

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Dora Golubiček, Lovro Novinc, Elena Perković

**UTJECAJ VRSTE LJEPILA NA PONAŠANJE KONSTRUKCIJSKIH  
SPOJEVA IZMEĐU ALUMINIJA I ČELIKA**

Zagreb, 2023.

Ovaj rad izrađen je na Zavodu za konstrukcije Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Davor Skejića i izv. prof. dr. sc. Ivana Duvnjaka, te je predan na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2022./2023.

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	4
1.1. Općenito.....	4
1.2. Spojevi između aluminija i čelika .....	5
1.3. Spojna sredstva za aluminijske profile .....	6
1.3.1. Općenito .....	6
1.3.2. Vijčani spojevi.....	7
1.3.3. Lijepljeni spojevi.....	9
1.4. Ljepila za metalne (aluminijske i/ili čelične) spojeve .....	10
1.4.1. Općenito o ljepilima .....	10
1.4.2. Razlike između krto i duktilnog ponašanja ljepila .....	12
2. CILJ ISTRAŽIVANJA I HIPOTEZE.....	14
3. ANALITIČKI PRORAČUN OTPORNOSTI LIJEPLJENIH SPOJEVA .....	16
3.1. Općenito.....	16
3.2. Analitički proračun posmične otpornosti ljepila .....	17
3.3. Analitički proračun vlačne otpornosti ljepila .....	17
3.4. Proračun vlačne otpornosti lijepljenih spojeva ('peeling').....	18
4. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA LIJEPLJENOG SPOJA PARA KUTNIKA U VLAKU 21	
4.1. Opseg i ciljevi laboratorijskog ispitivanja .....	21
4.2. Opis programa laboratorijskog ispitivanja .....	21
4.2.1. Razmještaj uzoraka i opreme za ispitivanje .....	21
4.2.2. Geometrijska svojstva kutnika .....	25
4.2.3. Ispitivanje mehaničkih svojstava aluminijskih uzoraka.....	28
4.2.4. Tehničke informacije o ljepilu .....	31
4.2.5. Nanošenje ljepila na uzorke kutnika .....	33
4.3. Ispitivanje kutnika u paru na vlak.....	40
4.3.1. Općenito .....	40
4.3.2. Režim nanošenja opterećenja .....	41

4.3.3.	Postupak provedbe ispitivanja.....	41
4.4.	Rezultati ispitivanja .....	42
4.4.1.	Prikaz rezultata za ljepilo SikaFast-555 L10.....	43
4.4.2.	Prikaz rezultata za ljepilo SikaPower-4720 .....	47
4.4.3.	Prikaz rezultata za ljepilo Sikadur-330 .....	52
4.4.4.	Prikaz rezultata za ljepilo Sikadur-31 CF Normal .....	56
4.5.	Diskusija rezultata .....	61
5.	NUMERIČKA PROCJENA VLAČNOG PONAŠANJA ZALJEPLJENIH ALUMINIJSKIH KUTNIKA.....	63
5.1.	Uvod .....	63
5.2.	Opis modela konačnih elemenata .....	63
5.2.1.	Općenito .....	63
5.2.2.	Geometrija numeričkog modela .....	64
5.2.3.	Rubni uvjeti i opterećenje .....	64
5.2.4.	Mehanička svojstva aluminijskih komponenata .....	66
5.2.5.	Mehanička svojstva i degradacija ljepila .....	67
5.2.6.	Diskretizacija modela .....	68
5.2.7.	Kontakti.....	69
5.3.	Rezultati i diskusija numeričkih simulacija.....	70
6.	DISKUSIJA REZULTATA.....	76
6.1.	Usporedba eksperimentalnih, numeričkih i analitičkih rezultata .....	76
6.2.	Komentar rezultata i zaključne napomene.....	80
7.	ZAKLJUČAK.....	81
7.1.	Neposredni zaključci iz provedenog istraživanja .....	81
7.2.	Smjernice za daljnja istraživanja .....	82
	ZAHVALA.....	83
	LITERATURA.....	84
	POPIS SLIKA .....	86
	POPIS TABLICA.....	89

## 1. UVOD

### 1.1. Općenito

Gledajući povijesni razvitak građevinarstva kao djelatnosti koja je uvelike obilježila ljudsku okolinu i čiji je razvitak bio neophodan za podizanje standarda života, uvijek se težilo ka novim rješenjima koja će biti dugotrajna, a ujedno i bolja od prethodnih. Sa svakom stručno relevantnom inovacijom, bilo u materijalu, bilo u postupku, moguća rješenja problema su postajala sve kvalitetnija i inženjeri su mogli raspolagati kvalitetnijim itinerarom metoda i gradiva.

Jedna od inovacija koja je na svojevrsan način obilježila građevinsku djelatnost bila je uvođenje aluminija kao novog građevinskog materijala koji će pronaći svoje mjesto u brojnim segmentima građevinskog sektora. Iako je početno proizvodnja aluminija bila preskupa, razvojem proizvodnih postupaka se ta cijena reducirala višestruko te je na taj način aluminij uveden kao održiv odabir u građevinskoj industriji.

Aluminij se, točnije rečeno, rabi u obliku svojih legura. Na taj način se, uz svoje prirodno svojstvo male težine u odnosu na čvrstoću te prirodnu otpornost na koroziju, postižu ciljane konstruktivna svojstva poput mogućnosti oblikovanja i lijevanja, modifikacije čvrstoće i dogovorne granice popuštanja, zavarljivosti te brojna druga. Mogućnosti oblikovanja poprečnih presjeka također su brojne kako prikazuje slika 1.1.



**Slika 1.1** Mogućnosti oblikovanja aluminijških profila za različitu namjenu [1, 2]

Spoj konstruktivnog elementa od aluminija s drugim elementima ili s podlogom do sada se u građevinskoj industriji obavljao na klasičan način: vijcima, zakovicama ili zavarivanjem. Inspiracija za potencijalni novi način sjedinjenja elemenata od aluminija potekla je iz avionske,

automobilske odnosno brodske industrije gdje se već dugi niz godina koristi ljepilo kao način spajanja/povezivanja. Odgovor na pitanje zašto bi se baš kod aluminijskih spojeva trebala tražiti alternativna metoda u odnosu na klasične načine spajanja leži u činjenici da je, za razliku od čelika, aluminij teško zavarivati zbog reakcije na visoku temperaturu te je samim time potaknuto razmišljanje o načinu koji će zamijeniti zavarivanje.

Ljepilo, kao spojno sredstvo, u građevinarstvu se do sada veoma oskudno koristilo u kontekstu sudjelovanja u nosivim konstrukcijskim sustavima. Razlog tome nalazi se u činjenici da je primjena ljepila slabo istražena. O tome jasno govori i podatak iz norme HRN EN 1999-1-1:2015 [3] za projektiranje aluminijskih konstrukcija u kojoj se o cijeloj problematici lijepljenih spojeva nalaze svega 3 stranice.

Unatoč velikim prednostima koje donosi ljepilo, poput niske cijene i lakoće formiranja spoja, postoji niz stvari koje se moraju prvotno utvrditi i ispitati prije nego se ljepilo može pouzdano primijeniti, odnosno normirati. Pogled u ranije navedene industrije koje koriste ljepilo u spojevima iza kojih stoji velika pouzdanost daje razlog za razumnu pomisao kako će ljepilo uspjeti pronaći svrhu i u građevinskoj industriji kao i motivaciju za provođenje ispitivanja koja će tu misao potkrijepiti.

## **1.2. Spojevi između aluminija i čelika**

Spojevi se projektiraju tako da se unutarnje sile i momenti raspodjeljuju na najbolji mogući način pod uvjetom da su prethodno spomenute unutarnje sile i momenti u ravnoteži s primijenjenim opterećenjima. Također, svaki dio u spoju mora imati sposobnost preuzimanja sile ili naprezanja prethodno pretpostavljenih u analizi. Nadalje, deformacije koje podrazumijeva ova raspodjela moraju biti unutar kapaciteta deformacija spojnih elemenata ili zavara i spojenih dijelova. Elementi koji se sastaju u spoju obično bi trebali biti raspoređeni tako da im se osi simetrije sijeku u jednoj točki [3].

Kada govorimo o povezivanju čeličnih elemenata, osim spojeva vijcima i zakovicama, nameću se zavareni spojevi. Kod kombinacija s aluminijem, s obzirom na njihova različita kemijska i fizikalna svojstva nailazimo na problem formiranja IMP (intermetalne) faze koja svojom krtošću narušava statičku i dinamičku čvrstoću spoja. Glavne razlike u fizikalnim svojstvima prikazane su u nastavku teksta u tablici 1.1.

**Tablica 1.1** Razlike između fizikalnih svojstava čistog aluminija i čistog čelika

Materijal	Točka taljenja [°C]	Elastični modul [MPa]	Gustoća (20°C) [kg/m <sup>3</sup> ]	Toplinska vodljivost [W/mK]
Čelik	1536	204000	7870	46
Čisti aluminij	660	67500	2700	222

Potaknuti problematikom, teži se pronalaženju adekvatnijih i pristupačnijih načina spajanja ovih dvaju materijala. Upravo takvim spojevima su se pokazali oni ostvareni adhezivnim vezama - ljepilima [4]. Glavne prednosti adhezivnih spojeva jesu ujednačenija raspodjela naprezanja, jednostavnost izrade, širi spektar materijala dostupnih za spajanje te niska cijena. Naravno, nailazimo i na nedostatke u vidu zahtjevnije površinske pripreme, niske otpornosti na odljepljivanje te još uvijek poteškoća u kontroli kvalitete [4].

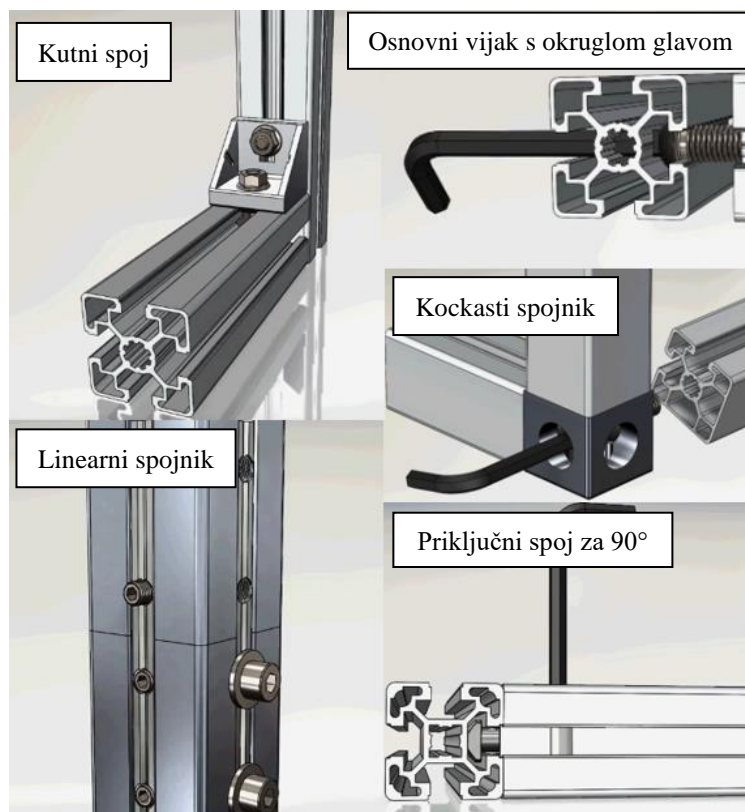
### 1.3. Spojna sredstva za aluminijske profile

#### 1.3.1. Općenito

Spojna sredstva su nam potrebna kako bismo ostvarili čvrstu mehaničku vezu između dva ili više aluminijskih profila. U nastavku teksta nabrojani su najčešće korišteni spojni elementi kod aluminijskih profila. To su aluminijski kutnici, kockasti utori za profile, linearni spojevi, priključni setovi te vijci koji su prikazani na slici 1.2 te čija je uporaba detaljnije opisana u narednom potpoglavlju.

Aluminijski kutnici sastoje se od dva kraka te samim time mogu biti jednakokrani te raznokračni, u oba su slučaja krakovi raspoređeni tako da tvore kut od 90 stupnjeva. Široku upotrebu pronalaze u konstrukcijskim spojevima u raznim industrijama – građevinskoj, automobilskoj, nautičkoj, a upotrebljavaju se i kod rashladnih tornjeva te kopnenih transportnih sustava. Kockasti utori za profile, estetski su prihvatljiviji zahvaljujući svom oblikovanju koje ne sadrži izbočine. Kao eventualni nedostatak treba istaknuti višu cijenu te ograničenu primjenu u vidu kombinacija dimenzija aluminijskih profila. Priprema prije montaže jest oblikovanje navoja unutar profila pomoću svrdla. Linearnim spojevima pristupamo ako postoji potreba za dužim profilima, ali s obzirom na logističke troškove prijevoza, isti se režu na manje komade te se kasnije po potrebi spajaju. Navedeni su spojevi u osnovi matice u obliku slova T, projektirani tako da nalegnu u utor za aluminijski profil. Prije upotrebe ovakvih spojeva, potrebno je dodatno provjeriti nosivost linearnog spoja. Priključni setovi i vijci prikladni su za jednostavniju primjenu. Njihova montaža

zahtijeva bušenje rupa kroz jedan profil te oblikovanje navoja unutar drugoga. Učinkovitost vijaka može se drastično poboljšati vijčanom spojnicom, ali to povećava vrijeme montaže te troškove [5].

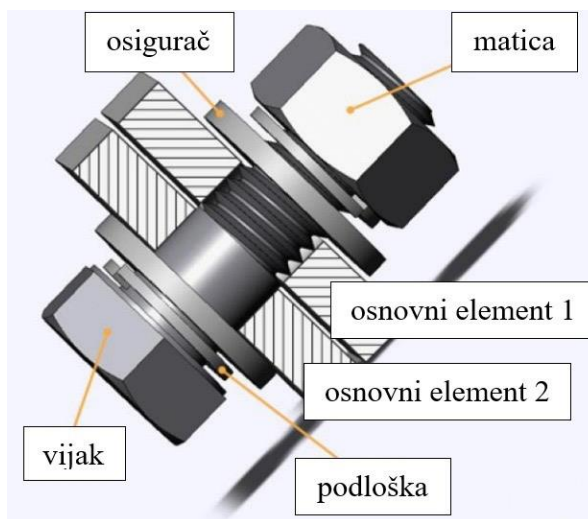


Slika 1.2 Spojna sredstva za aluminijske profile [5]

### 1.3.2. Vijčani spojevi

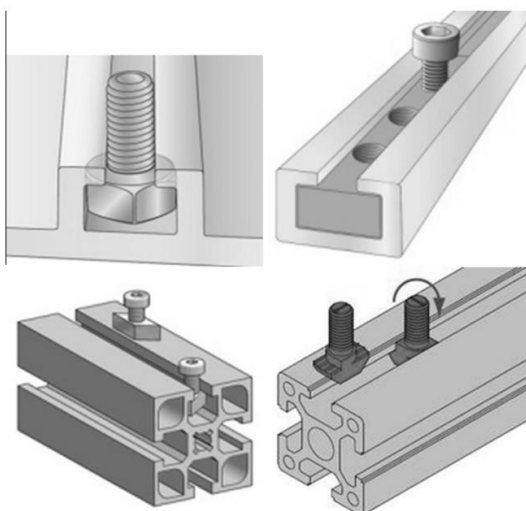
Vijčanim spojem, korištenjem pomoćnih elemenata - vijaka i/ili matica, elementi osnovnog spoja spajaju se u lako rastavljive sklopove. Spajanje podrazumijeva navlačenje osigurača i podloške na tijelo vijka te se na isto navija matica. To se obavlja korištenjem dva ključa, od kojih pomoću jednog sprječavamo okretanja vijka dok se istovremeno drugim ključem zateže vijčani spoj okretanjem matice. Da bismo spoj smatrali pritegnutim, moraju biti spriječena njihova pomicanja u ravnini okomitoj na samu os vijčanog spoja. Na slici 1.3 prikazani su osnovni elementi takvog spoja.





**Slika 1.3** Vijčani spoj - osnovni element [6]

Postoje raznolike metode spajanja aluminijskih elemenata te mogu, ali i ne moraju uključivati prisustvo spona. Takve su veze najčešće poznate kao posebni ili nekonvencionalni spojevi. Tipičan takav spoj sastoji se od strojno obrađenih staza i utora, unutar kojih se mogu nalaziti mehanička spajala poput vijaka. Glavna prednost ovakvih spojeva je brzina, jednostavnost montaže kao i ušteda osnovnog materijala uz posljedično smanjenje troškova. Ostvarljive metode spajanja su različite. Ova se tipologija spojeva koristi ne samo u građevinarstvu, već i u transportnoj industriji. Svakidašnje primjene jesu ipak u zgradarstvu, u vidu korištenja kod montaže okvira za stolarije, fotonaponskih potpornih sustava, stubišta, polica i sl. [7]. Slika 1.4 prikaz je upravo jednog takvog spoja.

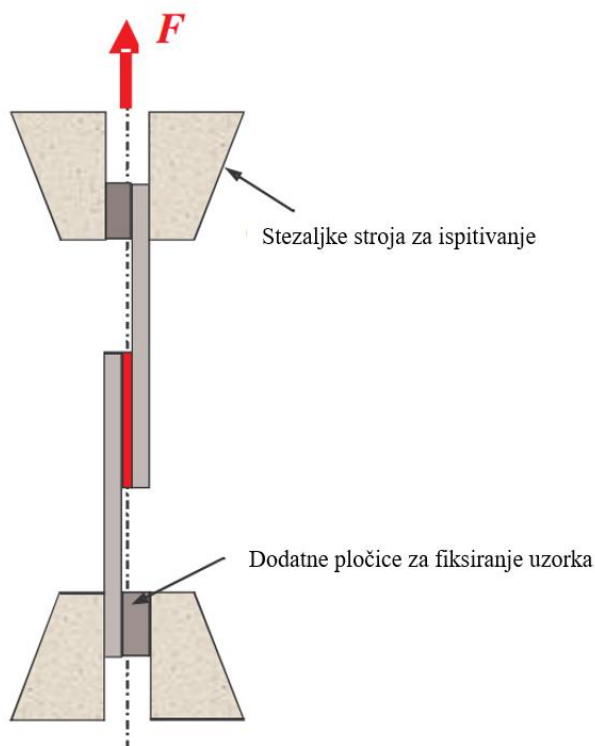


**Slika 1.4** Vijčano - kanalni spoj [8]

### 1.3.3. Lijepljeni spojevi

Prilikom projektiranja lijepljenih spojeva, potrebno je osigurati dovoljnu površinu za prijenos opterećenja, izbjegavati pukotine i prijevremena otkazivanja, težiti da spoj preuzima tlačna umjesto vlačna naprezanja te izbjeci koncentracije naprezanja pravilnim oblikovanjem spoja [9].

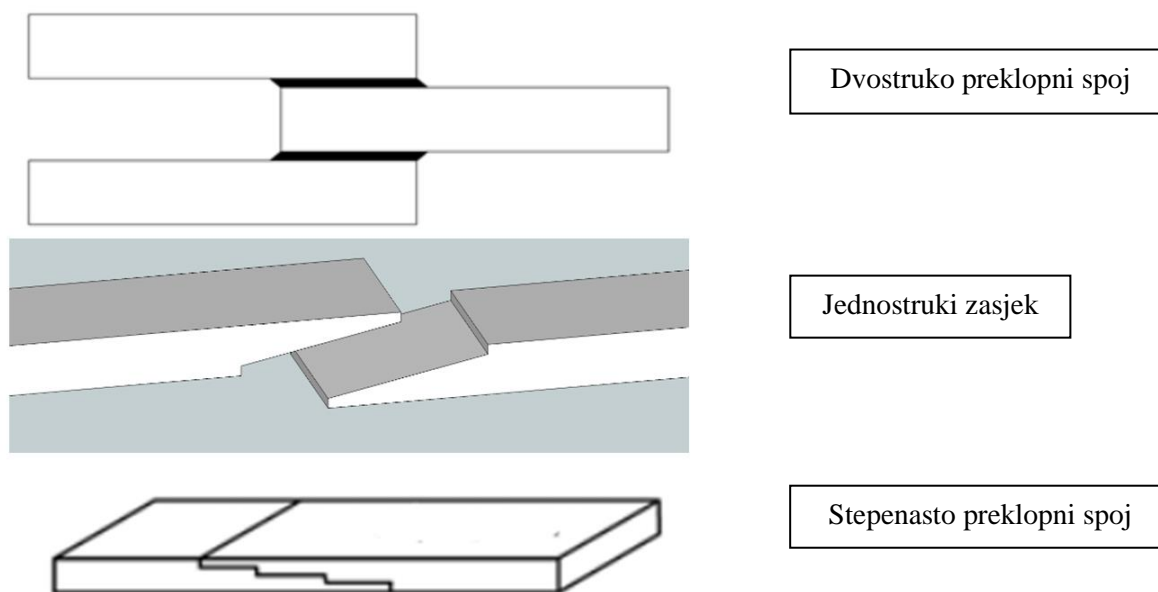
Kao najčešće primjenjivani lijepljeni spoj možemo navesti jednostruko preklopni spoj. Skica spoja kakvim se koristi u inženjerskoj praksi prikazana je na slici 1.5. Njegova jednostavnost te uporabna učinkovitost upravo su ono zbog čega se rezultati dobiveni ispitivanjima na navedenom spoju, koriste za određivanje mehaničkih svojstava lijepljenih spojeva te samih ljepila. Opterećenja u jednostruko preklopnom spoju nisu kolinearna, što rezultira momentom savijanja i u konačnici rotacijom spoja. Navedenim ponašanjem, lijepljeni se spoj izlaže posmičnim naprezanjima te naprezanjima uslijed odljepljivanja. Mogući ishod je da deformacije lijepljenih elemenata isto kao i samog ljepila, postanu plastične, osobito u područjima visokih naprezanja [10].



**Slika 1.5** Vlačno ispitivanje jednostruko preklopnog spoja [10]

Osim prethodno spomenutog jednostruko preklopnog spoja, ostale konfiguracije lijepljenih spojeva jesu dvostruko preklopni spoj te jednostruki zasjek, slika 1.6. U usporedbi s jednostruko preklopnim spojevima, dvostruko preklopni spojevi su teži za samu proizvodnju, no naprezanja odljepljivanja se uvelike smanjuju, a jednostruki zasjeci su učinkovitiji u pogledu smanjenja koncentracije naprezanja. Iako se navedeni spojevi najviše koriste u industriji, druge vrste spojeva imaju posebne primjene.

Stepenasto preklopni spojevi, slika 1.6, se mogu koristiti prilikom kompozitnih spajanja zbog lakoće izrade stepenaste konstrukcije tijekom procesa izrade materijala.



**Slika 1.6** Različite konfiguracije lijepljenih spojeva [11]

Prije samih ispitivanja poželjno je provesti preliminarnu numeričku analizu, ali imajući na umu kako točnost iste uvelike ovisi o izboru adekvatnih modela materijala koji se koriste kako bi predvidjeli čvrstoću lijepljenih spojeva, isto kao i posjedovanju pouzdanih podataka o svojstvima samih materijala koji se koriste.

Tijekom godina, povećao se broj pristupa predviđanju čvrstoće posmičnih spojeva korištenjem analitičkih ili numeričkih tehnika. Metoda konačnih elemenata (*eng. Finite Element Method - FEM*) omogućava precizno modeliranje složenih geometrija diskretizacijom ispitnog modela na mrežu čvorova za koje se rješavaju sustavi jednačbi. Time se premošćuje prepreka nemogućnosti formulacije analitičkog rješenja zbog složenosti problema. Prethodno navedeni spojevi shematski su prikazani na slici 1.6 [4].

## 1.4. Ljepila za metalne (aluminijske i/ili čelične) spojeve

### 1.4.1. Općenito o ljepilima

Tehnika lijepljenja, danas je sve popularnija u industrijskoj primjeni te postupno zamjenjuje ostale, tradicionalne načine spajanja materijala zbog svojih prednosti koje nudi. Ljepila možemo klasificirati na temelju raznih čimbenika kao što su:

- osnovne kemijske komponente (organski, anorganski, prirodno organski, sintetsko organski),
- konzistencija (tekuće, plastično, kruto),
- stvrđnjavanje (kemijsko stvrđnjavanje, fizičko stvrđnjavanje te hibridni načini) [27].

Različiti tipovi ljepila korišteni u građevinarstvu su:

- **Polimerna ljepila**

Sintetička vezivna tvar sačinjena od polimera te smatrana fleksibilnijim, jačim te s većom otpornošću na udar od ostalih vrsta ljepila. Klasificirana su kao termoplastična ili termoreaktivna, ovisno o molekularnoj strukturi [27].

- **Vruće taljiva ljepila**

Ljepilo za vruće taljenje (HMA) je oblik termoplastičnog ljepila koje se obično prodaje kao čvrsti cilindrični štapić različitih promjera prilagođenih za nanošenje pištoljem za vruće ljepilo [27].

- **Akrilna brtvila**

Akrilna brtvila su ključna za velike dijelove moderne industrije, osiguravajući veze visoke čvrstoće koje dobro funkcioniraju kao alternativa zakovicama ili drugim mehaničkim tehnikama spajanja. Akrilna ljepila su ili termoplasti, koji se mogu oblikovati iznad određene temperature ili termoreaktivni polimer, koji se "stvrđjava" jednom i nakon toga se ne može prekriti [27].

- **Ljepila od smole**

Proizvodi se u obliku praha, spreja, emulzije i tekućeg oblika te pruža izvanredne sposobnosti lijepljenja. Može se koristiti s raznim materijalima, uključujući drvo, tkaninu, staklo, porculan ili metal. Međutim, važno je napomenuti; epoksidna smola se ne smatra voodootpornom. Repetitivni vlažni ili mokri uvjeti mogu uzrokovati propadanje tijekom vremena što će na koncu utjecati na trajnost i otpornost [27].

- **Anaerobna ljepila**

Jednodijelna ljepila sastavljena od dimetakrilatnih monomera koji se stvrđnjavaju samo u nedostatku zraka. Manje su otrovni od ostalih akrila, imaju blag, neupadljiv miris i nisu korozivni za metale. Anaerobna ljepila koriste se za konstrukcijske veze, prvenstveno s materijalima kao što su metali i staklo te u manjoj mjeri drvo . Aktivator se nanosi na jednu ili obje površine spoja; ljepilo se zatim nanosi na jednu površinu kako bi se počelo stvrđnjavati. Spojevi proizvedeni korištenjem anaerobnih ljepila mogu izdržati izloženost organskim otapalima i vodi, vremenskim utjecajima i temperaturama do oko 200°C [27].

- **Epoksidna ljepila**

Epoksidna ljepila prijanjaju na širok repertoar materijala, zbog svoje visoke čvrstoće, otpornosti na kemikalije i okolinu te sposobnosti otpornosti na puzanje pod stalnim opterećenjem, epoksidi su najčešće korištena strukturna ljepila. Kao najčešće korišteno konstrukcijsko ljepilo, epoksidna ljepila se obično nude kao jednokomponentni ili dvokomponentni sustavi [27].

#### **1.4.2. Razlike između krto i duktilnog ponašanja ljepila**

Odabir ljepila treba se temeljiti na sljedećim čimbenicima: vrsti površina koje se spajaju (npr. pocinčano ili ne), izloženost koroziji (npr. vlaga, salinitet), ponašanje spoja na niskim ili povišenim temperaturama (ispod  $-30^{\circ}\text{C}$  i više od  $90^{\circ}\text{C}$ ), složenost spojeva, cijena (osobito u usporedbi sa zavarivanjem), mehanička svojstva, skupljanje, puzanje, otpornost na starenje itd. [9].

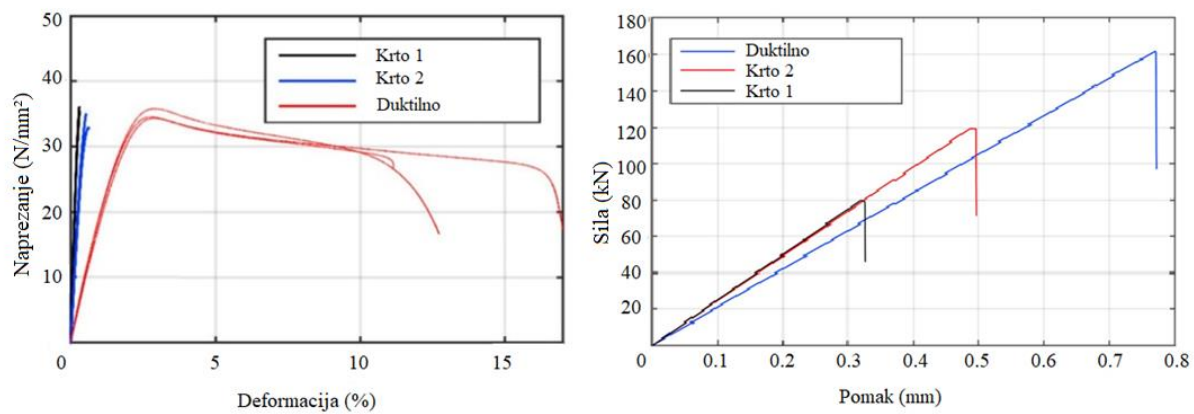
Prilikom odabira ljepila jedna od glavnih razlika koja se nameće jest priroda ponašanja lijepljenih spojeva uslijed izlaganja vanjskom opterećenju, točnije, vlačnoj sili. Ovisno o mehaničkim svojstvima koja ljepilo posjeduje, možemo zaključiti hoće li se ono ponašati krto ili duktilno prilikom izlaganja vanjskom opterećenju. Krto ljepilo odlikuju veća čvrstoća, manja viskoznost te manje rastezanje pri lomu dok duktilno pokazuje puno veće rastezanje pri lomu te veću viskoznost.

Neki su autori [12] došli do zaključaka o razlikama u ponašanju krutih i duktilnih ljepila uslijed provedbe statičkih i udarnih vlačnih ispitivanja. Za testove, korišten je konkavni uzorak za lokalizaciju deformacija i loma na središte uzorka, na kojem je pričvršćen instrument za mjerenje velikih deformacija. Eksperimentalna su ispitivanja dala zanimljive rezultate u pogledu brzine opterećenja u odnosu na naprezanja i deformacije:

(1) Za krto ljepilo, modul je konstantan i ne ovisi o brzini opterećenja iako se maksimalno naprezanje i deformacija povećava s padom brzine opterećenja.

(2) Za duktilno ljepilo do velike plastične deformacije dolazi uslijed statičkog opterećenja pri čemu je maksimalna deformacija vrlo velika iako maksimalno naprezanje nije visoko. Suprotno tome, ljepilo postaje krto u udarnim uvjetima tj. maksimalno naprezanje se povećava, a izduženje se smanjuje [12].

Kao što se može vidjeti s dijagrama deformacija-naprezanje te sila-pomak prikazanih na slici 1.7, uzorci s duktilnim ljepilom postižu vrlo visoku čvrstoću u usporedbi na one krte. Upotreba duktilnog ljepila povećala je čvrstoću spoja, međutim krutost lijepljenog spoja se smanjuje. Također, prednost duktilnih ljepila jest ravnomjerna raspodjela naprezanja duž lijepljene površine u odnosu na krta ljepila gdje postoji koncentracija naprezanja te iznenadni lom.



**Slika 1.7** Usporedba krto i duktilnog ljepila pri vlačnom ispitivanju [13]

## **2. CILJ ISTRAŽIVANJA I HIPOTEZE**

Pojava kontaktne korozije nužna je posljedica pri kombiniranju različitih metala. Kako bi se ona izbjegla u spojevima aluminija s drugim metalom, neke studije predlažu uporabu ljepila. Prednosti ljepila su mogućnost spajanja bez oslabljivanja materijala rupama potrebnih za spojna sredstva, raspodjela naprezanja je jednolika, korišteno ljepilo može služiti kao izolator ili vodič, prigušuje vibracije te smanjuje ukupnu masu konstrukcije [14]. Kontaktna se korozija na taj način može otkloniti. Ono što se javlja kao veći problem je činjenica da vlačno napregnuti lijepljeni spojevi nisu preporučeni za konstrukcijsku primjenu zbog pojave koncentracije naprezanja odljepljivanja [3].

Shodno tome, motivacija ovog istraživanja je dodatno istražiti ponašanje ljepila u spoju na način da se eksperimentalno ispituju ljepila različita po mehaničkim karakteristikama, ali i po kemijskom sastavu. Također će se provesti i detaljna numerička analiza na način da se proširi sa do sada provedenih 2D analiza na 3D analize. Na taj način će se numerički model više približiti realnom ponašanju spoja.

Cilj ovog rada je eksperimentalno i numerički ispitati ponašanje lijepljenih spojeva između aluminija i čelika koji su opterećeni na odljepljivanje te utvrditi maksimalnu otpornost. Nastavno na ovo, cilj je također kroz istraživanje ponašanja ljepila potaknuti primjenu ovakvog spoja u konstrukcijske svrhe. Drugim riječima, kalibrirani numerički modeli iz ovog istraživanja mogu poslužiti kao dobra osnova za normiranje navedenog tipa spoja, što će zauzvrat omogućiti njegovu veću primjenu. Eksperimentalno ispitivanje zamišljeno je na način da se par aluminijskih kutnika zalijepljen za krutu čeličnu ploču izlaže vlačnom naprezanju. Rezultati laboratorijskih ispitivanja biti će obrađeni u programskom paketu ARAMIS koji uz pomoć dviju kamera snima ispitni uzorak, obrađuje ga, te prikazuje sliku s naznačenim pomacima. Rezultati dobiveni ARAMIS-om će se usporediti s numerički dobivenim rezultatima u programskom paketu Simulia Abaqus 2021.

Na temelju navedenog, postavljene su dvije hipoteze koje će se u ovom radu istražiti:

1. Pojednostavljeni analitički proračun prema normi precjenjuje vlačnu otpornost lijepljenog spoja između aluminija i čelika.
2. Korištenjem specifičnih konačnih elemenata koji omogućuju simuliranje postupnog otkazivanja ljepila numeričkom će se metodom realnije procijeniti otkazivanje vlačno napregnutog lijepljenog spoja između aluminija i čelika.

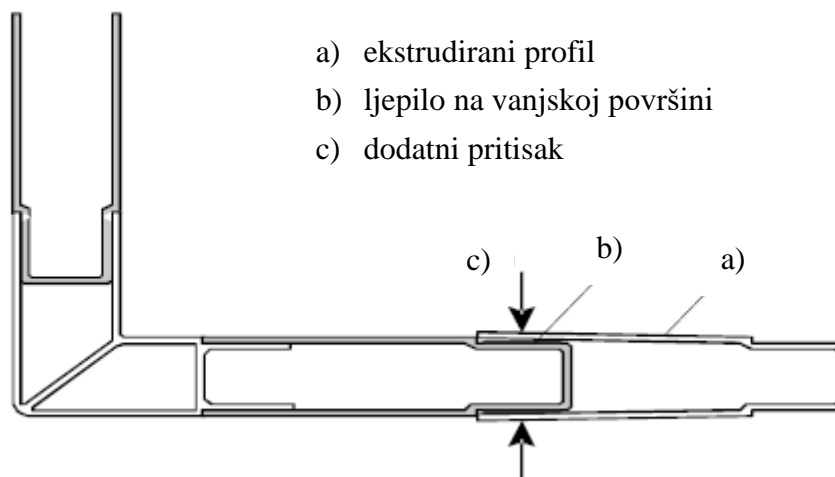
Zaključno, uzevši u obzir da još nije dovoljno raširena upotreba ljepila kao spojnog sredstva u aluminijским i čeličnim konstrukcijama, provedeno je istraživanje temeljeno na eksperimentalnom dijelu kako bi se utvrdilo postižu li takvi spojevi zadovoljavajuću otpornost.



### 3. ANALITIČKI PRORAČUN OTPORNOSTI LIJEPLJENIH SPOJEVA

#### 3.1. Općenito

Uzimajući u obzir kompleksno ponašanje ljepila pri opterećenju i kompleksnu prirodu degradacije svojstava ljepila, norma za aluminijske konstrukcije [3] vrlo oskudno obuhvaća problem otpornosti lijepljenog spoja. Prema [3], lijepljeni spojevi trebaju biti dimenzionirani na način da preuzimaju isključivo posmična naprezanja. Vlačna naprezanja, u kontekstu rastvaranja spoja, tzv. "peeling", trebala bi se izbjegavati ili preraspodijeliti uvođenjem drugih konstruktivnih komponenata koji bi preuzeli takvu vlačnu silu [3]. Na slici 3.1 je prikazana jedna takva preporučena konfiguracija spoja.



Slika 3.1 Posmični lijepljeni spoj [3]

Vidljivo je kako element ne mora nužno preuzimati samo posmična opterećenja zbog lijepljenog spoja već može preuzeti i vlak u uzdužnom smjeru koji se preuzima posmikom u ljepilu.

### 3.2. Analitički proračun posmične otpornosti ljepila

Prema [3], otpornost lijepljenog posmičnog spoja proračunava se prema izrazu (1):

$$\tau \leq \frac{f_{v,adh}}{\gamma_{Ma}} \quad (1)$$

gdje su:

$\tau$  nominalna vrijednost posmičnog naprezanja u sloju ljepila,

$f_{v,adh}$  karakteristična posmična čvrstoća ljepila,

$\gamma_{Ma}$  parcijalni faktor za materijal lijepljeni spoj.

Parcijalni faktor za ljepilo je dan sa vrijednosti  $\gamma_{Ma} \geq 3,0$ . Veliki iznos parcijalnog faktora pokriva nesigurnosti vezane uz nezanemarivu varijabilnost vrijednosti čvrstoće ljepila, malo iskustvo s ovakvim spojevima te smanjenje čvrstoće zbog starenja ljepila [3].

Analitički proračun za vlačnu otpornost lijepljenih spojeva normativno još ne postoji.

### 3.3. Analitički proračun vlačne otpornosti ljepila

Pomoću izraza za proračun čvrstoće:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

gdje su:

$\sigma$  – vlačna čvrstoća [ $N/mm^2$ ],

$F$  – vlačna sila [N],

$A$  – površina na koju djeluje sila [ $mm^2$ ].

Izračunate su očekivane vrijednosti sile pri lomu za svako ljepilo.

Prema podacima iz tehničkih listova proizvoda [16-19] dobivene su vrijednosti vlačne čvrstoće pri standardnim uvjetima temperature zraka od 23°C i relativne vlažnosti zraka od 50% za:

- SikaFast-555 L10  
 $\sigma_1 = 11 \text{ MPa}$

- SikaPower-4720  
 $\sigma_2 = 24 \text{ MPa}$
- Sikadur-330  
 $\sigma_3 = 30 \text{ MPa}$
- Sikadur-31 CF Normal  
 $\sigma_4 = 21 \text{ MPa}$

Površina uzoraka koji su izloženi vlačnim naprezanjima iznosi  $A = 2 \times 10 \times 14 = 280 \text{ cm}^2$  i jednaka je za sve uzorke te sile dobivene za pojedino ljepilo iznose:

$$F_1 = \sigma_1 \cdot A = 1,1 \cdot 280 = 308 \text{ kN}$$

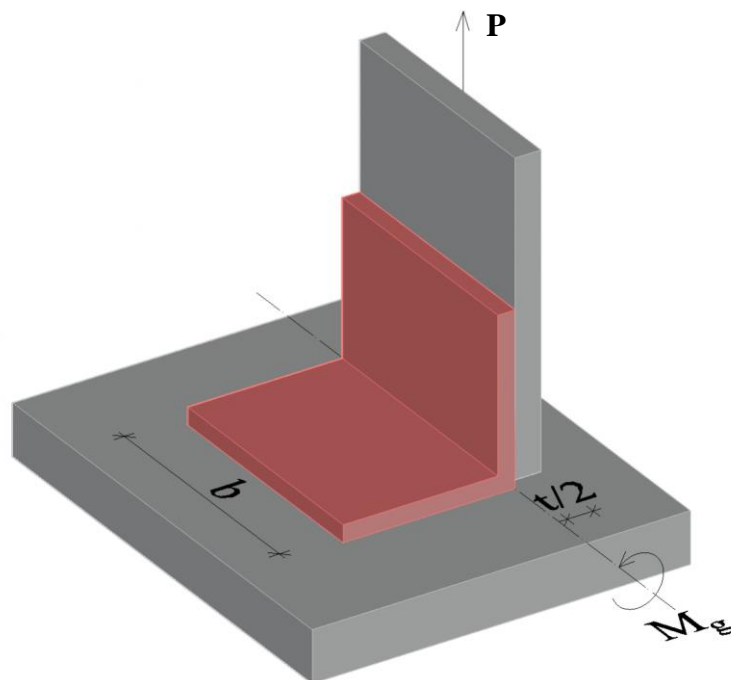
$$F_2 = \sigma_2 \cdot A = 2,4 \cdot 280 = 672 \text{ kN}$$

$$F_3 = \sigma_3 \cdot A = 3,0 \cdot 280 = 804 \text{ kN}$$

$$F_4 = \sigma_4 \cdot A = 2,1 \cdot 280 = 588 \text{ kN}$$

### 3.4. Proračun vlačne otpornosti lijepljenih spojeva ('peeling')

Prema [26], čvrstoća na odljepljivanje (engl. *peeling strength*) može se dobiti analitički za slučaj prikazan na slici 3.2.



Slika 3.2 Slučaj opterećenja na odljepljivanje

Izraz prema kojem se za navedeni slučaj opterećenja računa maksimalno naprezanje u ljepilu glasi:

$$\sigma_{max} = \frac{M_g}{b} \sqrt{\frac{12E_k}{Eg_m^3g_k}} + \frac{P\sqrt{2}}{b} \sqrt{\frac{12E_k}{Eg_m^3g_k}}$$

gdje je:  $M_g$  – moment savijanja

$b$  – širina lijepljene zone

$E_k$  – modul elastičnosti ljepila

$E$  – modul elastičnosti zalijepljenog elementa (alumijski kutnik)

$g_m$  – debljina zalijepljenog elementa (alumijski kutnik)

$g_k$  – debljina sloja ljepila

$P$  – sila opterećenja

$t$  – debljina čelične ploče

Moment savijanja  $M_g$  jednak je umnošku sile  $P$  i ekscentriciteta sile koji je jednak  $t/2$  (polovici debljine ploče preko koje se unosi opterećenje). Izraz za maksimalno opterećenje pri vlačnoj čvrstoći ljepila tada glasi:

$$P = \frac{\sigma_{max} \cdot b}{t \cdot \sqrt{\frac{12E_k}{Eg_m^3g_k}} + \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{12E_k}{Eg_m^3g_k}}}$$

Dobivena sila vrijedi samo za jedan kutnik. Množeći ju sa 2, dobivamo približnu vrijednost za par kutnika.

Uvrštavanjem odgovarajućih parametara svakog ljepila i alumijskog kutnika u gornju jednadžbu te množenjem s 2 dobivene su analitičke vrijednosti sila za lom kako je prikazano u Tablici 3.1:

**Tablica 3.1** Vrijednosti analitičkih maksimalnih sila

<b>Uzorak</b>	<b>VI. čvrstoća <math>\sigma_{\max}</math> [MPa]</b>	<b>Modul el. <math>E_k</math> [MPa]</b>	<b>Debljina sloja <math>g_k</math> [mm]</b>	<b>Maksimalna sila [kN]</b>
<b>01_A</b>	11	200	0,25	9,40
<b>02_A</b>	11	200	0,50	12,2
<b>03_A</b>	11	200	0,25	9,40
<b>04_B</b>	24	1900	0,50	11,0
<b>05_B</b>	24	1900	0,25	8,30
<b>06_B</b>	24	1900	0,25	8,30
<b>07_C</b>	30	4500	1,2	13,9
<b>08_C</b>	30	4500	0,80	11,7
<b>09_C</b>	30	4500	1,5	15,2
<b>10_D</b>	21	5000	2,5	12,5
<b>11_D</b>	21	5000	1,8	11,0
<b>12_D</b>	21	5000	2,0	11,4

## **4. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA LIJEPLJENOG SPOJA PARA KUTNIKA U VLAKU**

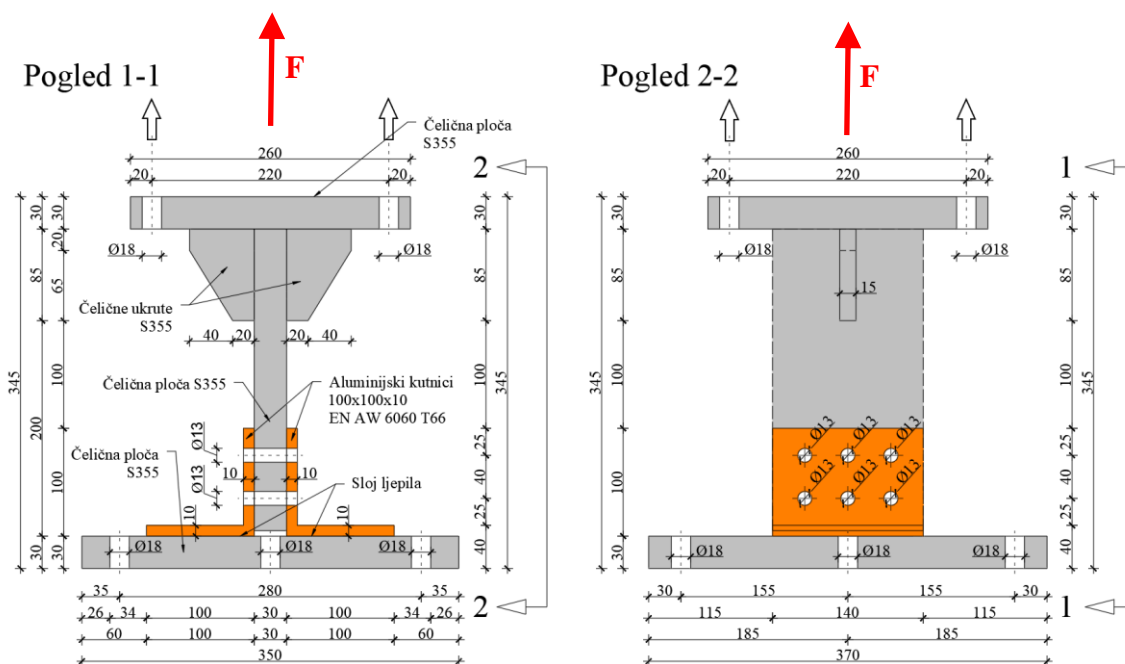
### **4.1. Opseg i ciljevi laboratorijskog ispitivanja**

Osnovna svrha ovog poglavlja je ispitati i utvrditi ponašanje lijepljenog para aluminijskih kutnika za čeličnu podložnu ploču. Kroz nadolazeća su potpoglavlja navedena i opisana provedena laboratorijska ispitivanja. Ispitana je konfiguracija aluminijskih kutnika dimenzija L 100x100x10 mm, duljine 140 mm, zalijepljenih na čeličnu ploču 370x350 mm debljine 30 mm. Kutnici su vijčano spojeni za drugu čeličnu ploču koja naliježe između kutnika te se statičkom prešom izvlači, kako bi se isprovociralo otkazivanje kritičnog dijela lijepljenih spojeva. Uzorci za ispitivanje podijeljeni su u četiri grupe ovisno o ljepilu. Tako imamo grupe A, B, C i D. Oznakom A nazvano je ljepilo SikaFast-555 L10, oznaka B predstavlja ljepilo SikaPower-4720, oznaka C za ljepilo Sikadur-330 te oznaka D za ljepilo Sikadur-31 CF Normal. Svaka je grupa imala po 3 uzorka para kutnika, pa je stoga ukupno ispitano 12 uzoraka.

### **4.2. Opis programa laboratorijskog ispitivanja**

#### **4.2.1. Razmještaj uzoraka i opreme za ispitivanje**

Izrada elemenata za ispitivanja kao i njihova naknadna montaža, provedeni su prema radioničkim nacrtima, slika 4.1. Opterećenje je uneseno preko statičke preše prema istoj slici na kojoj je ujedno prikazan razmještaj ispitanih uzoraka i dodatnih elemenata za ispitivanje na vlak.



**Slika 4.1** Razmještaj uzoraka i dodatne opreme za ispitivanje na vlak

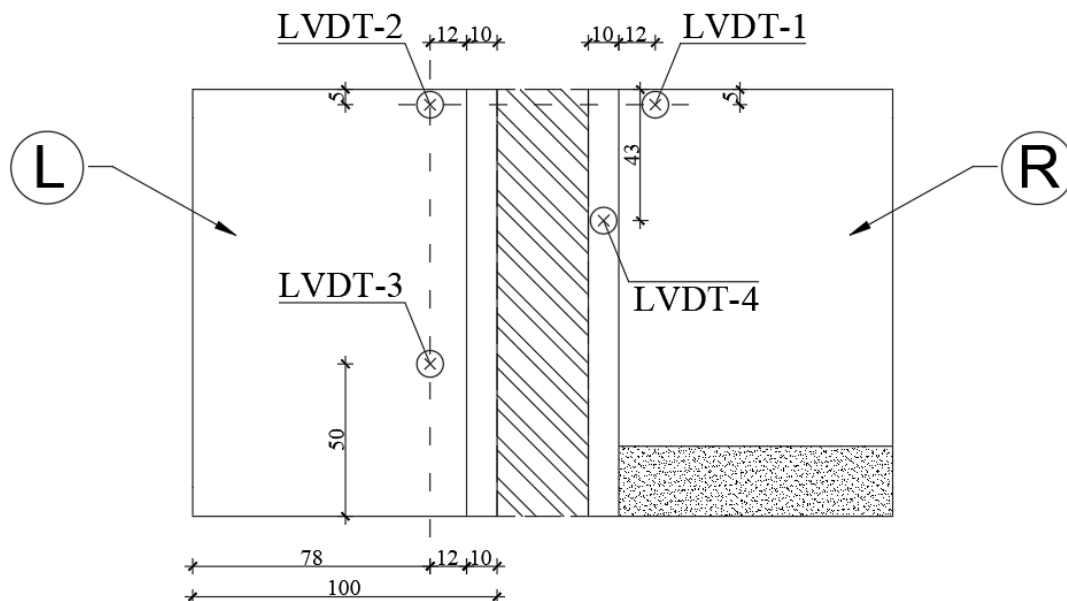
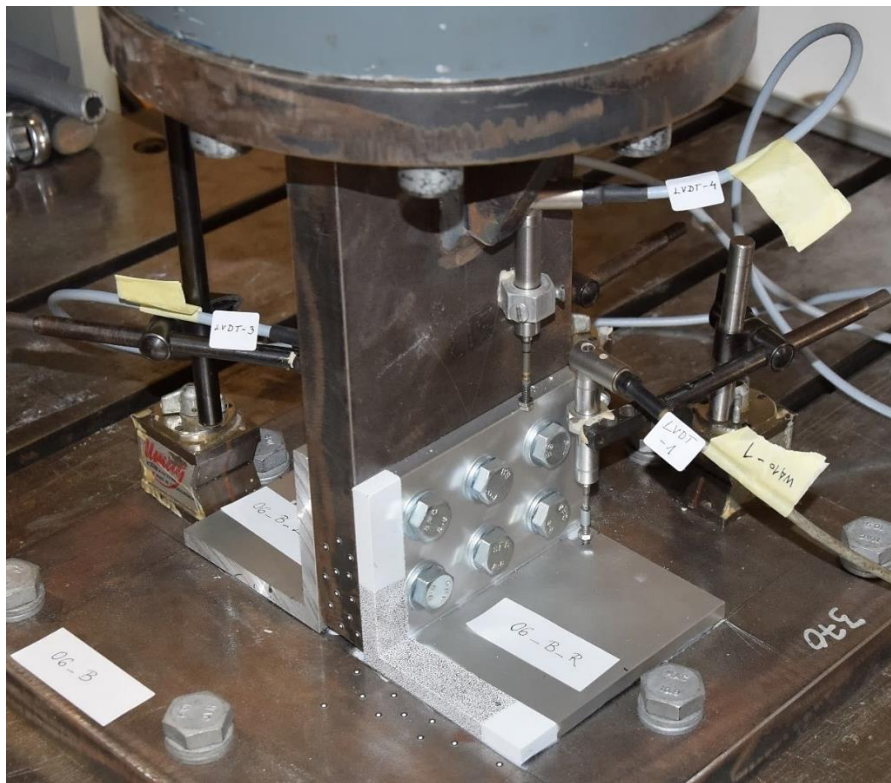
Donja čelična ploča dimenzija 350x370 mm, izrađena je s rupama za vijke promjera 18 mm s ciljem da se vijčano pričvrsti za podnožje preše i time čini za potrebe ispitivanja apsolutno krutu podlogu. Na navedeni se element lijepe aluminijski kutnici 100x100x10 mm međusobno udaljeni 30 mm kako bi između njih nalegla čelična ploča debljine 30 mm. Na kutnicima su izvedene rupe za vijke promjera 13 mm, kako bi se naprezanje i u konačnici lom koncentrirao na lijepljeni dio. Prethodno spomenuta čelična ploča izrađena je s čeličnim ukrutama te rupama za vijke promjera 18 mm. Ploča je u konačnici vijčano spojena za gornju kružnu ploču promjera 260 mm te debljine 30mm koja se ujedno montira na glavu preše. Elementi konfiguracije prikazani su na slici 4.2.



**Slika 4.2** Elementi konfiguracije za laboratorijsko ispitivanje

Vertikalni pomaci su mjereni induktivnim osjetilima. Induktivna osjetila za mjerenje pomaka, odnosno LVDT (Linear Variable Differential Transformer - linearno promjenjivi diferencijalni transformator), koriste se pri mjerenju pomaka na konstrukcijama. LVDT osjetilima mjere se pomaci u opsegu od nekoliko nm do nekoliko cm, s granicama pogreške  $\pm 0,5\%$  i linearnošću  $\pm 0,5\%$ . Prilikom montaže na konstrukciju ili uzorak, jezgra LVDT-a se osloni ili zalijepi na konstrukciju na mjesto gdje se želi mjeriti pomak, a tijelo se fiksira na odgovarajući stalak. Mjerni su uređaji postavljeni na četiri mjerna mjesta. LVDT 1 i 2 postavljeni su simetrično u odnosu na os čelične ploče - 12 mm udaljeni od kraka kutnika pričvršćenog za čeličnu ploču te 5 mm uvučeni od ruba kutnika okomitog na krak. LVDT 3 je postavljen u istoj osi kao i prva dva mjerna uređaja, ali uvučen 50 mm od ruba kutnika, dok je LVDT 4 postavljen na sami krak kutnika te uvučen 43 mm od ruba. Razmještaj mjernih uređaja prikazan je na slici 4.3.

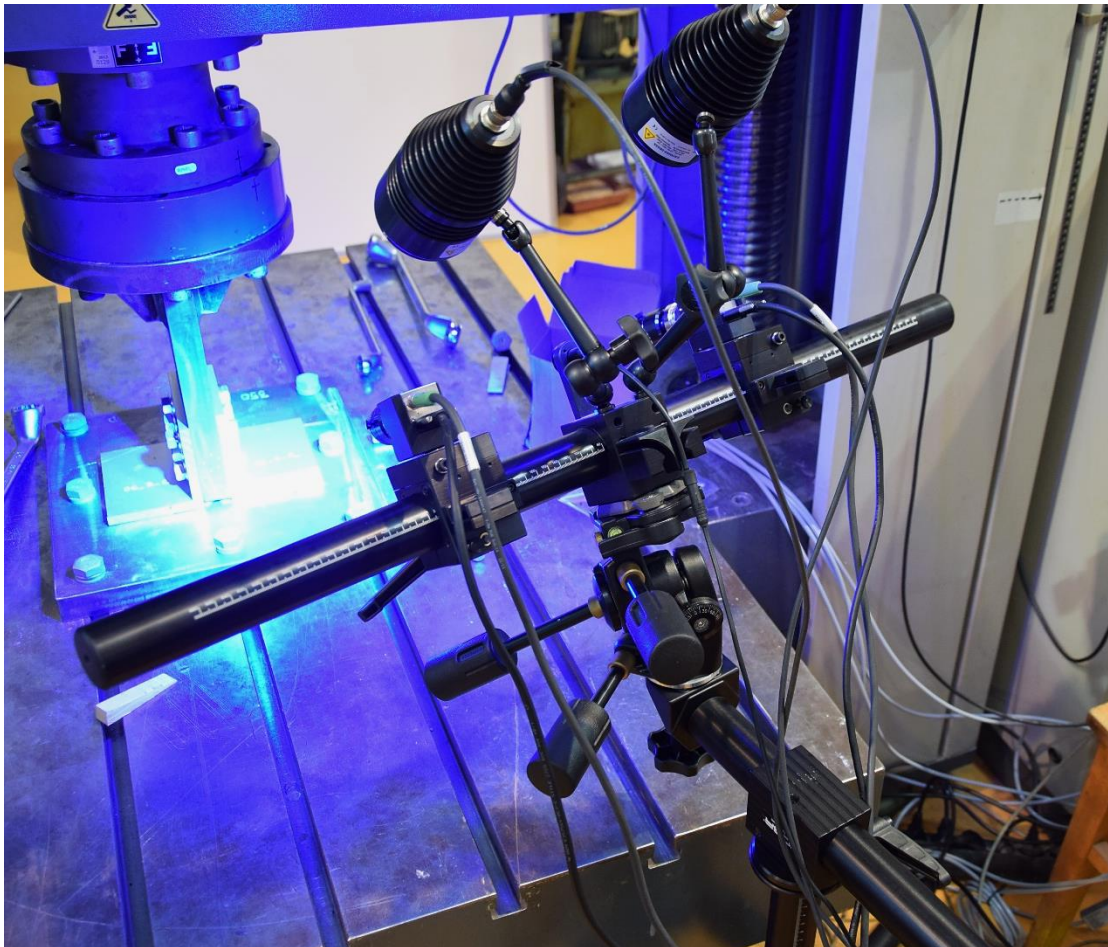




Slika 4.3 Razmještaj LVDT mjernih uređaja

Osim induktivnih osjetila, vertikalni su pomaci mjereni pomoću ARAMIS kamera. ARAMIS senzori su sustavi stereo kamera koji pružaju precizne 3D koordinate temeljene na triangulaciji. Sustav nudi stabilna rješenja za analizu uzoraka od samo nekoliko milimetara do strukturalnih komponenti od nekoliko metara. Mjerna rezolucija seže do submikrometarskog raspona neovisno

o geometriji i temperaturi uzorka. Položaj senzora u odnosu na ispitivani uzorak prikazan je na slici 4.4.



**Slika 4.4** Položaj ARAMIS kamera

#### **4.2.2. Geometrijska svojstva kutnika**

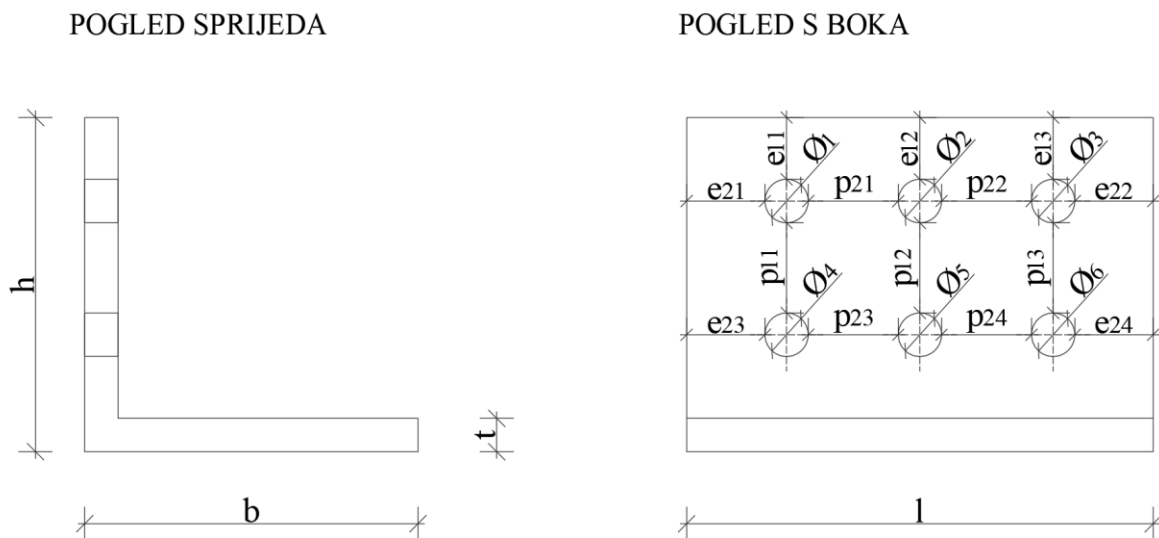
Svi uzorci sastoje se od aluminijskog kutnika L 100x100x10, duljine 140 mm koji se ljepilom spaja na čeličnu ploču debljine 30 mm.

Korištena aluminijska legura je EN AW 6060 T66. Ispitivanjem mehaničkih svojstava uzoraka utvrđeno je da uzorci otkazuju krto pri izlaganju vlačnoj sili od 74 kN.

Kutnici su na kraku duljine 'h' pričvršćeni za čelični sklop vijcima za koje su predviđene rupe nominalnog promjera 13 mm, no mjerenjem te osrednjavanjem rezultata dobiven je iznos promjera od 12,37 mm. Preko površine kraka duljine 'b', kutnik je zalijepljen za donju ploču dimenzija 370x350x30 mm.

Za potrebe ispitivanja, šest donjih ploča se koristilo u 12 ispitivanja tako da se jedna strana koristila za dva tipa ljepila, dok se druga strana koristila za preostala dva tipa ljepila. Donja je ploča za podlogu statičkog uređaja pričvršćena vijcima te smo ju u daljnjem ispitivanju smatrali apsolutno krutom.

Na slici 4.5 prikazane su oznake pojedinih dimenzija ispitnih uzoraka, a odgovarajuće vrijednosti istih dane su u tablicama 4.1 i 4.2.



Slika 4.5 Uzorci kutnika s naznačenim oznakama mjerenih dimenzija

**Tablica 4.1** Izmjerena geometrijska svojstva kutnika

Oznaka / Dimenzije [mm]	b	h	t	l	Φ1	Φ2	Φ3	Φ4	Φ5	Φ6
01-A-R	100,19	100,23	10,13	140,00	12,66	12,77	12,82	12,72	12,73	12,75
01-A-L	100,14	100,23	10,10	140,35	12,67	12,66	12,68	12,72	12,78	12,38
02-A-R	100,18	100,17	10,11	140,14	12,67	12,70	12,70	12,75	12,70	12,61
02-A-L	100,18	100,21	10,09	140,27	12,65	12,65	12,79	12,72	12,68	12,65
03-A-R	100,14	100,25	10,08	140,21	12,60	12,74	12,75	12,59	12,62	12,77
03-A-L	100,14	100,15	10,17	140,08	12,60	12,75	12,78	12,74	12,74	12,79
04-B-R	100,17	100,19	10,08	140,42	12,66	12,72	12,80	12,65	12,79	12,78
04-B-L	100,23	100,16	10,08	140,03	12,69	12,77	12,60	12,56	12,64	12,63
05-B-R	100,13	100,18	10,08	140,18	12,74	12,76	12,61	12,74	12,75	12,66
05-B-L	100,18	100,21	10,10	140,05	12,70	12,61	12,77	12,73	12,77	12,76
06-B-R	100,25	100,12	10,10	140,32	12,47	12,68	12,79	12,66	12,74	12,82
06-B-L	100,14	100,10	10,22	140,07	12,71	12,70	12,80	12,64	12,65	12,79
07-C-R	100,13	100,24	10,10	140,06	12,58	12,77	12,70	12,71	12,71	12,68
07-C-L	100,20	100,15	10,09	140,23	12,71	12,53	12,57	12,72	12,70	12,50
08-C-R	100,20	100,12	10,08	140,16	12,68	12,59	12,75	12,70	12,55	12,81
08-C-L	100,12	100,31	10,08	140,26	12,59	12,62	12,68	12,65	12,45	12,79
09-C-R	100,17	100,12	10,06	140,00	12,73	12,63	12,66	12,50	12,67	12,65
09-C-L	100,16	100,21	10,07	140,13	12,67	12,64	12,39	12,75	12,70	12,71
10-A-R	100,14	100,25	10,08	140,28	12,24	12,67	12,71	12,59	12,69	12,79
10-D-L	100,16	100,15	10,08	140,17	12,67	12,49	12,74	12,60	12,49	12,74
11-D-R	100,18	100,29	10,08	140,34	12,54	12,59	12,77	12,75	12,49	12,82
11-D-L	100,21	100,28	10,07	140,00	12,64	12,51	12,36	12,12	12,21	12,20
12-D-R	100,16	100,15	10,05	140,01	12,75	12,70	12,73	12,70	12,68	12,75
12-D-L	100,18	100,27	10,16	140,30	12,75	12,74	12,68	12,74	12,76	12,57
<b>Srednja vrijednost</b>	100,17	100,20	10,10	140,17	12,64	12,67	12,69	12,66	12,65	12,68

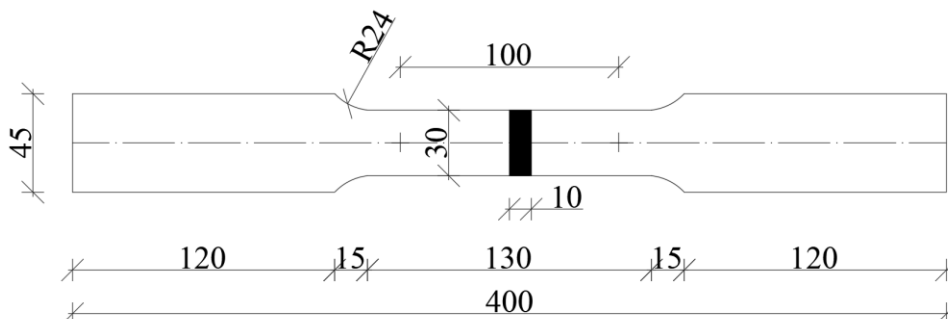
**Tablica 4.2** Izmjerena geometrijska svojstva kutnika

Oznaka / Dimenzije [mm]	e21	p21	p22	e22	e23	p23	p24	e24	e11	p11	e12	p12	e13	p13
01-A-R	24,13	27,43	27,11	23,15	24,27	27,20	26,99	23,23	18,56	27,28	18,63	27,17	18,64	27,19
01-A-L	24,10	27,16	27,24	23,49	24,31	26,98	27,01	23,80	18,62	27,30	18,59	27,25	18,77	27,26
02-A-R	24,31	27,14	27,35	23,31	24,31	27,03	27,14	23,49	18,70	27,20	18,57	27,42	18,62	27,16
02-A-L	24,24	26,96	27,41	23,32	24,23	27,17	27,12	23,11	18,64	27,18	18,56	27,17	18,62	27,20
03-A-R	24,25	16,96	27,46	23,33	24,10	27,33	27,02	23,54	18,58	27,24	18,54	27,32	18,63	27,21
03-A-L	24,23	27,19	27,04	23,23	24,19	27,13	27,05	23,34	18,50	27,25	18,61	27,22	18,64	27,17
04-B-R	23,83	27,50	26,80	23,88	24,17	27,42	27,00	24,13	18,60	27,28	18,66	27,20	18,72	27,23
04-B-L	24,14	27,05	27,02	23,58	23,98	27,00	27,09	23,67	18,37	27,20	18,52	27,21	18,49	27,22
05-B-R	24,08	27,21	27,29	23,38	24,29	27,04	27,13	23,59	18,57	27,25	18,57	27,21	18,65	27,17
05-B-L	24,27	27,16	27,44	23,44	24,30	27,29	27,23	23,51	18,55	27,21	18,60	27,23	18,79	27,41
06-B-R	24,60	27,52	27,36	23,78	24,48	27,55	27,52	24,00	18,75	27,60	18,63	27,65	18,71	27,46
06-B-L	24,56	27,38	27,40	23,73	24,14	27,03	27,05	23,70	18,45	27,27	18,42	27,22	18,48	27,19
07-C-R	24,38	27,36	27,68	23,38	24,36	27,68	27,44	23,70	18,78	27,60	18,76	27,58	18,86	27,74
07-C-L	24,65	17,45	27,84	23,92	24,24	27,66	27,52	23,89	18,71	27,70	18,69	27,61	18,78	27,66
08-C-R	24,45	27,42	27,48	23,80	24,36	27,36	27,51	23,86	18,67	27,60	18,59	27,66	18,69	27,56
08-C-L	24,45	27,62	27,58	23,82	21,20	27,56	27,63	24,05	18,78	27,82	18,80	27,68	19,03	27,60
09-C-R	24,44	27,37	27,26	23,73	24,90	27,36	27,48	23,74	18,67	27,62	18,90	27,77	18,68	28,23
09-C-L	24,64	27,16	27,36	23,70	24,76	27,46	27,33	23,81	18,77	27,64	18,50	27,68	18,70	27,61
10-A-R	24,62	27,40	27,59	23,63	24,21	27,45	27,50	24,07	18,76	27,63	18,76	27,61	18,76	27,57
10-D-L	24,58	27,96	27,35	24,05	24,31	27,57	27,79	24,07	18,64	27,63	18,59	27,58	18,74	27,59
11-D-R	24,50	27,39	27,45	23,93	24,44	27,54	27,54	23,94	18,74	27,69	18,88	27,74	18,91	27,55
11-D-L	24,54	27,41	27,66	23,55	24,42	27,43	27,72	23,75	18,87	27,81	18,78	27,62	19,11	27,83
12-D-R	23,58	27,29	27,23	23,51	23,49	27,30	27,20	23,54	18,68	27,30	18,56	27,55	18,56	27,32
12-D-L	23,92	27,27	26,80	24,10	23,85	27,02	26,88	26,81	18,40	27,75	18,60	27,15	18,60	27,14
<b>Srednja vrijednost</b>	24,31	26,49	27,34	23,61	24,14	27,32	27,29	23,85	18,64	27,46	18,64	27,44	18,72	27,43

#### 4.2.3. Ispitivanje mehaničkih svojstava aluminijskih uzoraka

Prije početka provedbe ispitivanja potrebno je provesti ispitivanje osnovnog materijala koji je korišten. U svrhu utvrđivanja stvarnih svojstava materijala, provedena je vlačna proba aluminijskih epruveta prema normi EN 10002:2001. Na slici 4.6. prikazan je uzorak aluminijske epruvete s dimenzijama prikazanim u milimetrima. Aluminijski uzorci, epruvete, izvađeni su iz kutnika dimenzija 100x100x10 mm. Ispitivanje se provodilo na Zwick&Roell statičkom uređaju za ispitivanje kapaciteta  $\pm 600$  kN, brzine unosa opterećenja 0,001 mm/min - 200 mm/min, s maksimalnim pomakom traverze od 1700 mm. Uzorak je bio uglavljen između mehaničkih čeljusti preko kojih se ujedno unosi vlačna sila. Uređaj je pokrenut preko elektromotora, a samo upravljanje vrši se putem računala i programskog paketa TestXpert. Mjerenje deformacija vrši se

pomoću ekstenzometra na mjernoj duljini unaprijed određenoj na temelju veličine poprečnog presjeka ispitnog uzorka. S ciljem izbjegavanja mogućih oštećenja, nakon dosezanja maksimalne sile i pri samom početku suženja poprečnog presjeka, ekstenzometri se odmiču od uzorka te se mjerenje deformacije vrši samo na mjernom uređaju.



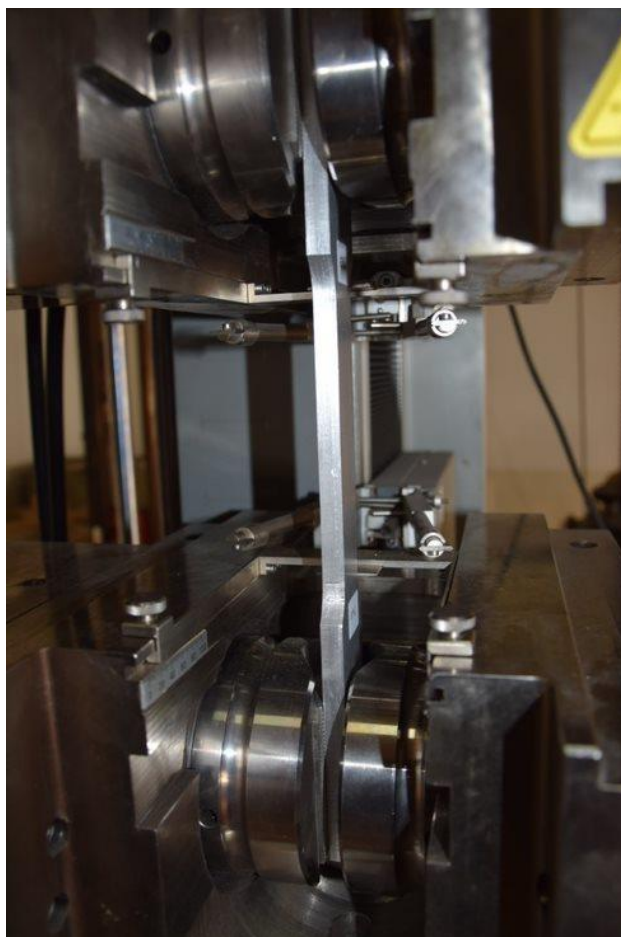
**Slika 4.6** Dimenzije i oblik uzorka za ispitivanje materijala

Ispitivanje se provelo na 7 uzoraka te su za svakog od njih izmjerene debljine i širine uzorka duž mjerne duljine. Dimenzije aluminijskih uzoraka prikazane su u tablici 4.2. Na slici 4.7. prikazano je ispitivanje aluminijskih epruveta, dok slika 4.8. prikazuje slomljene aluminijske uzorke. U tablici 4.3. dani su rezultati ispitivanja aluminijskih uzoraka te prikazuju granicu popuštanja ( $f_y$ ) i čvrstoću ( $f_u$ ) izražene u MPa za svaki pojedini uzorak. Slika 4.9. prikazuje rezultate ispitivanja aluminijskih uzoraka, odnosno predstavlja odnos inženjerskih naprezanja i deformacija za pojedini vlačni uzorak.

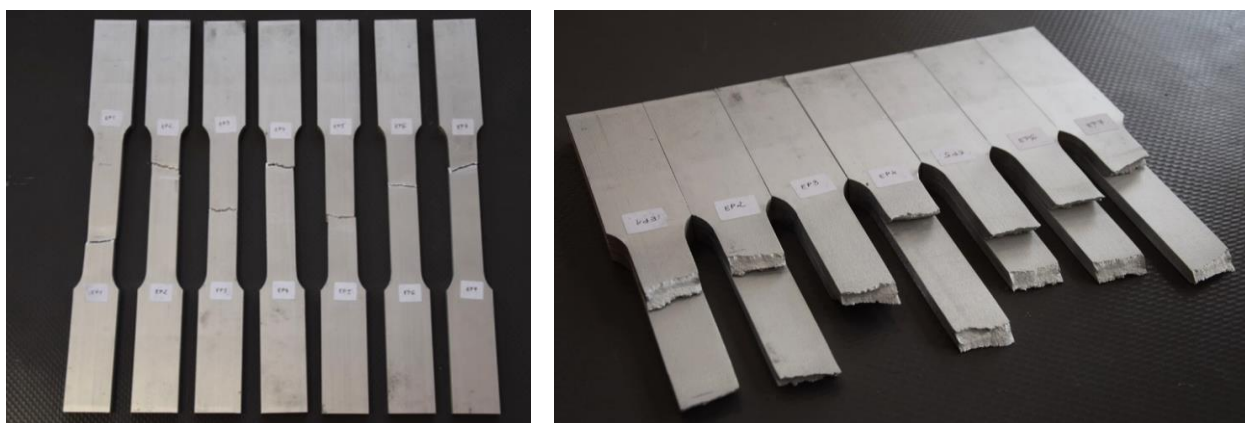
**Tablica 4.3** Izmjerena geometrijska svojstva pojedinih uzoraka materijala

Oznaka / Dimenzije [mm]	b1	b2	t
<b>EP1</b>	45,09	30,11	10,11
<b>EP2</b>	45,12	30,09	10,14
<b>EP3</b>	45,12	30,12	10,15
<b>EP4</b>	45,20	30,19	10,15
<b>EP5</b>	45,17	30,22	10,14
<b>EP6</b>	45,15	30,19	10,12
<b>EP7</b>	45,19	30,15	10,11
<b>Srednja vrijednost</b>	45,15	30,15	10,13





**Slika 4.7** Vlačna proba aluminijskih epruveta

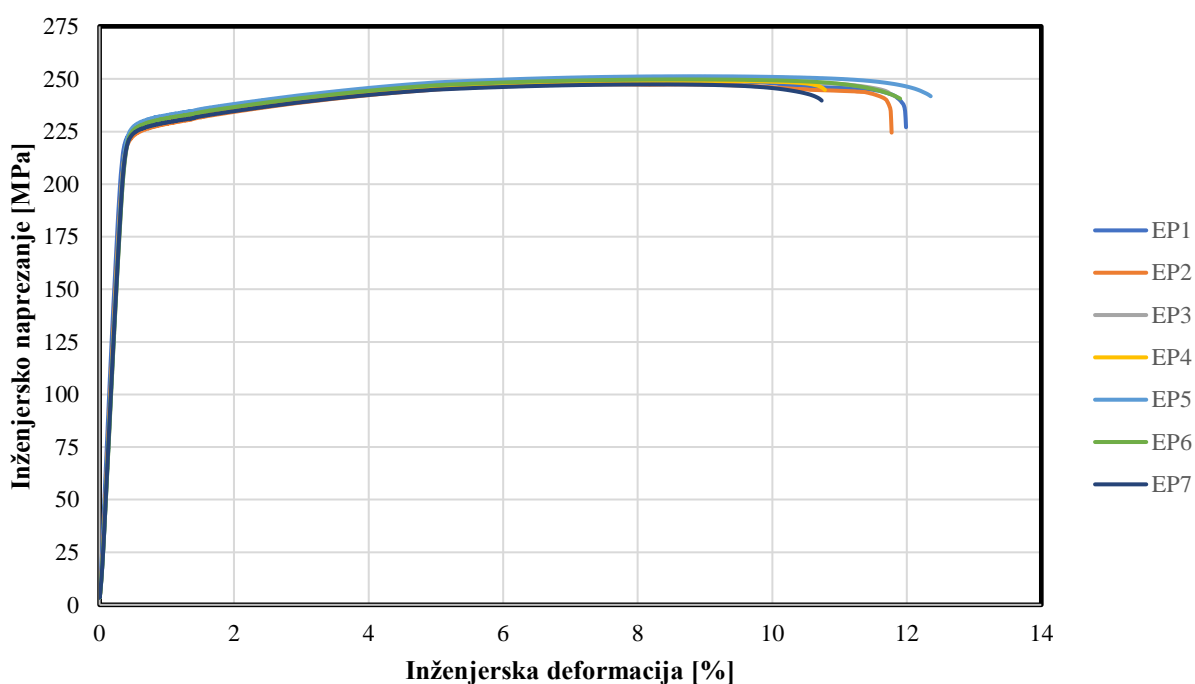


**Slika 4.8** Uzorci nakon vlačnog ispitivanja

Tablica 4.4 Izmjerena mehanička svojstva uzoraka aluminija

Uzorak	EP1	EP2	EP3	EP4	EP5	EP6	EP7	Srednja vrijednost
Dogovorna granica popuštanja $f_o$ [MPa]	226	224	226	226	229	227	225	226
Čvrstoća $f_u$ [MPa]	249	248	249	249	251	250	247	249

### Rezultati ispitivanja epruveta



Slika 4.9 Rezultati ispitivanja uzoraka aluminija

#### 4.2.4. Tehničke informacije o ljepilu

Za navedena ispitivanja korištena su 4 tipa ljepila. Analizirajući promatranu problematiku te dostupnu konfiguraciju i ispitivane materijale, u dogovoru sa zaposlenicima iz Sika Croatia d.o.o., odlučili smo koristiti SikaFast-555 L10, SikaPower-4720, Sikadur-330 i Sikadur-31 CF Normal. Karakteristike pojedinog ljepila dane su u nastavku.

- **SikaFast-555 L10**

SikaFast-555 L10 je dvokomponentno ljepilo s akrilatnom osnovom gustoće 1,2 kg/l. Namijenjen je za brzo lijepljenje i može zamijeniti mehaničko fiksiranje poput zakovica, vijaka i zavarivanja.



Prednosti proizvoda su brzi razvoj čvrstoće, ima odličnu prionjivost na većinu podloga, visoku čvrstoću i otpornost.

Volumno se dozira u omjerima 10:1. Prigodan je za ugradnju pri temperaturama od +5°C do +40°C. Vlačna čvrstoća nakon sušenja od 7 dana pri temperaturi od 23°C i relativnoj vlazi zraka od 50% iznosi 11 MPa. Modul elastičnosti u istim uvjetima iznosi 200 MPa, dok je izduženje do puknuća 200%. Zbog svojih karakteristika svrstan je u grupu duktilnih ljepila [17].

- **SikaPower-4720**

SikaPower-4720 je dvokomponentno epoksidno ljepilo gustoće ~1,1 kg/l. Pogodno je za lijepljenje panela izloženim velikom dinamičkom naprezanju, za strukturalne dijelove u kombinaciji s točkastim zavarivanjem ili zakovicama. Najčešće podloge su aluminij i hladnovaljani čelik te stakloplastika. Prednosti proizvoda su visoka čvrstoća, dobro prijanjanje na raznim podlogama bez predpremaza, ima dugo otvoreno vrijeme rada, može se točkasto zavarivati.

Volumenski omjer miješanja epoksidne i aminske komponentne je 2:1. Prigodan je za korištenje pri temperaturama od +10°C do +30°C. U uobičajenim uvjetima ima vlačnu čvrstoću 24 MPa i modul elastičnosti 1900 MPa. Izduženje do puknuća iznosi 3% debljine sloja što ga također čini duktilnim tipom ljepila. Minimalna debljina sloja iznosi 0,25 mm zbog svoje zrnate strukture koja ujedno omogućava ravnomjerno nanošenje sloja [18].

- **Sikadur-330**

Sikadur-330 je dvokomponentna tiksotropna epoksidna smola za impregnaciju gustoće 1,3 kg/l. Koristi se kao impregnacijska smola za SikaWrap tkaninu za suhi postupak ugradnje, kao temeljni premaz za mokri postupak ugradnje i kao konstruktivno ljepilo za lijepljenje SikaCarboDur lamela na ravne podloge. Neke od prednosti proizvoda su lako miješanje i ugradnja gleterom i impregnacijskim valjkom, ima dobru prionjivost na mnoge podloge i visoke mehaničke karakteristike.

Komponente se doziraju težinski u omjeru 4:1. Postojan je pri temperaturama od -40°C do +45°C. Nakon sušenja od 7 dana pri temperaturi od 23°C i relativnoj vlazi zraka od 50%, vlačna čvrstoća iznosi 30 MPa, a modul elastičnosti 4500 MPa. Izduženje pri slomu u istim uvjetima iznosi 0,9% ±0.1 % debljine sloja što ga čini krtim ljepilom [19].

- **Sikadur-31 CF Normal**

Sikadur-31 CF Normal je dvokomponentno epoksidno ljepilo za tankoslojno lijepljenje. Ima dvije namjene. Kao strukturalno ljepilo i mort koristi se za betonske elemente, tvrdi prirodni kamen, keramiku, mort, razne metale poput čelika, željeza i aluminija, drvo, poliester i staklo. Kao

reparaturni mort i ljepilo koristi se za kuteve i rubove, zapunjavanje rupa i šupljina, te za ispunjavanje fuga i pukotina. Neke od prednosti korištenja navedenog ljepila su jednostavnost miješanja i primjene, vrlo dobra prionjivost, visoke konačne čvrstoće u ranoj fazi, nepropusnost na tekućine i vodenu paru, te dobra kemijska otpornost i otpornost na habanje.

Komponente se doziraju težinski ili volumno u omjeru 2:1, a njihova gustoća u zamiješanom stanju iznosi 1,9 kg/l. Proces nanošenja ljepila odvija se pri temperaturama od +10°C do +30°C. Nakon sušenja od 7 dana pri temperaturi od 23°C vlačna čvrstoća iznosi 21 MPa, modul elastičnosti nakon 14 dana pri istoj temperaturi iznosi ~5000 MPa. Produljenje prilikom sloma nakon 7 dana iznosi  $0,4 \pm 0,1$  %. Maksimalna debljina sloja je 30 mm [20].

#### **4.2.5. Nanošenje ljepila na uzorke kutnika**

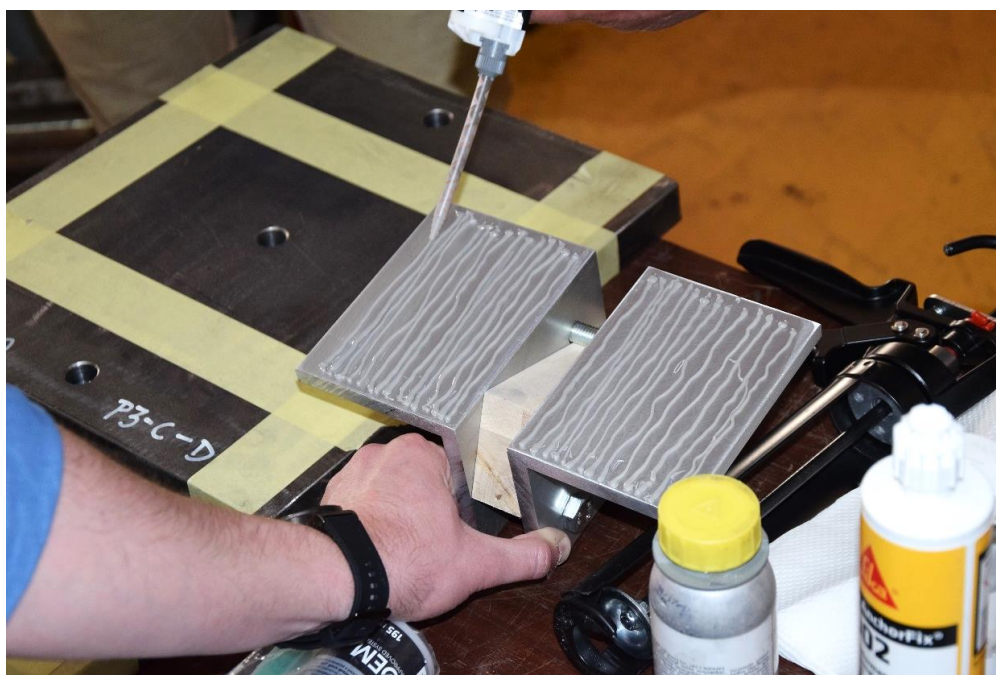
Prije početka ispitivanja, postupak lijepljenja aluminijskih kutnika za donje ploče proveden je u 2 stadija zbog prethodno spomenutog broja ploča koji iziskuje njihovo korištenje u dva navrata, između kojih je potrebna mehanička obrada površina prije nastavka s ispitivanjima. Pri samom nanošenju ljepila prisutni su bili gosp. Juranović te gosp. Grgec iz Sika Croatia d.o.o. čije smo materijale koristili. Prvo se nanošenje ljepila odvijalo u Laboratoriju za ispitivanje konstrukcija na Građevinskom fakultetu u Zagrebu 19. svibnja 2022. godine, dok se drugo odvijalo 07. lipnja 2022. godine.

Od ukupno 12 parova aluminijskih kutnika, u prvom su stadiju korištena tri za ljepilo SikaPower 4720 te tri za ljepilo SikaFast 555. Prije nanošenja ljepila, površine čelične ploče i aluminijskog kutnika potrebno je ohrapaviti kako bi se osiguralo prijanjanje i dobro očistiti alkoholom od prljavštine i masnoće.

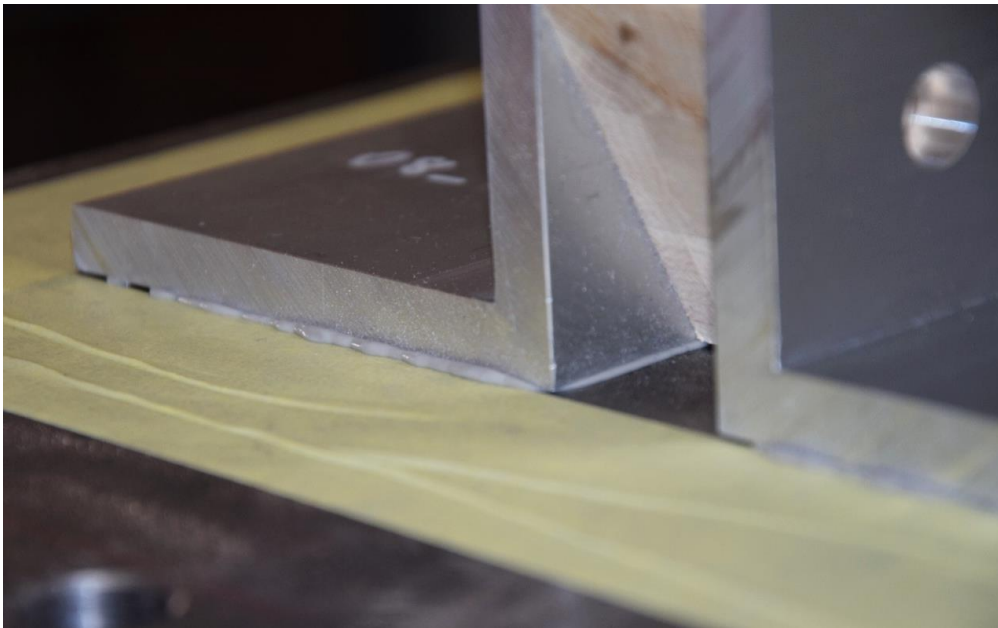
Prije nanošenja ljepila SikaFast 555, na čelične je ploče nanesen temeljni premaz koji relativno brzo ishlapi (unutar jedne minute) stoga nije bilo potrebno obraćati pažnju na samo vrijeme prije nanošenja ljepila. Slika 4.10. prikazuje ljepila SikaFast 555 i SikaPower 4270, dok slika 4.11. predstavlja proces nanošenja ljepila SikaFast 555. Na uzorak 01\_A, uz pomoć statičkog miksera, ljepilo je nanoseno u poprečnom smjeru u sloju debljine 0,2 do 0,3 mm, dok je na uzorak 03\_A u istoj debljini nanoseno u uzdužnom smjeru. Na uzorak 02\_A nanosen je sloj ljepila od 0,5 mm u kombinaciji uzdužnog i poprečnog nanošenja ljepila. Otvoreno vrijeme navedenog ljepila jest 5-10 minuta, što znači da 70% konačne čvrstoće ljepilo ostvari unutar tog vremenskog perioda. Preporučeno je lijepljene spojeve izložiti opterećenju najranije nakon 24h od nanošenja ljepila. Zalijepljeni aluminijski kutnik prikazan je na slici 4.12.



Slika 4.10 Ljepila korištena u prvom stadiju nanošenja

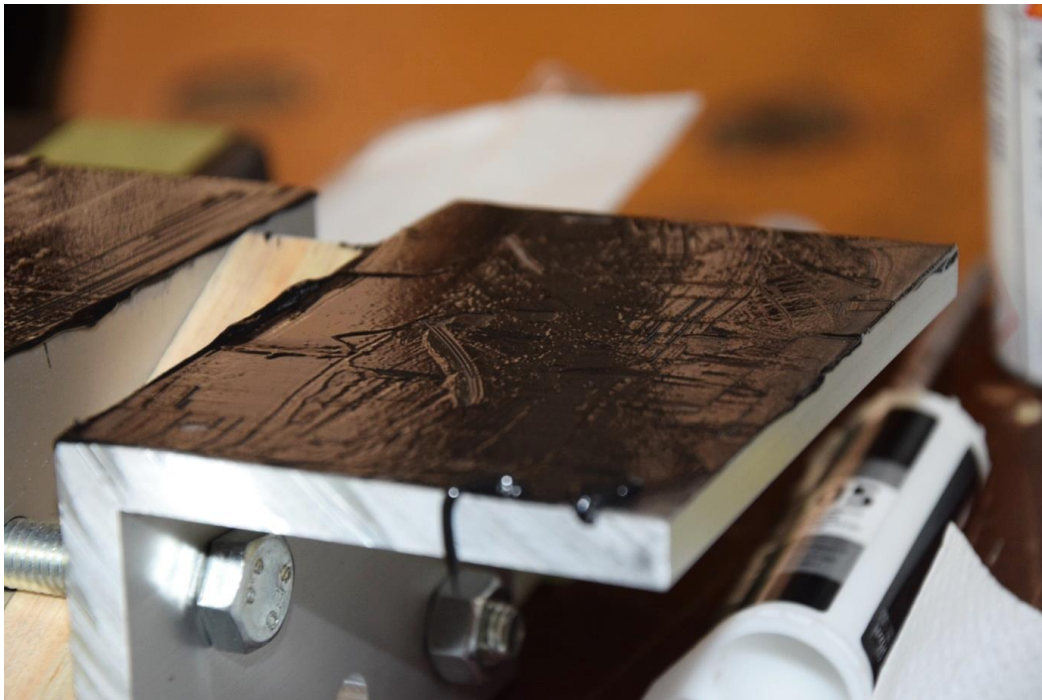


Slika 4.11 Nanošenje ljepila SikaFast 555 na aluminijski kutnik

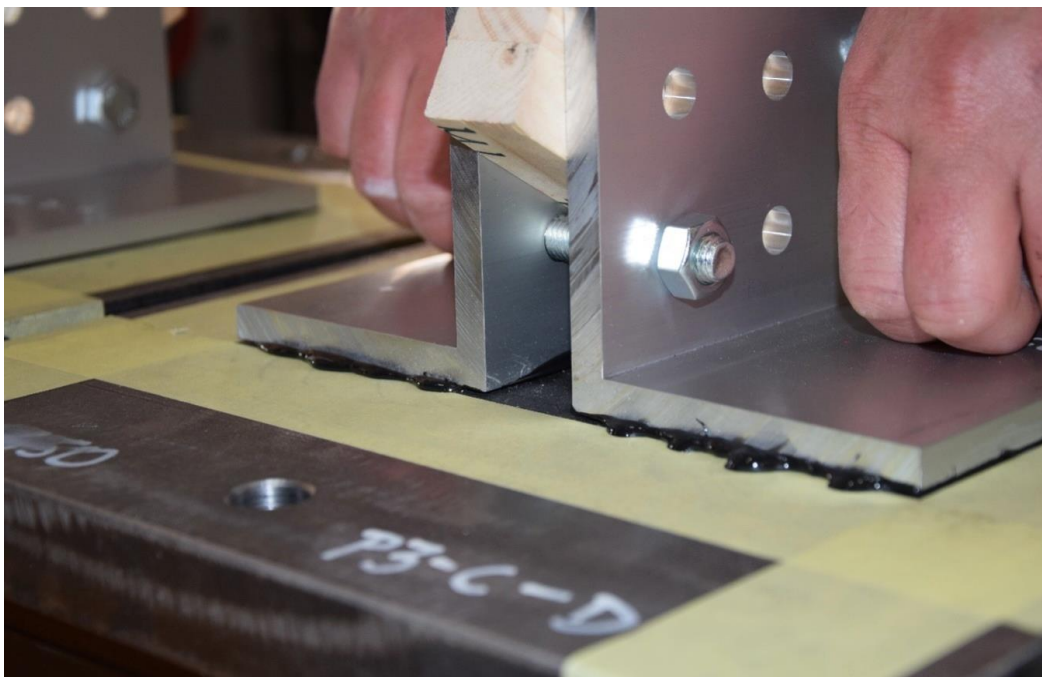


**Slika 4.12** Aluminijski kutnik zalijepljen ljepilom SikaFast 555 na čeličnu ploču

Prije nanošenja ljepila SikaPower 4720, potrebno je nanijeti temeljni premaz koji je sastavom sličan izopropilnim alkoholima te je potrebno pričekati 5 minuta da ishlapi prije pristupanja samom lijepljenju. Navedeno ljepilo sadrži staklene kuglice promjera 0.25 mm čime je unaprijed određena debljina samog sloja, odnosno, nakon pritiskanja aluminijskog kutnika na čeličnu ploču, višak će se ljepila istisnuti duž bočnih stranica kutnika. Ljepilo je nanoseno gleterom, tako da se razvlači po površini kutnika. Uzorci 05\_B i 06\_B nanoseni su u sloju jednakih debljina, ~0,25 mm, dok je uzorak 04\_B nanosen u debljem sloju od 0,5 mm. Otvoreno je vrijeme 45 minuta, sva tri uzorka su zalijepljena u isto vrijeme te je eventualno repozicioniranje moguće unutar prvih 90 minuta, no nakon toga važno je zalijepljene uzorke ne pomicati naredna 4 sata. Proces nanošenja te istiskivanja viška ljepila prikazani su na slikama 4.13. i 4.14.



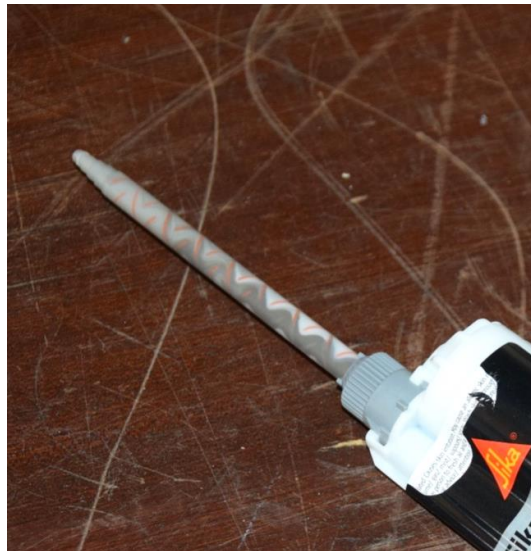
**Slika 4.13** Nanošenje ljepila SikaPower 4720 na aluminijski kutnik



**Slika 4.14** Istiskanje viška ljepila SikaPower 4720

Za ljepilo SikaFast 555 kao i za ljepilo SikaPower 4720, pomoću statičkog miksera dvije se komponente prolaskom kroz unakrsno postavljene prepreke unutar plastičnog aplikatora miješaju kako prikazuje slika 4.15. Statički je mikser nakon apliciranja potrebno baciti jer više nije upotrebljiv te je važno napomenuti kako se prvih par centimetara ljepila koja se iz aplikatora istisnu baca, obzirom da još nisu u potpunosti izmiješani.





**Slika 4.15** Statički mikser korišten kod ljepila SikaFast 555 te SikaPower 4720

U drugom su stadiju korištena tri para aluminijskih kutnika za ljepilo Sikadur 31CF-Normal te tri para za ljepilo Sikadur 330. Oba ljepila prikazana su na slici 4.16. Prije nanošenja ljepila, površine čelične ploče i aluminijskog kutnika također je potrebno ohrapaviti te dobro očistiti alkoholom. Nakon mehaničke obrade površine brušenjem i čišćenjem nije potrebno nanositi predpremaz prije ljepila Sikadur 330. Na uzorke 07\_C, 08\_C i 09\_C slojevi ljepila nanošeni su uz pomoć rebrastog gletera, kako prikazuje slika 4.17., koji omogućuje precizniju kontrolu debljine sloja. Na uzorak 07\_C nanesen je sloj debljine 1,2 mm, a na uzorak 08\_C sloj debljine 0,8 mm, dok je za uzorak 09\_C korišten grublji gleter kako bi se dobila debljina od 1,5 mm. Ljepilo nanosimo i na ploču i na kutnik.



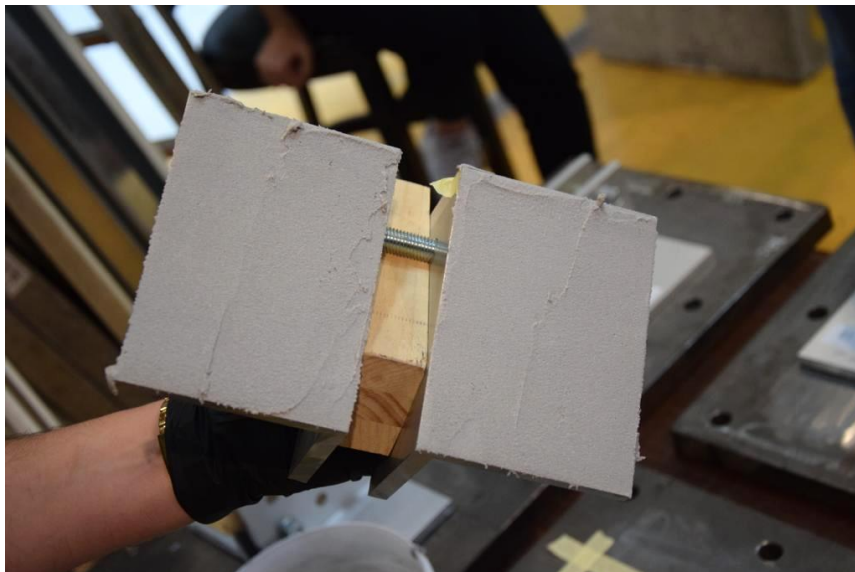
**Slika 4.16** Ljepila korištena u drugom stadiju nanošenja



**Slika 4.17** Nanošenje ljepila Sikadur 330 na aluminijski kutnik

Površinu je potrebno mehanički obraditi kako bi se osigurala hrapavost i kako bi se utvrdilo da je površina čista. Prije lijepljenja ljepilom Sikadur 31 CF-Normal, nije potrebno nanositi predpremaz. Za razliku od Sikadura 330, ljepilo sadrži zrna. Zbog granulometrije, idealna bi debljina sloja bila 3 - 4 mm.

Na uzorke 10\_D, 11\_D i 12\_D slojevi ljepila nanošeni su uz pomoć rebrastog gletera koji omogućuje precizniju kontrolu debljine sloja. Na uzorak 10\_D nanesen je sloj debljine 2,5 mm i na čeličnu ploču i na krakove aluminijskog kutnika. Na uzorak 11\_D, za razliku od prethodnog uzorka, nanesen je sloj od 1,8 mm samo na krak kutnika, a na uzorak 12\_D nanesen je sloj od 2mm debljine kako je prikazano na slici 4.18.



**Slika 4.18** Nanošenje ljepila Sikadur 31 CF-Normal na aluminijski kutnik

Važno je napomenuti kako su oba ljepila korištena u drugoj etapi dvokomponentna te kao takva iziskuju adekvatno miješanje A i B komponente. Kod ljepila Sikadur 330 komponente se doziraju težinski u omjeru 4:1 te je za naše potrebe to iznosilo 200 g komponente A te 50 g komponente B. Za ljepilo Sikadur 31 CF-Normal, komponente se doziraju težinski ili volumno u omjeru 2:1, odnosno u našem slučaju 160 g komponente A te 80 g komponente B. Sam proces miješanja komponenti oba ljepila prikazan je na slici 4.19. a) i b).



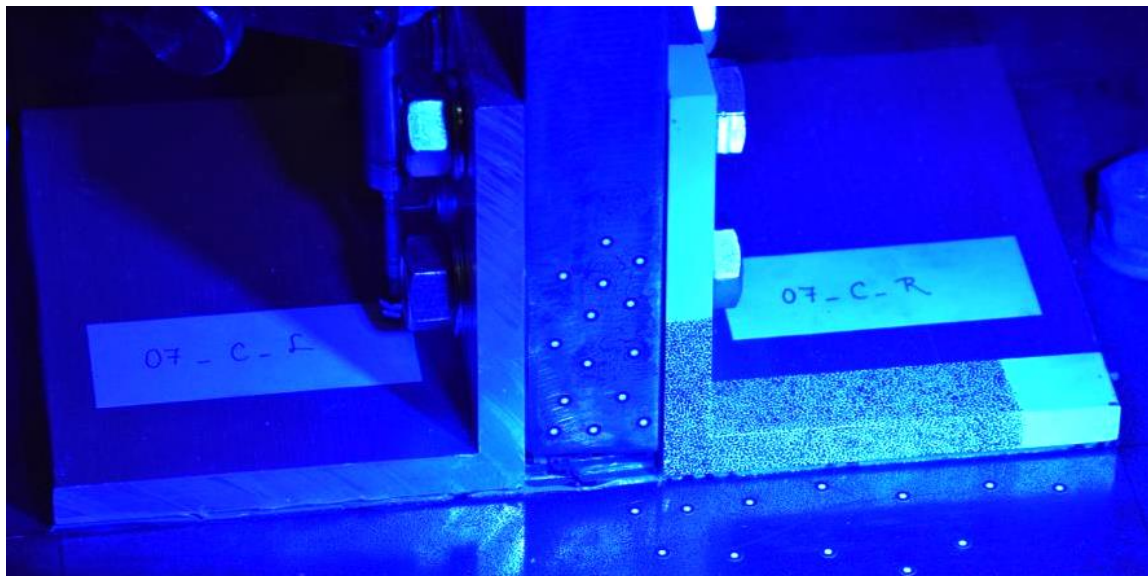
**Slika 4.19** Miješanje A i B komponenti ljepila a) Sikadur 330 te b) Sikadur 31 CF-Normal



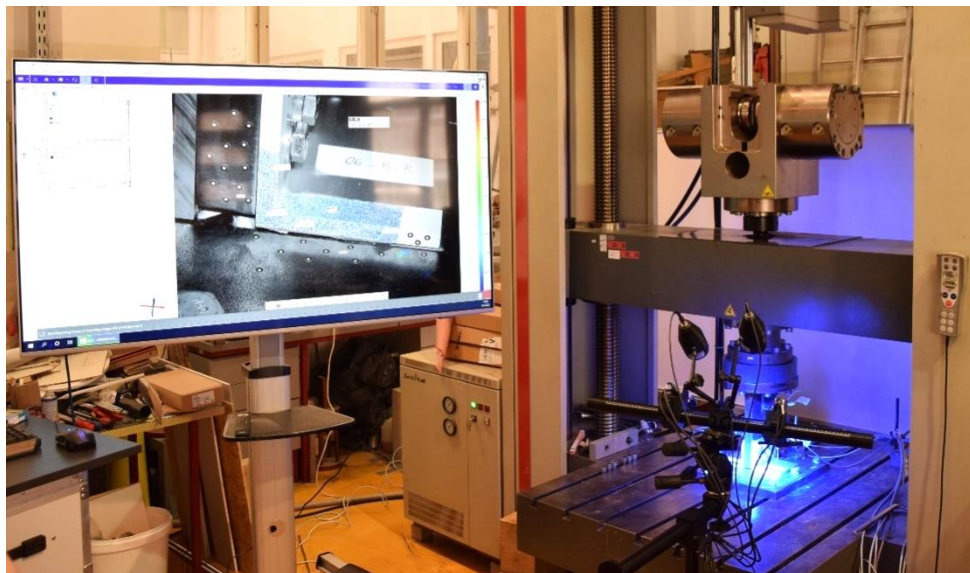
### **4.3. Ispitivanje kutnika u paru na vlak**

#### **4.3.1. Općenito**

Ispitivanje mehaničkih svojstava lijepljenih spojeva aluminijskih kutnika provedeno je u Laboratoriju za ispitivanje konstrukcija na Građevinskom fakultetu u Zagrebu 2. i 3. lipnja 2022. godina za uzorke zalijepljene 19. svibnja 2022. godine te 9. i 10. lipnja 2022. godine za uzorke zalijepljene 7. lipnja 2022. godine. Ispitano je ukupno 24 kutnika, odnosno 12 parova aluminijskih kutnika. Od toga, četiri su serije od po tri uzorka različitih, prethodno navedenih, ljepila. Svi uzorci su ispitani na Zwick&Roell statičkom uređaju za ispitivanje kapaciteta  $\pm 600$  kN, brzine unosa opterećenja 0,001 mm/min – 200 mm/min, s maksimalnim pomakom od 1700 mm. Prije početka ispitivanja, po jedan kutnik od svakog ispitanog uzorka pratio se prethodno spomenutim sustavom kamera i senzora ARAMIS, te se za potrebe istog trebao “istočkati“ na određenom promatranom području, kako bi senzor mogao stvoriti polje čije vertikalne pomake tada bilježi. Slika uzorka spremnog za ispitivanje te slika statičke preše, ARAMIS senzora te postavljenog uzorka prikazane su na slikama 4.20. i 4.21.



**Slika 4.20** Uzorak spreman za ispitivanje



**Slika 4.21** Ispitivanje uzorka lijepljenih kutnika

#### **4.3.2. Režim nanošenja opterećenja**

Svih 12 parova lijepljenih aluminijskih kutnika izloženo je vlačnoj sili. Sila se unosi u kutnike L 100x100x10 mm, duljine 140 mm. Opterećenje je uneseno preko statičke preše na prethodno definiranu konfiguraciju za ispitivanje uzoraka. U cilju postizanja istih laboratorijskih uvjeta te izazivanja otkazivanja na lijepljenom djelu, svi su kutnici za čeličnu donju ploču pritegnuti vijcima.

Ispitivanja su provedena uz kontrolu pomaka s brzinom 0,03 mm/min te s postupnim povećanjem do 0,1 mm/min do otkazivanja uzorka. Kod svih su uzoraka kutnici izloženi vlačnoj sili do prvog otkazivanja ljepila, stoga su te vrijednosti sile bilježene kao maksimalne. Nakon toga uzorak je izložen većoj brzinom prirasta pomaka kako bi se kutnici u potpunosti odvojili od donje čelične ploče.

#### **4.3.3. Postupak provedbe ispitivanja**

Ispitivanje prvog seta uzoraka, 01\_A, 02\_A te 03\_A, provedeno je kroz četiri ciklusa. Prvi ciklus je ciklus zagrijavanja kojem slijedi rasterećenje istom brzinom. Nastavak opterećenja provodi se do promjene nagiba u dijagramu koji prikazuje odnos sile i pomaka. Nakon određenog vremena mijenja se brzina unosa pomaka te dolazi do pada sile. Na koncu ispitivanje se nastavlja do sloma. Početak ispitivanja krenuo je s opterećenjem preko pomaka s brzinom unosa od 0,05 mm/min do iznosa sile od 5 kN. Rasterećenje je provedeno istom brzinom. Nastavak opterećenja do promjene nagiba u krivulji sila-pomak do koje također dolazi pri iznosu sile od 15 kN kao na prethodnom uzorku, proveden je brzinom unosa pomaka od 0,05 mm/min. Nastavlja se opterećivati uzorak s

0,2 mm/min do pada sile od cca 20% nakon čega slijedi nastavak ispitivanja do sloma s 0,6 mm/min.

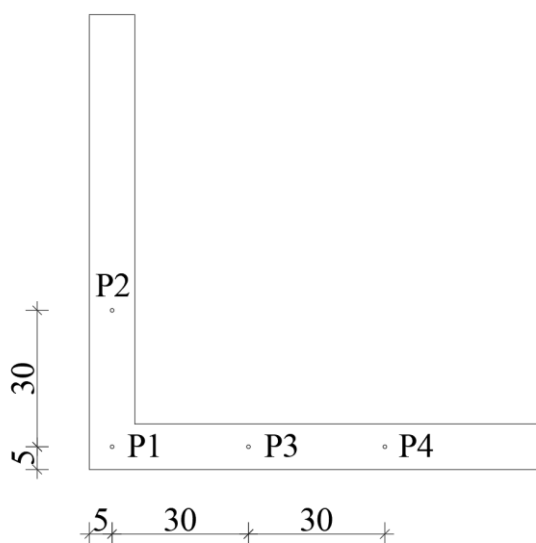
Drugi set uzoraka seta uzoraka, 04\_B, 05\_B te 06\_B, provedeno je kroz tri ciklusa. Opterećenje je nanošeno kontrolom pomaka s brzinom unosa pomaka 0,03 mm/min u prvom ciklusu zagrijavanja do iznosa sile od 5 kN. Rasterećenje se provodilo istom brzinom. Nastavak opterećenja provodi se istom brzinom unosa pomaka kao u prvom ciklusu, 0,03 mm/min do prethodno spomenute promjene nagiba u krivulji sila-pomak do koje dolazi pri iznosu sile od 15 kN. Opterećenje se tada nastavlja brzinom unosa pomaka od 0,1 mm/min do sloma uzorka.

Ispitivanje trećeg, 07\_C, 08\_C, 09\_C te četvrtog, 10\_D, 11\_D i 12\_D seta uzoraka provedeno je kroz tri ciklusa. U prvom je ciklusu opterećenje iznosilo 0,03 mm/min do iznosa sile od 5 kN, nakon čega je slijedilo rasterećenje istom brzinom. Nastavno se opterećenje provodilo brzinom unosa pomaka od 0,1 mm/min koje se nanosilo i do samog sloma uzorka.

Svi setovi uzoraka mjereni su ARAMIS-om s ispitivanjem od 0,2 Hz što bi u fotografijama predstavljalo jednu fotografiju svakih 5 sekundi. Kružni međuspremnik, struktura podataka koja koristi jedan međuspremnik fiksne veličine kao da je povezan s kraja na kraj, u ispitivanjima je bio složen na 4 sekunde s 10 Hz.

#### 4.4. Rezultati ispitivanja

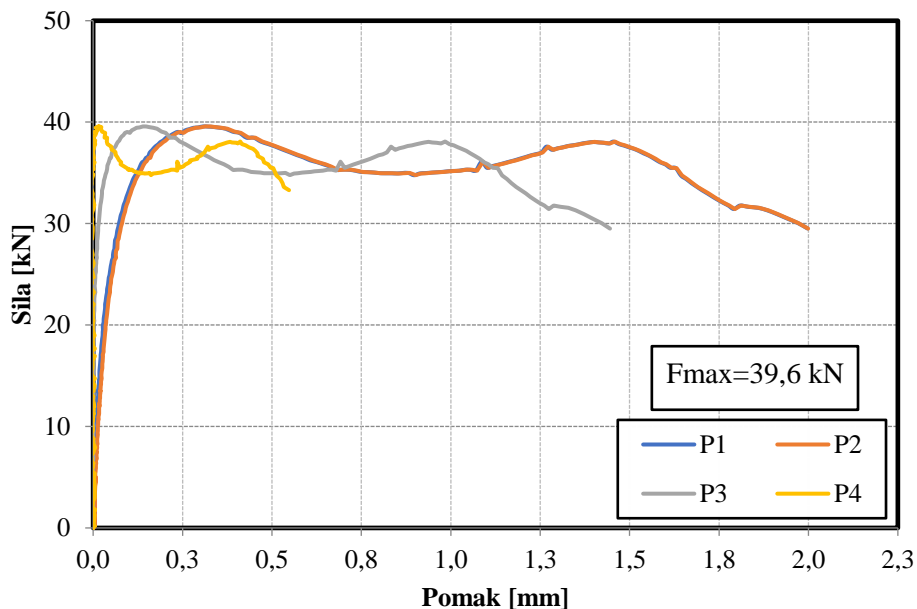
U ovoj točki prikazat će se rezultati u obliku dijagrama ovisnosti maksimalne sile i pomaka mjerenih ARAMIS senzorom na prethodno naznačenim mjernim mjestima P1, P2, P3 i P4 prikazanih na slici 4.22.



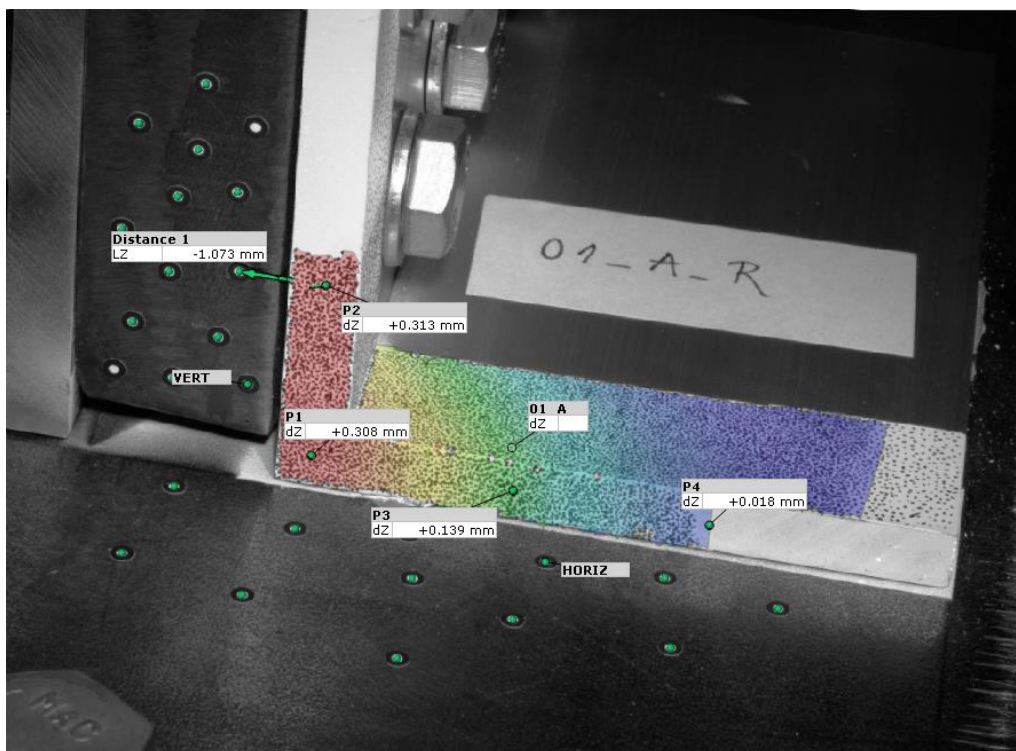
**Slika 4.22** Shematski prikaz točaka P1, P2, P3 i P4

Na slikama 4.23., 4.25., 4.27., 4.29., 4.31., 4.33., 4.35., 4.37., 4.39., 4.41., 4.43. i 4.45. prikazani su rezultati ispitivanja svih uzoraka (01-12) u obliku dijagrama sila-pomak za odabrane točke na kutniku te zapis iz ARAMIS-a. Slike 4.24., 4.26., 4.28., 4.30., 4.32., 4.34., 4.36., 4.38., 4.40., 4.42., 4.44., 4.46. prikazuju lomne površine ljepila na donjim pločama i kutnicima svakog uzorka.

#### 4.4.1. Prikaz rezultata za ljepilo SikaFast-555 L10



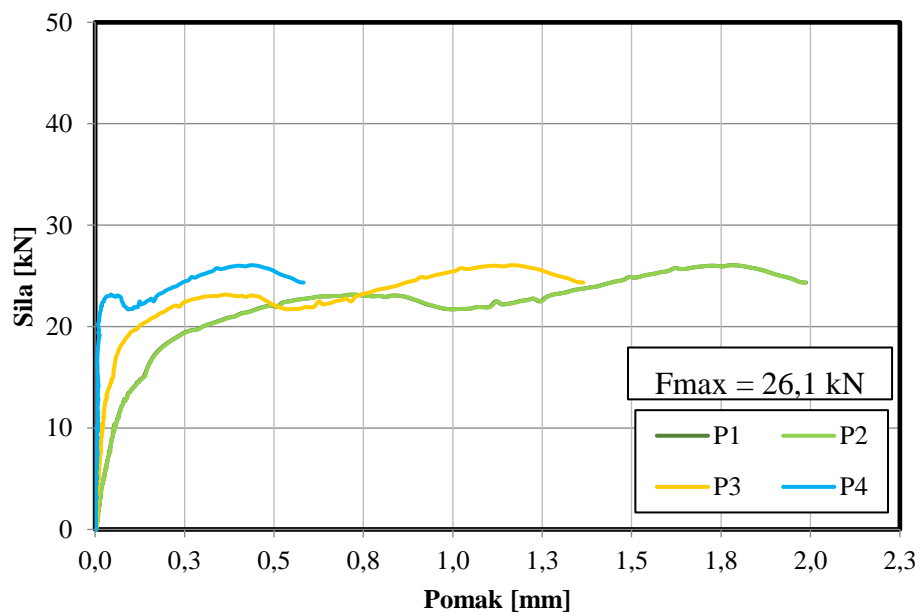
Slika 4.23 Odnos sila-pomak za karakteristične točke uzorka 01\_A\_R



Slika 4.24 Polje vertikalnih pomaka tijekom ispitivanja uzorka 01\_A

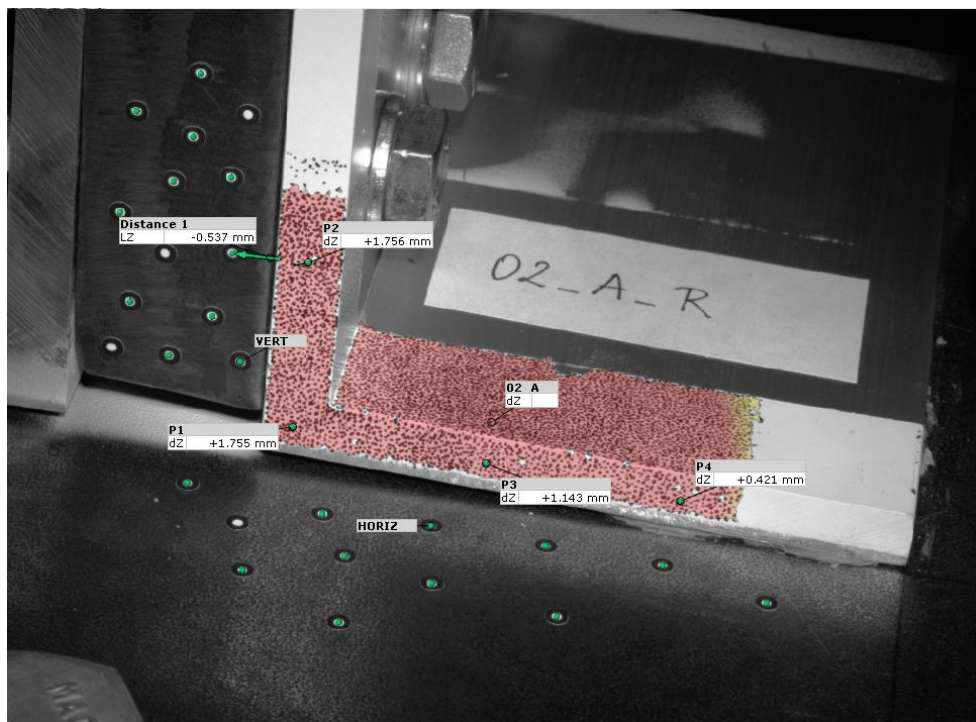


Slika 4.25 Prikaz lomnih površina ljepila uzorka 01\_A



Slika 4.26 Odnos sila-pomak za karakteristične točke uzorka 02\_A\_R

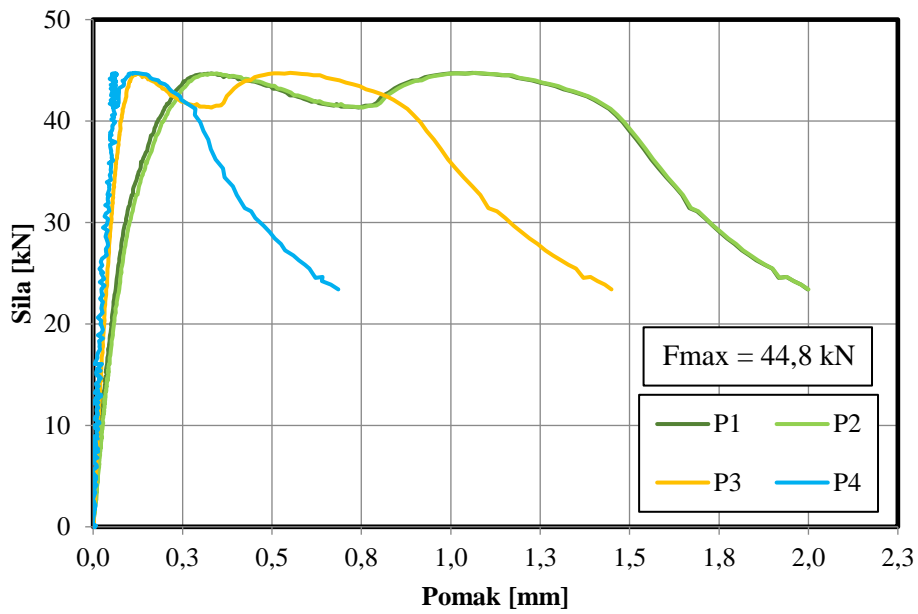




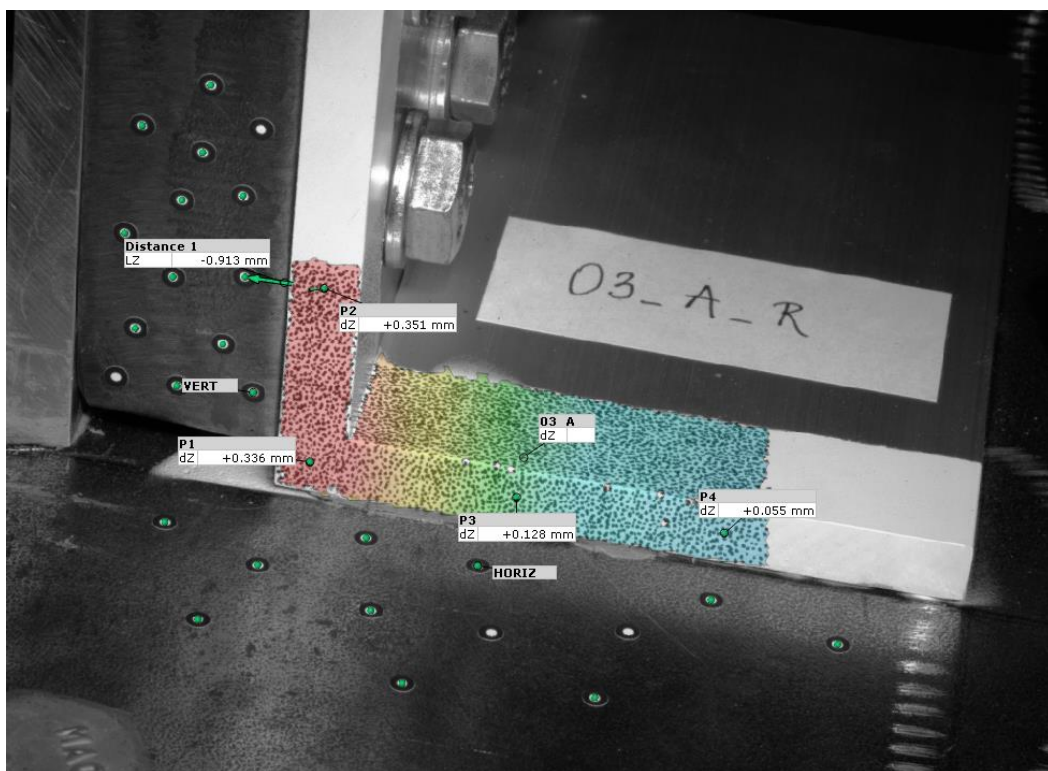
Slika 4.27 Polje vertikalnih pomaka tijekom ispitivanja uzorka 02\_A



Slika 4.28 Prikaz lomnih površina ljepila uzorka 02\_A



Slika 4.29 Odnos sila-pomak za karakteristične točke uzorka 03\_A\_R

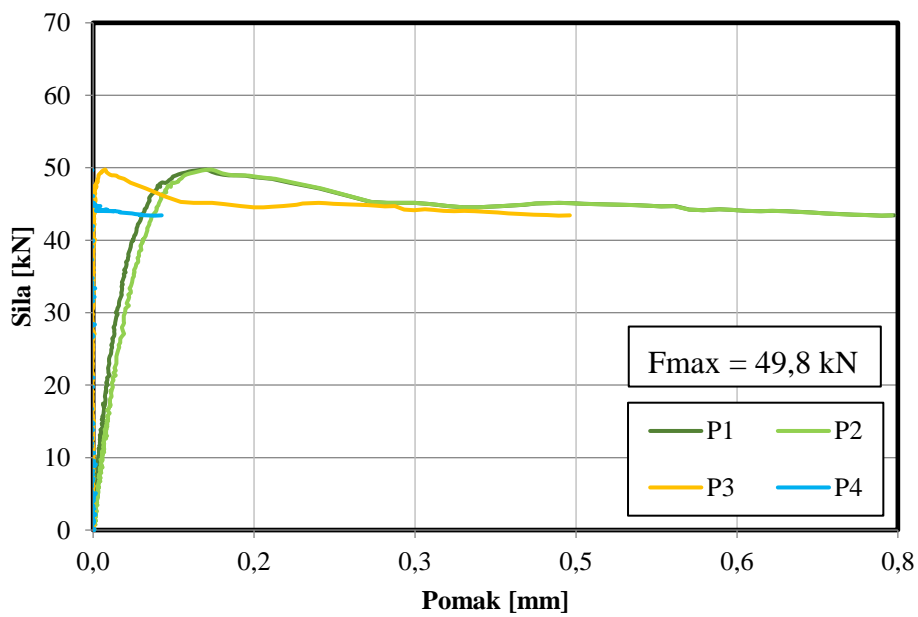


Slika 4.30 Polje vertikalnih pomaka tijekom ispitivanja uzorka 03\_A



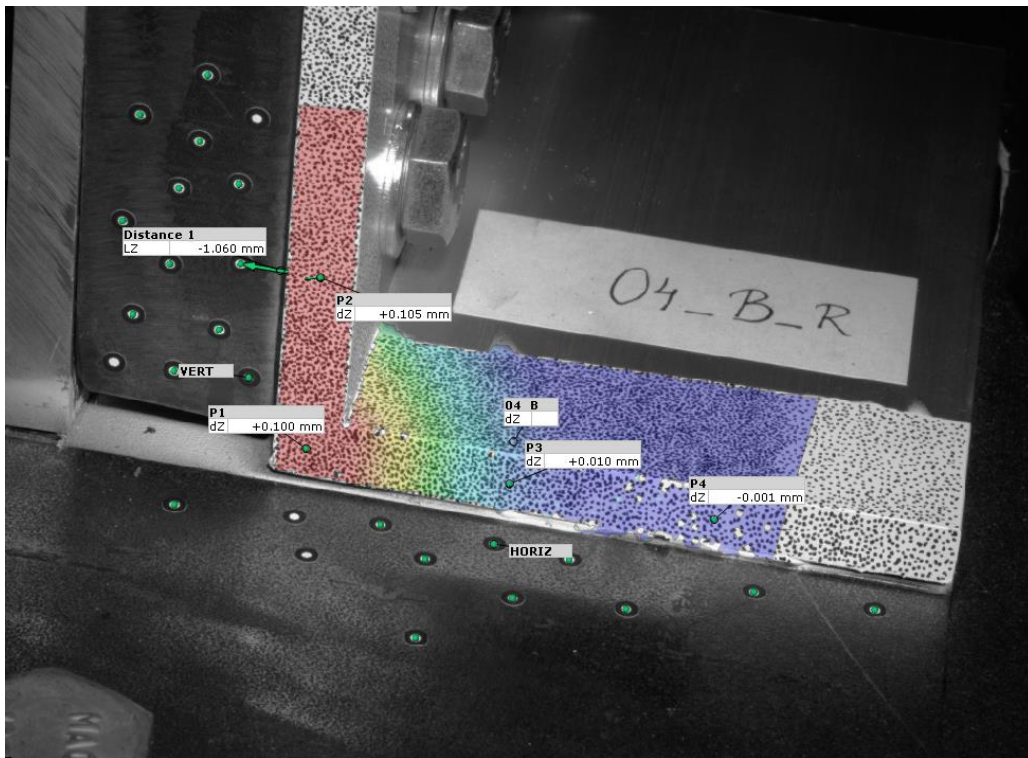
Slika 4.31 Prikaz lomnih površina ljepila uzorka 03\_A

#### 4.4.2. Prikaz rezultata za ljepilo SikaPower-4720



Slika 4.32 Odnos sila-pomak za karakteristične točke uzorka 04\_B\_R

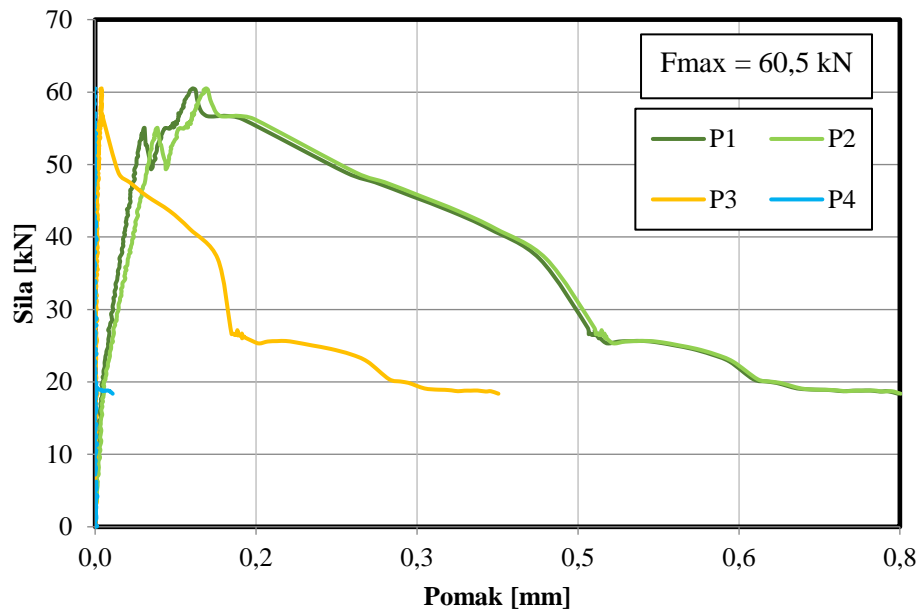




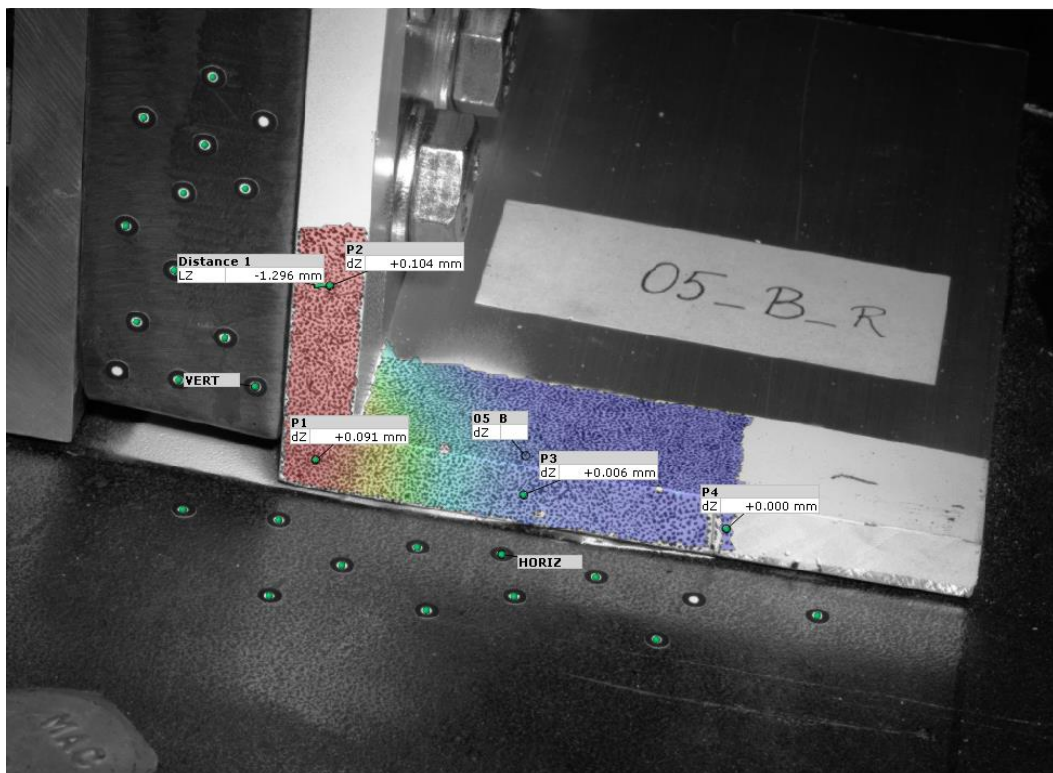
Slika 4.33 Polje vertikalnih pomaka tijekom ispitivanja uzorka 04\_B



Slika 4.34 Prikaz lomnih površina ljepila uzorka 04\_B



Slika 4.35 Odnos sila-pomak za karakteristične točke uzorka 05\_B\_R

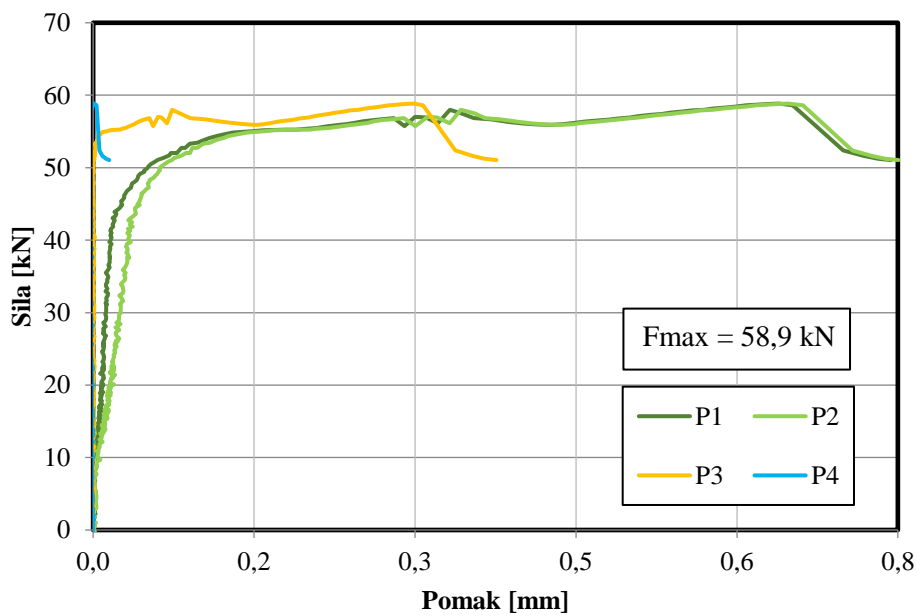


Slika 4.36 Polje vertikalnih pomaka tijekom ispitivanja uzorka 05\_B

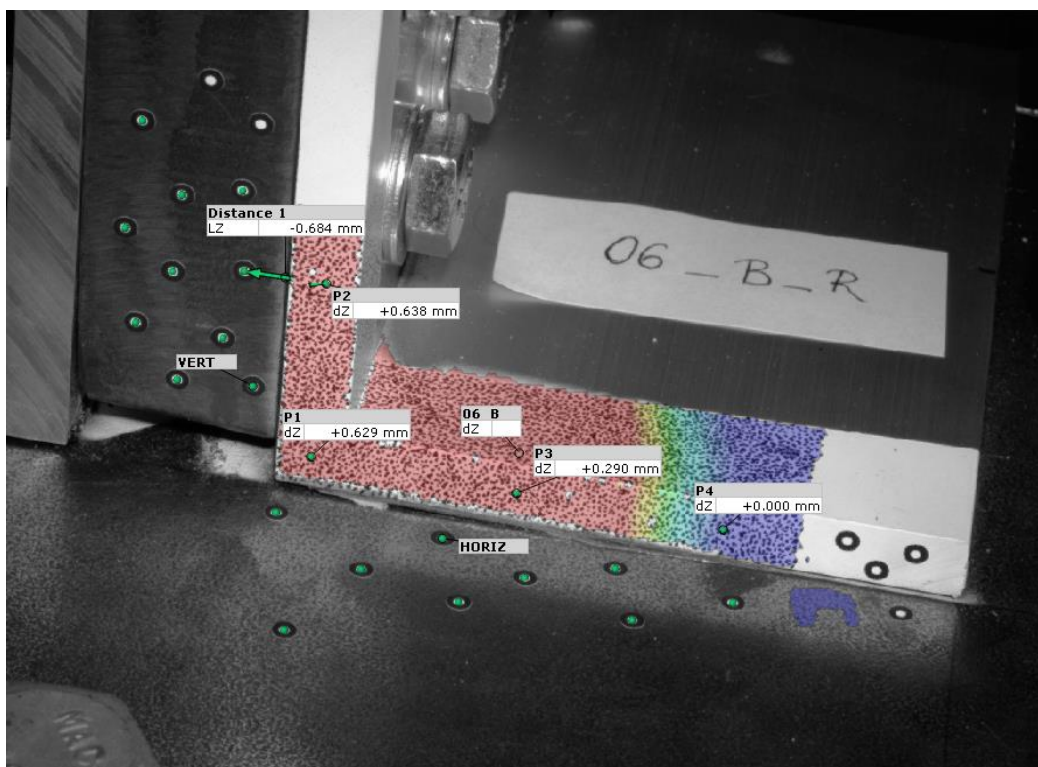




Slika 4.37 Prikaz lomnih površina ljepila uzorka 05\_B



Slika 4.38 Odnos sila-pomak za karakteristične točke uzorka 06\_B\_R

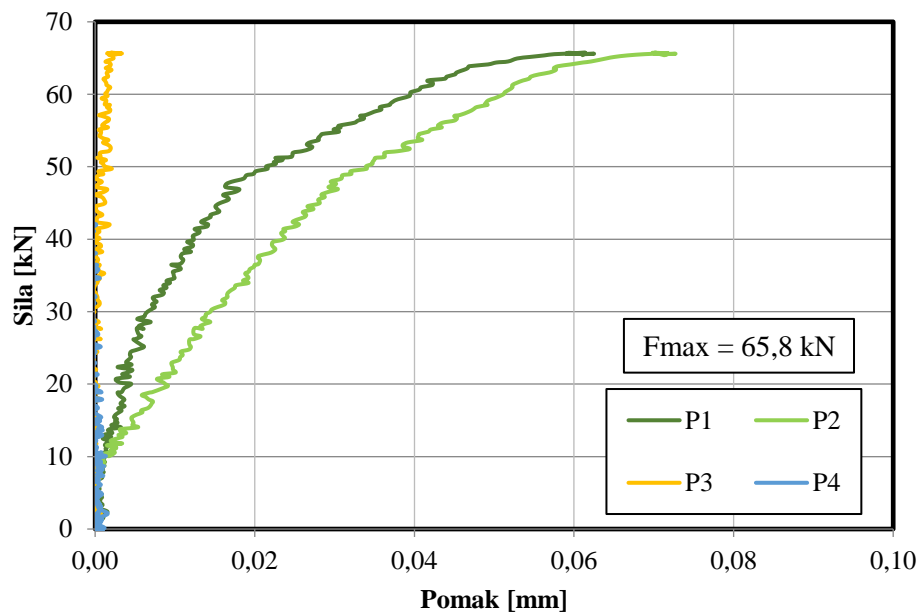


Slika 4.39 Polje vertikalnih pomaka tijekom ispitivanja uzorka 06\_B

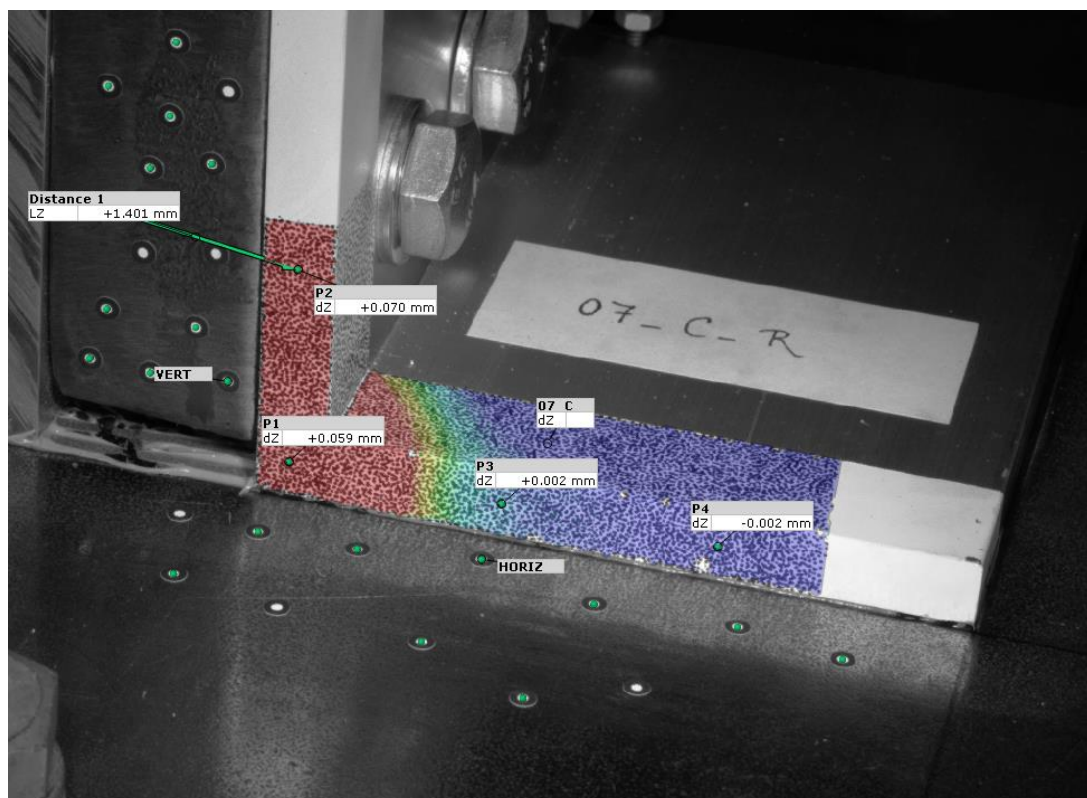


Slika 4.40 Prikaz lomnih površina ljepila uzorka 06\_B

#### 4.4.3. Prikaz rezultata za ljepilo Sikadur-330

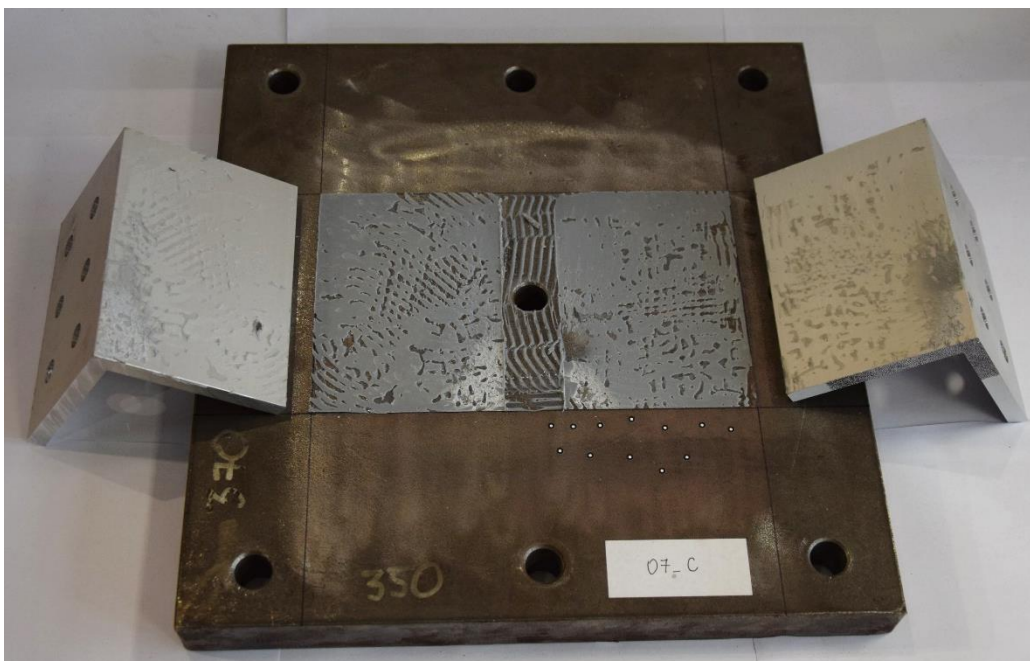


Slika 4.41 Odnos sila-pomak za karakteristične točke uzorka 07\_C\_R

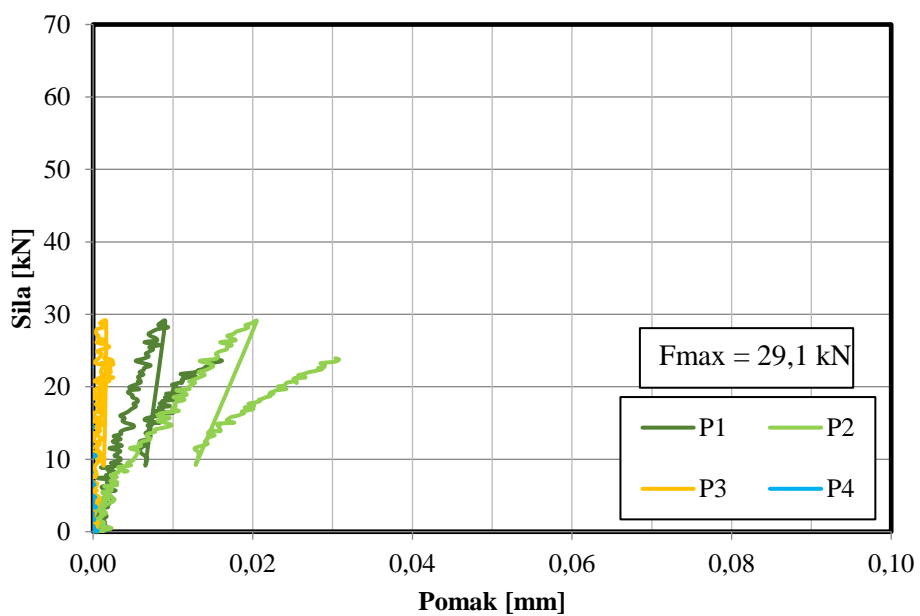


Slika 4.42 Polje vertikalnih pomaka tijekom ispitivanja uzorka 07\_C

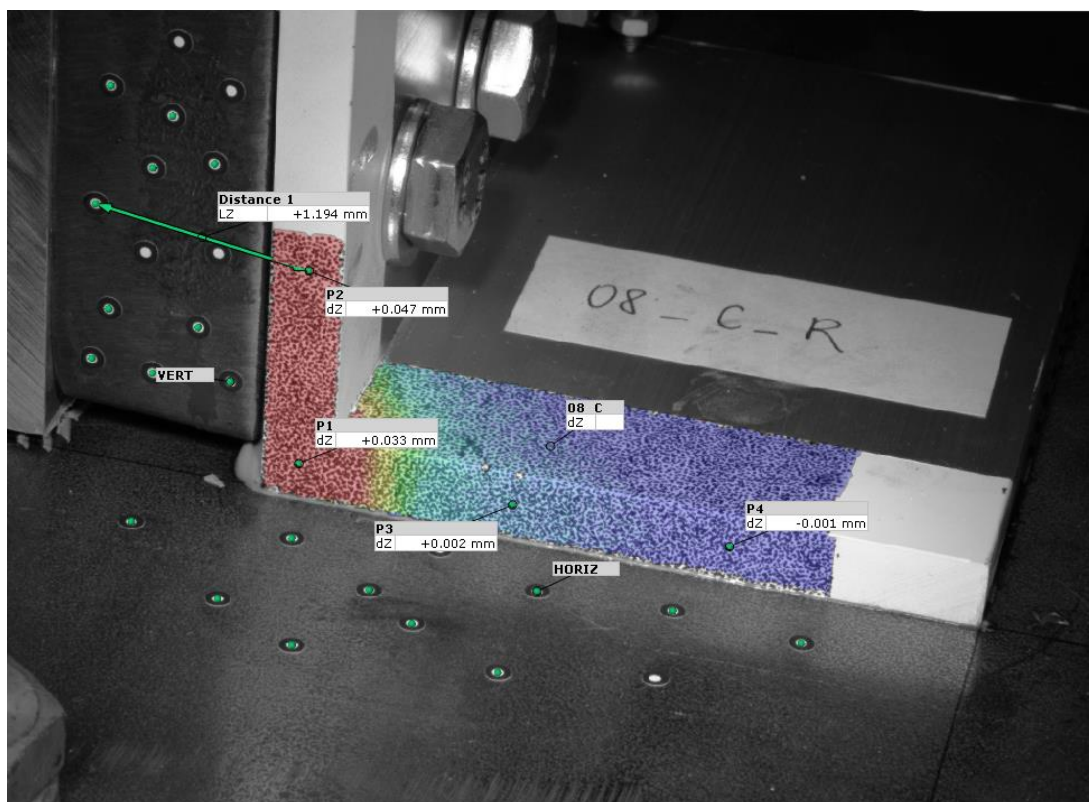




Slika 4.43 Prikaz lomnih površina ljepila uzorka 07\_C



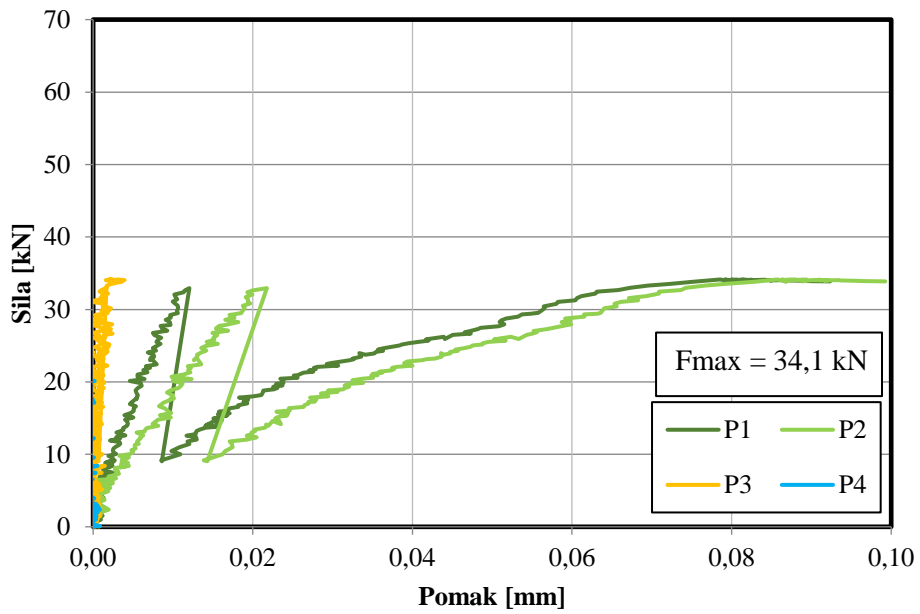
Slika 4.44 Odnos sila-pomak za karakteristične točke uzorka 08\_C\_R



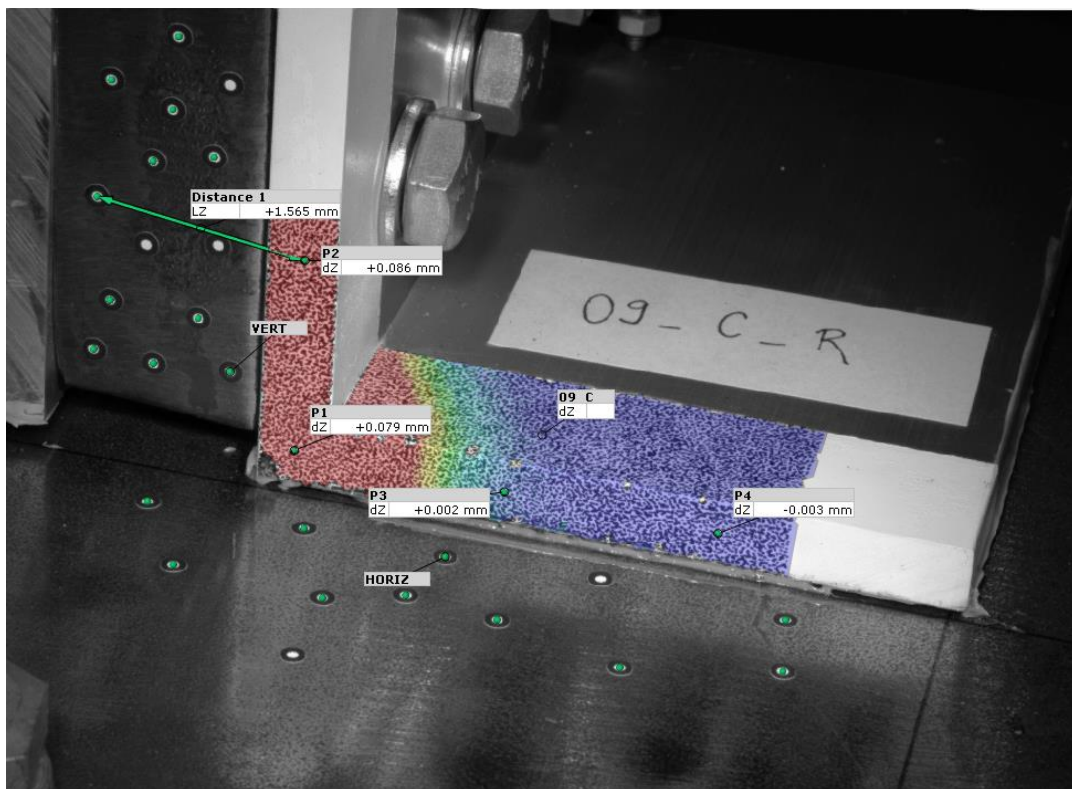
Slika 4.45 Polje vertikalnih pomaka tijekom ispitivanja uzorka 08\_C



Slika 4.46 Prikaz lomnih površina ljepila uzorka 08\_C



Slika 4.47 Odnos sila-pomak za karakteristične točke uzorka 09\_C\_R



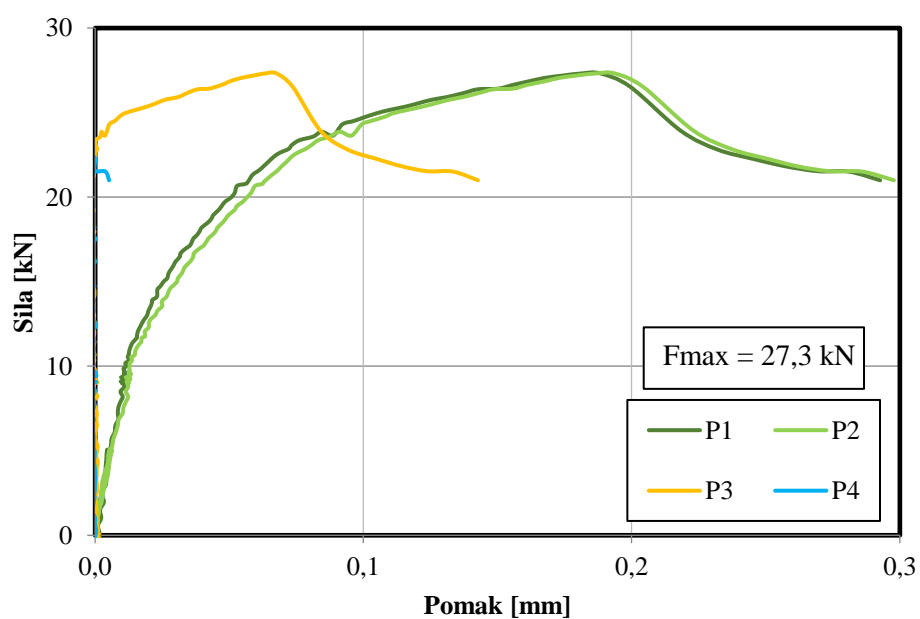
Slika 4.48 Polje vertikalnih pomaka tijekom ispitivanja uzorka 09\_C



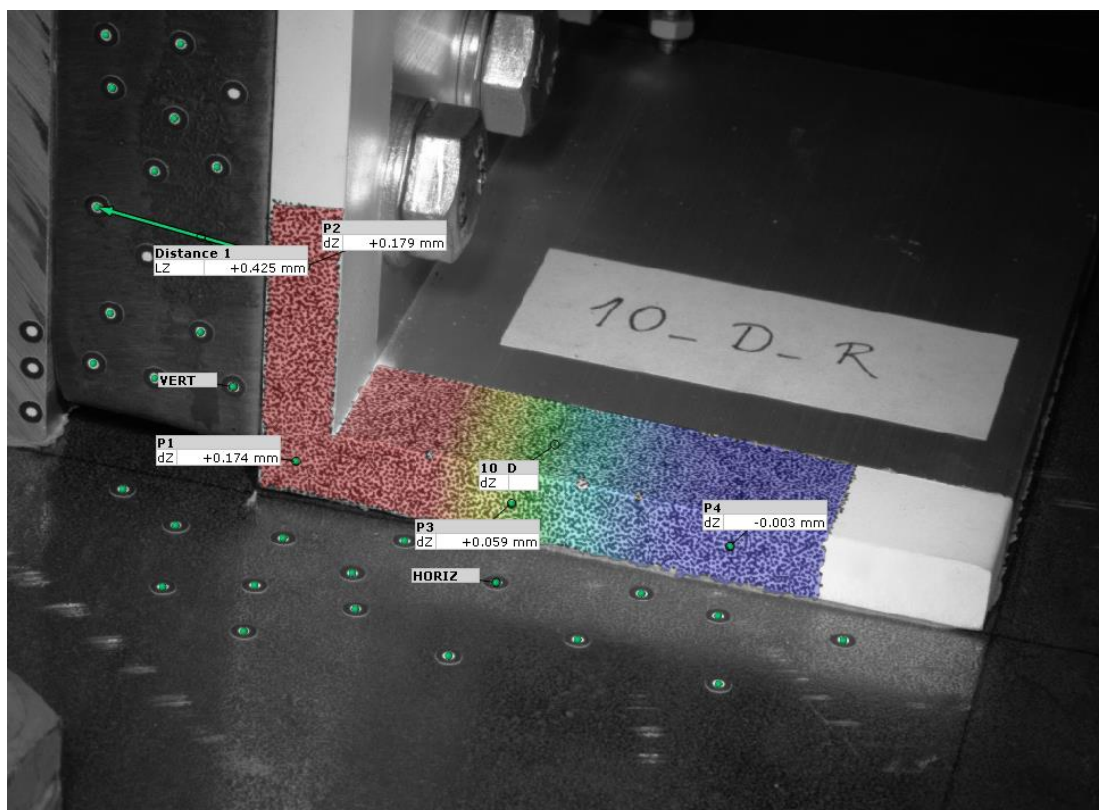


Slika 4.49 Prikaz lomnih površina ljepila uzorka 09\_C

#### 4.4.4. Prikaz rezultata za ljepilo Sikadur-31 CF Normal



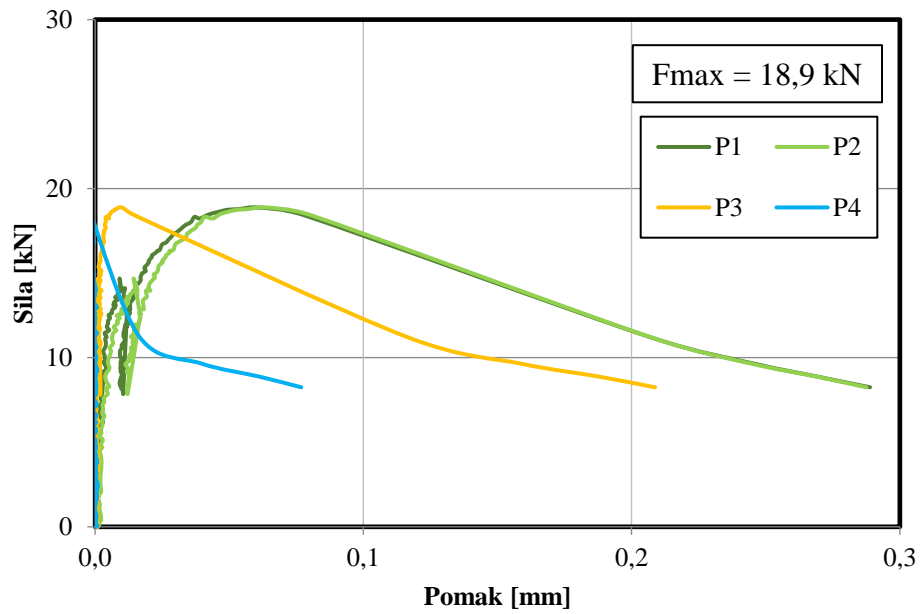
Slika 4.50 Odnos sila-pomak za karakteristične točke uzorka 10\_D\_R



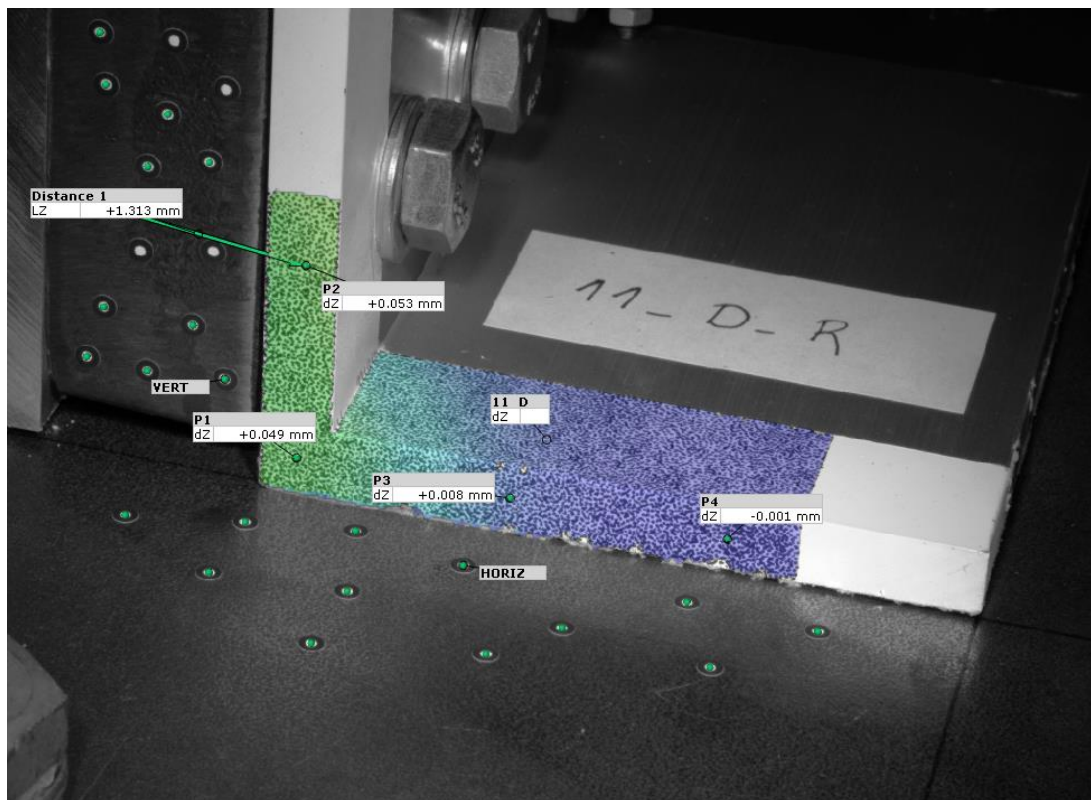
Slika 4.51 Polje vertikalnih pomaka tijekom ispitivanja uzorka 10\_D



Slika 4.52 Prikaz lomnih površina ljepila uzorka 10\_D

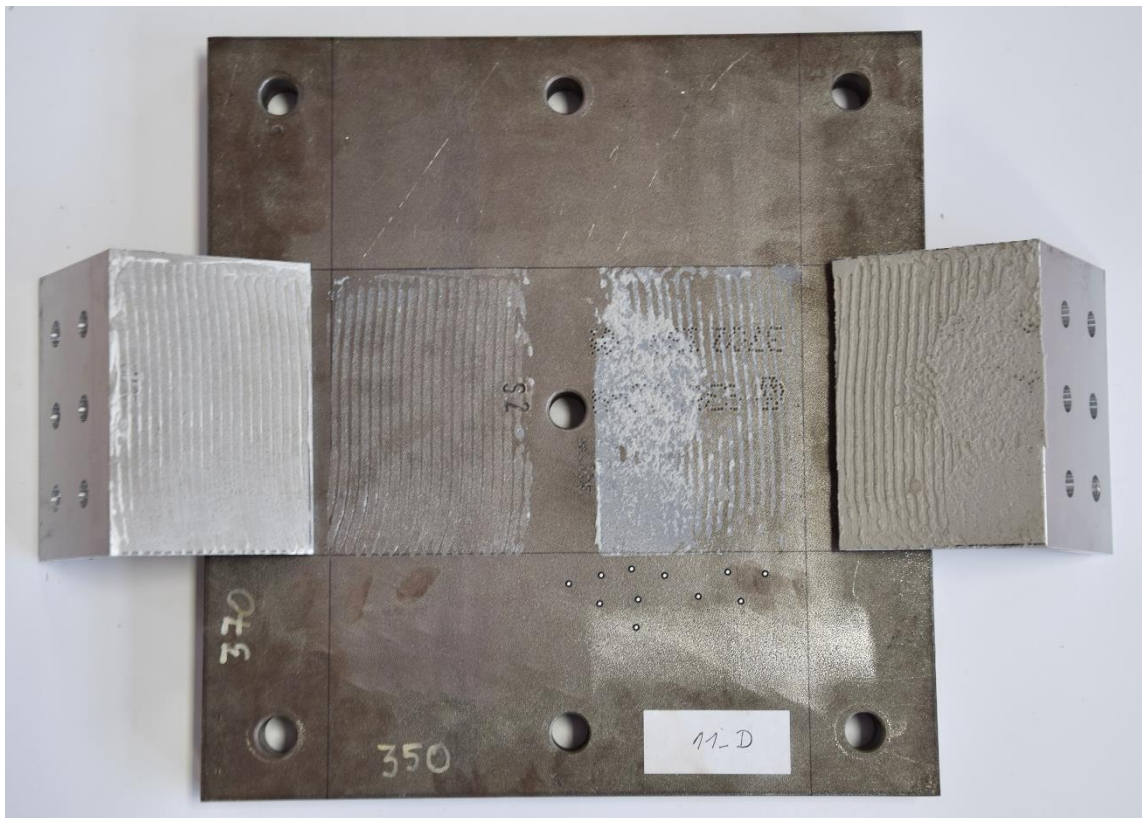


Slika 4.53 Odnos sila-pomak za karakteristične točke uzorka 11\_D\_R

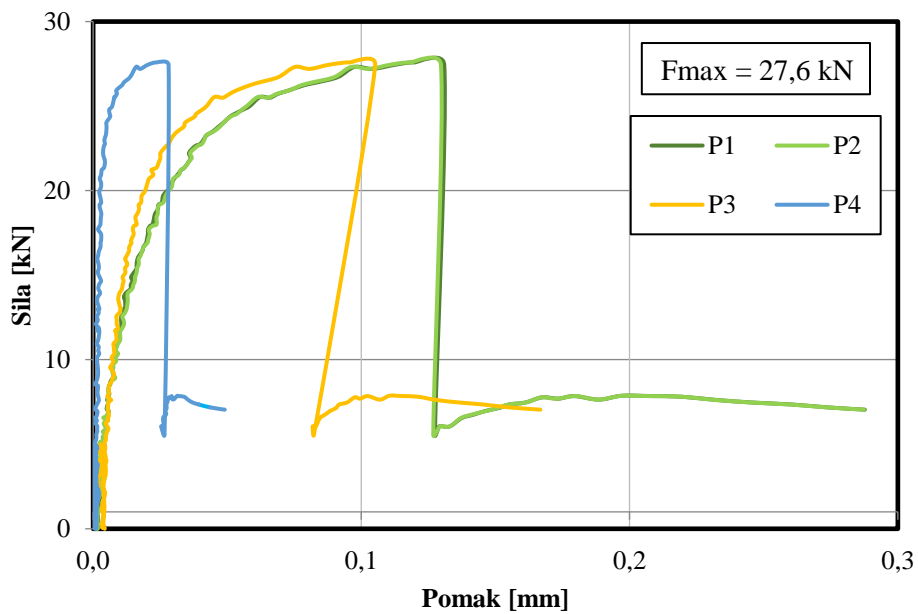


Slika 4.54 Polje vertikalnih pomaka tijekom ispitivanja uzorka 11\_D

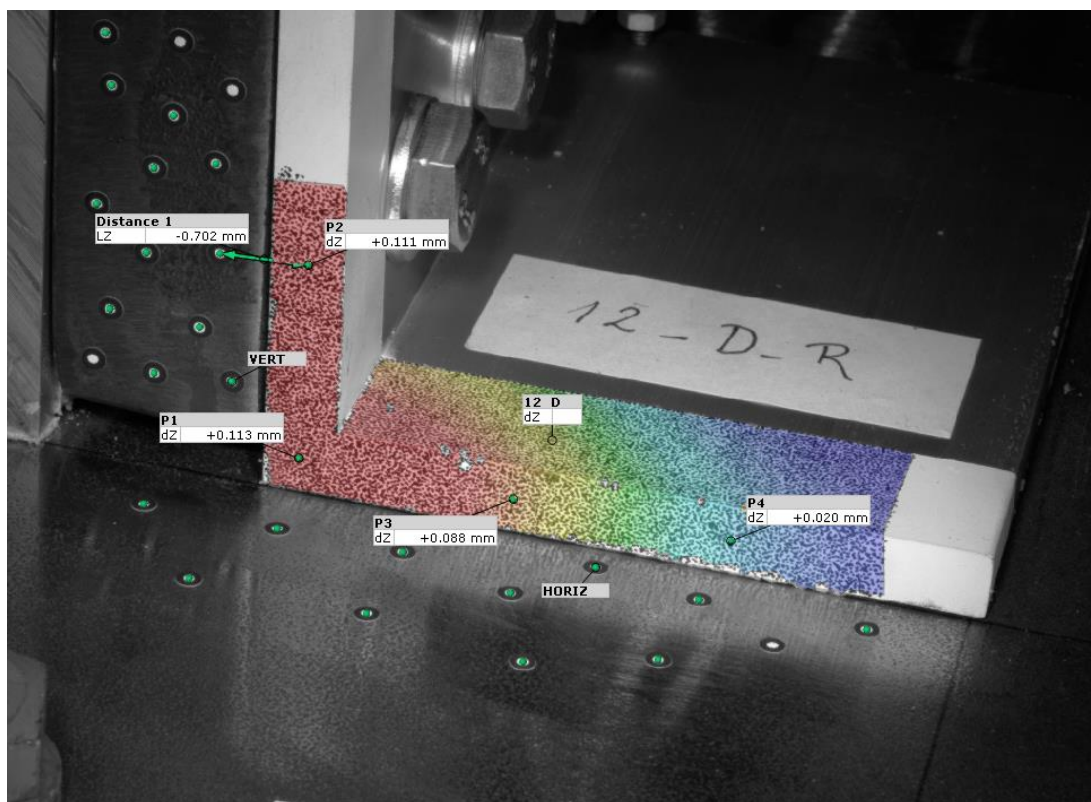




Slika 4.55 Prikaz lomnih površina ljepila uzorka 11\_D



Slika 4.56 Odnos sila-pomak za karakteristične točke uzorka 12\_D\_R



Slika 4.57 Polje vertikalnih pomaka tijekom ispitivanja uzorka 12\_D



Slika 4.58 Prikaz lomnih površina ljepila uzorka 12\_D

#### 4.5. Diskusija rezultata

Ispitivanjem uzoraka dobiveni su dijagrami sila-pomak iz ARAMIS-a. Iako su rezultati s preše pouzdani, u ovom slučaju nisu mjerodavni jer obuhvaćaju puno deformacija koje, pri promatranju ponašanja samog lijepljenog spoja, remete zapis (npr. deformacije na vijčanom posmičnom spoju).

U tablici 4.5. prikazane su maksimalne sile pojedinog uzorka i pripadni pomaci za promatrane točke.

**Tablica 4.5** Prikaz maksimalnih sila i pripadnih pomaka

Uzorak	Maksimalna sila [kN]	Pomak [mm]			
		P1	P2	P3	P4
01_A	39,6	0,308	0,313	0,139	0,018
02_A	26,1	1,774	1,775	1,161	0,434
03_A	44,8	1,061	1,068	0,551	0,117
04_B	49,8	0,105	0,110	0,011	-0,001
05_B	60,5	0,091	0,104	0,006	0,0003
06_B	58,9	0,639	0,648	0,299	0,001
07_C	65,8	0,061	0,070	0,002	-0,001
08_C	29,1	0,009	0,021	0,002	-0,001
09_C	34,1	0,079	0,086	0,002	-0,003
10_D	27,3	0,181	0,187	0,063	-0,003
11_D	18,9	0,061	0,064	0,010	-0,001
12_D	27,6	0,120	0,118	0,096	0,024

Oblikovno, početni relativno konstantni nagibi dijagrama pokazuju da ljepila imaju konstantnu krutost do maksimalne sile nakon koje se javlja popuštanje.

Uspoređujući dijagrame uzoraka 01\_A, 02\_A i 03\_A (SikaFast 555) vidljive su značajnije razlike na uzorku 02\_A u odnosu na druga dva iz iste serije. Razlike u maksimalnoj sili od 42 % i 34 % su rezultat nedovoljno stvrdnutog sloja ljepila. Razlog tome je što se pri lijepljenju uzorka koristila početna količina dvokomponentnog ljepila koja u statičkom mikseru nije bila dovoljno dobro izmiješana. Razlika prvog i trećeg uzorka od 5,17 kN je neznatna.

Kod dijagrama uzoraka 04\_B, 05\_B i 06\_B (SikaPower 4720) uočavamo razliku u maksimalnoj sili od 17 % kod prvog uzorka. Naime, prilikom nanošenja ljepila kod prethodno navedenog uzorka nanesen je deblji sloj od 0,5 mm u odnosu na preostala dva uzorka kod kojih debljina sloja iznosi 0,25 mm. Kod uzoraka 05\_B i 06\_B razlika maksimalnih sila je također neznatna i iznosi 1,65 kN.

Kod uzoraka 08\_C i 09\_C (Sikadur 330) uočen je znatno manji rezultat u odnosu na uzorak 07\_C. Debljina sloja ljepila svakog uzorka je različita i za uzorak 07\_C iznosi približno 1,2 mm, 08\_C približno 0,8 mm i 09\_C približno 1,5 mm. Pretpostavka je da postoji optimalna debljina nanošenja sloja i ona u za ljepilo tipa C iznosi oko 1,2 mm.

Za posljednje uzorke 10\_D, 11\_D i 12\_D (Sikadur 31 CF Normal) važno je napomenuti kako bi ljepilo zbog svoje granulometrije idealne rezultate postizalo pri debljini od 3-4 mm. Shodno tome, nije neuobičajeno da rezultat najdebljeg uzorka 12\_D od 2,5 mm daje najbolje rezultate. Iznenadujuće je da za razliku u debljini uzoraka od 0,2 mm za uzorke 10\_D i 11\_D razlika u rezultatima iznosi 31 %, dok za razliku u debljini uzoraka od 0,5 mm za uzorke 11\_D i 12\_D razlika iznosi svega 1 %.

Kod svih uzoraka ispitivanih u drugoj fazi provođenja ispitivanja (07-12) došlo je do slabijih rezultata. Naime, ljepila Sikadur 330 i Sikadur 31 CF Normal zahtijevaju obradu površine pjeskarenjem za kvalitetniju prionjivost, a takav način pripreme površine nije proveden u ovom ispitivanju. Osim toga, Sikadur 330 nije predviđen za lijepljenje metala.

## 5. NUMERIČKA PROCJENA VLAČNOG PONAŠANJA ZALIJEPLJENIH ALUMINIJSKIH KUTNIKA

### 5.1. Uvod

Središnja metoda prezentirane numeričke analize je metoda konačnih elemenata (MKE, eng. *FEM* – *Finite element method*). Po definiciji, to je numerička metoda za rješavanje skupa povezanih jednažbi dobivenih aproksimacijom nepoznatih varijabli kontinuiranog područja skupom nepoznatih varijabli u konačnom broju diskretnih točaka (čvorova) tog polja [21]. Ova definicija govori kako će se, primjenom ove metode, kontinuirani dijelovi sklopa diskretizirati na mrežu čvorova u kojima će se provoditi analiza. Što se detaljnija mreža čvorova definira, to će rezultat biti točniji, tj. bliži stvarnom rezultatu. Unatoč toj činjenici, pretjerano gusta mreža može rezultirati značajno dužim proračunom u zamjenu za malo ili praktički nikakvo poboljšanje točnosti [22]. Zbog toga je važno pronaći adekvatnu mrežu koja će zadovoljavati točnost rezultata bez nepotrebno velikog vremena proračuna. Programski paket korišten za numeričku analizu je Simulia Abaqus 2021 [23].

### 5.2. Opis modela konačnih elemenata

#### 5.2.1. Općenito

Pregledom literature [24] koja je vezana uz tematiku numeričkog modeliranja lijepljenih spojeva, pokazalo se da je većina analiza napravljena u 2D prostoru. Kod takvih modela, poklapanje rezultata sa eksperimentima je izrazito dobro, a sama analiza traje vrlo kratko. Međutim, za numeričku procjenu predmetnog sklopa bilo je potrebno provesti 3D numeričku analizu. S obzirom da je cjelokupna geometrija sklopa relativno jednostavna, kompletni numerički model je napravljen u Abaqusu bez dodatnih programskih paketa. Potrebno je napomenuti da gornja kružna ploča koja se pričvršćuje na glavu preše, kao i dodatne ukrute, nisu modelirani zbog jednostavnosti i brzine analize.

Provedene su statičke analize na svim modelima za procjenu  $F-\Delta$  ponašanja. Maksimalni broj inkremenata ograničen je na 1000, uz početni inkrement od 0,01. Za čelične i aluminijske komponente sklopa korišteni su volumni SOLID konačni elementi tipa C3D8I. To je kockasti konačni element sa 8 čvorova koji koristi linearnu interpolaciju. S druge strane, za ljepilo su također korišteni volumni konačni elementi (COH3D8), ali iz familije "Cohesive". Takvi elementi

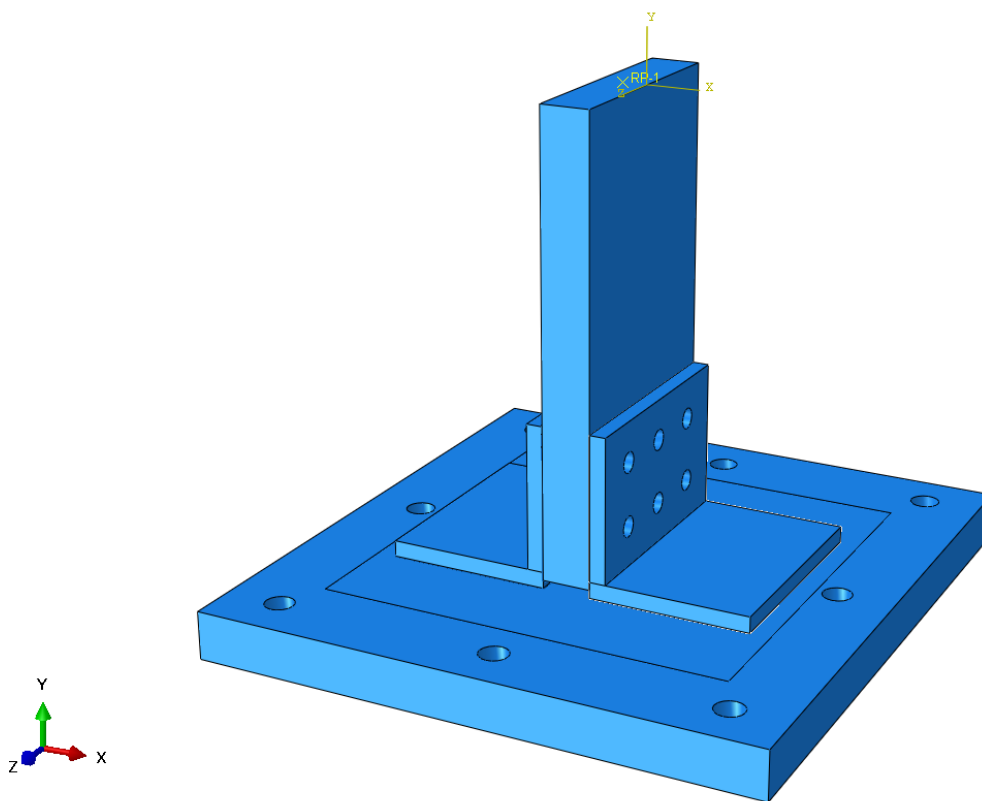


također koriste linearnu interpolaciju i imaju upotrebu većinom za ljepila i njima slične materijale jer dosljedno omogućuju procjenu njihovog ponašanja.

### **5.2.2. Geometrija numeričkog modela**

Sveukupno su izrađena četiri numerička modela. Svaki model predstavlja jednu grupu uzoraka, odnosno jednu vrstu ljepila. U modelima nisu modelirani vijci iz razloga što je središnja problematika vezana uz analizu ponašanja ljepila i ponašanja aluminijskog kutnika u lijepljenom spoju. Zbog toga su ostale komponente sklopa dimenzionirane tako da se pod očekivanim opterećenjem ponašaju kruto, pa se na taj način ne očekuje da će vijci imati ulogu u otkazivanju spoja.

Geometrija numeričkog modela, odnosno sklopa, prikazana je na slici 5.1. Dimenzije kutnika za model su usvojene prema srednjim vrijednostima koje su izmjerene prije laboratorijskog ispitivanja, tablica 4.1. Ostale komponente sklopa modelirane su sa nominalnim dimenzijama.

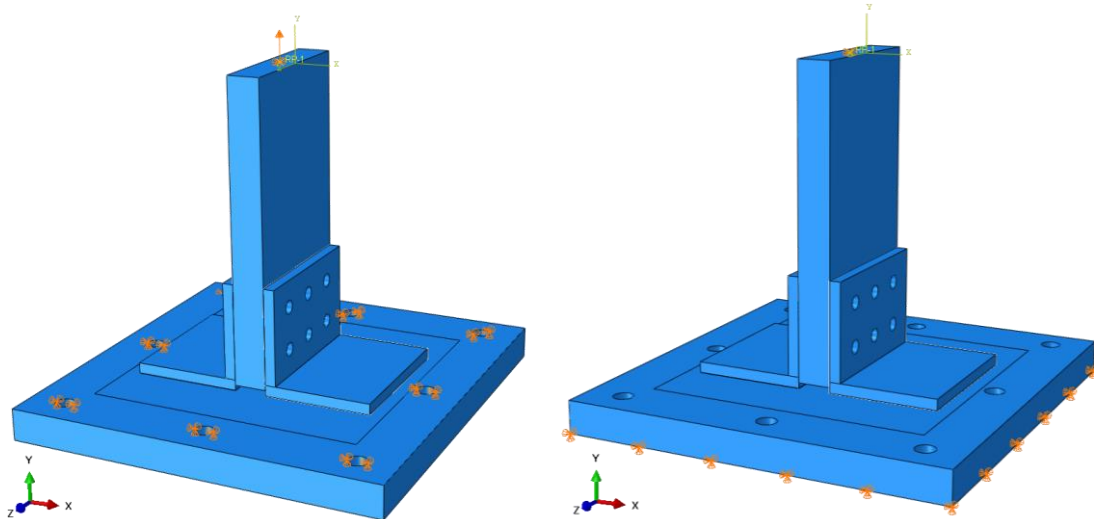


**Slika 5.1** Geometrija modela

### **5.2.3. Rubni uvjeti i opterećenje**

Za oslanjanje horizontalne čelične ploče na postolje preše razmatrana su dva načina pridržanja. Prvi način uzima u obzir postavljanje oslonaca u rupama za vijke na čeličnoj ploči, slika 5.2 a). Dakle, u osam rupa za vijke spriječeni su pomaci u svim smjerovima. Drugi način oslanjanja, slika

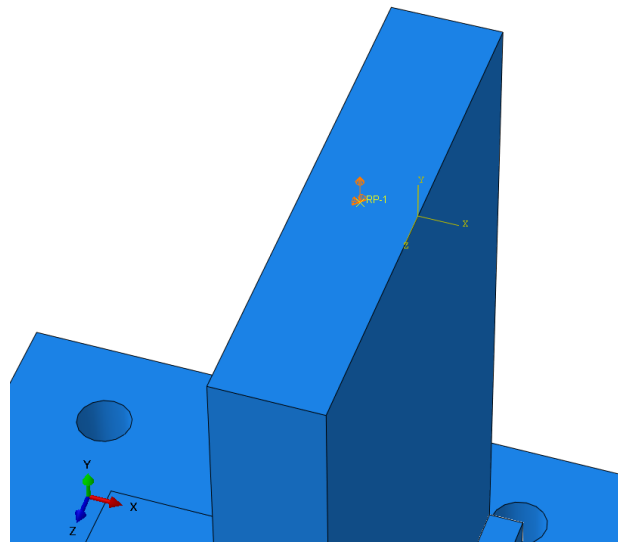
5.2 b), obuhvaća sprječavanje pomaka u svim smjerovima po cijeloj donjoj plohi čelične ploče. Preliminarnim analizama utvrđeno je da se postavljanjem oslonaca u rupama za vijke dobiju puno točniji rezultati, stoga je usvojen prvi način pridržanja čelične ploče za postolje preše za daljnje numeričke analize.



**Slika 5.2** Rubni uvjeti i opterećenje

Također, važno je napomenuti da je spriječen pomak u dva horizontalna smjera na vertikalnoj čeličnoj ploči kroz koju se unosi vlačno opterećenje, slika 5.3. S ovakvim horizontalnim pridržanjima postignuto je da se vertikalna ploča translacija isključivo po vertikalnoj, u ovom slučaju Y osi.

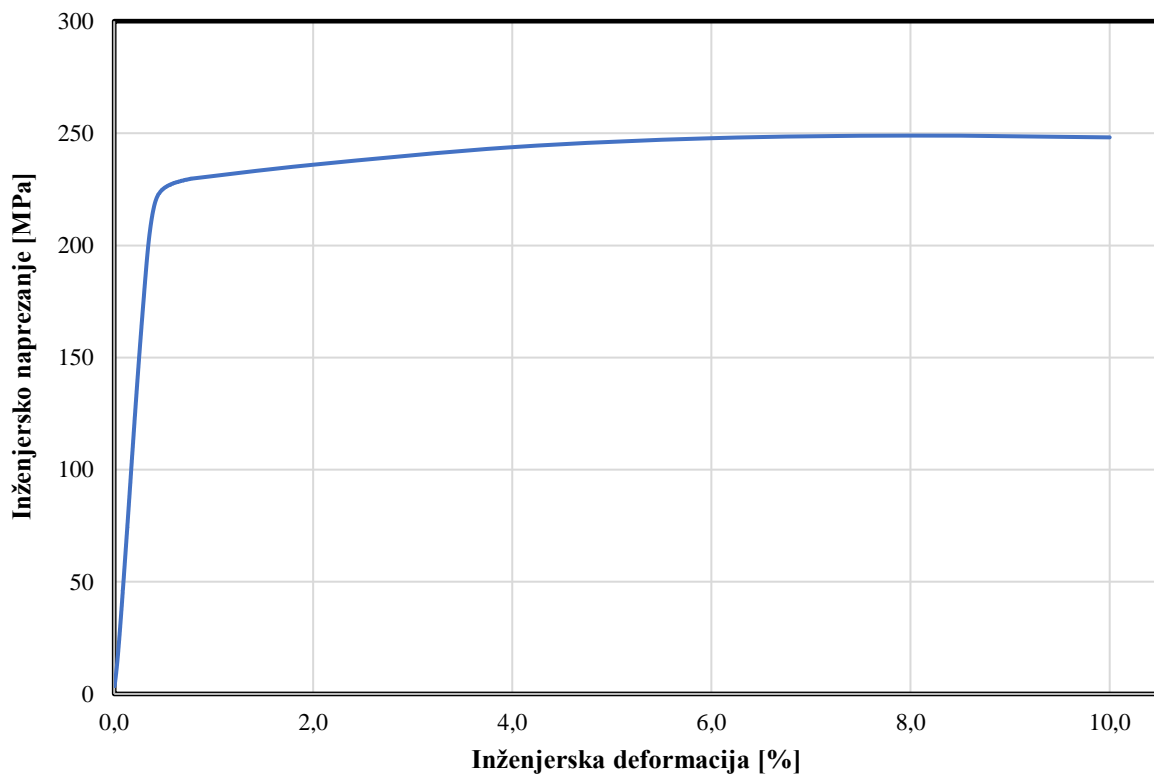
Opterećenje je uneseno kao vanjski pomak vertikalne ploče u referentnoj točki (RP-1), slika 5.3. Unos pomaka je linearan tako da se u zadnjem koraku analize ostvari vertikalni pomak u iznosu od 2 mm (smjer osi Y). Referentna točka obuhvaća cijelu gornju plohu vertikalne ploče preko tzv. "couplinga".



Slika 5.3 Unos opterećenja i rubni uvjeti na vertikalnoj čeličnoj ploči

#### 5.2.4. Mehanička svojstva aluminijskih komponenata

Ispitivanjem aluminijskih epruveta dobiveni su dijagrami naprezanje – deformacija za svaku epruvetu. Na temelju tih dijagrama dobiven je dijagram srednjih vrijednosti naprezanja i deformacija prikazan na slici 5.4.



Slika 5.4 Srednji dijagram naprezanja i deformacija epruveta

Ipak, u Abaqusu je aluminij kao materijal zadan bilinearно, a ne zadavanjem preko gore navedenog dijagrama. Razlog tomu je što je u ovom radu aluminijski kutnik debljine 10 mm i pri opterećenju i dalje ostaje u elastičnom stanju. Osjetljivost na ovu aproksimaciju pokazala bi se tek kada bi aluminijski kutnik bio debljine 3-5 mm. Na ovaj se način analiza znatno skratila jer je manjim brojem točaka dijagrama dovoljno dobro zadan materijal.

Modul elastičnosti aluminija u numeričkoj simulaciji je 70 GPa, a Poissonov koeficijent 0,33.

Bilinearni dijagram je zadan s dvije karakteristične točke:

- Granica popuštanja od 226,16 MPa s plastičnom deformacijom 0.
- Maksimalno naprezanje od 249,09 MPa s maksimalnom plastičnom deformacijom od 0,1.

### 5.2.5. Mehanička svojstva i degradacija ljepila

Ljepilo, samo po sebi, izuzetno je komplicirano za numeričko modeliranje. Za potrebe numeričkih analiza korištena su svojstva ljepila iz tehničkih dopuštenja koja izdaje Sika Croatia d.o.o.

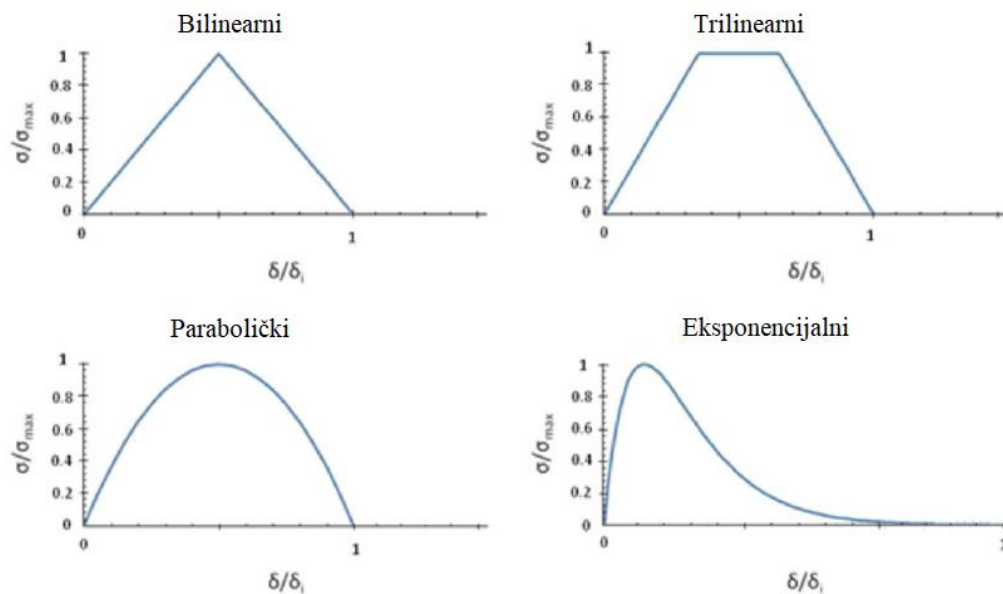
Svojstva ljepila potrebna za njihovo numeričko modeliranje su modul elastičnosti, modul posmika, vlačna čvrstoća, izduljenje pri slomu te posmična čvrstoća. Vrijednosti navedenih svojstava za pojedino ljepilo nalaze se u tablici 5.1.

**Tablica 5.1** Mehanička svojstva ljepila (tehnički list)

Ljepila	Sikadur 330	Sikadur normal 31 CF	SikaFast 555	SikaPower 4720
$\sigma_y$ [MPa]	30	21	11	24
$\tau_y$ [MPa]	21	6	12	14
<b>E</b> [MPa]	4500	5000	200	1900
<b>G</b> [MPa]	1407	1852	74	700
$\varepsilon$ [%]	0,9	0,4	200	3

Ljepila su modelirana sa elastičnim svojstvima, dok je degradacija ljepila opisana "*Traction – separation*" zakonom, slika 5.5. To je zakon koji simulira elastično ponašanje ljepila do vršnog opterećenja nakon kojeg se događa omekšavanje materijala preko degradacije svojstava do konačnog otkazivanja [24]. Oblik otkazivanja može varirati od linearnog, eksponencijalnog pa sve

do paraboličkog, ovisno o najpovoljnijoj aproksimaciji. Za potrebe ovog rada, a na temelju dostupnih mehaničkih svojstava, korišten je bilinearni "traction-separation" zakon.

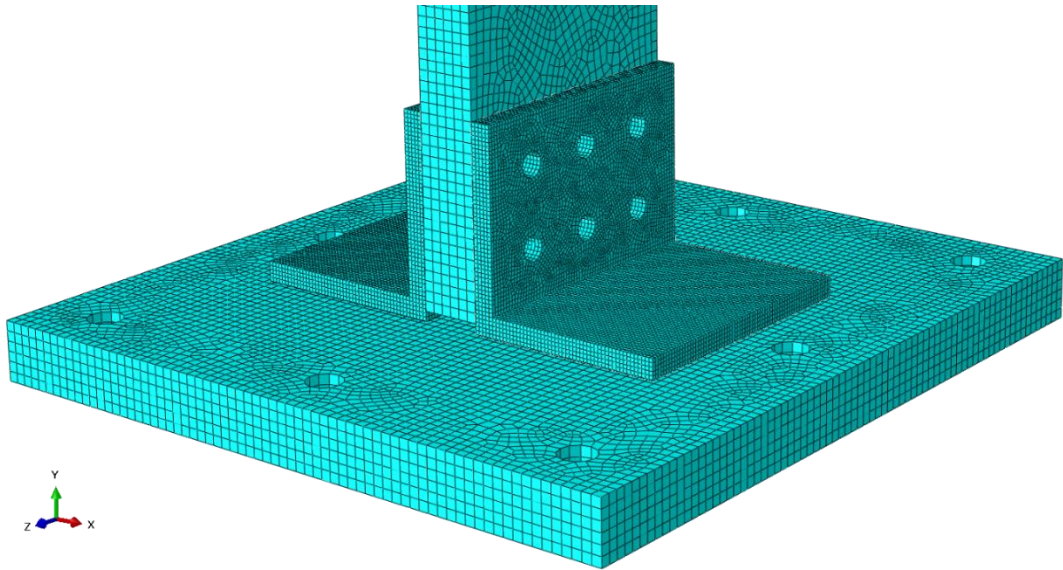


Slika 5.5 Oblici Traction – separation zakona [22]

### 5.2.6. Diskretizacija modela

U cilju dobivanja rezultata što bližih ispitivanju, napravljena je studija utjecaja gustoće mreže konačnih elemenata. Za konačne modele usvojene su sljedeće globalne veličine konačnih elemenata, slika 5.6:

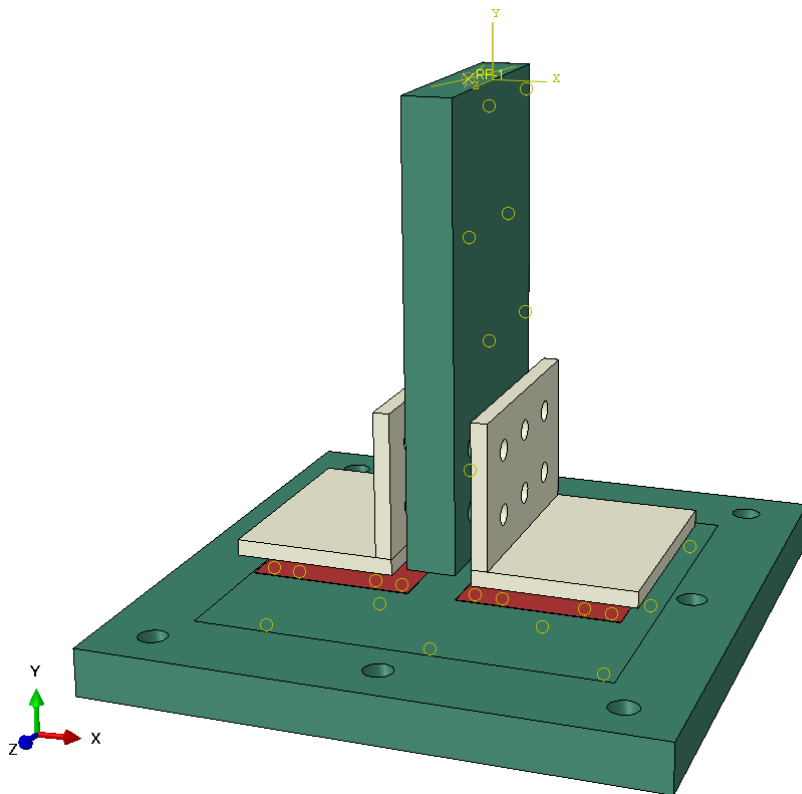
- horizontalna i vertikalna čelična ploča      5 mm<sup>2</sup>
- aluminijski kutnici                                      2 mm<sup>2</sup>
- ljepilo    1 mm<sup>2</sup>



Slika 5.6 Mreža konačnih elemenata

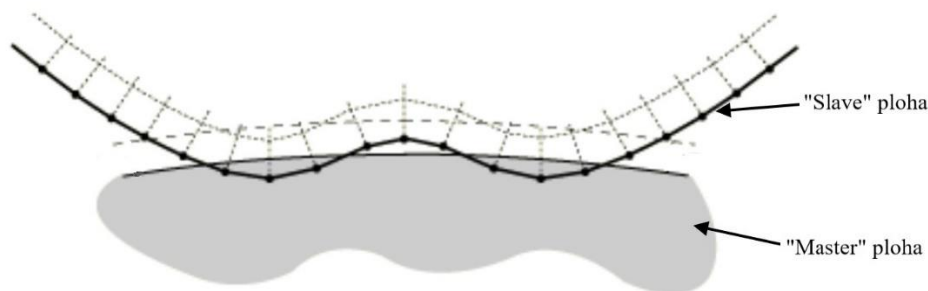
### 5.2.7. Kontakti

Prilikom definiranja kontakata između pojedinih komponenata sklopa, sve veze u modelu (veze između ljepila i čelika, ljepila i aluminija, aluminija i čelika) modelirane su sa TIE vezom koja predstavlja apsolutno krutu vezu između dvije komponente, slika 5.7.



Slika 5.7 Prikaz odvojenih komponenti

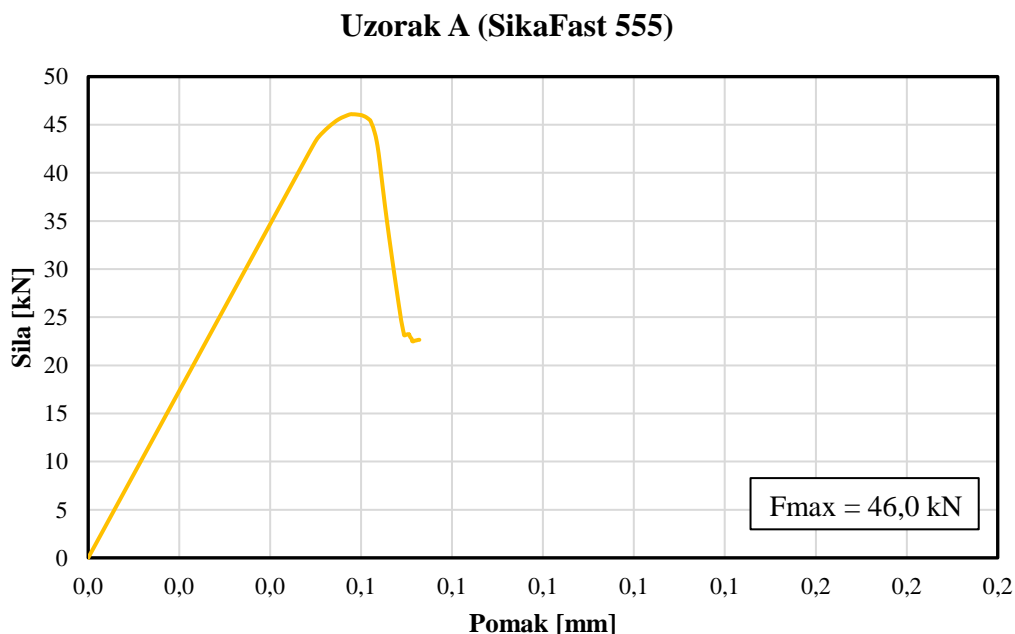
Kod definiranja TIE veze, potrebno je odabrati koje plohe će biti spojene. Između te dvije plohe je potrebno definirati koja će se odnositi kao *master* ploha, a koja kao *slave* ploha. *Master* ploha je u pravilu ona koja se ponaša kruće, a *slave* ploha ona koja se ponaša mekše. Razlog za to je u tome što pri kontaktu *slave* ploha ne može zadirati u *master* plohu dok *master* ploha može zadirati u *slave* plohu, slika 5.8. Zaključno s tim, kontaktna ploha ljepila je uvijek odabrana kao *slave*. Plohe aluminija u kontaktu s ljepilom su *master*, dok su u spoju s čelikom *slave*. Sve plohe čelika u ovom modelu su *master* plohe.



Slika 5.8 "Master" i "slave" ploha [25]

### 5.3. Rezultati i diskusija numeričkih simulacija

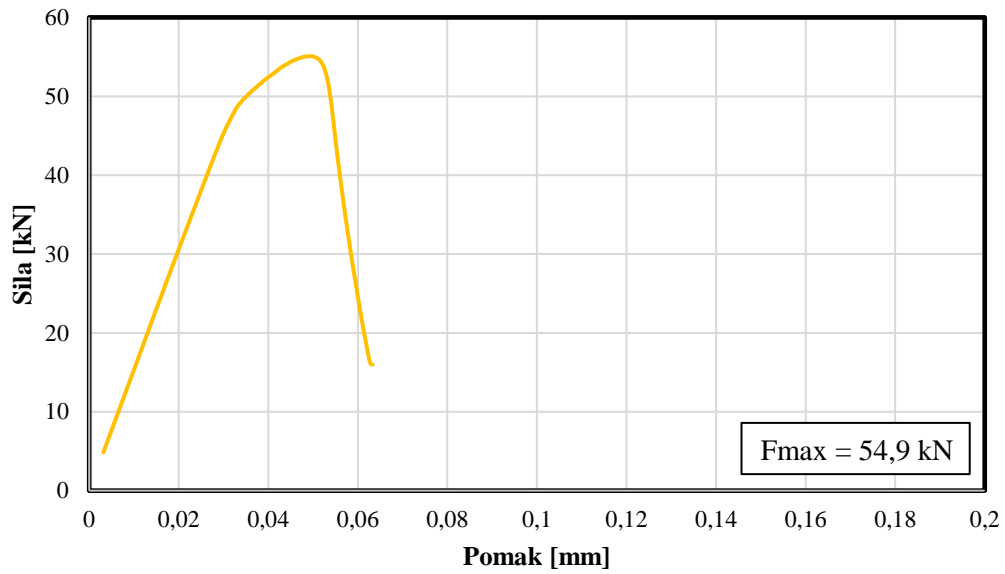
Provedbom numeričke analize dobiveni su dijagrami ovisnosti sile o vertikalnom pomaku za 4 tipa ljepila, slike 5.9 - 5.12.



Slika 5.9 Dijagram sila – pomak za uzorak A

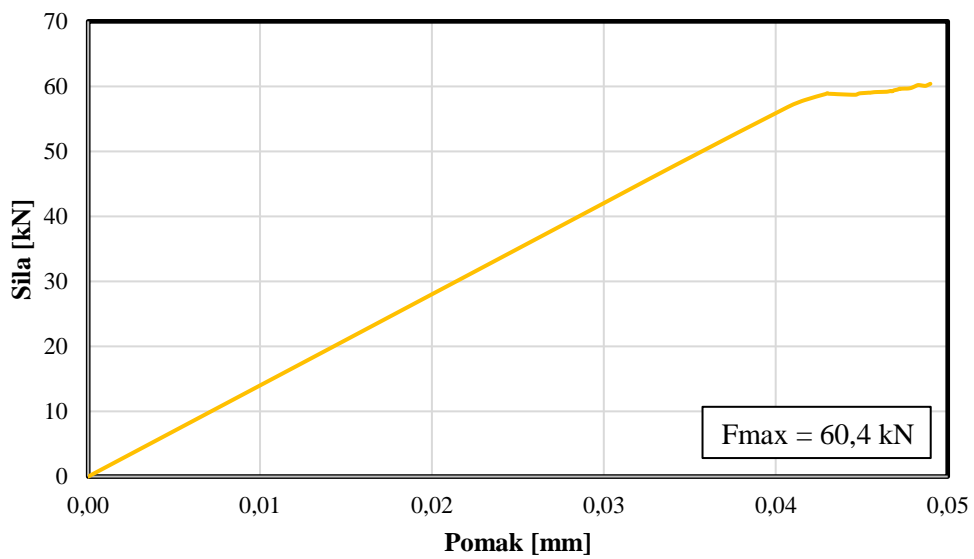


**Uzorak B (SikaPower 4720)**



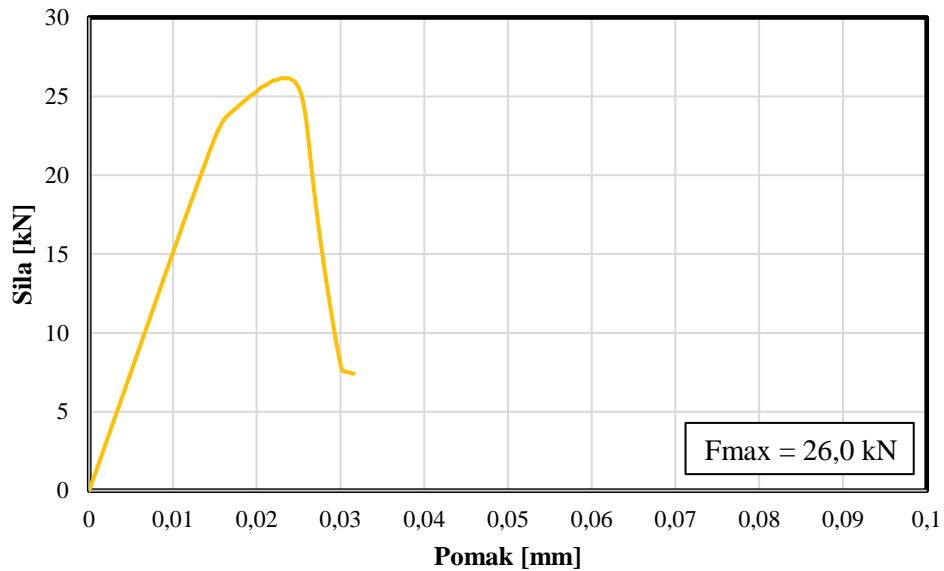
**Slika 5.10** Dijagram sila – pomak za uzorak B

**Uzorak C (Sikadur 330)**



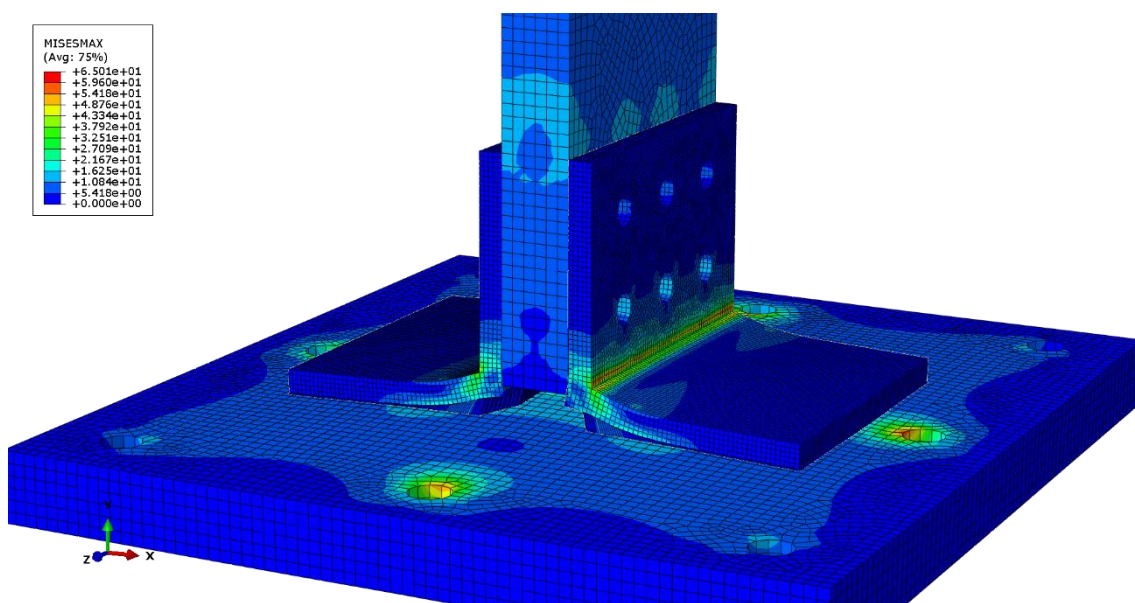
**Slika 5.11** Dijagram sila – pomak za uzorak C

**Uzorak D (Sikadur 31 CF Normal)**

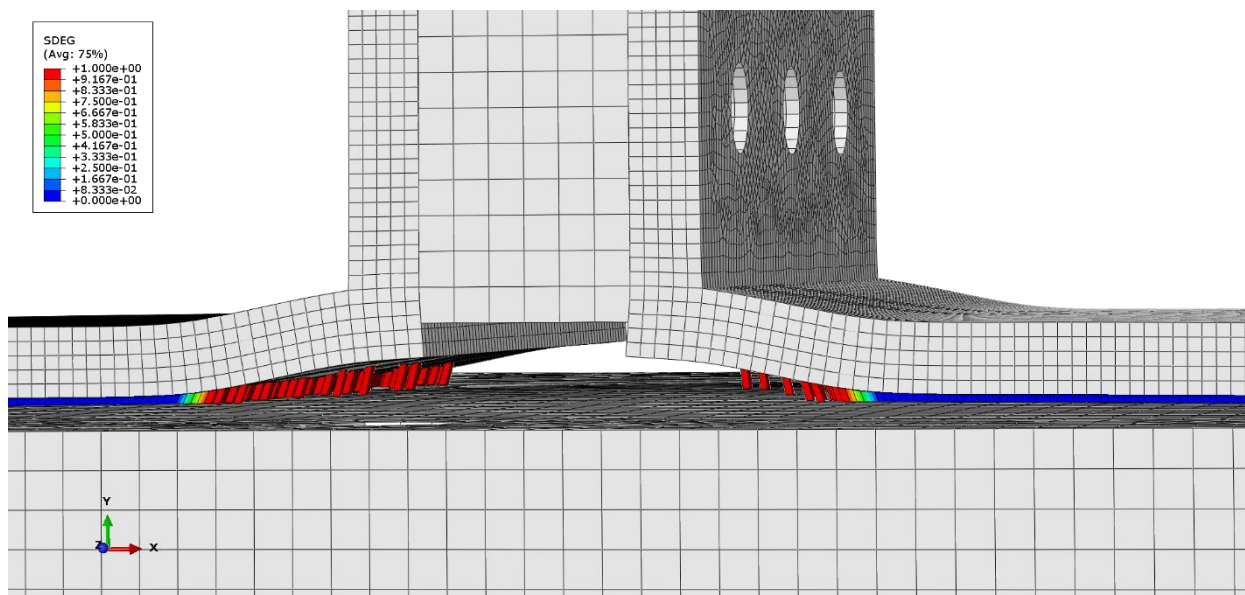


**Slika 5.12** Dijagram sila – pomak za uzorak D

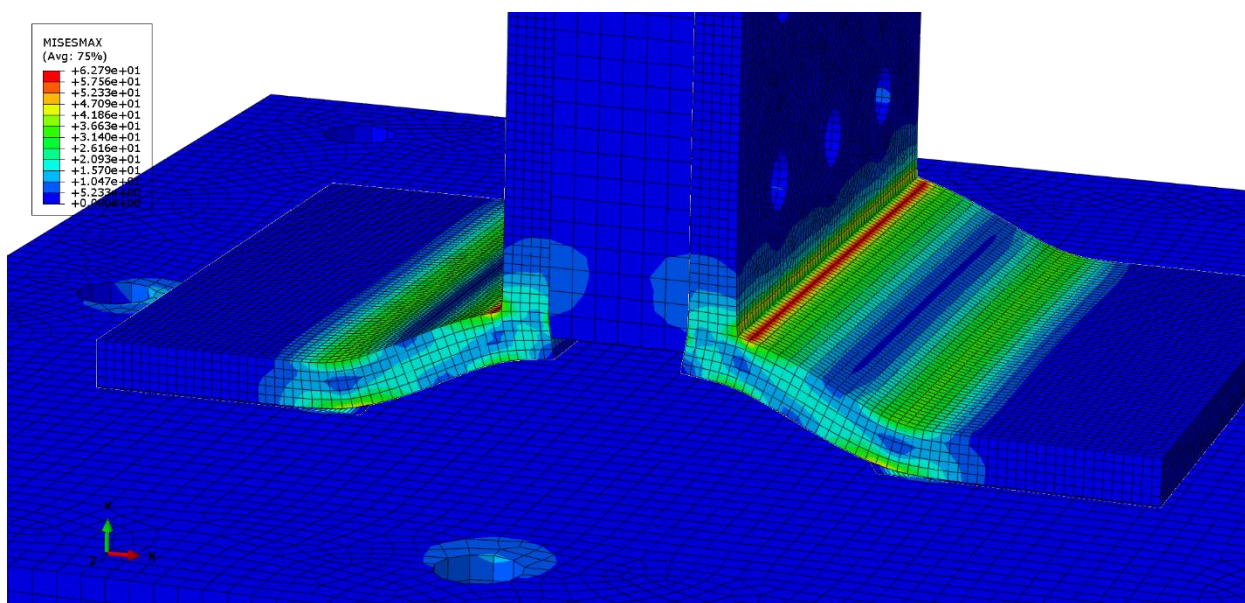
Na slikama 5.13 - 5.16 prikazano je stanje naprezanja pojedinih komponenti sklopa u trenucima postupnog otkazivanja ljepila. Za primjer je uzeto proizvoljno ljepilo kako bi se vizualno dočarao oblik deformiranja i raspodjela naprezanja.



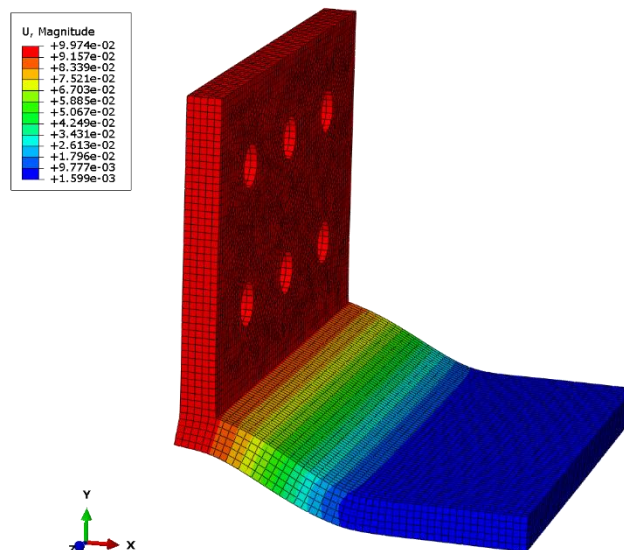
**Slika 5.13** Prostorno stanje naprezanja u trenutku otkazivanja ljepila



Slika 5.14 Degradacija ljepila



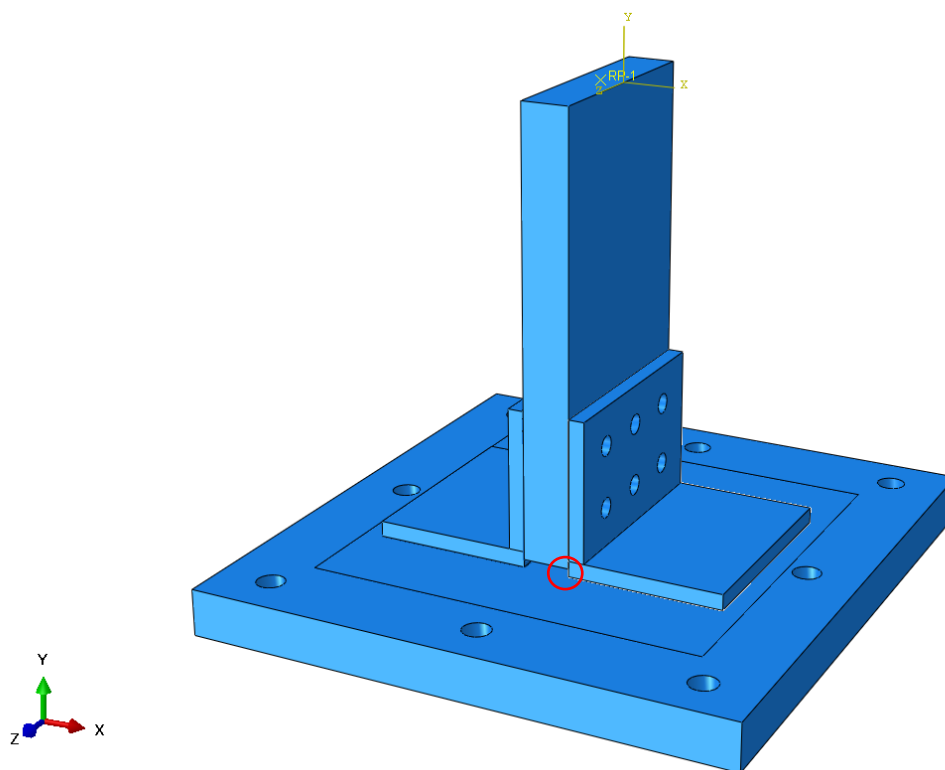
Slika 5.15 Raspodjela napreznja pri uznapredovalom otkazivanju ljepila



**Slika 5.16** Gradijent vertikalnog pomaka kutnika

Promatrajući rezultate numeričke analize vidljivo je kako ljepilo prvotno otkazuje pri rubu kutnika ispod unosa sile zbog pojave koncentracije naprezanja u toj zoni. Daljnjim otkazivanjem ljepila kutnik se postupno dovodi u stanje savijanja pri kojemu se uočava i vjerojatnost pojave plastičnog zgloba, kao što je vidljivo raspodjelom naprezanja na slici 5.15. Razlog modeliranja aluminija s plastičnim svojstvima nalazi se upravo u tom zapažanju. Na slici 5.16 prikazani su oko stotinu puta uvećani vertikalni pomaci kutnika jer su stvarni pomaci vrlo mali te su ljudskom oku teško uočljivi. Na ovaj način se želi detaljno prikazati stanje deformacije kutnika pri postupnoj degradaciji ljepila te steći dojam koliko koncentracija naprezanja može diktirati oblik deformiranja komponenti spoja.

Analogno tablici 4.5. napravljena je tablica 5.2 koja prikazuje maksimalne sile i pomake dobivenih numeričkom analizom. Analizirao se pomak točke na rubu kutnika naznačene na slici 5.17.



Slika 5.17 Položaj točke mjerenja pomaka

Tablica 5.2 Očitane maksimalne sile i vertikalni pomaci iz numeričkog modela

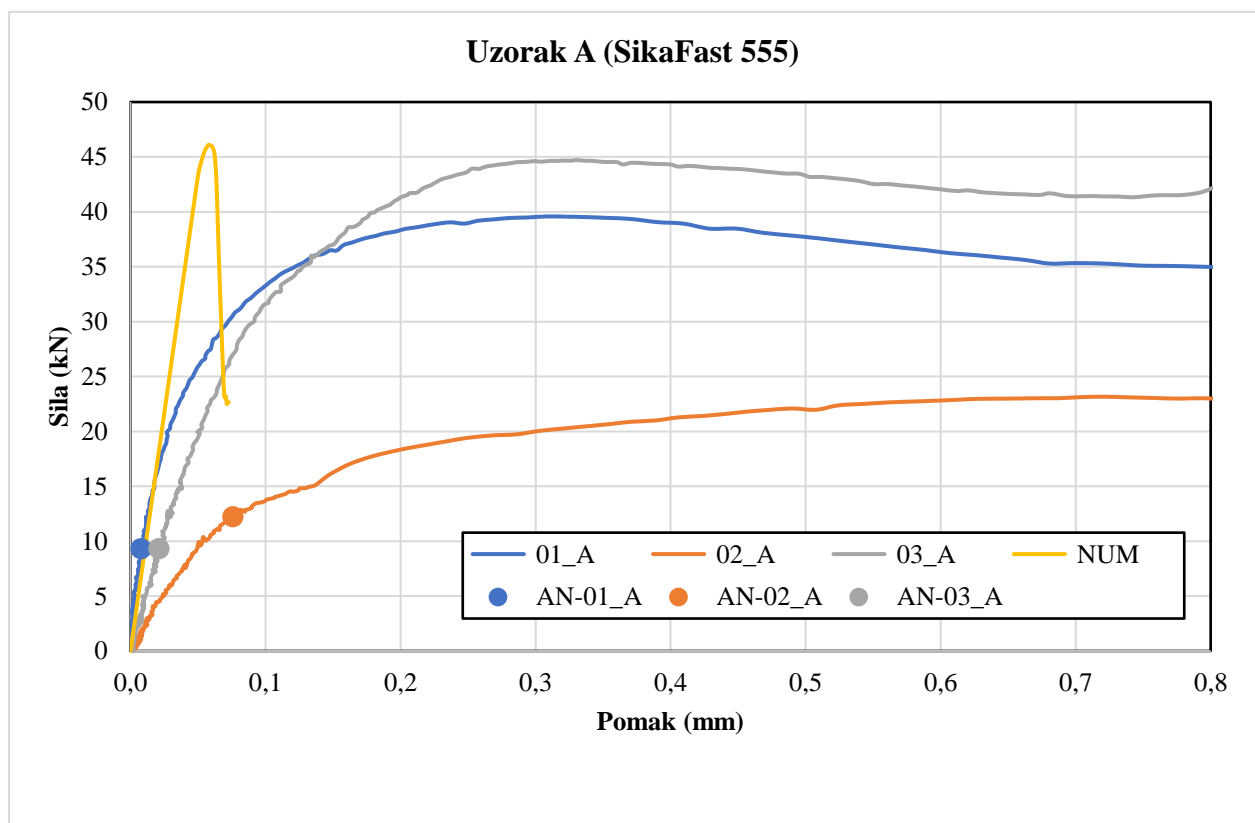
Uzorak	Maksimalna sila [kN]	Pomak [mm]
A	46,0	0,073
B	54,9	0,063
C	60,4	0,049
D	26,0	0,032



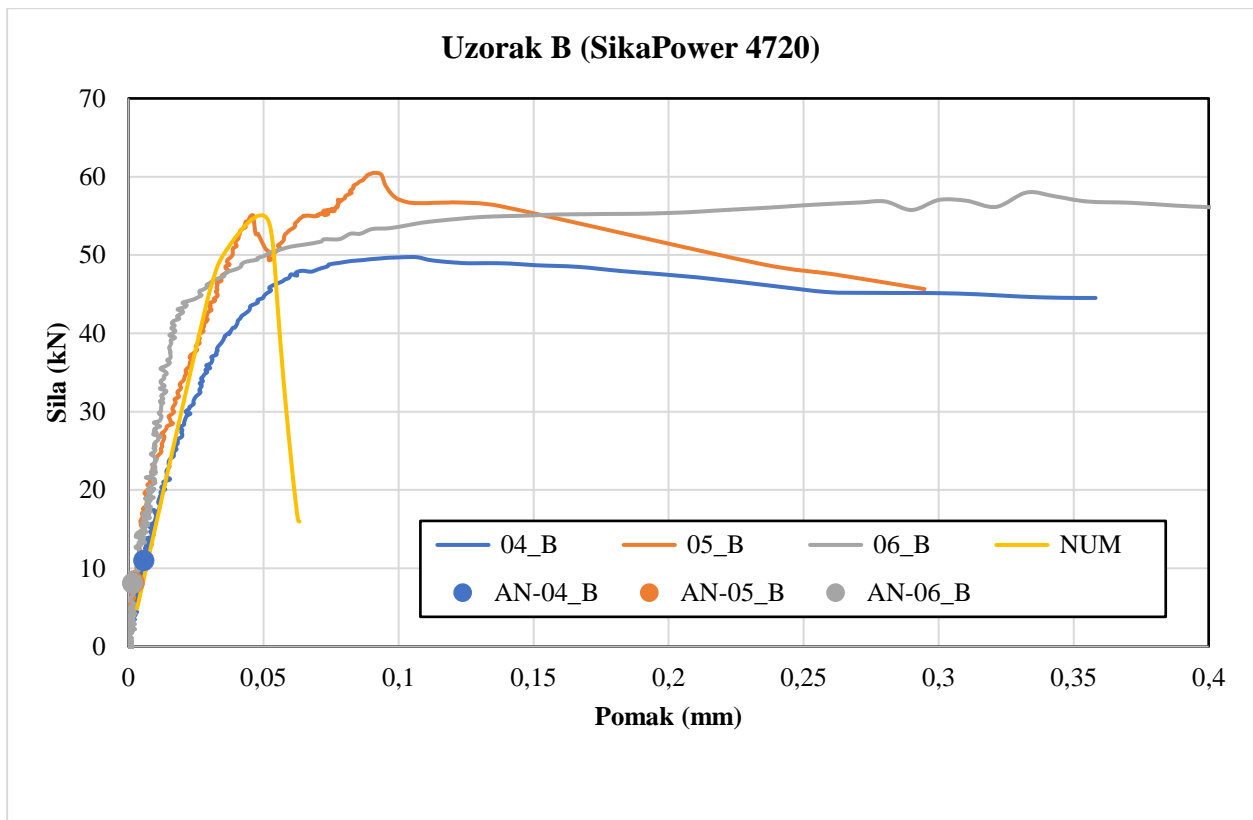
## 6. DISKUSIJA REZULTATA

### 6.1. Usporedba eksperimentalnih, numeričkih i analitičkih rezultata

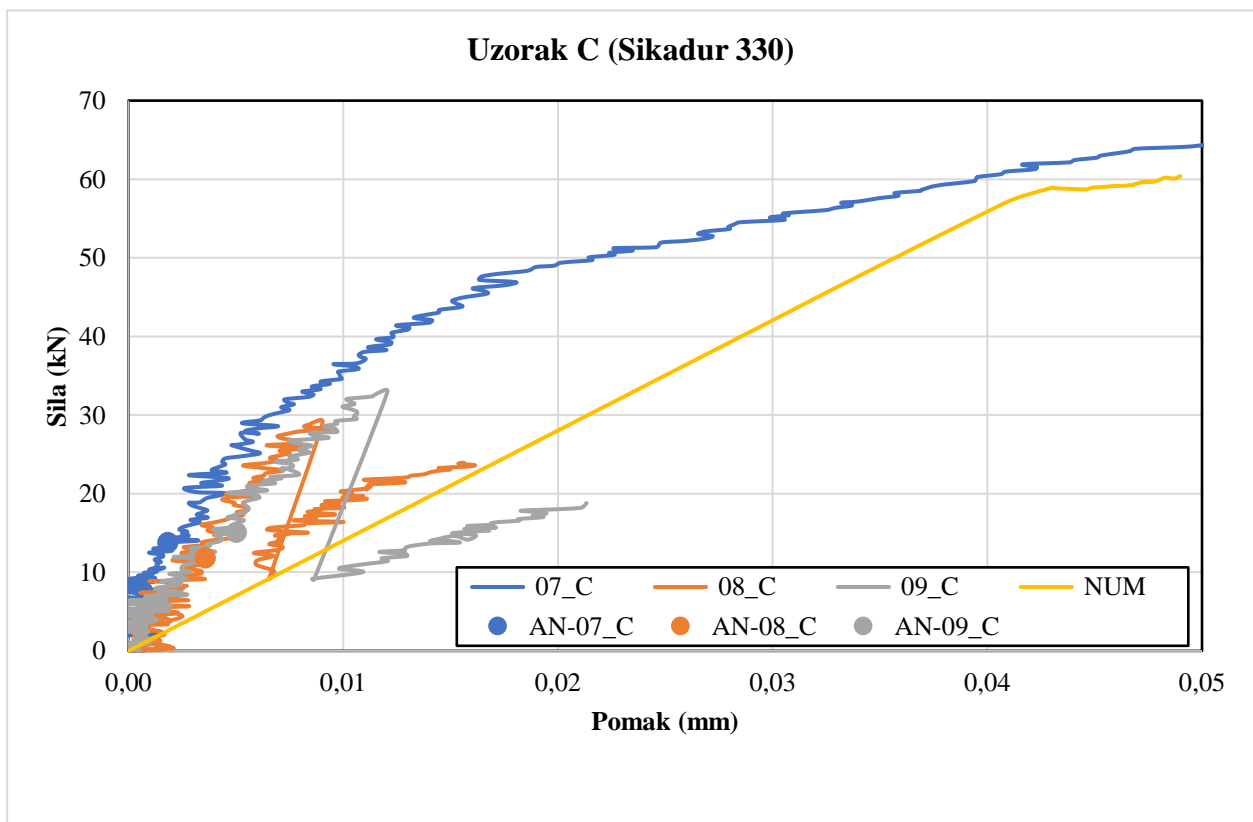
U ovom poglavlju prikazana je, grafički i tablično, usporedba numeričkih, eksperimentalnih i analitičkih rezultata. Eksperimentalni pomaci prikazani su za točku P1, čiji je položaj prikazan na slici 4.22, a numerički podaci su prikazani za točku na rubu kutnika, čiji je položaj prikazan na slici 5.17. Analitičke vrijednosti za svaki uzorak prikazane su točkama na odgovarajućim grafovima.



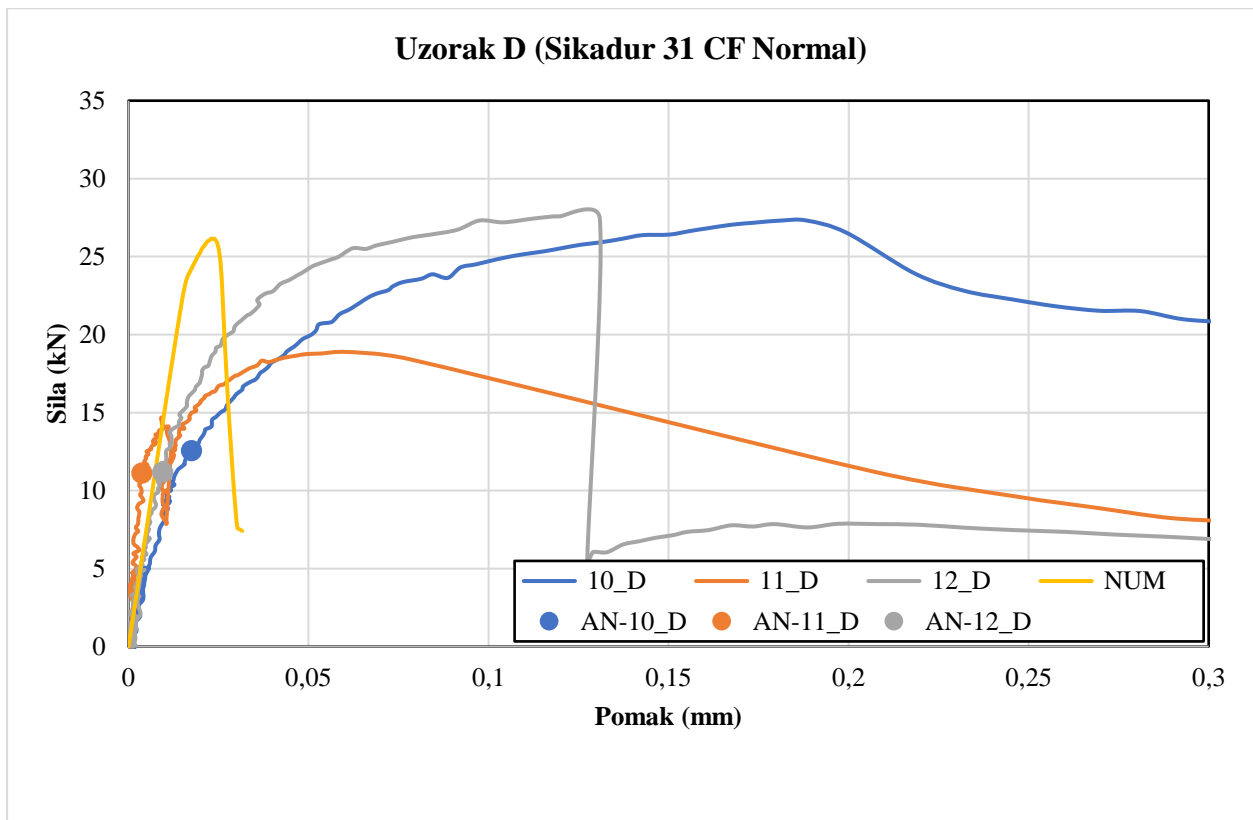
**Slika 6.1** Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata za uzorak A



Slika 6.2 Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata za uzorak B



Slika 6.3 Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata za uzorak C



**Slika 6.4** Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata za uzorak D

**Tablica 6.1** Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata

Uzorak	Maksimalna sila [kN]		Pomak [mm]	
	Eksperimentalno	Numerički	Eksperimentalno	Numerički
01_A	39,6	46,0	0,308	0,073
02_A	26,1		1,774	
03_A	44,8		1,061	
04_B	49,8	54,9	0,110	0,063
05_B	60,5		0,091	
06_B	58,9		0,639	
07_C	65,8	60,4	0,061	0,049
08_C	29,1		0,009	
09_C	34,1		0,079	
10_D	27,3	26,0	0,181	0,032
11_D	18,9		0,061	
12_D	27,6		0,120	

Usporedbom numeričkih i eksperimentalnih rezultata iz tablice 6.1 pokazuju se sljedeće razlike u maksimalnoj sili:

- **Uzorak A:** 3 – 43%
- **Uzorak B:** 7 – 9%
- **Uzorak C:** 8 – 52%
- **Uzorak D:** 5 – 27%

Važno je napomenuti ovdje kako veći postotci razlike u sili predstavljaju uvjete nedovoljne pokrivenosti površine lijepljenja ljepilom te drugačije uvjete stvrđavanja ljepila. Eksperimentalna sila generalno teži numeričkoj vrijednosti ukoliko su uvjeti lijepljenja i stvrđavanja povoljni.

Razlike u pomacima po pojedinim uzorcima su:

- **Uzorak A:** 76 – 96%
- **Uzorak B:** 31 – 90%
- **Uzorak C:** 20 – 82%
- **Uzorak D:** 48 – 83%

U tablici 6.2 prikazana je usporedba maksimalnih opterećenja za eksperimentalni, numerički i analitički slučaj.

**Tablica 6.2** Usporedba eksperimentalnih, numeričkih i analitičkih maksimalnih sila

Uzorak	Maksimalna sila [kN]		
	Eksperimentalno	Numerički	Analitički
<b>01_A</b>	39,6	46,0	9,4
<b>02_A</b>	26,1		12,2
<b>03_A</b>	44,8		9,4
<b>04_B</b>	49,8	54,9	11,0
<b>05_B</b>	60,5		8,3
<b>06_B</b>	58,9		8,3
<b>07_C</b>	65,8	60,4	13,9
<b>08_C</b>	29,1		11,7
<b>09_C</b>	34,1		15,2
<b>10_D</b>	27,3	26,0	12,5
<b>11_D</b>	18,9		11,0
<b>12_D</b>	27,6		11,4

Uvidom u tablicu 6.2 vidljivo je da analitički rezultati daju jako konzervativne iznose sila. Analitički izrazi, osim što daju samo procjenu otpornosti, a ne i pomaka i deformacija, daju znatno manje vrijednosti od onih iz laboratorijskih ispitivanja. Time se otvara prostor za racionalizaciju i bolju prilagodbu izraza. No unatoč tome, treba posvetiti oprez tom procesu zbog visoke varijabilnosti laboratorijskih rezultata koji ovise o tehnološkom procesu lijepljenja.

## 6.2. Komentar rezultata i zaključne napomene

Iz priloženih grafova usporedbe eksperimentalnih i numeričkih uzoraka te usporedne tablice može se zaključiti kako je postignuta velika razlika u otpornosti, tj. sili za sve grupe uzoraka. Također se može uočiti kako je pomak iz numeričke analize relativno mali u odnosu na eksperimentalni pomak. To je posljedica *Traction – separation* zakona po kojem se modelirala degradacija ljepila u Abaqusu. U numeričkom modelu upotrijebljen je, zbog svoje jednostavnosti i dostupnosti u ABAQUS-u, trokutasti *traction – separation* zakon (vidjeti točku 5.2.5.) koji predviđa instantnu degradaciju ljepila nakon dosezanja kritičnog naprezanja, a eksperimentalni rezultati ispitivanja ljepila ukazuju na određeni plato tečenja nakon dosezanja maksimalnog opterećenja. Upotrebom prikladnijeg *traction – separation* zakona, poput trapeznoga, ovakvo ponašanje ljepila moglo bi se preciznije uzeti u obzir. Razlike između eksperimentalnih i numeričkih pomaka dodatno su potkrijepljene slučajnim ekscentricitetima sile prilikom eksperimenta koji rezultiraju neravnomjernim opterećenjem lijepljenih površina lijevog, odnosno desnog kutnika.

Generalno, prilikom formiranja lijepljenog spoja potrebno je dobro pripremiti površinu lijepljenja kako bi se ostvarila što bolja prionjivost ljepila. Uz dobru obradu površine potrebno je i paziti da se ljepilo pažljivo aplicira na cijelu površinu lijepljenja kako bi se ostvarila puna nosivost spoja te kako bi se izbjegla oslabljenja u vidu nepotpuno zalijepljene površine dijelova koji se spajaju. S obzirom da je potrebno težiti podjednakom opterećenju svih lijepljenih površina, pažnja se mora obratiti na modificiranje početne konfiguracije u smislu uklanjanja bilo kakvih ekscentriciteta. Na taj će se način izbjeći prerano otkazivanje jedne lijepljene plohe. Ne smije se zanemariti omogućavanje dovoljnog vremena sušenja ljepila, na adekvatnoj temperaturi, kako bi ono postiglo maksimalnu prionjivost, odnosno nosivost. Uzevši sve navedeno u obzir, jedino što se nameće kao prikladan tehnološki postupak proizvodnje ovakvih spojeva jest automatizirana i strogo kontrolirana proizvodnja u prikladnim uvjetima. Na taj način bi se varijacije u rezultatima smanjile na minimum te bi se tako osigurala kvaliteta i uniformnost izvođenja kakvu lijepljeni spojevi zahtijevaju.

## **7. ZAKLJUČAK**

### **7.1. Neposredni zaključci iz provedenog istraživanja**

Ponašanje analiziranih tipova vlačno opterećenih lijepljenih spojeva aluminij - čelik je izuzetno kompleksno i uvelike ovisi o kvaliteti izvedbe samog spoja. Naime, adekvatna priprema spojnih površina i apliciranje ljepila koje mora biti ravnomjerno raspoređeno po cijeloj spojnoj površini aluminijskog kutnika uvelike diktira mehaničko ponašanje ovakvih spojeva. Problematika je tim veća jer norma za projektiranje aluminijskih konstrukcija, HRN EN 1999-1-1, ne obuhvaća projektiranje vlačno naprezanih lijepljenih spojeva. Upravo su to i razlozi zašto se ponašanje razmatranih spojeva u okviru ovog istraživanja provelo eksperimentalnim i numeričkim metodama.

Provedena originalna laboratorijska ispitivanja obuhvaćala su vlačno ispitivanje zalijepljenog para aluminijskih kutnika na čeličnu ploču. U tu svrhu ispitno je ukupno 12 parova kutnika, po 3 za svaku od 4 analizirane vrste ljepila. Rezultati su zabilježeni preko tradicionalnih LVDT uređaja i pomoću suvremenog sustava ARAMIS senzora koji se pokazao ključnim za bilježenje realnog ponašanja ovih vrlo osjetljivih spojeva. Svi uzorci lijepljenih spojeva otkazali su preko ljepila u različitim postocima otkazivanja kroz sloj ljepila i/ili u kontaktu ljepila i spojne površine aluminijskog kutnika, odnosno čelične ploče. Uz ispitivanje globalnog ponašanja spojeva provedena su i vlačna ispitivanja osnovnog materijala aluminijskih kutnika. Dobiveni su rezultati korišteni pri utvrđivanju stvarnih mehaničkih svojstava koji su kasnije korišteni u numeričkim simulacijama.

Numeričke simulacije provedene su u programskom paketu Simulia Abaqus. Zbog utjecaja neujednačenosti postupka ručnog lijepljenja eksperimentalni rezultati su neujednačeni čak i unutar serije uzoraka s istom vrstom ljepila. Ipak, razvijeni se numerički modeli zadovoljavajuće dobro poklapaju s prvom fazom ponašanja i kvalitetno karakteriziraju krajnju otpornost ispitanih serija uzoraka lijepljenih spojeva.

Napominje se da je ovo početna faza numeričkih simulacija i da je numeričke modele, u budućim istraživanjima, potrebno kalibrirati na temelju provedenih i dodatnih laboratorijskih ispitivanja u kojima će se pobliže odrediti i fizikalna svojstva korištenih vrsta ljepila. Takvi kalibrirani modeli će moći u potpunosti simulirati ponašanje lijepljenih spojeva te će se s njima moći provesti optimiziranje u pogledu geometrije analiziranih spojeva i odabira optimalne vrste ljepila. To je



ujedno i smjernica za daljnja istraživanja koja će u konačnici voditi do uporabe lijepljenih konstrukcijskih spojeva u aluminijskim konstrukcijama.

U konačnici, iako su dostupni analitički izrazi iz literature bili korisni za usporedbu s eksperimentalnim i numeričkim vrijednostima, postoji prostor za poboljšavanje njihove točnosti i pouzdanosti. Kako bi se postigla veća preciznost u interpretaciji ponašanja ovih spojeva, preporučuju se daljnja istraživanja koja će se usredotočiti na razvoj analitičkog izraza za otpornosti na odljepljivanje.

## 7.2. Smjernice za daljnja istraživanja

U toku provedbe ovog istraživanja javljale su se brojne nove problematike koje bi bilo trebalo dodatno obraditi u daljnjim istraživanjima. Neke od njih su:

- Pomaci kod ovakvih ispitivanja su iznimno mali, do te mjere da ih čak i induktivna osjetila otežano registriraju. Za potrebe ovog rada korišteni su također i LVDT uređaji, ali zbog međusobnog rasipanja njihovih zapisa, tako dobiveni rezultati nisu uzeti u obzir. Zbog toga se preporuča korištenje ARAMIS senzora za mjerenje pomaka oba kutnika jer se tako mogu mjeriti jako mali pomaci i utvrditi razlike koje nastaju kod preuranjenog otkazivanja spoja jednog od kutnika.
- U ovom radu se zbog debljine kutnika nije moglo promatrati plastično ponašanje aluminijskog kutnika uslijed savijanja zalijepljenog kraka. U buduću se preporuča smanjiti debljinu kutnika kako bi se proučila interakcija između otkazivanja ljepila i plastifikacije samog kutnika. Naime, takav način otkazivanja predstavlja poželjan način otkazivanja u realnim konstrukcijama i u cilju primjenjivosti istraživanja potrebno ga je detaljno istražiti.
- Prilikom provedbe eksperimentalnog dijela istraživanja uzeta je u obzir samo jedna debljina kutnika u odnosu na različite debljine ljepila. U daljnjim istraživanjima preporuča se varijacija u debljini kutnika i debljini ljepila u svrhu promatranja međusobne ovisnosti i utvrđivanju optimalne kombinacije debljina kutnika, odnosno sloja ljepila.
- Numerička simulacija otkazivanja ljepila u Abaqusu je uzeta u obzir kao bilinearni *Traction - separation* zakon. Potrebno je proučiti utjecaj drugih oblika *traction – separation* zakona (trapezni, eksponencijalni, parabolički) na točnost aproksimacije ponašanja ljepila.

## **ZAHVALA**

Zahvaljujemo se Katedri za metalne konstrukcije Građevinskog fakulteta u Zagrebu koja nam je pomogla u pisanju ovog rada i provedbi laboratorijskih istraživanja.

Najveću zahvalu upućujemo našem mentoru prof.dr.sc. Davoru Skejiću i asistentu Anđelu Valčiću, mag.ing.aedif. na savjetima te vođenju i poticanju kroz cijelo istraživanje te dr. sc. Janku Koščaku, mag.ing.aedif. i izv.prof.dr.sc. Ivanu Duvnjaku (komentoru) bez kojih provedba eksperimentalnih istraživanja u Laboratoriju za ispitivanje konstrukcija ne bi bila moguća.

Posebnu zahvalu upućujemo tvrtkama Sika Croatia d.o.o., Bajkmont d.o.o. i KFK d.o.o. na donacijama komponenti za provedbu ispitivanja.

## LITERATURA

- [1] *Industry Plaza*, Dostupno: <https://www.industry-plaza.com/aluminium-profiles-mcs-p202404790.html> [Pristupljeno: 03.02.2022.]
- [2] *ElAlibaba.com*, Dostupno: [https://www.alibaba.com/product-detail/Aluminium-Profile-Frame-For-Glass-Display\\_1600200695476.html](https://www.alibaba.com/product-detail/Aluminium-Profile-Frame-For-Glass-Display_1600200695476.html) [Pristupljeno: 03.02.2022.]
- [3] HRN EN 1999-1-1:2015, Eurokod 9: Projektiranje aluminijskih konstrukcija -- Dio 1-1: Opća pravila (EN 1999-1-1:2007+A1:2009+A2:2013)
- [4] Moreira, F.J.P., Campilho, R.D.S.G., Cardoso, M.G., Silva, F.J.G., Evaluation of T-joints in aluminium structures under different geometries, *Procedia Manufacturing*, 2020, 51, 848–855
- [5] Tuli, J.P., *Tuli*, Dostupno: <https://www.tuli.hr/blog/spojni-elementi-aluminijski-profili.html>, [Pristupljeno: 13.04.2022.]
- [6] Interna skripta – Elementi strojeva 1, Dostupno: <https://www.ffri.hr/~mdundjer/Elementi%20strojeva%20I/07-VijcaniSpojevi.pdf>, [Pristupljeno: 16.04.2022.]
- [7] Fiorino, L., Macillo, V., Mazzolani, F. M., Mechanical behaviour of bolt-channel joining technology for aluminium structures, *Construction and Building Materials*, 2014, 73, 76-88
- [8] Sapa, Design Manual, Sapa Profiler AB, Dostupno: <https://qdoc.tips/queue/sapa-extrusion-design-manual-pdf-free.html> [Pristupljeno: 17.04.2022.]
- [9] Piekarczyk, M., Grec, R., Application of adhesive bonding in steel and aluminium structures, *Archives of civil engineering*, 2012, 3, LVIII, 310-329
- [10] Lucić, M., Stoić, A., Kopac, J., Investigation of aluminium single lap adhesively bonded joints, urednik, *11th International scientific conference on contemporary achievements in mechanic, manufacturing and materials science*, 6.-9. prosinca 2005, Gliwice – Zakopane, Poljska, 597-604
- [11] Plasticine house, Dostupno: <https://plasticinehouse.com/how-to-connect-2-4x4-posts-together/> [Pristupljeno: 20.04.2022.]
- [12] Sugaya, T., Obuchi, T., Influences of Loading Rates on Stress-Strain Relations of Cured Bults of Brittle and Ductile Adhesives, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, 2011, 5(12), 921-928
- [13] Mohabeddine, A., Malik, G., Correia, J., Fantuzzi, N., De Jesus, A., Castro, J., M., Calcada, R., Berto, F., Comparison between brittle and ductile adhesives in CFRP/steel joints, *Procedia Structural Integrity*, 2022, 37, 1043-1048
- [14] Dokšanović, T., Džeba, I., Markulak, D., Applications of aluminium alloys in civil engineering, *Tehnički vjesnik*, 2017, 24(5), 1609-1618
- [15] Skejić, D., Boko, I., Torić, N., Aluminij kao materijal za suvremene konstrukcije, *Građevinar*, 2015, 11(67), 1075-1085
- [16] Krolo., J., Šimić, D., *Mehanika materijala*, Zagreb, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2011
- [17] Tehnički list proizvoda SikaFast-555 L10, verzija 02.01, 2020
- [18] Tehnički list proizvoda SikaPower-4720, verzija 2 (08/2015), 2015

- [19] Tehnički list proizvoda Sikadur-330, Izdanje 27/08/2013, 2013
- [20] Tehnički list proizvoda Sikadur-31 CF Normal, verzija 01.01, 2019
- [21] Interna skripta, Meštrović, M., *Metoda konačnih elemenata*, 2020.
- [22] Dostupno: [https://www.researchgate.net/figure/Different-forms-of-the-traction-separation-law\\_fig1\\_236866498](https://www.researchgate.net/figure/Different-forms-of-the-traction-separation-law_fig1_236866498) [Pristupljeno: 15.06.2022.]
- [23] Simulia Abaqus 6.11, Dostupno: <http://130.149.89.49:2080/v6.11/books/usb/default.htm?startat=pt09ch36s01aus172.html> [Pristupljeno: 04.05.2022.]
- [24] Nunes, S.L.S., Campilho, R.D.S.G., da Silva, F.J.G., de Sousa, C.C.R.G., Fernades, T.A.B., Banea, M.D., da Silva, L.F.M., Comparative failure assessment of single and double-lap joints with varying adhesive system, *The Journal of Adhesion*, 2015
- [25] CAE Assistant, Dostupno: <https://caeassistant.com/questions/question/master-slave-surfaces-basic-rules-1> [Pristupljeno: 10.05.2022.]
- [26] Godzimirski J., Kozakiewicz J., Lunarski J., Zielecki W.: Konstrukcyjne połączenia klejowe elementów metalowych w budowie maszyn. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej. Rzeszow, 1997.
- [27] Constro facilitator, Dostupno: <https://constrofacilitator.com/what-are-the-different-types-of-adhesives-used-in-construction/> [Pristupljeno: 12.03.2022.]

## POPIS SLIKA

<i>Slika 1.1</i> Mogućnosti oblikovanja aluminijskih profila za različitu namjenu [1, 2].....	4
<i>Slika 1.2</i> Spojna sredstva za aluminijske profile [5] .....	7
<i>Slika 1.3</i> Vijčani spoj - osnovni element [6].....	8
<i>Slika 1.4</i> Vijčano - kanalni spoj [8].....	8
<i>Slika 1.5</i> Vlačno ispitivanje jednostruko preklopnog spoja [10].....	9
<i>Slika 1.6</i> Različite konfiguracije lijepljenih spojeva [11].....	10
<i>Slika 1.7</i> Usporedba krto i duktilnog ljepila pri vlačnom ispitivanju [13].....	13
<i>Slika 3.1</i> Posmični lijepljeni spoj [3].....	16
<i>Slika 3.2</i> Slučaj opterećenja na odljepljivanje.....	18
<i>Slika 4.1</i> Razmještaj uzoraka i dodatne opreme za ispitivanje na vlak .....	22
<i>Slika 4.2</i> Elementi konfiguracije za laboratorijsko ispitivanje .....	23
<i>Slika 4.3</i> Razmještaj LVDT mjernih uređaja .....	24
<i>Slika 4.4</i> Položaj ARAMIS kamera .....	25
<i>Slika 4.5</i> Uzorci kutnika s naznačenim oznakama mjerenih dimenzija .....	26
<i>Slika 4.6</i> Dimenzije i oblik uzorka za ispitivanje materijala.....	29
<i>Slika 4.7</i> Vlačna proba aluminijskih epruveta.....	30
<i>Slika 4.8</i> Uzorci nakon vlačnog ispitivanja .....	30
<i>Slika 4.9</i> Rezultati ispitivanja uzoraka aluminija .....	31
<i>Slika 4.10</i> Ljepila korištena u prvom stadiju nanošenja.....	34
<i>Slika 4.11</i> Nanošenje ljepila SikaFast 555 na aluminijski kutnik .....	34
<i>Slika 4.12</i> Aluminijski kutnik zalijepljen ljepilom SikaFast 555 na čeličnu ploču.....	35
<i>Slika 4.13</i> Nanošenje ljepila SikaPower 4720 na aluminijski kutnik.....	36
<i>Slika 4.14</i> Istiskanje viška ljepila SikaPower 4720 .....	36
<i>Slika 4.15</i> Statički mikser korišten kod ljepila SikaFast 555 te SikaPower 4720 .....	37
<i>Slika 4.16</i> Ljepila korištena u drugom stadiju nanošenja.....	37
<i>Slika 4.17</i> Nanošenje ljepila Sikadur 330 na aluminijski kutnik.....	38
<i>Slika 4.18</i> Nanošenje ljepila Sikadur 31 CF-Normal na aluminijski kutnik .....	38
<i>Slika 4.19</i> Miješanje A i B komponenti ljepila a) Sikadur 330 te b) Sikadur 31 CF-Normal .....	39
<i>Slika 4.20</i> Uzorak spreman za ispitivanje.....	40
<i>Slika 4.21</i> Ispitivanje uzorka lijepljenih kutnika.....	41
<i>Slika 4.22</i> Shematski prikaz točaka P1, P2, P3 i P4.....	42
<i>Slika 4.23</i> Odnos sila-pomak za karakteristične točke uzorka 01_A_R.....	43
<i>Slika 4.24</i> Polje vertikalnih pomaka tijekom ispitivanja uzorka 01_A .....	43
<i>Slika 4.25</i> Prikaz lomnih površina ljepila uzorka 01_A.....	44
<i>Slika 4.26</i> Odnos sila-pomak za karakteristične točke uzorka 02_A_R.....	44
<i>Slika 4.27</i> Polje vertikalnih pomaka tijekom ispitivanja uzorka 02_A .....	45
<i>Slika 4.28</i> Prikaz lomnih površina ljepila uzorka 02_A.....	45
<i>Slika 4.29</i> Odnos sila-pomak za karakteristične točke uzorka 03_A_R.....	46

<i>Slika 4.30</i>	Polje vertikalnih pomaka tijekom ispitivanja uzorka 03_A .....	46
<i>Slika 4.31</i>	Prikaz lomnih površina ljepila uzorka 03_A.....	47
<i>Slika 4.32</i>	Odnos sila-pomak za karakteristične točke uzorka 04_B_R.....	47
<i>Slika 4.33</i>	Polje vertikalnih pomaka tijekom ispitivanja uzorka 04_B .....	48
<i>Slika 4.34</i>	Prikaz lomnih površina ljepila uzorka 04_B.....	48
<i>Slika 4.35</i>	Odnos sila-pomak za karakteristične točke uzorka 05_B_R.....	49
<i>Slika 4.36</i>	Polje vertikalnih pomaka tijekom ispitivanja uzorka 05_B .....	49
<i>Slika 4.37</i>	Prikaz lomnih površina ljepila uzorka 05_B.....	50
<i>Slika 4.38</i>	Odnos sila-pomak za karakteristične točke uzorka 06_B_R.....	50
<i>Slika 4.39</i>	Polje vertikalnih pomaka tijekom ispitivanja uzorka 06_B .....	51
<i>Slika 4.40</i>	Prikaz lomnih površina ljepila uzorka 06_B.....	51
<i>Slika 4.41</i>	Odnos sila-pomak za karakteristične točke uzorka 07_C_R.....	52
<i>Slika 4.42</i>	Polje vertikalnih pomaka tijekom ispitivanja uzorka 07_C .....	52
<i>Slika 4.43</i>	Prikaz lomnih površina ljepila uzorka 07_C .....	53
<i>Slika 4.44</i>	Odnos sila-pomak za karakteristične točke uzorka 08_C_R.....	53
<i>Slika 4.45</i>	Polje vertikalnih pomaka tijekom ispitivanja uzorka 08_C .....	54
<i>Slika 4.46</i>	Prikaz lomnih površina ljepila uzorka 08_C .....	54
<i>Slika 4.47</i>	Odnos sila-pomak za karakteristične točke uzorka 09_C_R.....	55
<i>Slika 4.48</i>	Polje vertikalnih pomaka tijekom ispitivanja uzorka 09_C .....	55
<i>Slika 4.49</i>	Prikaz lomnih površina ljepila uzorka 09_C .....	56
<i>Slika 4.50</i>	Odnos sila-pomak za karakteristične točke uzorka 10_D_R .....	56
<i>Slika 4.51</i>	Polje vertikalnih pomaka tijekom ispitivanja uzorka 10_D.....	57
<i>Slika 4.52</i>	Prikaz lomnih površina ljepila uzorka 10_D.....	57
<i>Slika 4.53</i>	Odnos sila-pomak za karakteristične točke uzorka 11_D_R .....	58
<i>Slika 4.54</i>	Polje vertikalnih pomaka tijekom ispitivanja uzorka 11_D.....	58
<i>Slika 4.55</i>	Prikaz lomnih površina ljepila uzorka 11_D.....	59
<i>Slika 4.56</i>	Odnos sila-pomak za karakteristične točke uzorka 12_D_R.....	59
<i>Slika 4.57</i>	Polje vertikalnih pomaka tijekom ispitivanja uzorka 12_D.....	60
<i>Slika 4.58</i>	Prikaz lomnih površina ljepila uzorka 12_D.....	60
<i>Slika 5.1</i>	Geometrija modela .....	64
<i>Slika 5.2</i>	Rubni uvjeti i opterećenje .....	65
<i>Slika 5.3</i>	Unos opterećenja i rubni uvjeti na vertikalnoj čeličnoj ploči.....	66
<i>Slika 5.4</i>	Srednji dijagram naprezanja i deformacija epruveta .....	66
<i>Slika 5.5</i>	Oblici Traction – separation zakona [22] .....	68
<i>Slika 5.6</i>	Mreža konačnih elemenata .....	69
<i>Slika 5.7</i>	Prikaz odvojenih komponenti.....	69
<i>Slika 5.8</i>	"Master" i "slave" ploha [25].....	70
<i>Slika 5.9</i>	Dijagram sila – pomak za uzorak A.....	70
<i>Slika 5.10</i>	Dijagram sila – pomak za uzorak B.....	71
<i>Slika 5.11</i>	Dijagram sila – pomak za uzorak C .....	71



<i>Slika 5.12</i> Dijagram sila – pomak za uzorak D .....	72
<i>Slika 5.13</i> Prostorno stanje naprezanja u trenutku otkazivanja ljepila .....	72
<i>Slika 5.14</i> Degradacija ljepila .....	73
<i>Slika 5.15</i> Raspodjela naprezanja pri uznapređovalom otkazivanju ljepila .....	73
<i>Slika 5.16</i> Gradijent vertikalnog pomaka kutnika .....	74
<i>Slika 5.17</i> Položaj točke mjerenja pomaka .....	75
<i>Slika 6.1</i> Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata za uzorak A .....	76
<i>Slika 6.2</i> Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata za uzorak B .....	77
<i>Slika 6.3</i> Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata za uzorak C .....	77
<i>Slika 6.4</i> Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata za uzorak D .....	78

## POPIS TABLICA

<b>Tablica 1.1</b> Razlike između fizikalnih svojstava čistog aluminija i čistog čelika .....	6
<b>Tablica 3.1</b> Vrijednosti analitičkih maksimalnih sila .....	20
<b>Tablica 4.1</b> Izmjerena geometrijska svojstva kutnika .....	27
<b>Tablica 4.2</b> Izmjerena geometrijska svojstva kutnika .....	28
<b>Tablica 4.3</b> Izmjerena geometrijska svojstva pojedinih uzoraka materijala.....	29
<b>Tablica 4.4</b> Izmjerena mehanička svojstva uzoraka aluminija .....	31
<b>Tablica 4.5</b> Prikaz maksimalnih sila i pripadnih pomaka .....	61
<b>Tablica 5.1</b> Mehanička svojstva ljepila (tehnički list).....	67
<b>Tablica 5.2</b> Očitane maksimalne sile i vertikalni pomaci iz numeričkog modela .....	75
<b>Tablica 6.1</b> Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata .....	78
<b>Tablica 6.2</b> Usporedba eksperimentalnih, numeričkih i analitičkih maksimalnih sila .....	79

## **SAŽETAK**

**Dora Golubiček, Lovro Novinc, Elena Perković**

### **Utjecaj vrste ljepila na ponašanje konstrukcijskih spojeva između aluminija i čelika**

Kod zavarivanja čelika s aluminijem, zbog različitih fizikalnih i kemijskih svojstva tih dvaju metala, nameće se problematika formiranja intermetalne veze. Naime, zavarivanjem se narušavaju mehanička svojstva spoja i zone utjecaja topline, neposredno uz spoj, do te mjere da je direktno zavarivanje aluminija i čelika još uvijek otvorena i vrlo složena problematika. Drugi, puno prihvatljiviji, ali još uvijek nedovoljno istražen, način spajanja aluminija i čelika je lijepljenje. Kao adekvatniji način spajanja, adhezivne veze ističu se prednostima pred ostalim načinima spajanja konstruktivnih elemenata. Jedna od najvažnijih prednosti jest ujednačenija raspodjela naprezanja, čemu slijede i jednostavnost primjene, malen do nikakav utjecaj na mehanička svojstva materijala kao i širok spektar materijala koji se mogu spajati. Naravno, postoje i nedostaci u pogledu zahtjevnije površinske pripreme te niske čvrstoće odljepljivanja koje su se kroz eksperimentalni dio rada detaljno razradile i opisale.

U radu je prikazano originalno istraživanje primjene ljepila kao spojnog sredstva za spajanje aluminijskih i čeličnih konstruktivnih elemenata. Provedena eksperimentalna i numerička istraživanja obuhvatila su utjecaj četiri vrste ljepila na ponašanje lijepljenih spojeva između aluminijskih kutnika i čelične ploče. Kvantificiran je i utjecaj pripreme lijepljenih površina i same debljine sloja pojedine vrste ljepila. Provedene, vrlo kompleksne, numeričke simulacije dosta dobro opisuju eksperimentalno ponašanje razmatranih tipova spojeva naročito u prvoj fazi ponašanja i mogu poslužiti kao baza za daljnje kalibriranje numeričkih modela. Takvi modeli će moći u potpunosti simulirati ponašanje lijepljenih spojeva te će se s njima moći provesti optimiziranje u pogledu geometrije analiziranih spojeva i odabira optimalne vrste ljepila. To je ujedno i smjernica za daljnja istraživanja koja će u konačnici voditi i do češće uporabe ljepila kod aluminijskih konstrukcija.

**Ključne riječi:** lijepljeni spoj, površinska priprema, otpornost na odljepljivanje, laboratorijsko ispitivanje, numeričke simulacije

## **SUMMARY**

**Dora Golubiček, Lovro Novinc, Elena Perković**

### **Influence of adhesive type on the behaviour of structural connections between aluminium and steel**

When steel is welded to aluminium, a problem arises with this type of joint because of the different physical and chemical properties of these two metals. Welding in this case significantly reduces mechanical properties of the connection and changes the heat-affected zone so much that direct welding of aluminium to steel is still an open and very complicated issue. Another, more suitable, but not yet fully researched way to join aluminium to steel is the use of adhesives. Adhesive bonding as the most suitable method, stands out from other connecting methods because of its many advantages. One of the most important advantages is uniform distribution of stresses, followed by ease of use, little to no influence on the mechanical properties of the material, and the ability to join a wide variety of materials. On the other hand, the disadvantages of adhesive connections are the accurate surface preparation and the low peel strength, which will be described in detail later in the experimental part.

This study shows the original research on the application of adhesives in joining aluminium and steel structural members. The experimental and numerical investigations carried out concerned the influence of four different types of adhesives on the behaviour of bonded connections between aluminium angles and steel plates. The influence of the surface preparation was investigated as well as the layer thickness of the individual adhesive types. Conducted, very complex, numerical analyses accurately reproduce the experimental behaviour of bonded connections, especially in the first phase of behaviour and can serve as a good basis for the future calibration of numerical models. Such models will be able to simulate the full behaviour of adhesively bonded connections. They will also serve as a good optimisation tool for the geometry of the joints studied and for the choice of the most suitable type of adhesive. This will also serve as a guide for future research that will eventually lead to more frequent use of adhesives in aluminium structures.

**Keywords:** adhesive connection, surface preparation, peel strength, laboratory testing, numerical simulations