



UNIVERZITET U NIŠU
MAŠINSKI FAKULTET



Nataša R. Zdravković

UTICAJ MEHANIČKE PRIPREME POVRŠINA NA ČVRSTOĆU ZALEPLJENIH SPOJEVA

DOKTORSKA DISERTACIJA

Текст ове докторске дисертације
ставља се на увид јавности,
у складу са чланом 30., став 8. Закона о високом образовању
("Сл. гласник РС", бр. 76/2005, 100/2007 - аутентично тумачење, 97/2008, 44/2010,
93/2012, 89/2013 и 99/2014)

НАПОМЕНА О АУТОРСКИМ ПРАВИМА:

Овај текст се сматра рукописом и само се саопштава јавности
(члан 7. Закона о ауторским и сродним правима, "Сл. гласник РС", бр.
104/2009, 99/2011 и 119/2012).

Ниједан део ове докторске дисертације не сме се користити
ни у какве сврхе, осим за упознавање са садржајем пре одбране.

Niš, 2025.



UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF MECHANICAL
ENGINEERING



Nataša R. Zdravković

**INFLUENCE OF MECHANICAL SURFACE
TREATMENT ON THE STRENGTH
PROPERTIES OF ADHESIVE JOINTS**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2025.

Podaci o doktorskoj disertaciji

Mentor: dr Dragan Milčić, redovni profesor, Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet
dr Damjan Klobčar, vanredni profesor, Univerzitet u Ljubljani, Mašinski fakultet

Naslov: Uticaj mehaničke pripreme površina na čvrstoću zalepljenih spojeva

Rezime: Lepljenje predstavlja savremenu i fleksibilnu tehnologiju spajanja koja nudi brojne prednosti u odnosu na tradicionalne metode spajanja. Univerzalnost lepljenja ogleda se u mogućnosti povezivanja različitih vrsta materijala, jednostavnosti primene i potencijalu za smanjenje proizvodnih troškova uz zadržavanje zadovoljavajućih mehaničkih svojstava spoja. Adekvatna priprema površina podloga koje se spajaju predstavlja ključni preduslov za postizanje visoke mehaničke čvrstoće zalepljenih spojeva.

U ovoj doktorskoj disertaciji prikazani su rezultati eksperimentalnog ispitivanja zalepljenih spojeva, sa fokusom na analizu uticaja različitih metoda pripreme površina podloga od nerđajućeg čelik X5CrNi18-10 i legure aluminijuma AlMg3 (EN AW 5754) na čvrstoću zalepljenih spojeva. Mehaničke pripreme uključuju pripremu površina podloga pomoću abrazivnog, vlaknastog jastučića Scotch-Brite-a i brusnog papira granulacije P180, zatim izradu četiri različitih tekstura u dve različite dubine na površinama podloga korišćenjem fiber impulsnog lasera, kao i metodu laserskog čišćenja površina podloga pomoću prenosivog lasera za čišćenje malih površina. Za ostvarivanje zalepljenih spojeva korišćeni su epoksidni lepkovi visoke čvrstoće: dva tipa dvokomponentnih i jedan tip jednokomponentnog epoksidnog lepka.

Kao preduslov za obezbeđivanje dobro zalepljenog spoja ispitano je svojstvo kvašenja (kontaktni ugao) pripremljenih podloga, merenje hrapavosti površina, analiza površina pod optičkim i SEM mikroskopom, hemijska analiza površina, kao i uticaj statičkog opterećenja na dva karakteristična tipa zalepljenih spojeva (jednostruko preklopni i test ljuštenja), zatim uticaj cikličnog opterećenja na jednostruko preklopne spojeve, analiziran je poprečni presek zalepljenog spoja, kao i mod otkaza jednostruko preklopnog spoja. Eksperimentalni rezultati su upoređeni sa rezultatima numeričke analize, a na osnovu poređenja svih dobijenih rezultata na kraju disertacije izvedeni su jasni zaključci o uticaju pripreme površine na čvrstoću zalepljenih spojeva.

Naučna oblast: Mašinske konstrukcije

Naučna disciplina: Mašinski elementi i konstrukcije, zalepljeni spojevi

Ključne reči: Zalepljeni spojevi, nerđajući čelik X5CrNi18-10, legura aluminijuma EN AW 5754, priprema površina, mehanička svojstva zalepljenih spojeva, visokociklični zamor

UDK: 621.79.02::621.792.053 (043.3)

CERIF
klasifikacija: T 210 Mašinstvo, hidraulika, vakuumska tehnologija i akustički
inženjering

Tip licence
Kreativne
zajednice: CC BY-NC-ND

Data on Doctoral Dissertation

Doctoral Supervisor:	Dr Dragan Milčić, full professor, University of Niš, Faculty of Mechanical Engineering Dr Damjan Klobčar, associate professor, University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering
Title:	Influence of mechanical surface treatment on the strength properties of adhesive joints
Abstract:	<p>Adhesive bonding is a modern and flexible joining technology that offers numerous advantages over traditional methods. The versatility of bonding is demonstrated by its ability to join different types of materials, ease of application, and potential to reduce production costs while maintaining satisfactory mechanical properties of the joint. Proper preparation of the surfaces to be joined is a key prerequisite for achieving high mechanical strength in bonded joints.</p> <p>This doctoral dissertation presents the results of experimental testing of bonded joints, focusing on the analysis of the influence of different surface preparation methods for stainless steel X5CrNi18-10 and aluminium alloy AlMg3 (EN AW 5754) on the strength of bonded joints. Mechanical preparations include treating the surfaces with an abrasive fibrous Scotch-Brite pad and P180 grit sandpaper, creating four different textures at two different depths on the surfaces using a fibre pulse laser, and laser cleaning of the surfaces using a portable laser for cleaning small areas. High-strength epoxy adhesives were used to create the bonded joints: two types of two-component and one type of one-component epoxy adhesive.</p> <p>To ensure a well-bonded joint, the wetting properties of the prepared substrates were tested by measuring the contact angle and surface roughness, while the surfaces were analysed using optical and SEM microscopes. Chemical analysis of the surfaces was conducted, along with investigations into the influence of static loading on two characteristic types of bonded joints (single-lap and peel test), and the influence of cyclic loading on single-lap joints. The cross-section of the bonded joint and the failure mode of the single-lap joint were also analysed. The experimental results were compared with the results obtained by numerical analysis. Based on the comparison of all the results, clear conclusions were drawn at the end of the dissertation regarding the influence of surface preparation on the strength of bonded joints.</p>
Scientific Field:	Mechanical construction
Scientific Discipline:	Mechanical elements and constructions, adhesive bonding
Key Words:	Adhesive joints, Stainless steel X5CrNi18-10, Aluminum alloy EN AW 5754, Surface treatment, Mechanical properties of adhesive bonding joints, High-cycle fatigue

UDC: 621.79.02::621.792.053 (043.3)

CERIF
Classification: T 210 Mechanical engineering, hydraulics, vacuum technology and
acoustic engineering

Creative
Commons
License Type: CC BY-NC-ND

Sadržaj

1.	Uvod	1
1.1	Cilj istraživanja.....	5
1.2	Metodologija	6
2.	Stanje istraživanja.....	8
2.1	Lepljenje kao tehnika spajanja	9
2.2	Teorije adhezije	13
2.2.1	Kvašenje površine kao preduslov adhezije.....	15
2.3	Materijali i priprema površina za lepljenje.....	19
2.3.1	Materijali adherentata	19
2.3.2	Materijali korišćeni za eksperimentalna istraživanja u okviru disertacije.....	20
2.3.3	Materijali lepkova.....	23
2.3.4	Priprema površine	25
2.3.5	Karakterizacija površine	38
2.3.6	Montaža zalepljenih spojeva	41
2.4	Mehanička svojstva zalepljenih spojeva	42
2.4.1	Tipovi opterećenja	42
2.4.2	Test smicanja – Jednostruko preklopni test.....	43
2.4.3	Test ljuštenja.....	46
2.4.4	Ispitivanje na zamor zalepljenih spojeva.....	48
2.4.5	Ispitivanje mehaničkih svojstava lepka	51
2.4.6	Analiza moda otkaza	51
3.	Eksperimentalna istraživanja.....	54
3.1	Materijali adherentata	54
3.2	Materijali lepkova.....	55
3.3	Kalup za izradu uzoraka za jednostruko preklopni test.....	58
3.4	Priprema površina podloga za lepljenje	60
3.5	Mikroskopska analiza topografije površine pripremljene za lepljenje.....	68
3.6	Merenje kontaktnog ugla.....	69
3.7	Metode ispitivanja zalepljenog spoja	71
3.7.1	Vizuelna metoda ispitivanja	71
3.7.2	Eksperimentalno ispitivanje zalepljenih spojeva na smicanje pri zatezanju – pod dejstvom statičkog opterećenja.....	73
3.7.3	Eksperimentalno ispitivanje zalepljenih spojeva na ljuštenje – pod dejstvom statičkog opterećenja	75

3.7.4	Ekperimentalno ispitivanje zalepljenih spojeva na smicanje pri zatezanju – pod dejstvom cikličnog opterećenja	77
3.7.5	Numerička analiza jednostruko preklopnih zalepljenih spojeva	80
3.7.6	Analiza poprečnog preseka zalepljenih spojeva	82
3.7.7	Analiza moda otkaza	83
4.	Rezultati i diskusija rezultata	84
4.1	Analiza merenja površinske hrapavosti.....	84
4.2	Test kvašenja i merenje kontaktnog ugla	85
4.3	Mikroskopska analiza topografije površine pripremljene za lepljenje.....	87
4.4	Hemijska analiza površine – EDS analiza.....	91
4.5	Vizuelno ispitivanje.....	93
4.6	Ekperimentalno ispitivanje zalepljenih spojeva na smicanje pri zatezanju – pod dejstvom statičkog opterećenja	93
4.6.1	Analiza moda otkaza nakon statičkog testa na smicanje.....	99
4.7	Ekperimentalno ispitivanje zalepljenih spojeva na ljuštenje metodom pokretnog valjka – pod dejstvom statičkog opterećenja	104
4.8	Analiza poprečnog preseka zalepljenog spoja.....	111
4.9	Ekperimentalno ispitivanje zalepljenih spojeva na smicanje pri cikličnom opterećenju na zatezanje.....	113
4.10	Numerička analiza jednostruko preklopnih zalepljenih spojeva.....	115
5.	Zaključak.....	117
	Literatura.....	127
	Prilog A.....	140
	Prilog B.....	146
	Prilog C.....	158
	Biografija autora	162

Spisak slika

Slika 1.1 Glavni tržišni trendovi koji oblikuju tržište lepkova u Evropi od 2022. do 2027. god.....	2
Slika 1.2 Procedura izrade zalepljenog spoja.....	4
Slika 2.1 Konfiguracije zalepljenih spojeva	10
Slika 2.2 Poređenje raspodele opterećenja kod (a) zalepljenih i (b) zakovanih spojeva.....	11
Slika 2.3 Šematski prikaz adhezionih i kohezionih sila.....	12
Slika 2.4 Osnovne teorije adhezije.....	13
Slika 2.5 Sedam klasa slabih graničnih sloja	14
Slika 2.6 Primer dobrog i lošeg kvašenja nakon nanošenja lepka na podlogu.....	16
Slika 2.7 Šematski prikaz kontaktnog ugla između tečnosti i čvrstog tela; opseg i varijacije kontaktnog ugla	16
Slika 2.8 Različita stanja kapljice na čvrstoj površini: (a) Young model, (b) Wenzel-ov model, and (c) Cassie-Baxter-ov model	17
Slika 2.9 Kvašenje površine tečnošću pre i nakon površinske pripreme	19
Slika 2.10 Tipični površinski slojevi na metalnoj podlozi.....	26
Slika 2.11 Metode priprema površina u tehnologiji lepljenja	27
Slika 2.13 Tri različite površinske teksture korišćenje u radu: udubljenja, žlebovi i rešetke	34
Slika 2.14 Prikaz tekstura u radu [107].....	35
Slika 2.15 Zavisnost čvrstoće zalepljenog spoja od prečnika i dubine udubljenja nakon laserskog graviranja	36
Slika 2.16 Srednje aritmetičko odstupanje neravnina Ra i srednja visina neravnina Rz	40
Slika 2.17 Prikaz različitih defekata koji mogu nastati pri lepljenju	42
Slika 2.18 Osnovne vrste napona u zalepljenim spojevima	43
Slika 2.19 Izgled i dimenzije jednostruko preklopnog uzorka prema standardu SRPS EN 1465.....	44
Slika 2.20 Idealizovane deformacije preklopnog spoja opterećenog na smicanje, sa krutim adherentima.....	45
Slika 2.21 Različiti tipovi testa ljuštenja.....	46
Slika 2.22 Test uzorci ljuštenja metodom pokretnog valjka: (a) pod uglom, (b) bez ugla	47
Slika 2.23 Dijagram sila ljuštenja – pomeranje nakon ispitivanja ljuštenja.....	47
Slika 2.24 Konstantna amplituda napona.....	48
Slika 2.25 S-N kriva.....	50
Slika 2.26 Dimenzije ispitnog uzorka za određivanje mehaničkih osobina pri statičkom zatezanju u skladu sa standardom SRPS EN ISO 527-1	51
Slika 3.1 Zbirni algoritam eksperimentalne metodologije poređenja uticaja različitih lepkova, priprema površina i ispitivanja na čvrstoću zalepljenog spoja adherenta od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 i legure aluminijuma EN AW 5754.....	54
Slika 3.2 Oprema za nanošenje dvokomponentnog (2K) lepka SikaFast®-580.....	56
Slika 3.3 Oprema za nanošenje dvokomponentnog (2K) lepka SikaPower®-880	56
Slika 3.4 Pećnica za sušenje i sterilizaciju do 300 °C model ED 56	57
Slika 3.5 Oprema za nanošenje jednokomponentnog (1K) lepka SikaPower®-492 G.....	57
Slika 3.6 Deo izrađenih epruveta od lepka SikaPower®-492 G prema standardu SRPS ISO 527-1 ...	58
Slika 3.7 Kalup za lepljenje jednostruko preklopnog spoja: (1) distancer, (2) gornji adherent, (3) lepak debljine 0,3 mm i (4) donji adherent	59
Slika 3.8 Prikaz (a) odstoynih pločica debljine 0,3 mm i (b) staklenih kuglica u lepku.....	59
Slika 3.9 Priprema kalupa pre lepljenja: provera dimenzija kalupa.....	60
Slika 3.10 Priprema kalupa pre lepljenja: premazivanje kalupa voskom Mold Release Wax.....	60
Slika 3.11 Sredstvo za čišćenje površina Sika® Cleaner P.....	61
Slika 3.12 Profilometar Mitutoyo SJ-301 korišćen pri merenju hrapavosti površine	61
Slika 3.13 Priprema površine: a) Abrazivni jastučić Scotch-Brite, b) Brusni papir granulacije P180 .	63

Slika 3.14 Prenosivi laser za čišćenje model Jetlaser M100 sa prikazom podešavanja parametara	64
Slika 3.15 Nanosekundni impulsni fiber laser M7 30W	64
Slika 3.16 Interfejs softvera „ezCAD 2”	65
Slika 3.17 Forma i dimenzije tekstura	66
Slika 3.18 Prikaz tekstura nakon laserskog graviranja nerđajućeg čelika X5CrNi18-10	66
Slika 3.19 Skenirajući elektronski mikroskop model Thermo Scientific Quattro ESEM.....	68
Slika 3.20 Optički mikroskop Keyence VHX-6000	69
Slika 3.22 Interfejs softvera Osilla Contact Angle kojim se vrši merenje kontaktnog ugla	71
Slika 3.24 Leptir test	72
Slika 3.26 Jednostruko preklopni uzorci od legure aluminijuma nakon očvršćavanja	74
Slika 3.27 Procedura ispitivanja na smicanje zalepljenog spoja.....	74
Slika 3.28 Dimenzije i izgled alata za ispitivanje ljuštenja.....	75
Slika 3.29 Procedura ispitivanja ljuštenja metodom pokretnog valjka	76
Slika 3.30 Prikaz (a) pripremljenih uzoraka od nerđajućeg čelika pre lepljenja, (b) proces nanošenja lepka i (c) ispitivanje ljuštenja metodom pokretnog valjka	77
Slika 3.31 Prikaz ispitivanja jednostruko zalepljenih uzoraka na visoko-frekventnom pulzatoru ZwickRoell Vibrophore 100	78
Slika 3.32 Prikaz (a) pripremljenih podloga brusnim papirom P180 i (b) zalepljenih aderenata od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10	79
Slika 3.33 3D model jednostruko preklopnog zalepljenog spoja.....	80
Slika 4.1 Prosečna vrednost površinske hrapavosti u zavisnosti od površinske pripreme.....	84
Slika 4.2 Prosečne vrednosti kontaktnog ugla u zavisnosti od primenjene pripreme površine i materijala podloge	85
Slika 4.3 Prosečne vrednosti kontaktnih uglova na nerđajućem čeliku X5CrNi18-10 posle 3 dana od graviranja, na aluminijumu EN AW 5754 12 dana nakon laserskog graviranja tekstura.....	86
Slika 4.4 SEM slike površina: ručno brušenje Scotch-Brite-om, ručno brušenje brusnim papirom P180	87
Slika 4.5 SEM slike površina: kružna udubljenja dubine 40 µm, kružna udubljenja dubine 80 µm....	88
Slika 4.6 SEM slike površina: linijski žlebovi na dubini od 40 µm, linijski žlebovi na dubini od 80 µm	89
Slika 4.7 SEM slike površina:tekstura mix na dubini od 40 µm, tekstura mix na dubini od 80 µm	90
Slika 4.8 SEM slike površina: tekstura saće na dubini od 40 µm; tekstura saće na dubini od 80 µm..	90
Slika 4.9 Hemijski sastav meren EDS analizom za nerđajući čelik X5CrNi18-10.....	91
Slika 4.10 Hemijski sastav meren EDS analizom za leguru aluminijuma EN AW 5754	91
Slika 4.11 SEM mikrografija i EDS mapiranje legure aluminijuma EN AW 5754 nakon laserskog graviranja tekture 4C	92
Slika 4.12 Dijagram sila – izduženje jednostruko preklopnog spoja zalepljenog SikaFast®-580.....	94
Slika 4.13 Dijagram sila – izduženje jednostruko preklopnog spoja zalepljenog SikaPower®-880	95
Slika 4.14 Dijagram sila – izduženje jednostruko preklopnog spoja zalepljenog SikaPower-492G	96
Slika 4.15 Prosečna čvrstoća na smicanje jednostruko preklopnih zalepljenih spojeva u odnosu na metod pripreme površine za nerđajući čelik X5CrNi18-10	97
Slika 4.16 Prosečna čvrstoća na smicanje jednostruko preklopnih zalepljenih spojeva u odnosu na metod pripreme površine za leguru aluminijuma EN AW 5754.....	98
Slika 4.17 Metod za izvođenje procenata moda otkaza	100
Slika 4.18 Procentualna raspodela moda otkaza lepka SikaFast®-580 na X5CrNi18-10	100
Slika 4.19 Procentualna raspodela moda otkaza lepka SikaPower®-880 na X5CrNi18-10.....	101
Slika 4.20 Procentualna raspodela moda otkaza lepka SikaPower®-492 G na X5CrNi18-10.....	101
Slika 4.21 Procentualna raspodela moda otkaza lepka SikaFast®-580 na EN AW 5754.....	102
Slika 4.22 Procentualna raspodela moda otkaza lepka SikaPower®-880 na EN AW 5754	102
Slika 4.23 Procentualna raspodela moda otkaza lepka Power®-492 G na EN AW 5754	103

Slika 4.24 Prikaz analizirane oblasti na dijagramu sila – pomeranje legure aluminijuma_EN AW 5754 nakon laserskog čišćenja.....	104
Slika 4.25 Dijagram sila – pomeranje nakon testa ljuštenja uzoraka od X5CrNi18-10.....	105
Slika 4.26 Dijagram sila – pomeranje nakon testa ljuštenja uzoraka od EN AW 5754.....	105
Slika 4.27 Uporedni prikaz prosečne čvrstoće ljuštenja (MPa) i otpornosti pri ljuštenju (N/mm) zalepljenih spojeva u odnosu na metod pripreme površine za nerđajući čelik X5CrNi18-10	109
Slika 4.28 Uporedni prikaz prosečne čvrstoće ljuštenja (MPa) i otpornosti pri ljuštenju (N/mm) zalepljenih spojeva u odnosu na metod pripreme površine za leguru aluminijuma EN AW 5754	110
Slika 4.29 Poprečni presek zalepljenih spojeva snimljen optičkim mikroskopom	111
Slika 4.30 Poprečni presek zalepljenih spojeva snimljen optičkim mikroskopom	112
Slika 4.31 Velerova (S-N) kriva za jednostruko preklopni zalepljeni spoj od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 i lepka SikaFast®-580	114
Slika 4.32 Uporedni prikaz eksperimentalnih i numeričkih rezultata jednostruko preklopnog zalepljenog spoja od legure aluminijuma EN AW 5754.....	115
Slika P.A.1 Tehnički list lepka SikaFast®-580.....	140
Slika P.A.1 Nastavak. Tehnički list lepka SikaFast®-580.....	141
Slika P.A.2 Tehnički list lepka SikaPower®-880.....	142
Slika P.A.2 Nastavak. Tehnički list lepka SikaPower®-880	143
Slika P.A.3 Tehnički list lepka SikaPower®-492 G	144
Slika P.A.3 Nastavak. Tehnički list lepka SikaPower®-492 G	145
Slika P.B.1 Dijagram sila – izduženje za jednostruko preklopni zalepljeni spoj od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 i lepka SikaFast®-580	146
Slika P.B.1 Nastavak. Dijagram sila – izduženje za jednostruko preklopni zalepljeni spoj od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 i lepka SikaFast®-580.....	147
Slika P.B.2 Dijagram sila – izduženje za jednostruko preklopni zalepljeni spoj od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 i lepka SikaPower®-880.....	148
Slika P.B.2 Nastavak. Dijagram sila – izduženje za jednostruko preklopni zalepljeni spoj od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 i lepka SikaPower®-880	149
Slika P.B.3 Dijagram sila – izduženje za jednostruko preklopni zalepljeni spoj od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 i lepka SikaPower®-492 G.....	150
Slika P.B.3 Nastavak. Dijagram sila – izduženje za jednostruko preklopni zalepljeni spoj od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 i lepka SikaPower®-492 G.....	151
Slika P.B.4 Dijagram sila – izduženje za jednostruko preklopni zalepljeni spoj od legure aluminijuma EN AW 5754 i lepka SikaFast®-580.....	152
Slika P.B.4 Nastavak. Dijagram sila – izduženje za jednostruko preklopni zalepljeni spoj od legure aluminijuma EN AW 5754 i lepka SikaFast®-580.....	153
Slika P.B.5 Dijagram sila – izduženje za jednostruko preklopni zalepljeni spoj od legure aluminijuma EN AW 5754 i lepka SikaPower®- 880	154
Slika P.B.5 Nastavak. Dijagram sila – izduženje za jednostruko preklopni zalepljeni spoj od legure aluminijuma EN AW 5754 i lepka SikaPower®- 880	155
Slika P.B.6 Dijagram sila – izduženje za jednostruko preklopni zalepljeni spoj od legure aluminijuma EN AW 5754 i lepka SikaPower®-492 G	156
Slika P.B.6 Nastavak. Dijagram sila – izduženje za jednostruko preklopni zalepljeni spoj od legure aluminijuma EN AW 5754 i lepka SikaPower®-492 G	157
Slika P.C.1 Dijagram sila – pomeranje nakon testa ljuštenja: zalepljeni spoj od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 i lepka SikaFast®-580	158
Slika P.C.2 Dijagram sila – pomeranje nakon testa ljuštenja: zalepljeni spoj od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 i lepka SikaPower®-880.....	158

Slika P.C.2 Nastavak. Dijagram sila – pomeranje nakon testa ljuštenja: zalepljeni spoj od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 i lepka SikaPower®-880	159
Slika P.C.3 Dijagram sila – pomeranje nakon testa ljuštenja: zalepljeni spoj od X5CrNi18-10 širine 25 mm i lepka SikaPower®-492 G	159
Slika P.C.4 Dijagram sila – pomeranje nakon testa ljuštenja: zalepljeni spoj od legure aluminijuma EN AW 5754 i lepka SikaFast®-580	160
Slika P.C.5 Dijagram sila – pomeranje nakon testa ljuštenja: zalepljeni spoj od legure aluminijuma EN AW 5754 i lepka SikaPower®-880.....	160
Slika P.C.6 Dijagram sila – pomeranje nakon testa ljuštenja: zalepljeni spoj od legure aluminijuma EN AW 5754 i lepka SikaPower®-492 G.....	161

Spisak tabela

Tabela 2.1 Istorijski razvoj lepkova i zaptivača.....	9
Tabela 2.2 Osnovni parametri spektra zamaranja.....	48
Tabela 2.3 Nazivi i šeme glavnih modova otkaza.....	52
Tabela 3.1 Hemijski sastav i mehanička svojstva nerđajućeg čelika X5CrNi18-10.....	55
Tabela 3.2 Hemijski sastav i mehanička svojstva legure aluminijuma EN AW 5754.....	55
Tabela 3.3 Mehaničke karakteristike lepkova prema specifikaciji proizvođača.....	58
Tabela 3.4 Uporedni prikaz primenjenih priprema površina na nerđajućem čeliku X5CrNi18-10 i leguri aluminijuma EN AW 5754.....	62
Tabela 3.5 Broj uzastopnih prolaza za forme tekstura gravirane impulsnim fiber laserom.....	67
Tabela 3.6 Definisana šema za ispitivanje zamora zalepljenih spojeva.....	79
Tabela 3.7 Elastična svojstva adherenta i lepkova.....	80
Tabela 4.1 Rezultati ispitivanja nakon testa ljuštenja: X5CrNi18-10 i lepak SikaFast®-580.....	106
Tabela 4.2 Rezultati ispitivanja nakon testa ljuštenja: X5CrNi18-10 i lepak SikaPower®-880.....	107
Tabela 4.3 Rezultati ispitivanja nakon testa ljuštenja na X5CrNi18-10 i lepak SikaPower-492G.....	107
Tabela 4.4 Rezultati ispitivanja nakon testa ljuštenja: EN AW 5754 i lepak SikaFast®-580.....	108
Tabela 4.5 Rezultati ispitivanja nakon testa ljuštenja: EN AW 5754 i lepak SikaPower®-880.....	108
Tabela 4.6 Rezultati ispitivanja nakon testa ljuštenja: EN AW 5754 i lepak SikaPower-492 G.....	109
Tabela 4.7 Rezultati ispitivanja na zamaranje zalepljenog spoja od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 i lepka SikaFast®-580.....	114
Tabela 4.8 Uporedne vrednosti rezultata za leguru aluminijuma EN AW 5754.....	115

1. Uvod

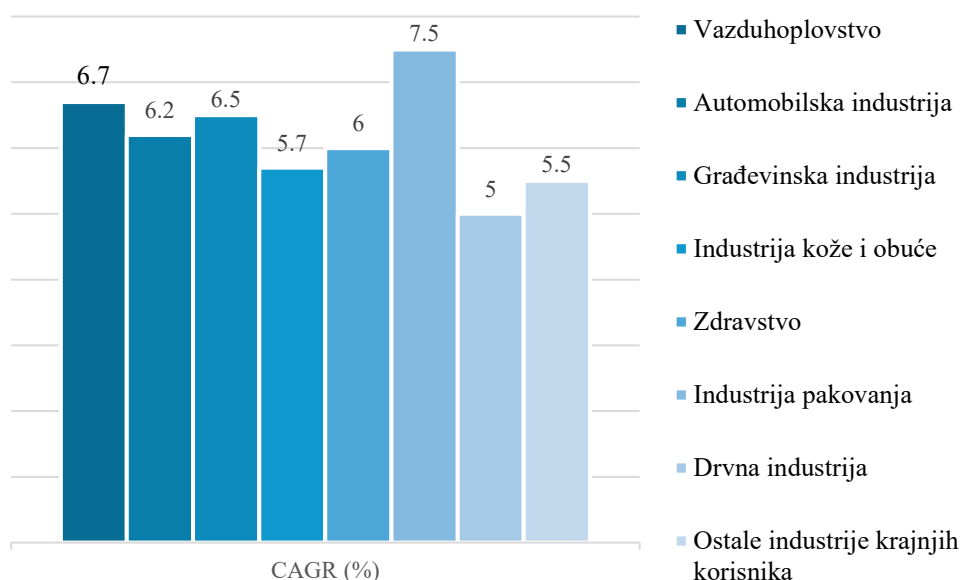
Koncept spajanja stvari pomoću lepljivih supstanci ili supstanci sličnih lepku postoji hiljadama godina [1]. Jedan od najranijih oblika tehničke domišljatosti praistorijskog čoveka ogleda se u upotrebi prirodnih lepljivih materijala kao što su smola, bitumen i katran od breze. Arheološki nalazi ukazuju da su još pripadnici vrste *Homo heidelbergensis*, pre oko 200.000 do 300.000 godina koristili brezin katran za pričvršćivanje kamenih alatki na drvene drške. Kasnije, rani *Homo sapiens* koristili su smolu i bitumen ne samo za alatke, već i za izradu nakita i umetničkih predmeta [1, 2]. Tek nedavno, u prošlom veku, čovek je pokušao da klasifikuje adheziju na osnovu fundamentalnog ponašanja materijala. Kao takvo, proučavanje adhezije dobija na značaju u oblastima nauke o materijalima, inženjerstva i biomedicinskih nauka.

Lepljenje je spajanje identičnih ili različitih vrsta metalnih i nemetalnih materijala putem površinske adhezije pomoću (nemetallnih) adhezivnih materijala, lepkova [2]. Zalepljeni spojevi su nerastavljivi, nepokretni, posredni fizičko-hemijski spojevi elemenata. Pri spajanju elemenata na delove njihovih površina nanosi se lepak, a zatim se između tih površina, uz odvijanje hemijskih reakcija, uspostavi kontakt. Osnovna funkcija ovog načina spajanja delova je prenos napona sa jednog elementa na drugi, pri čemu se ovi naponi ravnomernije raspodeljuju duž zalepljene površine u poređenju sa mehaničkim spojevima. Ovaj ravnomerniji raspored napona smanjuje lokalna naprezanja, što doprinosi dužem veku trajanja sklopa. Lepljenje kao novi oblik spajanja delova u industrijskoj proizvodnji, uz tradicionalne procese, kao što su zavarivanje ili lemljenje, postalo je jedna od najbrže razvijajućih metoda za spajanje gotovih i polugotovih proizvoda.

U oblasti nauke i tehnologije lepljenja, materijali koji se povezuju nazivaju se podlogama (ili supstratima), dok se nakon izvršenog procesa lepljenja najčešće koristi kao naziv adherenti. [1]. Podloge koje se spajaju obično su u čvrstom obliku, dok lepkovi mogu biti u čvrstom, tečnom stanju ili u obliku paste. Primeri podloga uključuju materijale kao što su plastika, tekstil, drvo, trake; građevinske materijale i materijale koji se koriste u automobilskoj i vazduhoplovnoj industriji. Postoji veliki izbor tipova podloga i lepkova, kao i različitih procesa za lepljenje materijala. Zahtevi savremene industrije za efikasnim i visokokvalitetnim lepkovima u različitim industrijama dovode do stabilnog širenja globalnog tržišta lepkova po godišnjoj stopi rasta (*engl. CAGR- Compound Annual Growth Rate*) od 5% u periodu od 2024. do 2034. godine [3]. Globalno tržište lepkova u 2024. godini vredelo je

68,94 milijarde dolara, a očekuje se da će do kraja 2034. godine dostići 112,29 milijardi dolara [3]. U svom izveštaju Ceresana Market Research [4] koja je početkom 2024. godine analizirala globalno tržište lepka, navodi da se oko 13,5 miliona tona lepka potroši svake godine. U Evropi se svake godine proizvede i koristi više od tri miliona tona lepka što uključuje povećanu upotrebu lepka u brojnim aplikacijama u industrijama, kao što su avio, automobilska, obućarska, industrija pakovanja, drvna i građevinska industrija. Brzi razvoj tehnologije lepljenja pripisuje se napretku u oblastima zalepljenih spojeva, odnosno u oblasti poboljšanja svojstava lepka, koji su doveli do nastanka novih lepka superiornih svojstava i posledično do širenja istraživanja fenomena povezanih sa adhezijom. Procenjuje se da postoji 250.000 različitih formulacija lepka kada se uzmu u obzir svi tipovi lepka koje proizvedu kompanije širom sveta i taj broj se stalno povećava [4].

Evropsko tržište lepka procenjeno je na 17,170 miliona dolara na kraju 2024. godine, a predviđa se da će tržište registrovati CAGR od 6,7% tokom perioda od 2024. do 2029. godine [5]. Pandemija COVID-a negativno je uticala na tržište lepka u Evropi, ali se očekuje da će rastuća potražnja iz građevinske, ambalažne i zdravstvene industrije oživeti regionalno tržište lepka. Slika 1.1 prikazuje analizu evropskog tržišta lepka, uključujući predviđeni godišnji procentualni rast (CAGR) po industrijama u periodu od 2022. do 2027. godine [6]. Glavne kompanije koje posluju na tržištu Evrope su: Arkema Group, Henkel AG & Co. KGaA, H.B. Fuller Company, Huntsman International LLC i Sika AG [5].

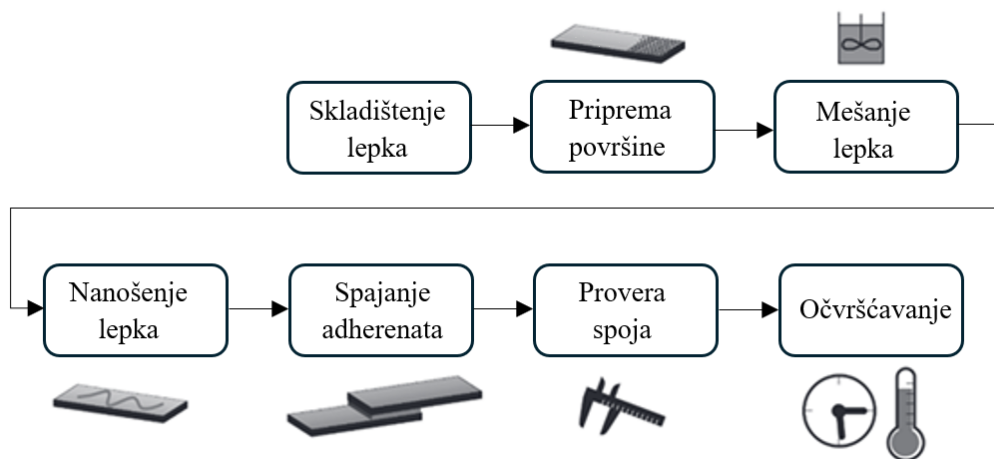


Slika 1.1 Glavni tržišni trendovi koji oblikuju tržište lepka u Evropi, CAGR (%), za period od 2022. do 2027. god. [6]

U poslednjih nekoliko decenija, tehnologija lepljenja pružila je inženjerima nove mogućnosti da optimizuju i inoviraju svoje konstrukcije i finalne proizvode. Našli su široku primenu u raznim oblastima, od industrije visoke tehnologije, kao što su avio industrija, automobilska industrija i brodogradnja, pa sve do tradicionalnih industrija. Zalepljeni spojevi doprinose povećanju sigurnosti konstrukcija, smanjenju potrošnje energije i materijala zahvaljujući lakšim komponentama, omogućavaju veću slobodu u dizajnu kroz spajanje različitih materijala, skraćuju vreme proizvodnog ciklusa i omogućavaju potpunu automatizaciju proizvodnih procesa [7, 8].

Puna funkcionalnost zalepljenog spoja zavisi od odgovarajućih fizičkih svojstava podloga koje se spajaju i lepka koji se koristi kao vezivno sredstvo. Čvrstoća zalepljenih spojeva zavisi od njihove geometrije, tipa opterećenja, svojstva materijala podloga i površinske pripreme delova koji se spajaju [9]. Na čvrstoću u velikoj meri može uticati i sam proces izrade spoja [10]. Pravilna izrada zalepljenog spoja podrazumeva niz koraka koji imaju za cilj obezbeđivanje dovoljnog kontakta lepka sa površinama adhezenata, uspostavljanje jakih adhezionih veza na kontaktu i kohezionih veza unutar lepka [10]. S obzirom na veliki broj faktora koji utiču na kvalitet spojeva, nedovoljno poznavanje procesa spajanja može dovesti do variranja čvrstoće zalepljenog spoja, a u najgorem slučaju i do loma pri daleko nižim opterećenjima od pretpostavljenih.

Važan proces, neophodan za dobijanje zalepljenih spojeva visoke nosivosti je pravilna obrada površine podloga. Izrada zalepljenog spoja podrazumeva pripremu površina pre spajanja, pripremu i nanošenje sloja lepka, fiksiranje i sklapanje podloga, očvršćavanje lepka, kontrolu uslova prilikom očvršćavanja i kontrolu kvaliteta izrađenih spojeva (slika 1.2) [10, 11]. Prilikom površinske obrade, u zavisnosti od primenjene metode, na površini materijala se formiraju neravnine u koje prodire lepak. Takav spoj karakteriše mnogo veća čvrstoća od spojeva materijala bez pripreme površina. Površinska priprema podloga igra važnu ulogu u poboljšanju čvrstoće zalepljenih spojeva, pa je veoma važno odabrati odgovarajući metod pripreme površine prema vrsti materijala. Međutim, svaki lepak i materijal koji se spajaju zahtevaju specifične metode površinske pripreme kako bi se postigao optimalan balans između čvrstoće zalepljenog spoja i načina otkazivanja.



Slika 1.2 Procedura izrade zalepljenog spoja [11]

U skladu sa prethodno navedenim, ova disertacija prikazuje rezultate eksperimentalnog ispitivanja zalepljenih spojeva, sa fokusom na uticaj različitih metoda pripreme površina podloga na čvrstoću zalepljenih spojeva. Istraživanje je usmereno na analizu uticaja mehaničke pripreme površina podloga od različitih materijala, nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 i legure aluminijuma AlMg3 (EN AW 5754). Mehaničke pripreme uključuju pripremu površina podloga pomoću abrazivnog, vlaknastog jastučića Scotch-Brite-a i brusnog papira granulacije P180, zatim izradu četiri različite teksture u dve različite dubine na površinama podloga korišćenjem fiber impulsnog lasera, kao i metodu laserskog čišćenja površina podloga pomoću prenosivog lasera za čišćenje malih površina. Za ostvarivanje zalepljenih jednostruko preklopnih spojeva korišćeni su epoksidni lepkovi visoke čvrstoće: dva tipa dvokomponentnih i jedan tip jednokomponentnog epoksidnog lepka. Kao preduslov za obezbeđivanje dobro zalepljenog spoja ispitano je svojstvo kvašenja koje je dobijeno merenjem kontaktnog ugla pripremljenih podloga, istraživanjem je obuhvaćeno i merenje hrapavosti, analiza površina pod optičkim i SEM mikroskopom, hemijska analiza površina, kao i uticaj statičkog opterećenja na dva karakteristična tipa zalepljenih spojeva (jednostruko preklopni i test ljuštenja), uticaj cikličnog opterećenja na jednostruko preklopne spojeve, analiziran je poprečni presek zalepljenog spoja, kao i mod otkaza jednostruko preklopnog spoja. Eksperimentalni rezultati su upoređeni sa rezultatima nakon numeričke analize, a na osnovu poređenja dobijenih rezultata na kraju disertacije izvedeni su jasni zaključci o uticaju pripreme površine na čvrstoću zalepljenih spojeva.

1.1 Cilj istraživanja

Brz napredak u razvoju materijala i savremenih lepkova visoke nosivosti doveo je do povećanog interesovanja za primenu zalepljenih spojeva u inženjerskim konstrukcijama. U poređenju sa drugim nerazdvojivim vezama kao što su zavareni i zalemljeni spojevi, zalepljeni spojevi imaju sledeće prednosti: mogućnost jednostavnog spajanja istih (aluminijum-aluminijum, čelik-čelik) i kombinacija različitih materijala (aluminijum-čelik, aluminijum-kompozit, čelik-kompozit itd.), svojstva materijala delova koji se spajaju se ne menjaju, samo malo ili nimalo termičko naprezanje materijala delova koji se spajaju, usled toga nema termičke dilatacije, nema strukturnih promena materijala, mogućnost spajanja veoma tankih delova (npr. folije), spajanje komponenti bez zareza, mogućnost prigušenja vibracija, nema površinskih oštećenja i kontaktne korozije [2, 7, 8, 12].

Proces ostvarivanja zalepljenih spojeva se može izvesti različitim metodama, sredstvima i operacijama. Izbor odgovarajućih uslova zavisi od niza faktora, uključujući vrstu i karakteristike osnovnog materijala (tip, veličina, površina itd.), konfiguracije zalepljenog spoja, kao i svojstva upotrebljenog lepka. Izbor konfiguracije spoja utiče na ograničenja proizvodnih kapaciteta, troškove proizvodnje i željeni konačni izgled dela. Čvrstoća zalepljenog spoja zavisi od mehaničkih svojstava aderenata i lepka, zaostalih unutrašnjih naprezanja, stepena stvarnog međuslojnog kontakta i geometrije samog spoja [7]. Svaki od ovih faktora ima snažan uticaj na performanse spoja. Potrebno je voditi računa i o eliminaciji koncentracije napona, koja utiče na smanjenje čvrstoće i radnog veka spoja. Razvijanje adhezije kod zalepljenih spojeva uglavnom se svodi na pravilnu pripremu površine, poboljšanje površinskog sloja fizičko-hemijskim metodama i izradu spoja [10]. Čvrstoća zalepljenog spoja u velikoj meri zavisi i od postupka površinske obrade, tako da je izuzetno važno istraživanje ove faze procesa lepljenja.

Mehanička priprema površine je značajna zbog svojih ekonomskih i ekoloških prednosti u poređenju sa ostalim dostupnim pripremanama. Lakša je za primenu i može se sprovesti koristeći već postojeću opremu u mnogim proizvodnim industrijama. Kako bi se što bolje mogao kontrolisati sam proces površinske pripreme, površina mora biti okarakterisana fizičkim i hemijskim karakteristikama površine koje su važne za adheziona svojstva. Kao druga uporedna metoda za pripremu površine izabran je laser. Laseri su postali sve važniji u pripremi površina kako bi se poboljšala hrapavost površine, a samim tim i čvrstoća spajanja zalepljenih spojeva. Za razliku od mehaničke pripreme, laserska metoda uklanja prljavštinu i gornje slojeve bez ostavljanja ostataka, koristeći isključivo svetlost.

Osnovni ciljevi ovog naučnog istraživanja su:

- Istraživanje uticaja mehaničke pripreme površina adherenata različitih materijala (nerđajući čelik X5CrNi18-10 i legura aluminijuma AlMg3) na čvrstoću zalepljenog spoja ostvarenu sa različitim epoksidnim lepkovima visoke nosivosti najnovije generacije.
- Usporedna analiza zalepljenih spojeva uzoraka bez prethodne pripreme, uzoraka kod kojih je mehanička priprema vršena uobičajnim operativnim pripremanama i zalepljenih spojeva kod kojih je za pripremu površina korišćen prenosivi laser za čišćenje, a za izradu različitih tekstura i dubina korišćen je fiber impulsni laser.
- Merenje i analiza ključnih parametara kao što su merenje hrapavosti, kontaktnog ugla kvašenja, analiza hemijskog sastava, topografije, analiza poprečnog preseka zalepljenog spoja i analiza moda otkaza pomoću naprednih tehnologija (profilometrija, Ossila Contact Angle, SEM, ImageJ).
- Ispitivanje čvrstoće spojeva različitim metodama (test smicanja, test ljuštenja) i poređenje rezultata u zavisnosti od metode pripreme površine, korišćenog lepka i adherenta.
- Istraživanje adhezionih i kohezionih mehanizama kroz ispitivanje veze između karakteristika površine i prionljivosti lepka.
- Analiza uticaja cikličnog opterećenja na dugotrajnost zalepljenih spojeva od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 pripremljenih brusnim papirom granulacije P180.
- Statistička obrada i analiza rezultata eksperimentalnog ispitivanja.
- Numerička analiza jednostruko preklopnih zalepljenih spojeva materijala adherenta od legure aluminijuma AlMg3 sa različitim epoksidnim lepkovima.
- Usporedna analiza rezultata numeričke analize i eksperimentalnih rezultata.

1.2 Metodologija

U okviru sprovedenog istraživanja u doktorskoj disertaciji, korišćen je niz naučnih metoda kako bi se obuhvatila teorijska analiza, eksperimentalni rad i interpretacija rezultata. Posebna pažnja posvećena je ispitivanju uticaja različitih mehaničkih priprema površina na kvalitet i mehanička svojstva zalepljenih spojeva. Metoda analize i metoda deskripcije kao naučne metode su korišćene za deo disertacije koji se odnosi na analizu i opis dosadašnjih istraživanja u domenu mehaničke pripreme površina kod zalepljenih spojeva različitih materijala. Na osnovu predmeta i ciljeva istraživanja može se zaključiti da su se rezultati u ovoj

doktorskoj disertaciji prikupljali metodom eksperimenta. Eksperimentalna istraživanja su urađena u laboratorijskim uslovima shodno definisanim standardima. Shodno temi, odrađen je veliki broj različitih mehaničkih priprema površina podloga za lepljenje (primena abrazivnih jastučića Scotch-Brite-a i brusnih papira granulacije P180, primena fiber impulsnog lasera za izradu tekstura i primena lasera kod laserskog čišćenja površina). Za svaki oblik pripremljene površine odrađeno je merenje kontaktnog ugla (test kvašenja), za uzorke pripremljene Scotch-Brite-om i P180 merena je hrapavost površine, urađena je topografija površine, kao i EDS analiza. Zalepljeni uzorci su ispitivani statički na test smicanja pri zatezanju (*engl. tensile lap-shear test*), na ljuštenje metodom pokretnog valjka (*engl. peel test*), kao i ispitivanje visokocikličnim opterećenjima na zamor.

Nakon mehaničkih ispitivanja analizirani su modovi otkaza rastavljenih zalepljenih površina primenom softvera ImageJ (adhezioni ili kohezioni lom). Izvršena je i priprema uzorka za mikroskopsku analizu preseka zalepljenih spojeva, a nakon toga je analiziran presek zalepljenog spoja pomoću mikroskopa (optičkog i SEM). U okviru disertacije, kao metoda analize, korišćena je i numerička analiza (FEA analiza) jednostruko preklopnih spojeva.

Metoda komparativne analize je korišćena za poređenje dobijenih rezultata, a metodom sinteze su utvrđene određene operativne preporuke. Metoda indukcije i generalizacije je primenjena za izvođenje opštih zaključaka o uticaju mehaničke pripreme na mehanička svojstva i čvrstoću zalepljenih spojeva.

2. Stanje istraživanja

Ginisov svetski rekord iz 2019. godine ukazuje na to koliko su savremeni sistemi lepka danas moćni, samo 3 grama lepka držalo je kamion od 17,5 tona na dizalici jedan metar iznad zemlje, jedan sat [13]. Ovaj podatak odgovara trenutnom nivou performansi lepкова, koji je postignut nakon brojnih istraživačkih i razvojnih napora tokom više decenija. Međutim, prvi pokušaj u ljudskoj istoriji da se stvori zalepljeni spoj između dve materijalne površine nije bio tako uspešan, nosivost zalepljenog spoja je bila veoma daleko od ovog nivoa performansi. Prvim lepkom u istoriji čovečanstva može se smatrati brezov katran, koji se u kamenom dobu koristio prvenstveno za lepljenje oruđa i oružja, velika većina lepкова je bila od prirodnih proizvoda kao što su kosti, kože, riba, mleko i biljke. Međutim, ovaj metod spajanja je značajno evoluirao tek u poslednjih 70 godina [14]. Glavni razlog je to što su lepکovi koji se koriste u naprednim tehnološkim aplikacijama zasnovani na sintetičkim polimerima, koji se razvijaju tek početkom 1900. god. Sintetički polimerni lepکovi počeli su da zamenjuju mnoge od ovih prirodnih proizvoda zbog njihove jače adhezije, veće mogućnosti formulacije i superiorne otpornosti na radna okruženja. Tabela 2.1 sažima glavne tačke istorijskog razvoja proizvoda za lepljenje i zaptivanje [8]. Prema A. Kinloch-u [15], lepак se može definisati kao materijal koji kada se nanese na površine materijala može da ih spoji i odoli odvajanju. Ali postoje i druge supstance koje su van ove definicije koje pokazuju fenomen adhezije, npr. štamparske boje i farbe. Sledeći značajan rast usledio je 1940-ih i 1950-ih sa razvojem strukturnih lepкова za industriju vojnih aviona. Zbog njihovog izuzetnog odnosa snage i težine, razvoj modernih lepкова je usko povezan sa istorijom avio i vazduhoplovne industrije. Prema R. Adams-u i dr. [16] strukturni lepак je lepак koji može da izdrži značajna opterećenja i koji je odgovoran za čvrstoću i krutost strukture. Primeri strukturnih lepкова su epoksidni, termoreaktivni akrilni i uretanski sistemi. Čvrstoća na smicanje može varirati od 5 MPa za poliuretan do 50 MPa za epoksid. Od strukturnih lepкова se očekuje da obezbede trajnost koja pokriva čitav životni vek proizvoda na kojem se primenjuju. Upravo trajnost zalepljenih spojeva predstavljala je problem u servisu aviona sve dok napredni sistemi lepka nisu definisani, uvedeni i verifikovani kasnih 1970-ih [8]. Sa uspešnim iskustvima u ovim industrijama, ubrzo se shvatilo da se lepکovi mogu koristiti za ekonomičnu zamenu mehaničkih metoda spajanja kao što su zavarivanje, lemljenje ili zakivanje. Zahvaljujući revoluciji u polimernoj nauci tokom 20. veka, razvijeni su lepکovi čvrstoće bliske samim spojenim materijalima, zbog čega je lepljenje preuzelo primat nad drugim tehnikama spajanja u mnogim oblastima.

Tabela 2.1 Istorijski razvoj lepkova i zaptivača [8]

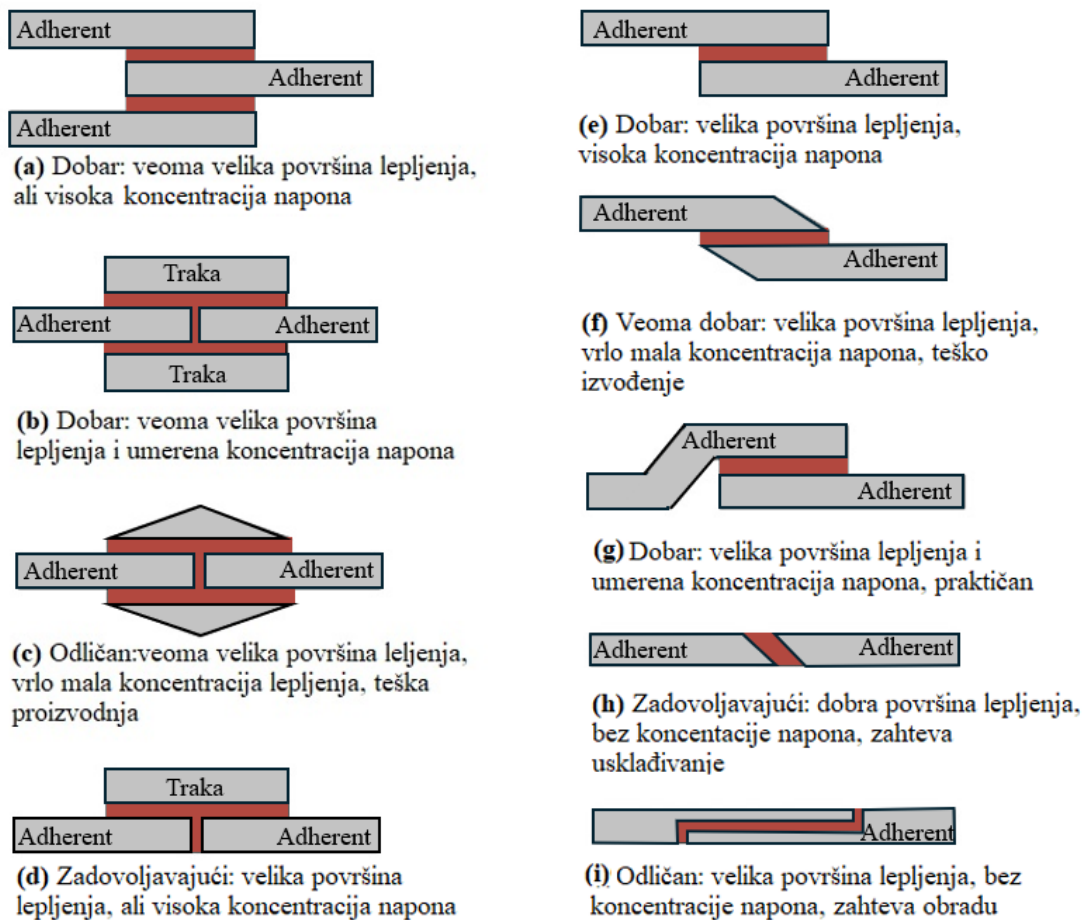
Približna decenija komercijalne dostupnosti	Lepak ili zaptivna masa (zaptivači)
<i>Pre 1910. godine</i>	Lepak od životinjskih kostiju, Lepak od ribe, Biljni lepkovi
<i>1910.</i>	Fenol-formaldehidni lepkovi, Kazeinski lepkovi
<i>1920.</i>	Celulozni ester, Alkidna smola, Ciklizovana guma u lepkovima, Polikloropren (Neopren), Lepkovi na bazi soje
<i>1930.</i>	Urea-formaldehidni lepkovi, Trake osetljive na pritisak, Fenolna smola lepljive folije, Lepkovi na bazi polivinil-acetata za drvo
<i>1940.</i>	Nitril-fenolni, Hlorisana guma, Melaminsko-formaldehidni Vinil-fenolni, Akrilni, Poliuretani
<i>1950.</i>	Epoksi(d), Cianoakrilati, Anaerobni lepkovi, Epoksidne legure
<i>1960.</i>	Poliamid, Polibenzimidazol, Polikvinoksalin
<i>1970.</i>	Lepkovi druge generacije na bazi akrila Akrilni lepkovi osetljivi na pritisak, Strukturni poliuretani
<i>1980.</i>	Ojačivači za termoset smole, Epoksi(d) na bazi vode, Vodeni kontaktni lepkovi, Oblikovani i penasti vrući lepkov
<i>1990.</i>	Epoksi(d) modifikovani poliuretanom, Očvrsnuti vrući lepkovi, UV i svetlosni sistem za očvršćavanje

2.1 Lepljenje kao tehnika spajanja

Lepljenje se definiše kao tehnika spajanja kontaktnih površina istovrsnih ili različitih materijala primenom lepka, nemetalne supstance, koji ostvaruje adheziju na površinama i obezbeđuje prenos opterećenja između njih [2, 10]. Prema SRPS EN 923 [17], lepak je nemetalna supstanca sposobna da spoji materijale površinskim lepljenjem (adhezijom), pri čemu spoj poseduje adekvatnu unutrašnju čvrstoću (koheziju).

Oblik zalepljenih spojeva predstavlja ključni faktor za postizanje optimalnih mehaničkih performansi i dugotrajnosti spoja. Pri projektovanju je neophodno odabrati odgovarajući tip spoja (npr. preklopni, čeonni, zakošeni ili kombinovani), kako bi se obezbedila što veća površina kontakta i smanjila ekscentričnost opterećenja. Posebnu pažnju treba obratiti na geometriju spoja, glatke prelaze, fazetiranje ili zakošenje ivica koje značajno doprinose smanjenju koncentracije napona i ravnomernijem prenosu opterećenja. Pored toga, dužina preklopa, debljina sloja lepka i njegova raspodela moraju biti pažljivo određeni jer direktno utiču na raspodelu napona i mehanizam loma. Dobro projektovan spoj omogućava da lepak i adherenti maksimalno iskoriste svoja mehanička svojstva, dok se istovremeno minimizuje rizik

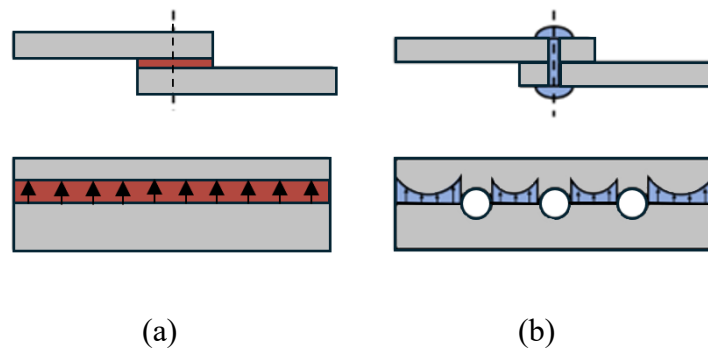
od pojave ljuštenja ili prerane degradacije spoja. Autori R. Adams i dr. [16] ukazali su na postojanje širokog spektra konfiguracija zalepljenih spojeva koje su dostupne za specifične inženjerske primene. Preklopni spojevi su najčešći oblici konfiguracije zalepljenih spojeva i postoje u nekoliko varijanti: jednostruki i dvostruki preklopni spojevi, kosi preklopni spojevi (*engl. scarf joint*) i drugi. Zalepljeni spojevi se mogu koristiti i kao sučeoni spojevi, posebno za zaptivanje i druge rotacione strukture. U udžbenicima se mogu naći primeri povoljnih i nepovoljnih konfiguracija zalepljenih spojeva, na slici 2.1 prikazano je nekoliko ovih primera.



Slika 2.1 Konfiguracije zalepljenih spojeva. (a) Simetrični dvostruki preklopni spoj, (b) Dvostruki preklopni spoj sa dodatnim pločicama/trakama, (c) Dvostruki preklopni spoj sa dodatnim pločicama kosih ivica, (d) Spoj sa dodatnom pločicom, (e) Jednostruki preklopni spoj, (f) Kosi jednostruki preklopni spoj, (g) Stepnasti preklopni spoj, (h) Kosi sučeoni spoj krajeva, (i) Simetrični jednostruki preklopni spoj [10, 18]

Upotreba zalepljenih spojeva je tokom poslednjih godina u porastu zbog mnogih prednosti koje dobro izveden zalepljeni spoj pruža u odnosu na tradicionalne mehaničke spojeve, posebno kada je u pitanju očuvanje strukturne čvrstoće. Jedan od problema koji se javlja kod drugih metoda spajanja jesu nepovoljna koncentracija napona i raspodela

opterećenja. Zakovani spojevi imaju veoma male površine prenosa opterećenja između podloga koje se spajaju, što dovodi do pojave koncentracija napona u blizini zakovica (oslabljuje se presek), koje su veoma podložne preranom otkazu. Ovaj efekat je još izraženiji kada se spajaju kompoziti ili krhki metali [19]. Zalepljeni spojevi bez obzira na kombinaciju materijala, bilo da je reč o metalu sa metalom, plastikom, staklom, gumom, keramikom ili drugim materijalima omogućavaju ravnomerniju raspodelu opterećenja duž cele površine spajanja (ne samo tačke ili linije), čime se ograničava efekat koncentracije napona. Smanjena pojava lokalnih vrhova napona utiče na veću dinamičku čvrstoću i duži radni vek spoja [20, 21]. Efekat (idealizovane) raspodele opterećenja kod zalepljenih i zakovanih spojeva prikazan je na slici 2.2.



Slika 2.2 Poređenje raspodele opterećenja kod (a) zalepljenih i (b) zakovanih spojeva [2, 19, 21]

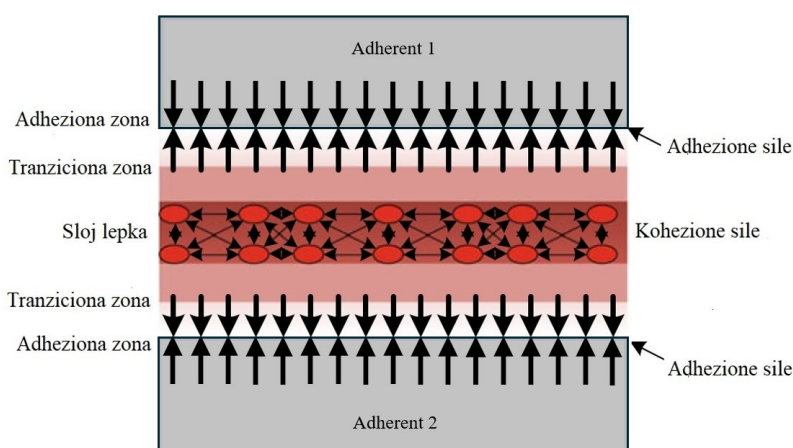
Da bi zalepljeni spoj dostigao punu nosivost, površine koje se spajaju moraju biti precizno nalegle i u potpunom kontaktu duž cele linije lepljenja, posebno u zoni ivica preklopa, gde se najčešće javljaju koncentracije napona. Ovo je preduslov za postizanje optimalne čvrstoće spoja i ravnomernog prenosa opterećenja [2].

Pošto se nanose unutar spoja, lepkovi ostaju gotovo nevidljivi u sklopu. Pored toga, formiraju zaptivni sloj koji sprečava prodor vazduha, vlage i drugih zagađivača kroz spoj [20]. Zaptivni sloj štiti konstrukciju od spoljašnjih uticaja, kao što su korozija, curenje i kontaminacija, čime se povećava radni vek i pouzdanost konstrukcije. Jedna od prednosti tehnologije lepljenja je i ta da je za spajanje potrebno vrlo malo ili nimalo toplote. Kao rezultat toga, struktura materijala delova koji se spajaju se ne menja, a zaostali naponi, koji su uglavnom povezani sa tehnologijom zavarivanja, retko se javljaju. I materijali sa završnim površinskim slojevima ili premazima mogu se efikasno zalepiti bez primene dodatnog zagrevanja. Sa ovog aspekta ne postoje ograničenja u pogledu kombinacija materijala koji se mogu spajati, čak i

neregularno oblikovane površine uz zanemarivo povećanje težine ne prouzrokuju praktično nikakvu promenu u dimenzijama ili geometriji delova.

Sa druge strane, zalepljene spojeve treba smatrati trajnim spojem, svaki pokušaj demontaže nije jednostavan i često dovodi do oštećenja adherenata i okolne strukture. Za postizanje zalepljenih spojeva veće nosivosti i dužeg radnog veka neophodna je pravilna priprema površina, što nije zahtev za spojeve koji se ostvaruju mehanički. Pri lepljenju moraju se obezbediti čiste prostorije sa kontrolisanim uslovima temperature i vlažnosti. Zalepljeni spojevi mogu se nedestruktivno ispitivati na prisustvo mehurića vazduha i nezalepljenih područja, ali trenutno ne postoji nedestruktivna metoda za određivanje njihove čvrstoće. Zbog toga se uzorci moraju destruktivno ispitivati, koristeći istu pripremu površine, lepak i ciklus lepljenja kao u stvarnoj strukturi.

Za sam proces lepljenja odgovorne su dve osnovne sile: adhezione i kohezione sile (slika 2.3). Odnos između ovih sila predstavlja ključni faktor koji određuje kvalitet zalepljenog spoja, a time i njegovu pouzdanost i oblast primene [18].



Slika 2.3 Šematski prikaz adhezionih i kohezionih sila [18]

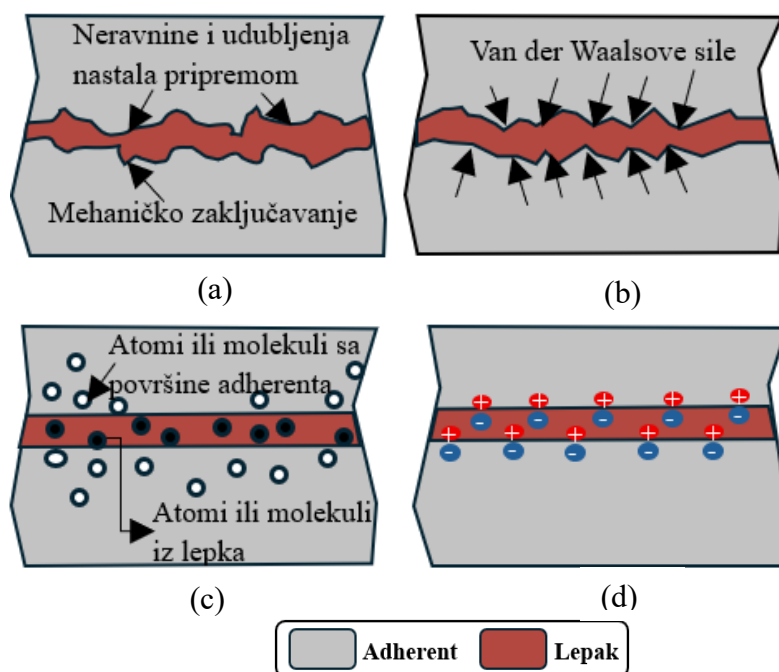
Adhezija je sposobnost različitih materijala da se međusobno drže zajedno na dodirnim površinama, zahvaljujući međumolekularnim silama koje deluju između njihovih atoma i molekula. Ona omogućava da se lepak „zalepi“ za podlogu, odnosno da se formira adhezioni veza [1, 14, 21]. Sile privlačenja između različitih vrsta molekula koji se nalaze na površinskom sloju (granici faza) podloga/lepak nazivaju se adhezione sile, koje usled interakcija dovode do vezivanja, odnosno adhezije lepka za površinu podloge (slika 2.3).

Za razliku od adhezije, koja deluje između različitih materijala, kohezija se odnosi na međumolekularne sile unutar jedne faze ili supstance. Kohezione sile obezbeđuju međusobno vezivanje molekula unutar iste materije. Kohezija predstavlja meru integriteta zalepljenog

spoja i opisuje njegovu mehaničku čvrstoću [22]. Kohezija se definiše kao sposobnost materijala da pruži otpor delovanju spoljašnjih (destruktivnih) sila koje teže njegovom razaranju. Dakle, mera kohezije je energija potrebna za razaranje materijala podeljena sa površinom duž koje je došlo do otkaza zalepljene veze [10]. Intenzitet kohezionih sila zavisi od uređenosti čestica materijala i prisutnih međumolekularnih sila, kao i od njegove mikrostrukture, koja može biti narušena pojavama poput mikroprslina ili kavitacije [2, 23].

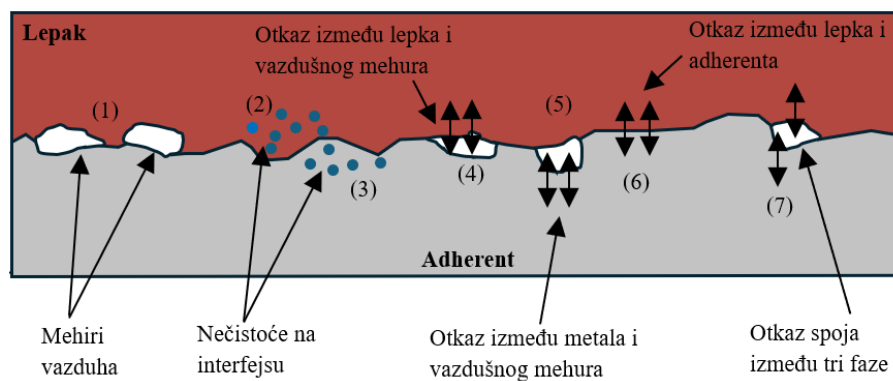
2.2 Teorije adhezije

Pri spajanju površina, moguće je ostvariti fizičku ili hemijsku vezu koja se može javiti na makroskopskom ili mikroskopskom nivou. U većini slučajeva veza se formira kada lepak (tečnost) navlaži površinu podloge (čvrstu supstancu), nakon čega lepak očvršćava kroz hemijski ili fizički proces. Proces adhezije zavisi od karakteristika površina koje se spajaju, pri čemu svojstva ovih površina značajno utiču na čvrstoću i dugotrajnost formiranog spoja. Hemijska i morfološka struktura ovih površina igraju ključnu ulogu u procesu vezivanja jer direktno utiču na efikasnost adhezije i snagu samog spoja. Postoji šest teorija adhezije koje se oslanjaju na karakteristike površina pri čemu naglašavaju da su površinska svojstva ključna za uspešnu vezu (slika 2.4). Ove teorije su predstavljene u nastavku [24].



Slika 2.4 Osnovne teorije adhezije: (a) mehaničko zaključavanje, (b) adsorpcija/hemijsko vezivanje, (c) difuzija i (d) elektrostatička adhezija [24]

Teorija slabog graničnog sloja (engl. *Weak Boundary Layer Theory*) ukazuje na to da dve površine ne mogu biti povezane ako ne dolaze u veoma blizak kontakt jedna sa drugom. Teoriju je predložio J. Bikerman [25], pri čemu se posebno ističe da slab granični sloj može nastati usled sedam različitih klasa faktora, kao što su vazdušni mehuri (džepovi), nečistoće, kao i hemijske reakcije između podloge i lepka (slika 2.5), koje mogu onemogućiti bliski kontakt i dovesti do formiranja sloja sa slabom kohezijom, čime se prijanjanje znatno umanjuje. Međutim, nije svaki kontaminant (zagađivač) nužno uzrok slabe veze, jer u nekim slučajevima, npr. ulja i masti sa površine mogu biti uklonjeni rastvaranjem od strane lepka [25, 22, 26].



Slika 2.5 Sedam klasa slabih graničnih sloja. (1) Vazdušni mehuri, (2) i (3) nečistoće na interfejsu, od (4) do (7) reakcije između podloge i lepka [25, 27]

Teorija difuzije je primenljiva samo na polimernim površinama, gde molekuli polimera mogu da interdifuzuju i na taj način formiraju vezu. Teorija je uglavnom primenljiva samo na spajanje sličnih linearnih gumenih polimera (engl. *Autohesion*) i na zavarivanje termoplastičnih materijala rastvaračima i ne važi za metalne spojeve. Kada dođe do procesa difuzije ili spajanja polimera, početna granica između dva materijala (interfejs) potpuno nestaje, nije moguće uočiti tragove te granice, materijali se potpuno stapaju i čine jedinstvenu strukturu bez jasno vidljive granice između njih.

Elektrostatička teorija potiče od pretpostavke da kada su dva metala u veoma bliskom kontaktu, elektroni se prenose sa jedne na drugu podlogu što dovodi do stvaranja električnog dvostrukog sloja i privlačne sile. Međutim, polimeri, kao nemetalni materijali, ne funkcionišu na isti način, jer ne mogu imati takve elektronske prenose između svojih molekula, pa stoga ova teorija nije primenljiva na polimerne lepkove.

Za ostvarivanje povezivanja između lepka i podloga, *teorija mehaničkog povezivanja - zaključavanja* (engl. *Mechanical Interlocking Theory*) zahteva podlogu koja ima neravnu, hrapavu površinu kako bi nestvrdnuti lepak mogao ući u šupljine gde bi i očvrstnuo. Ovo je

prihvatljivo za hrapave ili porozne površine, kao što su drvo, tekstil ili metalne površine sa veoma poroznim slojevima oksida, kao što je aluminijum. Iako se pretpostavlja da hrapavije površine poboljšavaju čvrstoću zalepljenog spoja kroz mehaničko povezivanje, argumenti protiv ove teorije ukazuju na to da bolji rezultati mogu biti i posledica drugih faktora, poput veće površine kontakta, smanjenja površinskih nečistoća, promena u kinetici kvašenja ili poboljšanja drugih svojstava površine koja nisu direktno povezana sa mehaničkim zaključavanjem, ali ipak doprinose većoj čvrstoći veze [15, 28, 29].

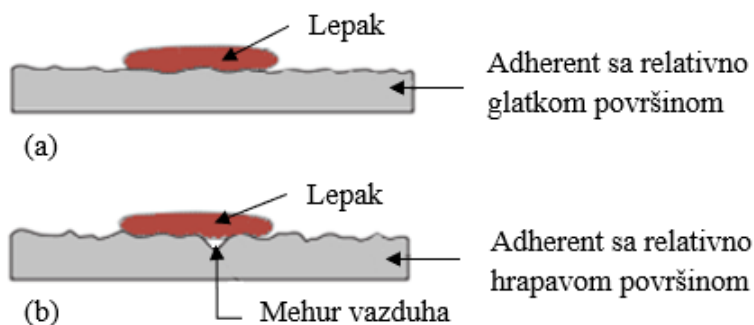
Teorija hemijskog vezivanja predlaže da se jonske, kovalentne, vodonične ili Lewis-ove kiselinsko-bazne veze mogu formirati između molekula lepka i lepka preko interfejsa. Ove veze su mnogo jače od veza koje formiraju sekundarne sile, ali imaju kraću dužinu veze i neophodna je bliska interakcija da bi se veze stvorile. Ova teorija objašnjava kako lepkovi mogu stvoriti čvrste i dugotrajne veze sa različitim podlogama, uključujući metale, plastiku i staklo, čineći je važnim principom u industriji lepka i spajanja materijala [22].

Teorija fizičke adsorpcije doprinosi svim oblicima adhezije pa je najšire primenjivana teorija. Uključuje međumolekulske interakcije između molekula lepka i površine podloge. Ove interakcije obuhvataju sekundarne ili Van der Waalove sile, koje uključuju dipolne sile, vodonične veze i disperzione sile. Ove sile su najslabije od svih međumolekularnih sila, ali su njihove jačine više nego dovoljne da objasne čvrstoću zalepljenih spojeva. Potencijalne energije ovih privlačenja su sve proporcionalne sa r^{-6} , gde je r rastojanje između molekula. Ove sile adhezije su vrlo kratkog dometa i deluju samo na jedan ili dva sloja molekula u interfejsnim slojevima. Da bi adhezija bila efikasna, neophodno je da molekuli lepka ostvare blizak kontakt sa površinom podloge. Proces uspostavljanja kontinuiranog kontakta između lepkova i podloge poznat je kao kvašenje (*engl. Wetting*).

2.2.1 Kvašenje površine kao preduslov adhezije

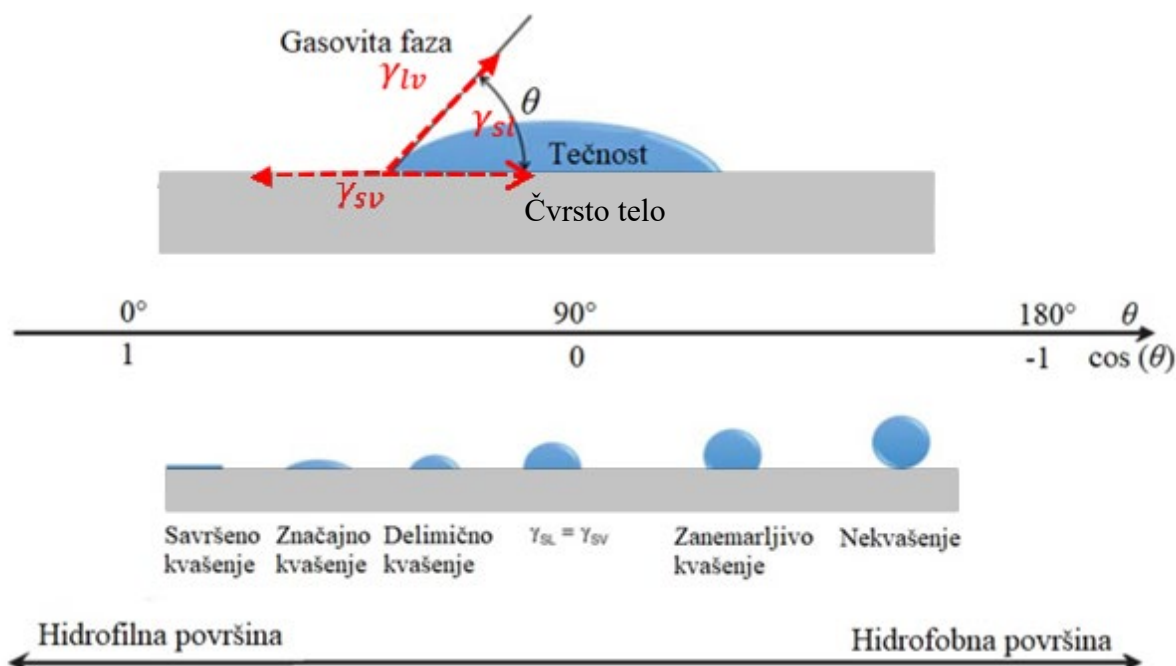
Prema definiciji, kvašenje je sposobnost tečnosti da održava kontakt sa čvrstom površinom, što je rezultat međumolekularnih interakcija kada se obe supstance dovedu u kontakt [11, 30]. Stepem kvašenja (ili vlažnosti) zavisi od ravnoteže adhezionih i kohezionih sila [11, 13, 31]. Adhezione sile između tečnosti i čvrste površine uzrokuju da kap tečnosti splasne po površini. Kohezione sile unutar tečnosti uzrokuju da kap zadrži oblik kugle i smanji kontakt sa površinom [11]. Slika 2.6 ilustruje dobro i loše kvašenje lepkova koji se šire po površini. Dobro kvašenje nastaje kada lepak prodire (odnosno teče) u doline i prsline na površini podloge, čime se postiže najveća čvrstoća spoja. Loše odnosno nepotpuno kvašenje nastaje kada lepak prelazi preko dolina, što rezultira smanjenjem ukupne čvrstoće spoja [32].

Duž interfejsa razvijaju se defekti u vidu malih vazdušnih džepova (slika 2.6) [33], što dovodi do smanjenja stvarne površine kontakta između lepka i podloge. Uspostavljanje bliskog kontakta lepka sa površinom omogućava da se površinske mane minimiziraju ili eliminišu.



Slika 2.6 Primer (a) dobrog i (b) lošeg kvašenja nakon nanošenja lepka na podlogu [33]

Kontaktni ugao (θ) prikazuje svojstva kvašenja površine koja su tesno povezana sa svojstvima adhezije i pruža korisne informacije o hemijskim i fizičkim osobinama površine nakon interakcije čvrste površine i tečnih supstanci. Ugao koji formira čvrsta površina i tangenta na gornju površinu na kraju tačke kontakta naziva se kontaktni ugao (slika 2.7), što odgovara uglu između tangente na tački kontakta i horizontalne linije čvrste površine [11].



Slika 2.7 Šematski prikaz kontaktnog ugla između tečnosti i čvrstog tela; opseg i varijacije kontaktnog ugla, γ_{lv} - međufazni napon između tečnosti i gasovite faze, γ_{sl} - međufazni napon između čvrstog tela i tečnosti i γ_{sv} - međufazni napon između čvrstog tela i gasovite faze [11,

Kontaktni ugao se definiše na preseku tri međufazne površine: čvrsta-tečna, tečna-gasovita i čvrsta-gasovita [34]. Pri merenju kontaktnog ugla voda se često koristi kao jedan od medijuma (*engl. Water Contact Angle*), gde pri kvašenju razlikujemo hidrofilnu i hidrofobnu površinu (slika 2.7). Kada je kontaktni ugao manji od 90° , čvrsta površina se definiše kao hidrofilna površina (tj. ona sa relativno visokom slobodnom energijom površine), pri tome važi pravilo da što je kontaktni ugao manji, to je kvašenje površine bolje, odnosno tečnost se bolje širi i prijanja na čvrstu podlogu [11, 35]. Kada je kontaktni ugao veći od 90° , površina se definiše kao hidrofobna (niska slobodna energija površine) što znači da voda ne može lako da kvasi čvrstu površinu [11, 36]. Ukoliko je kontaktni ugao veći od 150° ili manji od 10° (ili gotovo nula), takve površine definišemo kao super-hidrofobne i super-hidrofilne, respektivno [37].

Thomas Young je predložio primarni zakon kvašenja kapljicom vode na ravnoj i glatkoj površini, kao što je prikazano na slici 2.8 (a). Young-ova jednačina [39] je data kao:

$$\cos \theta_c = \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lv}} \quad (2.1)$$

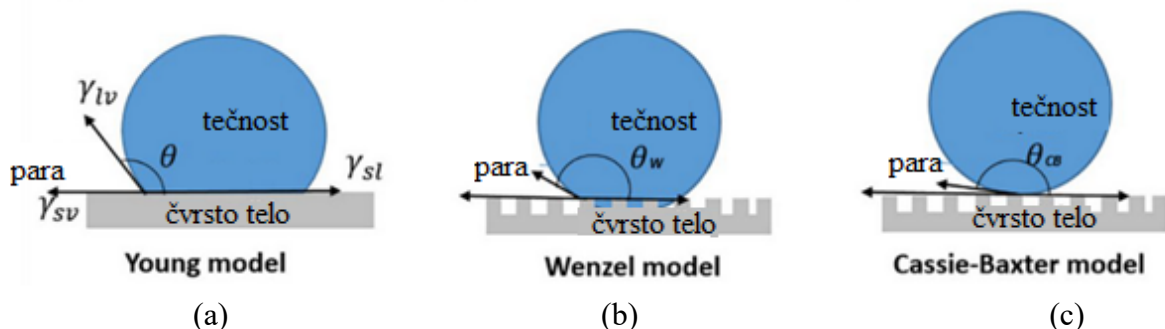
gde je θ_c statički kontaktni ugao na glatkoj površini, a γ_{sv} , γ_{sl} i γ_{lv} predstavljaju međufazne napone na granicama prema redosledu čvrsta-gasovita faza, čvrsta-tečna faza i tečna-gasovita faza.

Kontaktni ugao θ_c može se meriti različitim vrstama instrumenata (npr. goniometri, kamere visoke rezolucije), ali se može i izračunati pomoću sledeće jednačine:

$$\theta_c = 2 \arctg \frac{h}{r} \quad (2.2)$$

gde su: h – visina kapljice i r – poluprečnik kapljice.

Kako Young-ova jednačina važi samo za glatke i homogene površine, Wenzel je modifikovao Young-ov model i uveo faktor hrapavosti (r) da bi opisao fenomen kvašenja mikrostrukturiranih površina, kao što je prikazano na slici 2.8 (b) [40].



Slika 2.8 Različita stanja kapljice na čvrstoj površini: (a) Young model, (b) Wenzel-ov model, and (c) Cassie-Baxter-ov model [40]

Prema Wenzel-u [41], poboljšanje kvašenja površine može se postići povećanjem njene hrapavosti (hrapavljenjem). Povećana hrapavost smanjiće kontaktni ugao na inherentno hidrofilnoj površini i povećati kontaktni ugao na inherentno hidrofobnoj površini [42]. Ovo se zasniva na pretpostavci da je cela površina nakvašena, tečnost u potpunosti prodire u udubljenja površine dakle ne postoji vazdušni jaz (prostor) između površine i tečnosti. U Wenzel-ovoj jednačini, odnos između stvarne površine i ravne (idealno glatke) površine definiše se kao faktor hrapavosti r :

$$\cos\theta_w = r \cdot \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lv}} = r \cos\theta \quad (2.3)$$

gde je θ_w statički kontaktni ugao prema Wenzel-ovom modelu.

Drugi način za određivanje kontaktnog ugla kapljice na hrapavoj površini prema slici 2.8 (c) je suspenzija tečne kapi na površinskim grebenima, koja u ovom slučaju predstavlja vazduh koji je zarobljen između površinskih udubljenja i kapljice tečnosti. Cassie-Baxter-ova [43] studija ukazuje na to da tečnost ne kvasi u potpunosti praznine između površinskih žlebova na hrapavoj površini kada se infiltrira na heterogenu površinu. Vazduh je zarobljen ispod tečne kapi, između površinskih žlebova, a kap je zapravo u kontaktu sa složenim interfejsom koji se sastoji od gasa i čvrste materije (tzv. kompozitnog međufaznog sloja), što ukazuje na njegovu razliku sa Wenzel-ovom teorijom [44]. Cassie i Baxter-ova istraživanja su sugerisala da se svojstva infiltracije kapljica na hrapavoj površini smatraju kompozitnim kontaktom [45, 46]. Za heterogena kompozitna stanja kvašenja kontaktni ugao se može opisati Cassie-Baxter jednačinom:

$$\cos\theta_{CB} = f_s \cos\theta_c + f_v \cos\theta_v \quad (2.4)$$

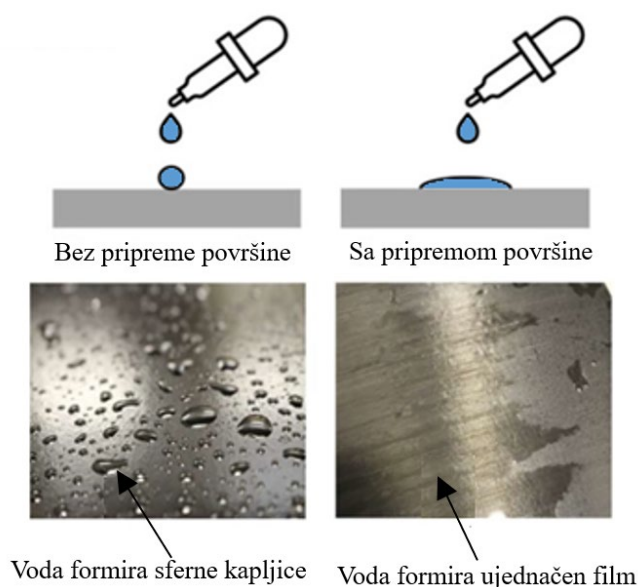
gde je θ_{CB} efektivni (stvarni) ugao kvašenja prema Cassie-Baxter modelu, θ_c Young-ov kontaktni ugao na glatkoj površini, a f_s i f_v su površinski udeli čvrste faze i pare na površini, redom.

S obzirom da važi da je $f_s + f_v = 1$ i da je $\theta_v = 180^\circ$ (što podrazumeva da kap tečnosti koja lebdi u vazduhu ima oblik savršene sfere), jednačina (2.4) se može preformulisati na sledeći način:

$$\cos\theta_{CB} = f_s \cos\theta_c + f_s - 1 \quad (2.5)$$

Iz jednačine (2.5) može se zaključiti da će kapljice imati veći efektivni kontaktni ugao ako se udeo čvrste površine f_s smanjuje, što znači da se veći deo kapljice oslanja na vazdušne džepove, a ne u direktnom kontaktu sa čvrstom podlogom. Ovo ukazuje na to da povećanjem hrapavosti površine i smanjenjem kontakta između tečnosti i čvrste faze raste hidrofobnost, što može dovesti do super-hidrofobnog ponašanja, kada efektivni kontaktni ugao prelazi 150° [43].

Značajan faktor koji može negativno uticati na kvašenje je prisustvo kontaminacije u lepku ili na površini podloge [47]. Ovo se može lako uočiti na slici 2.9, gde se ista površina i tečnost ponašaju na različite načine pre i nakon površinskog tretmana. Pre pripreme površine, tečnost ne kvasi površinu, već se na površini formiraju vrlo vidljive sferne kapi. S druge strane, nakon pripreme površine, može se uočiti da tečnost kvasi površinu, formirajući film, pri čemu se ugao kontakta smanjuje.



Slika 2.9 Kvašenje površine tečnošću pre i nakon površinske pripreme [47]

2.3 Materijali i priprema površina za lepljenje

2.3.1 Materijali aderenata

Adherenti, odnosno materijali koji su međusobno spojeni lepljenjem, igraju ključnu ulogu u formiranju i performansama zalepljenih spojeva. Njihova hemijska i fizička svojstva direktno utiču na kvalitet prijanjanja, izbor odgovarajućeg lepka, kao i na dugoročnu stabilnost spoja. U praksi se koristi širok spektar materijala kao podloga odnosno adherent, među kojima su najčešći metali, polimeri, kompoziti, keramika i staklo.

Metali su najčešće korišćeni adherenti u konstrukcijama koje zahtevaju visoku čvrstoću, krutost i otpornost na dinamička opterećenja. Najzastupljeniji metali u adhezivnom povezivanju su aluminijum, čelik, titanijum i njihove legure. Međutim, prisustvo oksidnih slojeva i niska površinska energija nekih metala (npr. aluminijuma) može značajno otežati adheziju. Stoga je za uspešno lepljenje metala neophodna odgovarajuća priprema površine, kao što su mehaničko hrapavljenje, hemijska obrada, anodizacija ili primena prajmera.

Polimerni materijali se često koriste kao podloge u industriji plastike, elektronike i automobilske industriji. Termoplasti (kao što su polietilen, polipropilen, polivinil-hlorid, polikarbonat) i termoreaktivni polimeri (epoksidi, fenolne smole) imaju veoma različita adhezijska svojstva. Polimeri niske površinske energije (kao što su PE i PP) pokazuju slabu adheziju bez dodatne aktivacije površine (npr. korona obrada, plazma tretman). Takođe, polarni karakter, staklotransiciona temperatura i kristaliničnost polimera utiču na njihovo ponašanje kao adhezijska sredstva.

Kompozitni materijali, naročito oni ojačani vlaknima (npr. karbonski i stakleni kompoziti), sve više se koriste u vazduhoplovstvu, automobilske i sportske industriji zbog njihove visoke specifične čvrstoće i krutosti. Površinske karakteristike kompozita mogu značajno varirati u zavisnosti od vrste matrice i načina proizvodnje. Tipično je da površinski sloj sadrži vezivnu matricu sa manjim sadržajem vlakana, što može uticati na smanjenje adhezije. Zbog toga je često potrebno dodatno brušenje ili upotreba prajmera kako bi se poboljšala adhezija na vlaknastim kompozitima.

Keramika i staklo se odlikuju visokom tvrdoćom, otpornošću na koroziju i visoke temperature, ali su krta i osetljivi na udare. Površinska energija im je generalno visoka, što pogoduje adheziji, ali se zbog njihove hemijske inertnosti i krhkosti zahteva pažljiv odabir lepka i kontrolisani režim očvršćavanja, kako bi se izbegla pojava unutrašnjih napona i loma.

Drvo kao podloga ima složenu poroznu strukturu i heterogenu hemiju, što može uticati na upijanje lepka i formiranje slabih slojeva. Vrsta drveta, vlažnost i gustina značajno utiču na ponašanje spoja. Lepljenje prirodnih materijala zahteva pažljivo doziranje lepka i kontrolu pritiska prilikom spajanja.

2.3.2 Materijali korišćeni za eksperimentalna istraživanja u okviru disertacije

Ova doktorska disertacija se fokusira na strukturno lepljenje podloga od dva metala: nerđajući čelik i legura aluminijuma. Ovi metali se razlikuju po mehaničkim svojstvima, ali se često primenjuju u slučajevima koji uključuju lepljenje kao primarni metod spajanja. I nerđajući čelik i legure aluminijuma se koriste kada se zahtevaju dobra svojstva izdržljivosti, tako da je važno da veze napravljene ovim materijalima takođe budu izdržljive. Oba materijala imaju stabilne površinske okside koji se spontano reformišu ako je površina oštećena, pri čemu kvalitet i debljina ovih oksidnih slojeva može zavisiti od uslova okruženja i tretmana kojima su materijali podvrgnuti.

2.3.2.1 Nerđajući čelik

Nerđajući čelici predstavljaju široku porodicu legura na bazi gvožđa sa niskim sadržajem ugljenika (obično znatno manjim od 2%) i najmanje 10,5% hroma. Dodavanjem hroma stvara se izuzetno tanak, ali stabilan i kontinuiran zaštitni sloj, koji ovu leguru čini otpornijom na koroziju [48]. Zasnovani su na sistemima gvožđe-hrom, gvožđe-hrom-ugljenik i gvožđe-hrom-nikl, ali mogu sadržati i druge legirajuće dodatke koji menjaju njihovu mikrostrukturu ili svojstva. U zavisnosti od klase, nerđajući čelici mogu sadržati nikl, mangan, molibden, titanijum, bakar i azot. Ovi drugi legirajući elementi se koriste za poboljšanje svojstava kao što su formabilnost, čvrstoća i žilavost. Pored otpornosti na promenu boje i koroziju, nerđajući čelici nude i otpornost na oksidaciju pri visokim temperaturama, kao i širok spektar čvrstoće i plastičnosti, u zavisnosti od legure. Nerđajući čelici se koriste u širokom spektru aplikacija i u mnogim okruženjima. Primena varira od proizvodnje energije, transportne industrije, građevinske industriji i industrije celuloze i papira, do uobičajenih kućnih proizvoda kao što su veš mašine i sudopere.

Nerđajući čelici mogu se podeliti u četiri različite grupe i primarno se klasifikuju prema fazi koja dominira njihovom mikrostrukturom (u zavisnosti od svoje kristalne strukture): austenitni, feritni, dupleks i martenzitni nerđajući čelici. Ove grupe imaju prilično različite mehaničke i hemijske osobine. Austenitna grupa je daleko najveća po obimu, a najbrže rastuća grupa su dupleks nerđajući čelici.

Austenitni nerđajući čelici predstavljaju najveću grupu nerđajućih čelika u proizvodnji i potrošnji. Imaju visok procenat hroma, između 15 i 26% i između 5 i 25% nikla. Uglavnom imaju austenitnu mikrostrukturu, ali mogu sadržati male količine ferita. Austenitna struktura ukazuje na mnoge osobine koje se nalaze u FCC strukturama, kao što su dobra obradivost (formabilnost) i čvrsto ponašanje na niskim temperaturama. Austenitni nerđajući čelici se lako obrađuju na hladno, dok servisne temperature (temperaturni opseg) mogu biti čak do 760 °C. Materijal se može kupiti u hladno vučenom obliku, a koristi se u širokom spektru aplikacija od pribora za jelo, kuhinjske opreme, medicinskih proizvoda do rezervoara za skladištenje hemikalija, u industriji celuloze, autobusima, vozovima, zgradama, pa čak i svemirskim odelima.

Materijal od nerđajućeg čelika koji je korišćen u ovom istraživanju je austenitni hrom-nikl nerđajući čelik X5CrNi18-10.

2.3.2.2 *Aluminijum i legure aluminijuma*

Aluminijum je lagan, mek, veoma rasprostranjen u zemljinoj kori i najčešće korišćen metal. Ima dobru električnu i toplotnu provodljivost, zadovoljavajuću korozionu otpornost, generalno pokazuje dobru obradivost, a FCC struktura ga čini plastičnim čak i na niskim temperaturama. Sam aluminijum ne pokazuje veoma dobra svojstva čvrstoće, ali legiranjem odgovarajućim elementima, hladnom deformacijom, termičkom obradom i kombinacijom ovih mogućnosti čvrstoća se može drastično povećati [49]. Najčešći hemijski elementi koji se dodaju aluminijumu su bakar, mangan, silicijum, magnezijum, cink itd. Pored čvrstoće, legirajući elementi mogu uticati i na gustinu, obradivost, električnu provodljivost, otpornost na koroziju i zavarljivost [50]. Zbog svoje male gustine ($2,7 \text{ gr/cm}^3$), aluminijum se široko koristi u industrijama transporta, građevinarstvu i proizvodnji ambalaže kako bi se povećala energetska efikasnost i smanjile emisije gasova sa efektom staklene bašte. Dobra površinska svojstva takođe čine legure aluminijuma interesantnim za širok spektar proizvoda, kao što su paneli, automobili i avioni. Takođe, aluminijum je reciklabilan i ekološki prihvatljiv.

Legura aluminijuma koja je korišćena u ovom istraživanju je svestrana legura metala sa širokim spektrom upotrebe AlMg3, prema standardu DIN 1725-1:1983 (oznaka W.Nr.3.3535) [51]. Prema savremenim evropskim standardima, odgovarajuća oznaka ove legure je EN AW 5754, koja pripada grupi Al-Mg legura (serija 5XXX). Označavanje legure aluminijuma EN AW 5754 H22 definisano je standardom SRPS EN 573-1 [52], gde broj 5 označava seriju kojoj pripada legura, broj 7 predstavlja modifikaciju osnovne legure, a oznaka 54 označava konkretnu leguru u seriji 5XXX. Legure aluminijuma su uglavnom dvokomponentne i trokomponentne, u zavisnosti od sistema legiranja podeljene su u osam grupa, sa oznakama od 1XXX do 8XXX. Legure serije 5XXX su legure sa magnezijumom kao primarnim legirajućim elementom, pri čemu slova oznaka *AW* – predstavlja leguru aluminijuma za gnječenje. Različite serije legura aluminijuma se različito obrađuju, tako da nakon oznake serije legure može se pisati slovo koje opisuje stanje legure, odnosno način termičke obrade, što u ovom slučaju predstavlja *H* – legure ojačane hladnim deformisanjem. Dodatne oznake termičkog stanja materijala definisane su standardom SRPS EN 515 [53].

Legura aluminijuma EN AW 5754 poznata je po svom visokom odnosu čvrstoće prema težini, otpornosti na koroziju, otpornosti na toplotu i dobroj plastičnosti i obradivosti – svim svojstvima koja čine ovu leguru pogodnim za širok spektar primena u različitim industrijama, kao što su automobilska, građevinska, brodogradnja, izrada posuda pod pritiskom itd.

2.3.3 Materijali lepkova

Postoji mnogo načina za klasifikaciju lepkova, ovde će prvenstveno biti grupisani kao strukturni ili nestrukturni. Ova grupa predstavlja tip primene gde se lepak obično koristi. Takođe, lepkove možemo klasifikovati prema tome da li formiraju umrežene molekule ili ne (tj. termoreaktivni ili termoplastični), po njihovoj fleksibilnosti (tj. kruti ili elastični) i po njihovom obliku i uslovima očvršćavanja. Strukturne primene su one koje zahtevaju visoku čvrstoću ili postojanost. Od strukturnih zalepljenih spojeva očekuje se da obezbede radni vek koji je ekvivalentan radnom veku proizvoda u kome je zalepljeni spoj sastavni deo. Nestrukturne primene su one koje generalno zahtevaju samo malu čvrstoću ili privremeno pričvršćivanje. Od ovih lepkova se ne zahteva da podnose značajna opterećenja, već samo da drže materijale na mestu. Primeri nestrukturnih lepkova su trake osetljive na pritisak, lepkovi za topljenje (gumene cementne smole) ili lepkovi za pakovanje.

Osnovna funkcija strukturnih lepkova je da obezbede čvrsto i trajno povezivanje elemenata konstrukcije, pri čemu moraju biti sposobni da izdrže visoka mehanička opterećenja [7, 8]. Epoksidi su najpoznatiji i najčešće korišćeni strukturni lepkovi, imaju široku primenu u automobilskoj, građevinskoj i vazduhoplovnoj industriji. Predstavljaju najsvestraniju familiju lepkova jer se dobro vezuju za mnoge podloge i mogu se lako modifikovati da bi se postigla veoma različita svojstva. Zahvaljujući dobrim osobinama kvašenja, epoksidni lepkovi obezbeđuju visok nivo adhezije na većini podloga, izuzev neobrađenih plastika i elastomera. Očvršli epoksidi imaju termoreaktivne molekularne strukture. Pokazuju odličnu čvrstoću na zatezanje i smicanje, ali relativno nisku čvrstoću na ljuštenje [7], osim ako nisu modifikovani otpornijim polimerom. Epoksidni lepkovi nude odličnu otpornost na ulje, vlagu i mnoge rastvarače. Nisko skupljanje pri očvršćavanju i visoka otpornost na puzanje pod produženim naprežanjem karakteristike su mnogih visokokvalitetnih epoksidnih lepkova. Epoksidne smole ne ispuštaju isparljive materije tokom procesa očvršćavanja i korisne su u aplikacijama za popunjavanje praznina. Takođe se odlikuju izuzetnom hemijskom postojanošću i dobrim mehaničkim svojstvima pri povišenim temperaturama. Opseg temperatura pri kojima mogu biti podvrgnuti su od $-157\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $204\text{ }^{\circ}\text{C}$ [7]. Pravilni izbor različitih očvršćivača, smola, modifikatora i punila-ojačivača omogućava razvijanje željenih svojstava za specifične primene [21]. Širok spektar očvršćivača uključuje komponente kao što su amini, primarni i sekundarni amini i anhidridi. Epoksi mogu biti u obliku tečnosti ili pasta, ali mogu biti i u obliku traka, filmova ili pene. Kao i kod mnogih drugih strukturnih lepkova, da bi se postigla maksimalna čvrstoća veze, naročito u nepovoljnim uslovima, površine adherenata moraju biti pažljivo

pripremljene. Epoksidni lepkovi formiraju jake do izuzetno čvrste spojeve sa čelikom, aluminijumom, mesingom, bakrom i većinom drugih metala..

Iako se prisustvo površinskih nečistoća i kontaminanata tradicionalno smatra nepovoljnim za kvalitet zalepljenog spoja, istraživanja pokazuju da određeni epoksidni lepkovi mogu ostvariti zadovoljavajuću, čak i vrlo dobru adheziju i u takvim uslovima. M. Debski i dr. [54] su analizirali mehanizme koji omogućavaju efikasno funkcionisanje epoksidnih lepka na nečistim, uljem kontaminiranim površinama, pri čemu su identifikovali tri osnovna procesa uklanjanja ulja sa površine: istiskivanje (*engl. displacement*), apsorpciju (*engl. absorption*) i tzv. „varenje“ (*engl. digestion*) kontaminanata, kao i dodatni proces gde dolazi do apsorpcije praćene isparavanjem ulja na slobodnim površinama (sekundarni proces). Takođe je pokazano da se, u slučaju ravnih površina, ulje može istisnuti bez značajnijeg zarobljavanja, dok kod hrapavih površina deo kontaminacije može biti apsorbovan u epoksidnu matricu, što omogućava očuvanje funkcionalne adhezije čak i u prisustvu uljnih nečistoća.

Većina komercijalno dostupnih epoksidnih lepka su jednokomponentni lepkovi (1K) koji očvršćavaju na povišenim temperaturama ili dvokomponentni lepkovi (2K) koji očvršćavaju na sobnoj ili na povišenoj temperaturi. 1K epoksidni lepkovi se uglavnom koriste za strukturno lepljenje čelika i aluminijuma. Koriste se u brojnim primenama u automobilskoj industriji, posebno kada su potrebna vrlo visoka mehanička i/ili udarna čvrstoća. Kako bi zadovoljili zahteve ovakvih primena, ove lepkove odlikuju veoma dobra čvrstoća spoja u širokom temperaturnom opsegu, visoka krutost, otpornost na udare i izuzetna otpornost na koroziju. Dvokomponentni epoksidni lepkovi se posebno koriste za strukturno lepljenje metala kod kojih su zahtevi za čvrstoćom i postojanošću u uslovima starenja veoma visoki. Nakon očvršćavanja, slojevi 2K epoksidnog lepka postaju termoreaktivni materijali sa relativno visokim kohezionim čvrstoćama i relativno krutim do elastičnim svojstvima. Pokazuju izuzetnu sposobnost prijanjanja na širok spektar standardnih podloga koje se koriste u industrijskoj praksi.

U ovom istraživanju korišćena su tri komercijalno dostupna ojačana strukturna epoksidna lepka proizvođača Sika, oznaka SikaFast®-580 [55], SikaPower®-880 [56] i SikaPower®-492 G [57]. Tehnički listovi za ove lepkove mogu se pronaći u Prilogu A ove disertacije.

Dvokomponentni akrilni/epoksidni lepak SikaFast®-580 temelji se na Sika tehnologiji polimera da kombinuje prednosti akrilnih smola sa dvostruko poboljšanim performansama (*engl. Acrylic Double Performance - ADP*). Tehnologija polimera ADP je tehnologija koja kombinuje dva ključna svojstva akrilnih smola kako bi poboljšala performanse materijala. Ovaj

pristup omogućava polimerima da pruže visoku adheziju, brže očvršćavanje, izdržljivost i otpornost na spoljne uticaje, kao što su UV svetlost, hemikalije i temperaturne promene. ADP tehnologija omogućava proizvodnju polimernih materijala sa poboljšanim mehaničkim i hemijskim svojstvima, koji su specijalno dizajnirani za različite industrijske aplikacije, uključujući automobilske, građevinske i elektronske proizvode. SikaFast®-580 kombinuje mogućnost očvršćavanja na sobnoj temperaturi (hladno očvršćavanje) i očvršćavanje na visokim temperaturama (toplotno očvršćavanje), uz odličnu adheziju na nečistim, uljem kontaminiranim površinama.

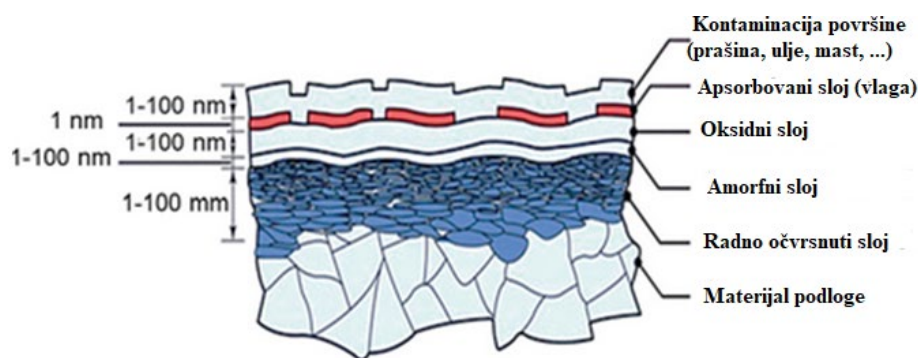
SikaPower®-880 je dvokomponentni epoksidni lepak koji se sastoji od smole i aminskog očvršćivača (*engl. cura*). Kada se ove dve komponente pomešaju, epoksid prolazi kroz egzotermnu reakciju i stvrdnjava se (očvršćava) kako bi formirao spoj. Epoksid-aminski lepkovi su specifičan tip epoksidnih lepkova u kojima se koristi aminski očvršćivač da bi se izazvala hemijska reakcija između epoksidne smole i aminskog sredstva za očvršćavanje. Ovaj tip lepkova je poznat po svojoj izuzetnoj čvrstoći, otpornosti na hemikalije, visokim temperaturama i dugoročnoj stabilnosti.

SikaPower®-492 G je jednokomponentni epoksidni hibridni lepak visoke čvrstoće, koji zavisi od visoke temperature kako bi se ubrzao proces očvršćavanja. Hibridni lepkovi su adhezivi koji kombinuju osobine različitih vrsta smola, najčešće akrilnih i epoksidnih, kako bi postigli bolje performanse nego što bi to bio slučaj sa pojedinačnim smolama. Kombinovanjem različitih tehnologija, hibridni lepkovi pružaju prednosti koje se ne mogu postići sa jednim tipom smole. Ovi lepkovi koriste prednosti oba tipa smola kako bi postigli odličnu ravnotežu između mehaničkih svojstava i otpornosti na različite uslove.

2.3.4 Priprema površine

Proces spajanja lepkom odvija se na nivou površina, pri čemu je pravilna priprema površina koje dolaze u kontakt sa lepkom ključna za formiranje čvrstih i dugotrajnih veza [7, 58]. Na nečistim površinama adhezija može biti otežana, veza se može ili neće u potpunosti formirati, što negativno utiče na čvrstoću spoja i upravo zbog toga, čistoća površine predstavlja ključno svojstvo [59, 2, 60]. Priprema površine definiše se kao jedna ili niz operacija koje uključuju čišćenje, uklanjanje rastresitog (labavog) materijala i fizičku i/ili hemijsku modifikaciju površine na koju se nanosi lepak pre lepljenja. Prilikom lepljenja lepak dolazi u kontakt sa površinama materijala koje se lepe, zbog čega površinski uslovi materijala značajno utiču na jačinu prionljivosti odnosno čvrstoću vezivanja [61, 62]. Površine metalnih materijala prekrivene su prirodnim oksidnim slojevima, ali usled različitih proizvodnih procesa (valjanje,

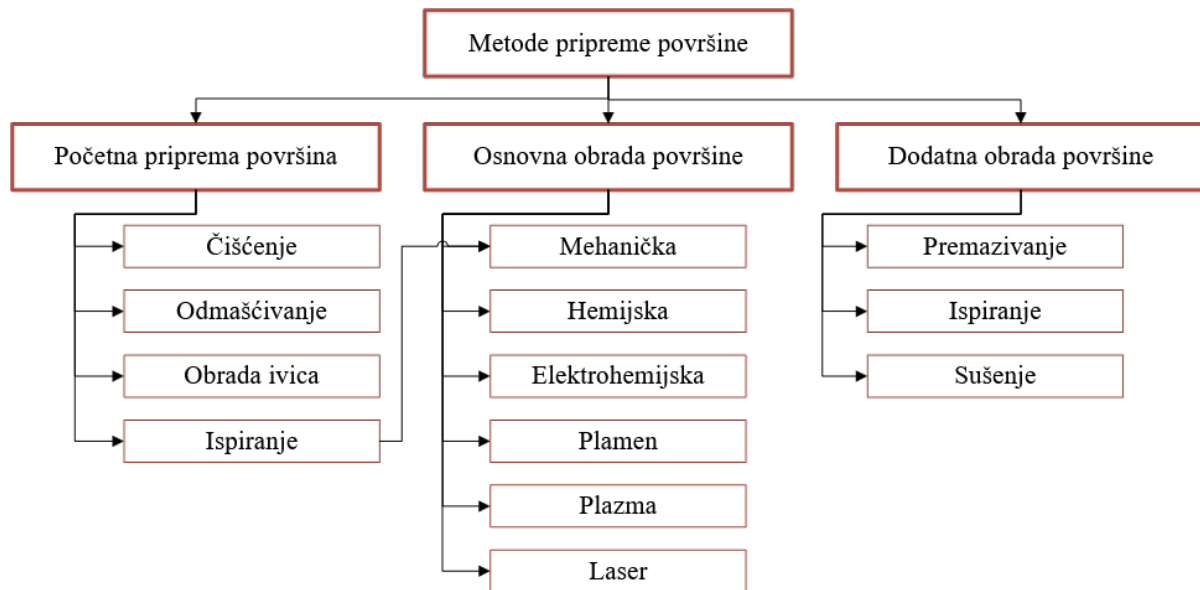
ekstruzija, sečenje, kao i termičkih uticaja poput zagrevanja i hlađenja vodom), kao i zbog prisustva organskih materija tokom pakovanja i skladištenja (ulje, masti, maziva, druge nečistoće), može doći do prekomernog rasta oksidnog sloja, pojave strukturnih defekata, promena i korozije. Sve to stvara neujednačene uslove na površini, formirajući zone koje negativno utiču na prionljivost lepka. Poželjno je da pre kontakta lepka sa podlogom površina materijala bude bez ovih strukturnih ili hemijski lomljivih područja, poznatijim kao "slabi slojevi" (*engl. Weak Boundary Layers- WBL*), u kojima lepak ne dolazi direktno u kontakt sa površinom adherenta i koje mogu predstavljati tačke inicijacije pucanja u procesu lepljenja [63]. Na slici 2.10 prikazani su tipični površinski slabi slojevi koji se mogu javiti na površinama metalnih materijala.



Slika 2.10 Tipični površinski slojevi na metalnoj podlozi [64]

Uklanjanje površinske kontaminacije i slabih slojeva sa površine metala i vraćanje metala u stanje samo sa prirodnim slojem oksida, predstavlja osnovne operacije za postizanje visoke čvrstoće zalepljenog spoja [61, 2]. Takođe, potrebno je razmotriti i kompatibilnost između lepka i sloja oksida. Zbog polimerne prirode lepka, njegova hemijska struktura varira u zavisnosti od vrste smole koja ga čini. Slično tome, sastav i hemijska svojstva sloja oksida variraju u zavisnosti od vrste osnovnog materijala, što dovodi do razlika u prionljivosti na osnovu kombinacije lepka i metalnog materijala [61]. Ovo ukazuje na to da, čak i kada su uslovi čišćenja materijala i površinski oblici identični, postoje razlike u prionljivosti zavisno od vrste metalnog materijala, konkretno, razlike u sloju oksida. Dodatno, stabilnost sloja oksida je ključni faktor koji utiče na jačinu prionljivosti. Iako je sloj oksida neposredno nakon tretmana čišćenja besprekorno čist, on lako adsorbuje organsku materiju i vlagu iz atmosfere, što dovodi do promena u njegovom površinskom stanju tokom vremena, uzrokujući varijacije u jačini prionljivosti. Stoga, kako bi se dosledno postigla željena čvrstoća spoja, neophodan je postupak površinske modifikacije koji će hemijski stabilizovati sloj oksida, čineći ga otpornim na promene temperature i vlažnosti.

Priprema površine predstavlja jednu od prvih tehnoloških faza procesa lepljenja i obuhvata niz operacija koje se razlikuju u pogledu tehnologije i njihovog broja i redosleda. Priprema površine pre lepljenja može se podeliti u tri osnovne grupe: metode preliminarne (početne) pripreme površine, osnovna obrada površine i dodatne metode obrade površine, čija primena zavisi od vrste podloge i lepka. Svaki metod karakteriše skup različitih svojstava i tehnoloških parametara, a podela metoda unutar svake od ovih grupa prikazana je na slici 2.11.



Slika 2.11 Metode priprema površina u tehnologiji lepljenja [65]

Preliminarna priprema površine uključuje odmaščivanje za koji se vrlo često koristi i termin čišćenje, a predstavlja efektivno jedini površinski metod koji se može primeniti na sve podloge [2, 7, 22]. Odmaščivanje često prethodi drugim metodama pripreme površine za lepljenje. Nakon čišćenja podloge, površina je slobodna od prljavštine, masti i ulja. Međutim, da bi se poboljšala adhezivna svojstva, površinu često treba dovesti u stanje koje omogućava dobro kvašenje lepkom. Ovo se može postići ili modifikovanjem postojeće površine ili stvaranjem nove površine koja je čvrsto vezana za osnovni materijal. Pojedini moderni lepkovi mogu da inkorporiraju prljavštinu i ulje sa nepripremljene metalne površine, omogućavajući dovoljnu vezu, ali ovakve veze je teže proceniti i ovde se očekuju veće varijacije u čvrstoći.

Osnovne metode pripreme površine primenjuju se s ciljem stvaranja grublje (hrapavije) površine, čime se povećava fizičko-hemijska aktivnost površine, što dovodi do jačanja adhezionih veza između lepka i adherenata [66, 67, 10]. Osim mehaničkih, hemijskih i elektrohemijskih tretmana, koji čine osnovne metode površinske pripreme, postoji grupa specijalnih metoda koja uključuje: tretman koronskim pražnjenjem, tretman plazmom, laserski

tretman, tretman plamenom, metode zasnovane na elektromagnetnom zračenju, tretman oksidacije ozonom i druge. Dodatni tretmani kao što su premazivanje, ispiranje ili sušenje obezbeđuju da se tehnološki proces pripreme površine pravilno izvede, a da dobijena površina ispoljava svojstva koja doprinose konačnoj čvrstoći zalepljenih spojeva.

Mehanička priprema površine je najstarija i najčešće korišćena tehnika za poboljšanje performansi zalepljenih metalnih spojeva [2, 22]. Osnovni razlog za primenu mehaničke pripreme je čišćenje površine i modifikacija geometrijske strukture površine [10, 68]. Modifikacijom geometrijske strukture površine povećava se kontaktna površina i poboljšava prodor lepka u strukturu spojenih površina. Oblik spoljašnjeg sloja podloge je jedna od karakteristika koja se odnosi na stepen završne obrade površine (tj. teksture površine) [10, 22]. Mehaničkom pripremom mogu se ukloniti preostali oksidi sa površine podloge nakon odmašćivanja, kao i sve nečistoće koje smanjuju čvrstoću zalepljenog spoja. Takođe, pomaže u uklanjanju debelih korozivnih slojeva sa podloge i omogućava razvoj geometrijske strukture kroz oblikovanje po želji. Mehanička priprema treba da bude praćena obradom odmašćivanja kako bi se dodatno osiguralo odstranjivanje labavih čestica sa površine podloge. Ukoliko se lepljenje obavlja prilično brzo nakon mehaničkog čišćenja, površina se može smatrati čistom.

O pripremi površine metalnih materijala raspravljali su J. Wasserbauer, J. Pikner [69] i M. Islam i dr. [70] u svojim radovima. Ukazali su na to da lepljenje sa pravilnom pripremom površine predstavlja dobar metod spajanja površina zbog visoke čvrstoće veze u uslovima smicanja. A. Safari i dr. u radu [71] daju rezultate istraživanja uticaja različitih priprema površine: brušenje brusnim papirom sa sedam različitih granulacija, peskarenje i sačmarenje (*engl. shot-blasting*) na čvrstoću aluminijumske legure 2024-T3. Došli su do zaključka da se čvrstoća jednostrukog preklopnog spoja stalno povećava sa povećanjem hrapavosti površine uzoraka, a da merenje hrapavosti površine predstavlja efikasan faktor u kontroli kvaliteta projektovanja i izrade zalepljenih spojeva. U radu [72] K. Łiczkovske i dr. najniža svojstva lepljenja postignuta su kod uzoraka koji su pre lepljenja samo odmašćeni izopropil alkoholom, bez ikakvih dodatnih priprema površine. Brušenjem brusnim papirom povećala se kontaktna površina i poboljšala su se svojstva spoja, što je dovelo do zaključka da formiranjem većih udubljenja, hrapavije površine i širenjem površinskog sloja može se uticati na povećanje čvrstoće na smicanje, kao i na žilavost loma zalepljenog spoja. Često se primećuje da hrapavljenje površina pre lepljenja poboljšava čvrstoću zalepljenih spojeva, te mnogi proizvođači specifikuju upotrebu neke vrste brušenja kao metod pripreme površine. Ova preporuka se zasniva na percepciji da abrazivni proces uklanja labave kontaminirane slojeve, a hrapava površina pruža određeni stepen mehaničkog povezivanja sa lepkovima.

Priprema površine mora biti prilagođena materijalu koji se lepi i može se razlikovati za različite metale ili kompozite. Kao metal, aluminijum ima visoku površinsku energiju od 1200 mJ/m² i stoga je vrlo pogodan za lepljenje, ali treba uzeti u obzir njegovu sklonost ka oksidaciji u vazduhu [13]. Ovaj prirodni proces pasivacije, u kojem se na površini formira sloj oksida debljine do 50 nm usled atmosferskog kiseonika, dovodi do dobrih svojstava aluminijuma u pogledu otpornosti na koroziju [73]. Tako da se na površini ne nalazi čist aluminijum već oksidni proizvodi poput aluminijum-oksida, njegovi hidroksidi i karbonati. Ovi slojevi su morfološki kompleksni i nemaju uvek pozitivan uticaj na kvalitet spoja zbog njihove krhkosti i poroznosti, što je od posebne važnosti kada se traže veoma trajni zalepljeni spojevi. Prema istraživanju A. Dillarda [74], legure aluminijuma se tradicionalno smatraju „teškim za spajanje“. Dok W. Brockmann [75] zaključuje da do danas nije bilo moguće stvoriti trajne zalepljene spojeve sa aluminijumskim legurama korišćenjem strukturnih lepкова, ako se pre lepljenja ne izvrši odgovarajuća priprema površine. Ukazujući na važnost identifikovanja uslova površine i metoda pripreme površine koji omogućavaju dobru trajnost zalepljenog spoja. Pripremu površine podloga od aluminijumskih legura istraživali su J. M. Arenas i dr. [76], koji su korišćenjem različitih metoda pripreme površine utvrdili da brušenje legura aluminijuma ima značajnu ulogu u pripremi površine i pogodno je za vezivanje struktura. Autor J. Klingen [13] je u svojoj knjizi predvideo korake u pripremi površine koje će biti pogodne za mnoge primene u industriji i zanatstvu, pri čemu navodi da mehanička obrada površine brušenjem (granulacija P 120 do P 600), četkama ili peskarenjem, rezultira svežim i hemijski aktivnim slojem sa većom efikasnom površinom. Međutim, povećanje hrapavosti doprinosi poboljšanoj adheziji samo do određene granice, na šta je ukazao i J. Liu i dr. [77] u svom istraživanju, gde je upotrebom šmirgle različitih granulacija pokazao da čvrstoća spoja raste sa povećanjem hrapavosti do određene granice, nakon čega dolazi do opadanja čvrstoće usled pojave površinskih defekata i otežane infiltracije lepka, zbog čega je važno pažljivo optimizovati uslove pripreme površine.

U radu [78] D. Mamalis i dr. daju istraživanje uticaja nekoliko metoda fizičkih i hemijskih tretmana na površinsku morfologiju aluminijumskih legura i na adhezionu čvrstoću na interfejsu između dva adherenta, tj. kompozita i metala. Fizički i hemijski tretmani primenjeni na površini aluminijumske legure promenili su morfologiju površine i površinsku energiju u različitim stepenima, što je, zauzvrat, uspešno poboljšalo međupovršinsku vezu između adherenata. S obzirom da je hemijsko tretiranje površine skupo i stvara toksični otpad, mehaničko brušenje predstavlja vrlo dobru prvu alternativu koju treba razmotriti.

Da Silva i dr. [79] proučavali su uticaj makroskopskog stanja površine podloge na čvrstoću zalepljenih spojeva. Napravljeno je nekoliko tekstura na površini aluminijumskih podloga sa različitim orijentacijama i upoređene su sa uzorcima bez tekstura. Utvrđeno je da teksture mogu povećati čvrstoću spoja u poređenju sa zalepljenim spojem bez pripreme. A. J. Kinloch [15] podržava mehaničke tehnike pripreme površina i naglašava neophodnost odmaščivanja površine pre lepljenja.

U poređenju sa aluminijumom, relativno manje istraživanja je sprovedeno o optimalnim tretmanima površina čelika u pripremi za lepljenje. Čelične legure se obično koriste tamo gde se očekuju visoke temperature i drugi zahtevi za čvrstoću. Kao rezultat toga, problematična područja poput korozije, termičke degradacije lepкова i prajmera, kao i uticaj vlage, postaju važna [80]. U procesu lepljenja, priprema površine čelika je od presudnog značaja i često zahteva strože zahteve u poređenju sa većinom drugih metala.

S obzirom da nerđajući čelici sadrže najmanje 10,5% hroma, otporni su na brojne agresivne medije i ne zahtevaju dodatnu zaštitu površine. Dobra otpornost na koroziju nerđajućih čelika zasniva se na formiranju pasivnog sloja hrom-oksida debljine svega nekoliko nanometara na površini materijala. U slučaju mehaničkog oštećenja, ovaj zaštitni sloj se veoma brzo obnavlja na površini nerđajućeg čelika zahvaljujući izuzetnoj migraciji hroma. Ova pasivna površina nerđajućih čelika karakteriše se vrlo niskom reaktivnošću sa okolinom, što dovodi do njihove izuzetne otpornosti na koroziju. Međutim, ova osobina predstavlja izazov za lepljenje ovih materijala jer značajno ograničava formiranje intermolekulskih veza, koje su potrebne za dobra adhezivna svojstva. Pošto se nerđajući čelici uglavnom koriste za komponente koje moraju biti otporne na dugoročne uslove, odgovarajući zalepljeni spojevi takođe moraju biti projektovani za dugoročnu stabilnost. Za ovu svrhu sprovedene su opsežne studije hemijskih i elektrohemijskih tretmana površine, neke od njih su poput A. Dillard-a [74] koji tvrdi da različite hemijske i elektrohemijske metode povećavaju adheziju nerđajućeg čelika. Ove metode se koriste samo u vrlo ograničenoj meri zbog njihove složenosti, kao i aspekata zaštite životne sredine i bezbednosti na radu. Takođe, za veliki broj primena lepljenja sa nerđajućim čelikom nije neophodno koristiti hemijske i elektrohemijske metode. U većini slučajeva mehanička obrada brušenjem ili peskarenjem u kombinaciji sa prethodnim i naknadnim čišćenjem površine daje vrlo dobra svojstva spoja.

A. Harris i A. Beevers u radu [81] istraživali su efekte peskarenja na površinske karakteristike mekog čelika i legure aluminijuma. U radu [82] G. Rotella i dr. vrše istraživanja pripreme površine za lepljenje na dvofaznim čelicima visoke čvrstoće koji se koriste u automobilske industriji u lakim vozilima. Pripremljene uzorke od dvofaznog čelika lepili su

epoksidnim lepkom. Vršena su statička ispitivanja preklopnog spoja (single-lap) i vršen je T-peel test, uz evaluaciju različitih strategija pripreme površine. Konkretno, spojne površine su prethodno tretirane pulsirajućim laserskim zračenjem pomoću fiber lasera, a rezultati su upoređeni sa uzorcima kod kojih je priprema vršena odmašćivanjem i peskarenjem.

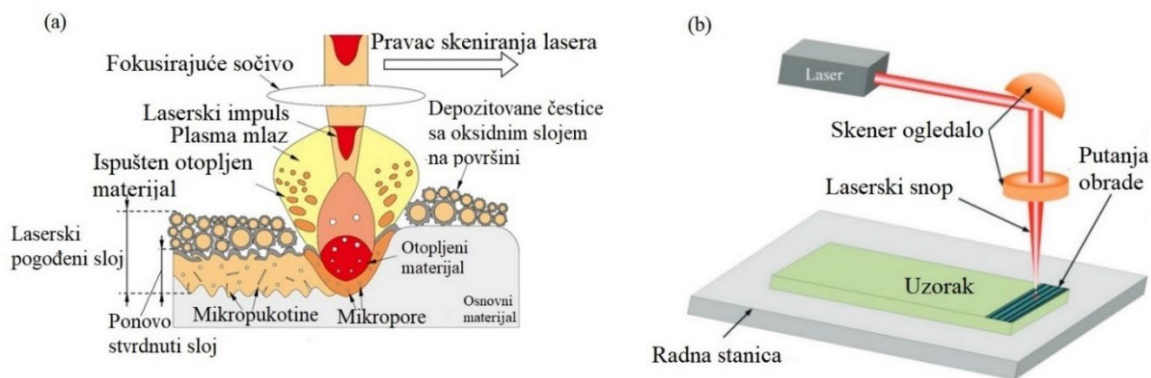
Prema W. Brockmann-u [75], metoda nagrizanja kiselinom se ne preporučuju za različite tipove čelika, ali se metode mehaničkog uklanjanja, kao što su ručno brušenje ili peskarenje, generalno koriste za postizanje dobrih rezultata adhezije. Ručno brušenje je izuzetno jeftino, zahteva manje vremena i troškova od ostalih priprema površine i ne uključuje neke od rizika povezanih sa komprimovanim gasom, strujom ili mašinama [83]. Iako postoje različite vrste brusnih papira za ručno brušenje, najčešće korišćeni u proizvodnji su brusni papir različitih granulacija i Scotch-Brite abrazivni jastučići. Scotch-Brite je ručni abraziv izrađen od sintetičkih vlakana impregniranih abrazivnim zrnima, namenjen za finu obradu i čišćenje površina. Prilikom brušenja ostavlja sitne rezove i manje tragove, ali i stvara manje prašine i prljavštine za razliku od brusnog papira. Efekat pripreme površine sa Scotch-Brite-om je retko proučavan u prošlosti [84, 85].

Laserski tretman, kao moderan, siguran i ekološki prihvatljiv metod za čišćenje i modifikaciju površina koje se lepe, sve više nalazi primenu u tehnologiji lepljenja. Laserski metod pripreme površina predstavlja brzu i jednostavnu alternativu konvencionalnim metodama čišćenja, pri čemu omogućava čišćenje površina i uklanjanje slojeva određene debljine u tačno definisanim oblastima. Moguće je ukloniti problematične organske ili neorganske supstance (farbe, masti, ulja, rđu, čestice, lepkove i slojeve oksida) sa površine svih uobičajenih materijala, uključujući metale poput aluminijuma, magnezijuma, nerđajućeg čelika itd. U toku laserskog tretmana vrlo tanak sloj osnovnog materijala se izlaže toploti, tako da je povećanje temperature podloge umereno.

Kod laserskog tretmana, fokusiran i snažan laserski zrak prelazi preko materijala koji se čisti, a energija zračenja laserskog zraka odmah se pretvara u toplotnu energiju [13]. Rezultujući nagli porast temperature dovodi do isparavanja sloja prljavštine, a čestice koje ne mogu ispariti se mehanički odbacuju (uklanjaju) sa površine usled čišćenja plazma udarnim talasom (*engl. Plasma Shock Wave*). Korišćenjem laserske metode moguće je promeniti strukturu i hrapavost metalnih površina, poput aluminijuma i čelika. Na primer, veoma brzo topljenje gornjeg sloja od 1-5 μm debljine aluminijumskih površina, nakon čega sledi naglo hlađenje, može proizvesti strukturu površine u obliku sunderastih, amorfno-mikrokristalnih površinskih slojeva (struktura) sa vrlo dobrom mehaničkom čvrstoćom. Zbog svoje porozne prirode, ova površina je sposobna da apsorbuje i učvrsti lepkove, posebno nisko-viskozne, što

rezultira odličnim adhezivnim svojstvima nakon očvršćavanja. Takvi zalepljeni aluminijumski kompoziti, pripremljeni posebno sa epoksidnim lepkovima, pokazuju značajno poboljšanje u otpornosti na starenje trajnih spojeva.

Nedavno je lasersko graviranje površine postalo konkurentna metoda za generisanje strukturiranih tekstura kako bi se poboljšao rad zalepljenih spojeva. U poređenju sa drugim metodama, lasersko graviranje površine je široko korišćeno od strane istraživača. Princip laserske ablacije zasniva se na topljenju, isparavanju i stvrdnjavanju metalnog materijala [86, 87], što je važan aspekt za proučavanje uticaja laserske ablacije na lepljenje. U procesu laserske ablacije, kao što je prikazano na slici 2.12 (a), laserski snop prelazi sa izvora emisije na površinu metalnog materijala, gde energija laserskih impulsa biva apsorbovana od strane metalnog materijala. Metalni materijal se topi i zagreva do temperature isparavanja, pri čemu ispareni materijal formira plazma mlaz na prednjoj ivici širine laserskog pulsa, a ova plazma se održava tokom celog pulsa. Kako je trajanje formiranja plazma mlaza veoma kratko, plazma mlaz stvara visok unutrašnji pritisak, takozvani reakcioni (povratni) pritisak (*engl. recoil pressure*) [86, 88, 89], koji deluje na rastopljeni materijal i može doprineti izbacivanju metalnog materijala daleko od centra laserskog snopa. Izbačeni rastopljeni materijal pada nazad na površinu materijala i formira sloj ponovo stvrdnutog otpadnog materijala [86, 90]. Ostatak rastopljenog metalnog materijala se sakuplja u krateru koji je formiran laserskim impulsom i ne može biti izbačen povratnim pritiskom. Naravno, neki ispareni metalni materijal može da izađe iz unutrašnjosti rastopljenog metalnog materijala, a mogu nastati i manje prsline kada se rastopljeni materijal stvrdne. Zbog toplotne difuzije i toplotne provodljivosti, formira se zona pogođena toplotom oko rastopljenog metala, koja se razlikuje u organizaciji i sastavu u odnosu na osnovni materijal. Dubina zone pogođene toplotom zavisi od primenjenog laserskog fluensa.



Slika 2.12 (a) Fenomeni interakcije tokom laserske obrade i (b) postavka nanosekundnog lasera [86]

Slika 2.12 (b) predstavlja ilustraciju procesa laserskog graviranja. Mesto laserskog snopa skenira površinu materijala radnog komada na specifičan, unapred definisan način, a laserski impuls se periodično generiše, uzrokujući ablaciju i uklanjanje ciljnog materijala. Proizvedena površinska tekstura zavisi od parametara laserske obrade (talasne dužine, energije pulsa, širine pulsa, frekvencije ponavljanja F , prosečna snage P , brzine skeniranja V , veličine mesta snopa, procesne okoline, prostorne distribucija snopa, itd.), svojstava radnog komada i načina na koji oni međusobno interaguju [91, 92, 93]. Svojstva radnog komada zavise od materijala i geometrije, a najvažnija svojstva su gustina, temperature topljenja-isparavanja, specifični toplotni kapacitet, toplotna provodljivost, latentna toplota topljenja-isparevanja i apsorpcija-reflektivnost u čvrstom-rastopljenom stanju [92, 94].

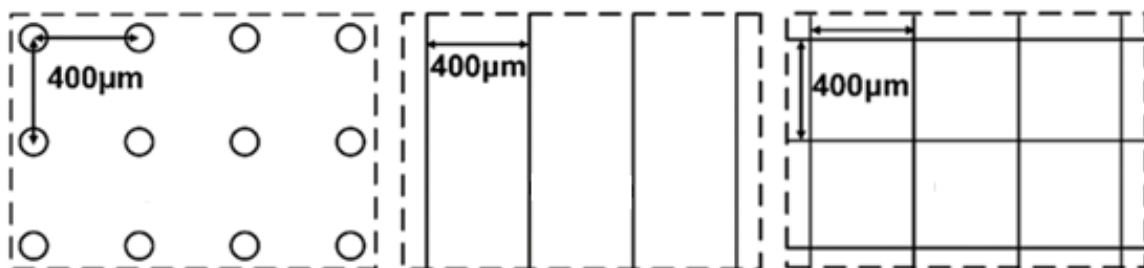
Laserska obrada može se klasifikovati u različite vrste. Obično se kategorizuje u četiri grupe prema trajanju pulsa laserskog snopa: milisekundni (ms), nanosekundni (ns), pikosekundni (ps) i femtosekundni (fs). Mikro- i nanosekundni laseri su jeftiniji i efikasniji od pikosekundnih i femtosekundnih lasera. Oni su najčešće korišćeni laseri za graviranje površina u cilju poboljšanja čvrstoće zalepljenih spojeva. Oni mogu stvoriti mikro-strukturirane teksture i slučajne nanoteksture. Optimalan izbor parametara lasera i tekstura može poboljšati performanse zalepljenog spoja zbog poboljšanog kvašenja, povećane kontaktne površine i poboljšanog mehaničkog povezivanja između površine podloge i lepka.

Mnoge nedavne naučne studije su se fokusirale na razumevanje ponašanja zalepljenih spojeva nakon upotrebe lasera na metalnim materijalima. G. Rotella i dr. u radu [95] istraživali su efekat laserske ablacije na čelične spojeve i pokazali da laserska ablacija ne samo da je poboljšala ukupno mehaničko ponašanje zalepljenog spoja pod statičkim opterećenjem, već je i održala čvrstoću spoja nakon izlaganja agresivnim uslovima okoline. Lasersku ablaciju su koristili J. Luo i R. Rechner za određivanje čvrstoće aluminijumskih spojeva. U radu J. Luo i dr. [96] koristio je lasersku ablaciju za graviranje i kreiranje odgovarajućih površinskih formi, što je značajno poboljšalo performanse vezivanja i povećalo otpornost na smicanje za 28,15% u poređenju sa originalnim uzorcima. R. Rechner i dr. [97] demonstrirao je poboljšanu snagu i izdržljivost veze nakon laserske ablacije i pokazao kako je laserski tretman poboljšao čišćenje površine uz promenu oksidnog sloja. U radu [98] M. Alfano-a i dr. korišćena je laserska ablacija pulsnog iterbijumskog fiber lasera (*engl. a pulsed ytterbium fiber laser*) male snage na podlogama od aluminijuma i nerđajućeg čelika. Laserska obrada na metalnim podlogama poboljšala je čvrstoću spoja za 100% za spojeve legure aluminijum/epoksi lepak i za 25% za kombinacije nerđajući čelik/epoksi lepak, u poređenju sa pripremljenim podlogama koje su samo odmašćene. Metod laserskog čišćenja pri različitim odnosima snage i frekvencijama

impulsa istraživao je C. Mandolino i dr. u radu [99] pri čemu su postignute najveće vrednosti, do duplo veće u poređenju sa referentnim. J. Watts i dr. u radu [100] za tretman PEEK površina koristio je nanosekundni pulsni Nd:YAG laser, pri čemu je čvrstoća zalepljenih spojeva značajno poboljšana, čak do 13 puta u odnosu na neobrađenu PEEK površinu. Prednost laserskog čišćenja je kombinacija povećane površine kontakta, mehaničkog povezivanja i promene u hemiji površine. Tačnije, laserska priprema površine pomaže da se istovremeno poboljšaju sva ova svojstva.

Istraživanja na temu laserskog graviranja i površinskih tekstura išla su u dva pravca: prvi se ticao pregleda dosadašnje literature na temu već primenjenih tekstura koje su pokazale najbolje rezultate čvrstoće spoja, a drugi se ticao dubine graviranja. Ova dva pravca su jako povezana i imaju uticaja jedan na drugi. Površinska tekstura može značajno uticati na statičku čvrstoću zalepljenih spojeva, pri čemu forma odgovarajuće teksture omogućava postizanje najviše čvrstoće spoja. Većina istraživanja proučavala je korelaciju između različitih parametara lasera (talasna dužina, intenzitet, brzina skeniranja ...) i čvrstoće veze [101, 102, 103, 104], dok je mnogo manje publikacija pokušalo da pronađe korelaciju između drugih parametara (kao što su hrapavost, sposobnost kvašenja merenjem kontaktnog ugla, hemijski sastav površine, mod otkaza itd.) i čvrstoće spoja [105, 106, 107].

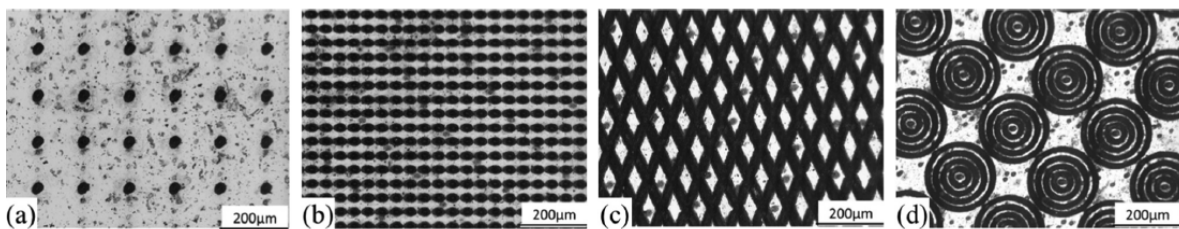
Z. Feng i dr. u svom radu [105] ukazuju na uticaj laserskog graviranja tri različite površinske teksture: udubljenja (*engl. dimple*), žlebove (*engl. groove*) i rešetke (*engl. grid*), pomoću nanosekundnog fiber lasera na podlozi od čelika 30CrMnSiA. Razmak između udubljenja (dimple-dimple) i razmak između žlebova (groove-groove) bio je $400\ \mu\text{m}$, prečnik udubljenja je bio $90\ \mu\text{m}$, a dubina oko $13\ \mu\text{m}$. Svaki žleb je imao širinu od $100\ \mu\text{m}$ i dubinu od približno $25\ \mu\text{m}$ (slika 2.13). U radu su sagledani uticaji na morfologiju površine, hrapavost površine (R_a i R_z) i kvašenje.



Slika 2.13 Tri različite površinske teksture korišćene u radu [105]: udubljenja, žlebovi i rešetke

Podloga sa rešetkastim uzorkom ukazuje na poboljšanja u velikoj meri, Ra je porastao za 400%, a Rz je čak 13 puta veći nego kod uzoraka koji nisu obrađeni ($Ra= 0,3 \mu\text{m}$, $Rz= 0,8 \mu\text{m}$), dok je kontaktni ugao smanjen sa 65° na 24° . Za uzorke sa teksturom udubljenja sila smicanja zalepljenih spojeva nije značajno poboljšana, dok je za uzorke sa žlebovima i rešetkastim teksturama čvrstoća iznosila 14,6 MPa i 23,3 MPa, što je povećanje od 219% i 348% u poređenju sa uzorcima koji nisu obrađeni. Što se tiče moda otkaza, za uzorke sa udubljenjima i žlebovima bio je adhezioni lom, dok je za spojeve sa rešetkastim uzorkom postignut kohezioni lom.

U radu J.I. Ahuir-Torres-a i dr. [107] generisana su tri tipa teksture: udubljenja sa 5% i 50% gustom površine (procenat gravirane površine), teksture sa ukrštenim žlebovima (*engl. cross groove*) sa gustom površine od 64% (sa uglom ukrštanja od 45°) i teksture sa koncentričnim prstenovima (*engl. concentric ring*) sa gustom površine od 70% (slika 2.14). Svako udubljenje ima prečnik od $37 \pm 2 \mu\text{m}$ i dubinu od $4,0 \pm 0,4 \mu\text{m}$. U slučaju žlebova, širina je $43,0 \pm 2,0 \mu\text{m}$, a dubina $4,5 \pm 0,4 \mu\text{m}$. Koncentrični prstenovi (koji se sastoje od centralnog udubljenja plus četiri kružna okružujuća žleba) pokazuju iste dimenzije kao i gore navedene teksture za udubljenja i žlebove.

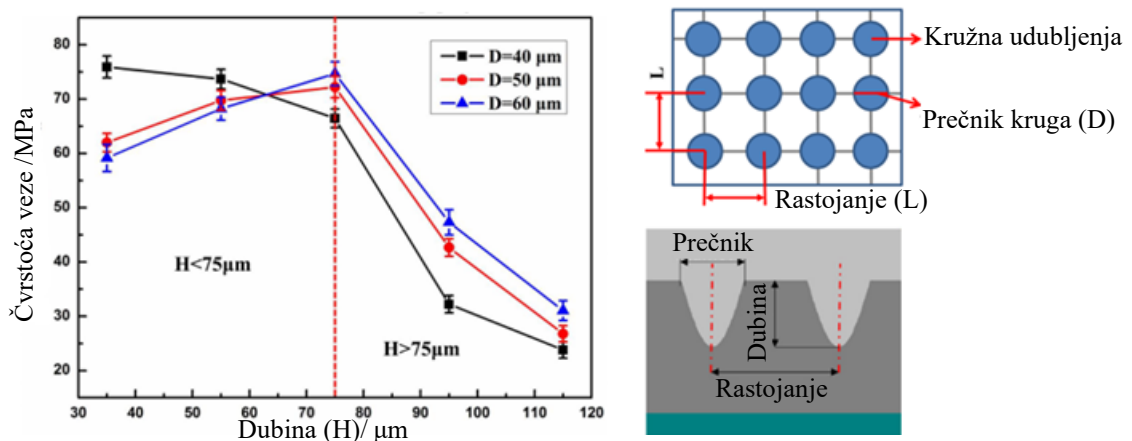


Slika 2.14 Prikaz tekstura u radu [107]:(a) udubljenja sa 5% gustom površine, (b) udubljenja sa 50% gustom površine, (c) teksture sa ukrštenim žlebovima sa gustom površine od 64% i (d) teksture sa koncentričnim prstenovima sa gustom površine od 70%

Autori su ukazali na to da su četiri tipa tekstura povećale površinsku hrapavost i kontaktni ugao. Objasnili su promenu površinskog kvašenja u hidrofobnu nakon primene tekstura sa ukrštenim žlebovima i koncentričnim prstenovima stvaranjem hijerarhijske teksture na površini. U kontekstu hidrofobnosti, hijerarhijske strukture mogu značajno smanjiti površinsku energiju, što dovodi do povećanja kontaktnog ugla i smanjenja prijanjanja tečnosti, stvarajući tako površinu koja je manje sklona upijanju tečnosti.

Kada razmatramo dubinu teksture, jako je značajno istraživanje Na Tan-a i dr. [108] u kome je prikazan uticaj podešavanja parametara obrade kojim su dobijene površine sa različitim prečnikom i dubinom udubljenja (rupe) i istovremeno istražen je njihov uticaj na

ponašanje vezivanja podloga od čelika ASTM1045. Proučavane su dubine udubljenja (H) od 35, 55, 75, 95 i 115 μm i prečnici (D) od 40, 50 i 60 μm . Za slučaj kada je dubina graviranja iznosila 35 μm , čvrstoća veze sa prečnikom teksture od 40, 50 i 60 μm bila je jednaka 76, 63 i 59 MPa, respektivno (slika 2.15). Za dubina teksture nižu od 75 μm , čvrstoća vezivanja se povećavala sa dubinom, sa jednim izuzetkom udubljenja prečnika 40 μm . Za slučaj kada su dubine graviranja veće od 75 μm primećen je pad čvrstoće sa povećanjem dubine. Ovo je posebno bilo uočljivo kada je dubina graviranja bila jednaka 115 μm , pri čemu je čvrstoća veze bila izuzetno niska od 22, 26 i 32 MPa, respektivno za prečnike teksture od 40, 50 i 60 μm . Analiza pokazuje da je zapremina vazduha u udubljenjima određena njihovim prečnikom i dubinom, koji su ključni parametri koji definišu kvalitet popunjavanja, kao i čvrstoću veze. Kako se dubina povećava, čvrstoća veze zavisi od ravnoteže između zaostalog napona uzrokovanog prisustvom vazduha i oslobađanja napona usled poboljšanja odnosa kontaktnih površina.



Slika 2.15 Zavisnost čvrstoće zalepljenog spoja od prečnika i dubine udubljenja nakon laserskog graviranja [108]

Na osnovu svega prethodnog, kada je u pitanju statičko ispitivanje čvrstoće zalepljenih spojeva laserski gravirane teksture kao što su udubljenja, linearni žlebovi i ukršteni žlebovi su najčešće korišćene površinske teksture u aplikacijama za lepljenje. Pri čemu se za teksturu sa udubljenjima, preporučuje veća gustina udubljenja sa visokim aspektnim odnosom prečnik/dubina (pliča dubina za veći prečnik) kako bi se poboljšala statička čvrstoća zalepljenih spojeva. Za teksturu sa linearnim žlebovima veliki uticaj na performanse zalepljenog spoja imaju odnos dubina/širina, razmak i ugao orijentacije. Povećanjem odnosa dubina/širina, smanjenjem razmaka i orijentacijom koja je normalna na pravac opterećenja može se poboljšati čvrstoća spoja. Tekstura sa ukrštenim žlebovima pokazala je veće poboljšanje u statičkoj čvrstoći zalepljenih spojeva u poređenju sa teksturama sa udubljenjima i linearnim žlebovima.

Povećanje odnosa dubina/širina i smanjenje razmaka između linija poboljšavaju čvrstoću zalepljenog spoja. Pritom, istraživanja ukazuju i na to da previše mali razmak između linija može oslabiti površinu.

Zaključno, ove površinske teksture mogu poboljšati čvrstoću spoja pronalaženjem optimalne korelacije između parametara teksture, svojstava lepka (viskoznost i krutost) i tipa opterećenja. U skladu sa prethodnim studijama [86, 105, 107, 108, 106] o laserskom graviranju i teksturama u ovoj doktorskoj disertaciji razvijene su četiri teksture u dve različite dubine kako bi se utvrdili efekti koji utiču na čvrstoću zalepljenog spoja. Prema Maressa i dr. [109], ovi efekti uključuju povećanje kontaktne površine, ostvarivanje mehaničkog međusobnog povezivanja uvođenjem mikro-rupa, koje mogu da zadrže lepak i ostvarivanje podrezivanja koje može da smanji rizik od loma lepka blokiranjem kretanja lepka u pravcu upravnom na površinu materijala.

Za posmatranje topografije površine nakon laserske ablacije pored SEM-a često se koristi i površinska hrapavost za statističko i kvantitativno karakterisanje promena u morfologiji površine. Laserska ablacija može značajno poboljšati površinsku hrapavost, a hrapavost površine se menja u zavisnosti od parametara laserske ablacije, na šta je ukazano u radu G. Rotella i dr. [110]. Utvrđeno je da se površinska hrapavost nakon laserske ablacije titanijumske legure povećala sa 107 nm na 294 nm nakon laserske ablacije. Generalno, površinska hrapavost nakon laserske ablacije metalnog materijala raste zbog stvaranja grublje morfologije površine što se može potvrditi i istraživanjem M. Galantucci-ja i dr. [111] koji su koristili laserski tretman na metalu i kompozitu kako bi poboljšali čvrstoću spojeva. U eksperimentima su primenili laserski snop velikog prečnika kako bi modifikovali hrapavost površine. Rezultati ukazuju na smanjenje kontaktnog ugla, što dovodi do bolje adhezije. Na uzorcima od aluminijuma postignuto je povećanje čvrstoće spoja za čak 70% u poređenju sa netretiranim uzorcima.

Pri idealnim uslovima pripreme površine, ugao kontakta treba da bude što bliži nuli kako bi se obezbedila optimalna adhezija. Postoji širok spektar metoda za pripremu površine koji se mogu primeniti u procesima lepljenja, koji mogu dovesti do toga da kvalitet površine varira, pri čemu nastaju različite morfologije i stanja površine. Ipak, krajnji cilj svake pripreme površine treba da bude povećanje čvrstoće i dugovečnosti spoja, što se postiže poboljšanjem prijanjanja između podloge i lepka. Bez obzira na odabrani postupak, ovaj cilj bi trebalo da bude prioritet. Dakle, pripremu površine podloga treba smatrati jednim od najkritičnijih koraka prilikom lepljenja, a izbor odgovarajuće pripreme za ostvarivanje dobrih i optimalnih rezultata čvrstoće zalepljenog spoja dobijaju se isključivo opsežnim eksperimentalnim ispitivanjem.

2.3.5 Karakterizacija površine

Performanse zalepljenog spoja direktno zavise od uspešne primene odabrane pripreme, a ključni deo za unapređenje kvaliteta postojećeg procesa ili razvoja novog postupka pripreme je procena karakteristika površine materijala, kako u pogledu topografije, tako i u pogledu hemijskog sastava. Ovo može obuhvatati sve, od jednostavnog osiguranja da je podloga čista, preko procene kvaliteta pripreme koja može biti povezana sa performansama, pa sve do analize površina nakon otkaza. Metode koje se obično koriste u proceni karakteristika površina metalnih podloga pre lepljenja su: ispitivanje topografije površine pomoću profilometrije sa iglom, elektronska mikroskopija i skenirajuća sonda mikroskopije, procena kvašenja i širenja tečnosti na čvrstim površinama, kao i hemijska analiza površine pomoću fotoelektronske spektroskopije X-zraka (*engl. X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS*), Auger elektronske spektroskopije (*engl. Auger Electron Spectroscopy, AES*) i masenu spektrometriju sekundarnih jona (*engl. Secondary Ion Mass Spectrometry, ToF-SIMS*). Raznolikost metoda koje se mogu koristiti je široka, a izbor metode ispitivanja zavisi od mnogih faktora, među kojima su ispitna sredina (okolina), finansijska ograničenja i cilj analize. Procenom svojstava podloge za lepljenje omogućava se kvantitativno poređenje ključnih karakteristika površine i uspostavljanje veze između promena izazvanih, na primer, pripremom površine i performansama zalepljenog spoja.

Strukture materijala koje se koriste u industriji su često složene, sa više faza ili aditiva koji omogućavaju postizanje specifičnih svojstava [112]. Kao rezultat toga, industrijski materijali mogu imati različite vrste interfejsa, što čini primenu konvencionalnih tehnika za njihovu karakterizaciju izazovnom. Zbog toga postoji potreba za tehnikom koja može analizirati površinske osobine materijala bez potrebe za specijalnim pripremanama uzoraka. Elektronska mikroskopija, sa svojom visokom prostornom rezolucijom, predstavlja vredan alat za proučavanje malih struktura, a nedavni napretci su omogućili posmatranje i analizu osobina malih materijala sa atomskom rezolucijom.

2.3.5.1 Topografija površine

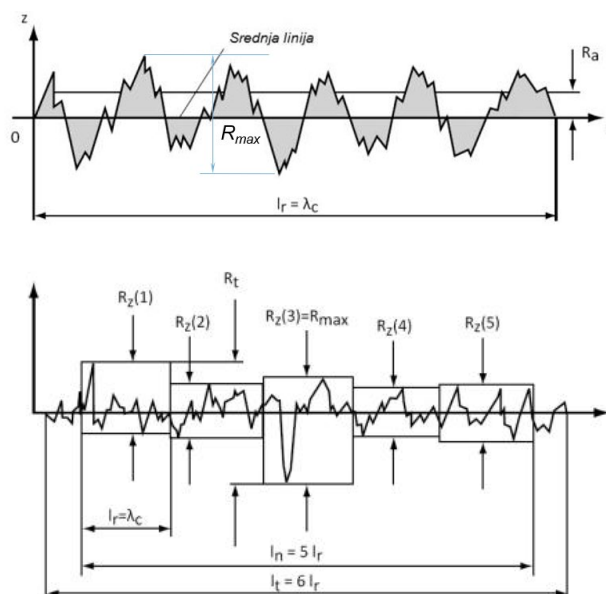
Topografija površine je jedan od najvažnijih površinskih karakteristika metalnih podloga, a uobičajeni način ispitivanja je korišćenje skenirajućeg elektronskog mikroskopa (*engl. Scanning Electron Microscopy, SEM*) za dobijanje slike površine materijala pod velikim uvećanjem [22]. Optički mikroskop nije dovoljno efikasan, ne samo zato što mu nedostaje uvećanje (rezolucija) koje pruža SEM, već i zbog lošeg fokusa i dubine polja. U optičkoj

mikroskopiji, detalji koji nisu u fokusu slike pojaviće se ili previše ili premalo fokusirani (tj. zamagljeni), dok SEM može da uredi vrlo velike dubine polja, a snimak koji se dobija skoro je trodimenzionalnog izgleda sa mogućnošću proučavanja strukture površine materijala [113].

U SEM-u, fokusirani elektronski snop skenira površinu uzorka liniju po liniju i formira signale na osnovu interakcija između snopa i uzorka [112]. Elektroni interaguju sa atomima uzorka, proizvodeći različite signale koji sadrže informacije o topografiji površine i sastavu uzorka. SEM snimanje koristi sekundarne elektrone (*engl. Secondary Electrons, SE*) i povratno rasutih elektrona (*engl. Backscattered Electrons, BSE*) emitovane sa površine uzorka. Opšti principi rada SEM-a se mogu pronaći u literaturi poput P. Goodhew- a [114], A. Bogner- a [115], D. Newbury [116] i ostali.

2.3.5.2 Profilometrija

Prilikom procene hrapavosti površine, poželjno je preći sa kvalitativnih slika dobijenih SEM-om na pristup koji omogućava kvantitativnu procenu hrapavosti površine, čime se omogućava preciznija analiza i bolje razumevanje karakteristika površine. To se može postići različitim tehnikama, uključujući skenirajuću tunelsku mikroskopiju (*engl. Scanning Tunneling Microscope, STM*) i mikroskopiju atomskih sila (*engl. Atomic Force Microscopy, AFM*), ali najjednostavnija metoda je korišćenje profilometrije. Ovo je standardni metrološki alat koji se široko koristi u inženjeringu za procenu površinskog profila (ili hrapavosti) obrađenog uzorka. Koncept je jednostavan, dijamantska igla se vuče po površini uzorka i beleži kratkorazmerna talasanja (hrapavost) i dugorazmerna talasanja (valovitost) površine u grafičkom obliku, bilo direktnim pomeranjem igle ili korišćenjem interferometrijskog pristupa. Interpretacija podataka o hrapavosti detaljno je obrađena u odgovarajućim standardima (BSI (1972), DIN (1990) i ISO (1997)), a najvažniji pojmovi i definisani parametri hrapavosti utvrđeni standardom SRPS EN ISO 4287 [117] su: srednje aritmetičko odstupanje profila od srednje linije (R_a), najveća visina neravnina (R_{max}) i srednja visina neravnina (R_z) (slika 2.16). Pojam R_z je srednja aritmetička vrednost pet segmenata profila u granicama referentne dužine L [118]. Referentna dužina L predstavlja podesnu odabranu dužinu odsečka profila, čije su vrednosti propisane standardom.



Slika 2.16 Srednje aritmetičko odstupanje neravnina R_a i srednja visina neravnina R_z [118]

Srednje aritmetičko odstupanje profila od srednje linije R_a definiše se kao srednja aritmetička vrednost odstojanja svih tačaka efektivnog profila od srednje linije na referentnoj dužini. Dok se srednja visina neravnina R_z dobija ukoliko se referentna dužina podeli na nekoliko segmenata, najčešće je to pet, i za svaki od segmenata se pronade najveća visina neravnina. Pojmovi R_a i R_z , koji su prikazani na slici 2.16 mogu se definisati na sledeći način:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (2.6)$$

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 R_z(i) \quad (2.7)$$

2.3.5.3 Hemijska analiza površine

Kategorije hemijske analize površine uključuju različite vrste SEM-a, fotoelektronsku spektroskopiju X-zraka (XPS), EDS, Auger elektronsku spektroskopiju (AES), masenu spektrometriju sekundarnih jona (razdvajanje jona po masi merenjem vremena leta- ToF-SIMS) i dr. [22]. Ove metode imaju različite primene u istraživanjima zalepljenih spojeva, ali najčešće se koriste za procenu površinskih svojstava, utvrđivanje ostatka kontaminacije, za analizu moda otkaza zalepljenih spojeva, proučavanje površina interfejsa u slučaju neuspeha, u cilju identifikovanja prisustva slabih slojeva ili drugih fenomena odgovornih za neuspeh, kao i ispitivanje hemije interfejsa odgovorne za prijanjanje. Mogućnost ispitivanja i utvrđivanja ovih slučajeva je jako bitna za analizu površine, jer svaka od njih može značajno uticati na krajnju čvrstoću zalepljenog spoja.

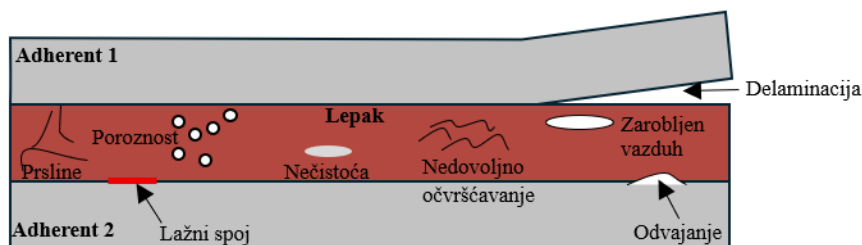
2.3.6 Montaža zalepljenih spojeva

Pravilna montaža zalepljenih spojeva zahteva visoku preciznost i tačnost prilikom poravnanja i fiksiranja podloga [10, 13]. Jedan od osnovnih tehnoloških zahteva u ovom procesu je da površine podloge koje se lepe budu u bliskom kontaktu, uz istovremeno izbegavanje prekomernih pritisaka koji mogu negativno uticati na kvalitet spoja. Fiksiranje i lepljenje adherenta imaju ključnu ulogu u osiguravanju kvaliteta i čvrstoće finalnog spoja. A precizno poravnanje i adekvatno lepljenje elemenata neophodni su kako bi se dobio spoj koji će zadovoljiti standarde čvrstoće i dugovečnosti. Pored toga, tačnost oblika i dimenzija podloga je podjednako važan faktor koji direktno utiče na mehaničke osobine spoja, a samim tim i na životni vek i pouzdanost u operativnim uslovima. Treba naglasiti da pravilno poravnanje podloga koje se lepe takođe podrazumeva i da debljina linije lepljenja bude ujednačena (konstantna) duž cele dužine spoja, osim u slučaju kada je drugačije specificirano u tehničkim zahtevima.

Očvršćavanje lepka je proces transformacije lepljivog materijala u jaku i nerastvorljivu lepljivu vezu. Lepak se stvrdne kao rezultat umrežavanja smole (ili monomera) u prisustvu očvršćivača, katalizatora ili na povišenoj temperaturi [7, 119]. Anaerobni lepkovi, koji su pretežno jednokomponentni lepkovi, očvršćavaju u odsustvu kiseonika, dok lepkovi na bazi rastvarača formiraju nepropusnu vezu kada rastvarač (tj. voda, alkohol ili organski rastvarač) ispari iz mase [10].

Pri očvršćavanju lepka potrebno je uzeti u obzir tehnološke parametre kao što su: opterećenje (pritisak očvršćavanja), temperaturu i vreme očvršćavanja. Pritisak u vezivanju lepka podstiče kvašenje, posebno u popunjavanju mikropora i površinskih mikroneravnina stvarajući povoljne uslove za nanošenje lepka i pričvršćivanje lepkova. Primenjeni pritisak treba da obezbedi da lepljive površine budu u bliskom kontaktu, a debljina veze je optimalna (0,05 – 0,50 mm). Vreme očvršćavanja je usko povezano sa temperaturom očvršćavanja. Kod hladno-vezujućih lepkova, čvrstoća zalepljenih spojeva raste sa vremenom očvršćavanja. Srednjo-temperaturno-vezujući i toplo-vezujući lepkovi imaju specifično vreme vezivanja, što obezbeđuje najveću čvrstoću spoja [7, 10]. Temperatura očvršćavanja lepka određuje da li se smatra da se stvrdnjavaju na hladno (temperatura okoline $< 30\text{ }^{\circ}\text{C}$), na srednjoj temperaturi ($T = 31 - 99\text{ }^{\circ}\text{C}$) ili na toplom vezivanju ($T > 100\text{ }^{\circ}\text{C}$). Maksimalna čvrstoća zalepljenih spojeva se može postići pod uslovom da se optimalna temperatura očvršćavanja za dati lepak zadrži tokom celog procesa, pri čemu temperature očvršćavanja daju proizvođači lepkova.

Pored toga, neophodno je uzeti u obzir i efekat skupljanja lepka tokom očvršćavanja, kada se oslobađaju isparljive materije. Ove isparljive materije mogu ostati zarobljene i mogu uzrokovati poroznost. Unutrašnja naprezanja opadaju kako se smanjuje debljina lepka, smanjujući tendenciju zadržavanja isparljivih materija. Praznine su često uzrokovane zarobljenim vazduhom na međupovršini ako lepak ima previsoku viskoznost, ne teče lako tokom očvršćavanja ili usled načina nanošenja lepka čak i u slučaju nedovoljne nanete količine lepka [13]. Prsline u lepku mogu nastati zbog nepravilnosti u procesu očvršćavanja (npr. nedovoljno stvrdnjavanje ili termalno skupljanje), kao i pod uticajem cikličnih opterećenja koja izazivaju zamor materijala [21]. Lokalne oblasti slabog očvršćavanja uzrokovane su pogrešnim mešanjem sistema lepka. Veće oblasti, koje mogu da se protežu kroz čitav spoj, nastaju usled pogrešnog mešanja, pogrešne formulacije ili nedovoljnog termalnog izlaganja. Ovo ukazuje da može doći do niza predviđenih i nepredviđenih defekata i grešaka u kontrolama kod zalepljenih spojeva. To uključuje defekte kao što su odvajanje spoja (*engl. disbonds*), defekt lažnog spoja (*engl. kissing bonds*), prsline, šupljine (praznine unutar lepka, nastale zbog zarobljenog vazduha ili neadekvatnog nanošenja), poroznost, loše očvršćavanje, nedovoljno popunjavanje, defekte na podlogama, neregularnu geometriju fileta, varijacije u debljini linije spoja i druge, kao što je prikazano na slici 2.17 [21, 120].

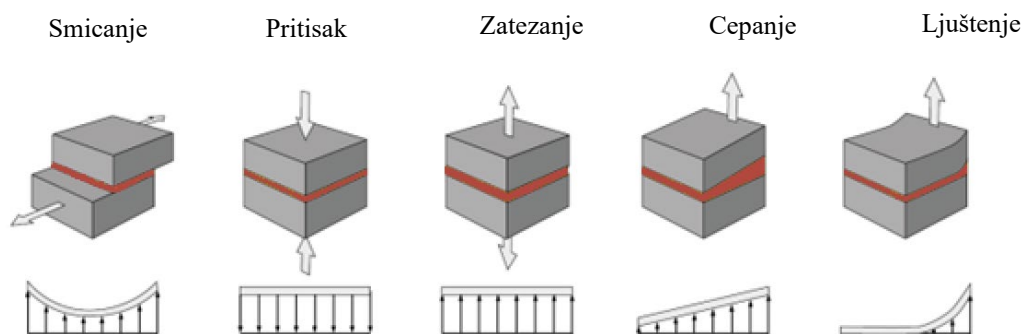


Slika 2.17 Prikaz različitih defekata koji mogu nastati pri lepljenju [21, 121]

2.4 Mehanička svojstva zalepljenih spojeva

2.4.1 Tipovi opterećenja

Mehanička svojstva zalepljenih spojeva direktno zavise od vrste opterećenja kojem su izloženi, kao i od geometrije spoja, vrste lepka, uslova površinske pripreme i načina primene opterećenja. Razumevanje ponašanja zalepljenih spojeva pod različitim vrstama opterećenja ključno je za pravilno projektovanje i pouzdanu primenu u tehničkim konstrukcijama. Zalepljeni spojevi mogu biti izloženi različitim vrstama opterećenja, koji izazivaju pet vrsta naprezanja: smicanje, pritisak, zatezanje, cepanje i ljuštenje (slika 2.18).



Slika 2.18 Osnovne vrste napona u zalepljenim spojevima [122]

Tokom eksploatacije zalepljeni spojevi mogu biti izloženi različitim vrstama mehaničkih opterećenja, što za posledicu ima pojavu različitih naponskih stanja u sloju lepka, kao i u adherentima. Naponsko stanje zavisi od: vrste opterećenja (zatezanje, smicanje, cepanje) i geometrije spoja [123]. Spoj opterećen na smicanje pokazuje mnogo veću čvrstoću od spoja opterećenog na ljuštenje, za potpuno isti lepak. Ovo čini dizajn spojeva i konfiguraciju naprezanja važnim delom procesa lepljenja. Zalepljeni spojevi su uglavnom projektovani da rade pod smičućim opterećenjima, zato što su lepkovi uglavnom otporni na smičuće sile i naponi mogu biti raspoređeni po celoj površini lepljenja. Kao što je prikazano na slici 2.18, ekstremne vrednosti se javljaju na krajevima preklopa i nose najveća opterećenja i upravo na tim mestima počinju eventualni otkazi. Za očekivati je da će vrednost ekstremnih napona zavisiti od relativne krutosti lepka i osnovnog materijala. Generalno, što je lepak elastičniji, to će napon biti ravnomernije raspoređen i ekstremni naponi će biti manje izraženi. Ljuštenje i cepanje dovode do visoke koncentracije napona duž uske linije na ivici zalepljenog spoja, pri čemu je nosivost veze u ovim uslovima obično niža nego kod drugih tipova opterećenja. Situacije u kojima dominira naprezanje usled ljuštenja ili cepanja generalno se smatraju najnepovoljnijim po mehaničku čvrstoću zalepljenog spoja.

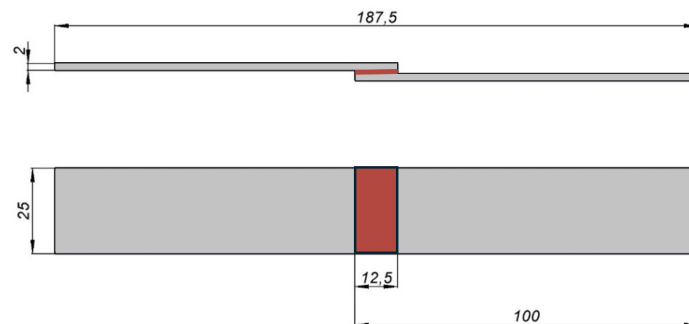
Ispitivanje mehaničkih svojstava zalepljenih spojeva obuhvata različite metode koje omogućavaju sagledavanje ponašanja spoja pod različitim vrstama opterećenja. Među najčešće primenjivanim testovima su: test smicanja, test ljuštenja i ispitivanja na zamor.

2.4.2 Test smicanja – Jednostruko preklopni test

Test na smicanje pri zatezanju (*engl. lap-shear test*) je metoda ispitivanja za određivanje uporednih vrednosti čvrstoće na smicanje zalepljenog spoja [22]. To je najčešće korišćena metoda ispitivanja zbog jednostavnosti sastavljanja i metode testiranja, a sprovodi se kako bi se utvrdio uticaj različitih površinskih tretmana, čvrstoća lepka i ciklusi očvršćavanja.

Iako je klasifikovan kao test na smicanje, važno je napomenuti da tip opterećenja kojem je jednostruko preklopni zalepljeni spoj izložen tokom ispitivanja nije čisto smicanje. Autori K. DeVries i P. Borgmeier [124] tvrde da, zbog deformacije adherenata dominiraju naponi ljuštenja pri lomu preklopnog spoja, a ne naponi smicanja. Uobičajna poboljšanja geometrije testa na smicanje predstavljena su u standardima ASTM D 3165 [125] i SRPS EN 1465 [126] (slika 2.19). Modifikacija geometrije kako je specifično određeno u ovom standardu smanjuje količinu savijanja kojoj su adherenti izloženi i smanjuje količinu opterećenja u mešovitom režimu na spoju.

Jednostruko preklopni spoj kao najčešća korišćena konfiguracija je i najviše proučavan tip zalepljenog spoja u literaturi. Pri ispitivanju značajan uticaj na otkaz zalepljenog spoja imaju geometrija i materijalna svojstva adherenata, dok na čvrstoću spoja utiču priprema površine, debljina sloja lepka, veličina preklopa i geometrija izbačenog lepka iz spoja (*engl. spew fillet*) [68, 127]. Mnoge teorije su korišćene za analizu napona, a predviđanja čvrstoće jednostruko preklopnih spojeva još uvek su predmet široke debate, na koje je ukazao i Da Silva i dr. u svojim radovima [128, 129].



Slika 2.19 Izgled i dimenzije jednostruko preklopnog uzorka prema standardu

SRPS EN 1465 [126]

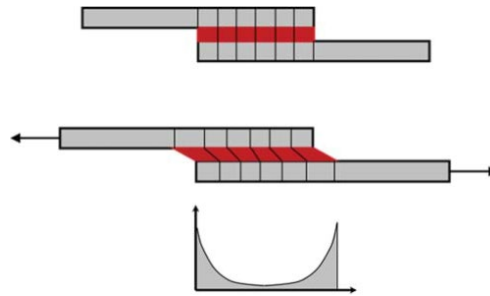
Čvrstoća preklopnog spoja na smicanje često se definiše pomoću jednačine (2.8):

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{F}{b \cdot l} \quad (2.8)$$

gde je F – primenjeno opterećenje, A – površina lepljenja, b – širina preklopa, l – dužina preklopa.

Da bi ova vrednost bila tačna, polazi se od pretpostavki da su adherenti kruti, da se sloj lepka smiče ravnomerno kroz celu površinu spoja u uslovima čistog smicanja i da ceo zalepljeni spoj ravnomerno popusti pri specifičnoj vrednosti primenjenog opterećenja (slika 2.20). Smatra se da je ispunjenje svih navedenih pretpostavki nerealno za konfiguraciju sa

jednostrukim preklapanjem, ali ovo je i dalje najčešći način za ispitivanje čvrstoće lepka na smicanje u mnogim testnim situacijama, kao što su ASTM i ISO standardi.



Slika 2.20 Idealizovane deformacije preklopnog spoja opterećenog na smicanje, sa krutim adherentima [128]

Model prema jednačini (2.8) zanemaruje ekstremne vrednosti napona na krajevima preklopa (slika 2.2 (a)), ali može poslužiti kao preliminarna gruba procena nivoa napona u sloju lepka. U literaturi se mogu naći različite analitičke metode koje su predložili Volkersen, Goland i Reissner, Adams and Peppiatt, Bigwood i Crocombe, Hart-Smith, itd. [15]. Prema O. Volkersen, maksimalni napon smicanja τ_{max} na krajevima preklopa može se izračunati na sledeći način [15, 130]:

$$\tau_{max} = \tau \cdot \sqrt{\frac{\Delta}{W}} \left[\frac{W - 1 + \cosh \Delta W}{\sin \sqrt{\Delta W}} \right] \quad (2.9)$$

gde se:

Δ bezdimenzionalni koeficijent određuje iz jednačine: $\Delta = (G \cdot l^2) / (E_2 \cdot d_2 \cdot h)$, dok je pomoćna veličina W definisana kao:

$$W = \frac{E_1 d_1 + E_2 d_2}{E_1 d_1} \quad (2.10)$$

gde je:

G – modul smicanja lepka,

E_1 i E_2 – moduli elastičnosti adherenata 1 i 2 (sa $E_1 d_1 > E_2 d_2$),

d_1 i d_2 – debljine adherenata 1 i 2,

h – debljina sloja lepka.

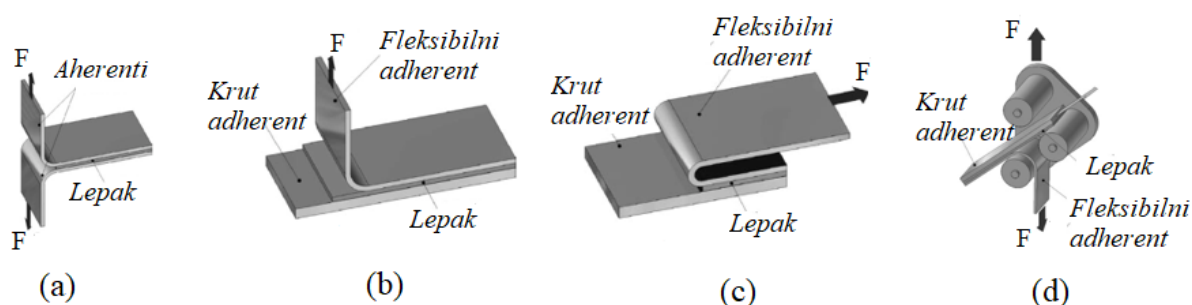
Za adherente za koje su $E_1 d_1$ i $E_2 d_2$ jednaki, jednačina (2.7) se pojednostavljuje:

$$\tau_{max} = \tau \cdot \sqrt{\frac{\Delta}{2}} \cdot \coth \sqrt{\frac{\Delta}{2}} \quad (2.11)$$

Jednačine (2.9) i (2.11) ukazuju na to kako napon ne zavisi samo od svojstava materijala lepka, već i od krutosti adherenata (modula i debljina).

2.4.3 Test ljuštenja

Od početka primene strukturnog lepljenja, testovi ljuštenja (*engl. peel test*) se koriste za procenu kvaliteta spoja i performansi lepka. Stoga je izuzetno koristan u proceni uticaja procesa (npr. priprema površine) ili uslova rada (izlaganje okolini) na čvrstoću zalepljenog spoja. Važnost merenja otpornosti na ljuštenje je posebno značajna zbog činjenice da su zalepljeni spojevi inherentno slabi na ljuštenje, da epoksidni lepkevi imaju nisku čvrstoću na ljuštenje, kao i to da se naponi pri ljuštenju mogu samo minimizirati (ne potpuno eliminisati) prilikom projektovanja spojeva [2, 80, 131]. Testovi se sastoje od ljuštenja tankog adherenta sa krute podloge ili sa druge fleksibilne (savijajuće) površine [132]. Testovi ljuštenja razvijeni su u više varijanti i opisani kroz odgovarajuće standarde. Razlikuju se pre svega po uglu ljuštenja - kao što su test T-ljuštenja, ljuštenje pod uglom od 90°, ljuštenje pod uglom od 180° i metoda pokretnog valjka - kao i po konstrukciji i tipu ispitne aparature (slika 2.21).

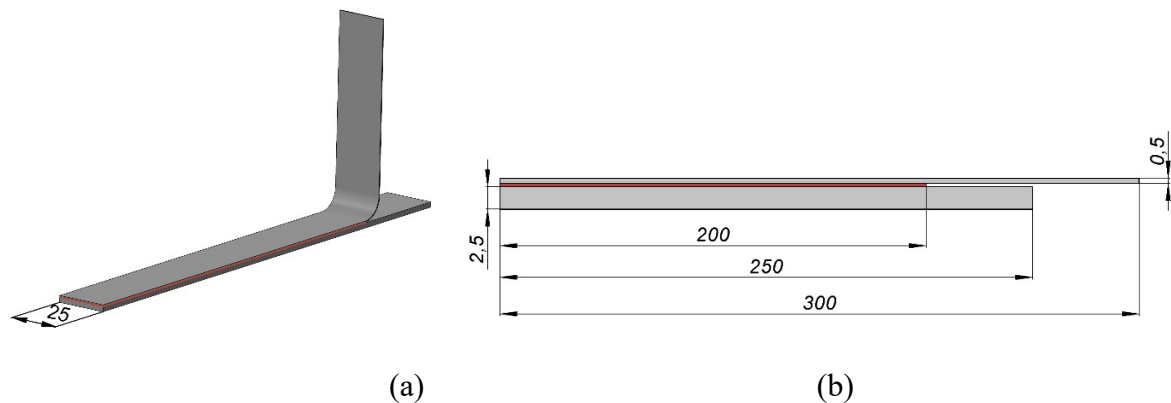


Slika 2.21 Različiti tipovi testa ljuštenja: (a) T-ljuštenje, (b) 90° ljuštenje, (c) 180° ljuštenje i (d) test ljuštenja sa pokretnim valjkom [2, 133]

Test T-ljuštenja je definisan standardima ASTM D1876-08 [134], SRPS ISO 11339 [135], gde su oba adherenta fleksibilna, a opterećenje se uvodi tako da se formira slovo „T“. Test 90° ljuštenje je definisan standardima ASTM D903 [136], ISO 8510-1 [137], gde se fleksibilni adherent povlači pod pravim uglom u odnosu na kruti adherent. Test 180° ljuštenje je definisan standardima ASTM D903 [136], ISO 8510-2 [138], fleksibilni adherent se preklapa i povlači unazad pod uglom od 180°.

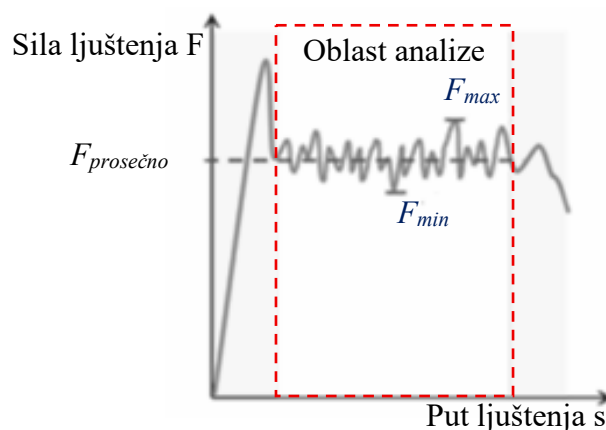
Test ljuštenja metodom pokretnog valjka (*engl. floating roller peel test*), koji je korišćen za eksperimentalna istraživanja u okviru ove disertacije, definisan standardima ASTM D3167-10 [139], SRPS EN 1464 [140] i delom SRPS ISO 14676 [141], razvijen je za određivanje relativne sile ljuštenja zalepljenog spoja koji se sastoji od jednog krutog i jednog

fleksibilnog adherenta. Asimetrični uzorak je obično širok 25 mm i sastoji se od fleksibilnog adherenta dužine 300 mm (debljine 0,5 mm) zalepljenog za kruti adherent dužine 250 mm (debljine 2,5 mm), kao što je prikazano na slici 2.22. Vrednosti sile ljuštenja se očitavaju sa dijagrama sila – pomeranje, zanemarujući prvih 25 mm loma. Ova metoda nije pogodna za zalepljene spojeve sa kompozitnim podlogama, ali je posebno korisna za testiranje prihvatanja i kontrolu procesa i često se koristi pri ispitivanju dugoročne izdržljivosti metalnih struktura.



Slika 2.22 Test uzorci ljuštenja metodom pokretnog valjka: (a) pod uglom, (b) bez ugla [140]

Otpornost na ljuštenje u N/mm (ili kN/m) je prosečna sila (F) po jedinici širine uzorka (b), merena duž zalepljenog spoja, koja je potrebna kako bi se kontinuirano odvojila dva adherenta jedan od drugog [15, 142]. Na slici 2.23 prikazan je tipičan dijagram sila ljuštenja (N) – pomeranje (mm). Početni deo krive ukazuje na početnu adheziju, a nakon čega se može uočiti pad sile koji označava početak otkaza veze. Sila može ponovo porasti ili oscilovati, što ukazuje na različite faze ljuštenja i eventualne nepravilnosti u vezi.



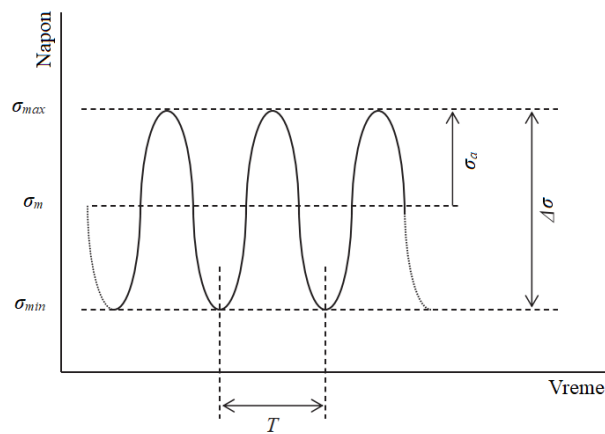
Slika 2.23 Dijagram sila ljuštenja u N – pomeranje u mm nakon ispitivanja ljuštenja metodom pokretnog valjka [143]

Radijus zakrivljenja blizu početka ljuštenja je vođen radijusom valjka preko kojeg se fleksibilni adherent ljušti. W. Brockmann i dr. [2] naglašavaju da se ovim načinom ispitivanja

takođe kontroliše putanja loma u sloju lepka. Ukoliko se fleksibilni adherent ljušti preko valjaka sa malim radiusom, putanja širenja loma (otkaza) pomera se prema tanjem adherentu, što ukazuje na to da je ova metoda jako korisna za ispitivanje uticaja pripreme površine na prijanjanje [2].

2.4.4 Ispitivanje na zamor zalepljenih spojeva

Većina konstrukcija i njihovih spojeva u eksploataciji je izložena promenljivim opterećenjima. Takva opterećenja se često modeluju kao ciklično promenljiva sila koja sa određenom frekvencijom deluje na konstrukciju. Na slici 2.24 prikazana je konstantna amplituda napona, dok su u tabeli 2.2 dati osnovni parametri koji se koriste za opisivanje spektra zamaranja.



Slika 2.24 Konstantna amplituda napona

Tabela 2.2 Osnovni parametri spektra zamaranja

Maksimalni napon	σ_{max}
Minimalni napon	σ_{min}
Amplitudni napon	$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$
Srednji napon	$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$
Opseg napona	$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$
Koeficijent asimetrije ciklusa	$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$
Period ciklusa opterećenja	T
Frekvencija (učestalost) opterećenja	$f = \frac{1}{T}$

Usled delovanja ovih opterećenja dolazi do pojave zamora materijala odnosno pojedinih konstrukcijskih elemenata. Zamor zalepljenih spojeva definiše se kao progresivni gubitak mehaničkih svojstava usled dugotrajnog cikličnog opterećenja, pri čemu su naponi obično ispod granice čvrstoće pri statičkom opterećenju. U procesu zamora dolazi do nastanka i propagacije mikroprslina koje mogu biti smeštene unutar samog lepka, na granici lepka-adherent ili unutar adherenta. Ove mikroprslinice se postepeno šire usled cikličnog opterećenja, što na kraju dovodi do otkaza spoja.

Zamor zalepljenih spojeva može se podeliti na niskociklični i visokociklični, u zavisnosti od nivoa napreznja i broja ciklusa opterećenja kojima su spojevi izloženi.

Niskociklični zamor javlja se pri relativno visokim nivoima napreznja, koji često prelaze granicu elastičnosti adhezivnog sloja ili adherenata. Broj ciklusa u ovom režimu je obično do oko 10^4 . Tokom niskocikličnog zamora, deformacije u spoju su delom plastične prirode, što može dovesti do trajnih promena u geometriji i unutrašnjoj strukturi lepka. U ovom procesu razvijaju se mikroprslinice koje se brzo šire do konačnog loma spoja, a ukupna čvrstoća i elastičnost značajno opadaju. Niskociklični zamor je naročito važan kod spojeva koji su izloženi jakim, ali relativno kratkotrajnim cikličnim opterećenjima, kao što su vibracije sa velikim amplitudama ili povremeni udari.

Sa druge strane, visokociklični zamor nastaje pri nižim nivoima napreznja, ispod granice elastičnosti materijala, ali nakon znatno većeg broja ciklusa, od oko 10^4 pa i preko 10^7 . U ovom režimu deformacije su uglavnom elastične, a mikroprslinice se formiraju i postepeno šire tokom dugog vremenskog perioda. Posledice visokocikličnog zamora su spori razvoj defekata koji mogu biti teško uočljivi, ali na kraju dovode do loma spoja. Zbog neprimetnih promena tokom dugog rada, inspekcija i precizno predviđanje otkaza predstavljaju izazov. Visokociklični zamor je karakterističan za spojeve podložne učestalim, ali slabijim opterećenjima, kao što su komponente u vozilima, avio- i drugim konstrukcijama koje rade dugo vremena sa malim oscilacijama opterećenja.

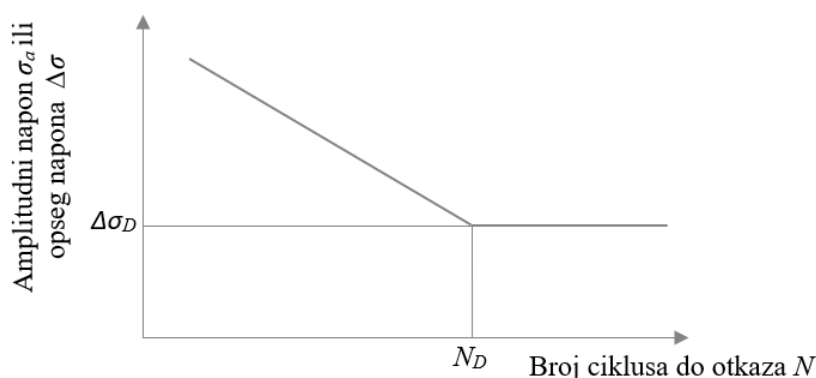
Metode ispitivanja zalepljenih spojeva na zamor su: ASTM D3166 [144] – Standardna metoda ispitivanja na zamor lepka pri smicanju zateznim opterećenjem (za spojeve metal-metal) i SRPS EN ISO 9664 [145] – Metode ispitivanja zamora adheziva za konstrukcije pri smicanju zatezanjem, opisuju načine za procenu izdržljivosti zalepljenih spojeva pod uslovima cikličnog opterećenja. Ispitivanje zalepljenih spojeva na zamor podrazumeva detaljnu kontrolu i definisanje niza parametara koji značajno utiču na rezultate i pouzdanost ispitivanja. Jedan od ključnih parametara je vrsta opterećenja kome je spoj izložen tokom testa. To može biti aksijalno zatezanje ili pritiskanje, smicanje, ljuštenje, savijanje ili torzija, u zavisnosti od

realnih uslova eksploatacije spoja. Bitni parametri ispitivanja na zamor su: faktor asimetrije ciklusa, amplituda opterećenja (opseg sila) i frekvencija opterećenja.

Faktor asimetrije ciklusa (R) je jedan od ključnih parametara pri ispitivanju na zamor, koji opisuje odnos minimalnog i maksimalnog opterećenja ($R = F_{\min}/F_{\max} = -1 \dots +1$) tokom jednog ciklusa zamora. Vrednost faktora asimetrije značajno utiče na ponašanje zalepljenih spojeva, jer različiti odnosi između minimalnog i maksimalnog opterećenja mogu izazvati različite mehanizme oštećenja i različiti radni vek.

Kod ispitivanja na zamor od suštinskog je značaja način na koji se kvantifikuje promena sile ili naprezanja tokom ciklusa, a tu se koriste amplituda opterećenja i opseg opterećenja. Neophodno je precizno definisati ove vrednosti, budući da one direktno utiču na radni vek spoja pod cikličnim opterećenjem. Takođe, značajnu ulogu ima frekvencija opterećenja, odnosno broj ciklusa u sekundi, koji se obično kreće, za ispitivanje zalepljenih spojeva u rasponu od 1 Hz do 60 Hz. Previsoka frekvencija može dovesti do zagrevanja uzorka zbog viskoelastične disipacije energije, što može uticati na rezultate ispitivanja.

S–N krive, u literaturi često nazivane Velerovim krivama [146], predstavljaju jedno od najčešće korišćenih sredstava za procenu radnog veka zalepljenih spojeva, kao i drugih konstrukcijskih elemenata pri dejstvu konstantnog cikličnog opterećenja. One se dobijaju eksperimentalnim ispitivanjem određenog broja uzoraka na različitim nivoima opterećenja, pri čemu se parametri R i f održavaju konstantnim. Nivo napona se obično izražava preko opsega σ_{\min} i σ_{\max} napona ili amplitudnog napona σ_a . Tokom ispitivanja, uzorci se opterećuju sve do loma, a beleži se broj ciklusa N do trenutka njegovog otkaza. Na slici 2.25 prikazan je tipičan oblik S–N krive.



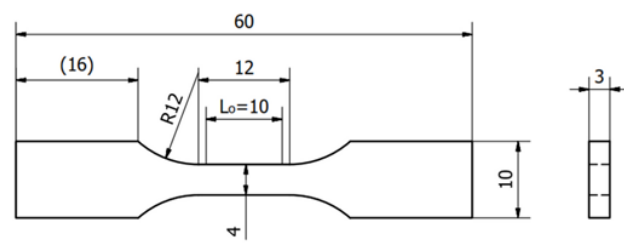
Slika 2.25 S–N kriva

Dinamička čvrstoća zalepljenih spojeva se najčešće definiše za uzorke koji izdrže $2 \cdot 10^6$ ciklusa bez loma. U SRPS EN ISO 9664 definisan je opseg frekvencije od 30 do 60 Hz, dok se

u standardu ASTM D3166 navodi da se uzorci testiraju na pet ili više različitih maksimalnih amplituda opterećenja odabranih tako da se lomovi (otkazi) javljaju u redosledu sa regularnim razmacima u opsegu od 10^7 ciklusa do najmanje 2000 ciklusa (uz preporuku da početno maksimalno opterećenje može biti 50% čvrstoće lepka, koje je prethodno određeno statičkim testom smicanja). Po završetku testa, mesto loma (u lepku ili u materijalu spoja), kao i način loma (kohezioni, adhezioni ili specijalni kohezioni lom) su relevantni za procenu performansi zamora zalepljenog spoja.

2.4.5 Ispitivanje mehaničkih svojstava lepka

Ispitivanje osnovnih svojstava lepka (*engl. bulk adhesive testing*) je praksa ispitivanja lepka kao osnovnog materijala, za razliku od konfiguracije spoja. Ova vrsta testa pruža uvid u čvrstoću lepljivog materijala bez komplikacija vezanih za prijanjanje. Dobijene vrednosti čvrstoće predstavljaju najveću potencijalnu čvrstoću adhezivne veze. Geometrija uzorka prikazana na slici 2.26 je u skladu sa standardom SRPS EN ISO 527-1 [147]. Ova geometrija omogućava uniformnu raspodelu napona i deformacija u centralnom delu uzorka, gde su ove vrednosti maksimalne. Na taj način, uzorak se širi i lomi pod dobro definisanim uslovima.



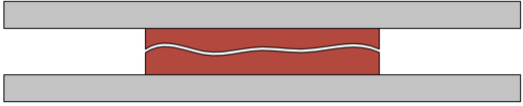
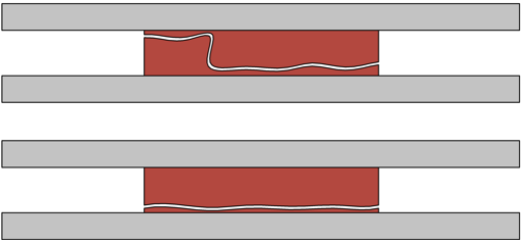
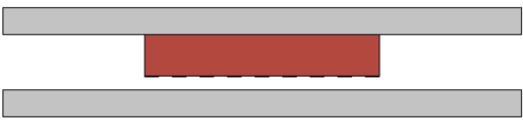
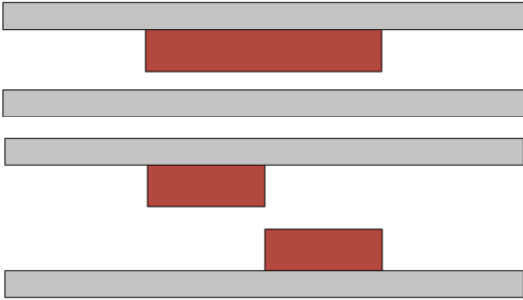
Slika 2.26 Dimenzije ispitnog uzorka za određivanje mehaničkih osobina pri statičkom zatezanju u skladu sa standardom SRPS EN ISO 527-1 [147]

2.4.6 Analiza moda otkaza

Analiza otkaza je jedan od ključnih načina za razumevanje ponašanja zalepljenih spojeva. U zavisnosti od svojstava površine i lepka, do loma može doći na različitim mestima. Ako otkaz nastane između sloja lepka i jednog od adherenta, pri čemu se lepak nalazi samo na jednoj od površina, to se naziva adhezioni otkaz. Ovo je obično uzrokovano slabim slojem granice, što može biti posledica, na primer, nedovoljne pripreme površine ili neodgovarajućeg izbora lepka. Ako su intermolekularne sile unutar lepka slabije od adhezivnih sila (između lepka i adherenta), doći će do kohezivnog otkaza, što znači da se otkaz odnosno lom dešava unutar samog lepka. Međunarodni standard SRPS EN ISO 10365: Adhezivi – Označavanje

glavnih modova otkaza [148], definiše adhezioni otkaz kao „lom zalepljenog spoja u kojoj se vizuelno čini da je razdvajanje na interfejsu lepak/adherent“, a kohezioni otkaz kao: „lom u zalepljenom spoju, u kome se vizuelno čini da se razdvajanje nalazi u lepku“. Tabela 2.3 prikazuje nazive i šeme mogućih preloma. Retko se dešava da je zalepljeni spoj toliko snažan da metalni adherenti puknu unutar samog metala, daleko od spajanja. To se naziva kohezivni otkaz u adherentima. Tip pucanja takođe zavisi od vrste opterećenja jer određena stanja napona izazivaju specifične tipove loma. Na primer, prilikom testova na ljuštenje, obično se čini da do pucanja dolazi na interfejsu (kontaktnoj površini) između adherenta i lepka, ali to može biti delaminacija oksidnog sloja od lepka ili koheziono pucanje koje se događa vrlo blizu površine oksida. Zbog toga je veoma važno pažljivo ispitati površine nakon loma kako bi se tačno utvrdio tip otkaza.

Tabela 2.3 Nazivi i šeme glavnih modova otkaza [148]

Mod otkaza	Prikaz otkaza
Kohezioni lom (<i>engl. Cohesion Failure</i>) CF	
Specijalni kohezioni lom (<i>engl. Special Cohesion Failure</i>) SCF	
Beli lom (<i>engl. Failure with stress whitening of adhesive</i>) SWCF	
Adhezioni lom (<i>engl. Adhesion Failure</i>) AF	

Kohezioni otkaz (*CF*) unutar sloja lepka smatra se poželjnim tipom otkaza. On ukazuje da je dostignuta maksimalna čvrstoća materijala u spoju, a istovremeno potvrđuje dobru adheziju i adekvatnu pripremu površine. Ipak, pri oceni rezultata treba uzeti u obzir vrstu opterećenja, osobine površine i strukturna svojstva celog spoja.

Specijalni kohezioni lom (*SCF*) predstavlja slučaj otkaza kada postoji tanak sloj lepka na jednoj površini. Lepak doseže granice svoje čvrstoće i počinje da se lomi blizu površine jednog adherenta, a ponekad je sloj lepka toliko tanak da ga jedva možemo uočiti. Ovo se obično dešava kada priprema površine nije bila dovoljno temeljna i/ili kada lepak nije odgovarajući.

„Beli“ lom (*SWCF*) se može javiti npr. kod lepljenja metala epoksidnim lepkom visoke čvrstoće. Usled prenosa povišenih sila unutar spoja, polimerna struktura lepka se može oštetiti blizu kontaktne površine sa adherentom i dobiti belu ili svetliju boju, dok metalna površina, vizuelno, ostaje skoro bez ostataka lepka. Ovaj tip otkaza se razlikuje od klasičnog adhezionog otkaza, budući da kod AF površina lepka ostaje sjajna i ne pokazuje nikakvu diskoloraciju (njegova je boja slična višku lepka na uzorku i tamnija je nego kod CF ili SWCF).

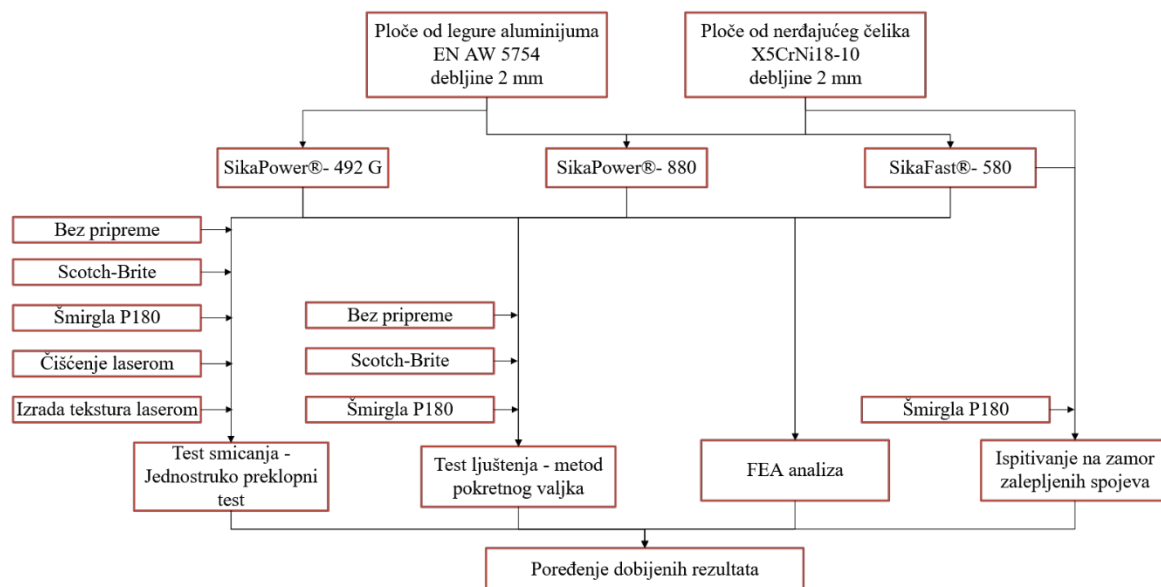
Adhezioni otkaz (*AF*) ili delaminacija oksidnog sloja od lepka ne mora uvek biti znak loše pripreme površine – može biti posledica specifičnih uslova naprezanja i/ili karakteristika materijala. U praksi, otkazi spoja često sadrže kombinaciju više modova otkaza. Oni se izražavaju procentualno, u zavisnosti od površine kontakta koja je pretrpela kohezioni ili adhezioni otkaz. Idealni slučaj je 100% kohezioni otkaz u sloju lepka [149].

Mod otkaza ne bi trebalo posmatrati kao jedini kriterijum procene kvaliteta spoja. Neke kombinacije lepak-adherent mogu doživeti adhezioni otkaz, a ipak imati veću čvrstoću od sličnih spojeva zalepljenih slabijim lepkovima koji pokazuju kohezioni otkaz [33]. Zbog toga je krajnja čvrstoća spoja pouzdaniji pokazatelj od samog moda otkaza.

Ipak, analiza moda otkaza ostaje dragocen alat za utvrđivanje da li je otkaz nastao zbog prisustva slabog sloja na granici lepak-adherent ili zbog nepravilne pripreme površine.

3. Eksperimentalna istraživanja

Eksperimentalni deo disertacije realizovan je u skladu sa metodologijom prikazanom u vidu algoritma na slici 3.1.



Slika 3.1 Zbirni algoritam eksperimentalne metodologije poređenja uticaja različitih lepkova, priprema površina i ispitivanja na čvrstoću zalepljenog spoja adherenta od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 i legure aluminijuma EN AW 5754

U okviru ove disertacije vršena su istraživanja vezana za poređenje uticaja različitih priprema površina na čvrstoću zalepljenih spojeva, primenom tri tipa epoksidnih lepkova, statičkih, dinamičkih i FEA analiza. Ispitivanje je obavljeno u kontrolisanim laboratorijskim uslovima u Laboratoriji za zavarivanje LAVAR Mašinskog fakulteta Univerziteta u Ljubljani, Slovenija.

3.1 Materijali adherenata

Kao adherenti za eksperimentalna istraživanja korišćena su dva materijala: nerđajući čelik X5CrNi18-10 (1.4301) i legura aluminijuma EN AW 5754, debljine 2 mm. U tabeli 3.1 prikazan je hemijski sastav nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 prema standardu SRPS EN 10088-1 [150] i mehanička svojstva u skladu sa standardom SRPS EN 10088-2 [151].

Tabela 3.1 Hemijski sastav i mehanička svojstva nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 [150, 151]

Hemijski sastav (% maksimalno ili opseg)								
<i>C</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>N</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Fe</i>
0,07	17-19,5	8-10,5	2,0	1,0	0,1	0,045	0,015	Ostatak
Mehanička svojstva								
Granica tečenja $R_{p0,2}$			Zatezna čvrstoća,		Elongacija A_{80} ,		Modul elastičnosti E	
(MPa)			R_m (MPa)		(% min)		(GPa)	
210			520-720		45		200	

Osnovna mehanička svojstva legure aluminijuma EN AW 5754 definisana su prema standardu SRPS EN 485-2:2019 [152], dok je hemijski sastav specificiran u skladu sa standardom ASTM B209/B209M-21a [153], a prikazani su u tabeli 3.2.

Tabela 3.2 Hemijski sastav i mehanička svojstva legure aluminijuma EN AW 5754 [152, 153]

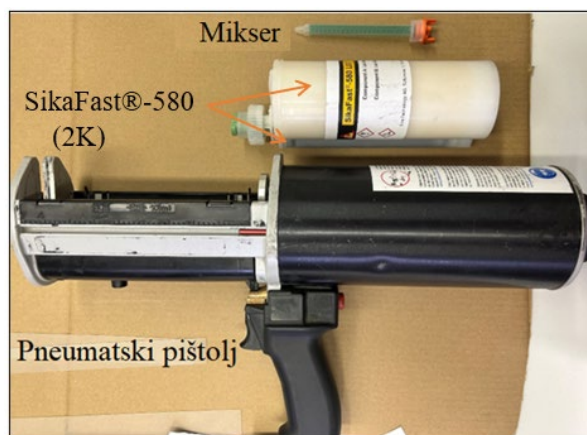
Hemijski sastav (% maksimalno ili opseg)									
<i>Si</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Mn</i>	<i>Mg</i>	<i>Cr</i>	<i>Zn</i>	<i>Ti</i>	<i>ostali</i>	<i>Al</i>
0,4	0,4	0,1	0,5	2,6-3,6	0,3	0,2	0,15	0,15	Ostatak
Mehanička svojstva									
Granica tečenja $R_{p0,2}$			Zatezna čvrstoća,		Elongacija A_{50} (%)			Modul elastičnosti E	
(MPa)			R_m (MPa)					(GPa)	
130			220-270		10			70	

3.2 Materijali lepkova

Za eksperimentalna istraživanja u okviru ove disertacije odabrana su tri tipa epoksidnih lepkova kao što je navedeno u poglavlju 2.3.3. Prilikom pripreme smeše lepka, posebno u slučaju višekomponentnih kompozicija, važno je održavati potreban odnos mešanja. Na tržištu postoji niz dostupnih rešenja, kao što su: dozatori, pneumatski i ručni pištolji, vage i drugi uređaji za mešanje i doziranje. Mešanje dvokomponentnog lepka vrši se kružnim kretanjem željenom brzinom pomoću različitih vrsta miksera, stvarajući tako hemijski homogenu mešavinu adhezivnih komponenti. Epoksidni lepak se nanosi na očišćene i tretirane površine, a nakon toga proces očvršćavanja je na sobnoj temperaturi ili u pećnici za sušenje. Vreme i temperatura očvršćavanja su definisane prema specifikaciji proizvođača.

SikaFast®-580 (2K) visoko-temperaturni akril/epoksi karakteriše razvoj visoke čvrstoće u roku od nekoliko minuta nakon nanošenja. Doziranje i nanošenje lepka se vrši

pomoću pneumatskog pištolja i miksera, prikazanih na slici 3.2. Lepak treba naneti na odgovarajuće površine u roku od 4 do 7 minuta (*engl. open time*) [55], što predstavlja vreme upotrebljivosti lepka. Nakon ovog vremena lepak dostiže stepen polimerizacije i ne može formirati sloj. Očvršćavanje lepka nakon lepljenja je dve nedelje na sobnoj temperaturi ili sušenje u pećnici na 140 °C od 10 do 15 minuta, nakon čega je potrebno uzorke ostaviti u laboratorijski kontrolisanim uslovima (temperatura 23 ± 2 °C, relativna vlažnost vazduha $50 \pm 5\%$) naredna 24 h.



Slika 3.2 Oprema za nanošenje dvokomponentnog (2K) lepka SikaFast®-580

Dvokomponentni epoksidni lepak SikaPower®-880, lepak koji je namenjen za konstrukcijske spojeve gde se zahtevaju žilavost i visoka čvrstoća. Na slici 3.3 prikazan je izgled dvokomponentnog lepka, ručni pištolj i mikser za lako i precizno doziranje lepka.



Slika 3.3 Oprema za nanošenje dvokomponentnog (2K) lepka SikaPower®-880

Vreme i temperatura očvršćavanja su definisane u odnosu na specifikaciju proizvođača, za lepak SikaPower®-880 vreme očvršćavanja iznosi 7 dana u laboratorijski kontrolisanim uslovima, u slučaju očvršćavanja u pećnici temperatura iznosi 80 °C, 30 minuta, nakon čega je

potrebno uzorke ostaviti 24 h [56]. Očvršćavanje uzoraka nakon lepljenja vršeno je u pećnici za sušenje i sterilizaciju do 300 °C model ED 56 proizvođača Binder GmbH (slika 3.4).



Slika 3.4 Pećnica za sušenje i sterilizaciju do 300 °C model ED 56

Jednokomponentni od odabranih lepka za potrebe ovog istraživanja je takozvani epoksidni hibridni lepak SikaPower®-492 G, strukturni lepak visoke čvrstoće i otporan na udarce, pogodan je za visoko strukturno lepljenje različitih vrsta metala. Za potrebe nanošenja lepka na slici 3.5 prikazan je ručni pištolj (statički) kao i brizgaljka za lakše nanošenje i doziranje lepka. Lepak na bazi epoksida je prema specifikaciji proizvođača pre lepljenja zagrevan do temperature od 55 °C u trajanju od 15 minuta, zatim nanesen na površine koje se lepe [57]. Nakon lepljenja uzorci su osušeni u pećnici na temperaturi od 175 °C, 20 minuta.



Slika 3.5 Oprema za nanošenje jednokomponentnog (1K) lepka SikaPower®-492 G

Sva tri odabrana tipa lepka su opšte namene i koriste se za lepljenje metala. Odabrane mehaničke osobine ispitivanih lepka su navedene u tabeli 3.3. Nakon isteka vremena sušenja, uzorci su uklonjeni iz pećnice i ostavljeni naredna 24 h.

Tabela 3.3 Mehaničke karakteristike lepka prema specifikaciji proizvođača [55, 56, 57]

Mehaničke karakteristike	SikaFast®-580	SikaPower®-880	SikaPower®-492G
Viskoznost (Pa·s)	150	100	230
Zatezna čvrstoća (MPa)	12	22	29
Izduženje pri lomu (%)	15	3,3	8
Modul elastičnosti (MPa)	900	2220	2190

Mehanička svojstva tri različita epoksidna lepka proverena su na osnovu testova zatezanja. Epruvete za ispitivanje osnovnih svojstava lepka obično se sastoje od sužene sekcije sa paralelnim stranama (tj. uzorak u obliku bučice ili koske) da bi se olakšalo merenje napreznja i da bi se osiguralo da do loma dođe unutar dela uzorka koji se ispituje, daleko od učvršćenih krajeva. Tri epruvete od svakog lepka, ukupno devet epruveta proizvedeno je u skladu sa standardom SRPS ISO 527-1 [147], uz korišćenje dimenzionisanja za mali oblik 1B. Prikaz gotovih epruveta od lepka SikaPower®-492 G prikazane su na slici 3.6. Lepkovi su naneti u kalup prema uputstvima proizvođača i sušeni 24 h u sobnim uslovima (temperatura 23 ± 2 °C). Ispitivanja zatezanja su sprovedena na ispitnoj mašini Zwick 7250 opsega 250 kN. Nakon eksperimentalnog ispitivanja zaključeno je da su dobijeni rezultati u skladu sa vrednostima navedenim u tehničkoj dokumentaciji proizvođača lepka Sika.

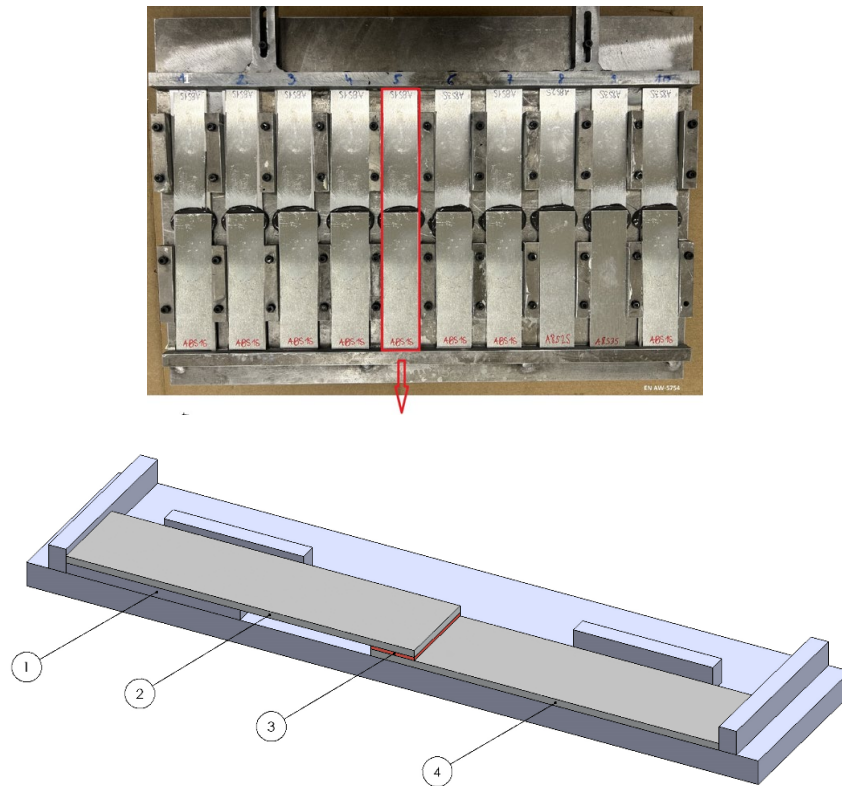


Slika 3.6 Deo izrađenih epruveta od lepka SikaPower®-492 G prema standardu SRPS ISO 527-1 [147]

3.3 Kalup za izradu uzoraka za jednostruko preklopni test

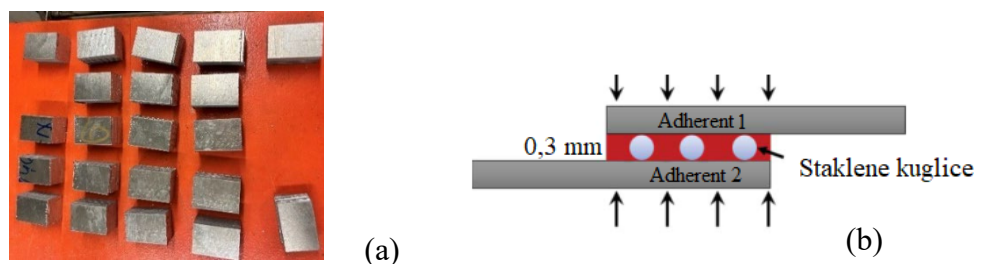
Kalup za poravnanje i držanje adherenata korišćen je kako bi se obezbedilo pravilno pozicioniranje i preklapanje uzoraka tokom testa na smicanje. Kalup predstavlja standardni alat koji se koristi u laboratorijskim ili industrijskim uslovima radi preciznog pozicioniranja i fiksiranja uzoraka tokom procesa lepljenja. Njegova osnovna funkcija je da obezbedi

konstantno poravnanje i održavanje odgovarajućeg razmaka između površina koje se lepe, čime se garantuje pravilno formiranje lepljivog spoja. Kalup obezbeđuje do 10 uzoraka, sa geometrijom prikazanom na slici 3.7.



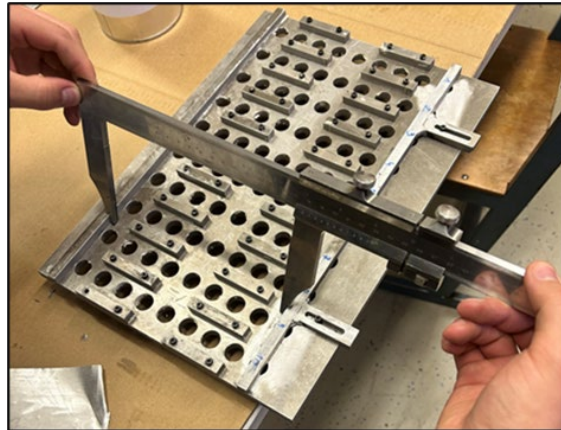
Slika 3.7 Kalup za lepljenje jednostruko preklopnog spoja: (1) distancer, (2) gornji adherent, (3) lepak debljine 0,3 mm i (4) donji adherent

Konstantna debljina lepka od 0,3 mm obezbeđena je primenom aluminijumskih pločica koje su služile kao odstojnici (distančeri) (slika 3.7), čija ukupna debljina odgovara zbiru debljine materijala (2 mm) i debljine lepka (0,3 mm) (slika 3.7 i slika 3.8 (a)). Pored toga, odabrani lepkovi (SikaFast® -580, SikaPower® -880 i SikaPower® -492 G,) u sebi sadrže i staklene perle (kuglice) prečnika 0,3 mm kako bi se dodatno obezbedila optimalna debljina lepka. Osim toga, staklene kuglice osiguravaju preciznu debljinu sloja lepka sprečavajući prekomerno istiskivanje lepka usled pritiska (slika 3.8 (b)).



Slika 3.8 Prikaz (a) odstojnih pločica debljine 0,3 mm i (b) staklenih kuglica u lepku

Pre početka procesa lepljenja potrebno je kalup premeriti na tačnu dužinu, u ovom slučaju 187,5 mm, sa preklopom od 12,5 mm (slika 3.9). Nakon toga, kalup se premazuje voskom za oslobađanje (odnosno odvajanje) od kalupa (*engl. Mold Release Wax*). Vosak predstavlja specijalizovani proizvod koji se koristi u procesu proizvodnje kako bi se olakšao proces uklanjanja delova iz kalupa nakon što su oblikovani. Ovaj vosak se nanosi na unutrašnju površinu kalupa čime se stvara zaštitni sloj koji sprečava da materijal "prione" za kalup (slika 3.10).



Slika 3.9 Priprema kalupa pre lepljenja: provera dimenzija kalupa



Slika 3.10 Priprema kalupa pre lepljenja: premazivanje kalupa voskom Mold Release Wax

3.4 Priprema površina podloga za lepljenje

Za eksperimentalno ispitivanje korišćene su različite pripreme površina podloga koje se spajaju lepljenjem, na dva različita materijala (X5CrNi18-10 i EN AW 5754). Pre mehaničke

pripreme svaki uzorak je pažljivo očišćen transparentnim čistačem na bazi rastvarača za jako zaprljane, neporozne površine - Sika® Cleaner P [154], koji se koristi za uklanjanje nečistoća i kontaminanata kao što su masnoće, ulja, prašina i prljavština sa podloge pre lepljenja (slika 3.11). Površine su brisane papirnim ubrusom navlaženim sredstvom Sika® Cleaner P. Pre nego što se rastvarač osuši (ispari) površine su obrisane suvim papirnim ubrusom, prema specifikaciji proizvođača. Kako bi se osigurala visoka čistoća, papirni ubrusi su redovno menjani. Nakon čišćenja površine merena je hrapavost još neobrađenih uzorka.



Slika 3.11 Sredstvo za čišćenje površina Sika® Cleaner P

Hrapavost površina merena je na svakom uzorku pre i nakon površinske pripreme profilometrom model SJ-301 proizvođača Mitutoyo, Japan (slika 3.12). Nakon merenja hrapavosti, uzorci kojima nije predviđena dodatna priprema površine su ponovo očišćeni, a zatim je izvedeno merenje kontaktnog ugla. Na ostalim uzorcima je sprovedena priprema površina prema eksperimentalnom planu.



Slika 3.12 Profilometar Mitutoyo SJ-301 korišćen pri merenju hrapavosti površine

Uporedni prikaz svih priprema površine uzorka koji su vršeni u ovoj doktorskoj disertaciji prikazani su u tabeli 3.4.

Tabela 3.4 Uporedni prikaz primenjenih priprema površina na nerđajućem čeliku X5CrNi18-10 i leguri aluminijuma EN AW 5754

Priprema površine	Detalji
<i>Bez pripreme (BP)</i>	Površine podloge od nerđajućeg čelika i legure aluminijuma očišćene Sika® Cleaner P. Nakon čišćenja merena je hrapavost podloga pre lepljenja.
<i>Scotch-Brite (SB) (ručno brušenje)</i>	Površina podloge nakon čišćenja je ravnomerno ručno brušena, zelenim finim abrazivnim jastučićem Scotch-Brite oko 30 sekundi u jednom aksijalnom smeru uz srednji pritisak, a zatim je nanet Sika® Cleaner P kako bi se očistila površina pre lepljenja.
<i>Brusni papir P180 (ručno brušenje)</i>	Površina podloge je nakon čišćenja i merenja hrapavosti ručno brušena brusnim papirom granulacije P180 u jednom aksijalnom smeru uz srednji pritisak oko 30 sekundi. Nakon pripreme površina je očišćena Sika® Cleaner P pre lepljenja.
<i>LČ (laser za čišćenje)</i>	Korišćen je prenosivi laser za temeljno čišćenje površine podloge pre lepljenja, sa postavkom snage od 45 W i impulsnom energijom od 1,25 mJ.
<i>LT (laser za teksture)</i>	Očišćena površina za lepljenje je tretirana nanosekundnim impulsnim fiber laserom za lasersko graviranje sa konstantnom snagom od 5% i ograničenim brojem impulsa za svaku teksturu i dubinu (40 µm i 80 µm). Uklanjanje prašine nakon graviranja vršeno je vazduhom pod pritiskom.

Površine ispitivanih uzoraka podvrgnute su mehaničkoj pripremi, odnosno ručnom brušenju. Preliminarna istraživanja su pokazala da ručno brušenje povećava hrapavost podloga i značajno utiče na čvrstoću u poređenju sa površinama koje nisu prethodno pripremljene. Za prvu metodu mehaničke pripreme odabrano je ručno brušenje pomoću fino-zrnastog (zelenog) vlaknastog abrazivnog jastučića Scotch-Brite (slika 3.13 (a)). Ova metoda je uobičajena u industrijskoj proizvodnji, ali je, uprkos tome, još uvek nedovoljno istražena u naučnoj literaturi. Druga priprema površina sprovedena je korišćenjem brusnog papira granulacije P180 (slika 3.13 (b)), koji je u ovom slučaju nedovoljno istražen na materijalima korišćenim u ovoj disertaciji.



(a)

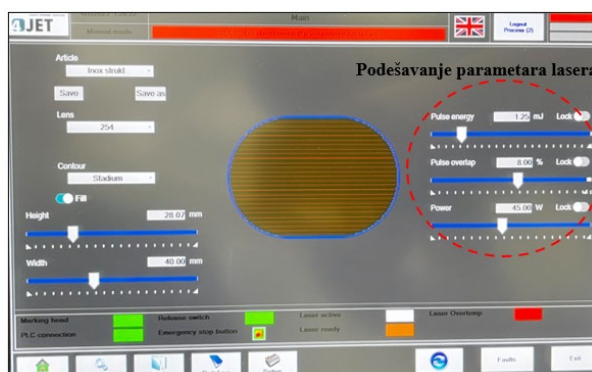
(b)

Slika 3.13 Priprema površine: a) Abrazivni jastučić Scotch-Brite, b) Brusni papir granulacije P180

Pored toga, korišćene su savremene metode pripreme površine koje se smatraju izuzetno efikasnim za postizanje veće čvrstoće zalepljenih spojeva. Konkretno, površine su tretirane dejstvom dva lasera. Prvi laser je korišćen za povećanje površinske energije materijala i čišćenje podloga, dok je drugi služio za graviranje površine, odnosno za stvaranje različitih tekstura na različitim dubinama na površinama prijanjanja.

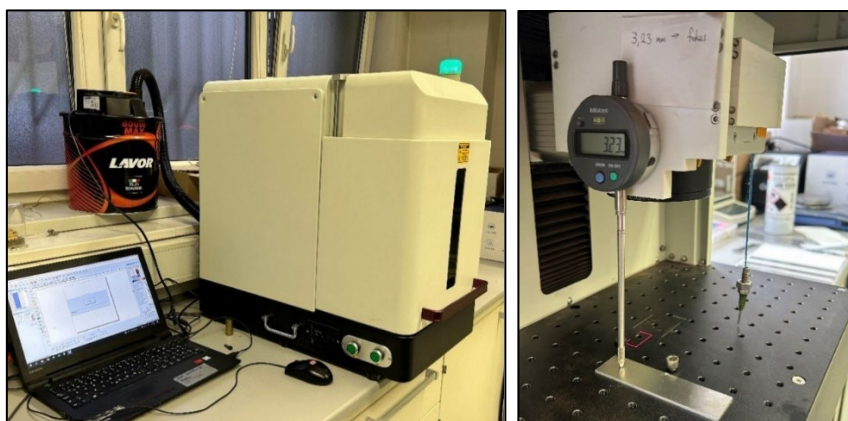
Čišćenje površine laserom pre lepljenja je beskontaktna, ekološki prihvatljiva metoda čišćenja. Kako je koncentracija energije potrebna za uklanjanje nečistoća koje generiše laser mnogo niža od praga ablacije za metale, površina osnovnog materijala ostaje nepromenjena. Laserska ablacija je uklanjanje sloja materijala ili supstance postavljene na određenu površinu pomoću laserskog zraka. Nečistoće se mogu uklanjati selektivno i sa malim uticajem na prijanjanje. Za potrebe ovog eksperimentalnog istraživanja kompanija PROTEAM iz Slovenije ustupila je laser za čišćenje Jetlaser M100 proizvođača 4JET Technologies GmbH (slika 3.14).

Jetlaser M100 je super kompaktan i prenosiv laser za čišćenje malih površina. Za potrebe čišćenja površina, a prema specifikaciji proizvođača, energija impulsa je podešena na 1,25 mJ, preklapanje impulsa je 8%, a snaga na 45 W. Energija laserskog zračenja je vrlo intenzivna i izuzetno fokusirana, povećava se površinski napon materijala, a ovako modifikovana površina je savršeno pripremljena za bolje mehaničko prijanjanje. Čišćenje uzoraka može početi sa ili bez prethodne pripreme površine.



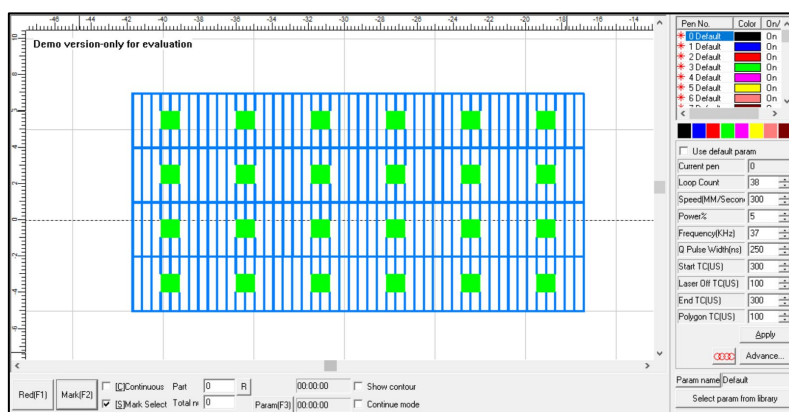
Slika 3.14 Prenosivi laser za čišćenje model Jetlaser M100 sa prikazom podešavanja parametara

Za lasersko graviranje korišćen je nanosekundni impulsni fiber laser (FL-mark-C sa JPT Opto-electronics Co., Ltd., Varabi, Japan, “M7 30 W” MOPA izvor, $\lambda = 1064 \text{ nm}$), koji se nalazi u Laboratoriji za termotehniku Mašinskog fakulteta Univerziteta u Ljubljani (slika 3.15). Laserski sistem je opremljen OPEKS F-Theta sočivom sa žižnim rastojanjem od 100 mm i radnom površinom od $70 \times 70 \text{ mm}^2$. Parametri procesa koji su održavani konstantnim tokom laserskog graviranja bili su frekvencija impulsa od 37 kHz, širina impulsa od 250 ns i snaga od 5%, sa prečnikom tačke fokusnog snopa od $\approx 25 \mu\text{m}$ i parametrom kvaliteta laserskog zraka $M^2 \leq 1,3$ (podaci proizvođača).



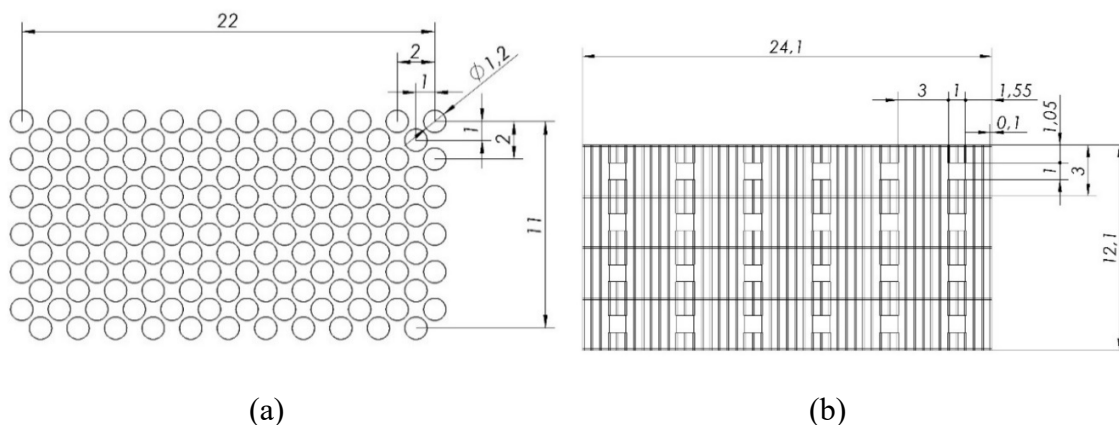
Slika 3.15 Nanosekundni impulsni fiber laser M7 30W

Laser je povezan sa računarnom, koji sa korisnikom komunicira preko softvera *ezCAD 2* (slika 3.16). Softver *ezCAD 2* pored upravljanja procesom laserskog graviranja pruža i mogućnost kontrole laserskog sistema tokom laserske pripreme. Softver omogućava da se upravlja brojnim parametrima laserskog graviranja, a neki od njih su: broj prolaza (*engl. loop count*), brzina (mm/sec), snaga, frekvencija impulsa, širina impulsa i dr. Vizuelni izgled tekstura je takođe izrađen u softveru *ezCAD 2*.

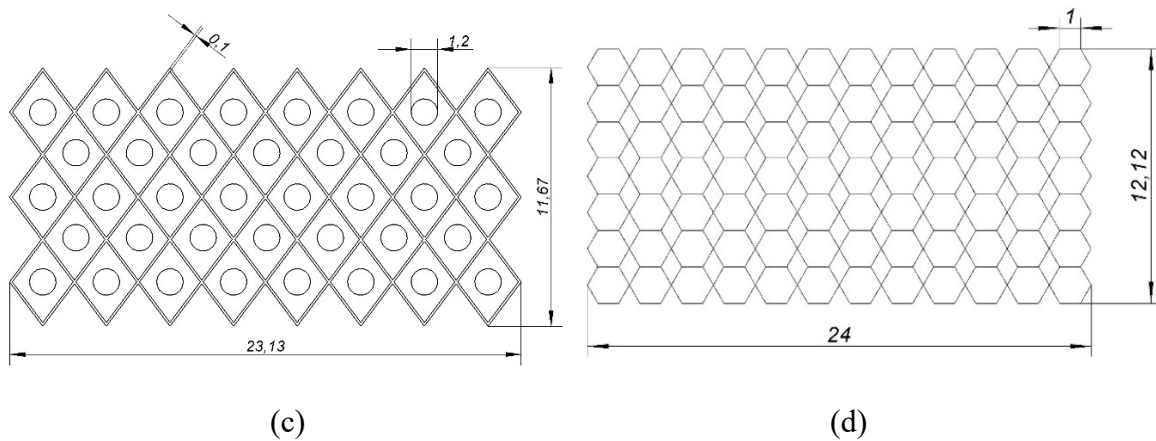


Slika 3.16 Interfejs softvera „ezCAD 2” kojim se vrši upravljanje i kontrola laserskog sistema tokom laserske pripreme

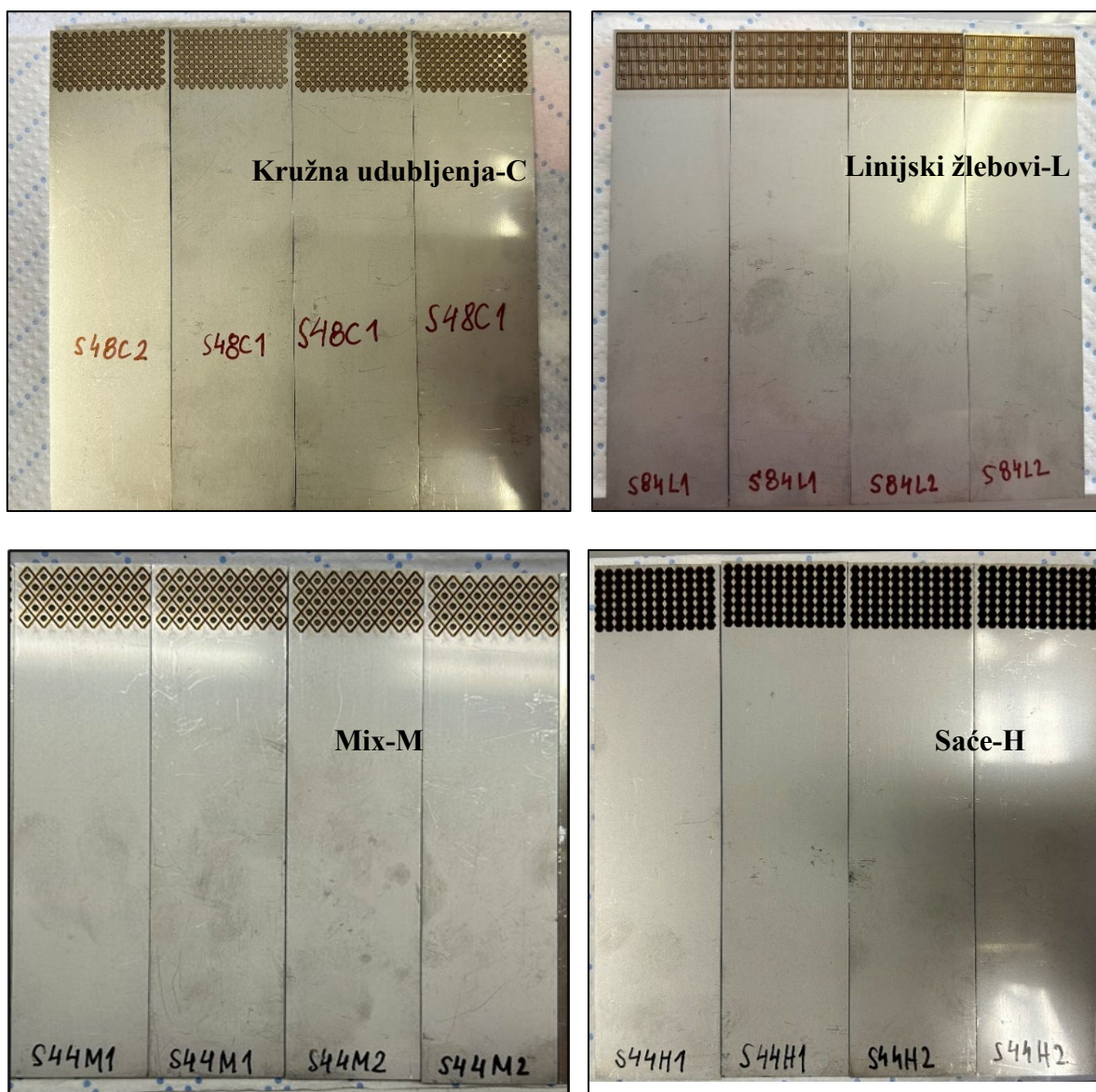
Forma tekstura koje su razvijene i usvojene u ovoj doktorskoj disertaciji, a na osnovu svega prethodnog razmatranog i utvrđenog, uključuju četiri različite forme sa naznačenim efektima u dve dubine, i to kružna udubljenja (4C na dubini od 40 μm i 8C na dubini od 80 μm), linijski žlebovi (4L na dubini od 40 μm i 8L na dubini od 80 μm), tekstura mix (4M na dubini od 40 μm i 8M na dubini od 80 μm) i tekstura saće (*engl. honeycomb*) (4H na dubini od 40 μm i 8H na dubini od 80 μm). Na slici 3.17 prikazane su dimenzije usvojenih tekstura, dok je na slici 3.18 prikazana forma tekstura nakon graviranja na laseru.



Slika 3.17 Forma i dimenzije tekstura: (a) kružna udubljenja (C), (b) linijski žlebovi (L), (c) mix (M), (d) saće tekstura (H)



Slika 3.17 Nastavak: Forma i dimenzije tekstura: (a) kružna udubljenja (C), (b) linijski žlebovi (L), (c) mix (M), (d) saće tekstura (H)



Slika 3.18 Prikaz tekstura nakon laserskog graviranja nerđajućeg čelika X5CrNi18-10

Prvi gravirani uzorak, kružna udubljenja (*engl. circle - C*), sastoji se od običnih mikro-rupa. Primarna funkcija ovih mikro-rupa je da poboljšaju površinu i mehaničko povezivanje upravno na smer smicanja. Lasersko graviranje površine u ovom obliku ostvaruje se tačkasto impulsnim (udarno-ablacionim) procesom bušenja (*engl. punctual percussive drilling process*). Graviranje kružnih površina može biti izuzetno produktivno uz pravilan izbor parametara i korišćenje ograničenog broja impulsa [109]. Prečnik rupe (udubljenja) je proporcionalan veličini laserskog zraka i zajedno sa dubinom udubljenja kontroliše se snagom lasera i brojem impulsa ili brojem uzastopnih prolaza. Broj uzastopnih prolaza je različit za svaki materijal i teksturu i određen je nakon dostizanja odgovarajućih dubina od 40 μm i 80 μm . Dubine na materijalima od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 i legure aluminijuma EN AW 5754 postignute su nakon temeljnog posmatranja i ponavljanja graviranja, što je obuhvatalo opsežno posmatranje uzoraka pod optičkim mikroskopom u cilju postizanja tačnih dubina (40 μm i 80 μm). Tabela 3.5 pokazuje broj uzastopnih prolaza za materijale i teksture, pri čemu se broj prolaza linije - odnosi na broj prolaza koje laser izvrši preko iste putanje ili površine tokom obrade materijala, a broj prolaza za popunjavanje - odnosi se na broj puta koje laser napravi prilikom popunjavanja unutrašnjeg dela teksture.

Tabela 3.5 Broj uzastopnih prolaza za forme tekstura gravirane impulsnim fiber laserom

Materijal	Tekstura	40 μm		80 μm	
		1*	2*	1*	2*
X5CrNi18-10	<i>Kružna udubljenja - C</i>	-	24	-	45
	<i>Linijski žlebovi - L</i>	42	24	110	45
	<i>Mix - M</i>	42	24	110	45
	<i>Saće - H</i>	-	24	-	45
EN AW 5754	<i>Kružna udubljenja - C</i>	-	7	-	15
	<i>Linijski žlebovi - L</i>	14	7	38	15
	<i>Mix - M</i>	14	7	38	15
	<i>Saće - H</i>	-	7	-	15

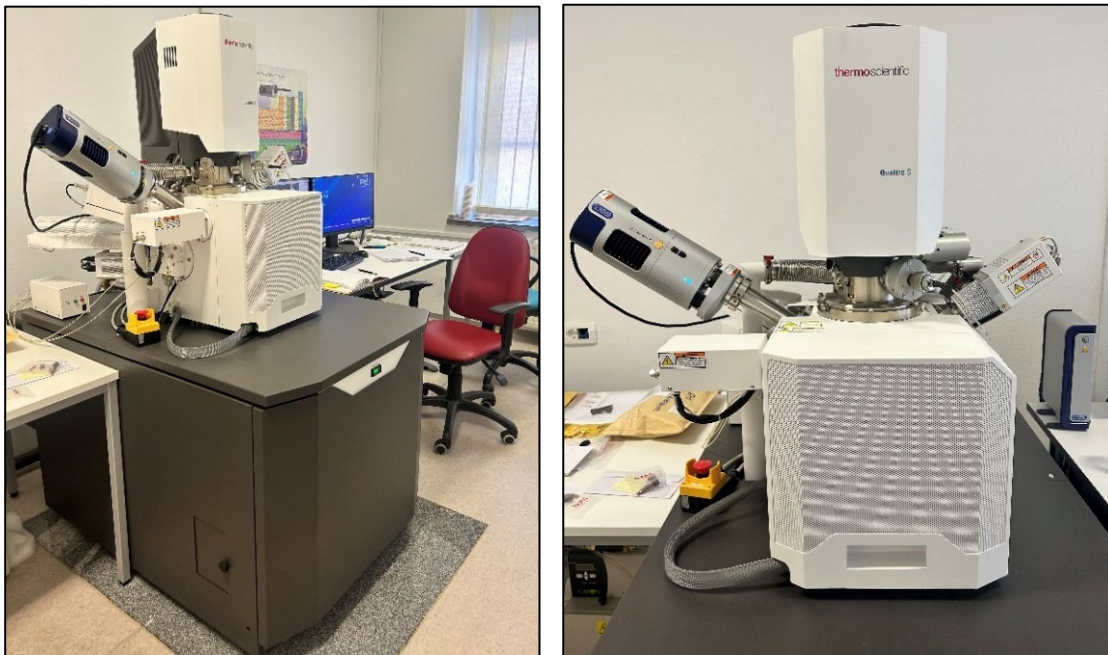
1*- Broj prolaza linije; 2*- Broj prolaza za popunjavanje

Linijski žlebovi (*engl. line - L*), druga tekstura, zamišljeni su tako da predstavljaju preklapajuća udubljenja. Linijska tekstura kreirana je sa ciljem da se postigne površinski uzorak sa većom površinom za dodir i mehaničko povezivanje. Linijska tekstura ostavarena je izvođenjem uzastopnih prolaza lasera duž međusobno upravnih linija na površini materijala.

Sledeća tekstura nazvana mix (M), čini kombinaciju dve prethodno pomenute teksture. Ukršteni linijski žlebovi orijentisani su pod uglovima od 45° i 135° i tako formiraju romboidne ćelije. U centru svake ćelije nalazi se kružno udubljenje prečnika jednakog prečniku teksture C, ali sa manjom gustinom raspoređenosti. Ova kombinacija linijsko-romboidnih žlebova i kružnih udubljenja stvara složen geometrijski uzorak sa izraženom simetrijom i funkcionalnim osobinama. Proces nastajanja teksture je isti kao kod prethodno opisanih tekstura. Površinska tekstura u obliku saća (*engl. honeycomb - H*) predstavlja pravilnu mrežu šestougaonih udubljenja, sa izraženom geometrijskom simetrijom. Ova forma teksture dobijena je periodičnim uklanjanjem materijala u heksagonalnom rasporedu, čime je ostvarena površina sa visokim stepenom regularnosti i karakterističnom topografijom.

3.5 Mikroskopska analiza topografije površine pripremljene za lepljenje

Thermo Scientific Quattro ESEM skenirajući elektronski mikroskop (SEM) je korišćen za analizu mikrostrukture površina nastalih različitim vrstama pripreme površina (slika 3.19). Mikroskopska analiza topografije površine rađena je na Naravoslovno tehniški fakultet Univerzitetu u Ljubljani, Slovenija. Testovi su izvedeni koristeći tehnike sekundarnih elektrona i povratno rasutih elektrona. Skenirajući elektronski mikroskop poseduje mogućnost hemijske analize putem energetsko disperzione spektroskopije (EDS).

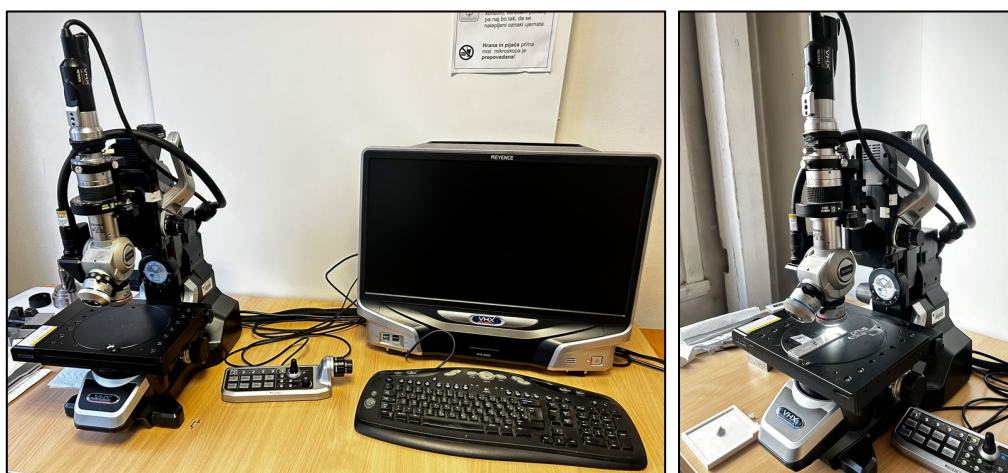


Slika 3.19 Skenirajući elektronski mikroskop model Thermo Scientific Quattro ESEM

Za analizu hemijskog sastava korišćena je EDS metoda pri kojoj su snimljeni spektri X-zraka dobijeni tretiranjem uzorka elektronskim snopom. Ovom metodom moguće je tačno utvrditi koji hemijski elementi su prisutni u materijalu i kako su međusobno raspoređeni.

Za analizu hemijskog sastava posebno su pripremljeni uzorci dimenzija 20 mm × 25 mm × 2 mm. Pre analize svi uzorci su očišćeni u ultrazvučnoj kadi, kako bi se uklonile površinske nečistoće koje mogu uticati na rezultate analize. Korišćen je rastvor etanola, čišćenje u trajanju od 5-10 minuta, nakon čega su uzorci isprani destilovanom vodom i osušeni u struji toplog vazduha.

Za analizu graviranja i merenja parametara lasera korišćen je digitalni optički mikroskop nove generacije Keyence VHX-6000 (slika 3.20). Mikroskop ima integrisanu kameru i softver za obradu slika koji može analizirati topografiju površine i slike materijala pri uvećanjima od 20x do 2000x. Optički mikroskop je korišćen kao ključni alat u analizi parametra lasera, dubine teksture, dimenzija, vizualizaciji mikroskopskih promena u strukturi ili lokalnih promena topografije nakon izlaganja laseru. Osim toga, optički mikroskop je korišćen u analizi površina nakon loma.

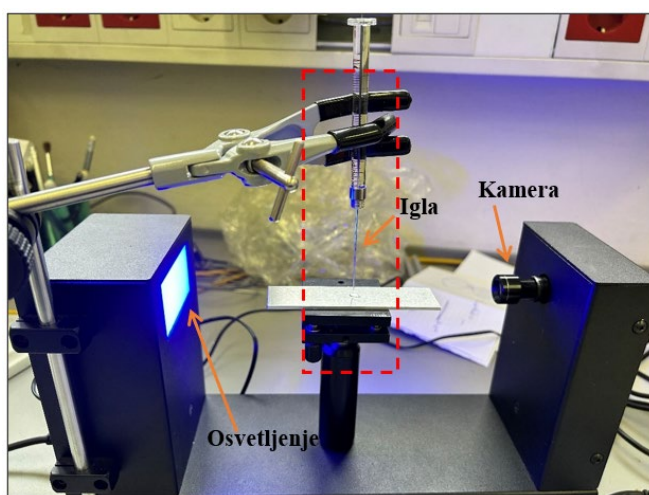


Slika 3.20 Optički mikroskop Keyence VHX-6000

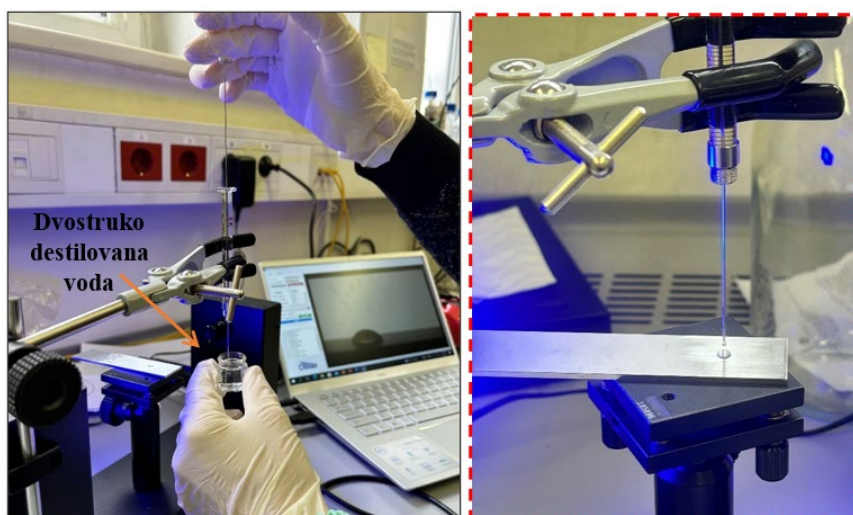
3.6 Merenje kontaktnog ugla

Kvašenje površina je procenjeno merenjem kontaktnog ugla korišćenjem dvostruko destilovane vode na sobnoj temperaturi da bi se ispitaio njen uticaj na adheziju dva adherenta (X5CrNi18-10 i EN AW 5754). Za merenje kontaktnog ugla korišćen je goniometar kontaktnog ugla proizvođača Osilla (slika 3.21). Nakon pripreme površine svi uzorci su podvrgnuti merenju kontaktnog ugla.

Kako bi se precizno izmerio kontaktni ugao, goniometar koristi kameru za snimanje kapljice tečnosti na uzorku. Osvetljenje je postavljeno tako da jasno osvetljava kapljicu i omogućava precizno praćenje njenog oblika. Iгла za kapljicu se koristi za precizno doziranje kapljice tečnosti na površinu uzorka. Kapljica treba biti dovoljno mala da se precizno izmeri njen oblik. Na svaku površinu nanete su po 5 kapi (približno 20 μL) na različitim mestima pripremljene površine. Goniometar je povezan sa računarom, koji komunicira sa korisnikom preko softvera za analizu *Osilla Contact Angle* (slika 3.22), koji na osnovu slike kapljice izračunava kontaktni ugao. Vrednost kontaktnog ugla se dobija pomoću algoritama koji analiziraju oblik kapljice i njen kontakt sa površinom. Sva merenja su obavljena na sobnoj temperaturi.



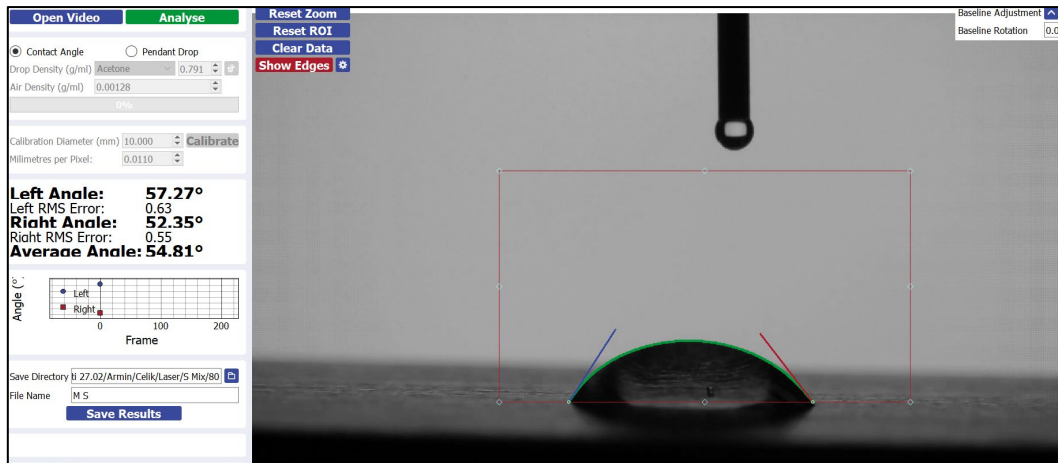
(a)



(b)

(c)

Slika 3.21 Prikaz (a) goniometra kontaktnog ugla Osilla, (b) načina uzimanja tečnosti, (c) detalja sa slike (a) - izgled kapljice na površini uzorka



Slika 3.22 Interfejs softvera Osilla Contact Angle kojim se vrši merenje kontaktnog ugla

Kako bi se simulirale stvarne industrijske primene i procenilo ponašanje površina sa laserskom teksturom u smislu adhezije, površine sa laserskom teksturom od 40 μm bile su izložene vazduhu okoline u različitim vremenskim periodima. Konkretno, površine od X5CrNi18-10 nerđajućeg čelika bile su izložene vazduhu okoline 3 dana, dok su aluminijumske površine bile izložene 12 dana.

3.7 Metode ispitivanja zalepljenog spoja

3.7.1 Vizuelna metoda ispitivanja

Vizuelna metoda je jedna od metoda ispitivanja bez razaranja (*engl. non-destructive testing methods*) i smatra se fundamentalnom naučnom metodom [155]. Vizuelna metoda ispitivanja zalepljenih spojeva je jednostavan i brz način pregleda spojeva kako bi se otkrile moguće greške i nedostaci koji su nastali tokom procesa lepljenja. Vizuelna metoda ispitivanja definiše se kao proces posmatranja koji se sprovodi golim okom (direktna metoda) ili uz pomoć odgovarajuće merne opreme (indirektna metoda). U ovoj doktorskoj disertaciji tokom vizuelnog ispitivanja analiziran je oblik i dimenzije zalepljenog spoja (dužina preklapanja, debljina sloja lepka, dužina i širina spoja, kao i paralelna i upravna orijentacija adherenata), kvalitet zalepljenog sloja (mehurići, diskontinuiteta sloja lepka, delaminacije, boja i homogenost- leptir test), kao i prisustvo izbačenog filma (veličina i pozicija). Za proveru dimenzija zalepljenog spoja korišćen je Mitutoyo 500-196-30, digitalno pomično merilo. Na slici 3.23 prikazana je provera dimenzije sloja lepka. Za proveru homogenosti i boje lepka urađen je tzv. leptir test.

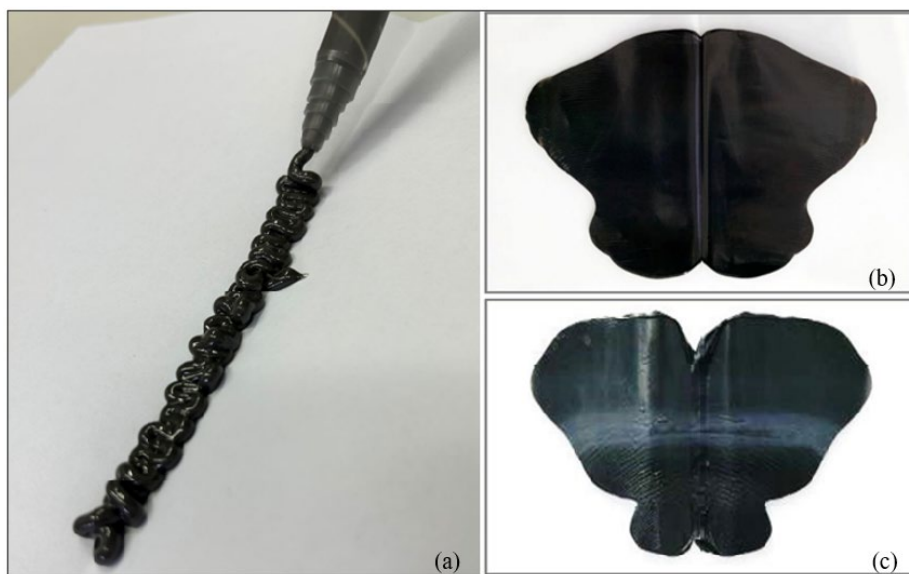


Slika 3.23 Prikaz provere debljine sloja lepka zalepljenog spoja

Vizuelna metoda iako nije standardizovana za sve tipove spojeva, koristi se za identifikaciju mogućih nedostataka i obezbeđivanje bezbednosti spoja pre nego što se primene preciznije metode ispitivanja koje često podrazumevaju razaranje uzoraka.

3.7.1.1 Leptir test za homogenost lepka

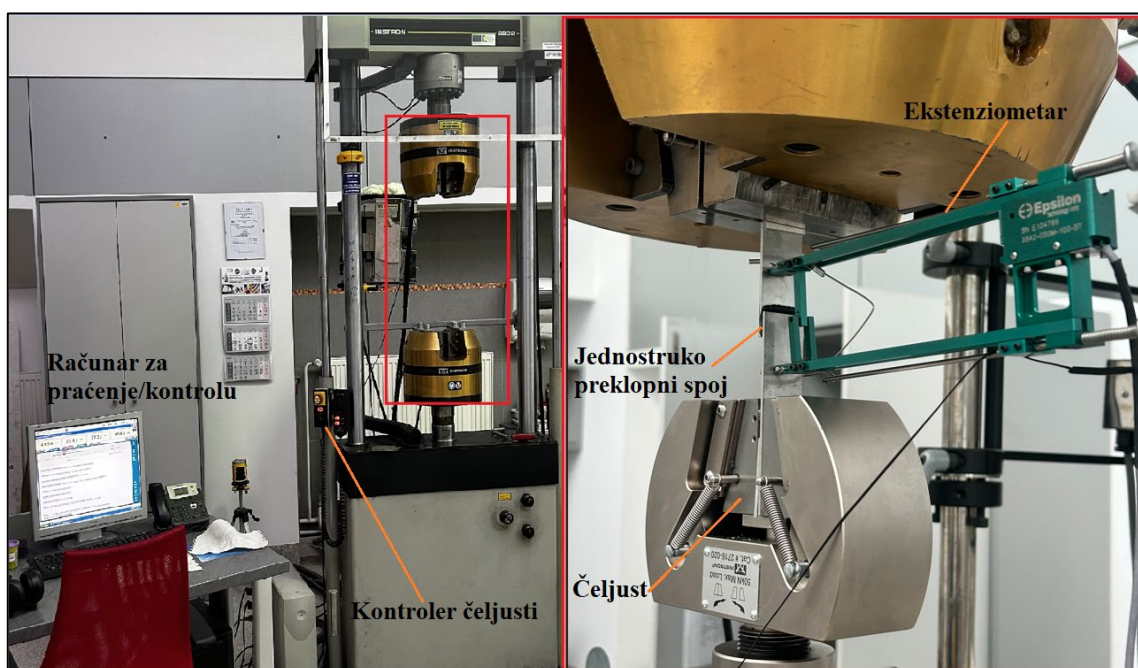
Korisna kvalitativna vizuelna provera za homogenost mešanog materijala (komponente A i B lepka) je leptir test (*engl. butterfly test*), koji se koristi kako bi se osigurala idealna svojstva primenjenog lepka. Leptir test sastoji se od nanošenja lepka u obliku trake na papir i presavijanja papira (slika 3.24 (a)). Otvaranjem papira, moguće je vizuelnom kontrolom osigurati da je boja istisnutog materijala uniformna. Lepak mora imati homogeni izgled i boju i ne sme da sadrži osušene čestice, bore ili mehuriće. Na slici 3.24 (b) prikazan je pozitivan test u slučaju idealnog mešanja lepka i negativan test na slici 3.24 (c), koji ukazuje na neadekvatno mešanje.



Slika 3.24 Leptir test: (a) naneti lepak i presaviti papir, otvoriti papir radi vizuelne provere: pozitivan leptir test (b) i negativan leptir test (c)

3.7.2 Eksperimentalno ispitivanje zalepljenih spojeva na smicanje pri zatezanju – pod dejstvom statičkog opterećenja

Ispitivanje zalepljenih jednostruko preklopnih spojeva na smicanje pri zatezanju sprovedeno je u skladu sa preporukama standarda ISO 4587 [156] na temperaturi od 23 °C i 50% relativne vlažnosti vazduha tj. u standardnim laboratorijskim uslovima. Ispitivanje je sprovedeno pomoću (servo-hidraulične) univerzalne kidalice INSTRON 8802 opsega 250 kN, sa kompjuterskom akvizicijom podataka, pri brzini ispitivanja od 1 mm/min. Najmanje dva uzorka po tipu spoja (odnosno pripreme) su pripremljena i testirana do potpunog otkaza. Pomeranje je mereno pomoću kontaktnog ekstenziometra proizvođača Epsilon Technology model 3542-050M-100-ST, sa dužinom mernog dela od 50 mm i opsegom merenja od +100%/-10% (slika 3.25).

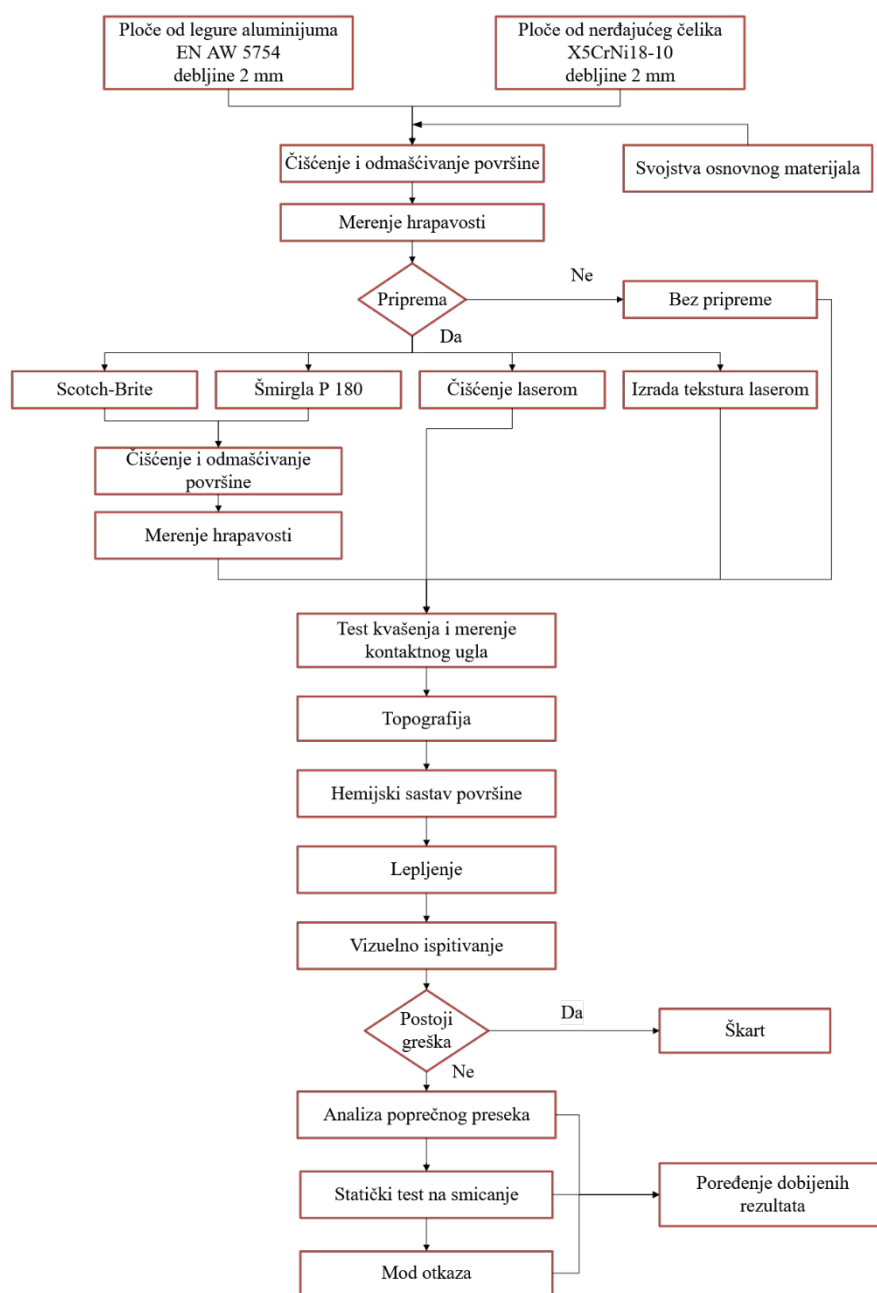


Slika 3.25 Dispozicija pri ispitivanju jednostruko preklopnog testa na Instron 8802

Za potrebe ispitivanja na smicanje ukupno je zalepljeno 162 uzorka (27 različito pripremljenih uzoraka \times 3 tipa lepka \times 2 materijala). Dimenzije zalepljenih aderenata za ispitivanje na smicanje prikazane su na slici 2.19 (poglavlje 2.4.2 ove disertacije), dok je izgled uzoraka nakon očvršćavanja prikazan na slici 3.26. Procedura ispitivanja na smicanje pri zatezanju jednostruko preklopnog spoja prikazana je na slici 3.27.



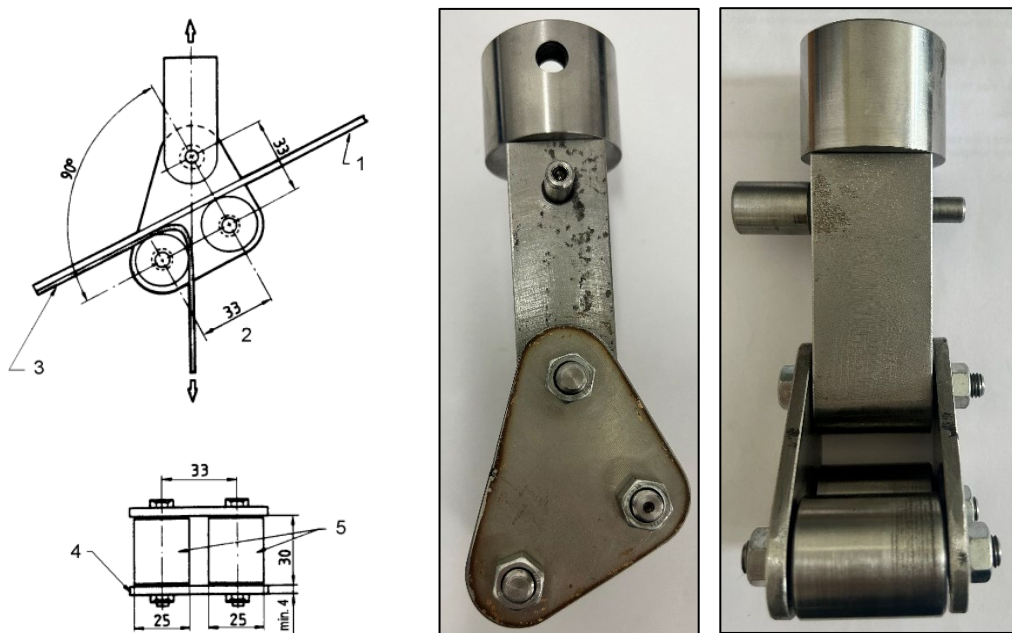
Slika 3.26 Jednostruko preklopni uzorci od legure aluminijuma nakon očvršćavanja



Slika 3.27 Procedura ispitivanja na smicanje zalepljenog spoja adherentata od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 i legure aluminijuma EN AW 5754

3.7.3 Eksperimentalno ispitivanje zalepljenih spojeva na ljuštenje – pod dejstvom statičkog opterećenja

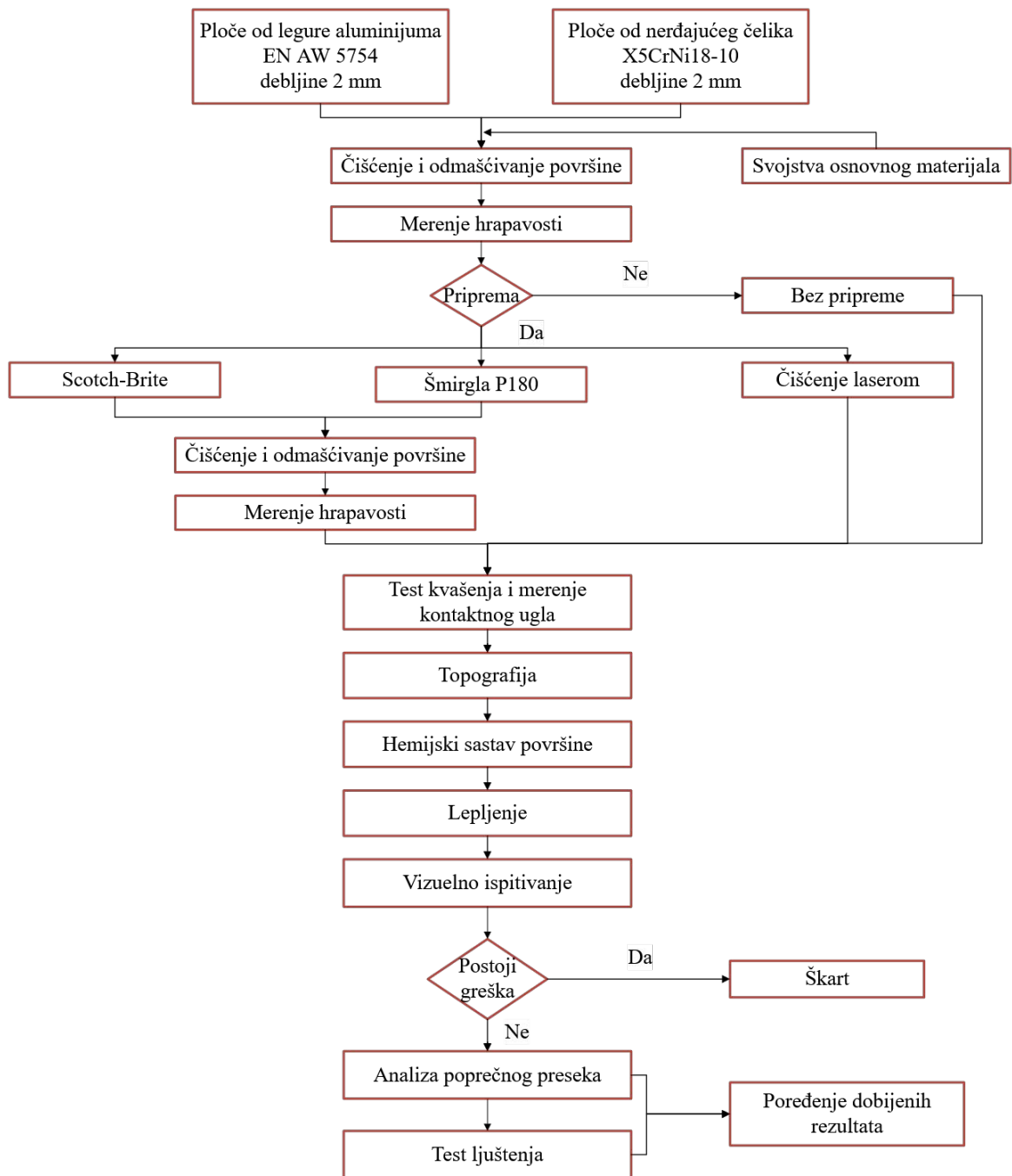
Ispitivanje na ljuštenje metodom pokretnog valjka izvedeno je na testnoj mašini Zwick 7250 opsega 250 kN, pri brzini ispitivanja od 100 mm/min. Testovi statičke čvrstoće sprovedeni su u laboratorijski kontrolisanim uslovima. Za potrebe ispitivanja, a prema standardu SRPS EN 1464 [140], projektovan je i izrađen alat za kidalicu. Alat za kidalicu prikazan na slici 3.28 služi za podupiranje uzoraka.



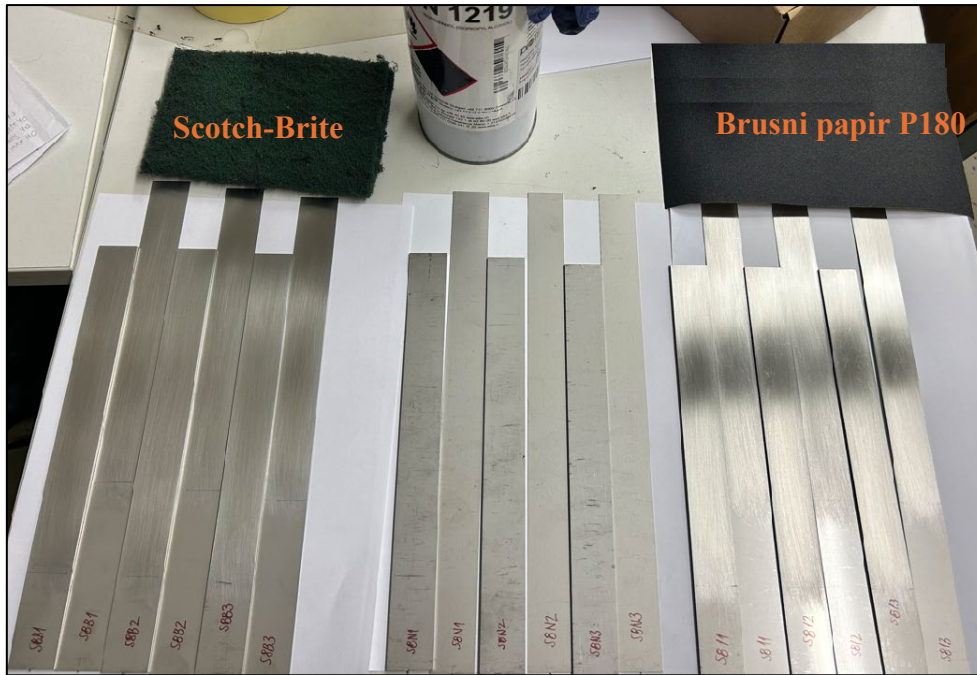
Slika 3.28 Dimenzije i izgled alata za ispitivanje ljuštenja [141]: 1-kruti adherent, 2- zona ljuštenja, 3- fleksibilni adherent, 4- konstrukcijski čelik, 5- valjak

Procedura ispitivanja na ljuštenje metodom pokretnog valjka prikazana je na slici 3.29. Postupak navedenih priprema površina sa slike 3.29 detaljno je opisan u poglavlju 3.4. Dimenzije uzoraka za ispitivanje ljuštenja metodom pokretnog valjka prikazane su na slici 2.22 (poglavlje 2.4.3 ove disertacije).

Pripremljeno je i zalepljeno po tri uzoraka nakon svake pripreme površine, nakon čega su uzorci ispitani do potpunog otkaza. Ukupno je zalepljeno 72 uzoraka (4 različitih priprema površina sa 3 ponavljanja \times 3 tipa lepka \times 2 materijala). Izgled pripremljenih uzoraka, proces nanošenja lepka i ispitivanja ljuštenja metodom valjaka prikazan je na slici 3.30.



Slika 3.29 Procedura ispitivanja ljuštenja metodom pokretnog valjka adhirenata od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 i legure aluminijuma EN AW 5754



(a)



(b)

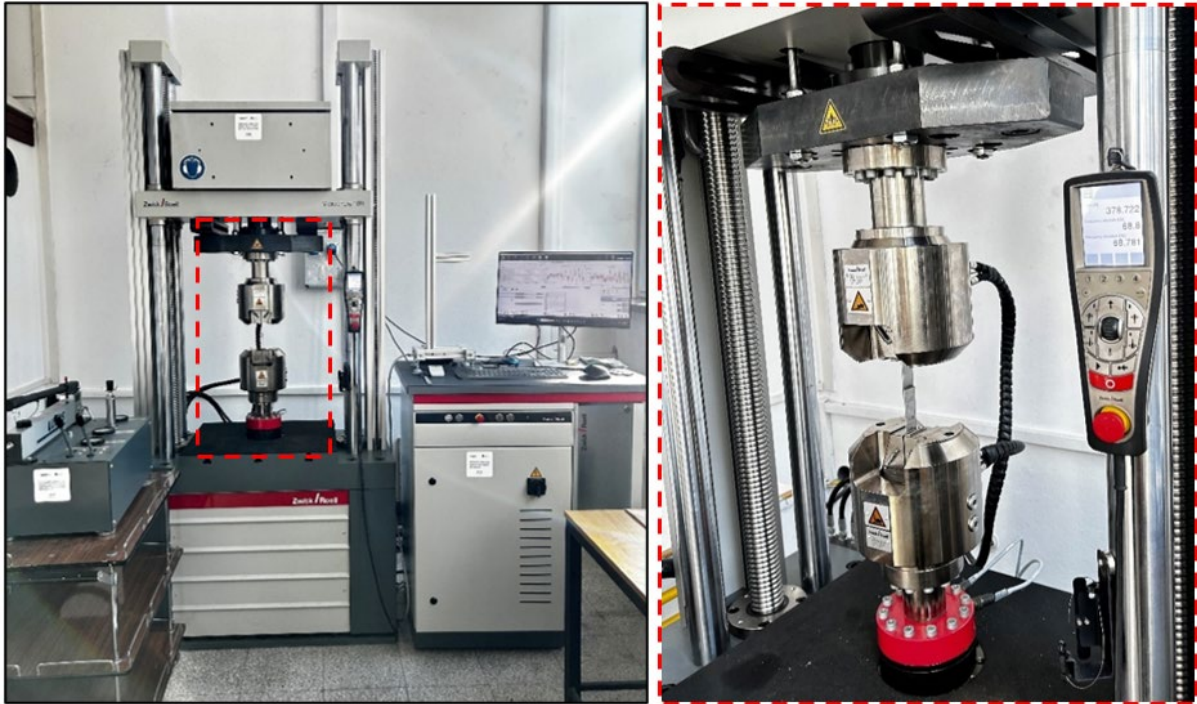


(c)

Slika 3.30 Prikaz (a) pripravljenih uzoraka od nerđajućeg čelika pre lepljenja, (b) proces nanošenja lepka i (c) ispitivanje ljuštenja metodom pokretnog valjka

3.7.4 Eksperimentalno ispitivanje zalepljenih spojeva na smicanje pri zatezanju – pod dejstvom cikličnog opterećenja

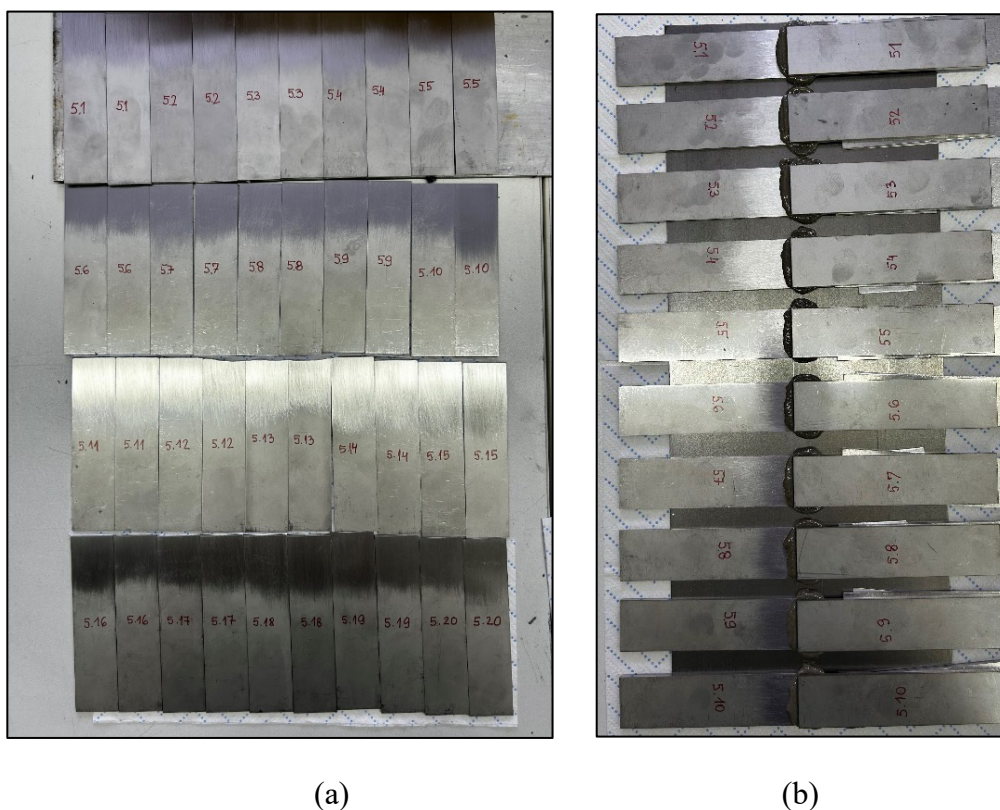
Ispitivanje zamora lepкова na smicanje pri zatezanju urađeno je s ciljem određivanja Velerove S-N krive na visoko-frekventnom pulzatoru ZwickRoell Vibrophore 100, opsega 100 kN (slika 3.31). Ispitivanje pod dejstvom cikličnog opterećenja rađeno je u Laboratoriji na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Mariboru, Slovenija.



Slika 3.31 Prikaz ispitivanja jednostruko zalepljenih uzoraka na visoko-frekventnom pulzatoru ZwickRoell Vibrophore 100

Za potrebe ispitivanja na zamor jednostruko zalepljenih spojeva na smicanje pri zatezanju odabrana je priprema površine šmirglom granulacije P180, a podloge od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 zalepljene su lepkom najnovije generacije, još uvek nedovoljno istražen u oblasti zamora lepкова SikaFast®-580 (2K). Postupak pripreme površina šmirglom P180 detaljno je opisan u poglavlju 3.4. Pripremljeno je i zalepljeno ukupno 20 uzoraka, prikaz epruveta dat je na slici 3.32. Nakon lepljenja, uzorci su ostavljeni na očvršćavanje prema specifikaciji proizvođača dve nedelje na temperaturi od 23 °C, a nakon toga podvrgnute su ispitivanju.

Tokom ispitivanja na zamaranje koeficijent asimetrije ciklusa, koji predstavlja odnos vrednosti opterećenja bio je $R = F_{min}/F_{max} = 0,1$, dok je frekvencija opterećenja iznosila 60 Hz. Tokom ispitivanja, broj ciklusa opterećenja do loma je zapisan za svaku epruvetu, a kriterijumom otkaza smatrao se lom u lepku. Dok je kriterijum za određivanje trajne dinamičke čvrstoće bio broj ciklusa 10^6 .



Slika 3.32 Prikaz (a) pripremljenih podloga brusnim papirom P180 i (b) zalepljenih aderenata od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10

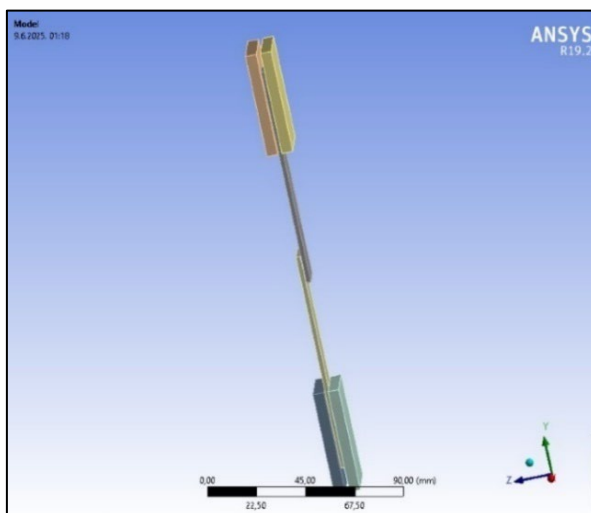
Prve tri epruvete su najpre statički opterećene, kako bi se odredila maksimalna sila na osnovu koje bi se definisala šema opterećivanja uzoraka. Opterećenja za ispitivanje zamora su odabrana prema ASTM i SRPS [144, 145] procedurama (50% maksimalnog smicajnog opterećenja kao početno) i razmatrani su spektri za analizu ponašanja zamora pri opterećenjima većim od 50% i opterećenjima manjim od 50% [157]. Vrednosti sila F_{max} i F_{min} prikazane su u tabeli 3.6.

Tabela 3.6 Definisana šema za ispitivanje zamora zalepljenih spojeva

F_{max} (kN)	F_{min} (kN)	F_{max} (kN)	F_{min} (kN)	F_{max} (kN)	F_{min} (kN)
4	0,4	3	0,3	2,4	0,24
3,8	0,38	2,8	0,28	2,4	0,24
3,6	0,36	2,8	0,28	2,3	0,23
3,4	0,34	2,6	0,26	2,2	0,22
3,2	0,32	2,6	0,26	2	0,2
3	0,3	2,4	0,24		

3.7.5 Numerička analiza jednostruko preklopnih zalepljenih spojeva

Numeričke simulacije zalepljenih jednostruko preklopnih spojeva sprovedene su korišćenjem metode konačnih elemenata (MKE) u softveru ANSYS Workbench. U cilju validacije numeričkog modela analiza MKE je usklađena sa uslovima eksperimentalnih ispitivanja smicanja pri zatezanju. Analiza je obuhvatila tačnu geometriju spoja (slika 3.33), materijalna svojstva adherenata EN AW 5754 i lepkove (SikaFast®-580, SikaPower®-880 i SikaPower®-492 G), prema specifikaciji proizvođača (tabela 3.7).

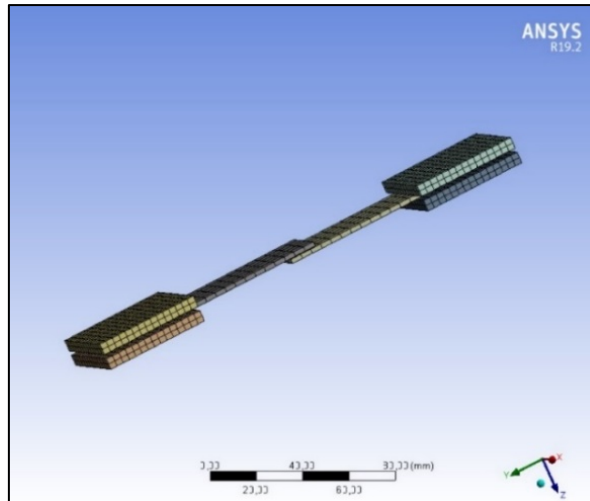


Slika 3.33 3D model jednostruko preklopnog zalepljenog spoja

Tabela 3.7 Elastična svojstva adherenta i lepkova [55, 56, 57]

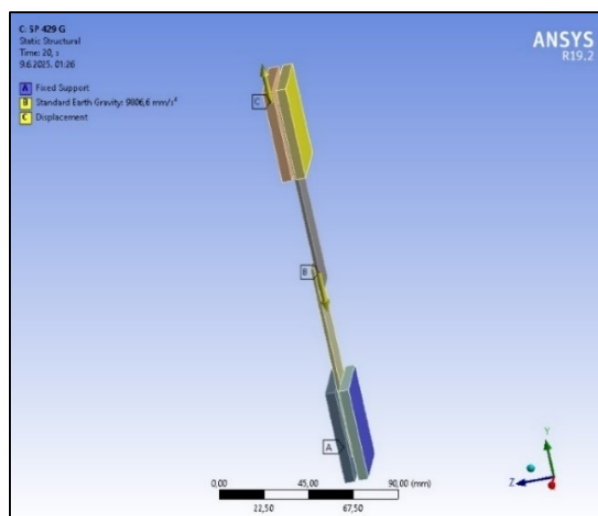
Materijali	E (GPa)	ν (-)
EN AW 5754	70	0,33
SikaFast®-580	900	0,3
SikaPower®-880	1900	0,34
SikaPower®-492G	1600	0,38

Za generisanje mreže konačnih elemenata koriste se elementi višeg reda ili SOLID 186. Mreža je generisana sa 13116 čvorova koji formiraju 2042 konačnih elementa, kao što je prikazano na slici 3.34 [158].



Slika 3.34 Generisana mreža konačnih elemenata za ispitivanje na smicanje jednostruko preklopnog spoja pri zatezanju

Parametri kvaliteta mreže i konvergencija rezultata praćeni su kako bi se dobili validni rezultati analize konačnih elemenata. U analizi je primenjen kontaktni model tipa „bonded“, u skladu sa definicijom u ANSYS Workbench. Ovakav pristup podrazumeva idealno spojeno ponašanje između svih kontaktnih površina, bez relativnog pomeranja ili odvajanja. Konkretno, kontakt je definisan između uzoraka i mehanizma za stezanje, kao i između sloja lepka i adherenata od nerđajućeg čelika ili legure aluminijuma. Kontaktna krutost (*engl. contact stiffness*) nije bila fiksna, već je ažurirana u svakoj iteraciji numeričkog proračuna, čime je omogućeno stabilnije konvergovanje rešenja i praćenje ponašanja spoja pod opterećenjem. Ovakav model omogućava pouzdanu evaluaciju naponsko-deformacionog stanja u kritičnim zonama zalepljenog spoja.



Slika 3.35 Opterećenja i granični uslovi za ispitivanje smicanja pri zatezanju

Opterećenja i granični uslovi za postavku analize prikazani su na slici 3.35. Donje ploče za hvatanje su bile fiksirane, dok su gornje pomerane da bi se simulirali realni uslovi tokom ispitivanja smicanja pri zatezanju. Virtuelni senzor sile je pričvršćen za fiksni nosač da bi se dobila sila reakcije izazvana pomeranjem uzorka. Takođe je uzeta u obzir i sila gravitacije koja deluje na sistem.

3.7.6 Analiza poprečnog preseka zalepljenih spojeva

U ovom istraživanju, za analizu otkaza testnih uzoraka korišćena je skenirajuća elektronska mikroskopija (SEM) u kombinaciji sa tehnikom analize poprečnog preseka. Za analizu poprečnog preseka (*engl. cross-section*) pripremljeni su uzorci dimenzija 20 mm × 25 mm × 2 mm. Zalepljen je po jedan uzorak za svaku pripremu, lepak i materijal, ukupno 72 epruvete. Za analizu poprečnog preseka zalepljenih spojeva pripremljeni su uzorci ubacivanjem u epoksidnu smolu, koji su zatim očišćeni etanolom (slika 3.36). Ispitivanja su sprovedena korišćenjem skenirajućeg elektronskog mikroskopa Thermo Scientific Quattro ESEM. Zbog neprovodnosti epoksi smola, pre analize uzorka na svaki uzorak je zalepljena bakarna traka, kao što je prikazano na slici 3.36. Poprečni preseci zalepljenih aderenata dodatno su posmatrani i pod optičkim mikroskopom Keyence VHX-6000.



Slika 3.36 Priprema i izgled uzorka za analizu poprečnog preseka zalepljenih spojeva

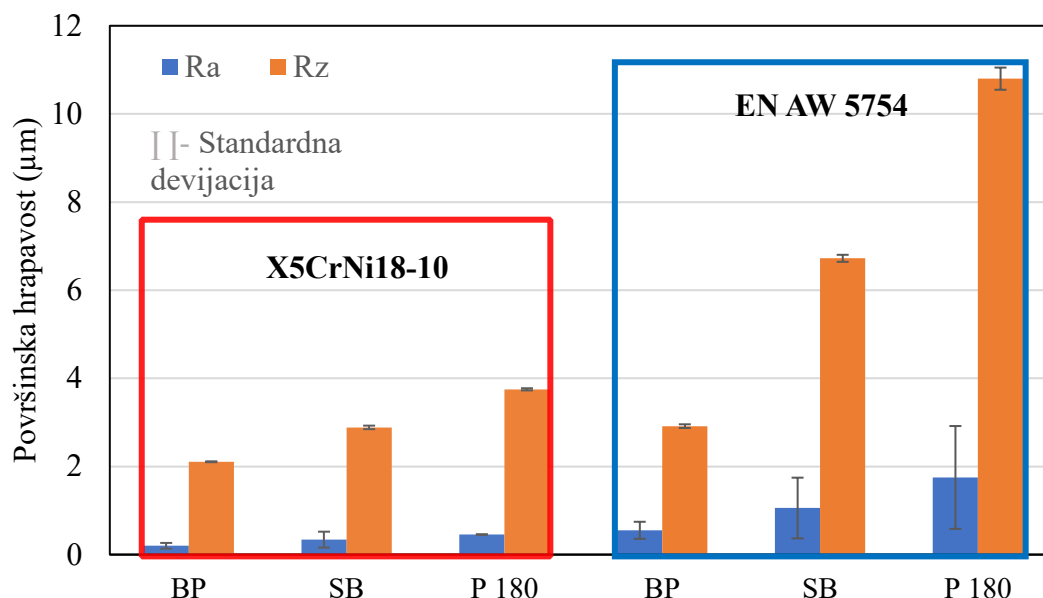
3.7.7 Analiza moda otkaza

Nakon statičkog ispitivanja analizirane su površine nakon otkaza. Uzorci su fotografisani digitalnom kamerom visoke rezolucije i obrađeni softverom za obradu slike ImageJ (1.8.0., Nacionalni institut za zdravlje, Bethesda, MD, SAD). Ova analiza je značajna jer pomaže u razjašnjavanju otkaza i donošenju zaključaka o kvalitetu zalepljenih spojeva. Za klasifikaciju otkaza korišćen je standard SRPS EN ISO 10365 [148] kako bi se bolje razumeli rezultati mehaničkih testova zalepljenih spojeva.

4. Rezultati i diskusija rezultata

4.1 Analiza merenja površinske hrapavosti

Površinska hrapavost površine podloga procenjena je korišćenjem dva parametara hrapavosti: srednje hrapavosti, Ra i srednje visina profila, Rz . Merenja su vršena na nekoliko tačaka u dva međusobno upravna pravca, uzdužno i tangencijalno. Merenja površinske hrapavosti su obavljena na tri različita mesta (u centru, na ivici i nasumično) za svaki uzorak. Za pripremu podloga laserskim graviranjem definisane su dve dubine od 40 μm i 80 μm . Slika 4.1 prikazuje rezultate merenja za dva osnovna parametra hrapavosti površine Ra i Rz u odnosu na različite metode pripreme površine (BP- bez pripreme, SB- Scotch- Brite, P180- brusni papir).

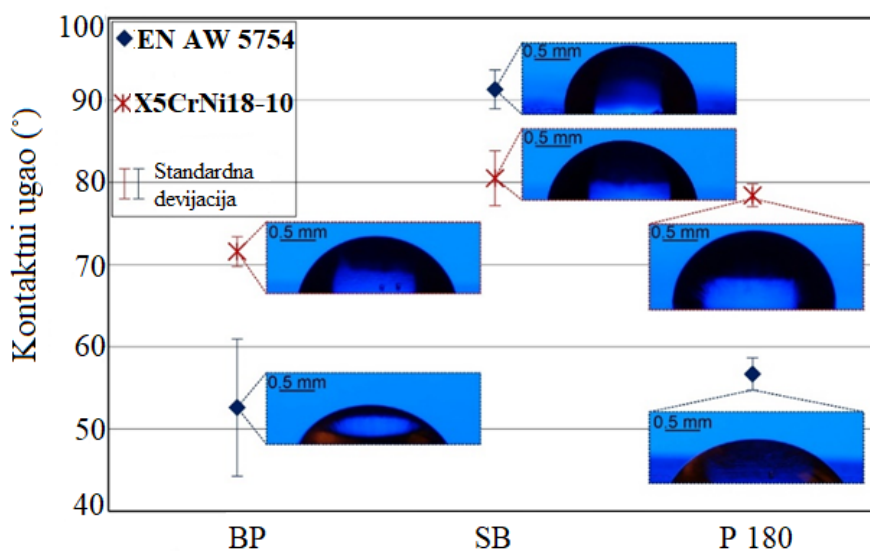


Slika 4.1 Prosečna vrednost površinske hrapavosti nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 i legure aluminijuma EN AW 5754 u zavisnosti od površinske pripreme

U slučaju legure aluminijuma EN AW 5754, postignuto je značajno povećanje površinske hrapavosti za uzorke pripremljene brusnim papirom P180 u poređenju sa uzorcima pripremljenim Scotch-Brite-om. Prosečne vrednosti Ra i Rz bile su $\pm 1,75 \mu\text{m}$ (1,46–1,91 μm) i $\pm 10,8 \mu\text{m}$ (8,65–12,33 μm), respektivno. Za nerđajući čelik X5CrNi18-10, prosečne vrednosti Ra i Rz bile su $\pm 0,45 \mu\text{m}$ (0,43–0,48 μm) i $\pm 3,75 \mu\text{m}$ (3,74–3,76 μm), respektivno. Kao rezultat toga, površine oba materijala pripremljene brusnim papirom P180 su pokazale veću hrapavost površine.

4.2 Test kvašenja i merenje kontaktnog ugla

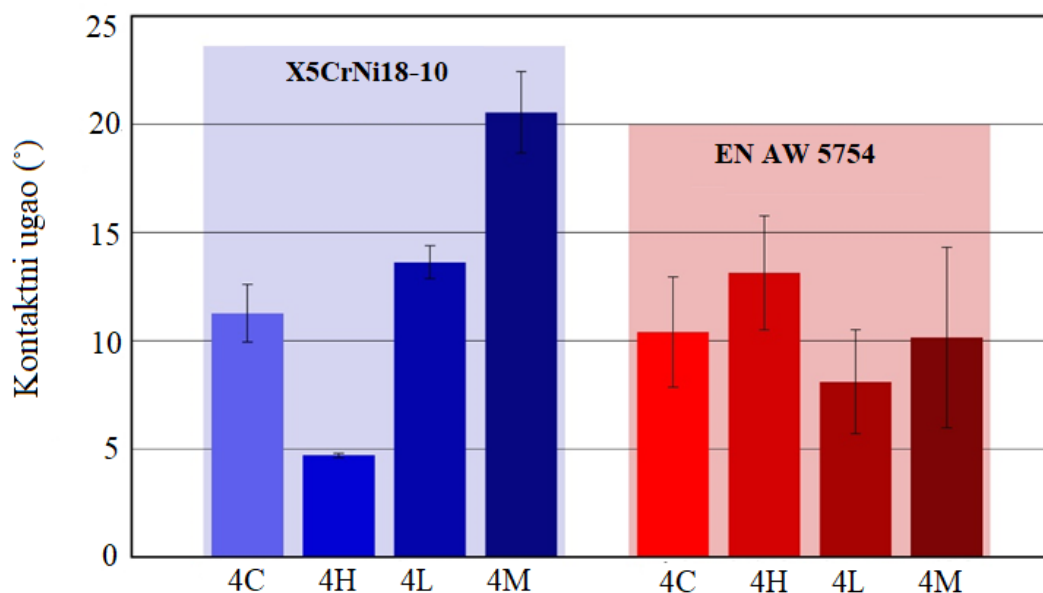
Kvašenje površina je procenjeno merenjem statičkog kontaktnog ugla, korišćenjem dva puta destilovane vode, sa ciljem da se ispita njen uticaj na adheziju dve podloge (X5CrNi18-10 i EN AW 5754). Na slici 4.2 prikazane su prosečne vrednosti kontaktnog ugla dobijene različitim površinskim pripremama (Scotch-Brite i brusni papir P180), kao i vrednosti kontaktnog ugla kod uzoraka bez prethodne pripreme površine. Rezultati pokazuju da su merenja kontaktnog ugla na površinama bez pripreme u skladu sa vrednostima prijavljenim u prethodnim studijama za oba korišćena materijala [159, 42]. Dok su površine tretirane Scotch-Brite-om pokazale veće kontaktne uglove, što ukazuje na stanje skoro neutralnog kvašenja, u poređenju sa površinama tretiranim brusnim papirom P180. Ovo odstupanje se može pripisati različitim stepenima hrapavosti površine koje prouzrokuju ove dve pripreme. Konkretno, brusni papir P180, sa svojom krupnijom granulacijom, dovodi do dubljih žlebova i veće hrapavosti površine. Prema teorijama Yang, Wenzel i Cassie-Baxter modela, povećana hrapavost može doprineti boljem kvašenju i mehaničkom povezivanju, što rezultuje poboljšanom prionljivošću. Shodno tome, povećana hrapavost povećava ukupnu površinsku energiju, olakšavajući kvašenje kapljica tečnosti što dovodi do nižeg kontaktnog ugla.



Slika 4.2 Prosečne vrednosti kontaktnog ugla u zavisnosti od primenjene pripreme površine i materijala podloge

Nakon procesa izrade laserske teksture površine od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 i legure aluminijuma EN AW 5754 pokazuju super-hidrofilno stanje kvašenja, koje karakterišu kontaktni uglovi blizu 0° . Da bi se simulirale industrijske primene u stvarnom svetu i procenilo ponašanje ovih površina sa laserskom teksturom u smislu adhezije, površine sa laserskom

teksturom od 40 μm bile su izložene vazduhu okoline tokom različitog trajanja. Naime, površine od nerđajućeg čelika su bile izložene vazduhu okoline 3 dana, dok su aluminijumske površine bile izložene 12 dana. Kontaktni uglovi izmereni na ovim površinama nakon navedenih vremenskih intervala prikazani su na slici 4.3.



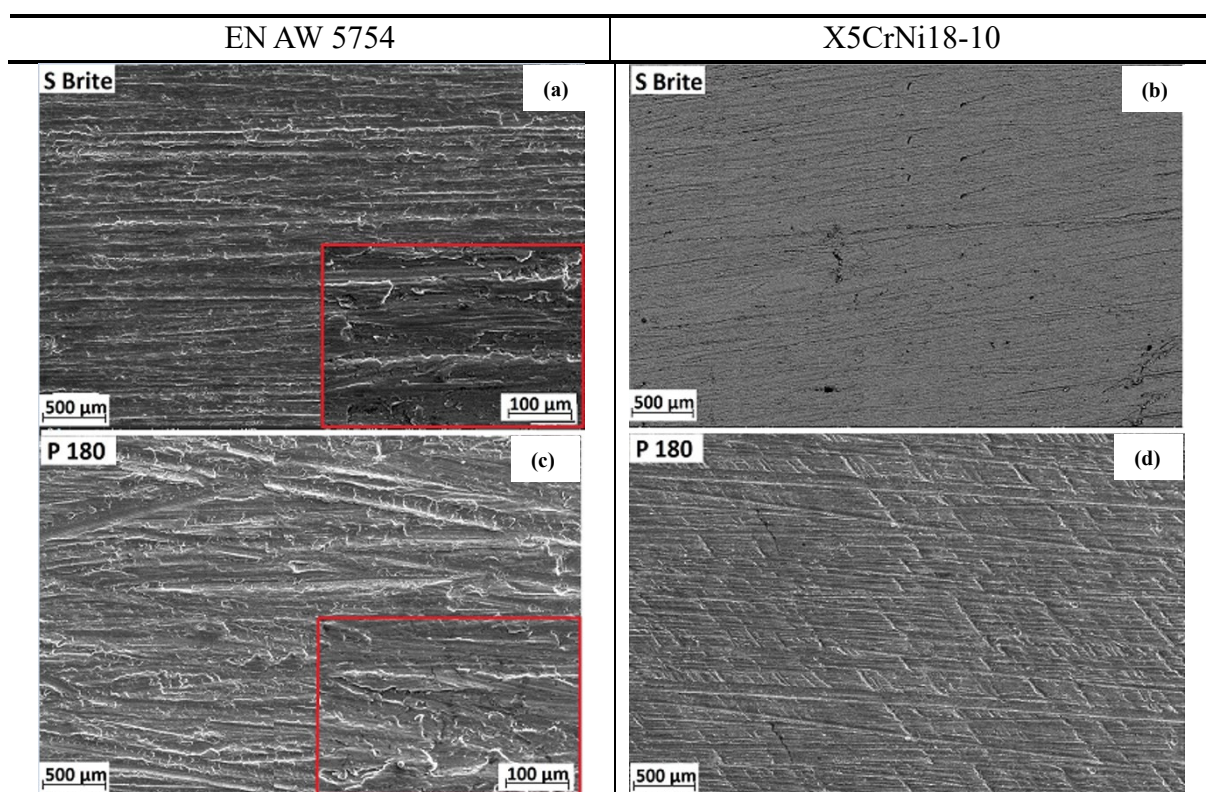
Slika 4.3 Prosečne vrednosti kontaktnih uglova na nerđajućem čeliku X5CrNi18-10 posle 3 dana od graviranja, na aluminijumu EN AW 5754 12 dana nakon laserskog graviranja tekstura

Zapažanja iz rezultata ukazuju na postepeno povećanje kontaktnih uglova tokom vremena, što označava prelazak iz početnog super-hidrofilnog stanja u hidrofilno stanje nakon nekoliko dana izlaganja vazduhu okoline. Ova promena u kvašenju je prijavljena u brojnim prethodnim studijama i može se pripisati apsorpciji hidrofobnih zagađivača prisutnih u atmosferi, što je saglasno istraživanjima u [160, 161, 162, 163].

Pored toga, slika 4.3 otkriva primetan disparitet u stopi povećanja kontaktnog ugla tokom vremena između površina od nerđajućeg čelika i aluminijuma. Na primer, ukoliko uporedimo podloge nakon teksture 4M, kontaktni ugao na površini nerđajućeg čelika dostiže $20,6^\circ$ nakon trodnevnog izlaganja vazduhu okoline, dok uzorak 4M na leguri aluminijuma pokazuje kontaktni ugao od $10,2^\circ$ nakon 12-dnevnog perioda izlaganja. Ovo odstupanje u promeni kontaktnog ugla, na površinama od nerđajućeg čelika koje pokazuju izraženiju promenu u kraćem vremenu izlaganja vazduhu okoline u poređenju sa aluminijumskim površinama, može se pripisati različitim tendencijama oksidacije i promenljivoj slobodnoj energiji ova dva materijala.

4.3 Mikroskopska analiza topografije površine pripremljene za lepljenje

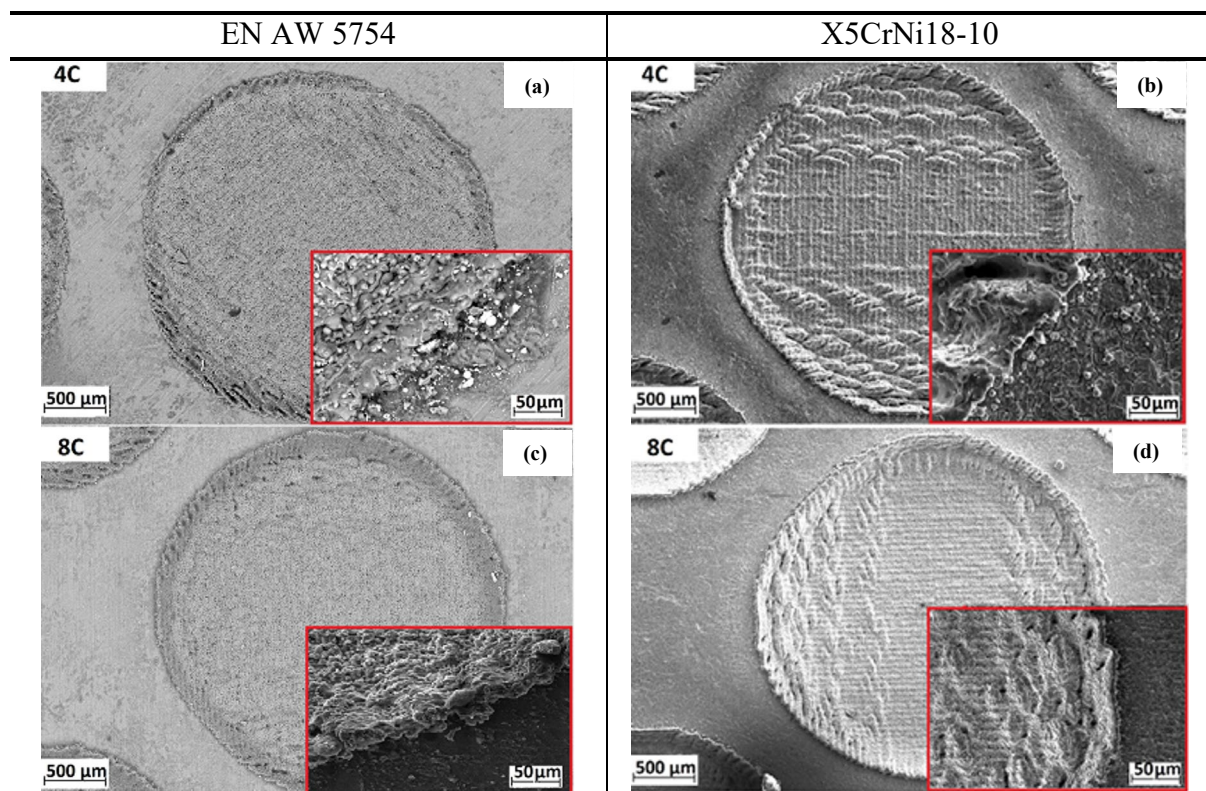
Na slikama 4.4 do 4.8 prikazane su SEM i mikroskopske fotografije sa varijacijom fokusa različitih priprema površina: ručno brušenje (Scotch-Brite-om i brusni papir P180) i četiri površine sa laserskom teksturom u dve dubine (40 μm i 80 μm). Brusni papir P180, sa svojom grubljom granulacijom, dovodi do dubljih brazdi i veće hrapavosti površine u odnosu na uzorke koji su pripremljeni Scotch-Brite-om (slika 4.4 (a) i (c)). Nasuprot tome, na površinama uzoraka koji su bili izloženi laserskim impulsima može se uočiti intenzivno zagrevanje i proces topljenja, prskanja i očvršćavanja materijala. Ovo je rezultiralo formiranjem obrađenog sloja na površini neobrađenog materijala u obliku izbočina oko tekstura, na šta su i ukazali C. Yang i saradnici [164] u svom radu. Ovo može uticati i dovesti do odstupanja u formi tekstura, što može imati i pozitivne i negativne efekte.



Slika 4.4 SEM slike površina: (a, b) ručno brušenje Scotch-Brite-om, (c, d) ručno brušenje brusnim papirom P180

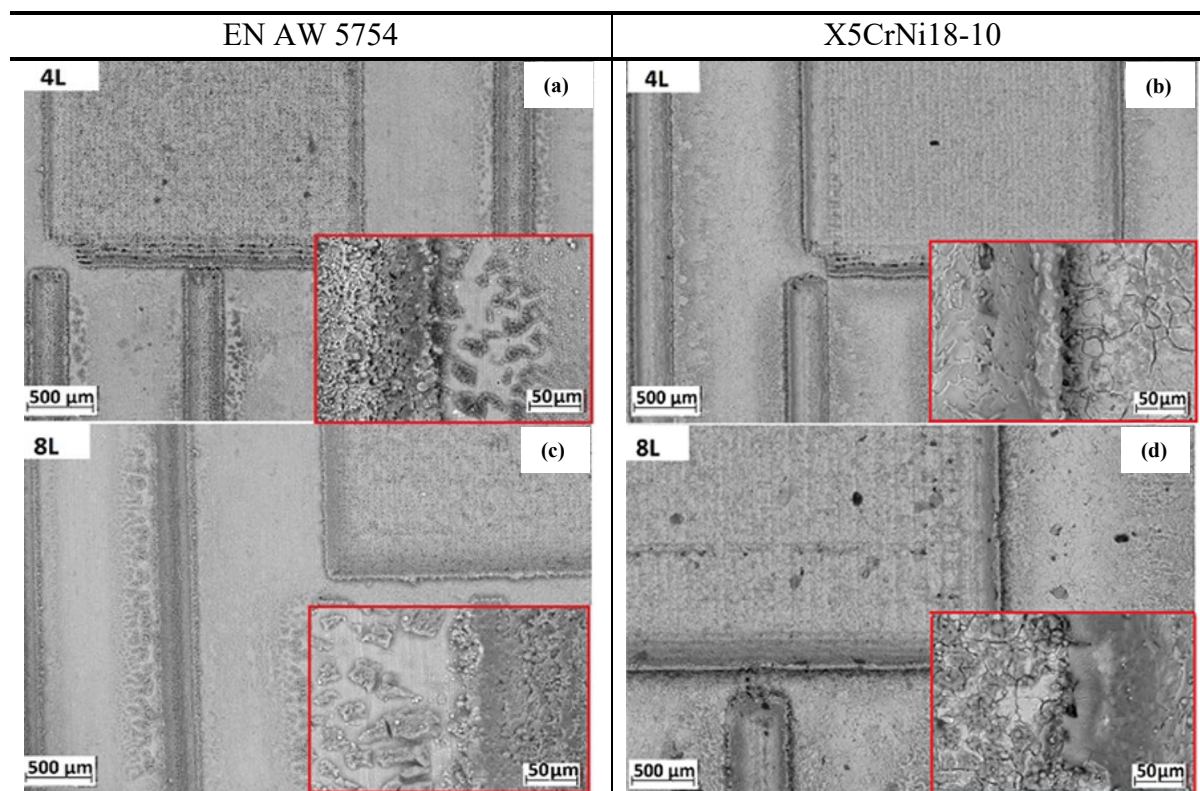
Prvi gravirani uzorak, kružna udubljenja, karakterišu mikro-rupe od 40 μm (slika 4.5 (a) i (b)) i dubine 80 μm (slika 4.5 (c) i (d)). Tokom laserskog graviranja, došlo je do istiskivanja rastopljenog materijala iz mikro-rupa formiranih na površini. Taj rastopljeni materijal izbačen iz središta laserskog impulsa ka okolini dolazi u kontakt sa okolnim delovima površine, ali i sa

drugim tokovima rastopljenog materijala koji su izbačeni u neposrednoj blizini. U fazi hlađenja i očvršćavanja, ovaj materijal se delimično vezao za okolnu površinu, formirajući čvrstu strukturu koja menja lokalnu topografiju. Ovo može pomoći pri mehaničkom povezivanju, ali takođe može dovesti do promena u kvašenju i povećanja ukupne hrapavosti površine. Na ovaj efekat posebno su ukazali autori P. Maressa i dr. [109] u svom radu, pri čemu su istakli da adhezija između sloja ponovo rastopljenog i očvršćenog materijala tzv. redeponovanog sloja (engl. *recast*) i osnovnog materijala može biti manja odnosno slabija nego njegova adhezija sa lepkom.



Slika 4.5 SEM slike površina: (a, b) 4C- kružna udubljenja dubine 40 μm , (c, d) 8C- kružna udubljenja dubine 80 μm

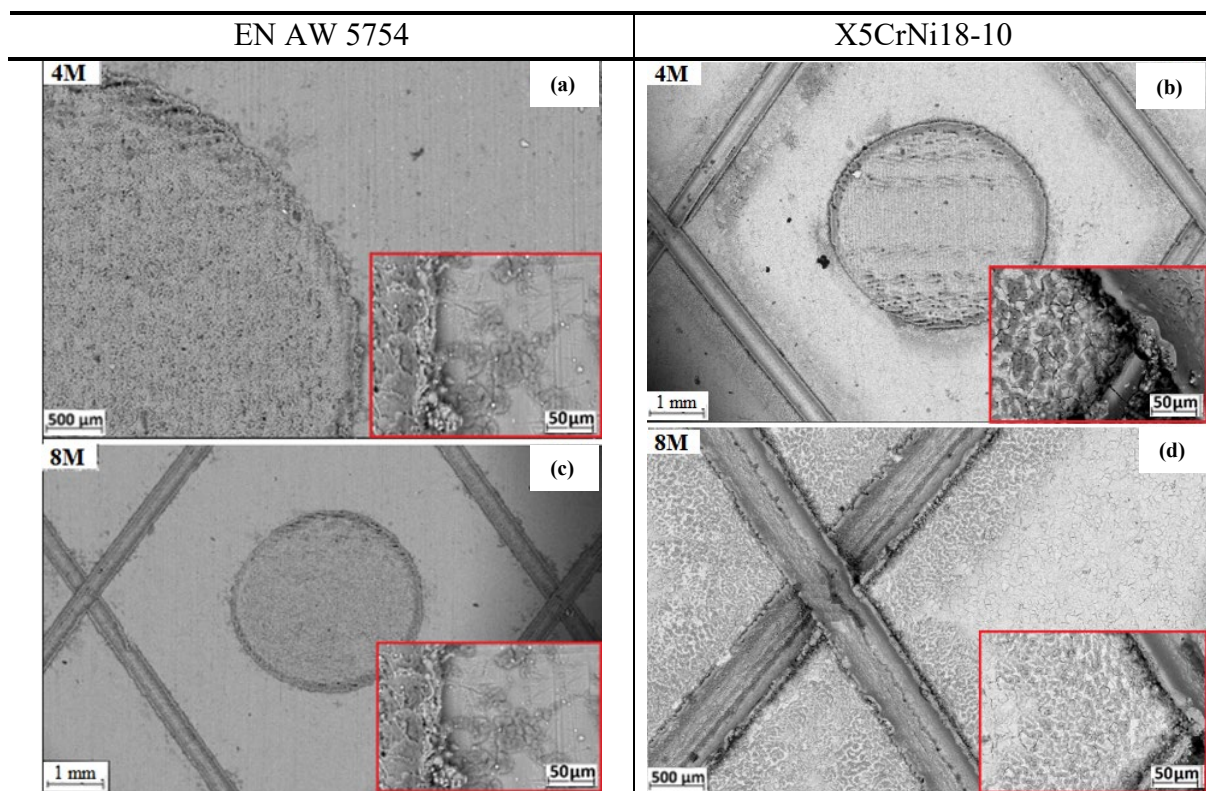
Tekstura sa linijskim žlebovima (slika 4.6) je pokazala dobro definisana udubljenja na površini i odstupanja od željenih oblika usled obrađenog sloja na površini materijala. Razmak između linija bio je 0,5 mm, a svaka linija je bila široka 0,1 mm, što je imalo značajan uticaj na topografiju površine. Sa povećanjem dubine, pojavio se veliki broj izbočina na leguri aluminijuma (slika 4.6 (c)), kao i šiljaka i mehura na nerđajućem čeliku (slika 4.4 (d)), naročito u blizini linijskih žlebova. Ove nepravilnosti ukazuju na fraktalnu strukturu obrađenog materijala, što može izazvati razlike u površinskom kvašenju.



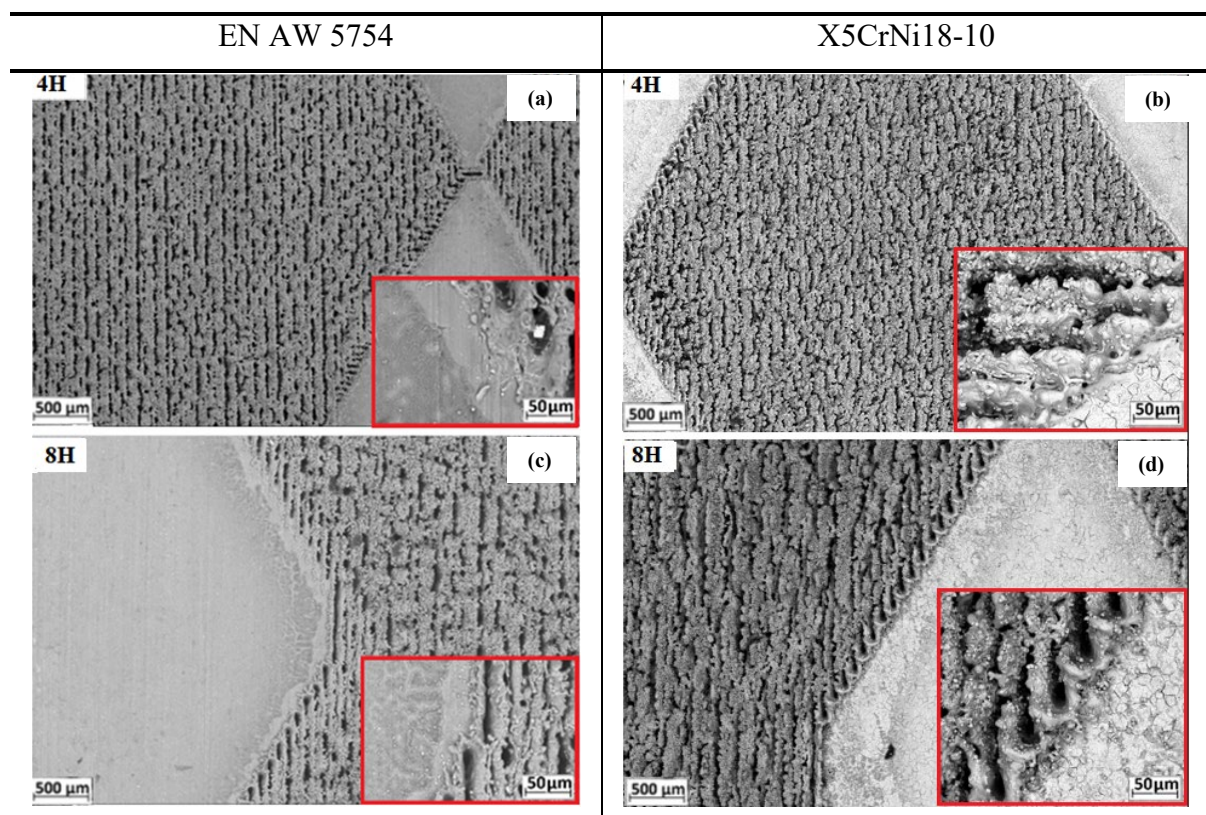
Slika 4.6 SEM slike površina: (a, b) 4L- linijski žlebovi na dubini od 40 μm , (c, d) 8L- linijski žlebovi na dubini od 80 μm

SEM analiza kod teksture mix (slika 4.7) pokazala je jasno definisane linijske žlebove romboidnog rasporeda, dok su kružna udubljenja pravilnog oblika i simetrična u odnosu na centar romboidnih ćelija. Primećena su lokalna zadebljanja duž ivica žlebova, verovatno nastala kao posledica ponovnog očvršćavanja materijala, što se može videti na slici 4.7 (a) i (c) za leguru aluminijuma i slici 4.7 (b) i (d) za nerđajući čelik. Laserska obrada, s druge strane, nije rezultirala mehaničkom deformacijom materijala i imala je najmanju grešku u obradi. Pod mikroskopom nije bilo značajne razlike između rupa ili linija na kraju područja preklapanja i onih u sredini oba materijala.

Najveći uticaj na topografiju površine imala je sačasta tekstura, jer je njena struktura bila komplikovanija, a udeo laserski obrađene površine veći. Slike 4.8 (a-d) ukazuju na ostvareni haotični teksturni oblik za oba ispitivana materijala. Visoka hrapavost površine i kvaziporozna struktura površine glavne su karakteristike ovog tipa površine. Prsline nastale usled termičkog procesa primenjenog u ambijentalnoj atmosferi mogu se uočiti na uveličanom prikazu slike, naročito pri dubinama od 80 μm . Zbog ovih faktora, adhezija laserski graviranog sloja za materijal lepka može biti kritičan faktor.



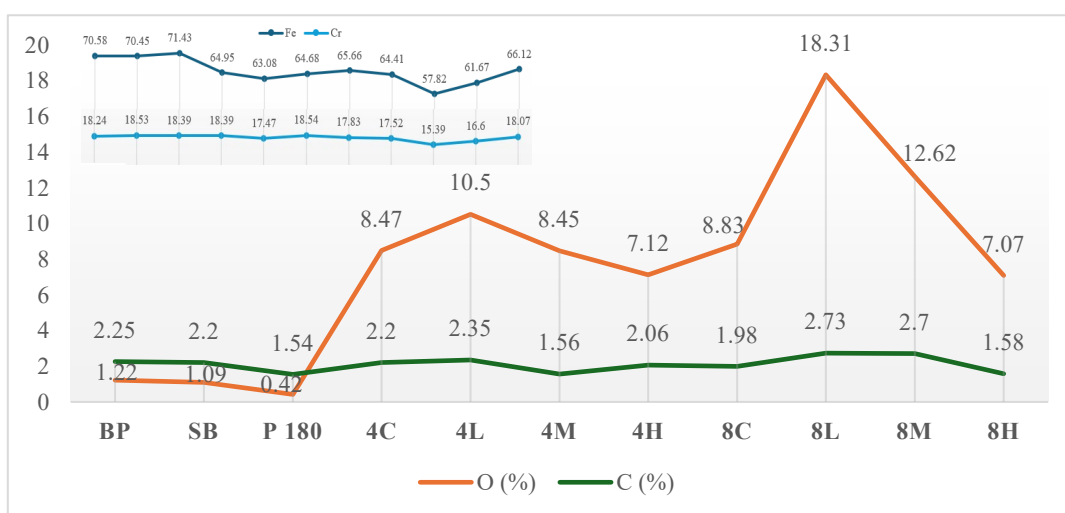
Slika 4.7 SEM slike površina: (a, b) 4M- tekstura mix na dubini od 40 μm , (c, d) 8M- tekstura mix na dubini od 80 μm



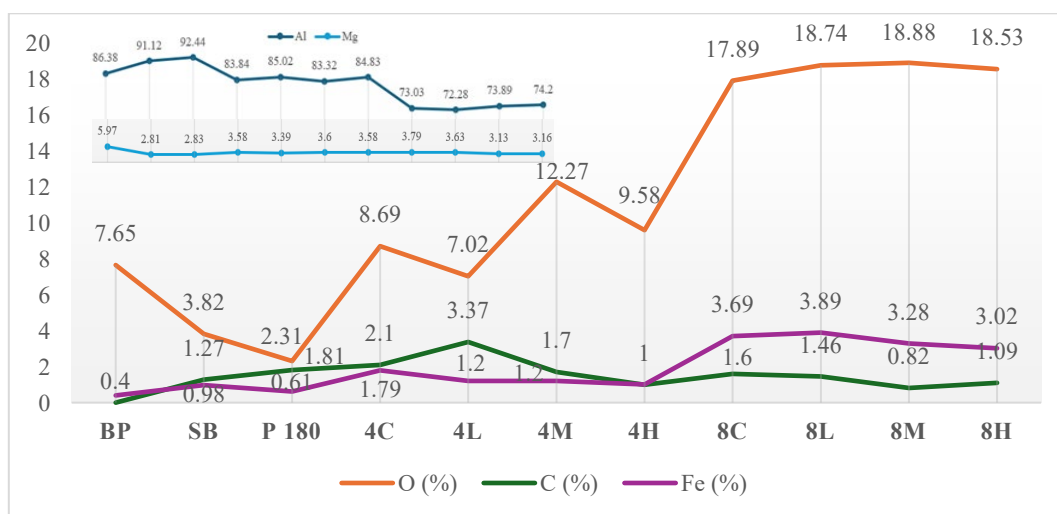
Slika 4.8 SEM slike površina: (a, b) 4H- tekstura saće na dubini od 40 μm ; (c, d) 8H- tekstura saće na dubini od 80 μm

4.4 Hemijska analiza površine – EDS analiza

Rezultati EDS analize pokazuju da različite pripreme površine mogu uticati na hemijski sastav površine. Na slikama 4.9 i 4.10 prikazan je hemijski sastav površine nakon različitih priprema. Zapaženo je da je sadržaj kiseonika (O) bio veći na uzorcima koji su samo očišćeni Sika Clener-om u poređenju sa onim pripremljenim Scotch-Brite-om ili šmirglom P180. Veći procenat O na očišćenim uzorcima može ukazivati na prisustvo tanke oksidne prevlake (Al_2O_3 kod legure aluminijuma, Fe/Cr-oksida kod nerđajućeg čelika) formirane tokom ili nakon čišćenja, dok ručno brušenje može ukloniti površinske okside i nečistoće, što dovodi do smanjenog učešća kiseonika u EDS analizi.



Slika 4.9 Hemijski sastav meren EDS analizom za nerđajući čelik X5CrNi18-10 u zavisnosti od pripreme površine (maseni udeo %)

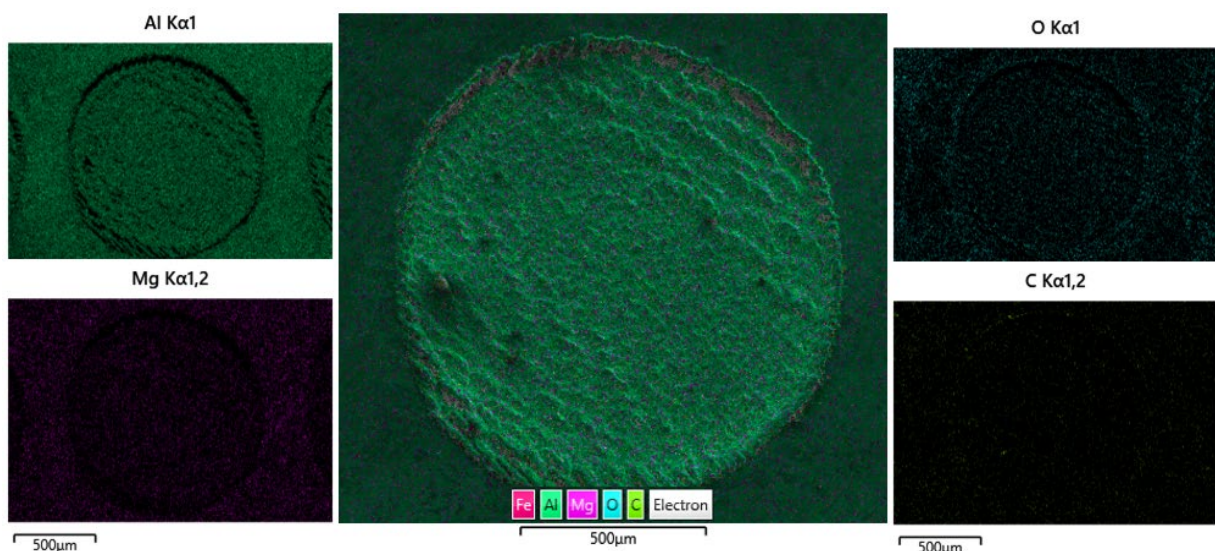


Slika 4.10 Hemijski sastav meren EDS analizom za leguru aluminijuma EN AW 5754 u zavisnosti od pripreme površine (maseni udeo %)

Sadržaj *Al* (za EN AW 5754) i *Fe* (za X5CrNi18-10) nakon laserskog graviranja je smanjen, a sadržaj elementa *O* povećan u poređenju sa drugim pripremama, što ukazuje da su legura aluminijuma EN AW 5754 i nerđajući čelik X5CrNi18-10 oksidovale i da su oksidi nastali na površini tokom laserskog graviranja. Promene u hemijskom sastavu površine naknadno utiču na promenu čvrstoće i kvašenje površine tokom vremena.

Nakon laserskog graviranja legure aluminijuma, EDS analiza je pokazala povišen sadržaj gvožđa (*Fe*), naročito pri dubinama od 80 μm , u rasponu od 3,02 do 3,89 masenih %, iako *Fe* nije dodat tokom procesa. Ovaj rezultat se može objasniti lokalnim obogaćivanjem *Fe* iz osnovne legure i formiranjem Fe-Al intermetalnih faza kao posledica redistribucije *Fe* tokom laserskog topljenja i brzog očvršćavanja, saglasno radu W. Pakieła i dr. [165], gde su kod legure AlMg5, bez dodatka *Fe*, detektovani FeAl_3 precipitanti (faze) nakon laserskog tretmana.

Prisustvo ugljenika (*C*) na površini nakon različitih priprema površine može varirati u zavisnosti od načina na koji svaka metoda uklanja ili ostavlja organske ostatke i površinske slojeve. Nakon laserskog graviranja često se stvara ugljenični sloj na samoj površini (u vidu crnila), pa EDS pokazuje veći sadržaj *C*. Međutim, laserska obrada može dovesti i do lokalnog zagrevanja koje može izazvati termičke reakcije, uključujući moguće formiranje slojeva ugljenika, u zavisnosti od specifičnih parametara obrade, kao što je prikazano na slici 4.11 u slučaju graviranja legure aluminijuma teksturom 4C.



Slika 4.11 SEM mikrofotografija i EDS mapiranje legure aluminijuma EN AW 5754 nakon laserskog graviranja teksturom 4C

Na slici 4.11 primetno je i da je *O* ravnomerno raspoređen po graviranoj površini, dok se sa povećanjem dubine graviranja povećava i stepen oksidacije obrađene metalne površine,

kao što je prikazano na slici 4.10. Kao rezultat toga, visoko oksidisani uzorci su pokazali visoko stabilna super-hidrofilna svojstva pri kvašenju, upravo kako je i ukazao V. Ialyshev i dr. u svom istraživanju [166].

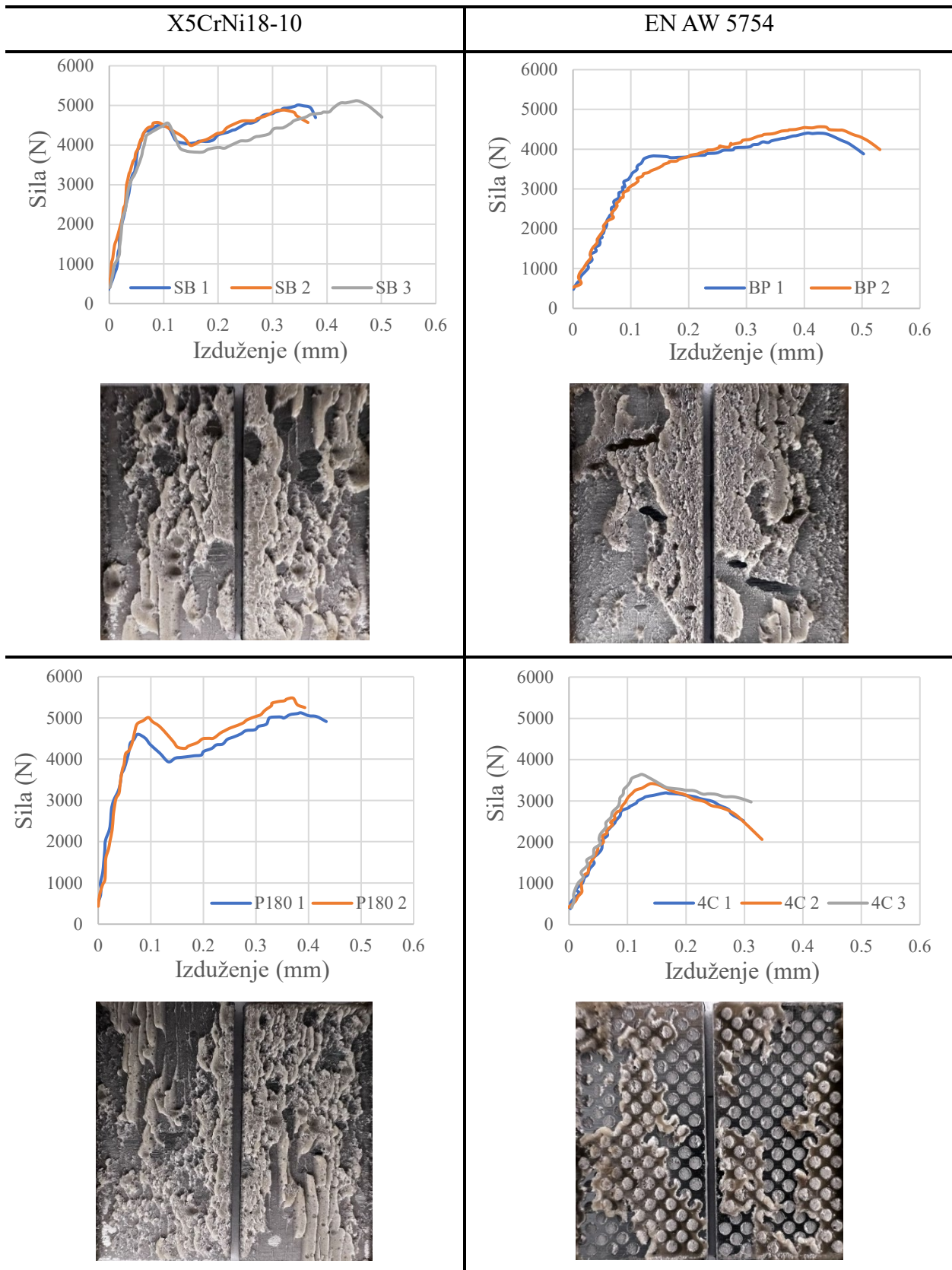
4.5 Vizuelno ispitivanje

Vizuelno ispitivanje sprovedeno je na svim zalepljenim uzorcima. Vizuelna kontrola je obuhvatala proveru oblika i dimenzije zalepljenog spoja, kvalitet zalepljenog spoja i prisustvo izbačenog filma, a ono što je ustanovljeno nakon vizuelne kontrole je da na zalepljenim uzorcima nije bilo nedopustivih grešaka. Što se tiče provere homogenosti lepka tzv. leptir test pokazao je za sva tri lepka da su lepkovi dobre homogenosti i boje tj. dobijen je pozitivan test koji ukazuje da je mešanje komponenti kod dvokomponentnih lepkova bilo idealno.

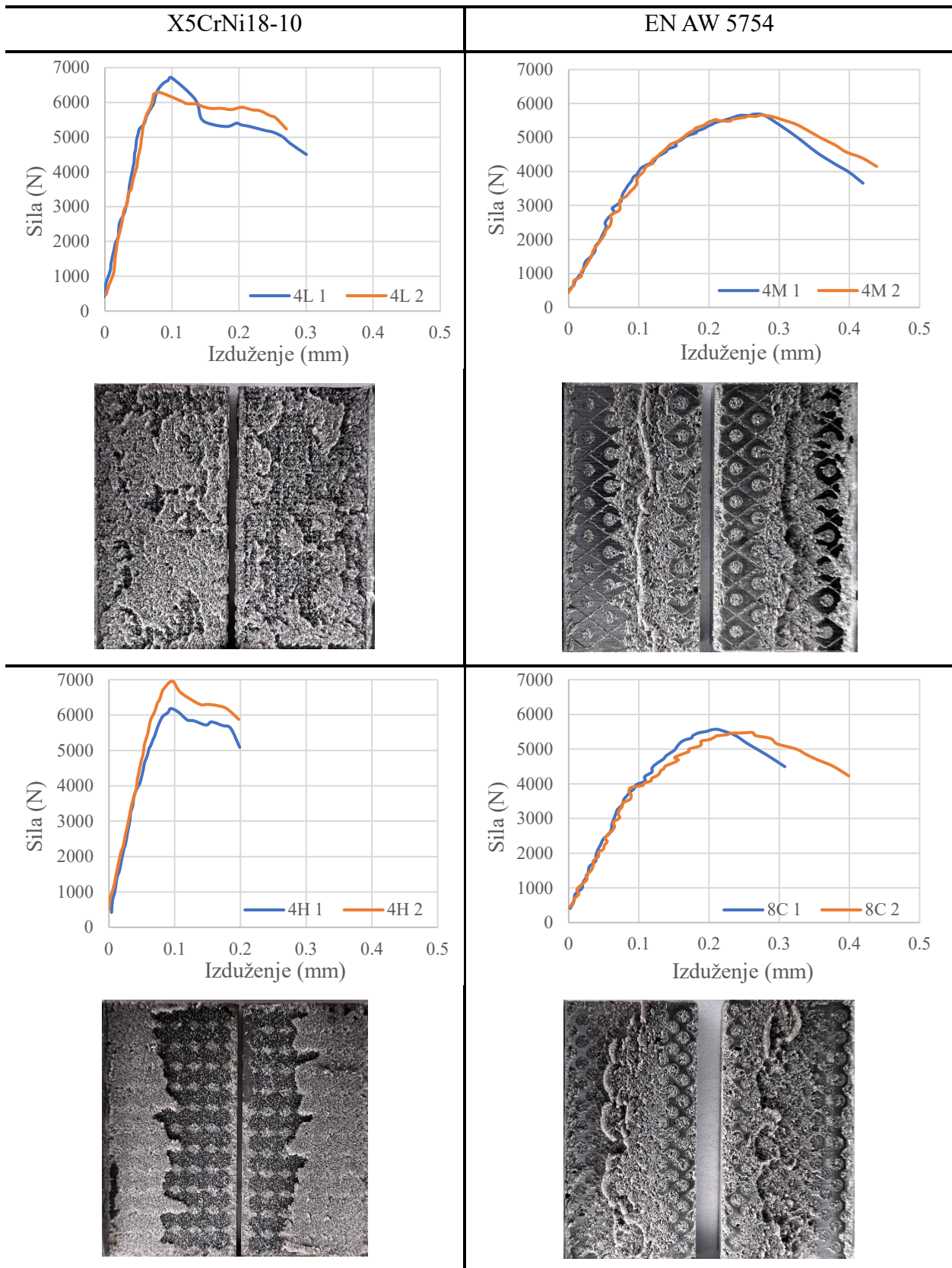
4.6 Eksperimentalno ispitivanje zalepljenih spojeva na smicanje pri zatezanju – pod dejstvom statičkog opterećenja

Rezultati ispitivanja smičućih svojstava zalepljenog spoja ostvarenih na različitim materijalima, sa različitim lepkovima i pripremama površina prikazani su u vidu dijagrama sila – izduženje. Na apcisi je prikazano registrovano izduženje kontaktnog ekstenziometra, dok je na ordinati prikazana registrovana sila. Rezultati ovih testova pružaju detaljnije razumevanje kako različite pripreme na površini adherenata mogu uticati na performanse lepljenja. Na slikama 4.12 do 4.14 prikazani su pojedini dijagrami nakon ispitivanja, a radi potpunosti prikaza, svi dijagrami dobijeni kao rezultat ispitivanja na smicanje prikazani su u Prilogu B ove doktorske disertacije.

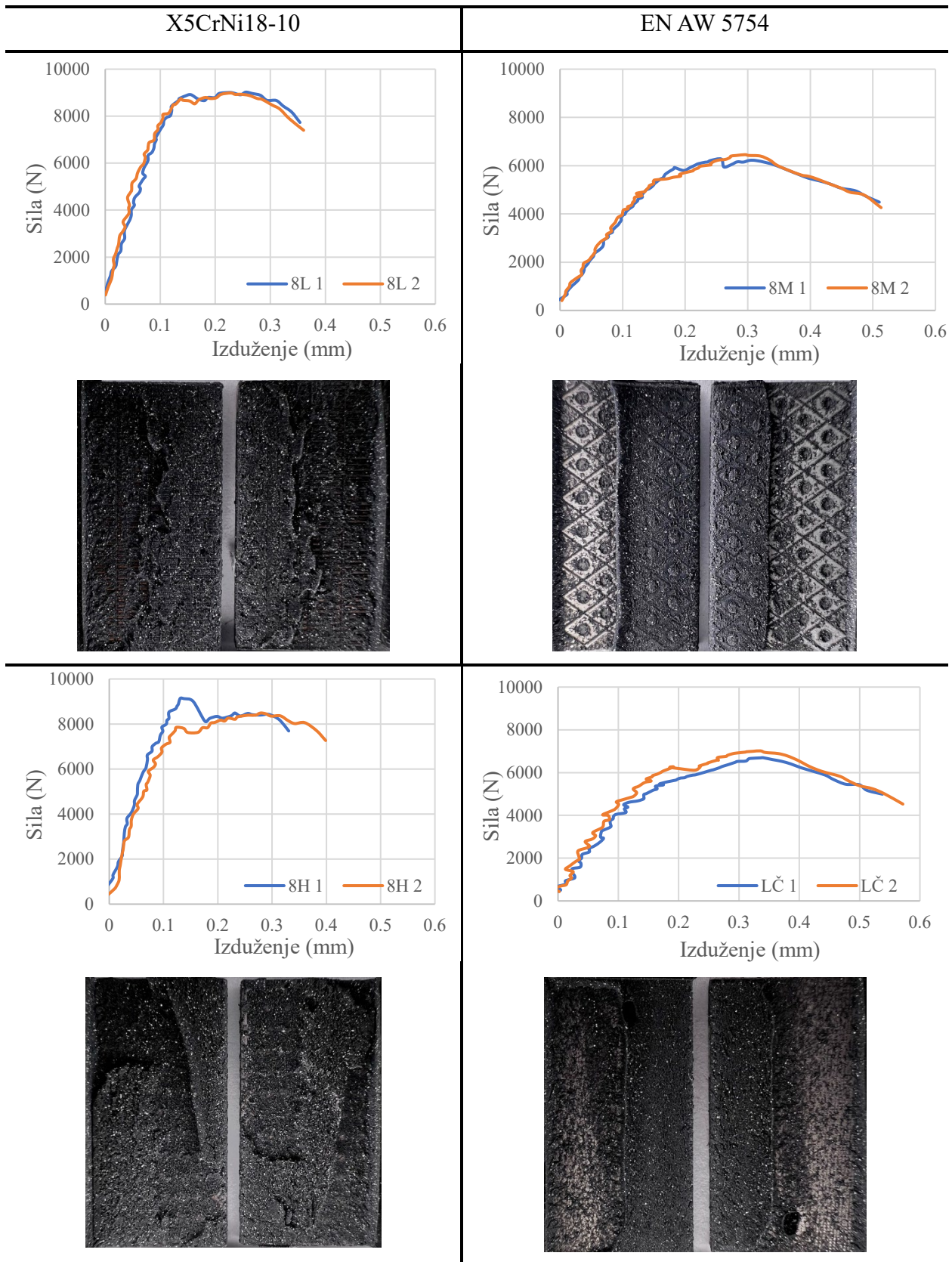
Na osnovu eksperimentalnih rezultata ispitivanja na smicanje, prikazanih na slikama u Prilogu B ove disertacije, izračunate su prosečne vrednosti čvrstoća spojeva. Prosečne vrednosti čvrstoće jednostruko preklopnih zalepljenih spojeva u odnosu na metod pripreme površine prikazane su pomoću grafikona, na slici 4.15 za slučaj kada su adherenti od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 i na slici 4.16 za slučaj kada su adherenti od legure aluminijuma EN AW 5754. Analiza rezultata statičkih testova na smicanje pokazuju da su postojale specifične zavisnosti koje su bile nezavisne od korišćenih materijala i lepkova, a ujedno ukazuju i na postojanje korelacije između pripreme, lepkova i čvrstoće zalepljenog spoja [167, 168].



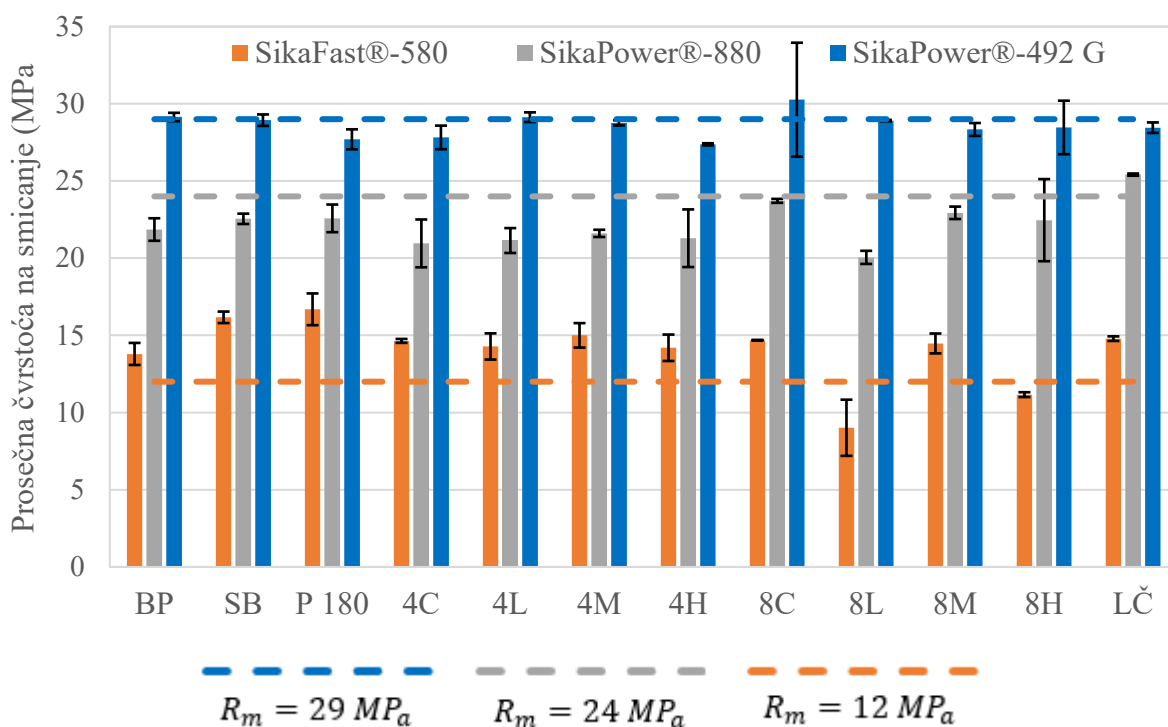
Slika 4.12 Dijagram sila – izduženje jednostruko preklopnog spoja zalepljenog SikaFast®-



Slika 4.13 Dijagram sila – izduženje jednostruko preklopnog spoja zalepljenog SikaPower®-



Slika 4.14 Dijagram sila – izduženje jednostruko preklopnog spoja zalepljenog SikaPower-492G

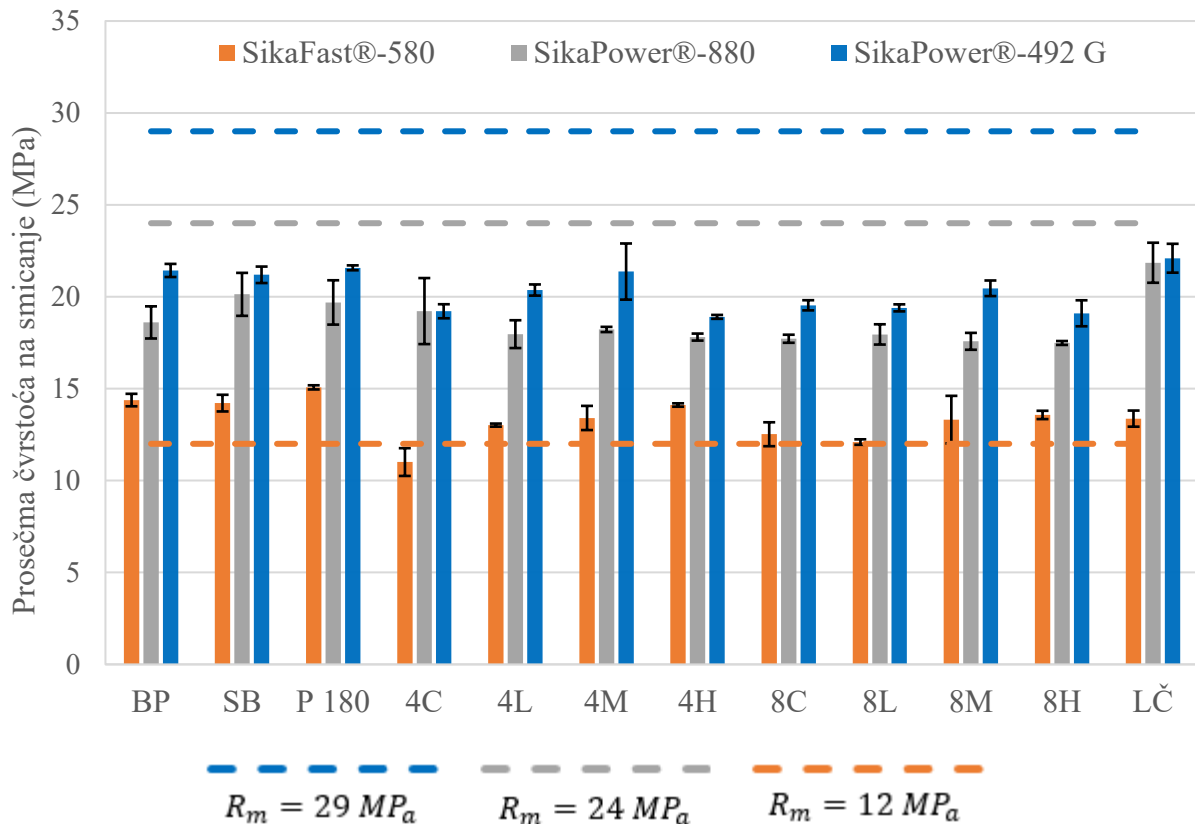


Slika 4.15 Prosečna čvrstoća na smicanje jednostruko preklopnih zalepljenih spojeva u odnosu na metod pripreme površine za nerđajući čelik X5CrNi18-10 (BP- bez pripreme; SB- Scotch-Brite; P180- brusni papir; 4C i 8C- kružna udubljenja na 40 i 80 μm ; 4L i 8L- linijski žlebovi na 40 i 80 μm ; 4M i 8M- mix od 40 i 80 μm ; 4H i 8H- saće od 40 i 80 μm ; LČ- lasersko čišćenje)

Kod dvokomponentnih lepкова, maksimalne vrednosti čvrstoće spoja kod oba ispitivana materijala ostvarene su pri istim metodama površinske pripreme: kod lepka 580 nakon pripreme brusnim papirom P180, a kod lepka 880 nakon laserskog čišćenja.

Lepak 580 ostvario je niže vrednosti čvrstoće spoja u poređenju sa ostalim ispitivanim lepkovima. Površinska priprema brusnim papirom P180 pokazala se efikasnijom u odnosu na lasersko graviranje i čišćenje, pri čemu je zabeležena najveća čvrstoća spoja od 15,07 MPa. Posebno je značajno napomenuti da su uzorci bez prethodne površinske pripreme na aluminijumu ostvarili visoke vrednosti čvrstoće (14,38 MPa), što je u korelaciji sa zaključcima M. Debskog i dr. [54], a ujedno je u skladu i sa preporukama proizvođača, koji navodi da lepak 580 poseduje sposobnost upijanja nečistoća i da se može primenjivati bez prethodne pripreme površine (poglavlje 2.3.3 ove disertacije). Međutim, na nerđajućem čeliku to nije bio slučaj, površinska priprema brusnim papirom je dovela do porasta čvrstoće spoja za približno 3 MPa u odnosu na uzorke bez prethodne pripreme. Što se tiče laserskog graviranja i čišćenja kao oblik teksture sa najvećom čvrstoćom pokazala se tekstura 4M, ali sa povećanjem dubine

graviranja vrednosti čvrstoće spoja su opali, npr. u slučaju tekture 4L vrednost čvrstoće spoja je opala za 5,28 MPa sa povećanjem dubine na 80 μm - 8L.



Slika 4.16 Prosečna čvrstoća na smicanje jednostruko preklopnih zalepljenih spojeva u odnosu na metod pripreme površine za leguru aluminijuma EN AW 5754 (BP- bez pripreme; SB- Scotch-Brite; P180- brusni papir; 4C i 8C- kružna udubljenja na 40 i 80 μm ; 4L i 8L- linijski žlebovi na 40 i 80 μm ; 4M i 8M- mix od 40 i 80 μm ; 4H i 8H- saće od 40 i 80 μm ; LČ- lasersko čišćenje)

Lasersko čišćenje je povećalo mehaničku čvrstoću zalepljenih spojeva sa lepkom 880 kod oba ispitivana materijala, pri čemu su postignute maksimalne vrednosti čvrstoće spojeva do 5,36 MPa u poređenju sa vrednostima dobijenim alternativnim pripremanama. Pripreme Scotch-Brite-om i brusnim papirom P180 pokazale su stabilne i ujednačene rezultate, sa približno sličnim vrednostima čvrstoće kod oba materijala, što ukazuje na njihovu pouzdanost. Kod pripreme laserskim graviranjem, na nerđajućem čeliku uočeno je povećanje čvrstoće spoja (do oko 3 MPa) sa povećanjem dubine graviranja, dok su pri dubini od 40 μm zabeležene vrednosti čvrstoće niže čak i od uzoraka bez prethodne pripreme. Nasuprot tome, kod aluminijuma povećanje dubine od 80 μm nije rezultiralo poboljšanjem mehaničkih svojstava zalepljenog spoja.

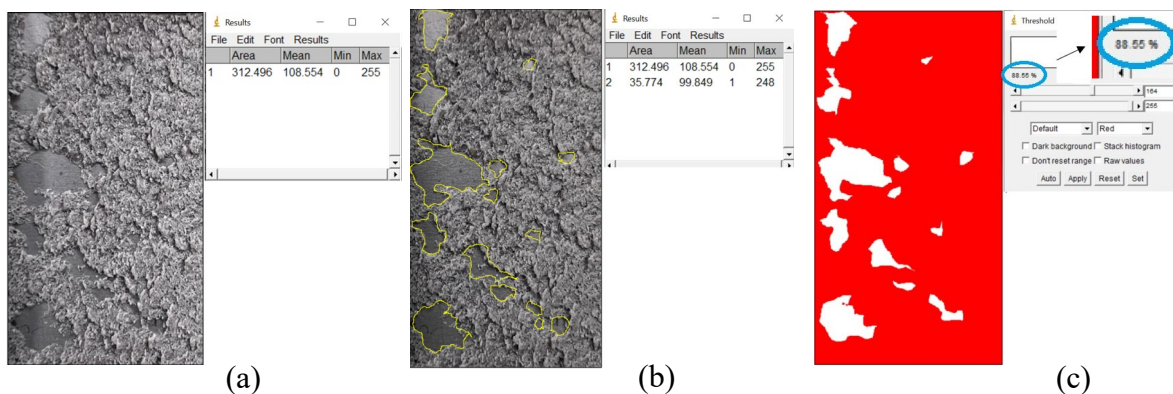
Jednokomponentni lepak 492 se izdvojio postizanjem najvećih vrednosti čvrstoće u odnosu na druge primenjene lepkove. Maksimalna vrednost čvrstoće spoja ostvarenog lepkom 492 varirala je u zavisnosti od materijala i načina pripreme. Lasersko čišćenje aluminijuma povećalo je čvrstoću do 3 MPa u poređenju sa najslabijim rezultatima dobijenim laserskim graviranjem. Kod nerđajućeg čelika, čvrstoća nakon laserskog čišćenja bila je u opsegu čvrstoće postignute brusnim papirom P180, dok se lasersko graviranje, tačnije tekstura 8C pokazala kao najbolja metoda pripreme površine za ovaj lepak i materijal. Standardna devijacija izmerenih vrednosti čvrstoće iznosila je 3,69 MPa, što ukazuje na izraženiju varijabilnost i manju konzistentnost rezultata u poređenju sa uzorcima sa nižom devijacijom. U svim ostalim slučajevima, uzorci bez pripreme površina su dali bolje rezultate čvrstoće spoja.

4.6.1 Analiza moda otkaza nakon statičkog testa na smicanje

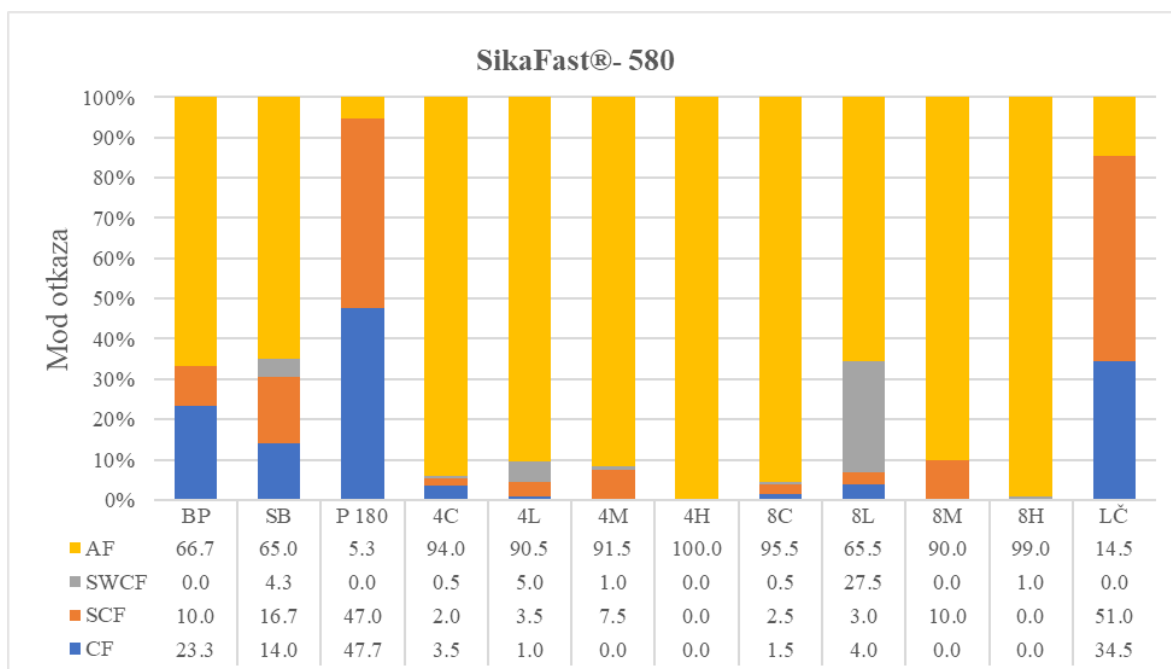
Odgovarajuća priprema površine trebalo bi da osigura da se najmanje jaka veza u zalepljenom spoju nalazi unutar sloja lepka, a ne na kontaktu površina koje se lepe. Ovo istraživanje je pomoglo da se rasvetle uzroci otkaza i izvedu neki zaključci o kvalitetu zalepljenih spojeva. U ovoj disertaciji, način otkaza za sve površine je posmatran odmah nakon statičkog testa smicanja.

Način loma zalepljenih spojeva razlikovao se u zavisnosti od korišćenog materijala, pripreme površine i korišćenih lepkova. Procenat površine je meren pomoću softvera ImageJ, a sam postupak je prikazan na slici 4.17 [167]. Ukupna izmerena površina veze (spoja) bila je 312,496 mm² (slika 4.17 (a)), a površina preloma (otkaza) bez lepka bila je 35,774 mm² (slika 4.17 (b)). Procenat površine u modu otkaza izračunat je deljenjem površine preloma (otkaza) bez lepka sa ukupnom površinom zalepljenog spoja i množenjem sa 100. Područja površine otkaza koja su imala sloj lepka na površini preloma obojena su crvenom bojom (slika 4.17 (c)) i činila su 88,55% kohezioni lom- CF, dok su područja bez lepka činila 11,45% adhezioni lom- AF. Na osnovu ovog postupka, izvedeni su procenti moda otkaza i prikazani su za sve uzorke.

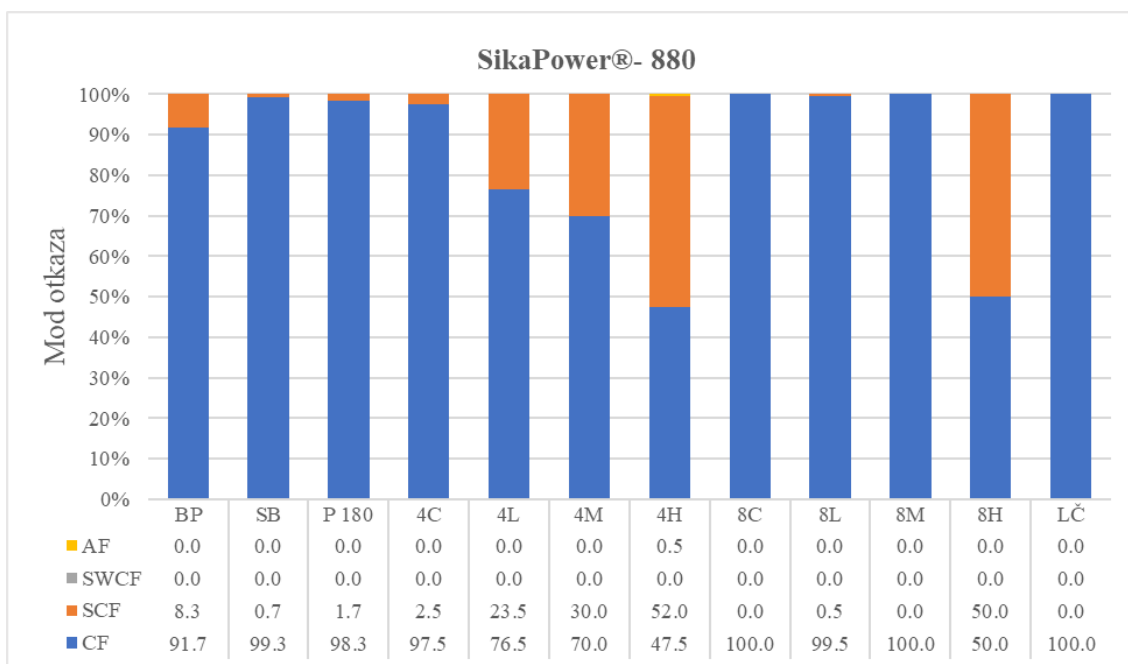
Modovi otkaza koji su registrovani kod ispitivanih uzoraka nakon testa smicanja jednostruko preklopnog spoja prikazani su obliku grafikona za X5CrNi18-10 na slikama 4.18 do 4.20 i EN AW 5754 na slikama 4.21 do 4.23.



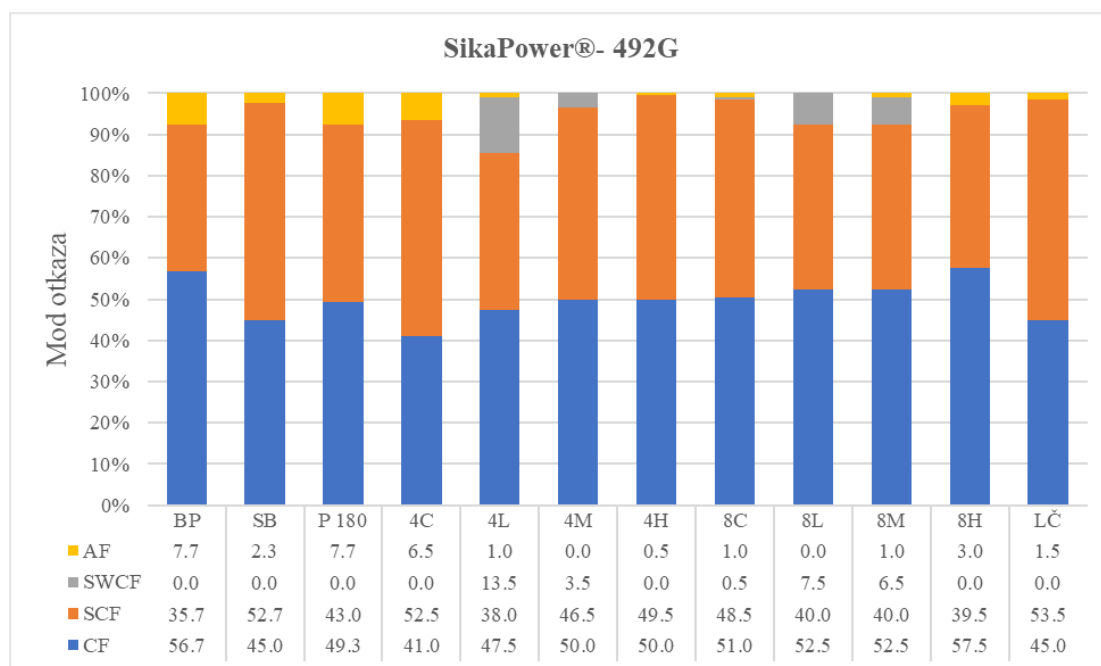
Slika 4.17 Metod za izvođenje procenata moda otkaza. (a) Fotografija ispitane površine loma; (b) obrada fotografije pomoću softvera ImageJ; (c) određivanje procenta moda otkaza na osnovu skale boja [167]



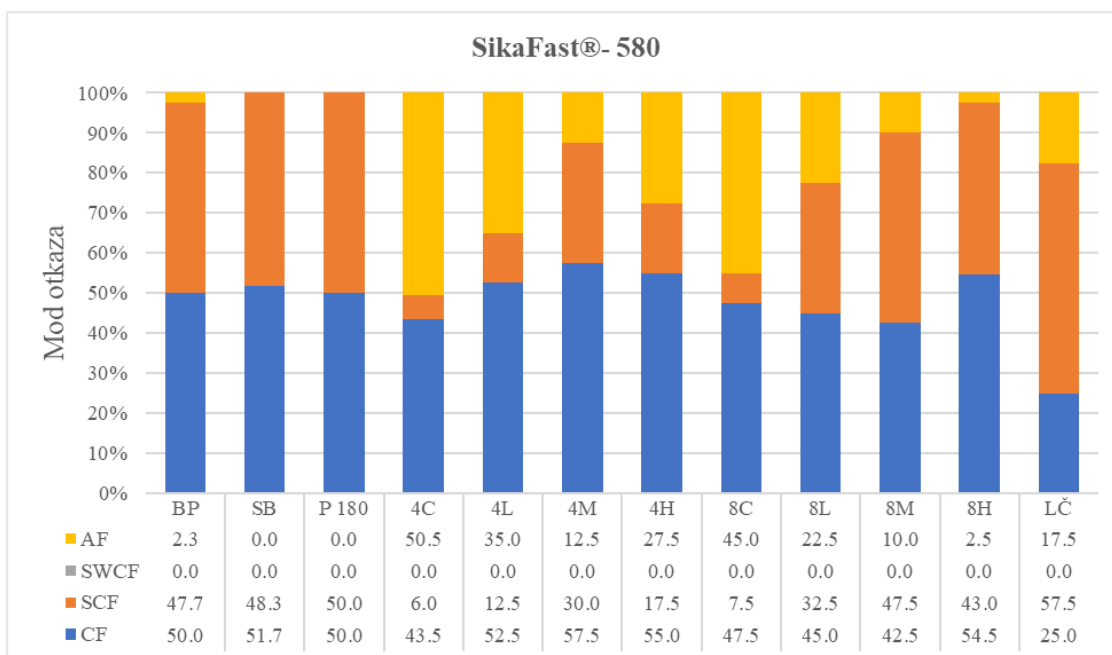
Slika 4.18 Procentualna raspodela moda otkaza lepka SikaFast®-580 na nerđajućem čeliku X5CrNi18-10 u zavisnosti od pripreme površine (CF - kohezioni lom; SCF - specijalni kohezioni lom; SWCF - lom sa izbeljivanjem lepka pod naponom; AF - adhezioni lom); BP- bez pripreme; SB- Scotch-Brite; P180- brusni papir; 4C i 8C- kružna udubljenja na 40 i 80 μm ; 4L i 8L- linijski žlebovi na 40 i 80 μm ; 4M i 8M- mix od 40 i 80 μm ; 4H i 8H- saće od 40 i 80 μm ; LČ- lasersko čišćenje)



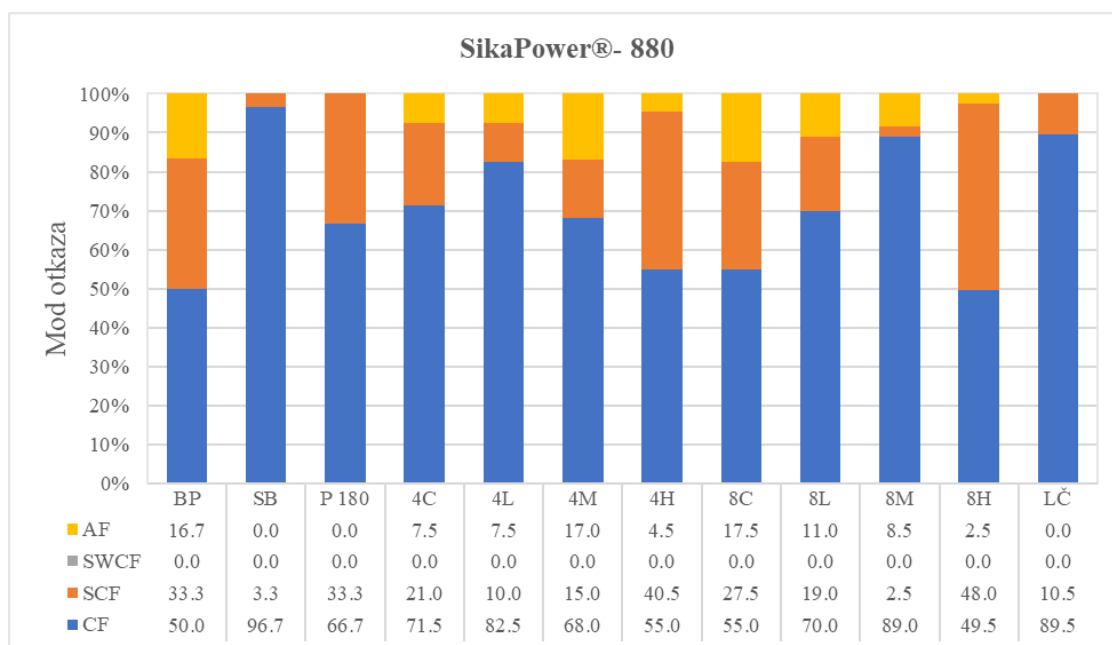
Slika 4.19 Procentualna raspodela moda otkaza lepka SikaPower®-880 na nerđajućem čeliku X5CrNi18-10 u zavisnosti od pripreme površine (CF - kohezioni lom; SCF - specijalni kohezioni lom; SWCF - lom sa izbejivanjem lepka pod naponom; AF - adhezioni lom)



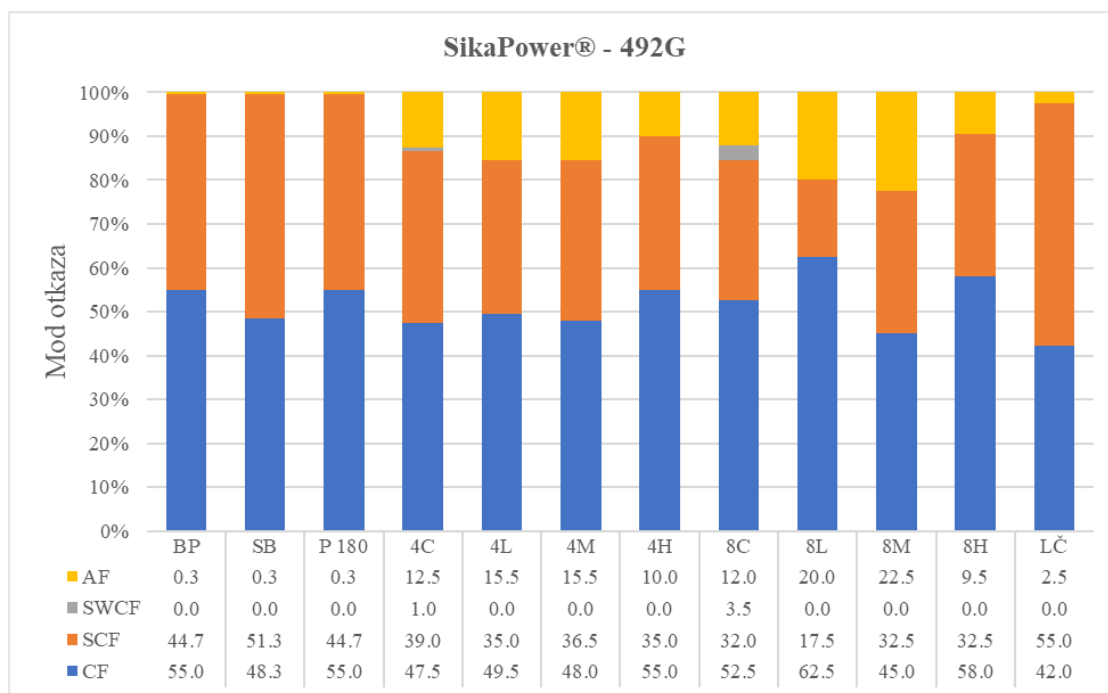
Slika 4.20 Procentualna raspodela moda otkaza lepka SikaPower®-492 G na nerđajućem čeliku X5CrNi18-10 u zavisnosti od pripreme površine (CF - kohezioni lom; SCF - specijalni kohezioni lom; SWCF - lom sa izbejivanjem lepka pod naponom; AF - adhezioni lom)



Slika 4.21 Procentualna raspodela moda otkaza lepka SikaFast®-580 na leguri aluminijuma EN AW 5754 u zavisnosti od pripreme površine (CF - kohezioni lom; SCF - specijalni kohezioni lom; SWCF - lom sa izbeljivanjem lepka pod naponom; AF - adhezioni lom)



Slika 4.22 Procentualna raspodela moda otkaza lepka SikaPower®-880 na leguri aluminijuma EN AW 5754 u zavisnosti od pripreme površine (CF - kohezioni lom; SCF - specijalni kohezioni lom; SWCF - lom sa izbeljivanjem lepka pod naponom; AF - adhezioni lom)



Slika 4.23 Procentualna raspodela moda otkaza lepka Power®-492 G na leguri aluminijuma EN AW 5754 u zavisnosti od pripreme površine (CF - kohezioni lom; SCF - specijalni kohezioni lom; SWCF - lom sa izbeljivanjem lepka pod naponom; AF - adhezioni lom)

Na osnovu rezultata ispitivanja može se zaključiti da primenom 2K lepka 580, priprema površine laserskim graviranjem ne obezbeđuje dovoljnu adheziju između adherenta i lepka, što je rezultiralo adhezionim lomom, posebno na nerđajućem čeliku gde su i zabeležene niže vrednosti smicajne čvrstoće, za razliku od pripreme brusnim papirom P180 ili metoda laserskog čišćenja, gde je kohezioni lom dominirao, što je u skladu sa višim vrednostima čvrstoće na smicanje.

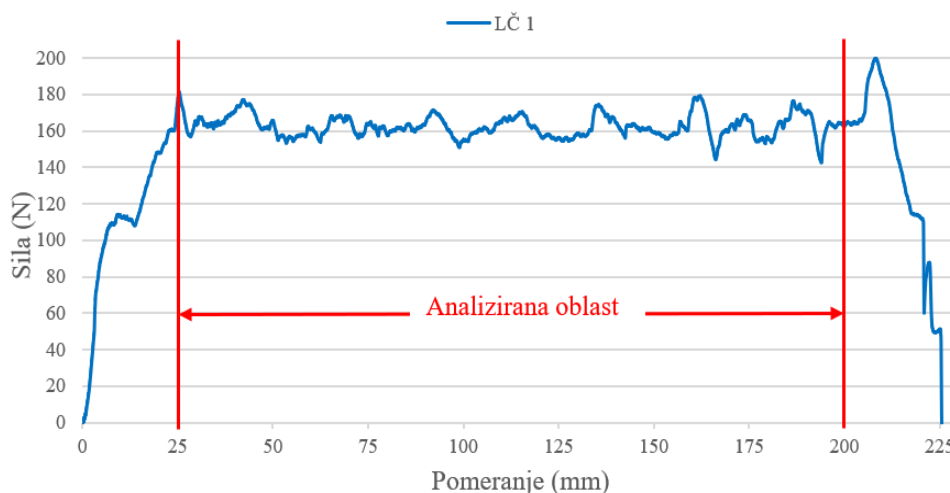
Sa izuzetkom legure aluminijuma, gde je došlo do adhezionog loma nakon laserskog graviranja (do 17,5% AF), 2K lepak 880 pokazao je veoma konzistentne rezultate, uglavnom kohezioni lom. Postupak pripreme površine laserskim čišćenjem, Scotch-Brite-om ili brusnim papirom P180 je u svim slučajevima rezultovao kohezionim ili specijalnim kohezionim lomom, što ukazuje na činjenicu da je obezbeđena dobra adhezija, a samim tim i veće čvrstoće spoja u odnosu na druge pripreme. Činjenica da je ovaj lepak veoma osetljivo reagovao na različite pripreme površina i da je čvrstoća utvrđena nakon ispitivanja bila različita dokazuje da ovaj lepak dovodi do loma u lepku kod oba materijala u svim pripremanama.

Kohezioni lom ili specijalni kohezioni lom dominirao je kod 1K lepka 492 za oba materijala. Međutim, adhezioni lom primećen je kod legure aluminijuma nakon svih tekstura izrađenih laserskim graviranjem i kod nerđajućeg čelika nakon pripreme Scotch-Brite-om i

brusnim papirom P180, što je svakako povezano sa činjenicom da su rezultati statičkog testa smicanja pokazali nižu čvrstoću u ovim priprema površina sa ovim lepkom.

4.7 Eksperimentalno ispitivanje zalepljenih spojeva na ljuštenje metodom pokretnog valjka – pod dejstvom statičkog opterećenja

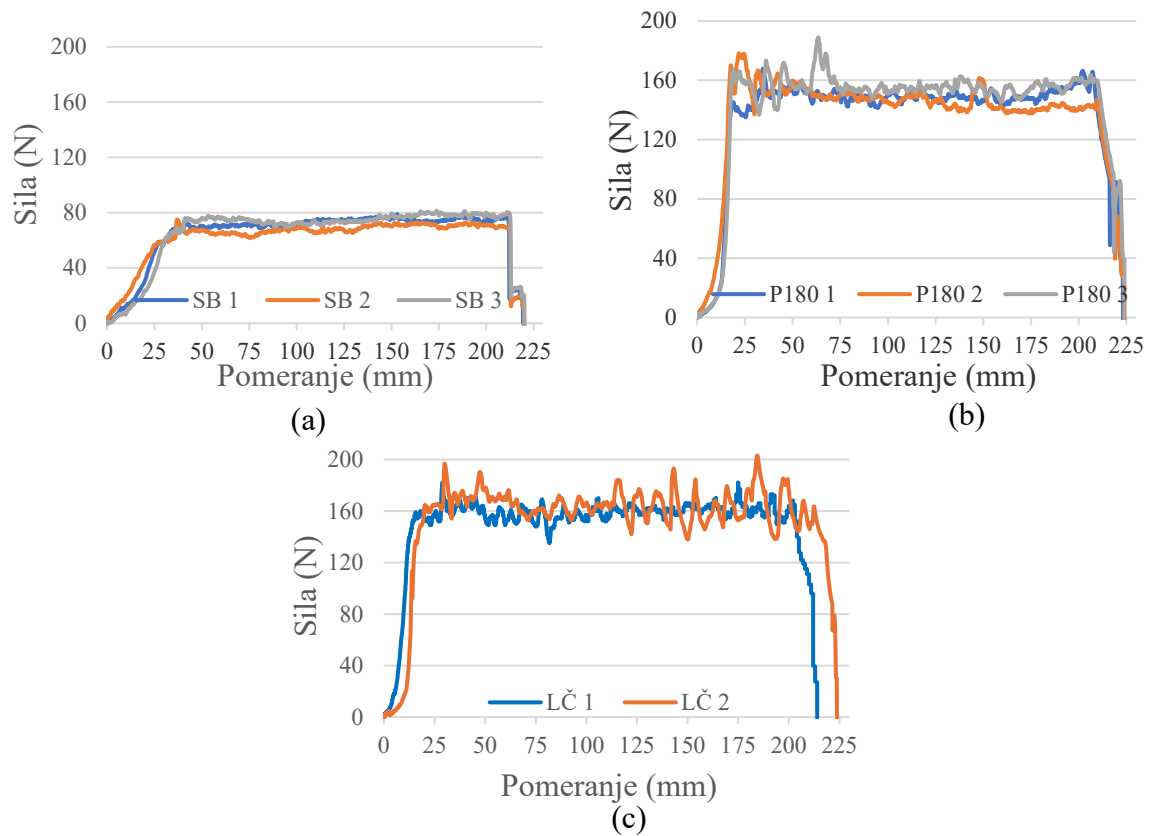
Tipičan dijagram sila – pomeranje koji se dobija prilikom izvođenja testa na ljuštenje metodom pokretnog valjka prikazan je na slici 4.24. Primarna analiza se vrši nakon što se početno zatezanje popravi kako bi se pružio tačniji prikaz otpornosti na ljuštenja materijala. Većina modernih instrumenata za ispitivanje omogućava korisniku da podesi oblast analize kako bi eliminisao podatke sa početka (prvih 25 mm) i kraja testa (poslednjih 25 mm), prema standardima ASTM D3167 i SRPS EN 1464 [139, 140]. Segment od prvih i poslednjih 25 mm se zanemaruje kako bi se izbegli uticaji početnih nelinearnih faza i osigurala tačnost i ponovljivost rezultata. Nakon toga, prosečna sila se meri na dužini od najmanje 115 mm [140] duž linije lepljenja, kako bi se dobili stabilni i reprezentativni rezultati. Na ovaj način su posmatrani svi dijagrami dobijeni testom ljuštenja metodom pokretnog valjka.



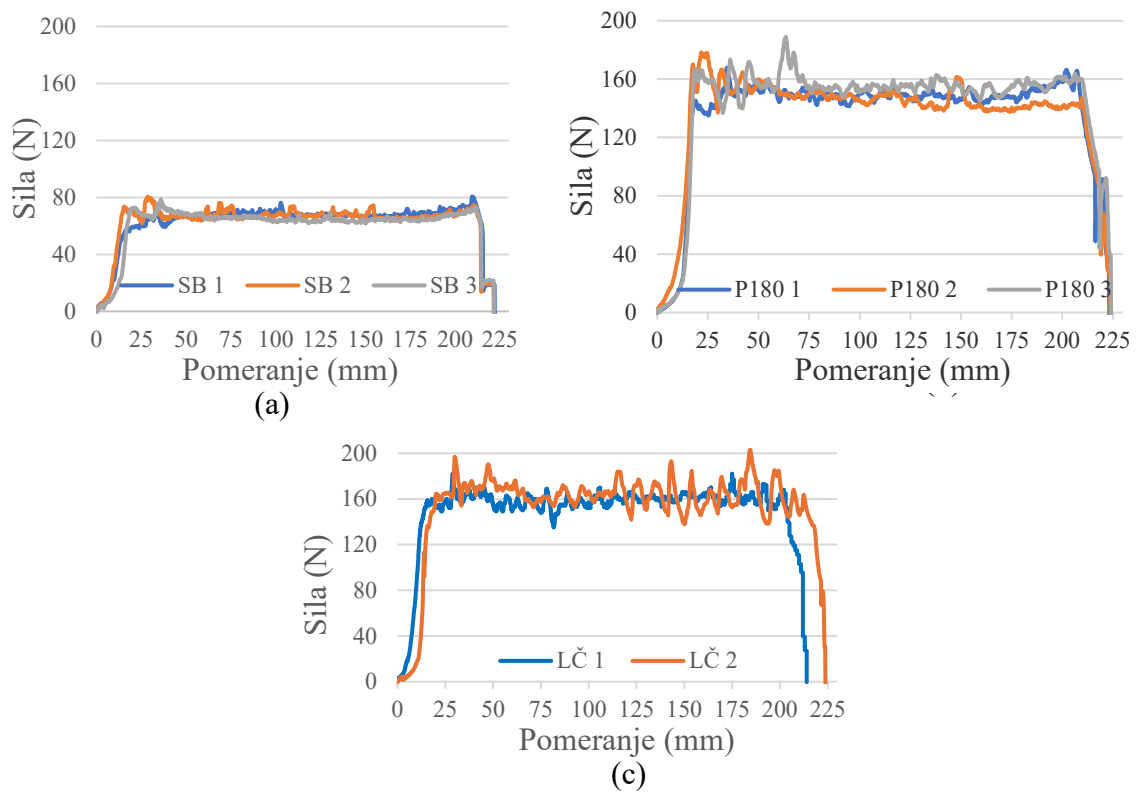
Slika 4.24 Prikaz analizirane oblasti na dijagramu sila – pomeranje legure aluminijuma

EN AW 5754 nakon laserskog čišćenja

Na slikama 4.25 i 4.26 prikazani su dijagrami koje sadrže reprezentativne krive statičkog testa ljuštenja metodom pokretnog valjka za razmatrane pripreme površina spojeva, primenjene lepkove i materijale aderenata. Radi potpunosti prikaza, svi dijagrami dobijeni kao rezultat ispitivanja na ljuštenje metodom pokretnog valjka prikazani su u Prilogu C ove disertacije.



Slika 4.25 Dijagram sila – pomeranje nakon testa ljuštenja uzoraka od X5CrNi18-10 širine 25 mm, zalepljen lepkom (a) SikaFast®-580, (b) SikaPower®-880, (c) SikaPower®-492 G



Slika 4.26 Dijagram sila – pomeranje nakon testa ljuštenja uzoraka od EN AW 5754 širine 25 mm, zalepljen lepkom (a) SikaFast®-580, (b) SikaPower®-880, (c) SikaPower®-492 G

Za izračunavanje otpornosti na ljuštenje koristi se stabilni deo krive, a ne maksimalna vrednost. Tako da otpornost ljuštenja predstavlja srednju vrednost dobijenu na osnovu rezultata ljuštenja uzoraka bez i sa prethodnim pripremanjima površine. Prosečna sila ljuštenja je ključna za precizno merenje adhezije između dva materijala, jer nam daje jasnu indikaciju koliko je veza između njih jaka ili slaba tokom trajanja testa. Korišćenje stabilnog dela „analizirane oblasti“ pomaže u izbegavanju varijacija koje se mogu javiti na početku ili kraju testa, kada sila može biti nerealno visoka ili niska zbog drugih faktora (npr. početne deformacije ili konačnog opuštanja).

Na osnovu dijagrama sila – pomeranje dobijene su maksimalne, minimalne i prosečne sile pri ljuštenju, prikazane u tabelama 4.1 do 4.6. Vrednost otpornosti na ljuštenje dobija se deljenjem prosečne sile (N) sa širinom spoja odnosno uzorka ($b = 25 \text{ mm}$) [169], dok se čvrstoća ljuštenja dobija deljenjem maksimalne sile (N) sa površinom poprečnog preseka ($0,3 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} = 7,5 \text{ mm}^2$) [170] svakog uzorka.

Tabela 4.1 Rezultati ispitivanja nakon testa ljuštenja: X5CrNi18-10 i lepak SikaFast®-580

Uzorci	Maksimalna sila pri ljuštenju (N)	Minimalna sila pri ljuštenju (N)	Prosečna sila pri ljuštenju (N)	Otpornost na ljuštenje (N/25mm)	Čvrstoća ljuštenja (N/7,5mm²)
<i>BP 1</i>	42,7	3,2	21,3	0,9	5,7
<i>BP 2</i>	39,0	9,8	24,0	1,0	5,2
<i>BP 3</i>	31,9	8,2	19,6	0,8	4,3
<i>SB 1</i>	78,9	51,5	72,3	3,2	10,5
<i>SB 2</i>	75,1	55,7	67,8	3,0	10,0
<i>SB 3</i>	81,3	37,1	73,9	3,3	10,9
<i>PI80 1</i>	93,2	70,2	79,9	3,2	12,4
<i>PI80 2</i>	87,9	56,7	76,9	3,1	11,7
<i>PI80 3</i>	81,6	56,2	75,0	3,0	10,9
<i>LČ 1</i>	96,5	72,6	85,0	3,4	12,9
<i>LČ 2</i>	102,4	31,1	85,2	3,4	13,7

BP- bez pripreme, SB- Scotch Brite, PI80- brusni papir, LČ- lasersko čišćenje

Tabela 4.2 Rezultati ispitivanja nakon testa ljuštenja: X5CrNi18-10 i lepak SikaPower®-880

Uzorci	Maksimalna sila pri ljuštenju (N)	Minimalna sila pri ljuštenju (N)	Prosečna sila pri ljuštenju (N)	Otpornost na ljuštenje (N/25mm)	Čvrstoća ljuštenja (N/7,5mm ²)
BP 1	21,3	2,6	15,1	0,6	2,8
BP 2	12,1	0,1	3,8	0,2	1,6
BP 3	16,5	-0,2	10,0	0,4	2,2
SB 1	147,1	112,8	133,8	5,4	19,6
SB 2	148,4	84,2	109,1	4,4	19,8
SB 3	103,9	62,3	81,1	3,2	13,9
P180 1	119,4	74,7	92,0	3,7	15,9
P180 2	122,1	72,2	92,6	3,7	16,3
P180 3	160,2	96,8	120,4	4,8	21,4
LČ 1	231,6	171,5	191,8	7,7	30,9
LČ 2	232,8	182,6	198,6	7,9	31,0

BP- bez pripreme, SB- Scotch Brite, P180- brusni papir, LČ- lasersko čišćenje

Tabela 4.3 Rezultati ispitivanja nakon testa ljuštenja na X5CrNi18-10 i lepak SikaPower-492G

Uzorci	Maksimalna sila pri ljuštenju (N)	Minimalna sila pri ljuštenju (N)	Prosečna sila pri ljuštenju (N)	Otpornost na ljuštenje (N/25mm)	Čvrstoća ljuštenja (N/7,5mm ²)
BP 1	199,9	96,8	177,1	7,1	26,7
BP 2	194,2	149,3	179,1	7,2	25,9
BP 3	212,2	150,8	182,3	7,3	28,3
SB 1	216,7	146,2	171,6	6,9	28,9
SB 2	186,4	135,0	160,5	6,4	24,9
SB 3	203,3	157,1	175,2	7,0	27,1
P180 1	207,1	112,1	176,1	7,0	27,6
P180 2	217,9	147,5	176,6	7,1	29,0
P180 3	245,2	162,3	191,7	7,7	32,7
LČ 1	214,1	137,2	167,3	6,7	28,5
LČ 2	242,2	144,4	168,6	6,7	32,3

Tabela 4.4 Rezultati ispitivanja nakon testa ljuštenja: EN AW 5754 i lepak SikaFast®-580

Uzorci	Maksimalna sila pri ljuštenju (N)	Minimalna sila pri ljuštenju (N)	Prosečna sila pri ljuštenju (N)	Otpornost na ljuštenje (N/25mm)	Čvrstoća ljuštenja (N/7,5mm ²)
BP 1	178,5	131,1	158,1	6,3	11,0
BP 2	173,2	93,8	148,9	6,0	11,3
BP 3	180,4	120,4	151,8	6,1	11,0
SB 1	172,0	134,2	155,5	6,2	10,2
SB 2	191,7	154,3	170,8	6,8	10,7
SB 3	186,7	153,3	169,7	6,8	10,5
P180 1	201,8	165,7	182,1	7,3	12,7
P180 2	194,1	153,5	175,2	7,0	12,0
P180 3	188,1	128,9	172,4	6,9	10,6
LČ 1	182,0	135,0	159,5	6,4	11,0
LČ 2	203,1	137,8	165,2	6,6	11,7

BP- bez pripreme, SB- Scotch Brite, P180- brusni papir, LČ- lasersko čišćenje

Tabela 4.5 Rezultati ispitivanja nakon testa ljuštenja: EN AW 5754 i lepak SikaPower®-880

Uzorci	Maksimalna sila pri ljuštenju (N)	Minimalna sila pri ljuštenju (N)	Prosečna sila pri ljuštenju (N)	Otpornost na ljuštenje (N/25mm)	Čvrstoća ljuštenja (N/7,5mm ²)
BP 1	68,0	40,6	57,7	2,3	9,07
BP 2	81,2	61,9	74,3	3,0	10,83
BP 3	80,2	57,7	69,3	2,8	10,69
SB 1	157,4	115,0	123,9	5,0	21,0
SB 2	146,5	109,1	124,6	5,0	19,5
SB 3	144,2	115,5	126,5	5,1	19,2
P180 1	167,8	135,0	149,3	6,0	22,4
P180 2	176,0	136,9	147,4	5,9	23,5
P180 3	188,9	136,7	155,8	6,2	25,2
LČ 1	181,7	142,7	162,6	6,5	24,2
LČ 2	180,6	142,3	163,1	6,5	24,1

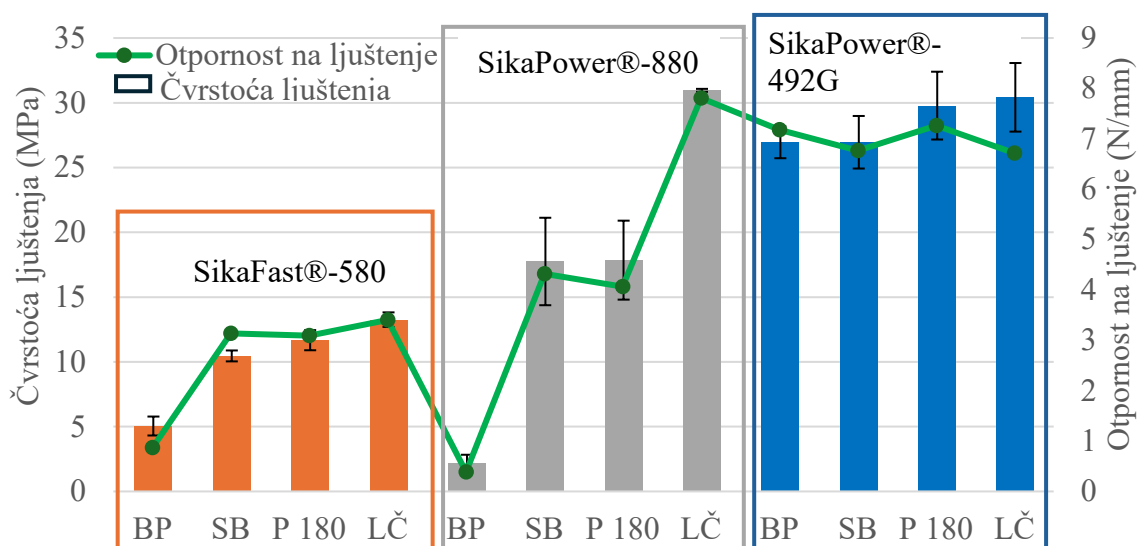
BP- bez pripreme, SB- Scotch Brite, P180- brusni papir, LČ- lasersko čišćenje

Tabela 4.6 Rezultati ispitivanja nakon testa ljuštenja: EN AW 5754 i lepak SikaPower-492 G

Uzorci	Maksimalna sila pri ljuštenju (N)	Minimalna sila pri ljuštenju (N)	Prosečna sila pri ljuštenju (N)	Otpornost na ljuštenje (N/25mm)	Čvrstoća ljuštenja (N/7,5mm ²)
BP 1	178,5	131,1	158,1	6,3	23,8
BP 2	173,2	93,8	148,9	6,0	23,1
BP 3	180,4	120,4	151,8	6,1	24,1
SB 1	172,0	134,2	155,5	6,2	22,9
SB 2	191,7	154,3	170,8	6,8	25,6
SB 3	186,7	153,3	169,7	6,8	24,9
P180 1	201,8	165,7	182,1	7,3	26,9
P180 2	194,1	153,5	175,2	7,0	25,9
P180 3	188,1	128,9	172,4	6,9	25,1
LČ 1	182,0	135,0	159,5	6,4	24,3
LČ 2	203,1	137,8	165,2	6,6	27,1

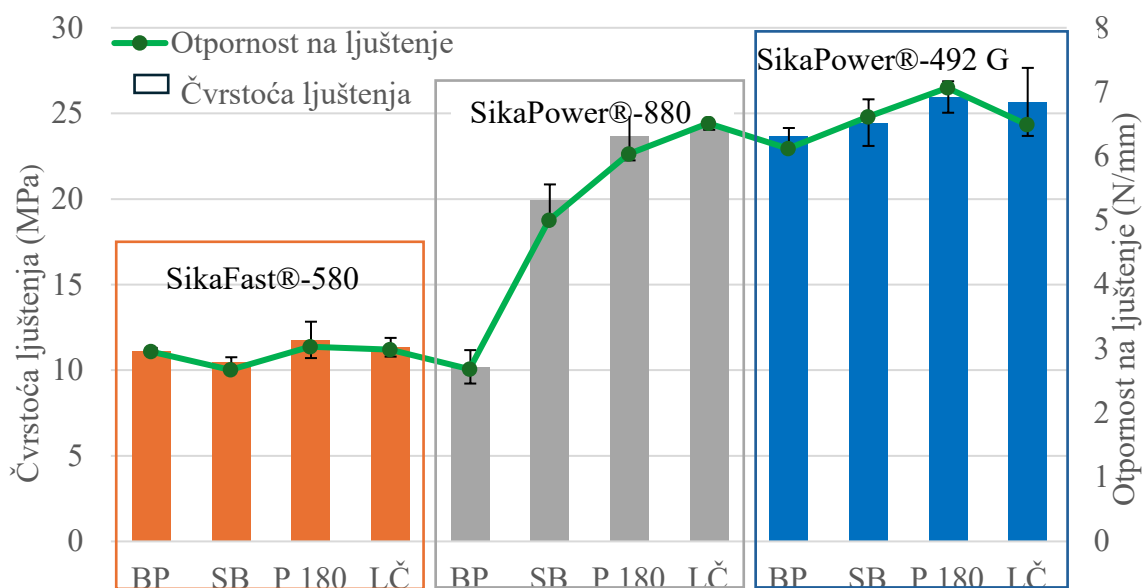
BP- bez pripreme, SB- Scotch Brite, P180- brusni papir, LČ- lasersko čišćenje

Prelaskom na statističku analizu svih dobijenih rezultata, na slikama 4.27 i 4.28 prikazani su uporedni dijagrami, stubičasti dijagram koji sumira prosečne vrednosti čvrstoće ljuštenja i linijski koji sumira prosečne vrednosti za otpornost pri ljuštenju za pojedinačne varijante priprema i oba materijala, sa naznačenim standardnim odstupanjima.



Slika 4.27 Uporedni prikaz prosečne čvrstoće ljuštenja (MPa) i otpornosti pri ljuštenju (N/mm) zalepljenih spojeva u odnosu na metod pripreme površine za nerđajući čelik

X5CrNi18-10



Slika 4.28 Uporedni prikaz prosečne čvrstoće ljuštenja (MPa) i otpornosti pri ljuštenju (N/mm) zalepljenih spojeva u odnosu na metod pripreme površine za leguru aluminijuma EN AW 5754

Na osnovu rezultata ispitivanja može se zaključiti da se zalepljeni spojevi izrađeni lepkom SikaFast®-580 odlikuju najvećom ponovljivošću dobijenih rezultata i nižim vrednostima čvrstoće ljuštenja u poređenju sa ostalim ispitivanim lepkovima. Maksimalna prosečna vrednost čvrstoće ljuštenja dobijena nakon laserskog čišćenja uzoraka od nerđajućeg čelika iznosila je 13,26 MPa (otpornost pri ljuštenju 3,4 N/mm), dok je standardno odstupanje 0,56 MPa. Na aluminijumu ovaj postupak takođe daje zadovoljavajuće rezultate, približno kao priprema šmirglom P180, gde je maksimalna prosečna čvrstoća iznosila 11,77 MPa, pri standardnom odstupanju od 1,06 MPa.

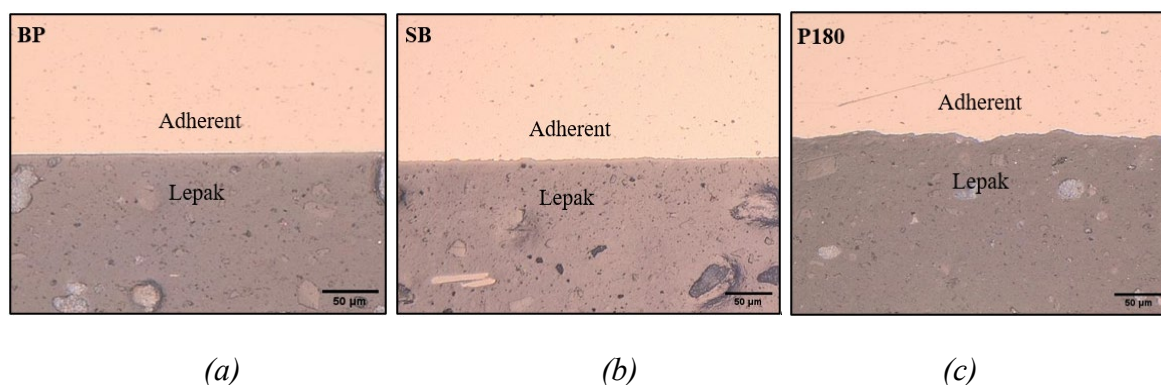
Kao i kod ispitivanja smicanjem, lasersko čišćenje je povećalo čvrstoću zalepljenih spojeva sa lepkom SikaPower®-880 kod oba ispitivana materijala, pri čemu su postignute maksimalne prosečne vrednosti čvrstoće do 30,96 MPa (otpornost pri ljuštenju 7,42 N/mm, standardno odstupanje 0,19 N/mm) na nerđajućem čeliku. Ovde je bitno naglasiti da se na dijagramima jasno uočavaju razlike u čvrstoći između priprema, a naročito je uočljiv pad čvrstoće i veće varijacije u ponovljivosti rezultata kod uzoraka koji su bez prethodne pripreme. Što jasno ukazuje na to da je lepak 880 osetljiviji na varijacije u pripremi površine.

Za zalepljeni spoj ostvaren lepkom SikaPower®-492 G rezultati pokazuju da je na aluminijumu priprema šmirglom P180 dala neznatno bolje rezultate u pogledu čvrstoće (0,29 MPa) u odnosu na lasersko čišćenje koje se na nerđajućem čeliku pokazalo kao uspešnije (uz smanjenu otpornost na ljuštenje). Ostale vrednosti čvrstoće su varirale u zavisnosti od

materijala i načina pripreme površina. Pri čemu su najniže vrednosti dobijene kod uzoraka bez prethodne pripreme kod oba ispitivana materijala, dok su uzorci sa nešto povišenom hrapavošću nakon pripreme Scotch-Brite-om pokazali iste (u slučaju nerđajućeg čelika) ili nešto bolje rezultate (kod aluminijuma) čvrstoće na ljuštenje.

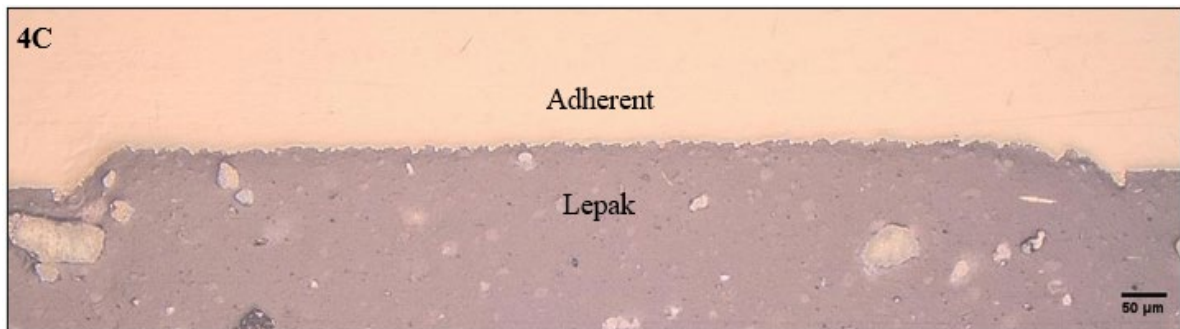
4.8 Analiza poprečnog preseka zalepljenog spoja

Na slici 4.29 prikazan je poprečni presek zalepljenih spojeva izrađenih od adherenata bez pripreme (BP), pripremljenih Scotch-Brite-om (SB) i pripremljenih brusnim papirom P180, a zalepljenih lepkom SikaPower®-492 G. Jasno se može uočiti da poprečni presek na slici 4.29 (a) pokazuje gotovo ravne konture (ima gotovo linearan karakter), dok presek na slici 4.29 (b) i (c) pokazuje nepravilnu, nazubljenu (reljefnu) morfologiju, što povećava stvarnu kontaktnu površinu i doprinosi boljoj adheziji. Kod površina sa većom hrapavošću, lepak dublje prodire u neravnine, čime se poboljšava prionljivost i povećava otpor na odvajanje usled povećane adhezione sile i mehaničkog povezivanja.

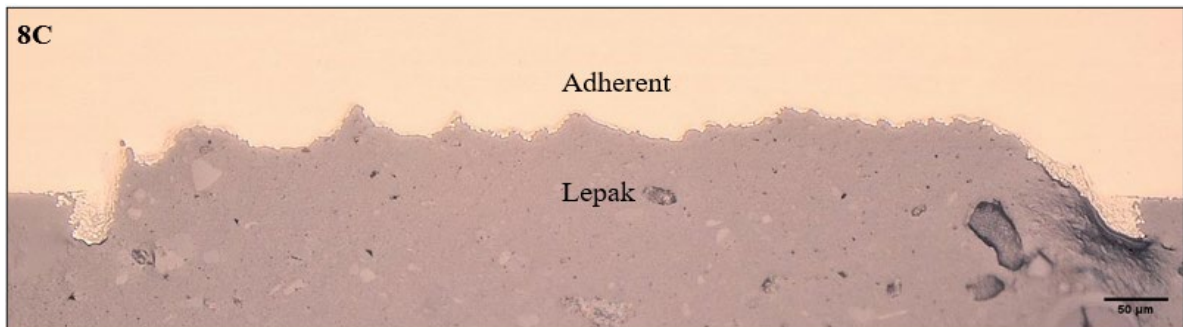


Slika 4.29 Poprečni presek zalepljenih spojeva adherenata od legure aluminijuma EN AW 5754 snimljen optičkim mikroskopom, uz različite metode pripreme površine: (a) BP- bez pripreme, (b) SB- Scotch-Brite i (c) brusni papir P180

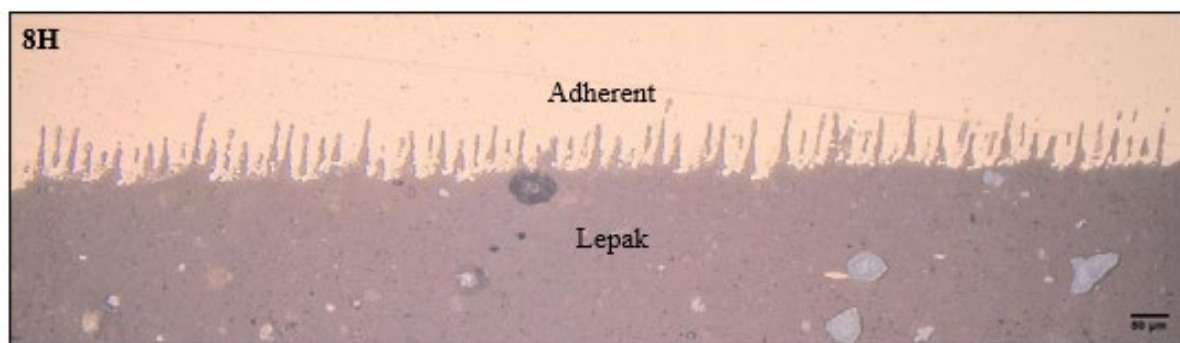
Na poprečnom preseku laserski graviranih tekstura jasno se uočavaju udubljenja i žlebovi, što ukazuje na uspešnu modifikaciju podloge sa ciljem poboljšanja mehaničkog povezivanja sa lepkom. Unutar tih tekstura, lepak je uspešno penetrirao i ostvario kontakt sa površinom podloge (slika 4.30 (a)), međutim mikrostruktura osnovnog materijala neposredno ispod teksture deluje porozno i očvrstlo, što se može jasno uočiti na slici 4.30 (b) na uzorku 8C pri dubini od 80 µm, i najverovatnije ukazuje na posledice lokalnog rastopljenog materijala i rekristalizacije tokom laserskog graviranja. Ova zona može biti klasifikovana kao ponovo očvrstli redeponovani sloj, o kome je bilo reči u poglavlju 4.3.



(a)



(b)



(c)

Slika 4.30 Poprečni presek zalepljenih spojeva snimljen optičkim mikroskopom, uz različite teksture pomoću lasera: (a) 4C- kružna udubljenja od 40 µm na nerđajućem čeliku X5CrNi18-10, (b) 8C- kružna udubljenja od 80 µm na nerđajućem čeliku X5CrNi18-10 i (c) 8H- tekstura saće od 80 µm na leguri aluminijuma EN AW 5754

Redeponovane zone, nastale tokom procesa laserskog graviranja, mogu poslužiti kao osnova za ostvarivanje mehaničkog povezivanja lepka putem mikroskopskih udubljenja, pora i neravnina, što omogućava povezivanje lepka sa površinskom morfologijom podloge (u neravninama i strukturama površine materijala). Međutim, takve zone su često strukturalno heterogene i sadrže mikropukotine, porozne oblasti i lokalne nepravilnosti nastale termičkom degradacijom. Zbog toga dolazi do otežanog i ravnomernog prodiranja lepka, čime se smanjuje čvrstoća spoja i narušava ukupna koherentnost veze sa osnovnim materijalom, što može

negativno uticati na dugoročnu mehaničku stabilnost spoja. U poređenju sa površinama tretiranim mehaničkim brušenjem, koje obično imaju stabilniju i homogeniju topografiju, gravirane površine pokazuju smanjenu sposobnost da formiraju pouzdanu i trajnu mehaničku vezu sa lepkom.

Na slici 4.30 (c), kod teksture saće (8H) primetne su neujednačene dužine i debljine linija, što ukazuje na nehomogenu geometriju i potencijalne nepravilnosti u procesu graviranja. Takve varijacije u dimenzijama linija i formi teksture mogu izazvati lokalne koncentracije napona, jer se opterećenje ne raspoređuje ravnomerno kroz površinu. Dodatno, prisustvo mikroporoznosti, mehura, termičkih defekata unutar teksture smanjuju ukupni integritet strukture, jer ove nepravilnosti mogu delovati kao inicijatori prslina i mesta gde može doći do loma pod opterećenjem. Za razliku od kompaktnije i homogenije površine dobijene ručnim brušenjem, sačasta tekstura usled svog neravnomernog profila i prisustva defekata rezultira slabijom mehaničkom čvrstoćom, što potvrđuju i rezultati ispitivanja na smicanje.

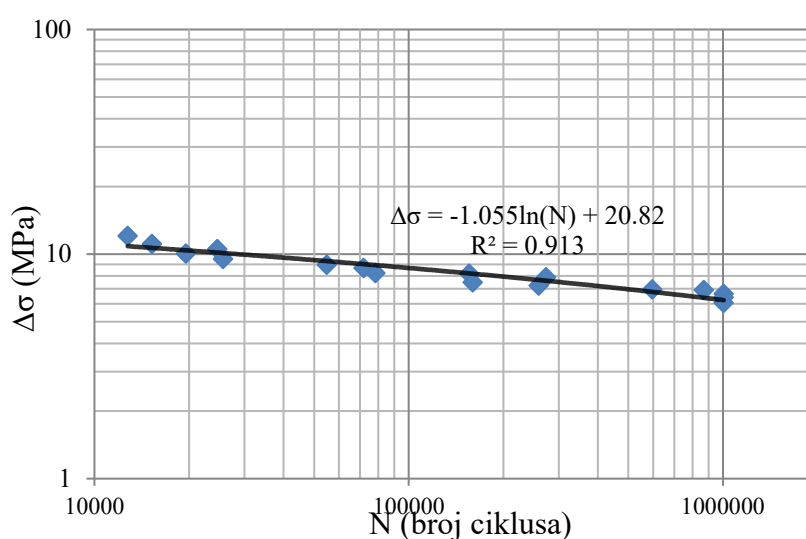
4.9 Eksperimentalno ispitivanje zalepljenih spojeva na smicanje pri cikličnom opterećenju na zatezanje

Rezultati ispitivanja jednostruko preklopnog zalepljenog spoja od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 i lepka SikaFast®-580 pri frekvenciji opterećenja od 60 Hz i koeficijentu asimetrije ciklusa $R = 0,1$, prikazani su u tabeli 4.7. Važno je napomenuti da frekvencija od 60 Hz omogućava brzo sprovođenje ispitivanja, bez zagrevanja zalepljenog spoja. Sva ispitivanja su sprovedena u standardnim laboratorijskim uslovima prema standardu SRPS EN ISO 9664 [145].

Tokom ispitivanja evidentirani su podaci o broju ciklusa u trenutku loma uzoraka, u slučaju uzoraka kod kojih nije došlo do loma nakon 10^6 ciklusa ispitivanje je prekinuto, a nivo opterećenja se definiše kao manja ili jednaka vrednost trajnoj dinamičkoj izdržljivost spoja [171]. Na osnovu rezultata ispitivanja na zamaranje prikazanih u tabeli 4.7 dobijena je Velerova (S-N) kriva koja prikazana na slici 4.31.

Tabela 4.7 Rezultati ispitivanja na zamaranje zalepljenog spoja od nerđajućeg čelika
X5CrNi18-10 i lepka SikaFast®-580

Uzorak No.	F_{max} (N)	F_{min} (N)	ΔF (N)	$\Delta\sigma$ (MPa)	N (ciklus)
5-4	4000	400	3600	12,04	12763
5-5	3800	380	3420	11,11	15233
5-6	3600	360	3240	10,52	24570
5-7	3400	340	3060	10,05	19519
5-8	3200	320	2880	9,52	25654
5-9	3000	300	2700	8,96	54820
5-10	3000	300	2700	8,66	71896
5-11	2800	280	2520	8,23	78265
5-12	2800	280	2520	8,17	155755
5-13	2600	260	2340	7,89	273543
5-14	2600	260	2340	7,49	159699
5-15	2400	240	2160	7,24	258786
5-16	2400	240	2160	6,91	868687
5-17	2400	240	2160	6,96	596120
5-18	2300	230	2070	6,64	1005000
5-19	2200	220	1980	6,42	1005000
5-20	2000	200	1800	6,07	1005000



Slika 4.31 Velerova (S-N) kriva za jednostruko preklopni zalepljeni spoj od nerđajućeg čelika
X5CrNi18-10 i lepka SikaFast®-580

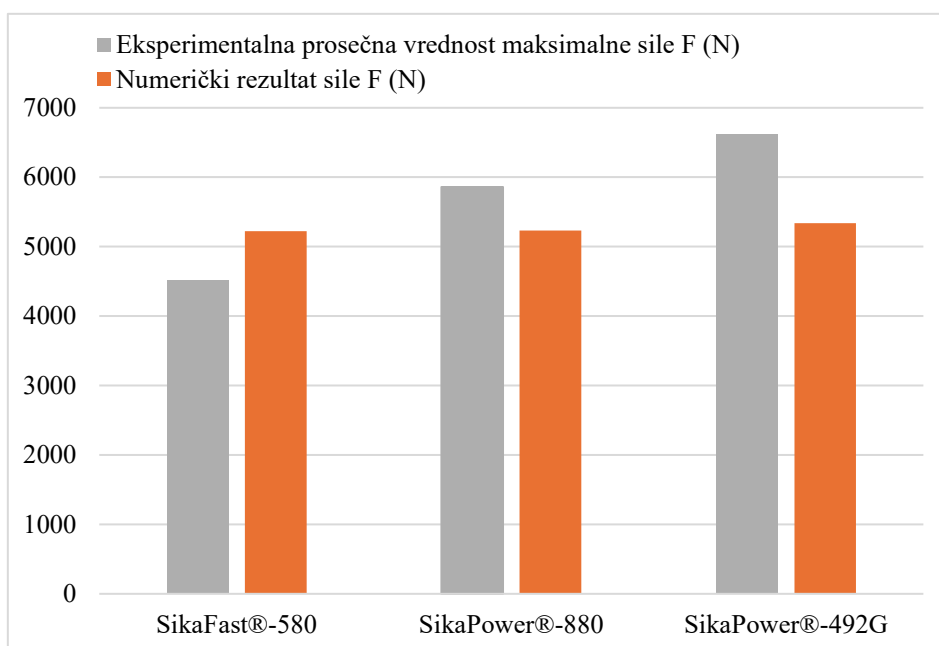
Na osnovu zakonitosti S-N krive sa slike 4.31 i dinamičke izdržljivosti definisane za broj ciklusa 10^6 može se zaključiti da je trajna dinamička čvrstoća jednostruko zalepljenog spoja kada su adherenti od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10, a lepak SikaFast®-580, pri $\Delta\sigma = 6,24$ MPa.

4.10 Numerička analiza jednostruko preklopnih zalepljenih spojeva

U tabeli 4.8 prikazani su uporedni rezultati dobijeni eksperimentalnim ispitivanjem na smicanje pri zatezanju i numeričkom analizom za identične uslove – isti materijal, lepak i geometriju jednostruko preklopnog spoja. Na osnovu dobijenih uporednih vrednosti iz tabele 4.8 na slici 4.32 prikazani su rezultati ispitivanja u vidu stubičastih dijagrama.

Tabela 4.8 Uporedne vrednosti rezultata za leguru aluminijuma EN AW 5754

Lepak	Eksperimentalna prosečna vrednost maksimalne sile (N)	Numerički rezultat sile (N)	Relativna greška
<i>SikaFast®-580</i>	4516,3	5224,7	-16%
<i>SikaPower®-880</i>	5859,2	5234,1	11%
<i>SikaPower®-492G</i>	6624,6	5336,7	19%



Slika 4.32 Uporedni prikaz eksperimentalnih i numeričkih rezultata jednostruko preklopnog zalepljenog spoja od legure aluminijuma EN AW 5754

FEA model ukazuje na dobru saglasnost sa eksperimentalnim rezultatima, pri čemu relativna greška za slučaj legure aluminijuma EN AW 5754 ne prelazi 19% ni za jedan od tri korišćena lepka. Dobijeni rezultati su u skladu sa vrednostima iz prethodnih studija [172, 173], čime se potvrđuje validnost primenjenog pristupa (modela).

5. Zaključak

Lepljenje predstavlja savremenu i veoma fleksibilnu tehnologiju spajanja koja nudi brojne prednosti u odnosu na tradicionalne metode spajanja. Univerzalnost lepljenja ogleda se u mogućnosti povezivanja različitih vrsta materijala, jednostavnosti primene i potencijalu za smanjenje proizvodnih troškova uz zadržavanje zadovoljavajućih mehaničkih karakteristika spoja. Adekvatna priprema površina podloga koje se spajaju predstavlja ključni preduslov za postizanje visoke mehaničke čvrstoće zalepljenih spojeva. Površinska priprema omogućava uklanjanje kontaminanata, slabo vezanih oksidnih slojeva i drugih nepoželjnih čestica koje mogu delovati kao slabi interfejsi, značajno umanjujući adhezionu sposobnost lepka. Osim toga, pravilno tretirana površina omogućava bolju sposobnost kvašenja, čime se obezbeđuje blizak kontakt između lepka i podloge, što je preduslov za ostvarivanje jakih hemijskih i/ili mehaničkih veza. Formiranjem stabilnog i homogeno raspoređenog interfejsa, smanjuje se rizik od koncentracije napona na granicama spoja, čime se povećava ukupna otpornost na lom, kao i sposobnost spoja da podnese i ciklična (dinamička) opterećenja. U tom smislu, priprema površine direktno utiče ne samo na početnu čvrstoću spoja, već i na njegovu dugoročnu stabilnost u realnim uslovima eksploatacije. Zbog toga je u svim aplikacijama u kojima se zahtevaju visokoperformansi zalepljeni spojevi – poput onih u vazduhoplovstvu, automobilske industriji i konstrukcijama izloženim agresivnom okruženju – pravilna i ponovljiva priprema površine od suštinskog značaja za postizanje optimalnih mehaničkih svojstava spoja.

Eksperimentalna istraživanja sprovedena u okviru ove doktorske disertacije bila su usmerena na analizu uticaja različitih postupaka pripreme površina (bez pripreme, ručno brušenje abrazivnim jastučićima Scotch-Brite, ručno brušenje brusnim papirom granulacije P180, lasersko graviranje i lasersko čišćenje) na čvrstoću zalepljenih spojeva, utvrđenu ispitivanjima na smicanje pri zatezanju i ljuštenje metodom pokretnog valjka. Tokom ispitivanja određeni su parametri hrapavosti i topografije površina, ugao kvašenja, hemijski sastav površinskog sloja (EDS analiza), kao i karakteristike poprečnog preseka spoja i mod otkaza nakon loma. Svojstva dinamičke izdržljivosti ispitivana su na uzorcima podvrgnutim cikličnom opterećenju konstantne amplitude i na kraju je usledila numerička analiza rezultata ispitivanja uzoraka na smicanje pri zatezanju.

Na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja u ovoj disertaciji mogu se doneti sledeći zaključci:

1. Na čvrstoću zalepljenih spojeva dominantno utiče priprema površina podloga. Izbor za pripremu površina od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 i legura aluminijuma EN AW 5754 zasnivala se na dosadašnjim istraživanjima i praktičnim zapažanjima koje ukazuju na značajan uticaj mikrostrukture površine na kvalitet i čvrstoću zalepljenog spoja.
2. Najjednostavnija metoda mehaničke pripreme površine je ručno brušenje pomoću specijalizovanih abrazivnih jastučića ili papira različitih granulacija, nakon čega sledi čišćenje odnosno brisanje čistačem radi uklanjanja ostataka. Za ručno brušenje odabrani su abrazivni jastučići Scotch-Brite i brusni papir granulacije P180 koji nisu dovoljno istraženi u postojećim istraživanjima priprema površina pre lepljenja, čime se pruža prilika za dobijanje novih saznanja o uticaju ovih metoda na strukturu površine i čvrstoću zalepljenog spoja.
3. Lasersko graviranje i čišćenje površina omogućava visoku preciznost i kontrolisanu izmenu površinske strukture, čime se povećava površina za adheziju i eliminišu kontaminanti. U ovoj disertaciji razvijene su i usvojene četiri različite teksture (kružna udubljenja, linijski žlebovi, mix i tekstura saće) u dve dubine (40 μm i 80 μm). Uključivanje različitih formi i dubina tekstura omogućava procenu uticaja kombinacije geometrije i vertikalne dimenzije teksture na smicajnu čvrstoću zalepljenog spoja, pružajući vredne podatke za optimizaciju procesa lepljenja u industrijskoj primeni.
4. Kod metala poput nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 i legure aluminijuma EN AW 5754 pripremljene ručnim brušenjem (abrazivni jastučić Scotch-Brite i brusni papir granulacije P180) značajno se utiče na topografiju i hemijsku reakciju površine, uklanjanjem oksidnih slojeva. Time se omogućava povoljnije kvašenje i povećava verovatnoća formiranja hemijskih ili mehaničkih veza između adherenata i lepka.
5. Kontaktni ugao predstavlja ključni parametar za ocenu sposobnosti površine da uspostavi interakciju sa tečnošću (lepkom), pri čemu dobijeni rezultat merenjem kontaktnog ugla $<10^\circ$ kod uzoraka nakon laserskog graviranja u literaturi se klasifikuje kao super-hidrofilno stanje površine. Ovakav rezultat implicira postojanje visoke površinske slobodne energije, kao i prisustvo hidrofilnih funkcionalnih grupa (hidroksilna, karboksilna, amino grupa...) ili izražene hrapavosti koje doprinose distribuciji tečnosti po površini, što čini povoljnu osnovu za formiranje stabilne i jake adhezione veze.
6. Pravovremeno lepljenje uzoraka neposredno nakon njihove pripreme pokazalo se kao ključno u očuvanju površinskih svojstava i dobijanju pouzdanih rezultata. Porast kontaktnog ugla nakon izlaganja ambijentalnom vazduhu sa 0° na $10,2^\circ$ u slučaju legure

aluminijuma (nakon 12 dana) i čak 20,6° u slučaju nerđajućeg čelika (nakon 3 dana), ukazuje na postepeni gubitak hidrofilnosti, verovatno usled apsorpcije zagađivača ili promena u hemijskoj strukturi. Ovi rezultati podvlače važnost momentalnog lepljenja uzoraka nakon površinske pripreme, kako bi se izbegle neželjene promene koje mogu uticati na tačnost i konzistentnost rezultata.

7. Vreme trajanja pripreme površine značajno se razlikuje u zavisnosti od primenjene metode pripreme. Primenjene mehaničke metode, ručno brušenje abrazivnim jastučićima Scotch-Brite i brusni papir granulacije P180, pokazale su se kao vremenski najmanje zahtevne - prosečno vreme pripreme iznosi oko 30 sekundi po uzorku. Lasersko čišćenje površine realizuje se u veoma kratkom vremenskom intervalu, pri čemu se površina dimenzija 25 mm x 12,5 mm može očistiti za približno 2 sekunde, u zavisnosti od materijala i stanja površine. S druge strane, lasersko graviranje se pokazalo kao vremenski najzahtevnija metoda. Na leguri aluminijuma, vreme graviranja po uzorku se kretalo od oko 7 minuta za teksturu dubine 40 μm (4C) do 31 minut za teksturu dubine 80 μm (8L). Na nerđajućem čeliku, vreme potrebno za izradu tekstura se dodatno povećava i dostiže vrednosti od 25 minuta za teksture dubine 40 μm (4C) do 1 sata i 32 minuta za izradu jedne teksture dubine 80 μm (8L). Ove razlike ukazuju na to da izbor metode pripreme ne utiče samo na karakteristike spoja, već ima direktan uticaj na ukupnu efikasnost procesa, što je naročito važno u kontekstu pripreme u industrijskim uslovima i optimizaciji vremena proizvodnje.
8. Rezultati EDS analize pokazuju da se različitim metodama pripreme površine može uticati na hemijski sastav površine. Porast sadržaja kiseonika na površini nerđajućeg čelika (sa 1,22 na 18,31 masenih %) i na leguri aluminijuma (sa 7,65 na 18,88 masenih %) kod uzoraka nakon laserskog graviranja u odnosu na uzorke bez prethodne pripreme ukazuje na značajnu modifikaciju hemijske strukture, posebno formiranje polarnih funkcionalnih grupa koje sadrže kiseonik. To povećava površinsku energiju i sposobnost kvašenja, što zajedno sa povećanom hrapavošću poznato je doprinosi većoj adheziji epoksidnih lepkova prema podlozi.
9. Rezultati ispitivanja na smicanje jednostrukog preklopnog spoja od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 zalepljenog epoksidnim lepkom SikaFast®-580 pokazali su da je najveća čvrstoća spoja nakon pripreme uzoraka ručnim brušenjem, brusnim papirom granulacije P180. Na osnovu dijagrama sila – izduženje, uzorci pripremljeni brusnim papirom P180 osim najveće čvrstoće spoja (porast od 20,8% u odnosu na uzorke bez pripreme), pokazali su i veću stabilnost ponašanja pri deformaciji, pri čemu je sila loma

bila konzistentna pri izduženjima od oko 0,41 mm u poređenju sa uzorcima bez prethodne pripreme koji su pokazali nižu čvrstoću uz veće varijacije, sa lomom u opsegu od 0,35 do 0,49 mm. Uprkos tome što je brušenje nerđajućeg čelika brusnim papirom P180, u odnosu na uzorke bez prethodne pripreme, dovelo do smanjenog sadržaja kiseonika (odnosno oksida) na površini (sa 1,22 na 0,42 masenih %) i povećanja kontaktnog ugla (što ukazuje na slabiju sposobnost kvašenja), mehaničko uklanjanje pasivnog oksidnog sloja i povećana hrapavost ovih uzoraka ($Ra = 0,45 \mu\text{m}$) omogućili su efikasnije povezivanje lepka za površinu, što je dodatno potvrđeno prelaskom sa adhezionog (kod uzoraka BP) na kohezioni i specijalni kohezioni tip loma kod uzoraka brušenih P180. Ovakvi rezultati ukazuju da kod nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 u kombinaciji sa SikaFast®-580 brušenje brusnim papirom P180 ne samo da poboljšava čvrstoću spoja, već i značajno doprinosi njegovoj pouzdanosti i ponovljivosti, što je ključno za primene u kojima je stabilnost mehaničkog spoja od presudnog značaja.

10. Eksperimentalni rezultati pokazali su da je ispitivani lepak SikaPower®-880 ostvario za oko 16% veću čvrstoću na smicanje nakon laserskog čišćenja u poređenju sa površinom nerđajućeg čelika bez prethodne pripreme. Zabeležen je kohezioni i specijalni kohezioni lom kod svih uzoraka što ukazuje na veću čvrstoću spoja u odnosu na čvrstoću samog lepka, što potvrđuje efikasnost laserskog čišćenja površine i jasan je pokazatelj dobre adhezije i pravilne pripreme površine. Zabeleženo izduženje od 0,33 mm ukazuje na određeni stepen duktilnosti u ponašanju lepka, što može doprineti povećanoj otpornosti spoja na udarna i promenljiva opterećenja. Ovakav spoj pokazuje povoljnu kombinaciju čvrstoće i žilavosti, što ga čini pogodnim za primenu u zahtevnijim radnim uslovima, gde su neophodne i visoka mehanička otpornost i pouzdanost u eksploataciji. Dobijeni rezultati su u skladu sa deklarisanim svojstvima lepka od strane proizvođača.
11. Rezultati ispitivanja smicanja pri korišćenju jednokomponentnog lepka SikaPower®-492 G ukazuju na pozitivan uticaj laserskog graviranja pri dubini od $80 \mu\text{m}$ na mehaničke karakteristike spoja. Ispitivani spojevi sa teksturom kružnih udubljenja pokazali su veće vrednosti sile loma i izduženje od 0,40 mm, u poređenju sa uzorcima bez pripreme površine. Iako je zabeležena standardna devijacija od 3,69 MPa, što ukazuje na nešto veću varijabilnost u rezultatima, prosečne vrednosti ipak pokazuju poboljšanje u odnosu na uzorke BP. Teksture sa kružnim udubljenjima pri dubini od $40 \mu\text{m}$ nisu pokazale značajno poboljšanje, rezultati su uporedivi sa uzorcima BP, uz

izduženje od 0,45 mm. Analiza moda otkaza pokazuje pretežno kohezioni i specijalni kohezioni lom, sa svega 1% adhezionog loma, što je značajno poboljšanje u odnosu na uzorke BP, kod kojih je adhezioni lom bio zastupljen sa 7,7%. Ovakva raspodela loma ukazuje da laserski gravirana kružna udubljenja omogućavaju bolju adheziju i prijanjanje lepka za podlogu, što dodatno potvrđuje korisnost laserske pripreme površine u ovom slučaju.

12. Mikroskopska analiza površina poprečnog preseka nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 nakon laserskog graviranja teksturom 8C pokazala je i određene negativne efekte, uključujući prisustvo istopljenog materijala, neravnomernosti i pojedinačnih defekata u strukturi površine. Ove pojave mogu negativno uticati na homogenost lepka i dugoročnu stabilnost spoja. Uprkos tome, eksperimentalni rezultati i analiza moda otkaza pokazuju da ovi defekti, u slučaju primene lepka SikaPower®-492 G, nisu značajno narušili čvrstoću spoja u početnim ispitivanjima, ali bi mogli predstavljati kritične tačke kod dugotrajnog zamora ili termičkog starenja.
13. Ispitivanjem čvrstoće smičućeg spoja adherentata od aluminijuma EN AW 5754 i primenom lepka SikaFast®-580, utvrđeno je da je mehanička priprema površine brušenjem brusnim papirom najefikasnija metoda. Uzorci pripremljeni šmirglom P180 pokazali su najveće vrednosti čvrstoće spoja, uz nešto izraženije izduženje od 0,6 mm (u poređenju sa ostalim od 0,32 do 0,5 mm), dominantno kohezioni i specijalno kohezioni mod otkaza, kao i hemijske i topografske karakteristike slične onima dobijenim na nerđajućem čeliku, uključujući smanjenje sadržaja kiseonika, povećanu hrapavost ($Ra = 1,75 \mu\text{m}$) i nešto povećan kontaktni ugao. Ovako dobijeni rezultati ukazuju na pouzdanost metode i konzistentno ponašanje lepka na različitim podlogama uz adekvatnu pripremu.
14. Metod pripreme površine koji daje najbolje rezultate čvrstoće spoja od EN AW 5754 i lepka SikaPower®-880 je lasersko čišćenje površine. U poređenju sa uzorcima bez pripreme, zabeleženo je povećanje čvrstoće za 17,47%, uz izduženje od 0,48 mm, što ukazuje na poboljšanu adheziju. Dominantan CF i SCF mod otkaza kod laserski očišćenih uzoraka, za razliku od prisustva adhezionog loma (16,7% AF) kod uzoraka bez pripreme, potvrđuje efikasnost metode laserskog čišćenja u poboljšanju vezivanja lepka sa adherentom. Kod metode laserskog graviranja povećanje dubine dovelo je do smanjenja čvrstoće spoja (npr. pad vrednosti čvrstoće za 19,95% kod tekstura 8H u odnosu na LC), što ukazuje na potrebu za optimizacijom procesa kako bi se izbegli negativni efekti kao što su stvaranje debljih oksidnih slojeva ili oštećenja površine.

Dobijeni rezultati na aluminijumu su saglasni sa rezultatima čvrstoće spoja od nerđajućeg čelika, gde se lasersko čišćenje takođe pokazalo kao najbolja priprema površine u kombinaciji sa istim lepkom.

15. Jednostruko preklopni spoj od legure aluminijuma EN AW 5754, za ispitivani lepak SikaPower®-492 i pripremu površine laserskim čišćenjem pokazuju statistički bolje rezultate čvrstoće spoja, za 3% veću čvrstoću u odnosu na uzorke bez pripreme i 15,70% u odnosu na najslabije rezultate postignute nakon pripreme laserskim graviranjem, teksturom 8H.
16. Lasersko graviranje nudi visoku preciznost u formiranju površinskih formi, ali rezultati smicanja pri zatezanju pokazuju da u pogledu čvrstoće gravirane površine mogu biti mehanički inferiorne u poređenju sa očišćenim ili ručno brušenim površinama. Ova razlika se može direktno povezati sa lokalnim defektima, koncentracijom napona i smanjenjem efektivne površine za prenos opterećenja, što sve zajedno narušava integritet materijala. Iako je lasersko graviranje omogućilo realizaciju različitih tekstura (kružnih, linijskih, mix i saće), potpuno kvašenje (tj. kontaktni ugao 0°) i povećan sadržaj kiseonika, ispitivanja mehaničke čvrstoće pokazala su da ove površinske modifikacije nisu doprinele značajnom povećanju čvrstoće spoja, čak su u većini slučajeva rezultati pokazali niže vrednosti u poređenju sa uzorcima pripremljenim mehaničkim pripremama ili samo čišćenjem. Zbog toga se može zaključiti da povoljne karakteristike kvašenja i hemijske aktivacije površine (povećanje sadržaja polarnih grupa, oksidacija površine, uklanjanje kontaminacija i promene u površinskoj energiji) same po sebi nisu dovoljne za postizanje kvalitetne veze između lepka i adherenta. Ključni faktor je balans između hemijskih, topografskih i mehaničkih karakteristika površine, pri čemu mehanička priprema ručnim brušenjem brusnim papirom granulacije P180 obezbeđuje optimalne uslove za lepljenje legure aluminijuma EN AW 5754 i nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 lepkovima strukturne namene.
17. Ispitivanja čvrstoće spoja su pokazala da ista metoda pripreme površine, ručno brušenje brusnim papirom P180, daje najbolje rezultate za oba ispitivana materijala (X5CrNi18-10 i EN AW 5754), kada se koristi lepak SikaFast®-580. Takođe, za oba ispitivana materijala zalepljena lepkom SikaPower®-880 rezultati ističu metod laserskog čišćenja kao najefikasniji metod u postizanju maksimalne čvrstoće spoja. Kod trećeg ispitivanog lepka, SikaPower®-492, zapaženo je da se metodama laserskog graviranja (na nerđajućem čeliku X5CrNi18-10) i laserskog čišćenja (na leguri aluminijuma EN AW 5754) mogu postići optimalni rezultati čvrstoće spoja.

18. Primetno je da u pojedinim kombinacijama adherent-lepak, uzorci bez površinske pripreme dostižu čak i veće vrednosti čvrstoće spoja u poređenju sa uzorcima kod kojih je primenjena neka od metoda pripreme površine (posebno u slučaju kombinacije lepka SikaFast®-580 sa EN AW 5754 ili lepak SikaPower®-492 kod oba ispitivana materijala). Ovaj rezultat ukazuje na to da priprema površine ne garantuje uvek poboljšane rezultate čvrstoće spoja, kao i to da nije uvek korisna, njen efekat može zavisiti od tipa i sastava podloge, hemijskog sastava površine i mehanizma vezivanja lepka, optimalne hrapavosti, kao i od izabranog metoda pripreme površine. Uzimajući u obzir i to da epoksidni lepkovi, pod određenim uslovima, mogu zadržati funkcionalnu adheziju i na kontaminiranim površinama, zahvaljujući sposobnosti sistema da prihvati, preraspodeli ili apsorbuje uljne čestice unutar epoksidne matrice, potrebno je jasno naglasiti potrebu za pažljivim odabirom i optimizacijom metode pripreme površine u skladu sa konkretnim lepak-podloga sistemom (odnosno precizne kombinacije podloga-lepak), jer standardne procedure ne garantuju uvek superiorne performanse.
19. Značajne razlike u čvrstoći utvrđene su između spojeva legure aluminijuma EN AW 5754 i nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 kada su korišćeni isti lepak i priprema površine. Spojevi od nerđajućeg čelika sa istim epoksidnim lepkovima pokazali su od 9% do 55% veću čvrstoću od spojeva legura aluminijuma, u zavisnosti od izbora pripreme površine. Razlike u čvrstoći između materijala uglavnom su posledica različitih svojstava površina pojedinačnih metalnih legura, što je rezultiralo različitim stepenom adhezije na svaki deo koji se lepi. Izbor pripreme površine koja je pogodna za materijal podloga koje se spajaju i hrapavost površine je od velikog značaja, jer može poboljšati čvrstoću zalepljenih spojeva.
20. Rezultati ispitivanja pokazuju da visoka zatezna čvrstoća lepka pretežno doprinosi većoj smicajnoj čvrstoći spoja, što je jasno pokazano kod zalepljenih spojeva adhirenata od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 sa kohezionim lomom. Kod spojeva od legure aluminijuma EN AW 5754 ova korelacija između zatezne i smicajne čvrstoće je slabije izražena jer na spoj pored svojstava lepka mogu uticati adhezija, priprema i hrapavost površine, kao i mehaničko zaključavanje. Razlike u ovim faktorima mogu doprineti varijacijama u tipu loma i smicajnoj čvrstoći u odnosu na nerđajući čelik. Pri odabiru lepka i pripremi podloge važno je uzeti u obzir i materijal spoja kako bi se postigla optimalna čvrstoća zalepljenog spoja.
21. Analizom rezultata moda otkaza nakon ispitivanja jednostruko preklopnog spoja na smicanje može se zaključiti za oba materijala da je lom u lepku (kohezioni lom) bio

izraženiji kod uzoraka koji su pripremljeni brusnim papirom P180, Scotch-Brite-om ili laserskim čišćenjem. U većini slučajeva, do adhezionog loma je došlo nakon laserskog graviranja zbog nedovoljne adhezije, kontaminacije ili oksidacije tokom procesa graviranja. Takođe, tokom procesa graviranja došlo je i do lokalnog topljenja i naknadnog očvršćavanja površinskog sloja, pri čemu se formirao tzv. redeponovani sloj sa smanjenom hemijskom reaktivnošću i mehaničkom stabilnošću.

22. Zabeležena čvrstoća spoja pri ljuštenju metodom pokretnog valjka bila je znatno niža u poređenju sa smicajnim opterećenjem. U slučaju lepka SikaFast®-580 čvrstoća spoja uzoraka bez prethodne pripreme na EN AW 5754 nakon ispitivanja na smicanje bila je 29% veća, dok je na X5CrNi18-10 postignuta čvrstoća spoja za 173% veća nakon ispitivanja smicanjem. Kod lepka SikaPower®-880 ta razlika u čvrstoći je još izraženija, na aluminijumu 82%, dok na nerđajućem čeliku za čak 886%. Za razliku od smicanja, gde naponi deluju paralelno sa površinom lepljenja, kod ljuštenja dolazi do visoko lokalizovanih napona na ivici spoja, što dovodi do naglog iniciranja loma i ubrzanog propagiranja prsline. Ovakvi rezultati ukazuju na izraženu zavisnost nosivosti spoja od vrste opterećenja i mehanizma loma.
23. Lepak SikaPower®-492 pri ispitivanju na ljuštenje ostvario je bolje performanse nego prilikom ispitivanja smicanjem, što je suprotno ponašanju druga dva ispitivana lepka, koji su u smicanju pokazali veću čvrstoću nego pri ljuštenju. Konkretno, kod pripreme površine nerđajućeg čelika brusnim papirom P180 u oba slučaja ispitivanja (na ljuštenje i smicanje), čvrstoća spoja bila je za 20,30% veća pri ljuštenju u poređenju sa rezultatima čvrstoće nakon smicanja, što ukazuje na specifično ponašanje ovog lepka pod kompleksnijim mehaničkim opterećenjem.
24. Test ljuštenja metodom pokretnog valjka pokazao se kao osetljiviji na varijacije u pripremi površine, u poređenju sa testom smicanja pri zatezanju. Uzorci bez prethodne pripreme su pokazali nižu čvrstoću spoja u odnosu na ostale pripreme (Scotch-Brite, P180 i čišćenje laserom). Uzorci pripremljeni brusnim papirom P180 i laserskim čišćenjem izdvojili su se kao najefikasniji, pri čemu je zabeležena i korelacija sa povećanjem površinske hrapavosti. Metoda pripreme uzoraka laserskim čišćenjem, korišćenjem lepka SikaPower®-880, pokazala je najveći porast čvrstoće u odnosu na uzorke bez pripreme, sa povećanjem od 137% kod EN AW 5754 i čak 1296% kod X5CrNi18-10, što ukazuje na visok stepen osetljivosti ispitivanja ljuštenja metodom pokretnog valjka na različite metode pripreme površine i osobine samog lepka. Može se zaključiti da ponašanje lepka pod različitim vrstama opterećenja može značajno

- varirati, kao i da priprema površine ima presudan uticaj kod naponski osetljivijih testova poput ljuštenja, naročito na materijalu kao što je nerđajući čelik X5CrNi18-10.
25. Kao podloga jednostruko preklopnih spojeva ispitivanih na zamor bio je nerđajući čelik X5CrNi18-10, dok je kao lepak korišćen SikaFast®-580, a priprema površine izvedena je brusnim papirom granulacije P180. Ispitivanje na zamor sprovedeno je na visokofrekventnom pulzatoru ZwickRoell Vibrophore 100, pri konstantnoj amplitudi, odnosu napona $R = 0,1$ i frekvenciji opterećenja od 60 Hz. Na osnovu dobijene Velerove krive (S-N), dinamička čvrstoća utvrđena za 10^6 ciklusa iznosi $\Delta\sigma = 6,24$ MPa. Iako za ispitivani lepak ne postoje dostupni referentni podaci o zamoru materijala u sličnim uslovima, dobijeni rezultat može poslužiti kao osnova za dalje poređenje i evaluaciju njegovih performansi u realnim radnim uslovima.
26. Rezultati numeričke analize (FEA) pokazali su dobru korelaciju sa eksperimentalnim podacima na leguri aluminijuma EN AW 5754, sa relativnom greškom u rasponu od približno 11% do 19%. Ova odstupanja se pripisuju idealizovanim pretpostavkama u numeričkom modelu, poput idealizovanih uslova lepljenja i pretpostavljene homogenosti materijala. Uprkos tome, model je efikasno predvideo ponašanje sile i pomeranja za sve testirane lepkove.
27. Nakon numeričke analize, među primenjenim lepkovima su jasno uočene razlike u maksimalnoj sili i pomeranju, što ističe značajan uticaj izbora lepka na performanse spoja. Ovo potvrđuje da razvijeni numerički model pruža pouzdan alat za predviđanje čvrstoće zalepljenog spoja i može se koristiti za dalju optimizaciju i projektovanje zalepljenih struktura ili delova.

Naučni doprinos doktorske disertacije ogleda se u:

- Istraživanju i analizi uticaja mehaničke pripreme površina od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 i legure aluminijuma EN AW 5754 na čvrstoću zalepljenog spoja;
- Istraživanju uticaja tradicionalnih metoda pripreme površine (ručno brušenje abrazivnim jastučićima Scotch-Brite i brusni papir granulacije P180) u poređenju sa savremenim tehnikama laserskog graviranja i laserskog čišćenja;
- Razvoju i eksperimentalnoj primeni četiri forme površinskih tekstura u dve različite dubine graviranja (40 μm i 80 μm), kao faktora koji utiče na čvrstoću spoja;
- Eksperimentalnom određivanju i analizi statičke nosivosti spoja primenom testa na smicanje pri zatezanju jednostruko preklopnog spoja i testa ljuštenja metodom pokretnog valjka uzorka od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 i legure aluminijuma EN AW 5754;

- Eksperimentalno određenim vrednostima otpornosti i čvrstoće ljuštenja zalepljenih spojeva metodom pokretnog valjka, ostvarenih lepljenjem korišćenjem tri različita epoksidna lepka i različitim metodama površinske pripreme na dva ispitivana materijala;
- Uvođenju višekriterijumskog pristupa u oceni kvaliteta zalepljenih spojeva, koji kombinuje površinsku karakterizaciju i mehanička ispitivanja;
- Utvrđivanju veze između topografije, hrapavosti, hemijskog sastava, kontaktnog ugla (sposobnost kvašenja) i mehaničke čvrstoće zalepljenih spojeva na testovima smicanja i ljuštenja;
- Identifikaciji optimalnih kombinacija površinske pripreme i lepka za svaki od ispitivanih materijala;
- Analizi moda otkaza spoja u zavisnosti od površinske pripreme, vrste lepka i materijala (adhezioni, kohezioni lom);
- Eksperimentalno određenim S-N krivama zalepljenih spojeva od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10, pripremljenih šmirglom P180 i zalepljenih lepkom najnovije generacije SikaFast®-580;
- Upporednoj analizi vrednosti dobijenih ispitivanjem testom smicanja i pri numeričkoj analizi zalepljenog spoja, ostvarenih na uzorcima bez prethodne pripreme, korišćenjem tri epoksidna lepka na leguri aluminijuma EN AW 5754.

Pravci budućeg istraživanja su:

- Dalja optimizacija laserskih tekstura kroz varijacije u obliku, rasporedu i dubini, kao i optimizacija parametara lasera sa ciljem smanjenja vremena potrebnog za izradu teksture, dodatnog poboljšanja adhezivnih svojstava i čvrstoće zalepljenog spoja. Kao i primena drugih naprednih površinskih priprema, kao što su plazma tretmani, hemijska modifikacija ili lasersko čišćenje, i njihova kombinacija sa laserskim graviranjem.
- Proširenje istraživanja na druge metalne ili kompozitne materijale koji se koriste u industriji, kako bi se validirali dobijeni rezultati i metode.
- Razvoj i primena numeričkih modela koji integrišu površinsku topografiju i mehaničke osobine spojeva, kao i preciznije ponašanje lepka u spoju radi predviđanja performansi i optimizacije procesa lepljenja.
- Eksperimentalna istraživanja usmerena na analizu procesa ponovnog lepljenja iskorišćenih uzoraka (*engl. debonding*), sa ciljem evaluacije mogućnosti restauracije i produženja radnog veka zalepljenog spoja.

Literatura

- [1] J. Comyn, „Introduction to Adhesion and Adhesives,“ u *Adhesion Science*, The Royal Society of Chemistry, 2021, pp. 1-22.
- [2] W. Brockmann, P. L. Geiß i J. Klingen, *Adhesive Bonding: Materials, Applications and Technology*, Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009.
- [3] „Adhesive Market Size & Industry Share | Growth By 2034,“ [Na mreži]. Available: <https://www.factmr.com/report/5343/adhesives-market?form=MG0AV3>. [Poslednji pristup February 2025].
- [4] „Global Adhesives Market Report: Industry Analysis | Ceresana,“ [Na mreži]. Available: <https://ceresana.com/en/produkt/adhesives-market-report-world?form=MG0AV3>. [Poslednji pristup February 2025].
- [5] [Na mreži]. Available: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/europe-adhesives-market/market-size>. [Poslednji pristup February 2025].
- [6] „Europe Adhesives Market Size & Share Analysis - Growth Trends & Forecasts (2025-20230),“ Mordor Intelligence, [Na mreži]. Available: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/europe-adhesives-market>. [Poslednji pristup February 2025].
- [7] S. Ebnesajjad, *Adhesives Technology Handbook*. 2nd ed., Norwich, NY: William Andrew: Inc., 2008.
- [8] E. M. Petrie, *Handbook of Adhesives and Sealants*, New York: McGraw-Hill Companies, 2000.
- [9] A. V. Pocius, *Adhesion and Adhesives Technology : An Introduction*, 3rd ed., Ohio, USA: Hanser Pub Inc, 2002.
- [10] A. Rudawska, *Surface Treatment in Bonding Technology*, Elsevier Inc., 2019.
- [11] M. E. A. Sousa, A. S. Q. F. Barbosa, R. J. C. Carbas, A. Akhavan-Safar i L. F. M. da Silva, *Introduction to Adhesive Bonding*, Weinheim, Germany: WILEY-VCH GmbH, 2021.
- [12] J. Kuczmaszewski, *Fundamentals of metal-metal adhesive joint design*, Lublin Branch: Lublin University of Technology: Polish Academy of Sciences, 2006.
- [13] J. Klingen, *Adhesive Bonding in Five Steps*, Germany: WILEY-VCHGmbH, 2022.
- [14] A. Pizzi i K. L. Mittal, *Handbook of Adhesive Technology*, Third edition, Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC, 2018.
- [15] A. Kinloch, *Adhesion and Adhesives: Science and Technology*, London: Chapman and Hall, 1987.

- [16] R. Adams, J. Comyn i W. Wake, *Structural Adhesive Joints in Engineering*, 2nd edn., London: Chapman & Hall, 1997.
- [17] *SRPS EN 923: Adhesives - Terms and definitions*, 2017 .
- [18] D. K. Dwivedi, „Adhesive Joining of Dissimilar Metals,“ u *Dissimilar Metal Joining*, Singapore, Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2023, pp. 287-305.
- [19] A. Antelo, „Fatigue life evaluation of adhesive joints in a real structural component,“ Master Thesis in Mechanical Engineering, Universidade do Porto, 2021.
- [20] F. Campbell, *Joining — Understanding the Basics*, Materials Park, Ohio: ASM International, 2011.
- [21] L. F. M. da Silva, A. Öchsner i R. D. Adams, *Handbook of Adhesion Technology*, 2nd edition, Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG, 2018.
- [22] R. D. Adams, *Adhesive Bonding: Science, Technology and Applications*, Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2005.
- [23] D. Packham, *Handbook of Adhesion*, New York: Longman, 1992.
- [24] N. Karthikeyan i J. Naveen, „Effect of surface modified adherend and nanofiller modified adhesives on the shear behaviour of single lap joints: a mini review,“ *Journal of Adhesion Science and Technology*, t. 38, br. 21, pp. 3943-3962, 2024.
- [25] J. J. Bikerman, *The Science of Adhesive Joints*, New York: Academic Press, 1961.
- [26] D. Brewis, „Adhesion to polymers: how important are weak boundary layers?,“ *International Journal of Adhesion and Adhesives*, t. 13, br. 4, pp. 251-256, 1993.
- [27] N. Naat, Y. Boutar, S. Naïmi, S. Mezlini i L. F. M. Da Silva, „Effect of surface texture on the mechanical performance of bonded joints: a review,“ *The Journal of Adhesion*, t. 99, br. 6, pp. 1-93, 2021.
- [28] M. R. Groth, „Structural Adhesive Bonding of Metals - surface and fracture mechanics aspects,“ Luleå University of Technology, Sweden, Doctoral thesis 2001:04.
- [29] A. J. Kinloch, „Adhesives in engineering,“ u *IMechE (Institution of Mechanical Engineers)*, Vol 211 Part G, England, 1997.
- [30] M. Zhang, L. Chu, C. Jiahua, F. Qi, X. Li, X. Chen i D. Yu, „Asymmetric wettability fibrous membranes: Preparation and biologic applications,“ *Composites Part B: Engineering*, t. 269, br. 111095, 2024.
- [31] A. Marmur, „Surface tension of an ideal solid: What does it mean?,“ *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, t. 51, br. 101388, 2021.
- [32] E. M. Petrie, „Plastics and Elastomers in Adhesives,“ u *Handbook of Plastics, Elastomers & Composites by Charles Harper*, New York, McGraw-Hill , 2002, pp. 397-506.

- [33] S. Ebnesajjad i C. F. Ebnesajjad, *Surface Treatments of Materials for Adhesive Bonding*, Second Edition, Oxford: William Andrew Publishing, 2014.
- [34] Ž. Pavlović, „Karakterizacija strukture neštampajućih elemenata CTP termalne štamparske forme za ofset štampu,“ *Doktorska Disertacija*, Fakultet Tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, 2012.
- [35] W. Che, L. Zhou, Q. Zhou, Y. Xie i Y. Wang, „Flexible Janus wood membrane with asymmetric wettability for high-efficient switchable oil/water emulsion separation,“ *Journal of Colloid and Interface Science Volume*, t. 629, br. Part B, pp. 719-727, 2023.
- [36] J. Li, Z. Yao, X. Zhang, Z. Wang, L. Liu, X. Yang, J. Zhang, S. Niu, Z. Han i L. Ren, „Bionic multifunctional ultra-linear strain sensor, achieving underwater motion monitoring and weather condition monitoring,“ *Chemical Eng Journal*, t. 464, br. 142539, 2023.
- [37] A. Samanta, Q. Wang, G. Singh, S. Shaw, F. Toor, A. Ratner i H. Ding, „Nanosecond Pulsed Laser Processing Turns Engineering Metal Alloys Antireflective and Superwicking,“ *J. Manuf. Process.*, t. 54, p. 28–37, 2020.
- [38] F. Bañon, C. Bermudo, F. Trujillo, S. Martin-Béjar, M. Herrera i L. Sevilla, „Adhesive Bonding Operations for Aeronautical Materials,“ u *Joining Operations for Aerospace Materials*, Springer Nature Switzerland AG, 2024, pp. 1-27.
- [39] T. Young, „III. An essay on the cohesion of fluids,“ *Philos. Trans. R. Soc. Lond.*, p. 65–87, 1805.
- [40] X. Wang, C. Fu, C. Zhang, Z. Qiu i B. Wang, „A Comprehensive Review of Wetting Transition Mechanism on the Surfaces of Microstructures from Theory and Testing Methods,“ *Materials*, t. 15, br. 14, p. 4747, 2022.
- [41] R. N. Wenzel, „Surface Roughness and Contact Angle,“ *J. Phys. Colloid Chem.*, t. 53, br. 9, 1949.
- [42] S. Rung, S. Schwarz, J. Zettl, B. Götzendorfer, C. Esen i R. Hellmann, „Static and Dynamic Contact Angle of Water Influenced by Femtosecond Laser Based Ripple Structures on Metals,“ *JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, t. 13, br. 2, pp. 100-104, 2018.
- [43] W. Sigmund i S. Hsu, „Cassie–Baxter Model,“ u *Encyclopedia of Membranes*, Berlin, Heidelberg, Springer, 2016, pp. 310-311.
- [44] S. Azizian i M. Khosravi, „Chapter 12 - Advanced oil spill decontamination techniques,“ *Inter. Sci. Tech*, t. 30, pp. 283-332, 2019.
- [45] A. B. D. Cassie i S. Baxter, „Wettability of porous surfaces,“ *Trans. Faraday Soc.*, t. 40, 1944.
- [46] M. Ghasemlou, F. Daver, E. Ivanova i B. Adhikari, „Bio-inspired sustainable and durable superhydrophobic materials: From nature to market,“ *J. Mater. Chem. A*, t. 7, p. 16643–16670, 2019.

- [47] R. J. C. Carbas, E. A. S. Marques, A. Akhavan-Safar, A. S. Q. F. Barbosa i L. F. M. da Silva, *Adhesive Bonding Technology and Testing*, Weinheim, Germany: WILEY-VCH GmbH, 2023.
- [48] D. H. Phillips, „Welding Metallurgy of Stainless Steels,“ u *Welding Engineering: An Introduction*, London, John Wiley & Sons, Ltd., 2015, p. 203–216.
- [49] M. Milčić, „Istraživanje uticaja parametara zavarivanja trenjem sa mešanjem na dinamičku izdržljivost zavarenog spoja legure aluminijuma 2024 T351,“ Doktorska disertacija, Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet, Niš, 2020.
- [50] A. Đurić, „Istraživanje tehnologija spajanja limova od čelika DP500 i legure aluminijuma AW-5754 u cilju razvoja lakih konstrukcija,“ Doktorska disertacija, Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet, Niš, 2022.
- [51] *DIN 1725-1: Aluminiumlegierungen; Knetlegierungen (engl. Aluminium alloys; Wrought alloys)*, 1983.
- [52] *SRPS EN 573-1: Aluminijum i legure aluminijuma - Hemijski sastav i oblik proizvoda za plastičnu preradu - Deo 1: Sistem brojčanog označavanja*, 2008.
- [53] *SRPS EN 515: Aluminijum i legure aluminijuma – Plastično prerađeni proizvodi – Oznake stanja*, 2017.
- [54] M. Debski, M. Shanahan i J. Schultz, „Mechanisms of contaminant elimination by oil-accommodating adhesives Part 2: A model of the processes involved,“ *Int J Adhes Adhes*, t. 6, br. 3, pp. 150-152, 1986.
- [55] *Provisional Product Data Sheet-SikaFast®-580*, Sika Services AG: Zurich, Switzerland, 2022.
- [56] *API-SikaPower®-880, Material Card*, Sika Services AG: Zurich, Switzerland, 2022.
- [57] *API-SikaPower®-492 G. Material Card*, Sika Services AG: Zurich, Switzerland, 2022.
- [58] G. Habenicht, *Applied Adhesive Bonding: A Practical Guide for Flawless Results*, Weinheim, German: WILEY VCH, 2009..
- [59] Y. Boutar, S. Naïmi, S. Mezlini i M. B. Sik Ali, „Effect of surface treatment on the shear strength of aluminium adhesive single-lap joints for automotive applications,“ *Int. J. Adhes. Adhes.*, t. 67, p. 38–43, 2016.
- [60] A. Yudhanto, M. Alfano i G. Lubineau, „Surface preparation strategies in secondary bonded thermoset-based composite materials: A review,“ *Compos A-Appl. Sci. Manuf.*, t. 147(1), br. 106443, 2021.
- [61] Y. Takahashi, S. Yamamoto, D. Katsuno i Y. Murata, „Metal Surface Preparation Technology for Adhesive Joining Reliability,“ *Kobelco Technology Review No 41, Welding and Joining Technologies*, pp. 70-78, March 2024.

- [62] C. Marques, A. Mocanu, Z. Tomić, S. Balos, E. Stammen, A. Lundevall, S. Abrahimi, R. Günther, J. de Kok i S. de Freitas, „Review on Adhesives and Surface Treatments for Structural Applications: Recent Developments on Sustainability and Implementation for Metal and Composite Substrates,“ *Materials*, t. 13, br. 24, 2020.
- [63] K. L. Mittal i K. W. Lee, *Polymer Surfaces and Interfaces: Characterization, Modification and Application*, London: CRC Press, 1997.
- [64] W. Grzesik i A. Ruszaj, „Influence of Process Hybridization on Surface Integrity,“ u *Hybrid Manufacturing Processes*, Springer, Cham, Springer Series in Advanced Manufacturing, 2021, p. 221–234.
- [65] A. Rudawska i I. Miturska, „Impact study of single stage and multi stage abrasive machining on static strength of lap adhesive joints of mild steel,“ u *MATEC Web of Conferences 244, 02006, ITEP'18*, 2018.
- [66] M. Sedlacek, B. Podgornik i J. Vizitin, „Influence of surface preparation on roughness parameters, friction and wear,“ u *Wear 266, 482–487*, 2009.
- [67] B. Bhushan i B. K. Gupta, *Handbook of Tribology: Materials, Coatings, and Surface Treatments*, New York: McGraw-Hill, 1991.
- [68] L. F. M. da Silva, R. J. C. Carbas, G. W. Critchlow, M. A. V. Figueiredo i K. Brown, „Effect of material, geometry, surface treatment and environment on the shear strength of single lap joints,“ *Int J Adhes Adhes*, t. 29, pp. 621-632, 2009.
- [69] J. Wasserbauer i J. Pikner, „Surface pre-treatment of aluminum alloys improving surface adhesive properties,“ u *28th International Conference on Metallurgy and Materials*, Brno, Czech Republic, May 22nd - 24th 2019, pp. 1186-1191.
- [70] M. S. Islam, L. Tong i P. J. Falzon, „Influence of metal surface preparation on its surface profile, contact angle, surface energy and adhesion with glass fibre prepreg,“ *Int. J. Adhes. Adhes.*, t. 51, pp. 32-41, 2014.
- [71] A. Safari, M. Farahani i P. Ghabezi, „Experimental study on the influences of different surface treatment processes and adhesive type on the aluminum adhesive-bonded joint strength,“ *Mech. Based Des. Struct. Mach.*, 2020.
- [72] K. Łyczkowska, D. Miara, B. Rams, J. Adamiec i K. Baluch, „The Influence of MSR-B Mg Alloy Surface Preparation on Bonding Properties,“ *Materials*, t. 16, br. 3887, 2023.
- [73] J. B. Michael, „Mechanical Testing of epoxy adhesives for naval applications,“ *The University of Maine, Mechanical Engineering, A Thesis*, 2002.
- [74] A. Dillard, *Adhesive bonding: science, technology and applications*, Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited, 2010.
- [75] W. Brockmann, „Steel adherends,“ u *Durability of Structural Adhesives*, London, Elsevier Applied Science, 1983, pp. Chapter 7, 306.

- [76] J. M. Arenas, C. Alía, J. J. Narbón, R. Ocaña i C. González, „Considerations for the industrial application of structural adhesive joints in the aluminium–composite material bonding,“ *Composites: Part B* 44, p. 417–423, 2013.
- [77] J. Liu, W. Wang, Y. Yan, H. He, Z. Xue, C. Xu i L. Li, „Influence of surface roughening of the raw material on the lap shearing strength and failure behavior of adhesively bonded aluminum joints,“ *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, t. 122, p. 327–342, 2022.
- [78] D. Mamalis, W. Obande, V. Koutsos, J. Blackford, C. Ó Brádaigh i D. Ray, „Novel thermoplastic fibre-metal laminates manufactured by vacuum resin infusion: The effect of surface treatments on interfacial bonding,“ *Mat. Des.*, t. 162, p. 331–344, 2019.
- [79] L. F. M. da Silva, N. M. A. J. Ferreira, V. Richter-Trummer i E. A. S. Marques, „Effect of grooves on the strength of adhesively bonded joints,“ *Int J Adhes Adhes*, t. 30, br. 8, pp. 735-743, 2010.
- [80] S. Ebnesajjad, *Handbook of adhesives and surface preparation: Technology, Applications and Manufacturing*, William Andrew, 2011.
- [81] A. F. Harris i A. Beevers, „The effects of grit-blasting on surface properties for adhesion,“ *International Journal of Adhesion and Adhesives*, t. 19, br. 6, pp. 445-452, 1999.
- [82] G. Rotella, M. Alfano, T. Schiefer i I. Jansen, „Evaluation of mechanical and laser surface pre-treatments on the strength of adhesive bonded steel joints for the automotive industry,“ *Journal of Adhesion Science and Technology*, t. 30, br. 7, pp. 747-758, 2015.
- [83] J. Bardis i K. K., „Effects of Surface Preparation on the Long-Term Durability of Adhesively Bonded Composite Joints, Final Report DOT/FAA/AR-03/53,“ U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, Washington, 2004.
- [84] J. Mazza, J. Avram i R. Kuhbander, „Grit-Blast/Silane (GBS) Aluminum Surface Preparation for Structural Adhesive Bonding,“ *Materials Science, Engineering*, t. 135697786, 2003.
- [85] N. Zdravković, D. Milčić, D. Klobčar, N. Korunović i M. Milčić, „Effect of surface preparation on the shear strength of aluminium alloy adhesive single-lap joints,“ *Innovative Mechanical Engineering*, t. 3, br. 1, pp. 48 - 57, 2024.
- [86] J. Mina, H. Wana, E. B. Carlsonb, J. Lina i C. Suna, „Application of laser ablation in adhesive bonding of metallic materials: A Review,“ *Optics and Laser Technology*, t. 128, br. 106188, 2020.
- [87] D. Pham, S. Dimov i P. Petkov, „Laser milling of ceramic components,“ *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, t. 47, br. 3-4, pp. 618-626, 2007.
- [88] D. Perez i L. Lewis, „Thermodynamic evolution of materials during laser ablation under pico and femtosecond pulses,“ *Appl. Phys. A*, t. 79, br. 4-6, pp. 987-990, 2004.
- [89] V. Semak i A. Matsunawa, „The role of recoil pressure in energy balance during laser materials processing,“ *J. Phys. D Appl. Phys.*, t. 30, br. 18, p. 2541–2552, 1997.

- [90] C. Leone, S. Genna, F. Tagliaferri, B. Palumbo i M. Dix, „Experimental investigation on laser milling of aluminium oxide using a 30 W Q-switched Yb:YAG fiber laser,“ *Opt. Laser Technol.*, t. 76, pp. 127-137, 2016.
- [91] N. Naat, Y. Boutar, S. Naïmi, S. Mezlini i L. F. M. Da Silva, „Effect of surface texture on the mechanical performance of bonded joints: a review,“ *The Journal of Adhesion*, t. 99, br. 6, pp. 1-93, 2021.
- [92] E. Nikolidakis, I. Choreftakis i A. Antoniadis, „Experimental Investigation of Stainless Steel SAE304 Laser Engraving Cutting Conditions,“ *Machines*, t. 6, br. 3, p. 40, 2018.
- [93] D. Teixidor, I. Ferrer, J. Ciurana i T. Ozel, „Optimization of process parameters for pulsed laser milling of micro-channels on AISI H13 tool steel,“ *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, t. 29, p. 209–218, 2013.
- [94] L. Sobotova i P. Demec, „Laser marking of metal materials,“ *Mod. Mach. Sci. J.*, t. 04, pp. 808-812, 2015.
- [95] G. Rotella, M. Alfano, T. Schiefer i I. Jansen, „Enhancement of static strength and long term durability of steel/epoxy joints through a fiber laser surface pre-treatment,“ *Int J Adhes Adhes*, t. 63, p. 87–95, 2015.
- [96] J. Luo, J. Liu, H. Xia, X. Ao, H. Yin i L. Guo, „Surface Treatments for Enhancing the Bonding Strength of Aluminum Alloy Joints,“ *Materials 2023*, t. 16, br. 5674, 2023.
- [97] R. Rechner, I. Jansen i E. Beyer, „Influence on the strength and aging resistance of aluminium joints by laser pre-treatment and surface modification,“ *Int. J. Adhes. Adhes.*, t. 30, br. 7, p. 595–601, 2010.
- [98] M. Alfano, S. Pini, G. Chiodo, M. Barberio, A. Pirondi, F. Furgiuele i R. Groppetti, „Surface Patterning of Metal Substrates Through Low Power Laser Ablation for Enhanced Adhesive Bonding,“ *The Journal of Adhesion*, t. 90, pp. 384-400, 2014.
- [99] C. Mandolino, E. Lertora, S. Genna, C. Leone i C. Gambaro, „Effect of laser and plasma surface cleaning on mechanical properties of adhesive bonded joints,“ *Procedia CIRP* 33, p. 458 – 463, 2015.
- [100] J. F. Watts, A. J. Wilson, I. Jones i F. Salamat-Zadeh, „Laser Surface Modification of Poly(etheretherketone) to Enhance Surface Free Energy, Wettability and Adhesion,“ *Int J Adhes and Adhes*, t. 62, pp. 69-77, 2015.
- [101] E. Stammen, K. Dilger, S. Böhm i R. Hose, „Surface modification with laser: pretreatment of aluminium alloys for adhesive bonding,“ *Tenth International Conference on Plasma Surface Engineering*, t. 4, br. S1, pp. S39-S43, 2006.
- [102] E. Ukar, F. Liébana, M. Andrés, I. Marcos i A. Lamikiz, „Laser Texturing and Dissimilar Material Joining,“ *Procedia Manufacturing*, t. 13, pp. 671-678, 2017.

- [103] H. Man, K. Chiu i X. Guo, „Laser surface micro-drilling and texturing of metals for improvement of adhesion joint strength,“ *Applied Surface Science*, t. 256, br. 10, pp. 3166-3169, 2010.
- [104] A. Buchman, M. Rotel i H. Dodiuk-Kenig, „Nd:YAG Laser Surface Treatment of Various Materials to Enhance Adhesion,“ u *Laser Surface Modification and Adhesion*, Salem, Scrivener Publishing LLC, 2014, pp. 3-54.
- [105] Z. Feng, H. Zhao, C. Tan, B. Zhu, F. Xia, Q. Wang, B. Chen i X. Song, „Effect of laser texturing on the surface characteristics and bonding property of 30CrMnSiA steel adhesive joints,“ *Journal of Manufacturing Processes*, t. 47, p. 219–228, 2019.
- [106] G. Li, M. Lei, C. Liang, K. Li, B. Li, X. Wang, J. Wang i Z. Wei, „Improving Adhesive Bonding of Al Alloy by Laser-Induced Micro–Nano Structures,“ *Appl. Sci.*, t. 12, br. 3, p. 1199, 2022.
- [107] J. Ahuir-Torresa, M. Arenasa, W. Perrieb, G. Deardenb i J. de Damborenea, „Surface texturing of aluminium alloy AA2024-T3 by picosecond laser: Effect on wettability and corrosion properties,“ *Surface and Coatings Technology*, t. 321, pp. 279-291, 2017.
- [108] N. Tan, Z.-g. Xing, X.-l. Wang, H.-d. Wang, G. Jin i B.-s. Xu, „Investigation of sprayed particle filling qualities within the texture on the bonding behavior of Ni-based coating,“ *Surface and Coatings Technology*, t. 330, pp. 131-139, 2017.
- [109] P. Maressa, L. Anodio, A. Bernasconi, A. G. Demir i B. Previtali, „Effect of Surface Texture on the Adhesion Performance of Laser Treated Ti6Al4V Alloy,“ *The Journal of Adhesion*, t. 91, br. 7, pp. 518-537, 2015.
- [110] G. Rotella, L. Orazi, M. Alfano, S. Candamano i I. Gnilitzkyi, „Innovative high-speed femtosecond laser nano-patterning for improved adhesive bonding of Ti6Al4V titanium alloy,“ *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, t. 18, p. 101–106, 2017.
- [111] L. M. Galantucci, A. Gravina, G. Chita i M. Cinquepalmi, „An Experimental Study of Paint-Stripping Using an Excimer Laser,“ *Composites Part A*, t. 27A, p. 1041–1049, 1996.
- [112] S. Horiuchi, „Electron Microscopy for Visualization of Interfaces in Adhesion and Adhesive Bonding,“ u *Interfacial Phenomena in Adhesion and Adhesive Bonding*, Singapore, Springer, 2024.
- [113] R. Perić, Z. Karastojković, Z. Kovačević i D. Gusković, „Skenirajuća elektronska mikroskopija legure zlata Au585Ag90Cu264Zn61 za proizvodnju nakita,“ *Zaštita materijala*, t. 56, br. 3, pp. 373-377, 2015.
- [114] P. J. Goodhew, F. J. Humphreys i R. Beanland, *Electron Microscopy and Analysis*, Taylor & Francis, 2000.
- [115] A. Bogner, P. H. Jouneau, G. Thollet, D. Basset i C. Gauthier, „A history of scanning electron microscopy developments: Towards „wet-STEM“ imaging,“ *Micron*, t. 38, pp. 390-401, 2007.

- [116] D. E. Newbury i D. B. Williams, „The electron microscope: the materials characterization tool of the millennium,“ *Acta Mat*, t. 48, pp. 323-334, 2000.
- [117] *SRPS EN ISO 4287: Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Terms, definitions and surface texture parameters (ISO 4287:1997)*, 2014.
- [118] D. Milčić, *Mašinski elementi*, Niš: Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet, 2022.
- [119] L.-H. Lee, *Adhesive bonding*, New York: Springer Science+Business Medi, 1991.
- [120] S. Omairey, N. Jayasree i M. Kazilas, „Defects and uncertainties of adhesively bonded composite joints,“ *SN Appl. Sci.*, t. 3, br. 769, 2021.
- [121] D. Markatos, *Experimental investigation of the effect of defects, non-detectable by means of conventional non destructive techniques, on the mode I fracture toughness of adhesively bonded composite joints*, University of Patras, Greece: Department of Mechanical Engineering and Aeronautics, Doctoral Dissertation, 2015.
- [122] Sika Services AG., „General Guideline. Structural Bonding.,“ Sika Services AG. Marketfield Engineering, Zurich, 2021.
- [123] S. Ebnesajjad i A. H. Landrock, „Joint Design,“ u *Adhesives Technology Handbook. 3rd ed.*, Elsevier, 2015, pp. 183-185.
- [124] K. DeVries i P. Borgmeier, „Testing of Adhesives,“ u *Handbook of Adhesive Technology. 2nd ed.*, New York, Marcell Dekker Publ. Co, 2003.
- [125] *ASTM D 3165: Standard Test Method for Strength Properties of Adhesives in Shear by Tension Loading of Single-Lap-Joint Laminated Assemblies*, 2000.
- [126] *SRPS EN 1465: Adhezivi – Određivanje smicajne čvrstoće zatezanjem lepljenih preklopnih sklopova*, 2010.
- [127] M. S. Kafkalidis i M. D. Thouless, „The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints,“ *Int J Solids Structures*, t. 39, pp. 4367-4383 , 2002.
- [128] L. F. M. da Silva, P. J. C. das Neves, R. Adams i J. Spelt, „Analytical models of adhesively bonded joints—Part I: Literature survey,“ *Int J Adhes Adhes*, t. 29, pp. 319-330 , 2009.
- [129] L. F. M. da Silva, P. J. C. das Neves, R. D. Adams, A. Wang i J. K. Spelt, „Analytical models of adhesively bonded joints—Part II: Comparative study,“ *Int J Adhes Adhes*, t. 29, pp. 331-341, 2009.
- [130] O. Volkersen, „The riveting force distribution in riveting connections with constant tab cross sections,“ *Aviation research (Luftfahrtforschung)*, t. 15, pp. 41-47, 1938.
- [131] B. Dunn i A. Cianciarulo, „Epoxy used in liquid gas,“ u *Proceedings of 1974 Spring Seminar, Designing With Today's Engineering Adhesives*, Cherry Hill, NJ, 1979.

- [132] W. R. Broughton, „Testing the mechanical, thermal and chemical properties of adhesives for marine environments,“ u *Adhesives in Marine Engineering*, Woodhead Publishing Ltd, 2012, pp. 99-154.
- [133] L. F. da Silva, D. A. Dillard, B. Blackman i R. D. Adams, *Testing Adhesive Joints, Best Practices*, Germany: Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, 2012.
- [134] *ASTM D1876-08R23: Standard Test Method for Peel Resistance of Adhesives (T-Peel Test)*, 2023.
- [135] *SRPS ISO 11339: Adhezivi — Ispitivanje T-ljuštenjem za lepljene sklopove "savitljivo na savitljivo"*, 2011.
- [136] *ASTM D903-98: Standard Test Method for Peel or Stripping Strength of Adhesive Bonds*, 2017.
- [137] *ISO 8510-1: Adhesives — Peel test for a flexible-bonded-to-rigid test specimen assembly, Part 1: 90 degree peel*, 2006.
- [138] *ISO 8510-2: Adhesives — Peel test for a flexible-bonded-to-rigid test specimen assembly, Part 2: 180° peel*, 2006.
- [139] *ASTM D3167-10R17: Standard Test Method for Floating Roller Peel Resistance of Adhesives*, 2017.
- [140] *SRPS EN 1464: Adhezivi - Određivanje otpornosti na ljuštenje adhezivnih veza velike čvrstoće - Metoda pokretnog valjka*, 2010.
- [141] *delSRPS ISO 14676: Adhezivi - Evaluacija efikasnosti tehnika tretiranja površina za aluminijum - Ispitivanje mokro-ljuštenje metodom pokretnog valjka*, 2013.
- [142] B. Duncan, „Developments in testing adhesive joints,“ u *Advances in Structural Adhesive Bonding*, Woodhead Publishing in Materials, 2010, pp. 389-436.
- [143] F. I. Leitfaden Kleben, „Guidelines - Adhesive Bonding – the Right Way,“ [Na mreži]. Available: <https://leitfaden.klebstoffe.com/en/6-5-2-floating-roller-peel-test/>. [Poslednji pristup 10 June 2025].
- [144] *ASTM D3166-99R20: Standard Test Method for Fatigue Properties of Adhesives in Shear by Tension Loading (Metal/Metal)*, 2020.
- [145] *SRPS EN ISO 9664: Adhezivi - Metode ispitivanja zamora adheziva za konstrukcije pri smicanju zatezanjem*, 2009.
- [146] A. Wöhler, „Über die Festigkeits-Versuche mit Eisen und Stahl,“ *Zeitschrift Für Bauwesen*, pp. 74-106, 1870.
- [147] *SRPS EN ISO 527-1: Plastics - Determination of tensile properties - Part 1: General principles (ISO 527-1:2019)*, 2019.

- [148] *SRPS EN ISO 10365: Adhesives - Designation of main failure patterns (ISO 10365:2022)*, 2022.
- [149] E. M. Petrie, *Plastics and adhesives as adhesives*, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2002.
- [150] *SRPS EN 10088-1: Nerđajući čelici — Deo 1: Spisak nerđajućih čelika*, 2015.
- [151] *SRPS EN 10088-2: Nerđajući čelici – Deo 2: Tehnički zahtevi za isporuku limova u traka od čelika otpornih na koroziju, za opшту namenu*, 2024.
- [152] *SRPS EN 485-2: Aluminijum i legure aluminijuma – Lim, traka i debeli lim – Deo 2: Mehaničke osobine*, 2019.
- [153] *ASTM B209/B209M-21a: Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Sheet and Plate*, 2021.
- [154] *Tehnički list proizvođača Sika® Cleaner P*, Sika Croatia d.o.o, 2023.
- [155] A. Rudawska, D. Stančková i J. Brzęczek, „The visual method in quality assessment of single-lap,“ *Advances in Science and Technology Research Journal*, t. 10, br. 31, p. 109–118, 2016.
- [156] *ISO 4587: Adhesives — Determination of tensile lap-shear strength of rigid-to-rigid bonded assemblies*, 2003.
- [157] C. Cruz Gonzalez, R. Perez Mora, S. Santillan Gutierrez, J. Taha-Tijerina, B. Vargas Arista i A. Barba Pigarron, „Fatigue strength evaluation and fracture behavior of joined dual phase steel/AA6061-T6 aluminum alloy,“ *Frattura ed Integrità Strutturale*, t. 48, pp. 530-544, 2019.
- [158] N. Zdravković, M. Banić, D. Klobčar, M. Milčić i S. Fischer, „Experimental and Numerical Analysis of Single Lap Aluminium Joints Bonded with Different Epoxy Adhesives,“ u *11th International Scientific Conference Research and Development of Mechanical Elements and Systems IRMES*, Vrnjačka banja, Serbia, 2025.
- [159] A. Sommers i A. Jacobi, „Creating micro-scale surface topology to achieve anisotropic wettability on an aluminum surface,“ *J. Micromech. Microeng.*, t. 16, p. 1571–1578, 2006.
- [160] P. Gregorčič, M. Conradi, L. Hribar i M. Hočevar, „Long-term influence of laser-processing parameters on (Super)hydrophobicity development and stability of stainless-steel surfaces,“ *Materials*, t. 11, p. 2240, 2018.
- [161] D. Ta, A. Dunn, T. Wasley, R. Kay, J. Stringer, P. Smith, C. Connaughton i J. Shephard, „Nanosecond laser textured superhydrophobic metallic surfaces and their chemical sensing applications,“ *Appl. Surf. Sci.*, t. 357, br. Part A, pp. 248-254, 2015.
- [162] A. Hadžić, M. Može, K. Arhar, M. Zupančič i I. Golobič, „Effect of Nanoparticle Size and Concentration on Pool Boiling Heat Transfer with TiO₂ Nanofluids on Laser-Textured Copper Surfaces,“ *Nanomaterials*, t. 12, p. 2611, 2022.

- [163] P. Gregorčič, „Comment on “Bioinspired Reversible Switch between Underwater Superoleophobicity/Superaerophobicity and Oleophilicity/Aerophilicity and Improved Antireflective Property on the Nanosecond Laser-Ablated Superhydrophobic Titanium Surfaces”,“ *ACS Appl. Mater. Interfaces*, t. 13, p. 2117–2127, 2020.
- [164] C. Yang, X. Mei, Y. Tian, D. Zhang, Y. Li i X. Liu, „Modification of wettability property of titanium by laser texturing,“ *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, t. 87, p. 1663–1670, 2016.
- [165] W. Pakieta, T. Tanski, Z. Brytan, G. Chladek i K. Pakieta, „The impact of laser surface treatment on the microstructure, wear resistance and hardness of the AlMg5 aluminum alloy,“ *Appl. Physics A*, t. 126, br. 231, 2020.
- [166] V. Ialyshev i A. Alnaser, „Determining the Role of Oxygen in Obtaining Long-Term Stable Superhydrophilic Surfaces on Metals Treated with a Femtosecond Laser,“ *ACS Omega*, t. 8, br. 37, pp. 33904-33911, 2023.
- [167] N. Zdravković, D. Klobčar, D. Milčić, M. Zupančič, B. Žužek, M. Milčić i A. Đurić, „Influence of Surface Preparation of Aluminum Alloy AW-5754 and Stainless Steel X5CRNi18-10 on the Properties of Bonded Joints. Materials,“ *Materials*, t. 17, br. 2561, 2024.
- [168] N. Zdravković, D. Klobčar, D. Milčić, M. Milčić, V. Pavlović i A. Đurić, „Effects of different surface preparations on bonding properties of aluminium alloy EN AW-5754,“ u *11th International Scientific Conference on Defensive Technologies – OTEH 2024, Materials and technologies - MT*, Belgrade, Serbia, 2024.
- [169] S. Teixeira de Freitas i J. Sinke, „Adhesion Properties of Bonded Composite-to-Aluminium Joints Using Peel Tests,“ *The Journal of Adhesion*, t. 90, pp. 511-525, 2014.
- [170] J. Butt, H. Mebrahtu i H. Shirvani, „Peel and tensile test investigation of aluminium 1050 foil parts made with a new additive manufacturing process,“ *Int. J. Rapid Manufacturing*, t. 5, br. 1, pp. 95-115, 2015.
- [171] N. Stojković, „Istraživanje ponašanja adhezionih spojeva metalnih konstrukcija pod dejstvom statičkog i cikličnog opterećenja,“ Doktorska disertacija, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Univerzitet u Nišu, 2017..
- [172] A. R. Eskenati, A. Mahboob, E. Bernat-Maso i L. Gil, „Experimental and Numerical Study of Adhesively and Bolted Connections of Pultruded GFRP I-Shape Profiles,“ *Polymers*, t. 14, br. 5, p. 894, 2022.
- [173] A. H. Alami i H. Bilal, „Modelling and verification of an acrylic adhesive as a hyperelastic material,“ *Advances in Materials and Processing Technologies*, t. 1, br. 1, pp. 1-12, 2015.
- [174] „Europe Adhesives Market Size & Share Analysis - Growth Trends & Forecasts (2025 - 2030),“ Mordor Intelligence, [Na mreži]. Available: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/europe-adhesives-market>. [Poslednji pristup February 2025].

[175] S. K. Mazumdar i P. K. Mallick, „Static and fatigue behavior of adhesive joints in SMC-SMC composites,“ *Polymer Composites*, t. 19, br. 2, pp. 139-146, 1998.



Provisional Product Data Sheet*
Version 1 (01 / 2022)

SikaFast®-580

High strength weld-shop adhesive

Typical Product Data

Properties	SikaFast®-580 A	SikaFast®-580 B
Chemical base	Acrylic/Epoxy	
Color (CQP ¹ 001-1)	Grey	Grey
Density (CQP 576-1)	1.1 g/cm ³	1.6 g/cm ³
Density mixed (calculated)	1.29 g/cm ³	
Mixing ratio	A:B by volume A:B by weight	100 : 10 100 : 16
Viscosity ² (CQP 029-4)	150 Pa·s	150 Pa·s
Consistency (mixed)	Thixotropic paste	
Application temperature	15 – 35 °C	
Open time ² (CQP 590-1)	7 minutes	
Handling time ^{3,4} (CQP 580-1,-6)	time to reach 1 MPa 15 minutes	
Shore D hardness (CQP 023-1 / ISO 868)	70	
Tensile strength ^{3,5} (CQP 036-2 / ISO 527)	12 MPa	
E-Modulus ^{3,5} (CQP 036-2 / ISO 527)	900 MPa	
Elongation at break ^{3,5} (CQP 036-2 / ISO 527)	15 %	
Tensile lap-shear strength ^{3,4,5} (CQP 580-1,-6 / ISO 4587)	17 MPa	
Impact peel strength ^{3,4,5,6} (CQP 580-3,-6 / ISO 11343)	20 N/mm	
Glass transition temperature ⁵ (CQP 509-1 / ISO 6721)	85 °C	
Shelf life (storage between 15 – 25 °C) (CQP 016-1)	12 months	

¹ CQP = Corporate Quality Procedure

² Tested at 20 °C / Shear rate: 10 s⁻¹

³ 23 °C / 50 % r.h.

⁴ Adhesive layer: 25 x 10 x 0.3 mm / Substrate: Steel

⁵ Cured for 2 weeks at 23 °C

⁶ Impact speed: 2 m/s.

Description

SikaFast®-580 is a fast curing, flexibilized structural, two-part adhesive system, which is based on Sika's Acrylic Double Performance (ADP) polymer technology. Uncured SikaFast®-580 is a pasty, non-sagging, hardly inflammable material which allows an easy and precise application.

Product Benefits

- Strength development within minutes after application
- Adhesion to a wide range of substrates without or with limited surface preparation
- High strength and impact resistance
- Solvent and acid free
- Lower odor than MMA containing products

Areas of Application

SikaFast®-580 is designed for to replace mechanical fixations such as rivets, screws or welding. It is suitable for high strength fastening of concealed joints and exhibits excellent adhesion on different types of substrates including metals, plastics, glass, wood, etc. This product is recommended for professional experienced users only. Tests with actual substrates and conditions have to be performed to ensure adhesion and material compatibility.

* This product is currently in the field test phase and has not been finally released. Technical data stated herein is based on preliminary testing and experience and is subject to change. Product is only suitable for experienced users and only after suitable pre-testing. Subject to mandatory legal provisions, Sika's liability is limited to the replacement of the defective products.

SikaFast®-Metalbonder 1/2

Sika P.A.1 Tehnički list lepka SikaFast®-580 [55]

Cure Mechanism

SikaFast®-580 cures according to radical chain polymerization. For an ideal curing process, it is required to homogeneously mix both components with the defined ratio. Open and fixture time are influenced by mixing ratio deviations as well as temperature, e.g., as higher the temperature as shorter the open and fixture time and vice versa. Adjustment of the bonded assembly is only possible within the open time. Despite the quick strength build-up, exposure to premature stresses must be avoided since this may result in a reduction of mechanical properties and loss of adhesion.

Chemical Resistance

In the view of potential chemical or thermal exposure, it is required to conduct a project related testing.

Method of application

Substrate preparation

Surfaces must be clean, dry and free from grease, oil and dust. Remove all loose particles or residues by cleaning it thoroughly, for example with an IPA wipe. Due to the diversity of materials, preliminary tests with original substrates are necessary.

Application

SikaFast®-580 is applied with a mixing ratio of 10:1 by volume through a 24 elements static mixer. If applied in large masses, heat is generated by the exothermic reaction. To avoid excessive temperature increase, bond line thickness is limited to 3 mm 5 mm, but must measure at least 0,5 mm. Optimum temperature for the bonding process is between 15 °C and 25 °C. The approved temperature range for substrates and adhesive is between 5°C and 40°C. The influence of the reactivity by temperature changes has to be respected.

After the open time has elapsed the bonded parts must not be moved against each other anymore. When the fixture time is reached the parts can be moved if no additional stress is distributed to the bond line.

For support in evaluation of the appropriate application equipment contact the Sika System Engineering department of Sika Industry.

Removal

Uncured excess of SikaFast®-580 can be removed easily before curing with a dry wipe, with Sika® Remover-208 or another suitable solvent. Once the adhesive is cured it can only be removed mechanically. Hands and exposed skin should be washed immediately using Sika® Cleaner-350H towels or a suitable industrial hand cleaner and water. Do not use solvents on skin!

Further Information

The information herein is offered for general guidance only. Advice on specific applications is available from the Technical Department of Sika Industry. Copies of the following publications are available on request:

- Safety Data Sheet

Basis of Product Data

All technical data stated in this Product Data Sheet are based on laboratory tests. Actual measured data may vary due to circumstances beyond our control.

Health and Safety Information

For information and advice regarding transportation, handling, storage and disposal of chemical products, users shall refer to the actual Safety Data Sheets containing physical, ecological, toxicological and other safety-related data.

Disclaimer

The information, and, in particular, the recommendations relating to the application and end-use of Sika products, are given in good faith based on Sika's current knowledge and experience of the products when properly stored, handled and applied under normal conditions in accordance with Sika's recommendations. In practice, the differences in materials, substrates and actual site conditions are such that no warranty in respect of merchantability or of fitness for a particular purpose, nor any liability arising out of any legal relationship whatsoever, can be inferred either from this information, or from any written recommendations, or from any other advice offered. The user of the product must test the product's suitability for the intended application and purpose. Sika reserves the right to change the properties of its products. The proprietary rights of third parties must be observed. All orders are accepted subject to our current terms of sale and delivery. Users must always refer to the most recent issue of the local Product Data Sheet for the product concerned, copies of which will be supplied on request.



Further information available at:
www.sika.ch
www.sika.com

Sika Schweiz AG
Business Unit Industry
Tüfenwies 16
CH-8048 Zurich
Switzerland
Tel. +41 58 436 40 40
Fax +41 58 436 55 30



SikaFast® - Metalbondor 2 / 2

Sika P.A.1 Nastavak. Tehnički list lepka SikaFast®-580 [55]

SikaPower®-880

Toughened and fast-curing 2C structural adhesive

TYPICAL PRODUCT DATA (FURTHER VALUES SEE SAFETY DATA SHEET)

Properties	SikaPower®-880 A	SikaPower®-880 B
Chemical base	Epoxy	Amine
Color (CQP001-1)	White	Grey
	mixed	Grey
Density	mixed, calculated	1.2 g/cm ³
		1.2 g/cm ³
Mixing ratio	A:B by volume	100:100
	A:B by weight	100:102
Viscosity (CQP029-4)	at 10 s ⁻¹	120 Pa·s ^A
		100 Pa·s ^A
Consistency	Thixotropic paste	
Application temperature	15 - 30 °C	
Open time (CQP580-1, -6 / ISO 4587)	45 min ^{A, B}	
Handling time (CQP580-1, -6 / ISO 4587)	time to reach 1 MPa	
Shore D hardness (CQP023-1 / ISO 7619-1)	70 ^C	
Tensile strength (CQP543-1 / ISO 527)	22 MPa ^{A, C}	
E-Modulus (CQP543-1 / ISO 527)	1900 MPa ^{A, C}	
Elongation at break (CQP543-1 / ISO 527)	3 % ^{A, C}	
Tensile lap-shear strength (CQP046-9 / ISO 4587)	24 MPa ^{A, B, C}	
Impact peel strength (CQP580-3, -6 / ISO 11343)	23 N/mm ^{A, C, D}	
Glass transition temperature (CQP509-1 / ISO 6721)	77 °C ^C	
Shelf life (CQP016-1)	12 months ^E	

CQP = Corporate Quality Procedure
C) Cured for 1 week at 23 °C

A) 23 °C / 50 % r.h.
D) Impact speed: 2 m/s

B) Adhesive layer: 25 x 12.5 x 0.3 mm / on steel
E) Storage between 15 and 25 °C

DESCRIPTION

SikaPower®-880 is a thixotropic, fast curing, gap-filling two-component epoxy adhesive, which cures at room temperature. It is designed for use in structural joints, where toughness and high strength are required. SikaPower®-880 is particularly suitable for bonding metallic substrates, like steel and aluminium, as well as composite substrates, like GFRP and CFRP laminates. The adhesive has very good application properties and shows elevated heat and environmental resistance.

PRODUCT BENEFITS

- High strength and high resistance to fatigue and impacts
- Long open time
- Fast curing at room temperature
- Very good non-sag and application properties
- Contains glass beads of 0.3 mm to ensure optimal bonding thickness
- Does not contain solvents or PVC

AREAS OF APPLICATION

SikaPower®-880 is suitable for fast assembly bonding applications in transportation and general industry, especially if high toughness and strength is required. It can also be used for repair applications as well as in hybrid joints in combination with spot welding, riveting or clinching.
This product is suitable for professional experienced users only. Test with actual substrates and conditions have to be performed to ensure adhesion and material compatibility.

CURE MECHANISM

SikaPower®-880 cures by a fast chemical reaction of the two components at room temperature. The cure rate can be further accelerated at higher temperatures, e.g., using ovens or infrared lamps. The final glass transition temperature, as well as the tensile and shear strengths, may be increased with higher curing temperature.

CHEMICAL RESISTANCE

In view of potential chemical or thermal exposure, it is required to conduct a project related testing.

METHOD OF APPLICATION

Surface preparation

Surfaces must be clean, dry and free from grease, oil and dust. Surface treatment depends on the specific nature of the substrates and is crucial for a long lasting bond. All pre-treatment steps must be confirmed by preliminary tests on original substrates considering specific conditions in the assembly process.

Application

SikaPower®-880 is dispensed from 1:1 dual cartridges with adequate dispensers. The use of electric or pneumatic guns with piston-driven plungers is recommended. In order to achieve a proper mixing, a Sulzer MixPac MFQ 10-24T is required. Extrude adhesive without mixer to equalize the filling levels. Attach the mixer and dispose of the first few cm of the bead before the application.

For application out of pails and drums, consult the Technical Department of Sika Industry for advice.

Removal

Uncured SikaPower®-880 may be removed from tools and equipment with Sika® Remover-208 or another suitable solvent. Once cured, the material can only be removed mechanically.

Hands and exposed skin have to be washed immediately using hand wipes such as Sika® Cleaner-350H cleaning towels or a suitable industrial hand cleaner and water. Do not use solvents on skin.

FURTHER INFORMATION

The information herein is offered for general guidance only. Advice on specific applications is available on request from the Technical Department of Sika Industry.

Copies of the following publications are available on request:

- Safety Data Sheets

PACKAGING INFORMATION

SikaPower®-880	
Dual Cartridge	400 ml
SikaPower®-880 A	
Pail	19 kg
Drum	225 kg
SikaPower®-880 B	
Pail	19 kg
Drum	227 kg

BASIS OF PRODUCT DATA

All technical data stated in this document are based on laboratory tests. Actual measured data may vary due to circumstances beyond our control.

HEALTH AND SAFETY INFORMATION

For information and advice regarding transportation, handling, storage and disposal of chemical products, users shall refer to the actual Safety Data Sheets containing physical, ecological, toxicological and other safety-related data.

DISCLAIMER

The information, and, in particular, the recommendations relating to the application and enduse of Sika products, are given in good faith based on Sika's current knowledge and experience of the products when properly stored, handled and applied under normal conditions in accordance with Sika's recommendations. In practice, the differences in materials, substrates and actual site conditions are such that no warranty in respect of merchantability or of fitness for a particular purpose, nor any liability arising out of any legal relationship whatsoever, can be inferred either from this information, or from any written recommendations, or from any other advice offered. The user of the product must test the product's suitability for the intended application and purpose. Sika reserves the right to change the properties of its products. The proprietary rights of third parties must be observed. All orders are accepted subject to our current terms of sale and delivery. Users must always refer to the most recent issue of the local Product Data Sheet for the product concerned, copies of which will be supplied on request.

PROVISIONAL PRODUCT DATA
SHEET 2020-12-03
SikaPower®-880
Version 01.01 (12 - 2020), en_CORP
013106808800001000

Sika Services AG
CH-8048, Zurich
Switzerland
Tel. +41 58 436 40 40
Email: ctd@ch.sika.com
www.sika.com/industry



SikaPower®-492 G

Semi crash resistant hem flange adhesive

Technical Product Data

Chemical base	Epoxy hybrid
Color (CQP ¹ 001)	black
Non-volatile compounds (CQP 576)	> 99 %
Density before / after curing (CQP 576)	1.30 / 1.35 kg/l approx.
Application temperature	50 - 80°C (nozzle)
Viscosity; 50°C, oscillation 5Hz, P/P 25 mm, 1 mm gap (CQP 584-1)	1000 Pa·s approx.
Curing time / substrate temperature	20 min / 175°C
Lap shear strength ² , at 0.3 mm (CQP 580-1,-6 / EN 1465)	20 MPa approx.
Lap shear strength ² , -30°C / +80°C, at 0.3 mm (CQP 580-1,-6 / EN 1465)	22 / 15 MPa approx.
Lap shear strength ² , 20' 160°C / 40' 200°C, at 0.3 mm (CQP 580-1,-6 / EN 1465)	19 / 18 MPa approx.
Lap shear strength ³ , 1.5 mm metal sheet, at 0.3 mm (CQP 580-1,-6 / EN 1465)	30 MPa approx.
Dynamic resistance to cleavage ⁴ (CQP 580-3,-6 / ISO 11343)	30 N/mm approx.
T-Peel strength ⁵ (CQP 580-2,-6 / ISO 11339)	9 N/mm approx.
Tensile strength ⁶ (CQP 580-5,-6 / ISO 527)	30 MPa approx.
Elongation at break ⁶ (CQP 580-5,-6 / ISO 527)	8% approx.
Glass transition temperature, DMTA (CQP 509 / DIN EN ISO 6721, EN 61006)	105°C approx.
Shelf life, at 23°C (CQP 584-1)	9 months

¹ CQP = Corporate Quality Procedures² DC 04 ZE 75/75 0.8 mm; 3 g/m² Anticorit PL 3802-39 S; adhesive layer: 25 x 10 x 0.3 mm; rate of extension: 10 mm/min.³ H320 ZE 50/50 1.5 mm; 3 g/m² Anticorit PL 3802-39 S; adhesive layer: 25 x 10 x 0.3 mm; rate of extension: 10 mm/min.⁴ DC 04 ZE 75/75 0.8 mm; 3 g/m² Anticorit PL 3802-39 S; adhesive layer: 20 x 30 x 0.3 mm; impact speed: 2.0 m/s.⁵ DC 04 ZE 75/75 0.8 mm; 3 g/m² Anticorit PL 3802-39 S; adhesive layer 25 x 100 x 0.3 mm; rate of extension: 100 mm/min.⁶ Rate of extension: 2 mm/min.**Description**

SikaPower®-492 G is a one-part, warm-applied, heat-curing high-structural, impact modified adhesive based on epoxy.

SikaPower®-492 G is designed for sheet metal assembly work in the body shop and is cured with heat, e.g. in the paint oven, to form a high-performance thermoset.

SikaPower®-492 G is manufactured in accordance with ISO 9001/14001 quality assurance system and with the Responsible Care program.

Product Benefits

- One-part
- High strength
- Adheres well to oily substrates
- Very high resistance to washing out
- Suitable for joining different metals
- Contains fine glass beads
- Distortion-free joining
- Provides protection against corrosion
- No damage to substrates
- Contains no solvents, PVC or isocyanates

Areas of Application

SikaPower®-492 G is suitable for high structural bonding of different types of metal. As an adhesive product it is designed for use as a hem flange bonding adhesive. The glass beads contained in the adhesive provide a uniform layer of adhesive in the gap and help to reduce excessive material squeeze out. The bonding of oily substrates (standard anti-corrosion treatment and deep drawing oils, approx. 3 g/m²) is possible because of the oil uptake during the heat curing that is an essential part of the process.



Method of Application

SikaPower®-492 G is applied in bead form with a recommended diameter of 1 to 3 mm. SikaPower®-492 G is filtered with a mesh size of 300 µm before packaging. Because the viscosity is temperature-dependent (see Fig. 1) all parts of the application system that are in contact with the adhesive must be heated. We recommend phased temperature increase from 40°C at the follower plate to 55°C at the application unit (nozzle). To prolong the life of the packings and facilitate removal of the cut foil disk we strongly recommend a preheating of the new drum for 15 minutes. This will make it easier to remove the foil. During longer breaks (e.g. over night or at the weekend) the equipment must be cooled down to ambient temperature and switched-off and the system (pump and dosage unit) depressurized.

The glass beads contained in the adhesive do not affect the application with standard application systems.

The time between application and curing must be as short as possible, since any uptake of moisture in the interim (climate-dependent) can cause formation of blisters during heat curing. As a guide to process planning, blister formation was not detected after conditioning of uncured parts at 23°C and 80% relative humidity in joined state for two weeks, a drop in dynamic resistance to cleavage was not detected even after four weeks. However, if suitable conditions cannot be guaranteed, pre-curing for 15 minutes at 160°C (substrate temperature) is necessary.

For advice on project-specific application techniques please contact the Corporate System Engineering department (Sika Services AG). For advice on suitable applications (Technical Service) please contact Sika Automotive GmbH.

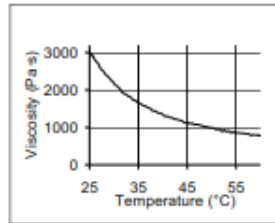


Figure 1: Viscosity as a function of temperature (Equipment: Physica)

Cure Mechanism

SikaPower®-492 G is cured by heat. The cure-rate depends both on temperature and elapsed time. The most suitable heat sources are convection ovens. The maximum temperature must not exceed 220°C.

Further Information

Copies of the following publications are available on request:

- Material Safety Data Sheet
- Pump specification

Packaging Information

Cartridges	300 ml
Hobbock ¹	23 l
Hobbock	50 l
Drum	195 l

¹ 280 mm diameter

Value Base

All technical data stated in this Product Data Sheet are based on laboratory tests. Actual measured data may vary due to circumstances beyond our control.

Local Restrictions

Please note that as a result of specific local regulations the performance of this product may vary from country to country. Please consult the local Product Data Sheet for the exact description of the application fields.

Health and Safety Information

For information and advice on the safe handling, storage and disposal of the chemical products, users shall refer to the most recent Material Safety Data Sheet containing physical, ecological, toxicological and other safety-related data.

Legal Notes

The information, and, in particular, the recommendations relating to the application and end-use of Sika products, are given in good faith based on Sika's current knowledge and experience of the products when properly stored, handled and applied under normal conditions in accordance with Sika's recommendations. In practice, the differences in materials, substrates and actual site conditions are such that no warranty in respect of merchantability or of fitness for a particular purpose, nor any liability arising out of any legal relationship whatsoever, can be inferred either from this information, or from any written recommendations, or from any other advice offered. The user of the product must test the product's suitability for the intended application and purpose. Sika reserves the right to change the properties of its product. The proprietary rights of third parties must be observed. All orders are accepted subject to our current terms of sale and delivery. Users must always refer to the most recent issue of the local Product Data Sheet for the product concerned, copies of which will be supplied on request.

Further information available at:
www.sika.ch
www.sika.com

Sika Automotive GmbH
Reichsbahnstraße 99
D-22525 Hamburg
Germany
Tel.+49405400-0
Fax+494054002-241

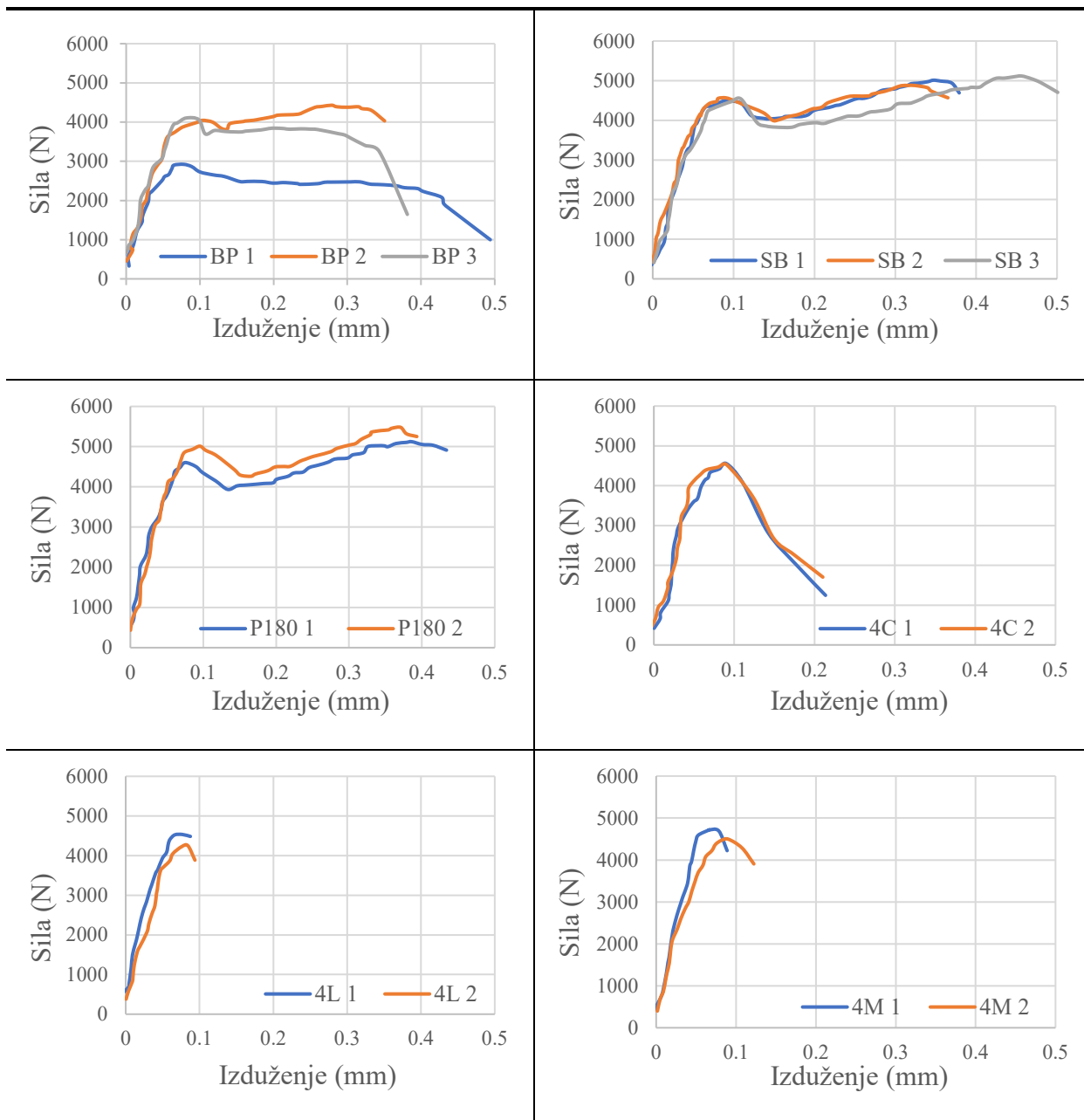


SikaPower®-492 G 2 / 2

Sika P.A.3 Nastavak. Tehnički list lepka SikaPower®-492 G [57]

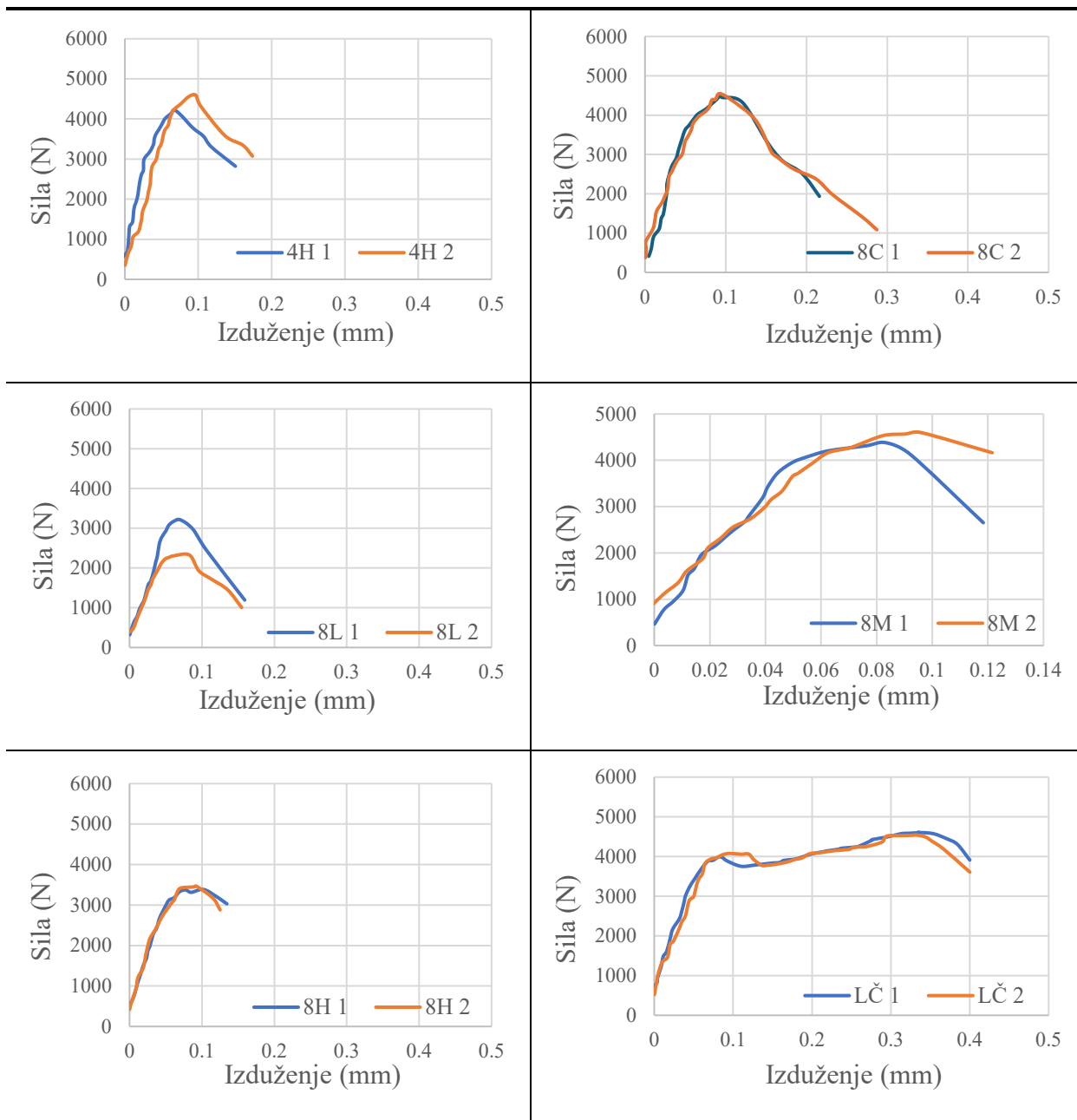
Prilog B

SikaFast®-580



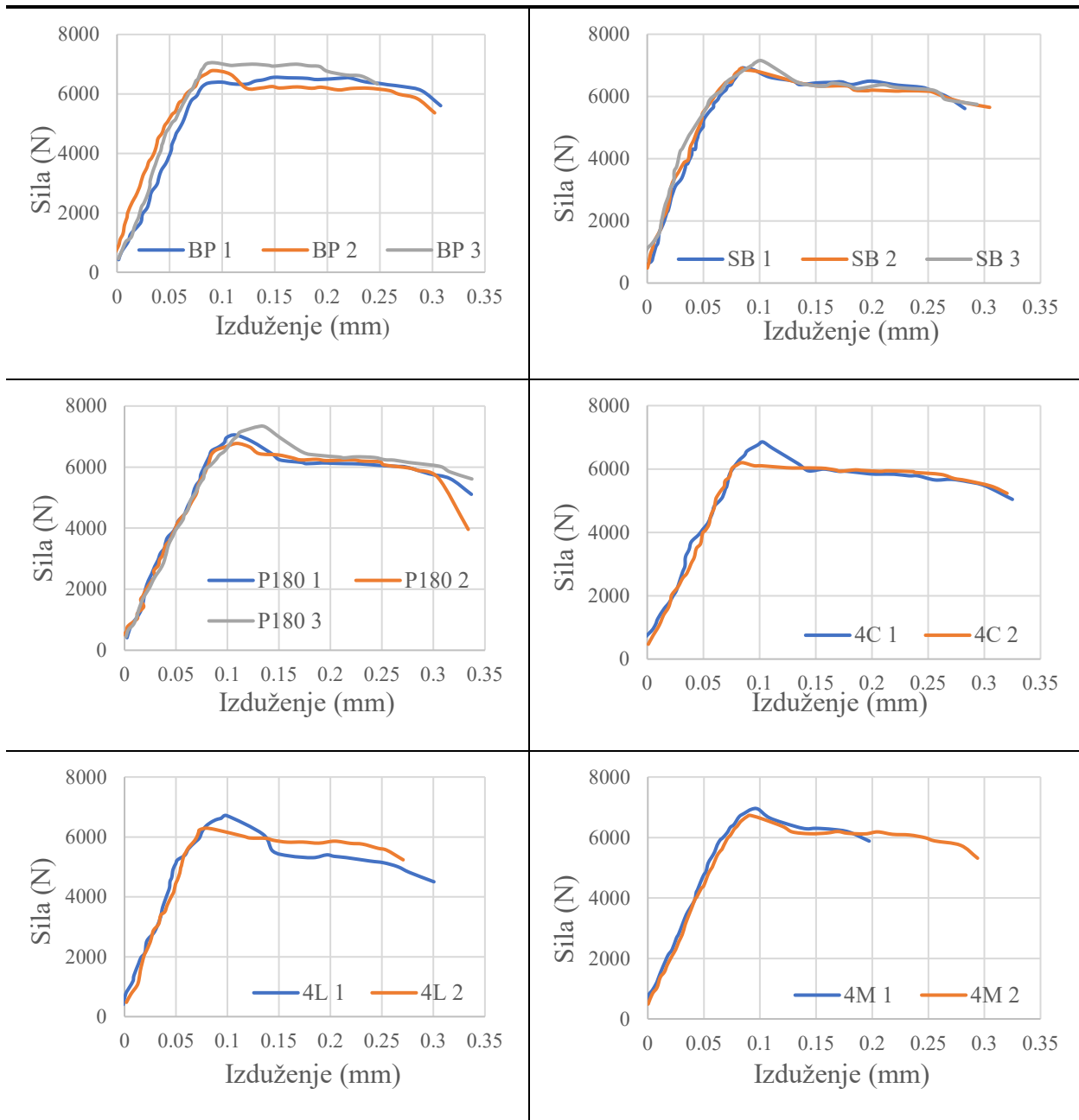
Slika P.B.1 Dijagram sila – izduženje za jednostruko preklopni zalepljeni spoj od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 i lepka SikaFast®-580

SikaFast®-580



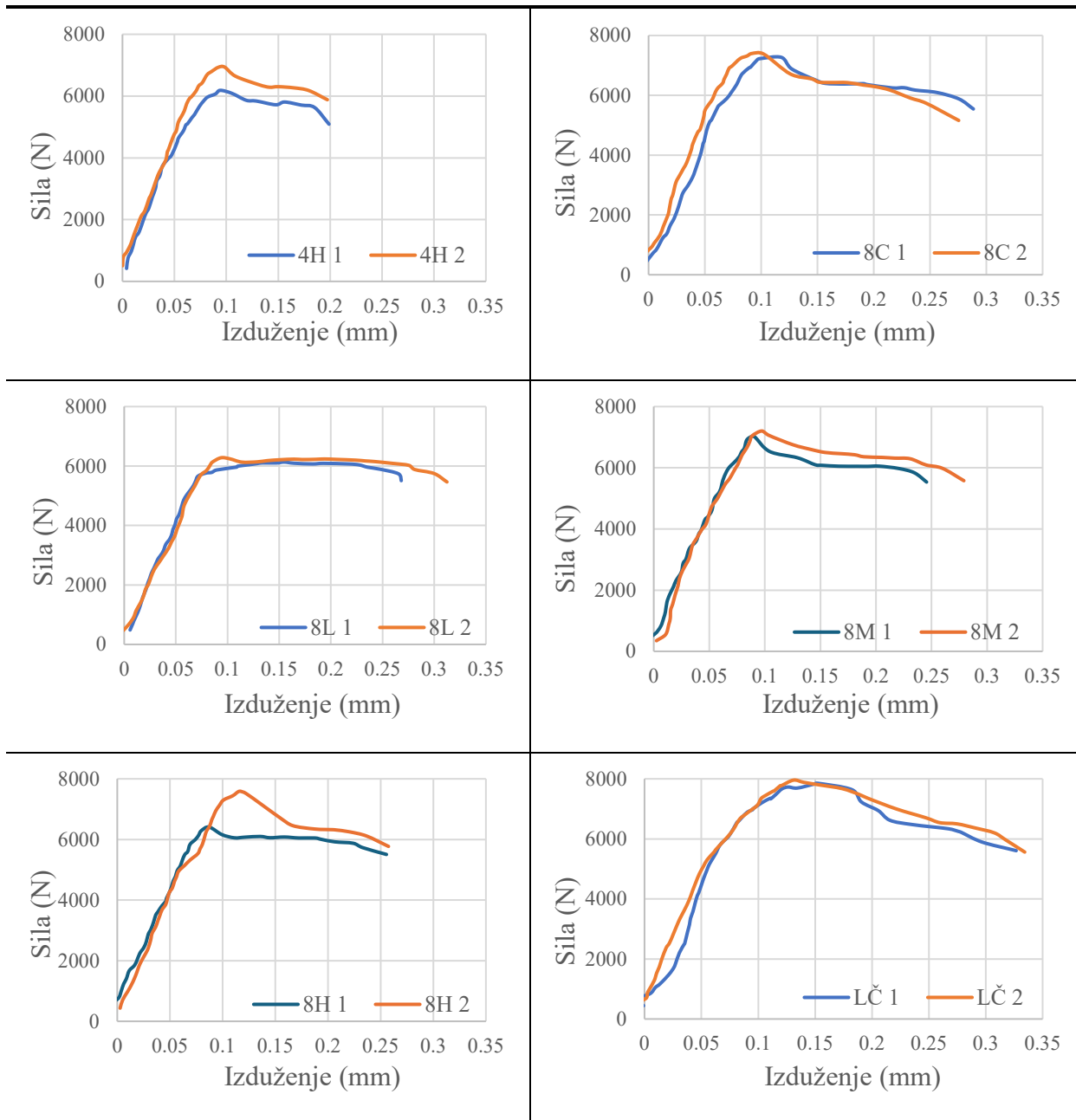
Slika P.B.1 Nastavak. Dijagram sila – izduženje za jednostruko preklopni zalepljeni spoj od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 i lepka SikaFast®-580

SikaPower®-880



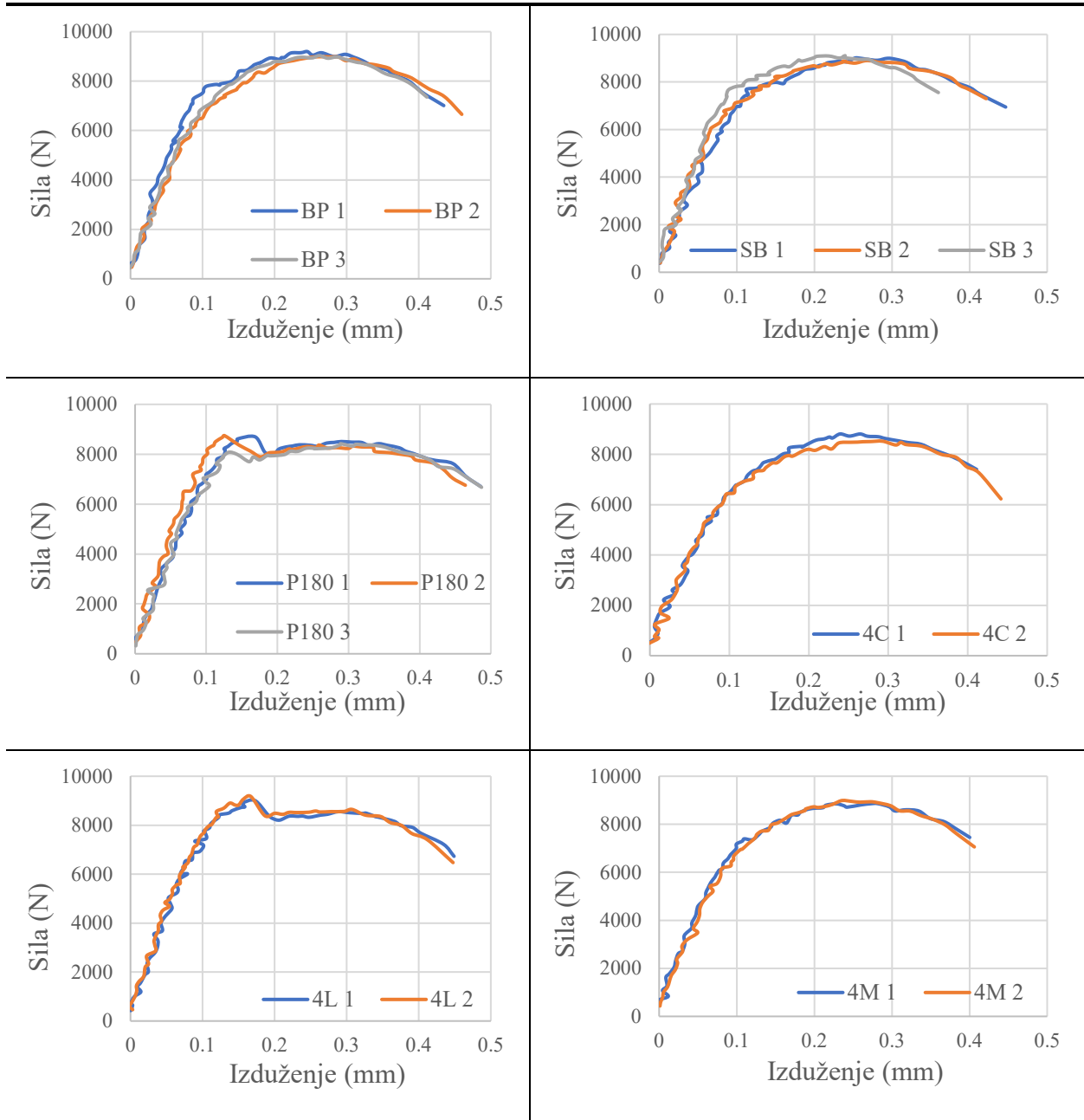
Slika P.B.2 Dijagram sila – izduženje za jednostruko preklopni zalepljeni spoj od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 i lepka SikaPower®-880

SikaPower®-880



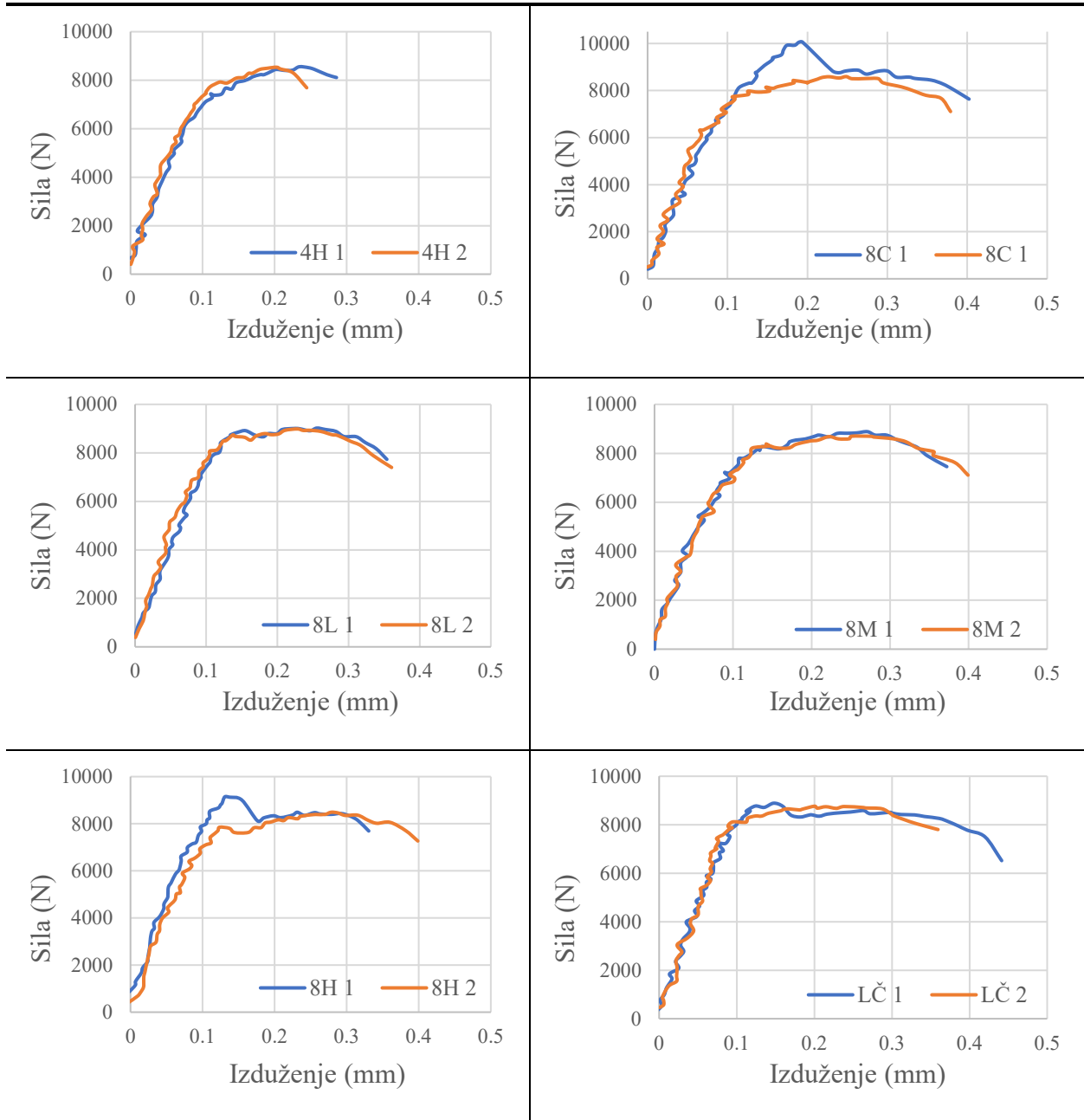
Slika P.B.2 Nastavak. Dijagram sila – izduženje za jednostruko preklopni zalepljeni spoj od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 i lepka SikaPower®-880

SikaPower®-492 G



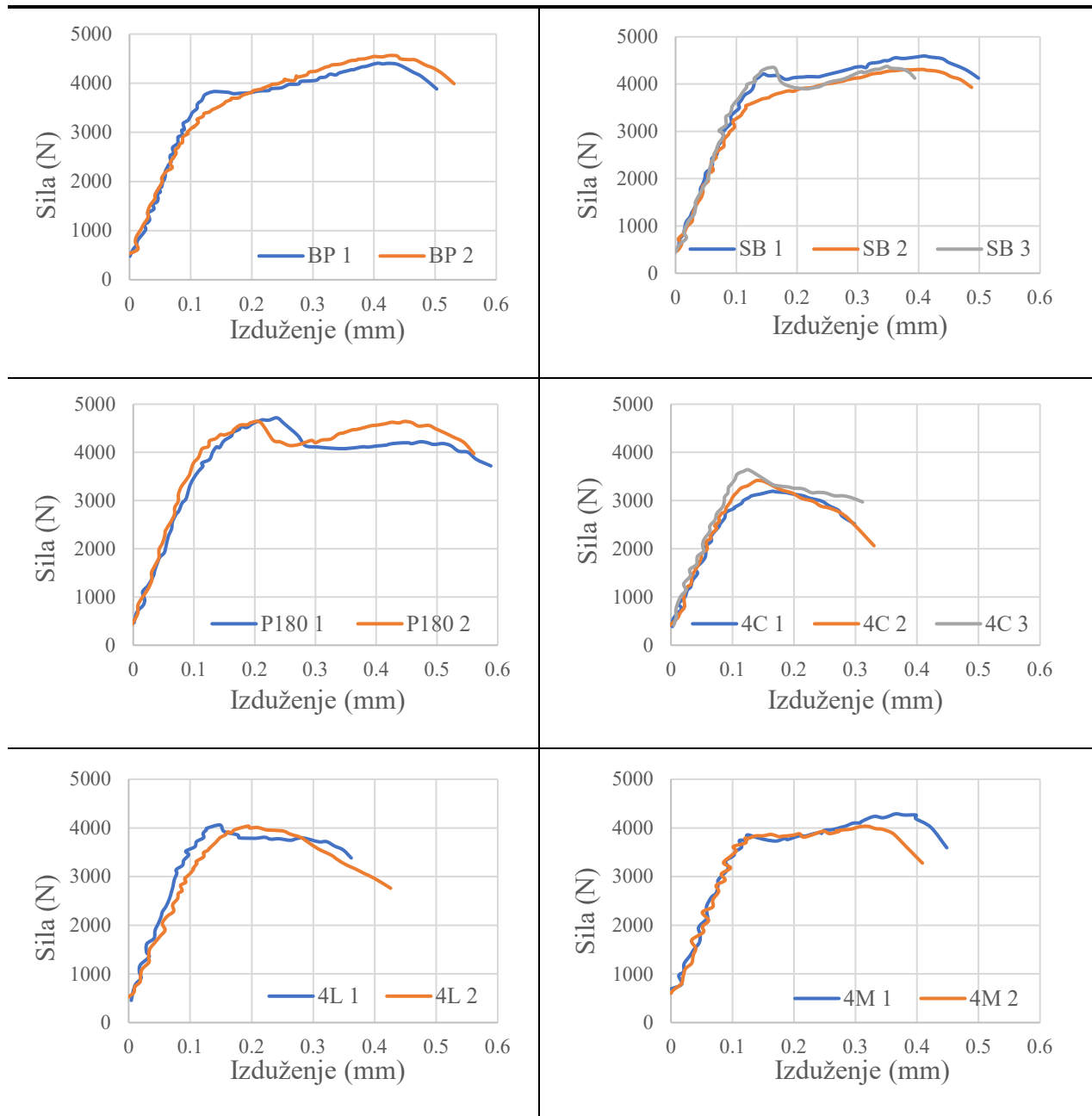
Slika P.B.3 Dijagram sila – izduženje za jednostruko preklopni zalepljeni spoj od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 i lepka SikaPower®-492 G

SikaPower®-492 G



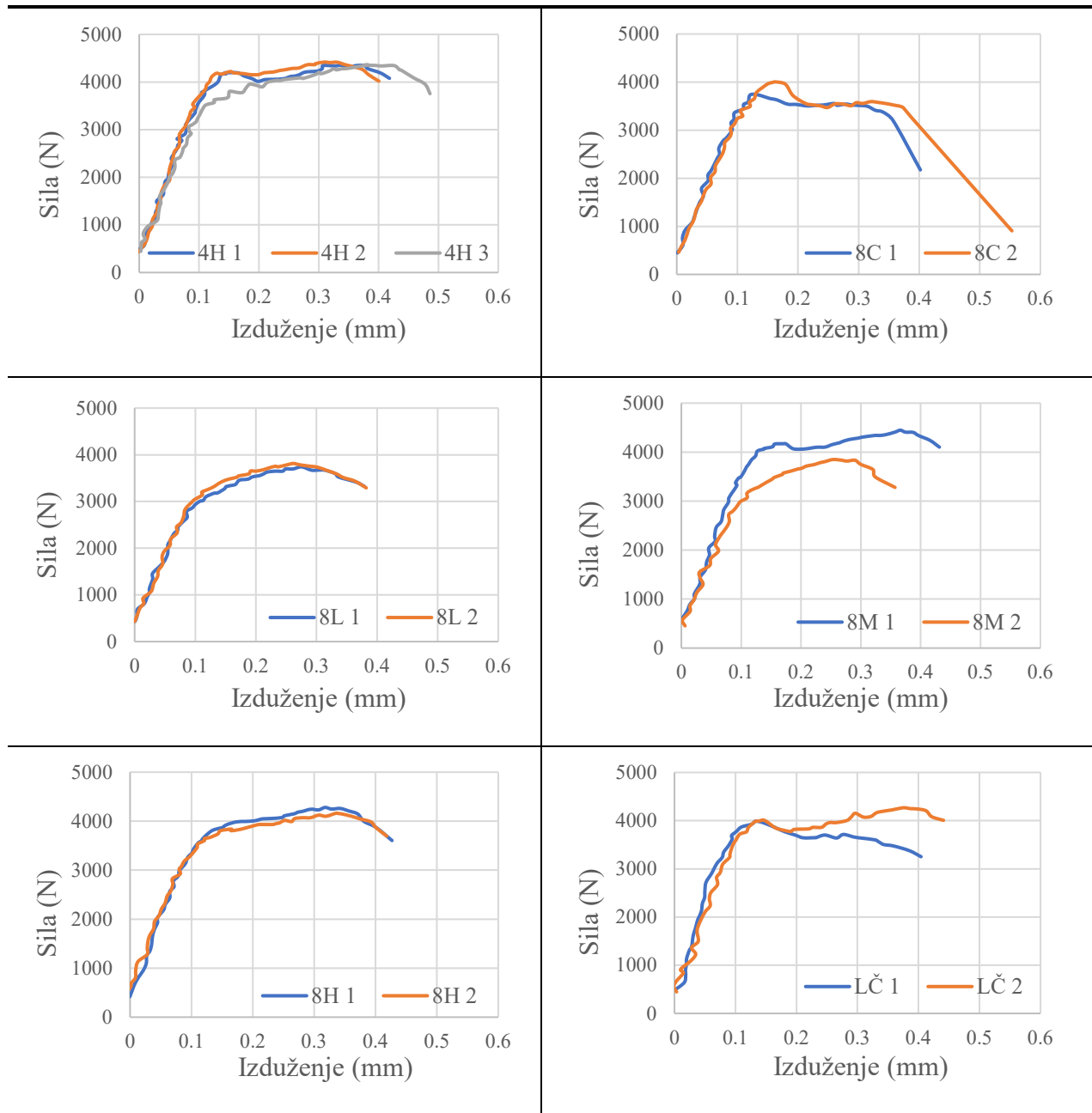
Slika P.B.3 Nastavak. Dijagram sila – izduženje za jednostruko preklopni zalepljeni spoj od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 i lepka SikaPower®-492 G

SikaFast®-580



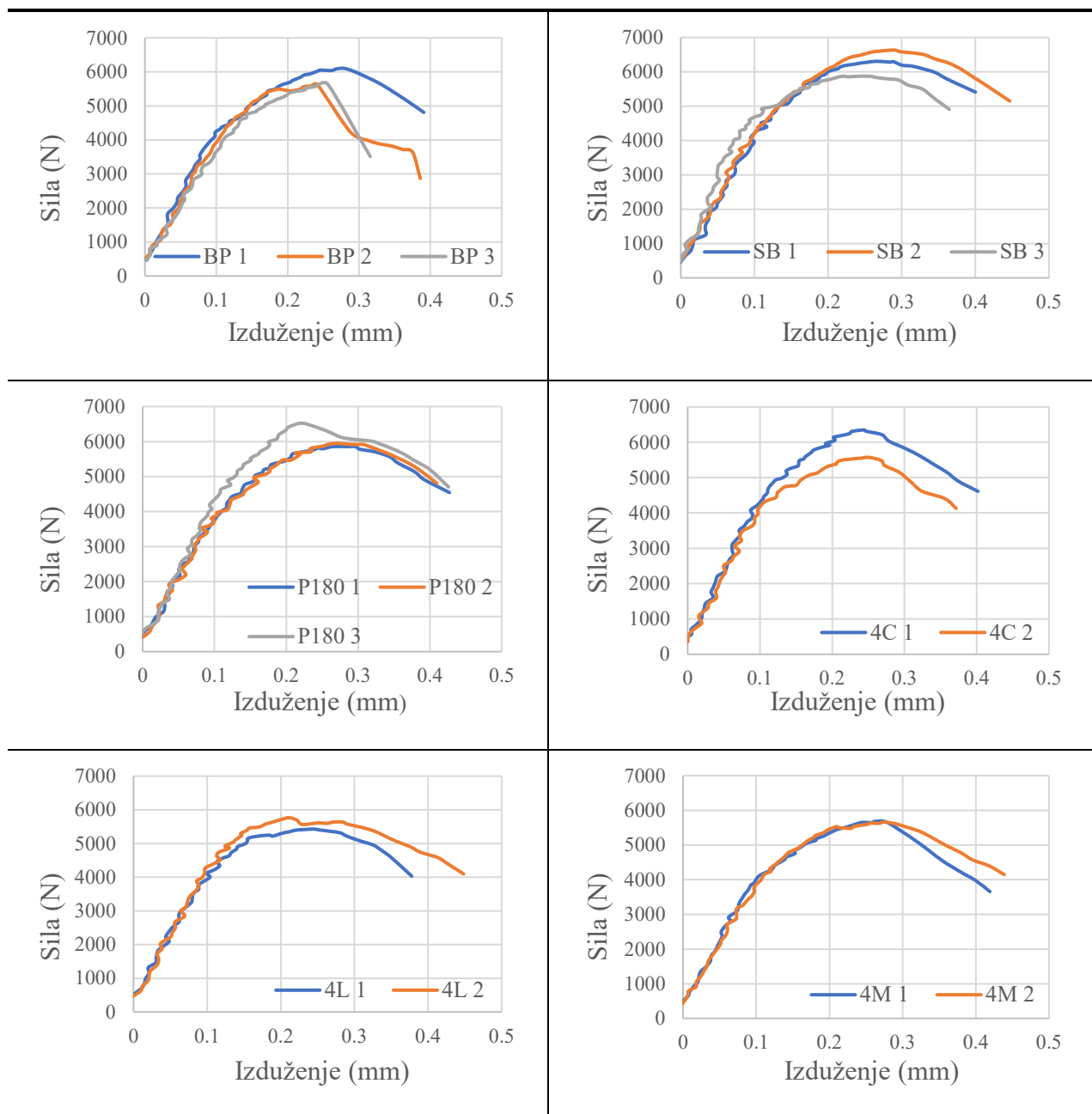
Slika P.B.4 Dijagram sila – izduženje za jednostruko preklopni zalepljeni spoj od legure aluminijuma EN AW 5754 i lepka SikaFast®-580

SikaFast®-580



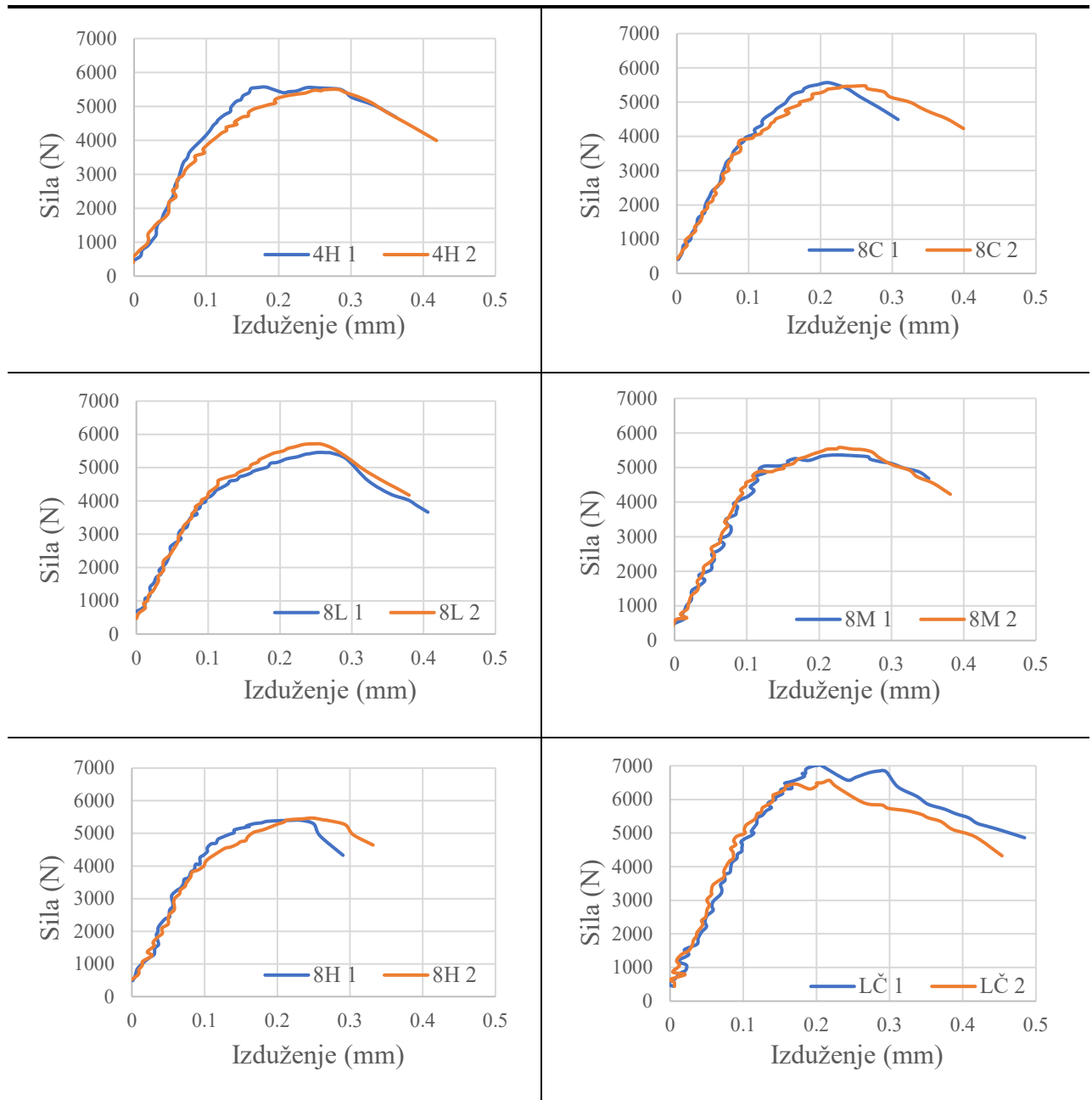
Slika P.B.4 Nastavak. Dijagram sila – izduženje za jednostruko preklopni zalepljeni spoj od legure aluminijuma EN AW 5754 i lepka SikaFast®-580

SikaPower®- 880



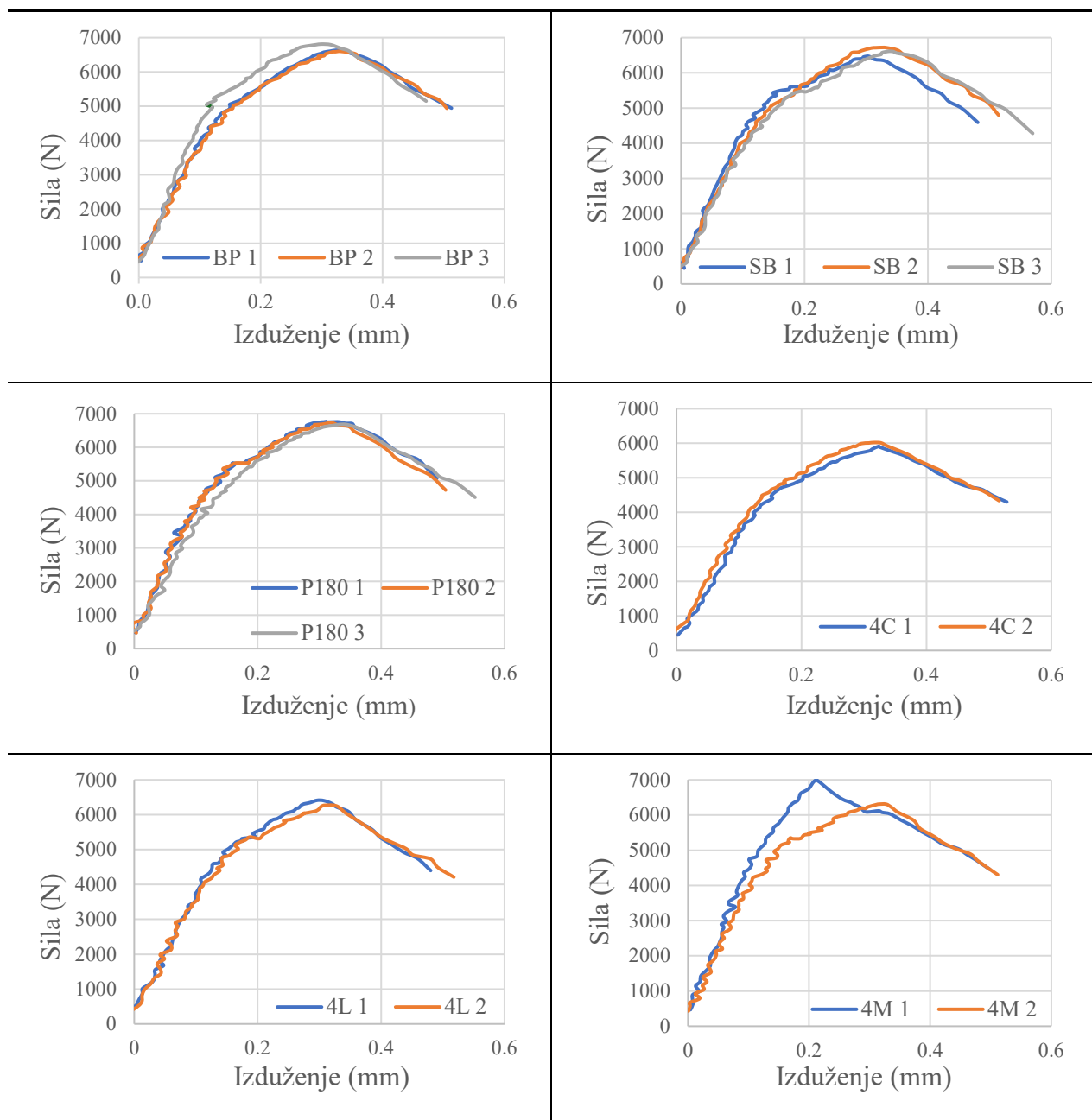
Slika P.B.5 Dijagram sila – izduženje za jednostruko preklopni zalepljeni spoj od legure aluminijuma EN AW 5754 i lepka SikaPower®- 880

SikaPower®- 880



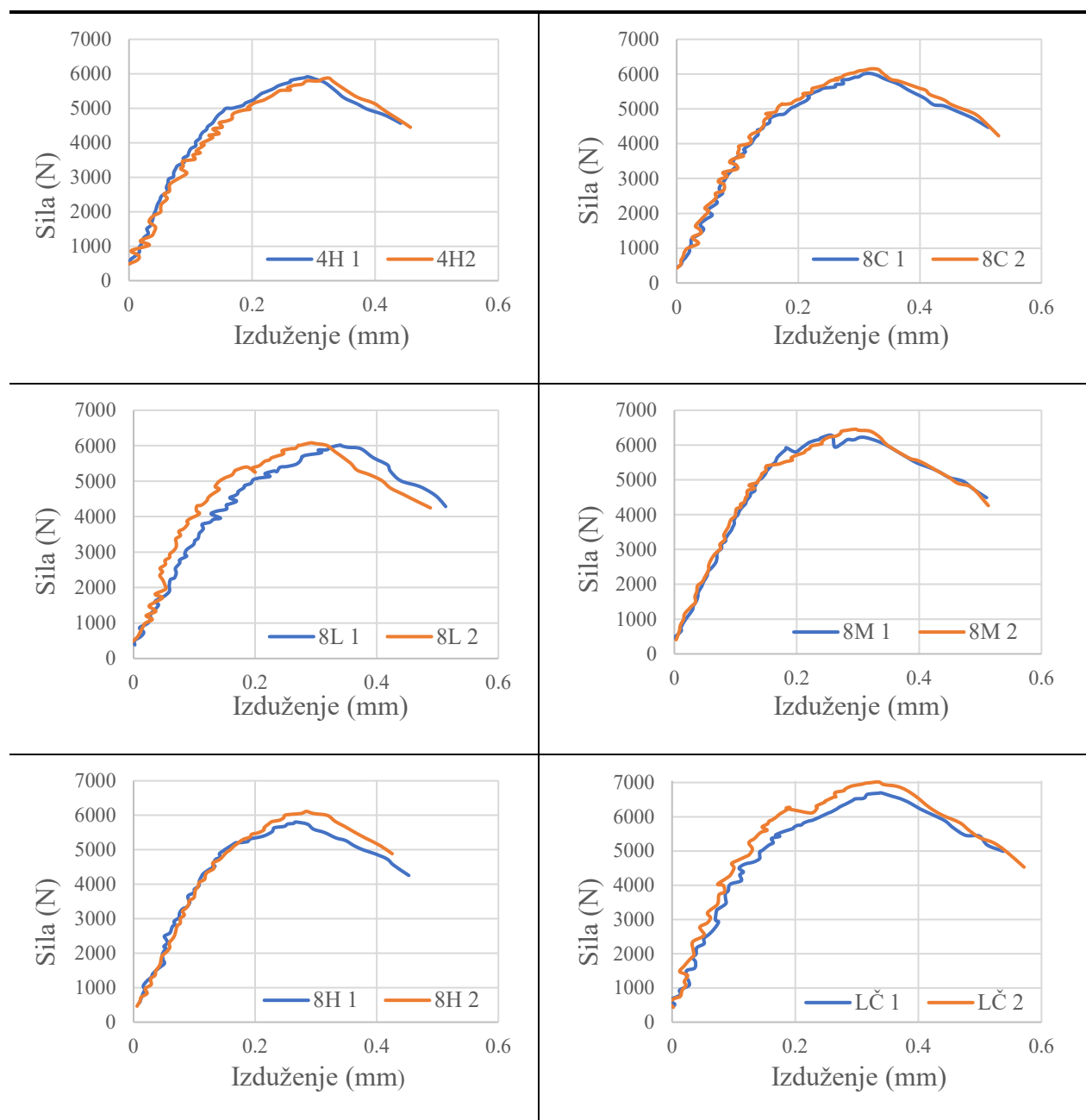
Slika P.B.5 Nastavak. Dijagram sila – izduženje za jednostruko preklopni zalepljeni spoj od legure aluminijuma EN AW 5754 i lepka SikaPower®- 880

SikaPower®-492 G



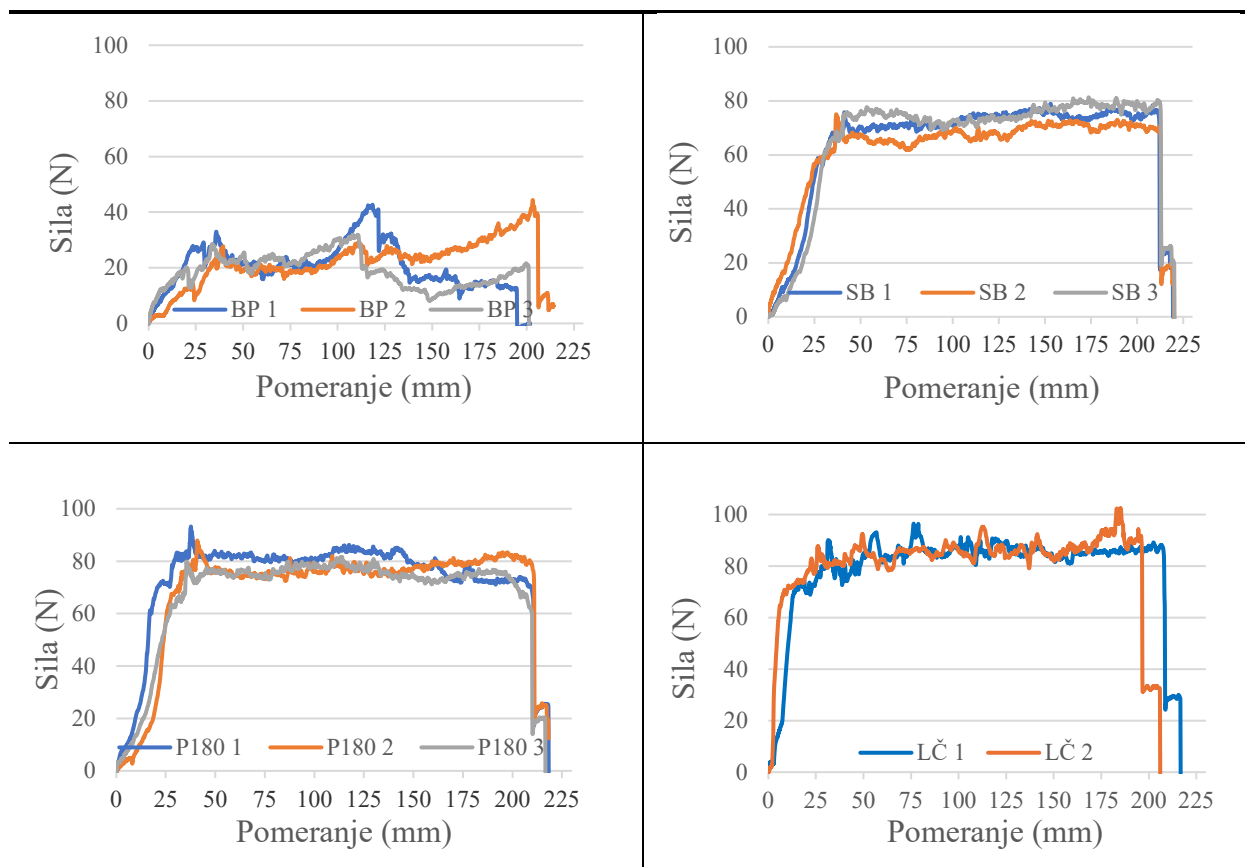
Slika P.B.6 Dijagram sila – izduženje za jednostruko preklopni zalepljeni spoj od legure aluminijuma EN AW 5754 i lepka SikaPower®-492 G

SikaPower®-492 G

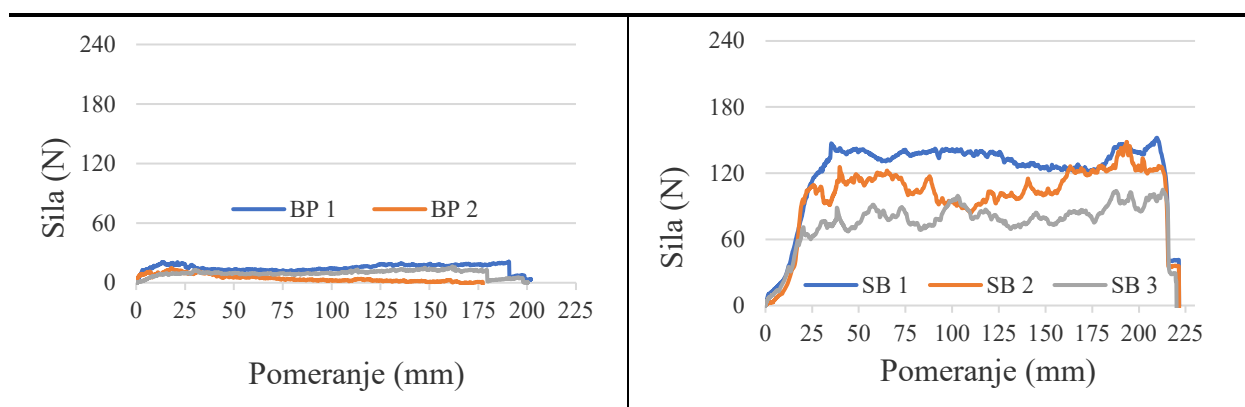


Slika P.B.6 Nastavak. Dijagram sila – izduženje za jednostruko preklopni zalepljeni spoj od legure aluminijuma EN AW 5754 i lepka SikaPower®-492 G

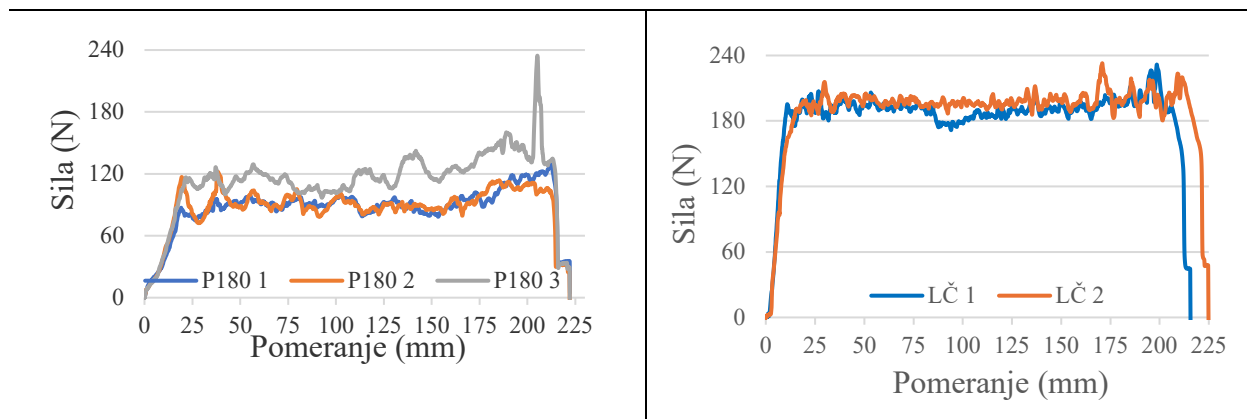
Prilog C



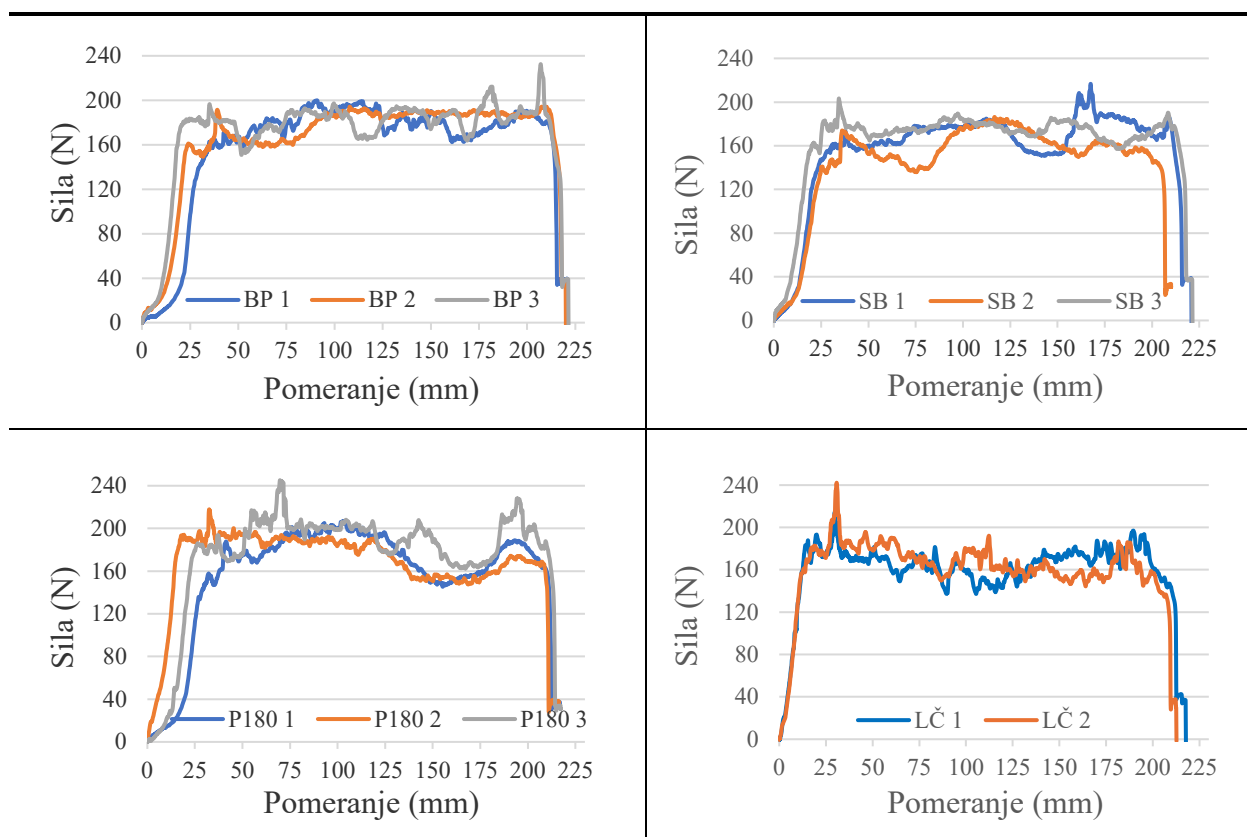
Slika P.C.1 Dijagram sila – pomeranje nakon testa ljuštenja: zalepljeni spoj od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 širine 25 mm i lepka SikaFast®-580



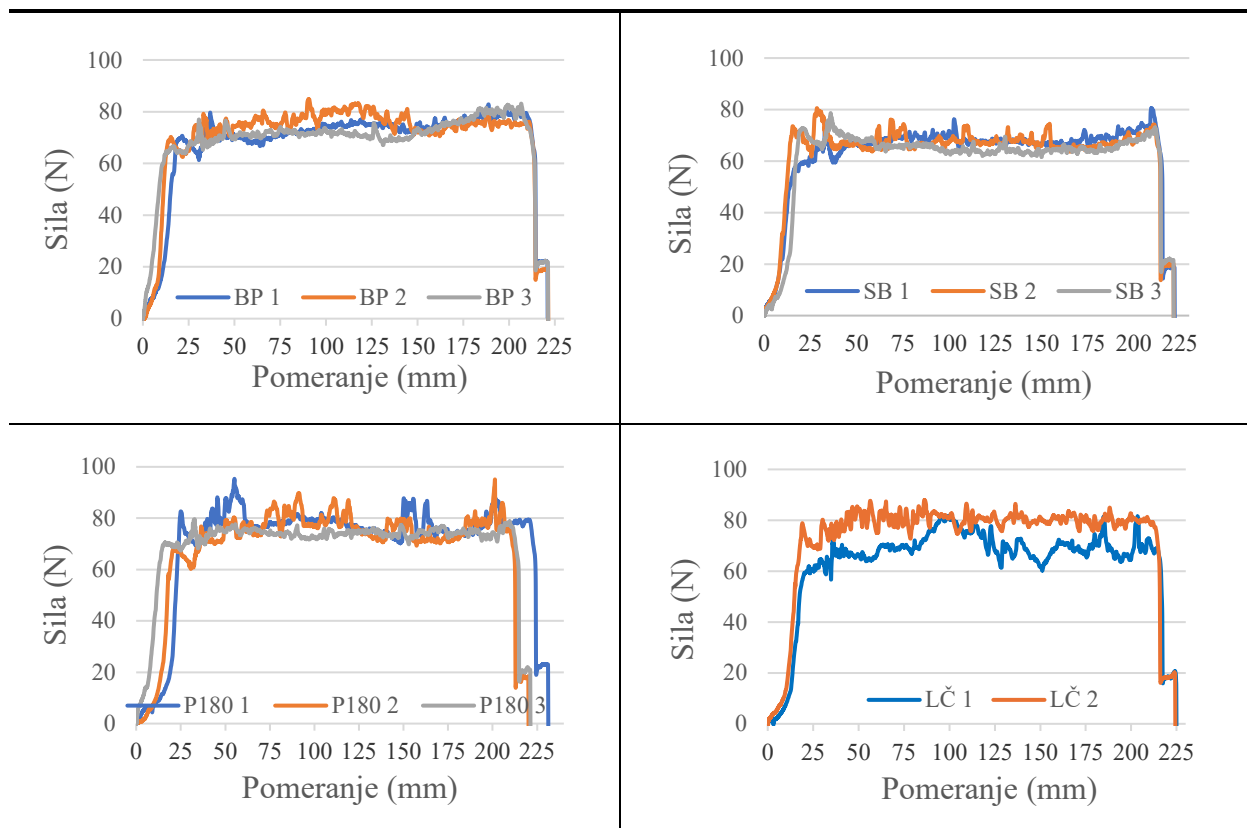
Slika P.C.2 Dijagram sila – pomeranje nakon testa ljuštenja: zalepljeni spoj od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 širine 25 mm i lepka SikaPower®-880



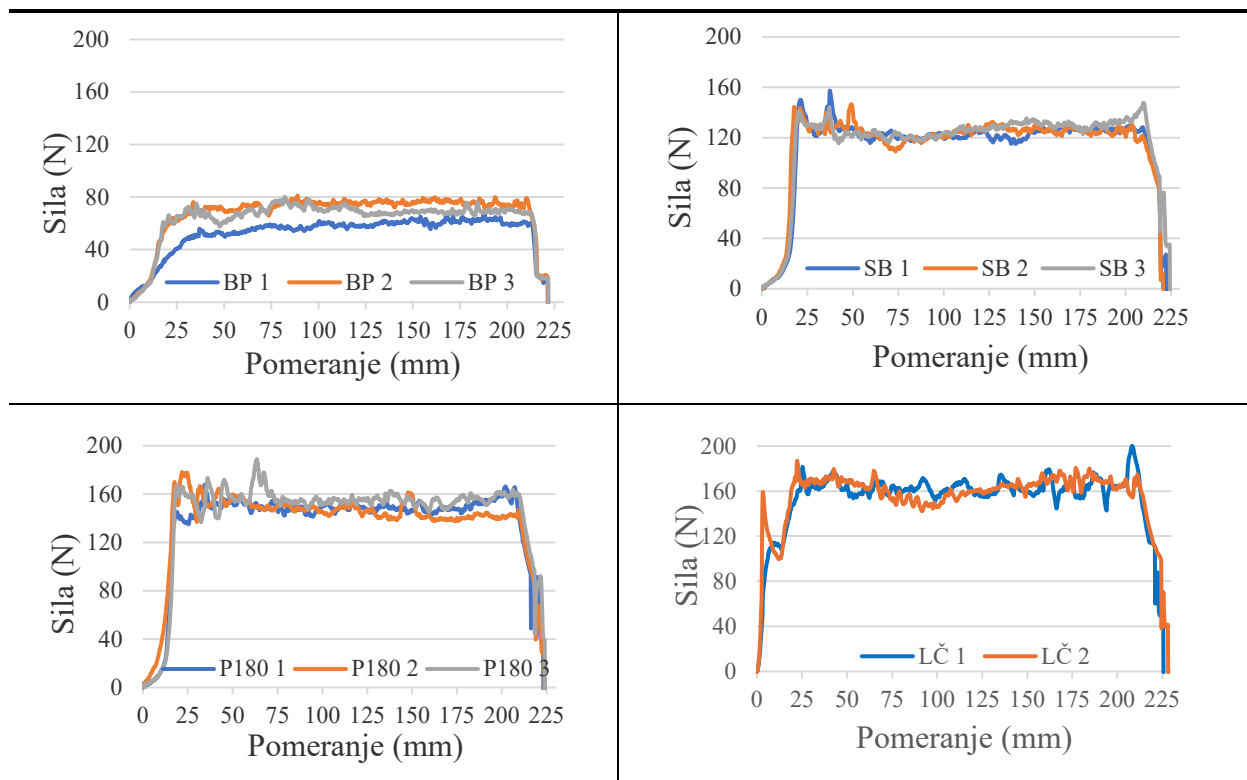
Slika P.C.2 Nastavak. Dijagram sila – pomeranje nakon testa ljuštenja: zalepljeni spoj od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 širine 25 mm i lepka SikaPower®-880



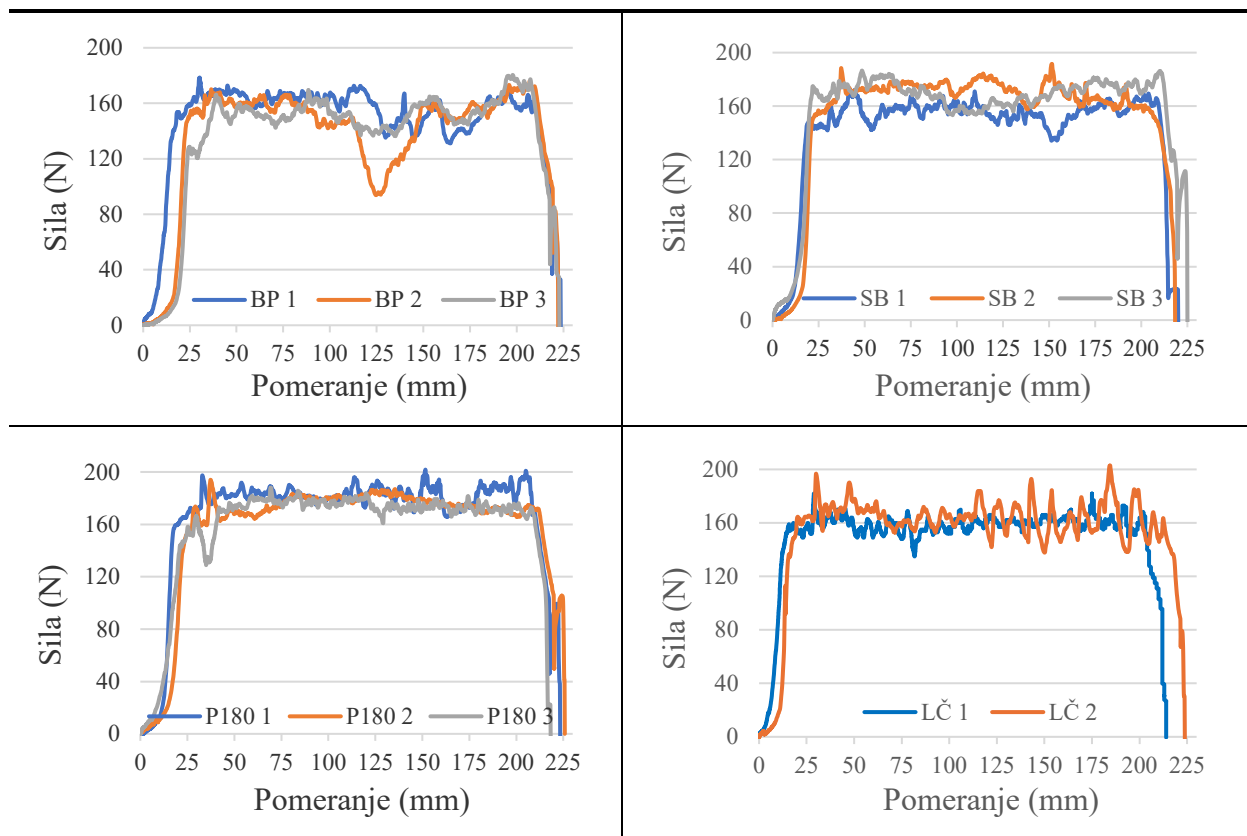
Slika P.C.3 Dijagram sila – pomeranje nakon testa ljuštenja: zalepljeni spoj od nerđajućeg čelika X5CrNi18-10 širine 25 mm i lepka SikaPower®-492 G



Slika P.C.4 Dijagram sila – pomeranje nakon testa ljuštenja: zalepljeni spoj od legure aluminijuma EN AW 5754 širine 25 mm i lepka SikaFast®-580



Slika P.C.5 Dijagram sila – pomeranje nakon testa ljuštenja: zalepljeni spoj od legure aluminijuma EN AW 5754 širine 25 mm i lepka SikaPower®-880



Slika P.C.6 Dijagram sila – pomeranje nakon testa ljuštenja: zalepljeni spoj od legure aluminijuma EN AW 5754 širine 25 mm i lepka SikaPower®-492 G

Biografija autora

Nataša Zdravković rođena je 20. novembra 1985. godine u Nišu. Završila je Osnovnu školu „Desanka Maksimović“ i Mašinsko tehničku školu „15. maj“, obe u Nišu. Mašinski fakultet Univerziteta u Nišu upisala je 2004. godine. Master studije je završila 2010. godine na profilu Mašinske konstrukcije i mehanizacija sa prosečnom ocenom u toku studija 9,82 i ocenom 10 na master radu.

Doktorske akademske studije upisala je 2010. godine na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Nišu, uža naučna oblast Mašinske konstrukcije i inženjering. Od 2011. godine angažovana je na izvođenju nastavno-obrazovnog procesa na katedri za Mašinske konstrukcije i inženjering, najpre kao stipendista Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije, a od 2018. godine kao asistent. Kao asistent učestvovala je u izvođenju nastavno-obrazovnog procesa na više od 10 predmeta.

Član je organizacionog odbora nekoliko međunarodnih naučno-stručnih konferencija. Autor je i koautor većeg broja naučnih i stručnih radova.

Udata je, majka dvoje dece i živi u Nišu.

Изјава 1.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом:

„Утицај механичке припреме површина на чврстоћу залепљених спојева“

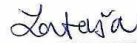
која је одбрањена на Машинском факултету Универзитета у Нишу:

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини, нити у деловима, нисам пријављивао/ла на другим факултетима, нити универзитетима;
- да нисам повредио/ла ауторска права, нити злоупотребио/ла интелектуалну својину других лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада, и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Нишу, 15.10.2025.

Потпис аутора дисертације:



Здравковић Наташа

Изјава 2.

**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ЕЛЕКТРОНСКОГ И ШТАМПАНОГ ОБЛИКА
ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Наслов дисертације:

„Утицај механичке припреме површина на чврстоћу залепљених спојева“

Изјављујем да је електронски облик моје докторске дисертације, коју сам предао/ла за уношење у **Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу**, истоветан штампаном облику.

у Нишу, 15.10.2025.

Потпис аутора дисертације:

Nataša

Здравковић Наташа

Изјава 3:

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу унесе моју докторску дисертацију, под насловом:

„Утицај механичке припреме површина на чврстоћу залепљених спојева“

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском облику, погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство **(CC BY)**
2. Ауторство – некомерцијално **(CC BY-NC)**
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде **(CC BY-NC-ND)**
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима **(CC BY-NC-SA)**
5. Ауторство – без прераде **(CC BY-ND)**
6. Ауторство – делити под истим условима **(CC BY-SA)⁴**

у Нишу, 15.10.2025.

Потпис аутора дисертације:

Nataša

Здравковић Наташа

⁴ Аутор дисертације обавезан је да изабере и означи (заокружи) само једну од шест понуђених лиценци; опис лиценци дат је у наставку текста.

1. Ауторство (CC BY)

Дозвољава умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора, на начин одређен од аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

Дозвољава умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора, на начин одређен од аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)

Дозвољава умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора, на начин одређен од аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. Уодносу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

Дозвољава умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора, на начин одређен од аутора или даваоца лиценце, и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада

5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)

Дозвољава умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора, на начин одређен од аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

Дозвољава умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора, на начин одређен од аутора или даваоца лиценце, и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.

⁵ Више о лиценцама Креативне заједнице на адреси:
http://creativecommons.org.rs/?page_id=74CC. Овај текст НИЈЕ саставни део изјава аутора!