



UNIVERZITET U NIŠU
MAŠINSKI FAKULTET



Aleksija D. Đurić

**ISTRAŽIVANJE TEHNOLOGIJA SPAJANJA
LIMOVA OD ČELIKA DP500 I LEGURE
ALUMINIJUMA AW-5754 U CILJU RAZVOJA
LAKIH KONSTRUKCIJA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Niš, 2022.



UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING



Aleksija D. Đurić

**INVESTIGATION OF JOINING TECHNOLOGIES
OF DP500 STEEL AND AW-5754 ALUMINUM
ALLOY SHEETS IN ORDER TO DEVELOP
LIGHTWEIGHT CONSTRUCTIONS**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2022.

Podaci o doktorskoj disertaciji

Mentor: dr Dragan Milčić, redovni profesor, Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet

Naslov: Istraživanje tehnologija spajanja limova od čelika DP500 i legure aluminijuma AW-5754 u cilju razvoja lakih konstrukcija

Rezime: Jedan od najvećih problema u primjeni multimaterijal dizajna, kao ključnog pristupa u razvoju lakih konstrukcija, je spajanje raznorodnih materijala, a posebno čelika i aluminijuma. U ovoj doktorskoj disertaciji analizirana je mogućnost spajanja dvofaznog čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754. Ova dva materijala izabrana su kao adekvatni predstavnici multimaterijal strukture, koja se prvenstveno primjenjuje u automobilske industriji. Suštinski posmatrano, ova doktorska disertacija sastoji se od teorijskog i eksperimentalnog istraživanja. U dijelu koji se odnosi na teorijska istraživanja analizirana su dosadašnja dostignuća vezana za spajanja raznorodnih materijala sa akcentom na spajanje dvofaznih čelika i legura aluminijuma. Eksperimentalna istraživanja u ovoj disertaciji podijeljena su u četiri dijela.

Prvi dio odnosi se na istraživanje mehaničkih svojstava, mikrostrukture i makrostrukture spoja dva lima od čelika DP500 dobijenog pomoću klasičnog elektrootpornog tačkastog zavarivanja (RSW). Parametri kod ove tehnologije spajanja imaju ključnu ulogu kada je riječ o kvalitetu spoja, zato je u disertaciji analiziran uticaj parametara zavarivanja na mehanička svojstva spoja, odnosno urađena je optimizacija parametara zavarivanja korišćenjem metoda kao što su višekriterijumska Tagučijeva optimizacija i Tagučijeva optimizacija sa sivom relacionom analizom.

Drugi dio eksperimentalnog istraživanja odnosi se na istraživanje mehaničkih svojstava, mikrostrukture i makrostrukture spoja limova od čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 dobijenog takođe pomoću klasičnog elektrootpornog tačkastog zavarivanja (RSW).

Treći dio eksperimentalnog istraživanja doktorske disertacije bavi se istraživanjem mehaničkih svojstava makrostrukture i mikrostrukture spoja limova od čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754, dobijenog pomoću elektrootpornog tačkastog zavarivanja elementima (REW), kao alternativni RSW tehnologiji spajanja. Takođe, analiziran je i uticaj parametara zavarivanja prvenstveno na tip loma, tj. mod otkaza, a onda i na mehanička svojstva, mikro i makro strukturu REW spoja.

Mehaničko spajanje, nazvano zakivanje bez zakovica (MC) je još jedna alternativna tehnika spajanja limova, ali bez dodatnog elementa i bez unošenja toplote. Ovaj način spajanja hladnim oblikovanjem izvodi se postupkom lokalnih deformacija uz pomoć oblikača (žiga) i matrice. U četvrtom dijelu doktorske disertacije prikazana je analiza mehaničkih svojstava i makrostrukture spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 dobijenog pomoću zakivanja bez zakovica. Na osnovu dobijenih rezultata istraživanja urađeno je rangiranje, te predstavljene prednosti i nedostaci razmatranih tehnologija.

Naučna oblast:	Mašinsko inženjerstvo
Naučna disciplina:	Mašinski elementi i konstrukcije, zavarivanje
Ključne riječi:	Elektrootporno tačkasto zavarivanje, Elektrootporno tačkasto zavarivanje elementima, Zakivanje bez zakovica, Čelik DP500, Legura aluminijuma AW-5754, Mehanička svojstva spojeva.
UDK:	621.791.05:621.791.793]:669.715+669.14(043.3)
CERIF klasifikacija:	T130; T210; T450
Tip licence Kreativne zajednice:	CC BY-NC-SA

Data on Doctoral Dissertation

Doctoral Supervisor: dr Dragan Milčić, full professor, University of Niš, Faculty of Mechanical Engineering

Title: Investigation of joining technologies of DP500 steel and AW-5754 aluminum alloy sheets in order to develop lightweight constructions

Abstract: Multi-material design is a key approach in the development of light constructions. Among the major problems in the application of multi-material design is the joining of dissimilar materials, especially steel and aluminum. In this doctoral dissertation, the possibility of joining dual-phase DP500 steel and AW 5754 aluminum alloy is analyzed. These two materials were selected as adequate representatives of the multi-material structure, which is primarily applied in the automotive industry. Generally, this doctoral dissertation consists of theoretical and experimental research. In the part related to theoretical research, the "state of the art" related to the joining of dissimilar materials with an emphasis on the joining of dual-phase steels and aluminum alloys are analyzed. The experimental research in this dissertation is divided into four parts.

The first part of the experimental research presents the research of mechanical characteristics, microstructure and macrostructure of the two DP500 steel sheets joint, which is welded by Resistance spot welding. (RSW). Also, this part of the doctoral dissertation analyzes the influence of welding parameters on the mechanical characteristics of the joint, i.e., the optimization of welding parameters using methods such as multiobjective Taguchi optimization and multiobjective Grey-based Taguchi method was done.

The second part of the experimental research refers to the research of mechanical characteristics, microstructure and macrostructure of the weld joint of DP500 steel and aluminum alloy AW 5754 obtained by conventional Resistance spot welding (RSW).

The third part of the experimental research presents the research of mechanical characteristics, macrostructure and microstructure of DP500 steel sheet and AW 5754 aluminum alloy joint obtained by Resistance element welding (REW), as an alternative to RSW joining technology. Also, the influence of welding parameters primarily on the failure mode, and then on the mechanical characteristics, microstructure and macrostructure of the REW joint were analyzed.

Mechanical clinching (MC) is another alternative technique for joining sheets, but without an additional element and without introducing heat. This method of cold forming has performed by the process of local deformations with the punch and die. The fourth part of the doctoral dissertation presents an analysis of the mechanical characteristics and macrostructure of the DP500 steel and the AW 5754 aluminum alloy joint obtained by mechanical clinching.

Based on the obtained and presented research results, a ranking of joining technology for dissimilar materials was made. The advantages and disadvantages of the considered technologies were also presented.

Scientific Field:	Mechanical engineering
Scientific Discipline:	Mechanical elements and constructions, welding

Key words:	Resistance spot welding, Resistance element welding, Mechanical clinching, Steel DP500, Aluminum alloy AW-5754, Mechanical properties of joints.
------------	--

UDK:	621.791.05:621.791.793]:669.715+669.14(043.3)
------	---

CERIF Classification:	T130; T210; T450
-----------------------	------------------

Creative Commons License Type:	CC BY-NC-SA
--------------------------------	-------------

*Ovu doktorsku disertaciju posvjećujem svom ocu Dragu Đuriću koji je nesretno nastradao
08.09.2021. godine.*

SADRŽAJ

SPISAK SLIKA	I
SPISAK TABELA	VI
1. UVOD	1
1.1. PREDMET I CILJ ISTRAŽIVANJA	3
1.2. METODOLOGIJA	4
2. TEHNOLOGIJE SPAJANJA LIMOVA OD ČELIKA I LEGURA ALUMINIJUMA – STANJE ISTRAŽIVANJA	5
2.1. SVOJSTVA, ZAVARLJIVOST I PRIMJENA LIMOVA OD DVOFAZNIH ČELIKA I LEGURA ALUMINIJUMA	5
2.2. PODJELA TEHNOLOGIJA SPAJANJA LIMOVA OD ČELIKA I LEGURA ALUMINIJUMA	8
2.3. TEHNOLOGIJE SPAJANJA ZAVARIVANJEM	9
2.3.1. Elektrootporno tačkasto zavarivanje	9
2.3.2. Elektrootporno tačkasto zavarivanje elementima	12
2.3.3. Zavarivanje trenjem sa miješanjem	14
2.3.4. Zavarivanje laserom	16
2.3.5. Zavarivanje ultrazvukom	17
2.4. TEHNOLOGIJE MEHANIČKOG SPAJANJA	18
2.4.1. Mehaničko spajanje pomoću dodatnih komponenti	18
2.4.2. Mehaničko spajanje bez dodatnih komponenti	20
2.5. LIJEPLJENJE	21
2.6. HIBRIDNE TEHNOLOGIJE SPAJANJA	22
2.7. TRENDVI ISTRAŽIVANJA TEHNOLOGIJA SPAJANJA LIMOVA OD ČELIKA I LEGURA ALUMINIJUMA	23
2.8. KARAKTERIZACIJA PONAŠANJA MEHANIČKIH I METALOGRAFSKIH SVOJSTAVA TAČKASTIH ZAVARENIH SPOJEVA DP ČELIKA I LEGURA ALUMINIJUMA	25
2.8.1. Statički test na zatezanje	26
2.8.2. Modovi otkaza	31
2.8.3. Dinamički test na zatezanje	35
2.8.4. Metalografska ispitivanja	38
2.8.5. Ispitivanje tvrdoće zavara	41
2.8.6. Poređenje mehaničkih svojstava tačkastih zavarenih spojeva	43

2.9. KARAKTERIZACIJA PONAŠANJA MEHANIČKIH I METALOGRAFSKIH SVOJSTAVA SPOJA DP ČELIKA I LEGURA ALUMINIJUMA DOBIJENIH ZAKIVANJEM BEZ ZAKOVICA (MEHANIČKO SPAJANJE)	47
2.9.1. Makrostruktura spoja	48
2.9.2. Statički test na zatezanje	49
2.9.3. Modovi otkaza	50
2.9.4. Dinamički test na zatezanje	54
2.10. POREĐENJE TEHNOLOGIJA SPAJANJA RAZNORODNIH MATERIJALA	55
3. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE	60
3.1. POSTAVKA EKSPERIMENTA	60
3.1.1. Elektrootporno tačkasto zavarivanje	62
3.1.2. Elektrootporno tačkasto zavarivanje elementima	64
3.1.3. Zakivanje bez zakovica	65
3.2. METODE ISPITIVANJA	66
3.2.1. Vizuelna metoda ispitivanja	66
3.2.2. Ispitivanje na zatezanje - statički test	66
3.2.3. Metalografska ispitivanja	73
3.2.4. Ispitivanje tvrdoće	75
3.2.5. Ispitivanje na zatezanje – dinamički test	77
3.3. OPTIMIZACIJA PARAMATARA ELEKTROOTPORNOG TAČKASTOG ZAVARIVANJA LIMOVA OD ČELIKA DP500	79
3.3.1. Tagučijeva metoda	81
3.3.2. Višekriterijumska Tagučijeva metoda	85
3.3.3. Tagučijeva metoda sa sivom relacionom analizom (TGRA)	87
3.3.4. Analiza varijanse (ANOVA)	88
4. REZULTATI I DISKUSIJA	93
4.1. ELEKTROOTPORNO TAČKASTO ZAVARIVANJE ČELIKA DP500	93
4.1.1. Vizuelno ispitivanje	93
4.1.2. Ispitivanje na zatezanje – statički test	94
4.1.3. Metalografska ispitivanja	98
4.1.4. Ispitivanje mikrotvrdoće	102
4.1.5. Optimizacija parametara elektrootpornog tačkastog zavarivanja limova od čelika DP500	103
4.2. ELEKTROOTPORNO TAČKASTO ZAVARIVANJE ČELIKA DP500 I LEGURE ALUMINIJUMA AW 5754	113
4.2.1. Vizuelno ispitivanje	113

4.2.2. Ispitivanje na zatezanje – statički test.....	114
4.2.3. Metalografsko ispitivanje	117
4.3. ELEKTROOTPORNO TAČKASTO ZAVARIVANJE ELEMENTIMA ČELIKA DP500 I LEGURE ALUMINIJUMA AW 5754.....	119
4.3.1. Vizuelno ispitivanje.....	119
4.3.2. Ispitivanje na zatezanje – statički test.....	119
4.3.3. Metalografsko ispitivanje	123
4.3.4. Ispitivanje tvrdoće	129
4.3.5. Ispitivanje na zatezanje – dinamički test	130
4.4. MEHANIČKO SPAJANJE ZAKIVANJEM BEZ ZAKOVICA ČELIKA DP500 I LEGURE ALUMINIJUMA AW 5754	132
4.4.1. Vizuelno ispitivanje.....	132
4.4.2. Ispitivanje na zatezanje – statički test.....	133
4.4.3. Metalografska ispitivanja	134
4.4.4. Ispitivanja na zatezanje – dinamički test	136
4.5. UPOREDNA ANALIZA	137
4.5.1. Poređenje mehaničkih karakteristika.....	137
4.5.2. Vrednovanja i rangiranje tehnologija spajanja	139
4.5.3. Prednosti i nedostaci tehnologija spajanja.....	141
5. ZAKLJUČAK	143
LITERATURA	151
PRILOG 1	170
PRILOG 2.....	177
PRILOG 3	181
PRILOG 4.....	185
PRILOG 5	189
BIOGRAFIJA AUTORA.....	192

SPISAK SLIKA

Slika 1.1. Primjer multimaterijal dizajna	2
Slika 1.2. Primjer multimaterial strukture [12]	2
Slika 2.1. Prikaz mehaničkih svojstava DP čelika – prilagođeno prema [20]	6
Slika 2.2. Prikaz mehaničkih svojstava legura aluminijuma serija 5, 6 i 7	8
Slika 2.3. Podjela tehnologija spajanja raznorodnih materijala male debljine (limova)	8
Slika 2.4. Osnovna šema elektrootpornog tačkastog zavarivanja [37]	9
Slika 2.5. Šematski prikaz mikrostrukture RSW zavara	10
Slika 2.6. Prikaz dva različita oblika jezgra zavara spoja dobijenog elektrootpornim tačkastim zavarivanjem [39]	11
Slika 2.7. Primjer primjene elektrootpornog tačkastog zavarivanja raznorodnih materijala kod haube automobila [45]	12
Slika 2.8. Šema elektrootpornog tačkastog zavarivanja elementima	13
Slika 2.9. Primjer primjene elektrootpornog tačkastog zavarivanja elementima u industriji (prilagođeno prema [49])	14
Slika 2.10 a) Šematski prikaz FSW-a [55]; b) Prikaz spoja legure aluminijuma AA6181-T4 i čelika DP600 dobijenog pomoću FSW-a [56] c) Prikaz procesa FEW [57]	15
Slika 2.11. Prikaz spajanja aluminijuma i čelika kod nosača motora automobila Honda Accord [61]	16
Slika 2.12 a) Postupak uvarivanja laserom (gustina snage $q > 106 \text{ W/cm}^2$); b) lasersko zavarivanje topljenjem (gustina snage $q < 106 \text{ W/cm}^2$) [63]	17
Slika 2.13. Šematski prikaz ultrazvučnog tačkastog zavarivanja [63]	18
Slika 2.14. Šema SPR (samoprobijajuće zakivanje) postupka spajanja materijala [72]	18
Slika 2.15. Postupak spajanja materijala sa samoprodujućim zavrtnjem (FDS) – 1. zagrijavanje; 2. penetracija; 3. istiskivanje; 4. formiranje navoja; 5. zavrtnanje (potpuno formirana zavrtnajska veza); 6. zatezanje [74]	19
Slika 2.16. Primjer primjene spajanja kućišta amortizera od aluminijuma i čeličnog tijela pomoću samoprobijajućih zakovica i strukturnih lijepkova [45]	19
Slika 2.17. Šema postupak mehaničkog spajanja zakivanje bez zakovica [76]	20
Slika 2.18: Primjer primjene zakivanja bez zakovica u automobilskoj industriji: a) konstrukcija nosača krovnog prozora, b) vrata automobila Honda, c) fragment poklopca motora i prtljažnika kod Mercedesa C klase [77]	21
Slika 2.19. Šematski prikaz postupka lijepljenja [77]	21
Slika 2.20. Primjer hibridne tehnologije: lijepljenje/zakivanje bez zakovica [84]	22
Slika 2.21. Ispitivanje mehaničkih svojstava RSW spoja: a) TS test; b) CT test; c) CP test	25
Slika 2.22. Opšti dijagram sila – izduženje za tačkasti zavareni spoj u slučaju testa na zatezanje (TS test)	26
Slika 2.23. Površinske promjene i promjene dimenzija prečnika zavara spoja zavisno od jačine struje pri spajanju legure aluminijuma A5052 i čelika DP600 [36]	31
Slika 2.24. Prikaz modova otkaza kod RSW spoja: a) međusobna fraktura (IF mod); b) izvlačenje (PF mod); c) djelimična međusobna fraktura (PIF mod); d) djelimično izvlačenje (PT – PP mod) (BM – osnovni materijal, HAZ zona uticaja toplote – ZUT, FZ – zona fuzije) [111]	32

Slika 2.25. Tipični izgled otkaza RSW spoja na primjeru čelika DP780: a) za statičko opterećenje na zatezanje; b) umjereno udarno opterećenje; c) udarno opterećenje; d) poprečni presjek RSW spoja [118]	33
Slika 2.26. Prikaz tri tipična moda otkaza kod RSW spoja aluminijuma i čelika opterećenih na zatezanje (poprečni presjek): a) PF mod; b) PIF mod; c) IF mod [119]	34
Slika 2.27. Prikaz loma REW spoja legure aluminijuma AlMg0.4Si1.2 T66 (1) i čelika 22MnB5 PH (2) opterećenog na zatezanje, za element je korišćen čelik 22MnB4 (4) [120]	34
Slika 2.28: Prikaz Velerove krive, tj. F-N krive	36
Slika 2.29. Prikaz poprečnog presjeka RSW spoja A5052 / DP600 zavaren sa strujom zavarivanja od: a) 10,5 kA; b) 12,5 kA [36]	39
Slika 2.30. Način formiranja zavara kod REW procesa pri spajanju čelika, spoja čelika 22MnMoB i legure aluminijuma 6061 u zavisnosti od vremena zavarivanja [27]	40
Slika 2.31. Dijagram sila – izduženje za spojeve legure aluminijuma AW-6016 (1,5 mm) i čelika 22MnB5 (2 mm) za različite tehnologije spajanja [79].....	46
Slika 2.32. Dijagram poređenja maksimalne sile dobijene pri ispitivanju na zatezanje za tri tehnologije spajanja čelika DP980 i legure aluminijuma A6022 (prilagođeno prema [161]).....	46
Slika 2.33. Primjer ispitivanja mehaničkih svojstava MC spoja:(a) test na zatezanje (TS), (b) unakrsni test na zatezanje (CT) (c) L test na zatezanje (CP) [162].....	47
Slika 2.34. Prikaz poprečnog presjeka spoja dobijenog zakivanjem bez zakovica sa naznačenim karakterističnim dimenzijama [165]	48
Slika 2.35. Prikaz poprečnog presjeka spoja dobijenog zakivanjem bez zakovica: (a) AW6082/DP600; (b) DP600/ AW6082 [167]	49
Slika 2.36. Prikaz karakterističnih načina loma za spoj dobijen zakivanjem bez zakovica opterećen na zatezanje: (a) lom vrata (NF mod); (b) međusobno izvlačenje (BF mod) [164].....	51
Slika 2.37. Karakteristične površine loma A_N i A_B kod spoja dobijenog zakivanjem bez zakovica [176].....	52
Slika 2.38. Prikaz loma vrata MC spoja čelika DP600 i legure aluminijuma Al6082: (a) debljina dna spoja je 0,61 mm; (b) debljina dna spoja je 0,43 mm [166]	53
Slika 2.39. Distribucija napona u poprečnom presjeku MC spoja legure aluminijuma AA6061-T6 (gornji lim) i čelika DP590 (donji lim) [160].....	55
Slika 3.1. Algoritam eksperimentalne metodologije poređenja mehaničkih i metalografskih svojstava spojeva legure aluminijuma AW 5754 i čelika DP500.....	60
Slika 3.2. Mašina za elektrootporno tačkasto zavarivanje proizvođača Kočevar i sinovi.....	62
Slika 3.3. Interfejs softvera BOS 6000 kojim se vrši upravljanje i kontrola procesa elektrootpornog tačkastog zavarivanja na mašini proizvođača Kočevar i sinovi .63	
Slika 3.4. Elektrode korišćene za elektrootporno tačkasto zavarivanje: (a) izgled elektroda; (b) dimenzije elektroda	63
Slika 3.5. a) Dimenzije elementa koji se presuje u aluminijum; b)Izgled prese za umetanje elemenata od čelika u aluminijuma [192]	64
Slika 3.6. Izgled spoja elementa od čelika i lima od legure aluminijuma [192].....	65
Slika 3.7. Izgled i dimenzija alata za spajanje čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 zakivanjem bez zakovica	65

Slika 3.8. Dimenzije epruveta za ispitivanje na zatezanje [194]	66
Slika 3.9. Izgled epruveta za zatezanje: a) RSW spoj dva lima od čelika DP500; b) RSW spoj čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754	68
Slika 3.10. Izgled i dimenzije epruvete za ispitivanje na zatezanje spoja DP500 čelika i legure aluminijuma AW 5754, dobijenog elektrootpornim tačkastim zavarivanjem elementima [194, 195]	69
Slika 3.11. Izgled i dimenzije epruveta za ispitivanje na zatezanje spoja DP500 čelika i legure aluminijuma AW 5754, dobijenog zakivanjem bez zakovica (mehanički spoj).....	71
Slika 3.12. Šematski prikaz dijagrama sila – izduženje.....	72
Slika 3.13. Izgled mikroskopa: a) Keyence VHX-6000; b) Leica EZ4 HD	73
Slika 3.14. Postupak pripreme uzoraka za makroskopsku i mikroskopsku analizu	74
Slika 3.15. Izgled mašine za ispitivanje tvrdoće po Vickersu	75
Slika 3.16. Šematski prikaz karakterističnih zona i linije po kojoj je rađeno mjerenje mikrotvrdoće za RSW spoj dva lima od čelika DP500.....	76
Slika 3.17. Šematski prikaz karakterističnih zona i linije po kojoj je rađeno mjerenje mikrotvrdoće za REW spoj čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 [194] 76	
Slika 3.18. Servo hidraulična testna mašina (pulzator) Shimadzu Servopulser E100kN [55] 77	
Slika 3.19. Šematski prikaz parametara elektrootpornog tačkastog zavarivanja koje je uslijedilo nakon umetanja elementa od čelika Q235 u leguru aluminijuma AW 5754.....	78
Slika 3.20. Prikaz procesa elektrootpornog tačkastog zavarivanja sa ulaznim parametrima, te izlaznim performansama zavarenog spoja na osnovu kojih će biti urađena optimizacija.....	79
Slika 3.21. Prikaz procesa optimizacije parametara elektrootpornog tačkastog zavarivanja ..	80
Slika 4.1. Prikaz uticaja parametara zavarivanja na spoljašnji izgled i oblik zavara.....	93
Slika 4.2. Dijagram sila - izduženje za tačkaste spojeve zavarena strujom zavarivanja 6, 8 i 10 kA [202]	95
Slika 4.3. Mod otkaza pri ispitivanju na zatezanje kod tačkastih zavarenih spojeva čelika DP500: a) IF mod; b) PF mod; c) PF mod [200].....	96
Slika 4.4. Prikaz načina loma tačkastog zavarenog spoja dva čelika od lima DP500 nakon testa na zatezanje	96
Slika 4.5. Prikaz uticaja struje zavarivanja na maksimalnu silu i količinu apsorbovane energije kod tačkastog zavarenog spoja čelika DP500	97
Slika 4.6. Prikaz uticaja sile u elektrodama na maksimalnu silu i količinu apsorbovane energije kod tačkastog zavarenog spoja čelika DP500	97
Slika 4.7. Prikaz uticaja vremena zavarivanja na maksimalnu silu i količinu apsorbovane energije kod tačkastog zavarenog spoja čelika DP500	98
Slika 4.8. Prikaz makrostrukture tačkastog zavarenog spoja čelika DP500 (FZ – zona fuzije; ZUT – zona uticaja toplote; OM – osnovni materijal)	99
Slika 4.9. Karakteristična područja makrostrukture tačkastog zavarenog spoja čelika DP500 (1 – područje ravnoosne strukture; 2 – područje orijentisano dentritima; 3 – područje normalizacije; 4 – područje rekristalizacije; 5 – područje osnovnog materijala).....	99

Slika 4.10. Prikaz mikrostruktura tačkastih zavarenih spojeva limova od čelika DP500 za uzorke označene sa DP1, DP2 i DP3 (ZUT – zona uticaja toplote, FZ – zona fuzije)	100
Slika 4.11. Prikaz karakterističnih potpodručja zone uticaja toplote kod tačkastog zavarenog spoja limova od čelika DP500 (OM – osnovni materijal, PZUT – prelazna zona uticaja toplote, SZUT – zonu uticaja toplote sitnih zrna, KZUT – zonu uticaja toplote krupnih zrna).....	101
Slika 4.12. Odzivni grafik S/N odnosa za maksimalnu silu kidanja F	104
Slika 4.13. Odzivni grafik S/N odnosa za izduženja pri maksimalnoj sili kidanja F	106
Slika 4.14. Odzivni grafik višestrukog S/N odnosa.....	109
Slika 4.15. Odzivni grafik sivog relacionog stepena (GRG)	111
Slika 4.16. Prikaz uticaja parametara zavarivanja na spoljašnji izgled i oblik tačke zavarenog spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW5754 na strani aluminijuma.....	113
Slika 4.17: Izgled elektrode nakon zavarivanja 21-og uzorka lima od čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754.....	114
Slika 4.18. Izgled uzoraka dobijenih elektrootpornim tačkastim zavarivanjem čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 nakon testa na zatezanje	116
Slika 4.19. Fraktografija tačkastog zavarenog spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 (Z – zavar, F – mjesto loma)	117
Slika 4.20. Makrostruktura i mikrostruktura tačkastog zavarenog spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 (OM – osnovni materijal, ZUT – zona uticaja toplote, FZ – zona fuzije, IMC – intermetalno jedinjenje)	118
Slika 4.21. Prikaz uticaja parametara zavarivanja na maksimalnu silu i količinu apsorbirane energije kod zavarenog spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 dobijenog elektrootpornim tačkastim zavarivanjem elementima	121
Slika 4.22. Izgled uzoraka dobijenih elektrootpornim tačkastim zavarivanjem elementima čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 nakon test na zatezanje – prikaz loma.....	122
Slika 4.23. Prikaz makrostrukture zavarenog spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 dobijenog elektrootpornim tačkastim zavarivanjem elementima (FZ – zona fuzije; ZUT – zona uticaja toplote; OM – osnovni materijal).....	124
Slika 4.24. Mikrostruktura uzorka označenog sa REW1 (OM – Osnovni materijal, FZ – zona fuzije, DP – dvofazni čelik DP500, Al – legura aluminijuma AW 5754, IMC – intermetalno jedinjenje)	125
Slika 4.25. Mikrostruktura uzorka označenog sa REW2 (OM – Osnovni materijal, FZ – zona fuzije, DP – dvofazni čelik DP500, Al – legura aluminijuma AW 5754, IMC- intermetalno jedinjenje)	126
Slika 4.26: Mikrostruktura uzorka označenog sa REW3 (DP – dvofazni čelik DP500, Al – legura aluminijuma AW 5754, IMC – intermetalno jedinjenje).....	127
Slika 4.27. Profil mikrotvrdoće za uzorak označen sa REW2 [194, 195]	129
Slika 4.28. Velerova (F/N) kriva za REW spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 [194].....	131
Slika 4.29. Prikaz loma REW uzoraka nakon dinamičkog ispitivanja [194].....	131
Slika 4.30. Fraktografija REW spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754, dobijena nakon dinamičkog testa za uzorak označen sa 2-7	132

Slika 4.31. Dijagram sila – izduženje dobijen ispitivanjem na zatezanja mehaničkog spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 dobijenog zakivanjem bez zakovica	133
Slika 4.32. Prikaz loma uzoraka dobijenih mehaničkim spajanjem nakon testa na zatezanje	134
Slika 4.33. Makrostruktura spoja dobijena zakivanjem bez zakovica, odnosno mehaničkim spajanjem čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754	135
Slika 4.34. Velerova (F/N) kriva MC spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754	136
Slika 4.35. Prikaz loma uzoraka dobijenih zakivanjem bez zakovica nakon dinamičkog ispitivanja na zatezanje.....	137
Slika 4.36. Poređenje maksimalne sile kidanja i vrijednosti apsorbovane energije za spojeve čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 dobijene elektrootpornim tačkastim zavarivanjem elementima (REW), elektrootpornim tačkastim zavarivanjem (RSW) i zakivanjem bez zakovica (MC).....	138
Slika 4.37. Poređenje dinamičke izdržljivosti spojeva čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 dobijene elektrootpornim tačkastim zavarivanjem elementima (REW) i zakivanjem bez zakovica (MC).....	138
Slika 4.38. Poređenje maksimalne sile kidanja i apsorbovane energije RSW spoja dva lima od čelika DP500 i spojeva čelika DP500 i legure aluminijuma dobijenih RSW, REW i MC tehnologijom spajanja	142

SPISAK TABELA

Tabela 2.1. Primjena DP čelika u automobilskoj industriji [21].....	6
Tabela 2.2. Pregled literature u pogledu optimizacije parametara elektrootpornog tačkastog zavarivanja čelika baziran na dostupnim studijama, objavljenim nakon 2015. godine.....	27
Tabela 2.3. Pregled mehaničkih svojstava RSW i REW spoja čelika i legura aluminijuma...43	
Tabela 2.4. Poređenje tehnologija spajanja raznorodnih materijala [186].....	56
Tabela 2.5. Poređenje tehnologija spajanja prema M. M. Eshtayeh i drugi [187].....	57
Tabela 2.6. Rangiranja tehnologija na osnovu kriterijuma predstavljenih u tabeli 2.5.	58
Tabela 2.7. Primjer zahtjeva i ograničenja vezanih za izbor tehnologije spajanja pri razvoju automobila.....	59
Tabela 3.1. Hemijski sastav i osnovna mehanička svojstva materijala korišćenih za istraživanje u ovoj doktorskoj disertaciji	61
Tabela 3.2. Pregled parametara zavarivanja sa oznakama epruveta za ispitivanje na zatezanje zavarenog tačkastog spoja dva lima od čelika DP500	67
Tabela 3.3. Pregled parametara zavarivanja sa oznakama epruveta za ispitivanje na zatezanja tačkastog zavarenog spoja limova od čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754.....	68
Tabela 3.4. Pregled parametara zavarivanja sa oznakama epruveta za ispitivanje na zatezanja spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754, dobijenog elektrootpornim tačkastim zavarivanjem.....	70
Tabela 3.5. Šema ispitivanja spojeva čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 na zamaranje	78
Tabela 3.6. Izbor nivoa parametara zavarivanja	81
Tabela 3.7. Prikaz Tagučijevog ortogonalnog plana L ₉	82
Tabela 3.8. Prikaz ANOVA tabele	91
Tabela 4.1. Rezultati ispitivanja na zatezanja zavarenog spoja čelika DP500 dobijenog elektrootpornim tačkastim zavarivanjem.....	94
Tabela 4.2. Prikaz dimenzija prečnika jezgra zavara tačkastog spoja čelika DP500	98
Tabela 4.3. Prikaz mikrotvrdoće karakterističnih zona tačkastog zavarenog spoja limova od čelika DP500.....	102
Tabela 4.4. Rezultati ispitivanja na zatezanja zavarenog spoja čelika DP500 dobijenog elektrootpornim tačkastim zavarivanjem za parametre zavarivanja date u tabeli 3.7.	103
Tabela 4.5. Prikaz vrijednosti S/N odnosa za maksimalnu silu kidanja F i izduženje pri maksimalnoj sili kidanja I.....	104
Tabela 4.6. Odzivna tabela S/N odnosa za maksimalnu silu kidanja F	104
Tabela 4.7. ANOVA tabela za maksimalnu silu kidanja F.....	105
Tabela 4.8. Odzivna tabela S/N odnosa za izduženje pri maksimalnoj sili kidanja I	106
Tabela 4.9. ANOVA tabela za izduženja pri maksimalnoj sili kidanja F.....	107
Tabela 4.10. Prikaz normalizovanih vrijednosti gubitka kvaliteta (NQL), ukupne normalizovane vrijednosti gubitka kvaliteta (TNQL) i višestrukog S/N odnosa MSNR.....	108
Tabela 4.11. Odzivna tabela višestrukog S/N odnosa (MSNR).....	108

Tabela 4.12. ANOVA tabela za višestruki S/N odnos (MSNR).....	109
Tabela 4.13. Prikaz normalizovanih vrijednosti S/N odnosa, te vrijednosti sekvence odstupanja (SEQU), sivog relacionog koeficijenta (GRC) i sivog relacionog stepena (GRG)	110
Tabela 4.14. Odzivna tabela sivog relacionog stepena (GRG).....	111
Tabela 4.15. ANOVA tabela za sivi relacioni stepen	112
Tabela 4.16. Rezultati ispitivanja na zatezanja zavarenog spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 dobijenog elektrootpornim tačkastim zavarivanjem...	115
Tabela 4.17. Rezultati ispitivanja na zatezanja spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 dobijenog elektrootpornim tačkastim zavarivanjem elementima	120
Tabela 4.18. Prikaz vrijednosti mikrotvrdoće zone zavara zavarenog spoja limova od čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754	129
Tabela 4.19. Prikaz rezultata ispitivanja na zamaranja REW spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754	130
Tabela 4.20. Rezultati ispitivanja na zatezanja mehaničkog spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 dobijenog zakivanjem bez zakovica	133
Tabela 4.21. Prikaz rezultata ispitivanja na zamaranje REW spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754	136
Tabela 4.22. Prosto međusobno poređenje tehnologija spajanja čelika DP500 i legure aluminijuma AW5754	139
Tabela 4.23. Rangiranja i vrednovanje tehnologija spajanja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754	140
Tabela 4.24. Prednosti i nedostaci tehnologija spajanja čelika i aluminijuma	141

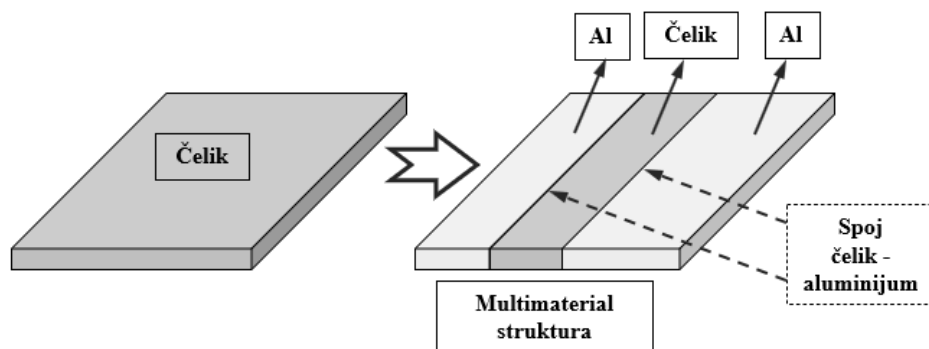
1. UVOD

Potreba za održivim razvojem proizvoda i opstankom na tržištu, a u isto vrijeme s ciljem smanjenja potrošnje energije i resursa, odnosno očuvanja životne sredine, dovela je do značajnije primjene dizajna za lake konstrukcije (*eng. Lightweight design*). U literaturnim izvorima objavljenim u drugoj polovini dvadesetog vijeka [1, 2] mogu se pronaći termini vezani za dizajn za lake konstrukcije, što implicira da se o smanjenju mase konstrukcije razmišljalo i ranije. Međutim, tadašnja tehnologija i materijali istraživačima nisu omogućavala da naprave značajnije rezultate u ovoj oblasti. Pojavom softvera za strukturnu analizu i razvojem novih lakih materijala stvorili su se uslovi za značajniji razvoj i istraživanje na polju lakih konstrukcija. Iako se u literaturi mogu pronaći različite definicije dizajna za lake konstrukcije [3, 4, 5], on u suštini označava primjenu adekvatnih metoda, tehnologija i materijala pri razvoju proizvoda s ciljem smanjenja mase konstrukcije, pri čemu primarna funkcija proizvoda ostaje nepromijenjena.

Pred proizvođače automobila posljednjih godina postavljaju se zahtjevi koji se odnose na očuvanje životne sredine, tj. da se na minimum svede štetnost koju upotreba automobila ostavlja na okolinu, počevši od proizvodnje pa sve do njihove razgradnje. Evropska regulativa 2019/631 Evropskog parlamenta i vijeća od 17. aprila 2019. godine [6] predviđela je 95 g CO₂/km emisije, kao i težnju za smanjenjem od 30% do 2030. godine za sve privatne automobile, te tako primorala proizvođače da svoja istraživanja usmjere ka pronalaženju rješenja za smanjenje emisije CO₂ [7]. Jedan od načina za smanjenje emisije CO₂ je smanjiti upotrebu količine goriva. Dokazan put kojim se dolazi do smanjenja potrošnje goriva je smanjenje mase vozila (smanjenje mase od 10% dovodi do uštede goriva od 5,5% [8], a time se smanjuje i emisija CO₂ [9]), a to se opet može postići zamjenom čelične strukture strukturom od lakih materijala, kao što su legure aluminijuma. Za očekivati je da potpuna zamjena čelika aluminijumom nije moguća, pa proizvođači automobila kombinuju čelik, aluminijum i druge materijale u jednu strukturu, što je u literaturi prepoznato kao multimaterijal dizajn [10, 11].

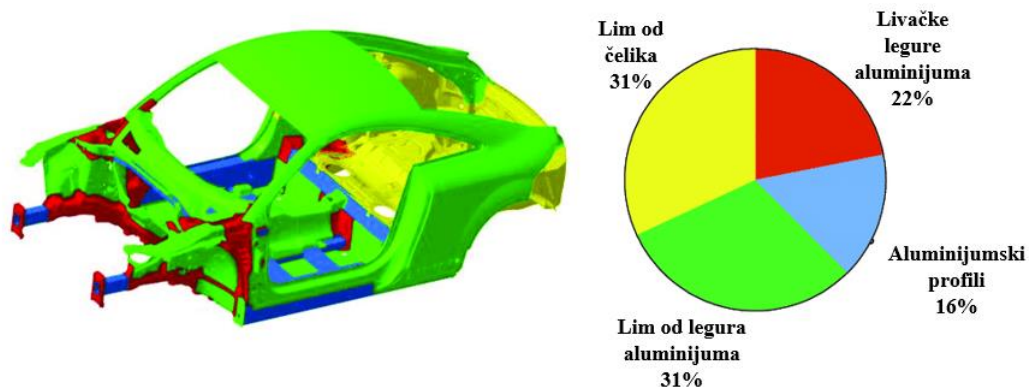
Multimaterijal dizajn je razvijen kao savremeni koncept dizajna za lake konstrukcije koji ima za cilj integrisanje različitih vrsta materijala u jednu strukturu [11]. Na slici 1.1. ilustrovano je prikazana upotreba različitih materijala kod istog dijela kako bi mu se smanjila

masa, a njegove performanse ostale iste. Na primjer, masa karoserije automobila može biti smanjena upotrebom različitih vrsta materijala. Različiti tipovi lakih karoserija razvijeni su primjenom čelika, aluminijuma i kompozitnih materijala. Kada je riječ o primjeni čelika, onda treba napomenuti da se tu prvenstveno misli na čelik 2. i 3. generacije kao što su ugljeni čelici za obradu u toplom stanju, austenitni ugljenik-mangan čelik, AHSS (*eng. Advanced High-Strength Steel*) čelici, itd. Zamjena konvencionalnih ugljeničkih čelika AHSS čelicima rezultovala je smanjenjem mase automobila za 15–20% [12].



Slika 1.1. Primjer multimaterijal dizajna

Primjer multimaterijal strukture gdje se jasno može vidjeti upotreba aluminijuma i čelika u automobilske industriji dat je na slici 1.2. Izuzetno je važno korišćenje aluminijumskih legura za proizvodnju dijelova karoserije automobila za postizanje smanjenja mase vozila. Prednje šine i stubovi, koji su konstruisani za apsorpciju udarne energije tokom sudara, trebaju biti proizvedeni od $5 \times \times \times$ ili $6 \times \times \times$ serije Al legura, prvenstveno zbog dobrog odnosa čvrstoće i duktilnosti ovih legura, što omogućava da tokom sudara ne dođe do loma nego gužvanja navedenih dijelova [13, 14].



Slika 1.2. Primjer multimaterijal strukture [12]

Laki materijali koji se pored aluminijuma i AHSS čelika primjenjuju u automobilske industriji su magnezijum, plastika i polimerni kompoziti [11, 15, 16]. Inovativne kombinacije ovih materijala dostupne su u oblicima proizvoda kao što su limovi, ploče i odlivci. Preduslov za postizanje multimaterijal strukture je primjena efikasnih i jeftinih tehnologija spajanja raznorodnih materijala. Uzimajući u obzir prednosti oba materijala, struktura od čelika i aluminijuma ima dobru perspektivu za primjenu u automobilske i avionske industriji. Međutim, ova dva materijala imaju različita fizička, hemijska i mehanička svojstva, pa je dobijanje kvalitetnog zavarenog spoja između ovih materijala usko grlo u popularizaciji strukture od čelika i aluminijuma [17].

1.1. PREDMET I CILJ ISTRAŽIVANJA

Prilikom izbora tehnologije spajanja ključnu ulogu ima mehaničko ponašanje dobijenog spoja, zato je od velikog značaja i doprinosa nauci, a posebno razvoju lakih konstrukcija, svako istraživanje koje ima za cilj analizu i poređenje mehaničkih svojstva spojeva raznorodnih materijala. U ovoj doktorske disertaciji je analizirana mogućnost spajanja dvofaznog čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 kao adekvatnih predstavnika multimaterijal strukture koja se prvenstveno primjenjuje u automobilske industriji. Predmet i ciljevi istraživanja mogu se podijeliti u pet osnovnih grupa:

- Istraživanje trenutnog stanja literature u domenu spajanja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754;
- Istraživanje uticaja parametara zavarivanja na mehanička svojstva, mikrostrukturu i makrostrukturu spoja dva lima od čelika DP500 dobijenog pomoću klasičnog elektrootpornog tačkastog zavarivanja (*eng. RSW – Resistance spot welding*). Pod mehaničkim svojstvima podrazumijeva se ispitivanje spoja na zatezanje (statički test) i tvrdoću. U industrijama kao što su automobilske i vazduhoplovne, pored mehaničkih svojstava, mod otkaza, odnosno oblik ili način loma tačkastog spoja je od ključne važnosti, pa je shodno tome cilj ovog dijela istraživanja analiza uticaja parametara zavarivanja i na mod otkaza spoja;
- Istraživanje specifičnosti spajanja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 pomoću klasičnog elektrootpornog tačkastog zavarivanja (RSW), pošto je poznato da ova dva materijala imaju značajno različita mehanička, fizička i hemijska svojstva;
- Elektrootporno tačkasto zavarivanje (RSW), zbog jednostavnosti rukovanja i pogodnosti automatizacije, najviše se primjenjuje u automobilske industriji, ali se zbog male

moгуćnosti primjene pri spajanju raznorodnih materijala sve više se teži ka pronalaženju alternativnih načina spajanja. Jedna takva tehnologija je elektrootporno tačkasto zavarivanje elementima (*eng. REW – Resistance element welding*). Shodno navedenom, u ovoj doktorskoj disertaciji predstavljeno je istraživanje spoja lima od DP500 čelika i legure aluminijuma AW 5754, dobijenog pomoću elektrootpornog tačkastog zavarivanja elementima (REW). Za spoj dobijen na ovaj način urađena je analiza mehaničkih svojstava, te mikrostrukture i makrostrukture. Kako ovaj postupak spajanja u suštini predstavlja spajanje DP500 čelika i elementa koji je takođe od čelika klasičnim elektrootpornim zavarivanjem, onda se kao cilj istraživanja nameće analiza uticaja parametara zavarivanja prvenstveno na tip loma, tj. mod otkaza, a onda i na mehanička svojstva, mikrostrukturu i makrostrukturu. Kada je riječ o mehaničkim svojstvima, pored statičkog testa i ispitivanja tvrdoće, izvedeno je i dinamičko ispitivanje spoja, odnosno analiza zamora spoja;

- Istraživanje mehaničkih (statički i dinamički test) i metalografskih (makrostruktura) svojstava spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754, dobijenog pomoću zakivanja bez zakovica (*eng. MC – mechanical clinching*).

Shodno prethodnom, može se izvesti primarni cilj ove disertacije, a to je istraživanje mogućnosti spajanja lima od DP500 čelika i legure aluminijuma AW 5754 pomoću elektrootpornog tačkastog zavarivanja (RSW), elektrootpornog tačkastog zavarivanja sa elementima (REW) i zakivanjem bez zakovica. Međusobnim poređenjem dobijenih rezultata istraživanja, te na osnovu poznatih činjenica, tj. analize pregleda postojećih istraživanja, na kraju disertacije izvedeni su jasni zaključci o prednostima i nedostacima navedenih tehnologija spajanja.

1.2. METODOLOGIJA

Metoda analize i metoda deskripcije kao naučne metode su korišćene za dio disertacije koji se odnosi na analizu i opis dosadašnjih istraživanja. Na osnovu predmeta i ciljeva istraživanja može se zaključiti da su se rezultati u ovoj doktorskoj disertaciji prikupljali metodom eksperimenta. Eksperimentalna istraživanja urađena su u laboratorijskim uslovima, shodno definisanim standardima. Metoda komparacije korišćena je kako bi se uporedili dobijeni rezultati, a metoda sinteze kako bi se izvršila analiza dobijenih rezultata. Metode indukcije i generalizacije korišćene su za izvođenje opštih zaključaka o prednostima i nedostacima postupka spajanja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754.

2. TEHNOLOGIJE SPAJANJA LIMOVA OD ČELIKA I LEGURA ALUMINIJUMA – STANJE ISTRAŽIVANJA

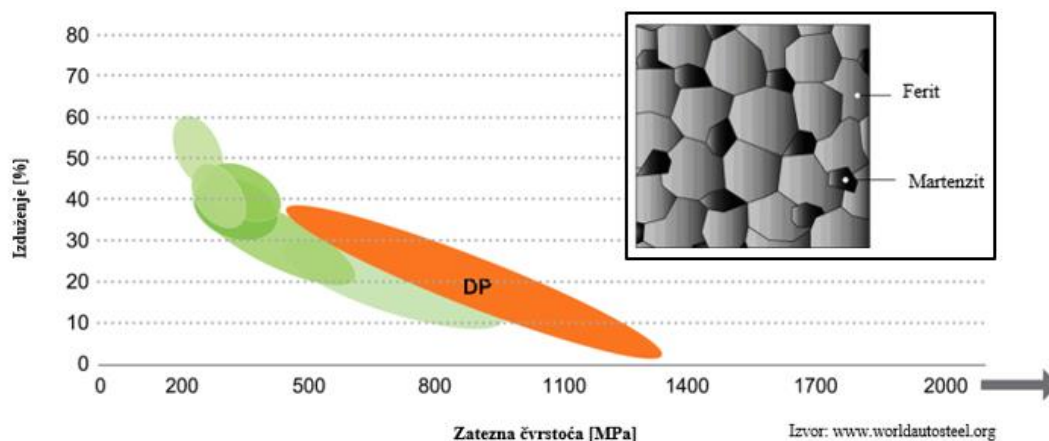
2.1. SVOJSTVA, ZAVARLJIVOST I PRIMJENA LIMOVA OD DVOFAZNIH ČELIKA I LEGURA ALUMINIJUMA

Ako se posmatra proizvodnja automobila može se zaključiti da na ukupnu masu vozila u najvećoj mjeri utiče masa karoserije. Prethodno je već rečeno da se za izradu lakih karoserija najčešće primjenjuju limovi od čelika visoke čvrstoće (AHSS) i legura aluminijuma.

Napredni čelici visoke čvrstoće (AHSS) razvijeni su i komercijalizovani u protekloj deceniji s ciljem da pomognu automobilskim kompanijama u ispunjavanju zahtjeva za lakim konstrukcijama bez ugrožavanja zahtjeva za bezbjednost putnika. Očekuje se da će se ove kategorije čelika dominantno primjenjivati kod automobila. Ovi čelici imaju izvrsnu kombinaciju visoke čvrstoće i duktilnosti, a i vrlo su pogodni za obradu [18]. AHSS čelici zahtijevaju posebna razmatranja i istraživanje njihovog ponašanja pri zavarivanju, a sve s ciljem uspješne primjene u automobilskoj konstrukciji. Dvofazni čelik (DP) je jedan od najčešćih AHSS čelika koji se koristi u proizvodnji karoserije automobila. Kombinacija odlične čvrstoće i formabilnosti DP čelika se dobija kroz dvokomponentnu mikrostrukturu (slika 2.1). DP čelici su uglavnom sastavljeni od disperzovanih ostataka martenzita u feritnoj matrici. Duktilnost je kontrolisana feritom, a čvrstoća martenzitom [19]. Mangan, hrom, molibden, vanadijum, nikl, silicijum, fosfor, dodati pojedinačno ili u kombinaciji, značajno utiču na nosivost DP čelika. Prethodno navedeni dodaci su pažljivo uravnoteženi, ne samo da bi se dobio DP čelik zadovoljavajućih mehaničkih svojstva, nego da bi se i zadržala generalno dobra sposobnost materijala za spajanje elektrootpornim tačkastim zavarivanjem.

Dvofazni čelici mogu da imaju zateznu čvrstoću od 450 do 1200 MPa (slika 2.1), a označavaju se na način da se prvo piše slova oznaka DP, koja ukazuje na to da se radi o dvofaznim čelicima, a onda se piše broj koji označava vrijednost zatezne čvrstoće (npr. DP500 – zatezna čvrstoća je 500 MPa).

DP čelici imaju veliki potencijal za poboljšanja performansi vozila bez dodavanja viška mase. Primjena DP čelika u automobilskoj industriji prikazana je u tabeli 2.1.



Slika 2.1. Prikaz mehaničkih svojstava DP čelika – prilagođeno prema [20]

Tabela 2.1. Primjena DP čelika u automobilskoj industriji [21]

DP čelik	Primjena u automobilima
DP500	Spoljašnji dio krova i vrata, spoljašnji i unutrašnji dio karoserije, podni paneli, dijelovi prtljažnika, zadnje šine, unutrašnji dio panela, itd.
DP600	Podni paneli, spoljašnji karoserije, ojačanja za podne panele, spoljašnji dio haube, blatobran, itd.
DP800	Unutrašnji dio karoserije, zadnje šine, ojačanja za zadnje amortizere, itd.
DP980	Komponente sigurnosnog kaveza (B-stub, tunel podnog panela, postolje motora, nosači sjedišta), itd.
DP1000	Krovne šine
DP1180	B-stub

Dvofazni čelik DP500 posjeduje dobru sposobnost oblikovanja i zavarivanja, te je kao takav vrlo pogodan i za izradu sigurnosnih dijelova kod karoserije automobila kao što su elementi za ojačanja. Ovaj čelik je podvrgnut posebnoj termičkoj obradi, čime se uglavnom dobija prethodno pomenuta dvofazna struktura. Beinit može biti prisutan kao komplementarna faza [22]. Zbog mogućnosti široke primjene čelik DP500 je predmet istraživanja ove doktorske disertacije.

Rast primjene aluminijuma i njegovih legura u automobilskoj industriji dugi niz godina je bio uglavnom posljedica primjene aluminijumskih odlivaka za dijelove motora i kovanih aluminijumski dijelova za mjenjače. Međutim, istraživanja pokazuju da se masa automobila može smanjiti i za 50% ukoliko se legure aluminijuma primjenjuju u karoseriji automobila [23]. S druge strane, jedan od najvećih nedostataka značajnije primjene aluminijuma je visoka cijena. Određivanje odgovarajućih aluminijumskih legura za karoseriju automobila bilo je predmet istraživanja mnogih radova [12, 13, 23, 24]. U posljednje vrijeme u proizvodnji automobila primjenjuje se nekoliko grupa legura aluminijuma, među kojima su

najzastupljenije legure AW 5754 i AA 6082. Legura AW 5754 srednje je čvrstoće kada se poredi sa ostalim legurama aluminijuma i najviše se koristi za karoserije sportskih automobila. Kada je riječ o leguri AA 6082, obično se koristi za strukturne elemente luksuznih automobila [24]. Jia Zhou i drugi, u studiji objavljenoj 2015. godine, prikazali su da se limovi izrađeni od serija 5xxx i 6xxx legura aluminijuma primjenjuju u procentu od oko 30% pri izradi karoserija putničkih automobila (npr. procenat primjene limova od legure aluminijuma serije 5xxx pri izradi karoserije Mercedes-Benza S klase je 18%) [25].

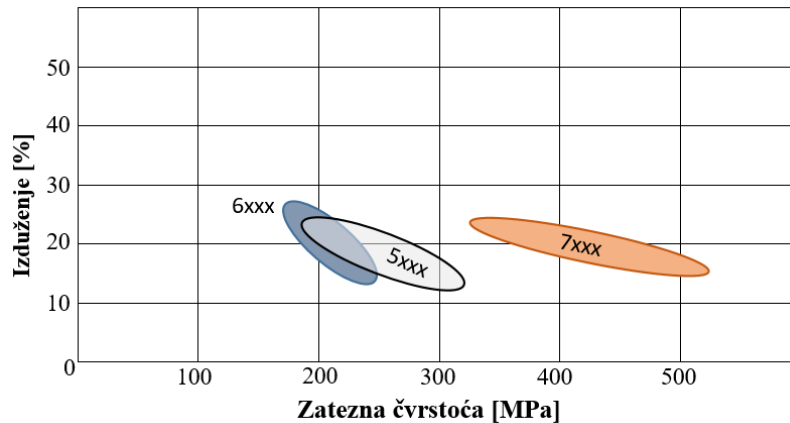
Legure aluminijuma predstavljaju mješavinu aluminijuma i drugih hemijskih elemenata koji imaju za cilj poboljšanje svojstava aluminijuma, prije svega njegove čvrstoće. Hemijski elementi koji se dodaju aluminijumu su najčešće bakar, mangan, silicijum, magnezijum, cink, itd. Pored čvrstoće, legirajući elementi utiču i na gustinu, obradivost, električnu provodljivost, otpornost na koroziju i zavarljivost. Legure aluminijuma se dijele u osam serija [26]:

- Legure serije 1xxx – sadrže 99% aluminijuma;
- Legure serije 2xxx – glavni legirajući element je bakar;
- Legure serije 3xxx – glavni legirajući element je mangan;
- Legure serije 4xxx – glavni legirajući element je silicijum;
- Legure serije 5xxx – glavni legirajući element je magnezijum;
- Legure serije 6xxx – glavni legirajući elementi su magnezijum i silicijum;
- Legure serije 7xxx – glavni legirajući element je cink;
- Legure serije 8xxx – ostali elementi.

Prethodno navedeni brožčani način označavanja legura aluminijuma definisan je standardom BAS EN 573-1:2009 [27], gdje prvi broj predstavlja seriju kojoj pripada legura aluminijuma, drugi broj predstavlja modifikaciju osnovne legure, dok zadnja dva broja predstavljaju čistoću aluminijuma. Ispred broja oznake piše se slovna oznaka AW gdje slovo A predstavlja aluminijum, a slovo W da je legura aluminijuma za gnječenje. Nakon broja oznake može se pisati slovo koje opisuje stanje legure, odnosno način termičke obrade (npr. H – ojačane hladnim deformisanjem, T – termički obrađeno).

Magnezijum je primarni legirajući element serije 5xxx i jedan je od najefikasnijih i najčešće korišćenih elemenata za legiranje aluminijuma. Legure iz ove serije posjeduju svojstva umjerene do visoke čvrstoće (slika 2.2), kao i dobru zavarljivost i otpornost na koroziju. Legure aluminijuma i magnezijuma, pored automobilske industrije, široko se koriste

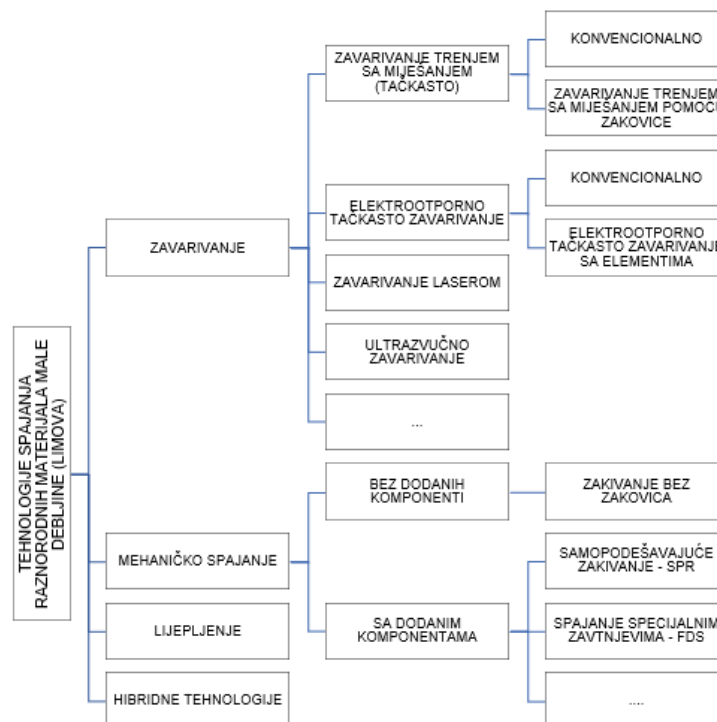
i u građevinarstvu, skladištima, za izradu posuda od pritiskom, te u brodogradnji. Legura aluminijuma AW 5754 predmet je istraživanje ove doktorske disertacije jer se, zajedno sa čelikom DP500, primjenjuje pri izradi karoserije automobila.



Slika 2.2. Prikaz mehaničkih svojstava legura aluminijuma serija 5, 6 i 7

2.2. PODJELA TEHNOLOGIJA SPAJANJA LIMOVA OD ČELIKA I LEGURA ALUMINIJUMA

Tehnologije spajanja limova u suštini se mogu podijeliti u tri osnovne grupe: zavarivanje, mehaničko spajanje, lijepljene i hibridne tehnologije [28, 29]. Na slici 2.3. prikazana je podjela savremenih tehnologija pogodnih za spajanje limova od različitih materijala, dobijena na osnovu analize trenutnog stanja tehnike.



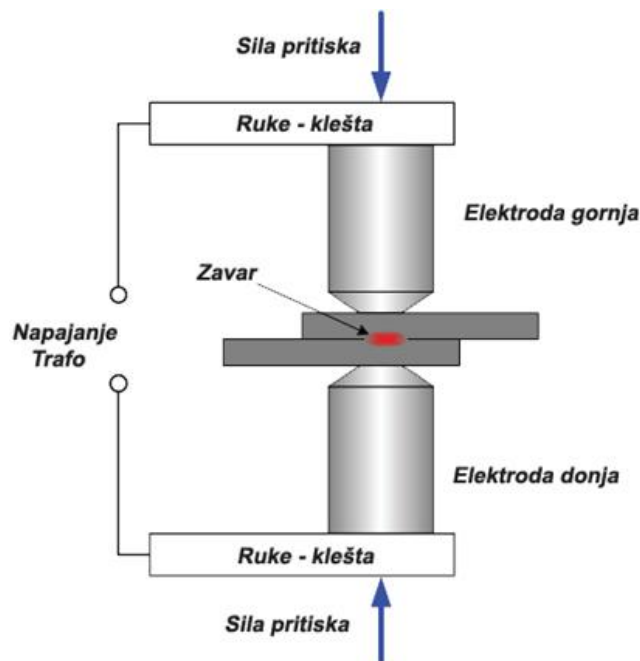
Slika 2.3. Podjela tehnologija spajanja raznorodnih materijala male debljine (limova)

2.3. TEHNOLOGIJE SPAJANJA ZAVARIVANJEM

2.3.1. Elektrootporno tačkasto zavarivanje

Elektrootporno tačkasto zavarivanje (RSW) je najčešće korišćeni postupak za povezivanje čelika, posebno u automobilskoj industriji, pa tako jedan automobil ima preko 5000 RSW tačaka [28], a svaka fabrika automobila ima više od 200 izvora struje za zavarivanje [30]. Shodno prethodno navedenom, izvedena su razna istraživanja u pogledu spajanja DP čelika RSW postupkom [19, 31, 32, 33], međutim, zbog potrebe za izradom multimaterijal strukture trenutni trend razvoja RSW tehnologija ide u pravcu analize spojeva različitih materijala, posebno aluminijuma i čelika [34–36].

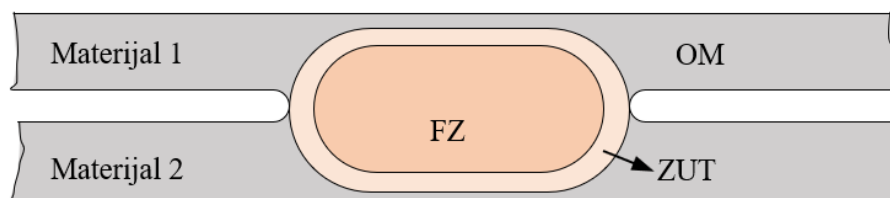
Elektrootporno tačkasto zavarivanje (RSW) u suštini predstavlja spajanje metala kombinovanim dejstvom toplote koja se generiše zbog električnog otpora u zatvorenom strujnom kolu između dva lima pritisnuta elektrodama oblika šipke, i sile pritiska [37]. Osnovna šema RSW postupka prikazan je na slici 2.4.



Slika 2.4. Osnovna šema elektrootpornog tačkastog zavarivanja [37]

Izvor struje kod elektrootpornog tačkastog zavarivanja može biti sa jednosmjernom (DC) i naizmjeničnom (AC) strujom. Wei Li i drugi [38] analizirali su uticaj tipa izvora struje na proces elektrootpornog zavarivanja i zaključili da je izvor sa jednosmjernom strujom efikasniji u odnosu na izvor sa naizmjeničnom strujom. Zagrijavanje pri elektrootpornom zavarivanju je kratkotrajno i neravnomjerno, pri čemu se najviše zagrijava središnji dio tačke (jezgro, grumen), gdje je jačina struje najveća. U početnoj fazi zagrijavanja u jezgru počinje

obrazovanje krupnih zrna pod dejstvom sile pritiska, tj. zavarivanje bez topljenja. Daljim zagrijavanjem jezgro se topi, a njegovim očvršćavanjem se dobija zavareni spoj [39]. Osnovna mikrostruktura zavara sastoji se od osnovnog materijala (OM), zone uticaja toplote (ZUT) i zone fuzije (FZ) što je prikazano na slici 2.5.



OM – osnovni materijal; ZUT – zona uticaja toplote ; FZ – zona fuzije

Slika 2.5. Šematski prikaz mikrostrukture RSW zavara

Džul-Lencovim zakonom je opisana količina toplote koja se generiše pri elektrootpornom tačkastom zavarivanju i određuje se prema [39]:

$$Q = \int_0^t R(t) \cdot I_z^2(t) \cdot dt \quad (2.1)$$

gdje su: I_z – struja zavarivanja [A],

t – vrijeme zavarivanja [s],

R_u – ukupni omski otpor između elektroda [Ω].

Ukupni omski otpor može da se definiše kao zbir pojedinih otpora [39]:

$$R_u = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 \quad (2.2)$$

gdje su: R_2 i R_4 – sopstveni otpori materijala koji se spajaju, odnosno zavaruju,

R_1 – otpor između materijala lima i gornje elektrode,

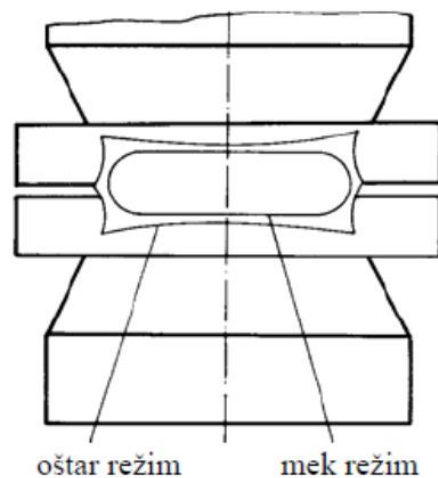
R_5 – otpor između materijala lima i donje elektrode,

R_3 – otpor na kontaktu dva materijala (lima) koji se spajaju.

Osnovni parametri elektrootpornog tačkastog zavarivanja, ujedno i oni koji u najvećoj mjeri utiču na kvalitet dobijenog zavara su:

- jačina struje zavarivanja (I);
- sila pritiska elektrodama (F);
- vrijeme zavarivanja (T);
- dimenzije vrhova elektroda;
- vrijeme prijanjanja elektroda;
- vrijeme održavanja sile pritiska (vrijeme hlađenja).

Na osnovu relacije (2.1) može se zaključiti da su struja zavarivanja (I) i vrijeme zavarivanja (T) međusobno povezani, odnosno potrebna je optimalna vrijednost i struje zavarivanja i vremena zavarivanja kako bi nastao kvalitetan spoj. Ukoliko je vrijednost struje zavarivanja i vremena zavarivanja premala tada neće nastati zavar, odnosno dolazi do efekta „lijepljenja“. Sa druge strane, ukoliko su struja zavarivanja i vrijeme zavarivanja preveliki dolazi do efekta „curenja“, odnosno izbacivanja istopljenog materijala iz spoja. Zavisno od jačine struje i vremena zavarivanja može se dobiti različita veličina i oblik zavara, kao što je prikazano na slici 2.6. Razlikuju se dva tipa režima zavarivanja: „oštri“ kod kojeg je jačina struje velika, a vrijeme zavarivanja kratko i „meki“ kod kojeg je jačina struje mala, a vrijeme zavarivanja dugo [39].

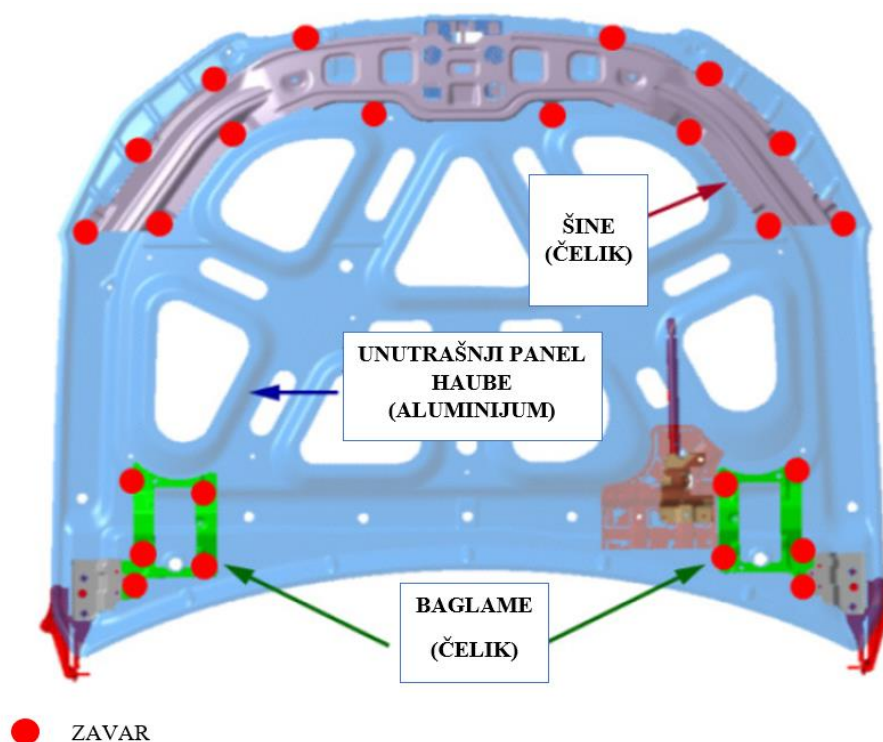


Slika 2.6. Prikaz dva različita oblika jezgra zavara spoja dobijenog elektrootpornim tačkastim zavarivanjem [39]

Elektrode za elektrootporno tačkasto zavarivanje izrađuju se od materijala visoke provodljivosti kao što je bakar i njegove legure. Materijali pogodni za izradu elektroda za elektrootporno zavarivanje definisani su standardom BAS EN ISO 5182:2017 [40], dok su dimenzije vrha, odnosno završetaka elektroda definisane standardom BAS EN ISO 5821:2011 [41]. Životni vijek elektrode predstavlja broj zavara koji elektroda može da izvede bez pojave oštećenja a da pri tom prečnik zavara bude u definisanim granicama. Na životni vijek elektrode utiču brojni parametri kao što su tip mašine za zavarivanje parametri zavarivanja, dimenzije vrha elektrode, materijali koji se zavaruju, kao i mogućnost hlađenja elektroda [42]. S ciljem produženja životnog vijeka elektrode s jedne strane, te poboljšanja mehaničkih svojstava spoja s druge strane, često se, prilikom spajanja raznorodnih materijala, između elektroda i lima postavlja traka od čelika ili nekog drugog materijala koja može doprinijeti poboljšanju zavarljivosti limova koji se spajaju [43, 44].

Primjer primjene RSW-a pri spajanju aluminijuma i čelika u kombinaciji u automobilskoj industriji može se posebno primijetiti kod haube, prtljažnika i vrata automobila, tj. kod dijelova koji se često otvaraju i zatvaraju, pa shodno tome moraju biti male mase. Na slici 2.7. prikazan je primjer primjene elektrootpornog tačkastog zavarivanja unutrašnjeg panela haube koja je od aluminijuma sa šinama i baglamama koje služe, između ostalog, za povećanje krutosti, a koje su izrađene od čelika.

Detaljan pregled trenutnog stanja tehnike u pogledu upotrebe elektrootpornog tačkastog zavarivanja pri spajanja čelika i aluminijuma razrađen je u nastavku rada.



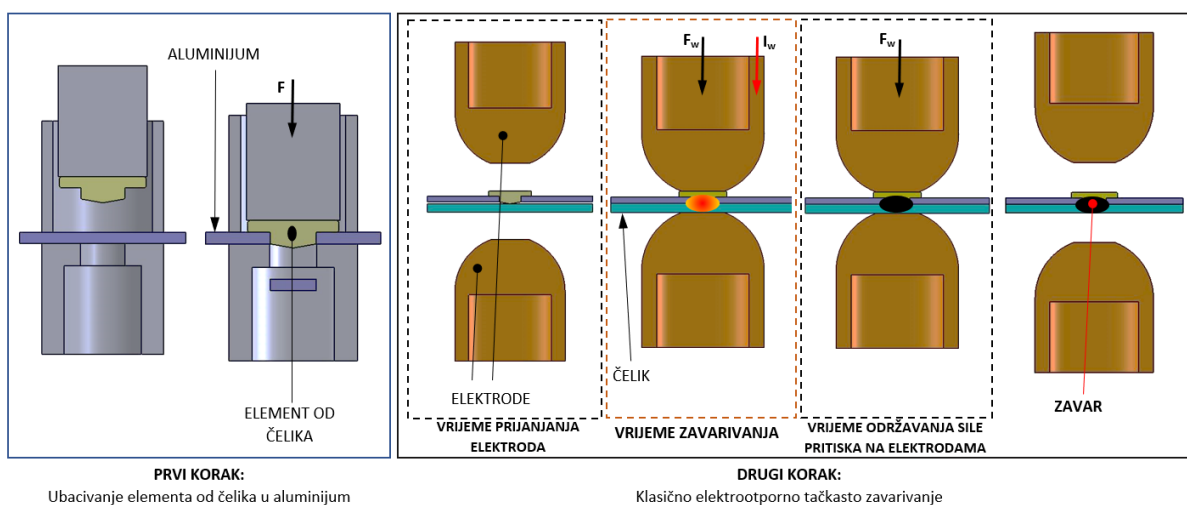
Slika 2.7. Primjer primjene elektrootpornog tačkastog zavarivanja raznorodnih materijala kod haube automobila [45]

2.3.2. Elektrootporno tačkasto zavarivanje elementima

Varijanta elektrootpornog tačkastog zavarivanja, poznata kao elektrootporno zavarivanje elementima (REW), prvenstveno je razvijena za spajanje različitih kombinacija čelika i lakih legura koje su metalurški nespojive i teško se mogu zavarivati zajedno [46]. Ova tehnologija se može primijeniti direktno u industriji bez uvođenja složene opreme, te se može koristiti kao alternativa za klasično elektrootporno tačkasto zavarivanje [47]. Dodatni element kod REW postupka se naziva zakovica, pa se ovaj postupak još može nazvati elektrootporno tačkasto zavarivanje sa zakovicama odnosno RSR (*eng. Resistance Spot Riveting*) [48]. Ovom

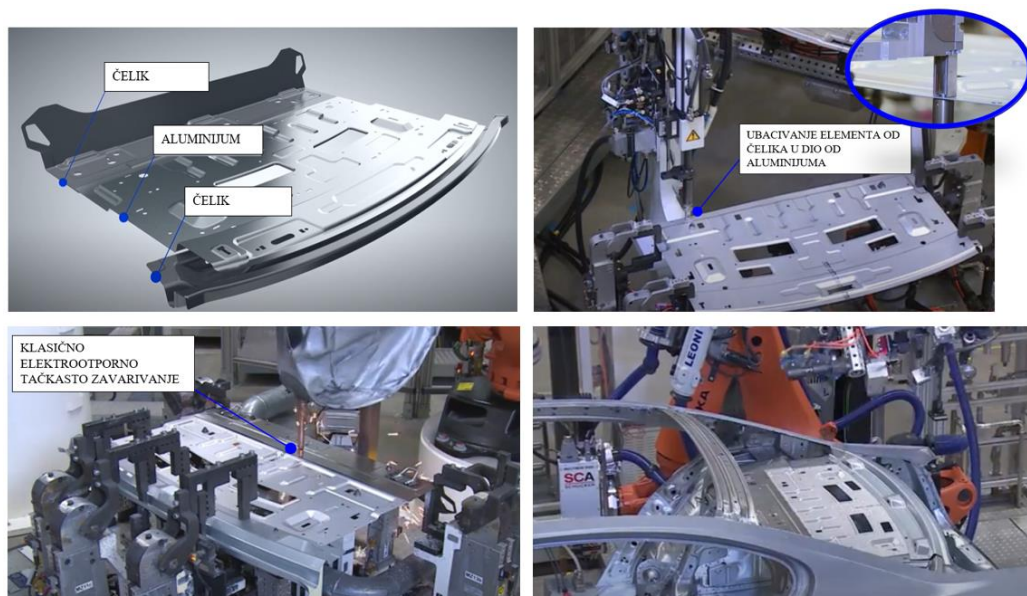
tehnologijom brzo i pouzdano se spajaju raznorodni materijali, prvenstveno čelik sa aluminijumom, magnezijumom i kompozitima.

Elektrootporno tačkasto zavarivanje elementima je postupak koji počinje umetanjem (presovanjem) umetka od čelika, koji se naziva element, u aluminijum ili neki drugi laki materijal. Nakon što se element upresuje u laki materijal, slijedi postupak klasičnog elektrootpornog tačkastog zavarivanja. Šema REW postupka data je na slici 2.8. Kako ovaj postupak spajanja u suštini predstavlja spajanje čelika i elementa koji je takođe od čelika klasičnim elektrootpornim zavarivanjem, onda na kvalitet spoja, tj. zavara utiču isti parametri kao i kod RSW postupka.



Slika 2.8. Šema elektrootpornog tačkastog zavarivanja elementima

Primjer primjene elektrootpornog tačkastog zavarivanja elementima u industriji prikazan je na slici 2.9. Dio prtljažnika izrađuje se od čelika i aluminijuma, a pomenuti postupak spajanja se, u odnosu na klasično elektrootporno zavarivanje, usložnjava samo u pogledu ubacivanja elementa od čelika u aluminijum, što se može jednostavno automatizovati, tako da ovaj način spajanja ne zahtijeva velika dodatna ulaganja u postojeće fabrike za sklapanje automobila.

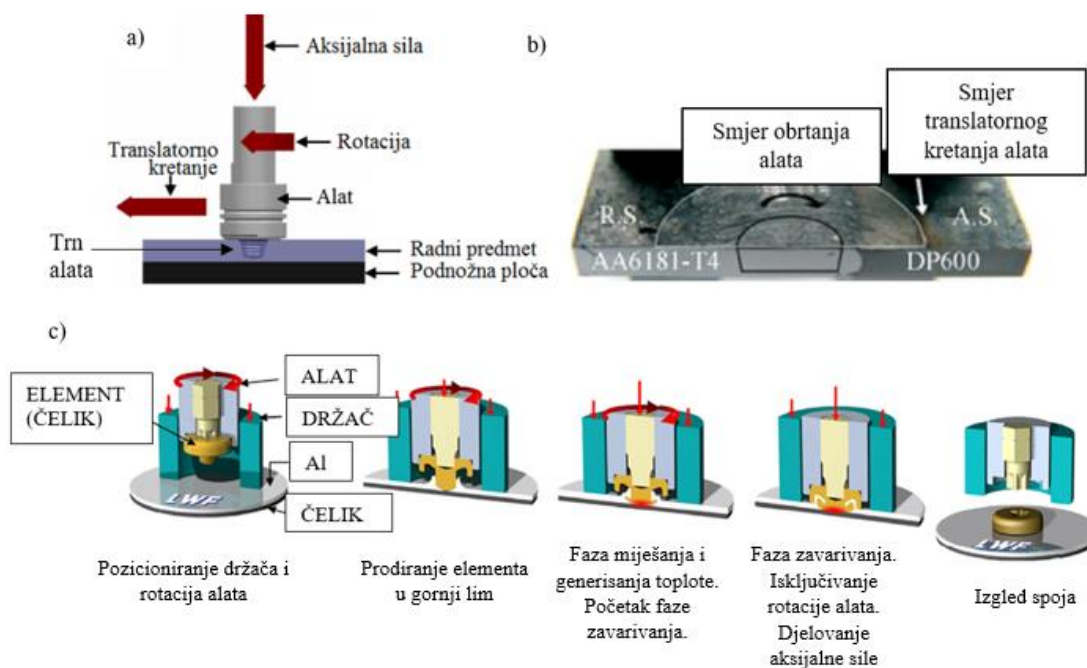


Slika 2.9. Primjer primjene elektrootpornog tačkastog zavarivanja elementima u industriji
(prilagođeno prema [49])

2.3.3. Zavarivanje trenjem sa miješanjem

Pored elektrootpornog zavarivanja istraživanja na polju spajanja čelika i legura aluminijuma dominantna su i u pogledu primjene zavarivanja trenjem sa miješanjem (*eng. FSW – Friction stir welding*) [50, 51], tačkastog zavarivanja trenjem sa miješanjem (*eng. FSSW – Friction stir spot welding*) [52] i zavarivanja trenjem sa miješanjem pomoću dodatnih elemenata (*eng. FEW – Friction element welding*) [53, 54].

Zavarivanje trenjem sa miješanjem je postupak zavarivanja (slika 2.10a) koji se izvodi pomoću specijalnog alata koji vrši zagrijavanje radnih komada i miješanje materijala dijelova koji se spajaju. Šavno zavarivanje trenjem sa miješanjem (FSW) može se podijeliti u četiri faze: (I) prodiranje trna alata u materijal, (II) miješanje i generisanje toplote – početak procesa zavarivanja, (III) translatorno kretanje alata – zavarivanje, (IV) izlaz alata iz materijala – kraj zavarivanja [55]. Prikaz šavnog zavarivanja trenjem sa miješanjem legure aluminijuma AA6181-T4 i čelika DP600 dat je na slici 2.10b. Suštinska razlika između šavnog i tačkastog zavarivanja trenjem sa miješanjem (FSSW) je u tome što kod tačkastog zavarivanja nema faze III, tj. alat ne vrši translatorno kretanje, nego se proces sastoji samo od faze prodiranja alata, faze miješanja i generisanja toplote, koja je ujedno i faza zavarivanja, te, na kraju, od faze izlaza alata iz materijala. Zavarivanje trenjem sa miješanjem pomoću dodatnog elementa (FEW) u suštini predstavlja FSSW postupak koji podrazumijeva da se na alat postavlja dodatni element, kao npr. zakovica, koji nakon procesa zavarivanja ostaje u spoju (slika 2.10c).



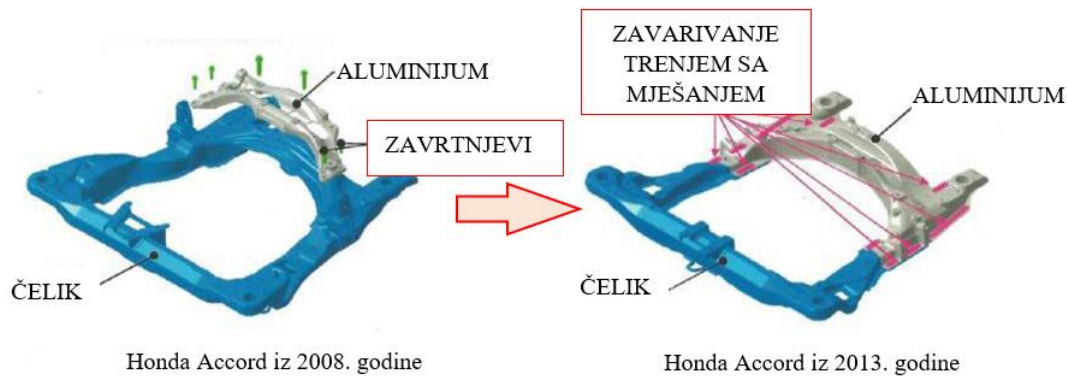
Slika 2.10 a) Šematski prikaz FSW-a [55]; b) Prikaz spoja legure aluminijuma AA6181-T4 i čelika DP600 dobijenog pomoću FSW-a [56] c) Prikaz procesa FEW [57]

Ključni parametri koji utiču na kvalitet spoja kod zavarivanja trenjem sa miješanjem su [58]:

- broj obrtaja alata;
- brzina translatornog kretanja alata (samo kod šavnog zavarivanja);
- brzina zavarivanja (samo kod šavnog zavarivanja);
- aksijalna sila;
- dubina uranjanja;
- ugao nagiba alata;
- geometrija i karakteristike alata.

Izbor parametara od ključne je važnosti za kvalitet tačkastog zavarenog spoja dobijenog trenjem sa miješanjem. Hadi Torkaman i drugi [59] istraživali su uticaj broja obrtaja alata i mikrostrukture materijala na formiranje FSSW zavara legura aluminijuma i DP čelika te zaključili da mikrostruktura DP čelika, tj. odnos martenzita i ferita utiče na veličinu FSSW zavara samo pri velikim brojevima obrtaja alata. Prema studiji autora Kai Xu i Shu-quan Zhang [60] optimalni parametri FSSW zavarivanja čelika DP590 debljine 1 mm i legure aluminijuma 6061 debljine 2 mm su: broj obrtaja alata od 1000 o/min, dubina uranjanja od 0,2 mm i vrijeme zavarivanja (vrijeme zadržavanja alata u materijalu) od 90 s.

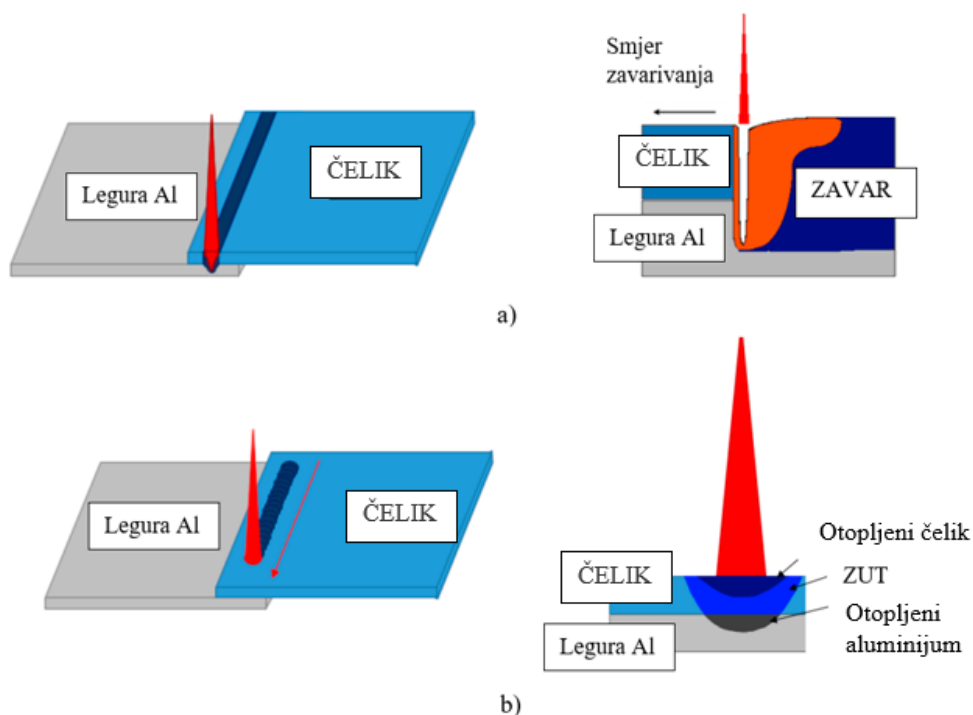
Primjer spajanja čelika i aluminijuma pomoću zavarivanja trenjem sa miješanjem u automobilskoj industriji najbolje se može vidjeti kod nosača motora automobila Honda Accord iz 2013. godine. Ovaj postupak zamijenio je spajanje raznorodnih materijala pomoću zavrtnja, što je bio slučaj kod nosača motora automobila Honda Accord iz 2008. godine (slika 2.11).



Slika 2.11. Prikaz spajanja aluminijuma i čelika kod nosača motora automobila Honda Accord [61]

2.3.4. Zavarivanje laserom

Lasersko zavarivanje je postupak spajanja materijala toplotom dobijenom energijom snopa svjetlosnih čestica. U odnosu na gustinu snage laserskog zavarivanja može se podijeliti na postupak uvarivanja laserom (slika 2.12a) i lasersko zavarivanje topljenjem (slika 2.12b). Lasersko zavarivanje, zbog velike gustine snage i malog unosa toplote, ima brojne prednosti pri zavarivanju aluminijuma i čelika u odnosu na druge postupke zavarivanja. Međutim, problemi s nastankom defekata i reflektivnošću i dalje postoje u procesu. Kada se aluminijum topi, zbog različite tačke topljenja, čelik ostaje u čvrstom stanju. Brzina apsorpcije laserske energije se povećava značajno kada se tečnost formira na površini aluminijuma i rezultuje stvaranjem laserski indukovane plazme koja vodi do nestabilnosti postupka zavarivanja [62]. Ova metoda spajanja različitih materijala, koja se naziva još i daljinsko lasersko zavarivanje, koristi se za širok spektar automobilskih aplikacija kao što su zatvarači, stubovi i sjedala [63]. Jedna od prednosti zavarivanja laserom je i mogućnost spajanja različitih materijala veće debljine [64]. Autor D. Zhou i drugi [65] istraživali su mogućnosti spajanja čelika DP590 i legure aluminijuma 6061, te zaključili da se ovom tehnologijom spajanja mogu izbjeći defekti u zavarenom spoju kao što su pore, prsline i omekšavanje zone uticaja toplote.



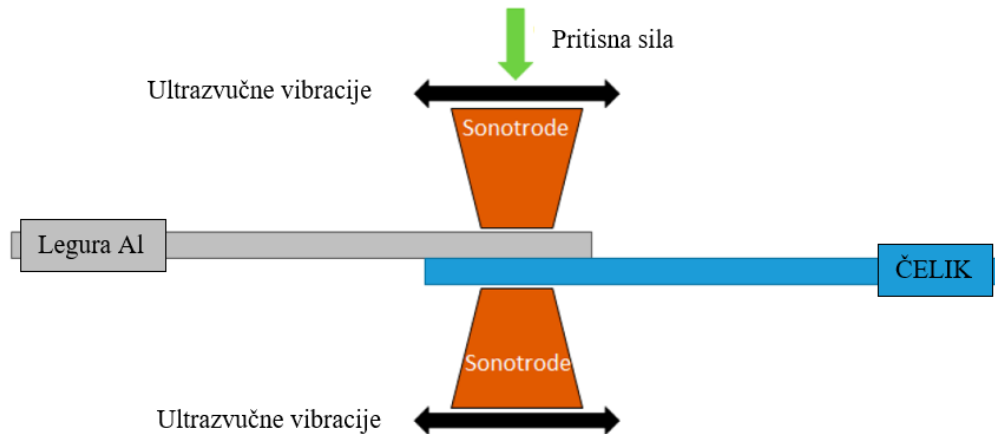
Slika 2.12 a) Postupak uvarivanja laserom (gustina snage $q > 10^6 \text{ W/cm}^2$); b) lasersko zavarivanje topljenjem (gustina snage $q < 10^6 \text{ W/cm}^2$) [63]

Najvažniji parametri za upravljanje procesom laserskog zavarivanja su [66]:

- snaga lasera (P);
- brzina zavarivanja (v);
- zaštitni plin (vrsta, protok, dovod);
- žižna daljina sočiva (f);
- prečnik žiže (dF);
- položaj žiže u odnosu na površinu materijala (z).

2.3.5. Zavarivanje ultrazvukom

Ultrazvučno zavarivanje je postupak spajanja materijala u čvrstom stanju pomoću ultrazvučnih vibracija visokih frekvencija. Generator visoke frekvencije isporučuje električnu energiju koja se piezoelektričnim pretvaračem pretvara u mehaničke vibracije iste frekvencije. Poseban tip ovog postupka je ultrazvučno tačkasto zavarivanje. Kod ovog postupka vibracije prolaze kroz sonotrode i tako omogućavaju stvaranje spoja (slika 2.13) [63]. Dosadašnje studije o ultrazvučnom zavarivanju aluminijuma i čelika uglavnom su fokusirane na analizu mehaničkih i metalografskih svojstava spoja tipičnih predstavnika aluminijumskih i čeličnih limova [67–70].



Slika 2.13. Šematski prikaz ultrazvučnog tačkastog zavarivanja [63]

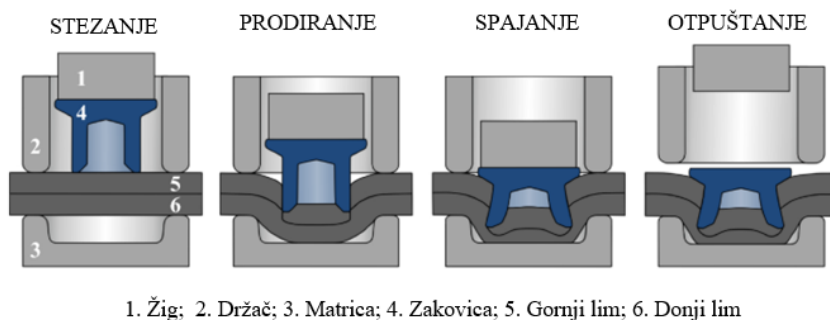
Najčešći parametri kod ultrazvučnog tačkastog zavarivanja su:

- amplituda vibracija;
- vrijeme vibracija;
- sila pritiska.

2.4. TEHNOLOGIJE MEHANIČKOG SPAJANJA

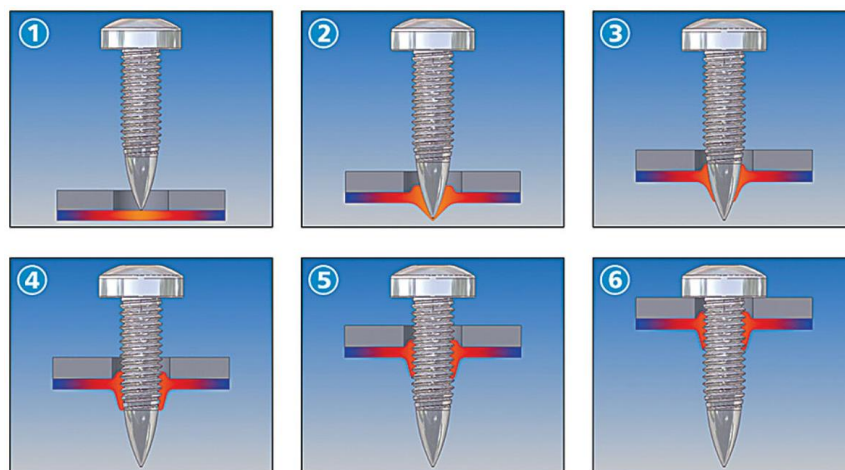
2.4.1. Mehaničko spajanje pomoću dodatnih komponenti

Mehaničko spajanje pomoću dodatnih komponenti u suštini podrazumijeva upotrebu dodatnih spoljašnjih komponenata kao što su zavrtnji i zakovice za spajanje dva ili više limova. Kada je riječ o savremenim mehaničkim tehnologijama spajanja pomoću dodatnih komponenti, onda dominantna istraživanja idu u pogledu spajanja materijala samoprobijajućim zakovicama (eng. *SPR – Self piercing riveting*) i samoproduirujućim zavrtnjem (eng. *FDS – Flow drilling screws*). Samoprobijajuće zakivanje SPR ne zahtijeva pretpranje površine ili prethodno bušenje rupa, te tako omogućava kratko vrijeme spajanja i uštede troškova [71]. Šema SPR postupka data je na slici 2.14.



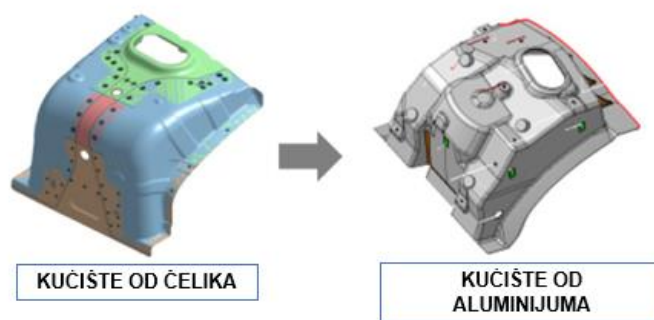
Slika 2.14. Šema SPR (samoprobijajuće zakivanje) postupka spajanja materijala [72]

FDS postupak je proces trenja koji koristi vijak kao pričvršćivač i alat. Ova tehnologija ima mnoge prednosti, poput jednostrane pristupačnosti, jednostavne odvojivosti i velike čvrstoće spoja [73]. Šema FDS postupka data je na slici 2.15.



Slika 2.15. Postupak spajanja materijala sa samoproduirujućim zavrtnjem (FDS) –
1. zagrijavanje; 2. penetracija; 3. istiskivanje; 4. formiranje navoja; 5. zavrtnje (potpuno formirana zavrtnjska veza); 6. zatezanje [74]

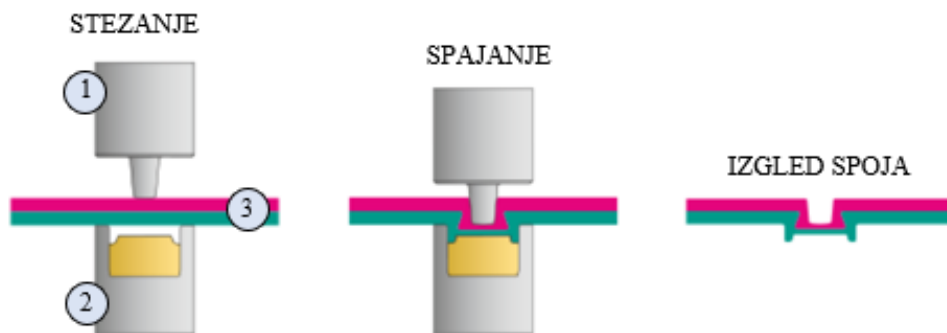
Kućište amortizera je komponenta koja ima veliki uticaj na performanse upravljanja i udobnost vožnje. Budući da je postojeće kućište amortizera sastavljeno od oko 20 čeličnih dijelova koje je potrebno spojiti zavarivanjem, tačnost i kvalitet zavarivanja tih dijelova mora se detaljno kontrolisati, što je veoma sporo i skupo. Međutim, u slučaju proizvodnje kućišta amortizera metodom livenja pod pritiskom od aluminijuma, cijena i vrijeme izrade, kao i masa samog kućišta su svedeni na minimum. Ovako dobijena aluminijumska kućišta masovno se proizvode i za postojeće čelično tijelo vezuju pomoću samoprobijajućih zakovica i strukturnih lijepkova (slika 2.16) [45].



Slika 2.16. Primjer primjene spajanja kućišta amortizera od aluminijuma i čeličnog tijela pomoću samoprobijajućih zakovica i strukturnih lijepkova [45]

2.4.2. Mehaničko spajanje bez dodatnih komponenti

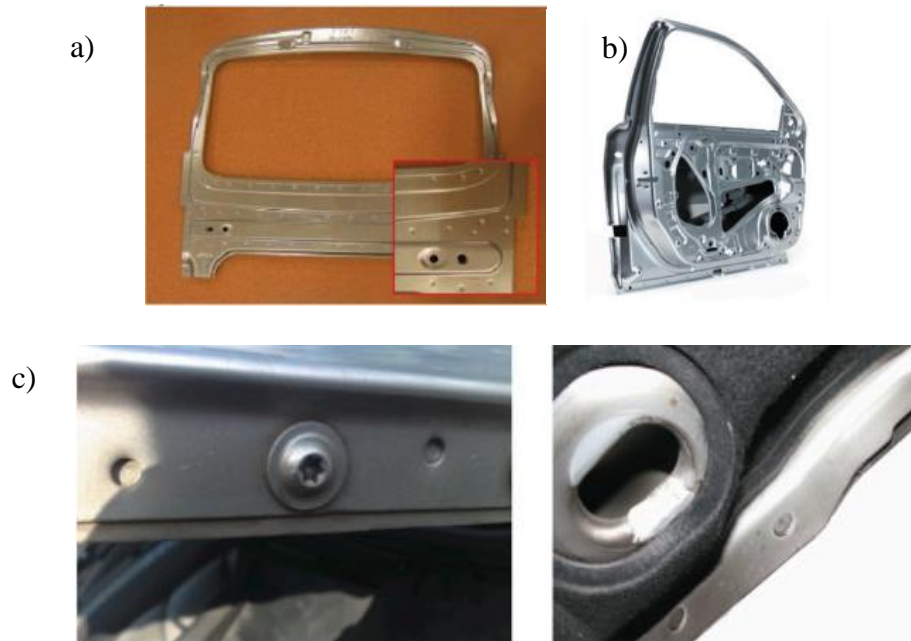
Mehanička tehnologija spajanja koja ne podrazumijeva upotrebu dodatnih spoljnih komponenti je zakivanje bez zakovica (*eng. MC – mechanical chlicing*). Ovaj način spajanja hladnim oblikovanjem izvodi se postupkom lokalnih deformacija uz pomoć oblikača (žiga) i matrice. Prilikom spajanja oblikač (žig) pritiskuje spojene limove unutar šupljina kalupa, tj. matrice, formirajući tako oblik koji te limove spaja, pri tome ne unoseći dodatnu toplotu u spoj. Šema postupka data je na slici 2.17. Osnovni parametar ovog postupka spajanja je sila kojom žig djeluje na lim, te geometrija žiga i matrice. Ova tehnologija, zbog svoje jednostavnosti, pogodnija je za automatizaciju u odnosu na druge mehaničke tehnologije spajanja. Pored navedenog, važna prednost ovog postupka spajanja je i nepotrebno dodatno farbanje, kao i to da nema dodatne potrebe za uklanjanjem zaostalih napona [75]. Detaljan pregled trenutnog stanja tehnike iz oblasti zakivanja bez zakovica razrađen je u nastavku ove doktorske disertacije.



1. Žig; 2. Matrica; 3. Materijali koji se spajaju

Slika 2.17. Šema postupak mehaničkog spajanja zakivanje bez zakovica [76]

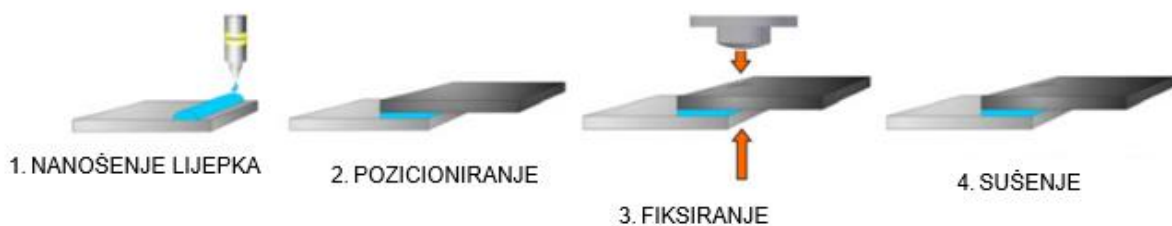
Zakivanje bez zakovica je već našlo primjenu u proizvodnji širokog spektra proizvoda od limova, posebno u automobilske industriji. Kod Volvo XC90 krovni prozor, odnosno njegova glavna noseća konstrukcija, ima oko 60 spojeva dobijenih ovom tehnologijom spajanja (slika 2.18a). Takođe, primjer primjene ovog spoja je konstrukcija vrata automobila Honda, izrađena od čeličnog lima i dijelova od legure aluminija (slika 2.18b). Njemački proizvođači, npr. Mercedes (slika 2.18c), primjenjuju zakivanje bez zakovica još od posljednjih godina prošlog vijeka [77].



Slika 2.18: Primjer primjene zakivanja bez zakovica u automobilskoj industriji: a) konstrukcija nosača krovnog prozora, b) vrata automobila Honda, c) fragment poklopca motora i prtljažnika kod Mercedes C klase [77]

2.5. LIJEPLJENJE

Kada je riječ o spajanju raznorodnih materijala onda se kao najreprezentativniji predstavnik hemijskog postupka spajanja nameće lijepljenje. Poznato je da se postupkom lijepljenja mogu spajati gotovo svi materijali, pa je tako vrlo pogodan i za spajanje čelika i aluminijuma. Ovakav postupak spajanja ima broje prednosti, a jedna od njih je smanjenje korozije između dijelova. S druge strane, kada je riječ o nedostacima lijepljenja, tu se prvenstveno misli na smanjena mehanička svojstva, pogotovo u pogledu čvrstoće i krutosti [78]. Pored navedenog, lijepkovi imaju i nedostatak u pogledu potrebne pripreme površina za spajanje, kao i dugog vremena potrebnog za očvršćavanje lijepka. Postupak lijepljenja dat je na slici 2.19.

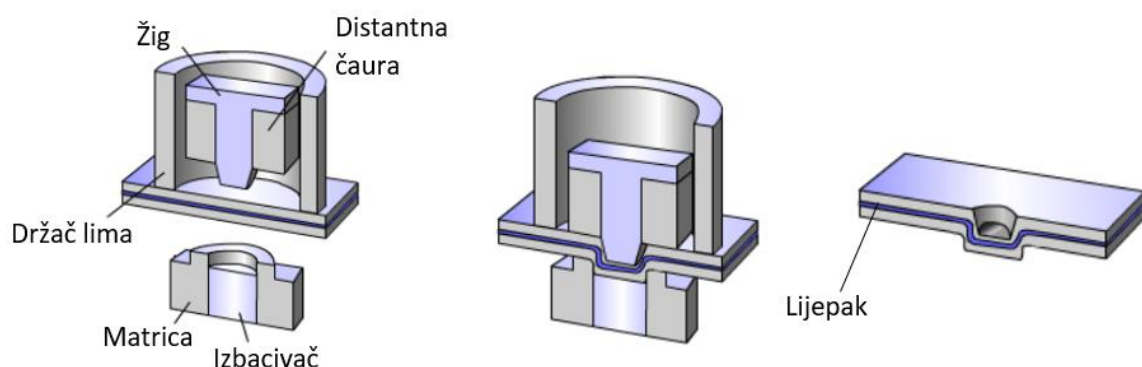


Slika 2.19. Šematski prikaz postupka lijepljenja [77]

Kada je riječ o istraživanju u vezi sa analizom mehaničkih svojstava zalijepljenog spoja čelika i aluminijuma autori S. Tatsuyai drugi [80] istraživali su zateznu čvrstoću zalijepljenog spoja između hladno valjanog čeličnog lima debljine 0,8 mm od 270 MPa i lima od aluminijske legure debele 1,2 mm (A5182/A6022). Korišćeno ljepilo je jednokomponentno epoksidno ljepilo Sumitomo 3M. Istraživanje je pokazalo da je za sve kombinacije spoja pomenutog čelika i aluminijuma zatezna čvrstoća veća od 20 MPa, a da je mod otkaza uvijek bio kohezijski, tj. lom je nastao kroz sredinu lijepka, što se smatra povoljnim slučajem. Treba napomenuti da na mehanička svojstva ljepila u velikoj mjeri utiče temperatura. Epoksidna ljepila obično pokazuju smanjenje čvrstoće i modula elastičnosti, te povećanje duktilnosti s povećanjem temperature. Za automobilsku industriju, lijepila su obično izrađena da izdrže temperature između $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ [81].

2.6. HIBRIDNE TEHNOLOGIJE SPAJANJA

Lijepkovi se često koriste u kombinaciji sa nekim od postupaka spajanja kao što je zakivanje, elektrootporno tačkasto zavarivanje ili elektrootporno tačkasto zavarivanje elementima. Ovakav način spajanja naziva se hibridno spajanje. A. Zvorykina i drugi [82] istraživali su spajanja limova od legure aluminijuma AW 6016 – T4 9 debljine 1 mm i čelik 22MnB5 debljine 1,5 mm pomoću lijepljenja i elektrootpornog tačkastog zavarivanja sa umetnutim elementom. Rezultati su pokazali da dati spoj ima bolja mehanička svojstva od zakovanog spoja istih materijala. Istraživanje autora Hao Jiang i drugi [83] pokazalo je da hibridni spoj lijepka i samoprobijajućih zakovica aluminijuma i čelika ima bolja mehanička svojstva nego spoj izveden samo sa lijepkom ili zakovicama. Na slici 2.20. prikazan je način spajanja dva lima pomoću lijepka i zakivanja bez zakovica.



Slika 2.20. Primjer hibridne tehnologije: lijepljenje/zakivanje bez zakovica [84]

Prednosti kombinovanja lijepkova i tehnologija zavarivanja ili mehaničkih tehnologija spajanja su [84]:

- generalno poboljšanje mehaničkih svojstava (statičkih i dinamičkih);
- povećanje krutosti spoja;
- izrada neprekidnog i nepropusnog spoja;
- nije potrebno fiksiranje spoja tokom procesa očvršćavanja lijepka.

2.7. TRENDOVI ISTRAŽIVANJA TEHNOLOGIJA SPAJANJA LIMOVA OD ČELIKA I LEGURA ALUMINIJUMA

Tehnologije spajanja kao što su zavarivanje trenjem sa mješanjem (FSW), samoprobijajuće zakivanje i lijepljenje su veoma efikasne u pogledu spajanja aluminijuma i čelika, ali zajedno imaju jedan veliki nedostatak, a to je automatizacija postupka spajanja.

Alessio Gullino i drugi [63] dali su u svom istraživanju pregled tehnologija spajanja čelika i aluminijuma za potrebe automobilske industrije i došli do sljedećih zaključaka:

- Kod elektrootpornog tačkastog zavarivanja čelika i aluminijuma maksimalna sila kidanja kretala se u granicama od 4 do 8 kN;
- Elektrootporno tačkasto zavarivanje sa dodatnim trakama i prevlakama nije pokazalo bolja mehanička svojstva u odnosu na klasično elektrootporno tačkasto zavarivanje;
- Vrijednosti maksimalne sile kidanja postignute korišćenjem ultrazvučnog tačkastog zavarivanja i tačkastog zavarivanja trenjem, generalno su bile nešto niže od onih koje se postižu klasičnim elektrootpornim tačkastim zavarivanjem;
- Spoj dobijen elektrootpornim tačkastim zavarivanjem sa elementima pokazao je nešto veću vrijednost maksimalne sile kidanja u odnosu na klasične RSW tehnologije.

Autori G. Meschut i drugi [57] u svom istraživanju poredili su mehanička svojstva inovativnih i visokoproduktivnih tehnologija spajanja za multimaterijal karoserije automobila kao što su zakivanje bez zakovica, elektrootporno tačkasto zavarivanje elementima, zavarivanje trenjem sa elementima, samoprobijajuće zakivanje i lijepljenje. Rezultat istraživanja pokazao je da sve tehnologije zadovoljavaju mehanička svojstva, te da sve metode imaju pojedinačne prednosti i nedostatke, pa generalna preporuka za jednu tehnologiju nije moguća. Odluka o primjeni jedne ili više tehnologija za serijsku proizvodnju zavisi od brojnih

parametara kao što su npr. obim proizvodnje, potrebna čvrstoća, fleksibilnost materijala, mogućnost automatizacije, troškovi, itd. S druge strane, zaključak istraživanja je da su potrebni dodatni razvojni koraci kako bi se dostigla zrelost određenih tehnologija za serijsku primjenu.

Kada je riječ o serijskoj proizvodnji, onda je elektrootporno zavarivanje veoma efikasna tehnologija spajanja za primjenu u automobilskoj industriji, a najprije zbog velike produktivnosti i stepena automatizacije. Dodatna prednost je u tome što se, uz odgovarajući izbor parametara, može dobiti visok kvalitet spojeva nezavisno od sposobnosti zavarivača. Već više od 100 godina RSW zavarivanje se pokazalo kao dominantna tehnologija pri spajanju tankih limova. Konkretno, automobilska industrija nastavlja da koristi RSW kod zavarivanja rezervoara kao svoj glavni postupak spajanja, uprkos snažnoj konkurenciji kao što su FSW, lepljenja i mehaničko spajanje. Visoka produktivnost po niskoj cijeni je ključ održivosti te pozicije u budućnosti. Kako bi se dokazala opšta zavarljivost strukture, potrebno je razmotriti i planirati pouzdanost zavarivanja (dizajn), zavarljivost (izbor materijala) i izvodljivost zavarivanja (proizvodnja).

Nepravilna kontrola parametara uključenih u proces može uticati na kvalitet zavara. RSW spoj u tim slučajevima može imati smanjenu nosivost, a i njegov izgled će biti narušen. Ako se jedan od parametara promijeni, onda će doći i do promjene nosivosti ukupnog RSW spoja. Stoga je od izuzetne važnosti da se parametri kontrolišu i ovo predstavlja izazov kod RSW postupaka. Shodno prethodno navedenom može se zaključiti da je od velike važnosti analiza uticaja parametara zavarivanja na nosivost RSW spoja, kako bi se potom mogla uraditi optimizacija samog procesa.

Kada je riječ o spajanju čelika i aluminijuma, Pouranvari [85] je u svojoj studiji objavljenoj 2017. godine dao pravce budućih istraživanja u vezi sa RSW tehnologijom spajanja ova dva raznorodna materijala, a to su:

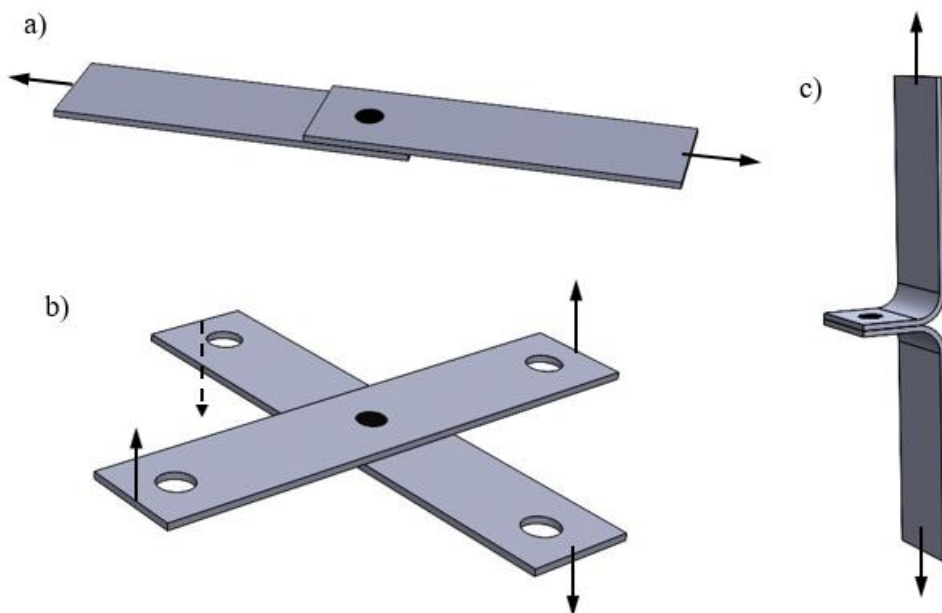
- Analiza krtosti intermetalnog jedinjenja (IMC sloja) koje nastaje pri spajanju čelika i aluminijuma zavarivanjem u odnosu na spoljašnje opterećenje;
- Zavisnost IMC sloja od tipa čelika koji se spaja sa aluminijumom;
- Analiza i razvoj premaza za čelik koji će uticati na rast IMC sloja;
- Izrada integralnog računarskog modela zavarivanja – od procesa do performansi;
- Analiza uticaja korozije na RSW spoj čelika i aluminijuma;
- Razvoj alternativnih postupaka zavarivanja/spajanja čelika i aluminijuma.

S ciljem doprinosa istraživanju tehnologija spajanja čelika i aluminijuma, a shodno prethodno navedenim trendovima, istraživanja ove doktorske disertacije bazirana su na analizi mehaničkih i metalografskih svojstava sljedećih tehnologija spajanja:

- Elektrootporno tačkasto zavarivanje;
- Elektrootporno tačkasto zavarivanje elementima;
- Zakivanje bez zakovica, mehaničko spajanje.

2.8. KARAKTERIZACIJA PONAŠANJA MEHANIČKIH I METALOGRAFSKIH SVOJSTAVA TAČKASTIH ZAVARENIH SPOJEVA DP ČELIKA I LEGURA ALUMINIJUMA

U automobilskim konstrukcijama tačkasti zavareni spojevi mogu biti opterećeni smicanjem usljed relativnog pomijeranja ili rotacije spojenih dijelova i zatezanjem usljed djelovanja sile normalne na spojene dijelove koja teži da ih razdvoji. Shodno prethodnom, ispitivanja koje se najčešće izvode s ciljem utvrđivanja mehaničkih ponašanja ovakvih spojeva su: statički i dinamički test na zatezanje (TS), unakrsni test na zatezanje (CT) i L test na zatezanje (CP), te ispitivanje mikrotvrdoće spoja [86]. Na slici 2.21. dat je šematski prikaz navedenih testova.

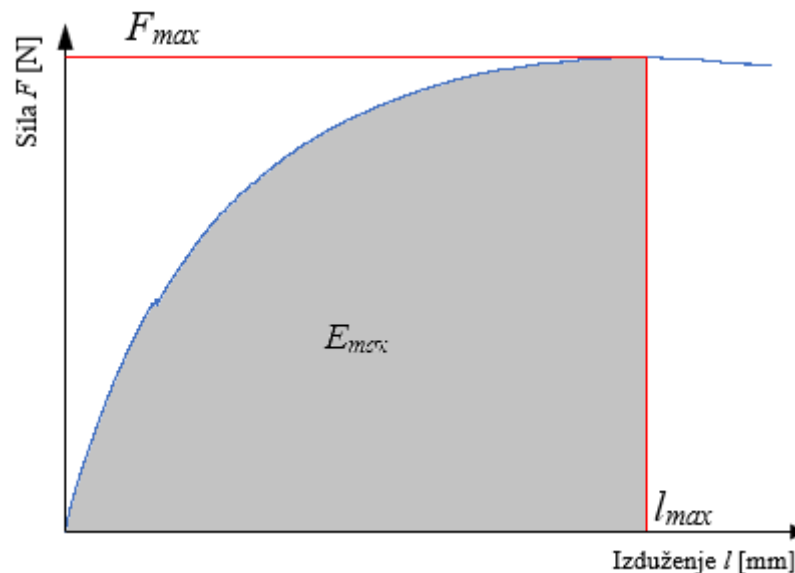


Slika 2.21. Ispitivanje mehaničkih svojstava RSW spoja: a) TS test; b) CT test; c) CP test

2.8.1. Statički test na zatezanje

Test na zatezanje (TS test) je najčešće korišćena metoda za određivanje čvrstoće zavarenog spoja, najprije zbog jednostavnosti izrade testnog uzorka, a zatim i zbog jednostavnosti samog testa. Na slici 2.22. prikazan je opšti dijagram sila – izduženje za tačkasti zavareni spoj u slučaju testa na zatezanje (TS test). Da bi se u potpunosti opisalo mehaničko ponašanje tačkastog zavarenog spoja potrebno je sa dijagrama sila – izduženje očitati sljedeće vrijednosti: maksimalno opterećenje, odnosno silu kidanja F_{max} , izduženje pri maksimalnom opterećenju l_{max} i snagu otkaza pri maksimalnom opterećenju, odnosno količinu apsorbovane energije E_{max} . Izduženje pri maksimalnom opterećenju, odnosno pri sili kidanja l_{max} je mjera duktilnosti spoja, dok je snaga otkaza pri maksimalnom opterećenju E_{max} mjerilo sposobnosti apsorpcije energije zavara, a njegova veća vrijednost pokazuje povećanje pouzdanosti zavara od udarnih opterećenja kao što su nesreće ili sudari [87]. U poglavlju 3 detaljno će biti objašnjena procedura određivanja količine apsorbovane energije na osnovu dobijenog dijagrama sila – izduženje.

Na statičku nosivost dominantno utiču mehanička svojstva materijala koji se spaja, tip elektrode i parametri zavarivanja. Kako pomenuti parametri direktno utiču i na veličinu jezgra zavara onda se može uspostaviti veza između veličine jezgra zavara i mehaničkog ponašanja RSW spoja [88, 89, 90].



Slika 2.22. Opšti dijagram sila – izduženje za tačkasti zavareni spoj u slučaju testa na zatezanje (TS test)

Kako bi se postigla odgovarajuća mehanička svojstva spoja potrebno je na adekvatan način odabrati parametre zavarivanja, prvobitno silu pritiska, jačinu struje i vrijeme trajanja ciklusa [91]. Ručno preračunavanje parametara zavarivanja, iskustvo operatera i stručnjaka tehničara prilikom podešavanja postavki parametara nisu davali dobre rezultate jer na podešavanje parametara svake mašine za zavarivanje utiču brojni faktori. Optimizacija parametara zavarivanja na osnovu određenih izlaznih svojstava spoja, prvenstveno onih koji se dobijaju statičkim ispitivanjem, predmet su istraživanja brojnih naučno-stručnih studija. U tabeli 2.2. dat je pregled literature u pogledu optimizacije parametara elektrootpornog tačkastog zavarivanja čelika baziran na dostupnim studijama, objavljenim nakon 2015. godine.

Tabela 2.2. Pregled literature u pogledu optimizacije parametara elektrootpornog tačkastog zavarivanja čelika baziran na dostupnim studijama, objavljenim nakon 2015. godine

Autori	Materijal	Metoda optimizacije	Ulazne promjenljive (Parametri zavarivanja)	Izlazna svojstva spoja	Rezultati – Zaključci
S.H. M. Anijdan i dr. [92] (2018)	DP600 / AISI 304	Taguči (Taguchi)	-Struja zavarivanja I -Vrijeme zavarivanja T -Sila u elektrodama F -Vrijeme hlađenje T_H	Napon dobijen ispitivanjem na zatezanje [N/mm ²]	Parametri zavarivanja koji daju najveću vrijednost napona su: $I=16$ kA; $T=16$ ciklus; $F=5$ kgf; $T_H=35$ ciklus.
H.A. Shende i dr. [93] (2017)	AISI 304L / AISI 1020	Tagučijeva metoda sa sivom relacijom analizom (Grey-Taguchi) /ANOVA	-Struja zavarivanja I -Vrijeme zavarivanja T -Pritisak elektrodama p -Vrijeme hlađenja T_H	Napon dobijen ispitivanjem na zatezanje [N/mm ²] Prečnik jezgra zavara [mm]	Parametri zavarivanja koji daju maksimalnu vrijednost napona, te minimalnu vrijednost prečnika jezgra zavara su: $I=10$ kA; $T=10$ ciklusa; $p=4$ bar; $T_H=25$ ciklus. Takođe, konstatovan je uticaj na izlazna svojstva: $I - 91,6\%$; $T - 7,16\%$; $p - 1,19\%$; $T_H - 0,017\%$.
F. Reyes-Calderón i dr. [94] (2018)	DP290/ DP290	Taguči (Taguchi)/ ANOVA	-Struja zavarivanja I -Vrijeme zavarivanja T -Pritisak elektrodama p	Sila kidanja dobijena ispitivanjem na zatezanje [N]	Parametri zavarivanja koji daju maksimalnu vrijednost sile kidanja su: $I=3,5$ kA; $T=1800$ ms; $p=0,75$ MPa Takođe, konstatovan je uticaj na izlazna svojstva spoja: $I - 46,67\%$; $T - 19,5\%$; $p - 33,82\%$.

Tabela 2.2. Nastavak

Autori	Materijal	Metoda optimizacije	Ulazne promjenljive (Parametri zavarivanja)	Izlazna svojstva spoja	Rezultati – Zaključci
A. Arumugam i dr. [95] (2015)	SPHC / SPRC35	Tagučijeva metoda sa sivom relacionom analizom (Grey-Taguchi) /ANOVA	-Struja zavarivanja I -Vrijeme zavarivanja T -Sila u elektrodama F	Napon dobijen TS testom [N/mm ²] Prečnik jezgra zavara [mm]	Parametri zavarivanja koji daju maksimalnu vrijednost napona, te minimalnu vrijednost prečnika zavara su: $I=9$ kA; $T=15$ ciklus; $F=3$ kN. Takođe, konstatovan je uticaj na izlazna svojstva: $I-58,7\%$; $T-11,9\%$; $F-21,5\%$.
A. Subramanian i dr. [96] (2018)	AISI 409M/ AISI 409M -feritni nehrđajući čelik	Višekriterijumska Tagučijeva metoda / ANOVA	-Struja zavarivanja I -Vrijeme zavarivanja T -Sila u elektrodama F	Napon dobijen TS testom [N/mm ²] – težinski faktor 0,8 Vrijednost udubljenja [mm] - težinski faktor 0,2	Parametri zavarivanja koji zadovoljavaju izlazna svojstva su: $I=11,5$ kA; $T=14$ ciklus; $F=3,5$ kN. Takođe, konstatovan je uticaj na izlazna svojstva: $I-60,86\%$; $T-19,77\%$; $F-13,99\%$.
I. A. Soomro i dr. [97] (2021)	DP590/D P590	Tagučići	-Struja zavarivanja I -Vrijeme zavarivanja T -Vrijeme hlađenje T_H	Sila kidanja dobijena pri CT testu [N] Količina apsorbovane energije dobijena pri CT testu [J]	Parametri zavarivanja koji daju maksimalnu vrijednosti sile kidanja i apsorbovane energije su: $I=7,5$ kA; $T=560$ ms; $T_H=400$ ms. Takođe, konstatovano je da struja zavarivanja ima najveći uticaj na izlazna svojstva spoja.
B. V. Feujofack Kemda i dr. [98] (2020)	ASTM A 36/ A 36 i ASTM A653/ A653	ANOVA	-Struja zavarivanja I -Vrijeme zavarivanja T -Sila u elektrodama F	Tvrdoća zone fuzije [HV] Prečnik jezgra zavara [mm]	Za oba razmatrana materijala konstatovano je da struja zavarivanja ima najveći uticaj i na tvrdoću zone fuzije (32,18%) i na veličinu prečnika jezgra zavara (30%).
A. E. Hernández i dr. [99] (2020)	DP600/A ISI304	Metodologija odzivne površine (RSM)	-Struja zavarivanja I -Vrijeme zavarivanja T	Sila kidanja dobijena TS testom [N] Prečnik jezgra zavara [mm]	Zavarivanjem sa strujom od 4,85 kA i vremenom od 300 ms se može dobiti maksimalna vrijednost sile kidanja, kao i prečnika jezgra zavara.

Na osnovu pregleda literature datog u tabeli 2.2. dolazi se do zaključka da na statičku nosivost tačkastog zavarenog spoja čelika u najvećoj mjeri utiče struja zavarivanja, dok je u većini slučajeva uticaj ostalih parametara zavarivanja (sile u elektrodama, vrijeme zavarivanja, vrijeme hlađenja) zanemarljiv. Optimizacija parametara zavarivanja najčešće je izvedena na osnovu maksimalne sile kidanja i prečnika jezgra zavara. Tagučijeva metoda je korišćena za jednokriterijumsku optimizaciju, dok je višekriterijumska Tagučijeva metoda i Tagučijeva metoda sa svom relacionom analizom (GRA) korišćena kod višekriterijumske optimizacije.

Kada je riječ o elektrootpornom tačkastom zavarivanju čelika i aluminijuma, većina studija je fokusirana na analizu uticaja sloja intermetalnog jedinjenja (IMC) na mehanička svojstva, prvenstveno na statičku nosivost. Intermetalno jedinjenje Fe-Al nastaje prvenstveno zbog razlike u termičkim i fizičkim svojstvima aluminijuma i čelika. IMC sloj je voma krt, a njegovo prisustvo u spoju značajno pogoršava mehanička svojstva spoja [100,101]. Značajna istraživanja urađena su u pogledu kontrole IMC međusloja tokom RSW zavarivanja čelika i aluminijuma, a zbog dobre metalurške kompatibilnosti sa oba materijala, došlo se do zaključka da premaz od cinka (Zn) na čeliku može poboljšati nosivosti spoja jer dovodi do smanjenja Al-Fe IMC sloja [102–104].

Jianbin i drugi [34] su istraživali uticaj Zn premaza na nosivost RSW spoja od legure aluminijuma A5052 i DP600 čelika u zavisnosti od jačine struje zavarivanja. Jasno je uočeno da se korišćenjem premaza Zn povećava nosivost spoja, posebno pri maloj jačini struje. U slučaju RSW spoja bez Zn sloja morfologija intermetalnog jedinjenja je u cjelini ravna linija, ali je jedinjenje Fe_4Al_{13} veće debljine nego kada je spoj sa Zn slojem. Pored Zn premaza na IMC sloj se može uticati i pomoću Mg premaza, tj. primjenom Mg premaza može se povećati nosivost RSW spoja čelika i legure aluminijuma [105].

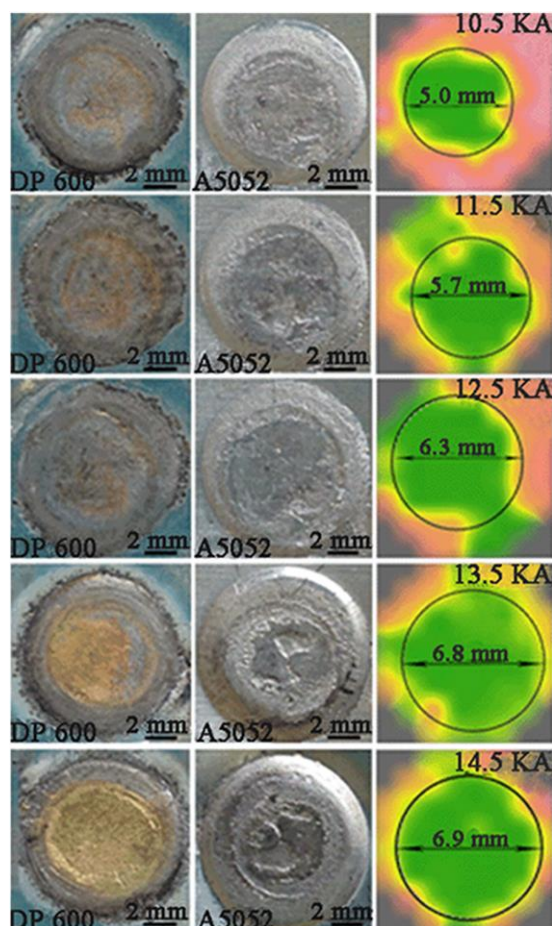
Svojstva površine Al legura snažno utiču na RSW proces, kvalitet zavarivanja i degradaciju elektroda. U najvećoj mjeri na kvalitet RSW procesa zavarivanja utiče prisustvo oksidnog sloja (Al_2O_3), hrapavost površine i maziva [106]. Veliki afinitet aluminijuma prema kiseoniku dovodi do gradnje teško topljivog oksida Al_2O_3 , sa temperaturom topljenja oko 2030 °C, što je znatno više od temperature topljenja osnovnog materijala koja je približno 658 °C. Ovaj sloj čuva aluminijum od korozije, ali indukuje veliku elektrootpornost na kontaktima elektroda i materijala, što dovodi do oštećenja elektroda i smanjivanja kvaliteta zavara. Obim ovih problema zavisi od debljine oksidnog sloja [107].

Čišćenje aluminijuma s ciljem otklanjanja oksidnog sloja može se vršiti mehanički, koristeći abrazivne papire ili hemijski koristeći, na primjer, NaOH rastvor. Potpuno očišćen

oksidni sloj daje značajno bolji kvalitet zavara, nego spoj gdje nije potpuno uklonjen oksidni sloj (nekompletno uklanjanje). Osim čišćenja, utvrđeno je da, povećanjem sila elektroda, dolazi prije do lomljenja oksidnog filma, čime se smanjuje otpornost na kontakte. Takođe, predložena je primjena niskog napona za predgrijavanje kako bi se smanjio uticaj sloja oksida pri zavarivanju [106–109].

C. Jianbin i drugi [36,] u studiji objavljenoj 2016. godine, istraživali su mehanička svojstva spoja čelika DP600 i legure aluminijuma A5052 dobijenog elektrootpornim tačkastim zavarivanjem, te, između ostalog, zaključili da površinske promjene i promjene dimenzija tačke spoja zavise od jačine struje pri spajanju. Žuta boja na površini čelične strane povećava se postepeno povećavanjem struje zavarivanja, što ukazuje na to da je bakar s elektrode sve više i više ostavljao ostatke na čeličnoj površini (slika 2.23). Ovaj fenomen se može objasniti činjenicom da se sa dodatnim unosom toplote površinska temperatura čelika i elektroda postepeno povećava, što je rezultovalo povećanom difuzijom između čelika i elektrode. Kad je struja zavarivanja prešla iznad 13,5 kA, površina aluminijske legure postala je neravnomjerna i osiromašena, što se pripisuje adheziji aluminijuma na površinu elektrode. Dodatno, adhezija je kontaminirala i degradirala elektrodu, čime se smanjuje efikasnost i kvalitet zavarivanja. Analizom kvaliteta površine tačkastog spoja pokazano je da optimalna jačina struje iznosi 12,5 kA, čime se u ovom slučaju postiže prečnik zavara od 6,3 mm. S druge strane, povećanjem jačine struje zavarivanja dolazi do redukcije debljine spoja. U slučaju spajanja legure aluminijuma A5052 i čelika DP600, za jačinu struje od 12,5 kA, redukcija debljine spoja je oko 14%, što je manje od preporuka Američkog društva za zavarivanje, a to je da redukcija debljine tačke spoja ne treba biti veća od 15 %. Ovo je još jedan parametar koji je potvrdio da je, u ovom slučaju, optimalna vrijednost jačine struje od 12,5 kA. Redukcija debljine spoja je još jedan od ozbiljnih nedostataka spajanja čelika i aluminijuma RSW tehnologijom.

Kod spoja čelika i legura aluminijuma važnu ulogu ima i način spajanja dva dijela, tj. da li se spaja aluminijum na čelik ili čelik na aluminijum. Istraživanja su pokazala da veću nosivost ima spoj kada se čelik spaja na aluminijum, jer u tom slučaju intermetalno jedinjenje (IMC), koje nastaje pri spajanju čelika i aluminijuma, ima manju debljinu [67].



Slika 2.23. Površinske promjene i promjene dimenzija prečnika zavara spoja zavisno od jačine struje pri spajanju legure aluminijuma A5052 i čelika DP600 [36]

Istraživanje autora A. Yuksel i H. Fatih [110] pokazalo je da na statičku nosivost RSW spoja značajno utiče i tip aluminijuma za koji se spaja DP čelik, tako je nosivost RSW spoja čelika DP450 i legure aluminijuma AA6061 veća od nosivosti spoja istog DP čelika sa legurama AA1050 i AA7075.

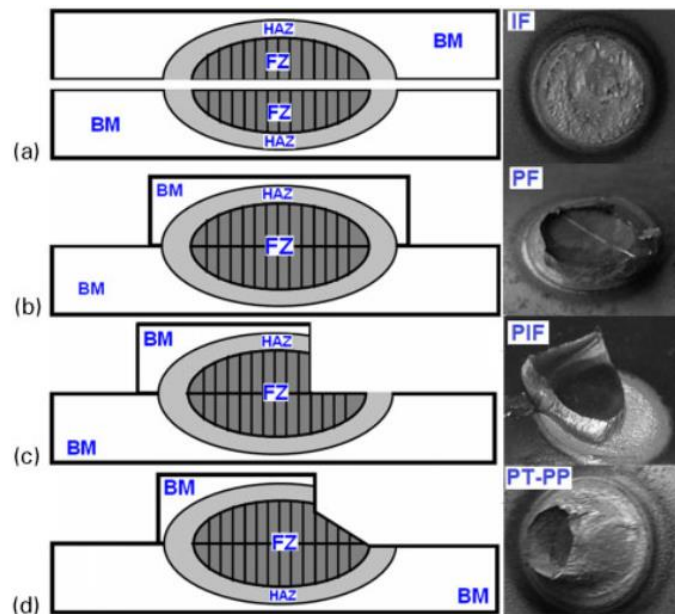
Kada je riječ o elektrootpornom tačkastom zavarivanju elementima (REW), većina do sada objavljenih studija bavila se poređenjem mehaničkih i metalografskih svojstava ove tehnologije spajanja čelika i aluminijuma sa konvencionalnim, tj. klasičnim elektrootpornim tačkastim zavarivanjem, što će biti analizirano u nastavku disertacije.

2.8.2. Modovi otkaza

Modovi otkaza, odnosno oblici obrazovanja površine loma kod elektrootpornog tačkastog zavarenog spoja, kvalitativna mjera mehaničkih performansi i indikator njihovih nosivosti i kapaciteta apsorpcije energije [111]. Mod otkaza je jedan od osnovnih indikatora

kvaliteta zavarar. Generalno, kod RSW spoja mogu se desiti četiri tipa, tj. moda otkaza: izvlačenje (PF mod), međusobna fraktura (IF mod), djelimična međusobna fraktura (PIF mod) i djelimično izvlačenje (PT-PP mod) [111, 112]. Navedeni modovi otkaza ilustrovano su prikazani na slici 2.24. U praksi, posebno u automobilskoj industriji, teži se dobijanju spoja koji će da pukne u PF modu, jer takav spoj može da apsorbuje veliku količina energije, što je od posebnog značaja pri udarima, tj. automobilskim nesrećama.

Tokom testa na zatezanje najčešća je pojava dva moda otkaza: IF i PF mod. IF mod ili međusobna fraktura identifikuje se kada dođe do loma zavarar kroz zonu fuzije (FZ). Kod PF moda do loma može doći u osnovnom materijalu (OM), zoni uticaja toplote (ZUT) ili ZUT/FZ zoni, a sve u zavisnosti od tipa osnovnog materijala.



Slika 2.24. Prikaz modova otkaza kod RSW spoja: a) međusobna fraktura (IF mod); b) izvlačenje (PF mod); c) djelimična međusobna fraktura (PIF mod); d) djelimično izvlačenje (PT – PP mod) (BM – osnovni materijal, HAZ zona uticaja toplote – ZUT, FZ – zona fuzije)

[111]

Sila koja dovodi do loma u IF modu može se izračunati prema sljedećem obrascu [87]:

$$F_{IF} = \frac{\pi}{4} d^2 \cdot \tau_{FZ} \quad (2.3)$$

gdje je: d – prečnik zavarar,

τ_{FZ} – napon smicanja u zoni fuzije.

Kod PF moda, sila koja dovodi do loma može se izračunati na osnovu sljedećeg obrasca [87]:

$$F_{PF} = \pi \cdot d \cdot t \cdot \sigma_{PFL} \quad (2.4)$$

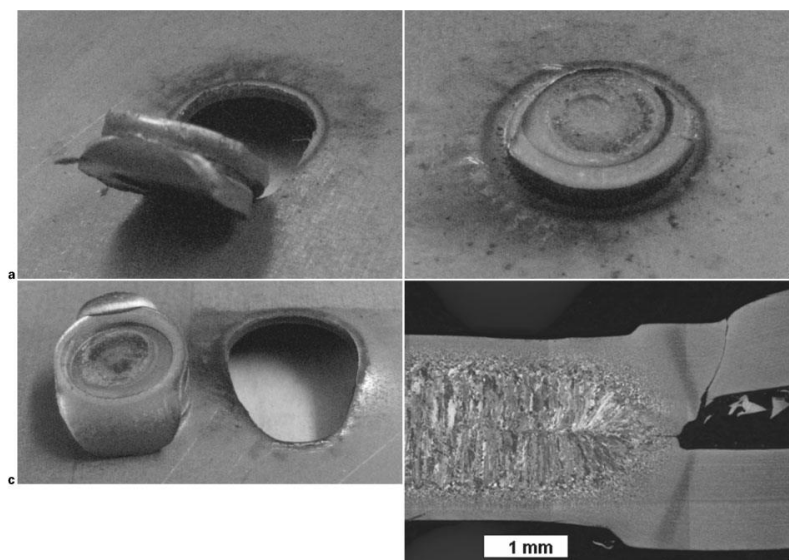
gdje je: t – debljina osnovnog materijala,

σ_{PFL} – normalni napon PF lokacije.

Inverznim putem, za poznate vrijednosti sile koja dovodi do loma, te za poznati mod otkaza moguće je odrediti napon smicanja u zoni fuzije τ_{FZ} , odnosno normalni napon PF lokacije σ_{PFL} .

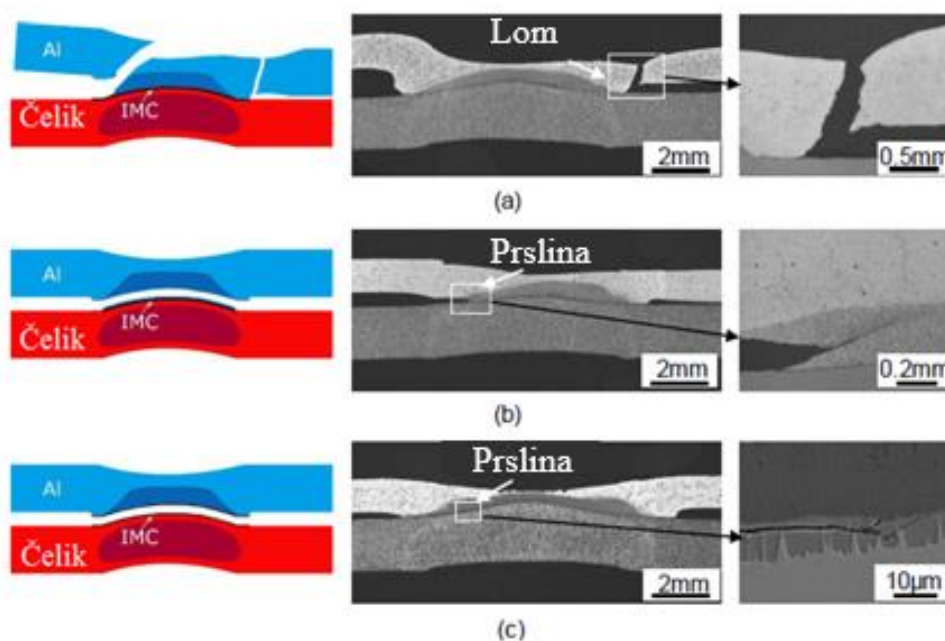
Veliki uticaj na mod otkaza ima i tvrdoća zone fuzije (FZ) i mjesta izvlačenja (PF lokacije – PFL), povećavanjem tvrdoće zone fuzije smanjuje se tendencija loma RSW spoja u IF modu, dok, s druge strane, povećanjem tvrdoće PF lokacije povećava se tendencija loma u IF modu [112, 113].

U slučaju TS testa kod spoja dva lima od DP čelika dominantni mod otkaza je PF, a mehanizam loma je lom kroz debljine materijala [114–117]. Na slici 2.25. prikazan je lom RSW spoja dva lima od čelika DP780 čelika za slučaj statičkog opterećenja (slika 2.25a), umjerenih udarnih opterećenja (2.25b) i udarnih opterećenja (2.25c), dok je na slici 2.25d prikazan poprečni presjek pomenutog RSW spoja gdje se jasno vidi primjer loma kroz materijal.



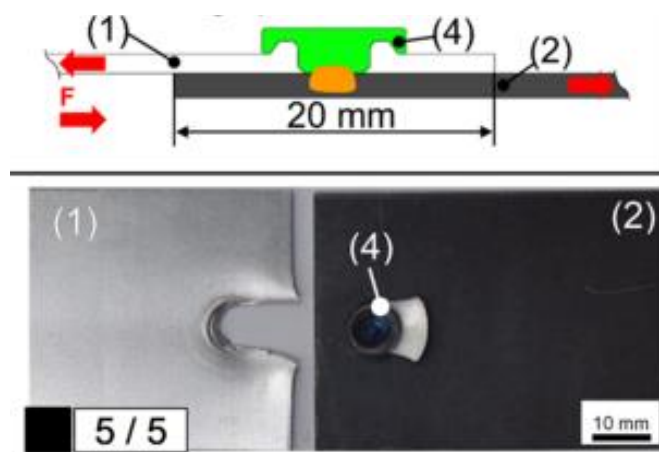
Slika 2.25. Tipični izgled otkaza RSW spoja na primjeru čelika DP780: a) za statičko opterećenje na zatezanje; b) umjereno udarno opterećenje; c) udarno opterećenje; d) poprečni presjek RSW spoja [118]

Način otkaza RSW spoja čelika i aluminijuma opterećenih na zatezanje je prikazan slici 2.26.



Slika 2.26. Prikaz tri tipična moda otkaza kod RSW spoja aluminijuma i čelika opterećenih na zatezanje (poprečni presjek): a) PF mod; b) PIF mod; c) IF mod [119]

Kada je riječ o REW spoju čelika i aluminijuma, lokacija loma je najčešće na mjestu spoja kroz aluminijum kao što je prikazano na slici 2.27. na primjeru spoja legure aluminijuma AlMg0.4Si1.2 T66 (1,2 mm debljine) i čelika 22MnB5 PH (1,5 mm debljine).



Slika 2.27. Prikaz loma REW spoja legure aluminijuma AlMg0.4Si1.2 T66 (1) i čelika 22MnB5 PH (2) opterećenog na zatezanje, za element je korišćen čelik 22MnB4 (4) [120]

2.8.3. Dinamički test na zatezanje

Zamor je najkritičniji način otkaza tačkastih zavarenih spojeva, posebno u automobilima [121, 122], stoga je neophodno bolje poznavanje ponašanja tačkastih spojeva pri dinamičkom opterećenju. Poznato je da je razaranje, prouzrokovano dinamičkim opterećenjem, izuzetno lokalizovano i da je inicijacija prslina kontrolisana amplitudama ciklične deformacije i napona u korijenu prsline. Zapremina materijala u blizini korjena zareza podvrgnuta je opterećenju koje za rezultat daje pojavu višeaksijalnih naponskih stanja pa, prema tome, treba razmotriti predviđanje ovih naponsko-deformacionih stanja kako bi se utvrdila dinamička izdržljivost tačkastog zavarenog spoja [123].

Problemi određivanja dinamičke izdržljivosti tačkastih spojeva dobijenih elektrootpornim tačkastim zavarivanjem su vrlo kompleksni, najprije zbog heterogene metalurške strukture spoja. Tokom RSW zavarivanja dolazi do stvaranja zareza između spojenih dijelova, pa je to još jedan od razloga zašto je zamor važno analizirati kod ovih zavarenih spojeva [124]. Za određivanje dinamičke izdržljivosti RSW spoja neophodno je korišćenje odgovarajućih metoda kao što su lokalni naponsko-deformacioni pristup, volumetrijski pristup, pristup zasnovan na energiji, intenzitetu napona polja (SFI), prosječnom naponu i sl [121, 125, 126]. Takođe, za određivanje dinamičke izdržljivosti razvijeni su multiaksijalni kriterijumi kao što su SWT, Glinka, KBM, FS, Crossland i VF [127].

Upravo zbog složenosti određivanja napona, tj. njegove zavisnosti od moda otkaza u praksi se kod RSW spojeva zamorna odnosno Velerova kriva prikazuje kao F-N kriva tj. prikazuje se kao zavisnost između sile F i broja ciklusa N [128]. Na slici 2.28 dat je prikaz F-N krive, gdje se sila F koja ne dovodi do loma nakon $10 \cdot 10^6$ broja promjena smatra za trajnu dinamičku izdržljivost što je propisano standardom za ispitivanje tačkastih zavarenih spojeva BAS EN ISO 14324:2004 [129].

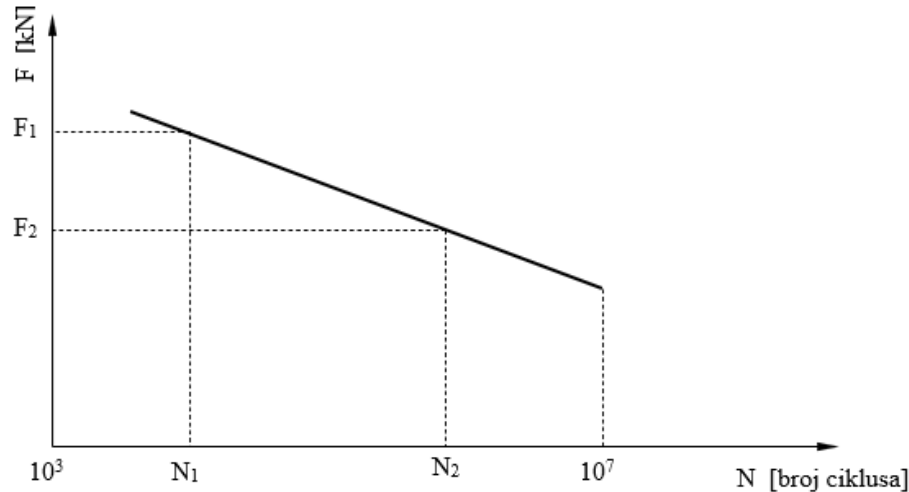
Zavisnost između sile F_1 i broja ciklusa do otkaza N_1 , te sile F_2 i broja ciklusa do otkaza N_2 može se zapisati sljedećom relacijom:

$$F_1^m \cdot N_1 = F_2^m \cdot N_2 \quad (2.5)$$

gdje m predstavlja nagib Velerove krive.

Shodno prethodnom, eksponent m se može izračunati na sljedeći način:

$$m = \frac{\log N_2 - \log N_1}{\log F_1 - \log F_2} \quad (2.6)$$



Slika 2.28: Prikaz Velerove krive, tj. F-N krive

Nagib Velerove krive može se definisati i preko koeficijenta b koji je poznat pod nazivom Basquin-ov (Baskuinov) nagib a dobija se na osnovu sljedećeg obrasca:

$$b = \frac{-(\log S_1 - \log S_2)}{(\log N_2 - \log N_1)} \quad (2.7)$$

Veza između nagiba m i b može se definisati sljedećim obrascem:

$$b = -\frac{1}{m} \quad (2.8)$$

Studije iz dinamičke analize RSW spoja legure aluminijuma i DP čelika su vrlo ograničene. Dosadašnje analize su obično bazirane na analizi spoja legura aluminijuma i drugih čelika (čelika koji nisu DP čelici) [105, 130, 131], zatim na dinamičku analizu RSW spoja DP čelika i drugih čelika [132, 133] ili na dinamičku analizu dva DP čelika [90, 134].

Poređenje rezultata dinamičkog ispitivanja RSW spoja dva lima od legure aluminijuma AA6022-T4 sa RSW spojem legure aluminijuma AA6022-T4 i IF čelika je dat u studiji autora J. Kang i dr. [135]. Testiranje je sprovedeno sa koeficijentom asimetrije ciklusa opterećenja $R=0,1$ pri 40 Hz. RSW spoj AA6022-T4/IF čelika pokazao je veću dinamičku izdržljivost u odnosu na RSW spoj AA6022-T4/AA6022-T4.

P. Banerjee i drugi [90] istraživali su uticaj struje i vremena zavarivanja na dinamičku izdržljivost RSW spoja dva DP čelika. Dva lima od čelika DP590 zavareni su sa

strujom od 7 kA i vremenom zavarivanja od 225 ms (P1), te sa strujom zavarivanja od 6,5 kA i vremenom zavarivanja od 150 ms (P2). Ovako pripremljeni uzorci podvrgnuti su TS testu sa dinamičkom silom od 50 kN sa koeficijentom asimetrije ciklusa $R=0,1$ i rangom frekvencije od 40 do 400 Hz. RSW spoj dobijen parametrima zavarivanja P1 i pri većoj vrijednosti sile može da izdrži veći broj ciklusa promjene opterećenja od RSW spoja dobijenog parametrima zavarivanja P2. Treba napomenuti da je kod ovog ispitivanja RSW spoja, dobijenog parametrima zavarivanja P1, došlo do loma u PF modu dok je kod RSW spoja dobijenog parametrima zavarivanja P2, lom bio u IF modu.

L. Zhanxiang i drugi [35] istraživali su ponašanje REW i RSW spoja čelika DP780 i legure aluminijuma 6061-T6 pri zamornom opterećenju. Spojevi dobijeni REW postupkom pokazali su bolja svojstva usljed zamornih opterećenja u odnosu na spojeve dobijene RSW postupkom. Način loma kod obje vrste spojeva zavisio je od nivoa opterećenja. Kod visokih nivoa opterećenja, lom REW spojeva bio je u PF modu (međusobno izvlačenje), dok je kod RSW spojeva lom bio u IF modu (međusobna fraktura). S druge strane, kod nižih nivoa opterećenja, kod oba spoja lom je bio kroz osnovni materijal u neposrednoj blizini zavara. Ispitivanja u ovom radu su urađena sa koeficijentom asimetrije ciklusa od $R=0,1$ i frekvencijom između 10 i 30 Hz na mašini MTS 810.

Heidrich D i drugi [136] u svom istraživanju bavili su se poređenjem dinamičke izdržljivosti spojeva dobijenih elektrootpornim tačkastim zavarivanjem sa zakovicom (RRSW), koji je veoma sličan postupku elektrootpornog tačkastog zavarivanja elementima, i samoproduirujućim zakovicama (SPR). U tu svrhu za ovu su studiju odabrani materijali čelika CR340 od 0,8 mm debljine i Al 6016 od 1,0 mm debljine, te, takođe, kombinacija istih materijala ali debljine čelika od 1,5 mm. Zakovica koja je korišćena za ovaj eksperiment bila je 6,5 mm debljine i nominalnog prečnika 5,6 mm, izrađena od čelika S355. Zamorni test urađen je sa $R=0$ za četiri različite vrste uzoraka: (a) pljosnate epruvete sa jednim spojem i preklopom od 50 mm, te ispitivanjem sa frekvencijom od 10 Hz, (b) pljosnate epruvete sa dva spoja i preklopom od 50 mm, takođe ispitivane frekvencijom od 10 Hz, (c) H-epruvete sa 10 spojeva opterećene na smicanje, ispitivane sa frekvencijom u rasponu od 83 do 95 Hz i (d) H-epruvete sa 10 spojeva opterećene na zatezanje ispitivane sa frekvencijom u rasponu od 34 do 38 Hz. Studija ovih autora pokazala je da RRSW ima bolja statička i dinamička svojstva nego SPR za debljinu čeličnog lima od 1,5 mm, dok to nije slučaj za spoj gdje je debljina čeličnog lima bila 0,8 mm.

2.8.4. Metalografska ispitivanja

Pri metalografskom ispitivanju spojeva utvrđuju se makrostrukturna i mikrostrukturna svojstva zavarenih spojeva.

2.8.4.1. Makrostruktura zavarenih spojeva

Način formiranja zavara kod RSW spoja određuje se eksperimentalno ili numerički. Efekat formiranja tačke kod RSW spoja često je istraživao primjenom MKE analize, koja je u posljednje vrijeme značajno privukla pažnju istraživača [104, 136–140].

Već je rečeno da se, zavisno o jačini struje i vremenu zavarivanja, mogu dobiti različite veličine i oblici zavara (slika 2.6). Dva karakteristična oblika zavara su oblik elipse i pravougaonika.

Izgled tačkastog zavara dva lima od DP čelika u poprečnom presjeku zavisi od parametara zavarivanja i elektroda kojima se vrši zavarivanje. Autori X. Wan i drugi [141] istraživali su uticaj struje zavarivanja na oblik zavara kod čelika DP600, te zaključili da zavar izgleda kao ravna elipsa pri nižim strujama zavarivanja, kao što su 6 kA i 8 kA. Zona fuzije postaje veća i u horizontalnom i u vertikalnom smjeru sa povećanjem struje, kako se struja zavarivanja povećava sa 10 kA na 12 kA, ali u tom slučaju brzina rasta zavara se smanjivala zbog bržeg odvođenja toplote. B. Wang i drugi [142] utvrdili su da zavar dva lima od čelika DP590, dobijen elektrootpornim tačkastim zavarivanjem, ima oblik ravne elipse gdje glavna osa elipse predstavlja prečnik zavara d , dok mala osa elipse predstavlja debljinu zavara.

Takođe, dokazano je da prečnik zavara RSW spoja kao primarni faktor utiče na vrijednost maksimalne sile kidanja, količinu apsorbirane energije, te, na kraju, i na tip, tj. mod otkaza spoja [143]. Različiti industrijski standardi preporučuju optimalnu ili minimalnu veličinu prečnika zavara RSW spoja koja će omogućiti nastajanje loma u PF modu. Na primjer, Američko zavarivačko društvo, Društvo automobilske inženjerstva (SAE), Američki nacionalni institut za standarde (ANSI) i Međunarodna organizacija za standardizaciju ISO (standard BAS EN ISO 14270:2017 [143]), zajedno preporučuju da se prečnik zavara RSW spoja d računa po sljedećem obrascu:

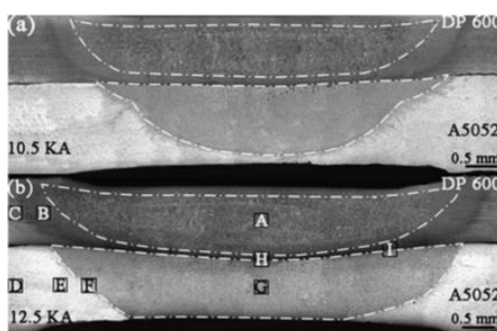
$$d = 4 \cdot \sqrt{t} \quad (2.9)$$

gdje je t [mm] debljina materijala koji se spaja.

Prethodna preporuka, prema analizi autora F. Nikoosohbat i drugih [144], nije dovoljna da garantuje lom u PF modu kada je riječ o elektrootpornom tačkastom zavarivanju limova od čelika DP980. S druge strane, veći odnos $(H_{max})_{FZ}$ (maksimalna tvrdoća zone fuzije (FZ)) i $(H_{min})_{BM}$ (minimalna tvrdoća osnovnog materijala) povećava mogućnost loma u PF modu, pa se kritična vrijednost prečnika zavara RSW spoja može izračunati pomoću sljedećeg obrasca [145]:

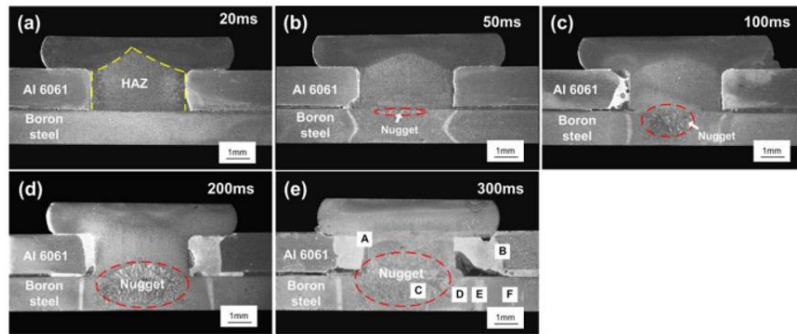
$$d_c = 0,53 \cdot t^{3,22} + 8,48 \left(\frac{(H_{max})_{FZ}}{(H_{min})_{BM}} \right)^{-1,24} \quad (2.10)$$

Proces formiranja zavara kod spoja DP čelika i aluminijuma može se opisati kroz četiri dijela. Prvo, veći dio toplote za zavarivanje stvoren kontaktnim otporom između površine metala i elektroda se odvodi zahvaljujući prisilnom hlađenju vodom koja teče u bakarnoj elektrodi. Drugo, većina toplote, koju generiše unutrašnji otpor DP čelika, apsorbuje se kako bi se topio čelik i formirala tačka. Treće, većina toplote proizvedene kontaktnim otporom između legure aluminijuma i DP čelika koristi se za formiranje IMC slojeva i konduktuje se ka strani aluminijumske legure zbog dva do tri puta veće toplotne provodljivosti aluminijuma od čelika. Četvrto, toplota nastala zbog međusobnog kontaktnog otpora lako aluminijumsku leguru vezuje u cjelinu, prvenstveno zbog niže tačke topljenja Al (oko 660 ° C). Na slici 2.29. prikazan je izgled zavara pri spajanju A5052 i DP600 sa različitim veličinama struje zavarivanja [36].



Slika 2.29. Prikaz poprečnog presjeka RSW spoja A5052 / DP600 zavaren sa strujom zavarivanja od: a) 10,5 kA; b) 12,5 kA [36]

Izgled zavara kod elektrootpornog tačkastog zavarivanja elementima (REW) zavisi od svojstava materijala, prvenstveno elementa, zatim od parametara zavarivanja kao i oblika i tipa elektrode. [47] L. Zhanxiang i drugi [47] u svojoj studiji dali su prikaz formiranja zavara kod REW spoja čelika 22MnMoB i legure aluminijuma 6061 u zavisnosti od vremena zavarivanja, što je prikazano na slici 2.30.



Slika 2.30. Način formiranja zavara kod REW procesa pri spajanju čelika, spoja čelika 22MnMoB i legure aluminijuma 6061 u zavisnosti od vremena zavarivanja [27]

Sa slike se može uočiti da je zavar asimetričan, odnosno da se veći dio uvijek, bez obzira na vrijeme zavarivanja, nalazio na strani čelika 22MnMoB.

2.8.4.2. Mikrostruktura zavarenih spojeva

Mikrostruktura tačkastog zavarenog spoja ima važnu ulogu jer se na osnovu mikrostrukture može pronaći korelacija između mehaničkih svojstava i modova otkaza. Da bi se razumjeli učinci mikrostrukture na mehanička svojstva RSW, važno je prepoznati mikrostrukturne razlike na različitim područjima spoja, a to uključuje osnovni metal (OM), zonu uticaja toplote (ZUT) i zonu fuzije (FZ) [118, 91]. Od mikrostrukture samog zavara direktno zavisi i kvalitet kompletnog spoja.

A. Chabok i drugi [31] prikazali su u svojoj studiji da kod jednoimpulsnog RSW zavarivanja čelika DP1000 zavar pokazuje tipičnu mikrostrukturu zone fuzije (FZ) sa stubastim zrnima koja su rezultat brzog hlađenja kod RSW-a. S druge strane, u slučaju dvostrukog impulsnog zavara, početna FZ struktura podijeljena je na dvije zone: unutrašnji dio sastavljen od stubastih zrna, a spoljašnji sloj ima ravnoosnu mikrostrukturu. Autori Y. B. Li i drugi [146] istražujući mikrostrukturu RSW spoja limova od čelika DP590 došli su do sljedećih zaključaka: (a) mikrostruktura osnovnog materijala sastoji se od oko 15% tvrdog martenzit/beinita i od oko 85% duktilnog ferita; (b) FZ zona se sastoji od martenzita s vrlo malom količinom igličastog ferita, a austenit, koji nastaje nakon solidifikacije, zbog brzog hlađenja pretvara se u martenzit i (c) zbog gradijenta temperature ZUT-a, mikrostruktura ove zone veoma je složena. Razlikuje se krupnozrnasta zona (CGHAZ), fino-zrnasta zona (FGHAZ), međukritična zona (ICHAZ) i subkritična zona (SCHAZ). I. A. Soomro i drugi [147] su zonu uticaja toplote kod RSW spoja čelika DP590 podijelili na tri podzone: krupnozrnasta zona (CGHAZ), fino-zrnasta zona (FGHAZ) i subkritična zona (SCHAZ). Kada je riječ o ZUT-u, F. Badkoobeh [148] i drugi utvrdili su da se i ova zona sastoji pretežno od

martenzita sa morfologijom letvica. C. Rajarajan i drugi [149] utvrdili su da je struja zavarivanja od 5,5 kA optimalna pri RSW zavarivanju DP čelika, kada je riječ o formiranju zavara sa maksimalnom penetracijom i minimalnom veličinom ZUT-a.

C. Jianbin i drugi [36] pri analizi mikrostrukture RSW spoja čelika DP600 i legure aluminijuma A5052 zaključili su da zona fuzije (FZ) ima pretežno martenzitnu strukturu, dok zona uticaja toplote (ZUT) ima feritnu i martenzitnu strukturu. Proces solidifikacije FZ zone prvo vrši transformaciju ferita u δ -Fe, zatim u austenit, i na kraju se dobija martenzit, čiji kristali imaju oblik tankih letvica. U regionu ZUT-a unos toplote je nedovoljan za topljenje metala, tako da se smatra da je mikrostruktura u ZUT-u generisana transformacijom čvrste faze austenita u martenzit. Shodno tome, ZUT je feritne i martenzitne strukture. U poređenju sa martenzitom u FZ, zrna veličine martenzita u ZUT-u su manja.

Mikrostruktura REW spoja čelika i legura aluminijuma je vrlo kompleksna, prvenstveno zbog postojanja više karakterističnih zona i to: zone fuzije na strani čelika koji se spaja, zone fuzije čeličnog elementa, zone uticaja toplote na strani čelika koji se spaja, zone uticaja toplote čeličnog elementa, prelazne zone između čelika i aluminijuma, te prelazne zone između elementa i čelika koji se spaja. Kao i kod klasičnog RSW zavarivanja, i kod REW postupka mogu se razlikovati različite podzone ZUT-a, zavisno od veličine zrna martenzita [47, 150]. Kada je riječ o FZ zoni, ona je pretežno martenzitne strukture, sa primjesama beinita i/ili ferita.

2.8.5. Ispitivanje tvrdoće zavara

Na osnovu studije mikrostrukture, u svakoj zoni zavarenog spoja definiše se nekoliko tačaka za ispitivanje tvrdoće kako bi se odredilo najslabije područje, odnosno kako bi se dobio profil tvrdoće zavarenog spoja. S obzirom na to da tvrdoća direktno zavisi od mikrostrukture spoja, koja je pak u zavisnosti od parametara zavarivanja i tipa materijala koji se spajaju, zaključuje se da i na tvrdoću zavara utiču parametri zavarivanja i svojstva osnovnog materijala.

RSW zavar dva lima od čelika DP800 ima visoku vrijednost tvrdoće, oko 584 [Hv] zbog formiranog martenzita u zoni fuzije, zaključak je autora C. Rajarajan i drugi [151]. Mikrotvrdoća FZ i ZUT-a na čeličnoj strani za RSW spoj legure aluminijuma A5052 i dvofaznog čelika DP600, veća je od mikrotvrdoće osnovnog materijala. Visoka mikrotvrdoća FZ u poređenju sa OM objašnjava se time što je mikrostruktura FZ uglavnom martenzitna.

ZUT sadrži ferit i martenzit koji imaju manju veličinu zrna u odnosu na martenzit u FZ-u, pa je stoga veće tvrdoće ZUT-a nego FZ-a. Slično tome, veličina zrna ferita u ZUT-u manja je nego kod OM, što dovodi do veće mikrotvrdoće ZUT-a od OM-a. Ako se posmatra mikrotvrdoća sa strane aluminijuma, onda se može zaključiti da je mikrotvrdoća FZ i ZUT-a manja od mikrotvrdoće osnovnog materijala [36].

Raspored mikrotvrdoće REW i RSW spojeva čelika DP780 i legure aluminijuma 6061-T6 dat je u studiji autora L. Zhanxiang i drugi [35]. Mikrotvrdoća osnovnog materijala elementa je ~ 185 HV, dok je mikrotvrdoća na vrhu elementa znatno veća od ove vrijednosti, jer je elektroda za vrijeme zavarivanja udarila čelični element i tako je on kaljen u radu. Mikrotvrdoća ZUT-a na strani elementa je veća od mikrotvrdoće osnovnog materijala i povećava se sa smanjenjem rastojanja od središta zavara. Visoka mikrotvrdoća (prosječna vrijednost: ~ 402 Hv) zone fuzije (FZ) pripisuje se formiranju martenzitne strukture čiji su kristali u obliku letvica. Štaviše, mikrotvrdoća blizu čelične strane DP je nešto veća od mikrotvrdoće u blizini elementa, jer je ekvivalent ugljenika (CE) DP čelika veći od materijala zakovice. Raspodjela mikrotvrdoće različitih regiona u RSW spoju je prilično slična onom u REW spoju. Prosječna tvrdoća čeličnog dijela zavara kod RSW spoja (418 HV) je veća u odnosu na čeličnu grupu REW spoja, a razlog tome viši ekvivalent ugljenika (CE) kod RSW spoja u poređenju sa onim u REW spoju materijala.

Poznato je da ugljenik kao stabilizator austenita pospješuje formiranje martenzita kao i da povećava tvrdoću istog. Korišćenje sadržaja ugljenika s ciljem predviđanja martenzitne tvrdoće bilo je održivo za tradicionalne čelike sa siromašnom hemijskom strukturom, koji su uglavnom sadržavali samo željezo i ugljenik, te imali mali sadržaj drugih legirajućih elemenata. Međutim, Yurioka i dr. [152] razvili su obrazac koji omogućava da se na osnovu sadržaja ugljenika odredi vrijednost martenzitne tvrdoće kod elektrootpornog tačkastog zavarivanja:

$$H_M = 884C(1 - 0,03C^2) + 294 \quad (2.11)$$

gdje je C sadržaj ugljenika u %.

Takođe, M. I. Khan i dr. [153] dali su obrazac koji pored sadržaja ugljenika, uzima u obzir i druge legirajuće elemente koji utiču na tvrdoću martenzita, odnosno koji omogućavaju da se na osnovu Yuriokaovog ekvivalenta ugljenika predvidi tvrdoća zone fuzije:

$$H_{FZ} = 630 \cdot CE_Y + 188 \quad (2.12)$$

gdje je CE_Y Yuriokaovog ekvivalenta ugljenika i određuje je prema sljedećem obrascu:

$$CE_Y = C + A(C) \cdot \left(5B + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr + Mo + Nb + V}{5} \right) \quad (2.13)$$

gdje su: C sadržaj ugljenika u %;

$A(C)$ – faktor korekcije;

$B, Si, Mn, Cu, Ni, Cr, Mo, Nb, V$ – legirajući elementi u %.

Faktor korekcije $A(C)$ moguće je odrediti na osnovu sljedećeg obrasca:

$$A(C) = 0,75 + 0,25 \cdot \tanh[20 \cdot (C - 0,12)] \quad (2.14)$$

2.8.6. Poređenje mehaničkih svojstava tačkastih zavarenih spojeva

U tabeli 2.3. dat je uporedni pregled mehaničkih svojstava tačkastog zavarenog spoja čelika i aluminijuma, dobijenog elektrootpornim tačkastim zavarivanjem (RSW) i elektrootpornim tačkastim zavarivanjem elementima (REW), urađen na osnovu trenutno dostupnih studija.

Tabela 2.3. Pregled mehaničkih svojstava RSW i REW spoja čelika i legura aluminijuma

Autori	Materijal	Mate. eleme. za REW	Parametri zavarivanja		Mehanička svojstva		Zaključci
			RSW	REW	RSW	REW	
G. Meschut i dr. [79] (2014)	AW-6016 (1,5 mm)/ 22MnB5 (2 mm)	S355	Nije naznačeno	Nije naznačeno	Nije naznačeno	$F = 4,5-5$ kN	REW tehnologija je kombinacija mehaničkog i termičkog spajanja i ima niz prednosti u odnosu na čisto termičke ili čisto mehaničke procese.
R. Qiu i dr. [48] (2015)	A6061(1 mm)/ čelik (1 mm)	čelik	$I=9-23$ kA $T=10$ ciklus $F=4$ kN		$F=2,8$ kN za $I=21$ kA	$F=3,85$ kN za $I=21$ kA	REW je efikasnija metoda spajanja u odnosu na RSW.

Tabela 2.3. Nastavak

Autori	Materijal	Mate. eleme. za REW	Parametri zavarivanja		Mehanička svojstva		Zaključci
			RSW	REW	RSW	REW	
L. Zhanx. dr. [47] (2016)	A6061-T6 (2 mm) / 22MnMo B (1,8 mm)	Q235	$I=12-20$ kA $T=300$ ms $F=3,6$ kN	$I=6-10$ kA $T=300$ ms $F=3,6$ kN	$F=957$ N $E=0,09$ J	$F=7087$ N $E=11.38$ J	Lom RSW spoja je bio u IF modu dok je kod REW zavisno od struje bio u IF i PF modu.
M. Meinhardt i dr. [154] (2019)	CR240LA / Al6-Out (1 mm)	CR24 0LA	Nije naznačeno	Nije naznačeno	Nije naznačeno	$F=4100$ N	Maksimalna sila kidanja postignuta je sa aluminijumom Al5-Stud debljine 1,1 mm, a lom kod uzoraka bio je u PF modu.
	CR240LA / Al5-Std (0,85 mm)	CR24 0LA				$F=3200$ N	
	CR240LA / Al5-Std (1,1 mm)	CR24 0LA				$F=4500$ N	
G. Meschut [155] (2017)	EN-AW 5182 (2.0 mm) / HDT1200 MZE50/ 50 (1.5 mm)	G10-5-R14-SH2,2	Nije naznačeno	$I=3,5 - 8$ kA $T=380$ ms $F=3$ kN	Nije naznačeno	$F=4,9$ kN	Kod REW spoja premaz od Zn nije uticao na nosivost. U kombinaciji sa lijepkom kod REW spoja je značajno povećana nosivost.
L. Zhanx. [35] (2017)	Al 6061 (2 mm) / DP780 (1,4 mm)	Q235	$I=12-16$ kA $T=200$ ms $F=3,6$ kN	$I=6-10$ kA $T=300$ [ms] $F=3,6$ kN	$F=4332$ N $E= 2.9$ J $FZ= 420$ HV $F_f=900$ N za $I=14$ kA	$F=7368$ N $E= 18.9$ J $FZ= 418$ HV $F_f=1800$] za $I=7$ kA	REW spoj ima značajno bolja integralna mehanička svojstva u odnosu na RSW spoj.
D. Heidrich i dr. [136] (2021)	CR340 (0,8 mm) / Al 6016 (1 mm)	S355	Nije naznačeno	$I=11$ kN $T=150$ mm $F=2$ kN	Nije naznačeno	$F=2,34$ kN $F_f \approx 300$ N pri 10^6	Pri dinamičkom testu je došlo d loma u PF modu.
	CR340 (1,5 mm) / Al 6016 (1 mm)					$F=2,1$ kN $F_f \approx 600$ N pri 10^6	

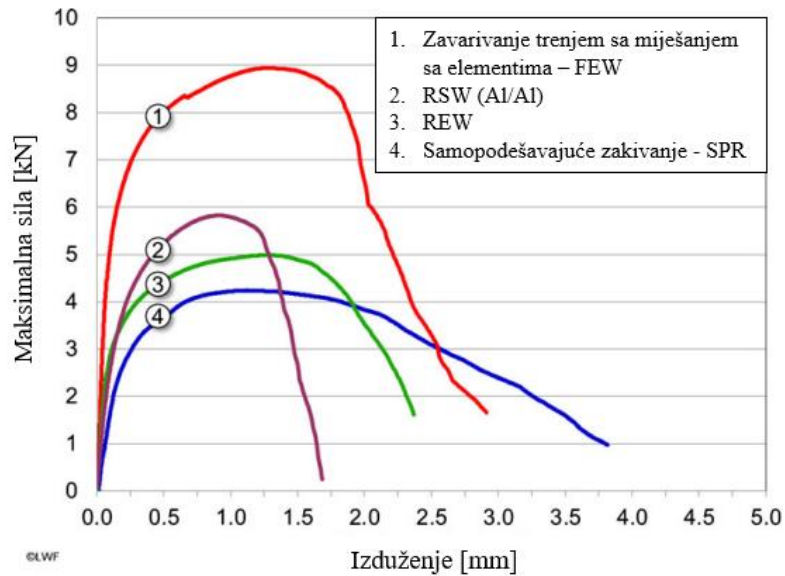
Tabela 2.3. Nastavak

Autori	Materijal	Mate. eleme. za REW	Parametri zavarivanja		Mehanička svojstva		Zaključci
			RSW	REW	RSW	REW	
S. Niu i dr. [156] (2021)	HS1300 T (1,55 mm) / AA6061-T6 (1 mm)	SWRCH16A	Nije naznačeno	$I=7-9$ kA $T=200$ ms	Nije naznačeno	$F=4,9$ kN	Kod REW spoja došlo je do loma u IF modu za uzorak zavaren sa strujom 7 kA, dok je za 8 i 9 kA mod otkaza bio PF.

Na osnovu predstavljenih istraživanja u tabeli 2.3. dolazi se do zaključka da je REW tehnologija spajanja značajno pogodnija za spajanje čelika i legura aluminijuma u odnosu na konvencionalnu RSW tehnologiju spajanja. Kod svih predstavljenih radova koji su se bavili poređenjem mehaničkih svojstava pokazana su bolja integralna svojstva REW tehnologije. S druge strane, iz tabele se može zaključiti da je struja parametar koji je bio varijabilan u svim studijama, te se tako nameće zaključak da je struja zavarivanja parametar koji ima najveći uticaj na mehanička svojstva.

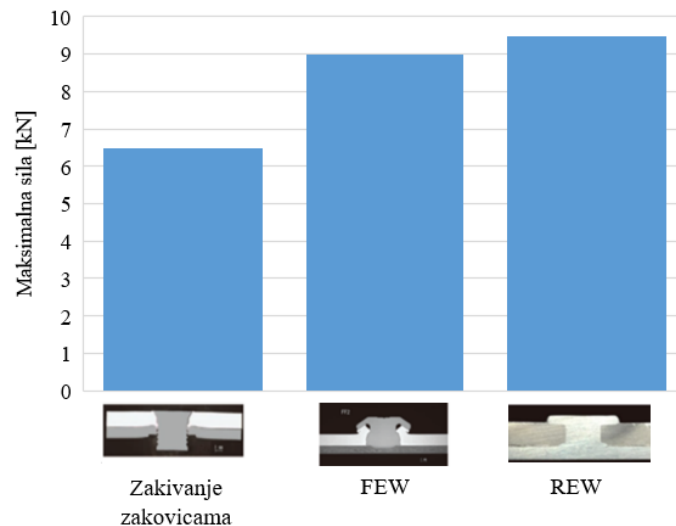
Prednost REW tehnologije u odnosu na RSW tehnologiju je vidljiva i kod spajanja legura magnezijuma i čelika [46, 150]. Primjena REW tehnologije moguća je i kod spajanja polimernih materijala sa čelicima [157–159], te pri spajanju legura aluminijuma i legura titana [160].

G. Meschut i drugi [155] poredili su REW i FEW (zavarivanje trenjem sa miješanjem sa elementom) tehnologije spajanja, te zaključili da bolju zateznu čvrstoću ima FEW spoj u odnosu na REW spoj, kada je riječ o spajanju čelika HDT1200M ZE50/50 (1.5 mm) i legure aluminijuma EN-AW5182 (2.0 mm). Na slici 2.31. prikazan je dijagram sila – izduženja za različite spojeve legure aluminijuma AW-6016 (1,5 mm) i čelika 22MnB5 (2 mm), predstavljen u studiji autora G. Meschut i drugi [79]. Sa slike se jasno uočava da je najveću vrijednost sile kidanja pri ispitivanju na zatezanje imao spoj dobijen FEW tehnologijom spajanja, dok je SPR imao najmanju vrijednost sile. Kod REW spoj vrijednosti sile je nešto manji, dok je vrijednost izduženja veća od RSW spoja dva lima od aluminijuma.



Slika 2.31. Dijagram sila – izduženje za spojeve legure aluminijuma AW-6016 (1,5 mm) i čelika 22MnB5 (2 mm) za različite tehnologije spajanja [79]

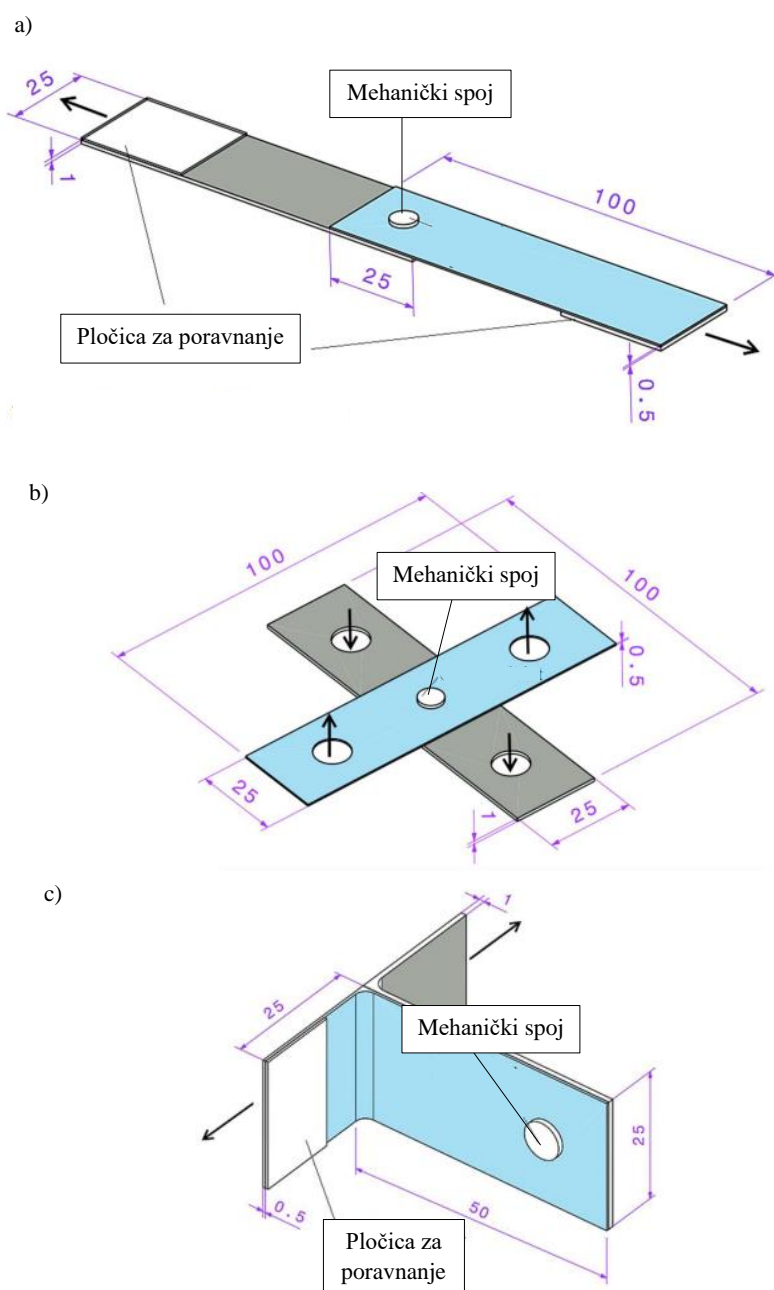
Na osnovu rezultata predstavljenih u studiji autora Junya Naito i Reiichi Suzuki [161] na slici 2.32. dat je dijagram poređenja maksimalne sile dobijene pri ispitivanju na zatezanje za tri tehnologije spajanja čelika DP980 i legure aluminijuma A6022. Sa dijagrama se može vidjeti da, u ovom slučaju, spoj dobijen REW tehnologijom ima bolju zateznu čvrstoću u odnosu na FEW spajanje i zakivanje zakovicama.



Slika 2.32. Dijagram poređenja maksimalne sile dobijene pri ispitivanju na zatezanje za tri tehnologije spajanja čelika DP980 i legure aluminijuma A6022 (prilagođeno prema [161])

2.9. KARAKTERIZACIJA PONAŠANJA MEHANIČKIH I METALOGRAFSKIH SVOJSTAVA SPOJA DP ČELIKA I LEGURA ALUMINIJUMA DOBIJENIH ZAKIVANJEM BEZ ZAKOVICA (MEHANIČKO SPAJANJE)

Kao i kod tačkastih zavarenih spojeva, kod mehaničkih spojeva generalno, a tako i kod spoja dobijenog zakivanjem bez zakovica s ciljem utvrđivanja mehaničkih svojstava potrebno je izvršiti sljedeća testiranja: statički i dinamički test na zatezanje (TS), unakrsni test na zatezanje (CT) i L test na zatezanje (CP) [162]. Primjer datih testova prikazan je na slici 2.33.



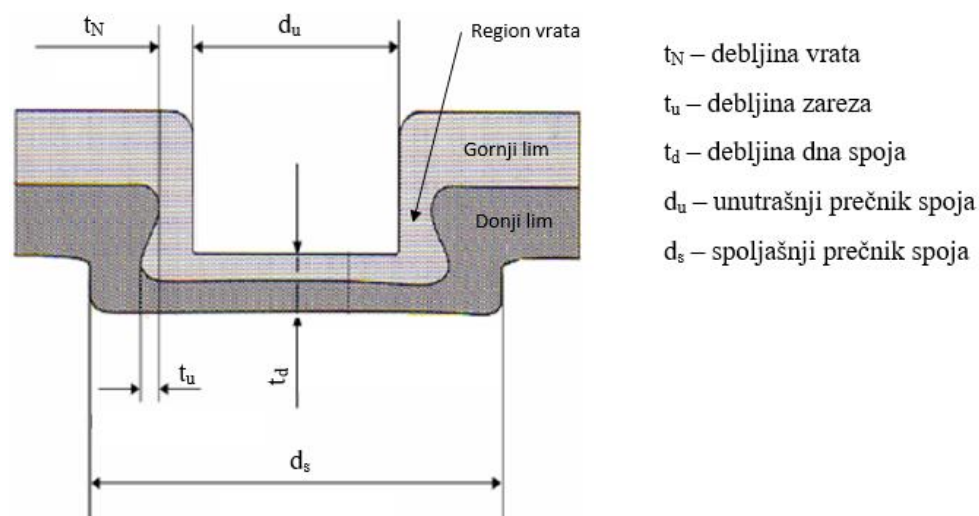
Slika 2.33. Primjer ispitivanja mehaničkih svojstava MC spoja:(a) test na zatezanje (TS),
(b) unakrsni test na zatezanje (CT) (c) L test na zatezanje (CP) [162]

Spajanje zakivanjem bez zakovica je postupak koji ne unosi toplotu u spoj pa tako ne dolazi do promjene u strukturi materijala koji se spajaju, što znači da ispitivanje mikrostrukture i tvrdoće spoja nije neophodno. Međutim, važne karakteristike kvaliteta mehaničkog spoja dobijenog zakivanjem bez zakovica su dimenzije spoja u presjeku dobijene makrostrukturnim ispitivanjem [163].

2.9.1. Makrostruktura spoja

Zakivanje bez zakovica je proces hladnog oblikovanja kojim se dva lima od istog ili različitog materijala spajaju plastičnim deformisanjem, a zahvaljujući i obliku žiga i matrice dobija se tzv. isprepletena struktura spoja. Dimenzije spoja u poprečnom presjeku se određuju makrostrukturnom analizom.

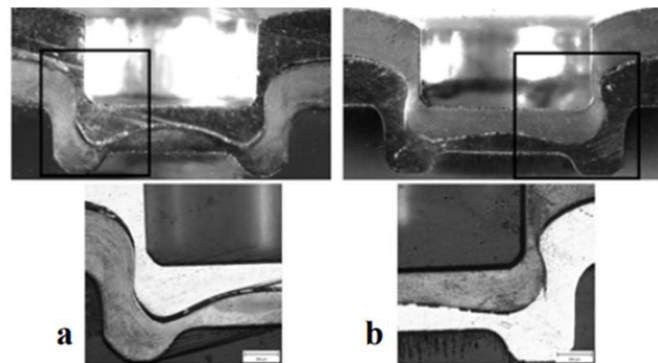
Na slici 2.34. dat je prikaz poprečnog presjeka spoja dobijenog zakivanjem bez zakovica sa naznačenim karakterističnim dimenzijama. Generalno posmatrano, najveći uticaj na nosivost spoja imaju debljina vrata (t_N) i debljina zarezata (t_u) [164].



Slika 2.34. Prikaz poprečnog presjeka spoja dobijenog zakivanjem bez zakovica sa naznačenim karakterističnim dimenzijama [165]

S. Jónás i drugi [166] su istraživali spajanje zakivanjem bez zakovica za spoj legure aluminijuma Al6082 (1 mm) i čelika DP600 (1 mm) i zaključili da je povoljniji slučaj kada je čelik DP sa gornje strane, te kada je debljina dna (t_d) između 0,45 i 0,5 mm. Ľuboš Kaščák i Emil Spišák [167] istraživali su mogućnosti spajanja čelika DP600 (1 mm) sa legurama aluminijuma AW 5754 (1 mm) i AW 6082 (1 mm), te, takođe, zaključili da je povoljniji slučaj kada je gornji lim od čelika DP600 pri spajanju sa legurom aluminijuma AW 6082, dok spoj

čelika DP600 i legure aluminijuma AW 5754 nisu uspjeli izvesti. Na slici 2.35. dat je prikaz poprečnog presjeka spoja legure aluminijuma AW 6082 i čelika DP600.



Slika 2.35. Prikaz poprečnog presjeka spoja dobijenog zakivanjem bez zakovica:
(a) AW 6082/DP600; (b) DP600/ AW 6082 [167]

2.9.2. Statički test na zatezanje

Kao i kod RSW odnosno REW spoja, zbog svoje jednostavnosti, mehanička svojstva MC spoja takođe se najčešće ispituju statičkim testom na zatezanje. Podaci koji se dobiju ovim ispitivanjem očitavaju se sa dijagrama sila – deformacija (slika 2.22), a to su: maksimalna sila F_{max} , izduženje pri maksimalnoj sili l_{max} i snaga otkaza pri maksimalnoj sili, odnosno količina apsorbovane energije E_{max} .

Brojni autori istražili su statičku nosivost MC spoja DP čelika i legura aluminijuma koristeći razne testove [166, 167, 168–171]. U studiji autora Yanli Song i drugi [169] predstavljeno je ispitivanje statičke nosivosti MC spoja čelika DP590 (1,6 mm) i legure aluminijuma AA6061-T6 (1,5 mm) koristeći sva tri testa (TS, CT, CP) predstavljena na slici 2.33, a rezultati prikazani u studiji pokazuju da spoj ispitan testom na zatezanje ima najveću nosivost (sila kidanja 4354 N) dok spoj ispitan pomoću L testa (CP test) ima najmanju nosivost (sila kidanja 624 N). Sličan zaključak može se izvući iz studije autora Szabolcs Jónás i drugi [166] koji su MC spoj čelika DP600 i legure aluminijuma Al6082 ispitivali pomoću TS i CS testa. Pri ispitivanju na zatezanja (TS test) MC spoj DP600/Al6082 izdržao je silu od 1,4 kN, dok je spoj Al6082/DP600 izdržao silu od 0,53 kN. S druge strane, pri CT testu spoj DP 600/Al6082 izdržao je silu od 0,43 kN, dok je spoj Al6082/DP600 izdržao silu od 0,548 kN. Ovako dobijeni rezultati pokazuju da na statičku nosivost pri ispitivanju na zatezanje utiče položaj materijala pri spajanju, tj. da li je gornji lim od DP čelika ili legure aluminijuma.

Kada je riječ o testu na zatezanje, autori Luboš Kaščák i Emil Spišák [167] također su dokazali su da veću nosivosti (približno 33%) ima MC spoj čelika DP600 i legure aluminijuma AW 6082 kada je gornji lim od čelika DP. Sebastian Wiesenmayer i drugi [168] ispitivali su na zatezanja MC spoj svih kombinacija legura aluminijuma AA5182, AA6111, AA7075, te čelika 22MnB5 i HCT780X (dvofazni čelik), i zaključili da najveću statičku nosivost ima kombinacija AA7075/ HCT780X (dvofazni čelik), koja je izdržala silu od približno 5,1 kN sa količinom apsorbovane energije od 1,65 J.

Geometrija žiga i matrice ima veliki uticaj na statičku nosivost spoja dva različita materijala [172, 173], te shodno tome i sama geometrija poprečnog presjeka spoja, prvenstveno debljina vrata i zarez, direktno utiču na statičku nosivost MC spoja.

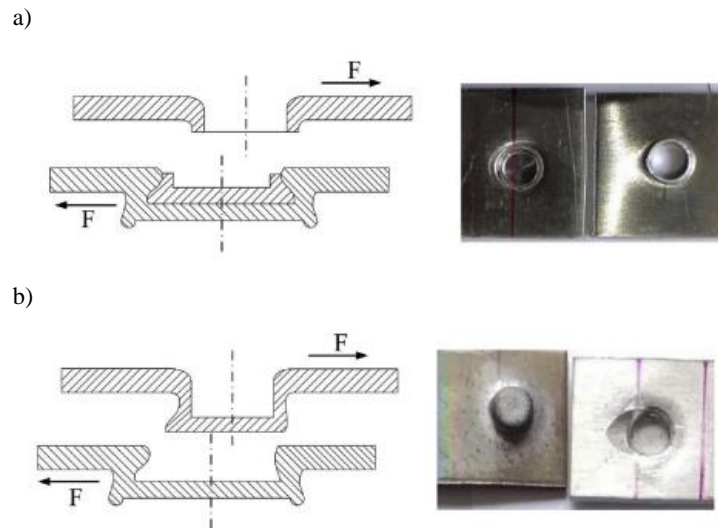
Yohei Abe i drugi [174] su istraživali spajanje tri lima, dva od čelika DP980 i jednog od legure aluminijuma serije 5xxx, pomoću zakivanja bez zakovica i samopodešavajućih zakovica. Statički test pokazao je da se pomoću oba načina može postići zadovoljavajući spoj, ali je konstatovano i da kombinacija navedenih tehnologija sa lijepkom značajno doprinosi povećanju statičke nosivosti spoja.

2.9.3. Modovi otkaza

Obrazovanje površine loma, odnosno mod otkaza još je jedna od mjera kvaliteta spoja. Pri ispitivanju na zatezanje može doći do loma vrata spoja koji se može nazivati NF mod (*eng. neck fracture mode*) i do međusobnog izvlačenja limova na mjestu spoja, što se još može nazvati BS mod (*eng. button separation mode*). Do loma spoja može doći i u hibridnom modu, što u suštini predstavlja kombinaciju prethodna dva načina moda [164]. Na slici 2.36. dat je prikaz karakterističnih načina loma za spoj dobijen zakivanjem bez zakovica opterećen na zatezanje,

Mod otkaza pri zatezanju zavisi od čvrstoće vrata (σ_N) i čvrstoće na mjestu zarez (τ_B) odnosno zavisi od debljine vrata (t_N) i debljine na mjestu zarez (t_u). L. Lei i drugi [164] definisali su faktor c koji predstavlja odnos debljine vrata i debljine na mjestu zarez, odnosno može se zapisati sljedećim obrascem:

$$c = \frac{t_N}{t_u} \quad (2.15)$$



Slika 2.36. Prikaz karakterističnih načina loma za spoj dobijen zakivanjem bez zakovica opterećen na zatezanje: (a) lom vrata (NF mod); (b) međusobno izvlačenje (BF mod) [164]

Ukoliko se pretpostavi da debljina vrata (t_N) teži nuli, tada i vrijednost faktora c teži da bude nula, odnosno [164]:

$$\lim_{t_N \rightarrow 0} \left(\frac{t_N}{t_u} \right) = 0 \quad (2.16)$$

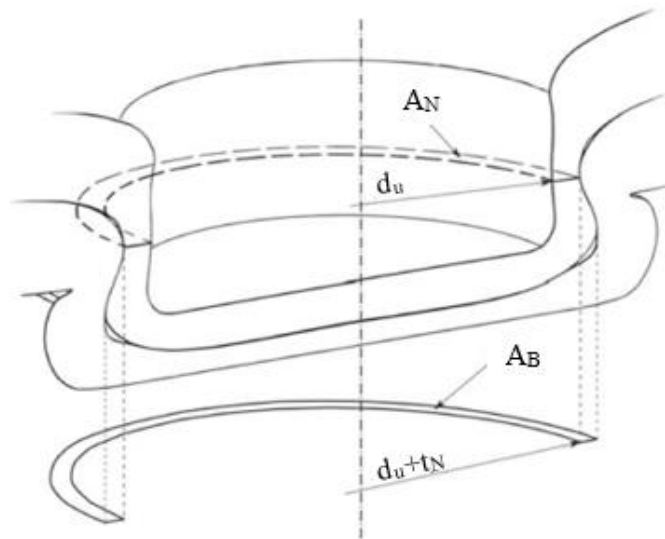
Prethodni slučaj implicira da će doći do loma na mjestu vrata odnosno do loma u NF modu. S druge strane, za slučaj da vrijednost debljine na mjestu zareza teži nuli, tada vrijednost c teži da bude beskonačna, odnosno [164]:

$$\lim_{t_u \rightarrow 0} \left(\frac{t_N}{t_u} \right) = \infty \quad (2.17)$$

Za prethodni slučaj do loma će doći u BS modu, odnosno dolazi do međusobnog izvlačenja limova na mjestu spoja. Shodno navedenom sa povećanjem vrijednosti c povećava se mogućnost loma u BS modu.

Pri unakrsnom opterećenju na zatezanja ili još nazvanom H testu do loma spoja dolazi na isti način kao i pri ispitivanju na zatezanje, odnosno do loma može doći u NF i BS modu [175].

Vrijednost sile koju može da izdrži spoj dobijen zakivanjem bez zakovica može se odrediti i analitički. Zavisno od načina tj. oblika loma razlikuju se dvije karakteristične površine loma A_N (površina poprečnog presjeka vrata) i A_B (projektovana površina zareza) kao što je prikazano na slici 2.37.



Slika 2.37. Karakteristične površine loma A_N i A_B kod spoja dobijenog zakivanjem bez zakovica [176]

Shodno prethodnom, za slučaj da se pretpostavi da će doći do loma u NF modu, vrijednost sile se može odrediti prema sljedećem obrascu [177]:

$$F_N = \sigma_N \cdot A_N = \sigma_N \cdot \pi \cdot (d_u \cdot t_N + t_N^2) \quad (2.18)$$

gdje su: F_N - sila koja dovodi do loma na mjestu vrata spoja;

σ_N - čvrstoća gornjeg lima na mjestu vrata spoja koja predstavlja zateznu čvrstoću gornjeg lima;

d_u - unutrašnji prečnik spoja;

t_N - debljina vrata.

Za slučaj da se pretpostavi da će doći do loma u BS modu, vrijednost sile se može odrediti po sljedećem obrascu [176]:

$$F_B = \tau_B \cdot A_B = \tau_B \cdot \pi \cdot (d_u + 2 \cdot t_N) \cdot H \quad (2.19)$$

gdje su: F_B - sila koja dovodi do loma na mjestu zarezja spoja, odnosno do međusobnog izvlačenja limova;

τ_B - smičući napon tečenja materijala na mjestu zarezja;

H - visina matrice.

Smičući napon tečenja materijala na mjestu zarezka može se odrediti prema obrascu [176]:

$$\tau_B = K \cdot \varepsilon_u^n / \sqrt{3} \quad (2.20)$$

gdje su: K - koeficijent tvrdoće materijala;

n - eksponent deformacije;

ε_u - stvarna deformacija.

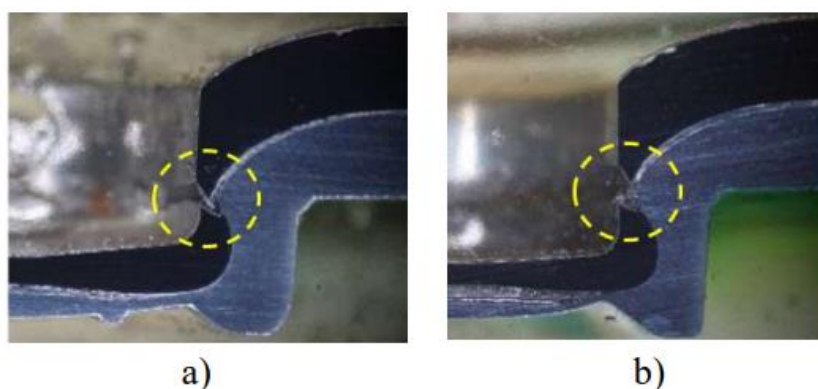
Vrijednost stvarne deformacije može se odrediti prema sljedećem obrascu:

$$\varepsilon_u = \ln(t_d / t_2) \quad (2.21)$$

gdje su: t_d - debljina dna spoja;

t_2 - debljina donjeg lima.

Na slici 2.38. dat je primjer loma spoja čelika DP600 i legure aluminijuma Al6082 na mjestu vrata spoja odnosno u NF modu, dobijenog zakivanjem bez zakovica za dvije različite debljine dna spoja pri ispitivanju na zatezanje. Kao razlog loma na mjestu vrata autori S. Jónás i drugi [166] navode veliko opterećenje koje se javlja na pomenutom mjestu. Takođe, autori pojašnjavaju da se kvalitetniji spoj DP čelika i legure aluminijuma može ostvariti termičkom obradom legure aluminijuma. Bez termičke obrade, koja povećava deformabilnost legure aluminijuma, za očekivati je da lom spoja nastane na mjestu vrata spoja, da dođe do loma same legure aluminijuma ili loma na mjestu izbočina spoja.



Slika 2.38. Prikaz loma vrata MC spoja čelika DP600 i legure aluminijuma Al6082:

(a) debljina dna spoja je 0,61 mm; (b) debljina dna spoja je 0,43 mm [166]

Teng Jiang i drugi [178] analizirajući način loma MC spoja čelika SAE1004 (0,7 mm) i legure aluminijuma AA6111-T4 (1 mm) zaključili su da sila kojom se vrši spajanje ima veliki uticaj na geometriju poprečnog presjeka spoja pa tako i na način loma. Prevelika sila dovodi do stanjivanja vrata spoja, te tako dolazi do loma u NF modu, dok premala sila dovoljno

ne deformiše gornji lim i samim tim se ne formira dovoljna veličina zareza, pa pri ispitivanju na zatezanje dolazi do međusobnog izvlačenja limova odnosno do loma u BS modu.

2.9.4. Dinamički test na zatezanje

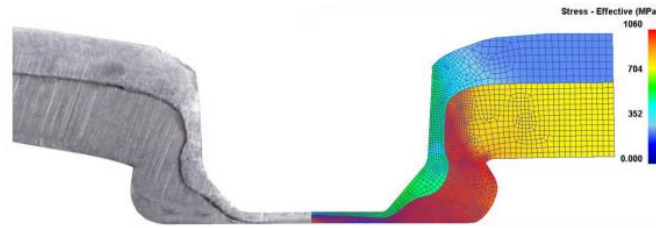
Dinamički test na zatezanje MC spoja DP čelika i legura aluminijuma sprovodi se po istoj proceduri kao i dinamički test na zatezanje RSW spoja, a cilj je dobiti vrijednost sile pri kojoj sami spoj može da izdrži $10 \cdot 10^6$ promjena, odnosno cilj dinamičkog ispitivanja je dobijanje Velerove krive prikazane na slici 2.28. Studije iz ove oblasti su vrlo ograničene. Određivanje mehaničkih svojstava MC spoja DP čelika i legure aluminijuma obično je svedeno samo na statičko ispitivanje. Međutim, određeni broj autora istraživao je ponašanje MC spoja dva lima od čelika ili dva lima od legure aluminijuma pri dinamičkom ispitivanju.

Statička nosivost zavarenog spoja dva lima od visokotvrdog čelika (zatezna čvrstoća veća od 1 GPa) je veća od statičke nosivosti MC spoja ta dva materijala, ali to nije slučaj kod dinamičkog opterećenja, odnosno pri većem broju ciklusa MC spoj je pokazao veću nosivost od zavarenog spoja, zaključak je autora Y. Abe i drugi [179].

T. Balawender [180] zaključuje da kod MC spoja dva lima od niskougljeničnog čelika DC4 (1 mm) pri niskocikličnom opterećenju od 4,9 kN dovodi do loma pri 1001 ciklusa, što je za oko 18% veća vrijednost sile nego pri statičkom opterećenju. Takođe, različit način loma primijećen je kod navedena dva slučaja ispitivanja.

Pri dinamičkom ispitivanju spoja dva lima od legura aluminijuma dobijenog zakivanjem bez zakovica, inicijalna prslina pojavljuje se u donjem limu na zakrivljenoj površini (najtanji dio na donjem limu) između dva lima, radijalno propagirajući dalje kroz donji lim sve do konačnog loma [181]. S druge strane, autori Z. M. Su i drugi [182] zaključili su da MC i SPR spoj dva lima od legura aluminijuma ima slično ponašanje pri dinamičkom opterećenju, te da lom nastaje u gornjem limu. Povećanje dinamičke nosivosti MC i SPR spoja moguće je kombinovanjem istih sa lijepkom, zaključak je autora F. Moronia [183].

Istraživanje autora A. Barimani-Varandi [184] pokazalo je da se na ispupčenjima na donjem limu MC spoja čelika DP590 i legure aluminijuma AA6061-T6 javljaju veliki naponi (slika 2.39) koji mogu izazvati mikro i makro prsline na tom mjestu, što može smanjiti dinamičku nosivost MC spoja, koja u suštini predstavlja najveću prednost ove tehnologije u odnosu na klasičnu RSW tehnologiju spajanja.



Slika 2.39. Distribucija napona u poprečnom presjeku MC spoja legure aluminijuma AA6061-T6 (gornji lim) i čelika DP590 (donji lim) [160]

R. Hörhold i drugi [185] istraživali su, između ostalog, i dinamičku nosivost MC spoja legure aluminijuma AA6016-T4 (2 mm) i čelika 22MnB5 (1,5 mm) sa prethodno pripremljenim otvorom u čeliku. Ispitivanje je uređeno pomoću CT testa sa koeficijentom asimetrije ciklusa $R=0,1$ i frekvencijom od 100 Hz. Analizirana su dva slučaja, cilindrični i konusni oblik unutrašnjeg otvora MC spoja, te je zaključeno da je bolju dinamičku nosivost pokazao cilindrični oblik, iako je debljina zareza bila značajno manja nego kod konusnog oblika.

2.10. POREĐENJE TEHNOLOGIJA SPAJANJA RAZNORODNIH MATERIJALA

Shodno predstavljenim rezultatima može se zaključiti da odabir tehnologije za spajanje limova od raznorodnih materijala zavisi od aspekta posmatranja, odnosno željenih rezultata. Sve tehnologije imaju i prednosti i nedostatke, zato je za poređenje tehnologija potrebno odabrati adekvatne kriterijume. R. Suzuki i drugi [186] u svojoj studiji porede tehnologije spajanja raznorodnih materijala prema 6 kriterijuma, a svakom od istih dodjeljuje vrijednosti: odlično primjenljivo/moguće; djelimično primjenljivo/djelimično moguće; nije primjenljivo/nije moguće. Na osnovu rezultata poređenja datih u tabeli 2.4. može se zaključiti da najveći broj ocjena „odlično primjenljivo/moguće“ ima REW tehnologija, dok, sa druge strane, najveći broj ocjena „nije primjenljivo/nije moguće“ ima tehnologija zakivanje bez zakovica.

Tabela 2.4. Poređenje tehnologija spajanja raznorodnih materijala [186]

Način spajanja	Naziv tehnologije (skraćena)	Mogućnost spajanja samo sa jedne strane	Pogodan za spajanje AHSS i drugih metala	Pouzdanost spoja	Nosivost spoja		Pogodan za spajanje tri lima
					TS test	CT test	
Mehaničko	SPR	X	x	○	○	Δ	○
	Zakivanje	X	x	○	Δ	x	○
	Zakivanje bez zakovica	X	x	○	Δ	x	x
	FDS	○	Δ	○	○	Δ	○
	Zavrtnajska veza	x	○	○	○	○	○
	FSW, FSSW	x	○	Δ	Δ	x	x
Mehaničko + toplotno	REW	x	○	○	○	○	○
	FEW	x	○	○	○	○	x
Toplotno	Lemljenje	○	○	Δ	x	x	x
Hemijsko	Lijepljenje	-	○	x	○	Δ	○

○ – odlično primjenljivo/moguće; Δ – djelimično primjenljivo/djelimično moguće;
x- nije primjenljivo/nije moguće

M. M. Eshtayeh i drugi [187] predstavili su poređenje različitih tehnologija spajanja na osnovu 17 kriterijuma, kao što je prikazano u tabeli 2.5. S obzirom na to da je ocjenjivanje izvršeno opisno (lingvistički), nije moguće izvršiti rangiranje samih tehnologija, pa su shodno tome opisne ocjene konvertovane u brožčane, što je prikazano u tabeli 2.6.

Tabela 2.5. Poređenje tehnologija spajanja prema M. M. Eshtayeh i drugi [187]

Naziv tehnologije/ Kriterijum		MC	SPR	Zakivanje zakovicama	Zavrta- njska veza	RSW	Lijeplj- enje
Pojava korozije		Moguća	Moguća	Moguća	Moguća	Da	Ne
Promjene u strukturi materijala		Ne	Ne	Ne	Ne	Da	Ne
Dinamička nosivost		Veoma dobra	Veoma dobra	Optim.	Optim.	Optim.	Dobra
Otpornost na udar		Optim.	Veoma dobra	Optim.	Optim.	Optim.	Dobra
Statička nosivost	TS	Dobra	Veoma dobra	Veoma dobra	Veoma dobra	Veoma dobra	Dobra
	CP	Dobra	Veoma dobra	Veoma dobra	Veoma dobra	Veoma dobra	Dobra
Mogućnost kombinovanja sa lijepkom		Djeli- mično moguće	Djelimi- čno moguće	Moguće	Moguće	Nije moguće	-
Pojava oštrih ivica ili strugotine		Ne	Ne	Ne	Oštre ivice	Ne	Ne
Potrebna dodatna komponenta za spajanje		Ne	SRP zakovica	Zakovica	Zavrtnj i navrtka	Ne	Lijepak
Potrebni dodatni koraci/procesi pri spajanju		Ne	Doda- vanje zakovice	Dodavanje zakovica	Doda- vanje zavrtnja i navrtke, zavrtnje	Obloga površine	Proces očvršća- vanja lijepka
Cijena po jednom spoju		Veoma niska	Niska	Veoma visoka	Veoma visoka	Visoka	Visoka
Unos energije		Mali	Mali	Visok	Visok	Veoma visok	Veoma visok
Ekonomska efikasnost		Veoma dobra	Dobra	Loša	Loša	Optim.	Optim.
Ekološka prihvatljivost		Veoma dobra	Veoma dobra	Dobra	Dobra	Loša	Veoma loša
Rukovanje		Veoma jednos.	Jednos.	Jednos.	Jednos.	Jednos.	Komple- ksno
Produktivnost		Veoma dobra	Veoma dobra	Dobra	Dobra	Zadov.	Dobra
Uticaj stanja površine lima na kvalitet spoja		Djelimi- čan	Nema uticaja	Nema uticaja	Nema uticaja	Veliki uticaj	Veoma veliki uticaj
Potrebna dodatna priprema		Ne	Ne	Bušenje	Bušenje	Čišćenje	Čišćenje

Konvertovanje opisnih ocjena u brojčane je urađeno po principu: 1 – veoma loše; 2 – loše; 3 – optimalno; 4 – dobro; 5 – veoma dobro. Kriterijumi za koje nije bilo moguće dati

ocjenu po navedenom principu su izbačeni (pojava korozije, promjene u strukturi materijala, pojava oštrih ivica ili strugotine, potrebne dodatne komponente za spajanje, potrebni dodatni koraci/procesi pri spajanju, potrebna dodatna priprema), pa je shodno tome rangiranje urađeno na osnovu preostalih 11 kriterijuma, sa pretpostavkom da svi kriterijumi imaju istu važnost.

Tabela 2.6. Rangiranja tehnologija na osnovu kriterijuma predstavljenih u tabeli 2.5.

Naziv tehnologije/ Kriterijum	MC	SPR	Zakivanje zakovicama	Zavrta- njska veza	RSW	Lijeplj- enje
Dinamička nosivost	5	5	3	3	3	4
Otpornost na udar	3	5	3	3	3	4
Statička nosivost	TS	5	5	5	5	4
	CP	4	5	5	5	4
Mogućnost kombinovanja sa lijepkom	3	3	4	4	1	-
Cijena po jednom spoju	5	4	5	5	4	4
Unos energije	4	4	2	2	1	1
Ekonomska efikasnost	5	4	2	2	3	3
Ekološka prihvatljivost	5	5	4	4	2	1
Rukovanje	5	4	4	4	4	1
Produktivnost	5	5	4	4	3	4
Uticaj stanja površine lima na kvalitet spoja	4	5	5	5	2	1
Ukupno	52	54	46	46	36	31
Srednja ocjena	4.33	4.5	3.83	3.83	3	2.82
Rang	2	1	3	3	4	5

Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 2.5. zaključuje se da je, prema navedenim kriterijumima, najpovoljnija tehnologija spajanja raznorodnih materijala samoprobijajuće zakivanje, dok je lijepljenje na zadnjem mjestu. Zakivanje bez zakovica je na drugom mjestu i ako se uzmu u obzir kriterijumi koji nisu razmatrani u tabeli 2.6, a dati su u tabeli 2.5. (npr. potrebne dodatne komponente za spajanje, potrebni dodatni koraci/procesi pri spajanju) onda bi se moglo očekivati da MC spoj ima veću ocjenu od SRP spoja. Kada je riječ o lijepljenju, treba napomenuti da ova tehnologija zasebno možda nije najpogodnija, ali je već zaključeno da u kombinaciji sa mehaničkim tehnologijama spajanja značajno poboljšava mehanička svojstva spoja.

Probleme rangiranja tehnologija spajanja raznorodnih materijala za potrebe automobilske industrije razmatrali su i autori J. H. Kim i drugi [188]. Ovi autori su u svojoj studiji predstavili aplikaciju pod nazivom *Multi-Material Joining Design Explorer* koja predstavlja savjetodavni sistem baziran na znanju, namijenjen konstruktorima u ranoj fazi konstruisanja, a sve s ciljem izbora adekvatne tehnologije spajanja koja će se primjenjivati za izradu multimaterijal strukture. Sama aplikacija vrši rangiranje tehnologija spajanja na osnovu izabranih kriterijuma, a bazirano na podacima koji su prikupljeni iz stručno-naučnih studija, industrije, priručnika itd. Kao primjer upotrebe date aplikacije autori su prikazali rangiranje tehnologija spajanja čelika DP780 i legure aluminijuma serije 6xxx, koje se koriste kod hauba, te zadnjih i prednjih panela automobila. Na osnovu zahtjeva i ograničenja koje imaju razvojni inženjeri, a koji su dati u tabeli 2.7, kao najpovoljnije tehnologije spajanja po kriterijumu nosivosti pri TS testu su hibridne tehnologije, odnosno tehnologije koje kombinuju mehaničko spajanje i lijepljenje. S druge strane, prema kriterijumu estetike najpovoljnija tehnologija za spajanja navedena dva materijala je tačkasto zavarivanje trenjem sa miješanjem (FSSW).

Tabela 2.7. Primjer zahtjeva i ograničenja vezanih za izbor tehnologije spajanja pri razvoju automobila

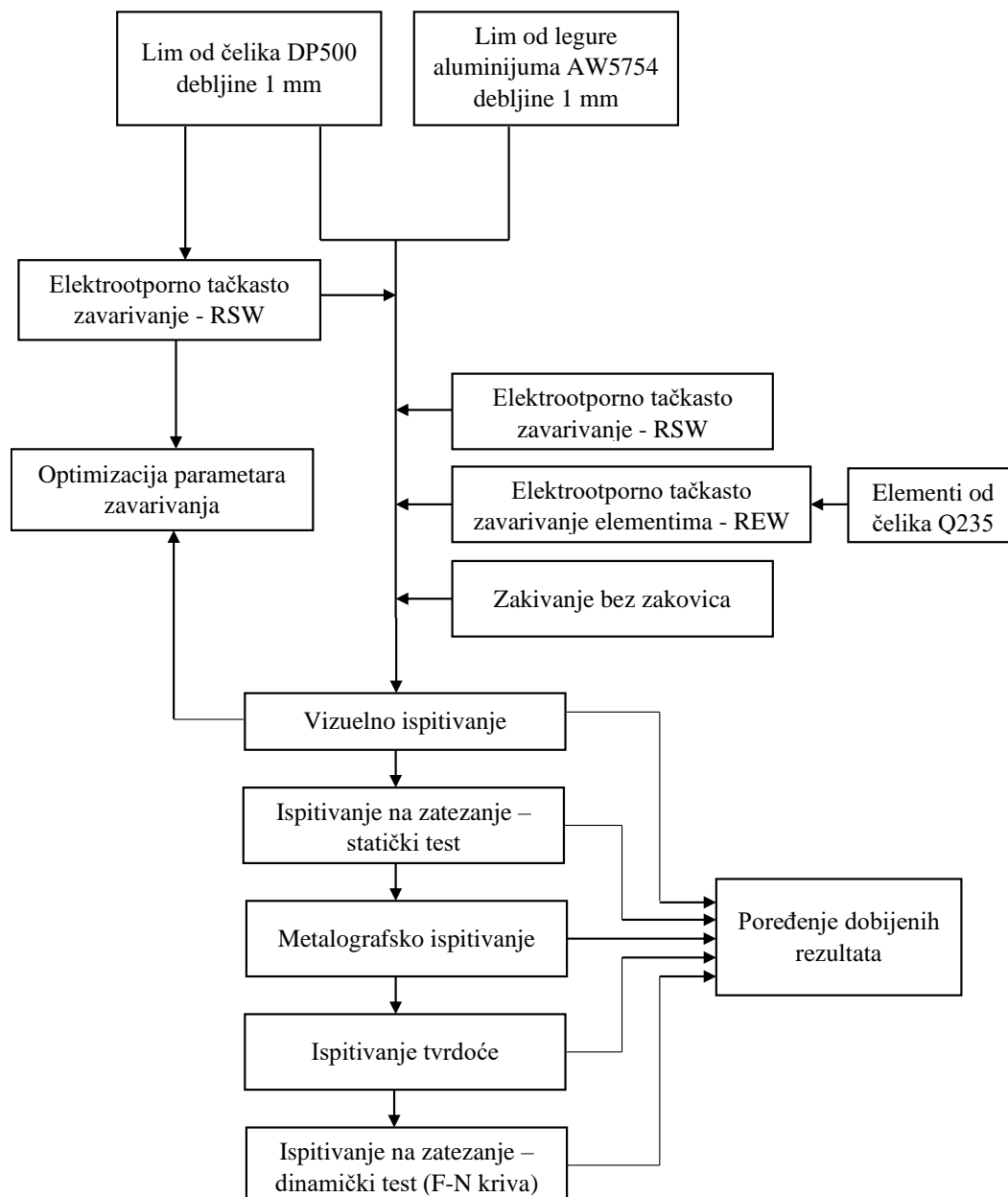
Materijal	Čelik DP780 i legura aluminijuma serije 6
Vrsta spoja	Preklopni spoj
Debljine limova	2–3 mm
Radna temperatura	0–40 °C
Mjesto spoja	Unutrašnji struktura automobila – nije vidljivo korisniku
Vremenski (radni) uslovi	Sunčano vrijeme sa povremenim kišnim danima
Zahtjevi vezani za nosivost	Srednja nosivost

Aplikacije za rangiranje tehnologija spajanja raznorodnih materijala su od velikog značaja za konstruktore, ali njihov rad je baziran na podacima koji se trebaju redovno obnavljati. Zato je svaka studija koja može doprinijeti boljem radu aplikacije, odnosno omogućiti relevantne podatke na osnovu koji se može izvršiti rangiranje, od izuzetne važnosti.

3. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE

3.1. POSTAVKA EKSPERIMENTA

Ekperimentalna istraživanja u ovoj doktorskoj disertaciji obavljena su u skladu sa algoritmom datim na slici 3.1.



Slika 3.1. Algoritam eksperimentalne metodologije poređenja mehaničkih i metalografskih svojstava spojeva legure aluminijuma AW 5754 i čelika DP500

Shodno prethodnoj slici može se zaključiti da su u ovoj doktorskoj disertaciji urađena istraživanja vezana za poređenje mehaničkih i metalografskih svojstava različitih spojeva legure aluminijuma AW 5754 i dvofaznog čelika DP500. Najprije je urađeno klasično elektrootporno tačkasto zavarivanje dva lima od čelika DP500 kako bi se dobijeni rezultati za raznorodne spojeve mogli porediti sa ovim spojem. Tehnologije spajanja legure aluminijuma AW 5754 i čelika DP500, koje su predmet istraživanja ove disertacije, su:

- Elektrootporno tačkasto zavarivanje (*eng. Resistance spot welding*) – RSW;
- Elektrootporno tačkasto zavarivanje elementima (*eng. Resistance element welding*) – REW;
- Mehaničko spajanje bez dodatnog elementa, zakivanje bez zakovica – (*eng. Mechanical clinching*) – MC.

Navedene tehnologije spajanja izabrane su kao predmet istraživanja jer se njihovom primjenom ne zahtijeva potpuna promjena montažnih linija u automobilskoj industriji. Date tehnologije se jednostavno i jeftino mogu implementirati u postojeće proizvodne linije jer su vrlo pogodne za automatizaciju.

Legura aluminijuma AW 5754 (1 mm) i čelik DP500 (1,5 mm) izabrani su kao adekvatni predstavnici multimaterijal strukture, odnosno strukture koja se sastoji od različitih materijala, a najviše se primjenjuju u automobilskoj industriji, o čemu je bilo riječi u prethodnom poglavlju. Kod elektrootpornog tačkastog zavarivanja elementima kao dodatni materijal, tj. materijal elementa, korišćen je konstrukcioni čelik Q235. Ekvivalent ovom konstrukcionom čeliku je čelik oznake S235JR. Hemijski sastav i mehanička svojstva navedenih materijala dati su u tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Hemijski sastav i osnovna mehanička svojstva materijala korišćenih za istraživanje u ovoj doktorskoj disertaciji

Materijal	Hemijski sastav (%)									
	C	Cr	Si	Mn	P	Fe	S	Mg	Al	Cu
DP500	0.1	/	0.5	1	0.025	Bal.	0.01	/	0.015	/
AW 5754	/	0.3	0.4	0.4	/	0.3	/	3.6	Bal.	0.1
Q235	0.29	/	0.28	1.03	0.04	Bal.	0.05	/	/	0.2
	Mehanička svojstva									
	Granica tečenja $R_{p0,2}$ [MPa]			Zatezna čvrstoća R_m [MPa]			Elongacija A_{80} (min %)			
DP500	330			550			20			
AW 5754	185			245			15			
Q235	250			475			20			

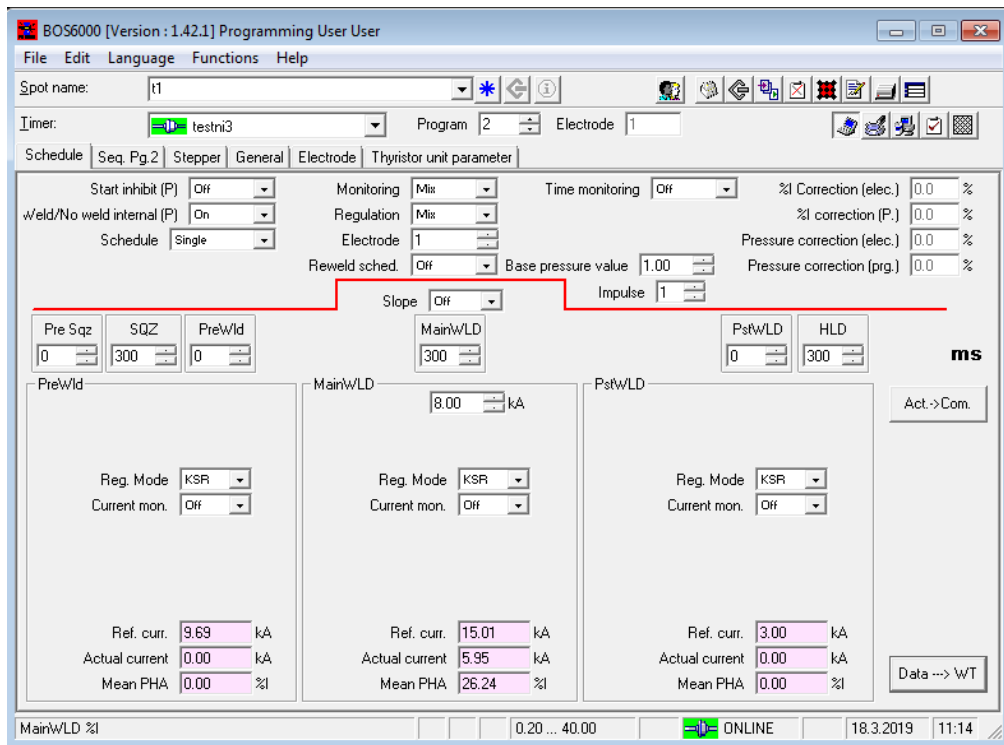
3.1.1. Elektrootporno tačkasto zavarivanje

Za elektrootporno tačkasto zavarivanje svih spojeva korišćena je mašina sa jednosmjernom strujom DC (*eng. direct current*) proizvođača Kočevar i sinovi (slika 3.2), koja se nalazi u Laboratoriji za zavarivanje Mašinskog fakulteta Univerziteta u Ljubljani, Slovenija. Upravljanje datom mašinom izvodi se preko upravljačke jedinice PSQ 6000 povezane na računar, koji sa korisnikom komunicira preko softvera BOS 6000 (slika 3.3). Mašina je takođe povezana sa izvorom vode i tokom procesa zavarivanja elektrode se kontinuirano hlade, što je od velike važnosti, posebno kada je riječ o vijeku trajanja elektroda i brzini hlađenja spoja.



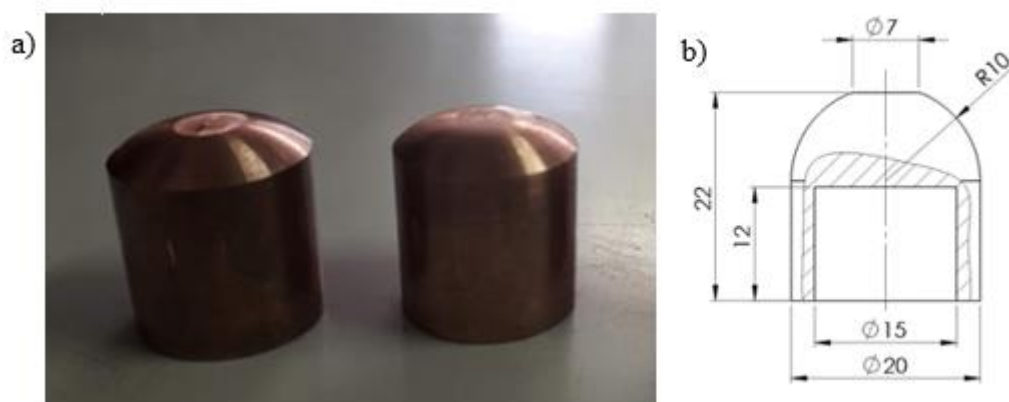
Slika 3.2. Mašina za elektrootporno tačkasto zavarivanje proizvođača Kočevar i sinovi

Softver BOS 6000 pored upravljanja procesom elektrootpornog tačkastog zavarivanja, pruža i mogućnosti kontrole procesa. Softver omogućava da se upravlja brojnim parametrima zavarivanja, a neki od njih su: struja zavarivanja (I), vrijeme zavarivanja (T), sekvencionalno vrijeme (SQZ), vrijeme zadržavanja elektroda (HLD), vrijeme predgrijavanja ($Pre - Weld$), vrijeme hlađenja (CT), itd. Kada je riječ o definisanju sile pritiska elektrodama (F), na ovoj mašini podešavanje se obavlja ručno, tj. pomoću pneumatskog ventila.



Slika 3.3. Interfejs softvera BOS 6000 kojim se vrši upravljanje i kontrola procesa elektrootpornog tačkastog zavarivanja na mašini proizvođača Kočevar i sinovi

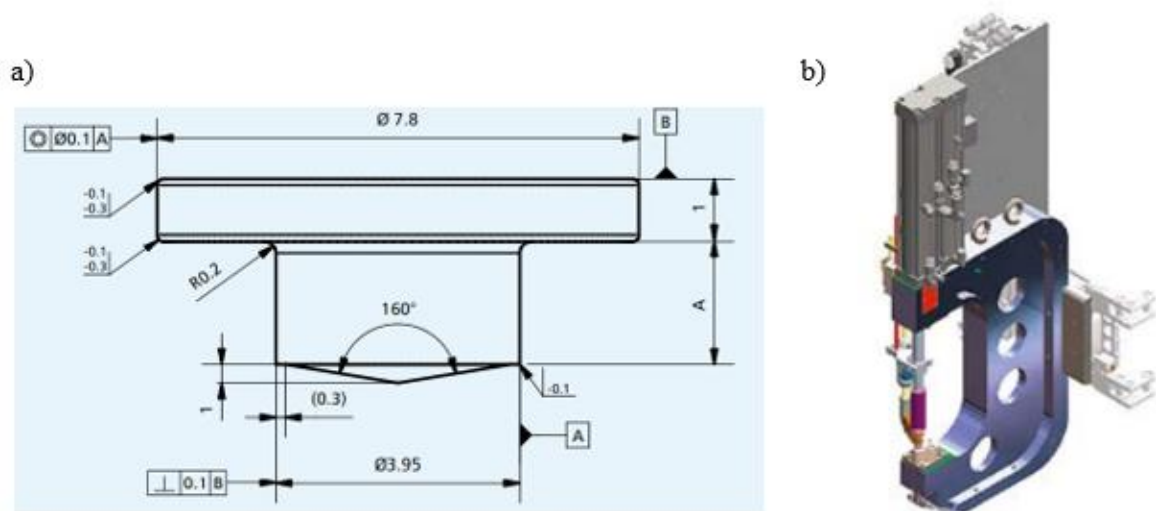
Izbor elektroda od velike je važnosti kod elektrootpornog tačkastog zavarivanja, posebno u industrijskim uslovima. Elektrode se tokom vremena, odnosno poslije određenog broja zavara, pohabaju što dovodi do promjene električnih, termičkih i mehaničkih parametara na kontaktu između elektrode i lima, a za posljedicu ima nekvalitetan spoj. Shodno prethodnim istraživanjima [189–191], za potrebe eksperimenta izabrane su bakarne elektrode ($\text{Cu} \approx 99,9\%$) oznake F1 (standard BAS EN ISO 5821:2011 [41]), dimenzija kao na slici 3.4.



Slika 3.4. Elektrode korišćene za elektrootporno tačkasto zavarivanje: (a) izgled elektroda; (b) dimenzije elektroda

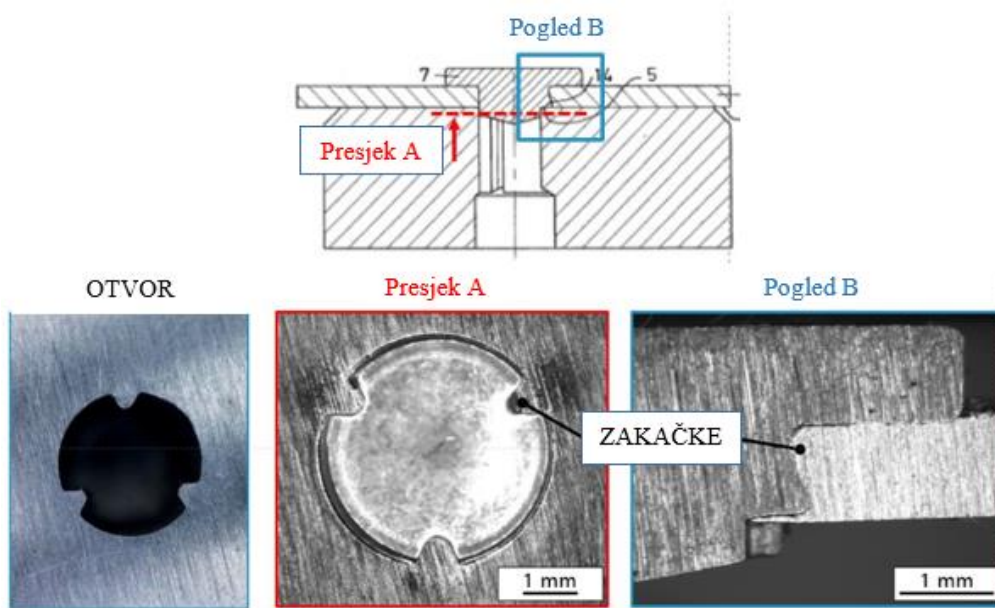
3.1.2. Elektrootporno tačkasto zavarivanje elementima

Proces elektrootpornog tačkastog zavarivanja elementima, kao što je i prikazano u poglavlju 2, započinje umetanjem elementa od čelika, u ovom slučaju Q235, u leguru aluminijuma AW 5754. Za potrebe ovog eksperimentalnog istraživanja kompanija ARNOLD UMFORMTECHNIK GmbH & Co. KG uradila je umetanje elemenata od čelika u pomenutu leguru aluminijuma. Izgled, odnosno dimenzije elementa od čelika, prikazane su na slici 3.5a, dok je presa za umetanje elementa u lim od legure aluminijuma, koju je data kompanija razvila, prikazana na slici 3.5b. Ova presa ima ram u obliku slova C sa integrisanim alatom za probijanje i može se koristiti stacionarno ili pričvršćena na robota. Sistem je nezavisan od smjera probijanja, te može da radi u svim položajima.



Slika 3.5. a) Dimenzije elementa koji se presuje u aluminijum; b) Izgled prese za umetanje elemenata od čelika u aluminijuma; [192]

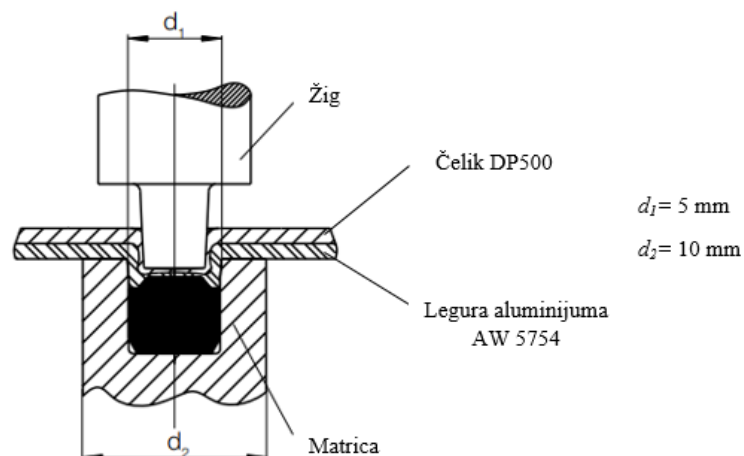
Kako prilikom transporta između proizvodnih linija, odnosno od trenutka umetanja elementa u čelik do trenutka zavarivanja ne bih došlo do razdvajanja, geometrija spoja elementa od čelika i lima od legure aluminijuma definisana je tako da to onemogućava, što je i prikazano na slici 3.6. Svi elementi za potrebe ovog istraživanja su upresovani u lim od legure aluminijuma silom od 300 N. Nakon procesa umetanja elementa od čelika u lim od legure aluminijuma slijedi proces klasičnog elektrootpornog tačkastog zavarivanja, a za ovo istraživanje je korišćena oprema koja je detaljno objašnjena u prethodnom poglavlju, tj. u poglavlju 3.1.1.



Slika 3.6. Izgled spoja elementa od čelika i lima od legure aluminijuma [192]

3.1.3. Zakivanje bez zakovica

Za potrebe eksperimentalnog istraživanja, spajanje limova od legure aluminijuma AW 5754 debljine 1 mm i čelika DP500 debljine 1,5 mm zakivanjem bez zakovica izvela je kompanija ©TOX® PRESSOTECHNIK GmbH & Co.KG. Spoj naziva TOX®-Round Join izveden je silom pritiska od 40 kN, a izgled i dimenzije alata za zakivanje bez zakovica dati su na slici 3.7.



Slika 3.7. Izgled i dimenzija alata za spajanje čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 zakivanjem bez zakovica

3.2. METODE ISPITIVANJA

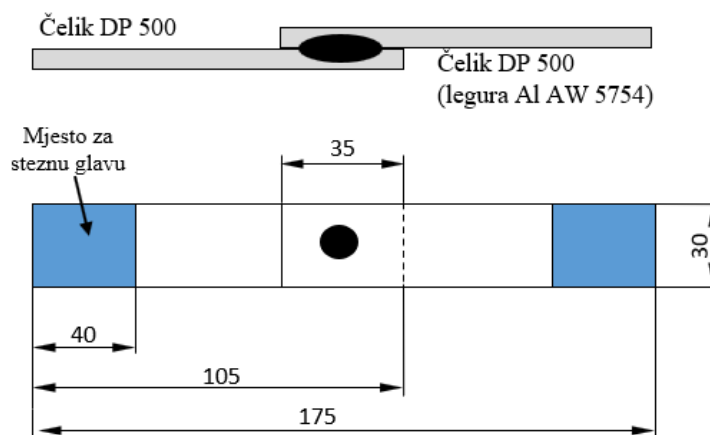
3.2.1. Vizuelna metoda ispitivanja

Vizuelna metoda ispitivanja mašinskih spojeva je metoda bez razaranja koja podrazumijeva detaljan pregled spojeva s ciljem utvrđivanja grešaka u spoju. Vizuelno ispitivanje nije standardizovano za spojeve koji su predmet istraživanja u ovoj disertaciji, ali je uređeno s ciljem određivanja mogućih grešaka kao što su: nepravilan oblik i dimenzije spoja, pojava pukotina, nepravilna površina spoja, itd. Vizuelna metoda ovdje ima za cilj i da prije ispitivanja metodama sa razaranjem utvrdi da li dati spojevi mogu izdržati opterećenje na zatezanja izvedeno pomoću ruku čovjeka.

3.2.2. Ispitivanje na zatezanje - statički test

3.2.2.1. Elektrootporno tačkasto zavarivanje limova od čelika DP500 čelik

Ispitivanje spojeva na zatezanje tačkastog elektrootpornog zavarenog spoja dva lima od čelika DP500 urađeno je u skladu sa preporukama standarda BAS EN ISO 14273:2017 [193]. Test je izveden na testnoj mašini Beta 50-7 / 6x14 sa brzinom kretanja traverze od 2 mm/min. Dimenzije zavarenih epruveta prikazane su na slici 3.8, dok je izgled epruveta prikazan na slici 3.9a.



Slika 3.8. Dimenzije epruveta za ispitivanje na zatezanje [194]

Za potrebe određivanja uticaja parametara zavarivanja na mehanička svojstva zavarenog spoja urađeno je zavarivanje sa 7 različitih kombinacija parametara zavarivanja, a ispitivanje je rađeno sa 3 ponavljanja, što znači da je za potrebe ispitivanja na zatezanje pripremljeno ukupno 21 epruveta. Parametri zavarivanja koji su varirani na tri nivoa su: struja

zavarivanja ($I=6-10$ kA), sila pritiska elektrodama ($F=2,45-4,91$ kN) i vrijeme zavarivanja ($T=200-400$ ms). U tabeli 3.2. dat je prikaz parametara zavarivanja sa definisanim oznakama epruveta.

Tabela 3.2. Pregled parametara zavarivanja sa oznakama epruveta za ispitivanje na zatezanje zavarenog tačkastog spoja dva lima od čelika DP500

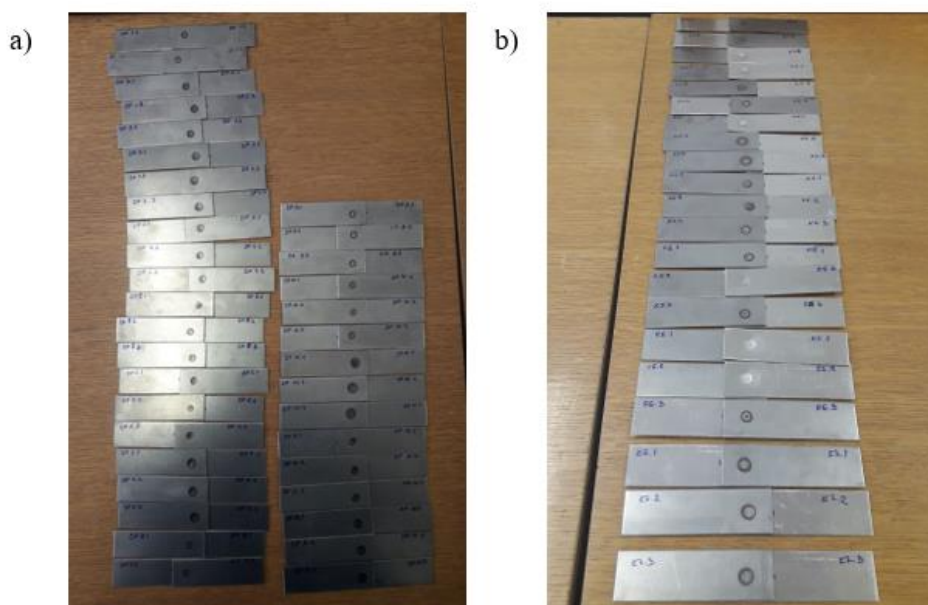
R.br.	Oznaka epruvete	Struja I [kA]	Sila F [kN]	Vrijeme zavarivanja T [ms]
1.	DP 1.1	6	3,68	300
2.	DP 1.2			
3.	DP 1.3			
4.	DP 2.1	8	3,68	300
5.	DP 2.2			
6.	DP 2.3			
7.	DP 3.1	10	3,68	300
8.	DP 3.2			
9.	DP 3.3			
10.	DP 4.1	8	2,45	300
11.	DP 4.2			
12.	DP 4.3			
13.	DP 5.1	8	4,91	300
14.	DP 5.2			
15.	DP 5.3			
16.	DP 6.1	8	3,68	200
17.	DP 6.2			
18.	DP 6.3			
19.	DP 7.1	8	3,68	400
20.	DP 7.2			
21.	DP 7.3			

3.2.2.2. Elektrootporno tačkasto zavarivanje čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754

Ispitivanje na zatezanje elektrootpornog tačkastog spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 takođe je urađeno u skladu sa prethodno pomenutim standardom. Dimenzije epruveta (slika 3.8) kao i uslovi ispitivanja, isti su kao i u slučaju ispitivanja spojeva čelik–čelik. Izgled epruveta dat je na slici 3.9b. Takođe je urađeno 7 različitih kombinacija parametara zavarivanja. Ispitivanje je rađeno sa 3 ponavljanja, a parametri zavarivanja koji su varirani na tri nivoa su: struja zavarivanja ($I=9,5-16,5$ kA), sila ($F=2,45-4,91$ kN) i vrijeme zavarivanja ($T=200-360$ ms). Pregled parametara zavarivanja sa oznakama epruveta za ispitivanje na zatezanja tačkastog zavarenog spoja limova od čelika DP500 (1,5 mm) i legure aluminijuma AW 5754 (1 mm) dat je u tabeli 3.3.

Tabela 3.3. Pregled parametara zavarivanja sa oznakama epruveta za ispitivanje na zatezanja tačkastog zavarenog spoja limova od čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754

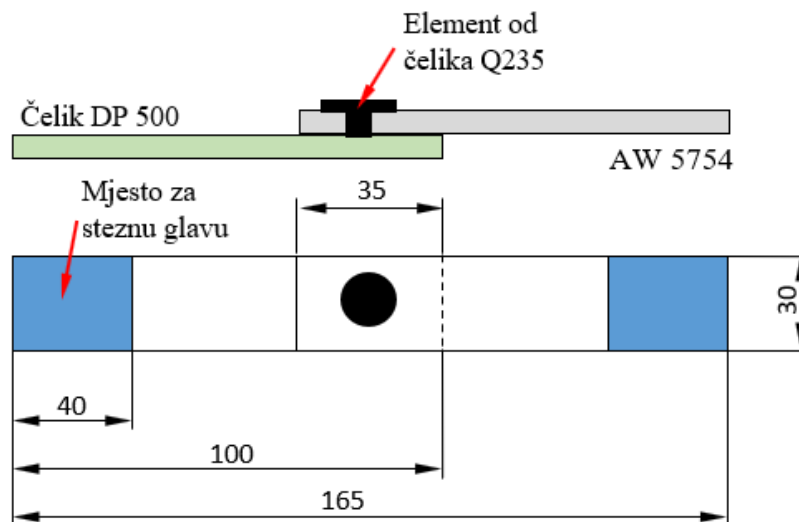
R.br.	Oznaka epruvete	Struja I [kA]	Sila F [kN]	Vrijeme zavarivanja T [ms]
1.	K 1.1	9,5	3,68	280
2.	K 1.2			
3.	K 1.3			
4.	K 2.1	12,5	3,68	280
5.	K 2.2			
6.	K 2.3			
7.	K 3.1	16,5	3,68	280
8.	K 3.2			
9.	K 3.3			
10.	K 4.1	12,5	2,45	280
11.	K 4.2			
12.	K 4.3			
13.	K 5.1	12,5	4,91	280
14.	K 5.2			
15.	K 5.3			
16.	K 6.1	12,5	3,68	200
17.	K 6.2			
18.	K 6.3			
19.	K 7.1	12,5	3,68	360
20.	K 7.2			
21.	K 7.3			



Slika 3.9. Izgled epruveta za zatezanje: a) RSW spoj dva lima od čelika DP500; b) RSW spoj čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754

3.2.2.3. Elektrootporno tačkasto zavarivanje elementima čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754

Ispitivanje na zatezanje spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754, dobijenog elektrootpornim tačkastim zavarivanjem elementima (REW), nije standardizovano. Za potrebe istraživanja urađene su epruvete dimenzija kao na slici 3.10.



Slika 3.10. Izgled i dimenzije epruvete za ispitivanje na zatezanje spoja DP500 čelika i legure aluminijuma AW 5754, dobijenog elektrootpornim tačkastim zavarivanjem elementima [194, 195]

Test je izveden, kao i prethodna dva, na testnoj mašini Beta 50-7 / 6x14 sa brzinom kretanja traverze od 2 mm/min. Takođe, za ovaj spoj pripremljena je ukupno 21 epruveta za test na zatezanje, dobijen sa 7 kombinacija parametara zavarivanja sa tri ponavljanja. Parametri

zavarivanja koji su varirani na tri nivoa su: struja zavarivanja ($I=6-10$ kA), sila ($F=2,45-4,91$ kN) i vrijeme zavarivanja ($T=60-180$ ms). Pregled parametara zavarivanja sa oznakama epruveta za ispitivanje na zatezanja spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754, dobijenog elektrootpornim tačkastim zavarivanjem elementima dat je u tabeli 3.4.

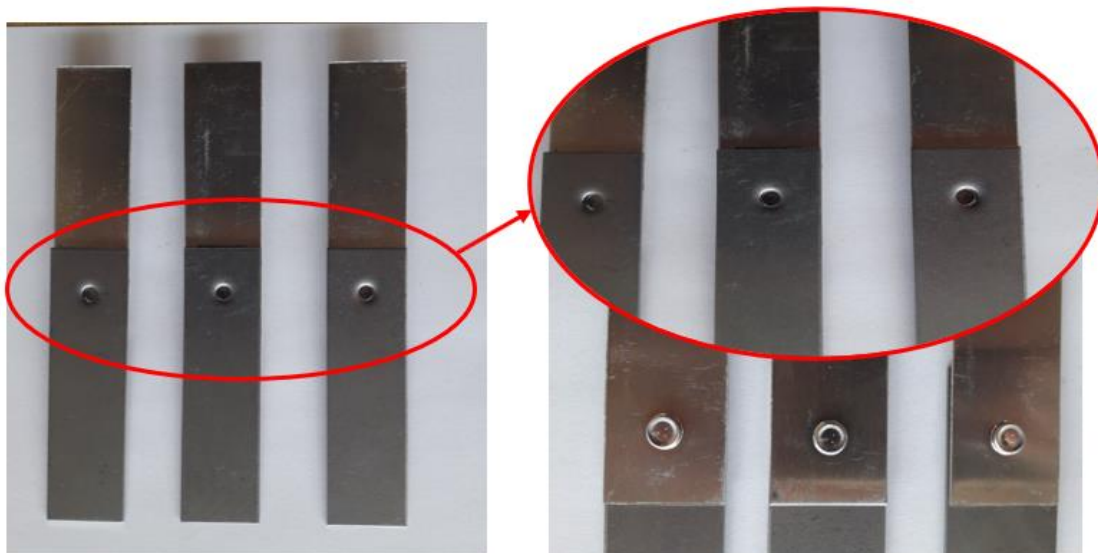
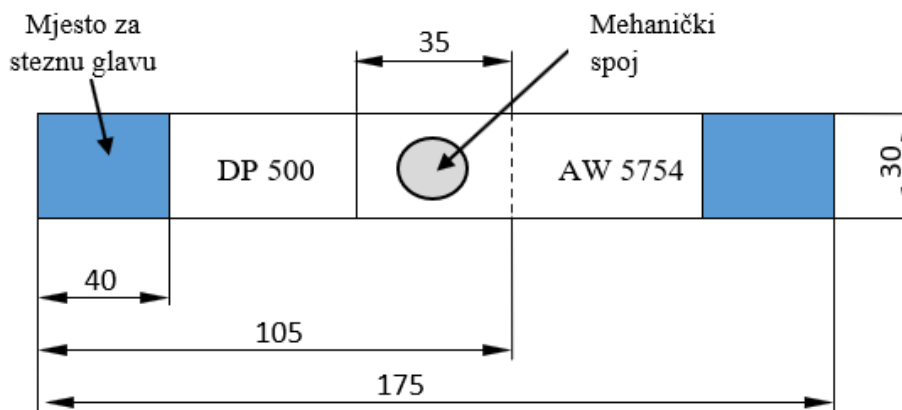
Tabela 3.4. Pregled parametara zavarivanja sa oznakama epruveta za ispitivanje na zatezanja spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754, dobijenog elektrootpornim tačkastim zavarivanjem

R.br.	Oznaka epruvete	Struja I [kA]	Sila F [kN]	Vrijeme zavarivanja T [ms]
1.	REW 1.1	6	3,68	60
2.	REW 1.2			
3.	REW 1.3			
4.	REW 2.1	8	3,68	60
5.	REW 2.2			
6.	REW 2.3			
7.	REW 3.1	10	3,68	60
8.	REW 3.2			
9.	REW 3.3			
10.	REW 4.1	8	2,45	60
11.	REW 4.2			
12.	REW 4.3			
13.	REW 5.1	8	4,91	60
14.	REW 5.2			
15.	REW 5.3			
16.	REW 6.1	8	3,68	120
17.	REW 6.2			
18.	REW 6.3			
19.	REW 7.1	8	3,68	180
20.	REW 7.2			
21.	REW 7.3			

3.2.2.4. Mehaničko spajanje – zakivanje bez zakovica čelika DP500 čelik i legure aluminijuma AW 5754

Za potrebe ispitivanja na zatezanja spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754, dobijenog mehaničkim spajanjem, tj. zakivanjem bez zakovica pripremljene su tri epruvete oznaka T1, T2 i T3. Epruvete su spojene shodno proceduri objašnjenom u poglavlju 3.1.3. Izgled i dimenzije epruveta prikazane su na slici 3.11. Ispitivanje na zatezanje sa brzinom

kretanje traverze od 2 mm/min urađeno je na testnoj mašini AGS-X 20 kN, proizvođača SHIMADZU.

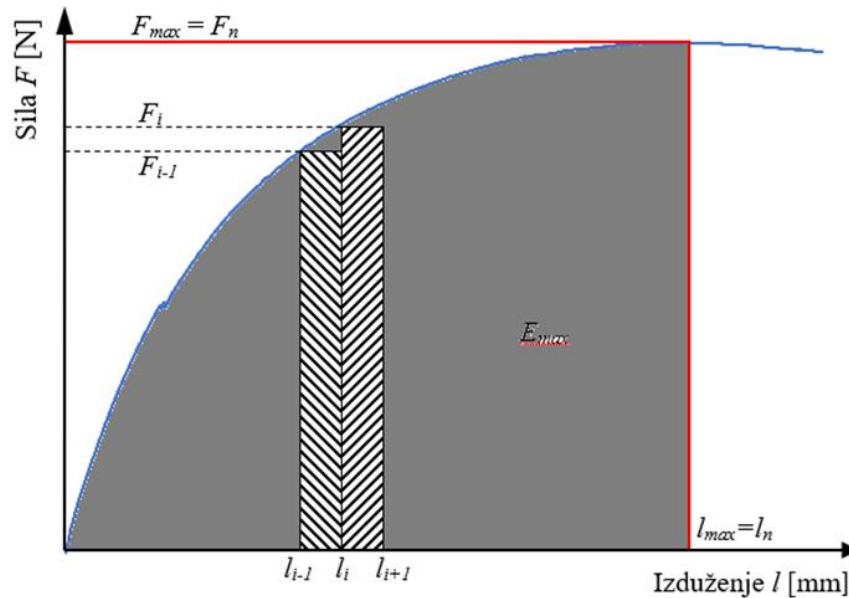


Slika 3.11. Izgled i dimenzije epruveta za ispitivanje na zatezanje spoja DP500 čelika i legure aluminijuma AW 5754, dobijenog zakivanjem bez zakovica (mehanički spoj)

3.2.2.5. Određivanje apsorbivane energije spoja

Pored maksimalnog opterećenja F_{max} i maksimalnog izduženja l_{max} , koji se direktno dobiju ispitivanjem na zatezanje (dijagram sila – izduženje), važno svojstvo mašinskih spojeva, posebno tačkastih spojeva, je maksimalna količina apsorbivane energije E_{max} . Ova energija omogućava da se preciznije opišu mehanička svojstva tačkastih spojeva. Što je veća količina apsorbivane energije E_{max} , veća je pouzdanost spoja u uslovima udara kao što su automobilske nesreće. Apsorbivana energija E_{max} predstavlja površinu ispod krive sila – izduženje, kao što

je prikazano na slici 3.12. Određivanje prikazane površine urađeno je pomoću numeričke integracije, metodom pravougaonog pravila [196].



Slika 3.12. Šematski prikaz dijagrama sila – izduženje

Numerička integracija metodom pravougaonog pravila zasniva se na tome da se interval od 0 do l_{max} (l_n) podijeli na N podintervala, a onda da se sabiranjem površina pojedinačnog pravougaonika dobije konačna površina koja predstavlja apsorbovanu energiju E_{max} , što je prikazano sljedećim obrascem:

$$\begin{aligned}
 E_{max} = & (l_1 - 0) \cdot \left(\frac{F_1}{2} \right) + (l_2 - l_1) \cdot \left(\frac{F_1 + F_2}{2} \right) + (l_3 - l_2) \cdot \left(\frac{F_2 + F_3}{2} \right) + \dots + \\
 & (l_i - l_{i-1}) \cdot \left(\frac{F_{i-1} + F_i}{2} \right) + (l_{i+1} - l_i) \cdot \left(\frac{F_i + F_{i+1}}{2} \right) + \dots + (l_n - l_{n-1}) \cdot \left(\frac{F_{n-1} + F_n}{2} \right)
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Obrazac (3.1) može se zapisati i u sljedećem obliku:

$$E_{max} = \sum_{i=0}^n (l_{i+1} - l_i) \cdot \left(\frac{F_i + F_{i+1}}{2} \right) \tag{3.2}$$

gdje je:

l_i – izduženje pri opterećenju F_i ;

l_{i+1} – izduženje pri opterećenju F_{i+1} .

Pored navedenog, pri ispitivanju na zatezanje važna karakteristika je i način loma spoja, odnosno mod otkaza. Kod ovakvih spojeva, kao povoljan način loma spoja je lom kroz

osnovni materijal i izvlačenje (PF mod), dok se lom kroz spoj ili zavar, nazvan međusobna fraktura (IF mod), smatra nepovoljnim slučajem.

3.2.3. Metalografska ispitivanja

U sklopu metalografskih ispitivanja urađena je makroskopska i mikroskopska analiza poprečnog presjeka spojeva dobijenih elektrootpornim tačkastim zavarivanjem i elektrootpornim tačkastim zavarivanjem elementima. Prethodno navedena mikroskopska i makroskopska analiza urađena je na digitalnom optičkom mikroskopu nove generacije Keyence VHX-6000, koji ima integrisanu kameru i softver za obradu slike (slika 3.13a). Prethodna ispitivanja urađena su s ciljem određivanja karakterističnih zona spojeva, kao i u svrhu analize uticaja parametara zavarivanja na makrostrukturu i mikrostrukturu spoja. Kod uzoraka spojenih zakivanjem bez zakovica urađena je samo makroskopska analiza, jer kod mehaničkog spajanja ne dolazi do promjene u strukturi materijala, pa mikroskopska analiza nije neophodna. Makroskopska analiza mehaničkog spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 urađena je na stereo mikroskopu sa integrisanom HD kamerom Leica EZ4 HD i softverom LAS EZ 3.4. slika 3.13b).

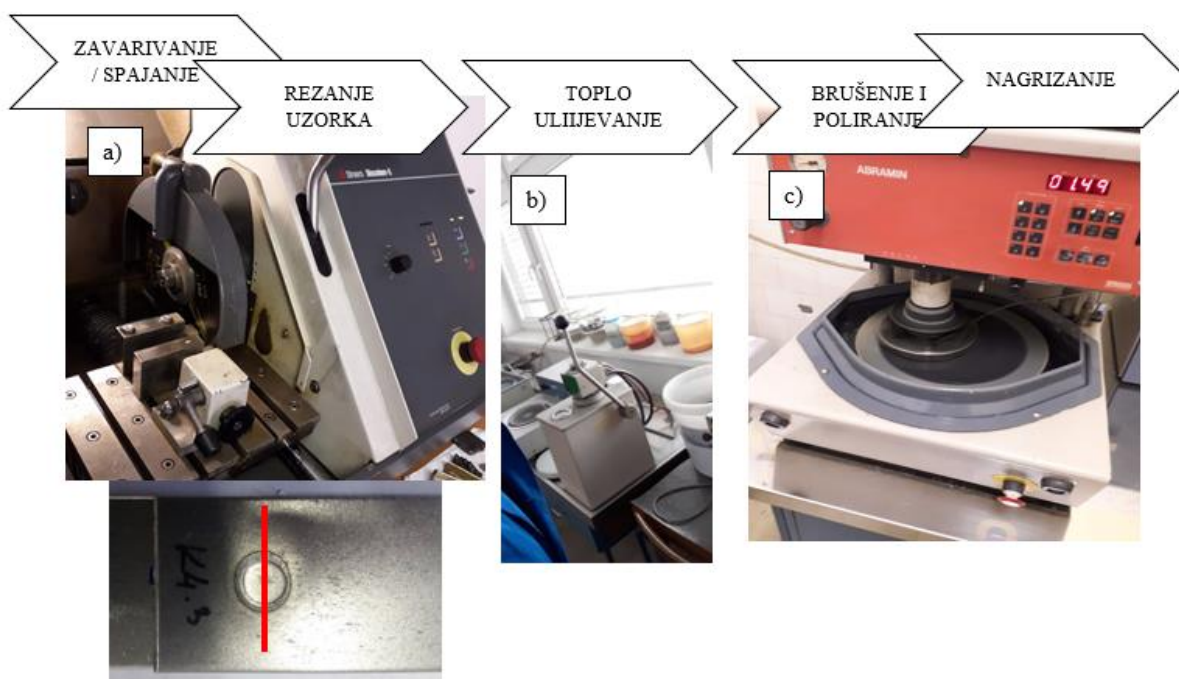


Slika 3.13. Izgled mikroskopa: a) Keyence VHX-6000; b) Leica EZ4 HD

Postupak makroskopskog ispitivanja RSW i REW spojeva započeo je zavarivanjem, odnosno spajanjem limova od čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754, parametrima zavarivanja sa 7 kombinacija parametara, kao što je prikazano u tabelama 3.2, 3.3 i 3.4. Nakon zavarivanja, odnosno spajanja, uslijedio je proces rezanja uzoraka po sredini, tj. centru spoja (slika 3.14a) na mašini za rezanje sa eksternim hlađenjem kako se ne bi narušila struktura spoja.

Odrezani uzorak najprije je toplim ulijevanjem ili zatapanjem upresovan u bakelit (slika 3.14b), a potom je na automatskoj mašini brušen i poliran (slika 3.14c). Brušenje je urađeno brusnim papirima finoće P240, P320, P400, P600, P800, R1200, a polirano je pomoću dijamantske paste veličine zrna $3\mu\text{m}$ i $1\mu\text{m}$. Idenična procedura urađena je za RSW spoj dva lima od čelika DP500, kao i za spoj čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754, dobijenog zakivanjem bez zakovica.

S ciljem razvoja makrostrukture i mikrostrukture, nakon procesa poliranja urađeno je nagrizanje uzoraka i to na način da su uzorci spoja dva lima od čelika 500 nagrizani potapanjem 7 sekundi u rastvoru 4% nitala (azotna kiselina HNO_3 i etil alkohol $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) potom isprani vodom, očišćeni alkoholom i osušeni u struji toplog vazduha. Spojevi čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 nagrizani su na način da su najprije potopljeni 7 sekundi u rastvor 4% nitala, zatim oprani pod vodom, očišćeni alkoholom i osušeni u struji toplog vazduha, te potom ponovo potopljeni u rastvor vode H_2O i HF-a (Fluorovodonična kiselina) 25 sekundi i na kraju ponovo isprani vodom, očišćeni alkoholom i osušeni u struji toplog vazduha. Kada je riječ o MC spojevima, s obzirom na to da je potrebna samo makroskopska analiza, proces je završen nakon brušenja. Treba napomenuti da je zatapanje uzoraka urađeno u hladnom stanju.



Slika 3.14. Postupak pripreme uzoraka za makroskopsku i mikroskopsku analizu

3.2.4. Ispitivanje tvrdoće

Vikersova metoda korišćena je za ispitivanje tvrdoće spojeva, a urađena je na uzorcima koji u pripremljeni za metalografsku analizu. Zahvaljujući metalografskoj slici bilo je moguće jasno odrediti tvrdoću različitih zona zavarenog spoja. Ispitivanje tvrdoće urađeno je na uzorcima spojenim elektrootpornim tačkastim zavarivanjem elementima, te na uzorcima spoja dva DP500 čelika, spojenih elektrootpornim tačkastim zavarivanjem. S obzirom na to da je ispitivanje tvrdoće urađeno nakon testa na zatezanje i nakon metalografske analize, zaključeno je da ispitivanje tvrdoće spoja čelik DP500 i legura aluminijuma AW 5754 dobijenog klasičnim elektrootpornim tačkastim zavarivanjem nije potrebno, prvenstveno zbog lošeg kvaliteta spoja koji se dobija o čemu će biti riječi u nastavku (Poglavlje 4).

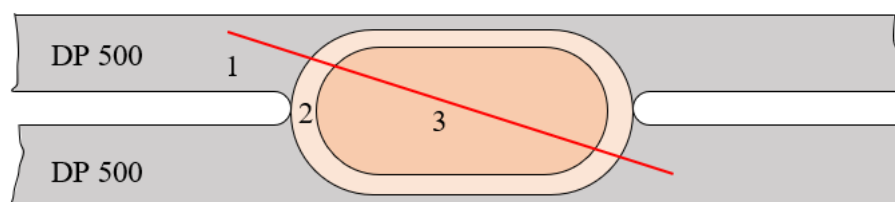
Ispitivanje tvrdoće urađeno je shodno preporukama standarda BAS EN ISO 14271:2018 [197] gdje je objašnjen način raspodjele tvrdoće kroz presjek spoja. Samo ispitivanje sprovedeno je na univerzalnoj mašini za ispitivanje tvrdoće ZHU/Z2.5, proizvođača Zwick/Roell (slika 3.15). Mikro Vickers test HV0,5 sa silom pritiska od 5 N u trajanju od 12 s primijenjen je s ciljem pravljenja otiska za mjerenje tvrdoće.



Slika 3.15. Izgled mašine za ispitivanje tvrdoće po Vickersu

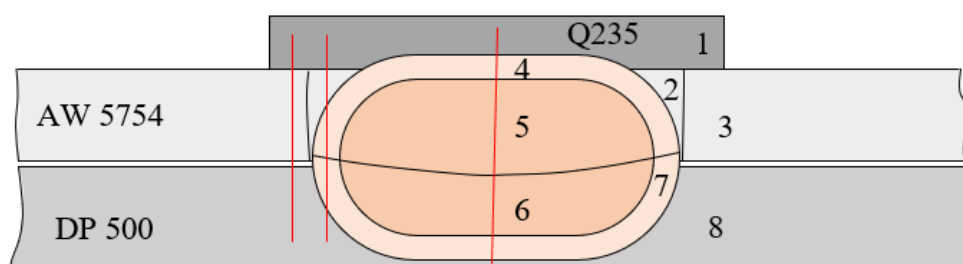
S ciljem dobijanja profila tvrdoće RSW spoja dva lima od čelika DP500 ispitivanje je urađeno duž dijagonalne linije, počevši od osnovnog materijala gornjeg lima (OM), zone uticaja toplote (ZUT), zone fuzije (FZ), pa do osnovnog materijala donjeg lima. Karakteristične zone, kao i linija po kojoj je rađeno ispitivanje tvrdoće za dati spoj prikazane su na slici 3.16. Kada je riječ o REW spoju čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754, tada se broj zona koje su interesantne za posmatranje značajno povećava. Profil tvrdoće urađen je po središnjoj horizontalnoj liniji, kao što je prikazano na slici 3.17. S ciljem dobijanja jasnije slike o mikrotvrdoći datog spoja ispitivanje je za određene uzorke rađeno duž tri horizontalne linije. Slika 3.17, takođe prikazuje i sve karakteristične zone navedenog spoja.

Ispitivanje tvrdoće urađeno je na uzorcima zavarenim sa 7 kombinacija parametara, kao što je dato u tabelama 3.2. i 3.4, a s ciljem određivanja uticaja parametara zavarivanja na mikrotvrdoću spoja.



1 – osnovni materijal; 2 – ZUT; 3 – zona fuzije

Slika 3.16. Šematski prikaz karakterističnih zona i linije po kojoj je rađeno mjerenje mikrotvrdoće za RSW spoj dva lima od čelika DP500



1 – osnovni materijal elementa; 2 – IMC; 3 – osnovni materijal AW 5754
4 – ZUT na strani elementa; 5 – zona fuzije na strani elementa;
6 – zona fuzije na strani čelika DP 500; 7 – ZUT na strani čelika DP500;
8 – osnovni materijal čelik DP 500

Slika 3.17. Šematski prikaz karakterističnih zona i linije po kojoj je rađeno mjerenje mikrotvrdoće za REW spoj čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 [194]

3.2.5. Ispitivanje na zatezanje – dinamički test

Ispitivanje zamaranjem na zatezanje s ciljem određivanja Velerove S-N krive (F-N krive) sprovedeno je na servo hidrauličnoj testnoj mašini (pulzatoru) „Shimadzu Servopulser E100kN, Shimadzu Co., Kyoto, Japan“ koja ima dinamičko i statičko aksijalno opterećenje do 100 kN (slika 3.18).



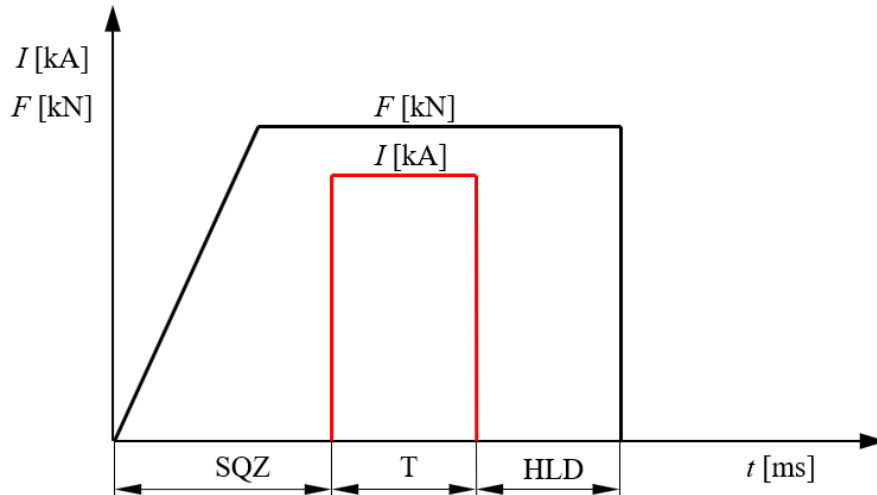
Slika 3.18. Servo hidraulična testna mašina (pulzator) Shimadzu Servopulser E100kN [55]

Ispitivanje zamaranjem urađeno je za spoj DP500 čelika i legure aluminijuma AW 5754 dobijenog elektrootpornim tačkastim zavarivanjem (REW) i zakivanjem bez zakovica, odnosno mehaničkim spajanjem (MC). Dimenzije epruveta za ispitivanje zamaranjem date su na slikama 3.10. i 3.11. Pripremljene su ukupno 22 epruvete, 11 za REW spoj i 11 za MC spoj. Kada je riječ o epruvetama dobijenim elektrootpornim tačkastim zavarivanjem elementima (REW), onda treba istaći da je zavarivanje urađeno shodno dijagramu na slici 3.19, a da su parametri zavarivanja, koji su izabrani za spajanje uzoraka za dinamički test, bili sljedeći:

- Struja zavarivanja: $I = 10 \text{ kA}$;
- Sila u elektrodama: $F = 3,68 \text{ kN}$;
- Vrijeme zavarivanja: $T = 60 \text{ ms}$;
- Sekvencionalno vrijeme: $SQZ = 300 \text{ ms}$;
- Vrijeme zadržavanja elektroda (vrijeme hlađenja): $HLD = 300 \text{ ms}$.

Ispitivanje na zamaranje urađeno je sa koeficijentom asimetrije ciklusa $R = 0,1$, koji predstavlja odnos opterećenja ($R = F_{\min} / F_{\max}$). Frekvencija na kojoj je urađeno ispitivanje bila je 30 Hz, a kriterijumom otkaza smatran je lom epruvete, odnosno za svaki uzorak je zapisan

broj ciklusa koji dovodi do loma. Kada je riječ o određivanju trajne dinamičke izdržljivosti, onda je kao kriterijum izabran broj ciklusa 10×10^6 .



Slika 3.19. Šematski prikaz parametara elektrotopnog tačkastog zavarivanja koje je uslijedilo nakon umetanja elementa od čelika Q235 u leguru aluminijuma AW 5754

Za svaki spoj je najprije ponovljen statički test na servo hidrauličnoj mašini, a onda su na osnovu sile koja dovodi do tečenja (granice tečenja) definisane vrijednosti sila F_{\min} i F_{\max} što je prikazano u tabeli 3.5.

Tabela 3.5. Šema ispitivanja spojeva čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 na zamaranje

REW		MC	
F_{\min} [kN]	F_{\max} [kN]	F_{\min} [kN]	F_{\max} [kN]
0,131	1,31	0,184	1,84
0,12	1,2	0,158	1,58
0,115	1,15	0,145	1,45
0,11	1,1	0,132	1,32
0,105	1,05	0,126	1,26
0,10	1		
0,098	0,98		

3.3. OPTIMIZACIJA PARAMETARA ELEKTROOTPORNOG TAČKASTOG ZAVARIVANJA LIMOVA OD ČELIKA DP500

S ciljem opširnije analize uticaja parametara elektrootpornog tačkastog zavarivanja na nosivost dobijenog spoja dva lima od čelika DP500, te s ciljem optimizacije istih parametara, korišćena je jednokriterijumska i višekriterijumska Tagučijeva (Taguchi) metoda optimizacije, kao i metoda koja kombinuje Tagučijevu (Taguchi) optimizaciju i sivu relacionu analizu (TGRA). Na slici 3.20. prikazan je proces elektrootpornog tačkastog zavarivanja sa ulaznim parametrima, te izlaznim performansama zavarenog spoja, na osnovu kojeg je urađena višekriterijumska optimizacija.



Slika 3.20. Prikaz procesa elektrootpornog tačkastog zavarivanja sa ulaznim parametrima, te izlaznim performansama zavarenog spoja na osnovu kojih će biti urađena optimizacija

Cilj ovog dijela istraživanja je uspostavljanje veze između ulaznih i izlaznih promjenljivih, tj. analiza uticaja ulaznih promjenljivih koje predstavljaju parametre zavarivanja na izlazne, odnosno odzivne promjenljive. Izlazne promjenljive u ovom istraživanju predstavljaju određena mehanička svojstva samog zavarenog spoja. Za ulazne nezavisne promjenljive, kao što je i prikazano na slici 3.20, izabrani su:

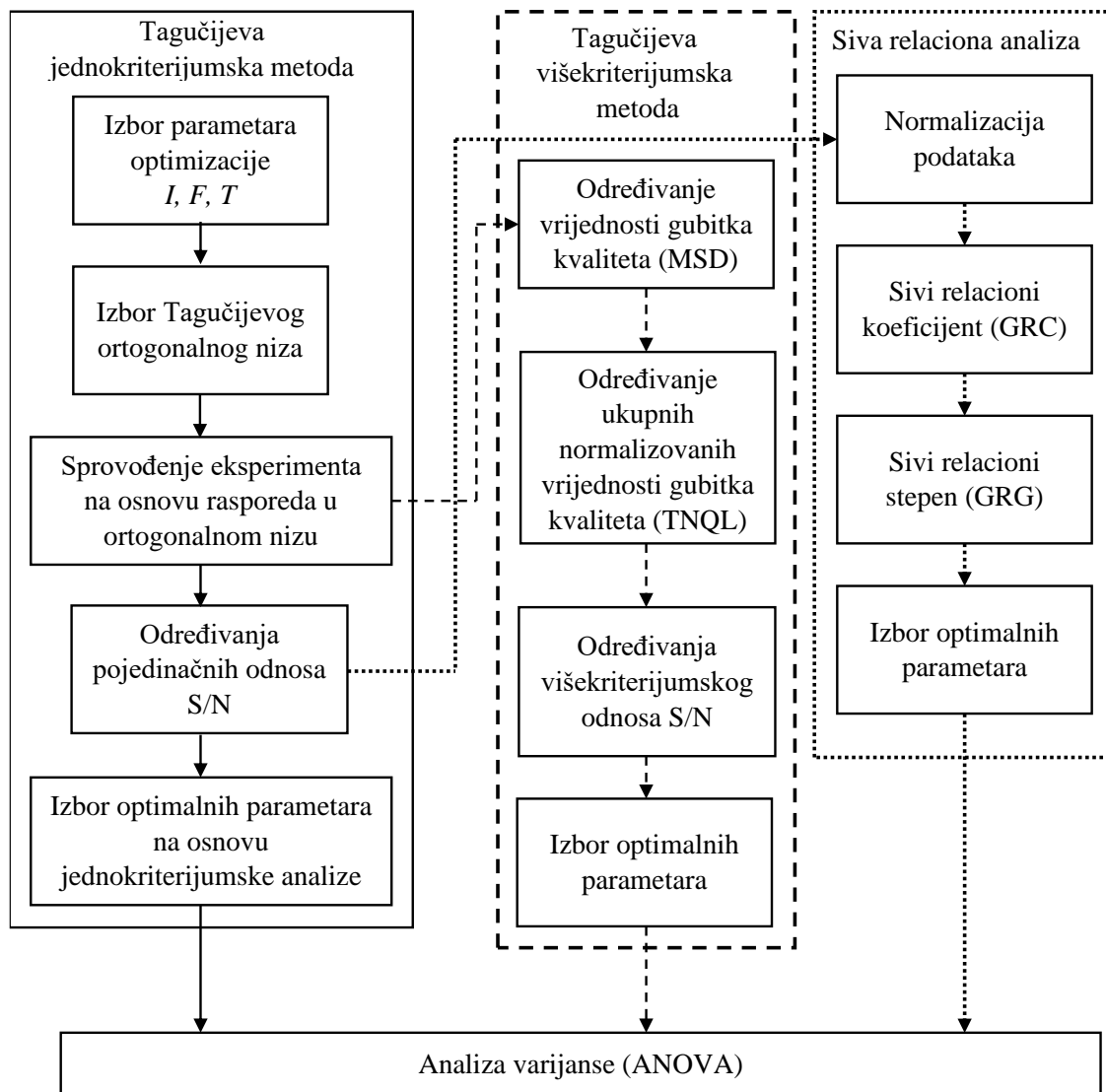
- Struja zavarivanja I [kA];
- Vrijeme zavarivanja T [ms];
- Sila u elektrodama F [kN].

Kada je riječ o odzivnim promjenljivim, za potrebe ovog istraživanja izabrana su mehanička svojstva zavarenog spoja koja se mogu dobiti statičkim ispitivanjem na zatezanje kao što je objašnjeno u poglavlju 3.2.2.1, a to su:

- Sila pri lomu, odnosno maksimalna sila F_{max} [kN];

- Maksimalno izduženje spoja l_{max} [mm].

U radu su najprije prikazani rezultati jednokriterijumske optimizacije za obe izlazne promjenljive, dobijeni upotrebom klasične Tagučijeve metode optimizacije. Potom su prikazani rezultati višekriterijumske optimizacije dobijeni Tagučijevom višekriterijumskom optimizacijom kao i Tagučijevom optimizacijom sa sivom relacionom analizom. Sam proces optimizacije prikazan je algoritmom na slici 3.21.



Slika 3.21. Prikaz procesa optimizacije parametara elektrootpornog tačkastog zavarivanja

U nastavku rada biće detaljno objašnjeni koraci u procesu optimizacije koji su prikazani na slici 3.21.

3.3.1. Tagučijeva metoda

Tagučijeva metoda dobila je naziv po idejnom tvorcu, japanskom inženjeru – statističaru Geniču Tagučiju (*Genichi Taguchi*). Ova metoda pronašla je svoju primjenu u inženjerstvu jer integriše statističke metode u inženjerske procese, koristeći ortogonalne nizove (engl. *Orthogonal Arrays*) kao i doraden postupak statističke obrade podataka. Ortogonalni nizovi omogućavaju da se analiza uticaja ulaznih parametara na odzivne parametre uradi sa minimalnim vremenom i resursima. Tagučiji je uveo novu karakteristiku, tj. odnos S/N (eng. *Signal-to-Noise*) koja predstavlja uticaj tzv. šuma (nekontrolisanih parametara) na ciljnu funkciju procesa, tj. odnos S/N predstavlja univerzalnu mjeru za ocjenu eksperimentalnih rezultata, a s ciljem kasnije optimizacije parametara [198]. Kao što je prikazano na slici 3.21, Tagučijeva optimizacija urađena je prema sljedećim koracima:

Korak 1: Izbor parametara zavarivanja, kao i nivoa potrebnih za definisanje Tagučijevog ortogonalnog plana.

Shodno prethodno definisanom, za potrebe ovog istraživanja izabrani parametri zavarivanja (struja zavarivanja, vrijeme zavarivanja i sila u elektrodama) su analizirani na tri nivoa, kao što je prikazano u tabeli 3.6.

Tabela 3.6. Izbor nivoa parametara zavarivanja

Parametri zavarivanja/nivoi	Nivo 1	Nivo 2	Nivo 3
Struja zavarivanja I [kA]	6	8	10
Sila u elektrodama F [kN]	2,45	3,68	4,91
Vrijeme zavarivanja T [ms]	200	300	400

Korak 2: Definisanje Tagučijevog ortogonalnog plana

Kao što je već rečeno, osnovna prednost Tagučijeve metode je što, zahvaljujući ortogonalnom nizu, zahtijeva minimalan broj eksperimenata, za razliku od potpunog faktornog plana eksperimenta. Kako se kod ovog istraživanja vrši analiza uticaja tri parametra zavarivanja na tri nivoa, onda se koristiti Tagučijev niz $L_9 (3^3)$, gdje broj 9 predstavlja broj potrebnih eksperimenata. U tabeli 3.7. dat je prikaz Tagučijevog ortogonalnog plana.

Tabela 3.7. Prikaz Tagučijevog ortogonalnog plana L₉

R.br.	Oznaka	Oznaka epruvete	Struja zavarivanja I [kA]	Sila u elektrodama F [kN]	Vrijeme zavarivanja T [ms]
1	T1	DP8	6	2.45	200
2	T2	DP1	6	3.68	300
3	T3	DP9	6	4.91	400
4	T4	DP4	8	2.45	300
5	T5	DP7	8	3.68	400
6	T6	DP10	8	4.91	200
7	T7	DP11	10	2.45	400
8	T8	DP12	10	3.68	200
9	T9	DP13	10	4.91	300

Korak 3: Sprovođenje eksperimenta na osnovu Tagučijevog ortogonalnog plana

S ciljem dobijanja odzivnih promjenljivih, tj. određivanja sile kidanja zavarenog spoja (maksimalna sila F) i izduženja pri sili kidanja (maksimalno izduženje l) urađeno je ispitivanje na zatezanje svih epruveta dobijenih spajanjem parametrima zavarivanja datim u tabeli 3.7. Za sve navedene parametre ispitivanje je urađeno sa tri ponavljanja, a za dalju analizu korišćena je srednja vrijednost. Treba napomenuti da su maksimalna sila i izduženje pri maksimalnoj sili potpuno nezavisne odzivne promjenljive, a da zajedno utiču na količinu energije koju tačkasti zavareni spoj može da apsorbuje, o čemu je bilo govora u poglavlju 3.2.2.5.

Korak 4: Određivanje odnosa S/N

Kako odnos S/N predstavlja osnovnu mjeru za analizu uticaja parametara zavarivanja na odzivne promjenljive tj. mehanička svojstva zavarenog spoja, stoga je veoma važno adekvatno definisati dati odnos. Prema karakteristici kvaliteta, jedinica kojom se izražavaju rezultati može se prema Tagučijevoj metodi podijeliti na tri različite grupe [198]:

- Definisana fiksna vrijednost je najbolja (*eng. nominal is the best*)

$$S/N = \eta = 10 \cdot \log \frac{\bar{Y}}{s_y^2} \quad (3.3)$$

- Što je manja vrijednost to je bolja (*eng. smaller is better*)

$$S/N = \eta = -10 \cdot \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right) \quad (3.4)$$

- Što je veća vrijednost to je bolja (*eng. bigger is better*)

$$S/N = \eta = -10 \cdot \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right) \quad (3.5)$$

gdje su: n – broj ponavljanja eksperimenta;

Y_i – izmjerena vrijednost karakteristike kvaliteta;

\bar{Y} – srednja vrijednost izmjerene karakteristike kvaliteta;

s_y^2 – disperzija od Y .

S obzirom na to da su odzivne promjenljive maksimalna sila i izduženje pri maksimalnoj sili, lako se dolazi do zaključka da će se za analizu uticaja parametara zavarivanja na navedene promjenljive koristiti karakteristika kvaliteta „Što je veća vrijednost to je bolje“, odnosno za određivanje odnosa S/N korišćen je obrazac (3.5).

Korak 5: Izbor optimalnih parametara na osnovu jednokriterijumske analize

Kod jednokriterijumske optimizacije, izbor optimalnih parametara vrši se samo na osnovu jedne odzivne promjenljive, pa je tako u ovom radu najprije urađena optimizacija parametara zavarivanja posebno za obje odzivne promjenljive, tj. posebno za vrijednost maksimalne sile i posebno za vrijednost maksimalnog izduženja.

Kako bi se dobili optimalni parametri najprije je potrebno izračunati *srednji efekat nivoa faktora* za svaki faktor i nivoa pojedinačno i to na osnovu ortogonalnog niza i dobijenih eksperimentalnih rezultata. Npr. srednji efekat faktora A (struja zavarivanja) na nivou 1 (6 kA) kod $L_9(3^3)$ ortogonalnog Tagučijevog niza ima oblik:

$$\bar{A}_1 = \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3}{3} \quad (3.6)$$

gdje su: Y_1 , Y_2 i Y_3 odzivne promjenljive, tj. izlazne performanse dobijene nakon eksperimentalnog ispitivanja.

Slično prethodnom, srednji efekat faktora C (vrijeme zavarivanja) na nivou 3 (400 ms) ima oblik:

$$\bar{C}_3 = \frac{Y_3 + Y_5 + Y_7}{3} \quad (3.7)$$

Nakon što se odrede vrijednosti srednjeg efekta svih faktora na svim nivoima, moguće je utvrditi optimalne parametre i to na način da je za dati faktor optimalan onaj nivo koji daje maksimalnu vrijednost srednjeg efekta faktora.

Pored dobijanja optimalnih parametara, ova metoda omogućava da se napravi i rang uticaja parametara na izlazne performanse, i to rangiranjem *glavnog efekta faktora* po veličini. Najveći uticaj na izlazne parametre ima onaj faktor koji ima najveću vrijednost glavnog efekta faktora. Glavni efekat faktora se odre[]e oduzimanjem maksimalne vrijednosti srednjeg efekta faktora od minimalne vrijednosti srednjeg efekta faktora.

Za dobijene optimalne vrijednosti može se odrediti i očekivana vrijednost izlazne promjenljive Y_{opt} . Tako, na primjer, ako se pretpostavi da su optimalni parametri za faktor A na nivo 1, za faktor B na nivo 2 i za faktor C na nivo 3 onda bi se očekivana vrijednost izlazne promjenljive mogla odrediti na osnovu sljedećeg obrasca:

$$Y_{opt} = Y_{suma} + (\bar{A}_1 - Y_{suma}) + (\bar{B}_2 - Y_{suma}) + (\bar{C}_3 - Y_{suma}) \quad (3.8)$$

gdje je Y_{suma} predstavlja ukupni presjek performansi, tj. srednju vrijednost izlazne promjenljive. U slučaju ortogonalnog niza L_9 ukupni presjek performanse Y_{suma} računa se prema sljedećem obrascu:

$$Y_{suma} = \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3 + \dots + Y_9}{9} \quad (3.9)$$

Vrijednosti u zagradama u obrascu (3.8) predstavljaju doprinos određenog faktora i dodaju se srednjoj vrijednosti izlazne promjenljive Y_{suma} samo ako su uticaji svih faktora linearni, što nije uvijek slučaj, pa se može očekivati da vrijednost izlazne promjenljive na optimalnom nivou bude blizu stvarne vrijednosti. Određivanje očekivane vrijednosti izlazne performanse na optimalnom nivou moguće je na ovaj način uraditi samo kod jednokriterijumske optimizacije.

Slično prethodnom može se odrediti i vrijednost S/N odnosa na optimalnom nivou i to koristeći sljedeće obrasce [198]:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{opt} = \eta_{opt} = \bar{\eta} + \sum_{i=1}^p (\bar{\eta}_{i,opt} - \bar{\eta}) \quad (3.10)$$

$$\bar{\eta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \eta_i \quad (3.11)$$

gdje su: $\bar{\eta}_{i,opt}$ – vrijednost odnosa S/N za svaki i -ti faktor na optimalnom nivou;

$\bar{\eta}$ – ukupna vrijednost S/N odnosa;

p – broj faktora koji signifikantno utiče na karakteristiku kvaliteta;

n – ukupan broj eksperimenata;

η_i – vrijednost odnosa S/N u i -tom eksperimentu.

Inverznim postupkom, koristeći se obrascima (3.3)–(3.5) za poznatu vrijednost odnosa S/N na optimalnom nivou moguće je, kod jednokriterijumske optimizacije, odrediti i vrijednost izlazne performanse na optimalnom nivou Y_{opt} . U slučaju da se koristi karakteristika kvaliteta „Što je vrijednost veća to je bolje“ onda bi se vrijednost izlazne performanse na optimalnom nivou Y_{opt} izračunala po sljedećem obrascu:

$$\eta_{opt} = -10 \cdot \log \left(\frac{1}{Y_{opt}^2} \right) \Rightarrow Y_{opt} = 10^{\frac{\eta_{opt}}{20}} \quad (3.12)$$

Opšteprihvaćeno je da poslije Tagučijeve metode slijedi analiza varijanse (ANOVA), koja ima za cilj da dodatno utvrdi uticaj ulaznih na izlazne promjenljive, tj. da utvrdi koliko varijacija ulaznih promjenljivih utiče na varijaciju izlaznih promjenljivih. U nastavku rada dato je detaljno objašnjenje analize varijanse (ANOVA).

Takođe, nakon analize rezultata pomoću Tagučijeve metode, odnosno dobijanja optimalnih parametara kao i vrijednosti izlaznih performansi na optimalnom nivou, potrebno je uraditi verifikaciju dobijenih rezultata. Verifikacija rezultata u ovom istraživanju urađena je na način da su sprovedeni testovi na zatezanja na epruvetama koje su spojene sa optimalnim parametrima zavarivanja. Rezultati dobijeni ovim ispitivanjem upoređeni su sa rezultatima dobijenim pomoću Tagučijeve metode.

3.3.2. Višekriterijumska Tagučijeva metoda

Višekriterijumska Tagučijeva optimizacija predstavlja modifikovanu jednokriterijumsku Tagučijevu optimizaciju koja ima za cilj da izabere optimalne parametre koji će istovremeno zadovoljiti sve izlazne performanse. Prva tri koraka kod

jednokriterijumske i višekriterijumske optimizacije su ista. Višekriterijumska Tagučijeva metoda definisana je sljedećim koracima [199, 200]:

Korak 1: Određivanje vrijednosti gubitka kvaliteta QL (*eng. Quality Loss values*)

Prvi korak kod višekriterijumske Tagučijeve metode je određivanje vrijednosti *gubitaka kvaliteta* (QL) na osnovu rezultata dobijenih eksperimentalnim ispitivanjem. Kao i kod standardne Tagučijeve metode, postoje tri grupe karakteristika kvaliteta, ali se za potrebe ovog istraživanja za obje izlazne promjenljive koristiti sljedeća:

- Što je veća vrijednost to je bolje (*eng. bigger is better*)

$$QL = L_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \quad (3.13)$$

Nakon određivanja vrijednosti gubitka kvaliteta (QL) potrebno je uraditi normalizaciju dobijenih rezultata, odnosno odrediti *normalizovane vrijednosti gubitka kvaliteta* NQL (*eng. Normalised Quality Loss values*) koristeći sljedeći obrazac:

$$NQL = N_i = \frac{L_i}{\max L_i} \quad (3.14)$$

gdje su: L_i – vrijednost gubitka kvaliteta i -te karakteristike kvaliteta;

$\max L_i$ – maksimalna vrijednost gubitka kvaliteta i -te karakteristike kvaliteta;

Korak 2: Određivanje ukupnih normalizovanih vrijednosti gubitka kvaliteta TNQL (*eng. Total Normalised Quality Loss values*)

Određivanje *ukupnih normalizovanih vrijednosti gubitka kvaliteta* TNQL urađeno je korišćenjem sljedećeg obrasca:

$$TNQL = \sum_{i=1}^k w_i(k) \frac{N_i(k)}{\max N_i(k)} \quad (3.15)$$

gdje su: $w_i(k)$ – težinski koeficijenti za i -tu karakteristiku kvaliteta;

$N_i(k)$ – normalizovana vrijednosti gubitka kvaliteta za i -tu karakteristiku kvaliteta

$N_i(k)$ – maksimalna vrijednost normalizovane vrijednosti gubitka kvaliteta za i -tu karakteristiku kvaliteta,

k – ukupna broj izlaznih karakteristika kvaliteta.

Korak 3: Određivanje višekriterijumskog, odnosno višestrukog odnosa S/N

Kod višekriterijumske optimizacije računa se jedan *višestruki* ili *višekriterijumski* odnos S/N umjesto pojedinačnih odnosa S/N za svaku izlaznu karakteristiku kvaliteta. Dobijeni višestruki odnos S/N označava se sa MSNR (*eng. multiple S/N ratio*) i matematički se može odrediti pomoću sljedećeg obrasca:

$$MSNR = -10\log(TNQL) \quad (3.16)$$

Korak 4: Izbor optimalnih parametara

Postupak izbora optimalnih parametara kod višekriterijumske Tagučijeve metode identičan je postupku izbora optimalnih parametara kod standardne Tagučijeve metode, samo se umjesto standardnog odnosa S/N optimalni parametri biraju na osnovu višestrukog odnosa S/N (MSNR).

3.3.3. Tagučijeva metoda sa sivom relacionom analizom (TGRA)

Pored višekriterijumske Tagučijeve metode u praksi se još primjenjuje i Tagučijeva metoda sa sivom relacionom analizom (*eng. Grey Relational Analysis – GRA*). Sivu relacionu analizu uspostavio je Deng 1989. godine i ona predstavlja granu sive teorije sistema. Kod ove metode optimizacija ulaznih promjenljivih, koje će istovremeno zadovoljiti više izlaznih performansi, vrši se na osnovu sivog relacionog stepena (*eng. Gray relatione grade – GRG*).

Tagučijeva metoda sa sivom relacionom analizom u ovom radu urađena je na način da su prva četiri koraka ista kao i kod standardne Tagučijeve metode, tj. ulaza u sivu relacionu analizu je dobijen S/N odnos za obje izlazne promjenljive. Siva relaciona analiza je definisana sljedećim koracima [201]:

Korak 1: Normalizacija podataka

Prvi korak kod sive relacione analize je normalizacija podataka, tj. kada se ova metoda kombinuje sa Tagučijevom metodom, onda se radi normalizacija S/N odnosa. Za slučaj da se koristi kriterijum „Što veća vrijednost to je bolje“, normalizacija se radi pomoću sljedećeg obrasca:

$$x_i(k) = \frac{\eta_i(k) - \min \eta_i(k)}{\max \eta_i(k) - \min \eta_i(k)} \quad (3.17)$$

gdje su: $\eta_i(k)$ – vrijednost S/N odnosa za i -tu karakteristiku kvaliteta

k – ukupna broj izlaznih karakteristika kvaliteta.

Nakon što se odredi normalizovana vrijednost odnosa S/N za svaku izlaznu karakteristiku kvaliteta, potrebno je odrediti sekvencu odstupanja, takođe za svaku izlaznu promjenljivu koristeći sljedeći obrazac:

$$\Delta_{0i} = |1 - x_i(k)| \quad (3.18)$$

Korak 2: Određivanje sivog relacionog koeficijenta (eng. *Gray relation coefficient* – GRC)

Sivi relacioni koeficijent GRC može se odrediti koristeći sljedeći obrazac:

$$\xi_i(k) = \frac{\min \Delta_{0i} + \xi \cdot \max \Delta_{0i}}{\Delta_{0i}(k) + \xi \cdot \max \Delta_{0i}} \quad (3.19)$$

gdje je $\xi \in (0,1)$, a najčešće se uzima vrijednost 0,5.

Korak 3: Određivanje sivog relacionog stepena (eng. *Gray relatione grade* – GRG)

Vrijednost sivog relacionog stepena može se odrediti pomoću sljedećeg obrasca:

$$\gamma_i = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \xi_i(k) \quad (3.19)$$

gdje je $w_i(k)$ težinski koeficijenti za i -tu karakteristiku kvaliteta.

Korak 4: Izbor optimalnih parametara

Izbor optimalnih parametara kod Tagučijeve metode sa sivom relacijom identičan je postupku izbora optimalnih parametara kod standardne Tagučijeve metode, samo se umjesto standardnog odnosa S/N optimalni parametri biraju na osnovu sivog relacionog stepena (GRG).

3.3.4. Analiza varijanse (ANOVA)

S ciljem dobijanja jasnijeg uticaja varijacije ulaznih parametara na ukupnu varijaciju posmatranih rezultata opšteprihvaćeno je da se poslije metoda optimizacije radi analiza varijanse (ANOVA). Ovu statističku metodu razvio je statističar i genetičar Ronald Fišer 1925. godine. Analiza varijanse daje tabelarni prikaz koji omogućava da se procentualno utvrdi uticaj jednog parametra na ukupnu vrijednost izlaznih performansi.

Već je naglašeno da su postavke eksperimenta za ovo istraživanje date u vidu Tagučijevog ortogonalnog plana $L_9(3^3)$, pa je prikaz primjene analize varijanse (ANOVA) upravo dat za taj primjer i to kroz sljedeće korake:

Korak 1: Stepeni slobode (*eng. Degrees of freedom – DF*)

Stepeni slobode se računaju za svaki faktor i za grešku, koristeći sljedeće obrasce:

- Ukupan broj stepeni slobode:

$$DF_{ukupno} = n - 1 = 9 - 1 = 8 \quad (3.20)$$

- Broj stepeni za svaki faktor:

$$DF_f = p - 1 = 3 - 1 = 2 \quad (3.21)$$

- Broj stepeni greške:

$$DF_E = DF_{ukupno} - \sum DF_f = 8 - 2 - 2 - 2 = 2 \quad (3.22)$$

gdje su: n – broj izvođenja eksperimenta (ovdje je $n=9$);

p – broj nivoa faktora (ovdje je $p=3$).

Pojam greške kod analize varijanse se može definisati kao kumulativna vrijednost koja uzima u obzir uticaje parametara koji nisu uključeni u eksperimente na izlazne performanse.

Korak 2: Određivanje vrijednosti korektivnog faktora (*eng. Correction factor – CF*)

Korektivni faktor CF može se odrediti pomoću sljedećeg obrasca:

$$CF = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n Y_i \right)^2 \quad (3.23)$$

gdje je Y_i izlazna i -ta vrijednost (zavisno od primijenjene metode može biti odnos S/N, MSNR ili sivi relacioni stepen GRG).

Korak 3: Određivanje suma kvadrata

Korak 3 kod analize varijanse podrazumijeva određivanje ukupne sume kvadrata izlaza, te sume kvadrata pojedinačnih faktora i greške, što se može uraditi korišćenjem sljedećih obrazaca:

- Ukupna suma kvadrata izlaza:

$$S_T = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - CF \quad (3.21)$$

- Suma kvadrata pojedinačnih faktora:

$$S_f = \frac{\left(\sum Y_{fj}\right)^2}{p} - CF \quad (3.22)$$

gdje su: f – ulazne promjenljive – faktori (ovdje je A – struja zavarivanja, B – sila u elektrodama, i C – vrijeme zavarivanja);

p – broj nivoa faktora (ovdje je $p=3$);

Y_{fj} – izlazna vrijednost faktora „ f “ na j -tom nivou.

Za slučaj faktora A, suma kvadrata može se odrediti na sljedeći način:

$$S_A = \left(\frac{Y_{A1}^2}{3} + \frac{Y_{A2}^2}{3} + \frac{Y_{A3}^2}{3}\right) - \frac{1}{9} \left(\sum_{i=1}^9 Y_i\right)^2 \quad (3.23)$$

- Suma kvadrata greške:

$$S_E = S_T - \sum S_f = S_T - S_A - S_B - S_C \quad (3.24)$$

Korak 4: Određivanje vrijednosti varijacije

Vrijednost varijacije potrebno je odrediti za svaki faktor pojedinačno kao i za grešku koristeći sljedeće obrasce:

- Varijacija za faktore:

$$V_f = \frac{S_f}{DF_f} \quad (3.25)$$

- Varijacija greške:

$$V_E = \frac{S_E}{DF_E} \quad (3.26)$$

Korak 5: Određivanje računске vrijednosti F testa

Računska vrijednost F testa se određuje za sve faktore i može se izračunati korišćenjem sljedećeg obrasca:

$$F_f = \frac{V_f}{V_E} \quad (3.27)$$

Faktori čija vrijednost F testa je ispod 1 mogu se zanemariti jer se smatra da nisu signifikantni (značajni), pa je onda potrebno uraditi ponovni proračun sa onim faktorima koji se ne zanemaruju.

Korak 6: Određivanje procentualnog učešća

Određivanje procentualnog učešća ulaznih promjenljivih na izlazne performanse, kao i određivanje procentualne vrijednosti greške može se uraditi korišćenjem sljedećih obrazaca:

- Procentualno učešće za faktore:

$$P_f [\%] = \left(\frac{S_f}{S_T} \right) \cdot 100\% \quad (3.28)$$

- Procentualno učešće greške:

$$P_E [\%] = \left(\frac{S_E}{S_T} \right) \cdot 100\% \quad (3.29)$$

Korak 7: Tabelarni zapis rezultata

Konačni rezultati dobijeni analizom varijanse zapisuju se u vidu ANOVA tabele kao što je prikazano u tabeli 3.8.

Tabela 3.8. Prikaz ANOVA tabele

Faktori	Stepeni slobode (DF)	Suma kvadrata	Varijacija	F statistika	P vrijednost	Procentualno učešće (%)
A (I)	2	S_A	V_A	F_A	P_A	$P_A (\%)$
B (F)	2	S_B	V_B	F_B	P_B	$P_B (\%)$
C (T)	2	S_C	V_C	F_C	P_C	$P_C (\%)$
Greška	2	S_E	V_E		P_E	$P_E (\%)$
Ukupno	8	$\sum S$			$\sum P$	$\sum P=100 (\%)$

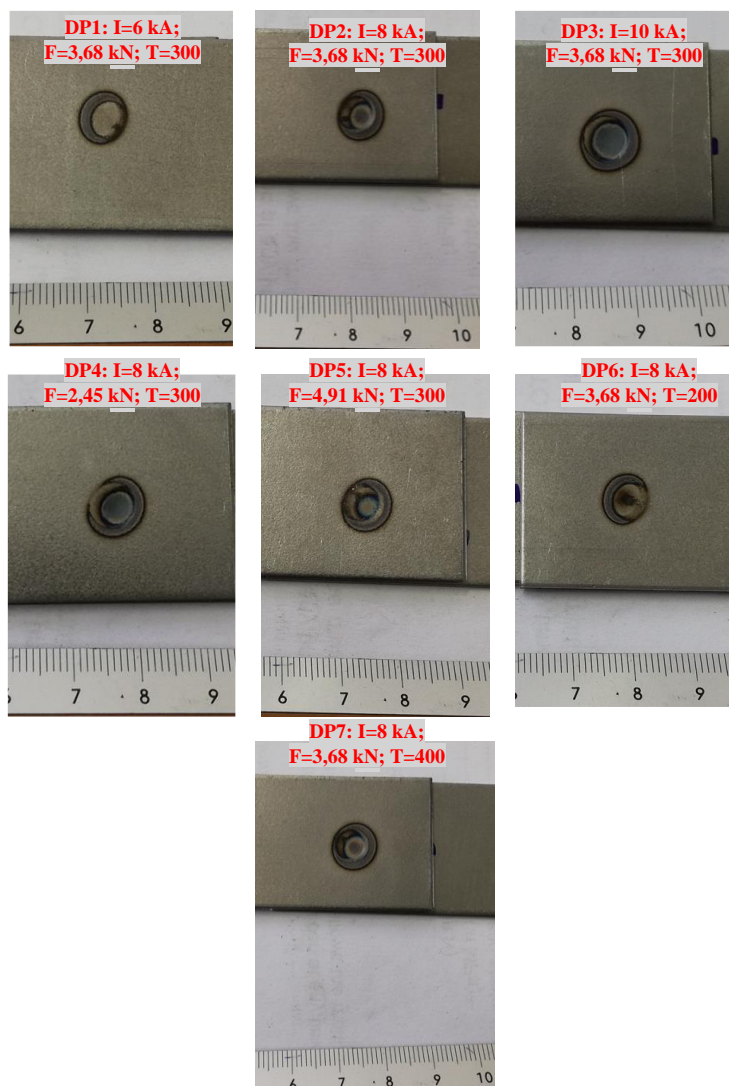
Interpretacija dobijenih rezultata u datoj tabeli započinje najprije analizom procentualnog učešća greške. Smatra se da su rezultati validni ako je procenat greške manji od 50%. S druge strane, vrijednost F statistike pokazuje takođe da li je neki faktor signifikantan, odnosno značajan za izlazne promjenljive. Već je navedeno da se faktori sa vrijednošću F statistike ispod 1 trebaju zanemariti, ali se takođe smatraju nesignifikantnim faktorima oni čija je vrijednost F testa manja od vrijednosti stepena slobode za dati faktor. Na kraju, procentualno je definisano koliko svaki od faktora utiče na izlazne performanse kao i kolika je procentualna vrijednost greške, odnosno koliko je procenat uticaja faktora koji nisu razmatrani na izlazne performanse.

4. REZULTATI I DISKUSIJA

4.1. ELEKTROTOPORNO TAČKASTO ZAVARIVANJE ČELIKA DP500

4.1.1. Vizuelno ispitivanje

Pri vizuelnom ispitivanju spojeva dva lima od čelika DP500 nisu primijećene površinske prsline i udubljenja na mjestu zavora, a vizuelnim ispitivanjem još se utvrdilo da parametri zavarivanja nemaju značajan uticaj na spoljašnji izgled i oblik zavora, što je prikazano na slici 4.1.



Slika 4.1. Prikaz uticaja parametara zavarivanja na spoljašnji izgled i oblik zavora

4.1.2. Ispitivanje na zatezanje – statički test

Dijagrami sila – izduženje, dobijeni ispitivanjem na zatezanje epruveta označenih sa DP (od 1.1 do 7.3) i zavarenih sa parametrima zavarivanja iz tabele 3.2, dati su na slikama u Prilogu 1 (od slike P.1.1. do slike P.1.7). Svi rezultati dobijeni ispitivanjem na zatezanje dati su i u tabeli 4.1.

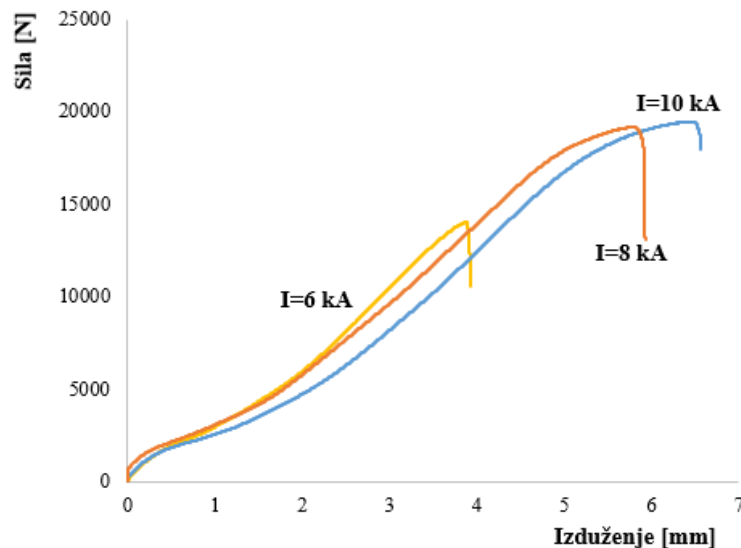
Tabela 4.1. Rezultati ispitivanja na zatezanja zavarenog spoja čelika DP500 dobijenog elektrootpornim tačkastim zavarivanjem

R.br.	Oznaka epruvete	Sila F [N]	Srednje vrijednosti sile F [N]	Vrijednosti apsorbovane energije E [J]	Srednje vrijednosti apsorbovane energije E [J]	Izduženje l [mm]	Srednja vrijednost izduženja l [mm]
1	DP 1.1*		14005		26.075		4.3
2	DP 1.2	14020		25.18		3.87	
3	DP 1.3	13990		26.97		4.73	
4	DP 2.1	19550	19530	63.1	66.0167	6.4	6.7
5	DP 2.2	19450		62.76		6.41	
6	DP 2.3	19590		72.19		7.29	
7	DP 3.1	18650	19036.67	51.08	55.2967	5.56	5.6967
8	DP 3.2	19180		56.44		5.77	
9	DP 3.3	19280		58.37		5.76	
10	DP 4.1	19520	19455	63.68	62.73	6.45	6.68
11	DP 4.2*						
12	DP 4.3	19390		61.78		6.91	
13	DP 5.1	18970	18960	67.46	65.5633	7.65	6.8467
14	DP 5.2	19240		64.88		6.59	
15	DP 5.3	18670		64.35		6.3	
16	DP 6.1	18620	18370	64.45	67.133	6.74	7.423
17	DP 6.2	18490		65.81		7.05	
18	DP 6.3	18000		71.14		8.48	
19	DP 7.1	20630	20340	91.03	81.7033	8.71	7.773
20	DP 7.2	20090		78.6		7.62	
21	DP 7.3	20300		75.48		6.99	

*Dobijeni rezultati nisu valorizovani

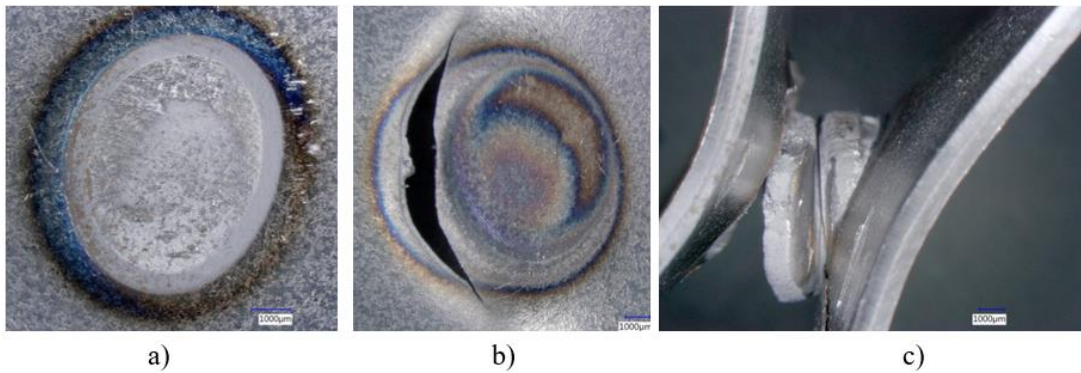
Dijagram sila – izduženje za spojeve zavarene strujom zavarivanja od 6, 8 i 10 kA dat je na slici 4.2. Shodno datoj slici, jasno se može vidjeti da povećanje struje zavarivanja ne znači i nužno povećanje maksimalne sile kidanja zavarenog spoja. Najveća vrijednost sile kidanja dobijena je za spoj zavaren strujom zavarivanja od 8 kA. Važno svojstvo kod ovakvih spojeva je i izduženje pri maksimalnoj sili, koje direktno utiče na vrijednost apsorbovane

energije spoja, koja ima najveću vrijednost pri zavarivanju sa strujom od 10 kA. Upravo s ciljem utvrđivanja optimalne vrijednosti za ova dva izlazna svojstva zavara urađena je višestruka optimizacija parametara zavarivanja.



Slika 4.2. Dijagram sila - izduženje za tačkaste spojeve zavarena strujom zavarivanja 6, 8 i 10 kA [202]

Važno svojstvo tačkastog zavarenog spoja je svakako i način loma spoja pri ispitivanju na zatezanje. Već je rečeno da je povoljniji slučaj kada dolazi do loma na način da se tačka, odnosno zavar izvlači iz jednog lima i ostaje na drugom, a takav mod otkaza nazvan je izvlačenje *PF* (eng. *pull-out failure*). S druge strane nepovoljnijim slučajem se smatra kada dođe do loma kroz zavar odnosno do međusobne frakture zavara *IF* (eng. *interfacial failure*). Pri ispitivanju datih uzoraka ustanovljeno je da je do loma u *IF* modu došlo samo kod spoja zavarenog strujom zavarivanja od 6 kA (slika 4.3a), dok je kod svih ostalih uzoraka do loma došlo u *PF* modu (slika 4.3b i 4.3c). Upravo ovakav način loma spoja govori u prilog činjenici da je maksimalna sila kod spojeva zavarenih strujom od 6 kA manja za približno 25% u odnosu na spoje zavarene strujom zavarivanja od 8 i 10 kA. Prikaz spoja nakon ispitivanja na zatezanje za sve karakteristične parametre zavarivanja dat je na slici 4.4. Kod spojeva koji su otkazali u *PF* modu jasno je vidljivo i sekundarno savijanje limova koje dovodi do izvlačenja tačke, odnosno zavara. Takođe, kod *PF* moda otkaza, prslina nastaje na obodu tačke, odnosno u zoni uticaja toplote što se može vidjeti na slici 4.3b kao i na slici 4.4. kod uzoraka označenih sa DP 2.1, DP 3.1 i DP 5.1.

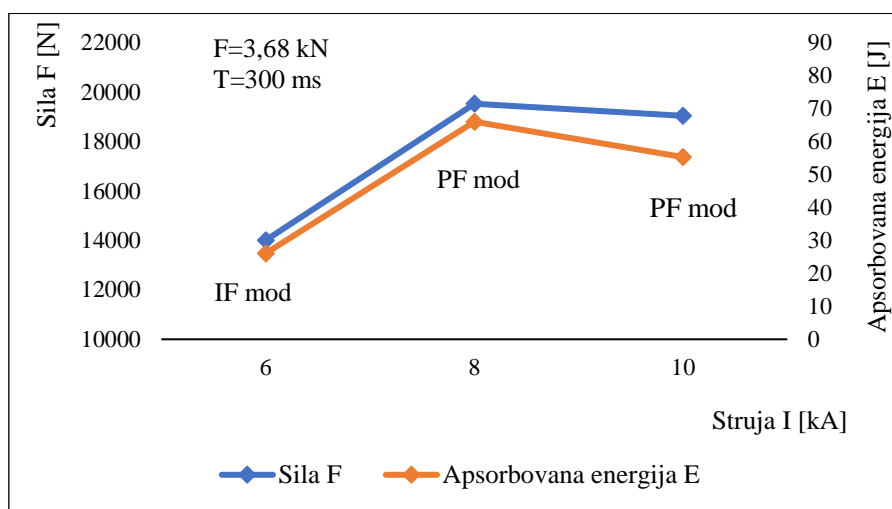


Slika 4.3. Mod otkaza pri ispitivanju na zatezanje kod tačkastih zavarenih spojeva čelika DP500: a) IF mod; b) PF mod; c) PF mod [200]

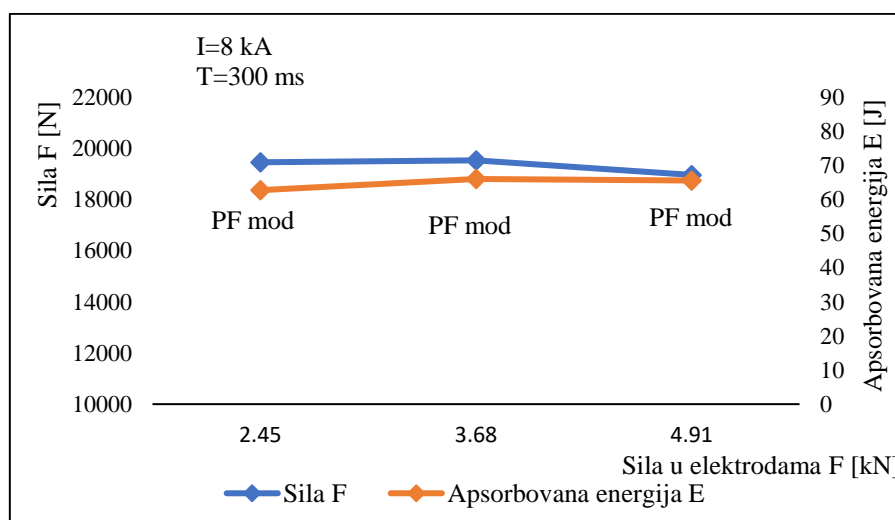


Slika 4.4. Prikaz načina loma tačkastog zavarenog spoja dva čelika od lima DP500 nakon testa na zatezanje

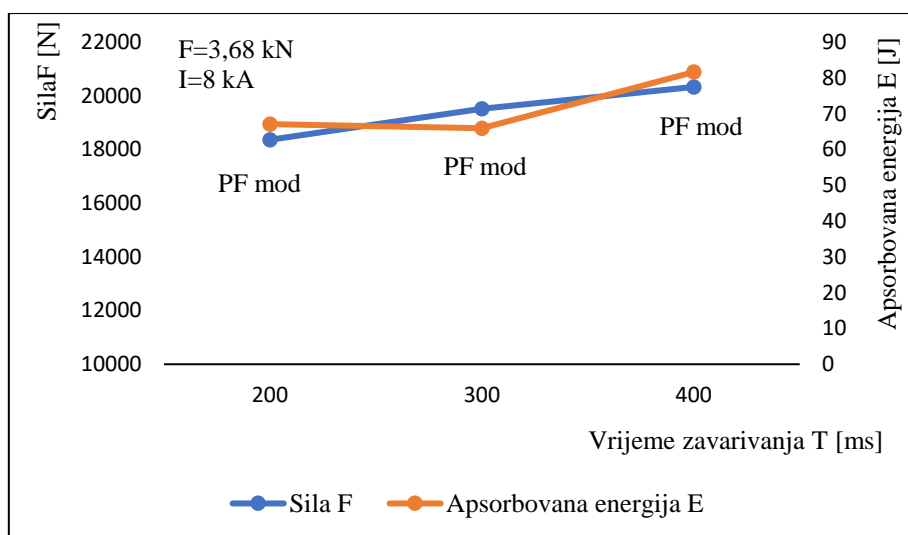
Shodno dijagramima datim u Prilogu 1 i rezultatima prikazanim u tabeli 4.1, te modu otkaza pri ispitivanju na zatezanje, može se zaključiti da na statička svojstva tačkastog zavarenog spoja dva lima od čelika DP500 u najvećoj mjeri utiče struja zavarivanja (slika 4.5). Sila u elektrodama i vrijeme zavarivanja nemaju značajan uticaj na statička svojstva spoja, što je prikazano dijagramima na slikama 4.6. i 4.7, međutim, poredeći međusobno ova dva parametra zavarivanja, može se primijetiti da nešto veći uticaj na maksimalnu silu i količinu apsorbovane energije ima vrijeme zavarivanja u odnosu na silu u elektrodama. Sa dijagrama datih na navedenim slikama se takođe može uočiti da povećanje sile ne znači i nužno povećanje količine apsorbovane energije.



Slika 4.5. Prikaz uticaja struje zavarivanja na maksimalnu silu i količinu apsorbovane energije kod tačkastog zavarenog spoja čelika DP500



Slika 4.6. Prikaz uticaja sile u elektrodama na maksimalnu silu i količinu apsorbovane energije kod tačkastog zavarenog spoja čelika DP500



Slika 4.7. Prikaz uticaja vremena zavarivanja na maksimalnu silu i količinu apsorbirane energije kod tačkastog zavarenog spoja čelika DP500

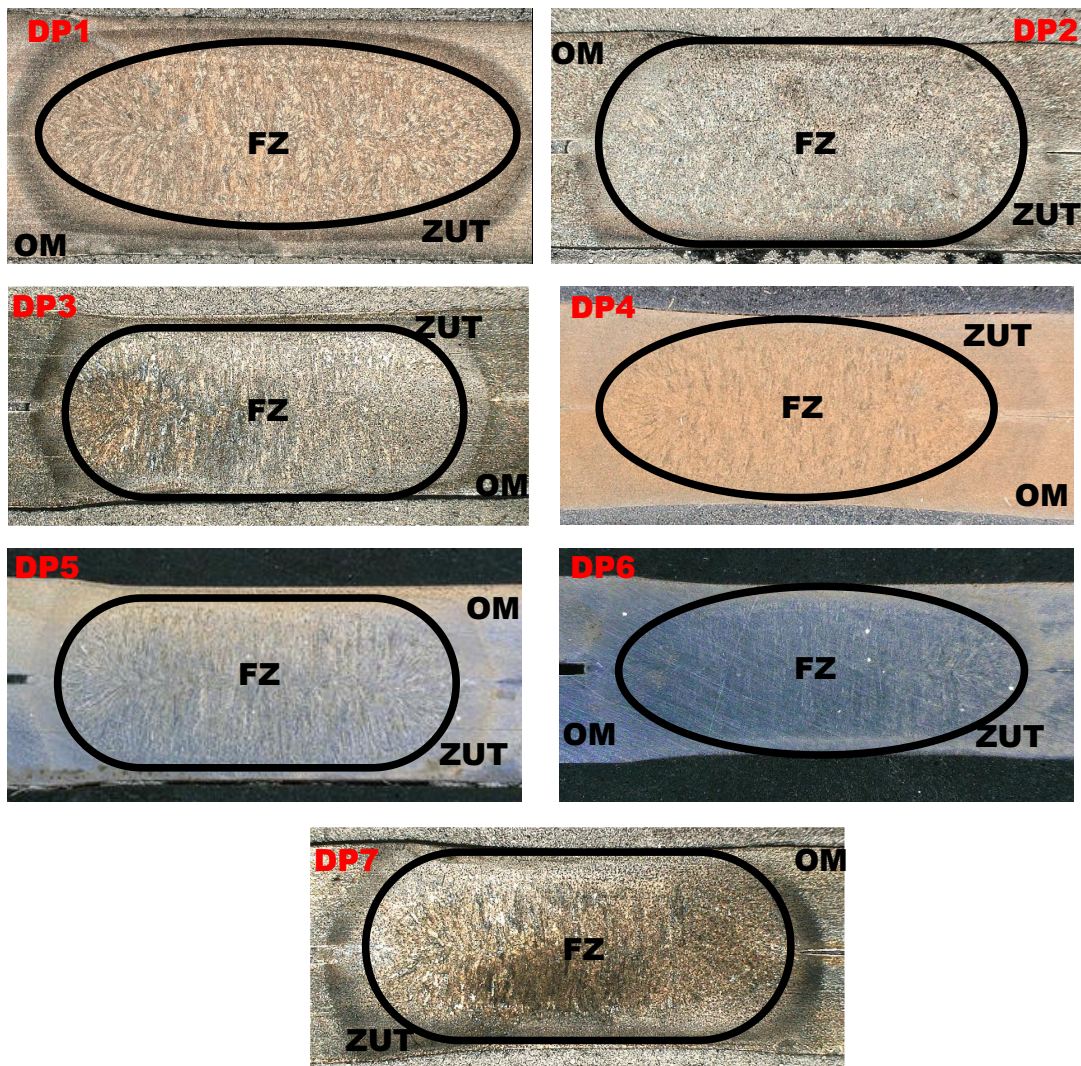
4.1.3. Metalografska ispitivanja

Kada je riječ o metalografskom ispitivanju tačkastog zavarenog spoja čelika DP500 najprije je urađena analiza makrostrukture spoja, a potom i analiza mikrostrukture. Pri makrostrukturnoj analizi određivan je prečnik jezgra zavara, te uticaj parametara zavarivanja na oblik i dimenzije zavara. Dimenzije prečnika jezgra zavara date su u tabeli 4.2. za svih sedam uzoraka. Na osnovu dimenzija datih u tabeli može se izvesti zaključak da na vrijednost prečnika jezgra zavara u najvećoj mjeri utiče dimenzija elektrode, dok parametri zavarivanja nemaju značajan uticaj.

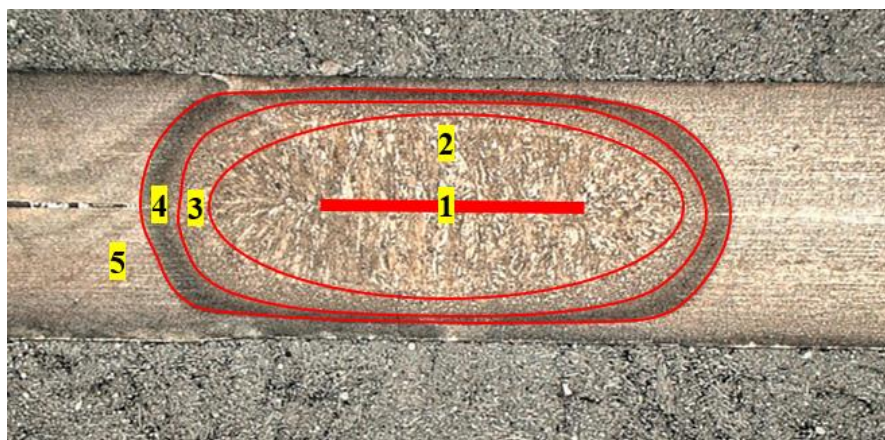
Tabela 4.2. Prikaz dimenzija prečnika jezgra zavara tačkastog spoja čelika DP500

Oznaka uzorka	DP1	DP2	DP3	DP4	DP5	DP6	DP7
d [mm]	6,2	7,1	6,8	6,7	6,5	6,7	7

Izgled poprečnog presjeka spoja, odnosno oblik jezgra zavara dat je na slici 4.8. Na datoj slici se može uočiti da se pojavljuju dva karakteristična oblika jezgra zavara, odnosno zone fuzije (FZ). Za najmanje vrijednosti razmatranih parametara zavarivanja, struju od 6 kA (DP1), silu u elektrodama od 2,45 kN (DP4), te vrijeme zavarivanja od 200 ms (DP6) uočen je oblik jezgra zavara u vidu elipse, dok je kod ostalih uzoraka izgled jezgra zavara u vidu pravougaonika sa zaobljenim krajevima. Kod svih uzoraka jasno se uočava 5 karakterističnih područja, a njihov prikaz dat je na primjeru uzorka označenog sa DP1 na slici 4.9.



Slika 4.8. Prikaz makrostrukture tačkastog zavarenog spoja čelika DP500 (FZ – zona fuzije; ZUT – zona uticaja toplote; OM – osnovni materijal)



Slika 4.9. Karakteristična područja makrostrukture tačkastog zavarenog spoja čelika DP500 (1 – područje ravnoosne strukture; 2 – područje orijentisano dentritima; 3 – područje normalizacije; 4 – područje rekristalizacije; 5 – područje osnovnog materijala)

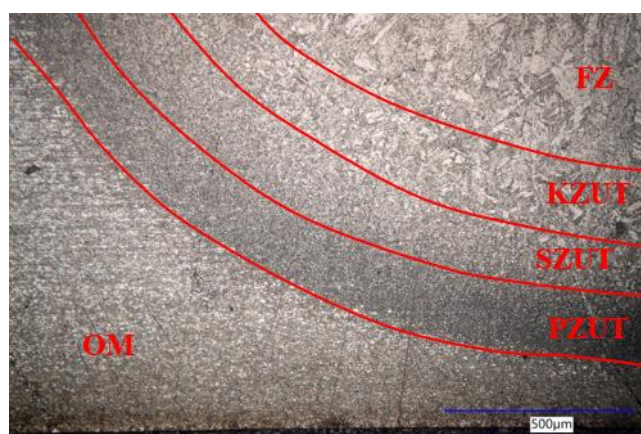
Mikrostruktura tačkastih zavarenih spojeva limova od čelika DP500 za uzorke označene sa DP1, DP2 i DP3 prikazana je na slici 4.10. Pri mikrostrukturnoj analizi posmatrana su tri područja:

- Zona fuzije (*FZ*) koja se tokom procesa zavarivanja topi i ponovo očvršćava;
- Zona uticaja toplote (*ZUT*) koja se tokom procesa zavarivanja ne topi ali prolazi kroz mikrostrukturnalne promjene;
- Zona osnovnog materijala (*OM*) koja tokom procesa zavarivanja ne doživljava nikakve mikrostrukturnalne promjene.



Slika 4.10. Prikaz mikrostruktura tačkastih zavarenih spojeva limova od čelika DP500 za uzorke označene sa DP1, DP2 i DP3 (*ZUT* – zona uticaja toplote, *FZ* – zona fuzije)

Uopšteno govoreći mikrostruktura tačkastih zavarenih spojeva ima heterogenu strukturu, a to je u skladu sa termičkim procesom koji se događa tokom zavarivanja. Osnovni materijal sastoji se od ferita i martenzita, dok se sa slike 4.10. može primijetiti da se i zona uticaja toplote (ZUT) i zona fuzije (FZ) dominantno sastoje od martenzitne strukture. Zona fuzije kod svih uzoraka sastoji se od velikih stubastih zrna nastalih uslijed usmjerenog očvršćavanja tečnog metala ka središnjoj liniji zavara. Stubasta zrna se uglavnom sastoje od letvica martenzita, a formiranje takve strukture u zoni fuzije može se pripisati visokoj brzini hlađenja koja je prisutna kod elektrootpornog tačkastog zavarivanja, prvenstveno zbog hlađenja bakarnih elektroda vodom. Dakle, zbog zagrijavanja temperaturama znatno većim od A_{C3} linije kompletan ferit prelazi u austenit, a potom, zbog velike brzine hlađenja za koju se pretpostavlja da je veća od $400\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ (znatno veće od kritične brzine potrebne za formiranje martenzita $40\text{--}120\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ [203]), austenit prelazi u latvičasti martenzit. Zona uticaja toplote počev od osnovnog materijala može se podijeliti na tri potpodručja (slika 4.11) i to na: prelaznu zonu uticaja toplote (PZUT), zonu uticaja toplote sitnih zrna (SZUT) i zonu uticaja toplote krupnih zrna (KZUT). Za prelaznu zonu uticaja toplote, te zonu uticaja toplote sitnih zrna može se reći da pripadaju području rekristalizacije, dok zona uticaja toplote krupnih zrna pripada području normalizacije. Temperatura zagrijavanja u prelaznoj zoni uticaja toplote (PZUT) je oko A_{C1} linije, pa se ona sastoji od ferita i blago kaljenog martenzita iz osnovnog materijala. Tokom zagrijavanja temperaturama nešto iznad A_{C3} linije dolazi do prelaska ferita u austenit, međutim, kratko vrijeme zagrijavanja i brzo hlađenje ograničavaju rast zrna, te se tako formira zona uticaja toplote sa sitnim zrnima (SZUT).



Slika 4.11. Prikaz karakterističnih potpodručja zone uticaja toplote kod tačkastog zavarenog spoja limova od čelika DP500 (OM – osnovni materijal, PZUT – prelazna zona uticaja toplote, SZUT – zonu uticaja toplote sitnih zrna, KZUT – zonu uticaja toplote krupnih zrna)

Mikrostruktura zone uticaja toplote sa krupnim zrnima (KZUT) sastoji se od krupnih zrna martenzita kao što je i prikazano na slici 4.11. Tokom zavarivanja, temperatura u KZUT-u dostiže vrijednost znatno iznad A_{C3} dobijajući tako 100% austenitni region. Zbog velikih brzina hlađenja i austenita bogatog ugljenikom, nakon hlađenja dolazi do formiranja krupnog zrna martenzita u prethodnim krupnim zrnima austenita.

4.1.4. Ispitivanje mikrotvrdoće

Poznato je da mikrostruktura zavarenih spojeva direktno utiče na tvrdoću spoja. U Prilogu 2 (od slike P.2.1. do slike P.2.7) dati su profili tvrdoće za sedam uzoraka označenih sa DP1–DP7 i ispitanih u skladu sa procedurom definisanom u poglavlju 3.2.4. Treba napomenuti da vrijednost tvrdoće u zoni uticaja toplote značajno zavisi od potpodručja, odnosno od mikrostrukture same zone uticaja toplote, dok u zoni fuzije tvrdoća u najvećoj mjeri zavisi od veličine zrna. U tabeli 4.3. data je prosječna vrijednost tvrdoće za osnovni materijal, dok su date približne vrijednosti tvrdoće zone fuzije i zone uticaja toplote za svih sedam uzoraka.

Tabela 4.3. Prikaz mikrotvrdoće karakterističnih zona tačkastog zavarenog spoja limova od čelika DP500

Oznaka epruvete	DP1	DP2	DP3	DP4	DP5	DP6	DP7
OM [HV]	235						
ZUT [HV]	250-350	240-270	260-300	240-330	240-315	260-300	250-310
FZ [HV]	375	350	350	360	350	355	360

Tvrdoća od približno 350 HV u zoni fuzije može se pripisati pretežno martenzitnoj strukturi. Sa druge strane, tvrdoća veća od 300 HV u ZUT-u takođe je zbog prisustva martenzita, dok je manja od 300 HV zbog sadržaja ferita. Manja tvrdoća ZUT-a u odnosu na FZ može biti povezana sa visokim elastičnim izobličenjem u volumenu kristala FZ zrna. Poznato je da je elastična distorzija u kristalu nastala martenzitnom transformacijom faktora koji povećava tvrdoću martenzita [204].

S obzorom na to da se u zoni fuzije dominantno pojavljuje martenzitna struktura, onda je moguće izračunati vrijednosti tvrdoće zone fuzije koristeći obrasce (2.11) i (2.12). Prema obrascu (2.11) koji predviđanje martenzitne tvrdoće vrši samo na osnovu sadržaja ugljenika u čeliku DP500, te na osnovu podataka datih u tabeli 3.1. dobija se da je vrijednost tvrdoće zone fuzije 382,37 HV. S druge strane, vrijednost tvrdoće zone fuzije izračunate koristeći obrazac (2.12) iznosi 328,37 HV. Posmatrajući dobijene vrijednosti dolazi se do

zaključka da je korišćenjem prethodna dva obrasca moguće približno odrediti tvrdoću zone fuzije koja potom može biti iskorišćena kako bi se odredila kritična vrijednost prečnika zavara potrebnog za lom u PF modu, kao što je prikazano obrascem (2.10).

Shodno analizi mikrostrukture, te rezultatima dobijenim ispitivanjem tvrdoće dolazi se do zaključka da od razmatranih parametara zavarivanja struja ima najveći uticaj na mikrostrukturu i tvrdoću zavara.

4.1.5. Optimizacija parametara elektrootpornog tačkastog zavarivanja limova od čelika DP500

Kao što je već rečeno, s ciljem utvrđivanja jasnijeg uticaja parametara zavarivanja na maksimalnu silu kidanja F_{max} i izduženje pri maksimalnoj sili kidanja l_{max} , kao dvjema važnim mehaničkim svojstvima spoja, urađena je optimizacija parametara zavarivanja i to u skladu sa procedurom opisanom u poglavlju 3.3. Prije same statističke obrade rezultata bilo je potrebno uraditi ispitivanja na zatezanje svih uzoraka zavarenih sa parametrima definisanim u tabeli 3.7. Ispitivanje na zatezanje je urađeno sa tri ponavljanja, a dobijeni rezultati, odnosno srednje vrijednosti maksimalne sile kidanja i izduženja pri maksimalnoj sili kidanja, prikazani su u tabeli 4.4. Dijagrami sila – izduženje dobijeni ispitivanjem se nalaze u Prilogu 1.

Tabela 4.4. Rezultati ispitivanja na zatezanja zavarenog spoja čelika DP500 dobijenog elektrootpornim tačkastim zavarivanjem za parametre zavarivanja date u tabeli 3.7.

R.br.	Oznaka	Oznaka epruvete	Srednja vrijednost maksimalne sile kidanja F [kN]	Srednja vrijednost izduženja pri maksimalnoj sili kidanja l [mm]
1	T1	DP8	13360	5.417
2	T2	DP1	14005	4.3
3	T3	DP9	12626.67	5.563
4	T4	DP4	19455	6.68
5	T5	DP7	20340	7.773
6	T6	DP10	18166.67	9.593
7	T7	DP11	21456	10.47
8	T8	DP12	16226.67	8.133
9	T9	DP13	17480	8.673

4.1.5.1. Jednokriterijumska Tagučijeva optimizacija

Jednokriterijumska Tagučijeva optimizacija podrazumijeva optimizaciju parametara zavarivanja samo na osnovu jedne izlazne karakteristike. Koristeći obrazac (3.5), koji podrazumijeva da je veća vrijednost izlazne karakteristike bolja, izračunata je vrijednost odnosa S/N, a rezultati za obje izlazne karakteristike dati su u tabeli 4.5.

Tabela 4.5. Prikaz vrijednosti S/N odnosa za maksimalnu silu kidanja F i izduženje pri maksimalnoj sili kidanja l

Oznaka epruvete	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
S/N za silu	82.516	82.926	82.026	85.781	86.167	85.186	86.631	84.205	84.851
S/N za izduženje	14.675	12.669	14.906	16.496	17.812	19.639	20.398	18.205	18.763

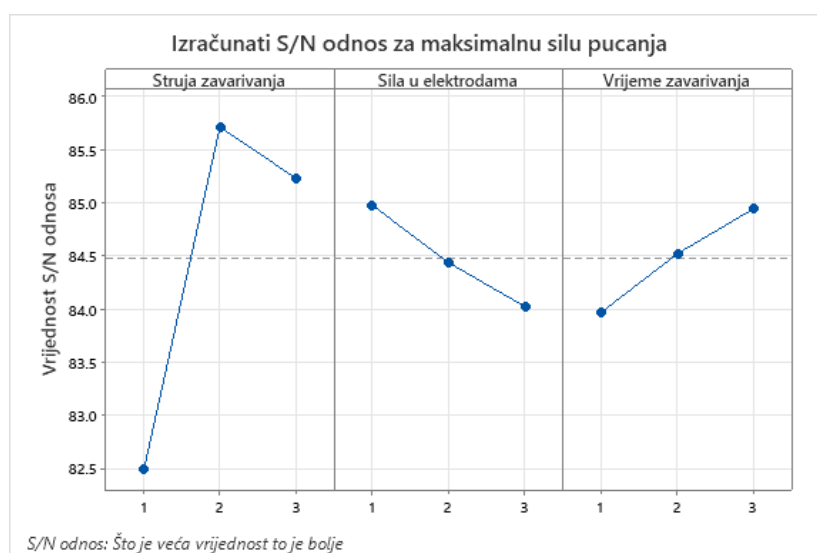
- Optimizacija parametara zavarivanja u funkciji maksimalne sile kidanja F_{max}

Prikaz izračunate vrijednosti S/N odnosa za svaki parametar i odgovarajući nivo dat je u tabeli 4.6, dok je S/N grafik dobijen na osnovu date tabele prikazan je na slici 4.12.

Tabela 4.6. Odzivna tabela S/N odnosa za maksimalnu silu kidanja F

S/N odnos za maksimalnu silu kidanja F			
Nivoi / Faktori	Struja zavarivanja	Sila u elektrodama	Vrijeme zavarivanja
Nivo 1	82.4892	84.9759*	83.9687
Nivo 2	85.7110*	84.4324	84.5190
Nivo 3	85.2288	84.0207	84.9413*
Min-max	3.2219	0.9552	0.9725
Rang	1	3	2

* optimalni nivo



Slika 4.12. Odzivni grafik S/N odnosa za maksimalnu silu kidanja F

Na osnovu tabele 4.6, te grafika S/N odnosa prikazanog na slici 4.12. zaključuje se da su optimalni parametri zavarivanja dobijeni na osnovu maksimalne sile kidanja: struja

zavarivanja na drugom nivou od 8 kA, sila u elektrodama na prvom nivou od 2,45 kN i vrijeme zavarivanja na trećem nivou od 400 ms. Takođe, posmatrajući dati dijagram i tabelu može se zaključiti da struja zavarivanja ima najveći uticaj na maksimalnu silu kidanja, a sa činjenicom da je optimalna vrijednost struje na drugom nivou potvrđena je prethodno navedena tvrdnja da povećanje struje zavarivanja ne znači i nužno povećanje maksimalne sile kidanja.

Koristeći jednačine (3.10)–(3.12) određena je vrijednost S/N odnosa i maksimalne sile kidanja na optimalnom novu. Dobijena vrijednost S/N odnosa na optimalnom nivou iznosi 86,68, dok vrijednost maksimalne sile kidanja na optimalnom nivou iznosi 21566,33 kN.

Koristeći proceduru objašnjenu u poglavlju 3.3.4. urađena je analiza varijanse (ANOVA) za maksimalnu silu kidanja, a rezultati su prikazani u tabeli 4.7.

Tabela 4.7. ANOVA tabela za maksimalnu silu kidanja F

Faktor	Stepen slobode	Suma kvadrata	Varijacija	F-test	Procentualno učešće
	DF	S	V	F	P(%)
Struja zavarivanja	2	18.12	9.059	14.509	81.72
Sila u elektrodama	2	1.38	0.689	1.103	6.21
Vrijeme zavarivanja	2	1.43	0.713	1.143	6.44
Greška	2	1.25	0.624		5.63
Ukupno	8	22.18			100%

S obzirom na to da je procentualno učešće greške manje od 50%, odnosno da iznosi 5,63%, eksperiment se smatra uspješnim. S druge strane, vrijednosti F-testa pokazuju da je samo struja zavarivanja signifikantan faktor jer je kod ostala dva faktora (sila u elektrodama i vrijeme zavarivanja) vrijednost F-testa manja od vrijednosti stepena slobode. Procentualno učešće pojedinih faktora na maksimalnu silu kidanja u potpunosti je saglasno sa rezultatima dobijenim Tagučijevom metodom, odnosno potvrđeno je da struja zavarivanja ima najveći uticaj na maksimalnu silu kidanja (81.72, dok je uticaj ostala dva faktora znatno manji. Dakle, uticaj sile u elektrodama na maksimalnu silu kidanja je 6,21%, dok je uticaj vremena zavarivanja 6,44%. Važno je napomenuti da mali procenat greške pokazuje da na maksimalnu silu kidanja samo u procentu od 5,63% utiču parametri koji nisu bili predmet razmatranja.

- Optimizacija parametara zavarivanja u funkciji izduženja pri maksimalnoj sili kidanja

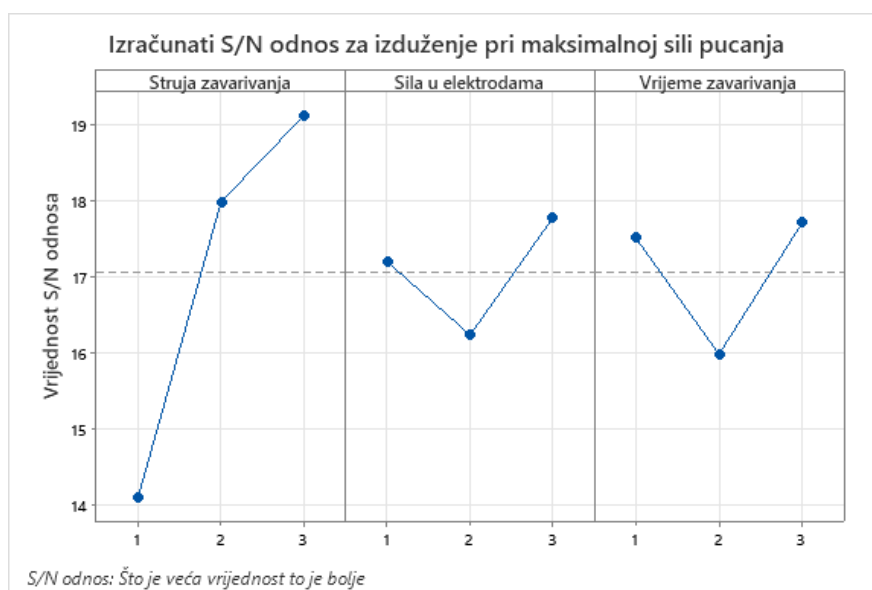
l_{max}

Prikaz izračunate vrijednosti S/N odnosa za svaki parametar i odgovarajući nivo na osnovu izduženja pri maksimalnoj sili kidanja l_{max} dat je u tabeli 4.8, dok je S/N grafik dobijen na osnovu date tabele prikazan je na slici 4.13.

Tabela 4.8. Odzivna tabela S/N odnosa za izduženje pri maksimalnoj sili kidanja l

S/N odnos za izduženje pri maksimalnoj sili kidanja l			
Nivoi / Faktori	Struja zavarivanja	Sila u elektrodama	Vrijeme zavarivanja
Nivo 1	14.084	17.189	17.506
Nivo 2	17.982	16.228	15.976
Nivo 3	19.122*	17.769*	17.706*
Min-max	5.038	1.541	1.73
Rang	1	3	2

* optimalni nivo



Slika 4.13. Odzivni grafik S/N odnosa za izduženja pri maksimalnoj sili kidanja F

Shodno prethodnoj tabeli i dijagramu zaključuje se da su optimalni parametri zavarivanja dobijeni na osnovu izduženja pri maksimalnoj sili kidanja za sva tri faktora na trećem nivou, odnosno struji zavarivanja od 10 kA, sili u elektrodama od 4,91 kN i vremenu zavarivanja od 400 ms. Takođe, posmatrajući dati dijagram i tabelu može se zaključiti da i u ovom slučaju struja zavarivanja ima najveći uticaj. Vrijednost S/N odnosa na optimalnom nivou iznosi 20,47, dok vrijednost izduženja pri maksimalnoj sili na optimalnom nivou iznosi 10,56 mm.

Analiza varijanse (ANOVA) urađena je i za slučaj izduženja pri maksimalnoj sili kidanja, a rezultati su prikazani u tabeli 4.9.

Tabela 4.9. ANOVA tabela za izduženja pri maksimalnoj sili kidanja F

Faktor	Stepen slobode	Suma kvadrata	Varijacija	F-test	Procentualno učešće
	DF	S	V	F	P(%)
Struja zavarivanja	2	41.889	20.945	26.111	79.79
Sila u elektrodama	2	3.634	1.817	2.265	6.92
Vrijeme zavarivanja	2	5.373	2.686	3.349	10.23
Greška	2	1.604	0.802		3.06
Ukupno	8	52.5			100%

Procentualno učešće greške iznosi 3.06%, pa se eksperiment smatra uspješnim. Vrijednosti F-testa pokazuju da su svi faktori signifikantni jer je kod svih vrijednost veća od stepena slobode. Procentualno učešće pojedinih faktora na izduženje pri maksimalnoj sili kidanja u potpunosti je saglasno sa rezultatima dobijenim Tagučijevom metodom, odnosno ponovo je potvrđeno da struja zavarivanja ima najveći uticaj na izduženje pri maksimalnoj sili kidanja (79.79%) dok je uticaj ostala dva faktora znatno manji. Dakle, uticaj sile u elektrodama na izduženje pri maksimalnoj sili kidanja je 6.92%, dok je uticaj vremena zavarivanja 10.23%. Kao i u prethodnom slučaju, ovdje je takođe veoma mali procenat greške (3,06%), što pokazuje da na izduženje pri maksimalnoj sili kidanja veoma malo utiču parametri koji nisu bili predmet razmatranja.

4.1.5.2. Višekriterijumska optimizacija

Kao što je objašnjeno u poglavlju 3.3, višekriterijumska optimizacija podrazumijeva analizu parametara zavarivanja na osnovu više izlaznih karakteristika. Na osnovu jednokriterijumske Tagučijeve optimizacije zaključuje se da su različite vrijednosti optimalnih parametara zavarivanja dobijene na osnovu maksimalne sile kidanja i izduženja pri maksimalnoj sili kidanja, pa se postavlja pitanje koji su to optimalni parametri koji će podjednako zadovoljiti obje veličine. Višekriterijumska optimizacija parametara zavarivanja urađena je korišćenjem višekriterijumske Tagučijeve metode i Tagučijeve metode sa sivom relacijom analizom.

- Višekriterijumska Tagučijeva metoda

Koristeći jednačine (3.13)–(3.16), a na osnovu vrijednosti za maksimalnu silu kidanja i izduženja pri maksimalnoj sili kidanja (tabela 4.4), određene su normalizovane vrijednosti gubitka kvaliteta (NQL) za obje izlazne karakteristike, ukupna normalizovana vrijednost kvaliteta ($TNQL$), te, na kraju, i višestruki S/N odnos ($MSNR$). S obzirom na to da se optimizacija vrši na osnovu dvije izlazne karakteristike, vrijednost težinskih koeficijenata iznosila je 0,5 za svaku od izlaznih karakteristika (ista važnost izlaznih karakteristika). Dobijeni rezultati prikazani su u tabeli 4.10.

Tabela 4.10. Prikaz normalizovanih vrijednosti gubitka kvaliteta (NQL), ukupne normalizovane vrijednosti gubitka kvaliteta ($TNQL$) i višestrukog S/N odnosa $MSNR$

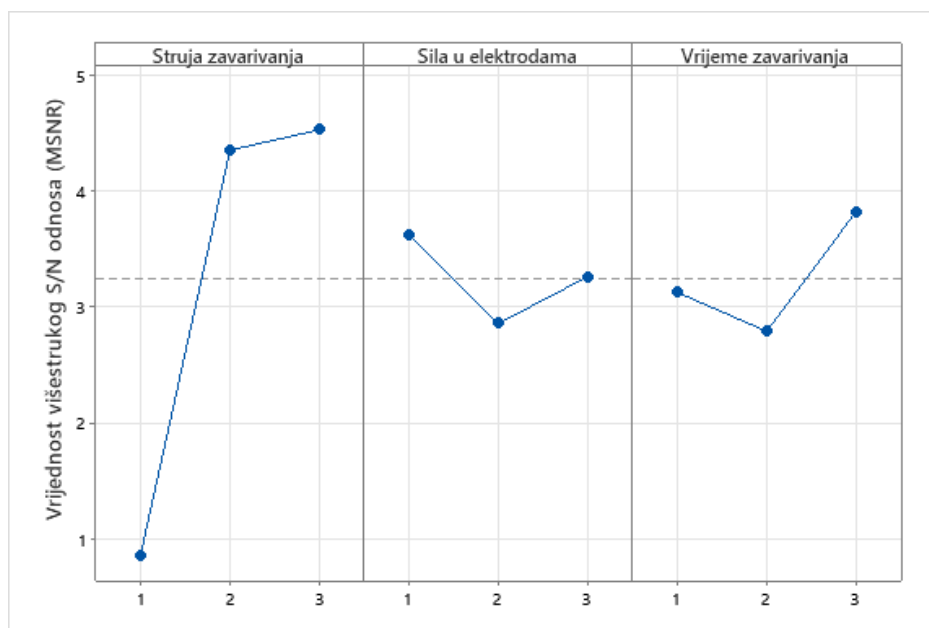
R. br.	Normalizovane vrijednosti gubitka kvaliteta NQL		TNQL	MSNR
	F	l		
1	0.893232	0.630114	0.761673	1.182313
2	0.812851	1	0.906426	0.426678
3	1	0.597474	0.798737	0.975963
4	0.421226	0.414366	0.417796	3.790359
5	0.385368	0.306027	0.345697	4.613039
6	0.483089	0.200922	0.342006	4.659669
7	0.346322	0.168672	0.257497	5.892278
8	0.605506	0.279534	0.44252	3.540666
9	0.521789	0.245809	0.383799	4.158963

Prikaz izračunatih vrijednosti višestrukog S/N odnosa ($MSNR$) za svaki parametar i odgovarajući nivo na osnovu obje izlazne karakteristike (maksimalne sile kidanja F_{max} i izduženja pri maksimalnoj sili kidanja l_{max}) dat je u tabeli 4.11, dok je grafik za višestruki S/N odnos dat na slici 4.14.

Tabela 4.11. Odzivna tabela višestrukog S/N odnosa ($MSNR$)

Višestruki S/N odnos za obje izlazne karakteristike			
Nivoi / Faktori	Struja zavarivanja	Sila u elektrodama	Vrijeme zavarivanja
Nivo 1	0.861650998	3.62165*	3.127549
Nivo 2	4.35435565	2.860128	2.792
Nivo 3	4.530635472*	3.264865	3.827093*
Min-max	3.668984475	0.761522	1.035093
Rang	1	2	3

* optimalni nivo



Slika 4.14. Odzivni grafik višestrukog S/N odnosa

Shodno prethodnoj tabeli i dijagramu, optimalni parametri zavarivanja dobijeni višekriterijumskom Tagučijevom optimizacijom, koji će podjednako zadovoljiti obje posmatrane izlazne karakteristike su: struja zavarivanja od 10 kA (treći nivo), sila u elektrodama od 2,45 kN (prvi nivo) i vrijeme zavarivanja od 400 ms (treći nivo). Kako je kod obje prethodno urađene jednokriterijumske metode struja zavarivanja bila najuticajniji faktor bilo je za očekivati da će to biti slučaj i kod višekriterijumske optimizacije, što potvrđuje prethodni dijagram i tabela (kod struje zavarivanja najveća je razlika između maksimalne i minimalne vrijednosti višestrukog S/N odnosa).

Analiza varijanse (ANOVA) urađena je za višestruki S/N odnos (MSNR), a rezultati ANOVA analize prikazani su u tabeli 4.12.

Tabela 4.12. ANOVA tabela za višestruki S/N odnos (MSNR)

Faktor	Stepen slobode	Suma kvadrata	Varijacija	F-test	Procentualno učešće
	DF	S	V	F	P(%)
Struja zavarivanja	2	25.692	12.846	21.21	87.25
Sila u elektrodama	2	0.871	0.435	0.720	2.96
Vrijeme zavarivanja	2	1.673	0.837	1.381	5.68
Greška	2	1.211	0.606		4.11
Ukupno	8	29.447			100%

Rezultati analize varijanse za višestruki S/N odnos (*MSNR*) su slični rezultatima analize varijanse za maksimalnu silu kidanja. Odnosno, vrijednosti F-testa pokazuju da je samo struja zavarivanja signifikantan faktor jer kod ostala dva faktora (sila u elektrodama i vrijeme zavarivanja) vrijednost F-testa je manja od vrijednosti stepena slobode. Procentualno učešće pojedinih faktora u potpunosti je saglasno sa rezultatima dobijenim višekriterijumskom Tagučijevom metodom, odnosno potvrđeno je da struja zavarivanja ima najveći uticaj na izlazne karakteristike (87,25%) dok je uticaj ostala dva faktora gotovo zanemarljiv. Vrijednost greške od 4.11% pokazuje ne samo da je eksperiment uspio nego da i je i uticaj parametara koji nisu razmatrani, odnosno uzeti u obzir pri datoj analizi na izlazne karakteristike, takođe zanemarljiv.

- Tagučijeva metoda sa sivom relacionom analizom

Procedura višekriterijumske optimizacije primjenom Tagučijeve metode sa sivom relacionom analizom objašnjena je u poglavlju 3.3.3. Koristeći obrasce date u pomenutom poglavlju izračunate su normalizovane vrijednosti S/N odnosa, sekvenca odstupanja (*SEQU*) i vrijednost sivog relacionog koeficijenta (*GRC*) za obje izlazne karakteristike (maksimalnu silu kidanja i izduženje pri maksimalnoj sili kidanja), a potom je određena vrijednost sivog relacionog stepena (*GRG*) na način da su težinski koeficijenti kao i u prethodnom slučaju iznosili 0,5. Vrijednosti pomenutih veličina prikazane su u tabeli 4.13.

Tabela 4.13. Prikaz normalizovanih vrijednosti S/N odnosa, te vrijednosti sekvence odstupanja (SEQU), sivog relacionog koeficijenta (GRC) i sivog relacionog stepena (GRG)

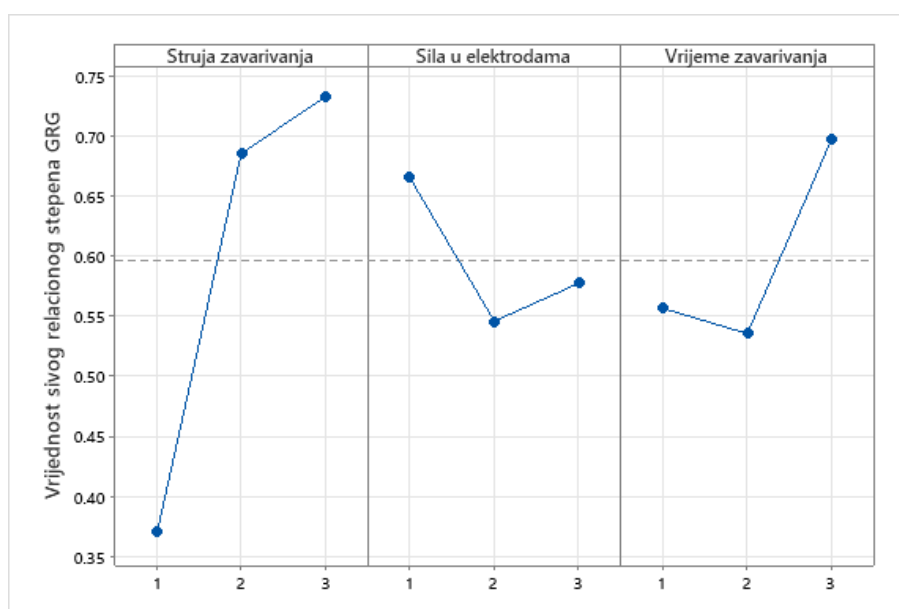
R. br.	Normalizovane vrijednosti S/N odnosa		SEQU		GRC		GRG
	<i>F</i>	<i>l</i>	<i>F</i>	<i>l</i>	<i>F</i>	<i>l</i>	
1	0.10649	0.259498	0.89351	0.740502	0.358806	0.403063	0.380934
2	0.19547	0	0.80453	1	0.38328	0.333333	0.358307
3	0	0.289384	1	0.710616	0.333333	0.413013	0.373173
4	0.81577	0.495003	0.18422	0.504997	0.73075	0.497514	0.614132
5	0.89972	0.66529	0.10027	0.33471	0.832949	0.599011	0.71598
6	0.68650	0.901696	0.31349	0.098304	0.614631	0.835696	0.725163
7	1	1	0	0	1	1	1
8	0.47338	0.716165	0.52661	0.283835	0.487036	0.63789	0.562463
9	0.61375	0.788404	0.38624	0.211596	0.564177	0.702646	0.633411

Prikaz izračunate vrijednosti sivog relacionog stepena (*GRG*) za svaki parametar i odgovarajući nivo dat je u tabeli 4.14, dok je odzivni grafik za sivi relacioni stepen (*GRG*) dat na slici 4.15.

Tabela 4.14. Odzivna tabela sivog relacionog stepena (*GRG*)

Sivi relacioni stepen (<i>GRG</i>)			
Nivoi / Faktori	Struja zavarivanja	Sila u elektrodama	Vrijeme zavarivanja
Nivo 1	0.3708	0.6650*	0.5562
Nivo 2	0.6851	0.5455	0.5353
Nivo 3	0.7319*	0.5773	0.6964*
Min-max	0.3611	0.1195	0.1611
Rang	1	2	3

* optimalni nivo



Slika 4.15. Odzivni grafik sivog relacionog stepena (*GRG*)

Tagučijevom metodom sa sivom relacionom analizom dobijeni su isti optimalni parametri zavarivanja kao i pri korišćenju višekriterijumske Tagučijeve optimizacije, a to su: struja zavarivanja od 10 kA (treći nivo), sila u elektrodama od 2,45 kN (prvi nivo) i vrijeme zavarivanja od 400 ms (treći nivo). Takođe, uticaj datih parametara zavarivanja na izlazne karakteristike identičnog je ranga. Najveći uticaj ima struja zavarivanja, pa vrijeme zavarivanja i na kraju sila u elektrodama. S obzorom na to da je Tagučijeva metoda sa sivom relacionom analizom već dokazan metod višekriterijumske optimizacije, može se zaključiti da i višekriterijumska Tagučijeva metoda daje zadovoljavajuće rezultate i da se može primjenjivati pri višekriterijumskoj optimizaciji.

Prema već ustaljenoj analogiji, za sivi relacioni stepen urađena je i analiza varijanse (ANOVA), a rezultati date analize su prikazani u tabeli 4.15.

Tabela 4.15. ANOVA tabela za sivi relacioni stepen

Faktor	Stepen slobode	Suma kvadrata	Varijacija	F-test	Procentualno učešće
	DF	S	V	F	P(%)
Struja zavarivanja	2	0.2314	0.1157	4.710	66.2
Sila u elektrodama	2	0.0229	0.0115	0.4676	6.57
Vrijeme zavarivanja	2	0.0460	0.0230	0.9372	13.17
Greška	2	0.0491	0.0246		14.06
Ukupno	8	0.3494			100%

Rezultati analize varijanse (ANOVA) u potpunosti su saglasni sa rezultatima dobijenim pomoću Tagučijeve metode sa sivom relacionom analizom. U ovom slučaju, kao i kod analize varijanse dobijene na osnovu višestrukog S/N odnosa, samo je struja zavarivanja signifikantan faktor, međutim, procentualno gledano uticaj struje je manji, dok je procentualno učešće greške (parametara koji nisu razmatrani) veće.

Shodno prethodnoj analizi zaključuje se da je struja zavarivanja najuticajniji faktor, a da su optimalni parametri zavarivanja koji će dati maksimalne vrijednosti sile kidanja i izduženja pri maksimalnoj sili kidanja sljedeći:

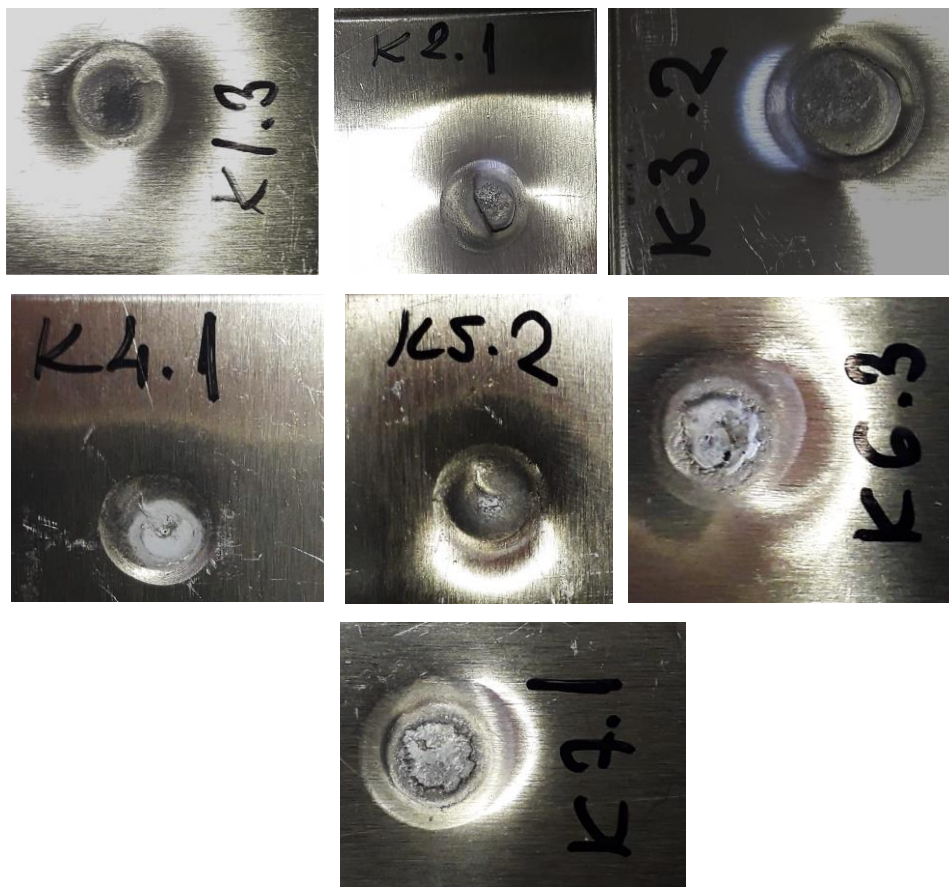
- Struja zavarivanja: $I=10$ kA;
- Sila u elektrodama: $F=2,45$ kN;
- Vrijeme zavarivanja: $T=400$ ms.

Posmatrajući optimalne parametre zavarivanja dolazi se do zaključka da je uzorak označen u tabeli 4.4. sa T7 upravo zavaren sa datim parametrima zavarivanja, a vrijednost sile kidanja od 21456 N i izduženja pri sili kidanja od 10.47 mm su najveće vrijednosti u poređenju sa ostalim rezultati prikazanim u tabelama 4.1. i 4.4. Prethodna činjenica potvrđuje, odnosno verifikuje prethodnu višekriterijumsku optimizaciju. Takođe, treba napomenuti da je mod otkaza kod svih uzorka zavarenih sa strujom zavarivanja od 6 kA (označeni sa T1, T2, T3), bio međusobna fraktura zavara odnosno IF mod, kod svih ostalih uzoraka do loma došlo je u PF modu. Prethodno navedeno potvrđuje da struja zavarivanja ima najveći uticaj na izlazne karakteristike.

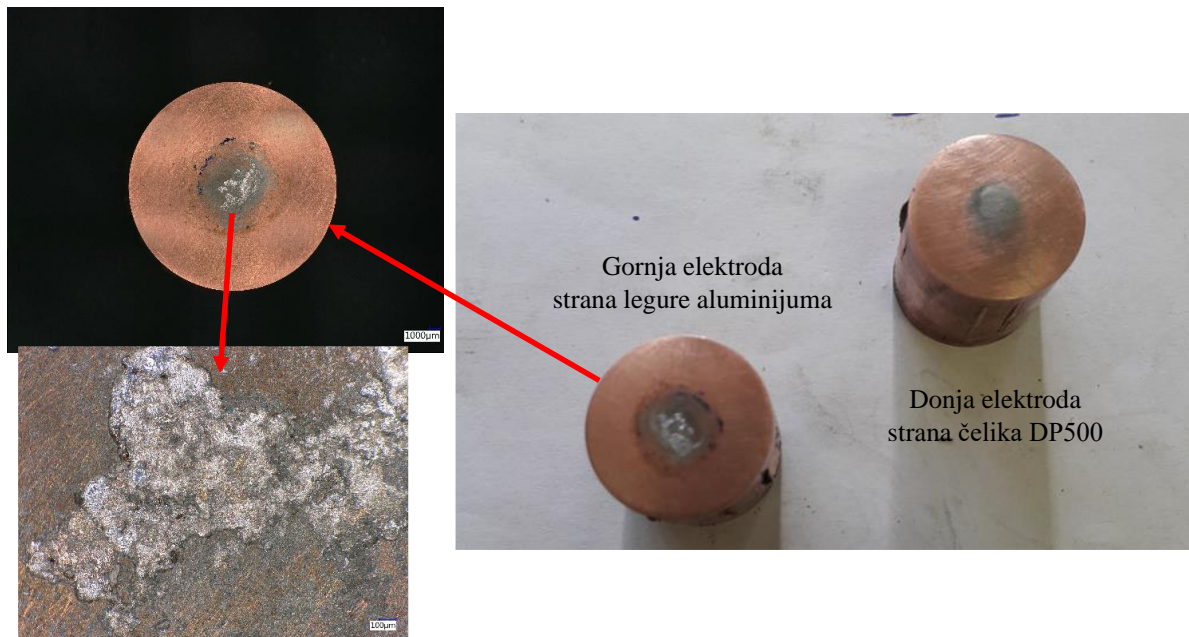
4.2. ELEKTROOTPORNO TAČKASTO ZAVARIVANJE ČELIKA DP500 I LEGURE ALUMINIJUMA AW 5754

4.2.1. Vizuelno ispitivanje

Pri vizuelnom ispitivanju tačkastog zavarenog spoja limova čelik DP500 i legura aluminijuma AW 5754 uočene su pukotine i udubljenja (stanjenje) u aluminijumu na mjestu zavara, što je prikazano na slici 4.16. Na datoj slici mogu se uočiti različiti tipovi pukotina: pukotine po obimu tačke (uzorak označen sa K3.2), površinske pukotine (K1.3, K7.1), te zapreminske pukotine (K2.1, K6.3). Kod uzoraka K4.1 i K5.2 uočava se udubljenje, odnosno stanjenje aluminijuma na mjestu zavara. Greške u zavaru u većoj ili manjoj mjeri su uočene kod svih zavarenih uzoraka. Razlog pojave ovih grešaka u zavarenom spoju može se opisati hemijskom reakcijom između bakarne elektrode i legure aluminijuma. Treba napomenuti da je postupak zavarivanja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 započet sa potpuno čistim elektrodama, da bi nakon 21. zavarenog uzorka elektrode izgledale gotovo uništeno, odnosno neupotrebljivo bez naknadne obrade (slika 4.17).



Slika 4.16. Prikaz uticaja parametara zavarivanja na spoljašnji izgled i oblik tačke zavarenog spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 na strani aluminijuma



Slika 4.17: Izgled elektrode nakon zavarivanja 21-og uzorka lima od čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754

4.2.2. Ispitivanje na zatezanje – statički test

Zbog uočenih grešaka u zavarenom spoju očekivana su veoma loša mehanička svojstva tačkastog zavarenog spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754. Rezultati ispitivanja na zatezanje dati su u tabeli 4.16, dok su dijagrami sila – izduženje dati na slikama u Prilogu 3 (od slike P.3.1. do slike P.3.7). Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da je moguće izvesti tačkasti zavareni spoj limova od čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 koji će izdržati silu od približno 2500 N. S druge strane, uočava se da spojevi dobijeni na ovaj način imaju veoma malu duktilnost (izduženje) koja direktno utiče na mogućnost apsorpcije energije.

Parametri zavarivanja imaju veliki uticaj na mehanička svojstva spoja, međutim zbog pojave grešaka u spojevima nije moguće utvrditi koji od parametara je najuticajniji, a koji je najmanje uticajan. Može se samo na osnovu uporedne analize zaključiti da su najbolja mehanička svojstva, kada je riječ o sili kidanja i izduženju pri sili kidanja, dobijeni za struju zavarivanja od 12,5 kA, silu u elektrodama od 3,68 kN i vrijeme zavarivanja od 200 ms. Na dijagramima datim u Prilogu 3 moguće se primijetiti da linija sila – izduženje ima određene nepravilnosti, odnosno da na mjestima ima oblika cikcak linije. Ova pojava može se opisati postepenim kidanjem intermetalne faze koja se formira između aluminijuma i čelika.

Tabela 4.16. Rezultati ispitivanja na zatezanja zavarenog spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 dobijenog elektrootpornim tačkastim zavarivanjem

R.br.	Oznaka epruvete	Sila F [N]	Srednje vrijednosti sile F [N]	Vrijednosti apsorbovane energije E [J]	Srednje vrijednosti apsorbovane energije E [J]	Izduženje l [mm]	Srednja vrijednost izduženja l [mm]
1	K 1.1	1257	1658.33	0.21	0.673	0.2	0.503
2	K 1.2	2506		1.45		0.85	
3	K 1.3	1212		0.36		0.46	
4	K 2.1	2182	2187.33	1.76	1.643	1.28	1.18
5	K 2.2	2002		1.18		0.9	
6	K 2.3	2378		1.99		1.36	
7	K 3.1	2589	2462	1.72	1.1567	1.02	0.7267
8	K 3.2	2453		1.19		0.81	
9	K 3.3	2344		0.56		0.35	
10	K 4.1	2441.3	2526.15	1.24	1.613	0.8	0.95
11	K 4.2*						
12	K 4.3	2611		1.986		1.1	
13	K 5.1	1755	1690	0.35	0.5067	0.32	0.5067
14	K 5.2	1727		0.42		0.43	
15	K 5.3	1588		0.75		0.77	
16	K 6.1	2415	2423.67	1.88	2.623	1.14	1.77
17	K 6.2	2463		2.43		1.61	
18	K 6.3	2393		3.56		2.56	
19	K 7.1	1599	1833.67	0.55	1.403	0.53	1.1967
20	K 7.2	2298		2.39		1.7	
21	K 7.3	1604		1.27		1.36	

*Dobijeni rezultati nisu valorizovani

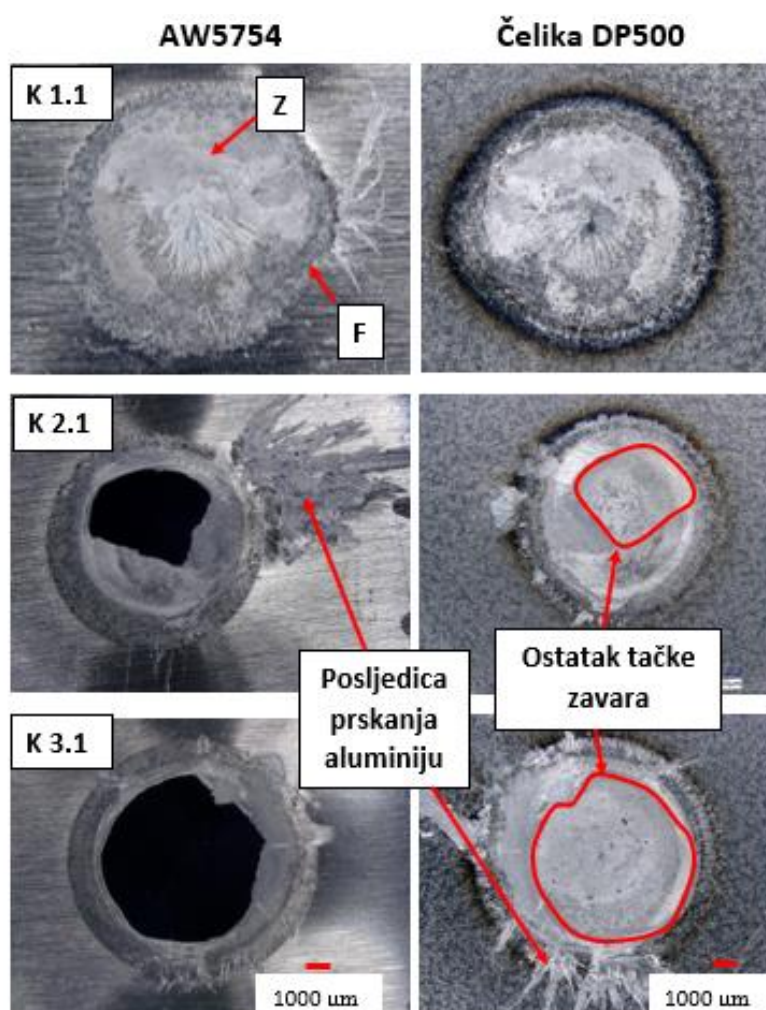
Kao što je već rečeno način loma spoja tokom testa na zatezanja jedan je od osnovnih parametara kvaliteta zavarenog tačkastog spoja. Kod većine uzoraka prilikom testa na zatezanje došlo je do loma kroz zavar, odnosno do međusobne frakture spoja. Određeni uzorci su otkazali u modu koji je sličan izvlačenju tačke odnosno PF modu, ali razlog takvog loma je posljedica pojave grešaka u spoju, odnosno pukotina u aluminijumu po obodu zavara. Na slici 4.18. prikazani su uzorci nakon testa na zatezanje, odnosno prikazan je način loma samog spoja. Upravo se svi nedostaci spajanja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 vide na datoj slici. Uzorci spojeni sa istim parametrima zavarivanja i pri istim uslovima otkazali su na različite načine. Ako se posmatraju uzroci označeni sa K3.1 i K3.2 vidi se da je do loma došlo u modu koji izgleda kao PF, međutim, vizuelnom analizom su upravo kod ovih uzoraka uočene zapreminske pukotine po obodu tačke koje su omogućile ovakav način loma spoja. Način loma

spoja samo djelimično prati dobijene vrijednosti sile kidanja i izduženja pri sili kidanja, tako npr. uzorak označen sa K6.1, koji je otkazao u IF modu, ima značajno veće vrijednosti sile kidanja i izduženja pri sili kidanja u odnosu na uzorak označen sa K7.1 koji je otkazao u PF modu.



Slika 4.18. Izgled uzoraka dobijenih elektrootpornim tačkastim zavarivanjem čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 nakon testa na zatezanje

S ciljem boljeg prikaza loma datih zavarenih spojeva na slici 4.19. data je fraktografija spoja za određene karakteristične uzorke. Pri fraktografskoj analizi u blizini zavara uočen je aluminijum nepravilnog oblika koji je posljedica prskanja tokom zavarivanja. Takođe, primjećena je mala površina zavara kod uzoraka koji su otkazali u IF modu (uzorak K1.1), što je jedan od glavnih razloga loših mehaničkih svojstava datog spoja. Kod uzoraka koji su otkazali u djelimičnom PF modu (K2.1 i K3.1) uočena je mala debljina zavara na strani legure aluminijuma, što je posljedica udubljenja odnosno stanjenja aluminijuma tokom zavarivanja.

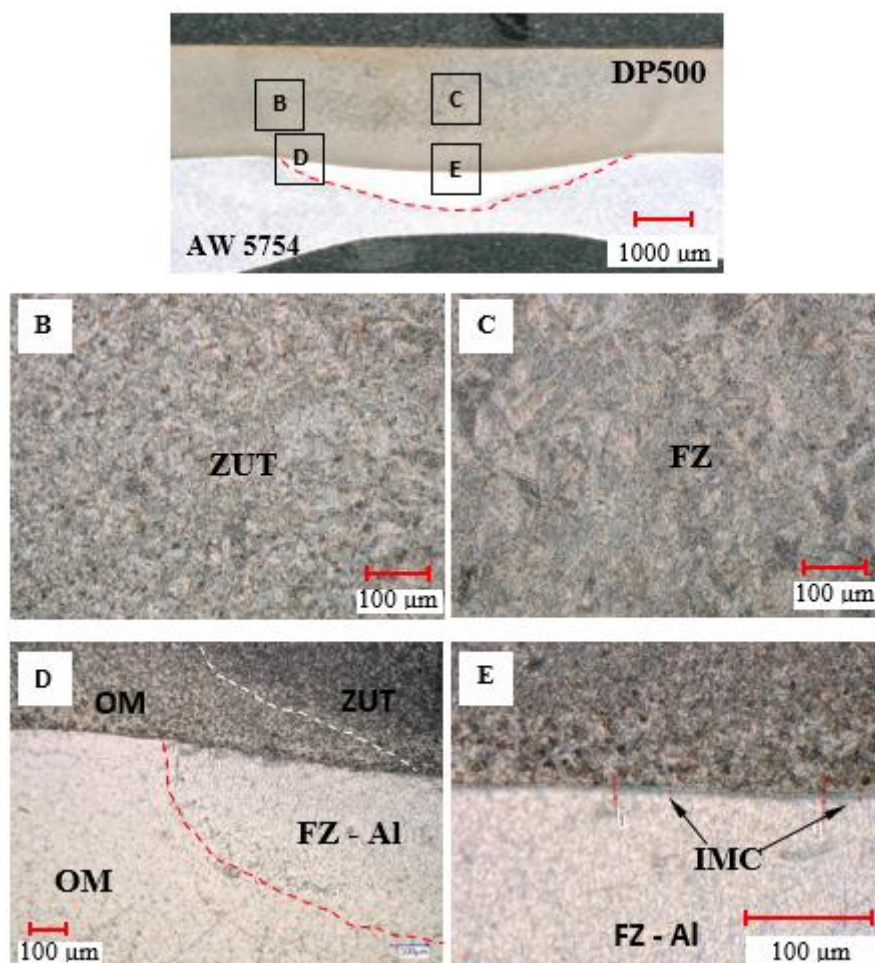


Slika 4.19. Fraktografija tačkastog zavarenog spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 (Z – zavar, F – mjesto loma)

4.2.3. Metalografsko ispitivanje

Metalografsko ispitivanje nije urađeno za svih sedam uzoraka jer je prilikom rezanja zavara u cilju pripreme za metalografsko ispitivanje kod određenih uzoraka dolazilo do loma,

odnosno do potpunog odvajanja zavara, pa takav uzorak nije bilo moguće zatapati, odnos uliti u kalup kao bi se potom mogao adekvatno pripremiti za metalografsku analizu. Tipičan izgled makrostrukture i mikrostrukture tačkastog zavarenog spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 dat je na slici 4.20. Maktostruktura spoja pokazuje potpunu nesimetričnost jezgra zavara. Manji dio jezgra zavara je na strani legure aluminijuma, što je svakako posljedica različitih hemijskih i fizičkih svojstava dva materijala. Takođe, makrostruktura spoja prikazuje pojavu stanjenja aluminijuma, odnosno debljina aluminijuma u centralnom dijelu zone fuzije je značajno manja od početne debljine aluminijuma (približno 50%).



Slika 4.20. Makrostruktura i mikrostruktura tačkastog zavarenog spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 (OM – osnovni materijal, ZUT – zona uticaja toplote, FZ – zona fuzije; IMC – intermetalno jedinjenje)

Mikrostruktura spoja prikazana je za četiri karakteristična regiona. Regija B (slika 4.20) prikazuje zonu uticaja toplote (ZUT) na strani čelika DP500. Ova zona predstavlja u suštini zonu rekristalizacije, a nedovoljan unos toplote izazvao je proizvodnju finog martenzita (sitno zrno) u ZUT-u. Zona fuzije (FZ) na strani čelika DP500 je pretežno martenzit i to je

prikazano u regiji C (slika 4.20). Razlog pretežno martenzitne strukture je zbog brzog hlađenja kod elektrootpornog tačkastog zavarivanja. Regija D (slika 4.20) pokazuje liniju između osnovnog materijala i ZUT-a. IMC je prikazan u području E (slika 4.20), intermetalna jedinjenja su identifikovana na liniji između zona fuzije DP čelika i legure aluminijuma. Pojava ovog jedinjenja jedan je od razloga loših mehaničkih svojstava, posebno duktilnosti i načina loma spoja.

4.3. ELEKTROOTPORNO TAČKASTO ZAVARIVANJE ELEMENTIMA ČELIKA DP500 I LEGURE ALUMINIJUMA AW 5754

4.3.1. Vizuelno ispitivanje

Vizuelnim pregledom spoja limova od čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754, dobijenog elektrootpornim tačkastim zavarivanjem elementima (REW), nisu uočene greške u spoju, niti promjene u obliku zavara. Treba napomenuti da je zavarivanje započeto sa potpuno čistim elektrodama koji su nakon 21. zavarenog uzorka izgledale nepromijenjeno, što znači da elektrode kod ove tehnologije imaju mnogo duži životni vijek u odnosu na elektrode koje se primjenjuju pri klasičnom elektrootpornom tačkastom zavarivanju. S druge strane, ovo znači da bakarne elektrode ne reaguju sa čelikom i tako je mogućnost pojave greške u spoju svedena na minimum.

4.3.2. Ispitivanje na zatezanje – statički test

U tabeli 4.17. dati su rezultati ispitivanja na zatezanja spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 dobijenog elektrootpornim tačkastim zavarivanjem sa elementima (REW). Dijagrami sila – izduženje dati su na slikama u Prilogu 4 (od slike P.4.1. do slike P.4.2). Na dijagramima datim u navedenom prilogu moguće je primijetiti da linija sila – izduženje ima određene nepravilnosti kao i kod klasičnog elektrootpornog tačkastog zavarivanja, odnosno na mjestima linija ima oblik cikcak linije. Ova pojava može se opisati postepenim kidanjem intermetalne faze koja se formira između legure aluminijuma i čelika, u slučaju REW zavarivanja intermetalna faza se formira između elementa (čelik Q235) i legure aluminijuma, te između čelika DP500 i legure aluminijuma.

Na osnovu podataka datih u tabeli, te na osnovu dobijenih dijagrama dolazi se do zaključka da navedeni spoj može izdržati silu od približno 2500 N, što je isto kao i kod klasičnog elektrootpornog tačkastog zavarivanja. Međutim, kod ovih spojeva uočava se

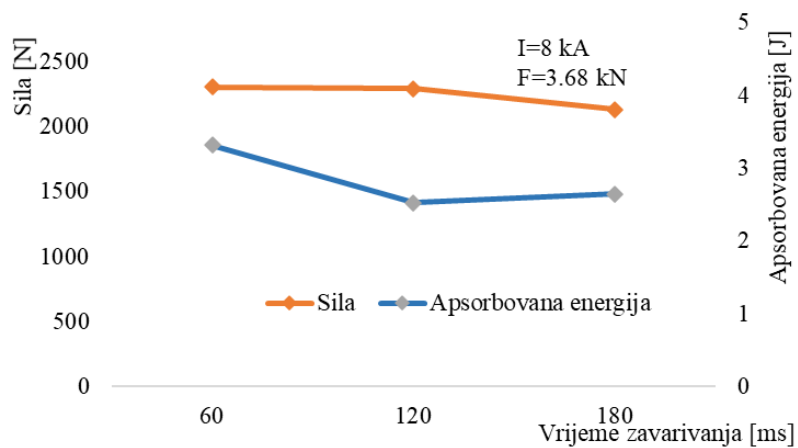
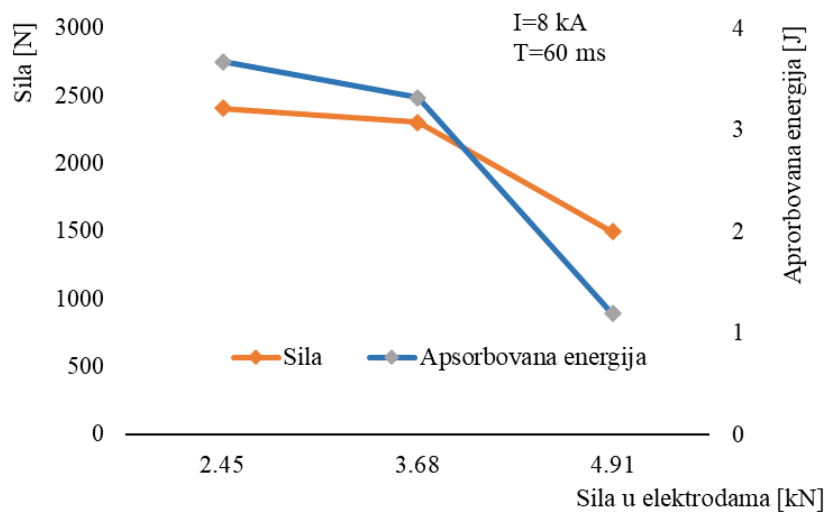
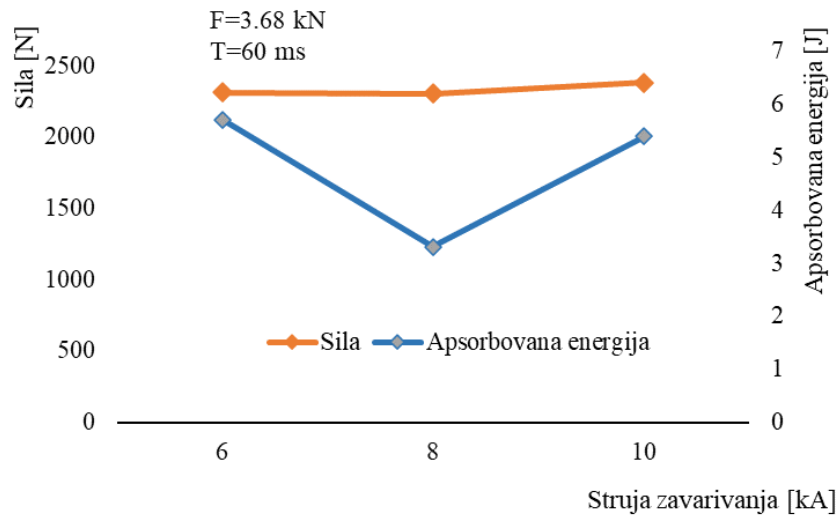
značajno veća duktilnost spoja pa samim tim i mogućnost veće apsorpcije energije nego spoj dobijen klasičnim elektrootpornim tačkastim zavarivanjem.

Tabela 4.17. Rezultati ispitivanja na zatezanja spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 dobijenog elektrootpornim tačkastim zavarivanjem elementima

R.br.	Oznaka epruvete	Sila F [N]	Srednje vrijednosti sile F [N]	Vrijednosti apsorbovane energije E [J]	Srednje vrijednosti apsorbovane energije E [J]	Izduženje l [mm]	Srednja vrijednost izduženja l [mm]
1	REW 1.1	2327	2313.33	1.88	5.723	1.05	3.34
2	REW 1.2	2415		4.69		2.47	
3	REW 1.3	2198		10.6		6.5	
4	REW 2.1	2342	2305	3.89	3.316	2.39	1.99
5	REW 2.2	2231		1.78		1.12	
6	REW 2.3	2342		4.28		2.46	
7	REW 3.1	2551	2383.33	7.23	5.4066	2.84	2.266
8	REW 3.2	2445		5.48		2.05	
9	REW 3.3	2154		3.51		1.91	
10	REW 4.1	2403	2411.33	2.5	3.673	1.46	2.036
11	REW 4.2	2405		3.69		2.04	
12	REW 4.3	2426		4.83		2.61	
13	REW 5.1*		1500		1.193		0.75
14	REW 5.2	829		0.075		0.14	
15	REW 5.3	2171		2.31		1.36	
16	REW 6.1	2403	2290.33	2.25	2.5266	1.29	1.453
17	REW 6.2	2144		2.87		1.69	
18	REW 6.3	2324		2.46		1.38	
19	REW 7.1	2115	2131	3.7	2.6466	2.19	1.626
20	REW 7.2	2097		1.87		1.24	
21	REW 7.3	2181		2.37		1.45	

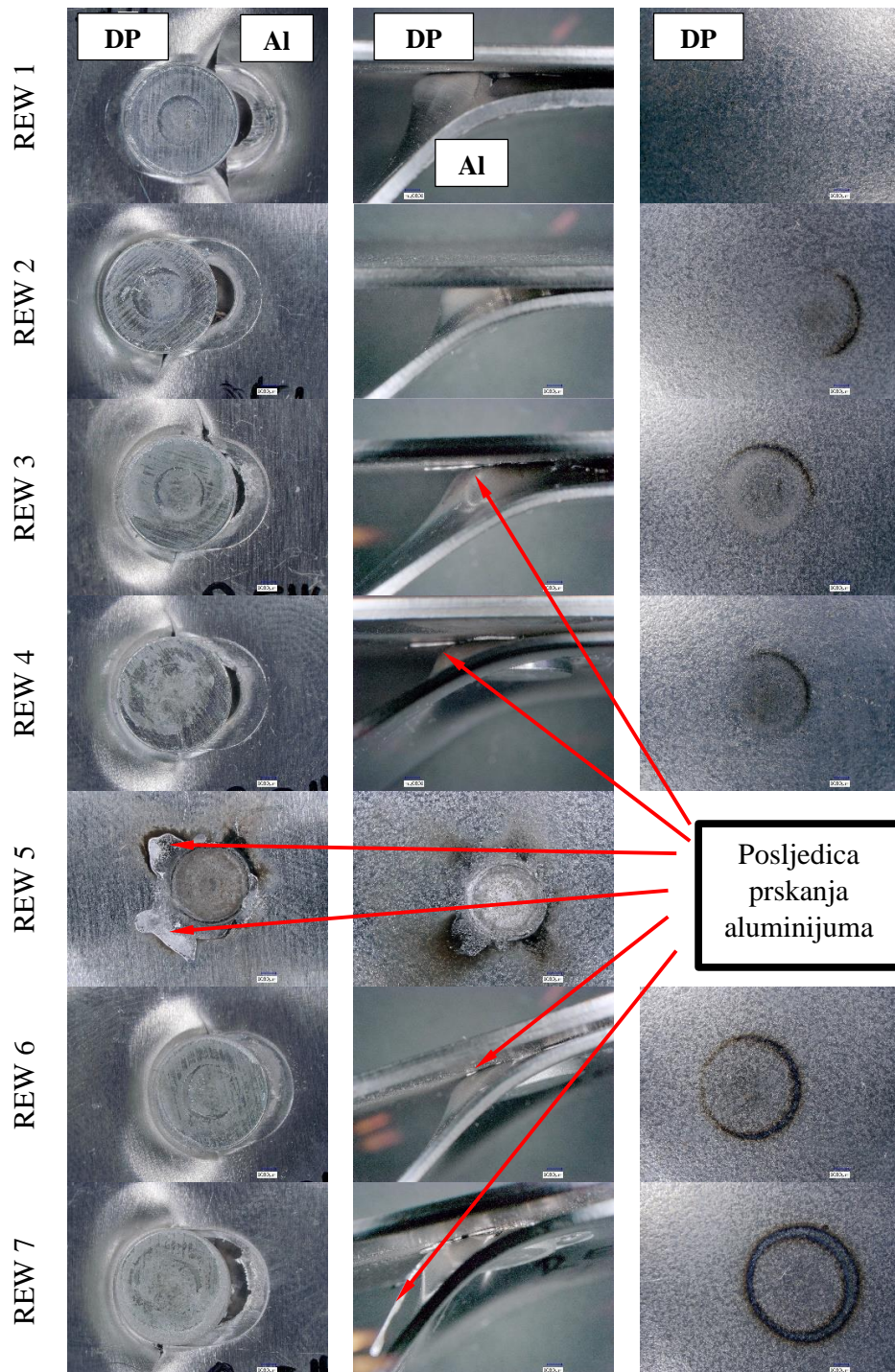
*Dobijeni rezultati nisu valorizovani

Dobijeni rezultati takođe pokazuju da razmatrani parametri zavarivanja nisu u velikoj mjeri uticali na vrijednost maksimalne sile kidanja, osim kod uzorka označenog sa REW 5 gdje je uočena značajna razlika u odnosu na ostale uzorke. Prosječna vrijednost maksimalne sile kidanje kretala u rasponu od 2100 do 2400 N. Kod uzorka označenog sa REW 5 zavarivanje je urađeno sa silom u elektrodama od 4,91 kN, te se može pretpostaviti da se zbog velike sile vrh element od čelika Q235 upresovao u čelika DP500, te je tako legura aluminijum došla u kontakt sa čelikom DP500 po većoj površini što je uzrokovalo nastanak lošeg spoja. Generalan uticaj parametara zavarivanja na silu kidanja i količinu apsorbovane energije prikazan je dijagramima na slici 4.21.



Slika 4.21. Prikaz uticaja parametara zavarivanja na maksimalnu silu i količinu apsorbovane energije kod zavarenog spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 dobijenog elektrootpornim tačkastim zavarivanjem elementima

Već je navedeno da je jedan od osnovnih pokazatelja kvaliteta spoja način loma pri ispitivanju na zatezanje. Svi uzorci spojeni elektrootpornim tačkastim zavarivanjem elementima otkazali su u PF modu, osim uzorka označenog sa REW 5. Izgled uzoraka nakon ispitivanja na zatezanja, odnosno prikaz loma kod ispitivanih uzoraka dat je na slici 4.22.



Slika 4.22. Izgled uzoraka dobijenih elektrootpornim tačkastim zavarivanjem elementima čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 nakon test na zatezanje – prikaz loma

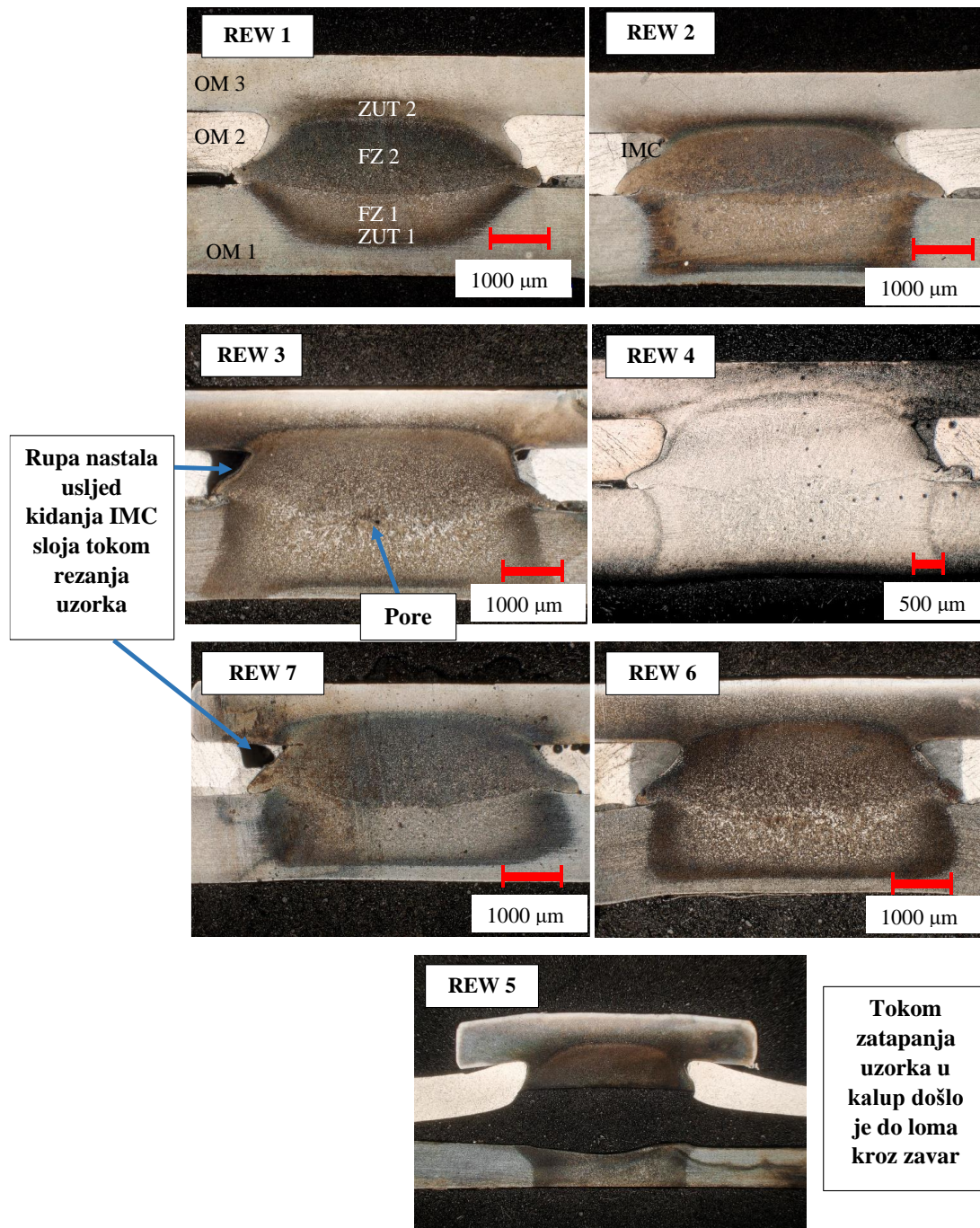
Tip loma kao na slici 4.22. (osim uzorka REW 5) takođe se sreće kod zakovnih i zavrtanjskih spojeva, a naziva se još i zateznim lomom (*eng. tension failure – TF*). Tokom ispitivanja na zatezanje preklopnog spoja, odnosno tokom ispitivanja na zatezanje – smicanje, zbog ekscentriciteta na putu opterećenja, dolazi do deformacija izvan ravni uzorka, a ta pojava se naziva sekundarno savijanje [150]. Lim od legure aluminijuma pri datom ispitivanju doživio je sekundarno savijanje što se može jasno vidjeti sa slike 4.22. Na primarnoj nosivoj površini legure aluminijuma ispod elementa došlo je do stvaranja prsline. Veličina ove prsline se povećavala kako je test napredovao. Kako se jačina sekundarnog savijanja povećavala, zbog smanjenja krutosti i ograničene duktilnosti, došlo je do loma lima od legure aluminijuma kroz centar rupe. Sekundarnog savijanja nije bilo na strani čelika DP500, prvenstveno zbog veće nosivosti čelika u odnosu na datu leguru aluminijuma. Takođe, sa slike 4.22. se može vidjeti da je tokom zavarivanja došlo do prskanja aluminijuma koji se zadržao između limova.

4.3.3. Metalografsko ispitivanje

Makrostruktura sedam razmatranih uzoraka zavarenog spoja limova od čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 dobijenih elektrootpornim tačkastim zavarivanjem elementima data je na slici 4.23. Sa slike se može vidjeti da parametri zavarivanja značajno utiču na oblik jezgra zavara. Pri struji zavarivanja od 6 kA (REW 1) primjećuje se najmanja površina jezgra zavara, odnosno najmanja penetracija. S povećavanjem struje zavarivanja na 8 i 10 kA povećava se penetracija zavara. Uzorak označen sa REW 5 je pukao kroz zavar tokom zatapanja u kalup, što je bilo očekivano nakon dobijenih rezultata mehaničkog ispitivanja spojeva na zatezanje. Zajedničko za sve ostale uzorke kada je u pitanju makrostruktura je asimetričnost jezgra. Veći dio jezgra, odnosno zavara, je u elementu od čelika Q235 za sve kombinacije. Ovo formiranje asimetričnih jezgra zavara se može pripisati razlikama u električnoj otpornosti i toplotnoj provodljivosti datih materijala.

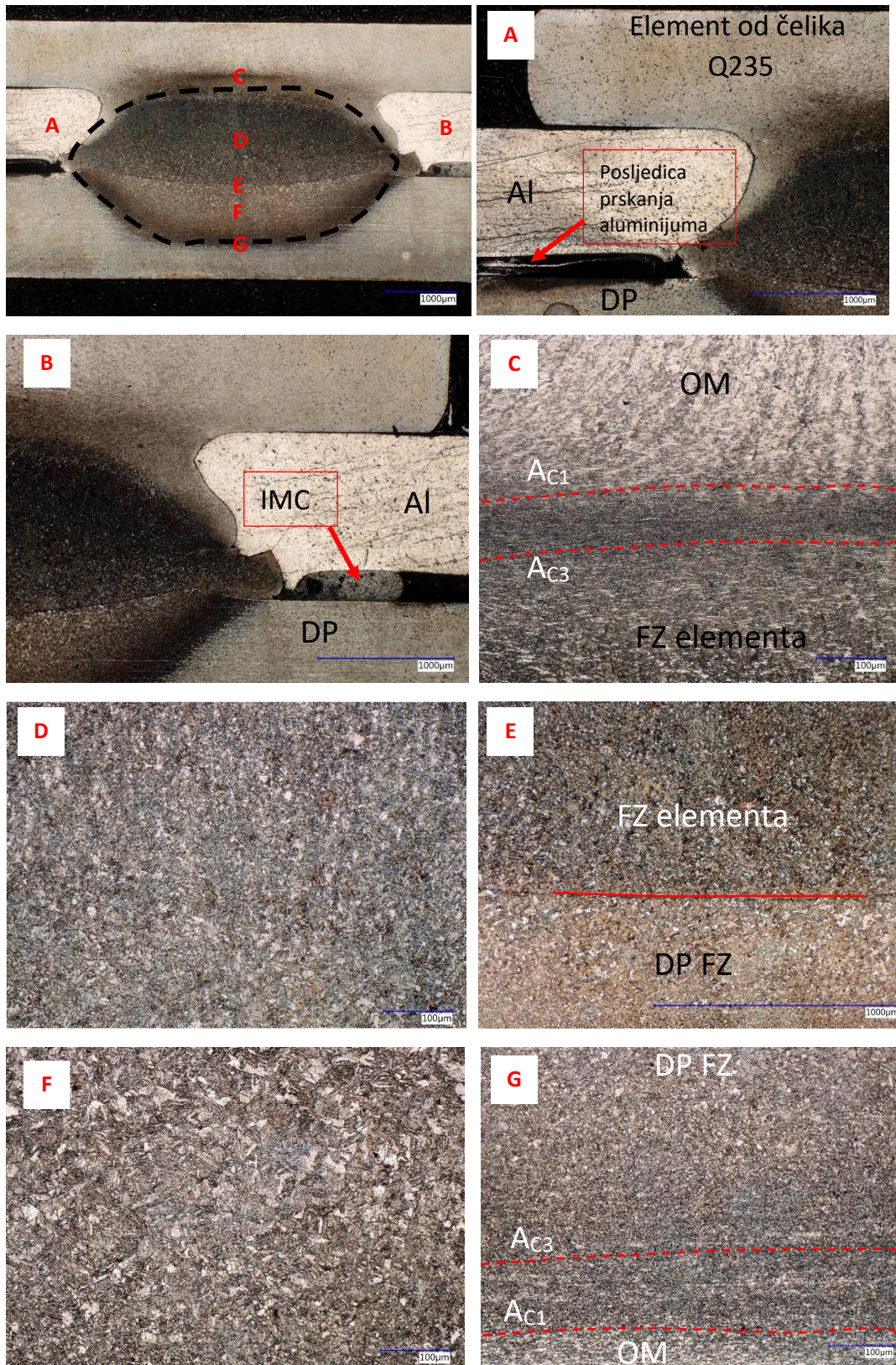
Zavareni spoj, odnosno makrostruktura REW spoja može se podijeliti na tri osnovne zone: zona fuzije (FZ), zona uticaja toplote (ZUT) i osnovni materijal (OM). Međutim, kako se kod ove tehnologije radi spajanje dva raznorodna materijala posredstvom elementa u makrostrukturi spoja (slika 4.23) razlikuju su tri tripa osnovnog materijala (OM1 – čelik DP500, OM2 – legura aluminijuma AW 5754 i OM3 – čelik Q235), te dvije karakteristične zone uticaja toplote (ZUT1 i ZUT2) kao i dvije zone fuzije (FZ1 i FZ2). U zoni između čelika DP500 i legure aluminijuma, te elementa i legure aluminijuma vidljiva je pojava IMC sloja, koji se kod uzoraka označenih sa REW3 i REW7 tokom pripreme za metalografsko ispitivanje

odlomio i stvorio rupu. S druge strane, između zona fuzije kod uzorka REW 3 primijećene su pore. Ove pojave nisu u značajnoj mjeri uticale na mehanička svojstva spoja.

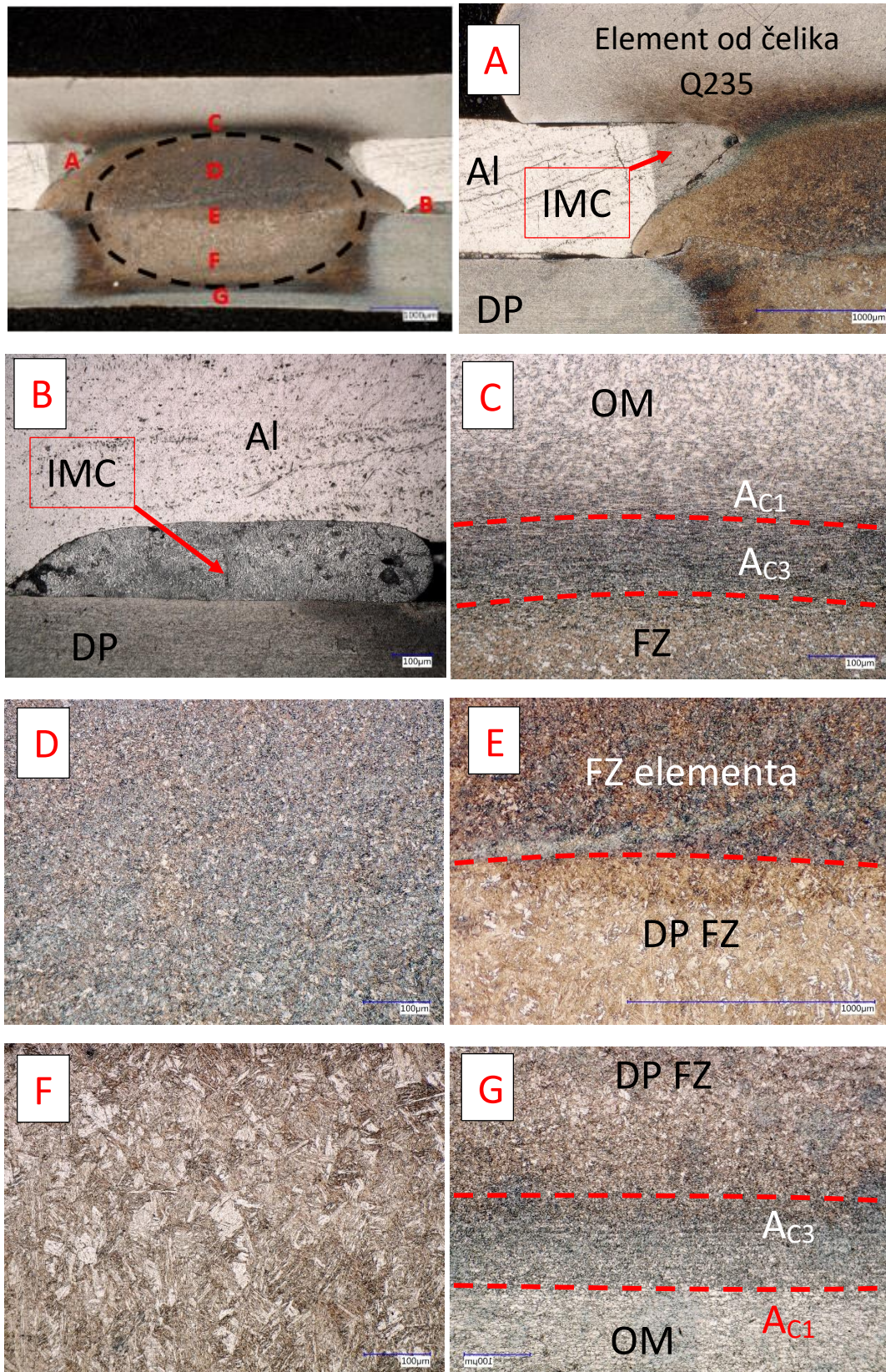


Slika 4.23. Prikaz makrostrukture zavarenog spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 dobijenog elektroodpornim tačkastim zavarivanjem elementima (FZ – zona fuzije; ZUT – zona uticaja toplote; OM – osnovni materijal)

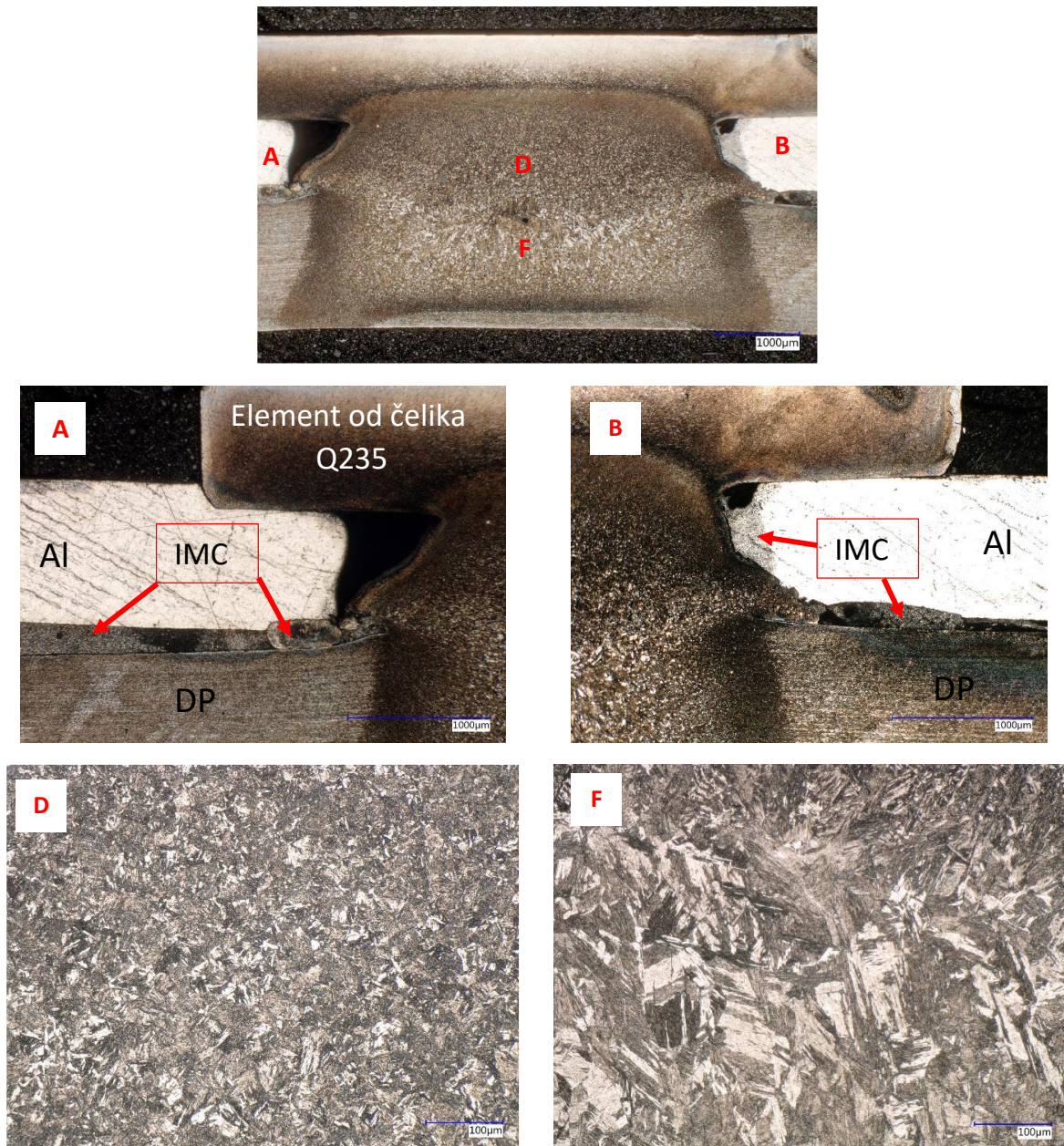
Mikrostruktura uzoraka označenih sa REW1, REW2 i REW3 data je na slikama 4.24, 4.25. i 4.26.



Slika 4.24. Mikrostruktura uzorka označenog sa REW1 (OM – Osnovni materijal, FZ – zona fuzije, DP – dvofazni čelik DP500, Al – legura aluminijuma AW 5754, IMC – intermetalno jedinjenje)



Slika 4.25. Mikrostruktura uzorka označenog sa REW2 (OM – Osnovni materijal, FZ – zona fuzije, DP – dvofazni čelik DP500, Al – legura aluminijuma AW 5754, IMC-intermetalno jedinjenje)



Slika 4.26: Mikrostruktura uzorka označenog sa REW3 (DP – dvofazni čelik DP500, Al – legura aluminijuma AW 5754, IMC – intermetalno jedinjenje)

Sa prethodno prikazanih slika može se vidjeti da struja zavarivanja, kao jedan od ključnih parametra elektrootpornog tačkastog zavarivanja, ima značajan uticaj na mikrostrukturu spoja. Mikrostruktura je prikazana kroz šest karakterističnih zona. Između elementa i legure aluminijuma, te između čelika DP500 i legure aluminijuma dolazi do formiranja intermetalnog jedinjenja IMC, što je prikazano u regionu A i B. Primjećuje se da se povećanjem struje zavarivanja povećava količina, odnosno veličina IMC sloja u mikrostrukturi spoja.

Regija C prikazuje mikrostrukture u zoni uticaja toplote (ZUT) na strani elementa Q235. Ovaj ZUT se može podijeliti u dvije različite podzone: (a) zonu uticaja toplote sitnih zrna (SZUT) ili međufazni ZUT i (b) zonu uticaja toplote krupnih zrna (KZUT) ili gornjefazni ZUT. Maksimalna temperatura koja se postiže u KZUT zoni je iznad A_{C3} , pri čemu se osnovni materijal (OM) potpuno transformiše u austenit. Kao rezultat brzog hlađenja, austenit se potom pretvara u martenzit. Maksimalna temperatura postignuta u SZUT-u je između A_{C1} i A_{C3} , a mikrostruktura OM transformirana je u mješavinu ferita i austenita. Nakon hlađenja austenit se transformiše u perlit dok se ferit zadržava. Mikrostruktura osnovnog materijala takođe se sastoji od ferita i perlita, ali je zapreminski udio perlita manji kod osnovnog materijala nego kod SZUT-a.

Regija D prikazuje područje zone fuzije (FZ) na strani elementa, dok područje E pokazuje zonu fuzije između čelika DP500 i elementa od čelika Q235. Maksimalna temperatura u zoni fuzije prevazilazi liniju A_{C3} . Zona fuzije na strani elementa sastoji se od perlita i ferita.

Zona fuzije (FZ) na strani čelika DP500 pokazuje složenu mikrostrukтуру koja uključuje stubasta zrna martenzita i gornjeg beinita, te Vidmanštetenovog i alotriomorfog ferita. Formiranje martenzita u zoni fuzije na strani čelika DP500 pripisuje se inherentno visokoj brzini hlađenja koja je kod procesa elektrootpornog točkastog zavarivanja prisutna zbog hlađenja bakrenih elektroda vodom i njihovog efekta gašenja, kao i kratkog ciklusa zavarivanja (područje F).

Zona uticaja toplote (ZUT) na strani čelika DP500 (Regija G) može se podijeliti u tri podzone, slično zoni uticaja toplote nastaloj pri zavarivanju dva lima od istoimenog čelika: prelaznu zonu uticaja toplote (PZUT), zonu uticaja toplote sitnih zrna (SZUT) i zonu uticaja toplote krupnih zrna (KZUT). Kod prelazne zone uticaja toplote (PZUT), maksimalna temperatura je ispod A_{C1} , što dovodi do blago kaljenog martenzita iz osnovnog materijala. U podzoni SZUT temperatura je nešto iznad A_{C3} linije što dovodi do prelaska ferita u austenit, međutim kratko vrijeme zagrijavanja i brzo hlađenje ograničavaju rast zrna, te se tako formira zona uticaja toplote sa sitnim zrnima. Zagrijavanjem temperaturama znatno većim od A_{C3} linije i brzim hlađenjem dolazi do prelaska austenita u martenzit krupnog zrna.

Parametri zavarivanja, prvenstveno struja zavarivanja, ne utiču na tip mikrostrukture spoja već na oblik i veličinu zrna, prvenstveno na veličinu zrna martenzita.

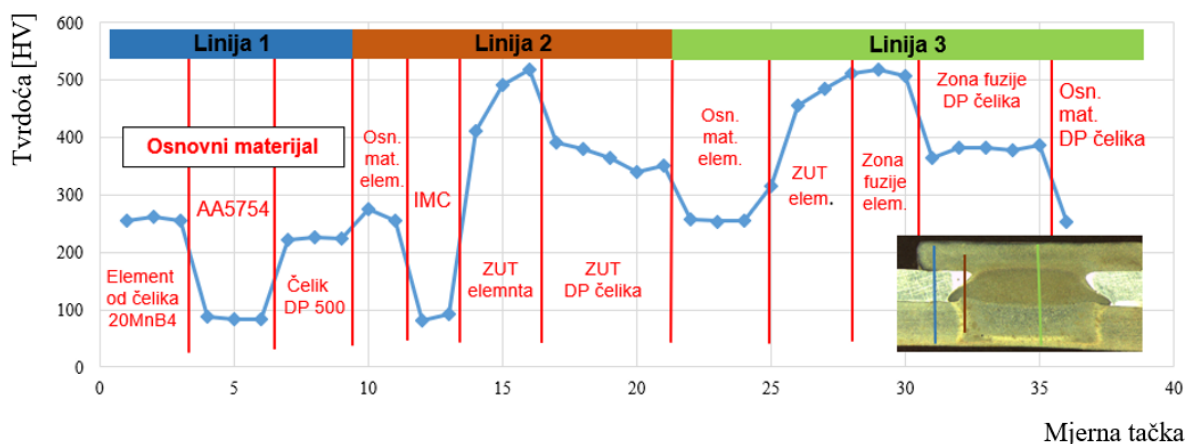
4.3.4. Ispitivanje tvrdoće

Poštujući proceduru objašnjenu u poglavlju 3.2.4. urađeno je ispitivanje mikrotvrdoće zavarenog spoja limova od čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 dobijenog elektrootpornim tačkastim zavarivanjem sa elementima. Ispitivanje je urađeno za šest uzoraka (ispitivanje nije izvedeno za uzorak REW5). U tabeli 4.18. dati su rezultati ispitivanja mikrotvrdoće u zoni fuzije na strani čelika DP500 i na strani elementa od čelika Q235.

Tabela 4.18. Prikaz vrijednosti mikrotvrdoće zone fuzije zavarenog spoja limova od čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754

Oznaka epruvete	REW1	REW2	REW3	REW4	REW6	REW7
FZ čelika DP500 [HV]	380	379	363	380	368	388
FZ elementa [HV]	473	512	462	481	476	468

Profil tvrdoće za uzorak REW2 dobijen ispitivanjem po horizontalnim linijama (tri linije) prikazan je na slici 4.27, dok su profili tvrdoće za sve ostale uzorke, dobijeni ispitivanjem po jednoj horizontalnoj liniji, dati u Prilogu 5 na slikama od P.5.1. do P.5.6.



Slika 4.27. Profil mikrotvrdoće za uzorak označen sa REW2 [194, 195]

Kao što je prikazano na slici 4.21, mikrotvrdoća zone fuzije u DP čeliku je u prosjeku 379 HV. Prosječna mikrotvrdoća osnovnog materijala čelika DP500 je 223 HV. Formiranje beinita i martenzita u zoni fuzije (FZ) objašnjava veću mikrotvrdoću FZ u odnosu na mikrotvrdoću osnovnog materijala, tj. čelika DP500. Zona uticaja toplote na strani elementa od čelika Q235 ima najveću mikrotvrdoću (više od 500 HV), što je prvenstveno posljedica martenzitne mikrostrukture.

Takođe, primjećuje se da je mikrotvrdoća zone fuzije na strani elementa vrlo visoka, oko 500 HV, što je posljedica martenzitne i perlitne strukture. Tvrdoća IMC sloja je slična tvrdoći osnovnog materijala legure aluminijuma AW 5754, približno 85 HV.

Profili tvrdoće svih REW uzoraka su vrlo slični, iako se primjećuje da se povećavanjem struje zavarivanja smanjuje tvrdoća zone fuzije, što može biti od izuzetne važnosti pri dinamičkom opterećenju uzorka. Tvrdoća zone fuzije na strani elementa kretala se u rasponu od 460 do 500 HV, dok je tvrdoća zone fuzije na strani DP čelika bila od 360 do 380 HV.

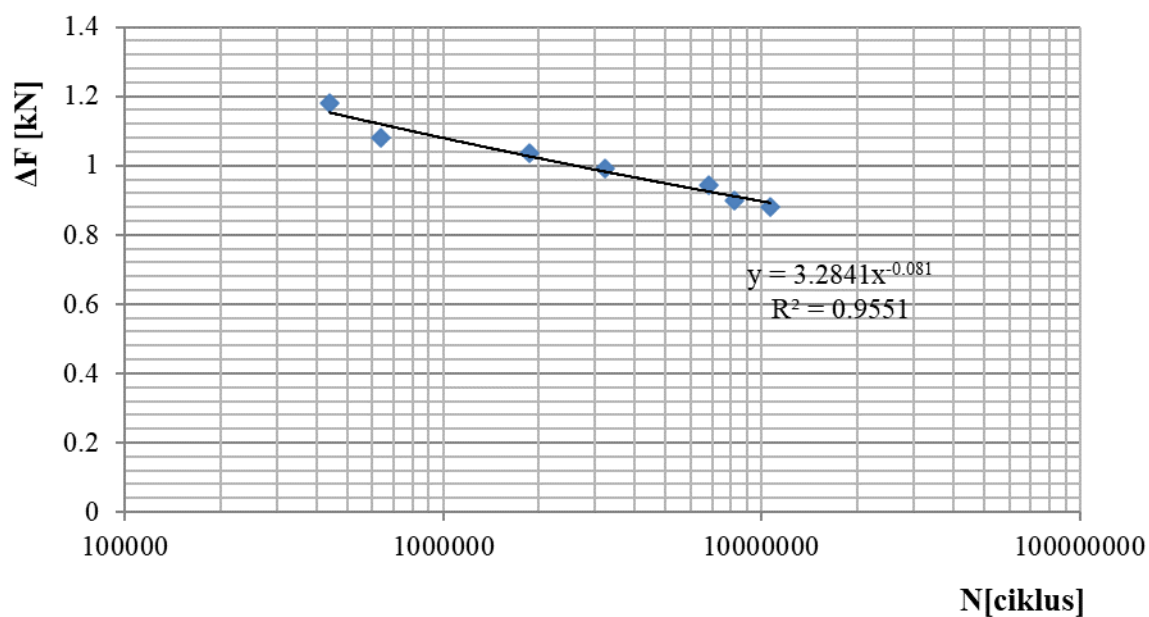
4.3.5. Ispitivanje na zatezanje – dinamički test

Ispitivanje na zamaranje REW uzoraka urađeno je u uslovima naprezanja na zatezanje sa koeficijentom asimetrije ciklusa $R=0,1$ i frekvencijom opterećenja od 30 Hz. Kada je u pitanju određivanje trajne dinamičke izdržljivosti onda je kao kriterijum izabran broj ciklusa 10×10^6 . Rezultati datog ispitivanja dati su u tabeli 4.19, dok je Velerova (F-N) kriva dobijena na osnovu datih rezultata prikazana na slici 4.28.

Tabela 4.19. Prikaz rezultata ispitivanja na zamaranja REW spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754

Oznaka uzoraka	F_{\min} [kN]	F_{\max} [kN]	ΔF [kN]	N [ciklus]
2-2	0,131	1,31	1.179	441902
2-3	0,12	1,2	1.08	637100
2-4	0,115	1,15	1.035	1872504
2-5	0,11	1,1	0.99	3229672
2-6	0,105	1,05	0.945	6804882
2-7	0,10	1	0.9	8214100
2-8	0,098	0,98	0.882	10678315

Kod svih sedam uzoraka (od 2–2 do 2–7) došlo je do loma kroz leguru aluminijuma na mjestu spoja, vrlo slično kao kod statičkog testa, pa se može smatrati da se radi lomu u PF modu, odnosno inicijalna prslina je nastala ispod elementa u leguri aluminijuma koja je rasla sa povećanjem broja ciklusa, te na kraju uzrokovala lom epruvete. Ispitivanje uzorka označenog sa 2–8 prekinuto je nakon 10×10^6 ciklusa i konstatovano da je pri sili od 0.882 kN trajna dinamička izdržljivost spoja. Prikaz uzoraka nakon dinamičkog testa dat je na slici 4.29.

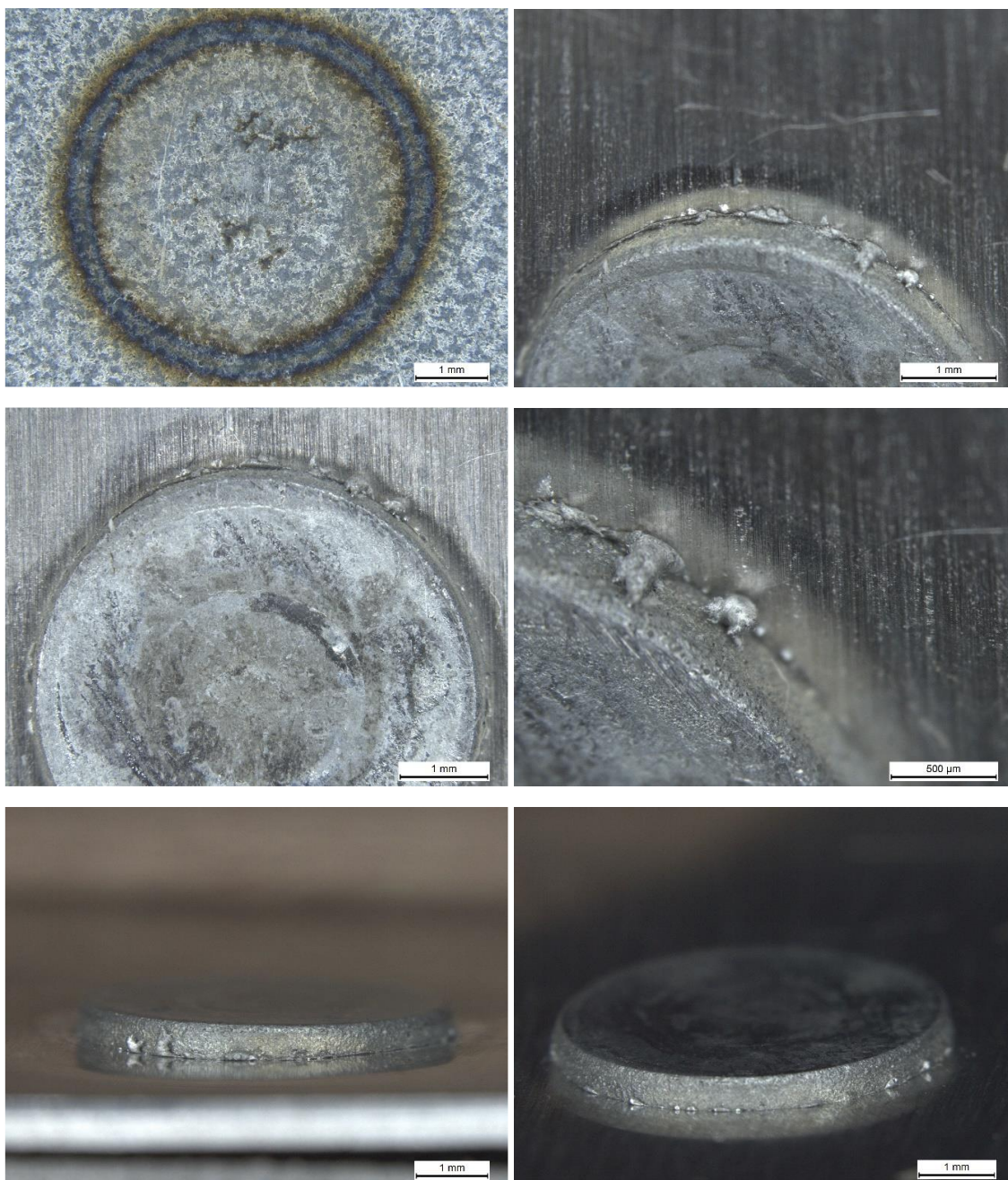


Slika 4.28. Velerova (F/N) kriva za REW spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 [194]



Slika 4.29. Prikaz loma REW uzoraka nakon dinamičkog ispitivanja [194]

Na slici 4.29. prikazana fraktografija REW spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754, dobijena nakon dinamičkog testa za uzorak označen sa 2–7.



Slika 4.30. Fraktografija REW spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754, dobijena nakon dinamičkog testa za uzorak označen sa 2-7

4.4. MEHANIČKO SPAJANJE ZAKIVANJEM BEZ ZAKOVICA ČELIKA DP500 I LEGURE ALUMINIJUMA AW 5754

4.4.1. Vizuelno ispitivanje

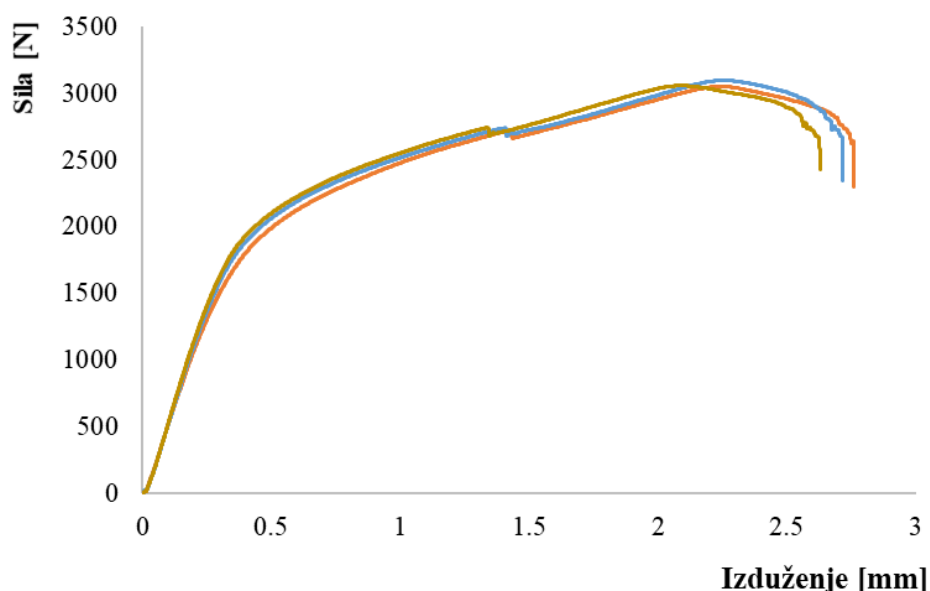
Vizuelnim pregledom spoja limova od čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754, dobijenog mehaničkim spajanjem, tj. zakivanjem bez zakovica, nisu uočene greške u obliku i strukturi spoja.

4.4.2. Ispitivanje na zatezanje – statički test

Rezultati ispitivanja na zatezanja (statički test) MC čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 dati su u tabeli 4.20, dok su dijagrami sila – izduženja za sva tri uzorka (T1, T2 i T3) dati na slici 4.31.

Tabela 4.20. Rezultati ispitivanja na zatezanja mehaničkog spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 dobijenog zakivanjem bez zakovica

Mehanička svojstva	T1	T2	T3	Srednja vrijednost
Sila F [kN]	3.05	3.09	3.05	3.06
Izduženje l [mm]	2.235	2.25	2.09	2.19
Vrijednosti apsorbovane energije E [J]	5.15	5.29	4.88	5.10



Slika 4.31. Dijagram sila – izduženje dobijen ispitivanjem na zatezanja mehaničkog spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 dobijenog zakivanjem bez zakovica

Na osnovu prethodne tabele i dijagrama može se zaključiti da mehanički spoj čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 dobijen zakivanjem bez zakovica može da izdrži nešto veću silu od 3 kN. Dijagram sila – izduženje za sva tri uzorka izgleda identično, prvenstveno zbog homogenosti spoja, odnosno zbog činjenice da prilikom mehaničkog spajanja ne dolazi do promjene u strukturi materijala koja može dovesti do nehomogenizacije. Takođe, na dijagramu se primjećuje da pri vrijednosti sile od približno 2700 N dolazi do blagog pada sile,

a ta pojava se može opisati popuštanjem veze, tj. pojavom zazora u spoju zbog veće deformacije legure aluminijuma u odnosu na čelik DP500.

Izgled uzoraka nakon ispitivanja na zatezanja dat je na slici 4.32. Kao što se vidi sa slike kod svih uzoraka došlo je do loma spoja na strani aluminijuma po obodu tačke. Ovakav način loma smatra se povoljnijim u odnosu na lom koji dovodi do razdvajanja limova bez pojave pukotine u aluminijumu. Kod ovih uzoraka kao i kod REW uzoraka pri ispitivanju na zatezanja uočena je pojava sekundarnog savijanja aluminijuma, samo što je manje izražena kod mehaničkog spoja u odnosu na REW spoj.

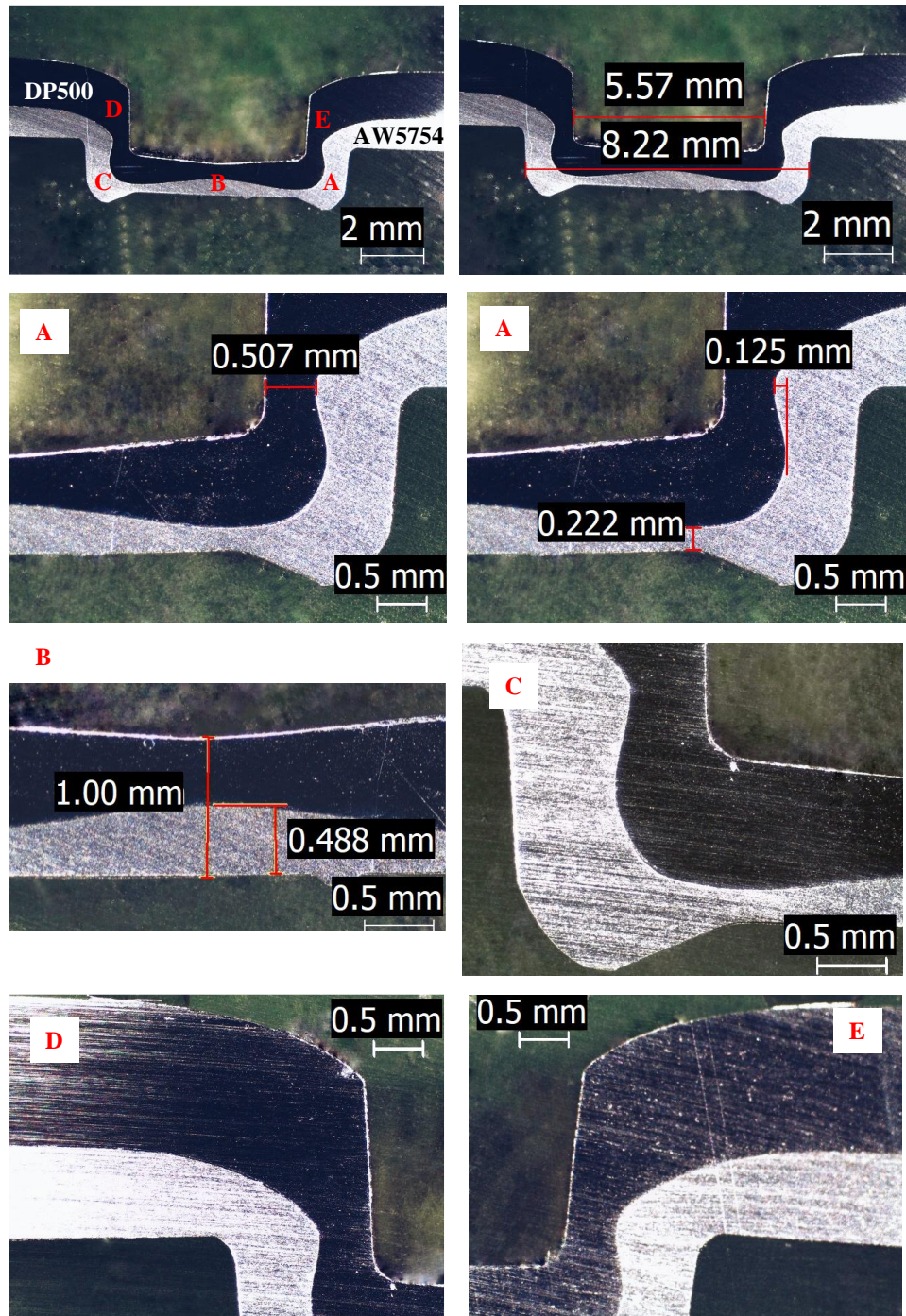


Slika 4.32. Prikaz loma uzoraka dobijenih mehaničkim spajanjem nakon testa na zatezanje

4.4.3. Metalografska ispitivanja

Tipična makrostruktura spoja dobijena zakivanjem bez zakovica, odnosno mehaničkim spajanjem bez dodatnih komponenti čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 data je na slici 4.33. Sa slike se jasno vidi da je čelik upresovan u leguru aluminijuma, odnosno da je lim od legure aluminijuma poprimio oblik matrice. Sa slike se vidi da je ukupna debljina

spoja na sredini 1 mm, dok je spoljašnji prečnik spoja 8,2 mm, a unutrašnji prečnik spoja 5.57 mm. Debljina vrata spoja je 0,507 mm, dok je debljina zareza 0,125 mm.



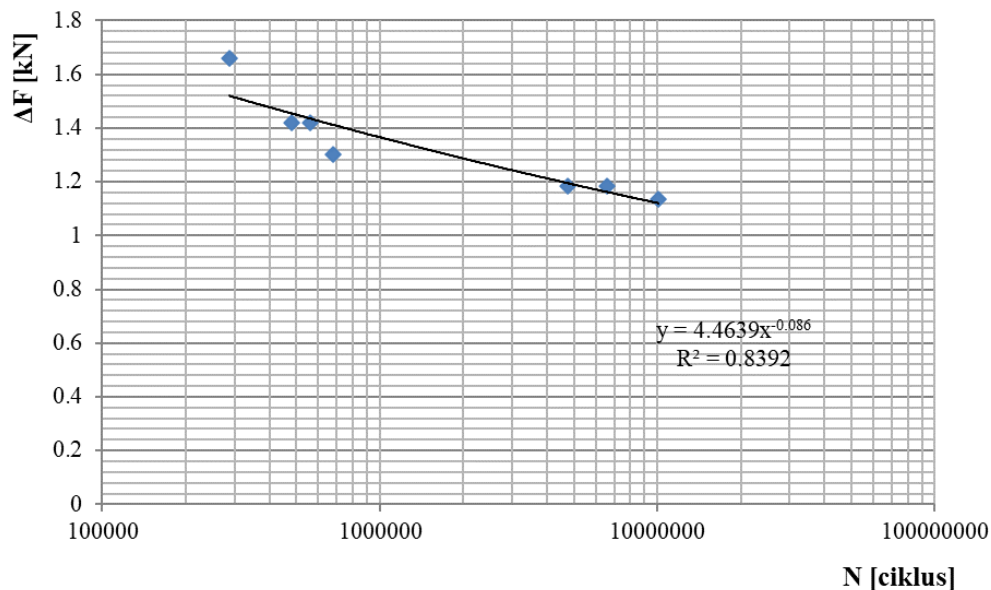
Slika 4.33. Makrostruktura spoja dobijena zakivanjem bez zakovica, odnosno mehaničkim spajanjem čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754

4.4.4. Ispitivanja na zatezanje – dinamički test

Po istoj analogiji kao i pri ispitivanju REW uzoraka urađeno je dinamičko ispitivanje na zatezanja mehaničkog spoja pomenuta dva raznorodna materijala. Rezultati ispitivanja dati su u tabeli 4.21, dok je Velerova (F-N) kriva dobijena na osnovu datih rezultata prikazana na slici 4.34.

Tabela 4.21. Prikaz rezultata ispitivanja na zamaranje REW spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754

Oznaka uzoraka	F_{\min} [kN]	F_{\max} [kN]	ΔF [kN]	N [ciklus]
1-1	1.8431	0.18431	1.65879	287838
1-2	1.5798	0.15798	1.42182	561502
1-3	1.5798	0.15798	1.42182	479410
1-4	1.44815	0.144815	1.303335	680924
1-5	1.3165	0.13165	1.18485	4739820
1-6	1.3165	0.13165	1.18485	6574913
1-7	1.2638	0.12638	1.13742	10045124



Slika 4.34. Velerova (F/N) kriva MC spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754

Kod svih šest uzoraka (od 1–1 do 1–6) došlo je do loma kroz leguru aluminijuma na mjestu spoja, vrlo slično kao kod statičkog testa, odnosno inicijalna prslina je nastala ispod na mjestu spoja u leguri aluminijuma koja je rasla sa povećanjem broj ciklusa, te na kraju uzrokovala lom epruvete. Ispitivanje uzorka označenog sa 1–7 prekinuto je nakon 10×10^6

ciklusa i konstatovano da je pri sili od približno 1,13 kN trajna dinamička izdržljivost spoja. Prikaz uzoraka nakon dinamičkog testa dat je na slici 4.35.



Slika 4.35. Prikaz loma uzoraka dobijenih zakivanjem bez zakovica nakon dinamičkog ispitivanja na zatezanje

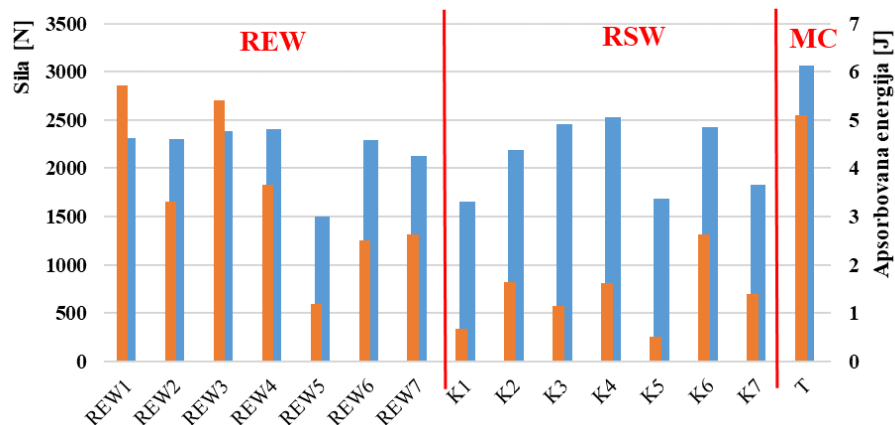
4.5. UPOREDNA ANALIZA

Ukoliko se 1 m³ čelika DP500 zamijeni sa 1 m³ legure aluminijuma AW 5754 masa te konstrukcije će se smanjiti približno 65% za 1 m³. Već je rečeno da zamjena kompletne konstrukcije od čelika aluminijumom nije preporučljiva prvenstveno zbog cijene. Multimaterijal strukture, odnosno kombinovanje čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 je definitivno adekvatan način da se podjednako zadovolji i cijena i masa konstrukcije, pa je zato izbor tehnologije spajanja ta dva materijala od ključnog značaja. Na osnovu dobijenih i prikazanih rezultata istraživanja, u nastavku je urađena uporedna analiza tehnologija spajanja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754.

4.5.1. Poređenje mehaničkih svojstava

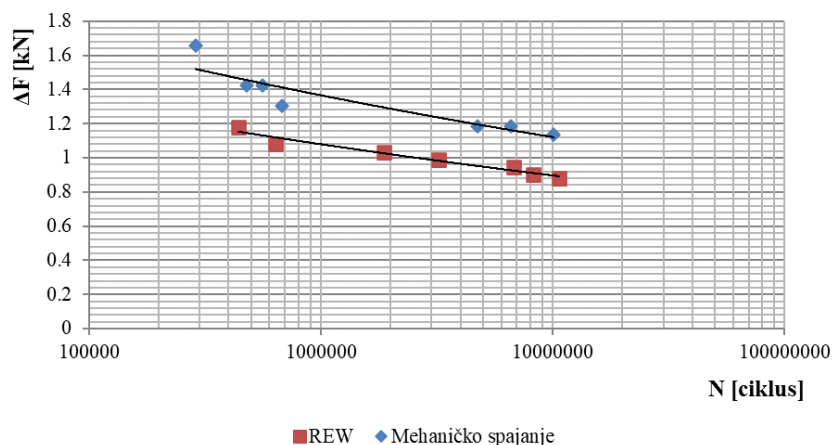
Prikaz poređenja maksimalna sile kidanja kao i vrijednosti apsorbovane energije za spojeve čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 data je na slici 4.35. Sa slike se jasno vidi da mehaničko spajanje (MC) daje bolje rezultata pri ispitivanju na zatezanja u pogledu maksimalne slike kidanja kada se poredi sa klasičnim elektrootpornim tačkastim zavarivanjem (RSW) i elektrootpornim tačkastim zavarivanjem elementima (RSW). Kada je riječ o vrijednosti apsorbovane energije najbolje rezultate daje tehnologija spajanja elektrootpornog tačkastog zavarivanja elementima. Generalno posmatrano, mehanička svojstva REW i MC

spoja su zadovoljavajuće, dok to nije slučaj kod RSW prvenstveno zbog male vrijednosti apsorbovane energije i načina loma datog spoja.



Slika 4.36. Poređenje maksimalne sile kidanja i vrijednosti apsorbovane energije za spojeve čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 dobijene elektrootpornim tačkastim zavarivanjem elementima (REW), elektrootpornim tačkastim zavarivanjem (RSW) i zakivanjem bez zakovica (MC)

Poređenje dinamičke izdržljivosti spojeva dobijenih elektrootpornim tačkastim zavarivanjem elementima (REW) i mehaničkog spajanja, tj. zakivanja bez zakovica (MC) dato je na slici 4.37. Sa slike se vidi da spoj dobijen mehaničkim spajanjem ima bolja dinamička svojstva od REW spoja. Velika tvrdoća zone fuzije REW spoja je jedan od razloga lošijih dinamičkih svojstava u odnosu na MC spoj. Ispitivanje na zamor RSW spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 nije urađeno zbog uočenih grešaka u spoju.



Slika 4.37. Poređenje dinamičke izdržljivosti spojeva čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 dobijene elektrootpornim tačkastim zavarivanjem elementima (REW) i zakivanjem bez zakovica (MC)

4.5.2. Vrednovanja i rangiranje tehnologija spajanja

Na osnovu eksperimentalnih istraživanja i zajedničke karakterizacije, te na osnovu subjektivne procjene i metoda analitičkih hijerarhijski procesa, urađeno je poređenje odnosno vrednovanje i rangiranje istraženih tehnologija spajanja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 na osnovu sljedećih referentnih kriterijuma:

- Maksimalna sila kidanja pri ispitivanju na zatezanja;
- Apsorbovana energija;
- Dinamička izdržljivost;
- Vizuelni izgled spoja;
- Mogućnost automatizacija (stepen automatizacija);
- Cijena implementacije u postojeće proizvodne pogone.

Koristeći prethodne kriterijume najprije je urađeno prosto međusobno poređenje tehnologija spajanja, a rezultati su dati u tabeli 4.21. U tabeli su zelenom bojom označene tehnologije koje zadovoljavaju date kriterijume, žutom se obojena polja tehnologija koje djelimično zadovoljavaju kriterijum, te crvenom one polja gdje tehnologija ne zadovoljava dati kriterijum.

Tabela 4.22. Prosto međusobno poređenje tehnologija spajanja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754

Kriterijumi	RSW	REW	MC
Maksimalna sila kidanja pri ispitivanju na zatezanja			
Apsorbovana energija			
Dinamička izdržljivost			
Vizuelni izgled spoja			
Mogućnost automatizacija (Stepen automatizacija)			
Cijena implementacija u postojeće proizvodne pogone			

Na osnovu tabele može se zaključiti da je elektrootporno tačkasto zavarivanje elementima (REW) jedina tehnologija koja zadovoljava sve kriterijume. Međutim, da bi se uradilo rangiranje tehnologija potrebno je sprovesti metodu analitičkih hijerarhijskih procesa, tj. izvršiti rangiranje i vrednovanja na osnovu definisanih kriterijuma, koristeći relacije [205]:

$$WRV = \sum_{i=1}^n (P_i) \cdot (w_i) \quad (3.1)$$

gdje su: n – broj tehnologija;

P_i – ponderisana ocjena tehnologije za određeni kriterijum u granicama od 5 do 10;

w_i – težinski koeficijent za određeni kriterijum;

U tabeli 4.23. dati su rezultati rangiranja i vrednovanja tehnologija spajanja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754.

Tabela 4.23. Rangiranja i vrednovanje tehnologija spajanja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754

Rangiranja i vrednovanje tehnologija spajanja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754												
Kriterijumi	Maksimalna sila kidanja		Apsorbovana energija		Dinamička izdržljivost		Vizuelni izgled spoja		Mogućnost automatizacija		Cijena implementacije u postojeće proizvodne pogone	
$\sum w_i = 1$	0,2		0,2		0,25		0,1		0,15		0,2	
RSW	≈ 2500 kN		2,62		Loše		Loš		Odlična		Mali troškovi	
REW	≈ 2500 kN		5,72		Dobre		Odličan		Odlična		Mali troškovi	
MC	≈ 3000 kN		5,29		Dobre		Odličan		Srednja		Srednji troškovi	
	P_i	$P_i \cdot w_i$	P_i	$P_i \cdot w_i$	P_i	$P_i \cdot w_i$	P_i	$P_i \cdot w_i$	P_i	$P_i \cdot w_i$	P_i	$P_i \cdot w_i$
RSW	8	1,6	6	1,2	6	1,2	5	0,5	10	1,5	10	2
REW	8	1,6	9	1,8	8	1,6	9	0,9	9	1,35	9	1,8
MC	9	1,8	8	1,6	8	1,6	9	0,9	8	1,2	8	1,6
	$\sum_{i=1}^n (P_i) \cdot (w_i)$											Rang
RSW	8											3
REW	9,05											1
MC	8,7											2

Na osnovu prethodne analize dolazi se do zaključka da je elektrootporno tačkasto zavarivanje elementima (REW) tehnologija spajanja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 koja u najvećoj mjeri zadovoljava zadate kriterijume. Treba napomenuti da su težinski koeficijent izabrani subjektivnom analizom.

4.5.3. Prednosti i nedostaci tehnologija spajanja

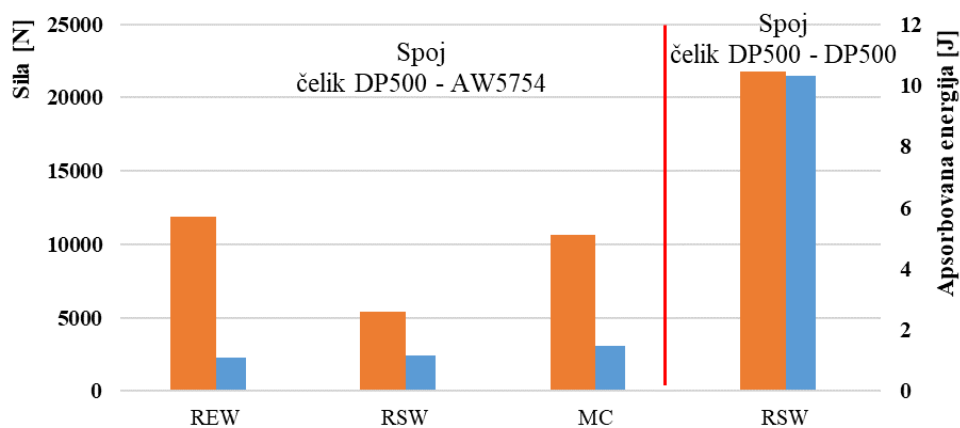
Generalno posmatrano, u tabeli 4.24. dati su prednosti i nedostaci prethodnih tehnologija u pogledu spajanja čelika i aluminijuma izvedeni na osnovu teorijskog i eksperimentalnog istraživanja.

Tabela 4.24. Prednosti i nedostaci tehnologija spajanja čelika i aluminijuma

Tehnologija spajanja	Prednosti	Nedostaci
Elektrootporno tačkasto zavarivanje - RSW	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ekološki prihvatljiva tehnologija; ▪ Jednostavna automatizacija; ▪ Velika brzina zavarivanja; ▪ Siguran i jednostavan rad; ▪ Nema dodatnog materijala; ▪ Nije potrebna priprema. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Loša mehanička svojstva spoja; ▪ Brzo trošenje elektroda; ▪ Loš vizuelni izgled spoja; ▪ Velika vjerovatnoća pojave grešaka u spoju.
Elektrootporno tačkasto zavarivanje elementima - REW	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ekološki prihvatljiva tehnologija; ▪ Jednostavna automatizacija; ▪ Siguran i jednostavan rad; ▪ Dobra mehanička svojstva spoja; ▪ Dobar vizuelni izgled spoja; ▪ Velika brzina zavarivanja/spajanja. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Potreban dodatni materijal – element; ▪ Potreba za izradom elementa i njegovim umetanjem u aluminijum; ▪ Na mjestu spoja ostaje glava elementa kao ispučenje.
Mehaničko spajanje, Zakivanje bez zakovica – MC	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ekološki prihvatljiva tehnologija; ▪ Jednostavna automatizacija; ▪ Siguran i jednostavan rad; ▪ Dobra mehanička svojstva spoja; ▪ Dobar vizuelni izgled spoja; ▪ Velika brzina zavarivanja/spajanja; ▪ Nije potrebna priprema. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Potrebna relativno velika sila za spajanje; ▪ Nije primjenljivo za krte čelike; ▪ Na mjestu spoja ostaje ispučenje.

Već je naglašena važnost zamjene čelika aluminijumom, ali treba napomenuti da je spoj čelika i aluminijuma značajno manjih mehaničkih svojstava nego spoj čelik – čelik. Konkretno, prethodno istraživanje je pokazalo da spoj dva lima od čelika DP500 dobijen elektrootpornim tačkastim zavarivanjem sa optimalnim parametrima daje značajno veću vrijednosti maksimalne sile kidanja i apsorbovane energije nego spoj čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 dobijen pomoću iste tehnologije ili pomoću REW ili MC tehnologije (slika 4.38). Vrijednost maksimalne sile kidanja kod spoja čelik – čelik je za približno 8 puta

veća nego kod spoja čelik – aluminijum dok je apsorbovana energija za približno dva puta veća kod spoja čelik – čelik.



Slika 4.38. Poređenje maksimalne sile kidanja i apsorbovane energije RSW spoja dva lima od čelika DP500 i spojeva čelika DP500 i legure aluminijuma dobijenih RSW, REW i MC tehnologijom spajanja

5. ZAKLJUČAK

Zakonska regulativa vezana za emisiju CO₂, između ostalog, značajno je uticala na popularizaciju i primjenu multimaterijal struktura u automobilske industriji. Primjena multimaterijal struktura, odnosno struktura od više različitih materijala ima za cilj smanjenje mase vozila, a sve kako bi se omogućila manja potrošnja goriva koje direktno utiče i na smanjenje emisije CO₂. Najčešće se u automobilske industriji jedna struktura, npr. karoserija automobila izrađuje od čelika, legure aluminijuma i kompozita. Usko grlo u popularizaciji multimaterijal struktura su specifičnosti vezane za spajanja materijala koji imaju različita mehanička, hemijska i fizička svojstva. Primarni cilj ove doktorske disertacije bio je istraživanje mogućnost spajanja dvofaznog čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754, kao adekvatnih predstavnika multimaterijal strukture, koja se prvenstveno primjenjuje u automobilske industriji. Istraživanje je usmjereno na sljedeće tehnologije spajanja: elektrootporno tačkasto zavarivanje (RSW), elektrootporno tačkasto zavarivanje elementima (REW) i zakivanje bez zakovica (MC).

Suštinski posmatrano, ova doktorska disertacija sastoji se od teorijskog i eksperimentalnog istraživanja. U dijelu koji se odnosi na teorijska istraživanja analizirana su dosadašnja dostignuća vezana za spajanja raznorodnih materijala sa akcentom na spajanje dvofaznih čelika i legura aluminijuma. Eksperimentalna istraživanja u ovoj disertaciji podijeljena su u četiri dijela:

- Prvi dio odnosio se na istraživanje mehaničkih svojstava, mikrostrukture i makrostrukture spoja dva lima od čelika DP500 dobijenog pomoću klasičnog elektrootpornog tačkastog zavarivanja (RSW). Mod otkaza je jedan od osnovnih indikatora kvaliteta tačkastog zvara, pa je kao takav bio sastavni dio ovog istraživanja. Parametri kod ove tehnologije spajanja imaju ključnu ulogu kada je riječ o kvalitetu spoja, zato je u disertaciji analiziran uticaj parametara zavarivanja na mehanička svojstva spoja, odnosno urađena je optimizacija parametara zavarivanja korišćenjem metoda kao što su višekriterijumska Tagučijeva optimizacija i Tagučijeva optimizacija sa sivom relacionom analizom.
- Drugi dio eksperimentalnog istraživanja odnosio se na istraživanje mehaničkih svojstava, mikrostrukture i makrostrukture spoja limova od čelika DP500 i legure aluminijuma AW

5754 dobijenog, takođe, pomoću klasičnog elektrootpornog tačkastog zavarivanja (RSW).

- U trećem dijelu eksperimentalnog istraživanja doktorske disertacije bavili smo se istraživanjem spoja lima od čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754, dobijenog pomoću elektrootpornog tačkastog zavarivanja elementima (REW), kao alternativni RSW tehnologiji spajanja. Za spoj dobijen na ovaj način analizirana su mehanička svojstva, te mikro i makrostruktura. Kako ovaj postupak spajanja u suštini predstavlja spajanje DP500 čelika i elementa koji je od čelika klasičnim elektrootpornim zavarivanjem, onda je u trećem dijelu disertacije prikazan i uticaj parametara zavarivanja prvenstveno na tip loma tj. mod otkaza, a onda i na mehanička svojstva, mikro i makro strukturu REW spoja.
- Zakivanje bez zakovica (MC) je još jedna alternativna tehnika spajanja limova, ali bez dodatnog elementa i bez unošenja toplote. Ovaj način spajanja hladnim oblikovanjem izvodi se postupkom lokalnih deformacija uz pomoć oblikača i matrice. Prilikom spajanja oblikač pritiska spojene limove unutar šupljina kalupa, odnosno matrice, formirajući tako oblik koji te limove spaja. U četvrtom dijelu doktorske disertacije prikazana je analiza mehaničkih svojstava i makrostrukture spoja čelika DP500 i legure aluminijuma 5754 dobijenog pomoću zakivanja bez zakovica.

Na osnovu dobijenih rezultata istraživanja urađeno je i rangiranje razmatranih tehnologija, a generalno posmatrano na osnovu predstavljenih rezultata u ovoj disertaciji mogu se izvesti sljedeći zaključci:

1. Parametri zavarivanja kao što su struja zavarivanja I , sila u elektrodama F i vrijeme zavarivanja T direktno utiču na kvalitet zavarenog RSW spoja dva lima od čelika DP500. Za potrebe istraživanja ova tri parametra su varirana na tri nivoa: $I=6-8-10$ kA; $F=2,45-3,68-4,91$ kN; $T=200-300-400$ ms. Vizuelnim ispitivanjem je utvrđeno da parametri nemaju uticaj na spoljašnji izgled i oblik tačke. Najveća vrijednost sile kidanja pri ispitivanju spoja na zatezanje dobijena je za spoj zavaren strujom zavarivanja od 8 kA, dok je najveća vrijednost izduženja pri maksimalnoj sili, koja direktno utiče na vrijednost apsorbirane energije spoja, dobijena pri zavarivanju sa strujom od 10 kA. Upravo s ciljem utvrđivanja optimalne vrijednosti za ove dvije izlazne karakteristike urađena je višestruka optimizacija parametara zavarivanja.
2. Struja zavarivanja je parametar koji u najvećoj mjeri utiče na statičku nosivost RSW spoja dva lima od čelika DP500. S druge strane, promjene vrijednosti u razmatranom rasponu

- kod parametra zavarivanja kao što su sila u elektrodama F i vrijeme zavarivanja T nisu značajno uticala na statičku nosivost datog RSW spoja.
3. Pri ispitivanju na zatezanje prethodno navedenih RSW spojeva ustanovljeno je da je do loma u IF modu došlo samo kod spoja zavarenog strujom zavarivanja od 6 kA, dok je kod svih ostalih uzoraka do loma došlo u PF modu. Upravo ovakav način loma spoja govori u prilog činjenici da je maksimalna sila kod spojeva zavarenih strujom od 6 kA manja za približno 25% u odnosu na spojeve zavarene strujom zavarivanja od 8 i 10 kA.
 4. Na dimenzije prečnika jezgra zavara RSW spoja dva lima od čelika DP500 u najvećoj mjeri utiču dimenzije elektrode, dok parametri zavarivanja nemaju značajan uticaj.
 5. Kod RSW spoja dva lima od čelika DP
 6. 500 pojavljuju dva karakteristična oblika jezgra zavara odnosno zone fuzije (FZ). Za spojeve zavarene sa najmanjim vrijednostima razmatranih parametara zavarivanja, struju od 6 kA, silu u elektrodama od 2,45 kN, te vrijeme zavarivanja od 200 ms uočen je oblik jezgra zavara u vidu elipse, dok je kod ostalih uzoraka izgled jezgra zavara u vidu pravougaonika sa zaobljenim krajevima.
 7. Ako se posmatra mikrostruktura RSW spojeva limova od čelika DP500 uočava se da se zona fuzija kod svih uzoraka sastoji od velikih stubastih zrna koji se sastoje od letvica martenzita. S druge strane, zona uticaja toplote (ZUT) počev od osnovnog materijala može se podijeliti na tri potpodručija i to na: prelaznu zonu uticaja toplote (PZUT), zonu uticaja toplote sitnih zrna (SZUT) i zonu uticaja toplote krupnih zrna (KZUT).
 8. Značajan uticaj parametara zavarivanja na profil mikrotvrdoće nije uočen. Tvrdoća od približno 350 HV u zoni fuzije kod svih uzoraka može se pripisati pretežno martenzitnoj strukturi. S druge strane, mikrotvrdoća veća od 300 HV u ZUT-u takođe je zbog prisustva martenzita, dok ona manja od 300 HV je zbog sadržaja ferita.
 9. Optimizacija parametara zavarivanja dva lima od čelika DP500 urađena je na osnovu dvije izlazne karakteristike, a to su vrijednost maksimalne sile kidanja i izduženja pri maksimalnoj sili kidanja. Parametri zavarivanja su raspoređeni na osnovu Tagučijevog ortogonalnog plana L_9 (tri faktora na tri nivoa). Najprije je urađena Tagučijeva jednokriterijumska optimizacija za obje izlazne karakteristike posebno. Optimalni parametri zavarivanja dobijeni na osnovu maksimalne sile kidanja su: struja zavarivanja od 8 kA, sila u elektrodama od 2,45 kN i vrijeme zavarivanja od 400 ms. Optimalni parametri zavarivanja, dobijeni na osnovu izduženja pri maksimalnoj sili kidanja su: struja zavarivanja od 10 kA, sila u elektrodama od 4,91 kN i vrijeme zavarivanja od 400 ms.

10. Analiza varijanse urađena za razmatrane prethodne izlazne karakteristike potvrdila je tezu da struja zavarivanja ima najveći uticaj na statičku nosivost spoja. Uticaj struje zavarivanja na maksimalnu silu kidanja je 81,72% u odnosu na ostale parametre, dok je na izduženje pri maksimalnoj sili kidanja taj uticaj 79,79%.
11. Višekriterijumska Tagučijeva metoda i Tagučijeva metoda sa sivom relacionom analizom korišćene su za višekriterijumsku optimizaciju parametara zavarivanja koja ima za cilj da podjednako zadovolji obje prethodno navedene izlazne karakteristike. Optimalni parametri zavarivanja koji su dobijeni pomoću obje metode su: struja zavarivanja od 10 kA, sila u elektrodama od 2,45 kN i vrijeme zavarivanja od 400 ms. Analiza varijanse je ponovo pokazala da je struja faktor koji ima najveći uticaj na statičku nosivost.
12. Za potrebe istraživanja spajanja limova od čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 parametri zavarivanja kod RSW postupka spajanja su varirani na tri nivoa: $I=9,5-12,5-16,5$ kA; $F=2,45-3,68-4,91$ kN; $T=200-280-360$ ms. Vizuelnom analizom kod gotovo svih uzoraka su uočene greške u spojevima u vidu pukotine i udubljenja (stanjenje) na strani legure aluminijuma na mjestu zavara, a razlog je hemijska reakcija bakarne elektrode i aluminijuma. Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da je moguće izvesti tačkasti zavareni spoj limova od čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 koji će izdržati silu od približno 2500 N. S druge strane uočava se da spojevi dobijeni na ovaj način imaju veoma malu duktilnost (izduženje) koja direktno utiče na mogućnost apsorpcije energije. Parametri zavarivanja imaju veliki uticaj na mehanička svojstva spoja, međutim zbog pojave grešaka u spojevima nije moguće utvrditi koji od parametara je najuticajniji, a koji utiče najmanje.
13. Kod većine uzoraka RSW spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 prilikom testa na zatezanje došlo je do loma kroz zavar, odnosno do međusobne frakture spoja. Kod određenih uzoraka do loma je došlo u modu koji je sličan izvlačenju tačke odnosno PF modu, ali razlog takvog loma je posljedica pojave grešaka u spoju, odnosno pukotina u aluminijumu po obodu zavara.
14. Makrostruktura spoja pokazuje potpunu nesimetričnost jezgra zavara, manji dio jezgra zavara je na strani legure aluminijuma, što je svakako posljedica različitih hemijskih i fizičkih svojstava dva materijala. Takođe, makrostruktura spoja prikazuje pojavu stanjenja aluminijuma, odnosno debljina aluminijuma u centralnom dijelu zone fuzije je značajno manja od početne debljine aluminijuma (približno 50%).

15. Intermetalna jedinjenja (IMC) su identifikovana na liniji između zona fuzije DP čelika i legure aluminijuma. Pojava ovog krtoeg jedinjenja jedan je od razloga loših mehaničkih svojstava, posebno duktilnosti i načina loma spoja.
16. Posmatrajući rezultate ispitivanja na zatezanje REW spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 primjećuje se da parametri zavarivanja u razmatranom opsegu ($I=6-8-10$ kA; $F=2,45-3,68-4,91$ kN; $T=60-120-180$ ms) nisu u velikoj mjeri uticali na vrijednost maksimalne sile kidanja, osim kod uzorka zavarenog silom u elektrodama od 4,91 kN. Vrijednost maksimalne sile kidanja kretala se u rasponu od 2100 do 2400 N.
17. Kod svih uzoraka spojenih elektrootpornim tačkastim zavarivanjem elementima (REW) lom je bio u PF modu, osim uzorka zavarenog silom u elektrodama od 4,91 kN koji je otkazao u IF modu. Može se pretpostaviti da je razlog loma u IF modu velika sila u elektrodama, pa se vrh elementa od čelika Q235 upresovao u čeliku DP500, te je tako legura aluminijum došla u kontakt sa čelikom DP500 po većoj površini, što je uzrokovalo nastanak lošeg spoja.
18. Posmatrajući makrostrukture REW spoja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 zaključuje se da parametri zavarivanja značajno utiču na oblik jezgra zavara. Pri struji zavarivanja od 6 kA primjećuje se najmanja površina jezgra zavara, odnosno najmanja penetracija. Povećavanjem struje zavarivanja na 8 i 10 kA povećava se penetracija zavara. Zajedničko za sve uzorke kada je riječ o makrostrukтури je asimetričnost jezgra. Veći dio jezgra, odnosno zavara je u elementu od čelika Q235 za sve kombinacije parametara.
19. Mikrostruktura REW spoja je veoma složena, razlikuju se tri tripa osnovnog materijala (OM1 – čelik DP500, OM2 – legura aluminijuma AW 5754 i OM3 – čelik Q235), te dvije karakteristične zone uticaja toplote (ZUT1 – na strani elementa i ZUT2 – na strani čelika DP500) kao i dvije zone fuzije (FZ1 – na strani elementa i FZ2 – na strani čelika DP500). U zoni između čelika DP500 i legure aluminijuma, te elementa i legure aluminijuma, vidljiva je pojava IMC sloja, a kod nekih uzoraka primijećene su i pore. Ove pojave nisu u značajnoj mjeri uticale na mehanička svojstva spoja.
20. Mikrotvrdoća zone fuzije REW spoja u DP čeliku je u prosjeku 379 HV. Formiranje beinita i martenzita u zoni fuzije (FZ) objašnjava veću mikrotvrdoću FZ u odnosu na mikrotvrdoću osnovnog materijala, tj. čelik DP500. Zona uticaja toplote na strani elementa od čelika Q235 ima najveću mikrotvrdoću (više od 500 HV), što je prvenstveno posljedica martenzitne mikrostrukture. Takođe, primjećuje se da je mikrotvrdoća zone fuzije na strani elementa vrlo visoka, oko 500 HV, što je posljedica martenzitne i perlitne strukture.

21. Kod svih sedam uzoraka pri dinamičkom ispitivanju REW spojeva na srvo-pulzatoru došlo je do loma kroz leguru aluminijuma na mjestu spoja, odnosno do loma u PF modu. Dinamičko ispitivanje je prekinuto kada je uzorak izdržao broj promjena 10×10^6 i tada je konstatovano da je pri sili od 0.882 kN trajna dinamička izdržljivost spoja.
22. Statičko ispitivanje na zatezanja spoja limova od čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 dobijenog zakivanjem bez zakovica uređeno je samo za jedan tip uzorka sa tri ponavljanja. MC spoj ova dva materijala koji ima debljinu dna spoja od 1 mm, debljinu zarezova od 0,125 mm i debljinu vrata od 0,507 mm izdržao je silu od 3,06 kN, sa izduženjem od 2,19 mm. Kod svih uzoraka došlo je do loma spoja na strani aluminijuma po obodu tačke. Ovakav način loma smatra se povoljnijim u odnosu na lom koji dovodi do razdvajanja limova bez pojave pukotine u aluminijumu.
23. Pri dinamičkom ispitivanju prethodno pomenutog MC spoja, kod polomljenih uzoraka primijećen je isti način loma kao i pri statičkom testu. Ovaj spoj izdržao je silu od 1,13 kN pri 10×10^6 ciklusa.
24. Poređenjem dobijenih rezultata zaključeno je da RSW i REW spoj imaju slične vrijednosti maksimalne sile kidanja, ali treba posebno napomenuti da su REW uzorci spojeni sa značajno manjom strujom zavarivanja. MC spoj je pri ispitivanju na zatezanja pokazao superiornost u pogledu maksimalne sile kidanja kada se poredi sa RSW i REW tehnologijom spajanja. Kada je riječ o vrijednosti apsorbovane energije, najbolje rezultate daje REW tehnologija. Takođe, dinamička nosivost MC spoja je veća od dinamičke nosivosti REW spoja.
25. Generalno posmatrano, mehanička svojstva REW i MC spoja su zadovoljavajuće, dok to nije slučaj kod RSW spoja, prvenstveno zbog male vrijednosti apsorbovane energije i načina loma datog spoja.
26. Rangiranje RSW, REW i MC spoja urađeno je pomoću AHP metode, a kriterijumi za rangiranje bili su: maksimalna sila, količina apsorbovane energije, dinamička izdržljivost, vizuelni izgled spoja i mogućnost automatizacije. Rang tehnologija je sledeći: REW, MC, RSW.
27. Prednosti i nedostaci tehnologija spajanja koji su izvedeni na osnovu eksperimentalnog i teorijskog istraživanja sprovedenog u ovoj doktorskoj disertaciji od posebnog su značaja jer se mogu integrisati u softvere koji pomažu konstruktorima u ranoj fazi razvoja proizvoda da izaberu adekvatnu tehnologiju spajanja dva raznorodna materijala, u ovom slučaju čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754.

Naučni doprinos doktorske disertacije se ogleda u:

- Istraživanju uticaja parametara zavarivanja na mehanička svojstva, mikrostrukturu i makrostrukturu spoja dva lima od čelika DP500 dobijena elektrootpornim tačkastim zavarivanjem (RSW);
- Optimizaciji parametara elektrootpornim tačkastim zavarivanjem dva lima od čelika DP500 primjenom višekriterijumske Tagučijeve metode kao i Tagučijeve metode sa sivom relacionom analizom;
- Istraživanju mogućnosti spajanja limova od čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 pomoću konvencionalnog elektrootpornog tačkastog zavarivanja (RSW)
- Istraživanju alternativnih tehnologija spajanja limova od čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754;
- Istraživanju mogućnosti spajanja čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 pomoću novorazvijene tehnologije spajanja naziva elektrootporno tačkasto zavarivanje elementima (REW);
- Istraživanju spajanja čelika DP500 u legure aluminijuma AW 5754 zakivanjem bez zakovica kao mehaničkom načinu spajanja;
- Istraživanju uticaja parametara zavarivanja na mehanička svojstva, mikrostrukturu i makrostrukturu zavarenog spoja limova od čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 dobijenog pomoću elektrootpornog tačkastog zavarivanja elementima;
- Eksperimentalnom određivanju dinamičke nosivosti (Velerove krive) zavarenog spoja limova od čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 dobijenog pomoću elektrootpornog tačkastog zavarivanja elementima;
- Eksperimentalnom određivanju statičke i dinamičke nosivosti spoja limova od čelika DP500 i legure aluminijuma AW 5754 dobijenog pomoću zakivanja bez zakovice;
- Uporednim analizama i izvedenim zaključcima o mogućnostima primjene različitih tehnologija za spajanje limova od različitih odnosno raznorodnih materijala (DP500 – AW 5754);
- Novom pristupu oblikovanja lakih konstrukcija primjenom multimaterijal dizajn savremenog koncepta oblikovanja lakih konstrukcija, prije svega u automobilske industriji, koji ima za cilj integrisanje različitih vrsta materijala u jednu strukturu, a sve sa aspekta ispunjenja zahtjeva koji se odnose na očuvanje životne sredine.

Pravci budućeg istraživanja su:

- Analiza uticaja parametara zavarivanja na dinamičku nosivost REW spoja DP čelika i legura aluminijuma. Optimizacija i analiza uticaja geometrije elementa na nosivost REW spojeva.
- Analiza mehaničkih svojstava REW spoja u kombinaciji sa lijepkom pri spajanju čelika i lakih metala odnosno čelika i polimera ojačanih ugljeničkim vlaknima.
- Analiza uticaja geometrije žiga i matrica na statičku i dinamičku nosivost spoja DP čelika i legure aluminijuma dobijenog pomoću zakivanja bez zakovica.
- Mogućnosti spajanja DP čelika i lakih metala kombinovanjem zakivanja bez zakovica i lijepljenja.

LITERATURA

- [1] E. Schapitz (1963) *Festigkeitslehre für den Leichtbau*, VDI-Verlag, Düsseldorf.
- [2] J. Wiedemann (1979/80) *Leichtbau I und II*, Vorlesungsmitschrift, TU Berlin, Berlin.
- [3] B. Klein (2009) *Leichtbau-Konstruktion, Berechnungsgrundlagen und Gestaltung*, Vieweg and Reubner.
- [4] H. P. Degischer, S. Luftl (2012) *Leichtbau, Prinzipien, Werkstoffauswahl und Fertigungsvarianten*, E-Book.
- [5] A. Albers, N. Burkardt (2013) *Systemleichtbau – ganzheitliche Gewichtsreduzierung*, u F. Henning, E. Moeller: *Handbuch Leichtbau*, Hanser Verlag München, pp. 115-132.
- [6] UREDBA (EU) 2019/631 EUROPSKOG PARLAMENTA I VIJEĆA od 17. travnja 2019. o utvrđivanju standardnih vrijednosti emisija CO₂ za nove osobne automobile i za nova laka gospodarska vozila te o stavljanju izvan snage uredbi (EZ) br. 443/2009 i (EU) br. 510/2011
- [7] J. H. Schmitt, T. Iung (2018) *New developments of advanced high-strength steels for automotive applications*, Comptes Rendus Physique, vol. 19,no. 8, pp. 641-656, DOI: 10.1016/j.crhy.2018.11.004.
- [8] G. Cole, A. Glove, R. Jeryan, G. Davies (1997) *Lightweight materials for automotive application*, Steel World 2, vol. 2, no. 1, pp. 75-83.
- [9] J. Galán, L. Samek, P. Verleysen, K. Verbeken, Y. Houbaert (2012) *Advanced high strength steels for automotive industry*, Rev. Metal., vol.48, no2, pp. 118-131, DOI: 10.3989/revmetalm.1158.
- [10] A. Đurić, B. Marković, S. Pelkić (2014) *Osnovni principi i pravila primjene lakog dizajna u mašinstvu*, Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications“ COMETA 2014, Jahornia, RS, BiH, pp. 579 -588.
- [11] M. Shashank, M. Stevens, M. Chess (2017) *Mixed Material Joining Advancements and Challenges*, Center for Automotive Research, Ann Arbor, MI.
- [12] M.Tisza, Z. Lukács (2018) *High strength aluminum alloys in car manufacturing*, International Deep Drawing Research Group 37th Annual Conference, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, vol. 418, DOI: 10.1088/1757-899X/418/1/012033.

- [13] Y. Zhang, H. Shan, Y. Li, J. Guo, Z. Luo, C. Yong Ma (2017) *Joining aluminum alloy 5052 sheets via novel hybrid resistance spot clinching process*, Materials & Design, vol. 18, pp. 36-43, DOI: 10.1016/j.matdes.2017.01.017.
- [14] M. Y. Ghannam, M. Niesluchowski, P. M. Culkeen (2002) *Analysis of a Frontal Rail Structure in a Frontal Collision*, SAE 2002 World Congress Detroit, Michigan.
- [15] M. Rossini, P. Russo Spena, L. Cortese, P. Matteis, D. Firrao (2015) *Investigation on dissimilar laser welding of advanced High strength steel sheets for the automotive industry*, Materials Science & Engineering A, vol. 628, pp. 288-296, 10.1016/j.msea.2015.01.037.
- [16] L. János, M. Ákos, P. Dóra (2017) *Fatigue Curves for Aluminium Alloys and their Welded Joints Used in Automotive Industry*, Materials Science Forum, vol. 885, pp. 86-91, DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.885.86.
- [17] K. Xu, Q. Cui, G. Li, S. Zhang (2017) *Research Status of Steel - Aluminum Joining Technology for Automobile Parts*, Proceedings of the 2017 2nd International Conference on Electrical, Automation and Mechanical Engineering (EAME 2017), Advances in Engineering Research, vol. 86, pp. 216-218, DOI: 10.2991/eame-17.2017.52.
- [18] M. Shome, T. Muralidhar (2015) *Welding and Joining of Advanced High Strength Steels (AHSS)*, 1st Edition, Woodhead Publishing, DOI: 10.1016/C2013-0-16259-9.
- [19] H. Aydin, (2015) *The mechanical properties of dissimilar resistance spot-welded DP600–DP1000 steel joints for automotive applications*,“ Journal of Automobile Engineering, vol. 229, no. 5, pp. 599-610, DOI: 10.1177/0954407014547749.
- [20] www.worldautosteel.org, pristupljeno 17.12.2021. godine.
- [21] <https://www.kloecknermetals.com/blog/dp-steel-why-is-dual-phase-steel-important-to-autos/> , pristupljeno 24.02.2022. godine.
- [22] G. Reyes , S. Gupta (2009) *Manufacturing and mechanical properties of thermoplastic hybrid laminates based on DP500 steel*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 40, no. 2, pp. 176-183, DOI: 10.1016/j.compositesa.2008.10.016.
- [23] A. I. Taub, A. A. Luo (2015) *Advanced lightweight materials and manufacturing processes for automotive application*, MRS Bulletin, Vol. 40, pp. 1045-1053, DOI: 10.1557/mrs.2015.268.
- [24] M. Tisza, I. Czinege (2018) *Comparative study of the application of steels and aluminium in lightweight production of automotive parts*, International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, vol. 1, no. 4, pp. 229-238, DOI: 10.1016/j.ijlmm.2018.09.001.

- [25] J. Zhou, X. Wan, Y. Li (2015) *Advanced aluminium products and manufacturing technologies applied on vehicles presented at the EuroCarBody conference*, Aluminium Two Thousand World Congress and International Conference on Extrusion and Benchmark ICEB 2015, Materials Today: Proceedings 2, 5015 – 5022, Doi: 10.1016/j.matpr.2015.10.091.
- [26] D. D. Živojinović (2013) *Primena mehanike loma na procenu integriteta zavarenih konstrukcija od legura aluminijuma*, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet Beograd, Beograd.
- [27] BAS EN 573:2009 - Aluminij i legure aluminija – Hemijski sastav i oblik poluproizvoda – Dio 1: Brojčani način označavanja.
- [28] L. Bertin (2014) *Tensile Strength of Automotive Aluminum Joints Using Resistance Spot Welding, Self-Piercing Riveting and Adhesive Hybrid Joining* -Electronic Theses and Dissertations, University of Windsor.
- [29] P. Kah, R. Suoranta, J. Martikainen, C. Magnus (2014) *Techniques for joining dissimilar materials: metals and polymers*, Rec. Adv. Mater. Sci., vol. 36, pp. 152-164.
- [30] A. Thongchai, S. Kawin, A. Phisut, T. Kreangsak (2014) *Resistance Spot Welding Optimization Based on Artificial Neural Network*, International Journal of Manufacturing Engineering, DOI: 10.1155/2014/154784.
- [31] A. Chabok, E. van der Aa, J.T.M. De Hosson, Y.T. Pei (2017) *Mechanical behavior and failure mechanism of resistance spot welded DP1000 dual phase steel*, Materials & Design, vol. 124, pp. 171-182, DOI: 10.1016/j.matdes.2017.03.070.
- [32] J.-H. Kim, D.-C. Lee, J.-H. Lee, Y.-S. Ham, K.-W. Kang (2017) *Fatigue Analysis of Spot-Welded Automobile Components Considering Fatigue Damage-Induced Stiffness Degradation in Time and Frequency Domains*, International journal of precision engineering and manufacturing, vol. 13, pp. 389-397, DOI: 10.1007/s12541-017-0047-y.
- [33] E. Mohsen, T. A. Mark, Z. A. Mohsen i F. D. Sergi (2014) *Effect of resistance spot welding parameters on weld pool properties in a DP600 dual-phase steel: A parametric study using thermomechanically-coupled finite element analysis*, Materials and Design, vol. 56, pp. 387–397, DOI: 10.1016/j.matdes.2013.11.026.
- [34] C. Jianbin, Y. Xinjian, H. Zhan, L. Ting, W. Kanglong, L. Ci (2017) *Improvement of resistance-spot-welded joints for DP 600 steel and A5052 aluminum alloy with Zn slice interlayer*, Journal of Manufacturing Processes, vol. 30, pp. 398-405, DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.10.009.
- [35] L. Zhanxiang, L. Yang, L. Zhen, A. Sansan, Y. Zhanghua, G. Yunlong, C. Qiang, (2017) *Microstructure and fatigue behavior of resistance element welded dissimilar joints of DP780 dual-phase steel to 6061-T6 aluminum alloy*, Int J Adv Manuf Technol, vol. 92, no. 5-8, pp. 1923-1931, DOI: 10.1007/s00170-017-0310-5.

- [36] C. Jianbin, Y. Xinjian, H. Zhan, S. Changzheng, Z. Yanxin i . Z. Yuxuan (2016) *Microstructure and mechanical properties of resistance-spot-welded joints for A5052 aluminum alloy and DP 600 steel*, Materials Characterization, vol. 120, pp. 45–52, DOI: 10.1016/j.matchar.2016.08.015.
- [37] Altistherm d.o.o: *Priručnik za elektrootporno zavarivanje* (<http://www.alatistherm.co.rs/pdf.tecna/PrirucnikPunktovanje.pdf>, pristupljeno 15.10.2020. godine)
- [38] W. Li, D. Cerjanec, G. A. Grzadzinski (2005) A Comparative Study of Single-Phase AC and Multiphase DC Resistance Spot Welding, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 127, pp. 583-589, DOI: 10.1115/1.1949621.
- [39] V. Šijački-Žeravčić, A. Milosavljević, V. Đorđević, M. Vukićević (2000) *Mašinski materijali II deo*, Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, Beograd.
- [40] BAS EN ISO 5182:2017 - Elektrootporno zavarivanje - Materijali za elektrode i pomoćnu opremu.
- [41] BAS EN ISO 5821:2011 - Elektrootporno zavarivanje - Završeci elektroda za tačkasto zavarivanje.
- [42] N. T. Williams, J. D. Parker (2004) Review of resistance spot welding of steel sheets. Part 2 Factors influencing electrode life, International Materials Reviews, Vol. 49, No. 2, pp. 77-108, DOI: 10.1179/095066004225010541.
- [43] S. Shin, D-J. Park, J. Yu, S. Rhee (2019) *Resistance Spot Welding of Aluminum Alloy and Carbon Steel with Spooling Process Tapes*. Metals, Vol. 9, No. 4:410, DOI: 10.3390/met9040410.
- [44] Y. Che, L. Wang, D. Sun, H. Li, W. Geng (2018) *Microstructures and Mechanical Properties of Resistance Spot-Welded Steel/Aluminum Alloy Joints with Process*, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 27, No. 10, pp. 5532-5544, DOI: 10.1007/s11665-018-3595-0.
- [45] I. S. Chang, Y. J. Cho, H. S. Park, D. Y. So (2016) *Importance of Fundamental Manufacturing Technology in the Automotive Industry and the State of the Art Welding and Joining Technology*, Journal of Welding and Joining, vol. 34, no. 1, pp. 21-25, DOI: 10.5781/JWJ.2016.34.1.21.
- [46] S. M. Manladan, F. Yusof, S. Ramesh, Y. Zhang. Z. Luo, Z. Ling (2017) *Resistance Element Welding of Magnesium Alloy/austenitic Stainless Steel*, Joining and Welding Symposium, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 238, DOI: 10.1088/1757-899X/238/1/012004.
- [47] L. Zhanxiang , L. Yang, L. Zhen, F. Yueqiao, W. Zhengmin (2016) *Resistance element welding of 6061 aluminum alloy to uncoated 22MnMoB boron steel*, Materials and Manufacturing Processes, vol. 31, no. 16, pp. 2174-2180, DOI: 10.1080/10426914.2016.1151044.

- [48] Q. Ranfeng, W. Nannan, S. Hongxin, C. Lihu, . H. Longlong, Z. Keke (2015) *Joining steel to aluminum alloy by resistance spot welding with a rivet*, International Journal of Materials Research, vol. 106, no. 1, pp. 60-65, DOI: 10.3139/146.111146.
- [49] ARNOLD UMFORMTECHNIK GmbH & Co. KG (<https://www.youtube.com/watch?v=bymK7g2KLKM>, pristupljeno 20.11.2021, godine).
- [50] N. M. Jimenez, P. Jacques, A. Simar (2016) *Evaluation of the intermetallic fracture toughness in Al-to-steel welds performed by Friction Stir Welding and Friction Melt Bonding*, Journées annuelles de la SF2M, Albi, France.
- [51] M. Mohamed Abd Elnabi, T.A. Osman, A. El Mokadem, A. Bakr Elshalakany (2020) *Evaluation of the formation of intermetallic compounds at the intermixing lines and in the nugget of dissimilar steel/aluminum friction stir welds*, Journal of Materials Research and Technology, vol. 9, no, 5, pp. 10209-10222, DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.07.027.
- [52] P. Tsung-Yu (2007) *Friction Stir Spot Welding (FSSW) –A Literature Review*, Welding & Joining & Fastening & Friction Stir Welding, 2007, World Congress, Detroit, Michigan, USA.
- [53] Y. Chae Lim, C. David Warren, J. Chen, Zhili Feng (2019) *Joining of Lightweight Dissimilar Materials by Friction Self-Piercing Riveting*, In: Y. Hovanski, R. Mishra, Y. Sato, P. Upadhyay, D. Yan (eds) *Friction Stir Welding and Processing X*. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-05752-7_18.
- [54] Y. Wu Ma, Y. Bing Li, W. Hu, M. Lou, Z. Qin Lin (2018) *Modeling of Friction Self-Piercing Riveting of Aluminum to magnesium*, Weld World, vol. 62, pp. 1195–1206, DOI: 10.1007/s40194-018-0614-6.
- [55] M. Milčić (2020) *Istraživanje uticaja parametara zavarivanja trenjem sa mešanjem na dinamičku izdržljivost zavarenog spoja legure aluminijuma 2024 T351*, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet Univerziteta u Nišu, Niš.
- [56] K. Martinsen, S. J. Hu, B. E. Carlson (2015) *Joining of dissimilar materials*, CIRP Annals, vol. 64, no. 2, pp. 679-699, DOI: 10.1016/j.cirp.2015.05.006.
- [57] G. Meschut, V. Janzen, T. Olfermann (2014) *Innovative and Highly Productive Joining Technologies for Multi-Material Lightweight Car Body Structures*, J. of Materi Eng and Perform, vol. 23, pp. 1515–1523, DOI:10.1007/s11665-014-0962-3.
- [58] M. Milčić, D. Milčić, T. Vuherer, L. Radović, I. Radisavljević, A. Đurić (2021) *Influence of Welding Speed on Fracture Toughness of Friction Stir Welded AA2024-T351 Joints*, Materials, vol. 14, no. 6, DOI: 10.3390/ma14061561.
- [59] H. Torkamani, J. Méndez Vivas, C. Lecart, E. Aldanondo Begiristain, P. Alvarez Moro, M-L. Antti (2022) *Effect of Rotation Speed and Steel Microstructure on Joint Formation in Friction Stir Spot Welding of Al Alloy to DP Steel*, Journal of Manufacturing and Materials Processing, Vol. 6, No. 1:24, DOI:10.3390/jmmp6010024.

- [60] K. Xu, S. Zhang (2020) *Research on Friction Stir Spot Welding Brazing Process and Properties of Dissimilar Metals DP590 and 6061*, Advances in Materials Science and Engineering, ID: 9701976, DOI: 10.1155/2020/9701976.
- [61] Y. Kusuda (2013) *Honda develops robotized FSW technology to weld steel and aluminum and applied it to a mass-production vehicle*, Industrial Robot: An International Journal, vol. 40, no. 3, pp. 208-212, DOI: 10.1108/01439911311309889.
- [62] P. Wang, X. Chen, Q. Pan, B. Madigan, J. Long (2016) *Laser welding dissimilar materials of aluminum to steel: an overview*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology volume vol. 87, pp. 3081–3090, DOI:10.1007/s00170-016-8725-y.
- [63] A. Gullino, P. Matteis, F. D’Aiuto (2019) *Review of Aluminum-To-Steel Welding Technologies for Car-Body Applications*, Metals, vol. 9, no. 315. DOI: 10.3390/met9030315.
- [64] R. Lahdo, A. Springer, O. Meier, S. Kaielerle, L. Overmeyer (2018) *Investigations on laser welding of dissimilar joints of steel and aluminum using a high-power diode laser*, Journal of Laser Applications, vol. 30, no. 3, DOI: 10.2351/1.5040643.
- [65] Z. Dianwu, L. Ningning, X. Shaohua, L. Jinshui (2016) *Research on laser weld bonding of dual phase steel to aluminium alloy*, Int. J. Manufacturing Research, vol. 11, no. 3 pp. 209-220.
- [66] B. Bauer (2006) *Optimiranje parametara laserskog zavarivanja čelika za poboljšavanje*, Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb.
- [67] D. Zhao, D. Ren, K. Zhao, S. Pan, X. Guo (2017) *Effect of welding parameters on tensile strength of ultrasonic spot welded joints of aluminum to steel—By experimentation and artificial neural network*. J. Manuf. Process, vol. 30, pp. 63–74, DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.08.009.
- [68] P. Prangnell, F. Haddadi, Y. C. Chen (2011) *Ultrasonic spot welding of aluminium to steel for automotive applications—Microstructure and optimisation*, Mater. Sci. Technol, vol. 27, no. 3, pp. 617–624, DOI: 10.1179/026708310X520484.
- [69] M. Shakil, N. H. Tariq, M. Ahmad, M. A. Choudhary, J. I. Akhter, S. S. Babu (2014) *Effect of ultrasonic welding parameters on microstructure and mechanical properties of dissimilar joints*, Mater. Des. Vol. 55, pp. 263–273, DOI: 10.1016/j.matdes.2013.09.074.
- [70] B. Michael, F. Balle (2021) *Multi-Spot Ultrasonic Welding of Aluminum to Steel Sheets: Process and Fracture Analysis*, Metals, vol. 11, no. 5, DOI: 10.3390/met11050779.
- [71] L. Dezhi, C. Andreas, P. Imran W. Geraint (2017) *Self-piercing riveting—a review*, Int J Adv Manuf Technol, vol. 92, pp. 1777–1824, DOI: 10.1007/s00170-017-0156-x.

- [72] B. Uhe, C. M. Kuball, M. Merklein, et al. (2020) *Improvement of a rivet geometry for the self-piercing riveting of high-strength steel and multi-material joints*, Prod. Eng. Res. Devel, vol. 14, pp. 417–423, DOI: 10.1007/s11740-020-00973-w.
- [73] S. Carmen, K. Gundolf, F. Horst E. (2016) *Influence of Corrosive Conditions on the Mechanical Performance of Flow Drill Screw Joints between Light Metals*,“ Materials Science Forum, vol. 879, pp. 1725-1730, DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.879.1725.
- [74] Flow-Drilling Screws Help Carmakers Shed Weight (www.assemblymag.com, pristupljeno 20.11.2021).
- [75] M. Carboni, S. Beretta, M. Monno (2006) *Fatigue behaviour of tensile-shear loaded clinched joints*, Engineering Fracture Mechanics, vol. 73, no. 2, pp. 178–190, DOI: 10.1016/j.engfracmech.2005.04.004.
- [76] TOX® PRESSOTECHNIK (www.tox-pressotechnik.com, pristupljeno 20.11.2021).
- [77] J. Mucha (2017) *Clinching technology in the automotive industry*, The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji; vol. 76, no. 2, pp. 75-94, DOI: 10.14669/AM.VOL.76.ART4.
- [78] C. Yvan, P. Lucas (2014) *Joining technologies for future automobile multi-material modules*, 11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2014, 19-24 October 2014, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan / Procedia Engineering, pp. 2104 – 2110.
- [79] G. Meschut, O. Hahn, V. Janzen, T. Olfermann (2014) *Innovative joining technologies for multi-material structures*, Weld World, vol. 58, pp. 65–75, DOI 10.1007/s40194-013-0098-3.
- [80] S. Tatsuya et al (2013) *Dissimilar Metal Joining Technologies for Steel Sheet and Aluminum Alloy Sheet in Auto Body*, Nippon steel technical report no. 103, pp. 91-98.
- [81] M. Q. dos Reis, M. D. Banea, L. F. M. da Silva, R. J. C. Carbas (2019) *Mechanical characterization of a modern epoxy adhesive for automotive industry*, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, vol. 41, no. 340, DOI: 10.1007/s40430-019-1844-2.
- [82] A. Zvorykina, O. Sherepenko, M. Neubauer, S. Jüttner (2020) *Dissimilar metal joining of aluminum to steel by hybrid process of adhesive bonding and projection welding using a novel insert element*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 282, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116680.
- [83] H. Jiang, Y. Liao, S. Gao, G. Li, J. Cui (2021) *Comparative study on joining quality of electromagnetic driven self-piecing riveting, adhesive and hybrid joints for Al/steel structure*, Thin-Walled Structures, vol. 164, DOI: 10.1016/j.tws.2021.107903.

- [84] European Aluminium Association: *Aluminium Automotive Manual – Joining, Hybrid joining techniques* (www.european-aluminium.eu, pristupljeno 29.03.2022).
- [85] M. Pouranvari (2017) *Critical assessment: dissimilar resistance spot welding of aluminium/steel: challenges and opportunities*, Materials Science and Technology, vol. 33, pp. 1705-1712, DOI: 10.1080/02670836.2017.1334310.
- [86] M. Pouranvari, S. P. H. Marashi, (2012) *Failure of resistance spot welds: tensile shear versus coach peel loading conditions*, Ironmaking and Steelmaking, vol. 39, no. 2, pp. 104-111, DOI: 10.1179/1743281211Y.0000000066.
- [87] M. Pouranvari i dr (2010) *Failure mode transition and mechanical properties of similar and dissimilar resistance properties of similar and dissimilar resistance*, Science and Technology of Welding and Joining, vol. 15, no. 7, pp. 625-631, DOI: 10.1179/136217110X12813393169534.
- [88] N. Akkaş, E. Ferik, E. İlhan, S. Aslanlar (2016) *The Effect of Nugget Sizes on Mechanical Properties in Resistance Spot Welding of S235JR(Cu) Steel Sheets Used in Railway Vehicles*, ACTA PHYSICA POLONICA A, vol. 130, no 1, pp. 60-63, DOI: 10.12693/APhysPolA.130.60.
- [89] N. Akkaş, E. Ferik, E. İlhan, S. Aslanlar (2016) *The Effect of Welding Current on Nugget Sizes in Resistance Spot Welding of SPA-C Steel Sheets Used in Railway Vehicles*, ACTA PHYSICA POLONICA A, vol. 130, no. 1, pp. 142-144, DOI: 10.12693/APhysPolA.130.142.
- [90] P. Banerjee, R.Sarkar, T.K. Pal, M. Shome (2016) *Effect of nugget size and notch geometry on the high cycle fatigue performance of resistance spot welded DP590 steel sheets*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 238, pp. 226–243, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.07.023.
- [91] W. H. Zhang, X. M. Qiu, D. Q. Sun, L. J. Han (2011) *Effects of resistance spot welding parameters on microstructures and mechanical properties of dissimilar material joints of galvanised high strength steel and aluminium alloy*, Science and Technology of Welding and Joining, vol. 16, no. 2, pp. 153-161, DOI: 10.1179/1362171810Y.0000000009.
- [92] S.H. Mousavi Anijdan, M. Sabzi, M. Ghobeiti-Hasab, A. Roshan-Ghiyas (2018) *Optimization of spot welding process parameters in dissimilar joint of dual phase steel DP600 and AISI 304 stainless steel to achieve the highest level of shear-tensile strength*, Materials Science & Engineering A, vol. 726, pp.120-125, DOI: 10.1016/j.msea.2018.04.072
- [93] H.A. Shende, N.A. Kadam (2017) *Optimization of resistance spot welding process parameters of AISI 304l and AISI 1020 welded joints*, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), vol. 4, no. 2, pp. 1059-1062.

- [94] F. Reyes-Calderón, R. Vences-Hernández, J.A. Salazar-Torres, H.J. Vergara-Hernández, I. Aguilera-Navarrete, V. Pérez-González (2018) *Parameter Optimization: Force (F), Time (T) and Current Intensity (I), in the RSW Welding Process of DP-290 Steel Plates Using the Taguchi Method*, Soldagem & Inspeção, vol. 32, no. 2, pp. 157-167, DOI: 10.1590/0104-9224/SI2302.04
- [95] A. Arumugam, M. A. Nor (2015) *Spot Welding Parameter Optimization To Improve Weld Characteristics For Dissimilar Metals*, International Journal of Scientific & Technology research, vol. 2, no. 1, pp. 75-80.
- [96] A. Subrammanian, D. B. Jabaraj, J. Jayaprakash (2018) *Multi-objective Optimization of Resistance Spot Welding of AISI 409M Ferritic Stainless Steel*, Journal of Scientific and Industrial Research (JSIR), vol. 77, no. 5, pp. 271 -275.
- [97] I. A. Soomro, S. R. Pedapati, M. Awang (2021) *Optimization of postweld tempering pulse parameters for maximum load bearing and failure energy absorption in dual phase (DP590) steel resistance spot welds*, Materials Science and Engineering: A, vol. 803, DOI: 10.1016/j.msea.2020.140713.
- [98] B.V. Feujofack Kemda, N. Barka, M. Jahazi, et al. (2020) *Optimization of resistance spot welding process applied to A36 mild steel and hot dipped galvanized steel based on hardness and nugget geometry*, Int J Adv Manuf Technol, vol. 106, pp. 2477–2491 DOI: 10.1007/s00170-019-04707-w.
- [99] A. E. Hernández, L. O. Villarinho, V. A. Ferraresi, M. S. Orozco, A. S. Roca, H. C. Fals (2020) *Optimization of resistance spot welding process parameters of dissimilar DP600/AISI304 joints using the infrared thermal image processing*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 108, pp. 211–221, DOI: 10.1007/s00170-020-05374-y.
- [100] J. Yang, S. Xue i dr. (2016) *Development of Zn–15Al–xZr filler metals for Brazing 6061 aluminum alloy to stainless steel*, Materials Science & Engineering A, vol. 651, pp. 425–434, DOI: 10.1016/j.msea.2015.11.004.
- [101] Y. Su, X. Hua i dr. (2015) *Characterization of intermetallic compound layer thickness at aluminum–steel interface during overlaying*, Materials and Design, vol. 78, pp. 1–4, DOI: 10.1016/j.matdes.2015.04.025.
- [102] J. Yang, Y.L. Li, H. Zhang, W. Guo, Y. Zhou (2015) *Control of interfacial intermetallic compounds in Fe–Al joining by Zn addition*, Materials Science & Engineering A, vol. 645, p. 323–327, 10.1016/j.msea.2015.08.036.
- [103] M.R. Arghavani, M. Movahedi, A.H. Kokabi (2016) *Role of zinc layer in resistance spot welding of aluminium to steel*, Materials & Design, vol. 102, pp. 106-114, DOI: 10.1016/j.matdes.2016.04.033.

- [104] W. Zixuan, W. Hui-Ping, W. Min, C. E. Blair, S. R. David (2016) *Numerical simulation of resistance spot welding of Al to zinc-coated steel with improved representation of contact interactions*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 101, pp. 749-763, DOI: 10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2016.05.023 .
- [105] I. Ibrahim, R. Ito, T. Kakiuchi, Y. Uematsu, K. Yun, C. Matsudai (2016) *Fatigue behaviour of Al/steel dissimilar resistance spot welds fabricated using welds fabricated using Al–Mg interlayer*, Science and Technology of Welding and Joining, pp. 223-233, DOI: 10.1179/1362171815Y.0000000086.
- [106] L. Han, M. Thornton, D. Boomer, M. Shergold, (2010) *Effect of aluminium sheet surface conditions on feasibility and quality of resistance spot welding*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 210, no. 8, pp. 1076–1082, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.02.019.
- [107] Z. Luo, S. Ao, Y. J. Chao, X. Cui, Y. Li, Y. Lin (2015) *Application of Pre-heating to Improve the Consistency and Quality in AA5052 Resistance Spot Welding*, Journal of Materials Engineering and Performance, vol. 10.
- [108] M.R. Karimi, M. Sedighi, D. Afshari (2015) Thermal contact conductance effect in modeling of resistance spot welding process of aluminum alloy 6061-T6. Int J Adv Manuf Technol, vol. 77, pp. 885–895, DOI: 10.1007/s00170-014-6492-1.
- [109] R. S. Florea, K. N. Solanki, D. J. Bammann, J. C. Baird, J. B. Jordon, M. P. Castanier (2012). *Resistance spot welding of 6061-T6 aluminum: Failure loads and deformation*, Materials and Design, vol. 34, pp. 624-630, DOI: 10.1016/j.matdes.2011.05.017.
- [110] A. Yuksel, H. Fatih (2016) *Investigation of resistance spot welds between DP450 steel and aluminum alloys*, Materials Testing, vol. 58, no. 5, pp. 408-412, DOI: 10.3139/120.110873.
- [111] M. Pouranvari, S. P. H. Marashi (2013) *Critical review of automotive steels spot welding: process, structure and properties*, Science and Technology of Welding and Joining, vol. 18, no. 5, pp. 361-403, DOI: 10.1179/1362171813Y.0000000120.
- [112] M. Alizadeh-Sh, S.P.H. Marashi (2017) *Resistance spot welding of dissimilar austenitic/duplex stainless steels: Microstructural evolution and failure mode analysis*, Journal of Manufacturing Processes, vol. 28, pp. 186-196, DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.06.005.
- [113] M. Pouranvari i dr (2007) *Effect of weld nugget size on overload failure mode of resistance spot welds*, Science and Technology of Welding and Joining, vol. 12, no. 3, pp. 217-225, DOI: 10.1179/174329307X164409.
- [114] P.-C. Lin; S.-H. Lin i J. Pan, (2006) *Modeling of failure near spot welds in lap-shear specimens based on a plane stress rigid inclusion analysis*, Engineering Fracture Mechanics, vol. 73, no. 15, pp. 2229–2249, DOI: 10.1016/j.engfracmech.2006.03.017.

- [115] S. Dancette i dr, (2012) *Investigation of the Tensile Shear fracture of Advanced High Strength Steel spot welds*, Engineering Failure Analysis, vol. 25, pp. 112–122, DOI: 10.1016/j.engfailanal.2012.04.009.
- [116] S. Brauser, L. A. Pepke, G. Weber, M. Rethmeier (2010) *Deformation behaviour of spot-welded high strength steels for automotive applications*, Materials Science and Engineering A, vol. 527, no. 26, pp. 7099–7108, DOI: 10.1016/j.msea.2010.07.091.
- [117] S. Ao, H. Shan, X. Cui, Z. Luo, Y. J. Chao, M. Ma (2016) *Effect of specimen width on the failure behavior in resistance spot weld tensile shear testing*, Weld World, vol. 60, pp. 1095–1107, DOI: 10.1007/s40194-016-0384-y.
- [118] M. I. Khan, M.L. Kuntz & Y. Zhou (2008) *Effects of weld microstructure on static and impact performance of resistance spot welded joints in advanced high strength steels*, Science and Technology of Welding and Joining, vol. 13, no. 3, pp. 294-304, DOI: 10.1179/174329308X271733.
- [119] N. Chen, H-P. Wang, B. E. Carlson, D. R. Sigler, M. Wang (2016) *Fracture mechanisms of Al/steel resistance spot welds in lap shear test*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 243, pp. 347-354, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.12.015.
- [120] H. Günter, G. Meschut (2021) *Joining of ultra-high-strength steels using resistance element welding on conventional resistance spot welding guns*, Weld World, vol. 65, pp. 1899–1914, DOI: 10.1007/s40194-021-01122-2.
- [121] F. Vucko, N. LeBozec, D. Thierry, B. Weber, L. Dosdat, G. Luckeneder, T. Bschorr, K. Rother, C. Sciaboni, J. Sczepanski (2016) *Combined corrosion and fatigue performance of joined materials for automotive applications*, Materials and Corrosion, vol. 67, no. 11, pp. 1143-1151, DOI: 10.1002/maco.201608962.
- [122] J.-H. Kim, D.-C. Lee, J.-H. Lee, Y.-S. Ham i K.-W. Kang (2017) *Fatigue Analysis of Spot-Welded Automobile Components Considering Fatigue Damage-Induced Stiffness Degradation in Time and Frequency Domains*, International journal of precision engineering and manufacturing, vol. 18, pp. 389-397, DOI: 10.1007/s12541-017-0047-y.
- [123] A.M. Pereira, J.A.M. Ferreira, F.V. Antunes, P.J. Bártolo (2014) *Assessment of the fatigue life of aluminium spot-welded and weld-bonded joints*, Journal of Adhesion Science and Technology, vol. 28, no.14-15, pp. 1432-1450, DOI: 10.1080/01694243.2012.698107.
- [124] M. Pouranvari (2016) *Fracture toughness of martensitic stainless steel resistance spot welds*, Materials Science & Engineering A, vol. 5, pp. 97-107, DOI: 10.1016/j.msea.2016.10.088.
- [125] J. Kanga i dr. (2017) *Tensile and Fatigue Behaviour of AA6022-T4 to IF Steel Resistance Spot Welds*, 2nd International Conference on Structural Integrity, ICSI 2017, Funchal, pp. 4-7.

- [126] R.J. Wang, D.G. Shang (2009) *Low-cycle fatigue life prediction of spot welds based on hardness distribution and finite element analysis*, International Journal of Fatigue, vol. 31, pp. 508–514, DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2008.04.009.
- [127] F. Esmaeili, A. Rahmani, S. Barzegar, A. Afkar (2015) *Prediction of fatigue life for multi-spot welded joints with different arrangements using different multiaxial fatigue criteria*, Materials and Design, vol. 72, pp. 21-30, DOI: 10.1016/j.matdes.2015.02.008.
- [128] F. Pennec, B. Tikri, S. Bergamo, M. Duchet, B. Weber, J.L. Robert (2018) *Experimental and numerical investigation of the overload effect on fatigue behaviour of spot-welded steel sheets*, Matériaux & Techniques, vol. 106, no. 3, DOI: 10.1051/mattech/2018036.
- [129] BAS EN ISO 14324:2004 -Elektrotoporno tačkasto zavarivanje - Ispitivanje zavarenih spojeva sa razaranjem - Metoda ispitivanja na zamor tačkasto zavarenih spojeva.
- [130] X. Sun, E.V. Stephens, M.A. Khaleel, H. Shao, M. Kimchi (2004) *Resistance Spot Welding of Aluminum Alloy to Steel with Transition Material From Process to Performance Part I: Experimental Study*, Welding research, pp. 188-195.
- [131] L. Shi, J. Kang, B. Shalchi-Amirkhiz, D.R. Sigler, A.S. Haselhuhn, B.E. Carlson (2019) *Effect of coating type on microstructure and mechanical behavior of resistance spot welds of thin X626 aluminum sheet to low carbon steel*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 264, pp. 438-447, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.09.025.
- [132] H.T. Kang, I. Accorsi, B. Patel, E. Pakalnins (2010) *Fatigue performance of resistance spot welds in three sheet stack-ups*, Procedia Engineering, vol. 2, no. 1, pp129-138, DOI: 10.1016/j.proeng.2010.03.014.
- [133] C. Wei (2017) *Development of Fatigue Life Prediction Method for Spot-Welded Joints of Mixed Materials*, PhD thesis, Michigan-Dearborn: University of Michigan-Dearborn.
- [134] J. H. Ordoñez Lara, R.R. Ambriz, C. García, G. Plascencia, D. Jaramillo (2017) *Fatigue Life of Resistance Spot Welding on Dual-Phase Steels*. U: R. Ambriz, D. Jaramillo, G. Plascencia, M. Nait Abdelaziz (urednici) Proceedings of the 17th International Conference on New Trends in Fatigue and Fracture, NT2F 2017, Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-70365-7_26.
- [135] J. Kang, H.M. Rao, D.R. Sigler, B.E. Carlson (2017) *Tensile and Fatigue Behaviour of AA6022-T4 to IF Steel Resistance Spot Welds*, Procedia Structural Integrity, vol. 5, pp. 1425-1432, DOI: 10.1016/j.prostr.2017.07.207.
- [136] D. Heidrich,, F. Zhang, X. Fang (2021) *Fatigue Strength of Rivet Resistance Spot Welding Technique in Comparison with Self-Piercing Riveting for Multi-material Body-in-White Structure*, J. of Materi Eng and Perform, vol. 30, pp. 3806–3821, DOI: 10.1007/s11665-021-05684-6.

- [137] Z. Luo, F. Yan, Y. Li, Y. Bai, Q. Yao, H. Tan (2015) *Numerical and Experimental Study on Nugget Formation Process in Resistance Spot Welding of Aluminum Alloy*, Transactions of Tianjin University, vol. 21, pp. 135-139, DOI: 10.1007/s12209-015-2356-5.
- [138] W. Zhang, D. Sun, L. Han, Y. Li (2015) *Optimised design of electrode morphology for novel dissimilar resistance spot welding of aluminium alloy and galvanised high strength steel*, Materials and Design, vol. 85, pp. 461-470, DOI: 10.1016/j.matdes.2015.07.025.
- [139] M. Jafari, A. Arayee, J. Senkara (2016) *A Review of Finite Element Analysis (FEA) of Resistance Spot Welding (RSW)*, Welding Technology Review, vol. 88, no. pp. 46-52, DOI: /10.26628/wtr.v88i2.571.
- [140] M. Mijajlović, D. Z. Ćirić, S. M. Vidojković (2021) *Effective temperature based algorithm for achieving constant quality resistance seam weld*, Thermal Science, Vol. 25, No. 4:A, pp. 2459-2469, DOI: 10.2298/TSCI200307222M.
- [141] X. Wan, Y. Wang, P. Zhang (2014) *Modelling the effect of welding current on resistance spot welding of DP600 steel*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 214, no. 11, pp. 2723-2729, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.06.009.
- [142] B. Wang, L. Hua, X. Wang, Y. Song, Y. Liu (2016) *Effects of electrode tip morphology on resistance spot welding quality of DP590 dual-phase steel*, Int J Adv Manuf Technol, vol. 83, pp. 1917–1926, DOI: 10.1007/s00170-015-7703-0.
- [143] BAS EN ISO 14270:2017 - Elektrootporno zavarivanje - Ispitivanje sa razaranjem zavarenih spojeva - Dimenzije uzorka i procedura mehaniziranog ispitivanja na razdvajanje zavarenih spojeva nastalih pri elektrootpornom tačkastom, šavnom i bradavičastom zavarivanju.
- [144] F. Nikoosohbat, S. Kheirandish, M. Goodarzi, M. Pouranvari, S. P. H. Marashi (2013) *Microstructure and failure behaviour of resistance spot welded DP980 dual phase steel*, Materials Science and Technology, vol. 26, no. 6, pp. 738-744, DOI: 10.1179/174328409X414995.
- [145] V.H. Baltazar Hernandez (2010) *Effects of Martensite Tempering on HAZ-Softening and Tensile Properties of Resistance Spot Welded Dual-Phase Steels*, PhD thesis, Waterloo, Ontario, Canada: University of Waterloo.
- [146] Y. B. Li, D. L. Li, S. A. David, Y. C. Lim, Z. Feng (2016) *Microstructures of magnetically assisted dual-phase steel resistance spot welds*, Science and Technology of Welding and Joining, vol. 21, no. 7, pp. 555-563, DOI: 10.1080/13621718.2016.1141493.
- [147] I.A. Soomro, S.R. Pedapati, M. Awang (2021) *Double Pulse Resistance Spot Welding of Dual Phase Steel: Parametric Study on Microstructure, Failure Mode and Low Dynamic Tensile Shear Properties*, Materials, 14, 802, DOI:10.3390/ma14040802.

- [148] F. Badkoobeh, A. Nouri, H. Hassannejad, H. Mostaan (2020) *Microstructure and mechanical properties of resistance spot welded dual-phase steels with various silicon contents*, Materials Science and Engineering: A, vol. 790, DOI: 10.1016/j.msea.2020.139703.
- [149] C. Rajarajan, P. Sivaraj & V. Balasubramanian (2020) *Role of Welding Current on Mechanical Properties and Microstructural Characteristics of Resistance Spot Welded Dual Phase Steel Joints*, Physics of Metals and Metallography vol. 121, pp.1447–1454, DOI: 10.1134/S0031918X20140136.
- [150] S.M. Manladan, Y. Zhang, S. Ramesh, Y. Cai, S.Ao, Z.Luo (2019) *Resistance element welding of magnesium alloy and austenitic stainless steel in three-sheet configurations*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 274, 116292, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2019.116292.
- [151] C. Rajarajan, P. Sivaraj, V. Balasubramanian (2020) *Microstructural analysis of weld nugget properties on resistance spot-welded advance high strength dual phase ($\alpha+\alpha'$) steel joints*, Materials Research Express, vol. 7, no. 1, DOI: 10.1088/2053-1591/ab654d.
- [152] N. Yurioka, M. Okumura, T. Kasuya, H.J.U. Cotton (1987) Met. Constr. 19 217R–223R.
- [153] M. I. Khan, M. L. Kuntz, E. Biro, Y. Zhou (2008) *Microstructure and Mechanical Properties of Resistance Spot Welded Advanced High Strength Steels*, Materials Transactions, vol. 49, no. 7, pp. 1629-1637, DOI: 10.2320/matertrans.MRA2008031.
- [154] M. Meinhardt, Martin Endres, M. Graf, M. Lechner, M. Merklein (2019) *Analysing resistance element welding with upset auxiliary joining steel-elements under shear load*, Procedia Manufacturing, vol. 29, pp. 329-336, DOI: 10.1016/j.promfg.2019.02.145.
- [155] G. Meschut, C. Schmal, T. Olfermann (2017) *Process characteristics and load-bearing capacities of joints welded with elements for the application in multi-material design*, Weld World, vol. 61, pp. 435–442, DOI: 10.1007/s40194-017-0431-3.
- [156] S. Niu, Y. Ma, M. Lou, C. Zhang, Y. Li (2020) *Joint formation mechanism and performance of resistance rivet welding (RRW) for aluminum alloy and press hardened steel*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 286, 116830, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116830.
- [157] J. Troschitz, J. Vorderbrüggen, R. Kupfer, M. Gude, G. Meschut (2020) *Joining of Thermoplastic Composites with Metals Using Resistance Element Welding*. Appl. Sci. Vol. 10, 7251, DOI: 10.3390/app10207251.
- [158] C. Schmal, G. Meschut (2020) *Process characteristics and influences of production-related disturbances in resistance element welding of hybrid materials with steel cover sheets and polymer core*, Welding in the World, vol. 64, pp. 437–448, DOI: 10.1007/s40194-019-00842-w.

- [159] A. Đurić, D. Milčić, B. Marković, M. Milčić (2022) *Tensile-shear testing of resistance element welded joint of carbon fiber-reinforced polymer and DP500 steel*, Innovative mechanical engineering, Vol. 1, No. 1, pp. 139 – 146.
- [160] S. Wang, Y. Li, Y. Yang, S. M. Manladan, Z. Luo (2021) *Resistance element welding of 7075 aluminum alloy to Ti6Al4V titanium alloy*, Journal of Manufacturing Processes, vol. 70, pp. 300-306, DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.08.047.
- [161] J. Naito, R. Suzuki (2020) *Multi-material Automotive Bodies and Dissimilar Joining Technology to Realize Multi-material*, Kobelco Technology Review, no. 38, pp. 32-37.
- [162] V. Babalo, A. Fazli, M. Soltanpour (2021) *Experimental study of the mechanical performance of the new highspeed mechanical clinching*, International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, vol. 4, pp. 218-236, DOI: 10.1016/j.ijlmm.2020.11.004.
- [163] Y. Zhang, H. Xu, R. Peng, Y. Lu, L. Zhu (2021) *The State of the Art of Finite Element Analysis in Mechanical Clinching*, Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech. DOI: 10.1007/s40684-021-00366-z.
- [164] L. Lei, X. He, T. Yu, B. Xing (2019) *Failure modes of mechanical clinching in metal sheet materials, Thin-Walled Structures*, vol. 144, 106281, DOI: 10.1016/j.tws.2019.106281.
- [165] S. Saberi, N. Enzinger, R. Vallant, H. Cerjak, J. Hinterdorfer, R. Rauch (2008) *Influence of plastic anisotropy on the mechanical behavior of clinched joint of different coated thin steel sheets*, Int J Mater Form, vol. 1, pp. 273–276, DOI: 10.1007/s12289-008-0349-9.
- [166] S. Jónás, M. Tisza, D. Felhős, P.Z. Kovács (2019) *Experimental and Numerical Study of Dissimilar Sheet Metal Clinching*, Proceedings of the 22nd International ESAFORM Conference on Material Forming, AIP Conf. Proc. 2113, 050021-1–050021-6, DOI: 10.1063/1.5112585
- [167] L. Kaščák, E. Spišák (2014) *Clinching of combination of high-strength steel sheets and aluminium sheets*, Transfer inovácií, vol. 30, pp. 215-2018.
- [168] S. Wiesenmayer, M. Graser, M. Merklein (2020) *Influence of the properties of the joining partners on the load-bearing capacity of shear-clinched joints*, Journal of Materials Processing Tech, vol. 283, 116696, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116696.
- [169] Y. Song, L. Yang, G. Zhu, L. Hua, R. Liu (2019) *Numerical and experimental study on failure behavior of steel-aluminium mechanical clinched joints under multiple test conditions*, International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, vol. 2, no 1, pp. 72-79, DOI: 10.1016/j.ijlmm.2018.12.005.
- [170] J. Kalich, U. Füssel (2021) *Influence of the Production Process on the Binding Mechanism of Clinched Aluminum Steel Mixed Compounds*. J. Manuf. Mater. Process, vol. 5, no. 105, DOI: 10.3390/jmmp5040105.

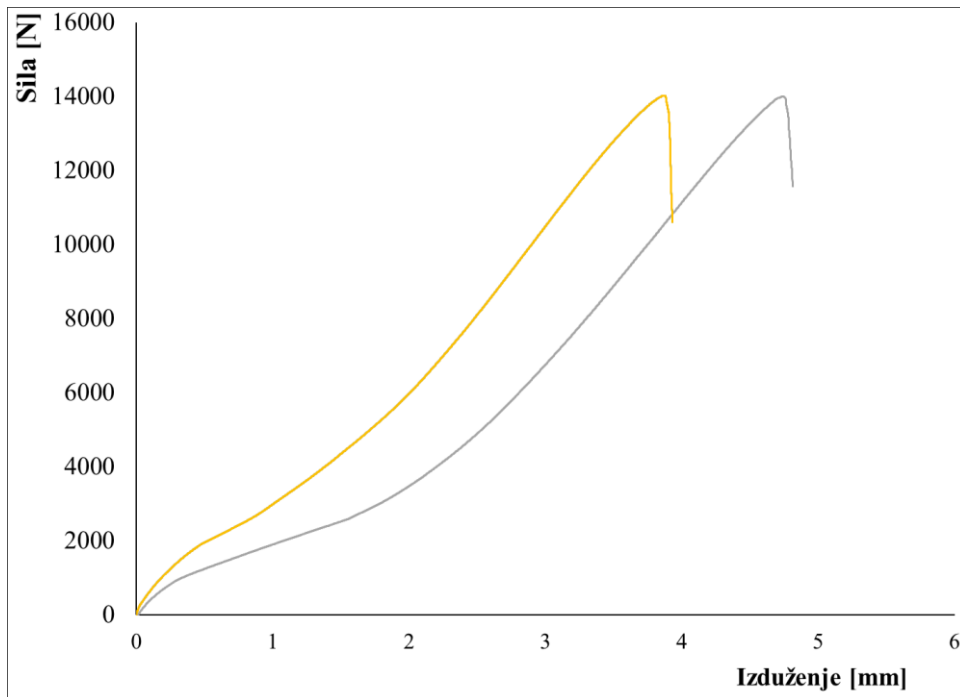
- [171] C.-J. Lee, J.-Y. Kim, S.-K. Lee, D.-C. Ko, B.-M. Kim (2010) *Parametric study on mechanical clinching process for joining aluminum alloy and high-strength steel sheets*, Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 24, pp.123-126, DOI: 10.1007/s12206-009-1118-5.
- [172] M. B. Tenorio, S. F. Lajarin, M. L. Gipiela, P. V. P. Marcondes (2019) *The influence of tool geometry and process parameters on joined sheets by clinching*, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, vol. 41, no. 67, DOI: 10.1007/s40430-018-1539-0.
- [173] Y. Abe, K.-I. Mori (2020) *Mechanical Clinching Process with Preforming of Lower Sheet for Joining Aluminium and Ultra-High Strength Steel Sheets*, Quarterly journal of the Japan welding society, vol. 38, no. 2, pp. 89-92, DOI: 10.2207/qjwsw.38.89s.
- [174] Y. Abe, T. Maeda, D. Yoshioka, K.-I. Mori (2020) *Mechanical Clinching and Self-Pierce Riveting of Thin Three Sheets of 5000 Series Aluminium Alloy and 980 MPa Grade Cold Rolled Ultra-High Strength Steel*, Materials, vol. 13, 4741, DOI:10.3390/ma13214741.
- [175] G. Shen, C.J. Lee, J.-M. Lee, G.S. Kang i dr. (2016) *Prediction of Failure Mode in Hole Clinching of Al Alloy and Advanced High-Strength Steel*, Key Engineering Materials, vol. 716, pp. 481-486, DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.716.481.
- [176] F. Lambiase (2012) *Influence of process parameters in mechanical clinching with extensible dies*, Int J Adv Manuf Technol, vol. 66, pp. 2123–2131, DOI: 10.1007/s00170-012-4486-4.
- [177] C.-J. Lee, G. Shen, B.-M. Kim, F. Lambiase, D.-C. Ko (2018) *Analysis of Failure-Mode Dependent Joint Strength in Hole Clinching from the Aspects of Geometrical Interlocking Parameters*. Metals. Vol. 8, no.12, DOI:10.3390/met8121020.
- [178] T. Jiang, Z.-X. Liu, P.-C. Wang (2015) *Effect of aluminum pre-straining on strength of clinched galvanized SAE1004 steel-to-AA6111-T4 aluminum*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 2015, pp. 193-204, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.08.016.
- [179] Y. Abe, T. Saito, K.-I. Mori, T. Kato (2018) *Mechanical clinching with dies for control of metal flow of ultra-high-strength steel and high-strength steel sheets*, Proc IMechE Part B:J Engineering Manufacture, vol. 232, no. 4, pp. 1–6, DOI: 10.1177/0954405416683429.
- [180] T. Balawender (2016) *Low Fatigue Strength of Clinch Joints*, Journal of Mechanics Engineering and Automation, vol. 6, pp. 277-281, DOI: 10.17265/2159-5275/2016.06.002.
- [181] Y. Zhang, X. He, Y. Wang, Y. Lu, F. Gu, A. Ball (2018) *Study on failure mechanism of mechanical clinching in aluminium sheet materials*, Int J Adv Manuf Technol, vol. 96, pp. 3057–3068, DOI:10.1007/s00170-018-1734-2.

- [182] Z.-M. Su, P.-C. Lin, W.-J. Lai, J. Pan (2015) *Fatigue analyses of self-piercing rivets and clinch joints in lap-shear specimens of aluminum sheets*, International Journal of Fatigue, vol. 72, pp. 53-65, DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.09.022.
- [183] F. Moroni (2018) *Fatigue behaviour of hybrid clinch-bonded and self-piercing rivet bonded joints*, The Journal of Adhesion vol 95, no. 5-7: Joint Design, pp. 577-594, DOI: 10.1080/00218464.2018.1552586.
- [184] A. Barimani-Varandi, A. J. Aghchai (2020) Electrically-assisted mechanical clinching of AA6061-T6 aluminum to galvanized DP590 steel: effect of geometrical features on material flow and mechanical strength, *Mechanics & Industry*, vol. 21, 529, DOI: 10.1051/meca/2020072.
- [185] R. Hörhold, M. Müller, M. Merklein, G. Meschut (2016) Mechanical properties of an innovative shear-clinching technology for ultra-high-strength steel and aluminium in lightweight car body structures, *Welding in the World*, vol. 60, no. 3, pp. 613-620, DOI: 10.1007/s40194-016-0313-0.
- [186] R. Suzuki, C. Ryo (2018) *Dissimilar metals Joining Process using GMAW has High strength and One side access characteristic, and the Automation robot system*, 71ST IIW Annual Assembly 2018, Commission XII "Arc Welding Processes and Production Systems" Bali Nusa Dua Convention Center, Bali, Indonesia.
- [187] M. M. Eshtayeh, M. Hrairi, A. K. M. Mohiuddin (2015) Clinching process for joining dissimilar materials: state of the art, *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 82, pp. 179–195, DOI: 10.1007/s00170-015-7363-0.
- [188] J. H. Kim, L. S. Wang, K. Putta, P. Haghighi, J. J. Shah, P. Edwards (2019) *Knowledge based design advisory system for multi-material joining*, *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 52, B, pp. 253-263, DOI:10.1016/j.jmsy.2019.03.003.
- [189] M. Kaiser, M. P. Siva, C. Yongjin, J. Changwook, N. Daegun, P. Yeong-Do (2021) *Geometrical degradation of electrode and liquid metal embrittlement cracking in resistance spot welding*, *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 61, pp. 334-348, DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.11.025.
- [190] X.Q. Zhang, G.L. Chen, Y.S. Zhang (2008) *Characteristics of electrode wear in resistance spot welding dual-phase steels*, *Materials & Design*, vol. 29, no. 1, pp. 279-283, DOI: 10.1016/j.matdes.2006.10.025.
- [191] B. Christoph, M. Gerson, B. Max, F. Julian, R. Michael (2020) *Prevention of liquid metal embrittlement cracks in resistance spot welds by adaption of electrode geometry*, *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 25, no. 4, pp. 303-310, DOI: 10.1080/13621718.2019.1693731.
- [192] ARNOLD UMFORMTECHNIK GmbH & Co. KG (<https://www.arnold-fastening.com/en/products/resistance-element-welding/flexweld>, pristupljeno 20.10.2021, godine).

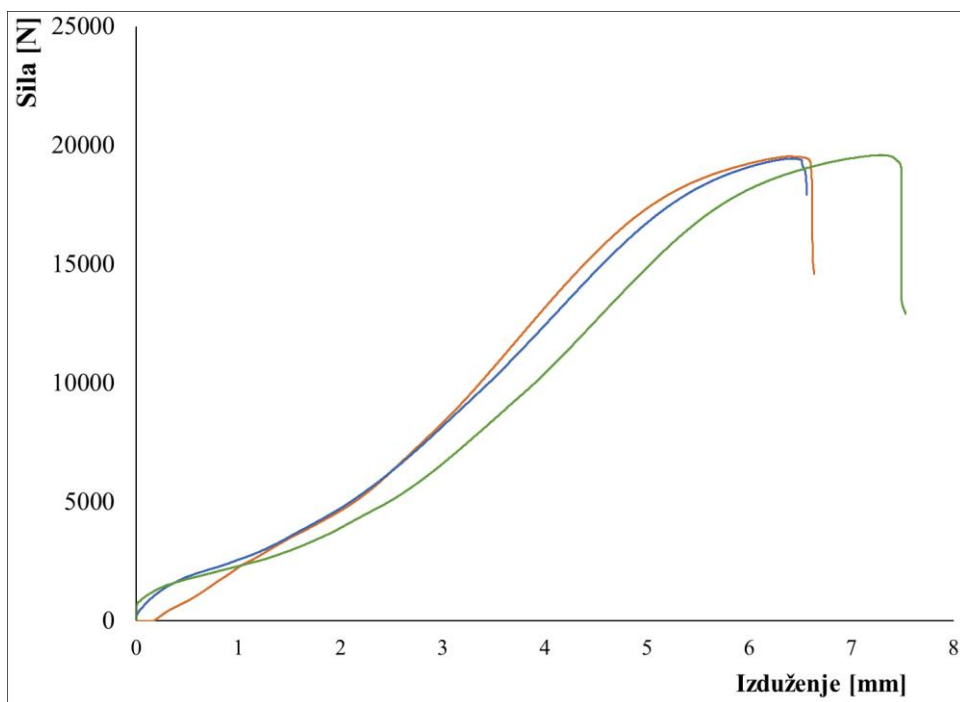
- [193] BAS EN ISO 14273:2017 - Elektrootporno zavarivanje - Ispitivanje sa razaranjem zavarenih spojeva - Dimenzije uzorka i procedura ispitivanja na smicanje elektrootpornih tačkastih, šavnih zavarenih spojeva.
- [194] A. Đurić, D. Milčić, Z. Burzić, D. Klobčar, M. Milčić, B. Marković, V. Krstić (2022) *Microstructure and Fatigue Properties of Resistance Element Welded Joints of DP500 Steel and AW 5754 H22 Aluminum Alloy*, Crystals, Vol. 12, 258. DOI: 10.3390/cryst12020258.
- [195] A. Đurić, D. Milčić, D. Klobčar (2020) *Joining Lightweight Components by Resistance Element Welding – REW*, Proceedings of The Fifth International Conference – MASING 2020, ISBN 978-86-6055-139-1, pp. 191-194.
- [196] A. Đurić, B. Marković (2018) *Failure mode and strength analyses of resistance spot weld joints of aluminium and austenitic stainless steel sheet*, Applied Engineering Letters, Vol.3, No.1, pp. 6-12, DOI: 10.18485/aeletters.2018.3.1.2.
- [197] BAS EN ISO 14271:2018 - Elektrootporno zavarivanje - Ispitivanje tvrdoće po Vickersu (nisko opterećenje i mikrotvrdoća) elektrootporno tačkasto, šavno i bradavičasto zavarenih spojeva.
- [198] V. O. Pejić (2016) *Modelovanje i optimizacija procesa glodanja vretenastim glodalima*, Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, Novi Sad.
- [199] F. A. Ghazalia, M. N. Berhanb, H. Y. Manurungb, Z. Sallehb and S. Abdullahc (2015) *Tri-Objective Optimization of Carbon Steel Spot-Welded Joints*, Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering), 76711, pp. 69–73, DOI: 10.11113/jt.v76.5916.
- [200] A. Djuric, D. Milčić, D. Klobčar, B. Marković (2021) *Multi-objective optimization of the resistance spot-welding process parameters for the welding of dual-phase steel DP500*, Materials and Technology, Vol. 55, No. 2, pp. 201-206, DOI: 0.17222/mit.2020.095.
- [201] F. Chen, Y. Wang, S. Sun, Z. Ma, X. Huang (2019) *Multi-objective optimization of mechanical quality and stability during micro resistance spot welding*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 101, no. 5-8, pp. 1903-1913, DOI: 10.1007/s00170-018-3055-x.
- [202] A. Đurić, D. Milčić, B. Marković, D. Klobčar, M. Milčić, D. Mitić (2021) *Resistance spot welding of steel sheet DP500 – influence of the welding current on the microhardness and weld nugget diameter*, 11. International scientific-professional conference SBW 2021 „Engineering technologies in manufacturing of welded constructions and products, SBW 2021“, pp. 27-30.
- [203] A. Ramazani, K. Mukherjee, A. Abdurakhmanov, M. Abbasi, U. Prahll (2015) *Characterization of Microstructure and Mechanical Properties of Resistance Spot Welded DP600 Steel*, Metals, vol. 5, pp. 1704-1716, DOI: 10.3390/met5031704.

- [204] M. Naderi, M. Abbasi, A.S. Akbari (2013) *Enhanced mechanical properties of a hot-stamped advanced high-strength steel via tempering treatment*, Metall. Mater. Trans. A, vol. 44, pp. 1852–1861, DOI: 10.1007/s11661-012-1546-1.
- [205] D. Lukić, M. Milošević, S. Borojević, J. Vukman, M. Đurđev (2014) *Application of multi-criteria decision making for manufacturing process evaluation and selection*, Journal of Production Engineering, vol. 17, no. 2, pp. 83-86.

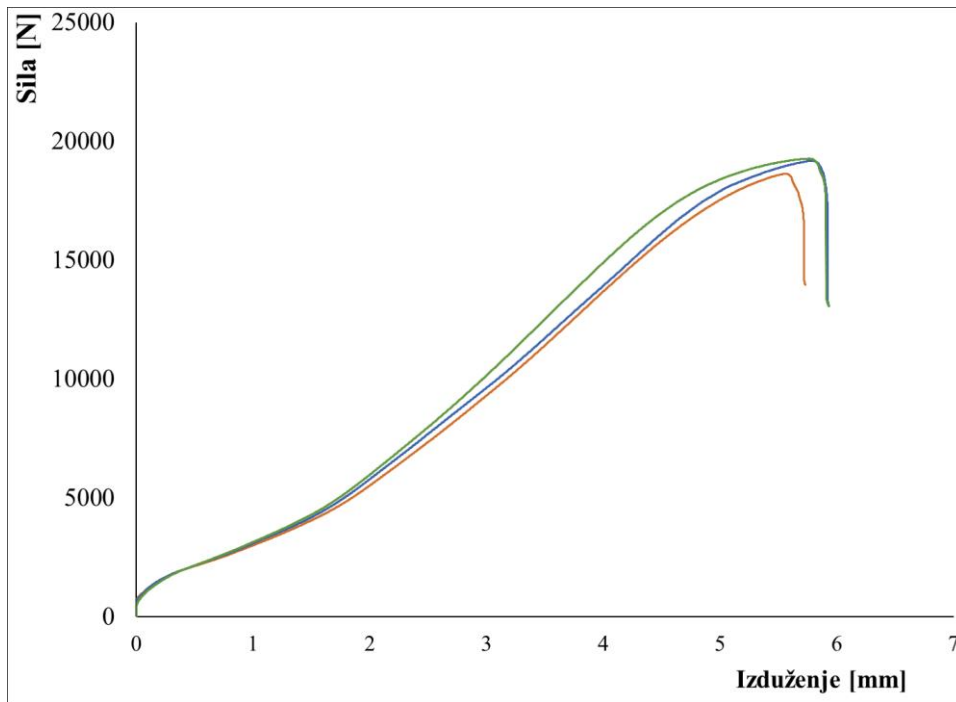
PRILOG 1



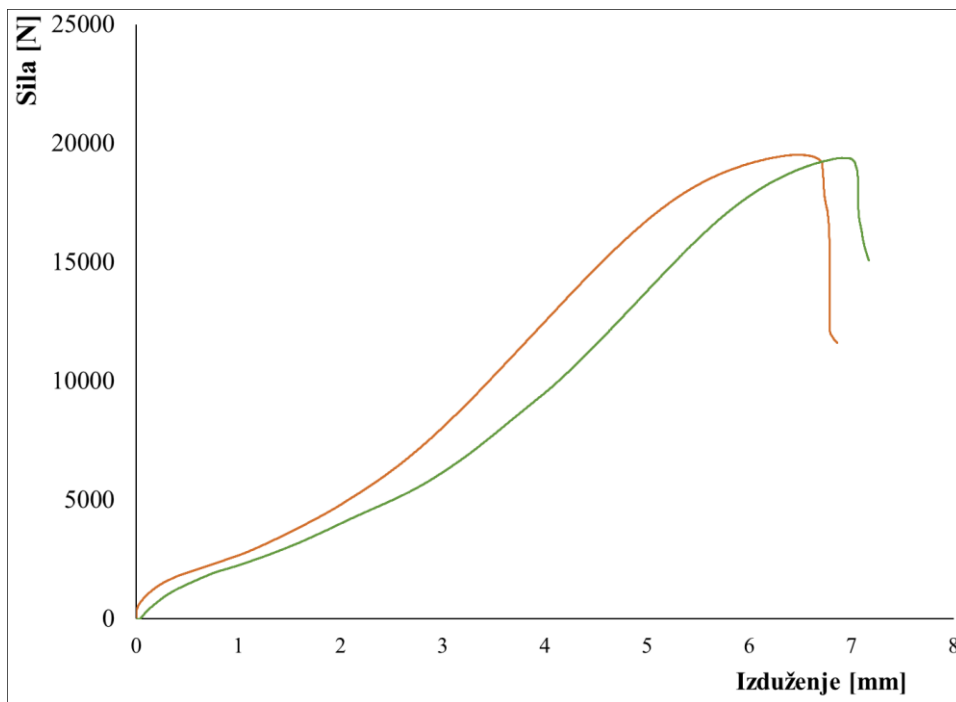
Slika P.1.1: Dijagram sila-izduženje za uzorak označen sa DP1



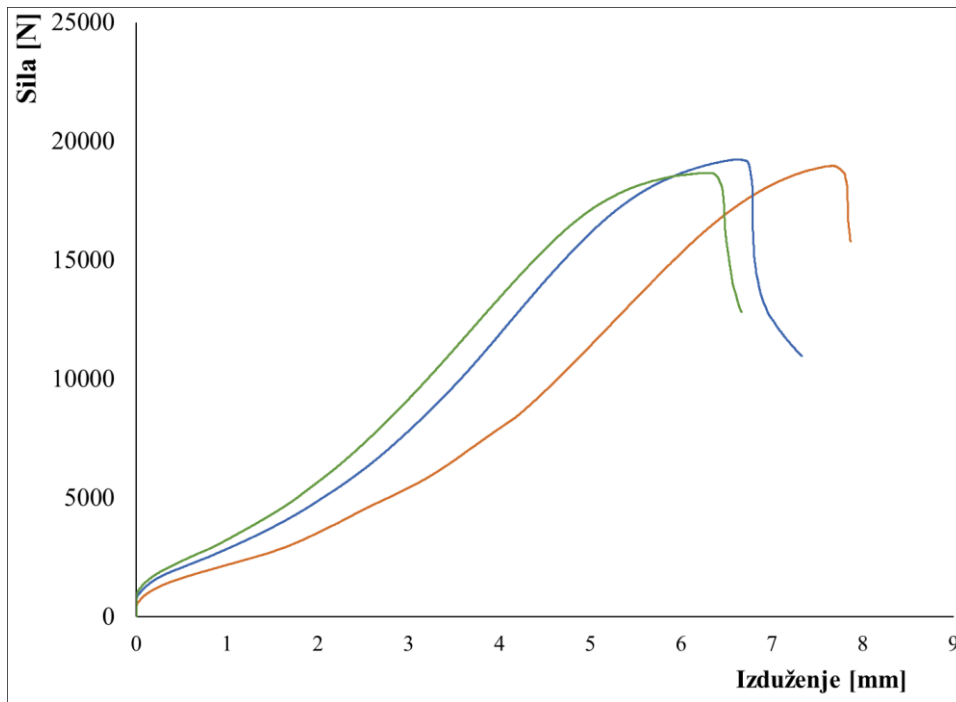
Slika P.1.2: Dijagram sila-izduženje za uzorak označen sa DP2



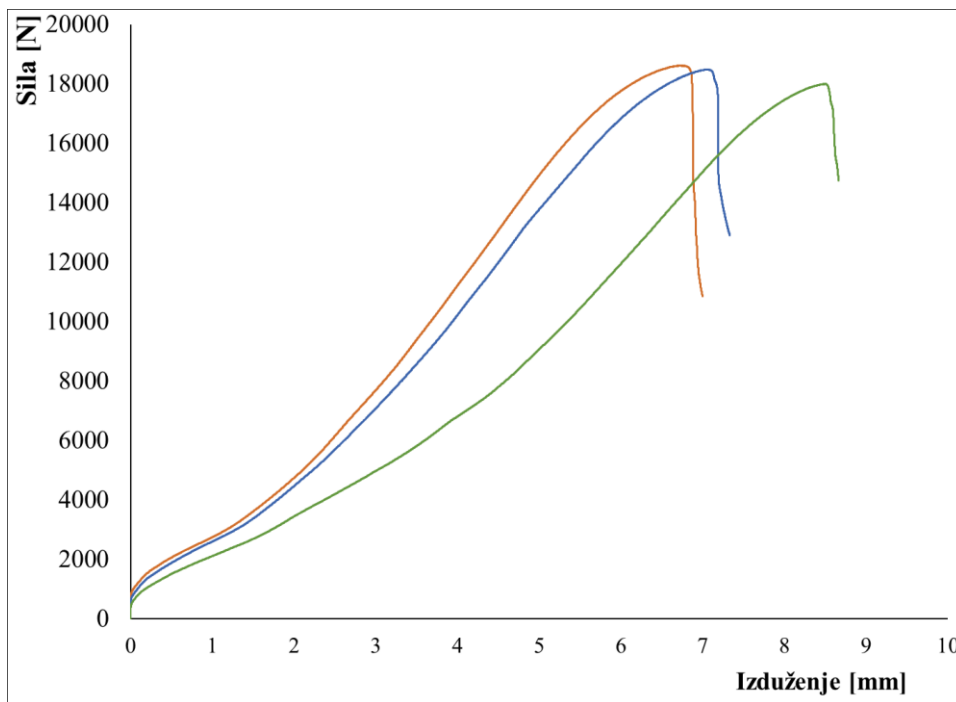
Slika P.1.3: Dijagram sila-izduženje za uzorak označen sa DP3



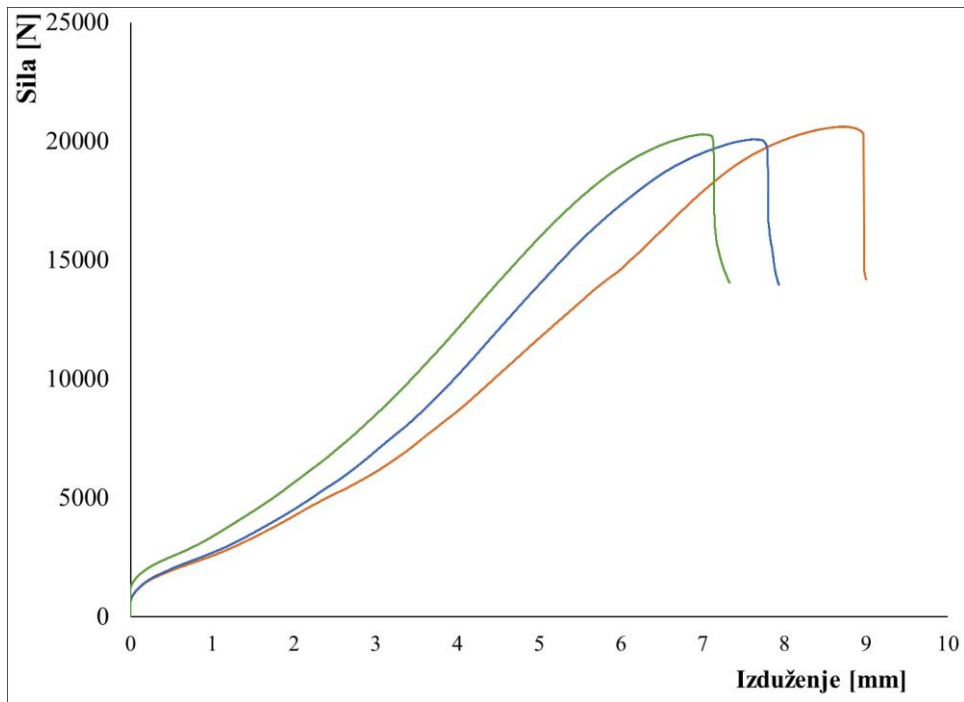
Slika P.1.4: Dijagram sila-izduženje za uzorak označen sa DP4



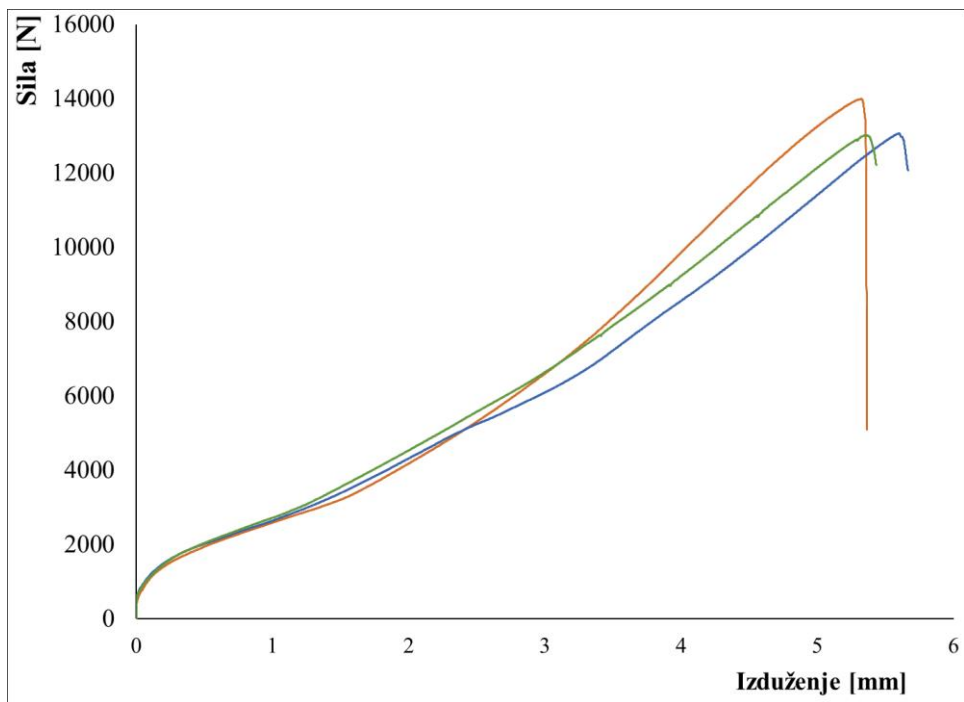
Slika P.1.5: Dijagram sila-izduženje za uzorak označen sa DP5



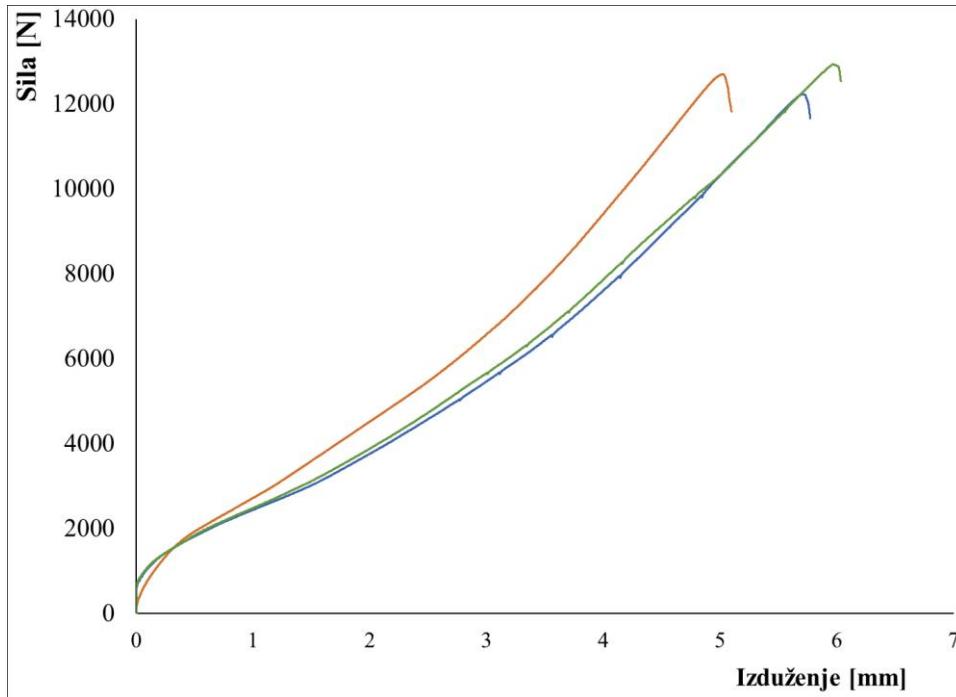
Slika P.1.6: Dijagram sila-izduženje za uzorak označen sa DP6



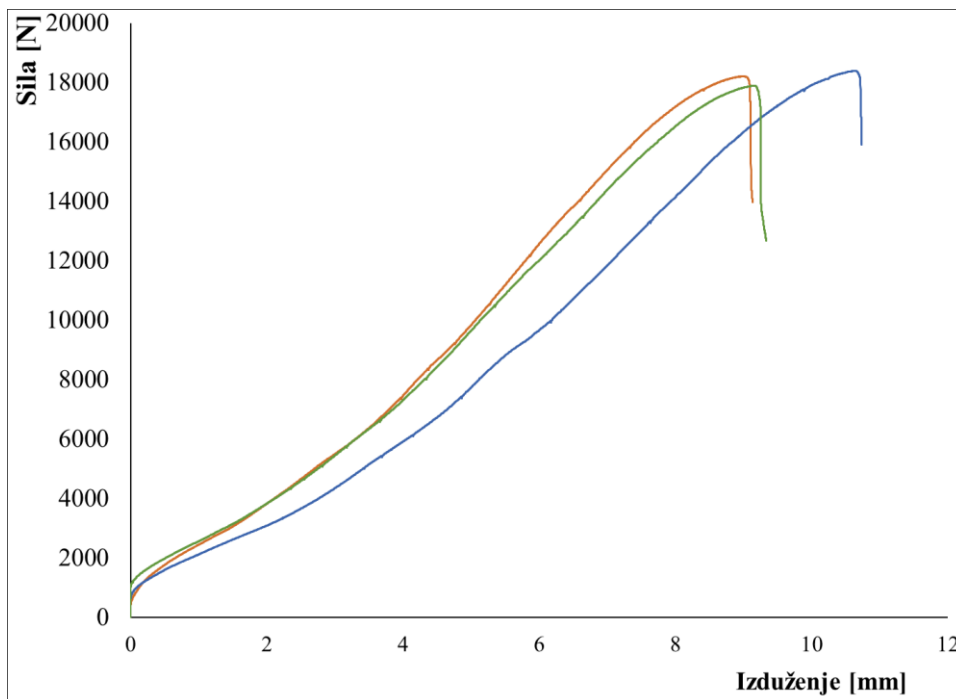
Slika P.1.7: Dijagram sila-izduženje za uzorak označen sa DP7



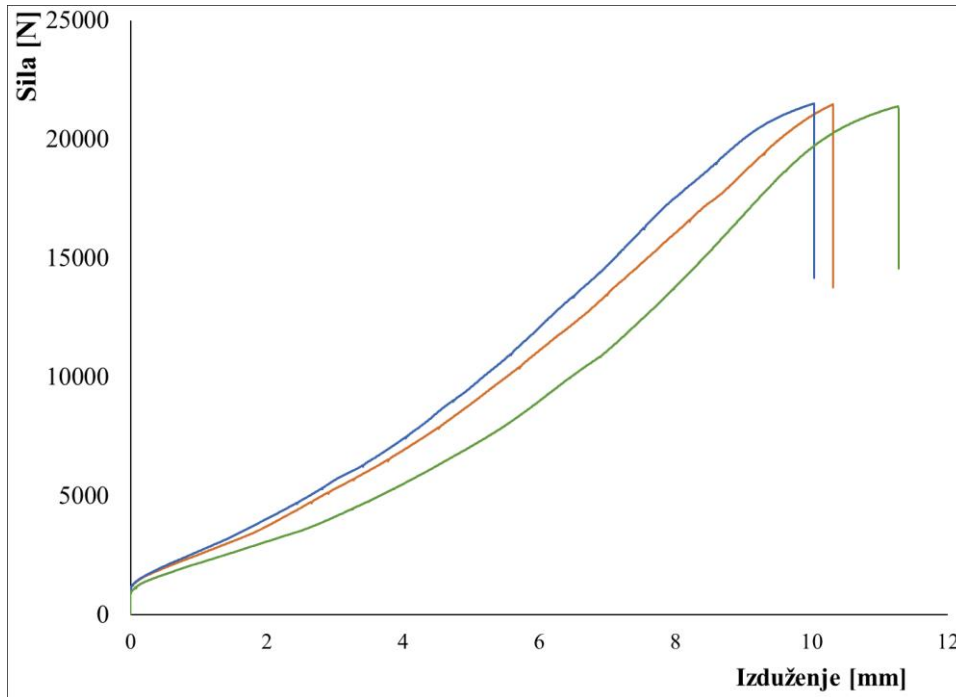
Slika P.1.8: Dijagram sila-izduženje za uzorak označen sa DP8



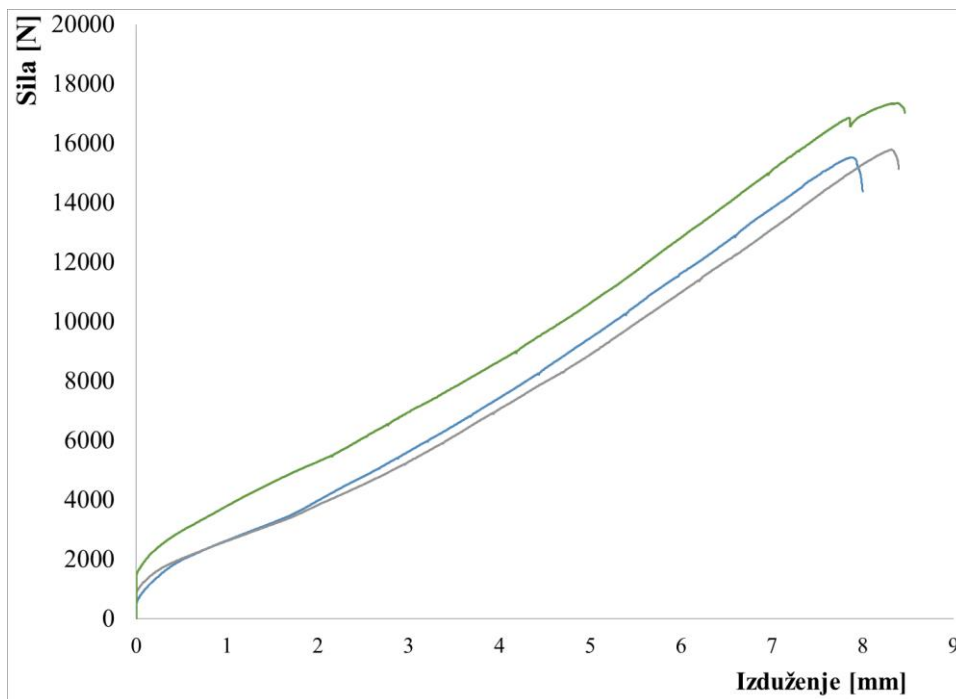
Slika P.1.9: Dijagram sila-izduženje za uzorak označen sa DP9



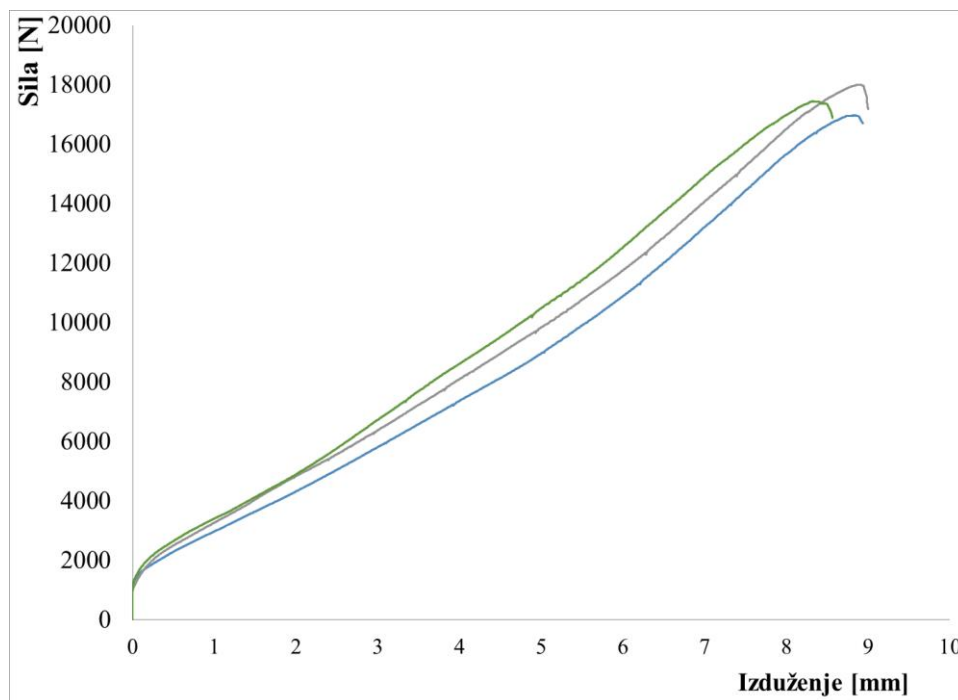
Slika P.1.10: Dijagram sila-izduženje za uzorak označen sa DP10



Slika P.1.11: Dijagram sila-izduženje za uzorak označen sa DP11

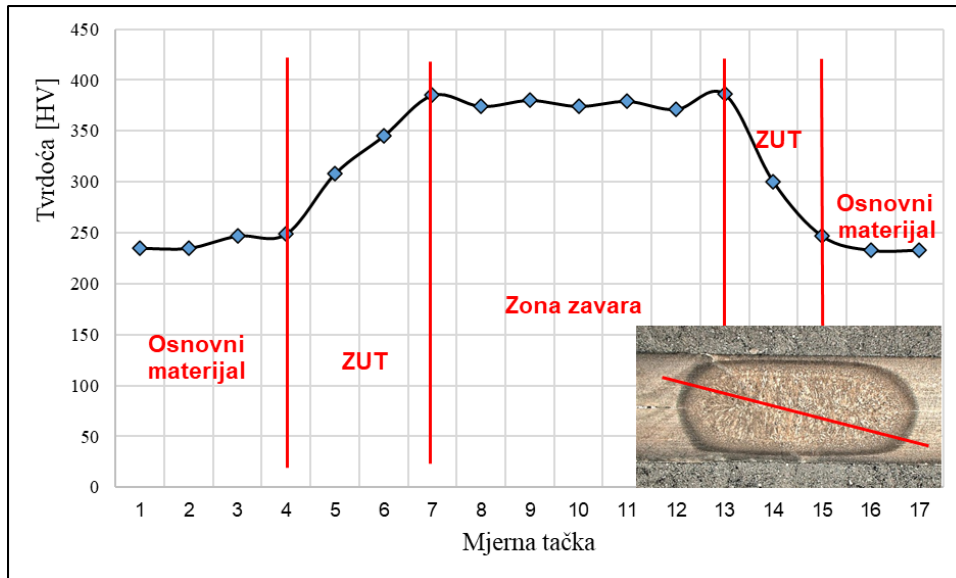


Slika P.1.12: Dijagram sila-izduženje za uzorak označen sa DP12

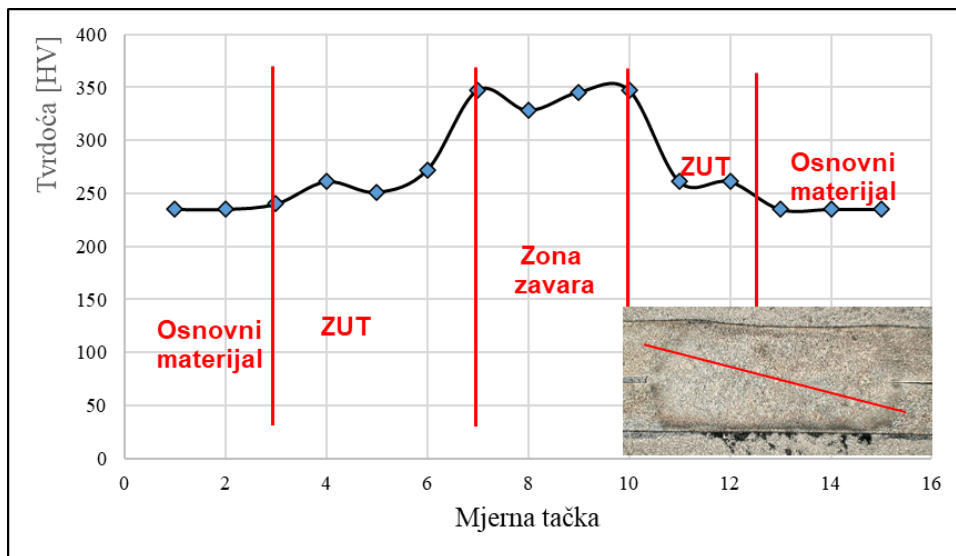


Slika P.1.13: Dijagram sila-izduženje za uzorak označen sa DP13

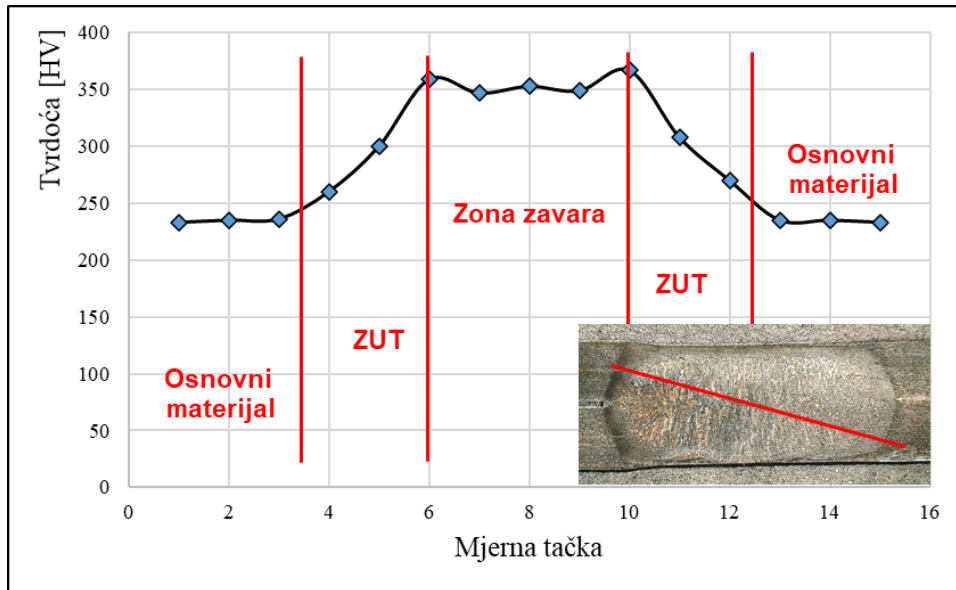
PRILOG 2



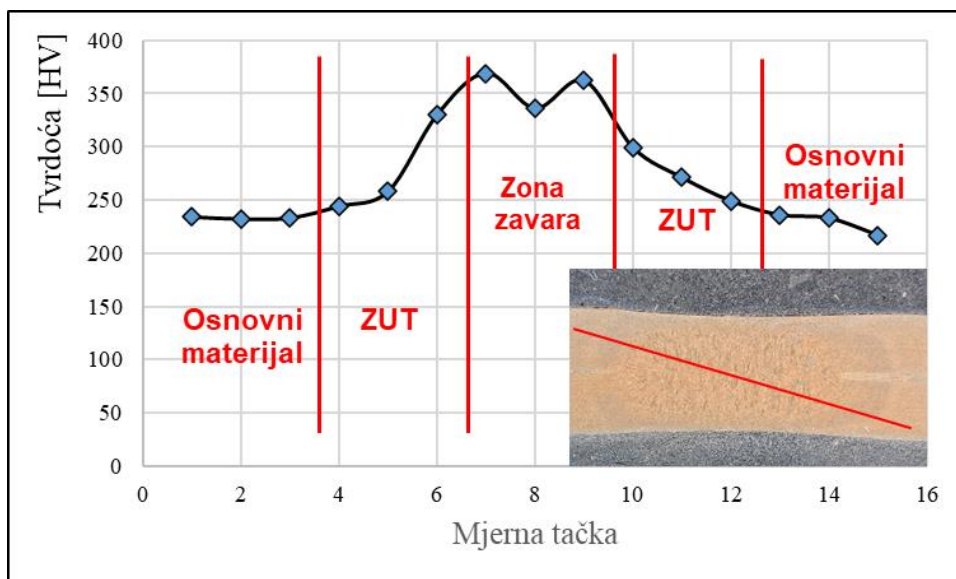
Slika P.2.1: Profil tvrdoće za uzorak označen sa DP1



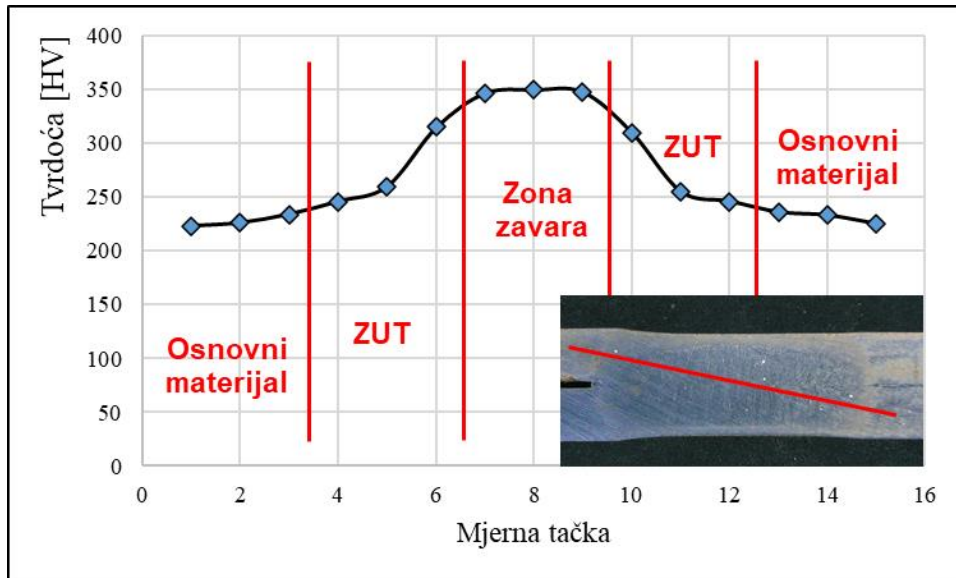
Slika P.2.2: Profil tvrdoće za uzorak označen sa DP2



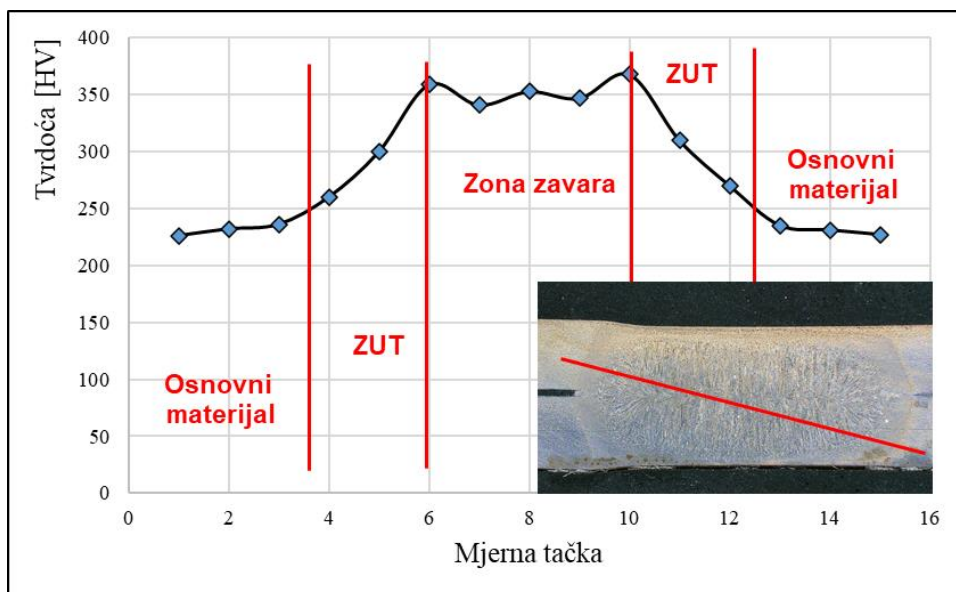
Slika P.2.3: Profil tvrdoće za uzorak označen sa DP3



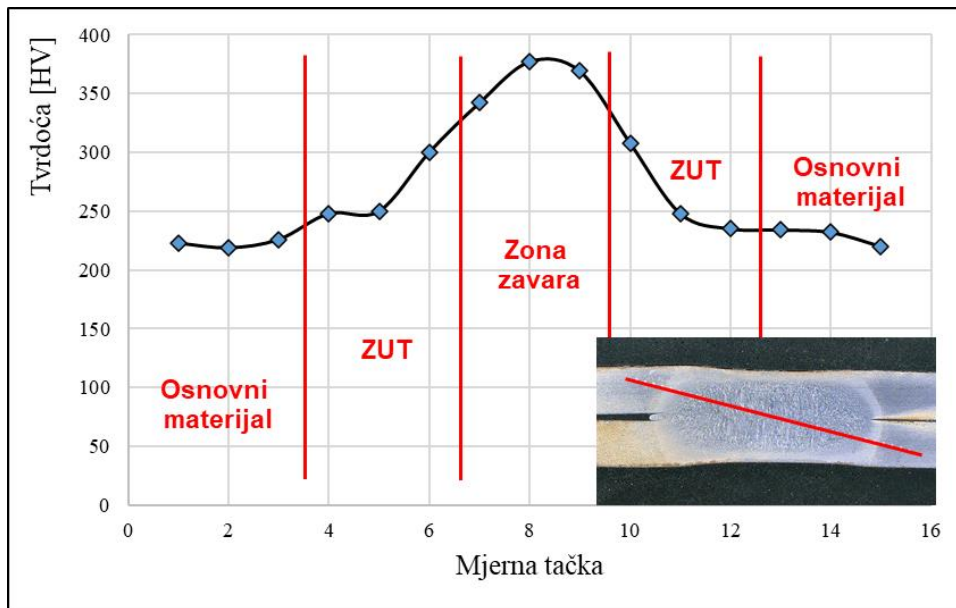
Slika P.2.4: Profil tvrdoće za uzorak označen sa DP4



Slika P.2.5: Profil tvrdoće za uzorak označen sa DP5

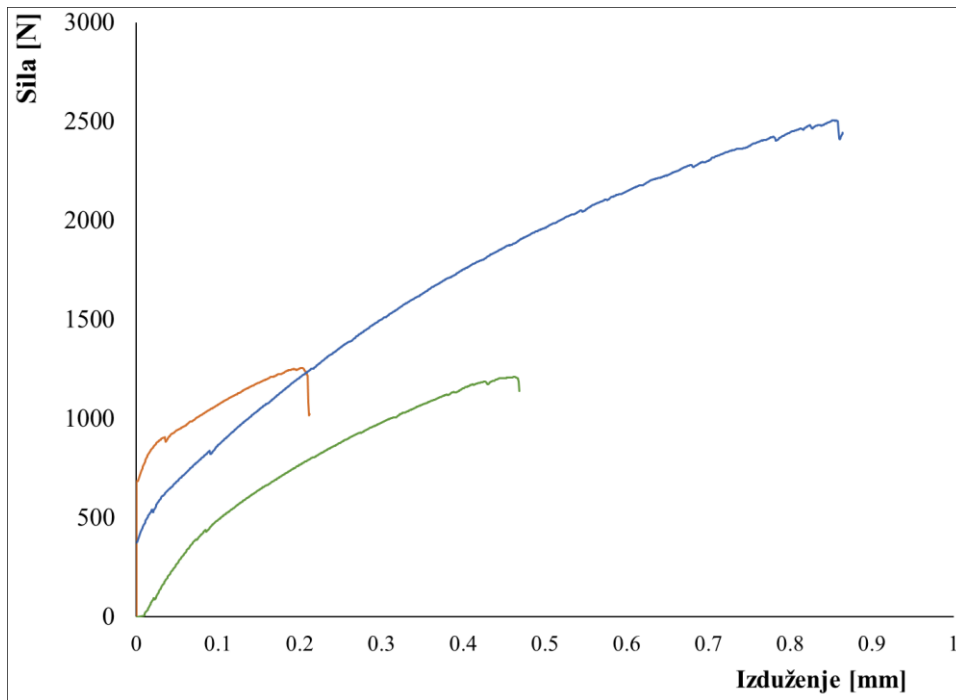


Slika P.2.6: Profil tvrdoće za uzorak označen sa DP6

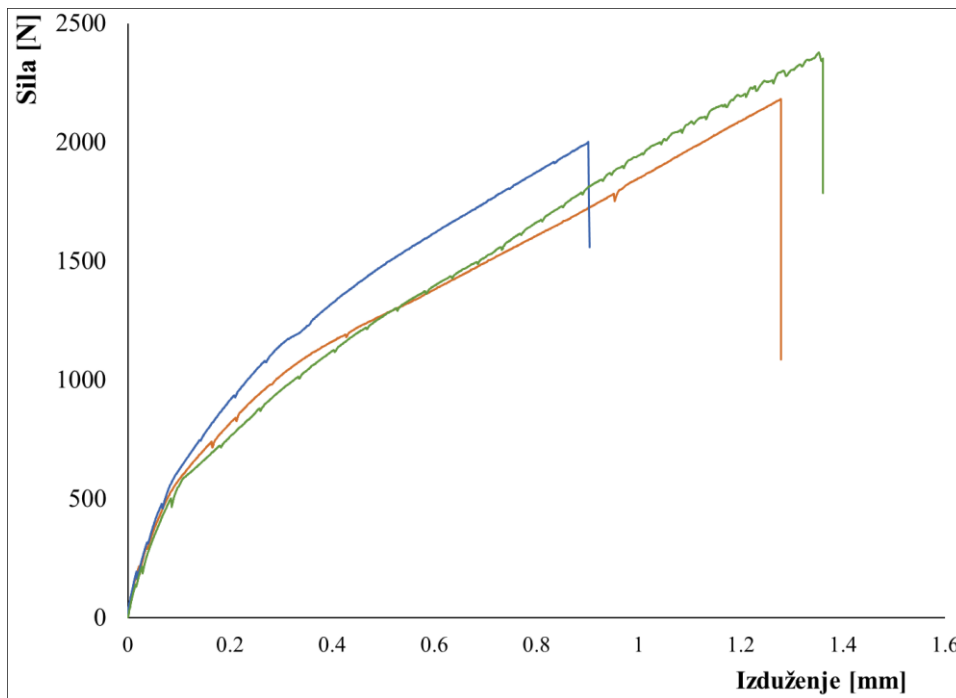


Slika P.2.7: Profil tvrdoće za uzorak označen sa DP7

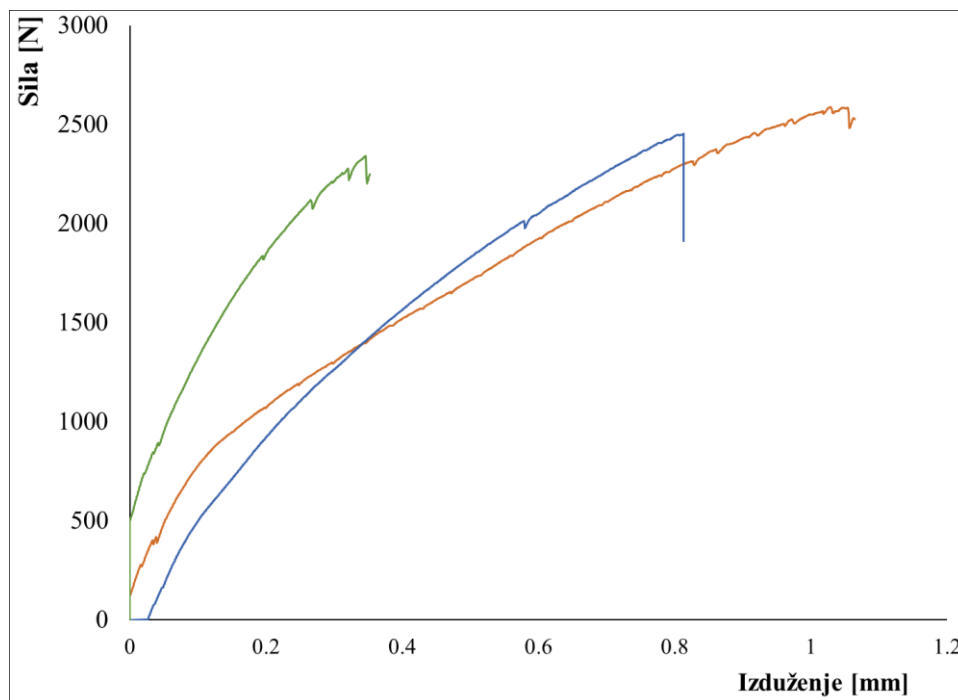
PRILOG 3



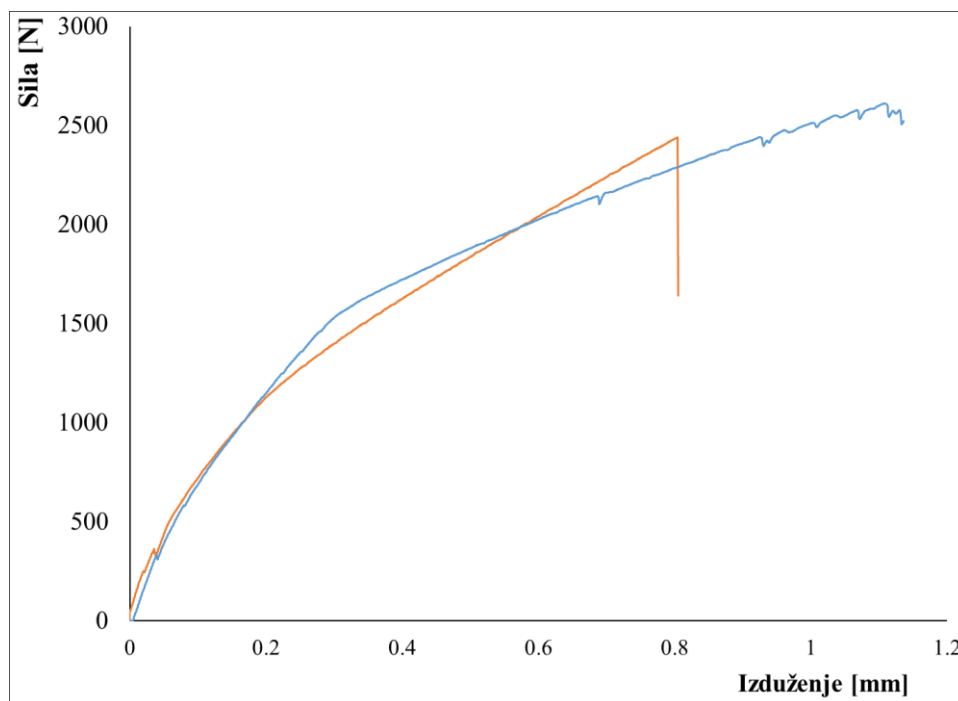
Slika P.3.1: Dijagram sila-izduženje za uzorak označen sa K1



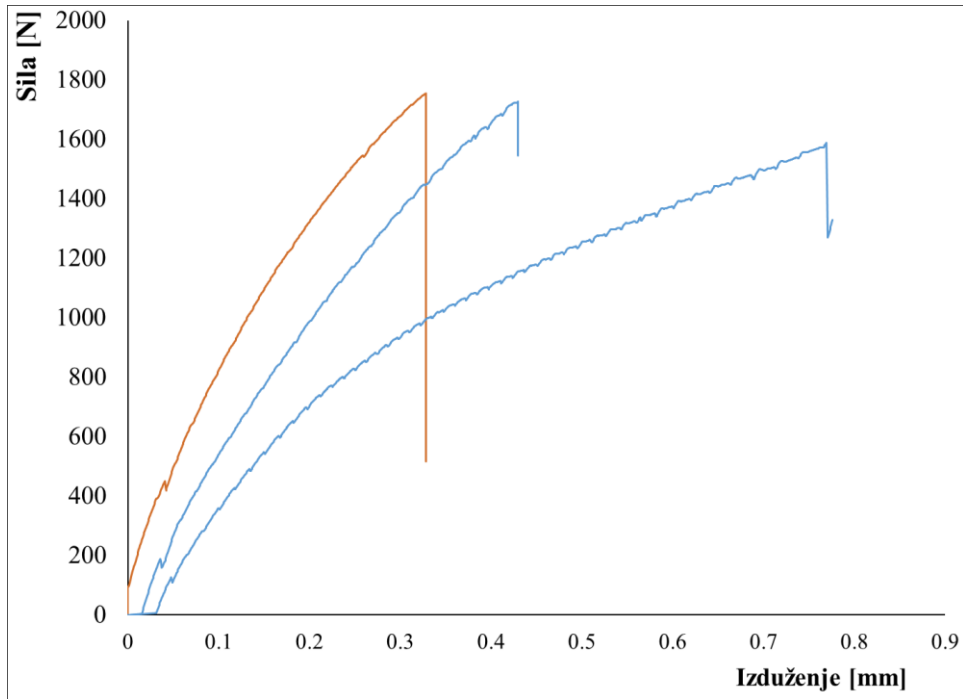
Slika P.3.2: Dijagram sila-izduženje za uzorak označen sa K2



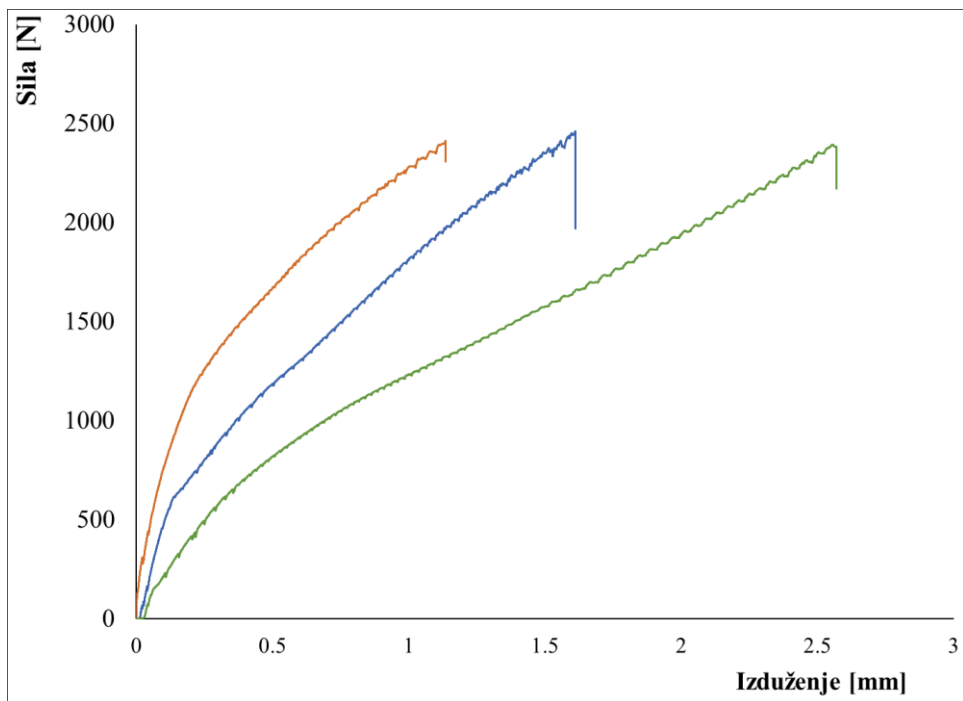
Slika P.3.3: Dijagram sila-izduženje za uzorak označen sa K3



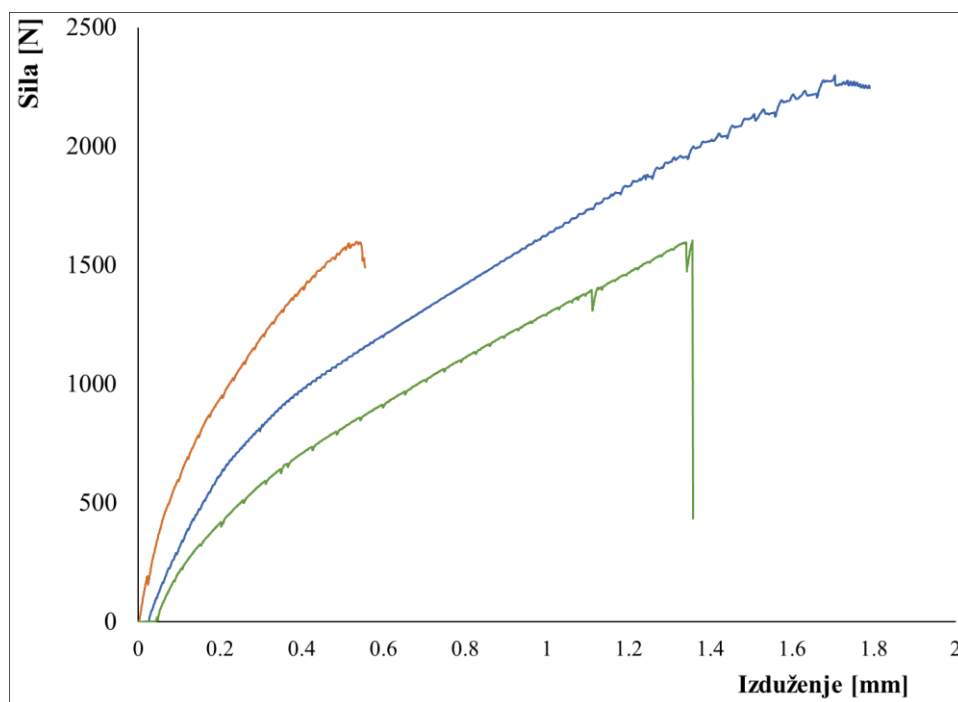
Slika P.3.4: Dijagram sila-izduženje za uzorak označen sa K4



Slika P.3.5: Dijagram sila-izduženje za uzorak označen sa K5

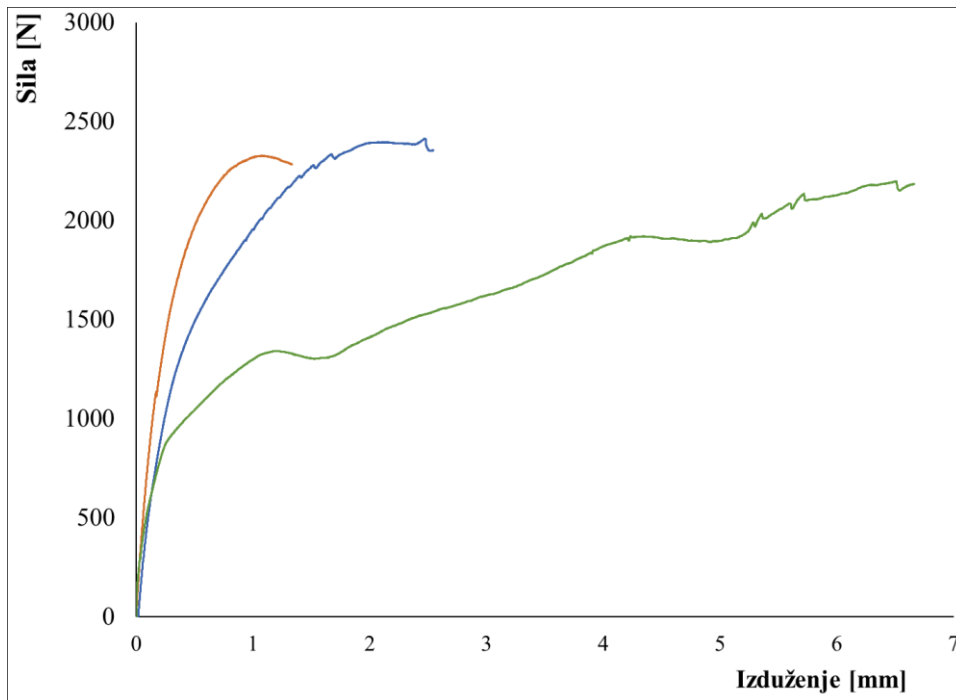


Slika P.3.6: Dijagram sila-izduženje za uzorak označen sa K6

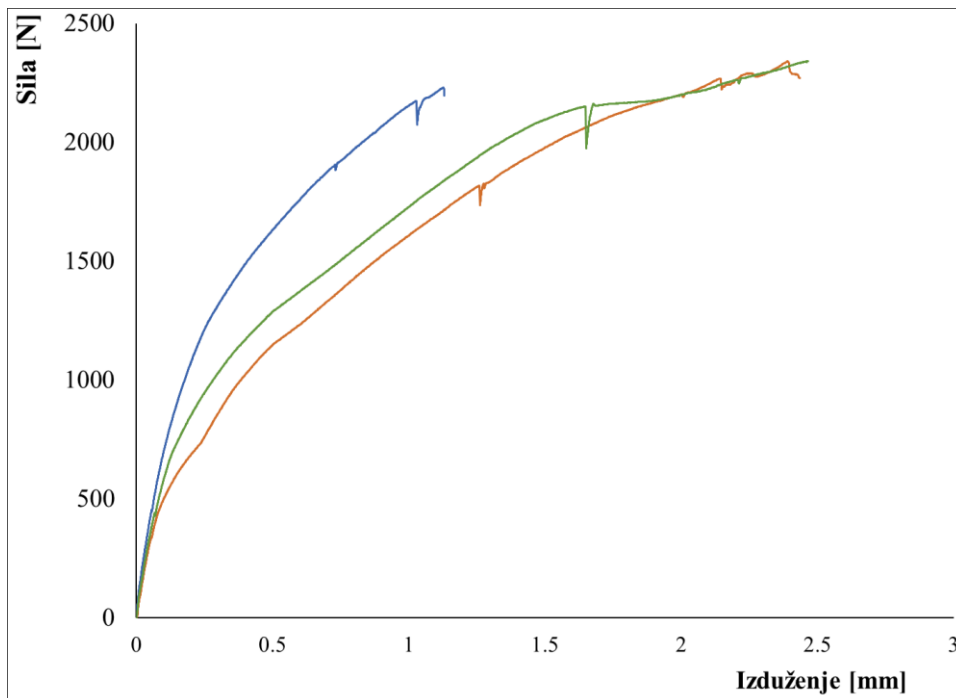


Slika P.3.7: Dijagram sila-izduženje za uzorak označen sa K7

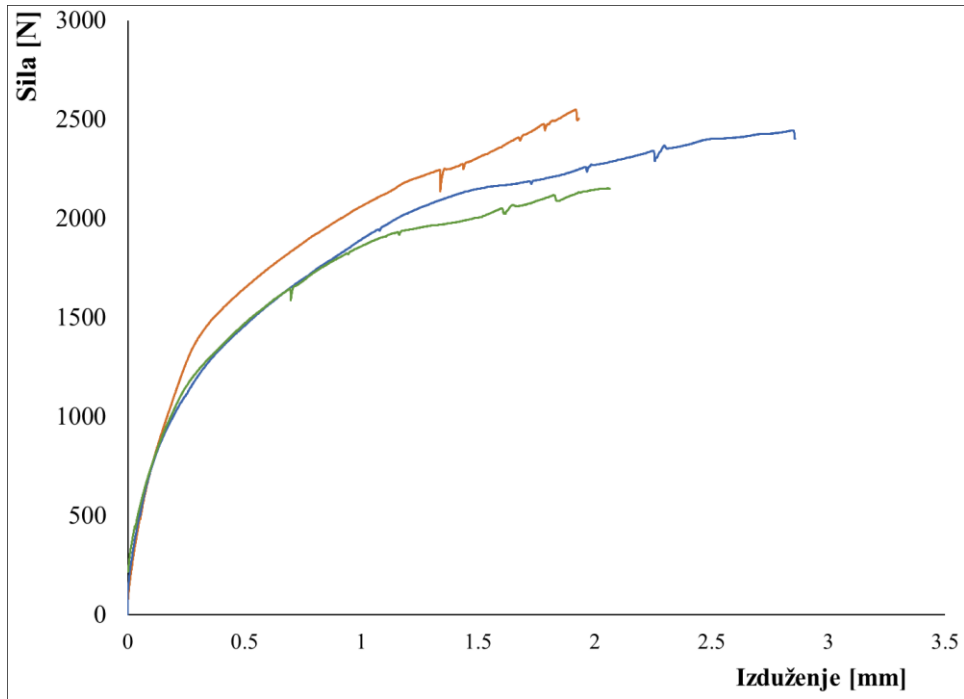
PRILOG 4



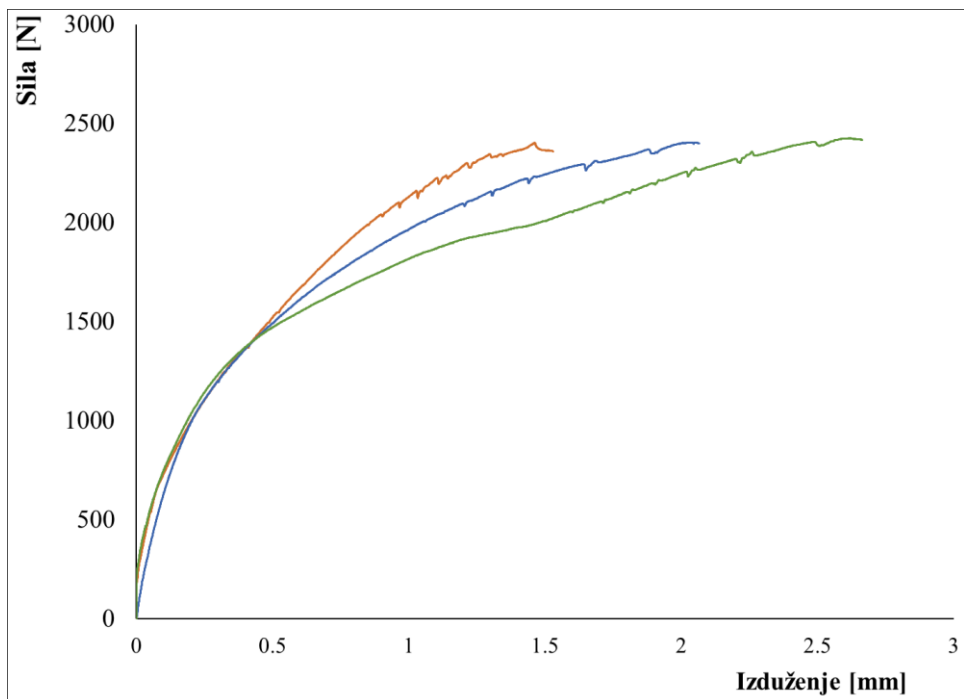
Slika P.4.1: Dijagram sila-izduženje za uzorak označen sa REW1



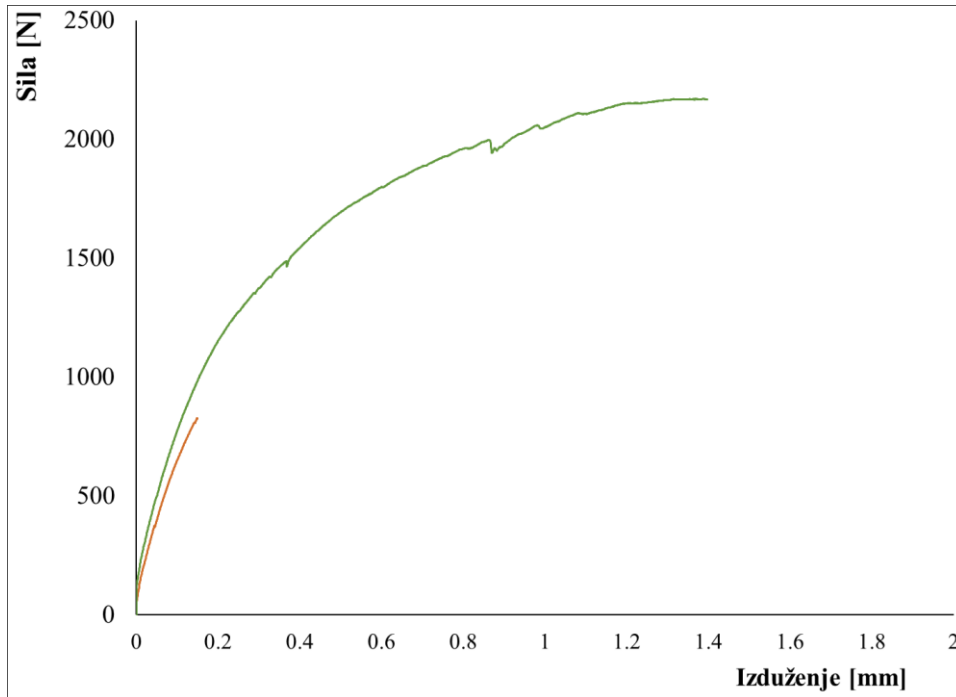
Slika P.4.2: Dijagram sila-izduženje za uzorak označen sa REW2



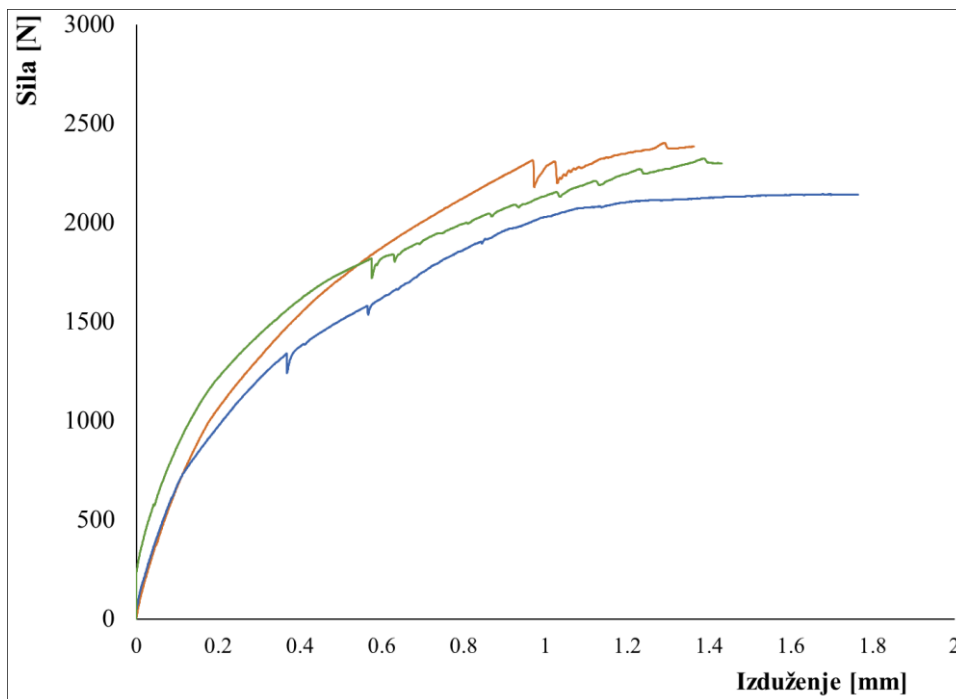
Slika P.4.3: Dijagram sila-izduženje za uzorak označen sa REW3



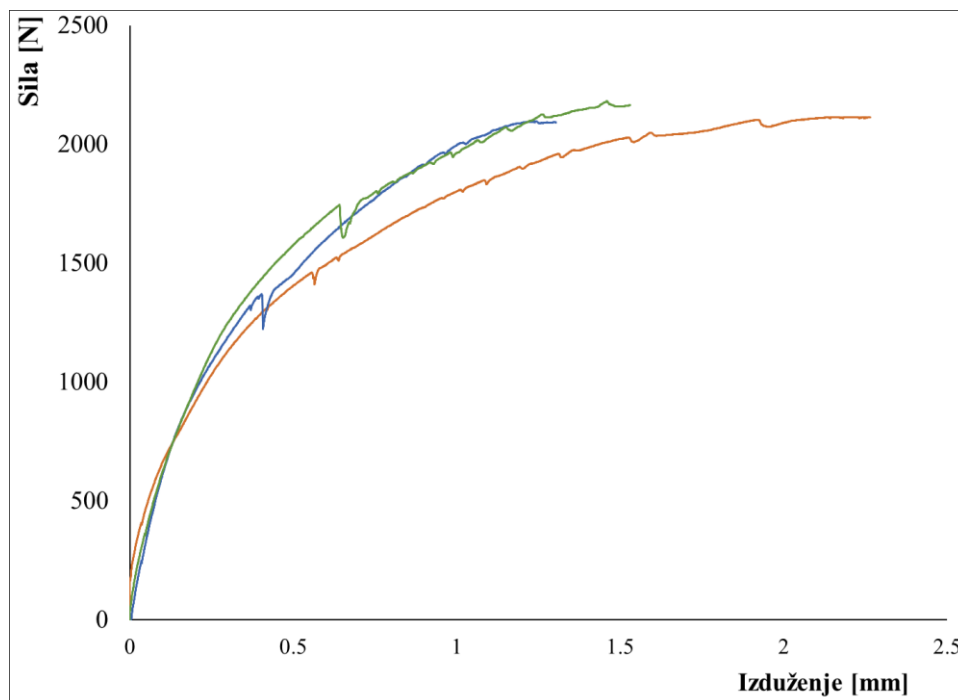
Slika P.4.4: Dijagram sila-izduženje za uzorak označen sa REW4



Slika P.4.5: Dijagram sila-izduženje za uzorak označen sa REW5

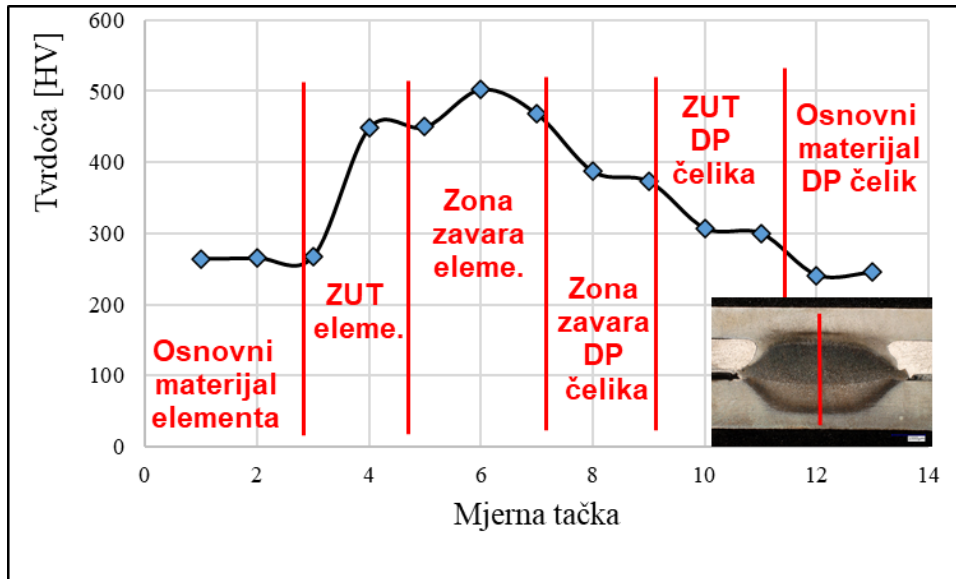


Slika P.4.6: Dijagram sila-izduženje za uzorak označen sa REW6

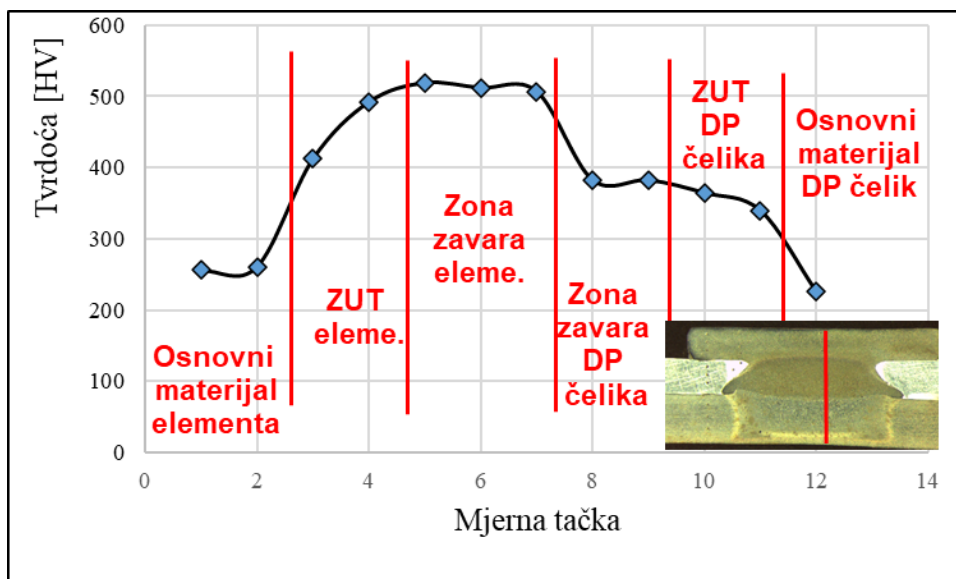


Slika P.4.7: Dijagram sila-izduženje za uzorak označen sa REW7

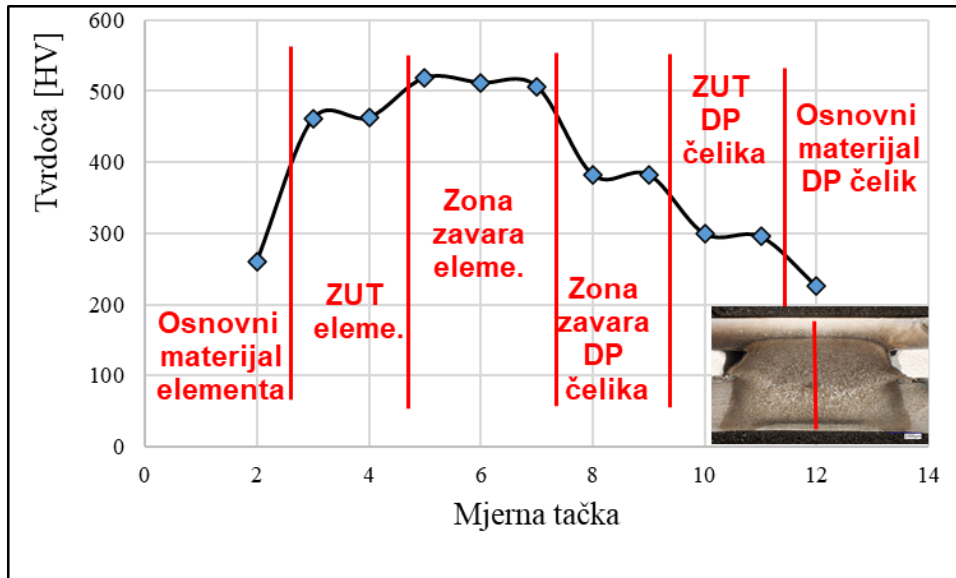
PRILOG 5



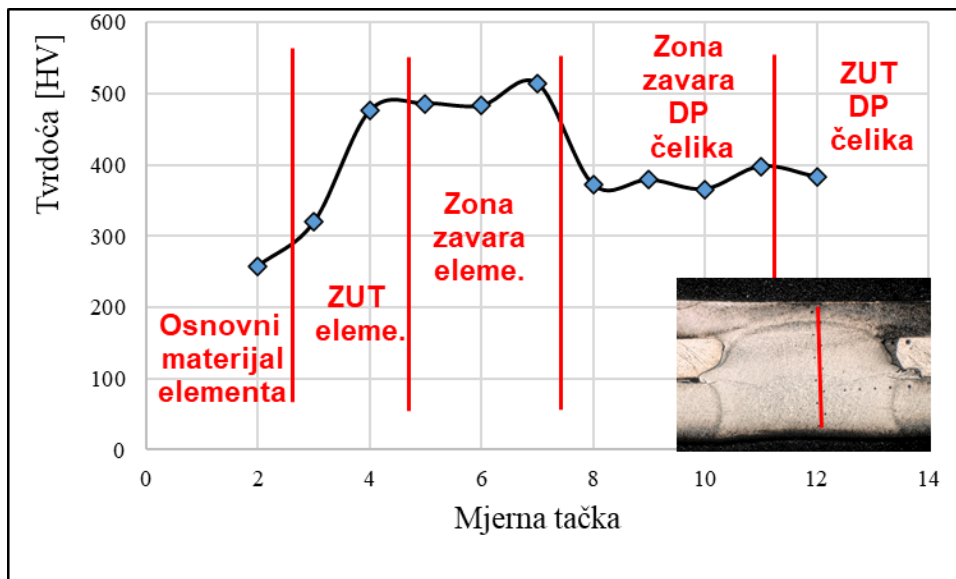
Slika P.5.1: Profil tvrdoće za uzorak označen sa REW1



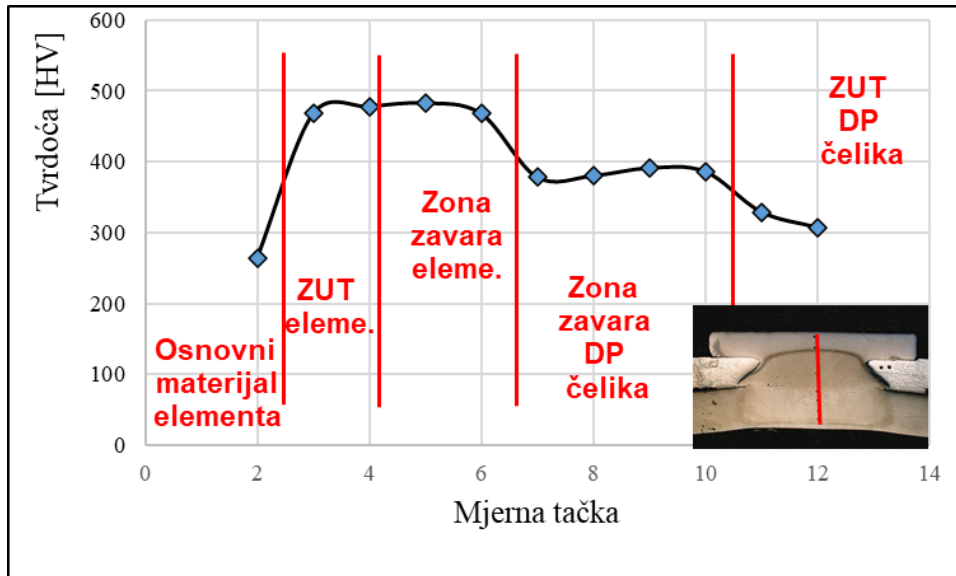
Slika P.5.2: Profil tvrdoće za uzorak označen sa REW2



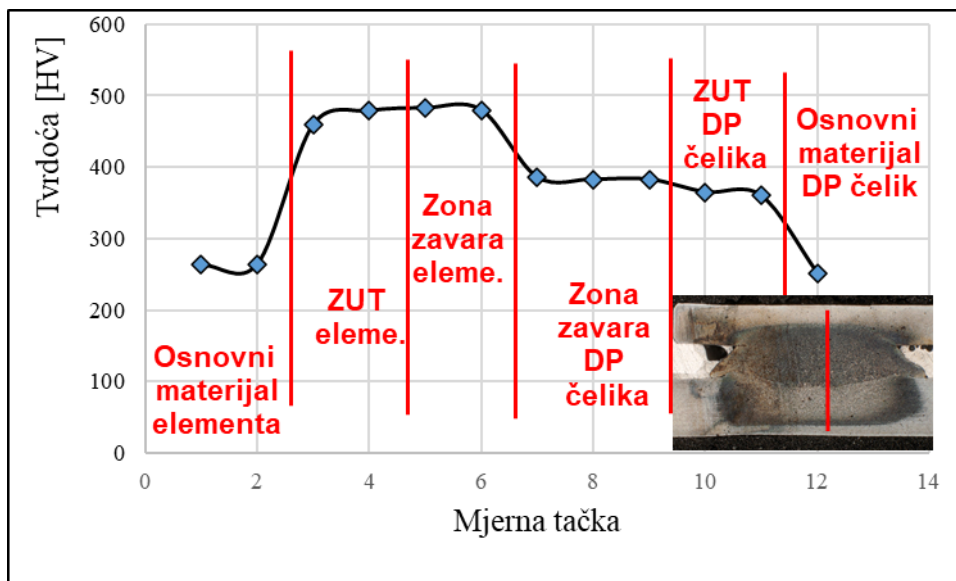
Slika P.5.3: Profil tvrdoće za uzorak označen sa REW3



Slika P.5.4: Profil tvrdoće za uzorak označen sa REW4



Slika P.5.5: Profil tvrdoće za uzorak označen sa REW6



Slika P.5.6: Profil tvrdoće za uzorak označen sa REW7

BIOGRAFIJA AUTORA



Aleksija Đurić rođen je 12.10.1990. godine u Vlasenici, RS, Bosna i Hercegovina. Osnovnu školu i gimnaziju je završio u Milićima, a kao učenik na razmjeni, pohađao je godinu dana Gimanziju Plochingen am Neckar u Njemačkoj. Osnovne akademske studije završio je na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Istočnom Sarajevu 2013. godine sa prosječnom ocjenom 9,95, kao najbolji student u istoriji fakulteta i stekao zvanje diplomirani inženjer mašinstva. Master studije, takođe na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Istočnom Sarajevu, je završio 2015. godine i stekao zvanje master mašinstva. Tema završnog master rada bila je „Doprinos razvoju lakih konstrukcija kroz istraživanje faktora lakoće materijala“. Doktorske studije na Mašinskom fakultetu u Nišu upisao je 2015. godine.

U zvanje asistenta izabran je 2014. godine, a u zvanje višeg asistenta 2016. godine, za užu naučnu oblast mašinske konstrukcije, na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Istočnom Sarajevu i u tom zvanju je i dalje. Do sada je izvodio auditorne i laboratorijske vježbe iz sledećih predmeta: Mašinski elementi 1, Mašinski elementi 2, Zavarene mašinske konstrukcije, Zavarivanje i termička obrada, Prenosnici snage, Ispitivanje konstrukcija, Osnovi konstruisanja, CAD-Dizajn uz podršku računara, Integralni razvoj proizvoda, Razvoj mašinskih sistema i Lake konstrukcije.

Član je asocijacije ADEKO (Asocijacija za Dizajn, Elemente i Konstrukcije) i udruženja DUZS (Društva za unapređenje zavarivanja Srbije). Od februara do maja 2019. godine boravio je na Mašinskom fakultetu u Ljubljani u okviru bilateralne saradnje između BiH i Republike Slovenije. Tokom boravka radio je i istraživao u okviru Laboratorije za zavarivanje. Putem programa CEEPUS boravio na: Institutu za informacione i komunikacione tehnologije u Sofiji, Mašinskom fakultetu u Beogradu i Fakultetu tehničkih nauku u Novom Sadu. Bio je član tima međunarodnog TEMPUS projekta EQIWBC i međunarodnog HORIZON 2020 projekta EUNORS. Kao student osnovnih studija bio je dobitnik Rektorove nagrade koja se dodjeljuje najboljim studentima Univerziteta u Istočnom Sarajevu, kao i dobitnik Dekanove nagrade za studenta generacije. Dobitnik je stipendije Fonda dr Milan Jelić za osnovne i master studije, koja se dodjeljuje najuspješnijim studentima u Republici Srpskoj. U 2018. i 2019. godini proglašen je za najboljeg mladog istraživača na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Istočnom Sarajevu. Bio je član tima koji je 2018. godine sa inovacijom „Mašina za čišćenje međucijevnog prostora kotlova termoelektrana sa horizontalnom postavkom cijevi“ osvojio prvo mjesto na Takmičenju za najbolju tehnološku inovaciju Republike Srpske.

Izjava 1.

IZJAVA O AUTORSTVU

Izjavljujem da je doktorska disertacija, pod naslovom

**ISTRAŽIVANJE TEHNOLOGIJA SPAJANJA LIMOVA OD ČELIKA DP500 I
LEGURE ALUMINIJUMA AW-5754 U CILJU RAZVOJA LAKIH KONSTRUKCIJA**

koja je odbranjena na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Nišu:

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada;
- da ovu disertaciju, ni u celini, niti u delovima, nisam prijavljivao na drugim fakultetima, niti univerzitetima;
- da nisam povredio autorska prava, niti zloupotrebio/la intelektualnu svojinu drugih lica.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci, koji su u vezi sa autorstvom i dobijanjem akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada, i to u katalogu Biblioteke, Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Nišu, kao i u publikacijama Univerziteta u Nišu.

U Nišu, _____.

Potpis autora disertacije:



Aleksija D. Đurić

Izjava 2.

**IZJAVA O ISTOVETNOSTI ŠTAMPANOG I ELEKTRONSKOG OBLIKA
DOKTORSKE DISERTACIJE**

Naslov disertacije:

**ISTRAŽIVANJE TEHNOLOGIJA SPAJANJA LIMOVA OD ČELIKA DP500 I
LEGURE ALUMINIJUMA AW-5754 U CILJU RAZVOJA LAKIH KONSTRUKCIJA**

Izjavljujem da je elektronski oblik moje doktorske disertacije, koju sam predao za unošenje u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu, istovetan štampanom obliku.

U Nišu, _____.

Potpis autora disertacije:



Aleksija D. Đurić

Izjava 3.

IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Nikola Tesla“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu unese moju doktorsku disertaciju, pod naslovom:

ISTRAŽIVANJE TEHNOLOGIJA SPAJANJA LIMOVA OD ČELIKA DP500 I LEGURE ALUMINIJUMA AW-5754 U CILJU RAZVOJA LAKIH KONSTRUKCIJA

Disertaciju sa svim prilogima predao sam u elektronskom obliku, pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju, unetu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu, mogu koristiti svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons), za koju sam se odlučio.

1. Autorstvo (**CC BY**)
2. Autorstvo – nekomercijalno (**CC BY-NC**)
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade (**CC BY-NC-ND**)
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima (**CC BY-NC-SA**)
5. Autorstvo – bez prerade (**CC BY-ND**)
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima (**CC BY-SA**)

U Nišu, _____.

Potpis autora disertacije:



Aleksija D. Đurić