Primjena elektrootpornog točkastog zavarivanja u autoindustriji

Pavković, Josip

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:473951

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Josip Pavković

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić

Student:

Josip Pavković

Zagreb, 2021.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Ivici Garašiću te Ivanu Juriću, mag. ing. mech. na svim korisnim savjetima i pruženoj pomoći pri izradi ovog rada.

Velike zahvale djelatnicima Laboratorija za zavarivanje i Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava koji su mi pomogli pri izvođenju eksperimenta.

Posebno se zahvaljujem obitelji, prijateljima i kolegama na svim lijepim trenucima te podršci, razumijevanju i motivaciji koju su mi pružali tijekom studija.

Rad posvećujem svojim malim pomagačima Domiću, Bengi i Mati.

Josip Pavković

„Change is easy. Improvement is far more difficult.“ – F. Porsche

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: **602 - 04 / 21 - 6 / 1**	
Ur.broj: **15 - 1703 - 21 -**	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Josip Pavković** Mat. br.: 0035217618

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena elektrootpornog točkastog zavarivanja u autoindustriji**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of resistance spot welding in automotive industry**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu rada potrebno je opisati postupke zavarivanja u autoindustriji s posebnim naglaskom na elektrootporno točkasto zavarivanje. Analizirati glavne parametre zavarivanja, te opisati njihov utjecaj na geometriju i kvalitetu spoja. Obrazložiti zavarljivost pojedinih metala postupkom elektrootpornog zavarivanja. Navesti primjere primjene u autoindustriji (koji su materijali u primjeni, primjer parametara, dijelovi konstrukcije).

U eksperimentalnom dijelu rada je potrebno definirati utjecaj različitih parametara zavarivanja na kvalitetu i oblik zavarenog spoja. Dobivene zavarene spojeve potrebno je podvrgnuti razornom i nerazornom ispitivanju, te na temelju dobivenih podataka ocijeniti adekvatnost odabranih parametara zavarivanja.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
30. studenoga 2020.

Zadatak zadao:
Izv.prof.dr.sc. Ivica Garašić

Datum predaje rada:
1. rok: 18 veljače 2021.
2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.
3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 22.2. – 26.2.2021.
2. rok (izvanredni): 9.7.2021.
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Predsjednik Povjerenstva:
Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA III
POPIS TABLICA V
POPIS OZNAKA VI
SAŽETAK VII
SUMMARY VIII
1. UVOD 1
2. POSTUPCI ZAVARIVANJA U AUTOINDUSTRIJI 4
2.1. Elektrootporno zavarivanje 6
2.1.1. Elektrootporno točkasto zavarivanje 8
2.1.1.1. Konfiguracije elektrootpornih točkastih zavara 11
2.1.1.2. Parametri elektrootpornog točkastog zavarivanja 15
2.1.1.3. Oprema za elektrootporno točkasto zavarivanje 18
2.1.1.4. Elektrode za elektrootporno točkasto zavarivanje 19
2.1.1.5. Režimi zavarivanja 21
2.1.2. Elektrootporno šavno zavarivanje 22
2.1.2.1. Primjena elektrootpornog šavnog zavarivanja 24
2.1.2.2. Parametri elektrootpornog šavnog zavarivanja 25
2.2. MIG / MAG zavarivanje 26
2.2.1. Zaštitni plinovi 27
2.2.1.1. Argon 27
2.2.1.2. Helij 28
2.2.1.3. Ugljikov dioksid 28
2.2.1.4. Kisik 29
2.2.1.5. Vodik 29
2.2.1.6. Dušik 29
2.2.2. Oprema za MIG/MAG zavarivanje 30
2.2.3. Parametri MIG/MAG zavarivanja 31
2.3. TIG zavarivanje 32
2.3.1. Oprema za TIG zavarivanje 33
2.3.2. Parametri TIG zavarivanja 34
2.3.2.1. Struja zavarivanja 34
2.3.2.2. Napon zavarivanja 34
2.3.2.3. Inertni plinovi 34
2.3.2.4. Brzina zavarivanja 35
2.4. Lasersko zavarivanje 36
2.4.1. Oprema za lasersko zavarivanje 38
2.4.2. Parametri laserskog zavarivanja 39
2.4.2.1. Snaga lasera 40
2.4.2.2. Brzina zavarivanja 40
2.4.2.3. Promjer žarišta 41
2.4.2.4. Zaštitni plin 41

2.5. Zavarivanje trenjem ... 42
2.5.1. Okretno zavarivanje trenjem ... 43
2.5.2. Zavarivanje trenjem rotirajućim alatom ... 44
3. Materijali u autoindustriji ... 47
3.1. Čelik ... 48
3.1.1. Lako oblikovljivi čelici, čelici za vučenje i duboko vučenje ... 49
3.1.2. Čelici visoke čvrstoće (eng. High Strength Steel) ... 49
3.1.3. Napredni čelici visoke čvrstoće (eng. Advanced High Strength Steel) ... 50
3.1.4. Čelici ultra visoke čvrstoće (eng. Ultra High Strength Steel) ... 50
3.2. Aluminij ... 50
3.2.1. 5000 Al-Mg ... 52
3.2.2. 6000 Al-Mg-Si ... 52
3.2.3. 7000 Al-Zn-Mg ... 52
3.3. Magnezij ... 52
3.4. Zavarljivost metala elektrootpornim točkastim zavarivanjem ... 54
3.4.1. Čelici ... 54
3.4.1.1. Niskougljični i mikrolegirani čelik ... 55
3.4.1.2. Čelici visoke čvrstoće i čelici ultra visoke čvrstoće ... 55
3.4.1.3. Čelici zaštićeni premazima ... 55
3.4.2. Aluminij i aluminijske legure ... 55
3.4.3. Magnezij i magnezijeve legure ... 55
4. EKSPERIMENTALNI DIO ... 57
4.1. Uređaj za elektrootporno točkasto zavarivanje ... 57
4.2. Tijek eksperimenta ... 59
4.2.1. Priprema ispitnih uzoraka ... 60
4.2.2. Određivanje parametara zavarivanja ... 61
4.2.3. Zavarivanje ispitnih uzoraka ... 62
4.2.4. Nerazorno ispitivanje vizualnom metodom ... 65
4.2.5. Razorno ispitivanje ispitnih uzoraka ... 67
5. ZAKLJUČAK ... 75
LITERATURA ... 77
PRILOZI ... 80

POPIS SLIKA

Slika 1 Vrste postupaka zavarivanja [2] 2
Slika 2 Težina i performanse lakih vozila s obzirom na godinu modela [3] 3
Slika 3 Audi A8 - Postupci spajanja [5] 5
Slika 4 Robotizirano zavarivanje karoserije automobila [6] 6
Slika 5 Istiskivanje [9] 7
Slika 6 Shematski prikaz elektrootpornog točkastog zavarivanja [12] 9
Slika 7 Promjena sile, struje zavarivanja i temperature u ovisnosti o vremenu pri elektrootpornom točkastom zavarivanju (shematski prikaz) [1] 10
Slika 8 Elektrootporno točkasto zavarivanje aluminijskog okvira vrata automobila [12] 11
Slika 9 Direktno zavarivanje [8] 12
Slika 10 Paralelno zavarivanje [8] 13
Slika 11 Serijsko zavarivanje [8] 14
Slika 12 Indirektno zavarivanje [8] 15
Slika 13 Električni otpori kod točkastog zavarivanja a) početne vrijednosti; b) promjena u vremenu [9] 16
Slika 14 Međuovisnost jakosti struje i vremena zavarivanja [9] 18
Slika 15 Shematski prikaz uređaja za elektrootporno točkasto zavarivanje [8] 19
Slika 16 Standardni oblici elektrode [7] 21
Slika 17 Elektrootporno šavno zavarivanje [1] 23
Slika 18 Vrste šavnih zavarenih spojeva [7] 23
Slika 19 Pomoćni okvir stražnje osovine BMW-ove serije 7 od aluminijske legure zavarena elektrootpornim šavnim zavarivanjem [14] 25
Slika 20 Presjek pištolja pri MIG/MAG zavarivanju [15] 26
Slika 21 Automatski MIG/MAG sustav za zavarivanje [15] 31
Slika 22 MAG (CMT) zavarivanje karoserije Volvo V70 automobila [18] 32
Slika 23 Presjek pištolja pri TIG zavarivanju [16] 33
Slika 24 Osnova oprema za TIG zavarivanje [19] 34
Slika 25 Valentino Balboni ispušni sustav za Lamborghini Aventador SVJ [21] 35
Slika 26 Shematski prikaz laserskog zavarivanja [23] 36
Slika 27 Lasersko zavarivanje karoserije Volvo C70 automobila [24] 37
Slika 28 Tehnike zavarivanja laserom [23] 37
Slika 29 Vođenje laserskog snopa pomoću zrcala kod CO2 lasera [23] 39
Slika 30 Vođenje laserskog snopa optičkim kabelom kod Nd:YAG lasera [23] 39
Slika 31 Odnos snage lasera i dubine penetracije [22] 40
Slika 32 Varijacija dubine penetracije u ovisnosti o brzini zavarivanja [22] 41
Slika 33 Utjecaj zaštitnog plina na dubinu penetracije [22] 42
Slika 34 Primjena zavarivanja aluminijskih dijelova trenjem na Mazda RX-8 automobilu [3] 43
Slika 35 Okretno zavarivanje trenjem [10] 44
Slika 36 Zavarivanje trenjem rotirajućim alatom [26] 46
Slika 37 Alat za zavarivanje trenjem rotirajućim alatom [26] 46
Slika 38 Usporedba strukturnih svojstava čelika, aluminija i magnezija [28] 47
Slika 39 Raspodjela čelika različite čvrstoće u karoseriji Volvo S60 automobila [31] 49
Slika 40 Primjeri primjene aluminijskih legura u automobilu [33] 51
Slika 41 Primjena magnezijevih legura u automobilskoj industriji kroz povijest [34] 53
Slika 42 Uređaj za elektrootporno točkasto zavarivanje TV-15 PKS 57
Slika 43 Specifikacije TV-15 PKS uređaja 58
Slika 44 Upravljačka jedinica 59

Slika 45 Kemijsko čišćenje uzoraka 60
Slika 46 Označavanje duljine preklopa 60
Slika 47 Predeksperiment – optimiranje parametara zavarivanja 61
Slika 48 Zaštitna oprema za elektrootporno zavarivanje 63
Slika 49 Zavarivanje ispitnih uzoraka 63
Slika 50 Uvećani prikaz zavara ispitnih uzoraka 1, 2 i 3 (s lijeva na desno) 64
Slika 51 Uvećani prikaz zavara ispitnih uzoraka 4, 5 i 6 (s lijeva na desno) 64
Slika 52 Uvećani prikaz zavara ispitnih uzoraka 7, 8 i 9 (s lijeva na desno) 65
Slika 53 Mjerenje promjera i računanje srednjeg promjera zavara i ZUT-a prema normi ISO 14329 – 2003 [40] 65
Slika 54 Grafički prikaz srednjeg promjera zone metala zavara u ovisnosti o jakosti struje zavarivanja i vremenu predgrijavanja 66
Slika 55 Grafički prikaz srednjeg promjera zone utjecaja topline u ovisnosti o jakosti struje zavarivanja i vremenu predgrijavanja 67
Slika 56 Kidalica 68
Slika 57 Ispitni uzorci nakon razornog ispitivanja 69
Slika 58 Uvećani prikaz mjesta loma ispitnih uzoraka 1, 2 i 3 (s lijeva na desno) 69
Slika 59 Uvećani prikaz mjesta loma ispitnih uzoraka 4, 5 i 6 (s lijeva na desno) 70
Slika 60 Uvećani prikaz mjesta loma ispitnih uzoraka 7, 8 i 9 (s lijeva na desno) 70
Slika 61 Grafički prikaz maksimalne vlačne sile ispitnih uzoraka 71
Slika 62 Grafički prikaz čvrstoće zavara 73

POPIS TABLICA

Tablica 1 Režimi elektrootpornog točkastog zavarivanja čelika [9] 22
Tablica 2 Režimi elektrootpornog šavnog zavarivanja [9] 24
Tablica 3 Utjecaj vrste zaštitnog plina na tehnološke parametre procesa [15] 30
Tablica 4 Ocjene zavarljivosti u ovisnosti o vrsti osnovnog materijala [35] 54
Tablica 5 Fiksni parametri zavarivanja 62
Tablica 6 Promjenjivi parametri zavarivanja 62
Tablica 7 Promjeri zavara i zone utjecaja topline 66
Tablica 8 Maksimalne vlačne sile na kidalici 71
Tablica 9 Promjeri zavara sa strane spoja 72

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
Q	J	Količina topline
I_z	A	Struja zavarivanja
t	s	Vrijeme zavarivanja
$R_{1\text{-}E}$	Ω	Otpor: materijal – gornja elektroda
R_1, R_2	Ω	Vlastiti otpori materijala
R_{k12}	Ω	Kontaktni otpor: materijal - materijal
$R_{2\text{-}E}$	Ω	Otpor: materijal – donja elektroda
ρ	Ω·mm2 /m	Specifični električni otpor
l	mm	Dužina vodiča
S	mm^2	Površina poprečnog presjeka vodiča
ω	min^{-1}	Brzina rotacije alata
v	mm/min	Brzina zavarivanja
α_A	°	Nagib alata prema osnovnom materijalu
F_N	kN	Sila pritiska alata na materijal
R_z	N/mm^2	Čvrstoća zavara
F_m	N	Maksimalna vlačna sila
A	mm^2	Površina točkastog zavara

SAŽETAK

Završni rad je podijeljen u dva dijela, teorijski i eksperimentalni dio.

U teorijskom dijelu rada klasificirani su i opisani najčešće primjenjivani postupci zavarivanja u autoindustriji s posebnim naglaskom na elektrootporno točkasto zavarivanje. Analizirani su parametri zavarivanja karakteristični za svaki navedeni postupak, te je dan osvrt njihovog utjecaja na geometriju zavara i kvalitetu samog zavarenog spoja. Navedeni su, također, i najčešće korišteni materijali u automobilskoj industriji, sa slikovnim prikazima dijelova konstrukcije, te je obrazložena zavarljivost pojedinih metala koji su implementirani u konstrukciju automobila.

U eksperimentalnom dijelu rada provedena je priprema i elektrootporno točkasto zavarivanje ispitnih uzoraka izrađenih od čelika S235. Nerazornim i razornim ispitivanjem ispitan je utjecaj jakosti struje zavarivanja i vremena predgrijavanja kao promjenjivih parametara zavarivanja na kvalitetu i oblik zavarenog spoja, te je ocijenjena adekvatnost odabranih parametara.

Ključne riječi: elektrootporno točkasto zavarivanje, automobilska industrija, postupci zavarivanja, MIG, TIG, lasersko zavarivanje, zavarivanje trenjem

SUMMARY

The thesis is divided into two parts, a theoretical and experimental part.

In the theoretical part of the thesis, the most commonly used welding procedures in the automotive industry are classified and described, with special emphasis on resistance spot welding. The welding parameters characteristic to each of these processes are analyzed, and a review of their influence on the geometry of the welds and the quality of the welded joint is given. The most commonly used materials in the automotive industry are also listed, with pictorial representations of parts of the structure. Weldability of metals that are implemented in the car structure is explained as well.

In the experimental part of the thesis, the preparation and resistance spot welding of the specimens made of S235 steel was performed. Non - destructive and destructive testing was conducted in order to examine the influence of welding current value and time of preheating as variable welding parameters on the quality and shape of the welded joint. Adequacy of selected parameters was evaluated as well.

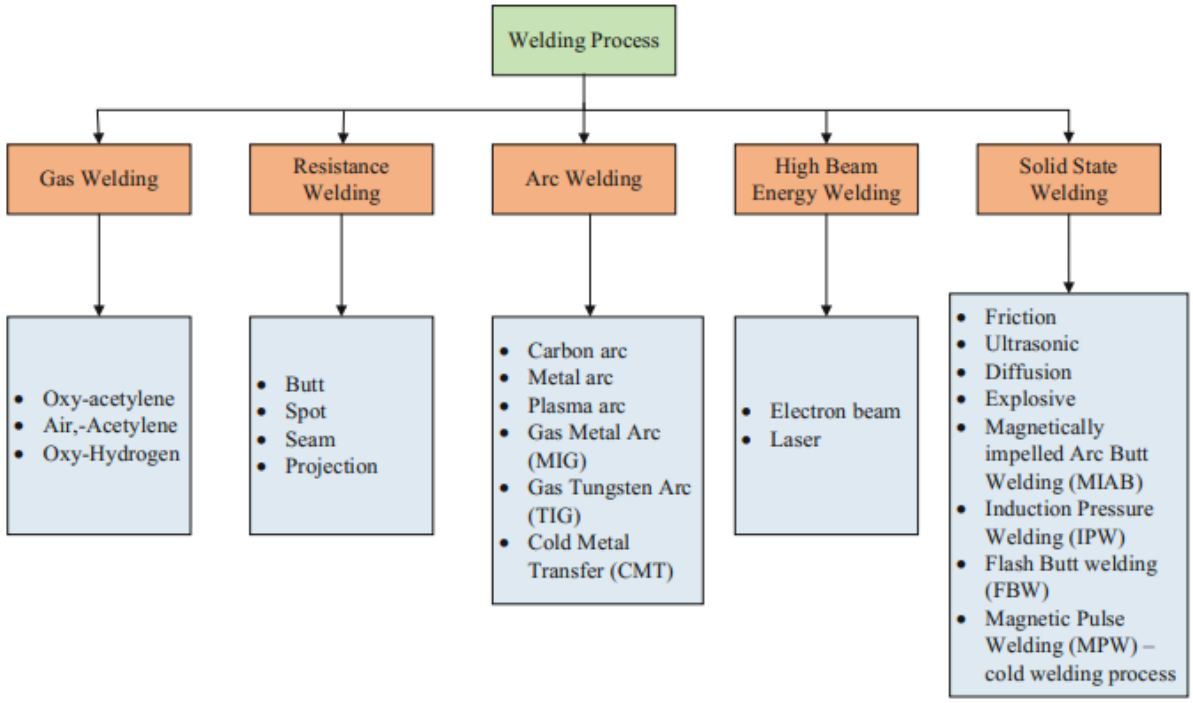
Key words: resistance spot welding, automotive industry, welding processes, MIG, TIG, laser welding, friction welding

1. UVOD

Zavarivanje je postupak spajanja istorodnih ili raznorodnih materijala u zoni zavarivanja uz upotrebu topline i / ili sile, sa ili bez dodatnog metala, s ciljem dobivanja homogenog zavarenog spoja. To može biti olakšano uz pomoć zaštitnih plinova, praha za zavarivanje ili različitih zavarivačkih pasta. Iako se najčešće povezuje sa metalnim dijelovima, postupak zavarivanja koristi se i za spajanje polimernih tvorevina. Energija potrebna za zavarivanje dobavlja se izvana.

Povijest zavarivanja započela je vrlo rano. Četiri tisuće godina prije nove ere, Sumerani su već zavarivali metale. Prilično velik vremenski period je protekao dok se nije postigao sljedeći veliki korak na polju tehnologije zavarivanja. Godine 2700. prije nove ere, Egipćani su plamenim zavarivanjem konstruirali bakrene vodove. Cijevi su zatim zapečaćene kao vodovodne cijevi za gradsku opskrbu vodom. Plameno zavarivanje koristilo se također i za izradu nakita. U sljedećim stoljećima došlo je do mnogih važnih otkrića na polju zavarivačke tehnologije, kao što su Guerickov električni stroj, Leibnizove električne iskre ili kondenzator EC von Kleista 1745 godine. Najveći napredak je, međutim, uslijedio tek tijekom razdoblja između 1880.–1887. godine. U tom je razdoblju Rus Nikolaj Nikolaijewitsch Bernados razvio postupak elektrolučnog zavarivanja. Uspio je prvi put spojiti dva metalna dijela pomoću električnog luka. U sljedećim godinama ovaj je postupak postao vrlo uobičajena metoda spajanja čelika. Postupak elektrootpornog zavarivanja dugujemo E. Thomsonu (1886), koji je kao izvor struje isprva koristio baterije. Porast kvalitete na području elektrolučnog zavarivanja postignut je zahvaljujući Robertsu i Nuysu, koji su prvi puta koristili inertne plinove tijekom postupka zavarivanja [1]. Većina najčešće korištenih metoda zavarivanja današnjice ipak su znatno novije [1]:

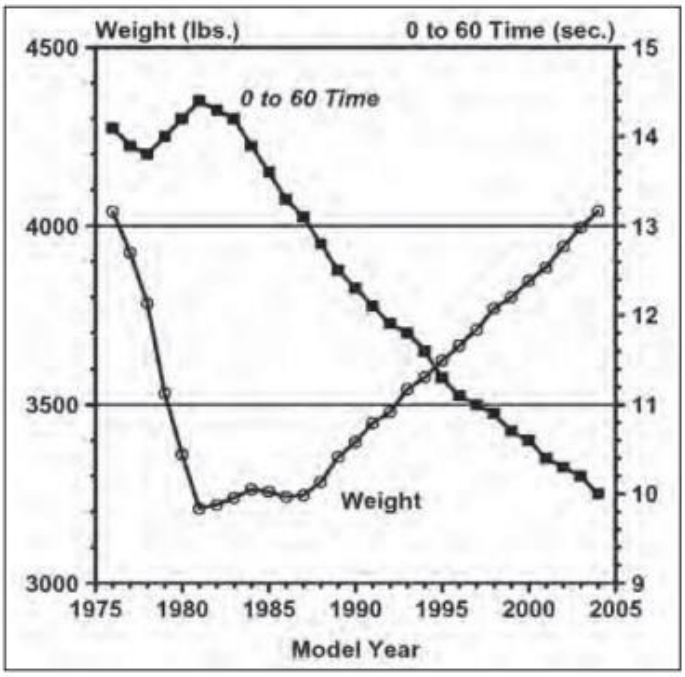
- EPP zavarivanje, 1936.
- TIG zavarivanje, 1936.
- MIG zavarivanje, 1948.
- MAG zavarivanje, 1953.
- plazma zavarivanje, 1960.
- lasersko zavarivanje, 1970.



Slika 1 Vrste postupaka zavarivanja [2]

Automobilska industrija jedna je od najvećih i tehnološki najzahtjevnijih proizvodnih grana. U državama sa razvijenom autoindustrijom, ona čini velik postotak u ukupnom BDP-u, zapošljavajući istodobno velik broj ljudi. Osim toga, izravno utječe na razvoj niza drugih gospodarskih grana koje se razvijaju da bi udovoljile njenim potrebama, kao što su na primjer industrije koje se bave proizvodnjom automobilskih pneumatika, ulja i maziva, elektronička industrija, industrija boja i lakova i sl. Ubrzani rast tržišta, digitalizacija, te sve stroža ograničenja u pogledu ekoloških propisa i energetske učinkovitosti automobila stavljaju, međutim, nove izazove pred proizvođače automobila. Ukoliko žele ostati u utrci i konkurirati na tržištu, automobilske se organizacije moraju prilagoditi i ponuditi nova rješenja za sigurniju i tehnološki napredniju vožnju, zadovoljavajući pritom ekološke standarde. Da bi se postigao napredak u smanjenju potrošnje goriva, a samim time i smanjenju emisije štetnih stakleničkih plinova potrebno je reducirati ukupnu masu automobila. Trenutni trend smanjenja obujma automobilskih motora, zadržavajući pritom iste ili slične performanse njihovih većih prethodnika pomaže u tom naumu, no konstantan porast elektronike i komfornih trošila u automobilima te korištenje novih pogonskih sustava (električna i hibridna vozila) koji povećavaju ukupnu masu automobila čine taj trend nedovoljnim. Olakšavanje strukturnih dijelova korištenjem tanjih čeličnih profila veće čvrsoće i lakših materijala općenito (npr. kompozita), pazeći pritom na zadovoljavanje sigurnosnih zahtjeva nužan je korak ka ukupnom

smanjenju mase automobila. Zahtjevi za tanjim i lakšim komponentama izrađenim od niza različitih materijala stvaraju također probleme u pogledu tehnologije zavarivanja, za koje su proizvođači automobila primorani pronaći optimalna rješenja ukoliko žele ostati konkurentni na tržištu.

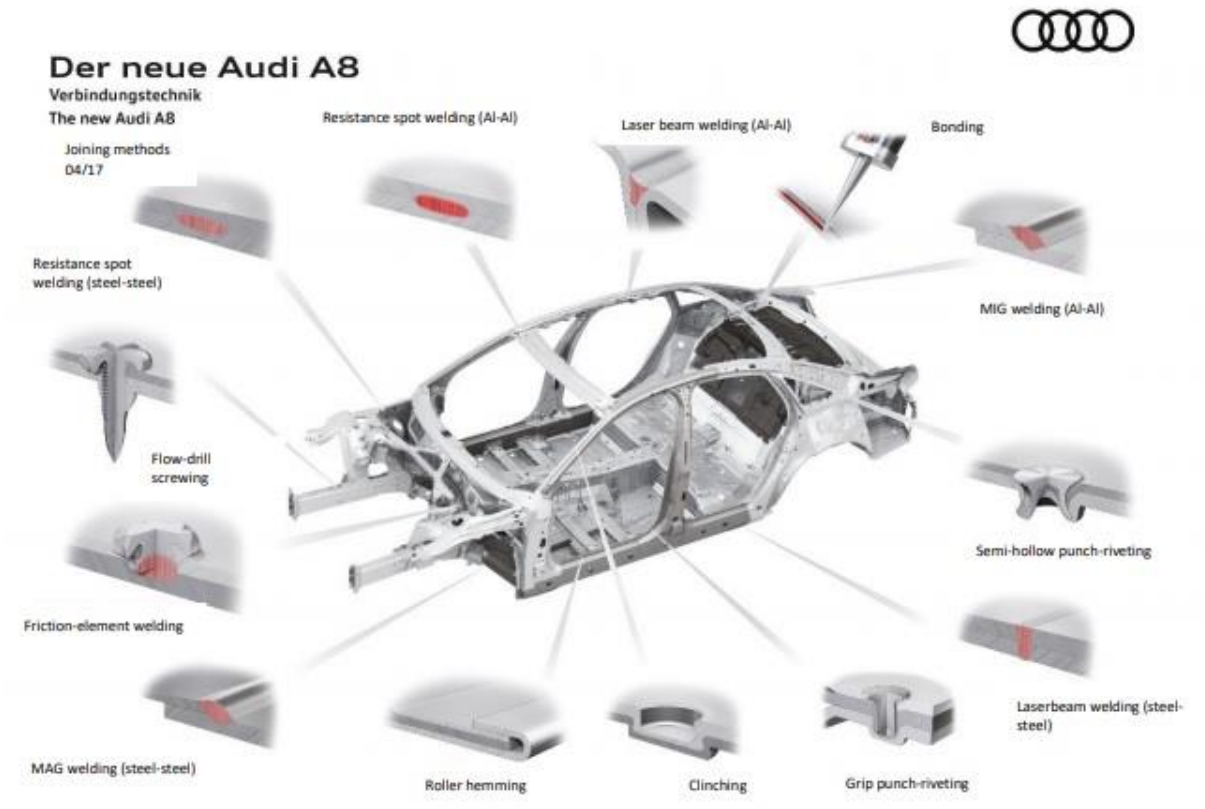


Slika 2 Težina i performanse lakih vozila s obzirom na godinu modela [3]

2. POSTUPCI ZAVARIVANJA U AUTOINDUSTRIJI

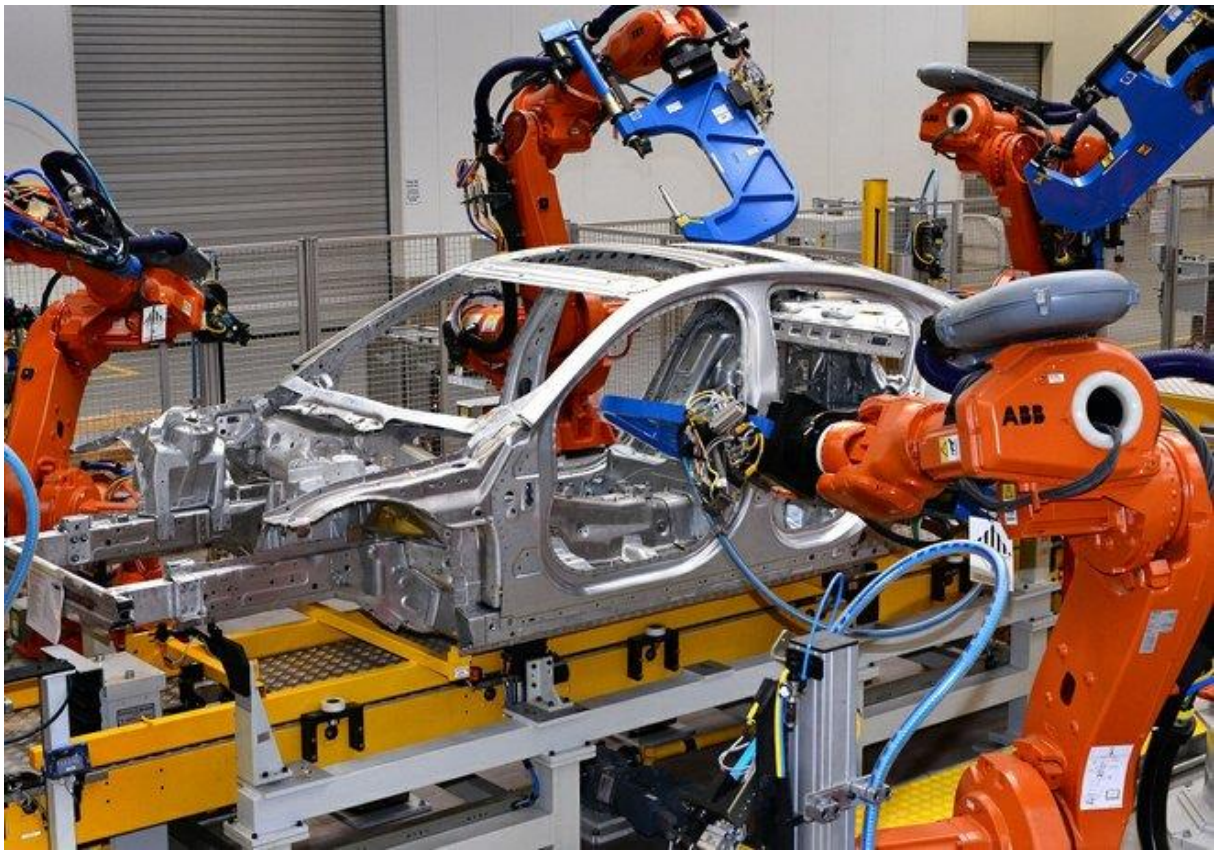
Proizvodnja najvažnijih dijelova automobila – među kojima su osovine i ostali dijelovi podvozja, a povrh toga i same karoserije automobila, ovisi o masovnoj primjeni različitih metoda povezivanja, među kojima je i zavarivanje. Metode zavarivanja i spajanja pri proizvodnji automobila određene su s obzirom na zahtjeve prema višoj razini sigurnosti, nižoj potrošnji goriva i boljoj dinamici vožnje. Najučestalije metode zavarivanja u autoindustriji su elektrootporno (točkasto i šavno) i MIG/MAG zavarivanje, dok elektrootporno točkasto zavarivanje uvelike prevladava. Osim njih koriste se još i TIG, lasersko zavarivanje te zavarivanje trenjem. Razvojem novih materijala te sve učestalijim korištenjem presvučenih limova, visokočvrstih čelika i nehrđajućih čelika, a također i sve većih količina aluminija pri konstruiranju vozila, porastao je, te još uvijek raste i popis korištenih metoda spajanja. Unatoč ovakvom razvoju događaja, očekuje se da će se dominacija elektrootpornog točkastog, te MIG / MAG zavarivanja i dalje zadržati u narednih nekoliko godina, barem što se velikoserijske proizvodnje tiče. Najvažniji je kriterij pri odabiru prikladnog postupka zavarivanja mogućnost postizanja pouzdanih i pravilno izvedenih zavara traženih svojstava na određenom mjestu i položaju obratka. Ekonomija i proizvodnost, također su često odlučujući čimbenici pri odabiru između dviju ili više alternativa, koje inače daju usporedivo tehničko rješenje. Odabir prikladnog postupka za određenu aplikaciju mora, međutim, uzeti u obzir i mnoge druge uvjete i aspekte [4]. Neki od najvažnijih među njima su [4]:

- vrste materijala koji se spajaju
- strukturni aspekti
- pristupačnost mjestu zavarivanja
- organizacija proizvodnog procesa
- kvaliteta osposobljenosti dostupne radne snage
- zahtjevi za održavanjem
- običaji i rutine tvrtke
- investicijski i operativni troškovi.



Slika 3 Audi A8 - Postupci spajanja [5]

Specifičan karakter automobilske industrije, kojeg odlikuju velike proizvodne količine, zahtjevi za visokom i pouzdanom kvalitetom zavarenih spojeva, smanjenje utjecaja ljudskog faktora te uvijek prisutni fokus na kontinuirani rast produktivnosti i učinkovitosti, zahtijeva metode spajanja s visokim stupnjem mehanizacije i automatizacije. Najviši mogući stupanj mehanizacije, s prilično dobrom fleksibilnošću, trenutno se očituje u široko rasprostranjenoj upotrebi robota pri zavarivanju. Gotovo sve metode zavarivanja (i ostale tehnike spajanja), koje se trenutno koriste u automobilskoj proizvodnji u velikoj su mjeri robotizirane. Prikladnost za mehanizaciju ostaje i dalje jedan od osnovnih kriterija u procesu odabira metode zavarivanja [4].



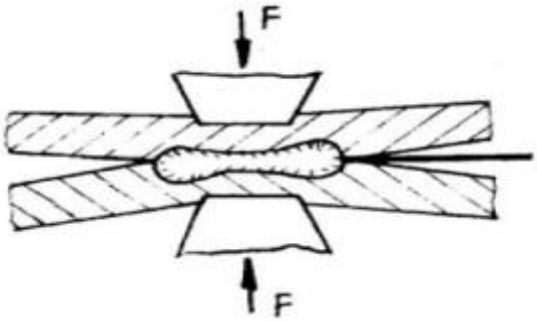
Slika 4 Robotizirano zavarivanje karoserije automobila [6]

2.1. Elektrootporno zavarivanje

Postupak elektrootpornog zavarivanja (eng. Resistance Welding), izumljen 1886. godine od strane profesora Elihu Thomsona, konceptualno je jedan od najjednostavnijih i najčešće korištenih postupaka zavarivanja [7]. Elektrootporno zavarivanje spada u skupinu procesa zavarivanja u kojima se toplina zavarivanja u dijelovima koji se zavaruju generira otporom koji ti dijelovi pružaju prema prolasku električne struje. Zavarivanje se provodi bez korištenja dodatnih materijala, a zavareni spoj nastaje uz pomoć djelovanja sile određenog iznosa na elektrode [8].

U praksi elektrode stežu izratke pod kontroliranim pritiskom, provode električnu struju visoke jakosti (i niskog napona) kroz izratke, potiču dobar lokalni kontakt (mehanički i električni) između obradaka i precizno usmjeravaju protok struje na željeno mjesto spoja. Pritisak elektrode također zadržava rastaljeni metal nastao na mjestu spoja, što sprječava njegovo istiskivanje iz spoja (slika 4), što bi rezultirao poroznošću. Naposlijetku, elektrode (koje mogu biti hlađene vodom) odvode toplinu iz zone zavarivanja, potičući brzo hlađenje

zavara [7]. Zavar, dakle, nastaje uz djelovanje lokalizirane sile koja se održava sve do solidifikacije zavarenog spoja. Posljedica primjene sile je usavršavanje strukture zrna, čime se dobiva zavar s fizikalnim svojstvima u većini slučajeva jednakim matičnom metalu, a ponekad čak i superiornijim [8]. Da bi elektrode mogle prenijeti silu, potreban je pristup obratku s obje strane. Zaštitni plinovi nisu potrebni jer je zrak između površina koje se zavaraju istisnut pomoću sile svojstvene procesu [10].



Slika 5 Istiskivanje [9]

Jedno od temeljnih načela elektrootpornog zavarivanja je generiranje velike količine toplinske energije u zoni zavara u vrlo kratkom vremenu, na način da se minimalna količina topline gubi na provođenje do hladnijeg susjednog materijala. Ovaj zahtjev za velikom brzinom stvaranja topline postiže se propuštanjem električne struje velike vrijednosti kroz zonu zavarivanja u kratkom vremenskom intervalu. Sljedeće načelo je generiranje mnogo veće količine topline u zoni zavarivanja nego na bilo kojem drugom dijelu aparata za zavarivanje. Drugim riječima, električni otpor između predmeta koji se spajaju mora biti veći od električnog otpora između elektroda i spomenutih predmeta [8]. Dobar oblik i stanje vrha elektrode važni su čimbenici za postizanje postojane kvalitete zavara.

Velik dio elektrootpornog zavarivanja izvodi se korištenjem izvora sa jednofaznom izmjeničnom strujom. Nažalost, vrlo visoka struja zavarivanja u jednoj fazi daje loš faktor snage. U drugoj varijanti elektrootpornog zavarivanja koristi se trofazna jednosmjerna struja velikog iznosa za kraća trajanja procesa. Ova varijacija daje izvrstan faktor snage jer je trenutno opterećenje uravnoteženo u sve tri faze. Sljedeći pristup elektrootpornom zavarivanju koristi metodu pražnjenja kondenzatora, koja, dok kondenzatori prazne svoju zalihu električne energije, omogućuje impulse istosmjerne struje. Iako je ukupna potreba za snagom pri elektrootpornom zavarivanju relativno niska, trenutna potreba za energijom vrlo je velika. Električni vodiči moraju stoga biti projektirani da provode maksimalne jakosti struje [10].

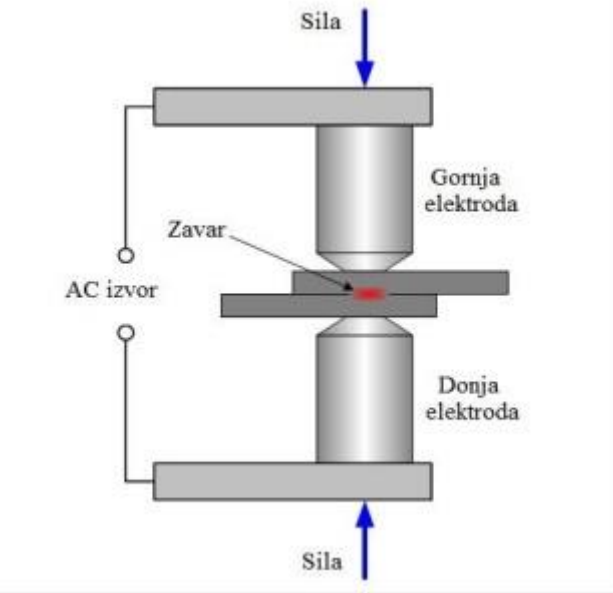
Neke od vrsta elektrootpornog zavarivanja su elektrootporno točkasto zavarivanje (eng. Resistance Spot Welding), elektrootporno šavno zavarivanje (eng. Resistance Seam Welding) i elektrootporno bradavičasto zavarivanje (eng. Resistance Projection Welding). Ova se tri postupka opsežno koriste za spajanje metala debljine do 4,8 mm. Glavne varijable procesa povezane s ovim postupcima elektrootpornog zavarivanja su struja zavarivanja, vrijeme zavarivanja, sila elektrode, materijal elektrode i konfiguracija vrha elektrode. Jednom kada su parametri za ove varijable pravilno prilagođeni, za upravljanje opremom potrebno je vrlo malo vještine [10].

Otpor je funkcija otpora i stanja površine osnovnog materijala te veličine, oblika i materijala elektroda i tlaka primijenjenog pomoću elektroda.

Automobilska industrija, među mnogim drugima, intenzivno koristi postupke elektrootpornog zavarivanja na konstrukcijama u kojima dizajn proizvoda uvjetuje preklapanje profila. Uz zavarivanje karoserije, autoindustrija koristi elektrootporno zavarivanje i za ostale dijelove automobila kao što su kućišta, kotači, sjedala, pa i manji dijelovi poput svjećica i komponenti električnog sustava. To je ekonomičan postupak idealan za proizvodnju velikog broja spojeva na osnovi masovne proizvodnje, a za mnoge od ovih aplikacija koriste se potpuno automatski i robotski sustavi [8,10,11].

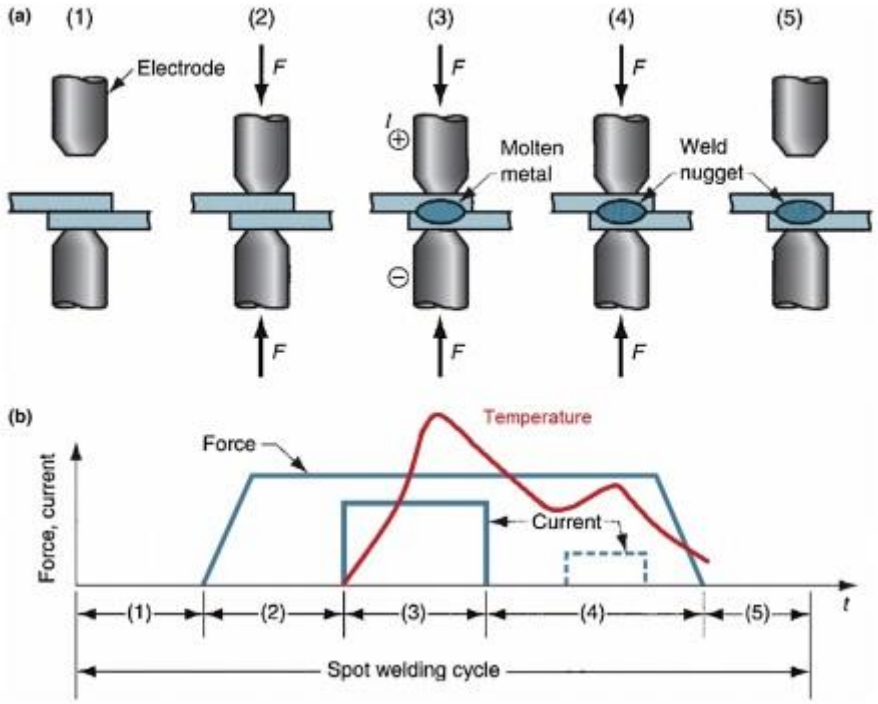
2.1.1. Elektrootporno točkasto zavarivanje

Elektrootporno točkasto zavarivanje (eng. Resistance Spot Welding) je postupak spajanja metala u kojem se radni komadi spajaju, na jednom ili više mjesta, pomoću topline nastale uslijed električnog otpora pri protoku električne struje kroz izratke pritisnute određenom silom preko elektroda. Sila ovisi o materijalu koji se spaja te o njegovoj debljini. Iako se u komercijalnoj proizvodnji sklopova primarno spajaju limovi debljine od 0,7 do 3 mm, moguće je spojiti i ploče do približno 6 mm debljine. Deblji komadi teže se zavaruju jer se velika količina topline odvodi u okolni metal. Kontaktne površine u području najveće koncentracije struje zagrijavaju se kratkotrajnim impulsom niskonaponske struje velikog iznosa, tvoreći na taj način točkasti zavar (slika 1). Kad protok struje prestane, sila elektrode se održava dok se metal zavara ubrzano hladi i učvršćuje. Elektrode se uvlače nakon svakog zavarivanja, što se obično odvija u djeliću sekunde. Zavar treba biti na dovoljnoj udaljenosti od ruba obratka tako da ima dovoljno osnovnog metala da izdrži silu elektrode i da osigura da lokalno izobličenje tijekom zavarivanja ne dopušta istiskivanje metala iz zavara [7].



Slika 6 Shematski prikaz elektrootpornog točkastog zavarivanja [12]

Elektrootporno točkasto zavarivanje započinje pritiskom komada u svrhu postizanja dobrog kontakta. Zagrijavanje pri elektrootpornom zavarivanju je kratkotrajno (od mikrosekunde do nekoliko sekundi) i neravnomjerno, pri čemu se najviše zagrijava središnji dio točke (jezgra), na kojoj je jakost struje najveća. Ako se električna struja isključi prije dostizanja temperature taljenja tada u strukturi zavarene točke nema šupljina i pora, ali nastaje krupnozrnata struktura i nemetalni uključci koji smanjuju žilavost spoja. Suprotno tome, tijekom taljenja i skrućivanja jezgre moguća je pojava šupljina i pora, što se može spriječiti djelovanjem sile pritiska. Smanjenje pritiska na elektrodama treba, stoga, kasniti u odnosu na isključenje struje za vrijeme t_k, dovoljno za završetak kristalizacije. Povećanjem debljine komada, hlađenje i kristalizacija se usporavaju, a vrijeme t_k se produžava. Kod debljih limova sila pritiska na elektrodama ne samo da treba djelovati duže, već se treba i povećati u svrhu sprječavanja pojave šupljina i pora [9].



Slika 7 Promjena sile, struje zavarivanja i temperature u ovisnosti o vremenu pri elektrootpornom točkastom zavarivanju (shematski prikaz) [1]

Točkasto elektrootporno zavarivanje najčešće je korištena tehnika spajanja za sastavljanje proizvoda od lima, primjerice automobilskih karoserija, kućanskih aparata, namještaja, građevinskih proizvoda, kućišta te, u ograničenoj mjeri, komponenata zrakoplova. Mnoge sklopove od dva ili više komada lima, koji ne zahtijevaju hermetičnost spojeva, može se ekonomičnije spojiti brzim postupkom elektrootpornog točkastog zavarivanja nego mehaničkim metodama. Glavne prednosti točkastog zavarivanja uključuju velike radne brzine, prikladnost za automatizaciju te uključivanje u visokoproduktivnu linijsku proizvodnju, kao i druge proizvodne postupke. Repetitivno točkasto zavarivanje može se izvršiti upotrebom robota, kao što se to obično i radi u pogonima za proizvodnju automobila. Uz automatsku kontrolu struje, vremena i sile na elektrodi, točkasti se zavari mogu dosljedno izrađivati po visokim proizvodnim stopama i niskim jediničnim troškovima rada, pomoću operatera čija razina kvalifikacije ne mora biti visoka [7].



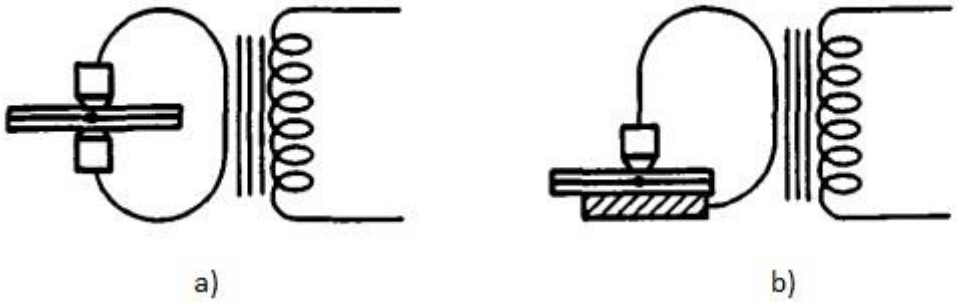
Slika 8 Elektrootporno točkasto zavarivanje aluminijskog okvira vrata automobila [12]

2.1.1.1. Konfiguracije elektrootpornih točkastih zavara

Postoje četiri opće kategorije elektrootpornih točkastih zavarenih spojeva koje su standardizirane i precizno definirane, te brojne varijacije na svaku od njih. To su: direktno, paralelno, serijsko te indirektno elektrootporno točkasto zavarivanje. Razlike su uglavnom posljedica strujnog puta kroz zavar te rasporeda i oblika elektroda. Svaka od četiri vrste bit će ukratko opisana u nastavku [8].

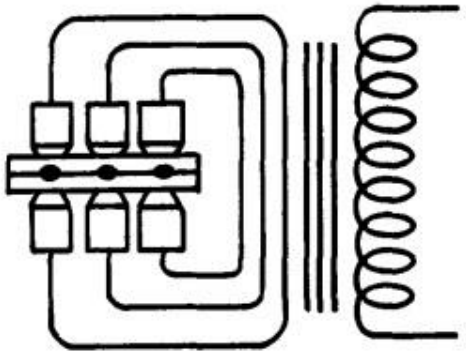
Direktno zavarivanje - U direktnom zavarivanju tok struje prolazi direktno kroz radni komad, između nasuprotnih elektroda. Na slici 9 a) i 9 b) prikazane su dvije vrste direktnih zavara. Slika 9 a) prikazuje osnovni točkasti zavar, kojeg je i najlakše proizvesti, budući da elektrode mogu biti optimalnog promjera i oblika. Većina konfiguracija elektrootpornog zavarivanja temelji se upravo na ovoj vrsti zavarivanja. Ako je raspored elektroda odgovarajući, i ako je odabran korektan oblik gornje elektrode, donja elektroda (koja je obično fiksna) može biti blok električno provodljivog materijala. Površina koja je u kontaktu sa radnim komadom može biti ravna ili cilindrična. Elektroda s ravnom površinom prikazana je na slici 9 b). Zbog razlike u geometriji područja kontakata elektrode i podložnog trna sa radnim komadom, raspodjela topline nije tako dobra kao na slici 9 a), pod pretpostavkom da su radni komadi na obje slike identični. Metoda na slici 9 b) se može koristiti za smanjenje unosa topline u materijal

koji je u dodiru sa podložnim trnom. Navedena metoda može također biti potrebna i zbog oblika sklopa ili u svrhu dobivanja zavara koji nije vidljiv na površini [8].



Slika 9 Direktno zavarivanje [8]

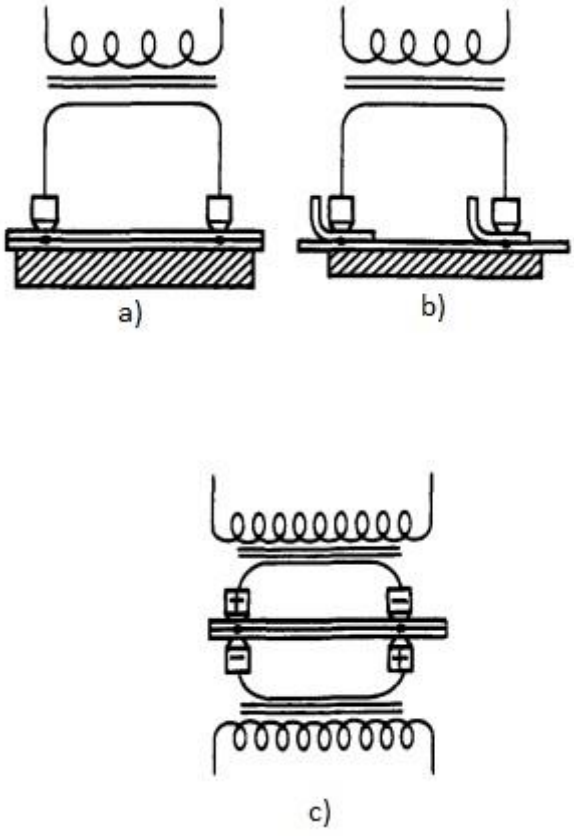
Paralelno zavarivanje - U ovoj se varijaciji istovremeno izrađuje dva ili više direktnih zavara, obično usko razmaknutih, pomoću struje zavarivanja koju za sve zavarene spojeve napaja jedan transformator. To iziskuje da svi elementi koji su uključeni u postupak točkastog zavarivanja budu gotovo jednaki za svaki zavar. Od svih parametara, pri ovakvom zavarivanju najteže je ujednačiti struju zavarivanja. Paralelno zavarivanje nudi dvije osnovne prednosti u usporedbi s izradom istih zavara u nizu. Jedna je prednost što se u istom vremenskom intervalu koji je potreban za jedan zavar može napraviti više zavara; druga je prednost što je pojava skretanja struje prema susjednim zavarima manje učestala, što omogućuje smanjenje minimalnog razmaka među zavarima. Kao što je gore spomenuto, struje zavarivanja za svaki zavar moraju biti gotovo jednake. Ako se dva ili više strujnih krugova napaja iz sekundarnog namota istog transformatora, električna struja neće biti jednaka u svakom krugu osim ako impedancije svakog kruga nisu identične, a to postaje sve teže za izvesti kako se povećava broj krugova. Puno bolja ravnoteža može se postići korištenjem transformatora s više sekundarnih namota, gdje svaki namot napaja jedan krug. Takva je konfiguracija prikazana na slici 10 [8].



Slika 10 Paralelno zavarivanje [8]

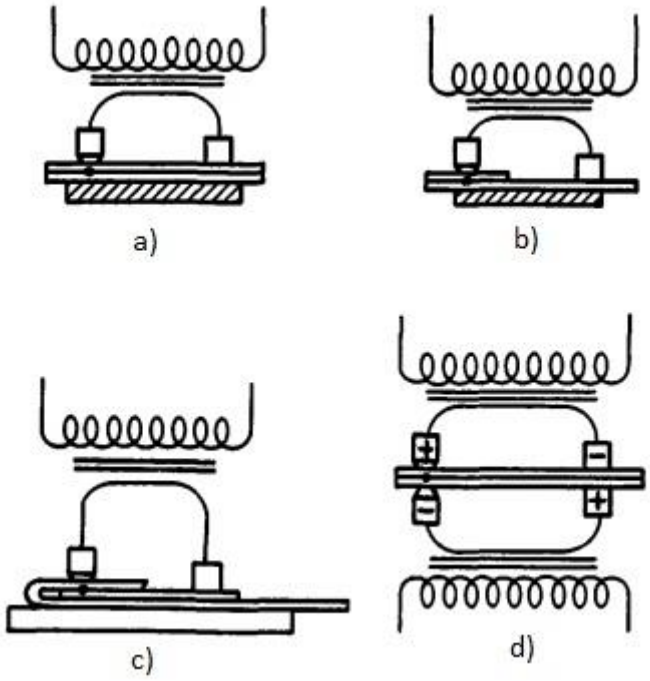
Serijsko zavarivanje – Slika 11 a) i b) prikazuje dvije varijacije serijskog točkastog zavarivanja. Sekundarni je krug povezan s dvije elektrode koje su u kontaktu sa izratkom sa iste strane, a koristi se i pomoćni podložni trn koji provodi električnu struju. Zavar, dakle, nastaje na svakoj od elektroda. Slika 11 a) prikazuje osnovnu konfiguraciju serijskog zavarivanja. Između elektroda postoje tri paralelne putanje struje. Prva je kroz gornji obradak i vrlo malo doprinosi stvaranju topline na kontaktnim površinama. Ona, međutim, stvara toplinu u materijalu na dodirnoj površini elektrode i obratka, te rezultira većim otiskom i vidljivošću zavara nego što bi to bilo prisutno da je isti zavar izrađen direktnim zavarivanjem. Iznos ove struje postat će sve veći smanjivanjem razmaka elektroda i / ili povećavanjem debljine gornjeg obratka. Ovaj efekt stoga ograničava minimalni razmak između elektroda i debljinu materijala koji je u kontaktu sa elektrodom. Suprotno tome, ova će se struja blago smanjivati smanjenjem otpora podložnog trna. Druga putanja struje je kroz donji materijal, a treća kroz podložni trn. Povećanje površine poprečnog presjeka trna ili njegove vodljivosti povećat će struju na toj putanji i poboljšati rezultate zavarivanja. Obje ove struje prolaze kroz kontaktne površine između obradaka te stvaraju toplinu potrebnu za zavarivanje. Na slici 11 b) prikazan je serijski zavar u kojem gornji obradak nije kontinuiran između elektroda, čime se eliminira pojava skretanja struje. Uvjeti zavarivanja za ovakav raspored slični su onima za indirektno zavarivanje, o kojem će kasnije biti riječi u ovom poglavlju. Temeljna prednost prethodno spomenutih serijskih konfiguracija zavarivanja je sposobnost izrade zavara s elektrodama i sekundarnim krugom sa samo jedne strane zavara. U usporedbi s direktnim točkastim zavarivanjem, otisak elektrode je izraženiji, a raspodjela topline nešto je lošija zbog ravne površine podložnog trna. Slika 11 c) ilustrira još jednu varijantu serijskog zavarivanja poznatu kao push-pull zavarivanje. Ovdje su elektrode spojene na zasebne sekundarne krugove sa svake

strane zavarenog spoja, s polaritetima raspoređenim kako je prikazano. Iako je pojava skretanja struje još uvijek prisutna, i to na oba obratka, napon između nasuprotnih elektroda povećava omjer struje zavarivanja i struje koja skreće u usporedbi s krugom prikazanim na slici 11 a). Treba imati na umu da ovaj raspored zahtjeva pristup elektrodama sa obje strane zavara, te da će na obje strane obratka biti prisutni otisci elektrode [8].



Slika 11 Serijsko zavarivanje [8]

Indirektno zavarivanje - Slika 12 a) do d) prikazuje brojne načine indirektnog zavarivanja. Krug sa slike 12 a) identičan je krugu na slici 11 a) za serijsko zavarivanje, osim činjenice da sadrži samo jednu elektrodu, te tako tvori samo jedan zavar, a ne dva kao što je to slučaj u serijskom krugu. Ova indirektna inačica zavarivanja može se koristiti kad nije moguće elektrodom pristupiti donjoj strani zavara, kad s jedne strane nije dopušten vidljivi otisak elektrode i kada je potreban samo jedan zavar. Ograničenja dana za serijsko zavarivanje vrijede također i za ovu konfiguraciju. Slika 12 c) prikazuje zavarivanje prirubnice. Pri tome podložni klin može biti neprovodljiv i gotovo će u potpunosti eliminirati otiske na pokaznoj strani zavara. Slika 12 d) je neizravni push-pull raspored. To je ista konfiguracija kao na slici 11 c), osim što sadrži samo jedan set nasuprotnih elektroda, čime tvori samo jedan zavar [8].



Slika 12 Indirektno zavarivanje [8]

2.1.1.2. Parametri elektrootpornog točkastog zavarivanja

Automobilske konstrukcije uključuju tisuće točkastih zavara čija izvedba mora omogućiti da sastavljeno vozilo zadovolji širok spektar ograničenja u pogledu performansi. To uključuje statička i dinamička opterećenja, te sigurnosne kriterije pri sudaru. Kako bi se to postiglo, procesni parametri elektrootpornog točkastog zavarivanja moraju biti korektno podešeni [13].

Na kvalitetu zavarenih spojeva najviše utječu [9]:

- jakost struje zavarivanja
- sila pritiska na elektrode
- vrijeme zavarivanja
- dimenzije vrhova elektroda
- vrijeme prianjanja elektroda
- vrijeme održavanja sile pritiska na elektrodama.

Osim navedenih parametara, pri elektrootpornom zavarivanju treba voditi brigu i o karakteristikama osnovnog materijala, zahtjevima u pogledu vanjskog izgleda zavarenih

spojeva, potrebnoj klasi kvalitete spoja, kvaliteti opreme i uređaja za zavarivanje te njihovoj kontroli. Jačina struje i vrijeme zavarivanja su međusobno povezani parametri, a njihov odnos može se opisati integralnim izrazom za količinu topline [9].

Količina topline koja nastaje pri elektrootpornom zavarivanju određuje se prema Jouleovom zakonu [9]:

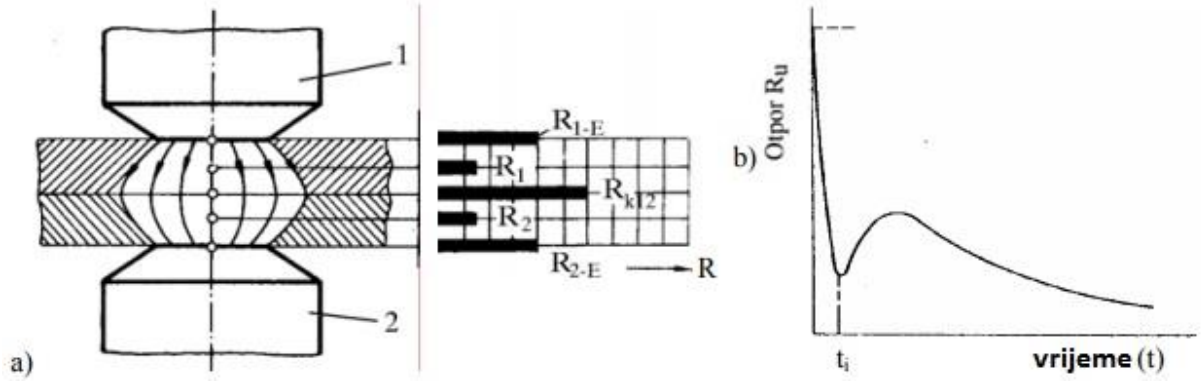
$$Q = \int R(t) \cdot I_z^2(t) \cdot dt \tag{1}$$

gdje je:

- *Iz* - struja zavarivanja [A]
- *t* - vrijeme zavarivanja [s]
- *R* - ukupni omski otpor između elektroda [Ω], koji se može definirati kao zbroj pojedinih otpora: $R = R_{1\text{-}E} + R_1 + R_{k12} + R_2 + R_{2\text{-}E.}$

pri čemu su:

- $R_{1\text{-}E}$ – otpor: materijal - gornja elektroda
- R_1 *i* R_2 – vlastiti otpori materijala
- R_{k12} – kontaktni otpor: materijal – materijal
- $R_{2\text{-}E}$ – otpor: materijal - donja elektroda.



Slika 13 Električni otpori kod točkastog zavarivanja a) početne vrijednosti; b) promjena u vremenu [9]

U početku zavarivanja kontaktni otpor R_{k12} je najveći (slika 9 a)), zbog nehomogenosti i hrapavosti dodirnih površina. Kontakt se ostvaruje na mjestu dodira, tj. lokalnih ispupčenja, odnosno struja teče samo kroz mali dio presjeka, pa se na mjestu dodira javlja veliki kontaktni otpor. Ako se istovremeno djeluje odgovarajućom silom pritiska, površina kontakta se

povećava, a kontaktni otpor značajno smanjuje. Kontaktni otpor se također značajno smanjuje s porastom temperature, što je posljedica rasta specifičnog otpora metalnog sloja uz kontakt, smanjenja otpora oksidnog sloja, povećanja broja i površine fizičkih kontakata među elektrodama, te plastične deformacije zagrijanog metala. Kontaktni otpori materijal–elektroda ($R_{1\text{-}E}$ i $R_{2\text{-}E}$) zadržavaju približno konstantne vrijednosti tijekom zavarivanja. Ti kontaktni otpori su znatno manjeg iznosa od kontaktnog otpora R_{k12} jer elektrode dobro provode električnu struju. Vlastiti otpori materijala R_1 i R_2 određuju se izrazom za otpor vodiča presjeka S (mm^2) i dužine l (mm):

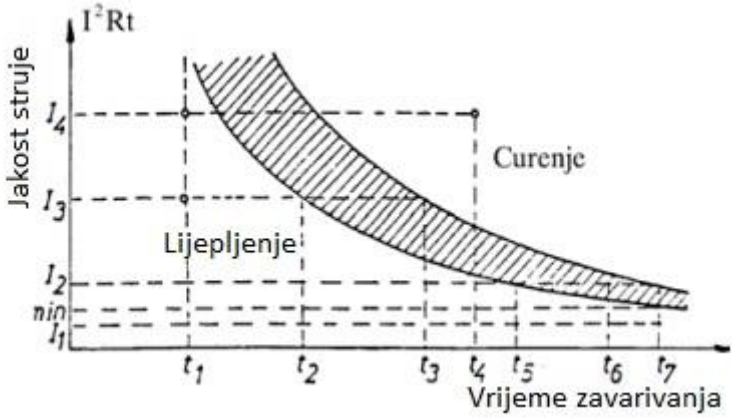
$$R = \rho \frac{l}{S} \tag{2}$$

gdje je:

- ρ - specifični električni otpor (raste sa porastom temperature) [$\Omega \cdot mm^2$ /m]
- l – dužina vodiča [mm]
- S – površina poprečnog presjeka vodiča [mm^2].

Specifični električni otpor je najvažnija termofizikalna karakteristika materijala pri elektrootpornom zavarivanju jer osigurava da se izvor topline od pretežno površinskog (u početnoj fazi zavarivanja - koja traje do trenutka vremena t_i, kada kontaktni otpori postaju zanemarivi – Slika 9 b)) promijeni u zapreminski (nakon t_i). Specifični otpor legura određen je njihovim sastavom (veći je nego kod čistih metala), termomehaničkom obradom, a u manjoj mjeri i mikrostrukturom. Kontaktni otpor, prema tome, djeluje kratkotrajno te brzo opada do zanemarive vrijednosti, kada je ukupni otpor minimalan (trenutak t_i – Slika 9 b)), dok se vlastiti otpor povećava do maksimalne vrijednosti, nakon čega se njegova vrijednost smanjuje [9].

Kako uvijek postoji minimalna jakost struje potrebna za dobivanje zavarenog spoja, vrijeme zavarivanja se ne može povećavati preko neke vrijednosti. Minimalna vrijednost jakosti struje ovisi o karakteristikama osnovnog materijala, debljini limova i stanju njihovih površina, dimenzijama vrha elektrode, sili pritiska, te o temperaturi metala na mjestu dodira površina. Vrijednosti jakosti struje i vremena zavarivanja pri kojima je moguće dobiti zavareni spoj, određene su šrafiranim dijelom na slici 10 [9].



Slika 14 Međuovisnost jakosti struje i vremena zavarivanja [9]

Zavareni spoj neće nastati ukoliko se odabrane vrijednosti jakosti struje i vremena zavarivanja nalaze lijevo od šrafiranog područja na dijagramu, nego će se u tom slučaju pojaviti efekt „naljepljivanja“ spojeva. U dijelu koji se nalazi desno od šrafiranog područja, uslijed prekomjerne topline, doći će do pojave prskanja, tj. „curenja“ ili izbacivanja rastopljenog metala, što također pogoršava kvalitetu zavarenog spoja [9].

2.1.1.3. Oprema za elektrootporno točkasto zavarivanje

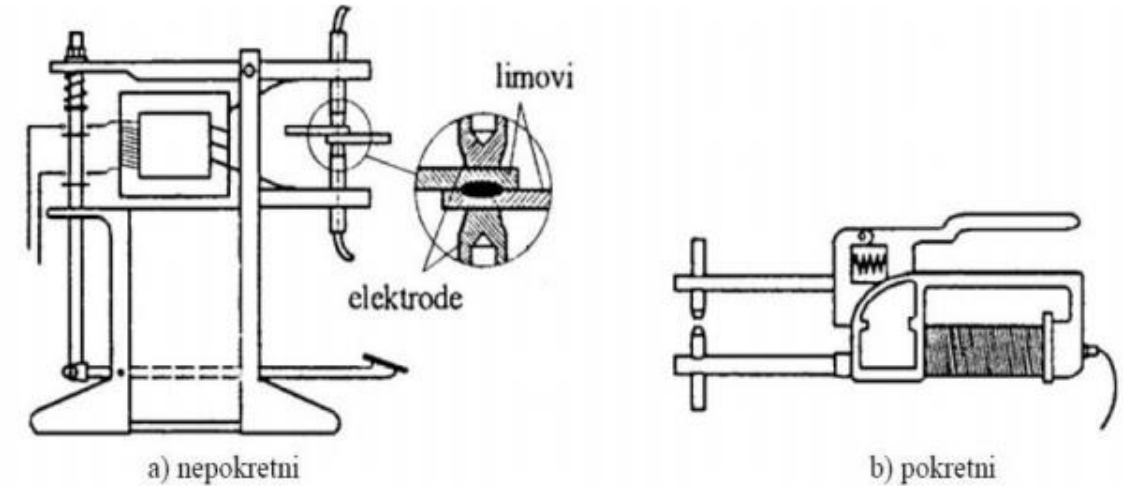
Oprema potrebna za elektrootporno točkasto zavarivanje može biti jednostavna i jeftina ili složena i skupa, ovisno o stupnju automatizacije. Specifikacije opreme za elektrootporno zavarivanje su standardizirane od strane Saveza proizvođača opreme za elektrootporno zavarivanje (eng. Resistance Welding Manufacturers Alliance), koja je pododbor Američkog društva za zavarivanje (eng. American Welding Society). Uređaji za zavarivanje sastoje se od tri glavna elementa [7]:

- električni krug: sastoji se od transformatora, prekidača te sekundarnog kruga
- upravljački krug: Pokreće struju i određuje vrijeme trajanja protoka struje, regulira struju zavarivanja
- mehanički sustav: sastoji se od okvira, fiksatora i drugih uređaja koji drže i stežu obradak te primjenjuju silu prilikom zavarivanja.

Sila pritiska može da se ostvariti [8]:

- mehanički – nogom (slika 15 a)) ili rukom (slika 15 b))
- automatski - hidraulički, električni ili pneumatski

U prvom slučaju pritisak je konstantan, dok se u ostalim slučajevima vrijednost pritiska u ciklusu zavarivanja može mijenjati [8].



Slika 15 Shematski prikaz uređaja za elektrootporno točkasto zavarivanje [8]

2.1.1.4. Elektrode za elektrootporno točkasto zavarivanje

Da bi se postigli najbolji rezultati u bilo kojoj operaciji točkastog zavarivanja, potrebno je koristiti odgovarajuće. Odabir prikladne legure od iznimne je važnosti jer može pomoći u postizanju uravnoteženije izmjene topline ili smanjenju trošenja vrha elektrode [8]. Elektrode se proizvode od legura bakra koje moraju imati što veću električnu provodljivost te što veću otpornost na trošenje pri povišenim temperaturama. Prvi zahtjev najbolje ispunjava čisti bakar, međutim njegova je tvrdoća, posebno na povišenim temperaturama, nedovoljna. Za izradu elektroda se stoga, najčešće koriste legure bakra sa kromom (0,3–1,2% Cr), kadmijem (0,7–1,3% Cd) ili legura triju elemenata Cu-Cr-Zr (0,5–1,4% Cr, 0,02–0,2% Zr). Za neke specijalne primjene koriste se volframove legure (najčešće s bakrom), koje imaju manju provodljivost od legura bakra ali znatno veću tvrdoću [9]. Promjer i oblik vrha moraju se također uzeti u obzir jer ovi čimbenici kontroliraju tlak i gustoću struje zavarivanja, koji moraju biti unutar prihvatljivog raspona za postizanje zadovoljavajućih rezultata. Pogrešna geometrija površine vrha također će rezultirati povećanim označavanjem površine [8].

Elektrode pri elektrootpornom točkastom zavarivanju obavljaju sljedeće funkcije [7]:

- provode struju zavarivanja prema izratcima
- prenose potrebnu silu na izratke u svrhu dobivanja zadovoljavajućeg zavarenog spoja

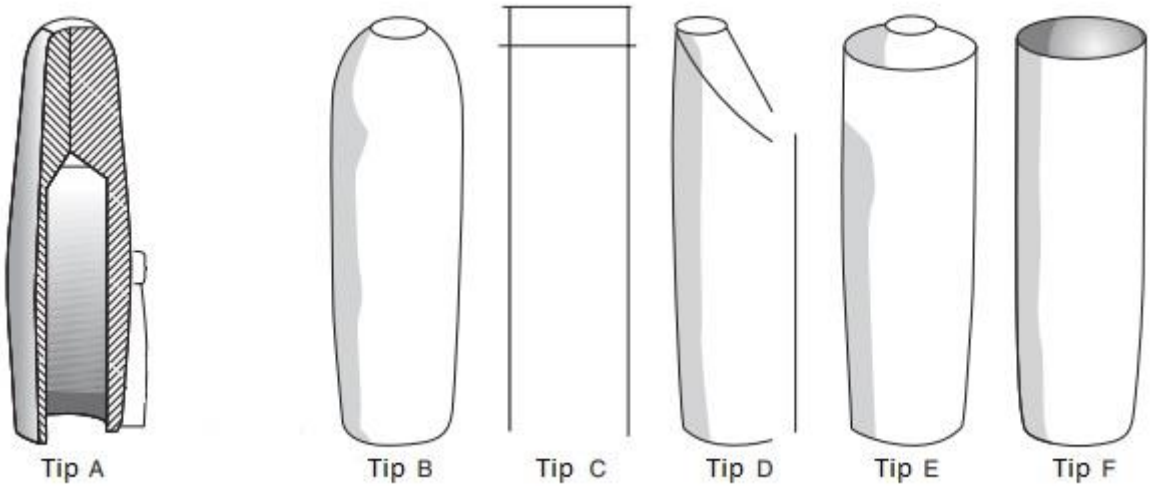
- odvode toplinu iz zone zavarivanja velikom brzinom.

Elektrode su s vremenom sklone poprimiti gljivasti oblik, što dovodi do povećanja veličine vrha elektrode. Prema trendovima u praksi automobilske industrije i međunarodnim standardima, promjer niti jednog vrha elektrode ne bi se trebao tijekom proizvodnog ciklusa povećati iznad vrijednosti koja rezultira smanjenjem većim od 30% od početnog promjera zavara. To je ekvivalent povećanju promjera elektrode na 1,3d, gdje d predstavlja standardni promjer elektrode. Kad se postigne ovaj promjer, elektrodu je potrebno zamijeniti ili vratiti u njenu izvornu veličinu i oblik. Postoji izravna veza između veličine i čvrstoće zavara. S povećanjem veličine zavara povećava se i čvrstoća. Da bi se veličina zavara održavala iznad minimalno potrebne vrijednosti (obično se uzima kao četverostruki kvadratni korijen od debljine limova koji se zavaruju), elektrode je potrebno često održavati. Uobičajena je praksa kod mnogih automobilskih tvrtki da se elektrode održavaju nakon svakih 30 procesa zavarivanja. Preventivno održavanje elektroda posebno je važno kako bi se izbjegle greške poput slabih ili pogrešno pozicioniranih zavara, nepravilog oblika zavara, nedovoljnog provara, izgaranja ili promjene boje radne površine, taljenja površine i naslaga materijala elektrode na radnoj površini [7].

Preporuča se da protok vode za hlađenje elektroda bude najmanje 4 L / min pri zavarivanju dva neprevučena čelična lima debljine do 3,0 mm. Pri zavarivanju prevučenih čelika preporučuju se veće brzine protoka rashladne vode. Temperatura ulazne vode ne smije prelaziti 20 °C, a temperatura izlazne vode ne smije prelaziti 30 °C . Da bi se održale ove razine temperature, opskrba vodom za hlađenje elektroda treba biti neovisna o krugovima vodenog hlađenja transformatora i tiristora. Za gornju i donju elektrodu također se trebaju koristiti zasebni krugovi rashladne vode. Nedovoljno hlađenje može prouzročiti razgradnju elektrode, a bakar s elektrode može se rastaliti i ući u čeličnu podlogu. Prisutnost rastaljenog bakra u dodiru sa čeličnom podlogom može prouzročiti ono što je poznato kao krhotina izazvana tekućim metalima [7].

Iako postoji mnogo vrsta elektroda, različitih veličina i oblika, koje su komercijalno dostupne, postoji šest standardnih konfiguracija vrha elektrode (slika 16). Tri najčešće korištena oblika elektrode pri točkastom zavarivanju su: ravni, konični i kupolasti. Većina postupaka zavarivanja u industriji temelji se na jednom od ova tri oblika, a ostale veličine i oblici često su potrebni da odgovaraju konturi zavarenog spoja ili da zadovoljavaju druge uvjete [8]. Elektrode s vrhovima tipa A (šiljasti) koriste se u primjenama za koje su vrhovi punog promjera preširoki.

Oblik tipa D koristi se u uglovima ili u blizini prevrnutih prirubnica. Elektroda u obliku kupole (tip B) i krnjeg konusa (tip E) najčešće se koriste u automobilskoj industriji. Sadašnji je trend uporaba elektroda u obliku kupole. Razlog popularnosti elektroda u obliku kupole je taj što imaju tendenciju brzog stabiliziranja kod zavarivanja prevučenih čelik, te stoga proizvode zavare konzistentne veličine u kratkom roku nakon stabilizacije [7].



Slika 16 Standardni oblici elektrode [7]

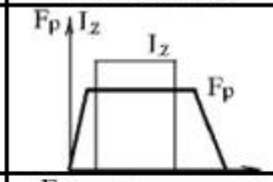
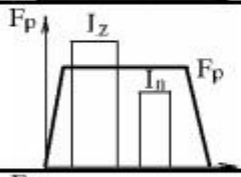
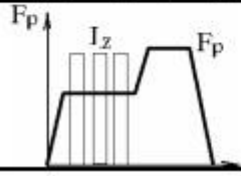
2.1.1.5. Režimi zavarivanja

Za postizanje kvalitetnog točkastog zavarenog spoja potrebno je definirati optimalni režim zavarivanja. To uključuje i izbor osnovnih parametara zavarivanja: jakosti struje I_z, vremena zavarivanja t_z i sile pritiska F_p koja se prenosi preko elektroda. Prema jakosti struje i vremenu, režimi zavarivanja mogu da se podijeliti na:

- „oštre“ - velika jakost struje, kratko vrijeme zavarivanja
- „meke“ - mala jakost struje, dugo vrijeme zavarivanja

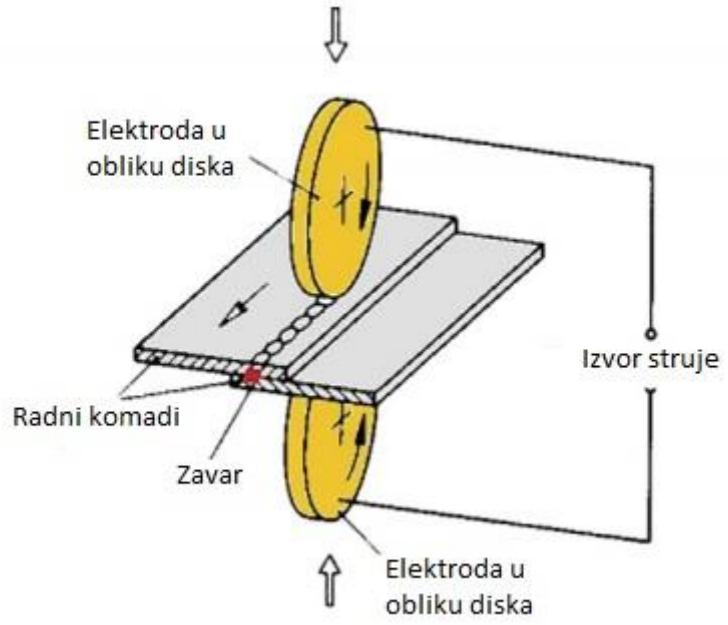
Navedeni režimi odražavaju se na oblik točkastog zavara, koji je u slučaju mekog režima gotovo eliptičan, a u slučaju oštrog režima pojavljuju se karakteristična ispupčenja po rubovima. Promjena jačine struje I_z i sile pritiska F_p tijekom zavarivanja čine ciklus zavarivanja (Tablica 1) [9].

Tablica 1 Režimi elektrootpornog točkastog zavarivanja čelika [9]

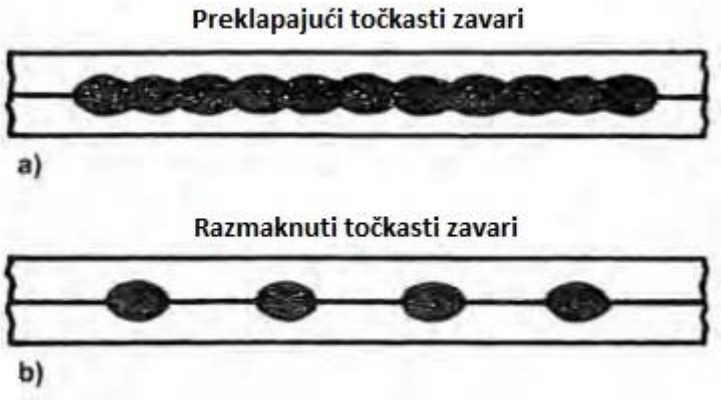
Naziv ciklusa	Shema ciklusa	Područje primjene
Jednoimpulsno točkasto zavarivanje konstantnim pritiskom elektroda.		Zavarivanje niskougljeničnih i niskolegiranih čelika debljine najviše do 6 mm.
Dvoimpulsno točkasto zavarivanje konstantnim pritiskom elektroda (zavarivanje s naknadnom termičkom obradom).		Zavarivanje zakaljivih čelika.
Višeimpulsno točkasto zavarivanje promjenjivim pritiskom elektroda.		Zavarivanje čelika debljine lima veće od 6 mm.

2.1.2. Elektrootporno šavno zavarivanje

Elektrooporno šavno zavarivanje, prema definiciji Američkog društva za zavarivanje, predstavlja proces elektrootpornog zavarivanja u kojem koalescencija nastaje uslijed topline dobivene zbog otpora protoku električne struje kroz obratke koji su međusobno pritisnuti elektrodama u obliku diska. Rezultirajući zavar je u biti niz djelomično preklopljenih točkastih zavara napravljenih postepeno duž spoja uslijed rotacije elektroda oko vlastite osi. Aparati za šavno zavarivanje sposobni su izraditi dvije vrste zavarenih spojeva. Kontinuirani, hermetički spoj (slika 18 a)) izrađuje se na preklopljenim obratcima kontinuiranom rotacijom elektroda sa strujom zavarivanja koja se isporučuje u kratkim uzastopnim impulsima kako bi se postigao učinak preklapanja točkastih zavara. Pri zavarivanju tanjih materijala, prekidi u dovodu struje nisu potrebni budući da će i neprekinuta struja zavarivanja proizvesti zadovoljavajući kontinuirani šavni zavar. Aparat za šavno zavarivanje sposoban je također proizvesti niz točkastih zavara koji se međusobno ne preklapaju (slika 18 b)). Iako se takav zavar možda ne može nazvati šavnim zavarom, ovakva operacija zavarivanja može se postići na standardnom aparatu za šavno zavarivanje i korisna je zavarivačka tehnika u aplikacijama gdje nije potrebna hermetičnost spoja [7].



Slika 17 Elektrootporno šavno zavarivanje [1]

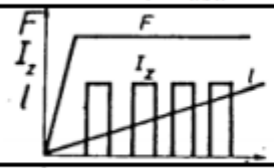
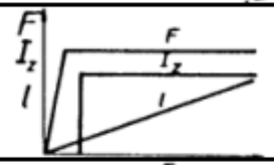
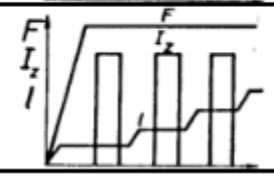


Slika 18 Vrste šavnih zavarenih spojeva [7]

Uvjeti zagrijavanja pri šavnom i točkastom zavarivanju imaju dosta toga zajedničkog, kao što je recimo utjecaj vremenskog intervala protoka struje i sile pritiska na karakteristike zavarenog spoja, dok su razlike posljedica kretanja radnog komada u odnosu na elektrodu. Otpor pokretnog kontakta je veći od otpora nepokretnog kontakta, što dovodi do intenzivnog izdvajanja topline kod pokretnog kontakta, a pri neprekidnom zavarivanju do pregrijavanja; površina radnog komada se tali, a na elektrodu se naljepljuju čestice materijala zavara. Zbog oštećenja radnog komada i ubrzanog trošenja elektroda neprekidno šavno zavarivanje se rijetko

primjenjuje. Pauze kod zavarivanja s prekidima poboljšavaju hlađenje elektroda i smanjuju njihovo pregrijavanje. Uređaji za šavno zavarivanje su slični uređajima za točkasto zavarivanje, s tim da imaju veću snagu zbog izraženije pojave skretanja struje i jer moraju omogućiti kretanje (rotaciju) elektroda. Materijal elektroda je praktički isti kao i kod točkastog zavarivanja. Tablica 2 daje pregled osnovnih režima šavnog zavarivanja ugljičnih i legiranih čelika različitih debljine te legura aluminija [9].

Tablica 2 Režimi elektrootpornog šavnog zavarivanja [9]

Naziv ciklusa	Shema ciklusa	Područje primjene
Prekidno (impulsno) uključivanje struje pri neprekidnoj rotaciji elektroda		Zavarivanje niskougljičnih i nehrđajućih čelika debljine lima do 3 mm
Neprekidno uključena struja pri neprekidnoj rotaciji elektroda		Zavarivanje manje odgovornih konstrukcija od niskougljičnih čelika debljine lima do 1 mm
Uključivanje struje pri nepokretnim elektrodama. Rotacija elektroda pri isključenoj struji		Zavarivanje aluminijskih legura debljine lima do 3 mm

2.1.2.1. Primjena elektrootpornog šavnog zavarivanja

Elektrootporno šavno zavarivanje popularan je postupak spajanja metala u automobilskoj industriji, ali i ostalim industrijama gdje se zahtijevaju hermetički izvedeni zavari. Najčešću primjenu u automobilskoj industriji pronalazi u proizvodnji katalizatora, spremnika za gorivo, ispušnih lonaca te krovnih spojeva, međutim koristi se i pri izradi drugih dijelova (slika 19). Izuzev automobilske industrije, često se koristi i pri proizvodnji izmjenjivača topline, vodenih spremnika te raznih limenki.



Slika 19 Pomoćni okvir stražnje osovine BMW-ove serije 7 od aluminijske legure zavarena elektrootpornim šavnim zavarivanjem [14]

2.1.2.2. Parametri elektrootpornog šavnog zavarivanja

Osnovni parametri šavnog zavarivanja su [9]:

- sila pritiska
- jačina i vrijeme djelovanja struje
- promjer i korak točaka
- brzina zavarivanja.

Sila pritiska te jačina i vrijeme djelovanja struje su povezani na gotovo isti način kao i kod točkastog zavarivanja. Korak točaka ovisi o režimu zavarivanja i o debljini materijala. Prekomjerno preklapanje točaka je nepoželjno iz razloga što smanjuje čvrstoću spoja. Promjer pojedinih točaka ovisi o debljini materijala, režimu zavarivanja te profilu radnog dijela elektroda [9].

2.2. MIG / MAG zavarivanje

MIG ili Metal Inert Gas i MAG ili Metal Active Gas postupci zavarivanja uvrštavaju se u GMAW tj. Gas Metal Arc Welding postupke u kojima djelovanjem topline električnog luka uspostavljenog između kosnstantno dobavljane žice kao dodatnog materijala i radnog komada dolazi do taljenja metala. Procesi se odvijaju u zaštitnoj atmosferi inertnih ili aktivnih plinova, tj. plinskih mješavina koje izlaze kroz sapnicu pod određenim tlakom [15]. Kao što i sam naziv kaže, u slučaju kad se kao zaštitni plinovi koriste neutralni ili inertni plinovi (npr. argon, helij ili mješavina plinova) ovaj postupak se naziva MIG, a kada se kao zaštitni plin koriste aktivni plinovi (najčešće CO2 i njegove mješavine s drugim plinovima) postupak se naziva MAG [16]. Zaštitni plin ili mješavina plinova štiti električni luk i rastaljeni materijal zavara od utjecaja atmosfere [7]. MAG postupak zavarivanja dijeli se na MAGC (eng. Metal Active Gas Carbon) i MAGM (eng. Metal Active Gas Mixture) postupke. Kod MAGC se kao zaštitni plin koristi čisti CO2, dok se kod MAGM postupka koriste plinske mješavine sa značajnim udjelom aktivnog plina [15]. Ovaj se postupak najčešće koristi za zavarivanje obojenih metala, visokolegiranih čelika i drugih metala koji imaju tendenciju ka vezanju sa kisikom, kao i za zavarivanje tankih limova [16]. Slika 20 prikazuje skicu procesa zavarivanja s presjekom pištolja.



Slika 20 Presjek pištolja pri MIG/MAG zavarivanju [15]

2.2.1. Zaštitni plinovi

Zaštitnu atmosferu pri zavarivanju mogu činiti pojedinačni plinovi ili dvokomponentne, trokomponentne te, ponekad i četverokomponentne zaštitne plinske mješavine u čiji sastav mogu biti uključene komponente poput ugljičnog dioksida, dušika, argona, helija, kisika i vodika. Kisik, dušik i vodik mogu se koristiti samo u plinskim mješavinama i to u vrlo malim postotcima, u suprotnom bi njihovo prisustvo donijelo više negativnih nego pozitivnih utjecaja na sami zavar. Argon, helij i ugljični diokisid se, međutim, mogu koristiti kao samostalni zaštitni plinovi [15]. Svrha zaštitnih plinova je [17]:

- zaštita metala zavara od negativnog utjecaja atmosfere (kisika i dušika)
- provođenje električne struje te emisija topline ka žici i radnom komadu
- omogućavanje postizanja potrebne geometrije zavara
- kontrola vrste transfera metala sa žice u materijal

2.2.1.1. Argon

Argon je neotrovan i nezapaljiv jednoatomni kemijski inertni plin bez boje, okusa i mirisa te nije topiv u talini. Argon je oko 1,4 puta gušći od zraka, čini manje od 1 % Zemljine atmosfere, a dobiva se pomoću procesa ukapljivanja i destilacije zraka. U današnje vrijeme argon je najčešće primjenjivani inertni plin. Iznimno povoljnim za zaštitu od atmosferske kontaminacije čine ga velika gustoća i svojstvo inertnosti, stoga se intenzivno koristi kao zaštitni plin u zavarivanju željeznih i neželjeznih metala. Može se upotrebljavati samostalno ili u varijanti s drugim plinovima zbog postizanja veće stabilnosti električnog luka. Primjena argona i njegovih mješavina u svrhu zaštitne atmosfere dozvoljena je u gotovo svim elektrolučnim procesima zavarivanja ne bi li se postigao kvalitetan zavar sa traženim mehaničkim svojstvima. Od neželjeznih metala, primjenjuje se za zavarivanje bakra, nikla, aluminija, titana, magnezijskih legura te cirkonija. Doprinosi, također, uspostavljanju i stabilnosti električnog luka uz veliku gustoću struje zahvaljujući niskoj energiji ionizacije, to jest energija luka fokusirana je na malom središnjem području kupke zavara. Plinske mješavine s visokim udjelima argona podržavaju visokoučinsko zavarivanje te sve konvencionalne načine prijenosa metala [15].

2.2.1.2. Helij

Helij je jednoatomni inertni plin male gustoće (približno 14 % gustoće zraka) i atomske mase. S obzirom da mu je cijena višestruko veća od cijene argona, u Europi se gotovo i ne koristi. Dobiva se separacijom iz prirodnog plina u kojem se smatra nečistoćom. Korištenjem helija u zavarivanju moguće je postići veliki unos topline čime se omogućava veća žitkost taline, brzina zavarivanja te dubina provara. Odlikuje ga također i veća toplinska vodljivost od argonove te širi stup električnog luka. Iznimno je koristan pri zavarivanju magnezija i aluminija koji imaju nisku toleranciju na uključke oksida, a primjenjuje se i u plinskim mješavinama kod zavarivanja korozijski postojanih čelika. Najviše doprinosi količini depozita kod zavarivanja visokim gustoćama struje uslijed izrazite stabilnosti električnog luka [15].

2.2.1.3. Ugljikov dioksid

Ugljikov dioksid sastoji se od dva kemijska elementa: ugljika i kisika i, iako njegova kemijska reaktivnost pri sobnoj temperaturi ne dolazi do izražaja, u uvjetima zavarivanja iznimno je reaktivan. Kod MAG postupka molekula CO_2, potaknuta velikom energijom plazme, raspada se u anodnom području luka na kisik i ugljikov monoksid. Slobodni elementi koji nastaju disocijacijom miješaju se s talinom ili se rekombiniraju u hladnijem, katodnom području kako bi ponovno nastao CO_2 , što biva popraćeno velikim oslabađanjem energije, a kao posljedicu ima formiranje dubljeg i šireg zavara. Kemijski elementi koji putuju lukom mogu reagirati sa slobodnim kisikom koji je nastao disocijacijom, te tako tvoriti okside. Ta pojava se sprječava dodavanjem dezoksidanata poput titana, silicija, i mangana u žicu dodatnog materijala. Svrha navedenih elemenata je da vežu kisik na sebe i potom se izlučuju u obliku troske na vrh taline. Veće količine ugljičnog dioksida znače ujedno i veći oksidacijski potencijal, a samim time i više troske na površini zavara. U suprotnom slučaju zavar će imati veći stupanj legiranosti silicijem, manganom i sličnim elementima. CO_2 ima nisku cijenu po jedinici volumena, lako je nabavljiv, a posebice je pogodan za MAG zavarivanje kratkim spojevima. Niska cijena ne garantira ekonomsku isplativost jer treba uzeti u obzir i otpadne plinove, manju učinkovitost deponiranja metala, prskanje te uklanjanje tragova prskanja kao faktore koji, u konačnici, povećavaju cijenu zavara [15].

2.2.1.4. Kisik

Kisik je plin bez boje i mirisa koji zauzima 21% atmosfere i 50% zemljine kore u volumnim postotcima. Neotrovan je i nezapaljiv, ali izrazito podržava gorenje. Reagira sa gotovo svim elementima osim rijetkih i inertnih plinova, a dobiva se ukapljivanjem iz zraka. Prethodno spomenuta svojstva čine ga idealnim plinom za povećanje temperature plamena kod plinskog zavarivanja i rezanja. Korištenje kisika pri zavarivanju povećava stabilnost električnog luka i žitkost taline, a smanjuje površinsku napetost. Dodavanjem od 1 do 5% O_2 moguće je postići smanjenje promjera kapljica dodanog metala i ubrzati njihovo stvaranje, a poboljšava se također i spajanje na rubovima te je površina zavara ravnija. Kod MAG postupaka zavarivanja kisik se često dodaje argonu sa svrhom povećanja stabilnosti luka te zbog doprinosa kvašenju i obliku šava pri zavarivanju niskougljičnih i korozijski postojanih čelika. Upotrebljava se također za povećanje brzina kod rezanja plazmom i laserom. Kisik se kao zaštitni plin koristi samo u plinskim mješavinama i to u malim postotcima [15].

2.2.1.5. Vodik

Vodik je najlakši postojeći plin (samo 7% težine zraka) i kemijski je aktivan. Iznimno je zapaljiv (temperatura zapaljenja iznosi 560°C), te pri određenim koncentracijama u mješavini sa zrakom, kisikom i drugim oksidacijskim sredstvima može biti eksplozivan. U zaštitnim plinskim mješavinama vodik se koristi u vrlo malim udjelima (otprilike 1 do 5 %). Njegova visoka toplinska vodljivost omogućuje nastajanje žitke taline što pozitivno utječe na kvašenje rubova i postizanje većih brzina zavarivanja. Često se dodaje argonu u svrhu zaštite pri zavarivanju niklovih legura i korozijski postojanih čelika. U malim količinama primjenjiv je također i kao zaštita kod plazma rezanja i nekih aplikacija zavarivanja [15].

2.2.1.6. Dušik

Dušik je atmosferski plin bez mirisa, boje i okusa čiji sadržaj u zraku iznosi do 78 %. Lakši je od zraka, ne izgara i ne podržava gorenje, a dobiva se kao proizvod procesa ukapljivanja zraka. Kemijski je neaktivan, ali pri temperaturama električnog luka reagira s metalima poput magnezija, aluminija i titana. Zaštitni plinovi sa sadržajem dušika preporučuju se pri zavarivanju ugljičnih čelika. Nerijetko se primjenjuje za zaštitu korijena zavara od atmosferskih onečišćenja. Ako se primjenjuje pri zavarivanju korozijski postojanih čelika,

potrebna je opreznost jer dušik može reducirati količinu ferita, što je nepovoljno. Kod MIG i TIG postupaka za zavarivanje dupleks korozijski postojanih čelika argonu se dodaje do 3% N_2. Dušik je pronašao široku primjenu i kod rezanja plazmom i laserom [15].

Tablica 3 Utjecaj vrste zaštitnog plina na tehnološke parametre procesa [15]

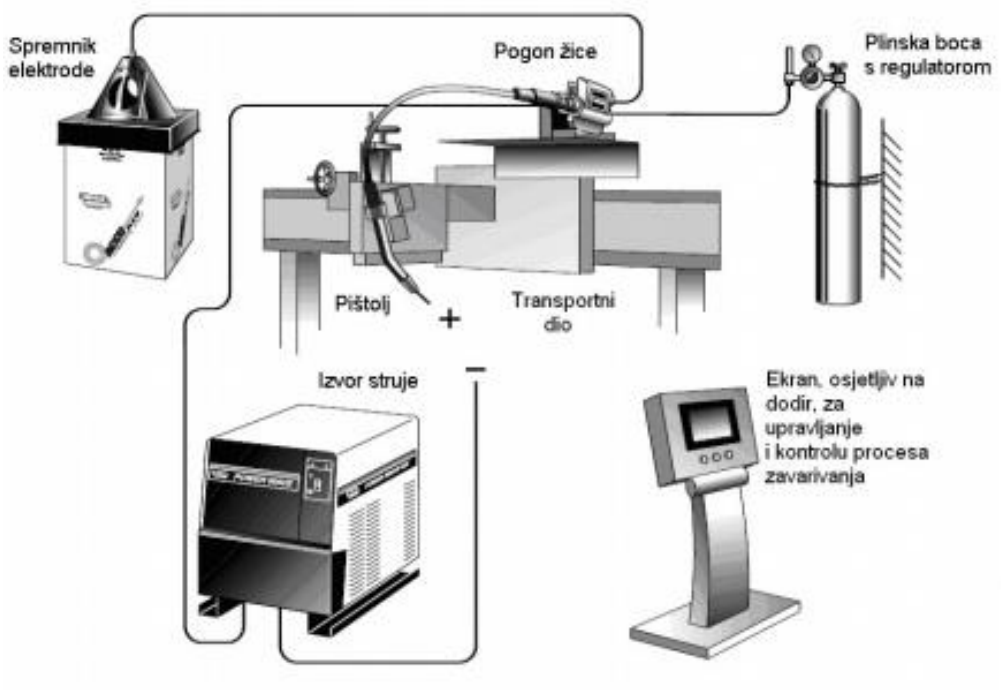
Vrsta zaštitnog plina	Reakcija plina s metalom	Penetracija	Značajke električnog luka		
			Napon	Stabilnost	Prijenos metala
Ar	inertna	uska, duboka	niski	dobra	zadovoljavajući (za MIG)
$Ar + O_2$	oksidirajuća	uska, duboka	niski	dobra	dobar
$Ar + CO_2$	malo oksidirajuća do oksidirajuća	lećasta (široka), vrlo duboka	niski do srednji	dobra	dobar
$Ar + CO_2 + O_2$	oksidirajuća	lećasta (široka), vrlo duboka	srednji	dobar	dobra
$Ar + H_2$	reducirajuća	vrlo duboka	srednji	dobra	-
$Ar + N_2$	kod čelika se stvaraju nitridi i dolazi do poroznosti	lećasta (široka), plitka	visoki	srednja do loša	zadovoljavsjući do loši
Ar+He	inertna	lećasta (široka), vrlo duboka	srednji	vrlo dobra	vrlo dobar
He	inertna	lećasta (široka)	visoki	dobra	zadovoljavajući
$He + Ar + CO_2 + H_2$	inertna	lećasta (široka)	srednji	dobra	dobar
CO_2	ponekad oksidirajuća	lećasta (široka), vrlo duboka	srednji	dobra	dobar, ponekad pojačano štrcanje
$CO_2 + O_2$	oksidirajuća	lećasta (široka), vrlo duboka	visoki	srednja do loša	zadovoljavajući
N_2	kod čelika se stvaraju nitridi i dolazi do poroznosti	lećasta, široka	visoki	vrlo loša	vrlo loš
$N_2 + H_2$	reducirajuća	-	-	-	koristi se za zaštitu korijena kod zavarivanja cjevovoda

2.2.2. Oprema za MIG/MAG zavarivanje

Osnovnu opremu automatskog industrijskog sustava za MIG/MAG zavarivanje čine (Slika 21) [15]:

- izvor struje
- oprema za dovod žice (bubanj za namatanje, permanentni magnetni motor i specijalni pogonski valjci)
- plinska boca s pokazateljem tlaka i regulatorom protoka zaštitnog plina
- spremnik sredstva za hlađenje pištolja

- izolirani polikabel (žica dodatnog materijala, bakreni vodič za struju, crijevo za zaštitni plin, crijevo za rashladno sredstvo)
- pištolj za zavarivanje
- sustav za automatsko pomjeranje pištolja
- zaštitna oprema za djelatnike.



Slika 21 Automatski MIG/MAG sustav za zavarivanje [15]

2.2.3. Parametri MIG/MAG zavarivanja

Varijable MIG/MAG postupaka zavarivanja koje direktno utječu na penetraciju i oblik zavara, stabilnost luka, produktivnost i ukupnu kvalitetu zavarivanja su [7]:

- potrošni materijal: sastav zaštitnog plina, tip i promjer elektrode, drugi fizikalni atributi
- postavke opreme: količinski protok zaštitnog plina, brzina dodavanja žice, polaritet, napon, način prijenosa metala
- manipulacija s pištoljem: udaljenost elektrode i radnog komada, brzina i kut zavarivanja, njihanje, položaj zavarivanja
- zavisne varijable: struja zavarivanja, način prijenosa metala.

Poznavanje i kontrola ovih varijabli presudni su za dosljednu proizvodnju zavara zadovoljavajuće kvalitete. Budući da nisu potpuno neovisne jedne o drugima, promjena jedne varijable obično zahtijeva promjenu jedne ili više drugih u svrhu postizanja željenih rezultata. Izbor je dodatno otežan činjenicom da su optimalne postavke specifične ovisno o namjeni, uključujući vrstu i debljinu osnovnog metala, geometriju spoja, eksploatacijske zahtjeve za izvedbu zavara itd. Niti jedan skup parametara ne daje optimalne rezultate za svaku primjenu. Postoje, također, i dodatni parametri koji se odnose na određene varijacije MIG/ MAG procesa [7].



Slika 22 MAG (CMT) zavarivanje karoserije Volvo V70 automobila [18]

2.3. TIG zavarivanje

TIG postupak zavarivanja temelji se na uspostavljanju i održavanju električnog luka između radnog komada i volframove netaljive elektrode uz zaštitu inertnog ili neutralnog plina, to jest odgovarajuće mješavine plinova. Razvijen je u svrhu zavarivanja magnezija i njegovih legura, no danas se upotrebljava i za zavarivanje različitih metala poput titana, aluminija, nehrđajućih čelika, tankih čeličnih limova i drugih neželjeznih metala i legura. Pri zavarivanju magnezija, aluminija te njihovih legura koristi se izmjenična struja, a pri zavarivanju ostalih metala se koristi istosmjerna struja s minus polom na elektrodi. Kao zaštitni plin pri TIG zavarivanju koristi se argon ili helij čija je svrha stvaranje zaštitne atmosfere koja se može lako ionizirati te štititi vrh elektrode i talinu od kontaminacije kisikom i drugim plinovima iz okoline. Postupak je idealan za visoko kvalitetno i precizno zavarivanje zahvaljujući malom intenzivnom električnom luku nastalom iz usmjerene elektrode. Toplina električnog luka tali i spaja rubne dijelove osnovnog metala, a po potrebi se sa strane dovodi i dodatni materijal. Iako ovaj postupak karakteriziraju veliki troškovi u pogledu opreme i potrošnog materijala te

relativno male brzine zavarivanja (10 – 15 cm u min), svoju primjenu u autoindustriji pronašao je zahvaljujući stabilnom luku koji omogućuje visokokvalitetno zavarivanje i postizanje homogenih zavarenih spojeva dobre estetike i dobrih mehaničkih svojstava te izrazitoj pravilnosti depozita i mogućnosti prijenosa dodanog materijala u kupku bez značajnog gubitka elemenata od kojih se sastoji. TIG zavarivanje se može izvesti u svim radnim položajima te omogućuje zavarivanje radnih komada čija debljina iznosi i manje od jednog milimetra [16].

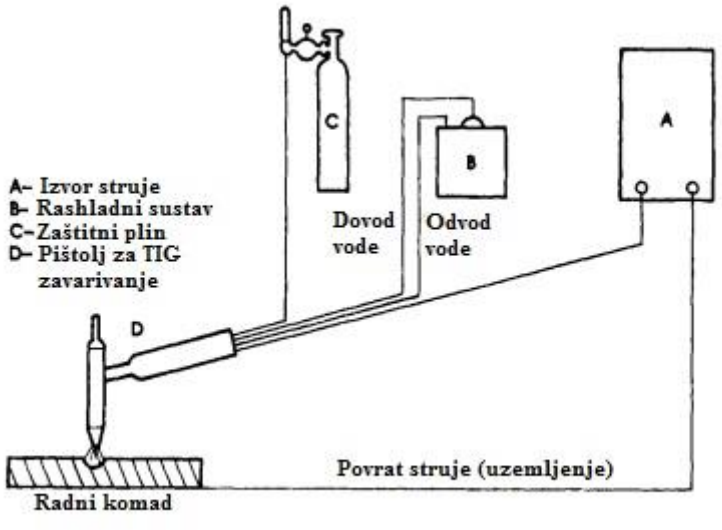


Slika 23 Presjek pištolja pri TIG zavarivanju [16]

2.3.1. Oprema za TIG zavarivanje

Osnovni zahtjevi za opremu kod svih TIG postupaka zavarivanja vrlo su slični, a sastoje se od (Slika 24) [19]:

- izvora napajanja
- ručnog ili mehanički upravljanog pištolja za zavarivanje
- spremnika inertnog zaštitnog plina pod tlakom
- kablova odgovarajuće veličine za provođenje struje zavarivanja od izvora napajanja do pištolja za zavarivanje.



Slika 24 Osnova oprema za TIG zavarivanje [19]

2.3.2. Parametri TIG zavarivanja

Parametri koji utječu na kvalitetu i ishod postupka TIG zavarivanja navedeni su u nastavku [20].

2.3.2.1. Struja zavarivanja

Veći iznosi struje pri TIG zavarivanju mogu dovesti do prskanja i oštećenja radnog komada. S druge strane, niže vrijednosti struje pri TIG zavarivanju mogu dovesti do slijepljivanja dodatnog materijala. Ponekad pri nižoj struji zavarivanja veće područje može biti zahvaćeno toplinom jer se za iste količine depozita dodatnog materijala visoke temperature moraju primjenjivati dulji vremenski period. U načinu rada sa fiksnom strujom, uređaj će automatski mijenjati napon kako bi se održala konstantna struja luka [20].

2.3.2.2. Napon zavarivanja

Napon za zavarivanje može biti konstantan ili podesiv, ovisno o opremi za TIG zavarivanje. Visok početni napon omogućuje lako pokretanje luka i veći raspon udaljenosti između vrha elektrode i radnog komada. Previsok napon može dovesti do velikih promjena u kvaliteti zavarivanja [20].

2.3.2.3. Inertni plinovi

Izbor zaštitnog plina ovisi o metalu radnih komada i utjecajima na cijenu zavarivanja, temperaturu zavarivanja, stabilnost luka, brzinu zavarivanja, rasprskavanje, životni vijek

elektrode itd. Utječe također na dubinu penetracije i profil zavara, poroznost, otpornost na koroziju te čvrstoću, tvrdoću i lomljivost materijala zavara. Argon ili helij najčešće su korišteni plinovi pri TIG zavarivanju. Za zavarivanje izuzetno tankog materijala koristi se čisti argon. Argon općenito pruža luk koji djeluje uglađenije i tiše. Penetracija je također znatno manja u slučaju kada se koristi argon umjesto helija. Iz navedenih razloga argon se koristi za većinu primjena, osim u slučajevima gdje je potrebna veća toplina i penetracija, odnosno pri zavarivanju debljih metala visoke toplinske vodljivosti. Takvi metali su primjerice aluminij i bakar (zbog svoje visoke toplinske vodljivosti) i primjena helija pri zavarivanju njihovih relativno debelih profila od iznimne je koristi. Čisti argon može se koristiti za zavarivanje konstrukcijskih čelika, niskolegiranih čelika, nehrđajućih čelika, aluminija, bakra, titana i magnezija. Smjesa vodika i argona koristi se za zavarivanje nekih vrsta nehrđajućih čelika i legura nikla. Čisti helij može se koristiti za aluminij i bakar, a smjese helija i argona mogu se koristiti za niskolegirane čelike, aluminij i bakar [20].

2.3.2.4. Brzina zavarivanja

Brzina zavarivanja je važan parametar pri TIG zavarivanju. Ako se poveća brzina zavarivanja, smanjuje se ulazna snaga ili toplina po jedinici duljine zavara, pa se posljedično smanjuje i penetracija zavara. Brzinom zavarivanja ili brzinom kretanja prvenstveno se kontrolira penetracija i veličina zavara. Prevelika brzina zavarivanja smanjuje kvašenje, povećava tendenciju nastajanja neprovara, poroznosti i neravnomjernih oblika zavara, dok sporija brzina zavarivanja smanjuje sklonost ka poroznosti [20].

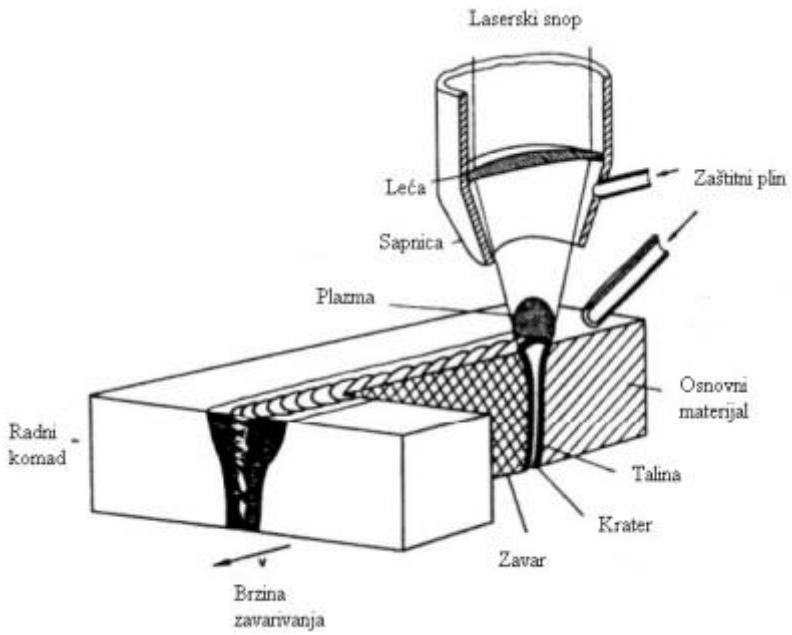
Slika 25 prikazuje Valentino Balboni ispušni sustav dobiven zavarivanjem titana TIG postupkom.



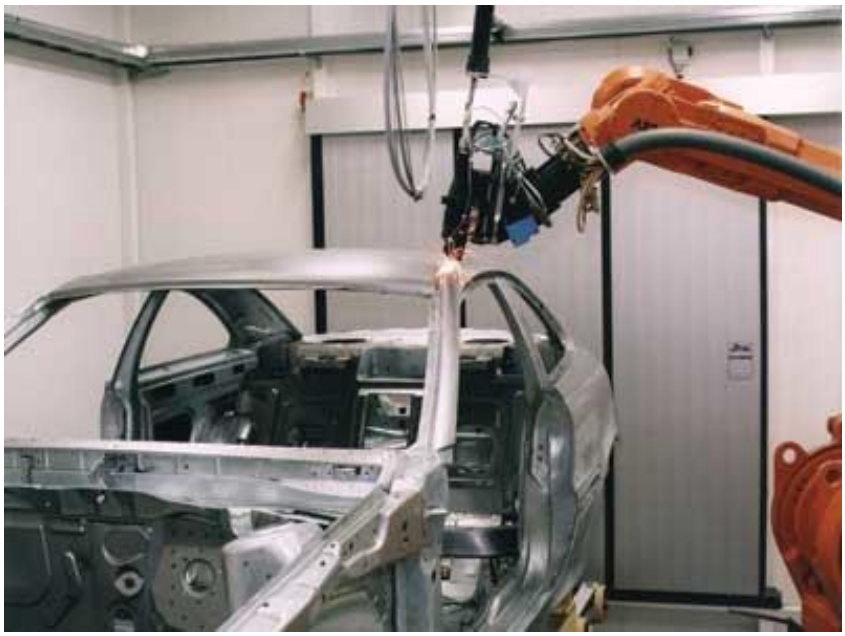
Slika 25 Valentino Balboni ispušni sustav za Lamborghini Aventador SVJ [21]

2.4. Lasersko zavarivanje

Zavarivanje laserskim snopom definirano je kao postupak zavarivanja pri kojem dolazi do taljenja metala uslijed topline uzrokovane primjenom koncentrirane, monokromatske, koherentne svjetlosne zrake usmjerene prema površinama koje se spajaju. Laserska zraka može se usmjeriti na određenu točku na površini radnog komada što rezultira velikim zračenjem čiju energiju komad apsorbira i transformira u toplinu. Povećavajući intenzitet snopa, povećava se i gustoća energije u toj točki, a materijal se zagrijava dok ne dosegne temperaturu taljenja te na taj način dolazi do zavarivanja taljenjem [22]. Lasersko zavarivanje odvija se u atmosferi zaštitnog plina (He, Ar, CO_2, N_2, plinske mješavine). Bez obzira što ovaj postupak karakteriziraju visoka cijena te precizno vođenje laserskog snopa uz preciznu pripremu radnog komada, ovaj postupak je redovito primjenjivan u autoindustriji zbog niza prednosti nad ostalim postupcima zavarivanja kao što su gotovo zanemariva zona utjecaja topline na okolni metal, velike brzine rada (>1 m/min), visokokvalitetni zavari i jednostavna automatizacija procesa. Najčešće se zavaruju zupčanici, dijelovi motora, kardanska vratila, dijelovi prijenosnih mehanizama, kočioni cilindri te limovi (pocinčani ili duboko vučeni) [23]. Iako je osnovna snaga lasera ključna, interaktivni mehanizmi između snopa i radnog komada uglavnom ovise o gustoći snage snopa (snaga po jedinici površine).



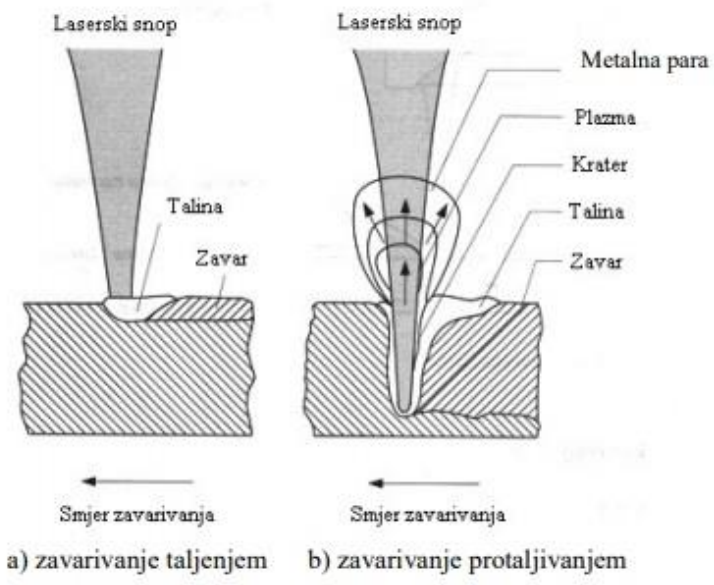
Slika 26 Shematski prikaz laserskog zavarivanja [23]



Slika 27 Lasersko zavarivanje karoserije Volvo C70 automobila [24]

Ovisno o gustoći snage laserske zrake na površini spoja razlikujemo dva različita načina zavarivanja (Slika 28) [22]:

- zavarivanje taljenjem
- zavarivanje protaljivanjem.



Slika 28 Tehnike zavarivanja laserom [23]

Zavarivanje taljenjem (Slika 28 a)) podrazumijeva apsorpciju energije laserske zrake površinom materijala i posljedični prijenos energije u okolni materijal. Ovaj način zavarivanja obično se odnosi na nisku gustoću energije koja je najčešće niža od 10^6 W mm^{-2}, odnosno na mali intenzitet snopa ili veliki promjer točke obasjane snopom. Zavari izvedeni laserskim zavarivanjem taljenjem odlikuju se malim omjerom dubine i širine, koji je potreban u primjenama s ograničenim uvjetima penetracije. Ovaj je način dobar za spajanje tankih dijelova (0,025–1,5 mm), za izradu finih zavara pri maloj snazi ili za spajanje debljih dijelova (do 3 mm) koristeći veću snagu [22].

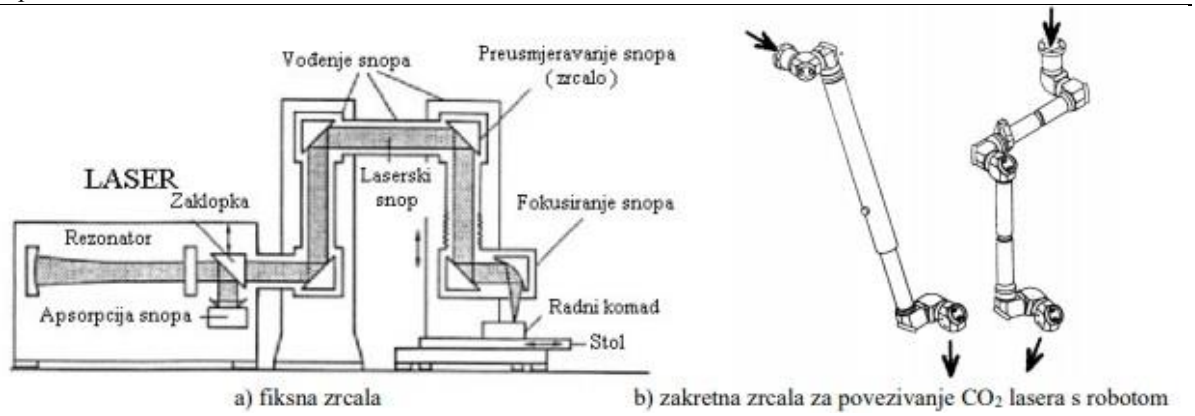
U zavarivanju protaljivanjem (Slika 28 b)) snop je fokusiran na površinu radnog predmeta s ciljem da generira energiju visoke gustoće koja uzrokuje isparavanje materijala. Uska i duboka ključanica nastaje uslijed višestrukog unutarnjeg odbijanja snopa, a oko nje dolazi do taljenja metala [22]. Pomicanjem toplinskog izvora krater se popunjava talinom te iza snopa dolazi do njezinog skrućivanja i nastajanja zavarenog spoja. Zbog zahtjeva za točnom brzinom zavarivanja kao i mjera sigurnosti, potrebna je automatizacija procesa [23]. Zavarivanje protaljivanjem prigodno je za zavarivanje debljih sekcija koje zahtijevaju duboku penetraciju i najčešće je korišten način laserskog zavarivanja [22].

2.4.1. Oprema za lasersko zavarivanje

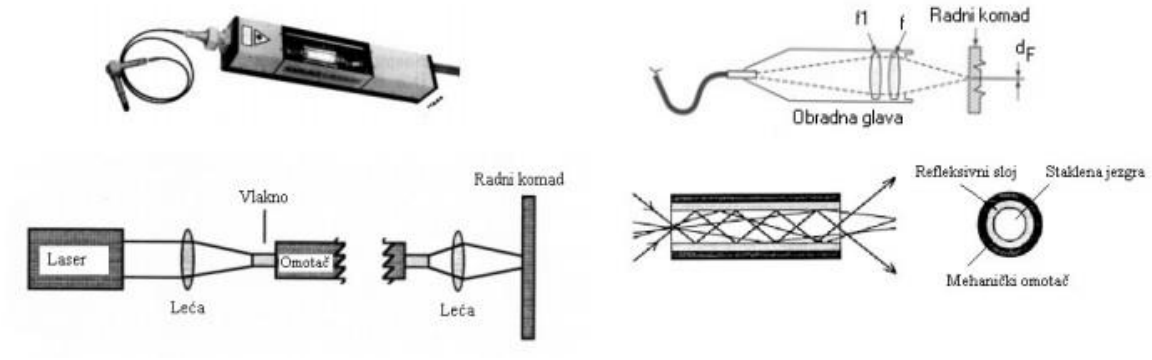
Za lasersko se zavarivanje upotrebljavaju CO_2 i Nd:YAG laseri, a ime su dobili prema vrsti aktivnog laserskog materijala u kojem se događa pojačanje svjetlosti. Njihova osnovna oprema sastoji se od [23] (Slika 29 i 30):

- rezonatora
- sustava vođenja laserskog snopa – zrcala i leće (CO2 i Nd:YAG) ili optička vlakna (Nd:YAG)
- obradne glave – sadrži optiku za fokusiranje snopa.

Relativno gibanje između radnog komada i laserskog snopa mora biti NC upravljano, pri čemu se može gibati radni komad, snop ili oboje. Ruka robota, na kojoj je pričvršćena obradna glava obavlja gibanje po zadanoj putanji, ostvarujući zavareni spoj. Roboti, te obradni sustavi s pet stupnjeva slobode gibanja koriste se za 3-D obradu [23].



Slika 29 Vođenje laserskog snopa pomoću zrcala kod CO2 lasera [23]



Slika 30 Vođenje laserskog snopa optičkim kabelom kod Nd:YAG lasera [23]

2.4.2. Parametri laserskog zavarivanja

Prikladno lasersko zavarivanje zahtijeva optimizaciju različitih parametara zavarivanja. Pored vrste lasera, postupak laserskog zavarivanja ovisi o različitim parametrima koji se mogu klasificirati u parametre laserske obrade, faktore geometrije spoja i uvjete zaštitnog plina. Osnovni parametri laserskog zavarivanja su [23]:

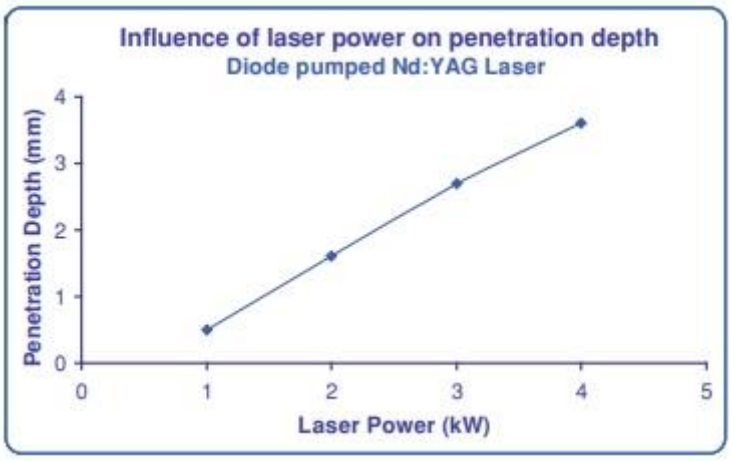
- snaga lasera
- brzina zavarivanja
- promjer sapnice (5 – 10 mm)
- udaljenost sapnice od radnog komada (5 – 12 mm)
- promjer žarišta
- položaj žarišta u odnosu na površinu materijala (iznad, ispod ili na površini)

- zaštitni plin (vrsta, protok, dovod – koaksijalno ili sa strane).

Utjecaj nekih važnih parametara na kvalitetu zavara ukratko je opisan u nastavku.

2.4.2.1. Snaga lasera

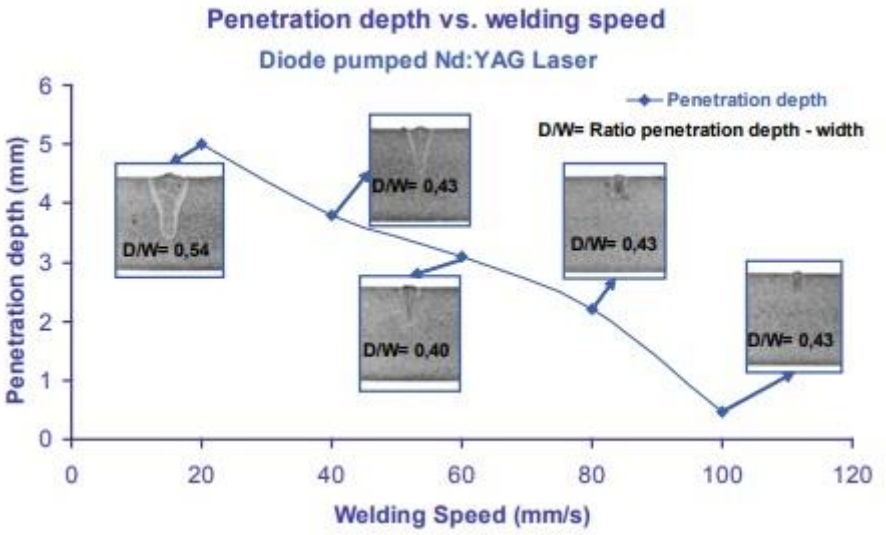
Povećanje snage lasera rezultira povećanom dubinom penetracije. Slika 31 prikazuje linearni prirast dubine penetracije sa porastom snage lasera [22].



Slika 31 Odnos snage lasera i dubine penetracije [22]

2.4.2.2. Brzina zavarivanja

Povećana penetracija može se postići i smanjenjem brzine zavarivanja, ali u ovom slučaju ponašanje je relativno drugačije, kao što je i prikazano na slici 32. U početku (od 100 do 60 mm/s), dubina penetracije ubrzano se povećava sa smanjenjem brzine zavarivanja, no, pri nižim brzinama zavarivanja, penetracija se ne povećava jednakim intenzitetom [22].



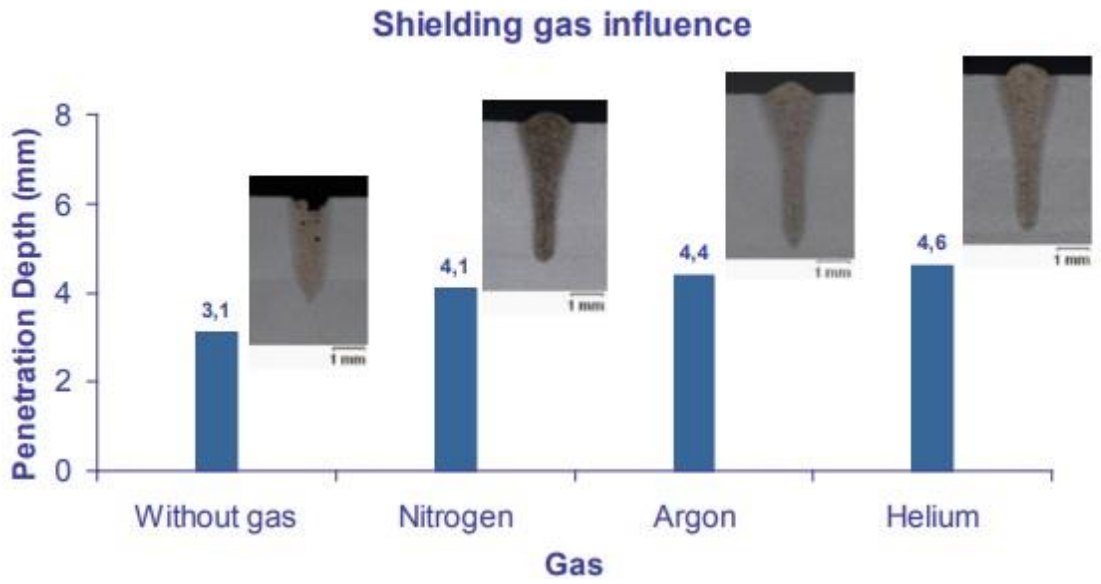
Slika 32 Varijacija dubine penetracije u ovisnosti o brzini zavarivanja [22]

2.4.2.3. Promjer žarišta

Gustoća energije ovisi o promjeru žarišta na radnom komadu. Pri konstantnoj snazi lasera, gustoća energije je veća što je promjer snopa na radnom komadu manji, a posljedično se povećava i dubina penetracije. Kod lasera sa vođenjem snopa pomoću optičkih vlakana, promjer žarišta na radnom predmetu ovisi o promjeru vlakana, duljini fokusa optičkih komponenata sustava za zavarivanje i radnoj udaljenosti [22].

2.4.2.4. Zaštitni plin

U različitim primjenama laserskog zavarivanja, posebice kada se koristi dovoljno velika snaga, ionizacija pare s površine radnog predmeta može rezultirati stvaranjem plazme, posebno kod CO_2 lasera. Plazma apsorbira lasersko zračenje i može utjecati na stabilnost ključanice, pa se, kako bi se izbjeglo stvaranje plazme, koristi zaštitni plin za uklanjanje pare s mjesta žarišta. Zaštitni plin potreban je također za zavarivanje materijala poput titana budući da u rastaljenom stanju titan reagira s kisikom uzrokujući oksidaciju metala i posljedično gubitak svojstava materijala. Slika 33 prikazuje utjecaj zaštitnog plina na dubinu penetracije pri laserskom zavarivanju čeličnih ploča koristeći iste parametre zavarivanja u svim slučajevima. Kao što se može primijetiti na makrografima sa slike 33, zaštitni plin utječe također i na kvalitetu površine. U ovom slučaju, helij pruža veću dubinu penetracije i glađu površinu od ostalih upotrijebljenih zaštitnih plinova [22].



Slika 33 Utjecaj zaštitnog plina na dubinu penetracije [22]

2.5. Zavarivanje trenjem

Zavarivanje trenjem je postupak zavarivanja u krutom stanju pri kojem se toplina potrebna za zavarivanje stvara relativnim gibanjem dvaju radnih komada koje je potrebno spojiti. Ova se metoda oslanja na izravnu pretvorbu mehaničke energije u toplinsku energiju potrebnu za formiranje zavarenog spoja, bez primjene topline iz bilo kojeg drugog izvora [7]. Zavarivanje se provodi pomoću relativnog kretanja jedne komponente u odnosu na drugu, uzduž dodirne površine uz primjenu sile pritiska na mjesto spajanja. Toplina koja nastaje uslijed trenja omekša materijal i čini ga plastičnim, a materijal s površine biva istisnut van rubova spoja, omogućujući na taj način zavarivanje „čistog“ materijala [16]. Ovaj postupak omogućuje uspješno spajanje širokog raspona istovrsnih materijala, kao i niz raznovrsnih metala, uključujući čelik i aluminij. Uzimajući u obzir važnost reduciranja mase automobila u svrhu smanjenja štetnih ispušnih plinova, mogućnost zavarivanja raznorodnih metala čini ovaj postupak iznimno privlačnim proizvođačima automobila. Strojevi za zavarivanje trenjem opremljeni su pogonskom glavom kao sredstvom za primjenu aksijalne sile i alatom koji fiksira radni komad tijekom zavarivanja. Veličine strojeva variraju od onih koji mogu zavariti čeličnu šipku promjera 13 mm do onih koji mogu zavariti čeličnu šipku promjera 125 mm. Ciklus zavarivanja trenjem najčešće je automatiziran [10]. Zavarivanje trenjem uključuje stvaranje topline frikcijskom abrazijom, odvođenje topline, plastičnu deformaciju i kemijsku interdifuziju. Međusobna povezanost ovih čimbenika tijekom zavarivanja trenjem komplicira

razvoj prediktivnih modela za ovaj postupak zavarivanja [7]. Postoji nekoliko varijanti zavarivanja trenjem, a u nastavku će ukratko biti opisane dvije najčešće korištene.

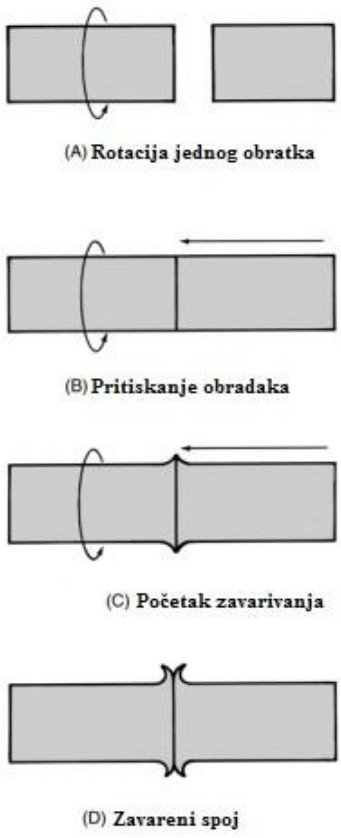


Slika 34 Primjena zavarivanja aluminijskih dijelova trenjem na Mazda RX-8 automobilu [3]

2.5.1. Okretno zavarivanje trenjem

U ovom postupku zavarivanja trenjem, jedan dio koji se zavaruje se okreće u odnosu na drugi dio s nekoliko stotina do nekoliko tisuća okretaja u minuti dok se drži pod pritiskom na površini obratka. Pri postizanju tražene temperature, rotacija se zaustavlja, a pritisak na radni komad se povećava da bi se dobio zavar [10]. Na slici 35 prikazan je tipični postupak okretnog zavarivanja trenjem, pri kojem se fiksni obradak drži u kontaktu s drugim, rotirajućim obratkom pod konstantnim ili postepeno rastućim pritiskom sve dok kontaktna površina ne dosegne temperaturu zavarivanja. Glavni parametri zavarivanja su brzina vrtnje, aksijalni tlak i vrijeme zavarivanja, a istima se upravlja kako bi se osigurala potrebna kombinacija topline i tlaka za stvaranje zavara. Navedeni parametri su podešeni tako da se kontaktna površina zagrije u plastični temperaturni opseg u kojem dolazi do formiranja zavara. Jednom kada se kontaktna površina zagrije, primjenjuje se aksijalna sila u svrhu postizanja međusobnog kontakta površina koje se zavaruju. Tijekom posljednje faze zavarivanja, dok su obratci u kontaktu, dolazi do

atomske difuzije, što omogućuje metaluršku vezu između ta dva materijala [7]. Dijelovi pogonskog sustava kao što su pogonske osovine i zupčanici koji imaju visoke zahtjeve za koncentričnost, bimetalni ispušni ventili motora te dijelovi mjenjača samo su neki od tipičnih automobilskih dijelova koji se zavaruju ovim postupkom [26].



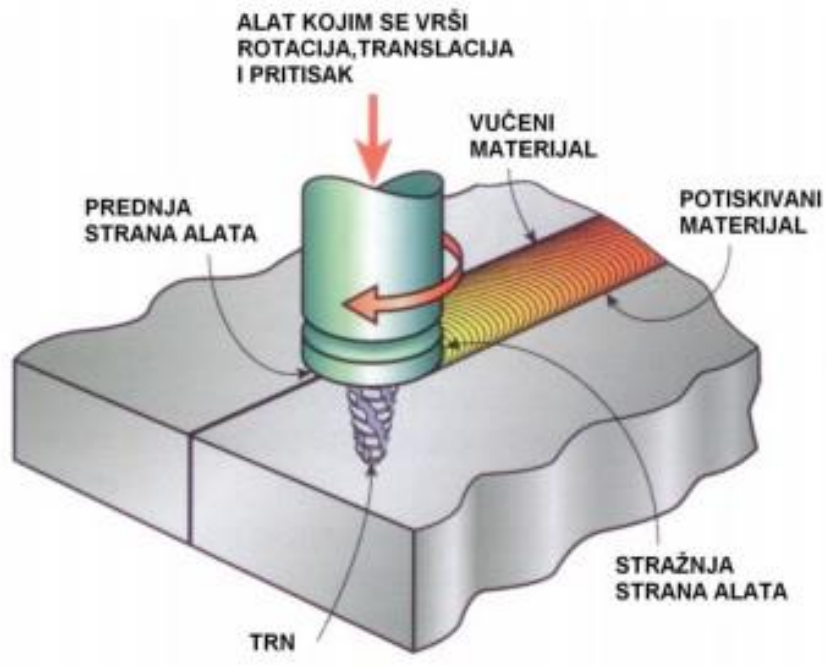
Slika 35 Okretno zavarivanje trenjem [10]

2.5.2. Zavarivanje trenjem rotirajućim alatom

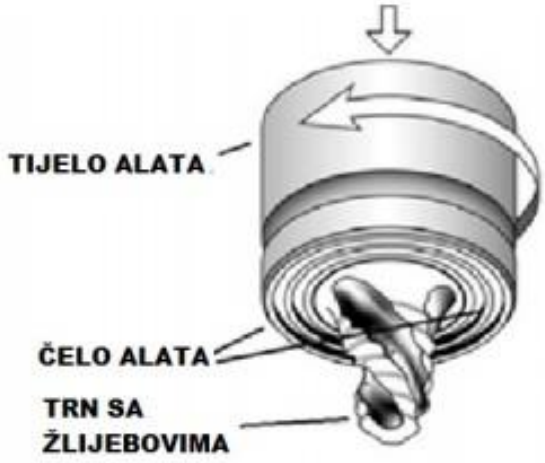
Pri zavarivanju trenjem rotirajućim alatom trenje se pojavljuje kao posljedica gibanja alata koji je pritisnut uz obratke koji se spajaju. Važno je da alat putem kojeg se trenjem dovodi toplina i putem kojeg dolazi do dinamičkog miješanja materijala izrađen od materijala koji je tvrđi od osnovnog materijala. Kao stroj koji pokreće alat može se koristiti i glodalica. Za razliku od elektrolučnih zavarivačkih postupaka, tijekom procesa zavarivanja ne dolazi do nastanka taline. Zavarivanje u krutom stanju nastaje uz pomoć povećanog pritiska i difuzije među materijalima, te zbog trenutnog postojanja viskozne ili prijelazne tekuće faze omekšanog materijala na području dodira, koja očvršćuje kasnije u procesu. Ovaj postupak ne zahtijeva dovođenje zaštitnih plinova i dodatnog materijala, a može se primjenjivati u svim položajima

ukoliko konfiguracija opreme to dopušta. Alat za zavarivanje sastavljen je od dva osnovna dijela: tijela alata (gornji dio) i trna (donji dio) (Slika 37). Čelo alata je naziv za površinu alata koja je u kontaktu s površinom materijala te uzrokuje nastanak trenja i posljedično razvijanje topline. Trn alata služi za miješanje i povezivanje materijala zahvaljujući superplastičnoj deformaciji. Rotacijom trna alata, pri prvotnom kontaktu sa površinom osnovnog materijala dolazi do razvijanja topline uslijed trenja te do omekšanja materijala i plastičnog deformiranja u cilindričnom području oko trna. Sa povećanjem dubine ulaska trna u materijal, dolazi do povećanja količine omekšanog područja sve do maksimalne dubine penetracije, odnosno do kontakta gornje površine materijala i čela alata. Širina omekšanog područja najmanja je na vrhu trna alata, a proširuje se sve do mjesta kontakta čela alata sa obratcima koji se zavaruju, gdje ujedno postiže najveću vrijednost. Nakon ulaska trna, u svrhu postizanja dodatne topline i omogućavanja daljnjeg zavarivanja, uobičajeno je zadržati pomicanje alata uz konstantnu rotaciju. Trajanje zadržavanja određuje se u ovisnosti o debljini materijala te brzini provođenja topline kroz isti. U daljnjem tijeku procesa alat se giba pravocrtno po liniji spajanja u smjeru zavarivanja. Provođenje topline kroz materijal omogućuje rotirajućem alatu mehaničko miješanje materijala, koji kruži oko alata u smjeru rotacije, s jednog obratka na drugi i obrnuto. Tanko plastificirano područje se formira oko rotirajućeg trna te prenosi materijal s jednog obratka na drugi pojavom „ključanice“ u krutom stanju. Na proces zavarivanja trenjem rotirajućim alatom utječu parametri zavarivanja, geometrija i oblik alata te oblik spoja [26]. Pod parametre zavarivanja podrazumijevamo [26]:

- brzinu rotacije alata ω, min^{-1}
- brzinu zavarivanja v, mm/min
- nagib alata prema osnovnom materijalu α_A
- silu pritiska alata na materijal F_N, kN.



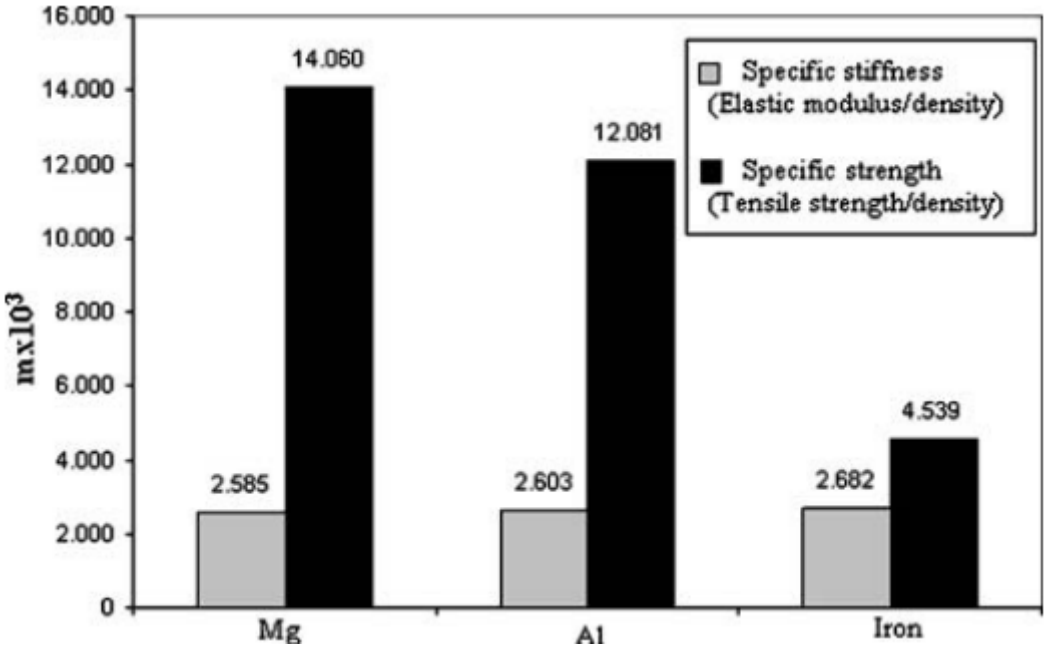
Slika 36 Zavarivanje trenjem rotirajućim alatom [26]



Slika 37 Alat za zavarivanje trenjem rotirajućim alatom [26]

3. Materijali u autoindustriji

Materijali korišteni u masovnoj proizvodnji putničkih vozila rezultat su dugoročnog evolucijskog procesa započetog na samim počecima automobilske industrije, a koji se i dalje nastavlja. Današnja vozila moraju udovoljavati širokom spektru zahtjeva kupaca te društvenih i zakonskih imperativa, kao što su sigurnost, ekonomičnost potrošnje goriva, pristupačna cijena, performanse, emisije stakleničkih plinova te mogućnost recikliranja. Izbor materijala direktno utječe na većinu ovih karakteristika i svojstava, stoga primjena određenih materijala kao dio konstrukcijskih rješenja može biti presudan faktor pri odluci kupca o kupnji vozila, te samom iskustvu korištenja istoga [27]. Glavni materijali koji se koriste za izradu automobilskih karoserija te pojedinih dijelova i komponenata u samom automobilu su čelik, aluminij i magnezij. Uz njih se, dakako koriste još i bakar (u električnim instalacijama), polimeri te ugljična vlakna, no o njima neće biti riječi u ovom radu. Glavni čimbenici za odabir materijala, posebno za karoseriju automobila, uključuju toplinsku, kemijsku ili mehaničku otpornost, jednostavnu proizvodnju i trajnost. Cjenovna pristupačnost također je važan faktor pri proizvodnji vozila, a uključuje uračunavanje troškova povezanih s cjelokupnim životnim ciklusom automobila, uključujući troškove proizvodnje, održavanja i zbrinjavanja [28].



Slika 38 Usporedba strukturnih svojstava čelika, aluminija i magnezija [28]

3.1. Čelik

Unatoč potrazi za alternativnim materijalima i značajnoj količini istraživanja koja su provedena u svrhu razvoja lakših materijala u posljednjih 30 godina, velika većina vlasnika sadašnje generacije automobila vozi pretežno čeličnu konstrukciju, za čiju je proizvodnju potrebno približno pola tone čeličnog lima. Ovaj materijal i dalje je dominantan u masovnoj proizvodnji komercijalnih automobila zbog svoje iznimne svestranosti u pogledu formabilnosti, visoke čvrstoće i pristupačne cijene [29]. Primjena čelika pri izradi dijelova u automobilskoj industriji ne odnosi se samo na karoseriju vozila, već i na motor, šasiju, kotače i mnoge druge dijelove [28]. Korištenjem ovog materijala industrija je uspjela pravovremeno odgovoriti na promjene u inženjerskim rješenjima koje proizlaze iz zakonskih i ekoloških zahtjeva [29]. Pojednostavljeno, prednosti čelika kao materijala pri konstruiranju automobila su sljedeće [29]:

- niska cijena
- jednostavnost oblikovanja
- dosljednost ponude
- otpornost na koroziju u kombinaciji s cinkovim premazima
- lakoća spajanja
- mogućnost recikliranja
- dobra apsorpcija energije sudara.

S druge strane, glavni nedostaci čelika u autoindustrijskoj primjeni su [29]:

- veća masa u usporedbi sa alternativnim materijalima
- korodira ukoliko je nezaštićen.

Međutim, oba ova čimbenika rješavana su tijekom posljednjih 20 godina razvojem mnogo šireg asortimana proizvoda od lima i traka [29]. Kako bi se udovoljilo sve većim zahtjevima u pogledu čvrstoće čelika i dobre apsorpcije energije sudara, kao i potrebe za manjom masom automobila, razvijeni su čelici visoke čvrstoće, koji čine veliki udio u proizvodnji automobila.



Slika 39 Raspodjela čelika različite čvrstoće u karoseriji Volvo S60 automobila [31]

Čelike je moguće razvrstati u grupe prema sličnosti svojstava te načinom rukovanja i spajanja [30]. U nastavku će ukratko biti opisane četiri grupe čelika koje su svoju primjenu pronašle u automobilskoj industriji.

3.1.1. Lako oblikovljivi čelici, čelici za vučenje i duboko vučenje

Ovi čelici imaju potpuno feritnu mikrostrukturu i obično imaju vrlo nizak sadržaj ugljika. Dizajnirani su za vrlo visoku sposobnost oblikovanja i često imaju visoku kvalitetu površinske obrade što ih čini pogodnim za vanjske dijelove automobila ili složene unutarnje dijelove. Ove čelike obično karakateriziraju pojedini izazovi u pogledu zavarljivosti, a moguće ih je spajati svim uobičajenim postupcima [30].

3.1.2. Čelici visoke čvrstoće (eng. High Strength Steel)

Ovi čelici imaju uglavnom feritne mikrostrukture, međutim da bi se postigla unaprijeđena mehanička svojstva (vlačne čvrstoće od 350 – 550 MPa) potrebna je fina veličina zrna. Posebni dodaci za legiranje koriste se u svrhu pročišćavanja zrna i jačanja mikrostrukture, uz istodobno zadržavanje dobre oblikovljivosti. Sadržaj ugljika u tim materijalima ostaje nizak, što je

posebno važno za zavarivanje. Ovi se materijali obično jednostavno zavaruju, a karakterizira ih nekolicina problema pri proizvodnji vozila [30].

3.1.3. Napredni čelici visoke čvrstoće (eng. Advanced High Strength Steel)

Napredni čelici visoke čvrstoće su generička skupina metala s vlačnom čvrstoćom većom od 550 MPa. Mikrostrukture ovih materijala mogu biti smjesa ferita, austenita, martenzita i bainita. Specifični kemijski sastavi i višefazne mikrostrukture koji proizlaze iz kombinacija toplinske obrade i drugih mehanizama jačanja omogućuju postizanje različitih vrijednosti čvrstoće, žilavosti i tvrdoće. Dvofazni (eng. Dual Phase) čelici visoke čvrstoće često se koriste u zoni sudara zbog njihove izražene sposobnosti apsorpcije velike količine energije. Pojedini napredni čelici visoke čvrstoće mogu zahtijevati specifične parametre zavarivanja, ali općenito se ova grupa materijala može zavarivati bez posebnih poteškoća. Zavarivanje treba provesti uz poseban oprez, kako bi se smanjile potencijalne distorzije koje proizlaze iz velikog unosa topline zavarivanja. Također, zavarivanjem mogu nastati faze visoke tvrdoće, koje mogu smanjiti žilavost zavarenih spojeva [30].

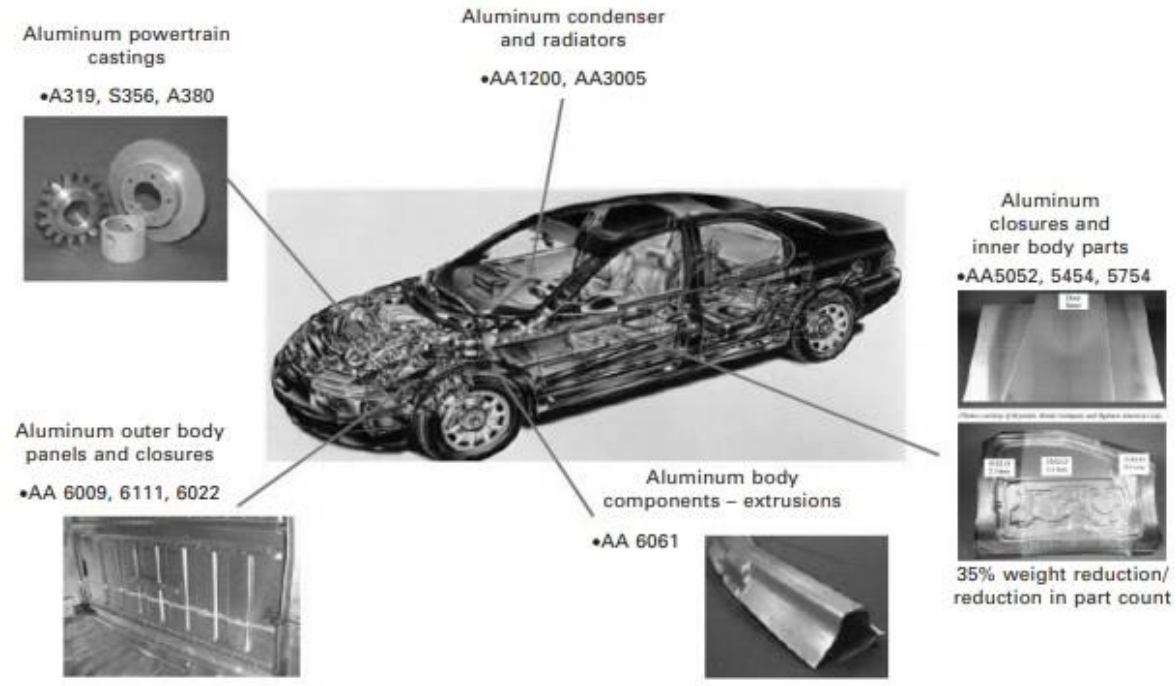
3.1.4. Čelici ultra visoke čvrstoće (eng. Ultra High Strength Steel)

Karakterizira ih vlačna čvrstoća od najmanje 780 MPa. Ova grupa čelika ima pretežno martenzitnu mikrostrukturu, a mogu biti prisutni i mali udjeli ostalih faza. Čelici ultra visoke čvrstoće imaju slična svojstva zavarivanja kao napredni čelici visoke čvrstoće, ali s većom čvrstoćom (i posljedično nižom duktilnošću). Primjer upotrebe čelika ultra visoke čvrstoće su martenzitni čelici koji se koriste kao strukturni elementi, primjerice za B stupove automobila zbog njihove izuzetno visoke čvrstoće. Ova grupa materijala je u osnovi još uvijek zavarljiva, ali učinak topline na svojstva zavara i okolne zone utjecaja topline može u nekim slučajevima ozbiljno pogoršati integritet spoja. Zavarivanje ovih materijala iziskuje, dakle, temeljito poznavanje određenih vrsta čelika, kako bi se mogao propisati prikladan postupak zavarivanja [30].

3.2. Aluminij

Najvažnija prednost aluminijskih legura nad čelicima u automobilskoj industriji je njihova mala gustoća, koja iznosi 2,7 g/cm^3 u usporedbi sa 7,87 g/cm^3 za čelike. Dakle, gustoća aluminijskih legura približno je 65% niža od gustoće čelika. Međutim, modul elastičnosti

aluminijskih legura je 70 GPa u usporedbi s 207 GPa za čelike, što znači da će za jednaku krutost na savijanje aluminijska komponenta biti 43,5% deblja od čelične komponente. Kao rezultat, smanjenje težine postignuto aluminijem neće biti u istom omjeru kao omjer gustoće između čelika i aluminija. Jednostavni izračun težine pokazuje da će zamjena čeličnih dijelova s aluminijskim dijelovima u karoseriji automobila rezultirati s približno 50% uštede na težini. Lijevane i kovane legure aluminija koriste se u brojnim primjenama u automobilima. Lijevane aluminijske legure uglavnom se koriste za dijelove motora, mjenjača i ovjesa, dok se kovane legure aluminija, u obliku limenih ploča i ekstrudata, koriste u dijelovima karoserije i vanjskim oplatama. Aluminijske legure pronalaze primjenu i u izmjenjivačima topline, uključujući cijevi hladnjaka i kondenzatora . Prednost korištenja aluminija u ovim primjenama nije samo njegova visoka toplinska provodljivost, već i znatno veći omjer čvrstoće i gustoće u usporedbi s legurama na bazi bakra, koje su tradicionalni materijali za proizvodnju izmjenjivača topline [32].



Slika 40 Primjeri primjene aluminijskih legura u automobilu [33]

Slično kao i kod čelika, različite legure aluminija imaju različita mehanička svojstva, a prema tome i različita područja primjene u vozilima. U nastavku će se ukratko spomenuti tri najčešće korištene aluminijske legure u automobilskoj industriji [30].

3.2.1. 5000 Al-Mg

Ova legura odlikuje se velikim omjerom čvrstoće i mase te dobrom oblikovljivošću. Uobičajene primjene uključuju upotrebu 5182 legure u unutarnjim pločama karoserije zbog dobre oblikovljivosti i otpornosti prema napetosnoj koroziji te 5022 legure s većom čvrstoćom i oblikovljivošću, za izradu poklopaca motora, krovova, vrata te blatobrana [30].

3.2.2. 6000 Al-Mg-Si

Daleko najčešća aluminijska legura koja se koristi u automobilskoj industriji, pretežno zbog veće čvrstoće u usporedbi s prethodnom legurom. Termički je obradiva, iznimno oblikovljiva i prilično dobro zavarljiva. Legura 6063 koristi se primjerice u okvirima sjedala i krovnim nosačima [30].

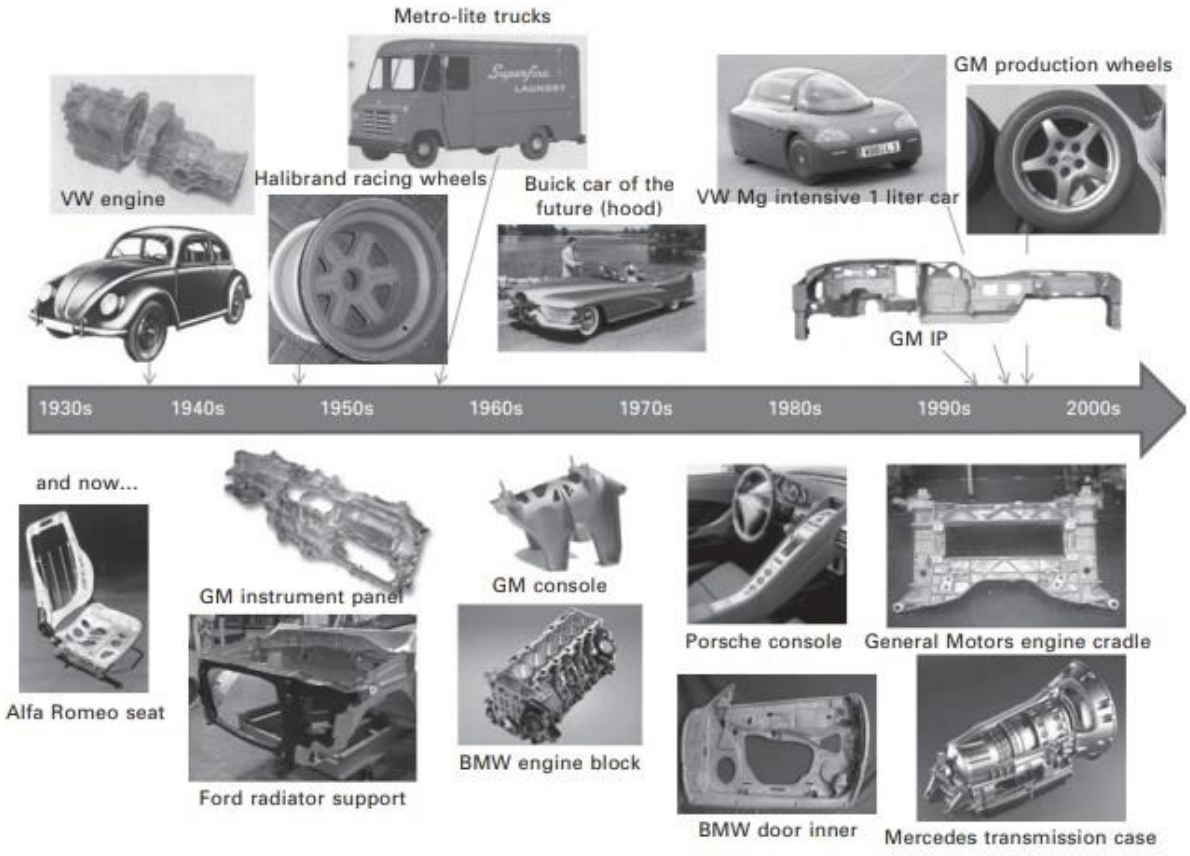
3.2.3. 7000 Al-Zn-Mg

Ova legura je rezultat napora za razvijanje aluminijske legure veće čvrstoće. Uz veću cijenu, još jedna loša strana je slabija otpornost na koroziju, što može predstavljati problem pri zavarivanju. Legure 7003 i 7046 mogu se koristiti u ojačanjima odbojnika te udarnim gredama [30].

3.3. Magnezij

Magnezijeve legure pronalaze primjenu u automobilima uglavnom zbog njihove vrlo male gustoće (1,74 g/cm^3 u usporedbi s 2,7 g/cm^3 za aluminijske legure). Imaju također i veći omjer čvrstoće i mase u odnosu na aluminijske legure. S druge strane, modul elastičnosti magnezijevih legura iznosi 45 GPa, što je znatno niže od modula elastičnosti čelika i aluminijskih legura; međutim, zbog njihove male gustoće, omjer modula i gustoće magnezijevih legura jednak je onom aluminijskih legura. Magnezijeve legure imaju malu duktilnost i slabu oblikovljivost ali mnoge magnezijeve legure mogu se lijevati u tanke dijelove do debljine od samo 2 mm. Uobičajena proizvodna metoda za izradu automobilskih dijelova od magnezija je tlačno lijevanje, koje omogućuje konsolidaciju dijelova i smanjenje troškova. Magnezijeve legure mogu se, poput aluminijskih legura, podijeliti na lijevane i kovane. Među legurama za lijevanje, AZ91, s aluminijom i cinkom kao glavnim legirnim elementima, koristi se u mnogim nestrukturnim komponentama, poput nosača, poklopaca i kućišta, gdje pruža značajnu uštedu na težini naspram aluminijeve legure A380. Za strukturne dijelove poput nosača instrument ploča i konstrukcija sjedala, gdje su veća duktilnost i otpornost na sudare od

iznimne važnosti, koriste se AM20, AM50 ili AM60 legure. Glavni legirni elementi u legurama serije AM su aluminij i mangan. Među kovanim legurama magnezija AZ80 se koristi za ekstrudirane dijelove, a AZ31 za limove. Jedan od glavnih problema magnezijevih legura je njihova loša korozijska postojanost. Iako je korozijska otpornost AZ i AM legura na koroziju u slanom okolišu usporediva s otpornošću lijevanih aluminijskih legura, njihova otpornost na galvansku koroziju vrlo je slaba. Dakle, kada je magnezijeva komponenta pričvršćena na čeličnu komponentu ili kada su dvije magnezijeve komponente pričvršćene pomoću čeličnog vijka, magnezij korodira strahovitom brzinom. Budući da je galvanska korozija magnezija u prisutnosti aluminija mnogo manja, kod primjene magnezija najčešće se koriste aluminijske podloške, aluminijski vijci ili čelični vijci presvučeni slojem aluminija [32]. Magnezij je svoju primjenu u automobilskoj industriji pronašao u unutarnjoj strukturi vrata, jezgri volana, stupu upravljača, okviru autosjedalice, naplatcima kotača, kućištu prijenosa, nosačima kompresora ventilacijskog sustava, servo pumpama, instrument tablama itd. [28]. Na slici 41 prikazana je primjena magnezijevih legura u automobilima kroz povijest.



Slika 41 Primjena magnezijevih legura u automobilskoj industriji kroz povijest [34]

3.4. Zavarljivost metala elektrootpornim točkastim zavarivanjem

Zavarljivost je sposobnost zavarivanja materijala. Metal se smatra zavarljivim u slučaju kad se primjenom određenog postupka zavarivanja, dobiva homogeni, kontinuirani, zavareni spoj koji zadovoljava propisane zahtjeve i koji posjeduje očekivana mehanička i druga tražena svojstva [16]. Zavarljivost legura i metala elektrootpornim točkastim zavarivanjem, prema dosadašnjim praktičnim i teoretskim iskustvima, ovisi o nizu utjecajnih faktora. Ocjena zavarljivosti legura i metala, na temelju višegodišnjih istraživanja, može se prikazati prema tablici 4 [35].

Tablica 4 Ocjene zavarljivosti u ovisnosti o vrsti osnovnog materijala [35]

1 – odlično 2 – dobro 3 – podnošljivo 4 – loše 5 – nedovoljno 6 – nemoguće	Aluminij	Nerđajući čelik	Mjed	Bakar	Pocinčani čelik	Čelik	Olovo	Nikal	Krom-nikal (20%Cr, 80%Ni)	Cink	Fosforna bronza	Novo srebro
Aluminij	[2]	5	4	5	3	4	5	4	4	3	3	6
Nerđajući čelik	5	[1]	5	5	2	1	6	3	3	6	4	4
Mjed	4	5	[3]	4	4	4	6	3	3	5	3	3
Bakar	5	5	4	[5]	5	5	5	4	4	5	3	3
Pocinčani lim	3	2	4	5	[2]	2	4	3	3	3	4	5
Čelik	4	1	4	5	2	[1]	6	3	3	6	3	4
Olovo	5	6	6	5	4	6	[3]	5	5	3	5	5
Nikal	4	3	3	4	3	3	5	[1]	2	6	3	2
Krom-nikal (20%Cr, 80%Ni)	4	3	3	4	3	3	5	2	[1]	6	4	2
Cink	3	6	5	5	3	6	3	6	6	[3]	4	6
Fosforna bronca	3	4	3	3	4	3	5	3	4	4	[2]	2
Novo srebro	6	4	3	3	5	4	5	2	2	6	2	[1]

3.4.1. Čelici

Mehanička svojstva zavara pri zavarivanju čelika s jako niskim sadržajem ugljika (0,05 % - 0,1 %) praktički su jednaka mehaničkim svojstvima osnovnog materijala. Neznatan utjecaj zakaljene strukture zamjećuje se uslijed povećanja sadržaja ugljika iznad 0,1 %, što dovodi do

povećanja čvrstoće zavara te omogućuje zavarene spojeve veće čvrstoće od osnovnog materijala. Povećanjem sadržaja ugljika iznimno se brzo povećava i utjecaj zakaljene strukture, no istodobno dolazi i do smanjenja plastičnosti zavarenog spoja. Metalografska ispitivanja dokazuju da se pri zavarivanju čelika sa sadržajem ugljika iznad 35 % u jezgri zavarene točke pojavljuje martenzit. To iziskuje naknadno zagrijavanje, jer u suprotnom dolazi do pojave krhkosti [35].

3.4.1.1. Niskougljični i mikrolegirani čelik

Uspješno se može zavariti elektrootpornim točkastim zavarivanjem [30].

3.4.1.2. Čelici visoke čvrstoće i čelici ultra visoke čvrstoće

Svi čelici koji se koriste u automobilskim karoserijama mogu se spojiti elektrootpornim točkastim zavarivanjem, međutim materijali visoke čvrstoće mogu zahtijevati duža vremena zavarivanja i veće sile pritiska kako bi se osigurala dobra kvaliteta zavara [30].

3.4.1.3. Čelici zaštićeni premazima

Čelici premazani cinkom, željezom i cinkom te aluminij silicijem (AlSi), mogu biti zadovoljavajuće zavareni, no životni vijek elektrode kraći je nego za nepremazani čelik zbog taloženja premaza na elektrodi. Potrebno je redovitije održavanje elektroda [30].

3.4.2. Aluminij i aluminijske legure

Potrebne su velike struje zavarivanja, a stanje površine radnog komada uvelike utječe na formaciju zavara. Taloženje aluminija na elektrodama predstavlja veliki problem [30]. Istraživanja su pokazala da uklanjanje oksidnog sloja, povećavanje sile pritiska te predgrijavanje niskim iznosima struje mogu značajno umanjiti kontaktni otpor i unaprijediti kvalitetu zavara [36].

3.4.3. Magnezij i magnezijeve legure

Elektrootporno zavarivanje magnezija, bilo točkasto ili šavno, izvodi se na kovanim, limenim i ekstrudiranim legurama, uglavnom sa sličnom opremom i uvjetima koji se koriste za zavarivanje aluminija. Prije samog zavarivanja površinu je potrebno temeljito odmastiti i, ako postoji, ukloniti zaštitni premaz [37]. Elektrootporno točkasto zavarivanje magnezija i njegovih

legura karakteriziraju problemi kao što su visoka struja zavarivanja, ubrzano trošenje elektroda, istiskivanje te poroznost [38].

4. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu završnog rada provedena je analiza utjecaja različitih parametara zavarivanja na kvalitetu i oblik zavarenog spoja. Eksperiment je proveden u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Izvršeno je zavarivanje 18 komada lima, odnosno 9 ispitnih uzoraka, na kojima je kasnije provedeno nerazorno ispitivanje vizualnom metodom, te razorno ispitivanje na kidalici u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava.

4.1. Uređaj za elektrootporno točkasto zavarivanje

Ispitni uzorci zavareni su na uređaju za elektrootporno točkasto zavarivanje hrvatske proizvodnje TV-15 PKS proizvođača Servus d.o.o. Pomoću ovog stroja moguće je zavarivati širok spektar materijala poput bakrenih, aluminijskih i pocinčanih proizvoda, te proizvoda od konstrukcijskih čelika. Navedeni stroj prikazan je na slici 42.



Slika 42 Uređaj za elektrootporno točkasto zavarivanje TV-15 PKS



Slika 43 Specifikacije TV-15 PKS uređaja

Stroj je izveden u stabilnoj, mehaničko - pneumatskoj izvedbi, a potrebna sila na elektrodama osigurana je pomoću pneumatskog mehanizma. Budući da su postavljene u „škarastoj izvedbi“, elektrode pri zatvaranju prolaze put u obliku kružnog luka. Kod ovakve izvedbe stroja, pneumatski cilindar pozicioniran je na donjoj ploči uređaja te prenosi silu zavarivanja na elektrode putem mehanizma za dizanje i gibljivog držača elektroda. Gornja je ručica, dakle, povezana preko fleksibilnih lamela sa zavarivačkim transformatorom te, za razliku od donje ručice, ima mogućnost gibanja. Donja ručica, s držačem elektroda, ima mogućnost podešavanja po visini, a sa zavarivačkim transformatorom povezana je preko donje ploče sekundara i koljena ručice. Energetika s tiristorom i energetski dio s transformatorom nalaze se u kućištu stroja za zavarivanje, a potrebno ih je, kao i držače elektroda, hladiti vodom [39].

Mikroprocesorsko upravljanje 1010-T osigurava unos odgovarajuće izabranih parametara zavarivanja u uređaj za elektrootporno točkasto zavarivanje, a odnosi se na [39]:

- izbor funkcije djelovanja naprave
- izbor oblika i jakosti struje zavarivanja
- izbor vremenskih parametara zavarivanja.

Upravljačka jedinica (Slika 44) nalazi se sa bočne strane uređaja, a sastoji se od tri osnovna dijela [39]:

- mikroprocesorska jedinica
- tiristorski energetski blok
- kabel za povezivanje.



Slika 44 Upravljačka jedinica

Mikroprocesorska jedinica 1010-T s LCD ekranom služi za unos parametara zavarivanja i izbor funkcija te optičkom signalizacijom prikazuje status naprave, a izrađena je na bazi mikroprocesora ugrađenog u kućište s folijskom tastaturom. Preko nje se izvode sve funkcije procesa zavarivanja, a omogućuje memoriranje dvadeset različitih programa za zavarivanje [39].

Tiristorski energetski blok je poluvodički element koji provodi ili ne provodi struju u određenom smjeru, a čini energetski dio upravljanja. Tiristor se zatvara pri prolasku struje kroz „nulu“ te ne propušta struju do nailaska sljedećeg upravljačkog signala dobivenog iz jedinice za upravljanje [39].

Kabel za povezivanje povezuje tiristorski energetski blok i MPC – jedinicu u jednu cjelinu. To je višežilni kabel, opremljen konektorima [39].

4.2. Tijek eksperimenta

U sljedećim odlomcima detaljno će biti opisan tijek eksperimenta po koracima.

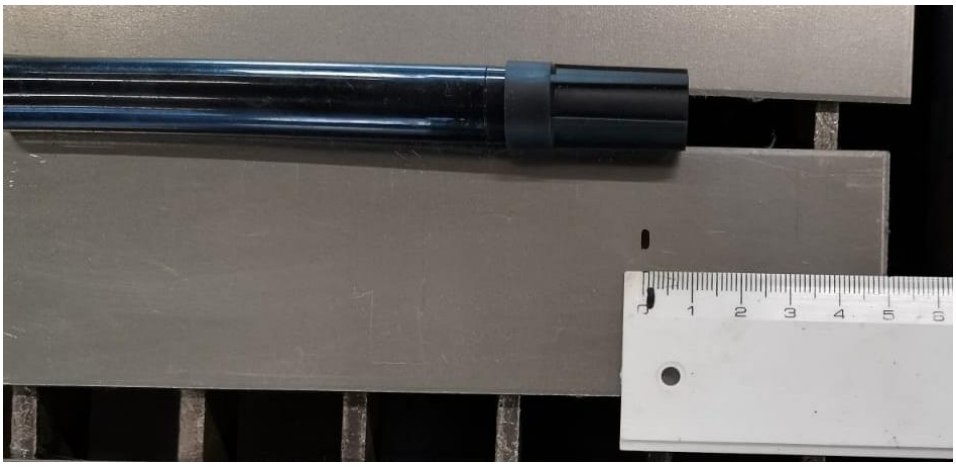
4.2.1. Priprema ispitnih uzoraka

Materijal iz kojeg su načinjeni ispitni uzorci je čelik S235. Uzorci su najprije izrezani na dimenzije 200 x 50 x 3 mm, a zatim kemijski očišćeni pomoću alkoholne otopine (Slika 45).



Slika 45 Kemijsko čišćenje uzoraka

Nakon čišćenja uzoraka, na istima je bilo potrebno markerom označiti mjesta preklopa dvaju limova pri zavarivanju (Slika 46). U ovom eksperimentu duljina preklopa iznosi 50 mm.



Slika 46 Označavanje duljine preklopa

4.2.2. Određivanje parametara zavarivanja

Prije početka samog zavarivanja potrebno je odrediti prikladne parametre. Određivanje parametara iterativan je postupak, koji sa iskustvom postaje jednostavniji i znatno kraći. Isprobavanjem različitih parametara, te nakon niza probnih zavara (Slika 47) odabrani su parametri zavarivanja. Osnovna jedinica vremenskih parametara je perioda, pri čemu jedna perioda iznosi 20 milisekundi. Jakost struje zavarivanja podešava se u odnosu na postotak ukupne snage uređaja za zavarivanje. Eksperiment je proveden u pojedinačnom načinu rada, a kao promjenjivi parametri izabrani su jakost struje zavarivanja i vrijeme predgrijavanja. Ostali parametri, poput struje predgrijavanja, vremena zavarivanja, vremena hlađenja te sile na elektrode bili su konstantni. Za svaki promjenjivi parametar odabrane su 3 karakteristične vrijednosti, te je na taj način dobiveno devet različitih zavara na devet ispitnih uzoraka. Fiksni parametri zavarivanja prikazani su u tablici 5, a promjenjivi parametri u tablici 6.



Slika 47 Predeksperiment – optimiranje parametara zavarivanja

Tablica 5 Fiksni parametri zavarivanja

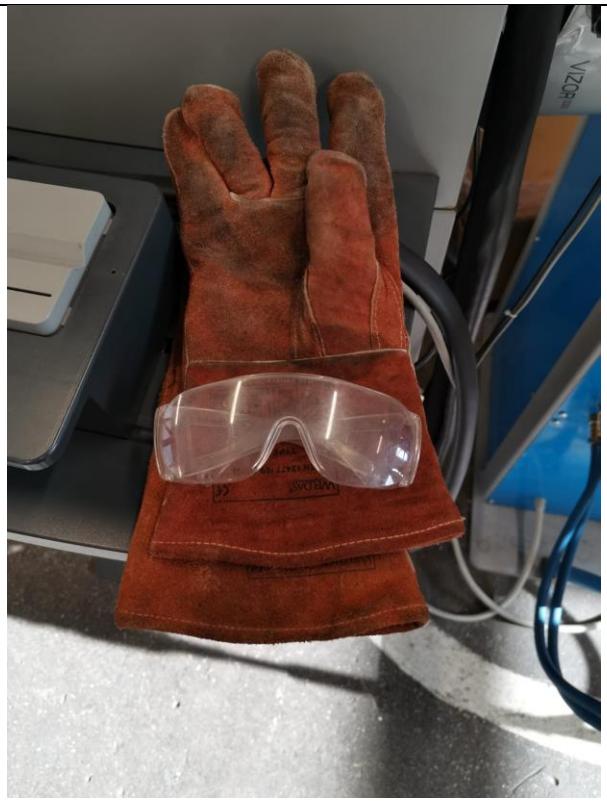
Vrijeme predpritiska, **s**	1
Struja predgrijavanja, **kA**	2,975
Vrijeme hlađenja, **s**	0,06
Vrijeme zavarivanja, **s**	0,8

Tablica 6 Promjenjivi parametri zavarivanja

Broj uzorka	I_z, **kA**	$t_{pred.}$, **s**
1	5,95	0
2	7,225	0
3	8,5	0
4	5,95	1
5	7,225	1
6	8,5	1
7	5,95	2
8	7,225	2
9	8,5	2

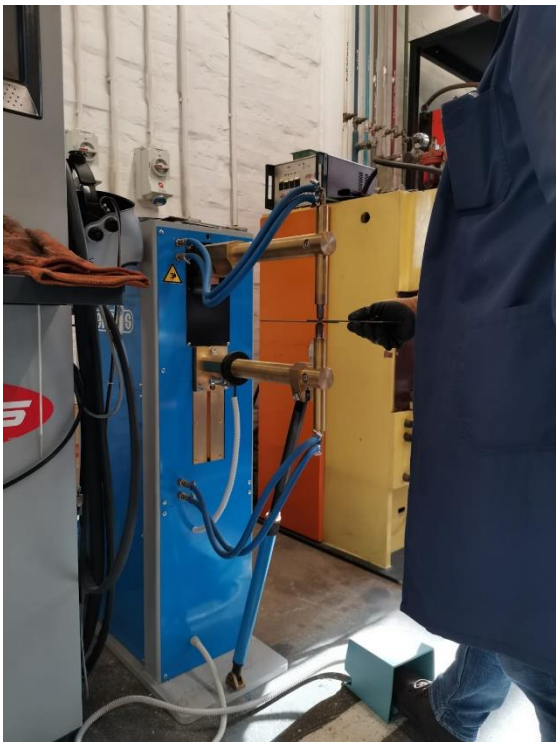
4.2.3. Zavarivanje ispitnih uzoraka

Prije samog zavarivanja ispitnih uzoraka potrebno je odjenuti potrebnu zaštitnu opremu. Preporuča se korištenje zaštitnih naočala i radne odjeće radi mogućeg rasprskavanja pri zavarivanju. Potrebno je također nositi zaštitne rukavice za zavarivanje. Zaštitna oprema prikazana je na slici 48.



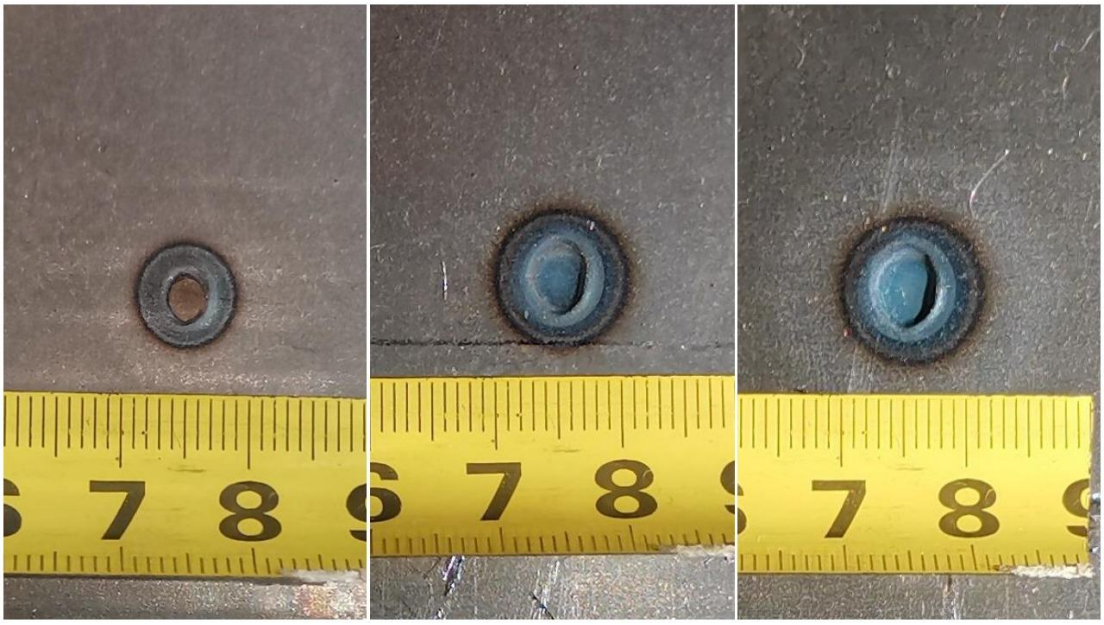
Slika 48 Zaštitna oprema za elektrootporno zavarivanje

Nakon oblačenja zaštitne opreme, uzorci se u preklopu postavljaju na donju elektrodu, a stroj se pokreće pritiskanjem nožne papučice (Slika 49).

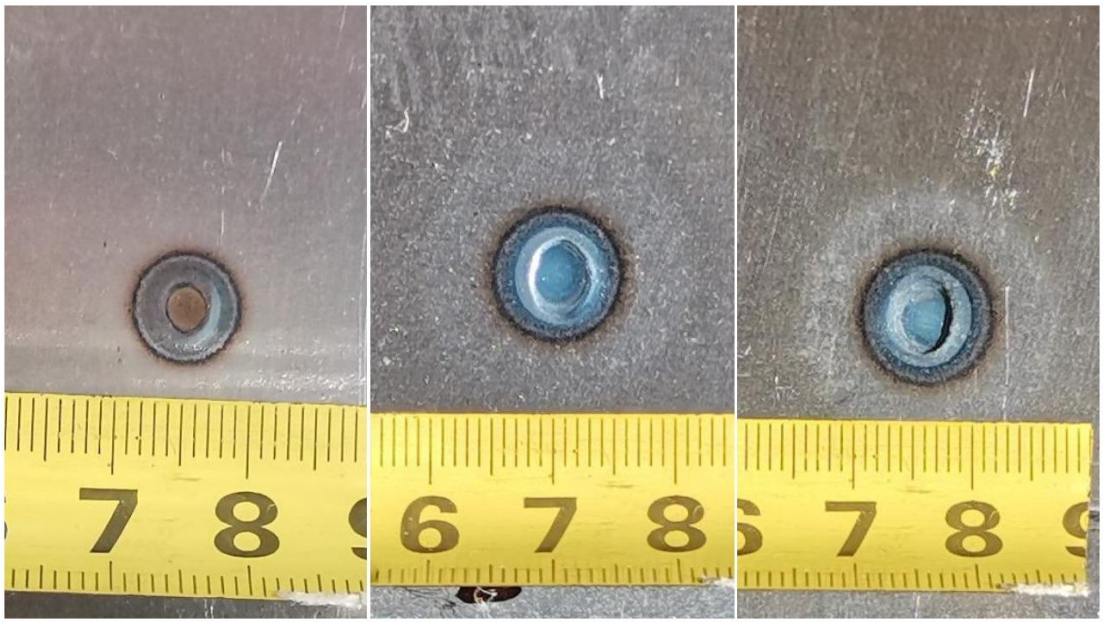


Slika 49 Zavarivanje ispitnih uzoraka

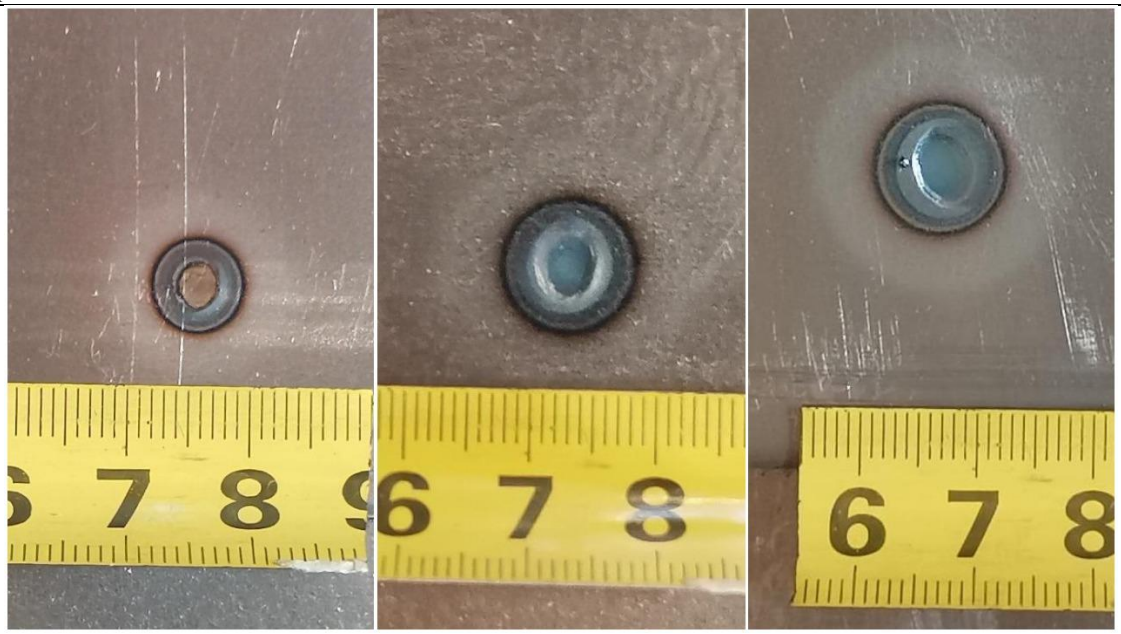
Izgled dobivenih zavara prikazan je na slikama 50, 51 i 52 u nastavku.



Slika 50 Uvećani prikaz zavara ispitnih uzoraka 1, 2 i 3 (s lijeva na desno)



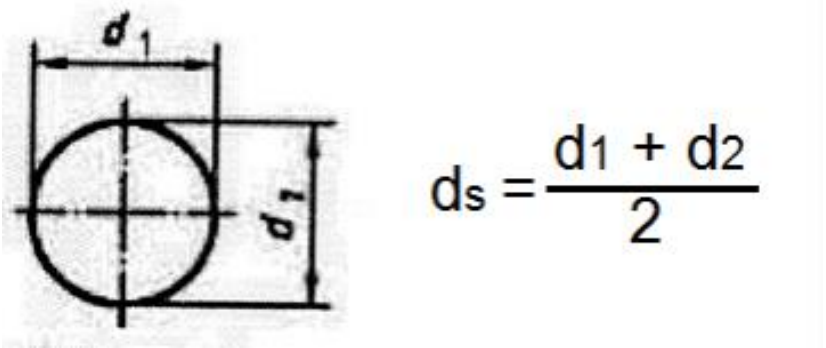
Slika 51 Uvećani prikaz zavara ispitnih uzoraka 4, 5 i 6 (s lijeva na desno)



Slika 52 Uvećani prikaz zavara ispitnih uzoraka 7, 8 i 9 (s lijeva na desno)

4.2.4. Nerazorno ispitivanje vizualnom metodom

Nerazorno ispitivanje provodeno je vizualnom metodom pomoću softverskog programa *ImageJ*. Za svaki od devet dobivenih zavara izmjereni su promjeri točkastih zavara d_{z1} i d_{z2}, te promjeri zone utjecaja topline d_{ZUT1} i d_{ZUT2}, u vertikalnom i horizontalnom smjeru, onako kako to nalaže norma ISO 14329 – 2003. Iz dobivenih promjera d_{z1} i d_{z2} te d_{ZUT1} i d_{ZUT2} potom su izračunati srednji promjeri d_{sz} i $d_{sZUT.}$, također prema normi. Slika 53 prikazuje način mjerenja promjera te računanja srednjeg promjera zavara i zone utjecaja topline prema ISO 14329 – 2003 normi.



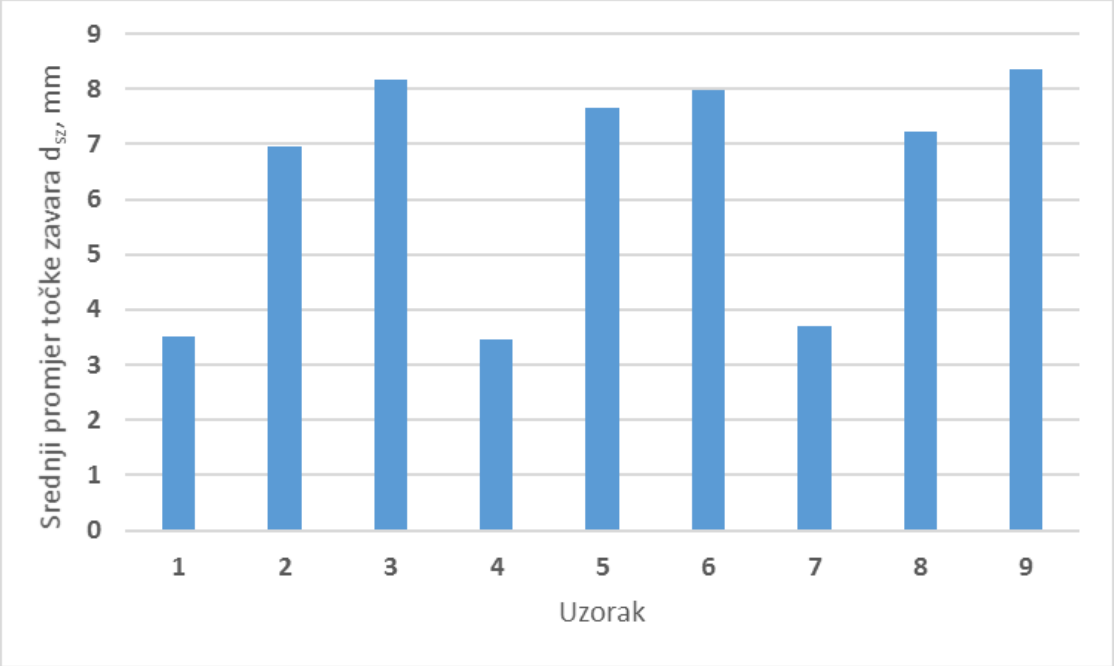
Slika 53 Mjerenje promjera i računanje srednjeg promjera zavara i ZUT-a prema normi ISO 14329 – 2003 [40]

Promjeri točke zavara i zone utjecaja topline prikazani su u tablici 7.

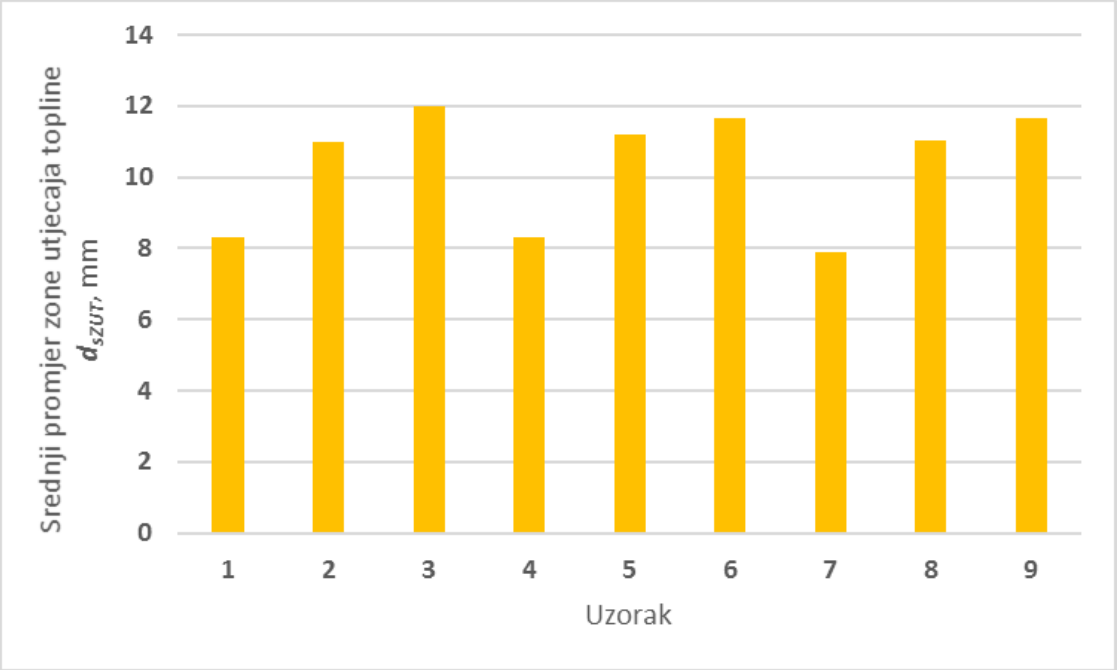
Tablica 7 Promjeri zavara i zone utjecaja topline

Uzorak	d_{z1}, mm	d_{z2}, mm	d_{sz}, mm	d_{ZUT1}, mm	d_{ZUT2}, mm	d_{sZUT}, mm
1	3,154	3,892	3,523	8,197	8,388	8,293
2	6,324	7,577	6,951	10,881	11,090	10,986
3	7,790	8,561	8,176	11,780	12,235	12,008
4	3,064	3,830	3,447	8,113	8,530	8,322
5	7,258	8,065	7,662	11,051	11,371	11,211
6	7,388	8,559	7,974	11,441	11,846	11,644
7	3,363	4,035	3,699	7,751	8,004	7,878
8	6,844	7,583	7,214	11,004	11,038	11,021
9	8,129	8,576	8,353	11,665	11,625	11,645

Rezultati mjerenja prikazani su grafički na slikama 53 i 54.



Slika 54 Grafički prikaz srednjeg promjera zone metala zavara u ovisnosti o jakosti struje zavarivanja i vremenu predgrijavanja



Slika 55 Grafički prikaz srednjeg promjera zone utjecaja topline u ovisnosti o jakosti struje zavarivanja i vremenu predgrijavanja

Analizom rezultata prikazanih tablično i grafički moguće je prokomentirati utjecaj jakosti struje zavarivanja i vremena predgrijavanja na srednji promjer samog zavara i zone utjecaja topline u ovom eksperimentu. Rezultati pokazuju da na srednji promjer zavara, jednako kao i na srednji promjer zone utjecaja topline, u najvećoj mjeri utječe jakost struje zavarivanja. Pri konstantom vremenu predgrijavanja, a varijabilnoj vrijednosti struje zavarivanja, za veće vrijednosti struje dobivaju se bitno veći srednji promjeri zavara i zone utjecaja topline. Pri konstantnoj vrijednosti struje, a varijabilnom vremenu predgrijavanja, nije bilo moguće odrediti točan uzorak po kojem se, u ovisnosti o trajanju predgrijavanja, mijenja promjer zavara i zone utjecaja topline. Može se zaključiti da u ovom eksperimentu vrijeme predgrijavanja nije imalo značajan utjecaj na veličinu srednjeg promjera zavara i zone utjecaja topline.

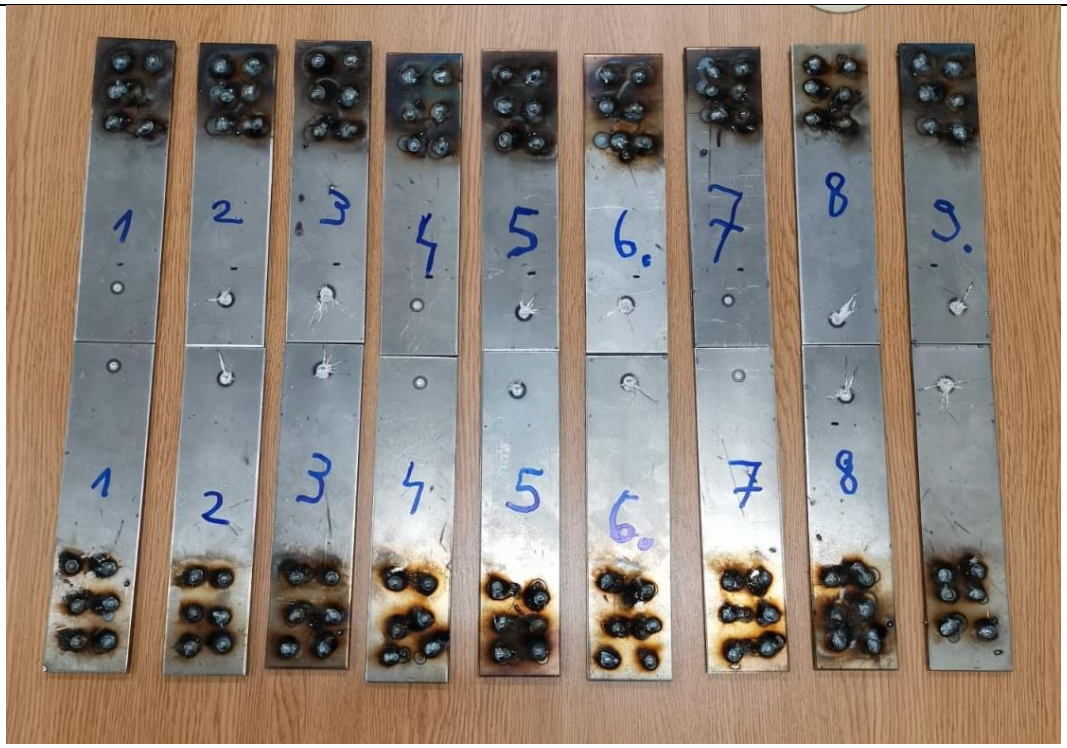
4.2.5. Razorno ispitivanje ispitnih uzoraka

Razorno ispitivanje na kidalici provedeno je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava. Model kidalice na kojoj je provedeno ispitivanje je EU 40 mod, njemačkog proizvođača Werkstoffprüfmaschinen (Slika 56). Na svakom od uzoraka dodana su dodatna ispupčenja radi boljeg prihvata u čeljusti kidalice.



Slika 56 Kidalica

Nakon što su montirani i pravilno učvršćeni na kidalicu, svi uzorci su bili izloženi kontinuiranom vlačnom opterećenju, pri čemu su zavari bili opterećeni smično. Prirast vlačne sile u vremenu promatran je na ekranu. Slika 57 prikazuje ispitne uzorke nakon razornog ispitivanja.

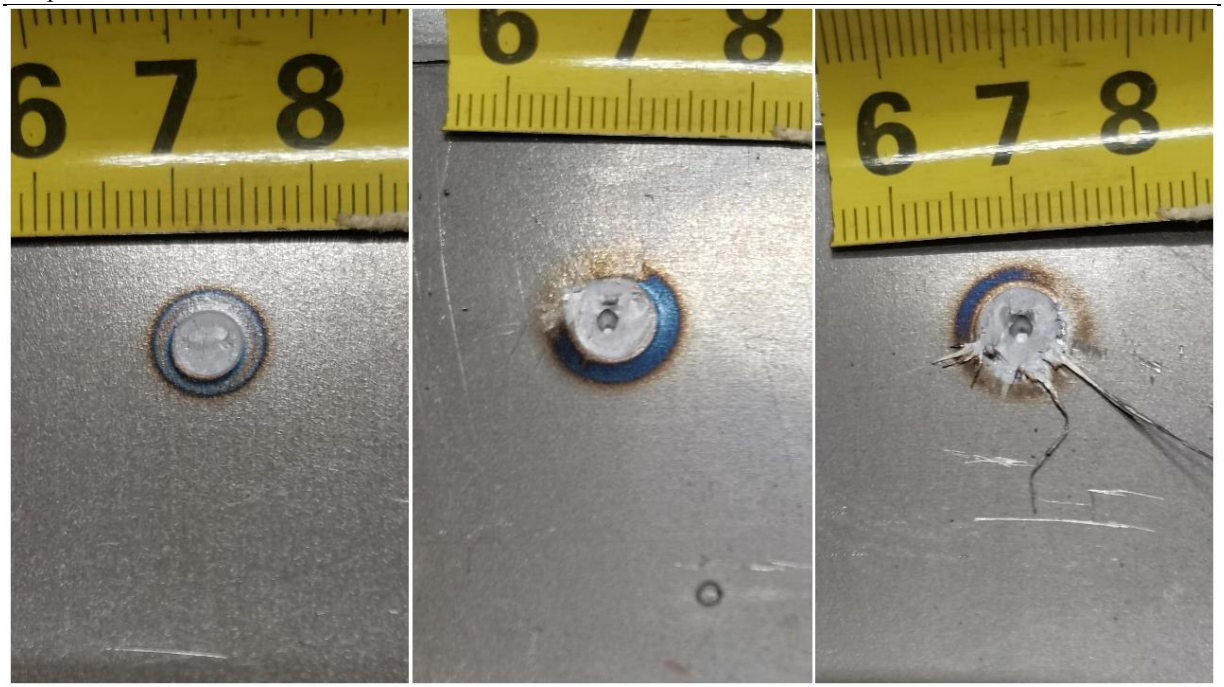


Slika 57 Ispitni uzorci nakon razornog ispitivanja

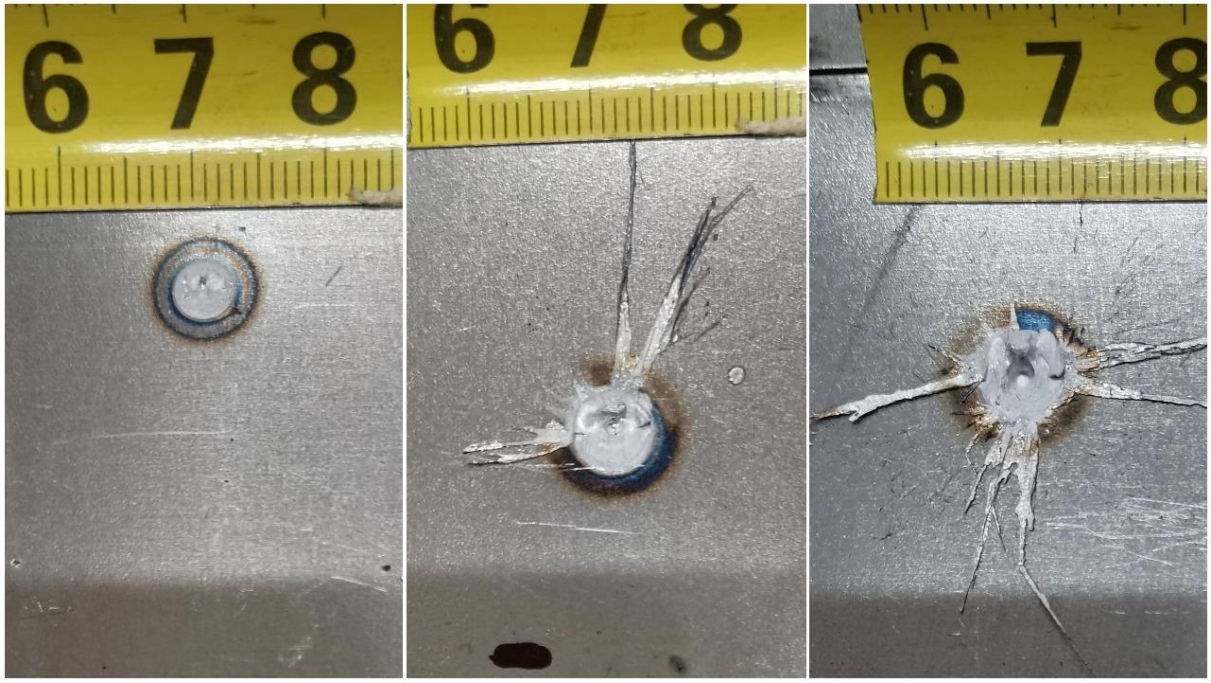
Na slici ispitnih uzoraka nakon razornog ispitivanja vidljivo je da je svaki od devet uzoraka puknuo na mjestu zavara. Uvećani prikazi mjesta loma nakon ispitivanja prikazani su na slikama 58, 59 i 60.



Slika 58 Uvećani prikaz mjesta loma ispitnih uzoraka 1, 2 i 3 (s lijeva na desno)



Slika 59 Uvećani prikaz mjesta loma ispitnih uzoraka 4, 5 i 6 (s lijeva na desno)



Slika 60 Uvećani prikaz mjesta loma ispitnih uzoraka 7, 8 i 9 (s lijeva na desno)

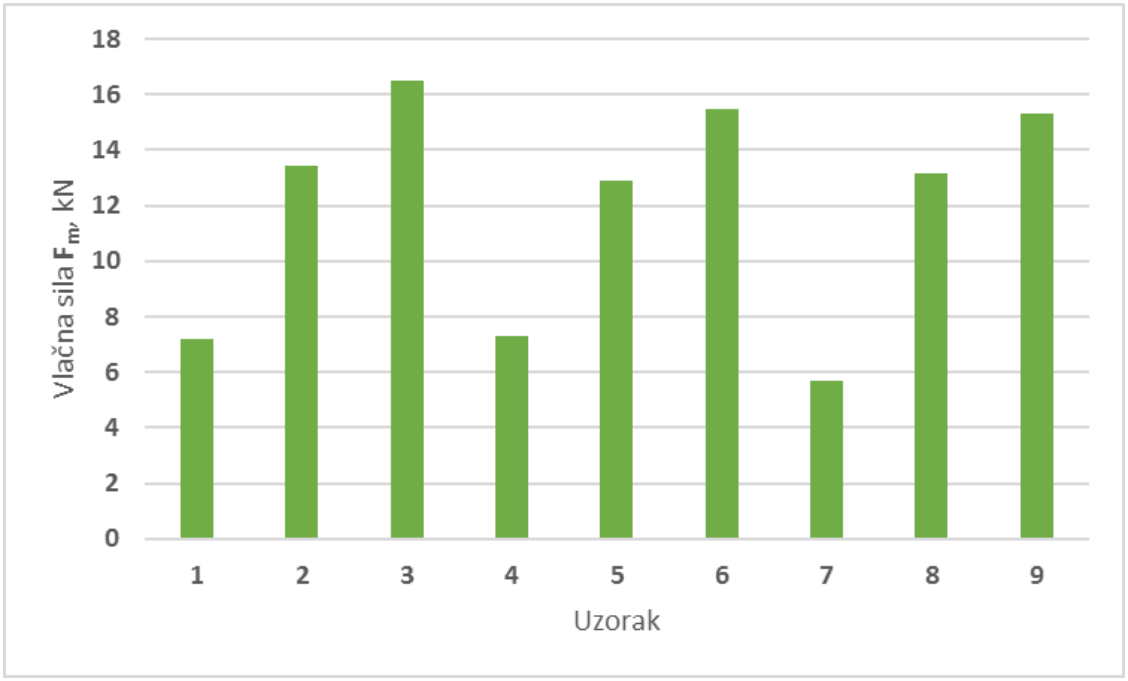
Vizualnim pregledom zavara nakon ispitivanja na kidalici na ispitnim uzorcima 1, 4 i 7 uočeno je naljepljivanje, dok je u svim zavarima, izuzev zavara na uzorku 4 uočena pora. Razlog nastajanja pore može biti nedovoljna sila na elektrodi.

Razornim ispitivanjem na kidalici dobiven je uvid u maksimalnu vlačnu silu koju svaki pojedini uzorak može podnijeti. Dijagrami dobiveni ispitivanjem prikazani su u prilogu završnog rada, a iznosi vlačne sile za svaki pojedini uzorak prikazani su u tablici 8.

Tablica 8 Maksimalne vlačne sile na kidalici

Uzorak	Maksimalna vlačna sila F_m, kN
1	7,216
2	13,433
3	16,510
4	7,283
5	12,909
6	15,467
7	5,706
8	13,169
9	15,335

Iznosi maksimalnih vlačnih sila za svaki od devet uzoraka prikazane su grafički na slici 61.



Slika 61 Grafički prikaz maksimalne vlačne sile ispitnih uzoraka

Na temelju očitanih podataka o maksimalnoj vlačnoj sili koju ispitni uzorci mogu izdržati, moguće je napraviti grubu procjenu čvrstoće zavara. Čvrstoća zavara računa se kao omjer maksimalne vlačne sile i površine zavara prema formuli:

$$Rz = \frac{Fm}{A} \tag{3}$$

gdje je *Rz,* N/mm^2 čvstoća zavara, F_m, N maksimalna vlačna sila, a A, mm^2 površina točkastog zavara. Površina točkastog zavara dobiva se prema sljedećoj formuli:

$$A = \frac{ds^2 \cdot \pi}{4} \tag{4}$$

pri čemu je $\acute{d}_s$, mm srednji promjer zavara sa strane spoja.

Prije samog proračuna čvrstoće zavara, a u svrhu veće točnosti, izmjerit će se promjeri zavara sa strane spoja, odnosno na mjestu loma. Mjerenje je izvršeno u programu *ImageJ,* a rezultati mjerenja, te srednji promjeri zavara prikazani su u tablici 9.

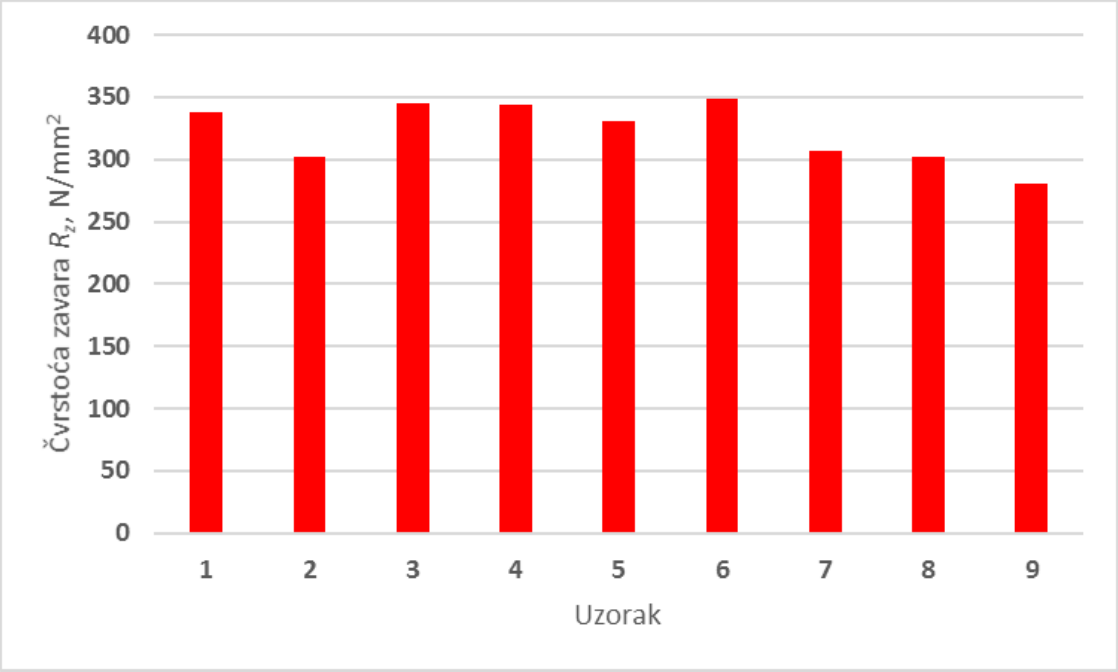
Tablica 9 Promjeri zavara sa strane spoja

Uzorak	**$\acute{d}_{z1}$, mm**	**$\acute{d}_{z2}$, mm**	**$\acute{d}_{sz}$, mm**
1	5,125	5,297	5,211
2	7,246	7,803	7,525
3	7,740	7,865	7,803
4	5,288	5,091	5,189
5	7,052	7,052	7,052
6	7,284	7,751	7,518
7	4,883	4,850	4,867
8	7,304	7,583	7,444
9	8,732	7,957	8,345

Nakon uvrštavanja karakterističnih vrijednosti u kalkulator dobiveni su iznosi čvrstoće svakog od uzoraka, odnosno zavara. Rezultati proračuna prikazani su u tablici 10.

Uzorak	**R_z, N/mm^2**
1	338,349
2	302,044
3	345,250
4	344,392
5	330,505
6	348,427
7	306,704
8	302,587
9	280,376

Rezultate prikazane u tablici, radi jasnije preglednosti, moguće je prikazati i grafički (Slika 62).



Slika 62 Grafički prikaz čvrstoće zavara

Analizom dobivenih podataka o čvrstoći svakog pojedinog uzorka može se zaključiti da se najčvršćim zavarom pokazao zavar na uzorku 6 prilikom čijeg je zavarivanja korištena maksimalna struja zavarivanja (8,5 kA), te vrijeme predgrijavanja od 1 s. Čvrstoća navedenog zavara iznosi 348,427 N/mm^2. Najmanja čvrstoća uzorka postignuta je zavarivanjem uzorka 9 uz maksimalne vrijednosti struje zavarivanja (8,5 kA) i vremena predgrijavanja (2 s). Čvrstoća tog uzorka iznosi 280,376 N/mm^2. Razlog takvog rezultata može biti prevelika količina topline dobivena odabirom maksimalnih parametara. Zavari na uzorcima 1, 4 i 7, iako su u mogućnosti izdržati najmanje iznose sile u usporedbi sa zavarima na ostalim uzorcima, pokazuju zadovoljavajuću čvrstoću s obzirom na veličinu srednjeg promjera zone metala zavara. Razlog tome je što porastom jakosti struje zavarivanja raste i srednji promjer metala zavara, stoga zavari na uzorcima 3, 6 i 9, iako su u stanju podnijeti najveće sile, nemaju nužno najveću čvrstoću. Adekvatnost čvrstoće, odnosno maksimalne sile koju uzorci mogu podnijeti ovisi o samom području primjene, no može se zaključiti da je, ukoliko se žele postići superiornija ili barem jednaka mehanička svojstva zavara u odnosu na osnovni materijal, potrebno koristiti veće iznose struje zavarivanja te sile pritiska za navedenu debljinu osnovnog materijala. Valja napomenuti da je primjenjivost ovakvog načina izračuna čvrstoće zavara, posebice uz greške poput naljepljivanja i pora, upitna. Za bolje razumijevanje utjecaja različitih parametara na kvalitetu elektrootpornog točkastog zavarivanja, potrebno je povećati broj ispitnih uzoraka, kao i broj promjenjivih parametara.

5. ZAKLJUČAK

Automobilsku industriju karakteriziraju masovna proizvodnja, potrebe za visokom preciznošću i kvalitetom, kao i što kraćim vremenima rada te tendencija ka smanjenju utjecaja ljudskog faktora. Pri odabiru prikladnog postupka zavarivanja, proizvođači automobila vode se sličnim načelima. Najvažniji kriterij pri odabiru tehnologije zavarivanja je upravo mogućnost postizanja pravilno izvedenih, pouzdanih zavara traženih svojstava i visoke kvalitete. Osim navedenog, važni kriteriji su također proizvodnost, ekonomičnost, mogućnost automatizacije i robotizacije kao i mogućnost implementiranja u proizvodnu liniju.

Najčešće primjenjivani postupci u autoindustriji su elektrootporno točkasto zavarivanje (koje uvelike prevladava), te MIG/MAG zavarivanje. Osim njih često se primjenjuju i TIG, lasersko zavarivanje, te zavarivanje trenjem. Za svaki od navedenih postupaka opisani su karakteristični parametri, oprema te područje primjene pri izradi automobila, a posebna pozornost pridana je elektrootpornom točkastom zavarivanju.

Elektrootporno točkasto zavarivanje je postupak spajanja metala pomoću topline nastale uslijed električnog otpora pri protoku električne struje kroz radne komade pritisnute određenom silom pritiska preko elektroda. Glavni parametri zavarivanja, koji ujedno imaju i najveći učinak na kvalitetu samog zavara su jakost struje zavarivanja, iznos sile pritiska te vrijeme zavarivanja. Velike radne brzine, ekonomičnost i dosljednost te jednostavna mehanizacija procesa samo su neka od obilježja elektrootpornog točkastog zavarivanja koja ovaj proces čine primamljivim proizvođačima automobila. Osim zavarivanja karoserija, ovaj proces koristi se i pri zavarivanju ostalih dijelova automobila poput kotača i sjedala sve do zavarivanja sitnih komponenata električnog sustava i svjećica.

U eksperimentalnom dijelu rada izvršeno je zavarivanje devet ispitnih uzoraka, debljine lima 3 mm, a promjenjivi parametri bili su jakost struje zavarivanja te vrijeme predgrijavanja. Nerazornim ispitivanjem vizualnom metodom utvrđeno je da veličina srednjeg promjera zavara, kao i zone utjecaja topline, proporcionalno raste sa porastom iznosa struje zavarivanja, dok vrijeme predgrijavanja nije imalo značajan utjecaj na veličinu srednjeg promjera zavara i zone utjecaja topline. Nakon razornog ispitivanja na kidalici, vizualnim pregledom utvrđeno je naljepljivanje na ispitnim uzorcima 1, 4 i 7 što je vjerojatno rezultat niske struje zavarivanja, te premale sile pritiska. Na svim ispitnim uzorcima, osim na uzorku 4, uočena je pora, čija pojava također može biti posljedica premale sile pritiska. Najveću silu kidanja, u iznosu od 16,510 kN podnio je zavar na uzorku 3, čije se zavarivanje izvelo bez predgrijavanja, a struja zavarivanja

iznosila je 8,5 kA. Najmanju silu kidanja, u iznosu od 5,706 kN podnio je zavar na uzorku 7, koji je izveden strujom zavarivanja jakosti 5,95 kA, a vrijeme predgrijavanja je iznosilo 2 s. Iz navedenih je rezultata vidljivo da iznos sile kidanja koju zavar može podnijeti značajno raste s porastom jakosti struje zavarivanja, dok predugo vrijeme predgrijavanja može uzrokavati smanjenje spomenutog iznosa. Najbolja svojstva u pogledu čvrstoće zavara dobivena su na ispitnom uzorku 6 prilikom čijeg je zavarivanja korištena struja zavarivanja od 8,5 kA, te vrijeme predgrijavanja od 1 s. Čvrstoća navedenog zavara iznosila je 348,427 N/mm^2. Najmanji iznos čvrstoće, iznosa 280,376 N/mm^2, postignut je zavarivanjem uzorka 9, pri čemu je korištena struja zavarivanja od 8,5 kA, te vrijeme predgrijavanja od 2 s. Razlog takvog rezultata može biti posljedica prevelike količine topline dobivene odabirom maksimalnih vrijednosti struje zavarivanja i vremena predgrijavanja. Može se zaključiti da bi za postizanje superiornijih ili barem jednakih mehaničkih svojstava zavara u odnosu na osnovni materijal bilo potrebno povećati vrijednost struje zavarivanja, kao i silu pritiska te njeno trajanje.

LITERATURA

[1] Vural, M.: Welding Processes and Technologies, Istanbul, 2014.

[2] Vendan, S. A., Gao, L., Garg, A., Kavitha, P., Dhivyasri, G., & SG, R.: Interdisciplinary Treatment to Arc Welding Power Sources, 2019.

[3] Matsuyama, K.: Trend of Automobile Vehicles and the Joining Technologies, 2007.

[4] Janota, M., Neumann, H.: Share of Spot Welding and Other Joining Methods in Automotive Production, 2008.

[5] Audi, https://www.audi-mediacenter.com/en/leightweight-construction-246, pristupljeno 24.12.2020.

[6] The Robot Report, https://www.therobotreport.com/abb-acquiring-ab-rotech-robotic-welding/, pristupljeno 27.12.2020.

[7] T. J. Lienert, S. Suresh Babu, T. A. Siewert i V. L. Acoff, ASM Metals HandBook Vol. 6A - Welding Fundamentals and Processes, Ohio: ASM International, 2011.

[8] R. W. Manufacturers: Resistance Welding Manual, Miami, Florida: Resistance Welder Manufacturers (RWMA), 2003

[9] Sedmak, A., Šijački-Žeravčić, V., Milosavljević, A., Đorđević, V., Vukićević, M.: Mašinski materijali II deo, izdanje Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, 2000

[10] C. L. Jenney i A. O'Brien: Welding Handbook, Miami: American Welding Society, 2001.

[11] G. Mathers: Resistance welding processes, 2002.

[12] Lin, W., Luo, H.: Robotic Welding, Singapore, 2014.

[13] Ouisse, M., Cogan, S.: Robust design of spot welds in automotive structures: A decision making methodology, 2009.

[14] Benedyk, J.C.: Aluminum alloys for lightweight automotive structures, Illinois Institute of Technology, USA, 2010.

[15] Garašić, I.: Tema MAG – Postupci zavarivanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2020.

[16] Zavarivanje.info, https://www.zavarivanje.info/cd/2689/osnovni-postupci-zavarivanja, pristupljeno 04.01.2021.

[17] Var.rs,https://var.rs/sve-o-zavarivanju/migmag-zavarivanje-co2-zavarivanje/, pristupljeno 04.01.2021.

[18] KEM Konstruktion, https://automobilkonstruktion.industrie.de/karosserie-interieur/auf-die-kalte-art/#slider-intro-2, pristupljeno 07.01.2021.

[19] Muncaster P. W.: A Practical Guide to TIG (GTA) Welding - Woodhead Publishing (1991)

[20] Mohan P.: Study the effects of welding parameters on TIG welding of Aluminum plate, Department of Mechanical Engineering National Institute of Technology Rourkela (India), 2014.

[21] Valentino Balboni, https://www.valentinobalboni.net/, pristupljeno 10.01.2021.

[22] Vaamonde Couso E., Vázquez Gómez J.: Laser Beam Welding and Automotive Engineering

[23] Bauer, B.: Laser – Zavarivanje – Rezanje, Postupci spajanja – materijali, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb

[24] Industrial laser solutions for manufacturing, https://www.industrial-lasers.com/welding/article/16485578/laser-development-at-volvo, pristupljeno 12.01.2021.

[25] TWI Global, https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/friction-and-forge-welding-processes-for-the-automotive-industry-september-1999, pristupljeno 15.01.2021.

[26] Bušić, M.: Zavarivanje trenjem aluminijskih sendvič panela rotirajućim alatom – Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.

[27] Sherman, A. M., Krause, A., Friedman, P., & Huston, D. Q.: Automotive Body Materials - Encyclopedia of Materials: Science and Technology, 2001.

[28] Fentahun, M. A., Savaş, M. A.: Materials Used in Automotive Manufacture and Material Selection Using Ashby Charts, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mizan -Tepi University, Ethiopia, 2018.

[29] Davies, G.: Materials for consideration and use in automotive body structures - Materials for Automobile Bodies, 2012.

[30] CARBOREP, European Harmonized Training for Personnel working with Car Body Repair Technology, 2019.

[31] Boron extrication, http://www.boronextrication.com/tag/body-structure/, pristupljeno 19.01.2021.

[32] Rowe, J.: Advanced materials in automotive engineering, Woodhead Publishing, 2012.

[33] Benedyk, J. C.: Aluminum alloys for lightweight automotive structures, Illinois Institute of Technology, USA, 2010.

[34] Powell, B. R., Luo, A. A., Krajewski, P. E.: Magnesium alloys for lightweight powertrains and automotive bodies, Advanced Materials in Automotive Engineering, 2012.

[35] Garašić, I.: Tema Elektrootporno zavarivanje – Postupci zavarivanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2020.

[36] Manladan S. M., Yusof F., Ramesh S., Fadzil M., Luo Z., Ao S.: A review on resistance spot welding of aluminum alloys, 2016.

[37] Kulekci, M.K.: Magnesium and its alloys applications in automotive industry, 2007.

[38] Manladan S. M., Yusof F., Ramesh S., Fadzil M.: A review on resistance spot welding of magnesium alloys, 2016.

[39] Uređaj za elektrootporno zavarivanje TV – 15 PKS - Tehničke upute

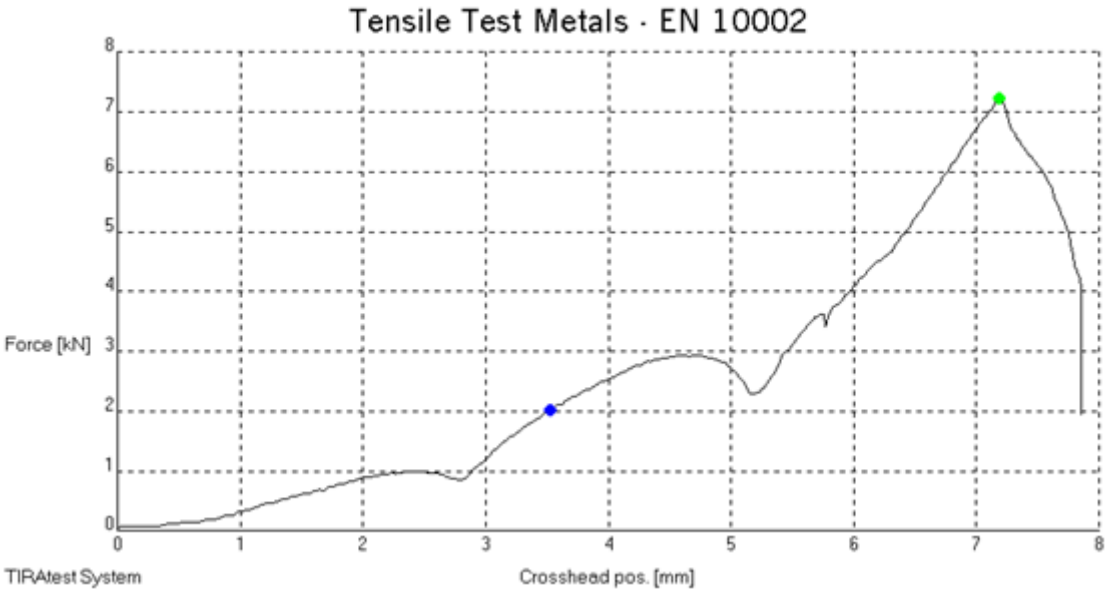
[40] ISO 14329:2003 – Resistance welding – Destructive tests of welds – Failure types and geometric measurements for resistance spot, seam and projection welding, Geneva

PRILOZI

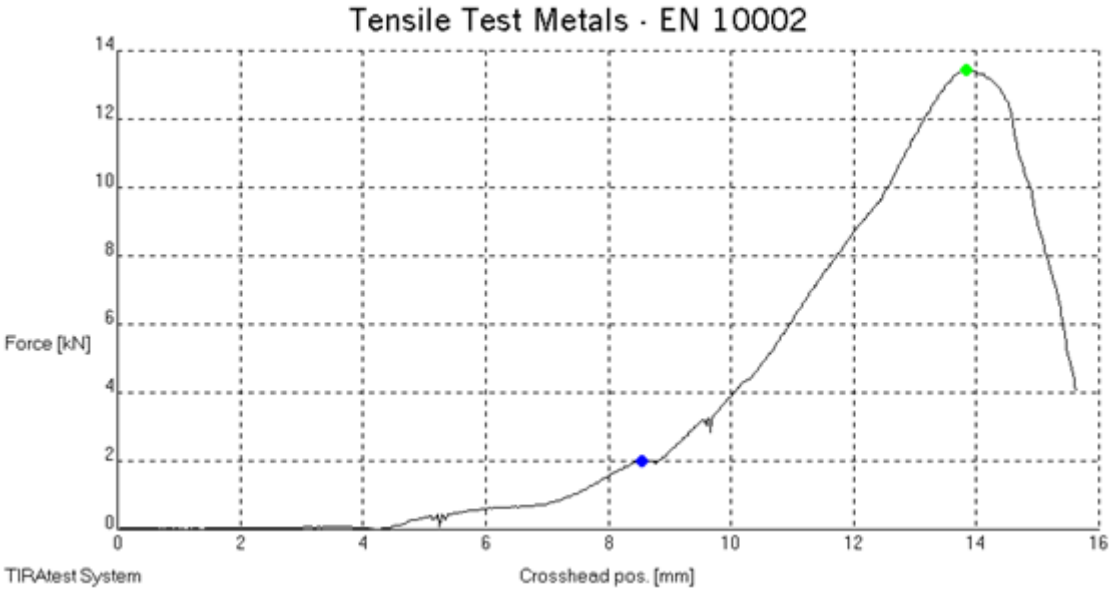
I. CD-R disc

II. Dijagrami ispitivanja ispitnih uzoraka na kidalici EU 40 mod

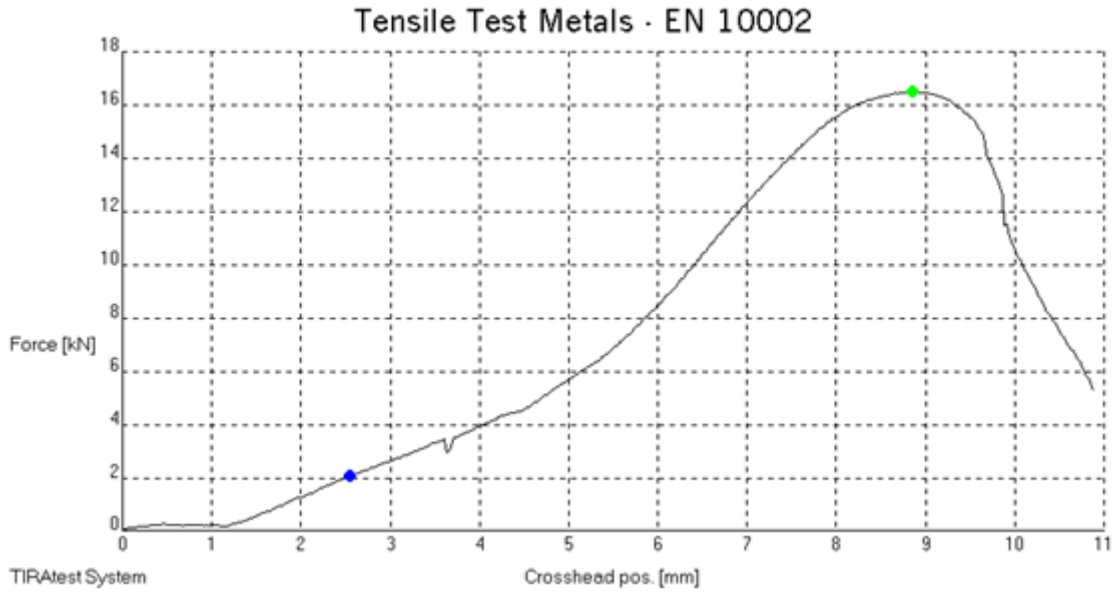
Ispitni uzorak 1



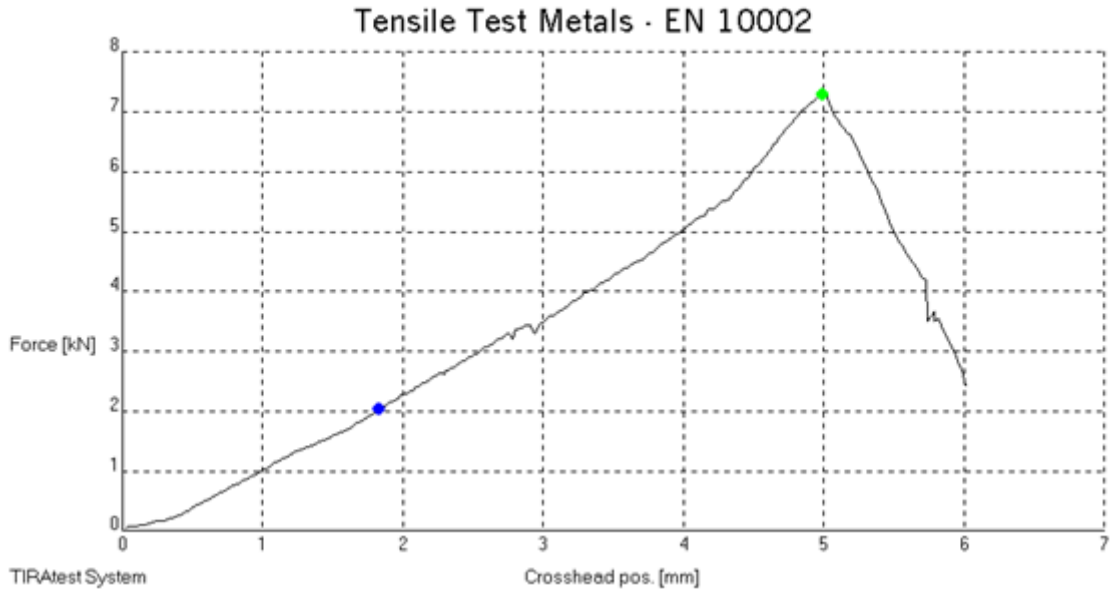
Ispitni uzorak 2



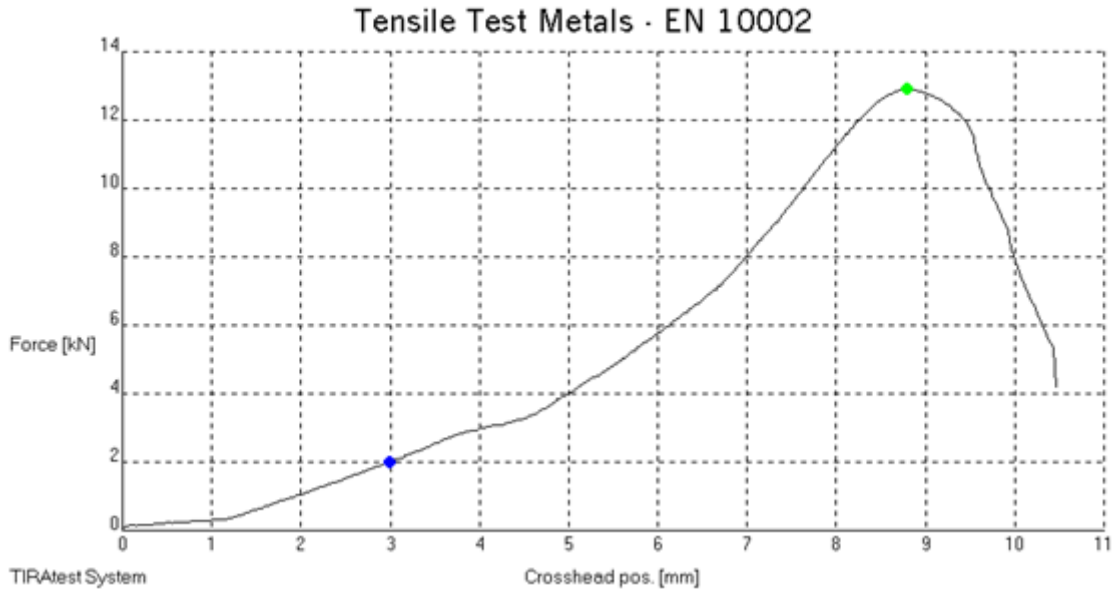
Ispitni uzorak 3



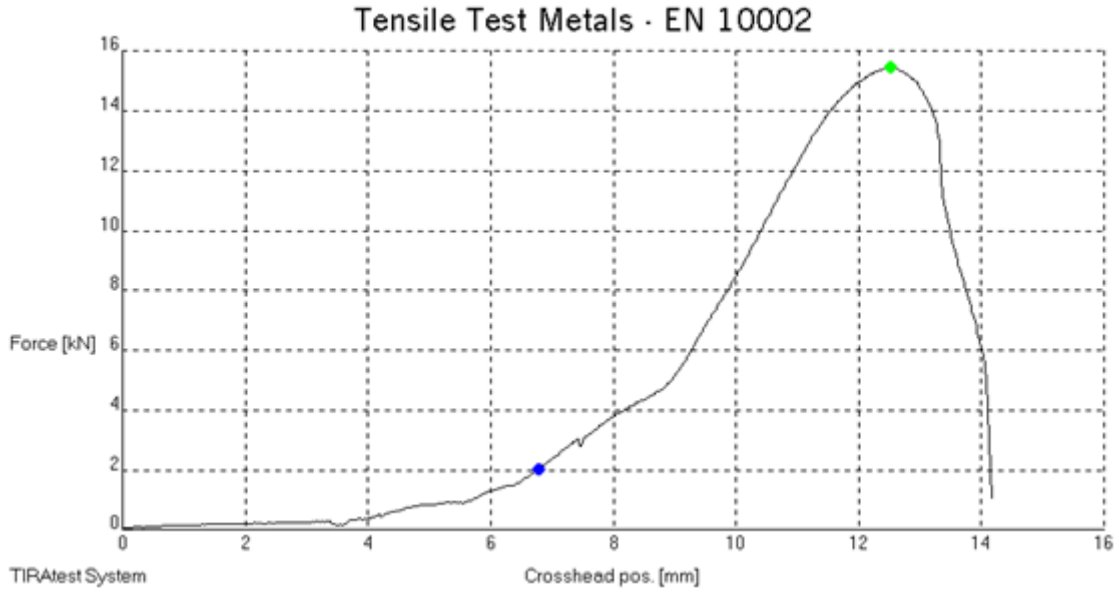
Ispitni uzorak 4



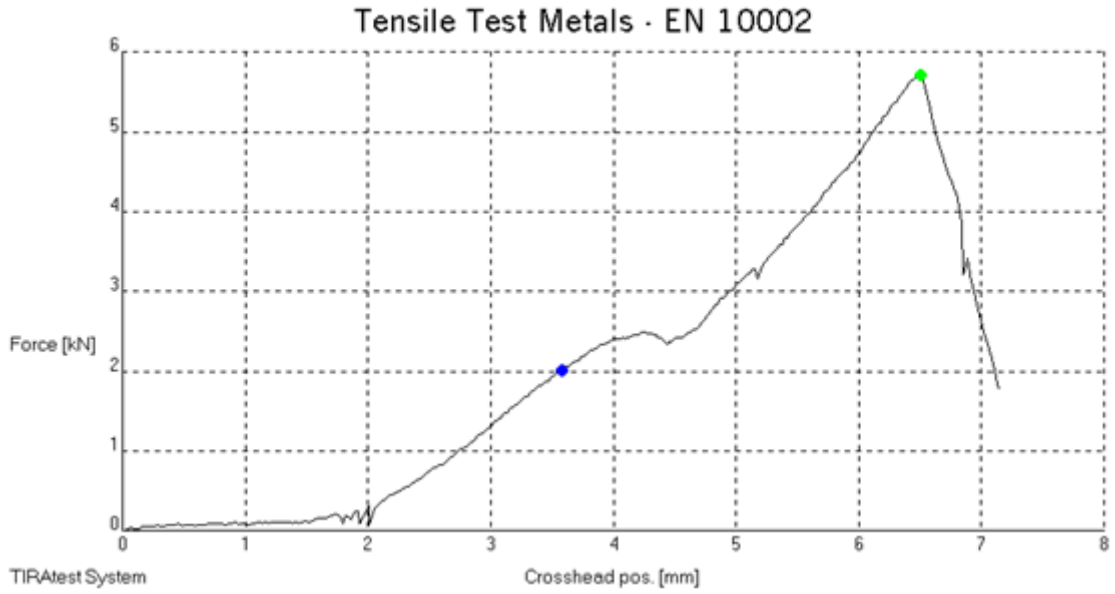
Ispitni uzorak 5



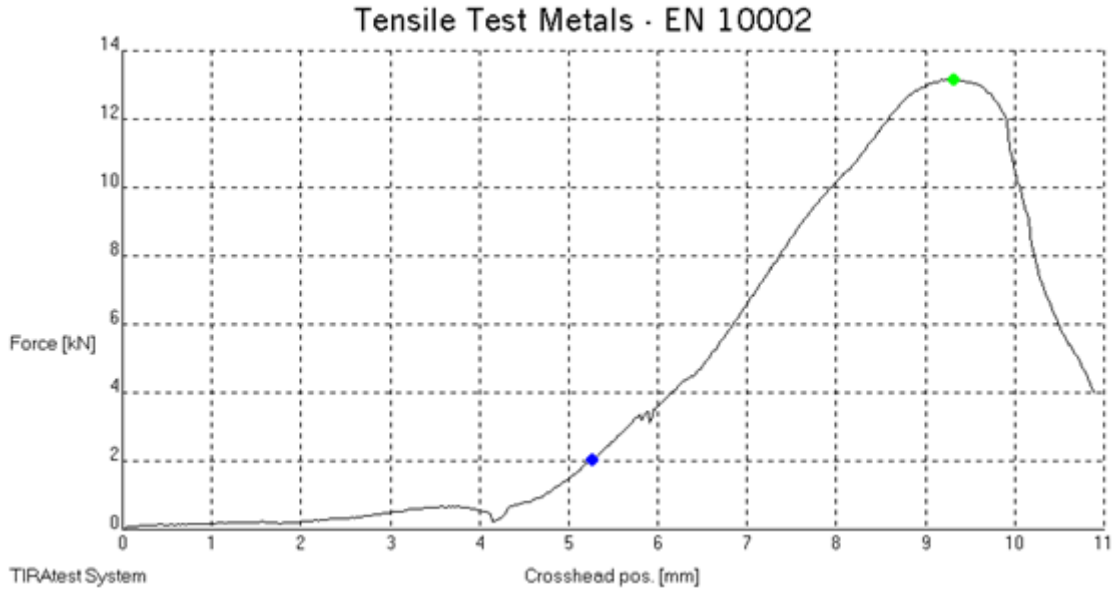
Ispitni uzorak 6



Ispitni uzorak 7



Ispitni uzorak 8



Ispitni uzorak 9

