

# Karakterizacija zavara cijevi od 25CrMo4 čelika

---

**Ezgeta, Toni**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2018**

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:772168>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-26**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Toni Ezgeta**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zdravko Schauperl, dipl. ing.

Student:

Toni Ezgeta

Zagreb, 2018.

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

Zahvaljujem se svojem mentoru prof. Zdravku Schauperlu na pomoći, savjetima, utrošenom vremenu i trudu, te ustupljenoj literaturi.

Toni Ezgeta





**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:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Toni Ezgeta**

Mat. br.:0035197406

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Karakterizacija zavara cijevi od 25CrMo4 čelika**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Characterisation of welds on 25CrMo4 tube**

Opis zadatka:

Dijelovi osobnih vozila koji su izrazito opterećeni tijekom eksploatacije izrađuju se od visokočvrstih čelika. To je pogotovo izraženo kod sportskih vozila ili vozila namijenjena visokim opterećenjima gdje su dijelovi šasije često izrađeni od 25CrMo4 čelika. Obzirom na kemijski sastav tog čelika i visoke zahtjeve koji se postavljaju u primjeni, zavarivanje 25CrMo4 čelika je vrlo zahtjevna i osjetljiva tehnološka operacija.

U radu je potrebno opisati sastav i svojstva 25CrMo4 čelika te postupke zavarivanja kojima se taj materijal zavaruje. U eksperimentalnom dijelu potrebno je napraviti laboratorijske analize postojećih zavara cijevi 25CrMo4 čelika s ciljem karakterizacije materijala zavara i materijala u zoni utjecaja topline. Analize uključuju svjetlosnu mikroskopiju, elektronsku mikroskopiju te određivanje osnovnih mehaničkih svojstava materijala. Na temelju dobivenih rezultata potrebno je donijeti zaključke o analiziranom materijalu te kvaliteti zavara i samog postupka zavarivanja.

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

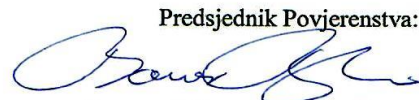
Zadatak zadan:  
30. studenog 2017.

Rok predaje rada:  
1. rok: 23. veljače 2018.  
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.  
3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:  
1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.  
2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.  
3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadao:

  
Prof.dr.sc. Zdravko Schauerl

Predsjednik Povjerenstva:  
  
Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

<b>SADRŽAJ</b> .....	I
<b>POPIS SLIKA</b> .....	II
<b>POPIS TABLICA</b> .....	V
<b>POPIS OZNAKA</b> .....	VI
<b>SAŽETAK</b> .....	VII
<b>SUMMARY</b> .....	VIII
<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. TEORIJSKI DIO</b> .....	2
2.1. Okvir ili šasija automobila .....	2
2.2. Materijali za izradu šasije .....	3
2.3. Spajanje šasije TIG postupkom.....	3
2.4. Nerazorna ispitivanja .....	3
2.5. Metode karakterizacije .....	4
2.5.1. Priprema uzoraka .....	4
2.5.2. Analiza svjetlosnim mikroskopom .....	8
2.5.3. Analiza skenirajućom elektronskom mikroskopijom .....	8
2.5.4. Analiza EDS detektorom .....	9
2.5.5. Ispitivanje tvrdoće prema metodi Vickers .....	9
<b>3. EKSPERIMENTALNI DIO</b> .....	11
3.1. Analiza segmenta šasije „FIREWALL“ .....	15
3.2. Analiza segmenta šasije „PODNICA“ .....	32
<b>4. ZAKLJUČAK</b> .....	58
<b>PRILOZI</b> .....	60
<b>LITERATURA</b> .....	61

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Šasija automobila [1].	2
Slika . Izrezivanje uzorka tračnom pilom.....	4
Slika 4. Uređaj za ulijevanje uzorka [6].	5
Slika 6. Uređaj za poliranje uzoraka [6].	7
Slika 7. Vršni kut i otisak penetratora Vickersovog tvrdomjera [10]	9
Slika 8. Postupak TIG zavarivanja cijevi [12].	12
Slika 9. Endoskop OLYMPUS Ultra LITE [14]	12
Slika 11. TESCAN VEGA TS5136LS na FSB-u [6].	14
Slika 13. Segment šasije FIREWALL u prvobitnom stanju: a) prednja strana b) stražnja strana	15
Slika 14. Segment šasije FIREWALL: stanje unutrašnje površine cijevi gdje se vidi osnovni materijal.	16
Slika 15. Segment šasije FIREWALL: stanje unutrašnje površine cijevi na mjestu zavora ....	16
Slika 16. Segment šasije FIREWALL: stanje unutrašnje površine cijevi, detalji zavora .....	16
Slika 17. Segment šasije FIREWALL pripremljen za radiografsku analizu.....	17
Slika 18. Segment šasije FIREWALL: radiogram .....	17
Slika 19. Segment šasije FIREWALL: a) prije izrezivanja; b) poslije izrezivanja.....	18
Slika 20. Segment šasije FIREWALL: uzorci pripremljeni za metalografsku analizu.....	18
Slika 21. Segment šasije FIREWALL uzorak 1: makrostruktura s mjestima analize mikrostrukture .....	19
Slika 22. Segment šasije FIREWALL uzorak 1: mikrostruktura osnovnog materijala na poziciji OM1, usmjerena feritno-perlitna mikrostruktura .....	19
Slika 23. Segment šasije FIREWALL uzorak 1: mikrostruktura na poziciji ZUT .....	20
Slika 24. Segment šasije FIREWALL uzorak 1: mikrostruktura na poziciji ZAVAR, neprotaljen materijal.....	20
Slika 25. Segment šasije FIREWALL uzorak 1: mikrostruktura na poziciji ZAVAR, veće povećanje, gruba dendritna mikrostruktura s porozitetom.....	21
Slika 26. Segment šasije FIREWALL uzorak 1: mikrostruktura osnovnog materijala na poziciji OM2, usmjerena feritno – perlitna mikrostruktura .....	21
Slika 27. Segment šasije FIREWALL uzorak 1: zavar, SEM, neprotaljenost .....	22
Slika 28. Segment šasije FIREWALL uzorak 1: detalj zavora, SEM, porozitet.....	22
Slika 29. Segment šasije FIREWALL uzorak 1: mjesto i rezultati EDS analize, OM1 .....	23
Slika 30. Segment šasije FIREWALL uzorak 1: mjesto i rezultati EDS analize, zavar .....	23
Slika 31. Segment šasije FIREWALL uzorak 1: mjesto i rezultati EDS analize, OM 2 .....	24
Slika 32. Segment šasije FIREWALL uzorak 2: makrostruktura s mjestima analize mikrostrukture .....	25
Slika 33. Segment šasije FIREWALL uzorak 2: mikrostruktura na poziciji ZUT .....	25
Slika 34. Segment šasije FIREWALL uzorak 2: mikrostruktura na poziciji ZAVAR, neprotaljenost, porozitet .....	26
Slika 35. Segment šasije FIREWALL uzorak 2: mikrostruktura na poziciji ZAVAR, veće povećanje neprotaljenost, porozitet.....	26
Slika 36. Segment šasije FIREWALL uzorak 2: zavar, SEM, neprotaljenost, porozitet.....	27
Slika 37. Segment šasije FIREWALL uzorak 2: detalj zavora, SEM .....	27
Slika 38. Segment šasije FIREWALL uzorak 2: detalj s porozitetom, SEM, porozitet .....	28
Slika 39. Segment šasije FIREWALL uzorak 2: mjesto i rezultati EDS analize, materijal zavora.....	28
Slika 40. Segment šasije FIREWALL uzorak 3: makrostruktura s mjestima analize mikrostrukture .....	29



Slika 41. Segment šasijske FIREWALL uzorak 3: mikrostruktura na poziciji ZUT .....	30
Slika 42. Segment šasijske FIREWALL uzorak 3: mikrostruktura na poziciji ZAVAR, porozite, uključine .....	30
Slika 43. Segment šasijske FIREWALL uzorak 3: mikrostruktura na poziciji ZAVAR, veće povećanje .....	31
Slika 44. Segment šasijske FIREWALL uzorak 3: mjesto i rezultati EDS analize, materijal zavara.....	31
Slika 45. Segment šasijske PODNICA u dostavnom stanju, dvije strane .....	32
Slika 46. Segment šasijske PODNICA: stanje unutrašnje površine cijevu, osnovni materijal ...	33
Slika 47. Segment šasijske PODNICA: stanje unutrašnje površine cijevi, mjesto zavara .....	33
Slika 48. Segment šasijske PODNICA: stanje unutrašnje površine cijevu, detalji zavara .....	33
Slika 49. Segment šasijske PODNICA pripremljen za radiografsku analizu .....	34
Slika 50. Segment šasijske PODNICA: radiogram .....	34
Slika 51. Segment šasijske PODNICA: dijelovi nakon rezanja .....	35
Slika 52. Segment šasijske PODNICA: uzorci pripremljeni za metalografsku analizu .....	35
Slika 53. Segment šasijske PODNICA uzorak 4: makrostruktura s mjestima analize mikrostrukture .....	36
Slika 54. Segment šasijske PODNICA uzorak 4: mikrostruktura osnovnog materijala na poziciji OM1, usmjerena feritno-perlitna mikrostruktura .....	36
Slika 55. Segment šasijske PODNICA uzorak 4: mikrostruktura na poziciji ZUT, transformirana mikrostruktura .....	37
Slika 56. Segment šasijske PODNICA uzorak 4: pozicija ZAVAR.....	37
Slika 57. Segment šasijske PODNICA uzorak 4: mikrostruktura na poziciji ZAVAR, detalj, neprotaljenost .....	38
Slika 58. Segment šasijske PODNICA uzorak 4: mikrostruktura na poziciji ZAVAR, gruborznata dendritna mikrostruktura .....	38
Slika 59. Segment šasijske PODNICA uzorak 4: mikrostruktura osnovnog materijala na poziciji OM2.....	39
Slika 60. Segment šasijske PODNICA uzorak 4: nerastaljeni materijal, porozitet, SEM.....	39
Slika 61. Segment šasijske PODNICA uzorak 4: mikrostruktura ispod površine zavara, SEM, sitan porozitet .....	40
Slika 62. Segment šasijske PODNICA uzorak 4: mjesto i rezultati EDS analize, OM1 .....	41
Slika 63. Segment šasijske PODNICA uzorak 4: mjesto i rezultati EDS analize, zavar.....	41
Slika 64. Segment šasijske PODNICA uzorak 4: mjesto i rezultati EDS analize, OM 2.....	42
Slika 65. Segment šasijske PODNICA uzorak 5: makrostruktura s mjestima analize mikrostrukture .....	43
Slika 66. Segment šasijske PODNICA uzorak 5: mikrostruktura na poziciji ZUT.....	44
Slika 67. Segment šasijske PODNICA uzorak 5: mikrostruktura na poziciji ZAVAR, neprotaljenost .....	44
Slika 68. Segment šasijske PODNICA uzorak 5: mikrostruktura na poziciji ZAVAR, detalj....	45
Slika 69. Segment šasijske PODNICA uzorak 5: mikrostruktura materijala ZAVAR .....	45
Slika 70. Segment šasijske PODNICA uzorak 5: zavar, SEM, neprotaljenost .....	46
Slika 71. Segment šasijske PODNICA uzorak 5: detalj zavara, SEM .....	46
Slika 72. Segment šasijske PODNICA uzorak 5: mjesto i rezultati EDS analize, materijal zavara .....	47
Slika 73. Segment šasijske PODNICA uzorak 6: makrostruktura s označenim mjestima analize mikrostrukture .....	48
Slika 74. Segment šasijske PODNICA uzorak 6: mikrostruktura na poziciji ZUT.....	49
Slika 75. Segment šasijske PODNICA uzorak 6: mikrostruktura na poziciji ZAVAR.....	49
Slika 76. Segment šasijske PODNICA uzorak 6: mikrostruktura na poziciji ZAVAR, detalj....	50

Slika 77. Segment šasije PODNICA uzorak 6: zavar, SEM, neprotaljenost .....	50
Slika 78. Segment šasije PODNICA uzorak 6: zavar, detalj, SEM .....	51
Slika 79. Segment šasije PODNICA uzorak 6: zavar, detalj ispod lica zavara, SEM, sitan porozitet.....	51
Slika 80. Segment šasije PODNICA uzorak 6: mjesto i rezultati EDS analize, materijal zavara .....	52
Slika 81. Segment šasije PODNICA uzorak 7: makrostruktura s mjestima analize mikrostrukture .....	53
Slika 82. Segment šasije PODNICA uzorak 7: mikrostruktura na poziciji ZUT.....	53
Slika 83. Segment šasije PODNICA uzorak 7: mikrostruktura na poziciji ZAVAR.....	54
Slika 84. Segment šasije PODNICA uzorak 7: mikrostruktura na poziciji ZAVAR, detalj....	54
Slika 85. Segment šasije PODNICA uzorak 7: mikrostruktura na poziciji ZAVAR, porozitet .....	55
Slika 86. Segment šasije PODNICA uzorak 7: zavar, SEM .....	55
Slika 87. Segment šasije PODNICA uzorak 7: zavar, detalj, SEM, neprotaljenost / pukotina	56
Slika 88. Segment šasije PODNICA uzorak 7: zavar, detalj ispod lica zavara, SEM, porozitet .....	56
Slika 89. Segment šasije PODNICA uzorak 7: mjesto i rezultati EDS analize, materijal zavara .....	57

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Oznake i ispitne sile mjerenja tvrdoće [10].....	10
Tablica 2. Kemijski sastav [11].....	11
Tablica 3. Toplinska obrada provedena prije postupka zavarivanja [11] .....	11
Tablica 4. Parametri radiografskog ispitivanja .....	13
Tablica 5. Mikrotvrdoća uzorka 1 na karakterističnim mjestima.....	24
Tablica 6. Mikrotvrdoća uzorka 1 na karakterističnim mjestima.....	24
Tablica 7. Mikrotvrdoća uzorka 2 na karakterističnim mjestima.....	29
Tablica 8. Mikrotvrdoća uzorka 3 na karakterističnim mjestima.....	32
Tablica 9. Mikrotvrdoća uzorka 4 na karakterističnim mjestima.....	42
Tablica 10. Mikrotvrdoća uzorka 5 na karakterističnim mjestima.....	47
Tablica 11. Mikrotvrdoća uzorka 6 na karakterističnim mjestima.....	52
Tablica 12. Mikrotvrdoća uzorka 7 na karakterističnim mjestima.....	57

---

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
R <sub>m</sub>	N/mm <sup>2</sup>	vlačna čvrstoća
R <sub>p0,2</sub>	N/mm <sup>2</sup>	granica razvlačenja
eV	elektronvolt	jedinica za energiju
kV	kilovolt	napon
mA	miliamper	jakost struje

---

**SAŽETAK**

U ovom radu provedena je karakterizacija i ispitivanje dva zavarena segmenata šasije sportskog automobila nazvanim Segment šasije „Firewall“ i segment šasije „Podnica.“ Zavari koji su izvedeni na zadanim segmentima dinamički su opterećeni te uslijed promjenjivih naprezanja može doći do njihovog oštećenja. Segmenti su dostavljeni te izrezani ručnom pilom kako bi im mikrostruktura ostala nepromijenjena te su na njima provedena nerazorna i razorna ispitivanja s ciljem analize osnovnog materijala cijevi i materijala zavara.

Ključne riječi: zavar, šasija, nerazorna i razorna ispitivanja

---

**SUMMARY**

This bachelor thesis is based on testing and characterization of two welded-segment of sport car chassis: "Firewall" and "Podnica." This parts have been dynamically loaded and that caused their damage. Segments have been delivered and cut in that way so their microstructure would remain the same. Welded segments were then tested with destructive and nondestructive methods to analyse base material of pipe and welded segment.

Key words: weld, chassis, destructive and nondestructive methods

## **1. UVOD**

U teorijskom dijelu opisane su vrste šasija, kao i materijali koji se najčešće koriste u automobilskoj industriji za izradu okvira (šasije) te tehnike njihovog spajanja. Opisani su sastavi i svojstva osnovnog, ali i dodatnog materijala koji se koristio prilikom zavarivanja, kao i sam postupak zavarivanja. Uz to opisane su vrste razornih i nerazornih ispitivanja, kao i parametri koji su korišteni tijekom analize uzoraka.

## 2. TEORIJSKI DIO

### 2.1. Okvir ili šasija automobila

Okvir automobila ili šasija je potporni dio automobila na koji se postavlja karoserija. On nosi sav teret vozila te preko opruga prenosi težinu na kotače. Prilikom vožnje dinamički je opterećen i sile koje se javljaju, posebice kod sportskih automobila, vrlo su velike. Na slici 1. prikazana je šasija automobila.



Slika 1. Šasija automobila [1]

Kod sportskih automobila šasije su nešto drugačije nego kod ostalih vozila. Osim odabira materijala boljih mehaničkih svojstava, u svrhu smanjenja naprezanja koja se javljaju u šasiji, pogodan je njen rešetkasti oblik koji se sastoji od međusobno povezanih cijevi spojenih u trokutaste oblike. Tim oblikom osim smanjenja naprezanja i povećanja krutosti vozila, smanjuje se i masa samog vozila, što doprinosi boljim voznim karakteristikama. Na slici 2. prikazana je rešetkasta šasija sportskog automobila.



Slika 2. Rešetkasta šasija sportskog automobila [2]



## 2.2. Materijali za izradu šasije

Materijali koji se koriste za izradu šasije moraju zadovoljiti niz zahtjeva kao što su toplinska, korozijska i mehanička otpornost, manja gustoća, mogućnost recikliranja i ponovne upotrebe, jednostavnost proizvodnje, vijek trajanja, ali i cijena. Materijal koji se najviše koristi je čelik zbog omjera mehaničkih svojstava i cijene. No, kod sportskih automobila osim čelika sve se više koriste legure aluminija, magnezija te kompoziti.

## 2.3. Spajanje šasije TIG postupkom

Zavarivanje TIG postupkom (engl. Tungsten Inert Gas) ili elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina je ručni postupak zavarivanja u neutralnom zaštitnom plinu ili neutralnoj smjesi plinova, koji koristi netaljivu volframovu elektrodu i posebno dodatni materijal. Svojstvo ovog postupka je stabilan električni luk i visoko kvalitetan zavar, ali zahtjeva izuzetne vještine zavarivača i relativno je spor. Iako se može koristiti za skoro sve vrste materijala, najčešće se koristi za zavarivanje nehrđajućih čelika i lakih metala (aluminijeve legure, titanove legure). Pogodan za zavarivanje tankih limova (do debljine 6 mm), a često se koristi kod proizvodnje bicikla, zrakoplova i u autoindustriji. U pravilu se volframova elektroda priključuje na (-) pol izvora istosmjerne struje, zbog znatno manjeg trošenja volframove elektrode. Koristi se pulsirajuća struja zavarivanja. [3]

## 2.4. Nerazorna ispitivanja

NDT ( nondestructive testing) su metode ispitivanja materijala bez razaranja. Proizvodi i materijali se ispituju i mjere tako da pri tome ne budu oštećeni. Time se osigurava balans između kontrole kvalitete i kontrole troškova. S obzirom na način ispitivanja NDT metode dijele se na [4] :

- Površinske metode
- Volumne metode
- Posebno izdvojene metode

## 2.5. Metode karakterizacije

### 2.5.1. Priprema uzoraka

Metalografija se bavi analizom strukture materijala .Pri tome se analizira makrostruktura (okom ili stereomikroskopom) i/ili mikrostruktura (na svjetlosnom ili elektronskom mikroskopu). Također to je znanost o razvijanju strukture. [5]

Priprema uzorka za analizu sastoji se od više koraka [5]:

- Izrezivanje
- Ulijevanje uzoraka
- Brušenje
- Poliranje
- Nagrizanje

#### Izrezivanje

Prvi korak u analizi mikrostrukture je izrezivanje dijela koji analiziramo i to vrlo preciznim i specijaliziranim alatima i napravama (dijamantne ploče) ili napraviti uzorak od materijala istovjetnog kao i materijal dijela koji analiziramo. [5] Na slici 3 prikazan je primjer tračnog izrezivanja uzorka.



**Slika 3. Izrezivanje uzorka tračnom pilom**

### Ulijevanje uzorka u polimernu masu

Uzorak ulijevamo u polimernu masu iz više razloga. Jedan od njih je da zaštiti uzorak od vanjskih uzroka, drugi je taj da dobivamo uniformni oblik uzorka za automatsku pripremu na strojevima za brušenje/poliranje i daljnju obradu i analizu. Također, na ulivenom uzorku se mogu bolje analizirati rubovi na kojima bi nam inače razne greške mogle promaknuti. Uzorke ulijevamo u polimernu masu koja može biti duromerna ili plastomerna. Polimerna masa s kojom ulijevamo uzorak mora imati što manju kontrakciju kako nam se uzorak ne bi odvojio od mase i tako onemogućio analizu na mikroskopu. Poželjna je što jača adhezija kako bi se polimerna masa što čvršće zalijepila za uzorak. Nužna je i ista otpornost na abraziju kao kod uzorka kako nam se kod brušenja ne bi dogodilo da imamo udubina ili izbočine na uzorku ili na masi. Masa mora imati mogućnost poliranja. Na slici 4 je jedan od uređaja za ulijevanje uzorka. [5]



Slika 4. Uređaj za ulijevanje uzorka [6].

## Brušenje

Bušenjem nastojimo skinuti sloj prljavštine, apsorbiranih plinova, oksida i plastično deformiranog sloja na uzorku, kako bi nam ostao materijal koji je referentan materijalu koji se ispituje. [5] Na slici 5 prikazan je jedan od uređaja za brušenje uzoraka na FSB-u.

Parametri brušenje jesu slijedeći: [5]

- Vrsta brusnog papira
- Kemijski sastav abraziva
- Zrnatost i oblik abraziva
- Sredstvo za podmazivanje
- Sila brušenja
- Vrijeme brušenja
- Brzina okretanja brusnog diska



Slika 5. Uređaj za brušenje uzoraka [6].

## Poliranje

Poliranjem uzorak dovodimo do zrcalnog sjaja. Radi se na istom principu kao i kod brušenja, ali s manjom veličinom abrazivnih čestica koje daju sjajnu, glatku površinu. U poliranom stanju analiziramo porozitet, nemetalne uključke i pukotine. [6] Na slici 6 prikazan je uređaj za poliranje uzoraka na FSB-u.



Slika 6. Uređaj za poliranje uzoraka [6].

## Nagrivanje (jetkanje)

Nagrivanje uzorka je postupak selektivnog korodiranja površine s namjerom da se istakne mikrostruktura uzorka. Na ovaj način možemo vidjeti kristalna zrna i ostale karakteristike materijala nevidljive u nenagrivanom stanju. Parametri za nagrivanje su sredstvo za nagrivanje, vrijeme, temperatura ili električna struja. [5]

Prema tome postoje i razni postupci nagrivanja [5]:

- Kemijsko nagrivanje –obavlja se na čelicima, lakim i obojenim materijalima. Čelike nagrivate u 3% nitalu (3% HNO<sub>3</sub>+ alkohol)
- Elektrolitičko nagrivanje –postupak kojim se nagrivate nehrđajući čelici
- Obojeno nagrivanje – svako zrno oboji se u drugu boju, koristi se za analizu granica zrna, ali otežava analizu mikrostrukture
- Termičko nagrivanje–koristi se za keramiku

### **2.5.2. Analiza svjetlosnim mikroskopom**

Svjetlosni mikroskop je instrument koji daje uvećane slike bliskih predmeta, koji se ne bi mogli promatrati golim okom. Snop svjetlosti osvjetljava objekt koji promatramo te zatim prolazi kroz optički sustav mikroskopa koji omogućuje stvaranje njegove povećane slike. Optički sustav mikroskopa građen je od niza leća, a može se podijeliti na dva osnovna dijela: okular i objektiv. Objektiv je građen od sustava leća, a okrenut je prema predmetu (objektu) koji promatramo. Kroz okular se gleda u mikroskop i također je građen od sustava leća. Svjetlost kojom osvjetljavamo predmet prolazi kroz tzv. kondenzator koji može biti građen od jedne ili više leća, a njegova je uloga da sabire zrake svjetlosti na uzorku koji promatramo kako bi on bio što bolje osvjetljen. Svjetlost ulazi u leće objektiva koje stvaraju prvu povećanu sliku predmeta. Leće okulara imaju ulogu da još više povećaju sliku predmeta koju daje objektiv. Moderni svjetlosni mikroskopi mogu postići povećanje od 1.000x te omogućavaju oku da razluči objekte koji su međusobno udaljeni i do 0,0002 mm. . [7]

### **2.5.3. Analiza skenirajućom elektronskom mikroskopijom**

Skenirajući elektronski mikroskop ili skraćeno SEM je uređaj kojim se s pomoću uskog snopa elektrona dobiva uvid u mikrostrukturu promatranog uzorka, uz golemo povećanje. Kod SEM-a, snop elektrona visoke energije, skenira po uzorku i izaziva niz reakcija s atomima na površini koju skenira. Detektori postavljeni u komori mikroskopa hvataju te elektrone i formiraju virtualnu sliku na ekranu koja pokazuje topografiju površine ili elementne kontraste. [8]

Kod SEM mikroskopa razlikuju se dvije vrste signala [8]:

- sekundarni elektroni (SE)
- raspršeni „Backscattered“ elektroni (BSE)

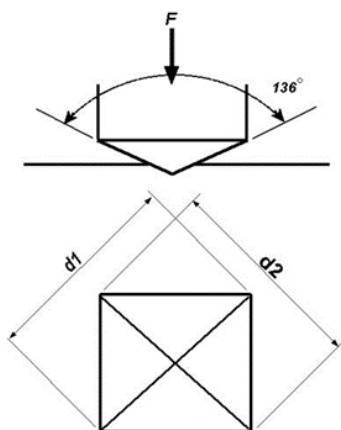
Sekundarni elektroni (SE) elektroni su atomi koji su izbačeni uslijed interakcije s primarnim elektronima iz snopa. Općenito imaju vrlo malu energiju (po definiciji manju od 50 eV). Zbog te njihove male energije mogu iskočiti samo iz vrlo plitkog dijela površine uzorka. Kao rezultat daju topografiju površine. Raspršeni elektroni (BSE) primarni su elektroni iz snopa koji su se odbili nazad od površine uzorka uslijed elastičnih međudjelovanja s jezgrom atoma iz uzorka. Imaju visoku energiju, koja (po definiciji) seže od 50 eV pa sve do napona koji imaju ubrzani elektroni iz snopa. [8]

#### 2.5.4. Analiza EDS detektorom

Pomoću prethodno spomenutog elektronskog mikroskopa, odnosno, SEM mikroskopa, provodi se i analiza kemijskog sastava pomoću EDS detektora. EDS analiza ponekad se naziva i EDXA (eng. Energy Dispersive X-ray Analysis) ili EDXMA mikroanaliza (eng. Energy Dispersive X-ray Microanalysis). Rendgenske zrake nastaju kada ubrzani elektron, koji potječe iz snopa elektrona, „izbije“ elektron iz unutarnje ljuske. Elektron iz vanjske ljuske, koji ima višu energiju, tada popunjava upražnjeno mjesto i otpušta „višak“ energije u obliku fotona X-zrake. Spektrometar X-zraka prikuplja te X-zrake, broji ih i sortira, uobičajeno na temelju energije (eng. Energy Dispersive Spectrometry, EDS). Dobiveni spektar iscrtava broj X-zraka, na okomitoj osi, nasuprot energiji, na vodoravnoj osi. Vrhovi na spektru odgovaraju elementima prisutnim u uzorcima. Položaj energije na spektru označava koji je element u pitanju. Broj signala u određenom vrhu na spektru označava udio elementa u analiziranom dijelu uzorka. [8]

#### 2.5.5. Ispitivanje tvrdoće prema metodi Vickers

Mikrotvrdoća prema metodi Vickers određuje se utiskivanjem penetratora u uzorak. Penetrator je četverostrana istostranična piramida izrađena od dijamanta s vršnim kutem od  $136^\circ$  prikazana na slici 7. Utiskivanje se vrši određenom silom i označava od HV 0.01 do HV 100. Za određivanje mikrotvrdoće najčešća sila utiskivanja je u rasponu od 0,1 N do 10 N. Ispitivanja su pokazala da izmjerene vrijednosti tvrdoće nisu jednake za sve promatrane sile. Tako kod opterećenja sa silama manjim od 20 N vrijednosti tvrdoća nisu jednake onima koje su izmjerene kod opterećenja sa silama višim od 20 N. Zbog navedenog ovi rezultati nisu usporedivi s tvrdoćama dobivenim ispitivanjima pri visokim opterećenjima. [9] Na slici 7. prikazan je vršni kut i otisak penetratora Vickersovog tvrdomjera.



Slika 7. Vršni kut i otisak penetratora Vickersovog tvrdomjera [10]

Ovisno o opterećenjima, pri Vickersovoj metodi mjerenja razlikuju se tipovi tvrdoća navedeni tablicom 1.

**Tablica 1. Oznake i ispitne sile mjerenja tvrdoće [10]**

Konvencionalna tvrdoća		Semi-mikrotvrdoća		Mikrotvrdoća	
Oznaka	Ispitna sila $F$ [N]	Oznaka	Ispitna sila $F$ [N]	Oznaka	Ispitna sila $F$ [N]
<b>HV 5</b>	49,03	<b>HV 0,2</b>	1,961	<b>HV 0,01</b>	0,09807
<b>HV 10</b>	98,07	<b>HV 0,3</b>	2,942	<b>HV 0,015</b>	0,1471
<b>HV 20</b>	196,1	<b>HV 0,5</b>	4,903	<b>HV 0,02</b>	0,1961
<b>HV 30</b>	294,2	<b>HV 1</b>	9,807	<b>HV 0,025</b>	0,2452
<b>HV 50</b>	490,3	<b>HV 2</b>	19,61	<b>HV 0,05</b>	0,4903
<b>HV 100</b>	980,7	<b>HV 3</b>	29,42	<b>HV 0,1</b>	0,9807



### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu provedena su razorna i nerazorna ispitivanja kako bi se odredio uzrok oštećenja zadanih segmenata. Od nerazornih ispitivanja provedena je endoskopska i radiografska analiza. Endoskopska ispitivanja provedena su na endoskopu, dok je za radiografsko ispitivanje korišten rendgen, skener i slikovna ploča. Razornim metodama napravljena je analiza mikrostrukture pomoću svjetlosnog mikroskopa s pripadajućim programom za analizu slike i skenirajućim elektronskim mikroskopom s detektorom za mikroanalizu kemijskog sastava. Također mjerena je i mikrotvrdoća metodom Vickers.

#### Materijal ispitivanih uzoraka – legura 25CrMo4

Dijelovi segmenata na kojima su obavljena ispitivanja načinjena su od legure čelika 25CrMo4. Neka od svojstava su mu visoka vlačna čvrstoća  $700 \text{ N/mm}^2 - 950 \text{ N/mm}^2$  i dobra zavarljivost. Primjenjuje se u automobilskoj i zrakoplovnoj industriji za izradu visoko otpornih osovina, dijelovi turbina, šasija. [11] U tablici 2. opisan je kemijski sastav legure 25CrMo4, a tablici 3. toplinska obrada osnovnog materijala provedena prije postupka zavarivanja.

**Tablica 2. Kemijski sastav [11]**

Elementi	C	Si	Mn	Cr	Mo	Fe
Udio	0,25	0,25	0,7	1,05	0,25	ostatak

**Tablica 3. Toplinska obrada provedena prije postupka zavarivanja [11]**

<b>Toplo valjanje</b>	1100-850 °C
<b>Normalizacijsko žarenje</b>	860-890 °C /zrak
<b>Meko žarenje</b>	680-720 °C
<b>Kaljenje</b>	840-880 °C /voda, ulje
<b>Temperiranje</b>	540-680 °C /zrak

## Zavarivanje i dodatni materijal

U postupku zavarivanja segmenata šasije također je korišten TIG postupak, zaštitna atmosfera u postupku je bila Argon 5.0, a postupak je vršen bez prethodnog ili naknadnog zagrijavanja. Parametri napona i jakosti struje su nepoznati. Na slici 8. prikazan je TIG postupak zavarivanja cijevi.



Slika 8. Postupak TIG zavarivanja cijevi [12]

Kao dodatni materijal korištena je žica od CrMo1 čelik obložena bakrom, vrlo je otporna na puzanje te se nakon ohlađivanja može koristiti do radne temperature od 550 °C. [13]

## Endoskopska analiza

Zbog vrlo složene geometrije i nepristupačnih dijelova uzoraka napravljena je endoskopska inspekcija uzoraka. Endoskopskim ispitivanjem vizualno su pregledani unutrašnji dijelovi cijevi. Na slici 9 prikazan je uređaj kojim se vršena inspekcija, endoskop OLYMPUS Ultra LITE.



Slika 9. Endoskop OLYMPUS Ultra LITE [14]

## Radiografska analiza

Radiografija je vrsta kontrole bez razaranja pri kojem su metali izloženi snopu rendgenskih zraka. Razlike u debljini, gustoći, apsorpciji uzrokovanoj unutarnjim pogreškama ili uključcima vide se na sjenovitoj slici koja nastaje na fluorescentnom zastoru ili fotografskom filmu stavljenom iza ispitivanog uzorka. Pri kontroli kvalitete metodama prozračivanja u praksi koriste se rendgenske zrake ili gama zrake. Rendgenske zrake nastaju pri naglom kočenju ubrzanog snopa elektrona na metalnoj ploči, dok gama zrake nastaju prilikom spontanog raspada nestabilnih atomskih jezgri (prirodnih radioaktivnih materijala i radioaktivnih izotopa). Oba su zračenja u biti elektromagnetska zračenja. Rendgenske i gama zrake ostavljaju trag na filmskoj emulziji (industrijske folije), na čemu se i zasniva radiografska kontrola i ispitivanje grešaka u unutrašnjosti materijala. [15] U tablici 4. prikazani su parametri korišteni za radiografsko snimanje segmenata šasije „Firewall“ i „Podnica“.

Rendgen: BALTEAU GM 300D

Skener: VMI 3600 SF

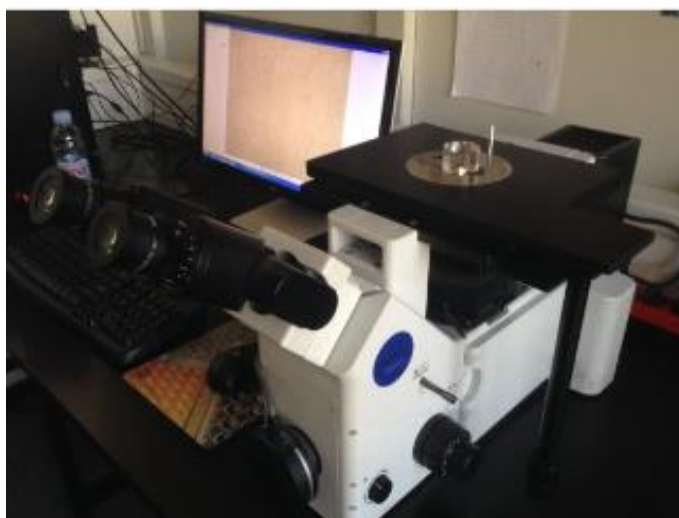
Slikovna ploča: Industrex XL blue 14“ × 18“

**Tablica 4. Parametri radiografskog ispitivanja**

Napon, <i>kV</i>	125
Struja, <i>mA</i>	3
Vrijeme ekspozicije, <i>s</i>	120
FF udaljenost, <i>mm</i>	700
Napon lasera, <i>V</i>	15
Napon fotomultiplikatora, <i>V</i>	5.25
Rezolucija skeniranja, <i>μm</i>	50

## Mikroskopska analiza

Na slici 10 prikazan je svjetlosni mikroskop kojim su približno određene faze koje se nalaze u danim uzorcima. Uređaj na kojem je rađena skenirajuća elektronska mikroskopija je TESCAN 5136 VEGA LS s detektorom za analizu kemijskog sastava (Slika 11.). Uređaj ima povećanje do 100 000x, a rezolucija mu iznosi 0,015  $\mu\text{m}$ . Također napravljena je i mikroanaliza prevlake pomoću EDS detektora u području analize 20keV.



Slika 10. Olympus GX51F-5 na FSB-u [6]



Slika 1112. TESCAN VEGA TS5136LS na FSB-u [6]

### Ispitivanje mikrotvrdoće uzoraka

Kod ispitivanja mikrotvrdoće opterećenje je trajalo 10-15 sekundi nakon čega je na uzorku ostajao otisak dijamantnog penetratora. Zatim su pod mikroskopom precizno izmjerene dužine dijagonale otiska i računana je srednja vrijednost. Unosom srednje vrijednosti dijagonala u formulu dobivamo konačnu vrijednost tvrdoće. Mikrotvrdoća uzoraka šasije ispitana je s opterećenjem  $0,2 \cdot 9,81 \text{ N}$ , tj. HV0,2, te sa  $09,1 \text{ N}$ , tj. HV 10.

#### 3.1. Analiza segmenta šasije „FIREWALL“

Na slici 13 je prikazan je segment šasije FIREWALL u početnom stanju.



Slika 13. Segment šasije FIREWALL u prvobitnom stanju: a) prednja strana b) stražnja strana

#### Endoskopska ispitivanja

Snimke cijevi segmenta FIREWALL s unutrašnje strane dobivene endoskopom su prikazane na slikama 14-16.

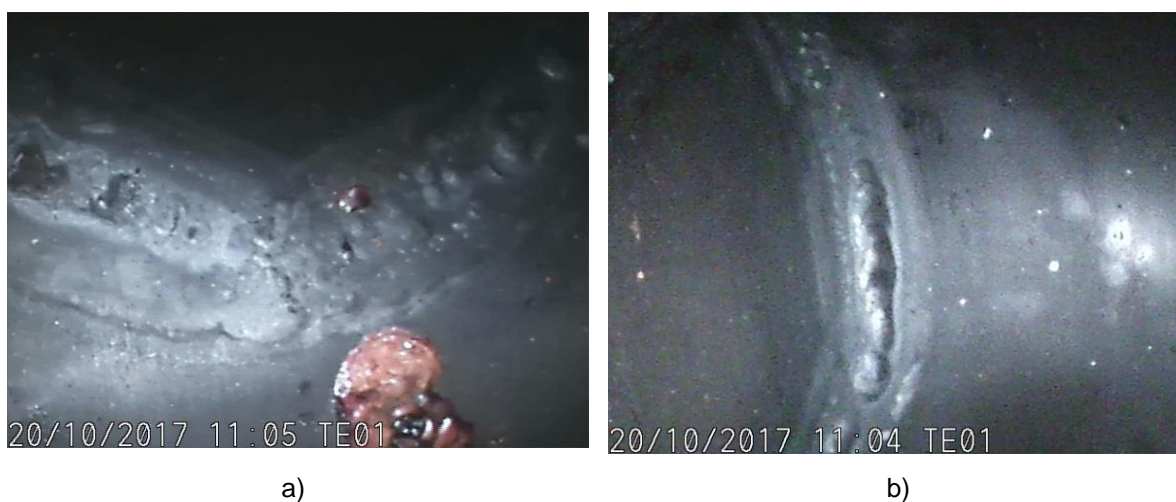
Endoskopskom analizom unutarnje strane cijevi vidljiva je korozija. Na mjestima zavora, vidljivo je i mjestimično progaranje osnovnog materijala, vjerojatno kao posljedica prevelikog unosa topline tijekom zavarivanja.



**Slika 14. Segment šasije FIREWALL: stanje unutrašnje površine cijevi gdje se vidi osnovni materijal.**



**Slika 15. Segment šasije FIREWALL: stanje unutrašnje površine cijevi na mjestu zavara**



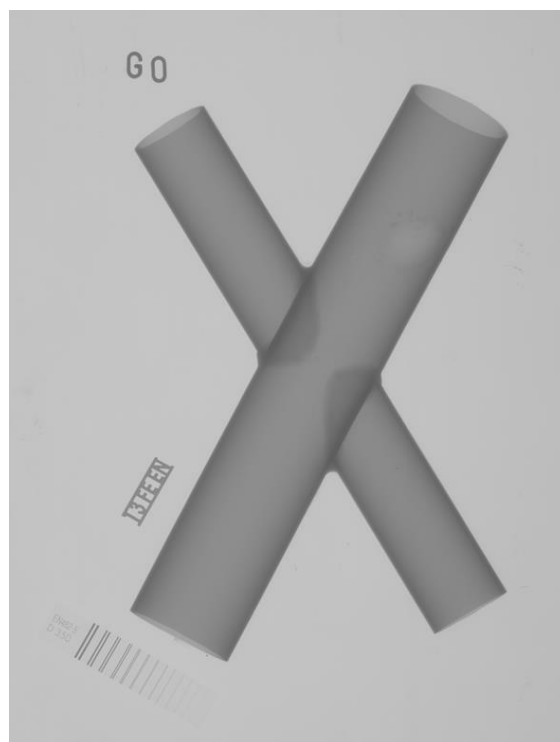
**Slika 16. Segment šasije FIREWALL: stanje unutrašnje površine cijevi, detalji zavara**

### **Radiografska analiza**

Na slici 17 prikazan je segment šasije FIREWALL u poziciji za radiografsku analizu, a na slici 18 prikazan je dobiveni radiogram. Analizom radiograma nisu uočene pukotine u materijalu zavara niti osnovnom materijalu. Zbog male debljine stijenke cijevi i malog lokalnog zavara nisu uočljive druge promjene.



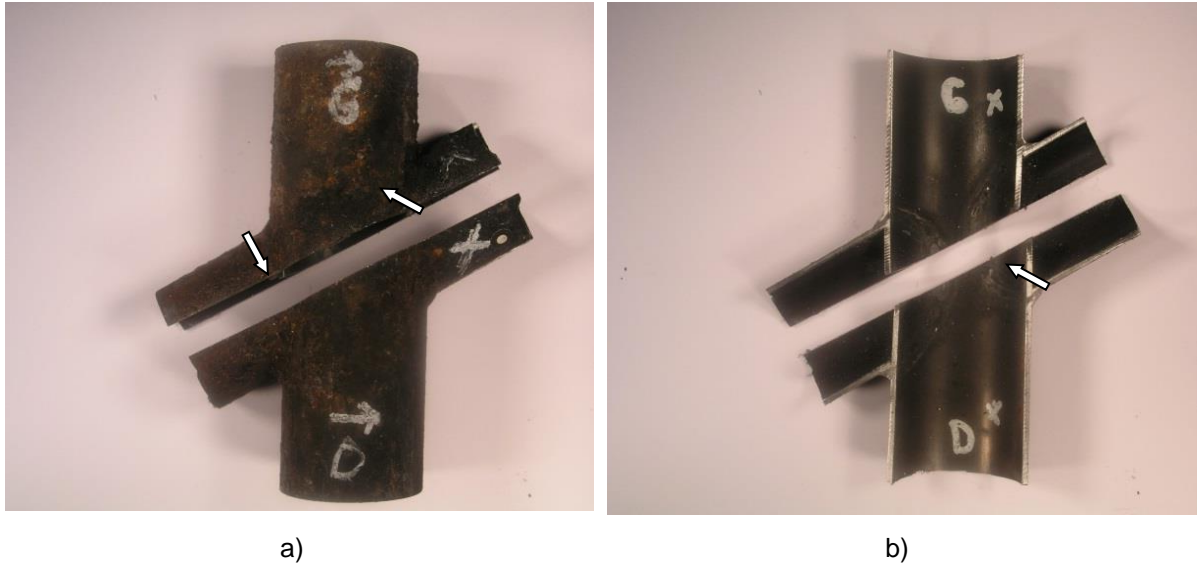
**Slika 17. Segment šasije FIREWALL pripremljen za radiografsku analizu**



**Slika 18. Segment šasije FIREWALL: radiogram**

### Analiza mikrostrukture

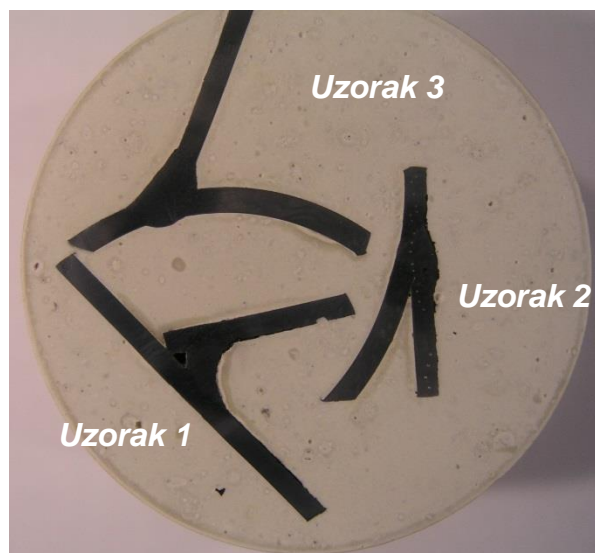
Za potrebe analize mikrostrukture segment šasije FIREWALL je izrezan tračnom i ručnom pilom bez unosa topline. Dostavljeni uzorak prije i poslije izrezivanja prikazan je na slici 19.



**Slika 19. Segment šasije FIREWALL: a) prije izrezivanja; b) poslije izrezivanja.**

Iz dostavljenog dijela Segment šasije FIREWALL izrezana su tri uzorka za analizu makro i mikrostrukture na mjestima označenim sa strelicama na slici 19.

Ti uzorci pripremljeni za metalografske analize prikazani su na slici 20.

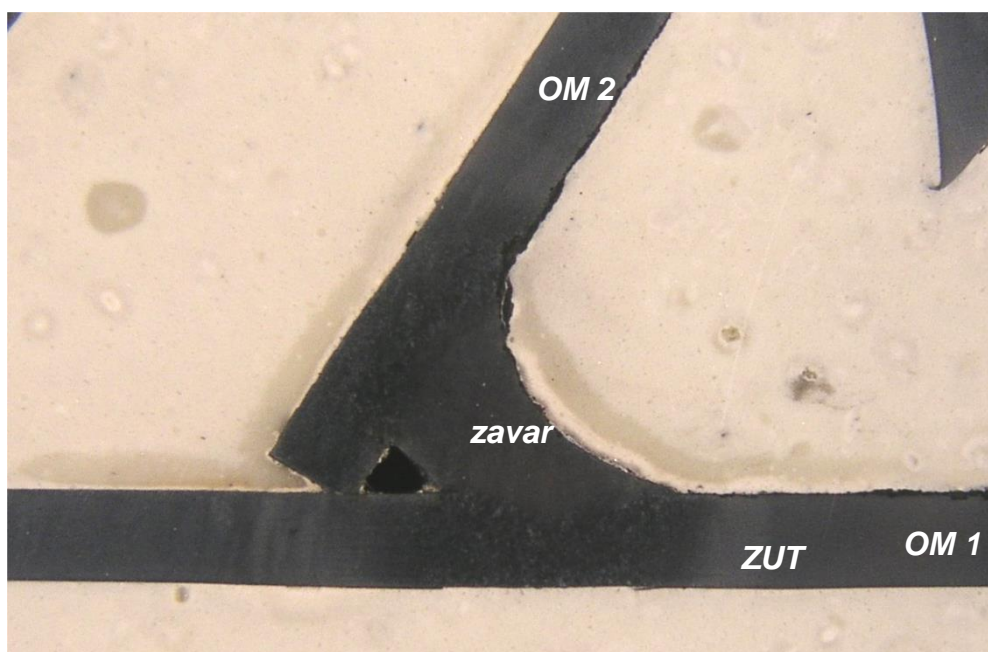


**Slika 20. Segment šasije FIREWALL: uzorci pripremljeni za metalografsku analizu**



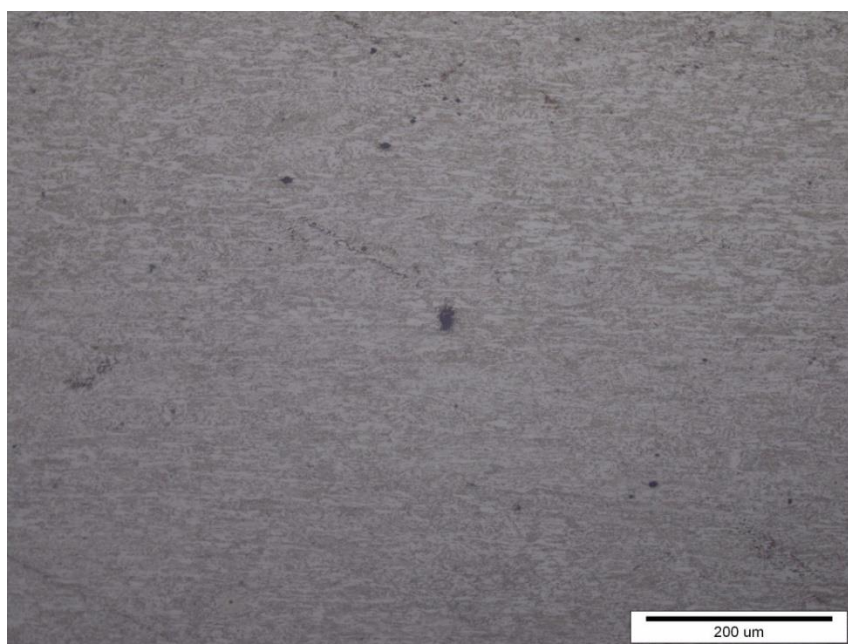
**Analiza strukture uzorka 1**

Makrostruktura zavara uzorka 1 prikazana je na slici 21.

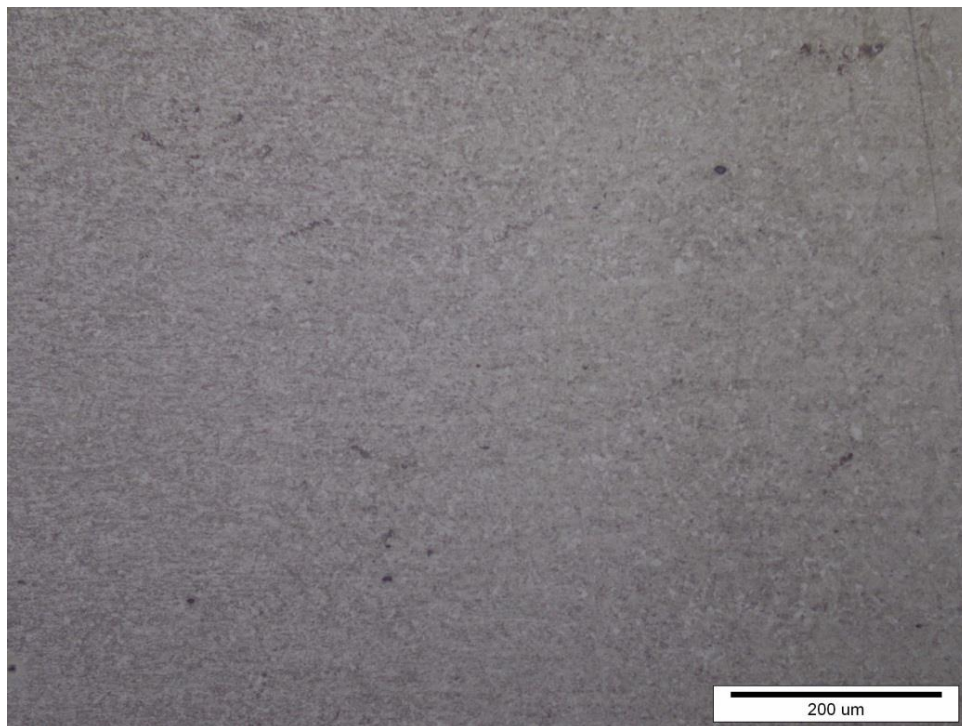


**Slika 21. Segment šasije FIREWALL uzorak 1: makrostruktura s mjestima analize mikrostrukture**

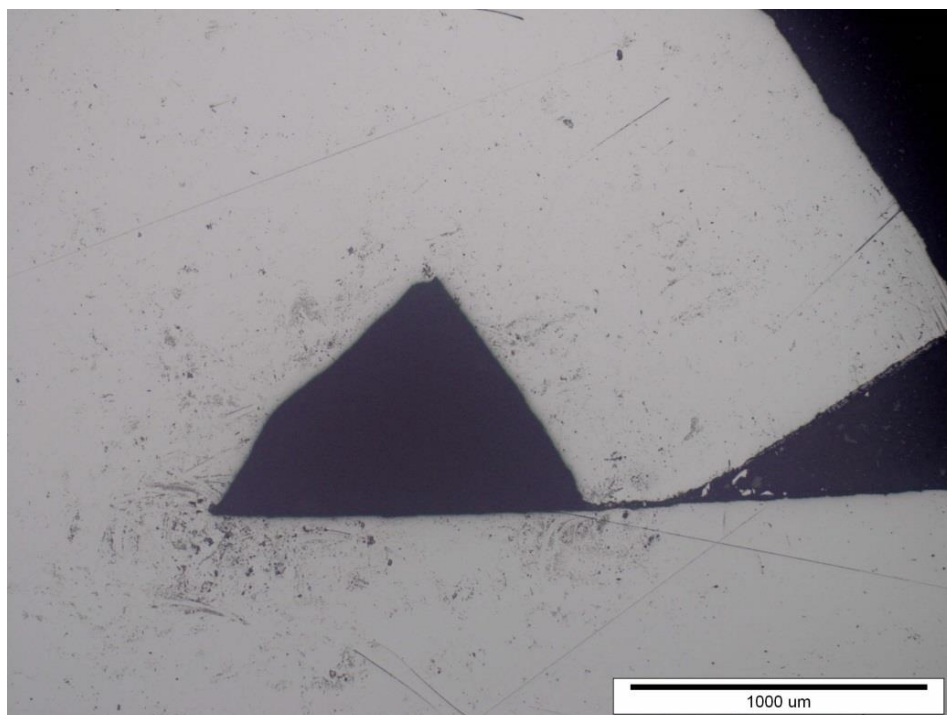
Karakteristične mikrostrukture uzorka na mjestima označenima na slici 21 (OM 1, ZUT, zavar, OM2) prikazane su na slikama 22 – 26.



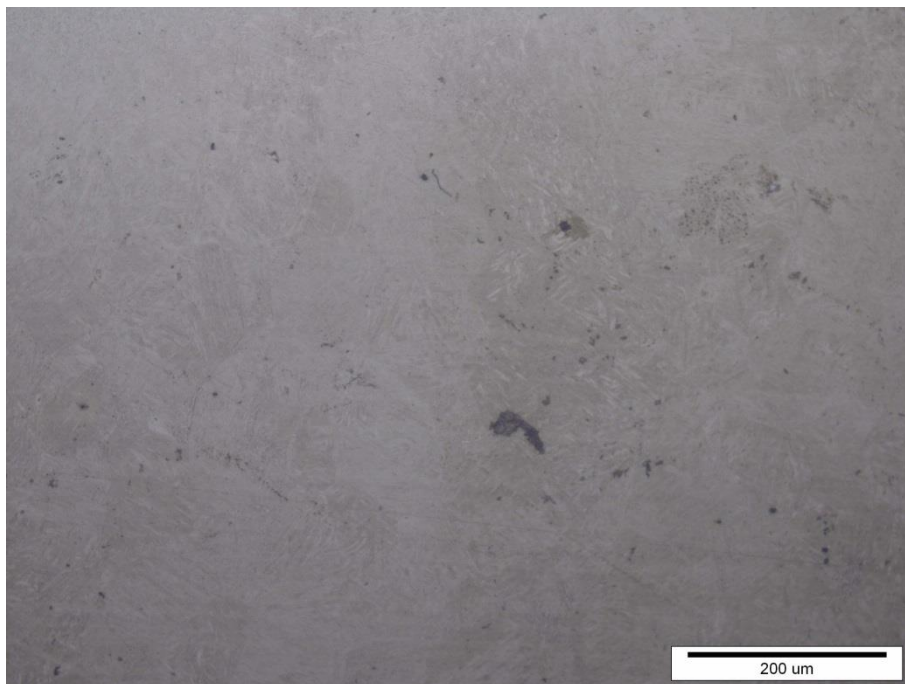
**Slika 22. Segment šasije FIREWALL uzorak 1: mikrostruktura osnovnog materijala na poziciji OM1, usmjerena feritno-perlitna mikrostruktura**



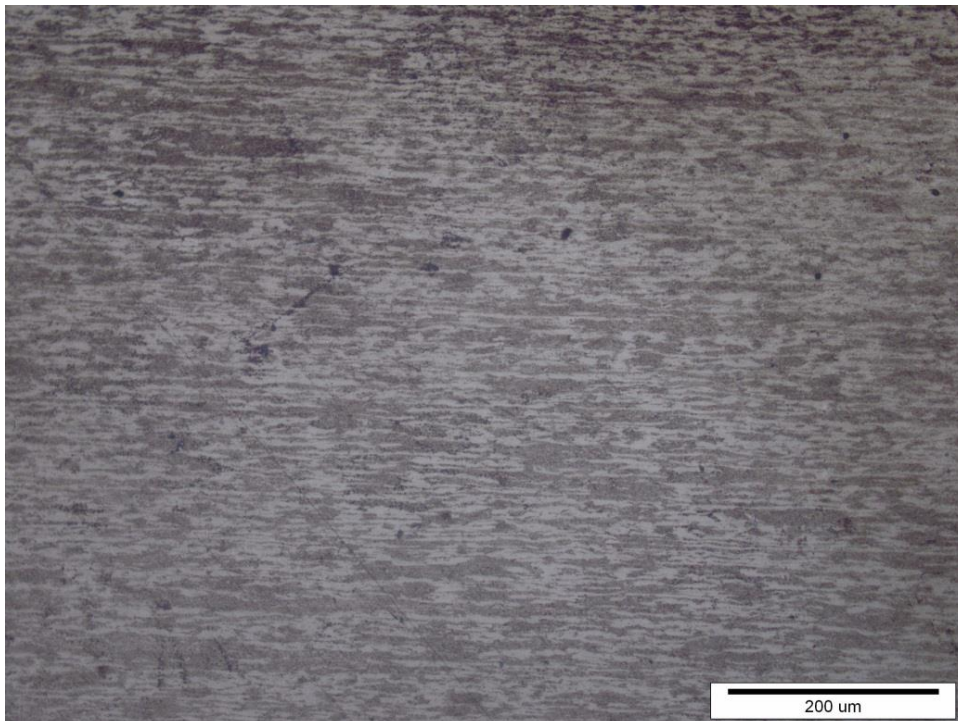
**Slika 23. Segment šasije FIREWALL uzorak 1: mikrostruktura na poziciji ZUT**



**Slika 24. Segment šasije FIREWALL uzorak 1: mikrostruktura na poziciji ZAVAR, neprotaljen materijal**

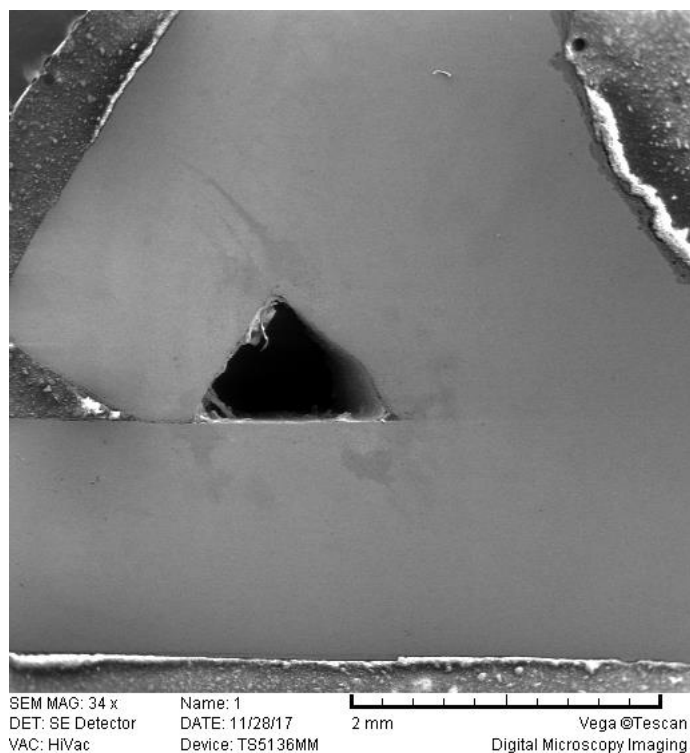


**Slika 25. Segment šasije FIREWALL uzorak 1: mikrostruktura na poziciji ZAVAR, veće povećanje, gruba dendritna mikrostruktura s porozitetom**

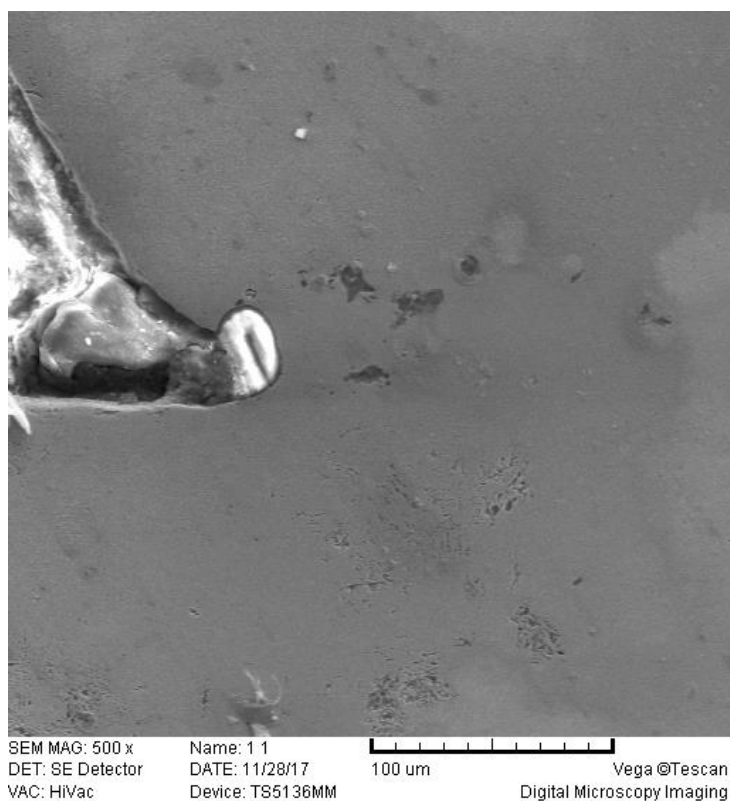


**Slika 26. Segment šasije FIREWALL uzorak 1: mikrostruktura osnovnog materijala na poziciji OM2, usmjerena feritno – perlitna mikrostruktura**

Uzorak 1 na mjestu zavora analiziran pomoću skenirajućeg elektronskog mikroskopa prikazan je na slikama 27 i 28.



**Slika 27. Segment šasije FIREWALL uzorak 1: zavar, SEM, neprotaljenost**

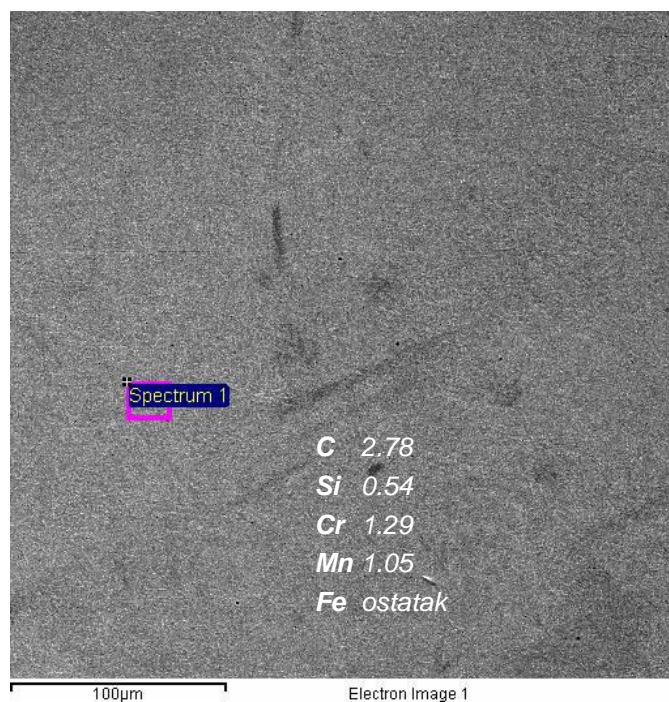


**Slika 28. Segment šasije FIREWALL uzorak 1: detalj zavora, SEM, porozitet**

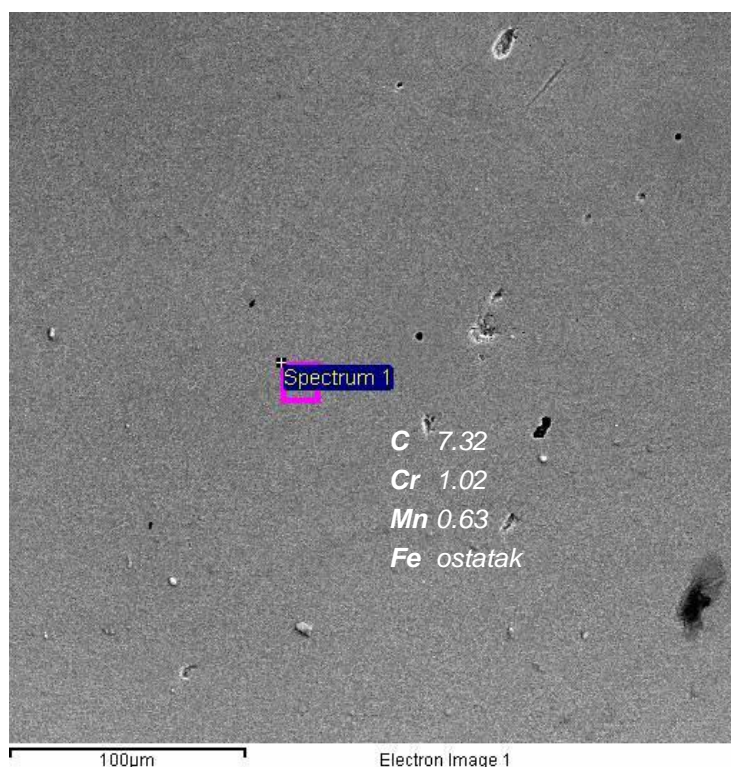
Na uzorku 1 na karakterističnim mjestima označenima na slici 21 napravljena je i EDS mikroanaliza kemijskog sastava. Pozicije EDS analize uzorka 1 s dobivenim masenim udjelima pojedinih elemenata prikazani su na slikama 29 – 31.



**Slika 29. Segment šasije FIREWALL uzorak 1: mjesto i rezultati EDS analize, OM1**



**Slika 30. Segment šasije FIREWALL uzorak 1: mjesto i rezultati EDS analize, zavar**



Slika 31. Segment šasije FIREWALL uzorak 1: mjesto i rezultati EDS analize, OM 2

### Mikrotvrdoća uzorka 1

Mjerenja mikrotvrdoće uzorka 1 su napravljena u osnovnom materijalu, materijalu zavara te materijalu u ZUTu, tj na karakterističnim mjestima prikazanima na slici 21. Srednje vrijednosti pet mjerenja prikazane su u tablicama 5 i 6.

Tablica 5. Mikrotvrdoća uzorka 1 na karakterističnim mjestima

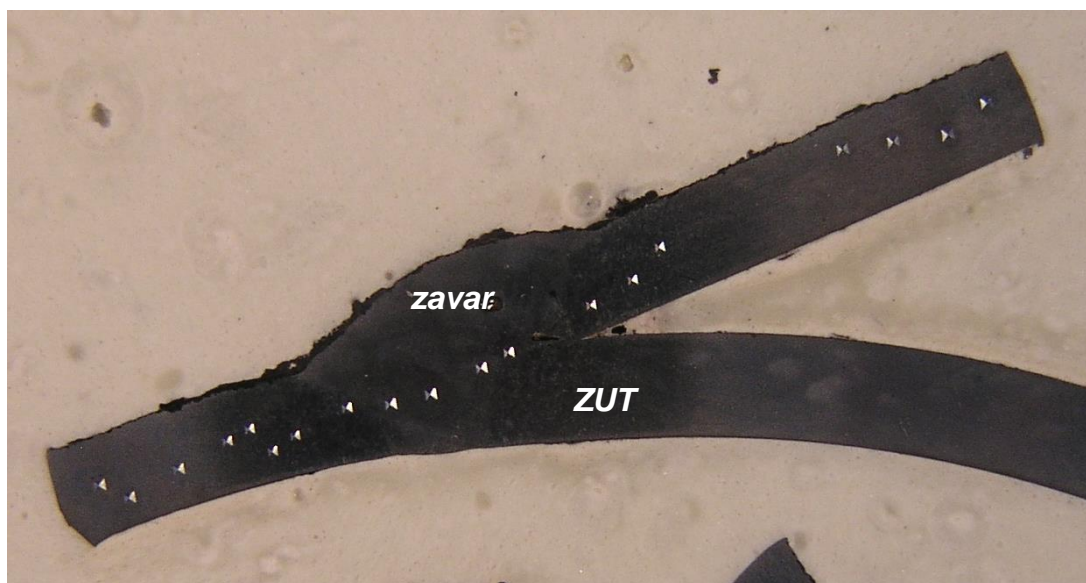
MJESTO MJERENJA	HV 0,2 SREDNJA VRIJEDNOST
OM 1	287
ZUT	369
ZAVAR	259
OM 2	256

Tablica 6. Mikrotvrdoća uzorka 1 na karakterističnim mjestima

MJESTO MJERENJA	HV10 SREDNJA VRIJEDNOST
OM 1	268
ZUT	390
ZAVAR	325
OM 2	283

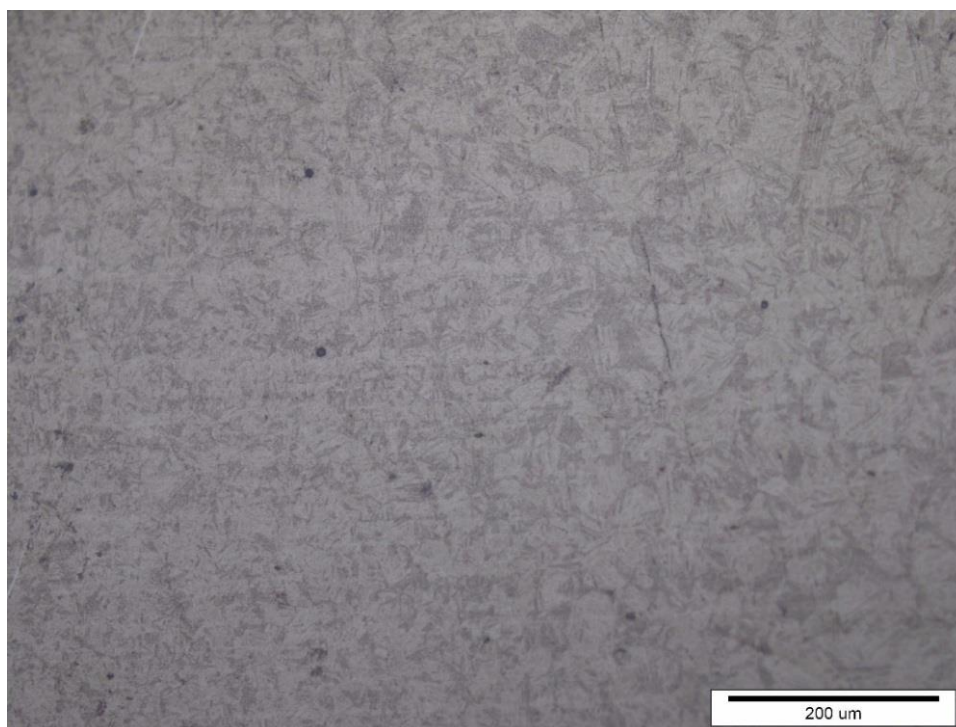
**Analiza strukture uzorka 2**

Makrostruktura zavora uzorka 2 prikazana je na slici 32.

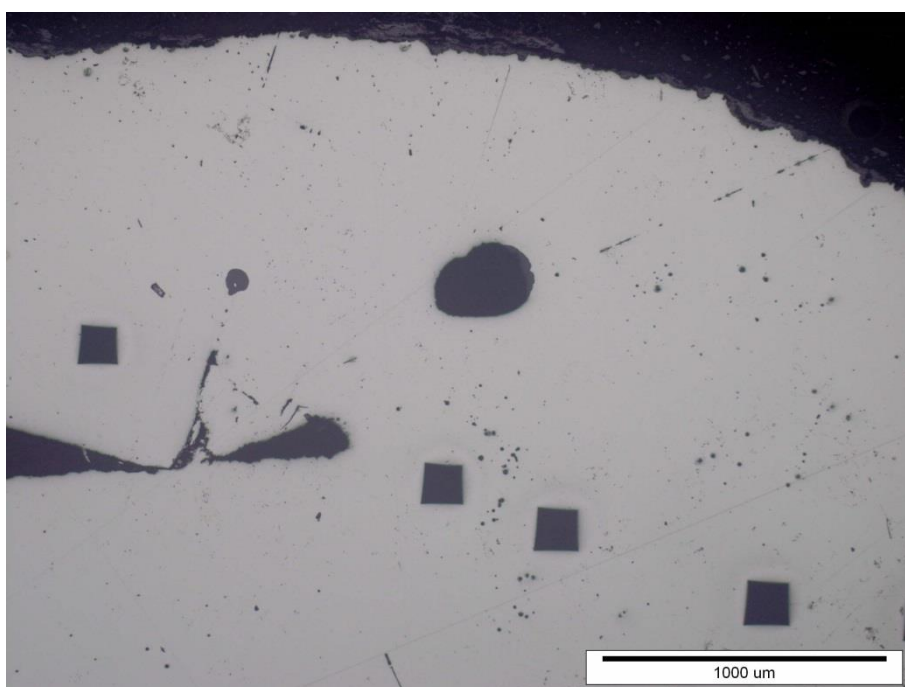


**Slika 32. Segment šasije FIREWALL uzorak 2: makrostruktura s mjestima analize mikrostrukture**

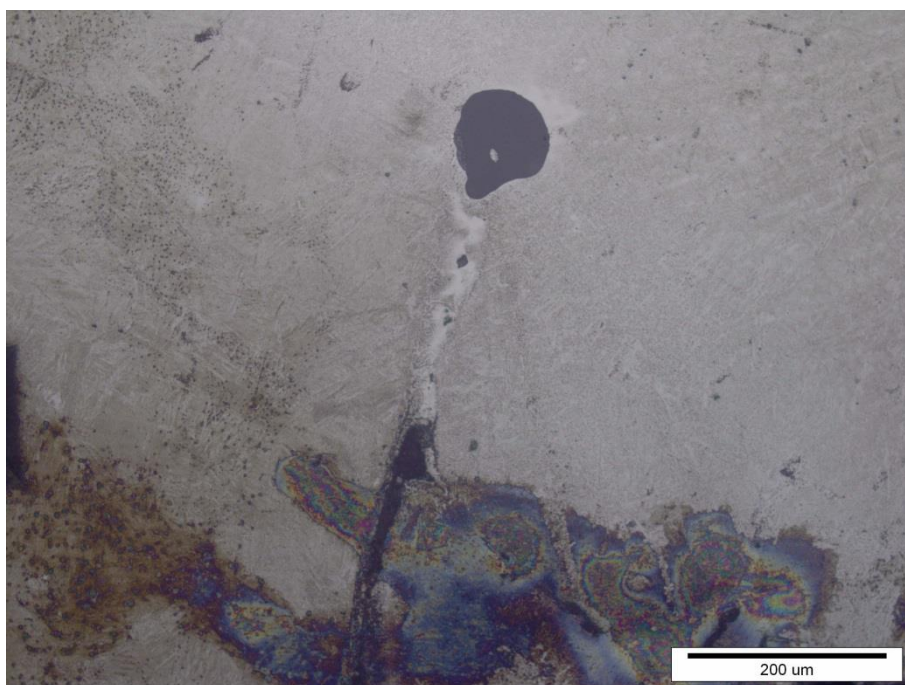
Karakteristične mikrostrukture uzorka na mjestima označenima na slici 32 (ZUT, zavar) prikazane su na slikama 33 – 35.



**Slika 33. Segment šasije FIREWALL uzorak 2: mikrostruktura na poziciji ZUT**



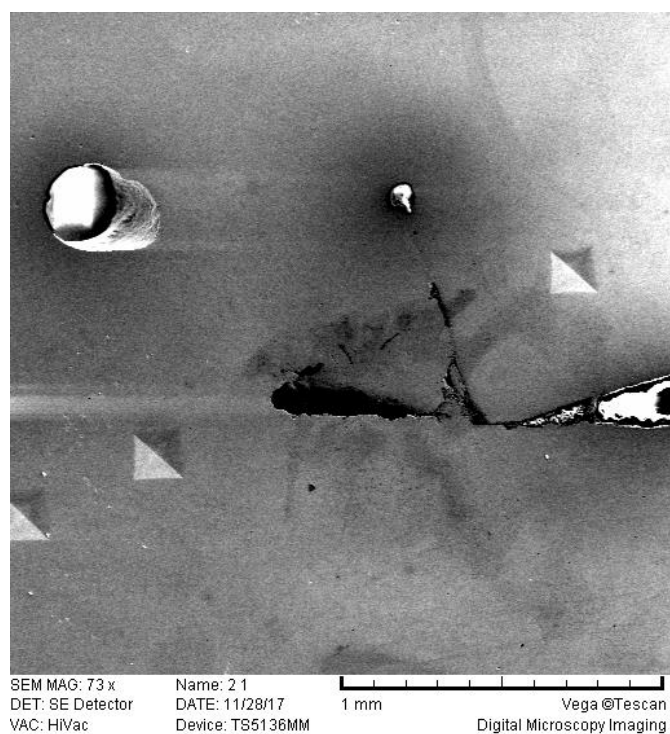
**Slika 34. Segment šasije FIREWALL uzorak 2: mikrostruktura na poziciji ZAVAR, neprotaljenost, porozitet**



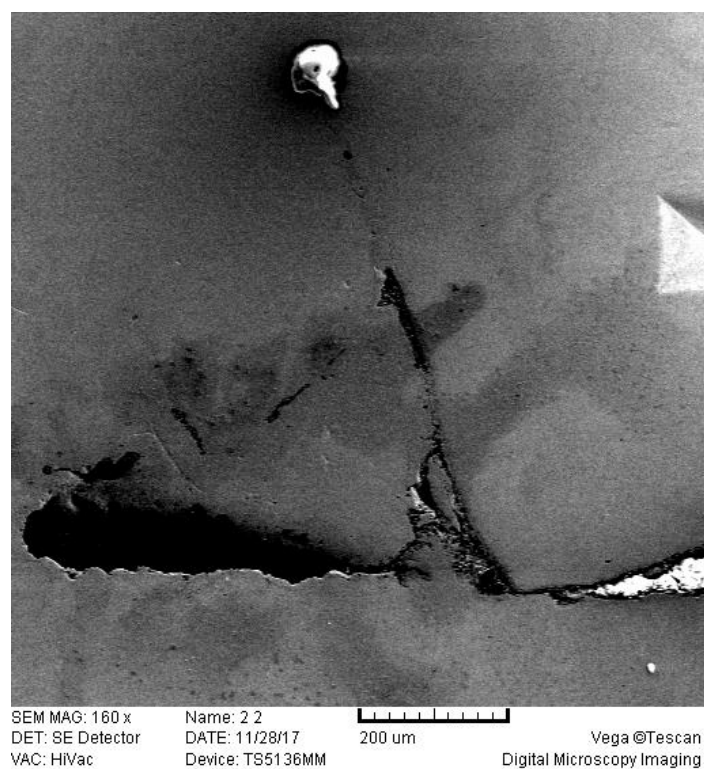
**Slika 35. Segment šasije FIREWALL uzorak 2: mikrostruktura na poziciji ZAVAR, veće povećanje neprotaljenost, porozitet**



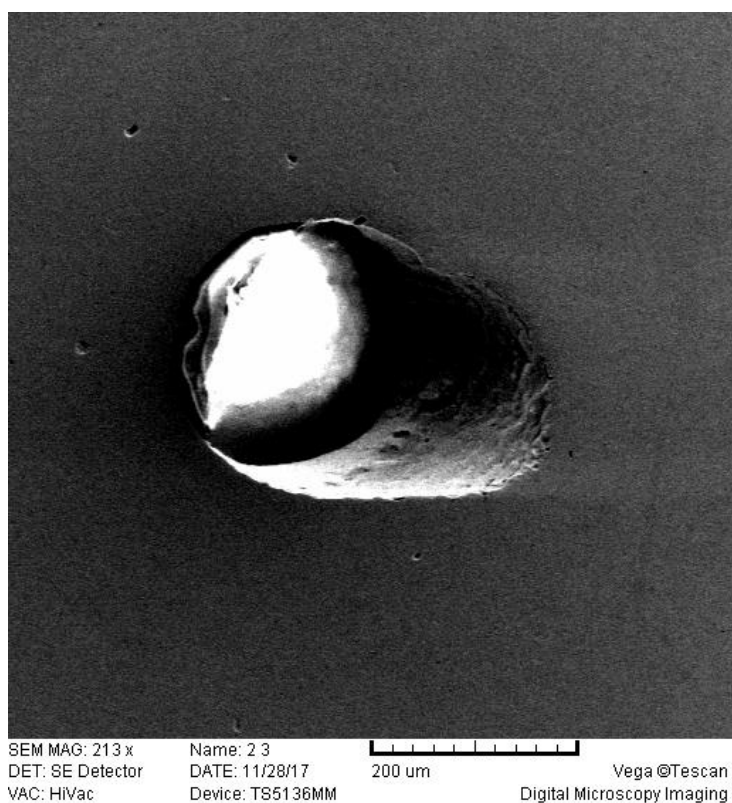
Detalji uzorka 2 na mjestu zavar analizirani pomoću skenirajućeg elektronskog mikroskopa prikazani su na slikama 36 - 38.



**Slika 36. Segment šasije FIREWALL uzorak 2: zavar, SEM, neprotaljenost, porozitet**

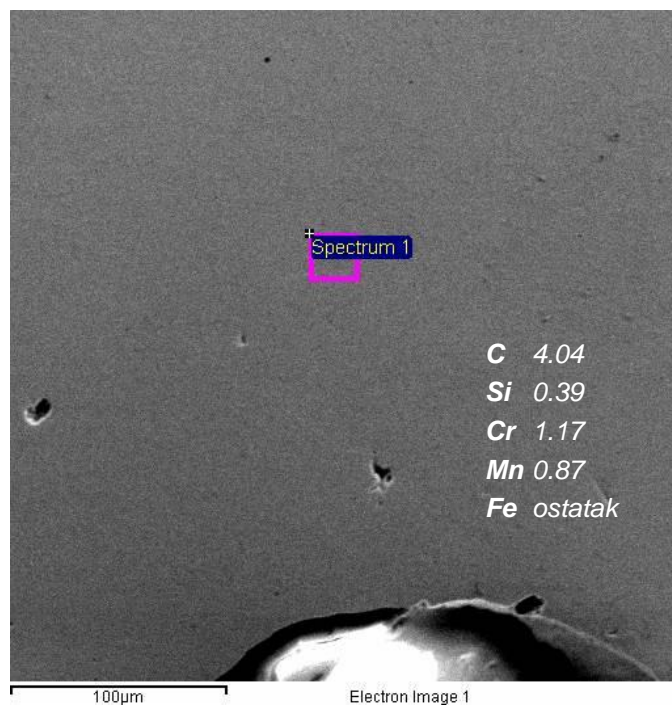


**Slika 37. Segment šasije FIREWALL uzorak 2: detalj zavar, SEM**



**Slika 38. Segment šasije FIREWALL uzorak 2: detalj s porozitetom, SEM, porozitet**

Na uzorku 2 napravljena je i EDS mikroanaliza kemijskog sastava materijala zavara. Pozicija EDS analize s dobivenim masenim udjelima pojedinih elemenata prikazana je na slici 39.



**Slika 39. Segment šasije FIREWALL uzorak 2: mjesto i rezultati EDS analize, materijal zavara**

### Mikrotvrdoća uzorka 2

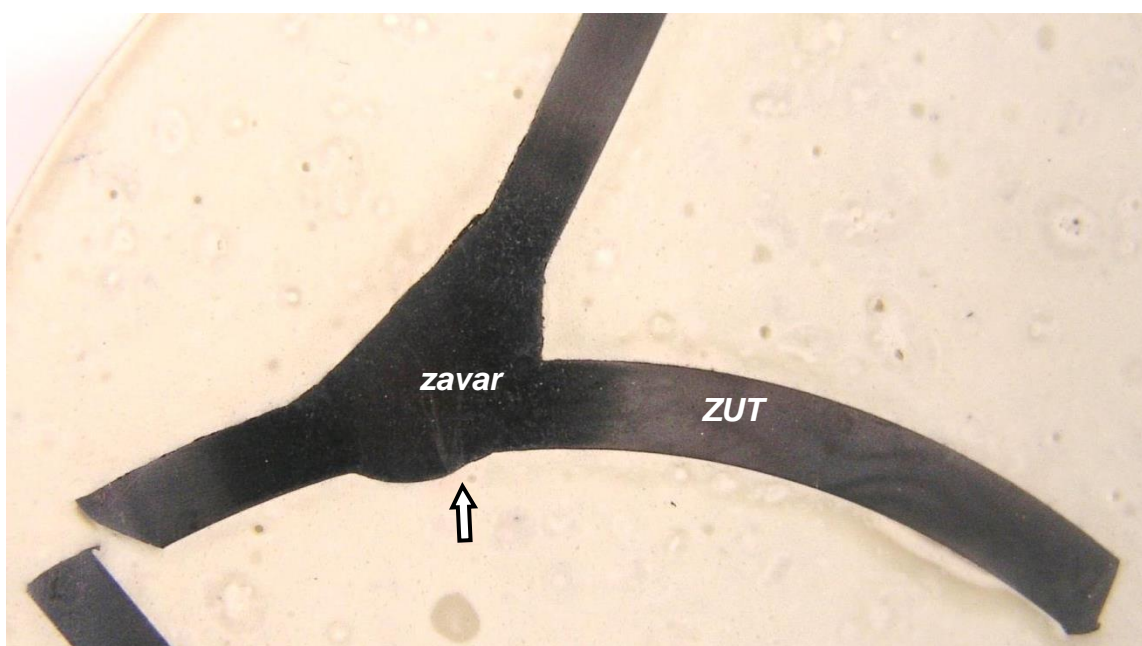
Mjerenja su napravljena u osnovnom materijalu, materijalu zavara te materijalu u ZUTu, tj na karakterističnim mjestima prikazanim na slici 32 Srednje vrijednosti pet mjerenja prikazane su u tablici 7.

**Tablica 7. Mikrotvrdoća uzorka 2 na karakterističnim mjestima**

MJESTO MJERENJA	HV0,2 SREDNJA VRIJEDNOST
ZUT	<b>279</b>
ZAVAR	<b>330</b>

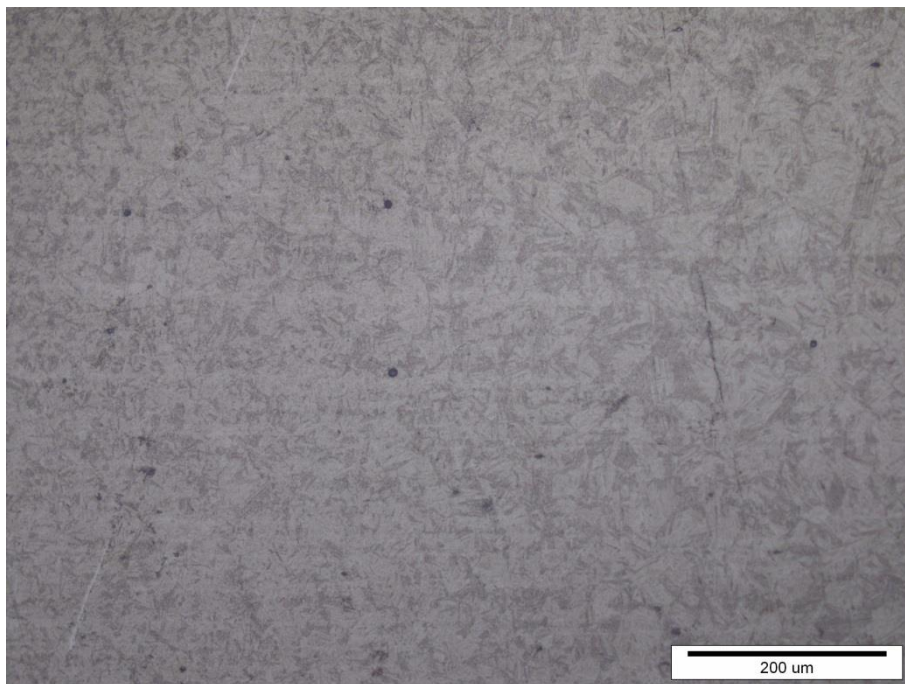
### Analiza mikrostrukture uzorka 3

Makrostruktura zavara uzorka 3 prikazana je na slici 40.

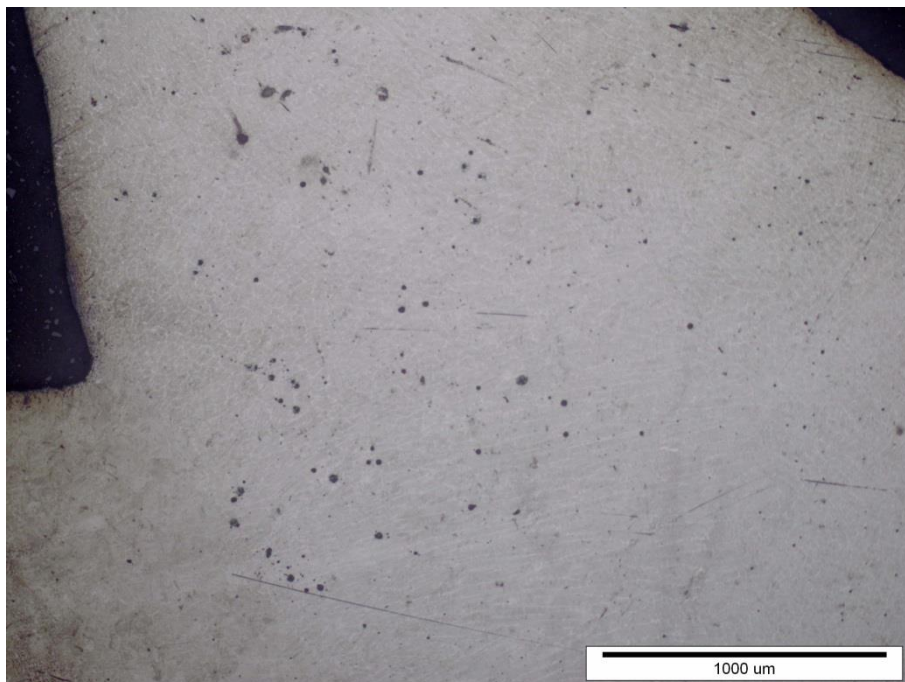


**Slika 40. Segment šasije FIREWALL uzorak 3: makrostruktura s mjestima analize mikrostrukture**

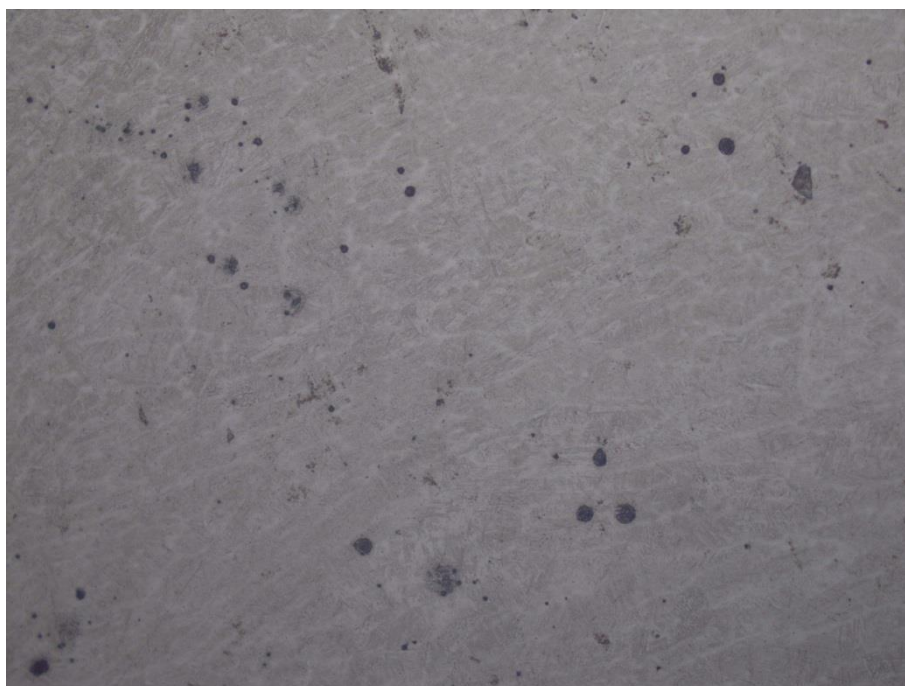
Karakteristične mikrostrukture uzorka na mjestima označenima na slici 40 (ZUT, zavar) prikazane su na slikama 41 – 43.



**Slika 41. Segment šasije FIREWALL uzorak 3: mikrostruktura na poziciji ZUT**

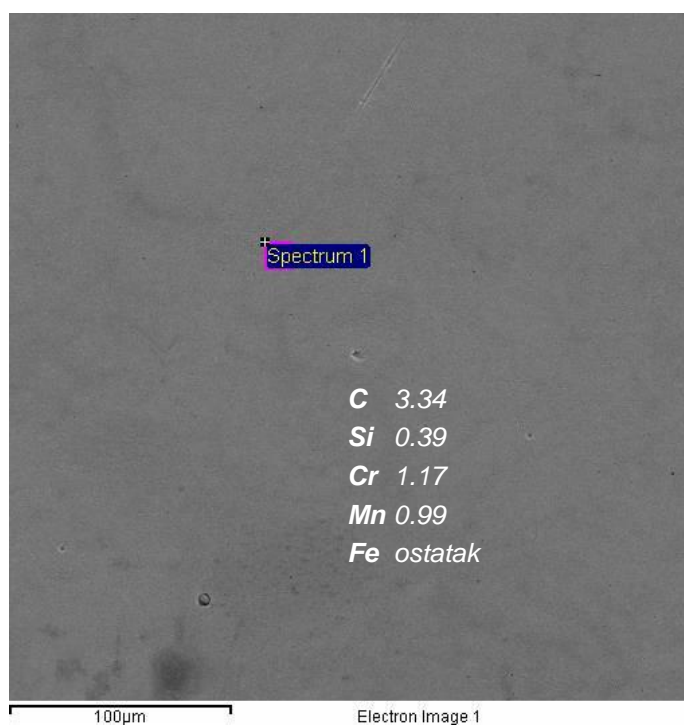


**Slika 42. Segment šasije FIREWALL uzorak 3: mikrostruktura na poziciji ZAVAR, porozite, uključine**



**Slika 43. Segment šasije FIREWALL uzorak 3: mikrostruktura na poziciji ZAVAR, veće povećanje**

Na uzorku 3 napravljena je i EDS mikroanaliza kemijskog sastava materijala zavara. Pozicija EDS analize s dobivenim masenim udjelima pojedinih elemenata prikazana je na slici 44.



**Slika 44. Segment šasije FIREWALL uzorak 3: mjesto i rezultati EDS analize, materijal zavara**

**Mikrotvrdoća uzorka 3**

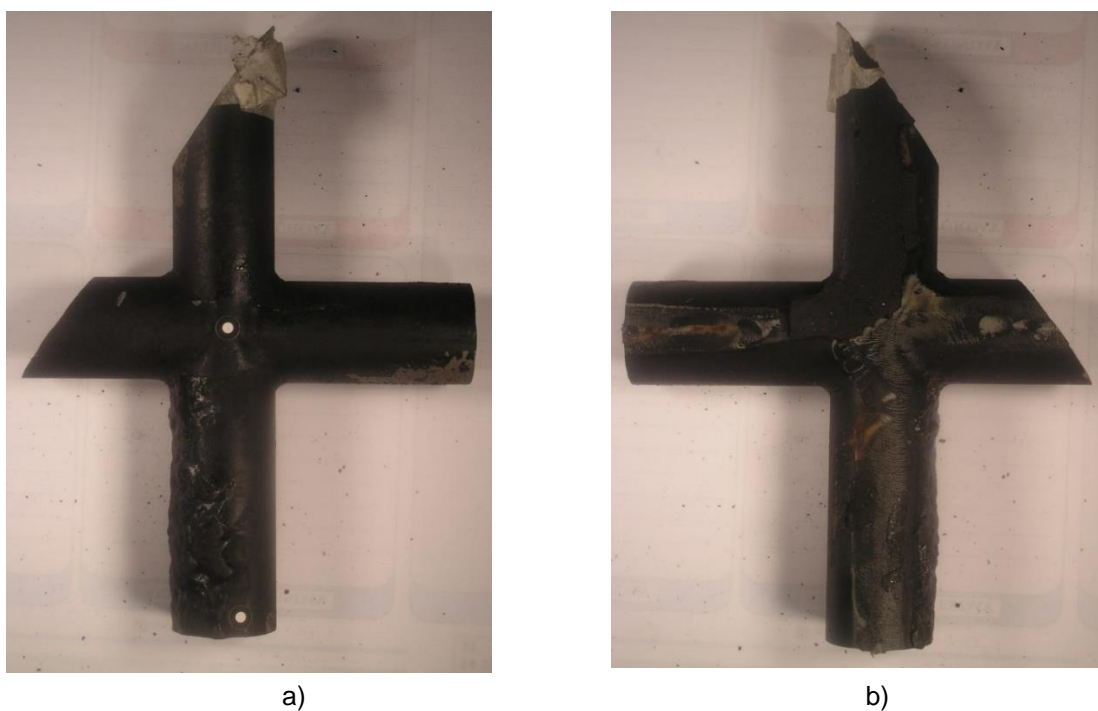
Mjerenja mikrotvrdoće uzorka 3 su napravljena u materijalu zavara i materijalu ZUTa, tj na karakterističnim mjestima prikazanima na slici 40. Srednje vrijednosti pet mjerenja prikazane su u tablici 8.

**Tablica 8. Mikrotvrdoća uzorka 3 na karakterističnim mjestima**

MJESTO MJERENJA	HV0,2 SREDNJA VRIJEDNOST
ZUT	<b>386</b>
ZAVAR	<b>284</b>

**3.2. Analiza segmenta šasije „PODNICA“**

Na slici 45 prikazan je segment šasije PODNICA u dostavnom stanju.



**Slika 45. Segment šasije PODNICA u dostavnom stanju, dvije strane**

**Endoskopska ispitivanja**

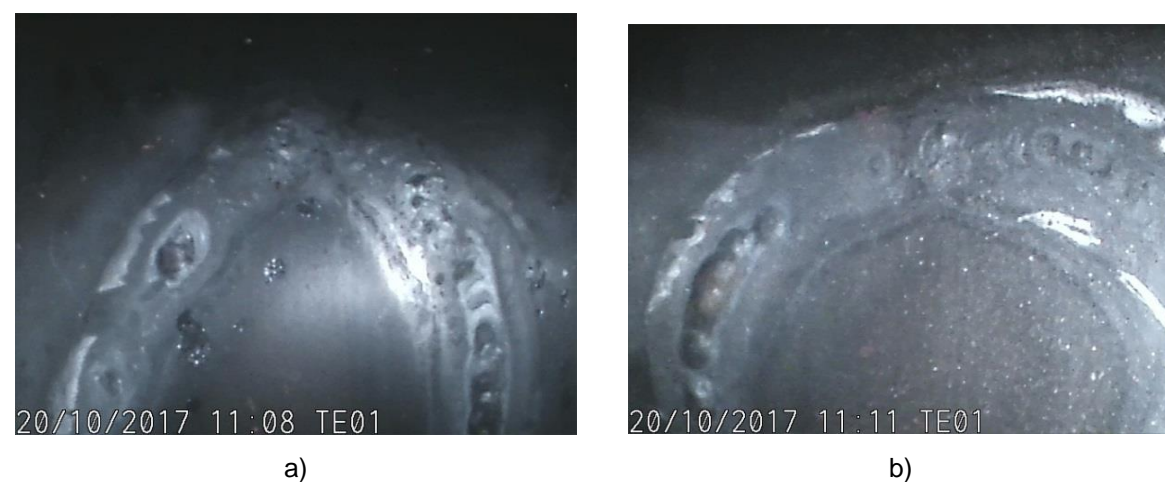
Snimke cijevi segmenta PODNICA s unutrašnje strane dobivene endoskopom su prikazane na slikama 46-48. Endoskopskom analizom unutarnje strane cijevi vidljiva je lokalizirana korozija, tj korozijski produkti. Na mjestima zavara, mjestimično je vidljivo progaranje osnovnog materijala kao posljedica prevelikog unosa topline.



**Slika 46. Segment šasije PODNICA: stanje unutrašnje površine cijevu, osnovni materijal**



**Slika 47. Segment šasije PODNICA: stanje unutrašnje površine cijevi, mjesto zavora**



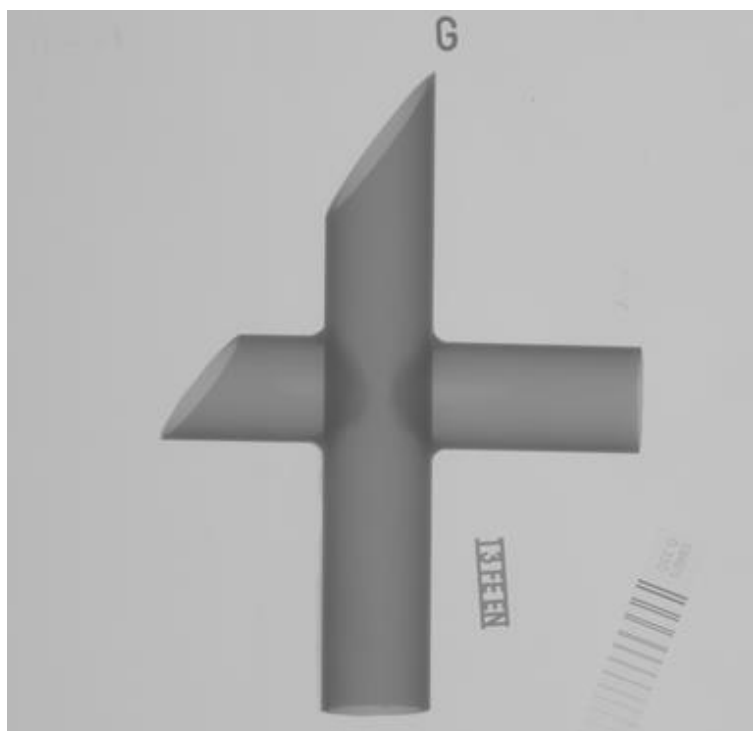
**Slika 48. Segment šasije PODNICA: stanje unutrašnje površine cijevu, detalji zavora**

**Radiografska analiza**

Na slici 49 prikazan je segment šasije PODNICA u poziciji za radiografsku analizu, a na slici 50 dobiveni radiogram. Analizom radiograma nisu uočene pukotine u materijalu zavara niti osnovnom materijalu. Zbog male debljine stijenke cijevi i malog lokalnog zavara nisu uočljive druge promjene.



**Slika 49. Segment šasije PODNICA pripremljen za radiografsku analizu**

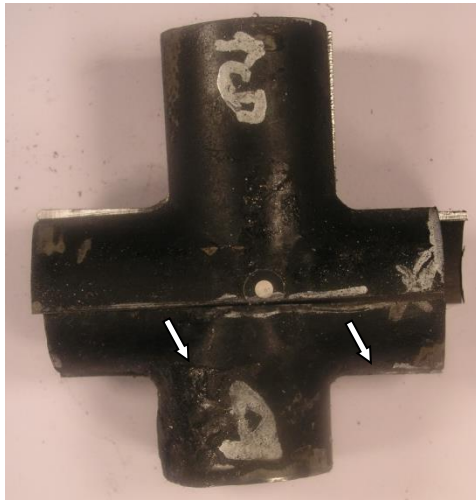


**Slika 50. Segment šasije PODNICA: radiogram**

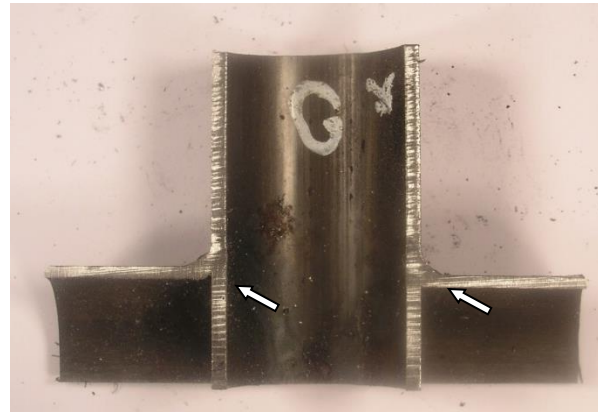


**Analiza strukture**

Za potrebe analize strukture materijala segment šasije PODNICA je izrezan pod intenzivnim ohlađivanjem i podmazivanjem. Izrezani dijelovi prikazani su na slici 51.



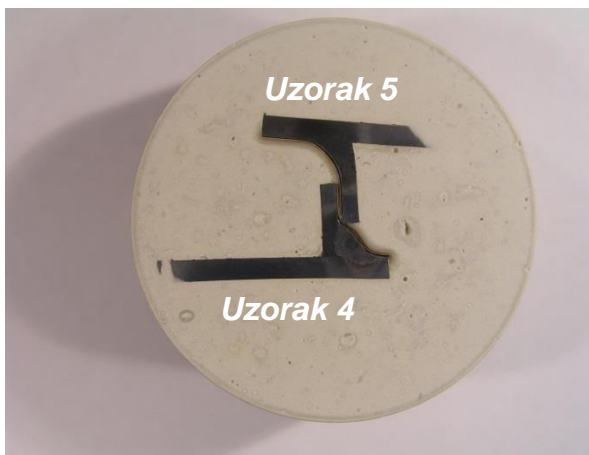
a)



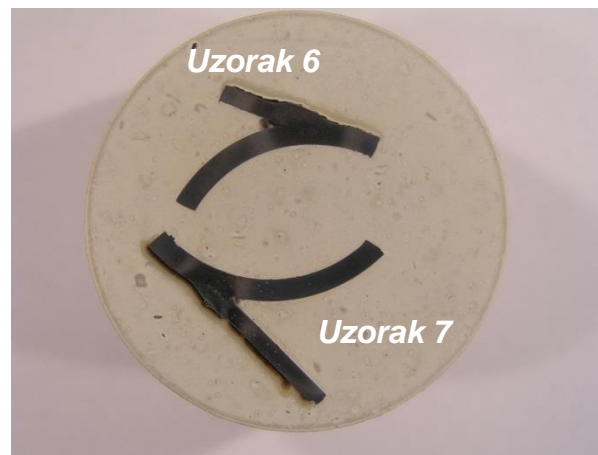
b)

**Slika 51. Segment šasije PODNICA: dijelovi nakon rezanja, dvije strane**

Iz dostavljenog dijela Segment šasije PODNICA izrezana su četiri uzorka za analizu makro i mikrostrukture na mjestima označenim sa strelicama na slici 51. Ti uzorci pripremljeni za metalografske analize prikazani su na slici 52.



a)

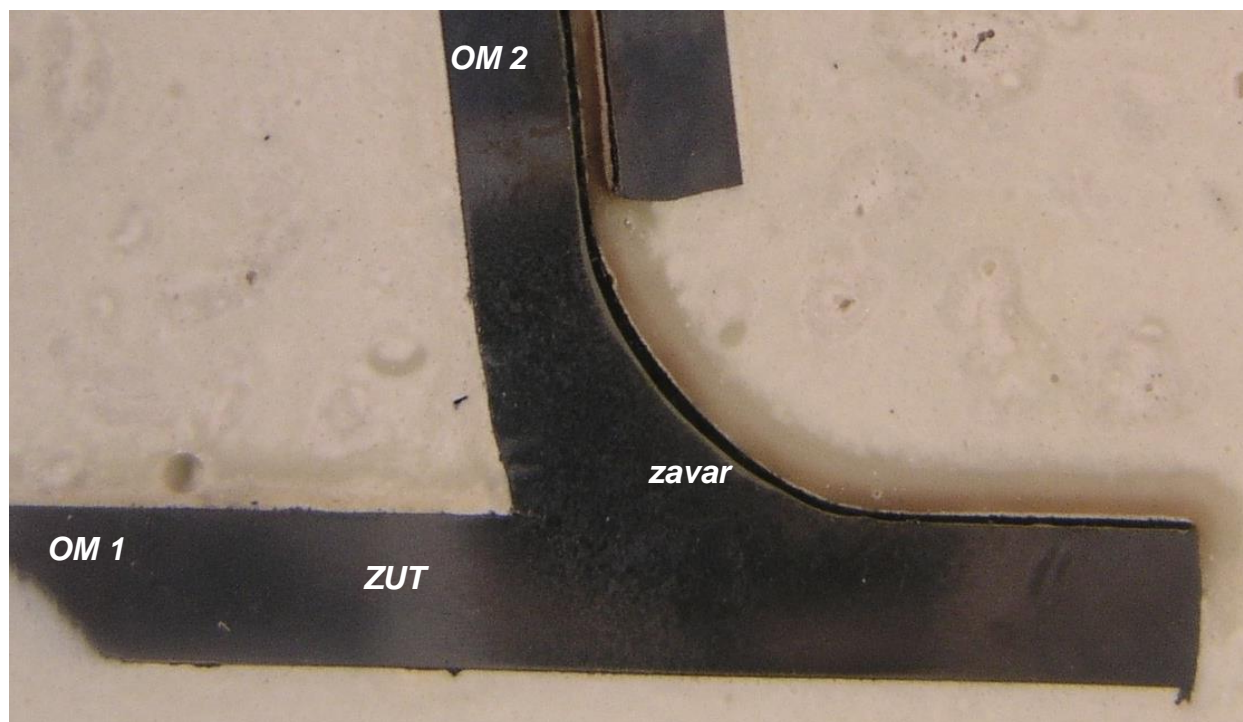


b)

**Slika 52. Segment šasije PODNICA: uzorci pripremljeni za metalografsku analizu**

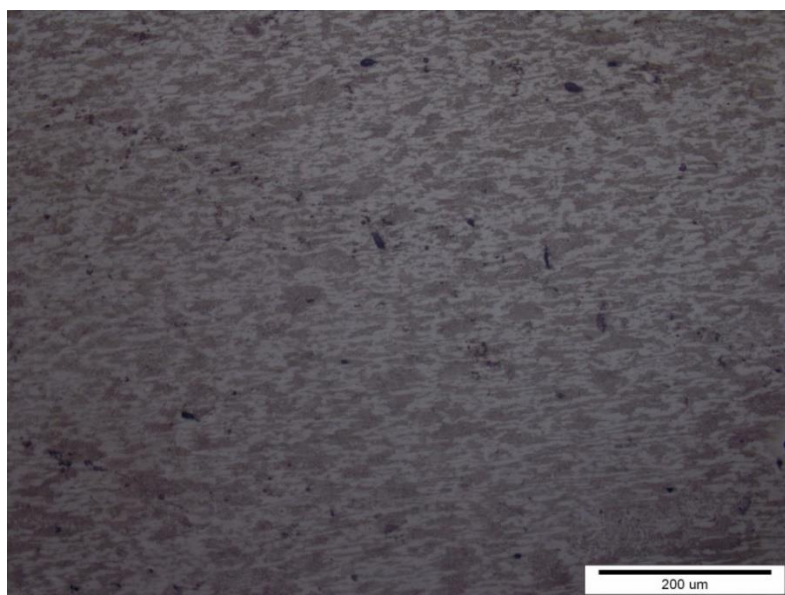
**Analiza strukture uzorka 4**

Makrostruktura zavora uzorka 4 prikazana je na slici 53.

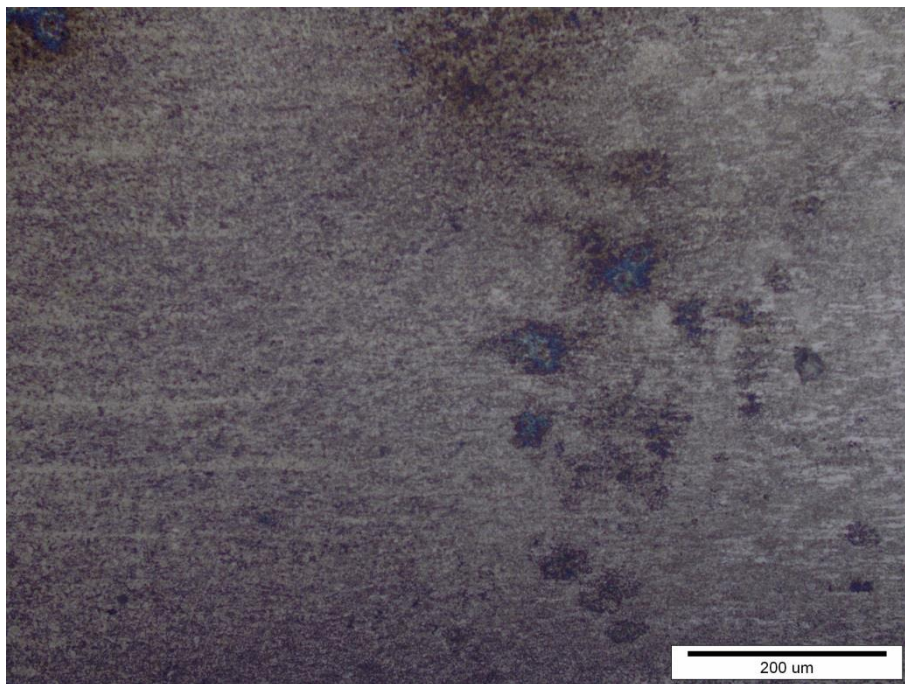


**Slika 53. Segment šasijske PODNICA uzorak 4: makrostruktura s mjestima analize mikrostrukture**

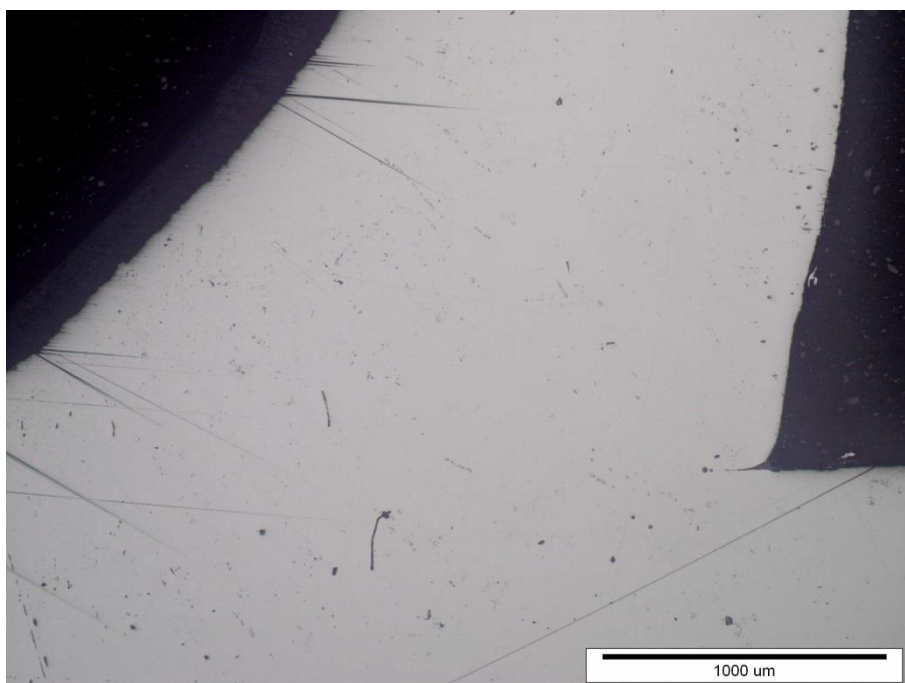
Karakteristične mikrostrukture uzorka na mjestima označenima na slici 53 (OM 1, ZUT, zavar, OM2) prikazane su na slikama 54 - 59.



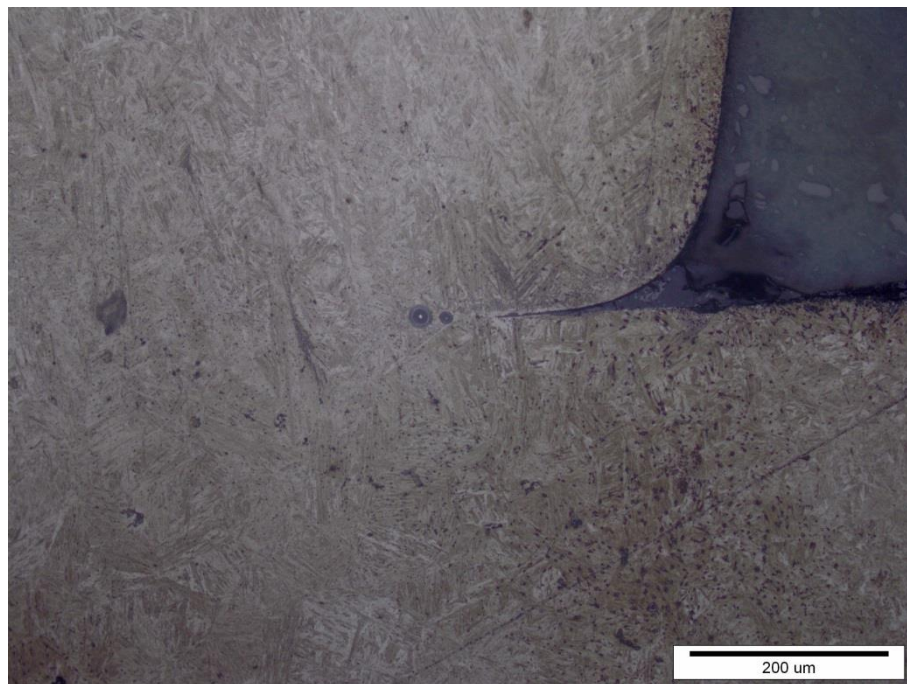
**Slika 54. Segment šasijske PODNICA uzorak 4: mikrostruktura osnovnog materijala na poziciji OM1, usmjerena feritno-perlitna mikrostruktura**



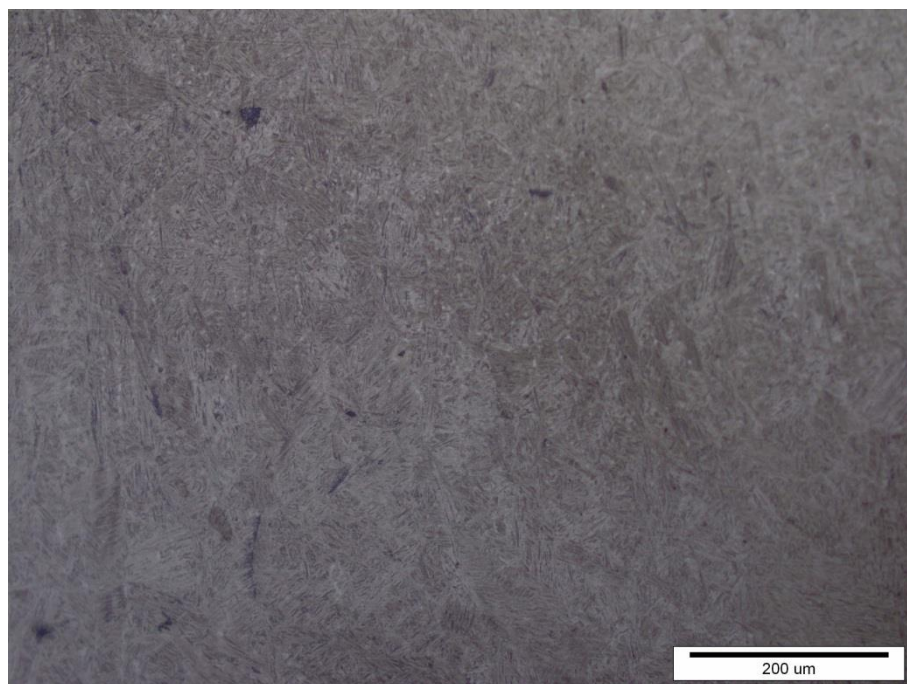
**Slika 55. Segment šasije PODNICA uzorak 4: mikrostruktura na poziciji ZUT, transformirana mikrostruktura**



**Slika 56. Segment šasije PODNICA uzorak 4: pozicija ZAVAR**



**Slika 57. Segment šasije PODNICA uzorak 4: mikrostruktura na poziciji ZAVAR, detalj, neprotaljenost**

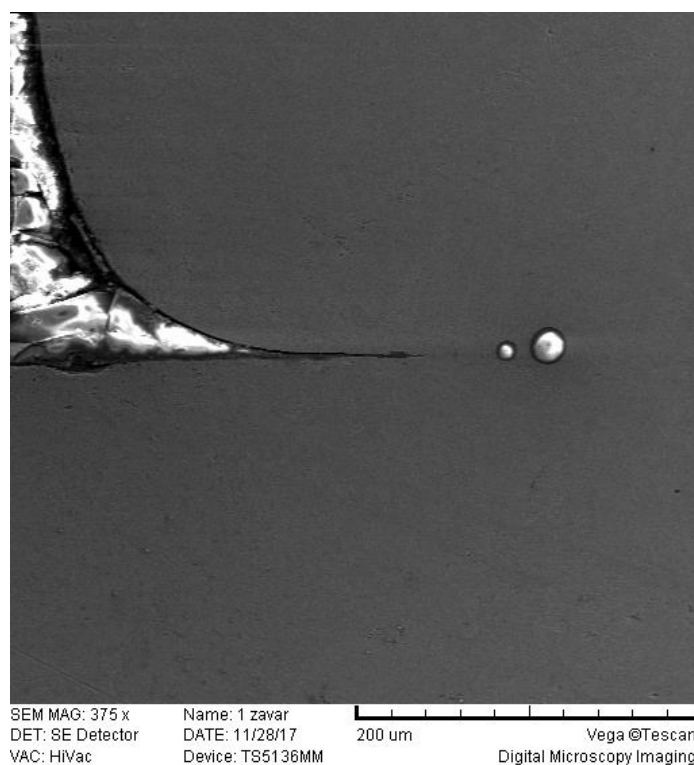


**Slika 58. Segment šasije PODNICA uzorak 4: mikrostruktura na poziciji ZAVAR, gruborznata dendritna mikrostruktura**

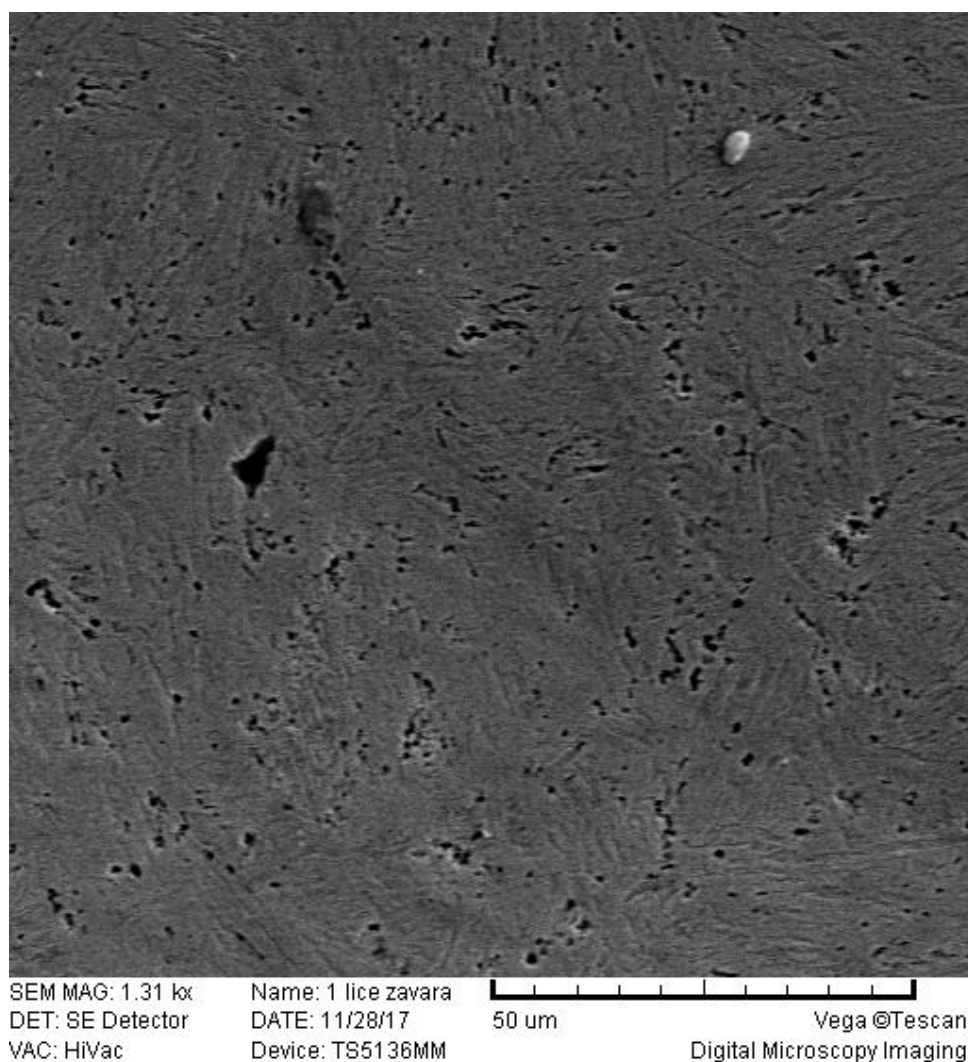


**Slika 59. Segment šasijske PODNICA uzorak 4: mikrostruktura osnovnog materijala na poziciji OM2**

Uzorak 4 na mjestu zavora analiziran pomoću skenirajućeg elektronskog mikroskopa prikazan je na slikama 60 i 61.



**Slika 60. Segment šasijske PODNICA uzorak 4: nerastaljeni materijal, porozitet, SEM**

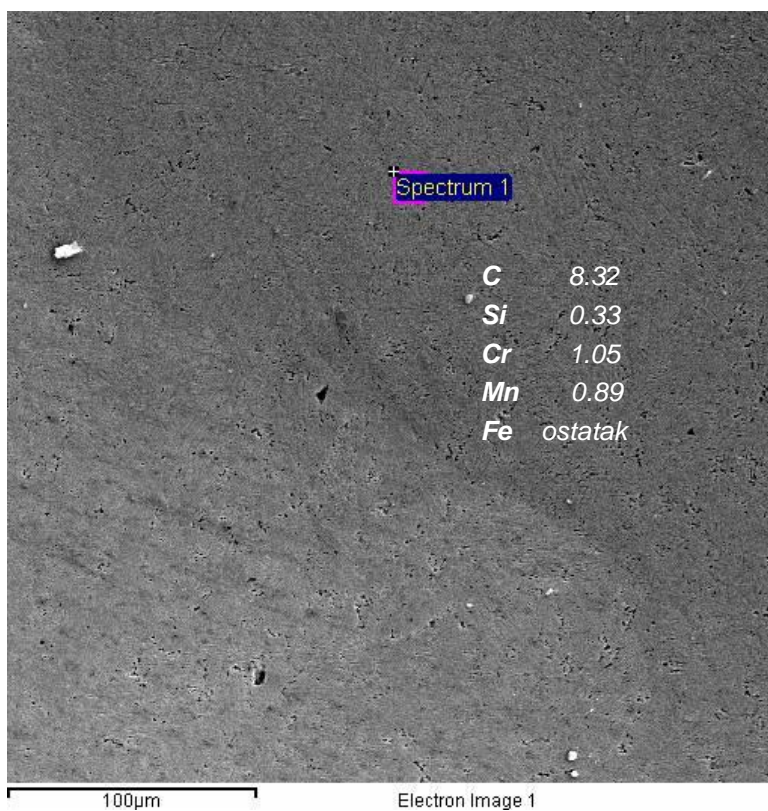


**Slika 61. Segment šasijske PODNICA uzorak 4: mikrostruktura ispod površine zavara, SEM, sitan porozitet**

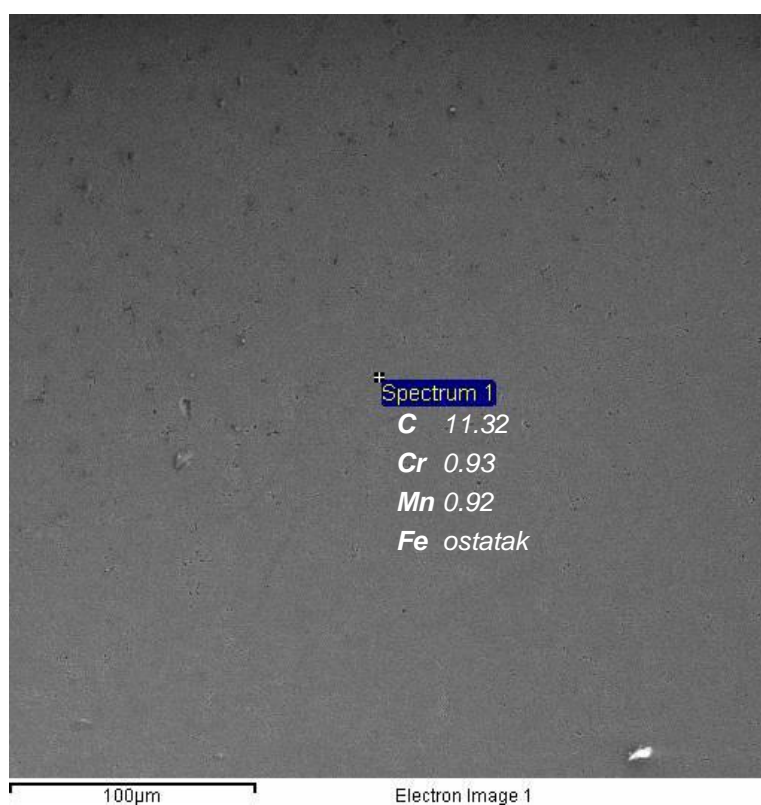
Na uzorku 4 na karakterističnim mjestima označenima na slici 53 napravljena je i EDS mikroanaliza kemijskog sastava. Pozicije EDS analize uzorka 4 s dobivenim masenim udjelima pojedinih elemenata prikazani su na slikama 62-64.



Slika 62. Segment šasije PODNICA uzorak 4: mjesto i rezultati EDS analize, OM1



Slika 63. Segment šasije PODNICA uzorak 4: mjesto i rezultati EDS analize, zavar



Slika 64. Segment šasije PODNICA uzorak 4: mjesto i rezultati EDS analize, OM 2

#### Mikrotvrdoća uzorka 4

Mjerenja su napravljena u osnovnom materijalu, materijalu zavara te materijalu u ZUTu, tj na karakterističnim mjestima prikazanima na slici 53. Srednje vrijednosti pet mjerenja prikazane su u tablici 9.

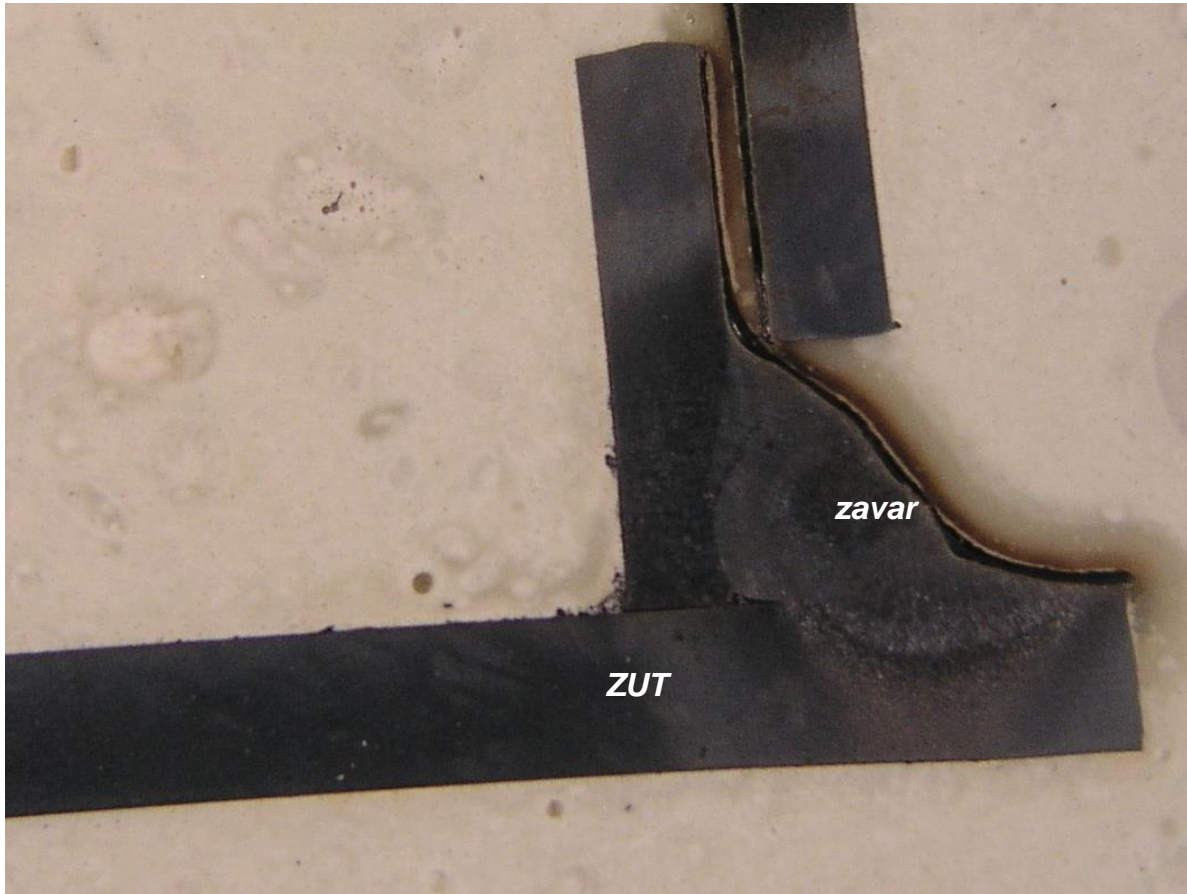
Tablica 9. Mikrotvrdoća uzorka 4 na karakterističnim mjestima

MJESTO MJERENJA	HV 0,2 SREDNJA VRIJEDNOST
OM 1	<b>208</b>
ZUT	<b>375</b>
ZAVAR	<b>423</b>
OM 2	<b>252</b>



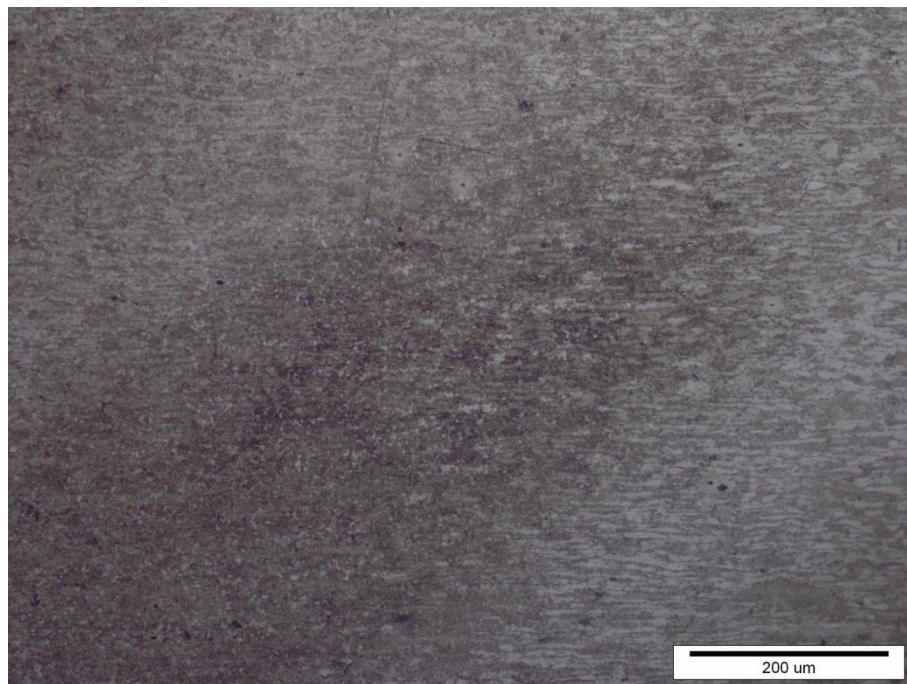
**Analiza strukture uzorka 5**

Makrostruktura zavora uzorka 5 prikazana je na slici 65.

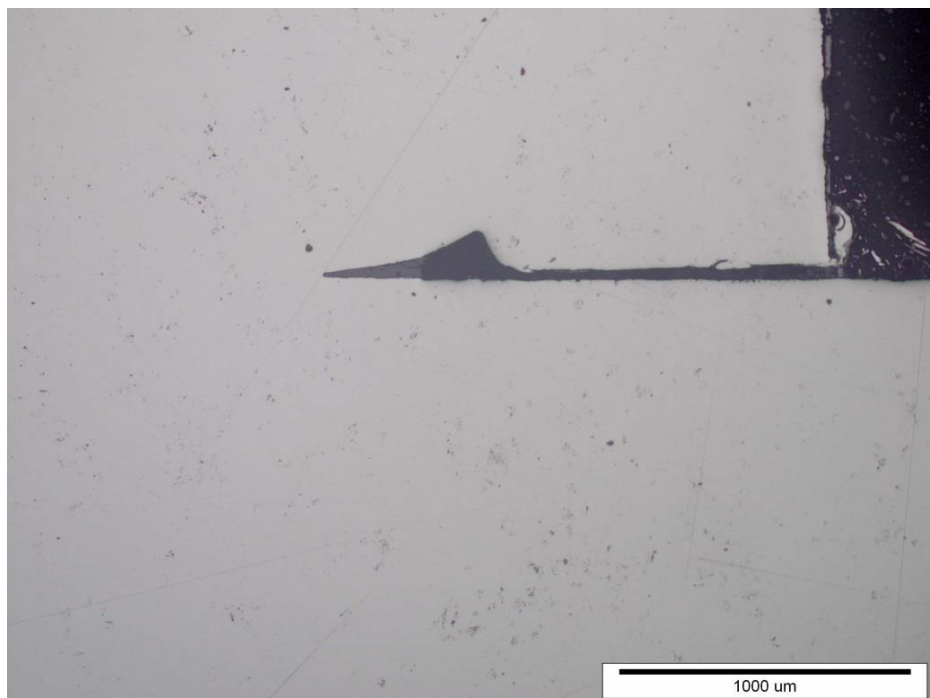


**Slika 65. Segment šasijske PODNICE uzorak 5: makrostruktura s mjestima analize mikrostrukture**

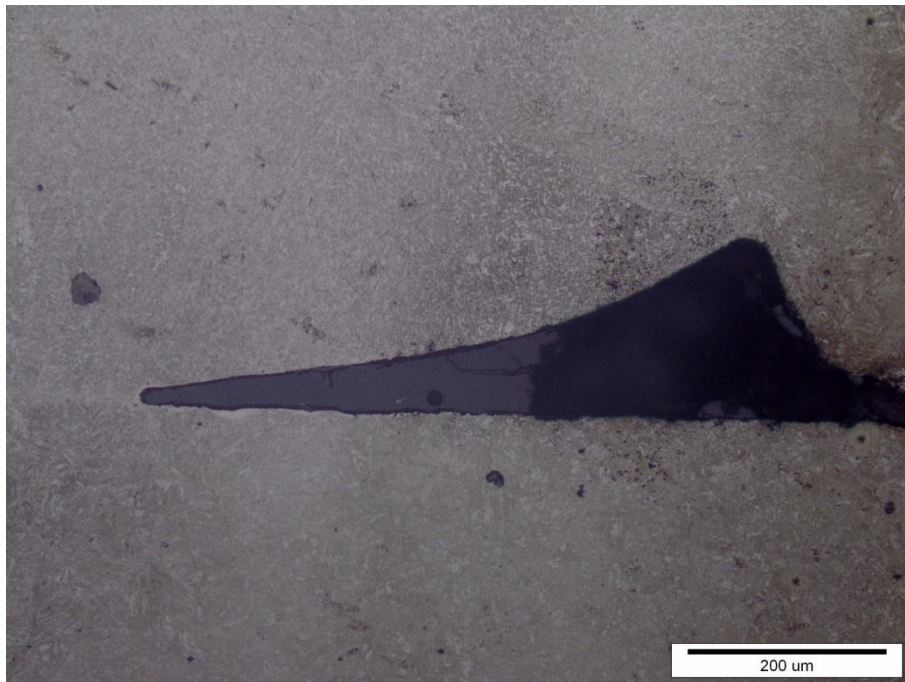
Karakteristične mikrostrukture uzorka na mjestima označenima na slici 65 (ZUT, zavar) prikazane su na slikama 66-69.



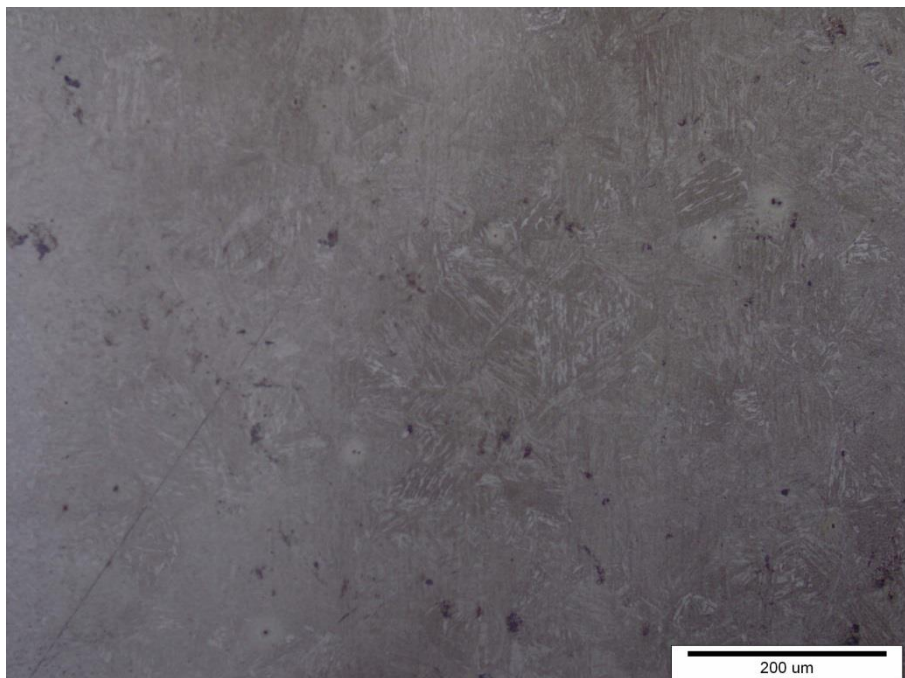
**Slika 66. Segment šasije PODNICA uzorak 5: mikrostruktura na poziciji ZUT**



**Slika 67. Segment šasije PODNICA uzorak 5: mikrostruktura na poziciji ZAVAR, neprotaljenost**



**Slika 68. Segment šasije PODNICA uzorak 5: mikrostruktura na poziciji ZAVAR, detalj**

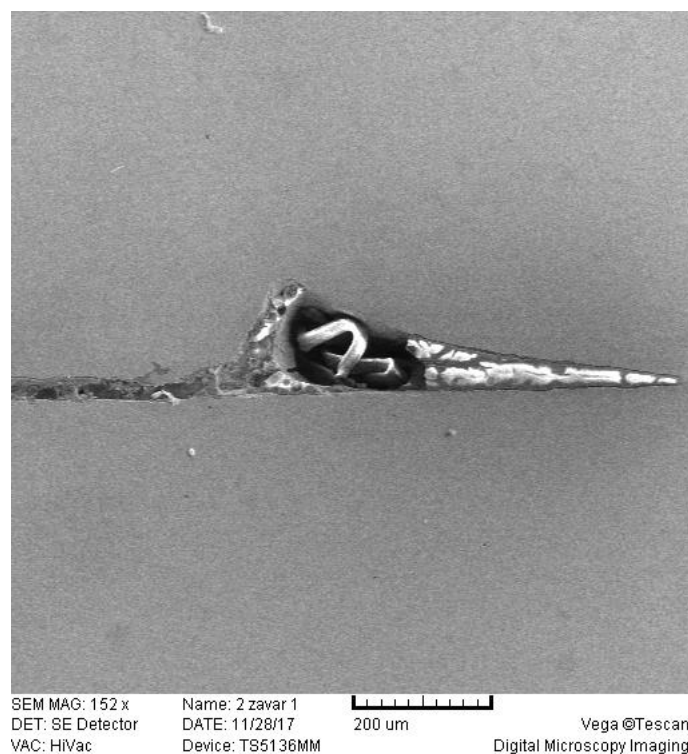


**Slika 69. Segment šasije PODNICA uzorak 5: mikrostruktura materijala ZAVAR**

Detalji uzorka 5 na mjestu zavora analizirani pomoću skenirajućeg elektronskog mikroskopa prikazani su na slikama 70 i 71.

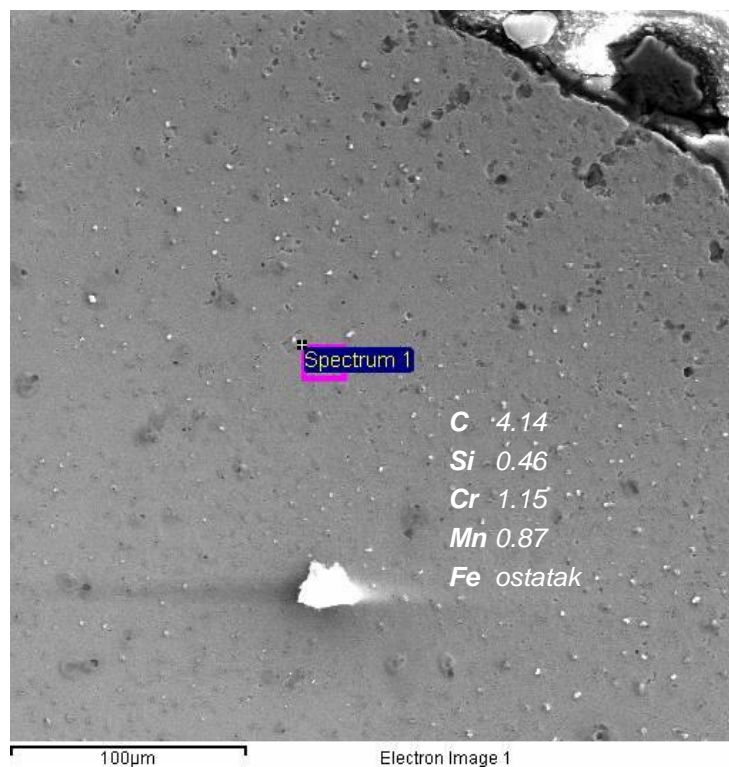


**Slika 70. Segment šasijske PODNICA uzorak 5: zavar, SEM, neprotaljenost**



**Slika 71. Segment šasijske PODNICA uzorak 5: detalj zavora, SEM**

Na uzorku 5 napravljena je i EDS mikroanaliza kemijskog sastava materijala zavara. Pozicija EDS analize s dobivenim masenim udjelima pojedinih elemenata prikazana je na slici 72.



**Slika 72. Segment šasije PODNICA uzorak 5: mjesto i rezultati EDS analize, materijal zavara**

### **Mikrotvrdoća uzorka 5**

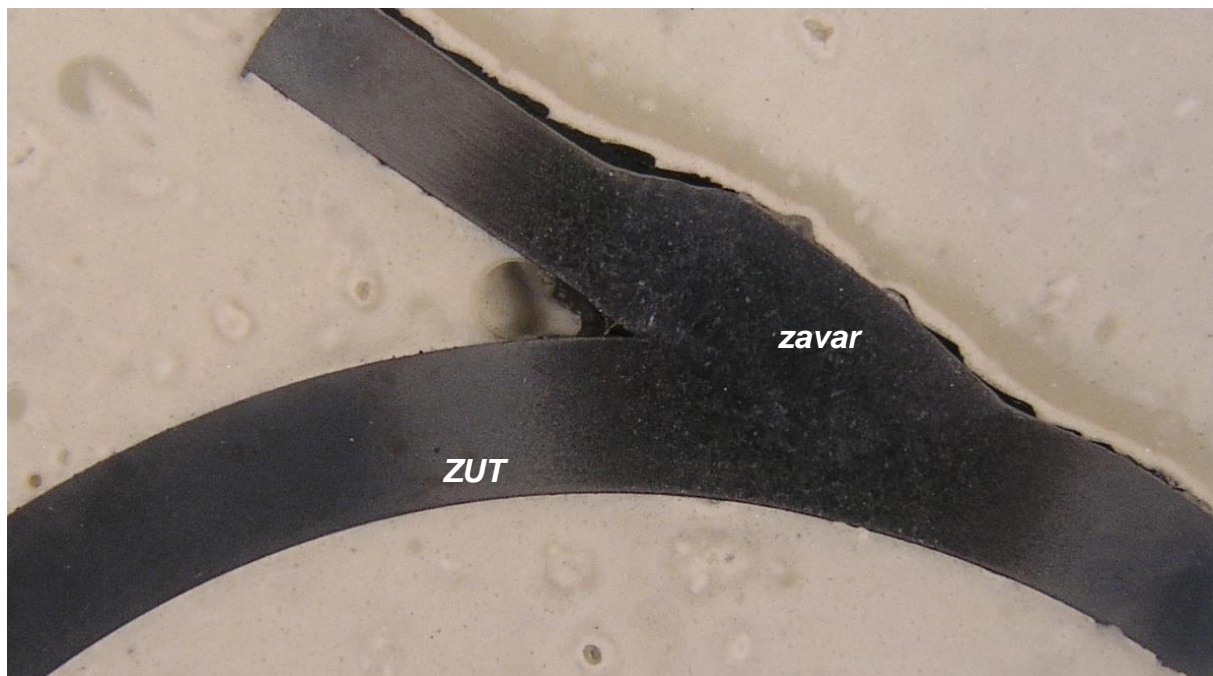
Mjerenja mikrotvrdoće su napravljena u materijalu zavara te materijalu ZUTa. Srednje vrijednosti pet mjerenja prikazane su u tablici 10.

**Tablica 10. Mikrotvrdoća uzorka 5 na karakterističnim mjestima**

MJESTO MJERENJA	HV0,2 SREDNJA VRIJEDNOST
ZUT	<b>303</b>
ZAVAR	<b>315</b>

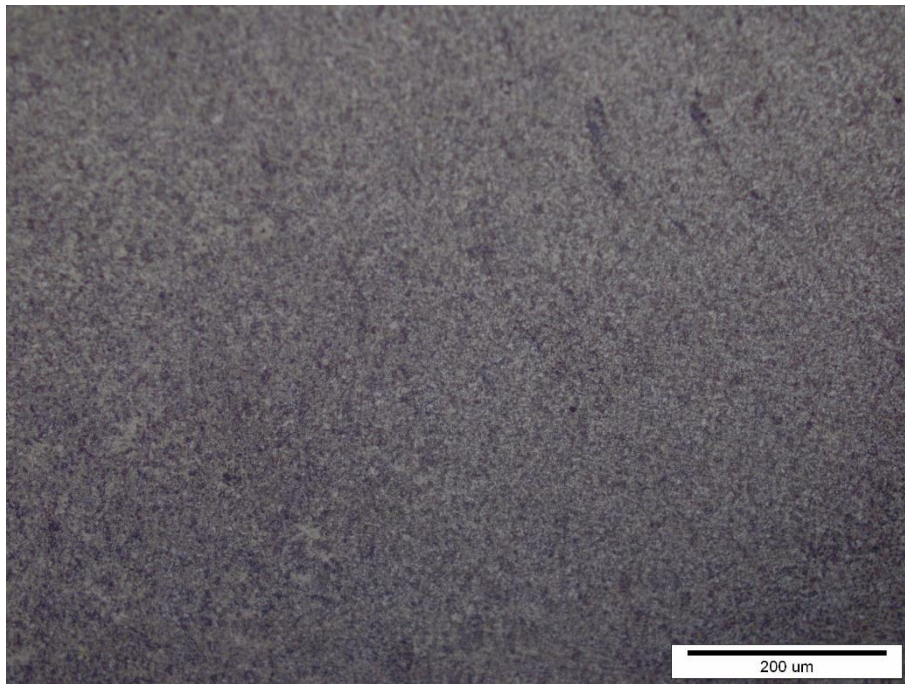
**Analiza strukture uzorka 6**

Makrostruktura zavora uzorka 6 prikazana je na slici 73.

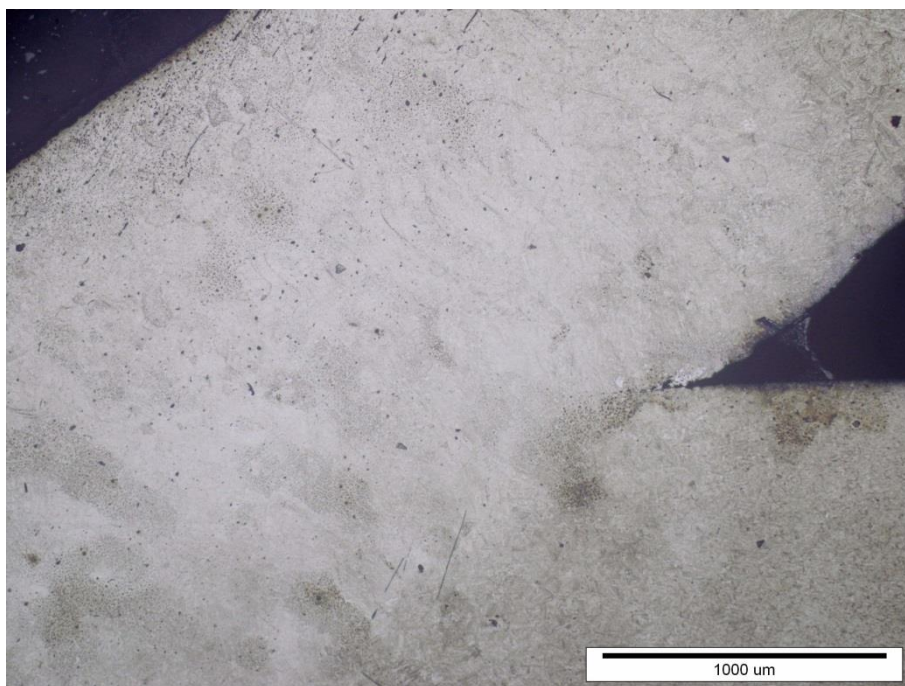


**Slika 73. Segment šasije PODNICA uzorak 6: makrostruktura s označenim mjestima analize mikrostrukture**

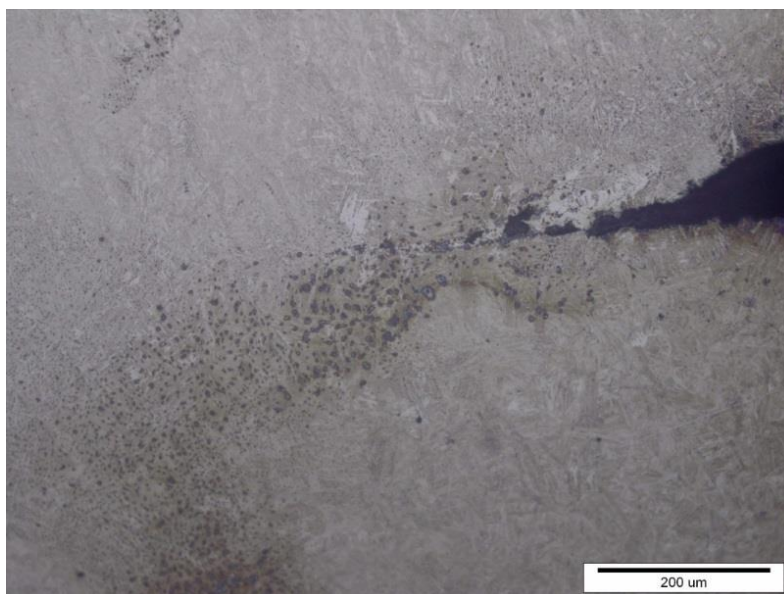
Karakteristične mikrostrukture uzorka na mjestima označenima na slici 73 (ZUT, zavar) prikazane su na slikama 74-76.



**Slika 74. Segment šasije PODNICA uzorak 6: mikrostruktura na poziciji ZUT**

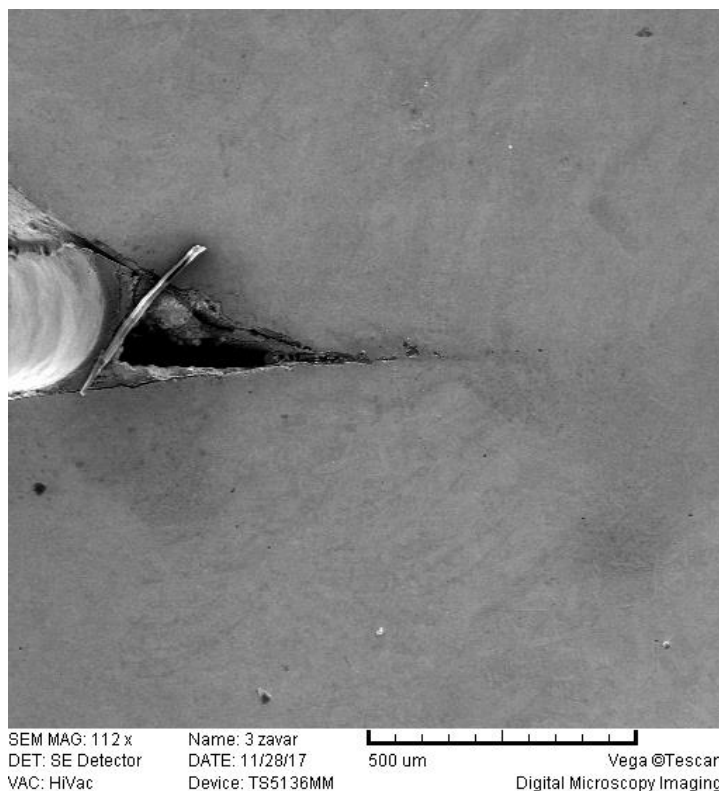


**Slika 75. Segment šasije PODNICA uzorak 6: mikrostruktura na poziciji ZAVAR**



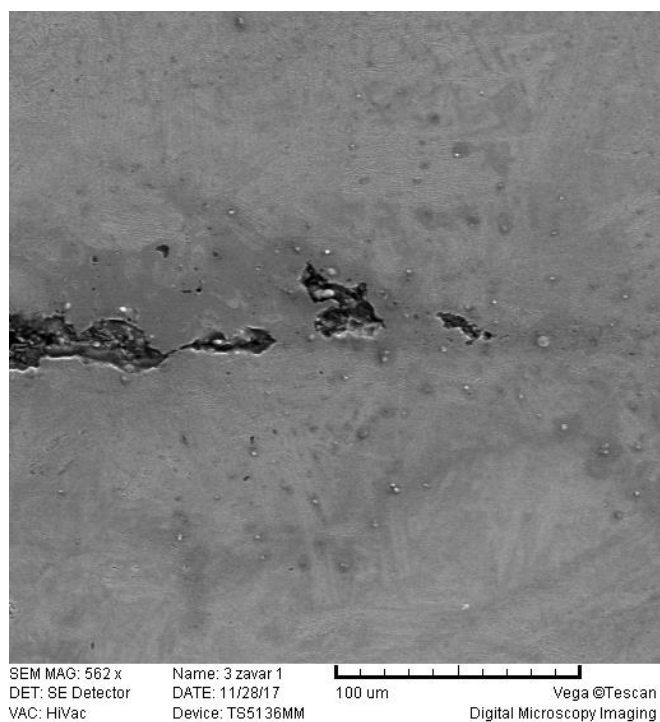
**Slika 76. Segment šasije PODNICA uzorak 6: mikrostruktura na poziciji ZAVAR, detalj**

Detalji uzorka 6 na mjestu zavara analizirani pomoću skenirajućeg elektronskog mikroskopa prikazani su na slikama 77-79.

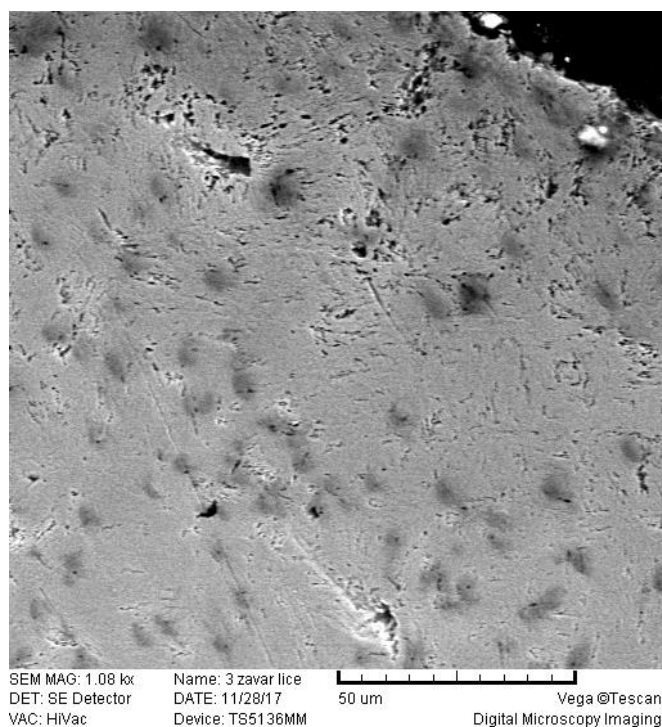


**Slika 77. Segment šasije PODNICA uzorak 6: zavar, SEM, neprotaljenost**



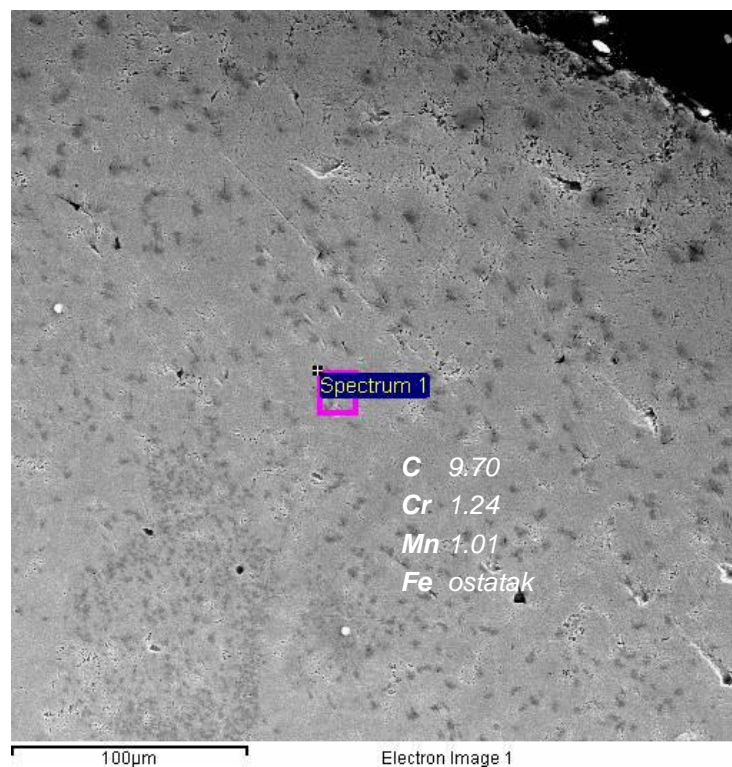


**Slika 78. Segment šasije PODNICA uzorak 6: zavar, detalj, SEM**



**Slika 79. Segment šasije PODNICA uzorak 6: zavar, detalj ispod lica zavara, SEM, sitan porozitet**

Na uzorku 6 napravljena je i EDS mikroanaliza kemijskog sastava materijala zavara. Pozicija EDS analize s dobivenim masenim udjelima pojedinih elemenata prikazana je na slici 80.



**Slika 80. Segment šasije PODNICA uzorak 6: mjesto i rezultati EDS analize, materijal zavara**

### **Mikrotvrdoća uzorka 6**

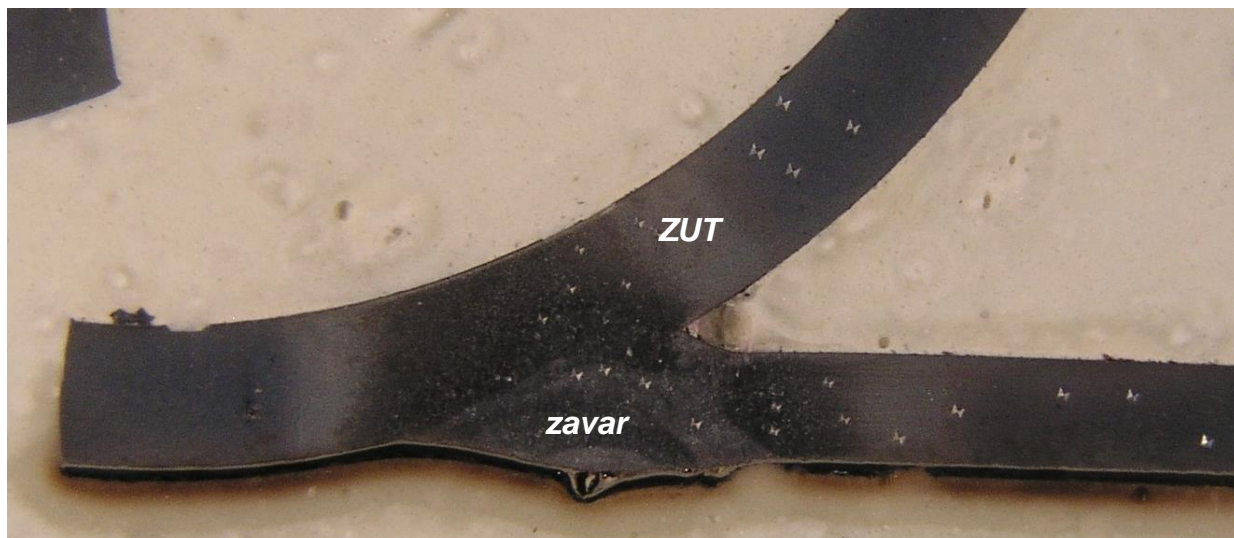
Mjerenja su napravljena u materijalu zavara i materijalu ZUTa. Srednje vrijednosti pet mjerenja prikazane su u tablici 11.

**Tablica 11. Mikrotvrdoća uzorka 6 na karakterističnim mjestima**

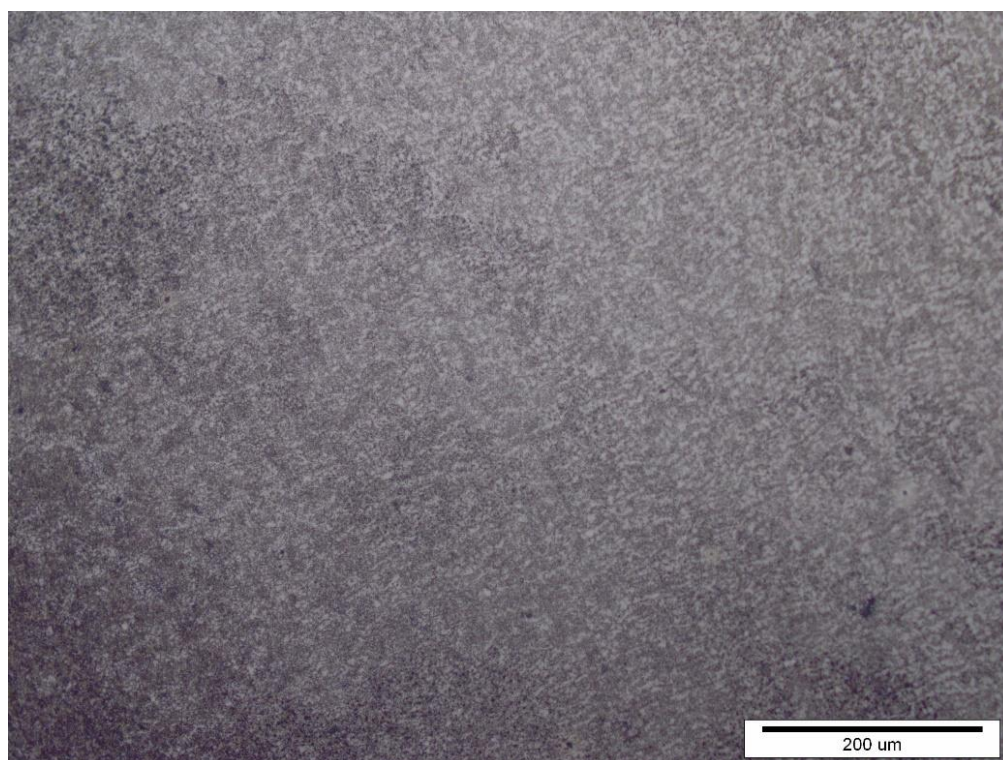
MJESTO MJERENJA	HV <sub>0,2</sub> SREDNJA VRIJEDNOST
ZUT	<b>330</b>
ZAVAR	<b>379</b>

**Analiza strukture uzorka 7**

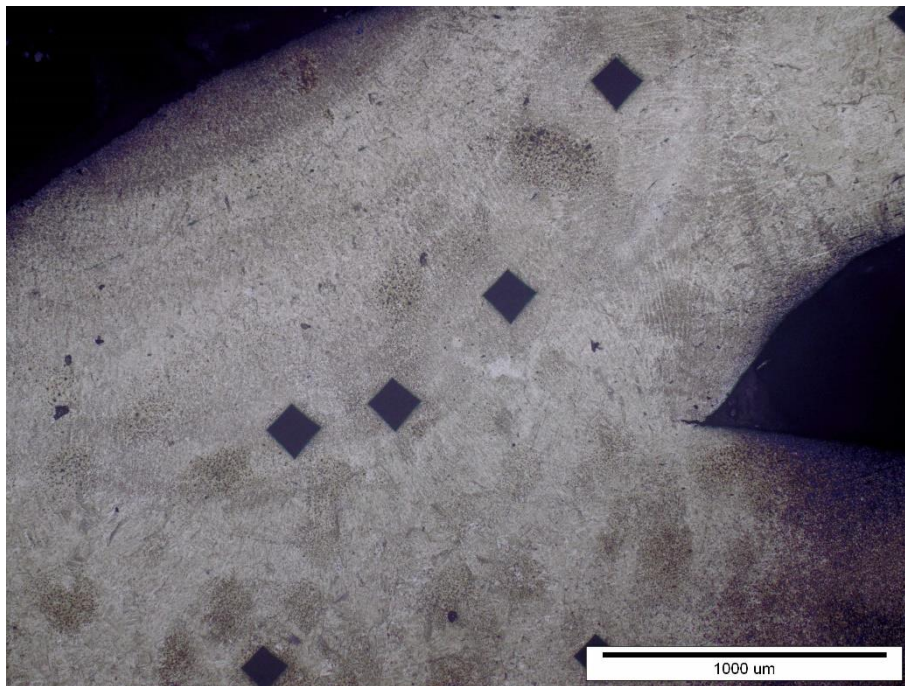
Makrostruktura zavora uzorka 7 prikazana je na slici 8. Karakteristične mikrostrukture uzorka na mjestima označenima na slici 81 (ZUT, zavar) prikazane su na slikama 82-85.



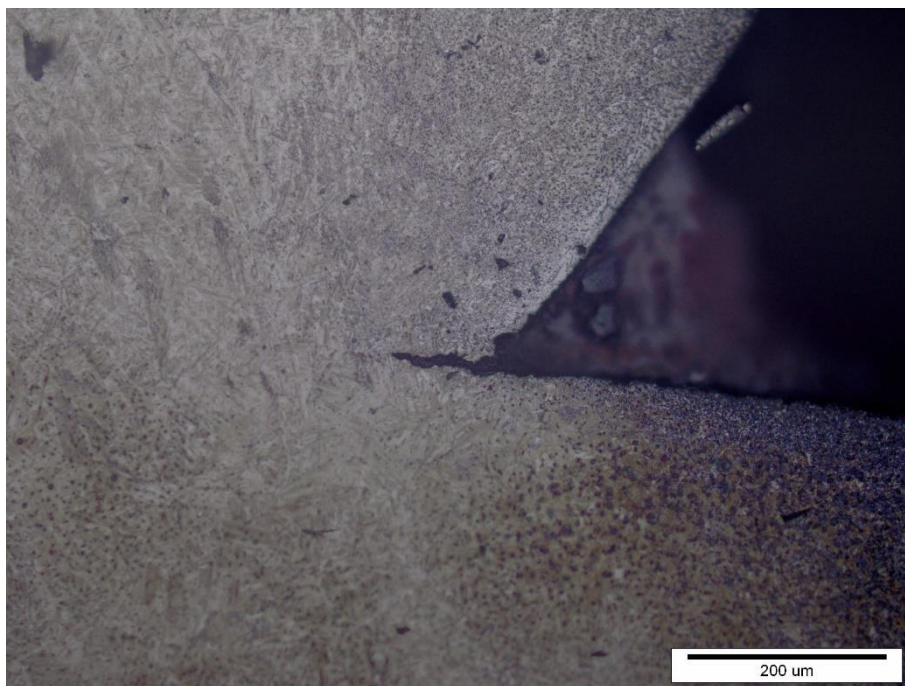
**Slika 81. Segment šasije PODNICA uzorak 7: makrostruktura s mjestima analize mikrostrukture**



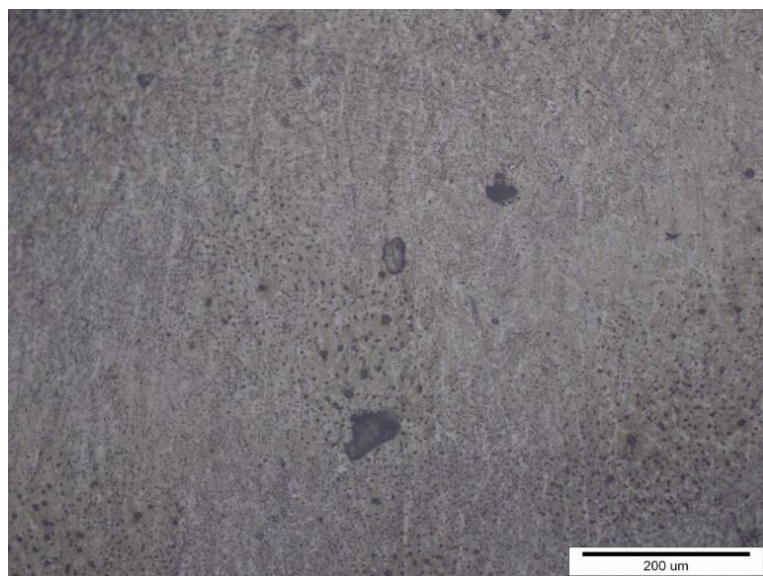
**Slika 82. Segment šasije PODNICA uzorak 7: mikrostruktura na poziciji ZUT**



**Slika 83. Segment šasije PODNICA uzorak 7: mikrostruktura na poziciji ZAVAR**

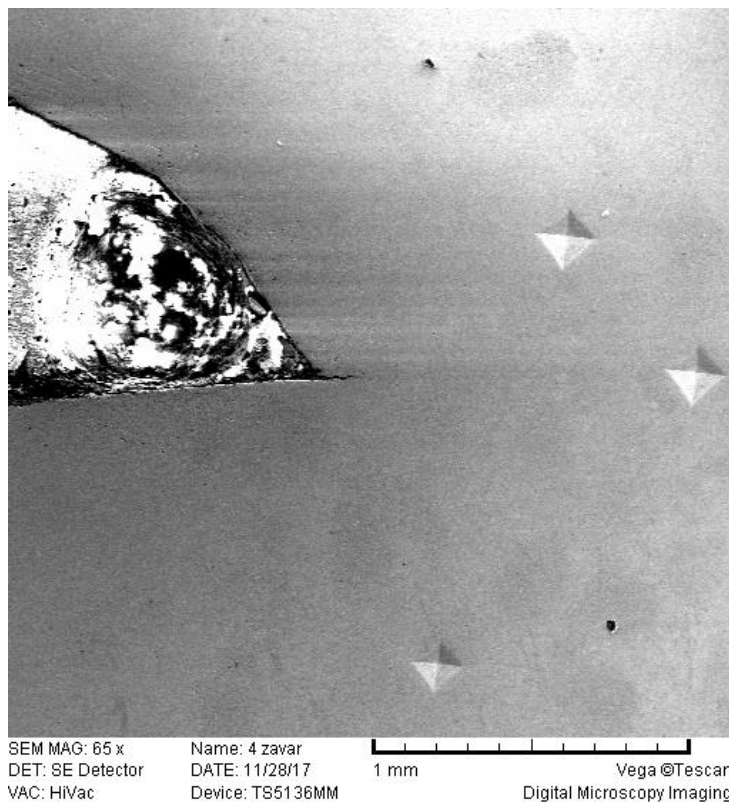


**Slika 84. Segment šasije PODNICA uzorak 7: mikrostruktura na poziciji ZAVAR, detalj**

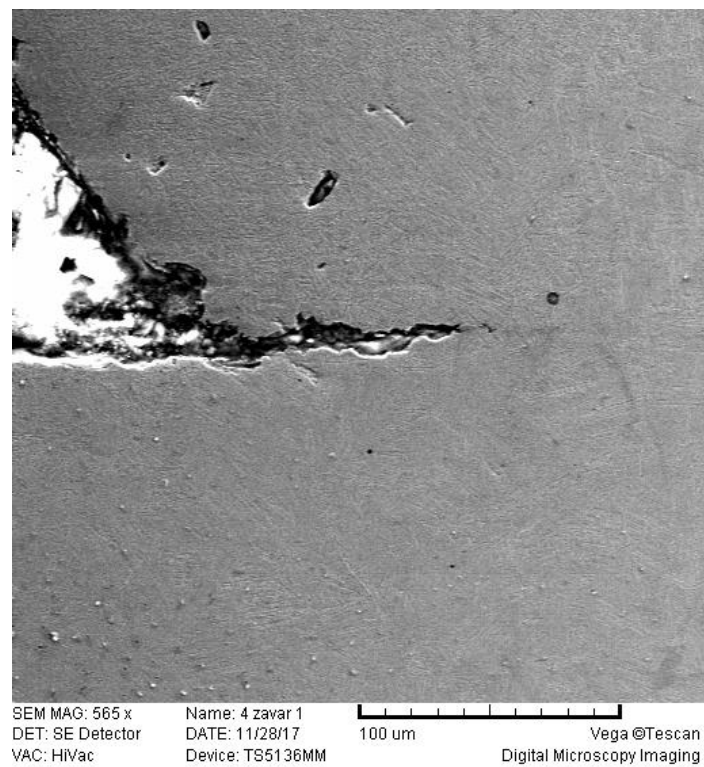


**Slika 85. Segment šasijske PODNICA uzorak 7: mikrostruktura na poziciji ZAVAR, porozitet**

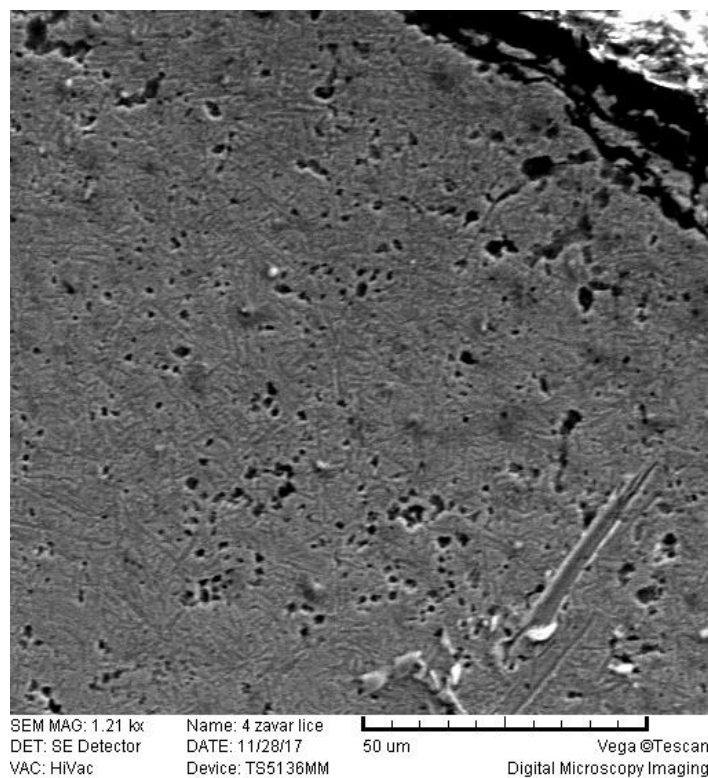
Detalji uzorka 7 na mjestu zavora analizirani pomoću skenirajućeg elektronskog mikroskopa prikazani su na slikama 86-89.



**Slika 86. Segment šasijske PODNICA uzorak 7: zavar, SEM**

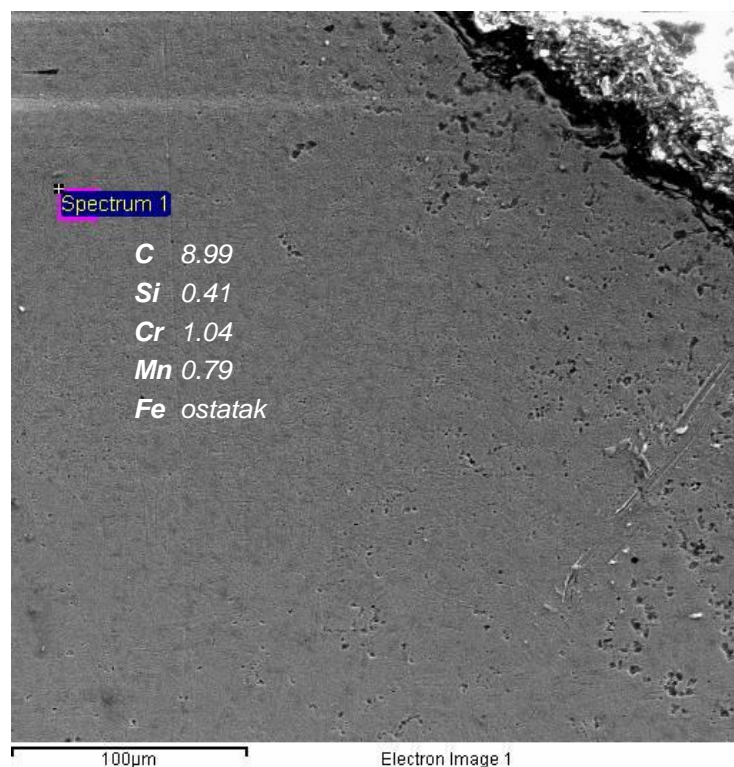


**Slika 87. Segment šasije PODNICA uzorak 7: zavar, detalj, SEM, neprotaljenost / pukotina**



**Slika 88. Segment šasije PODNICA uzorak 7: zavar, detalj ispod lica zavora, SEM, porozitet**

Na uzorku 7 napravljena je i EDS mikroanaliza kemijskog sastava materijala zavara. Pozicija EDS analize s dobivenim masenim udjelima pojedinih elemenata prikazana je na slici 89.



**Slika 89. Segment šasijske PODNICA uzorak 7: mjesto i rezultati EDS analize, materijal zavara**

### **Mikrotvrdoća uzorka 7**

Mjerenja mikrotvrdoće su napravljena u materijalu zavara i materijalu ZUTa. Srednje vrijednosti pet mjerenja prikazane su u tablici 12 .

**Tablica 12. Mikrotvrdoća uzorka 7 na karakterističnim mjestima**

MJESTO MJERENJA	HV0,2 SREDNJA VRIJEDNOST
ZUT	212
ZAVAR	441

#### 4. ZAKLJUČAK

Na segmenta šasije „Firewall“ i „Podnica“ napravljen je niz analiza i ispitivanja s ciljem dobivanja što točnijih rezultata. Prvo su provedena nerazorna endoskopska i radiografska ispitivanja, a zatim razorna ispitivanja.

Na temelju provedenih analiza i ispitivanja može se zaključiti slijedeće:

Endoskopskom analizom vidljiva je korodirana unutarnja površina cijevi. Korozija je intenzivnija na mjestima zavara gdje je vidljivo i mjestimično progaranje osnovnog materijala cijevi. Mogući uzrok progaranja je preveliki unos topline tijekom zavarivanja. Analizom radiograma nisu uočene pukotine u materijalu zavara niti u osnovnom materijalu koje bi bilo potrebno detaljnije karakterizirati. Mikroanaliza kemijskog sastava (EDS analiza), na svim uzorcima u osnovnom materijalu cijevi i materijalu zavara, pokazala je očekivane vrijednosti. Druge greške nisu vidljive nerazornim ispitivanjima, te su nakon njih provedena razorna ispitivanja .

Nakon izrezivanja napravljena je analiza makrostrukture svih uzoraka zavarenog spoja izrezanih iz segmenta šasije „Firewall“ i „Podnica.“ Na svakom uzorku vidljivo je područje osnovnog materijala, područje zone utjecaja topline i područje zavara. Zona utjecaja topline kod svih uzoraka se proteže duboko u osnovni materijal. U području zavara vidljivo je progaranja osnovnog materijala te greške koje su uzrok postupka zavarivanja.

Mikrostruktura osnovnog materijala analiziranih cijevi je uobičajena za tu vrstu materijala (25CrMo4), usmjerena feritno-perlitna mikrostruktura bez značajnih nepravilnosti. Prosječna mikrotvrdoća osnovnog materijala je oko 260 HV0,2.

Zona utjecaja topline se prostire kroz široko područje osnovnog materijala. Unutar zone vidljiva je značajna promjena mikrostrukture materijala, bliže osnovnom materijalu zrna su značajno manja, dok se blizu materijala zavara javlja grubozrnata transformirana mikrostruktura. To dokazuje i značajan porast mikrotvrdoće u ZUTu u blizini materijala zavara koji mjestimično iznosi do 386 HV0.2.

Materijal zavara ima grubozrnatu mikrostrukturu karakterističnu za to područje s mikrotvrdoćama do 441 HV0,2. Unutar materijala zavara vidljive su greške tehnološkog porijekla. Najčešće je vidljiv nedovoljno rastaljen osnovni materijal, tj neprotaljenost, progaranja materijala cijevi te porozitet unutar materijala zavara.



Navedene greške kao i lokalna otvrdnuća u strukturi materijala predstavljaju potencijalno opasna mjesta. Zavari na segmentima šasije „Firewall“ i „Podnica“ nisu dobro izvedeni, te je na njima napravljen niz grešaka. Uslijed promjenljivog dinamičkog opterećenja takva slaba mjesta predstavljaju koncentratore naprezanja koji mogu inicirati mikropukotinu koja će napredovati kroz materijal i uzrokovati njegov lom, odnosno pojavu poznatu kao umor materijala, a uzrok tome su loše optimirani parametri i loša tehnika rada.

---

**PRILOZI**

I. CD-R disc

---

**LITERATURA**

- [1] <https://www.mvwautotechniek.nl/Motor/Carrosserie/carrosserie.htm>
- [2] <http://www.lsxmag.com/news/sector111-and-palatov-motorsports-project-dragon-is-pure-adrenaline/>
- [3] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Zavarivanje\\_TIG\\_postupkom](https://hr.wikipedia.org/wiki/Zavarivanje_TIG_postupkom)
- [4] Damir Markučić: NDT metode, Zavarivanje i montaža, 2011.
- [5] Schaperl Z.: Autorizirana predavanja: Karakterizacija materijala, Sveučilište u Zagrebu, FSB, 2015
- [6] [http://repositorij.fsb.hr/5156/1/Stilin\\_2016\\_zavr%C5%A1ni\\_preddiplomski.pdf](http://repositorij.fsb.hr/5156/1/Stilin_2016_zavr%C5%A1ni_preddiplomski.pdf)
- [7] <http://e-skola.biol.pmf.unizg.hr/odgovori132.htm>
- [8] Mršić, S. Žugaj; Analiza GSR čestica upotrebom elektronskog mikroskopa (SEM/EDX); stručni članak; Zagreb; 2007
- [9] [http://www.vorax.hr/dokumenti/hr/mjer\\_tvr\\_hr.html](http://www.vorax.hr/dokumenti/hr/mjer_tvr_hr.html)
- [10] <http://www.ispitivanje.com/smjernice-za-ispitivanje-tvrdoce/>
- [11] <https://www.saarstahl.com/sag/downloads/download/11836>
- [12] <https://www.juzniprolaz.hr/>
- [13] <http://www.ceweld.com/en/product/sg-crm01-tig>
- [14] <https://www.olympus-ims.com/en/rvi-products/iplax-ultralite/>
- [15] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Radiografska\\_kontrola](https://hr.wikipedia.org/wiki/Radiografska_kontrola)