bila ta što se najprije analizirao nehrđajući čelik, gdje su snimljeni podaci za vrijeme pokusa zapravo podaci otkazivanja ljepila, jer čelik ima znatno višu rasteznu čvrstoću i znatno viši modul rasteznosti od ljepila. Dakle, ponašanje za vrijeme opterećivanja se u svakom slučaju ne može pripisati čeliku, već sasvim sigurno ljepilu.

Rezultati i rasprava / Results and discussion

Za svako ispitno tijelo izračunato je najveće smično napreznje u sloju ljepila (smična čvrstoća ljepila):

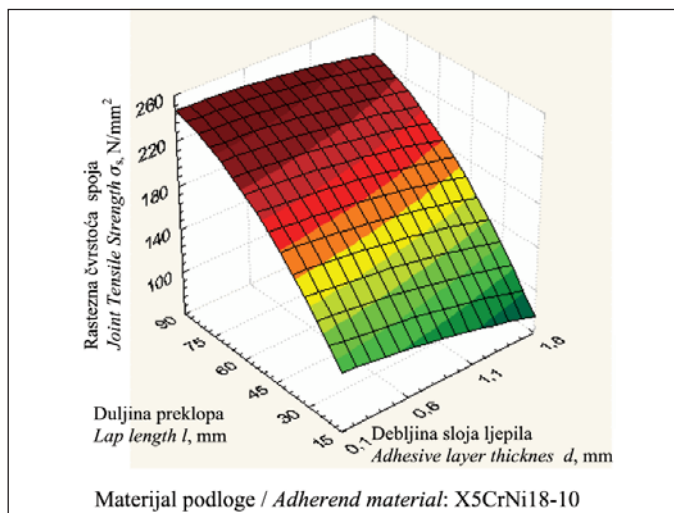
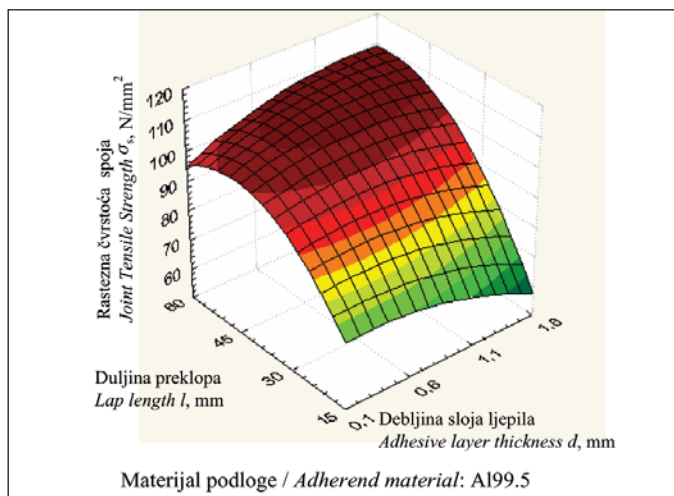
$$\tau_a = \frac{F_{\max}}{l \cdot a} \quad (1)$$

i spojem prenešeno najveće rastezno napreznje (rastezna čvrstoća spoja):

$$\sigma_s = \frac{F_{\max}}{s \cdot a} \quad (2)$$

Vrijednosti rastezних čvrstoća [izračunate na temelju izraza (2)] pokazuju nosivost (maksimalnu opteretivost) lijepljenoga spoja. Pritom se uočava da postignute vrijednosti rastezних čvrstoća spojeva pri odgovarajućim duljinama preklopa bitno ovise o materijalu podloge (slika 8). To upućuje na zaključak da pored adhezijskih svojstava podloge u kombinaciji s ljepljivom, značajan utjecaj na nosivost spoja imaju mehaničke (deformacijske) karakteristike materijala koji se lijepe.

Materijali većeg modula rasteznosti i više granice tečenja postižu veće vrijednosti čvrstoća odnosno veću nosivost lijepljenoga spoja. Stoga je nosivost spojeva od nehrđajućega čelika veća kod onih kod aluminija (slika 8).



SLIKA 8. Eksperimentalni rezultati
FIGURE 8. Experimentally obtained results

Iz slike je 8 nadalje vidljivo da razmatrani čimbenici izravno utječu na čvrstoću lijepljenih spojeva.

Za očekivati je da porastom duljine preklopa, a zbog povećanja ukupne površine lijepljenja, nosivost spoja raste. Međutim, karakteristike ovisnosti nosivosti spoja o duljini preklopa značajno ovise i o materijalu podloge. Kod spojeva s podlogom od aluminija utvrđeno je postojanje optimalne duljine preklopa pri kojoj se postiže najveća nosivost (rastezna čvrstoća) spoja. Vrijednost optimalne duljine u slučaju aluminijske podloge jest oko 40 mm (za debljinu sloja ljepljiva $\delta = 0,1$ mm), (slika 8). Povećanje duljine preklopa iznad

tih vrijednosti ne samo što ne povećava nosivost spoja, već se ona i smanjuje. Objašnjenje za takvo ponašanje moguće je dati na temelju teorijskih razmatranja iz^{1,7,8}.

Na temelju prethodnih razmatranja nameće se za oblikovanje jednostrukih lijepljenih spojeva važan zaključak. Povećavanje površine lijepljenja (duljine preklopa) iznad vrijednosti pri kojima se postiže čvrstoća sloja ljepljiva iznad granice razvlačenja podloge nema smisla, jer ionako nije moguće iskoristiti tako postignutu čvrstoću sloja ljepljiva. Stoga je uvijek potrebno eksperimentalno ili približno teorijski utvrditi optimalnu duljinu preklopa pri kojoj je iskoristivost mehaničkih svojstava čvrstoće podloge maksimalna.

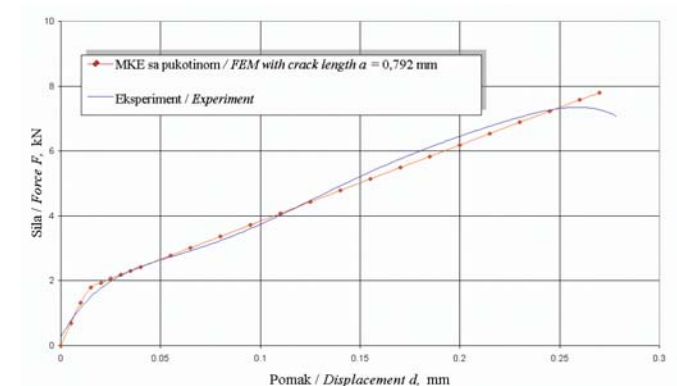
Prethodno opisano ponašanje tijekom eksperimenta nije utvrđeno kod spojeva načinjenih od nehrđajućega austenitnog čelika. S obzirom da bi za sve podloge trebala vrijediti ista teorijska razmatranja, nameće se zaključak da kod spojeva s podlogama od čelika nije postignuta optimalna duljina preklopa.

Prilikom određivanja utjecaja debljine sloja ljepljiva na čvrstoću spoja ne treba razmatrati debljinu samo u geometrijskome smislu; već se i druga svojstva sloja ljepljiva koja ovise o debljini sloja mogu promatrati kao utjecajni čimbenici na čvrstoću. Kod tanjih slojeva ljepljiva sprječavaju se poprečne kontrakcije sloja ljepljiva. Sprječavanje poprečne kontrakcije, što pridonosi čvrstoći, smanjuje se što je sloj ljepljiva deblji. Očito smanjenju čvrstoće spoja kod debljih slojeva ljepljiva pridonosi i nehomogenost slojeva, a posebice moment savijanja koji se povećava sa sve debljim slojem ljepljiva kod jednostrukih preklopnih lijepljenih spojeva zbog povećane ekscentričnosti pri opterećenju. Moment savijanja uzrokuje dodatna normalna naprezanja i naprezanja na rubovima preklapanja uzrokovana opterećenjima na ljuštenje. Velik utjecaj na smanjenje čvrstoće također imaju i različite debljine ljepljiva unutar lijepljenoga spoja.

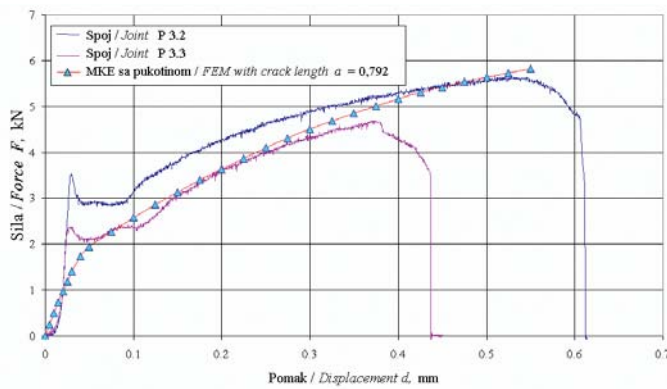
Vrijednost optimalne debljine sloja ljepljiva je oko 0,4 mm (pri duljini preklopa $l = 40$ mm), (slika 8). Povećanje debljine iznad tih vrijednosti ne samo što ne povećava nosivost spoja, već se ona i smanjuje. Objašnjenje za takvo ponašanje moguće je dati na temelju teorijskih razmatranja iz^{1,7,8}.

Numerička istraživanja temelje se na ispitivanju jedne grupe uzoraka načinjenih od dva materijala podloge: austenitnoga nehrđajućeg čelika i aluminija. Duljina preklopa kod koje je provedena simulacija iznosi 30 mm. Usporedba numeričkih i eksperimentalnih rezultata prikazana je slikama 9 i 10. Rezultati prikazani na navedenim slikama dobiveni su na temelju stvarnih σ - ϵ dijagrama materijala podloge i na temelju značajki ljepljiva prikazanih na slici 7b. U model je uvedena pukotina na rubu preklapanja duljine 0,792 mm. Objašnjenje za to dano je u⁹.

Očito ovakav model s pukotinom duljine $a = 0,792$ mm i ovim značajkama ljepljiva i podloge dobro opisuje realno stanje, a podaci o izračunatoj sili u skladu su s eksperimentalnim podacima.



SLIKA 9. Usporedba numeričkih i eksperimentalnih rezultata
FIGURE 9. Comparison of numerical and experimental results



SLIKA 10. Usporedba numeričkih i eksperimentalnih rezultata
 FIGURE 10. Comparison of numerical and experimental results

Zaključak / Conclusion

Veći broj faktora utječu na mehaničke karakteristike nosivosti lijepljenih spojeva. Među njima su najznačajniji: duljina preklopa i debljina sloja ljepila.

Za ispravno dimenzioniranje lijepljenoga spoja nužno je utvrditi njihove optimalne vrijednosti, pri kojima se uz najmanje utrošenoga materijala podloge i ljepila može postići najveća nosivost spoja.

U eksperimentalnom dijelu rada analizirani su jednostruki lijepljeni spojevi pri uvjetima uzdužnoga rasteznog opterećivanja. Razmotreni su spojevi s podlogama od austenitnoga nehrđajućeg čelika i aluminija, kod kojih je mijenjana duljina preklopa i debljina sloja ljepila.

Prema očekivanju pokusi su potvrdili da duljina preklopa i debljina sloja ljepila izravno utječu na čvrstoću lijepljenih spojeva. Međutim, karakteristike te ovisnosti u razmatranome su rasponu preklopa različite,

ovisno o materijalu podloge. Očito je da deformacijske karakteristike podloge izravno utječu na nosivost čitavoga lijepljenoga spoja.

U numeričkom dijelu rada cilj je bio načiniti prikladan model lijepljenoga spoja. To je ostvareno s rezultatima koji se mogu proglasiti kao prihvatljivi. Model je primijenjen i na aluminijsku podlogu i na podlogu od austenitnoga nehrđajućeg čelika te je dao dobre rezultate.

Optimalne vrijednosti ispitivanih faktora eksperimentalno su postignute na ispitnim tijelima načinjenima od aluminijske podloge. Kod podloge od austenitnoga nehrđajućeg čelika ove vrijednosti nisu postignute. Stoga taj problem ostaje kao cilj budućih istraživanja. Također će se načiniti i prostorni model pomoću MKE-a i provesti simulacija, a dobiveni rezultati usporediti s onima dobivenim ravninskim modelom.

LITERATURA / REFERENCES

1. Schindell-Bidinelli, E. H., Gutherz, W.: *Konstruktives Kleben*, VCH Verlag, Weinheim, 1988.
2. N. N.: *Technical data sheet, Product 3421*, Loctite Corp., Dublin, 2000.
3. Tripalo, A.: *Tehnologija prerade aluminija*, Tehnička knjiga, Beograd 1966.
4. www.stahlschluesel.de, 2003.
5. N. N.: *ANSYS Vers 6.0*, ANSYS Inc. Canonsburg USA, 2000.
6. Andruet, R. H., Dillard, D. A., Holzer, S. M.: *Special finite elements for analysis of adhesive joints*, ECCOMAS 2000, 11–14 September 2000, Barcelona.
7. Kralj, S., Kožuh, Z.: *Designing of bonded joints*, Proceedings HDTZ, Zagreb, 1994, 115 – 149.
8. Raos, P., Matejiček, F., Lucić, M.: *Experimental investigation on mechanical characteristics of adhesively bonded single-lap joints*, Proceedings 1st DAAAM International Conference ATDC'02, Slavonski Brod, September 12-14, 2002, 517-520.
9. Matejiček, F., Raos, P., Lucić, M.: *Numerical analysis of single-lap adhesive joint*, Proceedings 4th International Congress of Croatian Society of Mechanics (CD-Book), Bizovac, September 18-20, 2003, 123-124.

DOPISIVANJE / CORRESPONDENCE

Prof. dr. sc. Pero Raos, Sveučilište u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Trg I. B. Mažuranić 18
 HR-35 000 Slavonski Brod, Hrvatska / Croatia, Tel. +385-35-446-188, Fax +385-35-446-446, praos@public.srce.hr