

# Analiza svojstava zavarenog niskougličnog čelika

---

**Kurtović, Dino**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Metallurgy / Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:115:749410>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-20**



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET  
UNIVERSITY OF ZAGREB  
FACULTY OF METALLURGY

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb - Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Dino Kurtović

ZAVRŠNI RAD

Sisak, rujan 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Dino Kurtović

ANALIZA SVOJSTAVA ZAVARENOG NISKOUGLJIČNOG ČELIKA

ZAVRŠNI RAD

Voditelj: doc. dr. sc. Ivan Jandrić

Članovi Povjerenstva za ocjenu i obranu završnog rada:

prof. dr. sc. Stoja Rešković - predsjednik  
doc. dr. sc. Ivan Jandrić - član  
doc. dr. sc. Martina Lovrenić-Jugović - član  
prof. dr. sc. Stjepan Kožuh - zamjenski član

Sisak, rujan 2019.

## *Zahvala*

*Ovim putem zahvaljujem se svima koji su svojim prijedlozima i savjetima pomogli u izradi ovog rada. Hvala mojoj obitelji, prijateljima na velikoj podršci tijekom studiranja. Posebna zahvala ide mom voditelju doc. dr. sc. Ivanu Jandrliću na pomoći, vodstvu i strpljenju koju mi je pružio.*

## SAŽETAK

### ANALIZA SVOJSTAVA ZAVARENOG NISKOUGLJIČNOG ČELIKA

U radu je dan teorijski pregled postupaka zavarivanja metalnih materijala. Poseban osvrt je dan na postupke elektrootpornog točkastog zavarivanja. Kako je elektrootporno točkasto zavarivanje najčešće korišteni postupak spajanja u automobilskoj industriji, poseban osvrt je dan na parametre zavarivanja i njihov utjecaj na konačnu kvalitetu zavara. Opisane su najčešće greške koje se javljaju u zavaru pri točkastom zavarivanju, kao i metode kojima su vršena strukturna ispitivanja i mjerenje tvrdoće zavarenih spojeva. U eksperimentalnom dijelu na prethodno zavarenim uzorcima uzimanih iz limova s tri tipa vozila, provedena je metalografska priprema uzoraka brušenjem i nagrivanjem. Nagrivanje je provedeno u dvije otopine, prvo u otopini nital (0,5 % HNO<sub>3</sub> u destiliranoj vodi) kako bi odredili početnu strukturu, a nakon ponovnog poliranja otopinom Klemm 1, kako bi utvrdili postojanje zaostalog austenita. Nakon strukturnih istraživanja provedeno je mjerenje makro i mikro – tvrdoće u području zavara. Time se istražio utjecaj strukturnih promjena u području zavara na svojstva zavarenog spoja, točnije tvrdoća. Iz rezultata ispitivanja i provedenih analiza zaključeno je kako tijekom elektrootpornog točkastog zavarivanja ispitivanih limova dolazi do pojave zaostalog austenita u strukturi u zoni utjecaja topline i zoni taljenja. Također uočena je pojava dendritnog rasta zrna i martenzit u zoni taljenja. Izmjerene vrijednosti tvrdoće pokazuju kako uslijed promjene strukture dolazi i do značajne promjene u izmjerenim vrijednostima tvrdoće u odnosu na osnovno stanje. Najviši iznosi tvrdoće izmjereni su u zoni taljenja kod svih uzoraka. Također su i u zoni utjecaja topline izmjerene više vrijednosti tvrdoće u odnosu na tvrdoću polaznog materijala. Dokazano je kako uslijed zavarivanja dolazi do pojave zaostalog austenita u području zone utjecaja topline i zone taljenja, te mjestimične pojave martenzita u zoni taljenja, što za posljedicu ima porast vrijednosti tvrdoće u području zavara.

**Ključne riječi:** elektrootporno točkasto zavarivanje, mikrostruktura, zaostali austenit, makrotvrdoća, mikrotvrdoća

## SUMMARY

### ANALYSIS OF WELDED LOW-CARBON STEEL PROPERTIES

The paper provides a theoretical overview of welding procedures for metallic materials. Since spot welding is the most commonly used welding procedure in automotive industry, special attention is given to welding parameters during spot welding and their impact on final weld quality. In the paper are also described the most common errors that occur during spot welding, and the methods that are used for structural testing and for measurement of weld hardness. In the experimental part the metallographic preparation of specimens was performed on previously welded specimens taken from sheets from three types of vehicle by grinding and etching. Etching was carried out in two solutions, first in NITAL solution (0.5% HNO<sub>3</sub> in distilled water) to determine the initial structure, and after re-polishing with Klemm 1 solution to determine the existence of residual austenite. After structural studies, the measurement of macro and micro - hardness in the weld area was performed. The effect of structural changes on the properties of the welded joint, namely hardness, were investigated. From the test results and performed analyzes, it can be concluded that during the electric resistance spot welding in the tested steel sheets there is occurrence of residual austenite in the structure of the heat affective zone and melting zone. There was also observed the occurrence of dendritic grain growth and martensite structure in the melting zone. Measured hardness values show that due to the change in structure, there is a significant change in the measured hardness values relative to the starting metal. The highest hardness values were measured in the melting zone at all samples. Also, in the heat affected zone the measured hardness values were much higher relative to the as received material. It has been shown that due to the welding there is occurrence of retained austenite in the heat affected zone and the melting zone, and the occasional appearance martensite in the melting zone, which results in increase of hardness in the welded area.

**Keywords:** electric resistance spot welding, micro-structure, residual austenite, macro-hardness, micro-hardness

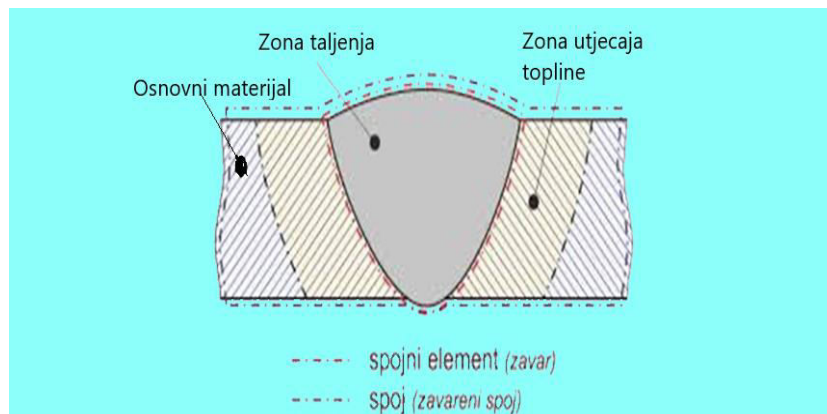
## Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. ZAVARIVANJE .....	2
2.1. POSTUPCI ZAVARIVANJA.....	3
2.1.1. Zavarivanje taljenjem.....	3
2.1.2. Zavarivanje pritiskom .....	6
2.1.3. Elektrootporno zavarivanje.....	7
2.1.4. Elektrootporno točkasto zavarivanje.....	9
3. ZONA TALJENJA I UTJECAJA TOPLINE.....	11
3.1. Zona vara kod točkastog zavarivanja .....	11
4. TVRDOĆA I METODE ISPITIVANJA.....	13
4.1. Metode mjerenja tvrdoće.....	13
5. METALOGRAFIJA .....	15
6. EKSPERIMENTALNI DIO .....	17
7. REZULTATI ISPITIVANJA I RASPRAVA.....	21
7.1. Rezultati strukturnih ispitivanja .....	21
7.2. Rezultati ispitivanja tvrdoće.....	27
8. ZAKLJUČAK.....	30
9. LITERATURA .....	31

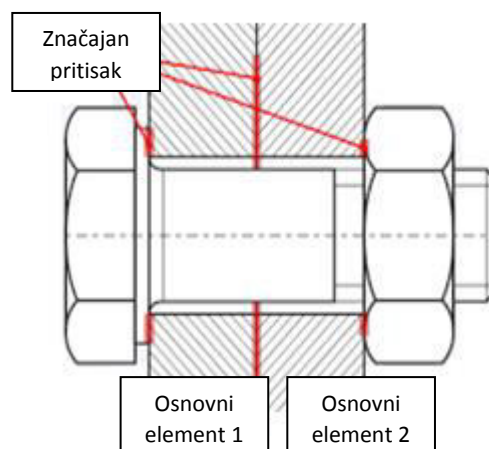
## 1. UVOD

Tehnike spajanja materijala bitne su u izradi metalnih konstrukcija i proizvoda te njihovom oblikovanju iz raznih metalnih i nemetalnih materijala. Kako bi se mogla odabrati tehnika spajanja prijeko je potrebno dobro poznavanje svojstava materijala. Osiguranje kompaktnosti spojenih komada i mogućnost pouzdanog podnošenja napreznja koja nastaju između spojenih komada je cilj tehnika spajanja materijala [1].

Spoj može biti rastavljiv spoj ili nerastavljiv spoj, slika 1 i slika 2. Kada se sastavljeni dijelovi ne mogu rastaviti bez razaranja ili oštećenja takve spojeve zovemo nerastavljivi spojevi, dok se kod rastavljivih spojeva dijelovi mogu rastaviti bez razaranja ili oštećenja te ih možemo opet sastaviti. Zakivanje, zavarivanje, utaljivanje, ulaganje, lemljenje, lijepljenje te spajanje kitom spadaju u nerastavljive spojeve, dok su stezno spajanje, spajanje vijcima, spajanje klinovima te spajanje zaticima i svornjacima vrste rastavljivih spojeva [1, 2].



Slika 1. Spoj zavarom (nerastavljiv) [3]



Slika 2. Vijčani spoj (rastavljiv) [4]



Cilj ovog završnog rada je detaljnije obraditi i istražiti spojeve ostvarene elektrootpornim točkastim zavarivanjem. Strukturnim istraživanjem odrediti će se postojanje zaostalog austenita u području zavara.

Ovaj tip spajanja je danas najzastupljeniji u autoindustriji pri spajanju više dijelova karoserija automobila i drugih vozila u jednu cjelinu. Pri proizvodnji većine karoserijskih komponenti vozila (kao što su nosivi profili, vrata, prtljažnik, poklopac motora, krov i dr.), koriste se postupci dubokog izvlačenja što predstavlja postupak obrade materijala deformacijom gdje se istovremenim savijanjem i istezanjem dobije oblik predmeta. Na strojevima poput ekscentar, hidrauličkih ili koljenastih preša se dubokim izvlačenjem oblikuju limovi debljine 0,02-50 mm [5].

Naknadno je potrebno te komponente spojiti u jedinstvenu cjelinu, tj. karoseriju vozila. Upravo to u automobilskoj industriji obavljaju roboti, tj. vrše spajanje dijelova karoserije točkastim zavarivanjem. Oni predstavljaju sofisticirane uređaje za točkasto zavarivanje kojima se postiže velika preciznost i bolja kvaliteta spoja te se njima ispunjavaju posebni zahtjevi u proizvodnji. Također se danas koriste i razni prijenosni uređaji za točkasto zavarivanje kod reparaturnih radova oštećenja karoserije, koji imaju manje mogućnosti kontrole kvalitete zavarenih spojeva. Općenito kod spajanja komponenti karoserija u autoindustriji, potrebno je oprezno voditi postupke točkastog zavarivanja kako bi konačni zavari bili u skladu s brojnim zahtjevima za sigurnošću konačnog proizvoda. To se prvenstveno odnosi na veličinu i oblik zavara, strukturu zavara, njegova mehanička svojstva pri statičkim i dinamičkim opterećenjima i mnogim drugim zahtjevima [6].

Cilj završnog rada je dati pregled postupaka spajanja metalnih materijala zavarivanjem, s detaljnijim osvrtom na točkasto zavarivanje, formiranje zavara pri točkastom zavarivanju i bitne karakteristike koje on mora zadovoljavati u autoindustriji. Nadalje, dat će se pregled korištenih metoda ispitivanja u ovom završnom radu, kojima će se ispitati točkasti zavari. Eksperimentalno će se provesti analiza strukturnih promjena u području zone taljenja, zoni utjecaja topline i osnovnom materijalu tijekom točkastog zavarivanja limova za autoindustriju. Strukturnim ispitivanjima istražiti će se porast zrna i prisutnost zaostalog austenita. Također će se provesti ispitivanja mikro i makro tvrdoće, kojima će se ispitati utjecaj nastalih strukturnih promjena na vrijednosti tvrdoće u zavarenom spoju.

## **2. ZAVARIVANJE**

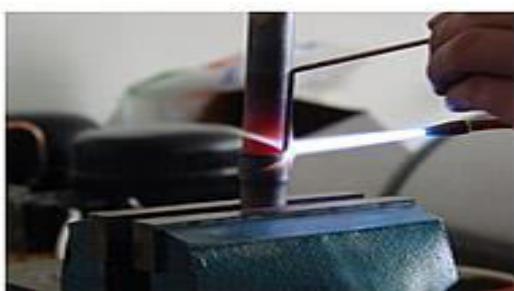
Zavarivanje je spajanje dvaju ili više, istovrsnih ili raznovrsnih materijala, taljenjem ili pritiskom, sa ili bez dodavanja dodatnog materijala, na način da se dobije homogen zavareni spoj. Prema načinu spajanja metode zavarivanja dijele se u dvije velike skupine: zavarivanje taljenjem i zavarivanje pritiskom [7]. Zavarivanje taljenjem predstavlja zavarivanje materijala na mjestu spoja u rastaljenom stanju gdje se može, a i ne mora dodavati materijal. Zavarivanje pritiskom predstavlja zavarivanje materijala u omekšanom ili čvrstom stanju pomoću pritiska ili udarca na mjestu spoja [7].

Toplinska energija se najčešće koristi kao izvor energije za spajanje materijala zavarivanjem. Glavna obilježja izvora energije su koncentriranost gustoće snage, brzina kretanja izvora te snaga izvora. Da bi se materijal doveo u stanje za zavarivanje oblik energije korištene za zavarivanje nije bitan (kemijska, difuzijska, električna i optička), već je bitna gustoća snage te izvori mogu biti visoke, uobičajene i niske gustoće [1].

## 2.1. POSTUPCI ZAVARIVANJA

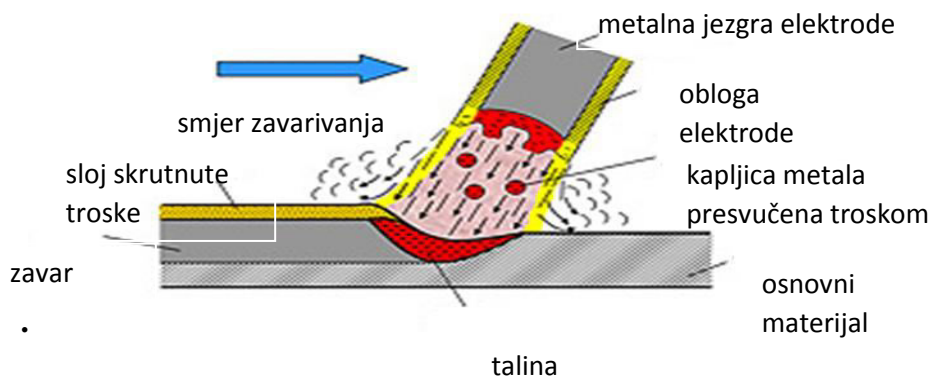
### 2.1.1. Zavarivanje taljenjem

**Plinsko zavarivanje** je jedna od najsvestranijih i najstarijih postupaka zavarivanja taljenjem. Izgaranjem gorivih plinova u kisiku dobiva se toplinska energija. Plamen koji nastaje koristi se za zagrijavanje rubova metala i dodatnog materijala u šipkastom obliku. Acetilen ( $C_2H_2$ ) najčešće se koristi od gorivih plinova, a mogu se još koristiti gradski plin, vodik, metan, butan, propan, itd. Kisik i acetilen miješaju se plameniku, pale se i izgaranjem stvaraju temperature u plamenu od  $3100\text{ }^\circ\text{C}$  [1,7]. Najviše se koristi za montažne i instalacijske radove (cijevi, cilindri, itd.)



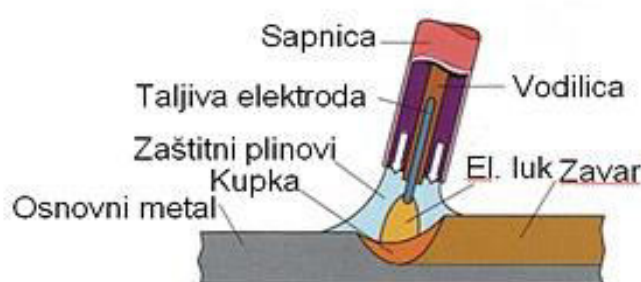
Slika 3. Plinsko zavarivanje [6]

**Ručno elektrolučno zavarivanje obloženim elektrodama (REL)** gdje istosmjernom ili izmjeničnom strujom se zavaruju i navaruju sve vrste metala. Zavarivač je neophodan jer je postupak ručni, gdje se električni luk postavlja između vrha elektrode i radnog komada. Prednosti ovog postupka su jeftina oprema, širok spektar elektroda, koristi se za sve konstrukcije čelika, moguće je zavarivanje u svim položajima, koristi se za sve debljine zavara te je na taj način moguće provesti zavarivanje u više slojeva. Nedostaci ovog postupka su mogućnost greške jer se ručno obavlja, potrebna je ventilacija zbog puno dima, postojana je opasnost od troske u zavaru, mora se ukloniti otpad te su moguće greške radi prekidanja i uspostavljanja elektrode [1, 7].



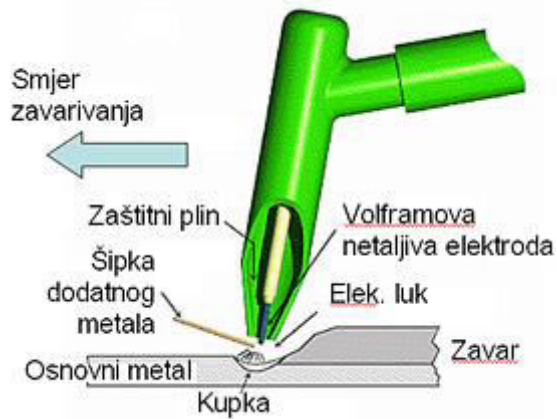
Slika 4. Shema električnog luka s obloženom taljivom elektrodom [6]

**Zavarivanje s taljivom elektrodom u zaštitnoj plinskoj atmosferi** gdje se električni luk uspostavlja i održava između vrha taljive metalne elektrode, odnosno žice i zavarnog metala. Električni luk stvara potrebnu toplinu te osigurava u okruženju zaštitnog plina taljenje dodatnog materijala i spajanih rubova osnovnog materijala. Kada se kao zaštitni plinovi koriste neutralni ili inertni plinovi (npr. argon) taj postupak se naziva MIG (Metal Inert Gas) te kada se kao zaštitni plinovi koriste aktivni plinovi (najčešće CO<sub>2</sub>) onda postupak se naziva MAG (Metal Active Gas). Prednosti MIG/MAG postupka su brzine zavarivanja, tanki srednji i debeli komadi se mogu zavarivati, koriste se za sve vrste metala u svim položajima zavarivanja te se postupak može automatizirati i robotizirati. Nedostaci su to što je oprema skupa, treba obratiti veliku pozornost oko zaštite zbog plina, treba se raditi s dvije ruke te dolazi do opasnosti od naljepljivanja [1, 7].



Slika 5. MIG/MAG postupak [7]

**Zavarivanje s netaljivom elektrodom u zaštitnoj plinskoj atmosferi** gdje se postupak zasniva na uspostavljanju i održavanju električnog luka volframove netaljive elektrode i radnog komada uz korištenje zaštite neutralnog ili inertnog plina. Ovaj postupak se naziva TIG postupak (Tungsten Inert Gas) gdje rubne dijelove osnovnog metala tali i spaja toplina električnog luka, no ako je potrebno dodaje se i dodatni materijal. Postupak je razvijen za zavarivanje magnezija i njegovih legura, dok se danas koristi i za aluminij, titan, tanke čelične limove, nehrđajući čelik i druge neželjene metale te njihove legure. Prednost TIG postupka je da osigurava visokokvalitetno zavarivanje, zavareni spojevi su homogenih i dobrih mehaničkih svojstava, koristi se za zahtjevne materijale te ovakvo zavarivanje daje najkvalitetniji zavar. Nedostatak je mala brzina zavarivanja, oprema je skupa kao i plin za zaštitu (argon), skupoća volframa te radi oksidacije neophodna je sekundarna zaštita [1,7].



Slika 6. TIG Zavarivanje [7]

**Zavarivanje plazmenim lukom** gdje se plazma koristi za prijenos električnog luka do obratka. Plazma predstavlja plin koji je zagrijan na jako visoke temperature (5000 °C) i ioniziran tako da postane električki vodljiv. Zbog visoke topline luka metal koji se zavaruje topi se i spaja. Postupak se koristi za gotovo sve metale, a najčešće se zavaruju nikal, titan, aluminij, bakar i njihove legure te visoko legirani i nehrđajući čelici. Prednost ovog postupka je taj da razmak nije kritične veličine između pištolja i radnog komada, dolazi do potpunog protaljivanja u jednom prolazu jer velika koncentracija energije u mlazu plazme omogućava duboku penetraciju, smanjene su kutne deformacije jer je zona utjecaja topline uska s paralelnim rubovima, veća je brzina zavarivanja uz stabilan luk zbog velike koncentracije energije te su spojevi visoke kvalitete. Nedostatak je da pištolji moraju imati vodeno hlađenje te su osjetljiviji na oštećenje nego kod TIG postupka i razmak između vrha elektrode i sapnice zahtjeva vrlo točno održavanje [1, 7].



Slika 7. Zavarivanje plazmenim lukom [6]

### 2.1.2. Zavarivanje pritiskom

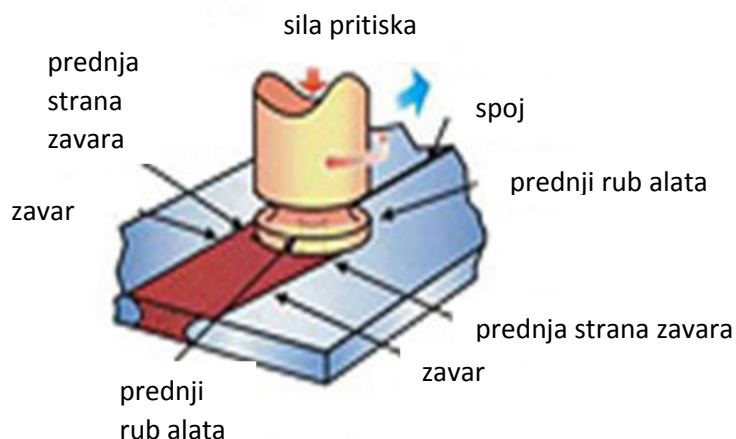
**Zavarivanje trenjem** se izvodi laganim kretanjem jedne komponente u odnosu na drugu duž zajedničke dodirne površine uz pritisak na mjesto spajanja. Materijal omekša zbog topline nastale trenjem te postaje plastičan i površinski materijal se istisne van rubova spoja tako da se čisti materijal zavaruje.

Tri su vrste zavarivanja trenjem:

1. Okretno zavarivanje trenjem kojim se zavaruju čelične osovine i poluosovine, elementi ovjesa, vilice mjenjača, ventili motora i dr.,

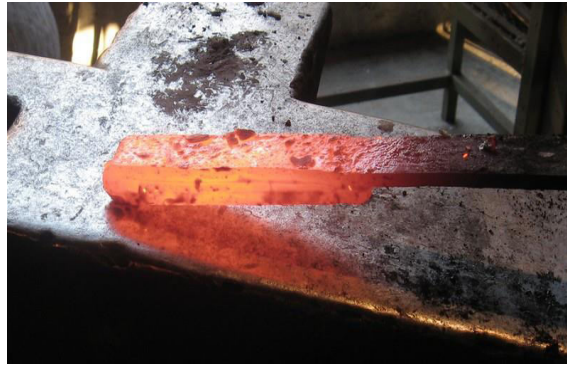
2. Uzdužno zavarivanje trenjem u avionskoj industriji služi za spajanje lopatica propelera na disk. Ovaj postupak je jeftin i s njim se spajaju obruči kotača, diskovi kočnica i drugi dijelovi motora,

3. Zavarivanje trenjem s okretnim alatom gdje se zavaruju aluminijski profili debljine od 2 do 12 mm, zavar je odličan te je postupak ekološki prihvatljiv jer nema razvijanja zavarivačkih plinova i ne dolazi do prskanja elektroda [1, 6].



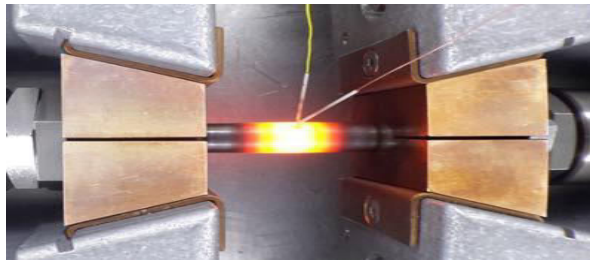
Slika 8. Zavarivanje trenjem s okretnim alatom [6]

**Kovačko zavarivanje** predstavlja staru tehniku zavarivanja koja uključuje povezivanje materijala pomoću sile i topline, pri čemu se metal zagrijava vatrom, a sila se primjenjuje udaranjem. Deblji komadi se lakše formiraju zbog tendencije dužeg zadržavanja topline dok se tanji komadi mogu zavariti prilikom zagrijavanja što dovodi do pojave mjehurića na površini. Izvori pritiska su razni, neki koriste ručni čekić dok se neki služe kućištem za napajanje. Prilikom pritiska elementi iz jednog komada metala mogu prijeći na drugi komad. Ovaj postupak se može obaviti sa sličnim ili različitim metalima, no kada se koriste različiti metali zavareni proizvod je čvršći od bilo kojeg od metala pojedinačno. U konačnom proizvodu nema pukotina ili razmaka između slojeva čak i kada ne nekoliko slojeva zajedno spojeno [8].



Slika 9. Kovačko zavarivanje [9]

**Difuzijsko zavarivanje** obavlja se pri temperaturi na mjestu zavarivanja iznad temperature kristalizacije vrlo slabim pritiskom i tlakom, jednostavnom ili izmjenjivom difuzijom površinskih atoma na maloj udaljenosti. Obavlja se u vakuumu ili u zaštitnim plinovima i solnim kupeljima. Koristi se u elektrotehnici, fluidnoj tehnici, vakuumskoj tehnici i raketnoj tehnici te za zavarivanje obloga kočnica. Prednost je da nema potrebe za potrošnim materijalima (elektrode za zavarivanje, tekućine ili posebni plinovi), niski intenzitet energije, istovremeno se može zavarivati nekoliko materijala, mogu se spojiti velike nekoliko metara dugačke i široke konstrukcije te mali dijelovi koji se mjere u mikronima i visoka je kvaliteta šavova. Nedostatak je skupa oprema za vakuumsku instalaciju, posebna obuka osoblja, što je veća vakuumska instalacija teže je dobiti potreban vakuum unutar komore [1, 10].



Slika 10. Difuzijsko zavarivanje u vakuumu [10]

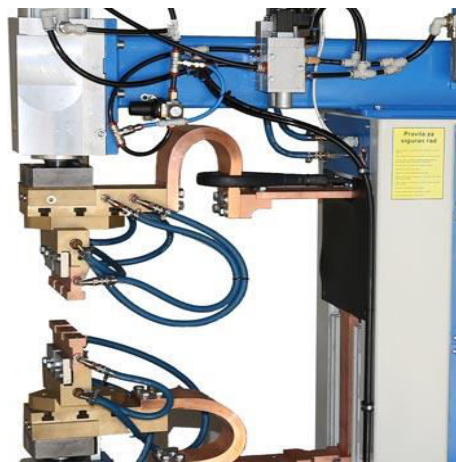
### 2.1.3. Elektrootporno zavarivanje

Elektrootporno zavarivanje kod kojeg su brojni postupci koje dijelimo ovisno o načinu primjene toplinske energije i mehaničkih sila, a to su točkasto, bradavičasto, zavarivanje iskrenjem, šavno, sučeljno elektrootporno zavarivanje pritiskom, visokofrekventno zavarivanje, itd. Kod ovog postupka toplina koja nastaje zbog otpora prolazu struje metal se zagrijava i tali, a nema električnog luka te su toplinska i mehanička energija potrebne za dobivanje zavarenog spoja. Nastoji se raditi sa vrlo jakim strujama (100-



300 000 A) tako da što brže dođe do protoka struje. Većinom se koriste izvori izmjenične struje, ali mogu se koristiti i izvori istosmjerne struje [1].

**Bradavičasto elektrotoporno zavarivanje** je postupak kod kojeg se lim s izbočinama (bradavicama) postavlja na dugi ravni lim gdje se zavarivanje ostvaruje istodobnim nastajanjem više točaka. Ploča ili ravna elektroda velikog promjera pokriva niz izbočina koje se lakše tale i tako nastaju spojevi. Prednost je manja deformacija površina zavarenih komada, manja osjetljivost na nečistoće zavarenih površina te manja potrošnja elektroda. Nedostatak je to što je potrebna oprema visoke snage zbog istovremenog zavarivanja svih točaka i što je velik trošak izrade bradavica [1].



Slika 11. Uređaj za bradavičasto zavarivanje [11]

**Elektrotoporno šavno zavarivanje** je postupak sličan točkastom zavarivanju, a koristi se tamo gdje su potrebni nepropusni spojevi. Osiguranje mehaničkog pritiska i dovoda električne struje ostvaruje se pomoću obrtnih diskova ili valjaka. Postupak se koristi za proizvodnju cijevi iz visokougličnih čelika. Tako nastale cijevi odlikuje visoka čvrstoća zavarenog spoja i točnost geometrijskih oblika [1].

**Elektrotoporno zavarivanje iskrenjem** je postupak koji se provodi kroz tri faze, a to su predgrijavanje, iskrenje (gdje se tali tanki sloj predgrijanih komada) te sabijanje (gdje se osigurava nastajanje zavarenog spoja). Postupak se koristi za zavarivanje tankostijenih otvorenih i zatvorenih profila te za zavarivanje cijevnih sustava u kotlogradnji [1].

**Sučeljno elektrotoporno zavarivanje pritiskom** je postupak gdje se radni komadi dovode pritiskom u kontakt po čitavom poprečnom presjeku. Postupak je dosta ograničen mogućnostima zbog velike potrošnje električne energije, skupe pripreme te je nemoguće međusobno zavarivanje komada različitih poprečnih presjeka [1].

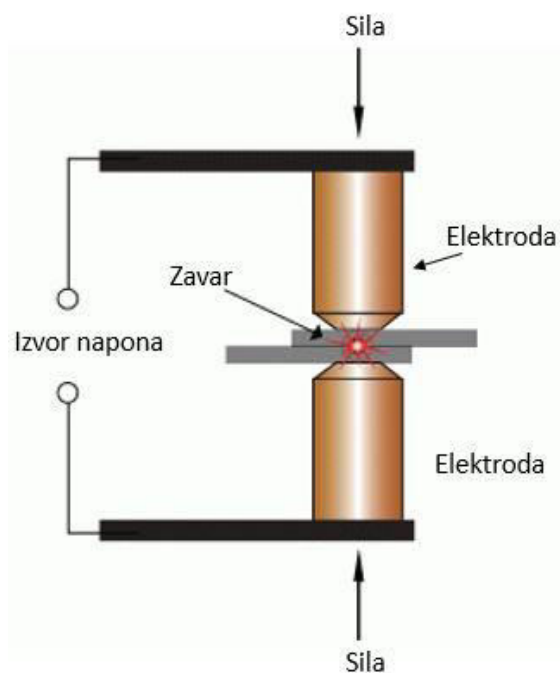
**Elektrotoporno visokofrekventno zavarivanje** je postupak gdje se toplina zavarivanja stvara u vodiču. Primjenjuje se kao visokofrekventno indukcijsko zavarivanje uz pritisak. Koristi se za izradu plinovodnih, vodovodnih i konstrukcijskih cijevi promjera od 22,5 do 219 mm. Kod takvog postupka zavarivanja dolazi do trakaste strukture zavarenog spoja jer se ne može potpuno isključiti neravnomjernost tijekom zagrijavanja cijevnog uložka iako je zavareni spoj visoke kvalitete [1].

**Elektrootporno točkasto zavarivanje** je postupak zavarivanja gdje se dobiva zavareni spoj taljenjem dvaju materijala između dobro stegnutih elektroda kroz koje se dovodi električna energija, tj. zavarivanje gdje se mjesta dodira preklopnog spoja zagrijavaju dovodenjem električne struje i zavaruju pod tlakom točkastim zavarom [12].

#### 2.1.4. Elektrootporno točkasto zavarivanje

Široka je primjena elektrootpornog točkastog zavarivanja, no najviše se koristi tamo gdje je potrebno zavariti puno spojeva te gdje su potrebne serijske i masovne proizvodnje. Najveća primjena je u automobilskoj industriji [13].

Kako je ranije navedeno, postupak se provodi pritiskom elektroda na materijal i propuštanjem električne energije kroz spoj, slika 12.



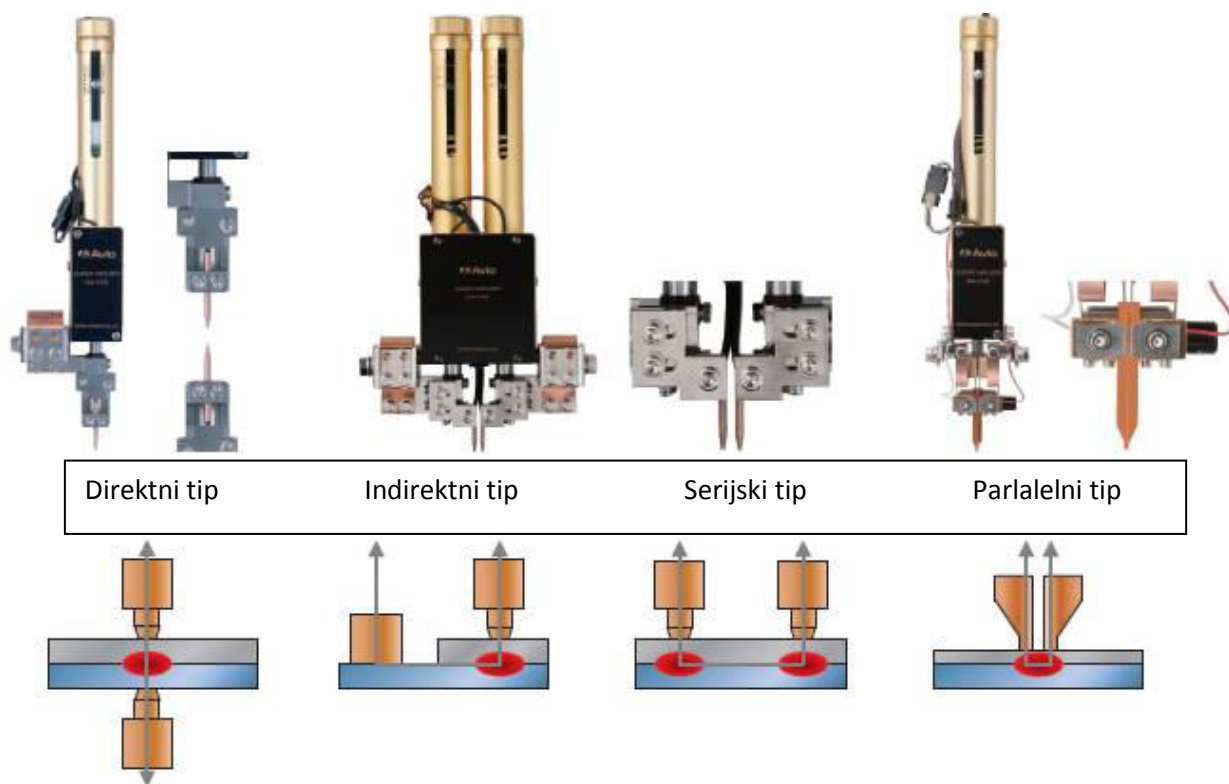
Slika 12. Prikaz direktnog točkastog zavarivanja [14]

Elektrode, koje su najčešće napravljene iz Cu-legura, pritišću radne komade u mjestu gdje će se formirati spoj. Kroz elektrode se propušta velika struja, čiji iznos ovisi o vrsti materijala i debljine komada koji se spajaju, te se uslijed otpora razvija toplina između kontaktnih površina. Uslijed visokih temperatura, elektrode se s vremenom troše te često ostavljaju sloj bakra na mjestu zavara [6] što predstavlja određenu grešku zavarivanja. To se može umanjiti, a time i produžiti vijek trajanja elektroda, na način da se elektrodama smanji radna temperatura. Smanjenje radne temperature može se ostvariti kontrolom jačine struje i/ili konstrukcija elektrode s kanalom za hlađenje, kojim cirkulira rashladno sredstvo (voda). Nakon prekida dovoda struje i dok se mjesto zavarivanja hladi, potrebno je ostvariti konstantni pritisak mjesta spoja sve do potpunog skrućivanja.

Postoji više principa točkastog zavarivanja te može biti jedno-točkast (elektrode se nalaze s jedne ili obje strane zavarenog spoja) ili više-točkast (gdje struja prolazi istodobno kroz više



točaka što rezultira većim brojem zavarenih mjesta). Postupak se može provoditi direktno (elektrode su postavljene jedna nasuprot druge), indirektno (elektrode se nalaze jedna kraj druge, a radni komad je na bakrenoj površini ispod elektroda), serijski i paralelni postupak, slika 13. Indirektna metoda se koristi kada je jako teško ili nemoguće radni komad direktno stisnuti s obje strane.



Slika 13. Postupci točkastog elektrootpornog zavarivanja [15]

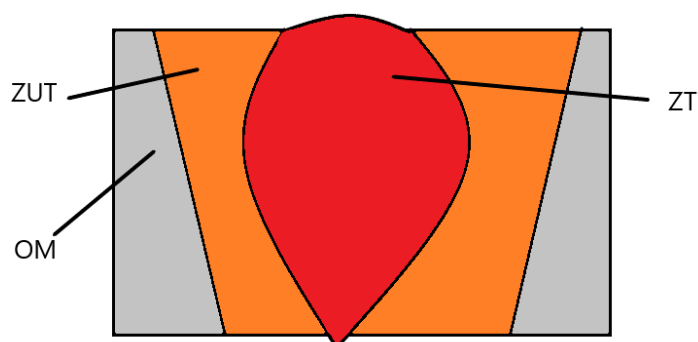
Postupci elektrootpornog točkastog zavarivanja su vrlo pogodni za robotizaciju. Parametri procesa (vremenski ciklus struje zavarivanja i pritisak) koji ovise o debljini i vrsti materijala namještaju se prije zavarivanja, gdje zavarivač postavlja komade koji se spajaju između elektroda i proces se odvija automatski [1, 13]. Postoji više uređaja za točkasto zavarivanje koji se mogu mehanički aktivirati (rukum, nogom) ili automatski (hidraulički, električno, pneumatski), a to su: višestruki modulirani punkt uređaj, stabilni punkt uređaj s linearnim putem elektrode, stabilni punkt uređaj za projekcijsko zavarivanje, ručni punkt uređaj/kliješta te stabilni punkt uređaj s lučnim putem elektrode [17].

Općenito kod kontrola kvalitete svih tipova zavara, ispitivanja se dijele na kontrolu kvalitete metodama sa ili bez razaranja. Kontrola kvalitete bez razaranja ne utječe na svojstva zavarenog spoja, a obuhvaća vizualnu kontrolu, radiografsku kontrolu, ultrazvučnu kontrolu, kontrolu nepropusnosti, kontrolu magnetskim ispitivanjima te kontrolu penetrantskim tekućinama. Radi provjeravanja mehaničkih i tehnoloških osobina te strukture zavarenih spojeva provodi se kontrola kvalitete sa razaranjem zavarenih spojeva. Za takvu kontrolu koriste se posebno izrađene epruvete napravljene od posebnih ploča (namjerno dodanih na spoj koji se zavaruje), prigodnih otpadaka ili posebnih ploča koje su zavarene u istim uvjetima [16].

### 3. ZONA TALJENJA I UTJECAJA TOPLINE

Mjesta zavara ne pokazuju homogenu mikrostrukturu te zbog topline razvijene pri ciklusu zavarivanja stvaraju se tri zone različite mikrostrukture zone zavara i njegove okoline, a to su: osnovni materijal (OM), zona utjecaja topline (ZUT), te zona taljenja (ZT), slika 14.

Zona u kojoj je osnovni komad podvrgnut mikrostrukturnoj promjeni tijekom zavarivanja, to jest zona koju zahvaća toplina iz ZT, zove se zona utjecaja topline (ZUT). Značajan utjecaj na kvalitetu točkastog zavara imaju svojstva ZUT-a. Kako u toj zoni nije moguće utjecati dodatnim materijalom na strukturu, ona ovisi o količini topline koja se razvija pri zavarivanju i svojstvima osnovnog materijala. Ovisno o tome u njoj su moguće različite strukturne promjene o kojima ovise naknadna svojstva ove zone. U zoni taljenja, ZT (slika 14), dolazi to taljenja osnovnog materijala. Pri tome je kod većine postupaka moguće dodati dodatni materijal. Odabirom dodatnog materijala moguće je utjecati na kemijski sastav, a time i na konačnu strukturu i svojstva zavara u zoni taljenja. Pri zavarivanju, ovisno o postupku zavarivanja, koriste se zaštitne atmosfere kojima se utječe na kvalitetu zavara [1, 6].

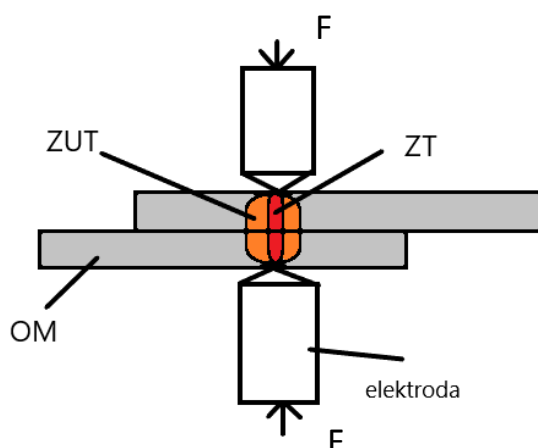


Slika 14. Prikaz zona u zoni vara i njegovoj okolini

#### 3.1. Zona vara kod točkastog zavarivanja

Oko 2000 do 5000 točkasto zavarenih spojeva nalazi se na modernom vozilu. Točkasti zavari konstrukcijskih dijelova automobila koriste se za prijenos naprezanja kroz konstrukciju tijekom sudara. Sposobnost automobila da pruža odgovarajuću zaštitu putnicima od ozljeda u slučaju sudara u velikoj mjeri ovisi o cjelovitosti i dobrim mehaničkim svojstvima na mjestu točkastih zavara. Loši točkasti zavari utječu na krutost i buku vozila te vibracije u vozilu. Stoga se za održavanje izdržljivosti a time i sigurnosti vozila, posebna pozornost daje na održavanje kvalitete zavara pri spajanju konstrukcija i upravljačkih sklopova. To se vrši raznim nadzornim sustavima tijekom točkastog zavarivanja [6], koji su danas standardizirani i automatizirani u autoindustriji.

Na tipičnim automobilskim čelicima prilikom točkastog zavarivanja označavamo tri zone prethodno spomenute: osnovni ili nepromijenjeni materijal (OM), ZUT koji često doživljava promjene faze čvrstog stanja ali ne i taljenje, te ZT u kojoj se događa taljenje i očvršćivanje, slika 15.



Slika 15. Prikaz zona vara prilikom točkastog zavarivanja

Ovisno o debljini komada ZT može biti samo s gornje strane ili po cijelom presjeku. Brzo zagrijavanje i hlađenje, što je izazvano toplinskim ciklusima pri točkastom zavarivanju, mogu značajno mijenjati mikrostrukturu što utječe na tvrdoću samog zavara. Ovisno o kemijskom sastavu i mikrostrukturi OM, kod točkastih zavara ugljičnih čelika dolazi do očvršćivanja u ZT i ZUT, te u određenim slučajevima i do omekšavanja u pojedinim dijelovima ZUT-a [1].

Greške znatno utječu na nosivost i sposobnost izdržljivosti zavarenih točkastih zavara na vozilu te su prikazane kroz sljedeća četiri koraka [6]:

1. interfacijalni način rada, gdje se prijelom zavara širi kroz ZT. Ovakav način rada štetno utječe na značajke sigurnosti prilikom sudara vozila,
2. način rada u kojem dolazi do loma svih zona zavarivanja koji ovisi o metalurškim i geometrijskim obilježjima te uvjetima u kojima se zavarivanje provodi,
3. djelomični interfacijalni način rada gdje se prijelom prvo pojavljuje u ZT, a tek onda kroz samu debljinu zavarenog komada,
4. djelomična debljina-djelomično povlačenje, gdje se pukotina širi kroz ZT te se taj dio uklanja.

Parametri zavarivanja su struja zavarivanja, vrijeme zavarivanja i sila pritiska elektrode. Jačinom struje i brzinom zavarivanja određuje se unos topline zavarivanja u području zavara, te ih treba prilagoditi tako da se dobije dovoljna veličina zavara. Povećana temperatura elektrode uzrokuje povećanje unosa topline što povećava mogućnost plastične deformacije koja se može pojaviti u površini zavara pod pritiskom elektrode. Da bi se takva pojava izbjegla trebaju se kontrolirati parametri zavarivanja i geometrija elektrode. Da bi se omogućilo točkasto zavarivanje komadi se pritišću zajedno sa elektrodama kako bi se ostvario dovoljan kontakt za zavarivanje. Komadi veće čvrstoće odupiru se pritisku elektroda, stoga su potrebne veće sile elektroda. Povećana čvrstoća materijala koji se zavaruje smanjuje kontakt između materijala što smanjuje opseg zavarivanja [6].

Izbacivanje rastaljenog komada i očvršćivanje osnovnog materijala su pojave koje oslabljuju kvalitetu zavara. Izbacivanjem rastaljenog materijala s površine pri zavarivanju može

uzrokovati površinske greške zavara i oslabljena mjesta. Nakon hlađenja nastaje praznina čija veličina ovisi o sili elektrode. Ako je sila elektrode dovoljno velika neće ostati nikakvih šupljina ili pora nakon hlađenja. Također pretjerano skupljanje materijala tijekom hlađenja može dovesti do stvaranja pora. U središtu vara, gdje je očvršćavanje posljednje, zbog nedovoljne sile pritiska elektroda ili samog svojstva materijala, moguće je formiranje praznih mjesta, poroznosti. Poroznosti ili šupljine uočljive su na lomnim površinama, te su rezultat nemogućnosti materijala da se termički skupi pri skrućivanju zone taljenja na mjestu zavara.

Veličina ZUT-a ovisi o materijalu koji se zavaruje i količini unesene toplinske energije iz ZT u okolni materijal. Kao i kod drugih tipova zavara, veličina i svojstva ZUT-a utječu na duktilnost točkastih zavarenih spojeva i svojstva cijelog zavara [1, 6].

Kako pri elektrootpornom točkastom zavarivanju, uslijed različitih parametara zavarivanja, može doći do određenih strukturnih promjena, za ispitivanje točkastih zavara najpouzdanije su metode ispitivanja tvrdoće i strukturna ispitivanja, kojima se može dobiti pouzdane informacije o nastalim promjenama.

## 4. TVRDOĆA I METODE ISPITIVANJA

Tvrdoća je svojstvo materijala, predstavlja otpornost materijala prema prodiranju drugog znatno tvrdog materijala u njegovu površinu. Ona ovisi o sastavu i strukturi materijala, temperaturi tijela i brzini prodiranja. Friedrich Mohs je prvi napravio klasifikaciju materijala prema tvrdoći, tzv. Mohsova skala tvrdoće, no zbog slabe selektivnosti danas se prema njoj klasificiraju samo minerali. Postoji više metoda mjerenja tvrdoće kojima se mjeri veličina ili dubina otiska nastalog utiskivanjem penetratora u površinu materijala djelovanjem sile. Metode se dijele na metode mjerenja po Brinellu, Vickersu, Rockwellu i Shoreu [18]. Za ispitivanja točkastog zavara ponajviše se koristi Vickersova metoda.

### 4.1. Metode mjerenja tvrdoće

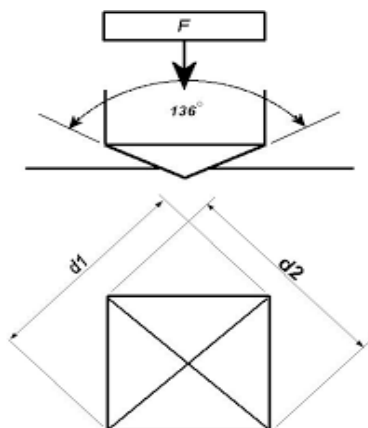
**Brinellova metoda mjerenja tvrdoće** se koristi za meke i srednje tvrde materijale. Penetrator je kuglica od kaljenog čelika (za tvrdoće do 450 HB) ili od tvrdog metala (za tvrdoće do 650 HB) promjera ( $D$ ) koja se utiskuje silom ( $F$ ) u površinske slojeve materijala. Otisak u obliku kalote promjera baze ( $d$ ) i dubine ( $h$ ) nastaje u ispitivanom materijalu. Brinellovom metodom ne mjeri se dubina prodiranja kuglice ( $h$ ), već promjer kalote ( $d$ [mm]). Prednost ovog načina mjerenja je jednostavna priprema površine i lako mjerenje otiska. Nedostatak je to što se ne mogu mjeriti tvrdoće veće od 650 HB i nakon mjerenja otisak je velik i ostavlja vidljiv trag.

**Mjerenje tvrdoće po Rockwellu** predstavlja metodu kod koje se ne mjeri veličina promjera otiska, nego dubina prodiranja penetratora. Vrijednost tvrdoće se prilikom ovakvog mjerenja očitava na skali tvrdomjera nakon rasterećenja. Za meke materijale se koristi mala čelična kuglica ( $HRB$ ), dok za tvrde materijale se koristi dijamantni stožac ( $HRC$ ). Prednost ove metode je veća brzina mjerenja tvrdoće (mjerenje traje 10 sekundi), plitak otisak te neposredno očitavanje tvrdoće na uređaju [19].

**Tvrdoća po Shoreu** se mjeri skleroskopima, tako da uteg  $s$  uvijek jednake visine udari u površinu uzorka. Rezultat je manja ili veća visina odskoka što ovisi o modulu elastičnosti. Metoda se koristi u serijskoj proizvodnji istovrsnih izradaka, posebice kaljenih (npr. radilice motora). Okomito na površinu kojoj se mjeri tvrdoća postavi se skleroskop, tako što se uteg postavi na visinu  $h_1$  te se kočnicom drži na toj visini.

Kada se pusti kočnica uteg pada kroz cijev i odbija se od površine materijala na visinu odskoka  $h_2$ , gdje se zadrži. Tvrdoća je veća većom visinom odskoka  $h_2$  za uvijek istu početnu visinu  $h_1$ , što se očitava iz tablice koja se nalazi u priboru skleroskopa [20].

**Mjerenje tvrdoće po Vickersu** je metoda slična Brinell metodi, ali se koristi dijamentni penetrator u obliku pravilne četverostrane piramide s vršnim kutom od  $136^\circ$ . Otisak izgleda poput piramide kvadratične osnovice. Mjeri se duljina dvaju dijagonala otiska te se uzima aritmetička sredina kao referentna vrijednost. Prema omjeru između ispitne sile i otiska nastalog na površini računa se iznos tvrdoće po Vickersu. Najčešće korištene ispitne sile su: 9,81 N, 19,62 N, 49,05 N, 98,10 N i 294,30 N. Korištenjem ispitnih sila manjih od 9,81 N ulazimo u domenu mikro-tvrdoće i uporabu u metalografskim laboratorijima. Ispitna sila primjenjuje se na uzorak kroz 15 sekundi te još sljedećih 30 sekundi ostaje primijenjena. Dulje vrijeme ispitivanja zahtijevaju meki materijali, dok na primjer čelik tvrdoće 140 HV zahtjeva primjenu sile od samo 10 sekundi [21]. Otisak oblika šuplje piramide na ispitnom uzorku ostavlja piramida čija je baza kvadrat dijagonala  $d_1$  i  $d_2$ , slika 16. Pomoću dijagonale baze otisnuća (kvadrata) izražava se površina otiska. Mjerne površine na uzorcima prije primjene ispitivanja po Vickersu treba brižno i pažljivo pripremiti. Neka mjerenja zahtijevaju i poliranje uzorka (semi-mikro i mikro-tvrdoća). Za mjerenje dijagonale kod malih otisaka potreban je mikroskop [22].

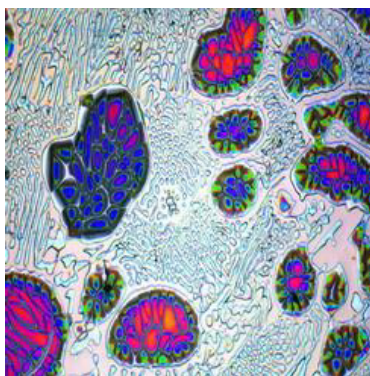


Slika 16. Otisak vrha piramide pri mjerenju tvrdoće po Vickersu [21]

## 5. METALOGRAFIJA

Metalografija predstavlja znanost koja se bavi strukturom metala i slitina. Svojstva materijala ovise o njihovoj strukturi, tj. o raspodjeli kristala, njihovoj vrsti i veličini kao mikrostrukturnih komponenata. Interpretacija i povezivanje mikrostrukture s proizvodnim postupcima, svojstvima, primjenom i razvojem metalnih materijala i izradaka te proučavanje mikrostrukture metalnih sustava predstavljaju svrhu metalografskih ispitivanja. Tehnike metalografskih ispitivanja su optička, elektronska i ionska rendgenska mikroskopija, a mogu se još odraditi rendgenska strukturna analiza, toplinska i dilatometrijska analiza te određivanje mikrotvrdoće.

Pripremu uzorka te makroskopska i mikroskopska ispitivanja strukture uzorka obuhvaćaju metalografska ispitivanja [23]. Pomoću svjetlosnog mikroskopa vrši se analiza metalnih uzoraka, zbog njihove neprozirnosti, koji radi na principu refleksije svjetlosti koja pada na površinu uzorka. Koriste se optički i elektronski mikroskopi koji pomoću sustava leća i zrcala povećavaju sliku površine uzorka. Uzorak mora biti dobro pripremljen što znači da mora biti jednak materijalu koji predstavlja (reprezentativan), odvojen, brušen i poliran, bez ogrebotina i oštećenja od poliranja, gdje su s površine materijala uklonjena sva oštećenja kako bi se mogla otkriti prava mikrostruktura tokom postupka nagrizanja te poliran tako da su sačuvani svi uključci gdje se mora paziti da nakon poliranja ne ostaju jamice, ogrebotine te vodene mrlje i mora ostati dovoljno ravan da se omogući promatranje pri velikim povećanjima. Površina se priprema tako da se odvoji reprezentativan uzorak iz osnovnog materijala (laserom, piljenjem, lomljenjem). Nakon rezanja uzorak se ulaže u polimernu smolu (radi zaštite bridova i nekih dijelova te radi lakšeg rukovanja s izbruscima nepravilnih oblika), brusi abrazivnim sredstvom (kao što je brusni papir gdje se omogućuje smanjenja mehaničkih grešaka na najmanju moguću mjeru) i polira (kako bi se postigla zrcalno ravna površina). Nakon toga se vrši čišćenje od prljavštine, ispiranje i sušenje površine uzorka. Uzorak se nagriza i šalje na analizu u nagrizenom stanju kako bi se na poliranoj površini vidjele pojedine mikrostrukturne komponente [24, 25], slika 17.



Slika 17. Mikroskopski uvećana površina uzorka [25]

Makroskopska ispitivanja provode se prije mikroskopskih ispitivanja i pomoću njih gledaju se greške u metalima i legurama te se donose zaključci o njihovoj građi. Makroskopska

ispitivanja obuhvaćaju vizualnu kontrolu i uvećanja do 20x (pomoću lupe). Makrostruktura se ispituje na prijelomu uzorka ili izrezanom i metalografski pripremljenom uzorku te na samoj površini komada [24].

Mikroskopska ispitivanja služe za određivanje tipa mikrostrukture, veličine zrna, orijentacije, raspodjele i veličine uključaka. Ovakva ispitivanja narušavaju homogenost strukture, no s njima se očitavaju greške pri raznim tehnološkim procesima. Ispituju se jednofazne i višefazne legure i metali pomoću svjetlosnog mikroskopa [26]. Kroz optički sustav mikroskopa prolazi snop svjetlosti koji osvjetljava predmet koji promatramo te stvara njegovu povećanu sliku. Sustav se sastoji od niza leća, a glavni dijelovi su okular i objektiv [27].

Cilj ovog rada je odrediti strukturne promjene koje nastaju u materijalu pri točkastom zavarivanju. Također će se istražiti područje zavara da se odredi formiranje zavara i greške koje se javljaju pri korištenju ručnog prijenosnog uređaja za točkasto zavarivanje. Strukturnim istraživanjem odredit će se postoji li nakon zavarivanja u strukturi zaostali austenit, te kakav je u odnosu na početnu strukturu. Mjerenjem tvrdoće odredit će se utjecaj strukturnih promjena na tvrdoću zavarenog spoja.



## 6. EKSPERIMENTALNI DIO

Za ispitivanja strukturnih promjena koje nastaju u točkastom zavaru, pri elektrootpornom točkastom zavarivanju niskougličnih feritnih čelika za autoindustriju, uzeti su uzorci točkasto zavarenih limova iz prethodnih istraživanja [28].

Limovi su uzimani iz ravnih dijelova prednjih vrata vozila i to od tri različita proizvođača osobnih vozila Opel, Peugeot i Toyota. Vodilo se računa da automobili budu iz iste klase vozila. Nakon izrezivanja traka, trake su očišćene od laka brušenjem vodo-brusnim papirom gradacije 120, 240, 400 i 600. Nakon čišćenja zavarivanje je provedeno prijenosnim uređajem za elektrootporno točkasto zavarivanje (punkt aparat/klještama), slika 18. Slikom 18 prikazani su dobiveni zavari na uzorcima iz limova.



Slika 18. Aparat za zavarivanje i zavarivanje limova



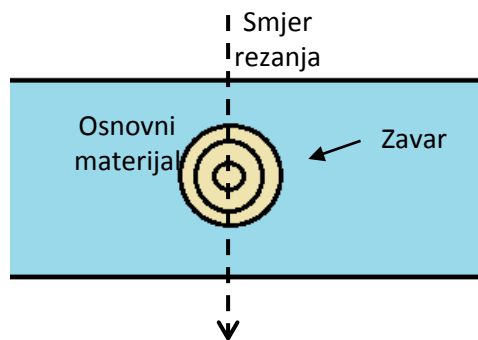
Slika 19. Zavareni uzorci iz limova

Nakon zavarivanja iz dobivenih traka izrezani su uzorci za strukturna ispitivanja. Uzorkovanje je vršeno rezanjem na vodom hlađenoj rezalici Bühler ABRASIMET 2, slika 20, tako da se rezalo po sredini zavara, slika 21.





Slika 20. Rezalica Buehler ABRASIMET 2



Slika 21. Mjesto rezanja uzoraka za strukturna ispitivanja i mjerenje tvrdoće

Na taj način bilo je moguće istražiti strukturne promjene po svim područjima zavora, te naknadno izvršiti mjerenje tvrdoće. Izrezani uzorci za strukturna ispitivanja uloženi su u vodljivu karbonsku masu Conductomet, postupkom vrućeg prešanja na uređaju Buehler Simplimet 1000. Parametri ulaganja u vruću masu su bili: zagrijavanje 2,3 min., tlak prešanja 250 bara, vrijeme hlađenja 2 min.

Nakon ulaganja uzorci su pripremljeni za metalografska ispitivanja brušenjem i poliranjem na uređaju PHENIXBETA GRINDING/POLISHER s glavom Vector LC, tablica 1.

Tablica 1. Parametri brušenja i poliranja

Podloga	Gradacija	Vrijeme, min
SiC - papir	120	2
	240	3
	400	3
	600	3
	800	5
<b>Poliranje</b>		
Tkanina (filc)	-	5

Nakon poliranja uzorci su nagrizeni prvo s otopinom NITAL (0,5 %  $\text{HNO}_3$  u destiliranoj vodi) kako bi se odredila početna struktura, a nakon ponovnog poliranja s otopinom Klemm 1. Klemm 1 otopina pripravljena je otapanjem  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  u 50 ml destilirane vode do zasićenja. Nakon otapanja dodano je 1 g  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$  do zasićenja. Nagrizanjem u Klemm 1 otopini omogućuje se razlikovanje faza na temelju obojenja; ferit svijetlo ili tamno plave boje, martenzit smeđe do crne boje, zaostali austenit nebojan.

Struktura osnovnog materijala i područja zavara promatrana je na invertnom metalografskom mikroskopu Olympus GX 71, opremljenog s digitalnom kamerom DP70, pri različitim povećanjima, slika 22.



Slika 22. Invertni metalografski mikroskop Olympus GX 71

Korišteni mikroskop ima mogućnost snimanja mikrostruktura pri povećanjima od 50X do 1000X i opremljen je programskim paketom za automatsku obradu slike AnalySIS Materials Research Lab.

Nakon strukturnih ispitivanja provedena su mjerenja tvrdoće u području zavara kako bi se utvrdio utjecaj strukturnih promjena u području vara na tvrdoću. Ispitivanje makro-tvrdoće provedena su na uređaju Mitutoyo Hardness Testing Machine HV, slika 23.



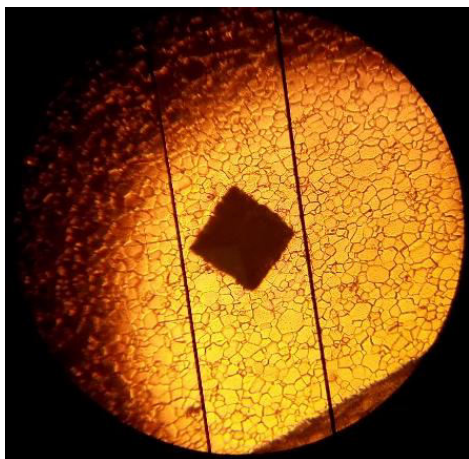
Slika 23. Ispitivanje makro-tvrdoće u području zavara

Uređaj koristi dijamantnu piramidu koja na uzorku ostavlja otisak, te mjerenjem dijagonala otiska automatski na osnovu primijenjene sile utiskivanja, izračunava vrijednosti tvrdoće. Dijagonale se mjere postavljanjem linija na rubove otiska, slika 24.

Kako bi osigurali točnost mjerenja, prije samog ispitivanja potrebno je provesti kalibraciju uređaja i kontrolno mjerenje na etalonu. Stoga je prethodno ispitivanju provedena kalibracija uređaja. Nakon kalibracije korišten je referentni blok tvrdoće 255,6 HV10 za provjeru točnosti mjerenja.

Nakon tri uzastopna mjerenja utvrđeno je kako su izmjerene vrijednosti u skladu s tvrdoćom referentnog bloka i da je uređaj umjeren. Nakon kalibracije i umjeravanja uređaja pristupilo se ispitivanju tvrdoće u osnovnom materijalu i području zavara. Pri tome je uređaj postavljen na silu utiskivanja od 19,61 N i vrijeme utiskivanja 10 sekundi. Rezultati mjerenja dani su u poglavlju rezultati i rasprava.

Kako su uzorci uzimani iz tankih limova, debljine 0,65 – 0,75 mm, otisak pri ispitivanju makro-tvrdoće je bio značajno velik u odnosu na zavar. Stoga su na uzorcima naknadno izmjerene vrijednosti mikrotvrdoće na mikro-tvrdomjeru LEICA VMHT, slika 25. Na taj način bilo je moguće odrediti promjenu tvrdoće po presjeku zavara, te utvrditi kako se tvrdoća mijenja po zoni taljenja i zoni utjecaja topline.



Slika 24. Mjerenje makro-tvrdoće



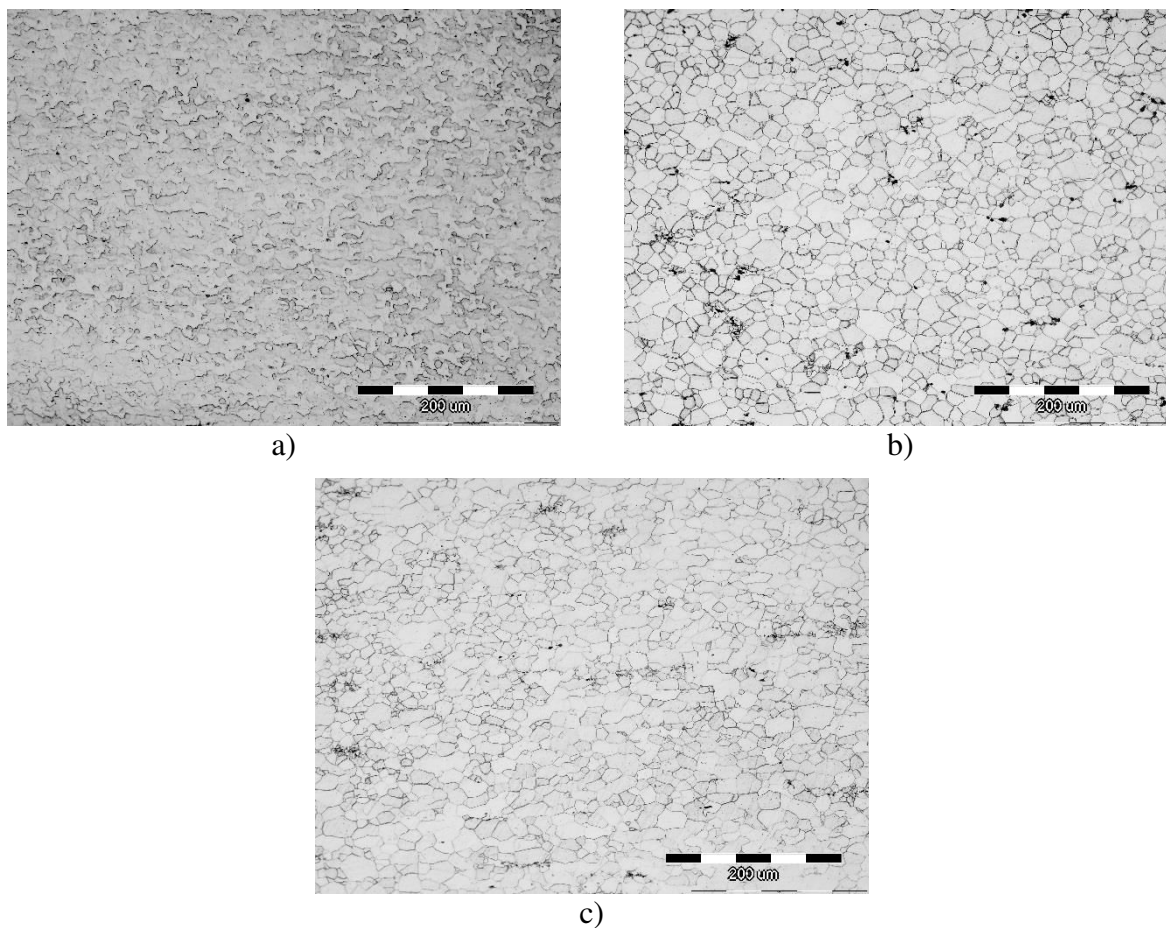
Slika 25. Mikro-tvrdomjer LEICA VMHT

Slično kao i kod prethodnog uređaja, mjerenje tvrdoće se bazira na utiskivanju dijamantne piramide u površinu uzorka s odgovarajućim opterećenjem i u trajanju 10 s. Nakon mjerenja dimenzije otiska automatski se izračunava vrijednost mikro-tvrdoće. Pri ispitivanju mikro-tvrdoće korištena je sila utiskivanja 2,941 N u vremenu od 10 sekundi.

## 7. REZULTATI ISPITIVANJA I RASPRAVA

### 7.1. Rezultati strukturnih ispitivanja

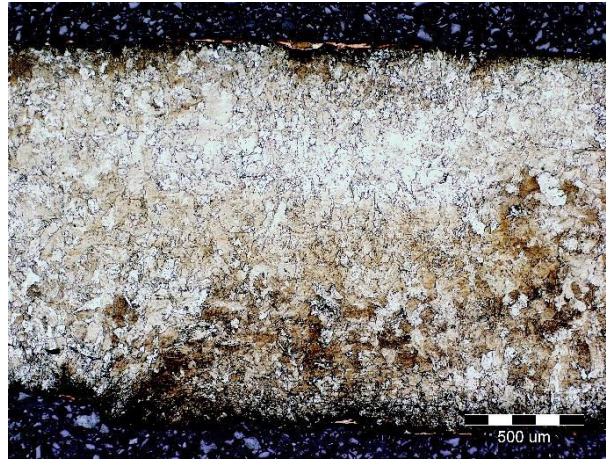
Metalografskom analizom na invertnom metalografskom mikroskopu Olympus GX 71 prvo je promatrana početna struktura na uzorcima iz osnovnog lima prije zavarivanja. Nagrizanje je provedeno otopinom NITAL. Na slici 26 prikazane su početne strukture ispitivanih limova.



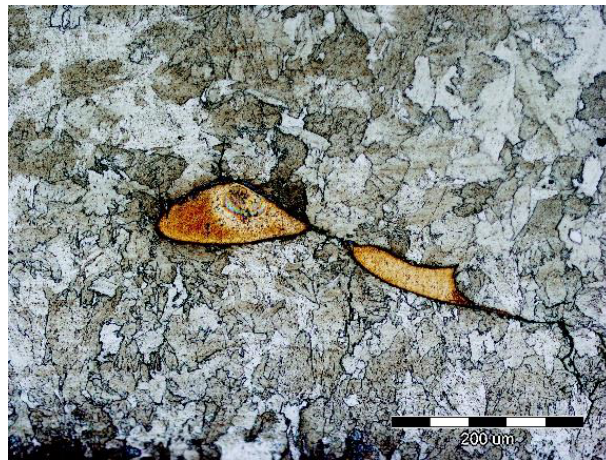
Slika 26. Početne strukture u uzetim trakama iz: a) Opel, b) Peugeot, c) Toyota

Strukturalna mikroanaliza pokazuje da kod sva tri uzorka početno stanje je homogena sitnozrnata feritna struktura. Može se uočiti kako je feritno zrno nešto sitnije u rubnim dijelovima nego u sredini trake.

Slikom 27. prikazana je struktura u području zavara nakon zavarivanja traka uzimanih s vrata marke vozila Opel.



a) a)



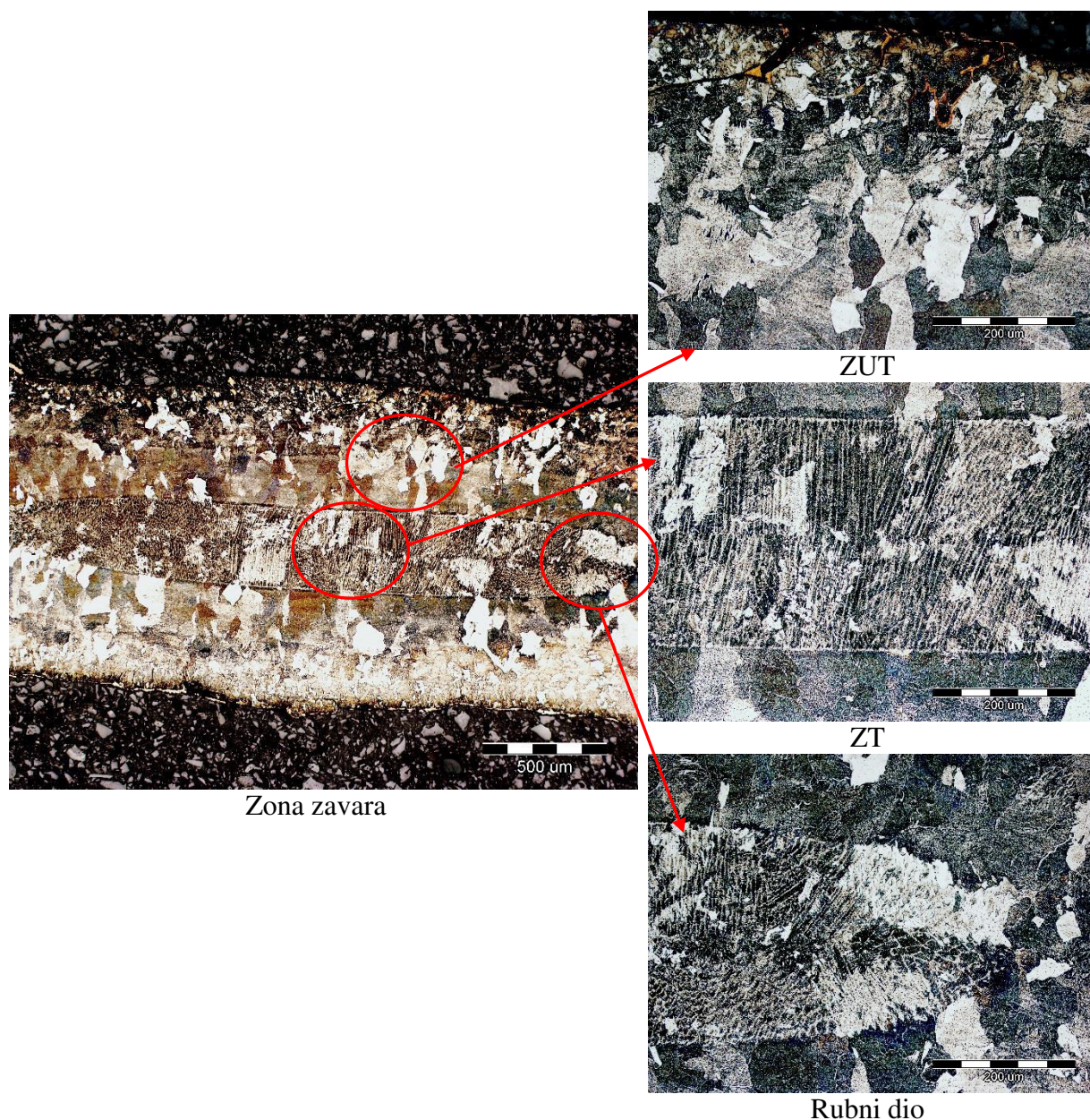
b)

Slika 27. Zona taljenja i zona utjecaja topline u zavaru uzoraka iz trake uzimane s vozila Opel: a) Područje zavara, b) Uključak bakra

Strukturalna ispitivanja na zavarenom spoju limova uzetih iz marke vozila Opel pokazala su netipičan zavareni spoj. Na slici 27 a) iz snimljene makrostrukture ne uočava se specifična pojava zone utjecaja topline (ZUT) i zone taljenja (ZT). Struktura pokazuje da je zavarivanje ostvareno. Čak je u rubnom dijelu spoja došlo do formiranja uključaka bakra, koji je zaostao uslijed taljenja elektrode pri prolasku struje, slika 27 b). Uočava se i porast zrna u području spoja, no nisu definirane zona taljenja i zona utjecaja topline. Može se pretpostaviti da je do ove pojave došlo uslijed nedovoljno dugog kontakta elektroda s materijalom pri zavarivanju. Uslijed toga je došlo do lokalnog porasta temperature i spajanja materijala u kontaktu. Pri tome su vjerojatno samo pojedini površinski dijelovi lima u kontaktu bili rastaljeni i naknadno se spojili, te time nije došlo do formiranja specifične zone taljenja.



Slikom 28. prikazana je struktura u području zavara nakon zavarivanja traka uzimanih s vrata marke vozila Peugeot.

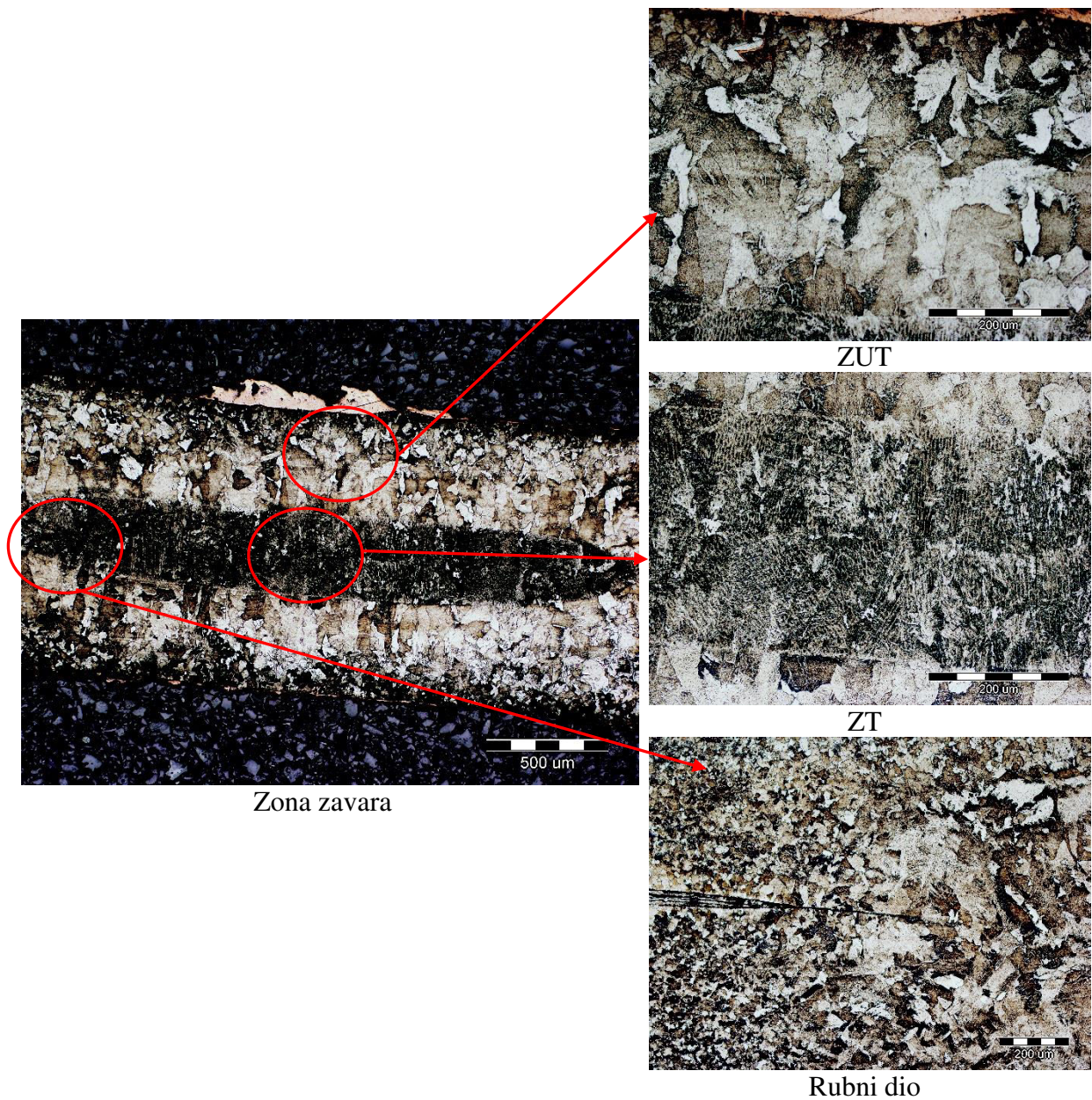


Slika 28. Zona taljenja i zona utjecaja topline u zavaru uzoraka iz trake uzimane s vozila Peugeot

Kod zavara na limu uzimanom s Peugeota vidi se tipični oblik točkastog zavara, s jasno definiranom zonom taljenja i zonom utjecaja topline. Strukturna analiza pojedinih dijelova zavara pokazuje kako je zavarivanjem došlo do promjene početne strukture materijala. U području ZUT-a jasno je vidljiva pojava zaostalog austenita (bijela zrna), koji je značajno veći od početnog feritnog zrna i nasumično raspoređen po ZUT. U području ZT može se uočiti dendritni rast zrna, te u pojedinim dijelovima je došlo do formiranja igličastog martenzita (crne lamele u ZT).



Slikom 29. prikazana je struktura u području zavara nakon zavarivanja traka uzimanih s vrata marke vozila Toyota.

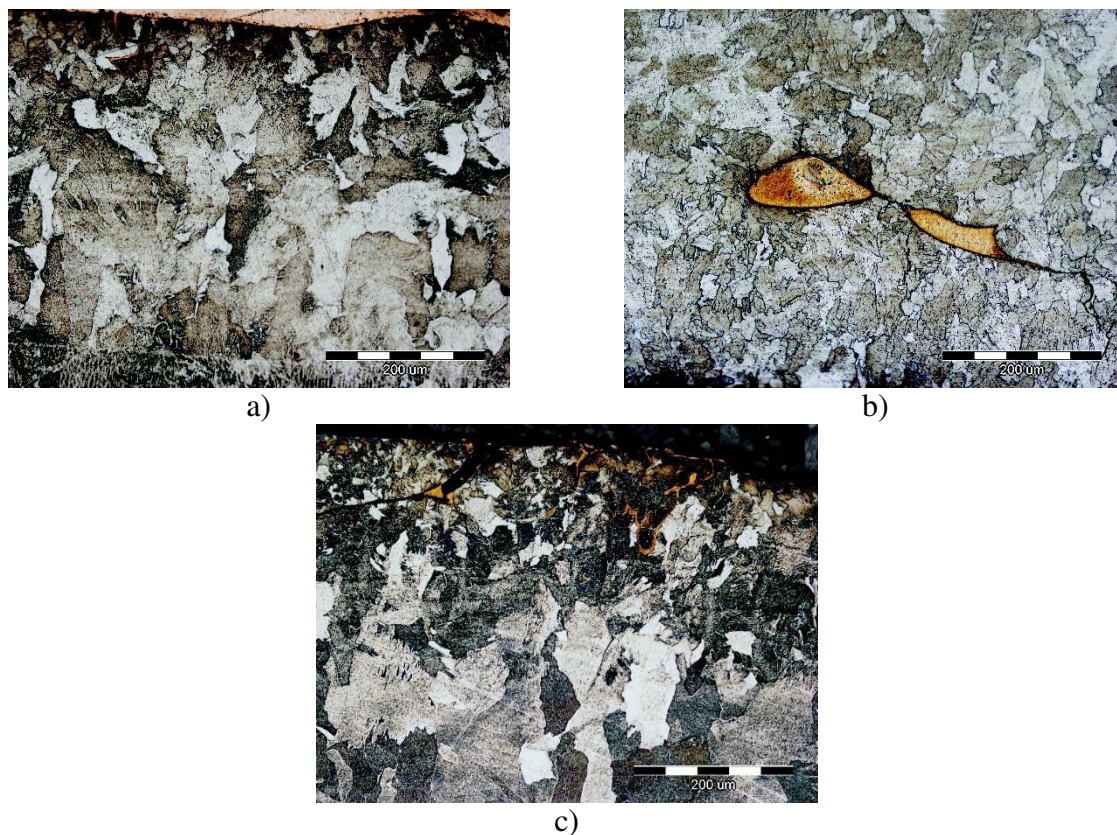


Slika 29. Zona taljenja i zona utjecaja topline u zavaru uzoraka iz trake uzimane s vozila Toyota

Slično kao i u prethodnom slučaju, jasno je izražena zona zavara s vidljivim ZUT i ZT. Također se u zoni utjecaja topline uočava zaostali austenit (bijelo obojan). U zoni taljenja nešto se slabije uočava dendritni rast zrna. U zavaru je također uočena prisutnost manje količine martenzita. Zona utjecaja topline se proteže od zone taljenja pa sve do rubnih dijelova zavarenih komada, u kojima je materijal bio u kontaktu s elektrodama tijekom zavarivanja. Rubni dio zone utjecaja topline pokazuje kako je kod ovog zavara prisutna oštra pukotina na samom karaju zavara.



Slikom 30. prikazani su uočeni naljepci i uključci bakra od elektroda, na mjestima kontakta elektroda uređaja za zavarivanje i materijala koji se zavaruje.

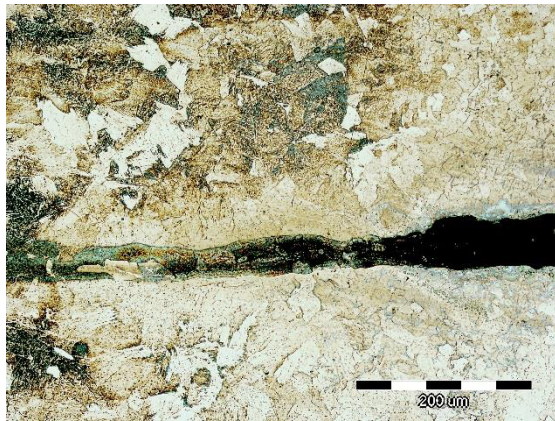


Slika 30. Uključci bakra nastali tijekom zavarivanja limova

Kod sva tri zavarena spoja uočeno je kako u dijelu gdje je ostvaren kontakt između materijala koji se zavaruje i bakrenih elektroda, dolazi do prodiranja bakra u površinski sloj zavarenog materijala. Dio bakra ostaje kao naljepak na površini spojenih komada. Do ovog dolazi uslijed visokog kontaktnog otpora i posljedičnog zagrijavanja i pregrijavanja bakrenih elektroda. Slična su zapažanja uočena i u prethodnim istraživanjima zavarenih spojeva ostvarenih točkastim zavarivanjem [6]. Razlog je pregrijavanje elektrode, te se može djelomično korigirati korekcijom jačine struje, odabirom temperaturno otpornijeg materijala za kontaktne elektrode ili hlađenjem elektroda [6].

Ovisno o obliku spoja, točnije obliku ruba spoja, značajno ovise i sama mehanička svojstva zavarenog spoja. U slučaju da su rubni dijelovi zavarenog spoja oštri, veća je vjerojatnost da će pri mehaničkom opterećenju u tom dijelu doći do formiranja i propagacije pukotine, a time i popuštanja zavarenog spoja [6]. Iz tog razloga posebno su snimljene slike oblika rubnih dijelova zavara, slika 31.





Peugeot

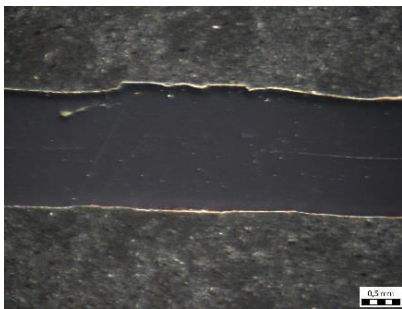


Toyota

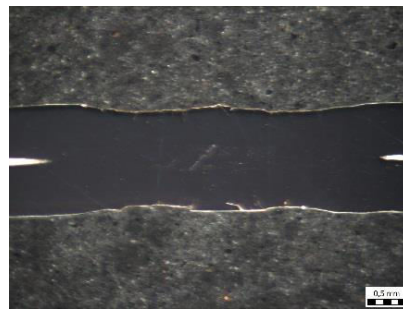
Slika 31. Pukotine na kraju zavarenog spoja

Uočava se da kod ispitivanih zavarenih spojeva rubni dijelovi imaju vrlo oštre rubove. To predstavlja vrlo ostru inicijalnu pukotinu koja značajno oslabljuje sami spoj pri naknadnim mehaničkim opterećenjima.

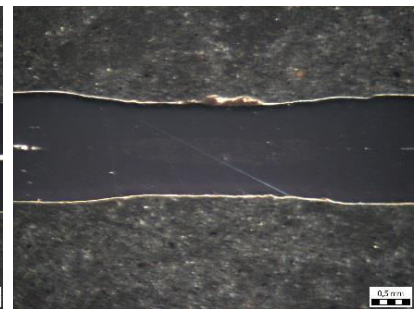
Ovisno o samom mjestu gdje se ostvaruje zavar, često puta zavareni spoj može predstavljati i estetski problem. Tako uslijed visoke sile kojom elektrode djeluju na mjesto zavarivanja ili korištenjem prevelike struje tijekom zavarivanja, uslijed čega dolazi do pregrijavanja materijala, može doći do zaostalih udubljenja [6]. Upravo ova greška se uočava i na ispitivanim spojevima, slika 32.



Opel 30X



Peugeot 30X



Toyota 30x

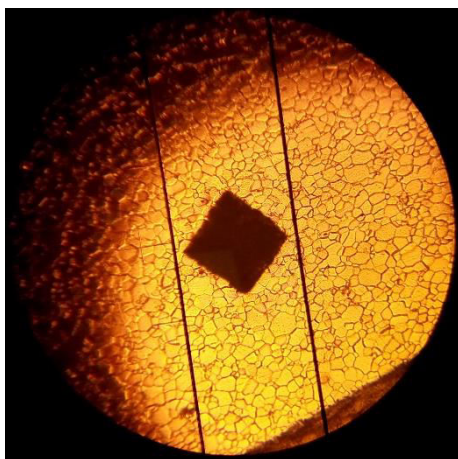
Slika 32. Udubljenja u području zavara uslijed djelovanja sile elektroda

Ovo može predstavljati estetski problem, te je vrlo bitno odabrati mjesto ostvarivanja zavara korištenim uređajem. U autoindustriji ovo se rješava regulacijom pritiska i jačine struje, te postavljanjem spojeva na nepristupačnim mjestima gdje ne predstavljaju estetski problem.

Još jedna vrlo česta greška, ili nedostatak pri točkastom zavarivanju, predstavljaju usahline koje mogu nastati uslijed prevelike temperature pri zavarivanju, te vrlo brzom hlađenju. Na taj način se u unutrašnjosti zavara, točnije u samoj zoni taljenja, stvaraju praznine (pukotine). U ispitivanim zavarenim spojevima ova greška nije uočena.

## 7.2. Rezultati ispitivanja tvrdoće

Prvo su određene vrijednosti tvrdoće osnovnog materijala na uzorcima uzimanim iz tri različita tipa vozila, slika 33 i tablica 2.



Slika 33. Otisak pri mjerenju makro-tvrdoće uređajem Mitutoyo Hardness Testing Machine HV

Tablica 2. Vrijednosti izmjerene makro-tvrdoće HV2 na osnovnom materijalu

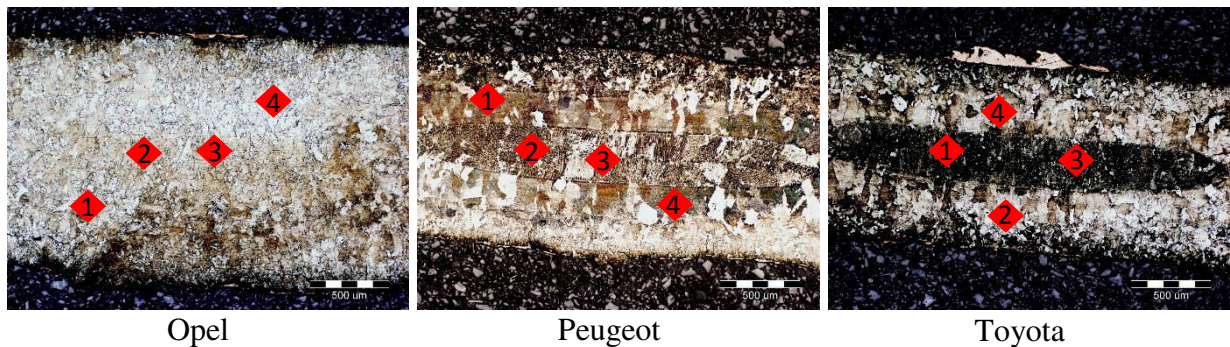
Br.mjerenja	Opel	Peugeot	Toyota
1.	124,7	132,3	151,2
2.	120,7	129,8	148,6
3.	123,1	126,9	143,3

Izmjerene tvrdoće osnovnog materijala kod sva tri uzorka ukazuju na podjednake vrijednosti tvrdoće, s nešto višim vrijednostima u slučaju uzoraka uzimanih iz vrata vozila Toyota. Kako se radi o vrlo mekanom čeliku što se vidi iz izmjerenih tvrdoća, dolazi do značajno velikog otiska uređaja prilikom mjerenja makro-tvrdoće, slika 33. Tablicom 3. dane su vrijednosti izmjerenih makro-tvrdoća u području zavora za svaki uzorak.

Tablica 3. Izmjerene vrijednosti makro-tvrdoće HV2 u području zavora

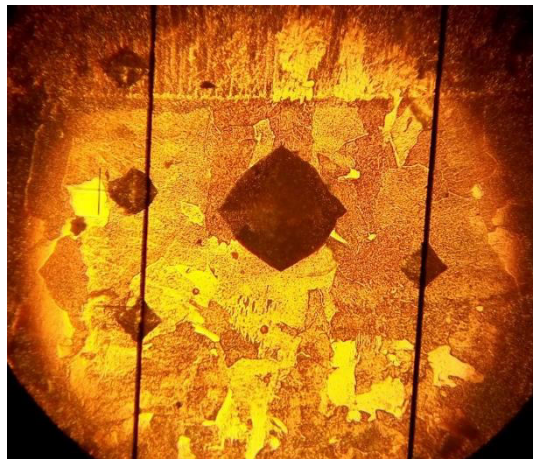
Br.mjerenja	Opel	Peugeot	Toyota
1.	203,2	149,5	142,3
2.	220,3	208,2	213,6
3.	136,2	218,3	223,7
4.	134,8	139,3	219,1

Slikom 34. prikazana su mjesta mjerenja makro-tvrdoće.



Slika 34. Mjesto mjerenja makro-tvrdoće na sva tri zavar

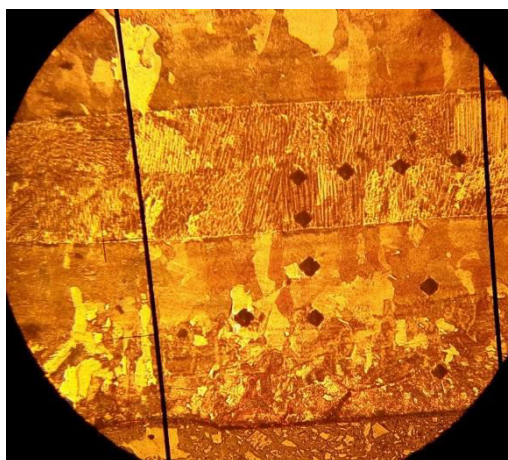
Iz izmjerenih vrijednosti, tablica 3, vidi se da u području zavar dolazi do značajnog povećanja iznosa tvrdoće, s tendencijom porasta u području zone taljenja. Mjerenjem je uočeno kako su otisci pri mjerenju makro-tvrdoće prevelike površine u odnosu na zavar, slika 35. Izmjerene tvrdoće pokazuju srednje vrijednosti tvrdoće zavar, što uključuje i djelomično vrijednosti i zone utjecaja topline i zone taljenja.



Slika 35. Veličina otiska pri mjerenju makro-tvrdoće

Iz slike se vidi kako sam otisak prelazi preko nekoliko zrna i čak je u određenim slučajevima zahvaćao obje zone, zonu taljenja i zonu utjecaja topline. Iz tog razloga preciznija mjerenja promjene tvrdoće provedena su korištenjem mikro-tvrdomjera LEICA VMHT pri sili 2,941 N i vremenu otiskivanja od 10 sekundi. Na slici 35 može se vidjeti i otisci dobiveni mikro-tvrdomjerom, koji su značajno manji po veličini. Mjerenja mikro-tvrdoće izvršena su samo na uzorcima uzimanim iz tipa vozila Peugeot i Toyota, pošto su strukturalna ispitivanja pokazala da kod tipa Opel ne dolazi do formiranja tipičnog zavar s izraženom zonom taljenja. Slikom 36. prikazani su otisci dobiveni pri ispitivanju uzorka iz lima od vozila Peugeot. Vrijednosti izmjerenih tvrdoća dane su tablicom 4.





Slika 36. Raspored otisaka pri ispitivanju mikro-tvrdoće na uzorcima iz lima s vozila Peugeot

Tablica 4. Izmjerene vrijednosti mikro-tvrdoće HV0.3 u području zavora.

Br. mjerjenja	Peugeot			Toyota		
	OM	ZUT	ZT	OM	ZUT	ZT
1.	134,6	197,1	230,0	163,0	187,3	239,4
2.	136,8	189,0	235,0	156,0	183,8	236,3
3.	137,1	166,9	246,1	150,0	189,0	242,5

Rezultati izmjerenih mikro-tvrdoća pokazuju kako vrijednosti tvrdoće rastu kako se ide od osnovnog materijala prema zoni taljenja u zavarenom spoju. Isto je uočeno kod oba uzorka, s nešto višim vrijednostima izmjerenih mikro-tvrdoća u spoju lima uzimanih s vozila Toyote. Vrijednosti mikro-tvrdoće iskazane u tablici 4 su srednje vrijednosti većeg broja mjerjenja. Za svaku vrijednost su provedena 3 ili više mjerjenja. Iznosi izmjerenih mikro-tvrdoća su ovisile o mjestu mjerjenja, točnije tipu zrna u kojem je mjereno, pošto u zoni taljenja i zoni utjecaja topline uz zaostali austenit ima i prisutnost igličastog martenzita.

Iz strukturalnih ispitivanja, te izmjerenih vrijednosti tvrdoće očito je da u zoni taljenja ima nešto više martenzita. Razlog tome je vrlo brzo hlađenje rastaljenog čelika, pošto je točkasti spoj bio malog volumena, te se radilo s tankim limom, koji omogućava vrlo brzo odvođenje topline.

## 8. ZAKLJUČAK

Iz provedenih istraživanja moguće je izvesti slijedeće zaključke:

- Strukturna ispitivanja na osnovnom materijalu potvrđuju da su uzorci uzimani iz čeličnih limova koji imaju sitnozrnatu feritnu mikrostrukturu.
- Nakon zavarivanja kod uzoraka uzimanih iz limova od vozila Peugeot i Toyota formirani su tipični zavari, dok je kod zavarivanja limova od vozila Opel došlo do netipične zone zavara, bez uočljive zone taljenja.
- Nagrizanje otopinom Klemm 1 ukazalo je kako nakon zavarivanja u strukturi kod svih uzoraka postoji zaostali austenit koji je znatno krupniji od početnog feritnog zrna.
- U području zone taljenja moguće je uočiti dendritni rast zrna, uz prisutnost martenzita.
- Kod svih zavara u mjestima kontakta bakrenih elektroda s čeličnim limom koji se zavaruje dolazi do naljepljivanja i prodiranja bakra u površinske slojeve lima.
- Na rubnim dijelovima zavarenih spojeva uočavaju se oštri rubovi koji predstavljaju oštre pukotine uslijed čega može doći do popuštanja zavarenog spoja.
- Izmjerene tvrdoće ukazuju na porast tvrdoće u području zavara.
- Najviši iznosi tvrdoće izmjereni su u zoni taljenja, dok je u zoni utjecaja topline također došlo do značajnog porasta tvrdoće u odnosu na osnovni materijal.

## 9. LITERATURA

- [1] Mirko Gojić: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2003)
- [2] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Spoj\\_\(strojarstvo\)#cite\\_note-1](https://hr.wikipedia.org/wiki/Spoj_(strojarstvo)#cite_note-1) (preuzeto 22.6.2019.)
- [3] <https://www.ffri.hr/~mdundjer/Elementi%20strojeva%20I/04-NerastavljiviSpojevi.pdf> (preuzeto 22.6.2019.)
- [4] <https://www.ffri.hr/~mdundjer/Elementi%20strojeva%20I/07-VijcaniSpojevi.pdf> (preuzeto 22.6.2019.)
- [5] Stoja Rešković: Tehnologije oblikovanja deformiranjem, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2011.
- [6] M. Pouranvari, S. P. H. Marashi, Critical review of automotive steels spot welding: process, structure and properties, Science and Technology of Welding and Joining 18 (2013) 5, 361-403
- [6] <http://www.ram-rijeka.com/c/931/Osnovni-postupci-zavarivanja---Ram-Rijeka.wshtml> (preuzeto 28.6.2019.)
- [7] <http://www.zavarivanje.info/cd/11940/zavarivanje-moderni-postupci-mig-mag-tig-rel-autogeno> (preuzeto 29.6.2019.)
- [8] <http://ba.honky-outdoor-es.com/info/forge-welding-20647310.html> (preuzeto 29.6.2019.)
- [9] [https://www.google.hr/search?q=kova%C4%8Dko+zavarivanje&espv=2&biw=1680&bih=925&tbm=isch&imgil=r4BKsr6W-y6hiM%253A%253BwN7hslCTa3sbhM%253Bhttp%25253A%25252F%25252Fsurvival.aforumfree.com%25252Ft5832-santoku&source=iu&pf=m&fir=r4BKsr6W-y6hiM%253A%252CwN7hslCTa3sbhM%252C\\_&usg=\\_\\_eN0QtnA62tTxbJsVhm26qy\\_wCGk%3D&dpr=1&ved=0ahUKEWjtk9exg7\\_NAhUCExoKHWHiCiMQycIMg&ei=tUtsV63lDIKmaOHEq5gC#imgsrc=r4BKsr6W-y6hiM%3A](https://www.google.hr/search?q=kova%C4%8Dko+zavarivanje&espv=2&biw=1680&bih=925&tbm=isch&imgil=r4BKsr6W-y6hiM%253A%253BwN7hslCTa3sbhM%253Bhttp%25253A%25252F%25252Fsurvival.aforumfree.com%25252Ft5832-santoku&source=iu&pf=m&fir=r4BKsr6W-y6hiM%253A%252CwN7hslCTa3sbhM%252C_&usg=__eN0QtnA62tTxbJsVhm26qy_wCGk%3D&dpr=1&ved=0ahUKEWjtk9exg7_NAhUCExoKHWHiCiMQycIMg&ei=tUtsV63lDIKmaOHEq5gC#imgsrc=r4BKsr6W-y6hiM%3A) (preuzeto 30.6.2019.)
- [10] <https://shallot.ru/hr/when-and-why-diffusion-welding-is-used.html> (preuzeto 29.6.2019.)
- [11] <https://servus.hr/proizvodi/zavarivanje/tv-40-100-pk-2/> (preuzeto 1.7.2019.)
- [12] <http://struna.ihjj.hr/naziv/tockasto-zavarivanje/6742/> (preuzeto 1.7.2019.)
- [13] Krček, Darinka : Elektrootporno točkasto zavarivanje kod valovitih stranica distributivnih kotlova, Međimursko veleučilište u Čakovcu, Čakovec, 2018.: <https://repositorij.mev.hr/islandora/object/mev%3A808/datastream/PDF/view> (preuzeto 14.8.2019.)
- [14] <http://www.vista-industrial.com/blog/spot-welding/> (preuzeto 1.7.2019.)
- [15] <http://nptel.ac.in/courses/112107144/welding/lecture11&12.htm> (preuzeto 1.7.2019.)
- [16] Ćosić, Stanislaw: Osiguranje kvalitete zavarenih spojeva u brodograđevnom proizvodnom procesu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.:

- [http://repositorij.fsb.hr/5120/1/%C4%86osi%C4%87\\_2016\\_zavrzni\\_preddiplomski.pdf](http://repositorij.fsb.hr/5120/1/%C4%86osi%C4%87_2016_zavrzni_preddiplomski.pdf)  
(preuzeto 1.7.2019.)
- [17] <http://www.alatistherm.co.rs/pdf.tecna/PrirucnikPunktovanje.pdf> (preuzeto 1.7.2019.)
- [18] <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=62873> (preuzeto 1.7.2019.)
- [19] <http://brod.sfsb.hr/~ikladar/Materijali%20I/Ispitivanje%20tvrdoce.pdf> (preuzeto 1.7.2019.)
- [20] [https://bib.irb.hr/datoteka/665504.Materijali\\_1\\_Praktikum\\_za\\_laboratorijske\\_vjebe.pdf](https://bib.irb.hr/datoteka/665504.Materijali_1_Praktikum_za_laboratorijske_vjebe.pdf) (preuzeto 2.7.2019.)
- [21] <https://www.ispitivanje.com/smjernice-za-ispitivanje-tvrdoce/> (preuzeto 2.7.2019.)
- [22] Ivaniš, Davor: Određivanje tvrdoće materijala Vickersovom metodom uz različita opterećenja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.:  
[http://repositorij.fsb.hr/494/1/16\\_02\\_2009\\_Zavrzni\\_rad\\_-\\_Odredivanje\\_tvrdoce\\_materijala\\_metodom\\_po\\_Vickersu\\_primjenom\\_razlicitih\\_opterecenja.pdf](http://repositorij.fsb.hr/494/1/16_02_2009_Zavrzni_rad_-_Odredivanje_tvrdoce_materijala_metodom_po_Vickersu_primjenom_razlicitih_opterecenja.pdf) (14.8.2019.)
- [23] <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=40365> (preuzeto 2.7.2019.)
- [24] <http://brod.sfsb.hr/~ikladar/SISM/Metalografija%20Fe-C%20legura.pdf> (preuzeto 2.9.2019.)
- [25] [http://www.trimid.rs/proizvodi/metalografija\\_i\\_petrografija.5.html](http://www.trimid.rs/proizvodi/metalografija_i_petrografija.5.html) (preuzeto 2.9.2019.)
- [26] Živčić, Ivančica: Analiza mikrostrukture keltskog mača, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.:  
[http://repositorij.fsb.hr/5793/1/%C5%BDiv%C4%8Di%C4%87\\_2016\\_diplomski.pdf](http://repositorij.fsb.hr/5793/1/%C5%BDiv%C4%8Di%C4%87_2016_diplomski.pdf)  
(preuzeto 14.8.2019.)
- [27] Trnak, Marija: Elektronska mikroskopija, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera, Osijek, 2010.: <http://www.mathos.unios.hr/~mdjumic/uploads/diplomski/TRN01.pdf> (preuzeto 14.8.2019.)
- [28] Dorijan Dervić: Analiza mikrostrukture limova za autoindustriju spojenih točkastim zavarivanjem, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2018.  
<https://repositorij.simet.unizg.hr/islandora/object/simet%3A159> (preuzeto 10.07.2019.)