

---

**UNIVERZITET U BEOGRADU  
MAŠINSKI FAKULTET**

**Mihajlo S. Arandelović**

**UTICAJ VIŠESTRUKIH GREŠAKA U  
ZAVARENOM SPOJU NA INTEGRITET  
ZAVARENE KONSTRUKCIJE**

**DOKTORSKA DISERTACIJA**

**Beograd, 2022.**

---

---

**UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING**

**Mihajlo S. Arandelović**

**INFLUENCE OF MULTIPLE DEFECTS ON  
STRUCTURAL INTEGRITY OF WELDED  
JOINTS**

**DOCTORAL DISSERTATION**

**Belgrade, 2022.**

---

**Mentor:**

Dr Aleksandar Sedmak, profesor emeritus  
Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu

**Članovi komisije:**

dr Zoran Radaković, redovni profesor  
Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu

dr Gordana Bakić, redovni profesor  
Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu

dr Ana Petrović, docent  
Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu

dr Zijah Burzić, naučni savetnik  
Vojnotehnički institut u Beogradu

dr Simon Sedmak, naučni saradnik  
Inovacioni centar Mašinskog fakulteta u Beogradu

**Datum odbrane:**

## PREDGOVOR

Želeo bih da se zahvalim svima koji su učestvovali u izradi ove doktorske disertacije. Prvenstveno bih se zahvalio dr. Radomiru Jovičiću i prof. emeritusu Aleksadru Sedmaku na svemu što su me je naučili i omogućili svojim znanjem i zalaganjem da ova teza bude napisana.

Zahvalio bih se Instutu „GOŠA“ na velikoj pomoći, a posebno Danijelu Pavloviću koji je svojim znanjem (praktičnim, ali i teoretskim) doprineo izradi ove doktorske disertacije. Njegova svesrdačna pomoć je učinila mnogo na podizanju kvaliteta ove disertacije.

Takođe se zahvaljujem Vojno-tehničkom instutu u Beogradu, posebno Srđi Perkoviću, koji je svojim stručnim i teoretskim znanjem učestvovavao u izradi i tumačenju eksperimentalnih rezultata ove doktorske disertacije.

Zahvaljujem se i Laboratoriji za mehanička ispitivanja materijala na Tehnološko-Metalurškom fakultetu u Beogradu i kolegi Stefanu Dikiću koji je takođe imao velikog udela izradi eksperimentalnog delu ove disertacije.

Ovim putem se zahvaljujem i zaposlenima u Laboratoriji za analizu napona i deformacija katedre za otpornost konstrukcija Mašinskog fakulteta u Beogradu koji su takođe imali udela u eksperimentalnom delu ove doktorske disertacije.

Želim da se zahvalim i svim članovima komisije na pomoći prilikom izrade doktorske disertacije.

Kolegama iz Inovacionog centra Mašinskog fakuleta, Branislavu Đorđeviću, Nikoli Milovanoviću i Lazaru Jeremiću se zahvaljujem ovim putem na pomoći tokom pripreme, tehničkoj obradi, kao i pomoći tokom izrade ove doktorske disertacije.

Svojoj supruzi Ani i sinu Ognjenu hvala na podršci i razumevanju, kao i svojim roditeljima koji su uvek verovali u mene.

Ova doktorska disertacija je nastala nakon višegodišnjeg istraživanja na projektima tehnološkog razvoja finansiranim od strane Ministarstva prosvete nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (projekat TR35040 i ugovor 451-03-68/2020-14/ 200213).

# UTICAJ VIŠESTRUKIH GREŠAKA U ZAVARENOM SPOJU NA INTEGRITET ZAVARENE KONSTRUKCIJE

## REZIME

Glavni cilj ovog istraživanja je utvrđivanje kombinacije realnih grešaka koji predstavljaju potencijalno najveću opasnost po integritet zavarenih spojeva i konstrukcija. Analiziran je uticaj prisustva više različitih grešaka u zavarenom spoju čelika S275JR na integritet zavarene konstrukcije. Sa tim ciljem formirani su numerički proračunski modeli i fizički modeli epruveta, koji su bili ispitivani jednoosnim zatezanjem, a deformacije zona zavarenog spoja su merene beskontaktnom optičkom metodom. Osnovna ideja je bila da se predvidi ponašanje zavarenih spojeva u radnim uslovima u prisustvu višestrukih površinskih grešaka numeričko-eksperimentalnim pristupom. Određeni su naponi pri kojima dolazi do pojave prsline u zavarenim spojevima za sve merodavne kombinacije grešaka, pri čemu je takođe utvrđeno koja greška inicira početnu prsline za sve slučajeve kombinacije grešaka. Kao rezultat ovog ispitivanja određene su karakteristike materijala svih zona zavarenog spoja.

Razvijeni su početni modeli koji su potom unapređvani. Polja deformacija dobijena eksperimentalnim istraživanjima, pre svega digitalnom korelacijom slika, su korišćena u ovoj studiji. Na taj način su iterativno razvijeni novi realni numerički modeli, koji su omogućili određivanje napona pri kojem dolazi do pojave prsline, kao i naponskog i deformacijskog stanja u zoni uticaja toplote.

Kombinacije grešaka u zavarenom spoju sa smaknućem ploča su se pokazale kao najkritičnije u pogledu integriteta zavarene konstrukcije, kao i sama priroda kombinacije pomenutih grešaka. Usled primetnog “*overmatching*” efekta, ova studija je pokazala da lomovi “kreću” iz grešaka smeštenih u zoni uticaja toplote (pre svega na ili blizu linije stapanja).

## KLJUČNE REČI

Čelik S275JR, zavarivanje, višestruke greške, geometrija, metoda konačnih elemenata, digitalna korelacija slika.

**Naučna oblast:** Tehničke nauke – Mašinsko inženjerstvo.

**Uža naučna oblast:** Tehnologija materijala.

**UDK:** 621.791.052:620.179(043.3)

# **INFLUENCE OF MULTIPLE DEFECTS ON STRUCTURAL INTEGRITY OF WELDED JOINTS**

## **ABSTRACT**

The main goal of this research was to determine the combination of real defects that potentially represent the greatest danger to the integrity of welded joints and structures. The influence of multiple defects in the welded joint of S275JR steel on the integrity of the welded structure was investigated. For this purpose, numerical calculation models and physical models of specimens were formed, which were tested by uniaxial tension, and the deformations of the welded joint zones were measured by the non-contact optical method. The basic idea was to predict the behavior of welded joints in working conditions with presence of multiple surface defects by numerical-experimental approach. The stress at which a crack occurs in welded joints with a combination of defects has been determined, as well as which defect initiates the crack propagation for all defects combination. As a consequence of this test, the material characteristics of all zones of the welded joint were determined.

Initial models were developed and then improved. The deformation field obtained by experimental research was included. Thus, a new real numerical models were iteratively developed, which enabled both the determination of the stress at which the crack occurs as well as the stress in the heat affected zone.

Combinations of defects in welded joints with vertical misalignment were recognized as the most critical one concerning welded construction integrity, as well as the nature of these defects combinations. Due to the noticeable "overmatching" effect of the welded joint, this study shown that the fractures originated from defects located in the heat affected zone (primarily at or near the fusion line).

## **KEYWORDS**

Steel S275JR, welding, multiple welding defects, weld geometry, finite element method, digital image correlation.

**Scientific Field:** Technical Sciences – Mechanical Engineering.

**Subfield:** Materials technology.

**UDC:** 621.791.052:620.179(043.3)

## Sadržaj:

1. Uvod .....	1
1.1 Opis poglavlja disertacije .....	3
2. Pregled literature .....	5
2.1 Pregled literature, uvod.....	5
2.3 Primena metode DIC u ispitivanju zavarenih spojeva.....	6
2.4 Uticaj grešaka na koncentraciju napona u zavarenom spoju .....	8
3. Kontrola kvaliteta, greške i ispitivanje zavarenih spojeva.....	14
3.1 Zavarivanje - uvod.....	14
3.2 Kontrola kvaliteta zavarenih spojeva .....	14
3.2.1 Uvod u kontrolu kvaliteta .....	14
3.2.2 Specifikacija tehnologije zavarivanja – WPS (eng. <i>Welding procedure specification</i> ) .....	14
3.2.3 Kvalifikacija procedure tehnologije zavarivanja WPQR (eng. <i>Welding procedure qualification report</i> ).....	15
3.3 Nepravilnosti u zavarenim spojevima .....	16
3.3.1 Klasifikacija nepravilnosti (grešaka) u zavarenim spojevima .....	16
3.3.2 Kriterijumi prihvatljivosti zavarenih spojeva .....	17
3.4 Ispitivanje zavarenih spojeva.....	18
3.4.1 Osnove metoda ispitivanja bez razaranja .....	18
3.4.1.1 Vizuelno ispitivanje .....	19
3.4.1.2 Radiografsko ispitivanje .....	19
3.4.2 Osnove metoda ispitivanja razaranjem (mehanička ispitivanja) .....	20
4. Osnove stereometrije i metode konačnih elemenata .....	23
4.1 Merenje deformacija - uvod .....	23
4.2 Stereometrija - Digitalna korelacija slike .....	23
4.3 Metoda konačnih elemenata (MKE).....	25
5. Tehnologija zavarivanja .....	27
5.1 Tehnologija zavarivanja - uvod .....	27
5.2 Uopšteno o osnovnom materijalu S275JR.....	27
5.3 Dodatni materijal .....	27
5.4 Tehnologija i potupak zavarivanja .....	28
5.4.1 Temperatura predgrevanja.....	28
5.4.2 Priprema žleba .....	30
5.4.3 Uređaj i parametri zavarivanja.....	31
5.4.4 Ispitivanje bez razaranja zavarenih ploča .....	31
6. Eksperimentalna ispitivanja.....	32

6.1 Pregled eksperimentalnih ispitivanja.....	32
6.2 Ispitivanja osnovnog materijala S275JR .....	32
6.3 Ispitivanja epruveta iz zavarenih ploča jednoosnim zatezavanjem .....	35
6.3.1 Plan ispitivanja .....	35
6.3.2 Priprema epruveta za ispitivanje iz zavarenih ploča.....	36
6.3.3 Postavka eksperimenta .....	39
6.4 Rezultati ispitivanja jednoosnim zatezavanjem.....	41
6.4.1 Rezultati ispitivanja jednoosnim zatezavanjem grupe epruveta 1.....	41
6.4.2 Rezultati ispitivanja jednoosnim zatezavanjem grupe epruveta 2.....	55
6.4.3. Rezultati ispitivanja jedno-osnim zatezavanjem grupe epruveta grupe 3 .....	62
6.4.4 Rezultati ispitivanja jedno-osnim zatezavanjem grupe epruveta grupe 4 .....	67
6.4.5 Rezultati ispitivanja jednoosnim zatezavanjem grupe epruveta grupe 5.....	75
6.5 Mikrostrukturno ispitivanje i ispitivanja tvrdoće zavarenog spoja.....	79
7. Postavka numeričkih modela.....	81
7.1 Uvod .....	81
7.2 Postavka osnovnog numeričkog modela .....	81
7.3 Unapređivanje geometrije i analiza dodatnih uticaja .....	84
7.4 Greške u zavarenom spoju – baza za razvijanje realnih modela .....	88
7.5 Novi numerički modeli za čelik S275 .....	90
7.6 Određivanje mehaničkih osobina zone uticaja toplote .....	92
8. Analiza rezultata.....	95
8.1 Uvod .....	95
8.2 Ispitivanje jednoosnim zatezavanjem.....	95
8.3 Merenje tvrdoće i analiza mikrostrukture.....	95
8.4 Rezultati numeričkih proračuna sa čelikom S275 .....	96
9. Zaključak.....	109
10. Literatura.....	111
11. Dodatak disertaciji.....	115
Dodatak 1 – Plan rezanja ploča .....	115
Dodatak 2 – Metodologija merenja pomeranja na epruvetama za jednoosno zatezavanje (epruvete 1.2, 2.1, 2.2, 3.1, 3.2,4.1, 4.2, 5.1, 5.2).....	117
Dodatak 3 – Prikaz vrednosti tvrdoća za epruvete grupe 1, 2, 3, 4.....	137



## 1. Uvod

Osnovna mehanička ispitivanja u kombinaciji sa numeričkim metodama pružaju sveobuhvatnu sliku o integritetu zavarenih spojeva u konstrukcijama, naročito u prisustvu jedne ili više grešaka u zavarenom spoju. S obzirom na veliki broj uticajnih faktora na kvalitet zavaranoj spoja, posebna pažnja se posvećuje nastanku i uticaju grešaka, pogotovu kada greške pripadaju različitim grupama u istom zavarenom spoju. Savremenim pristupom istraživanja, koji zahteva sve veću primenu numeričkih metoda, moguće je delimično preduprediti ovaj problem i time uočiti uticaj ovih grešaka preko raspodele napona, deformacija i pomeranja. Ukoliko se u ispitivanje uticaja grešaka uključe i ispitivanja bez razaranja i mehanička ispitivanja dobija se sveobuhvatna slika zavarenog spoja, jer se dobijaju i tačne veličine i tipovi grešaka. Na taj način moguće je predvideti ponašanje zavarenih spojeva, kao i celokupne zavarene konstrukcije, u kojima se mogu naći različiti tipovi grešaka nastalih kao posledica zavarivanja. Važno je takođe istaći da pored prethodno rečenog, primena odgovarajućih standarda iz oblasti zavarivanja pruža odgovarajuće ulazne informacije za sprovođenje numeričkih i eksperimentalnih ispitivanja i simulacija zavarenih spojeva.

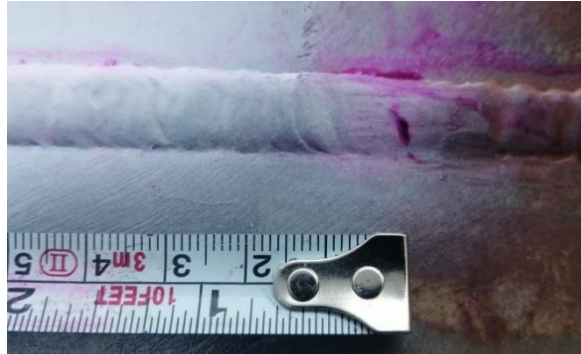
Prilikom izvođenja zavarenih spojeva može doći do nastanka različitih grešaka u metalu šava, što je u realnim konstrukcijama čest problem. Prisustvo grešaka može rezultirati otkazom zavarene konstrukcije. Direktni razlog je ozbiljno narušavanje integriteta konstrukcije usled prisustva bilo kojih neprihvatljivih grešaka, usled njihovog uticaja na koncentraciju napona. Kao primer čestih grešaka u zavarenim spojevima definisanih standardom u tom polju u realnim konstrukcijama mogu se javiti neprovaren koren i smaknuće limova i profila koji mogu biti praćeni još i zajedima, nadvišenjem i neuvarenim ivicama zavarenog spoja itd., što je u praksi jako čest slučaj. Greške u zavarenim spojevima se jako često javljaju u grupama od više istovremenih različitih tipova grešaka, koje standard SRPS EN ISO 5817 [1, 2] tretira pojedinačno, i ne uzima u obzir njihov zajednički uticaj na integritet konstrukcije (u ovom slučaju zavarenog spoja). Primer u praksi su zavareni spojevi kvaliteta B (najviši nivo kvaliteta po standard SRPS EN ISO 5817) koji su rađeni za dimnjak visine 40m na termoelektrani. Na slici 1.1 su prikazane greške u sučeonim zavarenim spojevima. Ove greške su izazvane nestabilnošću luka tokom procesa zavarivanja.



Slika 1.1: Višestruke greške izazvane nestabilnošću luka

Neadekvatnom atmosferskom zaštitom je nastao nestabilan luk koji sa sobom povlači još površinskih grešaka osim šetanja luka (odstupanje geometrije metala šava duž zavarenog spoja). Može se uočiti loš nastavak, nalepljivanje, prelivanje metala šava na osnovni materijal, zajedni kao i

razbrizgavanje dodatnog materijala. Osim toga je bilo prisutno i smaknuće sučeonih zavarivanih ploča od oko 2 mm što takođe povećava mogućnost pojave površinskih (i zapreminskih) grešaka. Nepravilnosti (greške) ne moraju da budu vidljive golim okom. Na slici 1.2 je prikazan zajed i nalepljivanje posle ispitivanja metodama bez razaranja (u daljem tekstu IBR) u ovom slučaju penetrantima, što je posledica već pomenutog smaknuća ploče od 2 mm u kombinaciji sa neadkvatnom brzinom zavarivanja i jačinom struje.



Slika 1.2: Zajed i nalepljivanje na sučeonom zavarenom spoju

Ovaj problem se javlja kod svih tipova čelika i svih vrsta zavarenih spojeva. Može se javiti i kod zavarenih spojeva austenitnih čelika (u primeru prikazanom na slici 1.3 cevovoda) zahtevanog kvaliteta B, kao što se vidi na slici 1.3.

Na slici 3 levo se vidi smaknuće od 5 mm praćen ulegnućem zavarenog spoja i prelivanjem zavaranoj spoja na osnovni material. Greške su izazvane smaknućem i ovo je lep primer kako jedna površinska greška povlači druge. Na slici 1.3 desno je prikazano nadvišenje u kombinaciji na lošim nastavkom i nalepljivanjem izazvanih neadkvatnom tehnikom zavarivanja.



Slika 1.3 : Izgled višestrukih grešaka kod austenitnih cevi

Kao što je pomenuto, cilj ove doktorske disertacije tiče se istraživanja ponašanja sučeonih zavarenih spojeva osnovnog materijala komercijalne oznake S275JR predviđenog za rad konstrukcija u uslovima na temperaturi oko 20°C u prisustvu više grupisanih grešaka različitog tipa. Cilj ove studije je istraživanje mogućeg uticaja višestrukih grešaka na integritet cele konstrukcije zavarenog spoja primenom različitih metoda istraživanja, poput mehaničkih ispitivanja i metode konačnih elemenata (u daljem tekstu MKE). Kao što se vidi na prikazanim primerima iz prakse, prilikom izrade zavarenih spojeva može doći do nastanka različitih grešaka u metalu šava, što je u realnim konstrukcijama čest problem, i to može rezultirati posledicama koje dovode to otkaza i reparacije konstrukcije, što često predstavlja veoma zahtevan proces sa tehno-ekonomske

strane, jer zahteva dosta vremena kako bi se konstrukcija vratila u funkciju [3, 4]. To je posledica direktnog narušavanja integriteta konstrukcije usled prisustva bilo kojih grešaka koje prave koncentraciju napona. Pošto je u praksi uglavnom slučaj da dodatni material u zavarenom spoju bude mnogo boljih mehaničkih osobina nego osnovni (eng. *overmatching*), u samom eksperimentu je pristupljeno na isti način tačnije uzorci namenjeni za eksperimentalna ispitivanja su napravljeni sa “*overmatching*” efektom. Za praćenje deformacija korišćen je softverski paket ARAMIS koji u kombinaciji sa dvema kamerama visoke rezolucije može pratiti ponašanje kroz sve stadijume opterećivanja (eng. *digital image correlation* - DIC). Prethodno opisana tehnika praćenja deformacija je poslužila za izradu numeričkog modela koji bi se dalje unapredio do verzije koja bi mogla da predvidi ponašanje zavarenih spojeva sa višestrukim greškama primenom metode MKE.

Glavni cilj ove disertacije je analiza višestrukih grešaka u zavarenom spoju čelika S275JR na integritet zavarene konstrukcije napravljene od ovog materijala, ali mogućnost predviđanja ponašanja zavarenih spojeva numeričkom simulacijom u prisustvu višestrukih grešaka. Pored toga, dodatni cilj ove disertacije je da se uz pomoć softverskog paketa ABAQUS predvidi ponašanje zavarenih spojeva u realnim radnim uslovima na osnovu iskustva stečenog eksperimentalnim ispitivanjima zavarenih spojeva čelika S275JR. Višestruke greške u zavarenom spoju koje se nalaze u metalu šava imaju uticaj i na deformacije u zoni uticaja toplote (u daljem tekstu ZUT), kao najkritičnijem delu zavarnog spoja. Još jedan dodatni cilj je bio da se odredi kako geometrija zavarnog spoja utiče na polje deformacija zavarnog spoja. Takođe, cilj je utvrditi kombinacije realnih grešaka (kategorizovanih odgovarajućim standardom) koji predstavljaju potencijalno najveću opasnost po integritet spojeva i konstrukcija.

Faza numeričke analize je obuhvatila nekoliko iteracija i izvesne aproksimacije, usled nedostatka prethodnih istraživanja u ovoj vrsti analize. Prvo je bilo neophodno napraviti modele koji će davati rezultate koji imaju smisla u pogledu raspodele napona i deformacija, odnosno ponašanja samog zavarnog spoja, da bi se u kasnijim fazama pažnja posvetila preciznosti dobijenih rezultata. Konačno, nakon uspostavljanja merodavnih modela, bilo je moguće uraditi proračune za različite trenutke ponašanja/loma epruveta, koji bi se dalje međusobno poredili, kako bi se utvrdilo koja kombinacija grešaka ima najnepovoljniji uticaj na integritet zavarnog spoja, kao i na koji način svaka pojedinačna greška utiče na ostale.

## 1.1 Opis poglavlja disertacije

Doktorska disertacija je ukupno podeljena na jedanaest poglavlja. Prvo poglavlje se sastoji od uvodnih razmatranja, kao i od kratkog pregleda poglavlja doktorske disertacije.

Drugo poglavlje obuhvata kratak pregled literature koja je služila kao osnov za izradu ove disertacije. Sam pregled literature je podeljen na tri dela, a glavni fokusi obrađenih radova ticali su se: uticaja geometrije zavarnog spoja; na koncentraciju napona u zavarenim spojevima primenom metode konačnih elemenata; primenu metode digitalne korelacije slika (beskontaktna optička metoda) u ispitivanju zavarenih spojeva i uticaja grešaka na koncentraciju napona u zavarenom spoju.

U trećem poglavlju obrađeni su zahtevi pojedinih standard koji se tiču kontrole zavarenih spojeva, kvaliteta istih, klasifikaciji grešaka, kriterijuma prihvatljivosti itd. U ovom poglavlju su prepoznati problemi identifikacije grešaka u zavarenim spojevima, kao i osnove za njihovo otkrivanje i analizu uticaja.

Četvrto poglavlje obuhvata teorijske osnove ispitivanja digitalnim korelacijama slika (beskontaktna optička metoda) i osnove metoda konačnih elemenata.

Fokus petog poglavlja je usmeren na tehnologiju zavaravanja i ovo poglavlje je podeljeno na nekoliko potpoglavlja u kojima su opisani koraci izrade zavarenih spojeva namenjenih za mehanička ispitivanja, izbor osnovnog i dodatnog materijala, tehnologija i postupak zavarivanja, određivanje temperature predgrevanja, priprema žleba, određivanje parametara zavarivanja itd.

U šestom poglavlju su prikazani rezultati eksperimentalnog dela doktorske disertacije. Ovo poglavlje počinje sa rezultatima ispitivanja mehaničkih i hemijskih ispitivanja osnovnog materijala, odnosno ispitivanja čelika S275JR (EN oznaka 1.0044). Dalje, prikazan je plan ispitivanja epruveta pripremljenih iz zavarenih ploča sa greškama kombinacijama, postavka eksperimentalnih ispitivanja i prikaz rezultata ispitivanja, preciznije ispitivanja jednoosnim zatezanjem, ispitivanja tvrdoće, kao i prikaz mikrostrukturnih analiza. Deformaciona polja ispitivanih epruveta tokom ispitivanja jednoosnim zatezanjem su praćena beskontaktnom optičkom metodom, odnosno primenom tehnike digitalne korelacije slika. Rezultati ispitivanja (deformacionog polja) su obrađeni u softverskom paketu ARAMIS, ali i neposrednim merenjem pomeranja repernih tačaka na epruvetama tokom zatezanja snimljenih HD kamerom.

U sedmom poglavlju predstavljeni su predloženi numerički modeli, kao i njihov razvoj ka realnim numeričkim modelima usled preciznog merenja grešaka na zavarenim spojevima i unošenjem kombinija grešaka u iste. Takođe u ovom poglavlju dat je prikaz novih realnih numeričkih modela sa realnim vrednostima grešaka u cilju određivanja vrednosti napona usled jednoosnog zatezanja, kako u metalu šava, liniji stapanja, tako i u zoni uticaja toplote zavarenog spoja.

U cilju dobijanja odgovarajućih zaključaka, urađena je analiza dobijenih rezultata, koja je predstavljena u osmom poglavlju ove disertacije. Urađena je analiza rezultata jednoosnim zatezanjem. Analizirani su i rezultati izmerenih tvrdoća, a na tim istim uzorcima je analizirana snimljena mikrostruktura. Analizirani su i dobijeni uporedni rezultati numerički-eksperimentalnih ispitivanja, i to upoređivanjem različitih metoda analize ponašanja epruveta u prisustvu višestrukih grešaka.

U devetom poglavlju prikazani su odgovarajući zaključci na osnovu dobijenih eksperimentalno/numeričkih rezultata.

U desetom poglavlju je prikazana referentna literatura koršćena prilikom izrade ove doktorske disertacije.

U jedanaestom poglavlju se nalazi dodatak disertaciji – plan sečenja ploča, tabele i fotografije ispitivanja koje nisu obrađene u disertaciji, kao i rezultati izmerenih tvrdoća koji takođe nisu obrađeni u ovoj disertaciji.

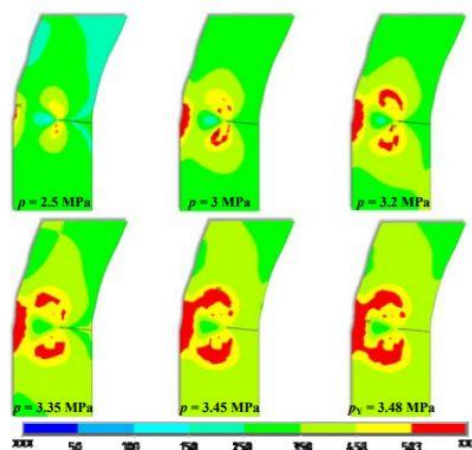
## 2. Pregled literature

### 2.1 Pregled literature, uvod

U ovom poglavlju će biti prikazani rezultati određenih studija u kojima je analiziran uticaj grešaka (nepravilnosti) i (ili) geometrije zavarenog spoja na integritet konstrukcije (zavarenog spoja), kao i uticajem deformacija kako u metalu šava tako i u ZUT-u na integritet celokupnog zavarenog spoja. Pregled literature ove glave je podeljen u tri dela. U prvom delu pregleda literature obrađena je tema uticaja geometrije šava na raspodelu napona zavarenog spoja, u drugom delu pregleda literature obrađena je primena softverskog paketa ARAMIS na zavarenim spojevima, dok je u trećem delu pregleda literature obrađen uticaj grešaka pojedinačnih zavarenih spojeva na integritet zavarene konstrukcije. Cilj predstavljenog pregleda literature je da prikaže dosadašnja istraživanja u ovoj oblasti koje su uticale na postavljanje određenih hipoteza ove doktorske disertacije.

### 2.2 Uticaj geometrije zavarenog spoja na koncentraciju napona

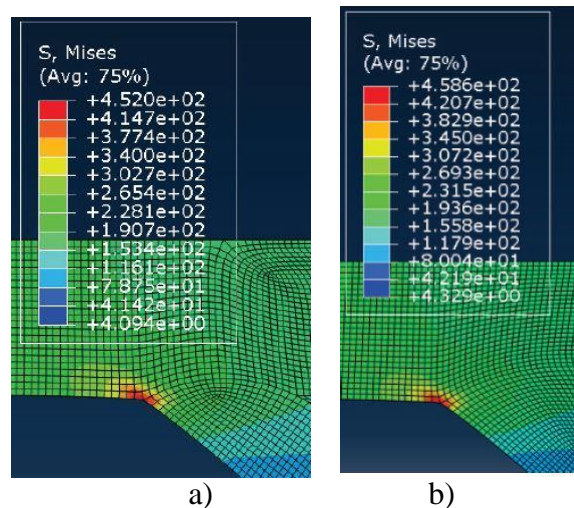
Izgled i geometrija zavarenog spoja ima izuzetan uticaj na raspodelu koncentracije napona, s toga su Kozak i njegovi saradnici [5] u svojoj studiji razmatrali uticaj napona nastalih usled smaknuća cilindričnih delova rezervoara nastalog tokom zavarivanja na integritet posude pod pritiskom. Veličine napona određene su pomoću API 579[6] norme i izračunate numerički korišćenjem MKE. Smaknuće je variralo od 0 mm do 7,9 mm što standardom nije dozvoljeno, kako po preporukama API 579 tako i po preporukama EN ISO 5817, koji predstavlja jedan od ključnih standarda vezanih za predmet ove doktorske teze. U ovoj studiji dat je prikaz vrednosti napona sa povećanjem smaknuća sučeono zavarenih limova, u cilju poređenja njihovih vrednosti. Za prikazani slučaj ne postoje izrazi za računanje napona pri jednoosnom zatezanju, pa se autor oslanjao na ANSYS - ove rezultate prikazane na slici 2.1. Rezultati dobijeni ANSYS-om su poređeni sa metodama proračuna napona koje su propisane standardom API 579 na koji se autor rada i pozivao. U najkritičnijem slučaju do otkaza posude nije došlo, samim time rezultati su i po ANSYS-u i API 579 prihvatljivi. Treba imati u vidu da je u ovom konkretnom slučaju proračun prema standardu API 579 konzervativniji i na strani sigurnosti.



Slika 2.1: Tečenje materijala 355 J2 G3 [3]

Sedmak i saradnici [7] u svojoj studiji prikazuju poređenje raspodele napona i deformacija u preklopnim zavarenim spojevima različite geometrije posude pod pritiskom za transport amonijaka. Ovaj rad se bavi raspodelom napona na i oko zavarenih spojeva. U tu svrhu su razvijena dva numerička modela zasnovana na metodi konačnih elemenata (MKE). Modeli su opterećeni na zatezanje i dobijeni rezultati napona i deformacije su upoređeni kako bi se utvrdilo u kojoj meri

razlike u dimenzijama zavarenog spoja utiču na njegovo ponašanje. Maksimalni naponi u oba slučaja su iznosili 452 MPa and 459 MPa, što se može videti na slici 2.2. Naponi su maksimalni na mestima gde je i očekivana najveća vrednost usled prisustva koncentrataora, odnosno na mestima promene geometrije zavarenog spoja. Ova mesta predstavljaju i najveću opasnost od pojave prsline.

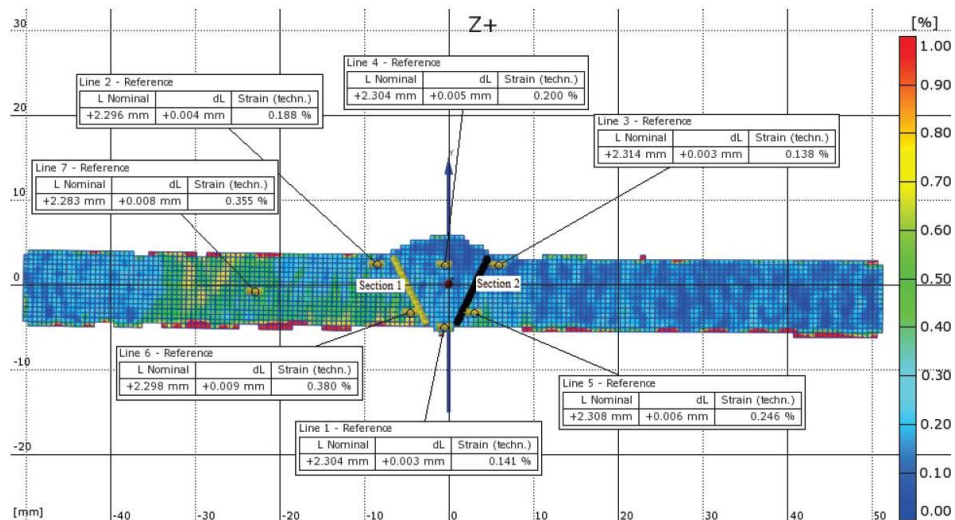


Slika 2.2: Raspodela napona u a) prvom modelu; b) drugom modelu [5]

Autori gore prikazane studije su na adekvatan način pokazali u kojoj meri i koliko geometrija zavarenog spoja utiče na raspodelu napona i deformacije, što može dovesti do pojave loma i otkaza zavarene konstrukcije. Jedini nedostatak ove studije je što nisu u obzir uzeti parametri zavarivanja koji mogu dovesti do promene mehaničkih svojstava zavarenog spoja. A to može dovesti do pojave dodatnih nepravilnosti (grešaka) u samom zavarenom spoju. Najčešće su to nalpljivanja kao posledica geometrije spoja za zavarivanje. U spojevima sa prikazanom geometrijom, nalepljivanja su očekivana pojava.

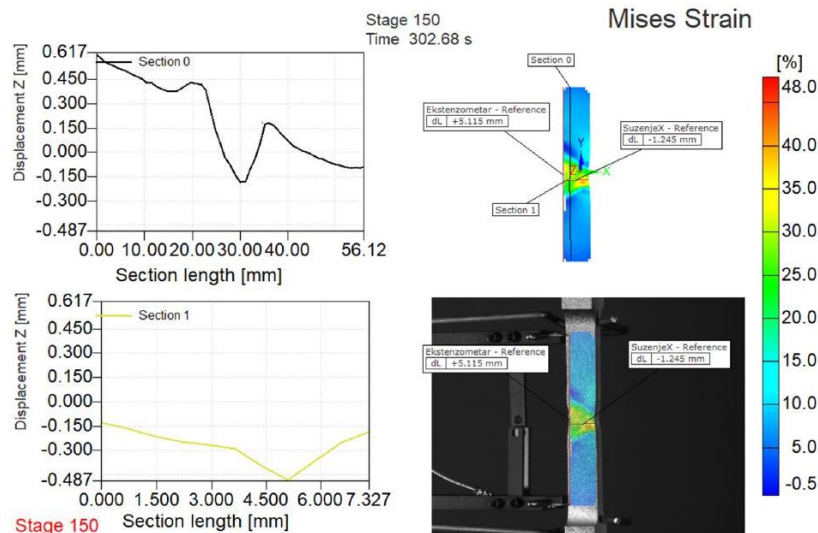
## 2.3 Primena metode DIC u ispitivanju zavarenih spojeva

Zavareni spojevi su u konstrukciji tretirani kao kritična mesta zbog nehomogenosti i anizotropije samog zavarenog spoja. Milošević u svom radu [8] smatra da je zavareni spoj mesto koncentracije napona i samim tim smanjuje nosivost cele konstrukcije. Zbog pomenutih problema poželjno je da zavareni spoj bude boljih mehaničkih osobina od osnovnog materijala. Zavarenih spoj je napravljen sa gorepomenutim “*overmatching*” efektom. Ovim radom je obuhvaćeno merenje deformacija “*overmatching*” zavarenog spoja metodom DIC kao tehnikom kojom je moguće odrediti a raspodele napona. Analizom je utvrđeno da u zavarenom spoju koji nema nepravilnosti (greške) koncentracija napona nema nikakav uticaj na mesto zavarenog spoja sa aspekta integriteta same konstrukcije. Ponašanje lokalnih zona zavarenog spoja kao i njihov međusobni uticaj je jedan od najvećih problema za integritet konstrukcije, tačnije problem leži u odedivanju mehaničkih svojstava ZUT-a. U svom radu Milošević zajedno sa svojim saradnicima [9] računa lokalne deformacije (ponašanje lokalnih zona zavarenog spoja) i pomeranja metodom DIC. Uzorci su ispitani na jednoosno zatezanje. Dve kamere su korišćene za snimanje pomeranja i deformacija. U samom radu je predstavljena primena stereometrijskih metoda korišćenjem ARAMIS softvera u cilju merenja lokalnih deformacija i pomeranja zavarenog spoja pod uticajem jednoosnog zatezanja. Dobijeni rezultati ukazuju na različite vrednosti deformacija lica i korene strane šava zavarenog spoja, dok je najveća koncentracija napona u korenu šava, prikazana na slici 2.3.



Slika 2.3: Raspodela deformacija na ispitnoj epruveti izmerena ARAMIS-om u studiji Miloševića i saradnika [9]

Jounis je sa svojim saradnicima [10] odredio krivu napon-deformacija za čelik komercijalnog imena Niomol 490K primenom merode konačnih elemenata uz pomoć DIC metode merenja deformacija i pomeranja. Dobijeni rezultati primenom MKE su potom upoređivani sa eksperimentalnim rezultatima. Glavni cilj ovog upoređivanja je nalaženje razlika i adekvatne korekcije numeričkih modela, u adekvatnom broju koraka kako bi se razlike smanjile između eksperimentalnog ispitivanja i numeričkog modela smanjile. Zaključak studije je da je proces sam po sebi brz i efikasan, da su u dovoljna samo tri koraka kako bi se dobili jako slični rezultati, a generalno sam pristup kombinacije stereometrije i MKE-a je efikasan za određivanje koncentracije napona u zonama zavarenog spoja. Ova analiza je dala osnov ispitivaje epruveta sa greškama. Prvi korak u istraživanju predložene metode je određivanje stvarnih kriva napon – deformacija pancirnog čelika ArmoX 500T. Milošević sa svojim saradnicima [11] je prikazao ispitivanje jednoosnim zatezanjem na martenzitnom čeliku. Suština metode je da koristi analitičke relacije za dobijanje stvarnog napona i to korišćenjem stereometrijske metode snimanjem deformacija i pomeranja na ispitivanim uzorcima pomoću stereo kamera, a zatim primenom MKE u cilju određivanja naponskog stanja. Koncentracija napona u ovom radu je dobijena numerički upotrebom softverskog paketa ABAQUS. Metodom konačnih elemenata je analiziran model sa vrednostima deformacija koje su izmerene stereometrijskom metodom. Kao direktan nastavak na predhodni rad, Milošević je u svojoj sledećoj studiji [12] prikazao novu predloženu metodologiju za određivanje stvarne krive napon-deformacija, koji je zasnovan na paralelnoj upotrebi analitičkih jednačina u kombinaciji sa numeričkim i eksperimentalnim rezultatima. Prvi korak je bio taj da se upotrebom DIC metode odredi pravi dijagram napon – deformacija i to zamenom opšte poznate analitičke jednačine izmerenim vrednostima. Tipičan prikaz merenja je dat na slici 2.4. Posle toga se pristupilo određivanju koncentracije napona korišćenjem novog metodološkog pristupa koji je baziran na gorepomenutim jednačinama i potvrdu istog pristupa numeričkom simulacijom metodom konačnih elemenata (MKE). Suština ovakve metodologije je bilo uvođenje faktora koncentracije napona u sam process određivanja napona. Ovaj pristup je potom primenjen na određivanje prave krive napon – defrmacija i na zavarenom spoju u kojima metal šava ima niže mehaničke karakteristike nego osnovni materijale (*eng. undermatching*) različitih geometrija i osnovnih materijala. Nova predložena metoda je uopštena tj., ne zavisi od vrste osnovnog materijala i geometrije zavarenog spoja.

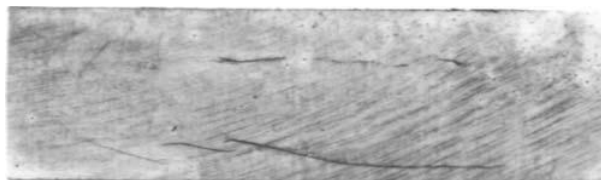


Slika 2.4: Merenja deformacija i pomeranja primenom softverskog paketa ARAMIS od strane Miloševića i saradnika [12]

U svim gore-pomenutim radovima prikazana je primena softverskog paketa ARAMIS tokom merenja deformacija i pomeranja uzoraka tokom ispitivanja, kao i primenu MKE. U obrađenim studijama pokazano je na koji način deformacije i pomeranja usled jednoosnog zatezanja utiču na integritet zavarenog spoja, što je i potvrđeno i primenom MKE. Goreopisane studije su pružile određene smernice i značajan doprinos u razumevanju problematike ove doktorske disertacije. Može se istaći da je ostavljen prostor u istraživanju uticaja nedozvoljenih grešaka u zavarenim spojevima i njihov uticaj na celokupni integritet zavarene konstrukcije. Takođe ovi radovi su dali izvornu ideju što se tiče metoda koje će biti korišćene u ovoj doktorskoj disertaciji.

## 2.4 Uticaj grešaka na koncentraciju napona u zavarenom spoju

Jovičić je u ovom radu [13] imao za cilj da analizira posudu pod pritiskom za skladištenje tečnog ugljen-dioksida, na kojoj su pronađene prslinice IBR metodama. Predmet ispitivanja je bio određivanje uticaja ovih prslinica na sam integritet posude pod pritiskom, tačnije uticaj koncentracije napona. Zavareni spoj na kome je pronađena prslinica je urađen elektro-lučnim zavarivanjem pod praškom (EPP postupak). Sa aspekta kriterijuma prihvatljivosti grešaka u zav. spojevima, posle redovnog ispitivanja IBR metodama pronađene su 3 prslinice, ali prema tadašnjem relevantnom standard, samo jedna je uzeta kao prava (slika 2.5).

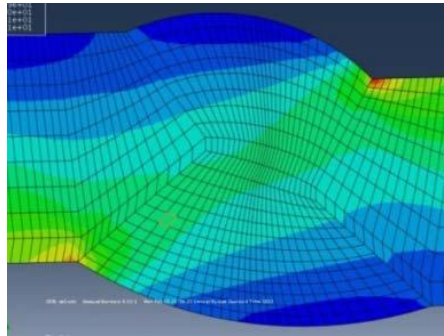


Slika 2.5: Prslinice na rezorvoaru za skladištenje tečnog ugljen-dioksida [13]

Dužina prslinice je iznosila 60mm, a maksimalna dubina koja je izmerena ultrazvučnom metodom je 3 mm. Pored pomenute kontinualne prslinice, izmereno je i nadvišenje od 5 mm, što je nedozvoljeno za ovaj slučaj. Sve dimenzije zajedno sa nepravilnostima (greškama) koje su dovele do pojave prslinice. U radu je analiziran uticaj koncentracije napona MKE (slika 2.6). Simulacijom je uočeno da se koncentracije napona javljaju na mestima na kojima su i očekivana, što je rezultat same geometrije zavarenog spoja, kao i prisustva prslinice. Na osnovu prikazanih rezultata se može se videti da je prisustvo prslinice dovelo do koncentracije napona koji prevazilaze vrednost napona

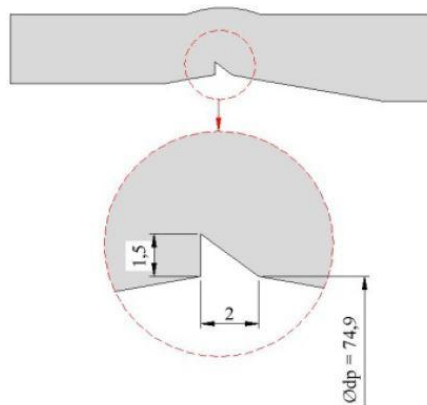


tečenja materijala. Maksimalna koncentracija napona na mestu oko greške iznosi 662 MPa dok napon tečenja osnovnog i dodatnog materijala iznosi oko 450 MPa.



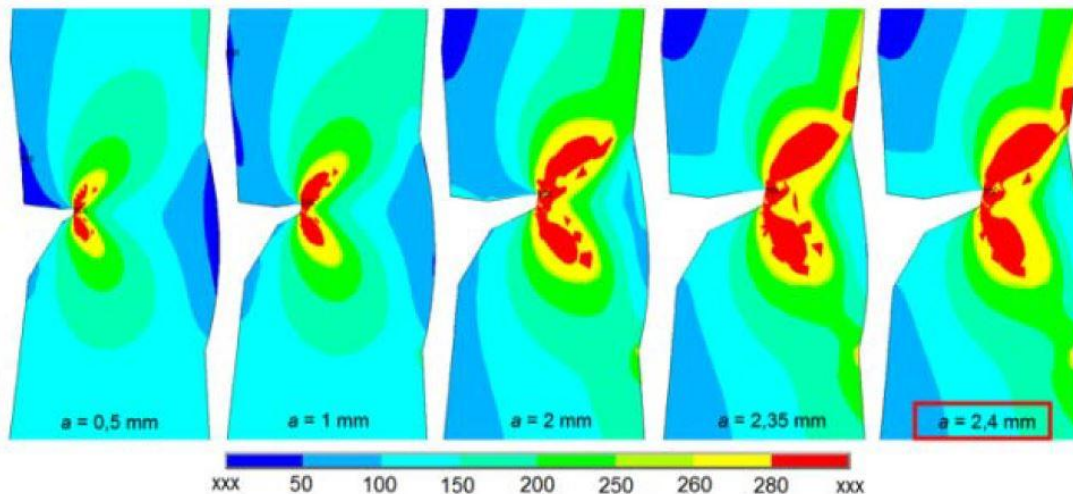
Slika 2.6: Koncentracija i raspodela napona na numeričkom modelu u radu [13]

Ovim radom uzet je u obzir uticaj dveju grešaka u zavarenom spoju, grešku tipa nadvišenja i grešku tipa prsline. U studiji se jasno se uočava njihov međusobni uticaj u kojoj nadvišenje predstavlja konzentator napona i dovodi do pojave i širenja prsline. Pored uočene međusobne zavisnosti 2 tipa greške u zavaranom spoju, ovaj rad je otvorio neka nova pitanja, među kojima se mogu izdvojiti 2 najvažnija: na koji način korelacija 2 greške utiče na vek same konstrukcije i uticaj ostalih parametara koji utiču na ponašanje greške osim geometrije šava. Kozak i njegovi saradnici [14] su razmatrali uticaj greške neprovarenog korena u šavu prema kriterijumima standarda EN ISO 6520-1. Greške u zavarenim spojevima, osnosnonalepljivanje i neprovar su analizirane u sučeonom spoju cevi i kolena. Uočeno je da jedna strana (korenog) zavarenog spoja nije potpuno uvarena. Na slici 2.7 je prikazan izgled neprovarenog korena zavarenog spoja.



Slika 2.7: Izgled i dimenzije zavarenog spoja i greške tipa neprovarenog korena [14]

Osnovni material 10 CrMo 9-10. Analiza naponskog stanja oko vrha greške je urađena primenom MKE. Simulacijama je pokazano da je nakritičnije mesto ono sa koncentracijom napona, odnosno neprovaren koren. Na slici 2.8 je prikazano širenje prsline iz neuvarenog korena. Analizirano je nekoliko različitih dubina, a svi parovi tačaka krive opterećenja se nalaze unutar bezbednosne oblasti FAD (eng. *failure assessment diagram*) dijagrama, pa je stoga potrebno odrediti kritičnu tačku preseka sa krivom otpornosti materijala. Zaključeno je da je pritisci koji dovode do loma jednaki graničnim pritiscima, pa stoga nije potrebno koristiti dodatne metode proračuna. U ovom radu analiziran je uticaj samo jedne greške na integritet konstrukcije.

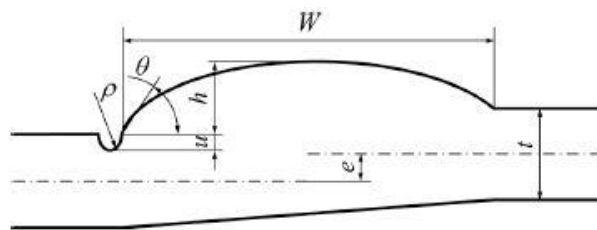


Slika 2.8: Mesto najveće koncentracije napona i širenje prsline [14]

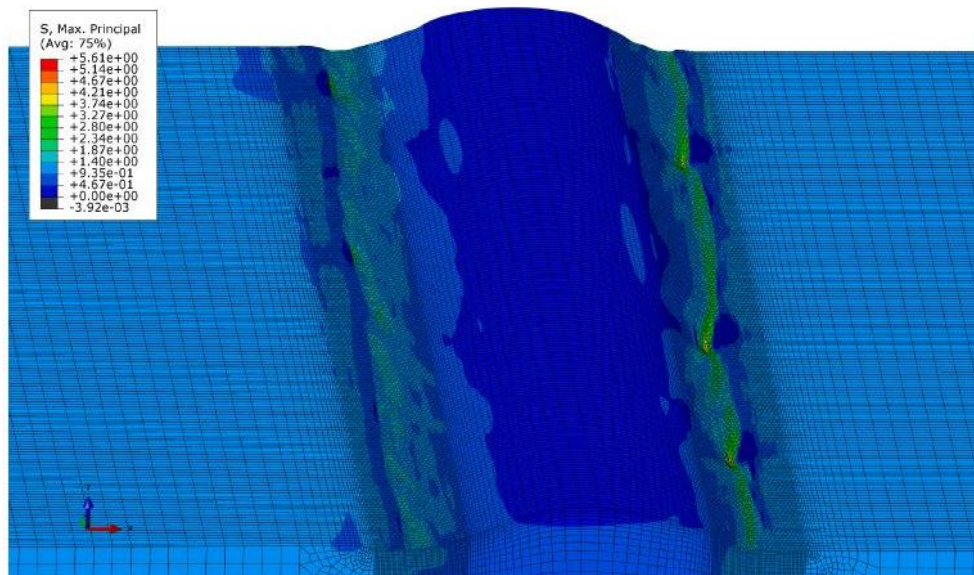
Dimić je sa saradnicima [15] u ovoj studiji analizirao uticaj grešaka u zavarenom spoju na integritet kolena cevi koji su izloženi konstantnom unutrašnjem pritisku. Analiziran je uticaj neprovarenog korena na unutrašnjoj strani cevi koji je otkriven ultrazvučnom metodom ispitivanja. Potom je urađena analiza MKE u softverskom paketu ABAQUS u cilju analize uticaja grešaka tipa neprovarenog korena. Pored toga je metodom konačnih elemenata ispitana rezerva plastičnosti zavarenog spoja kako bi se utvrdila nosivost konstrukcije u slučaju kada površinska greška dovodi do pojave prsline. Zaključeno je da do smanjenja nosivosti konstrukcije dolazi samo u slučaju prisustva prsline koja je inicirana površinskom greškom tipa neprovar. Ovom studijom nisu obuhvaćeni ostali spoljni uticaji koji mogu imati uticaj na dobijene rezultate. Nalepljivanje je još jedna greška koja se jako često javlja u zavarenim spojevima, što je Tušek sa saradnicima obradio u radu [16]. U radu je zaključeno da je nalepljivanje najčešća greška koja se javlja u zavarivanju i da je glavni razlog pojave iste nedovoljan unos toplote prilikom zavarivanja.

I ako je u današnje vreme proces zavarivanja kvalitetan i pouzdan, projektovana geometrija zavarenog spoja se razlikuje od realne u određenoj meri usled toplotnog i dinamičkog efekta samog procesa zavarivanja, što je Otersbok prikazao u svom radu [17]. Te lokalne promene geometrije zavarenog spoja veoma utiču na raspodelu koncentracije napona u samoj konstrukciji zavarenog spoja. Zajed prikazan na slici 2.9 je skeniran 3D skenerom zarad preciznije statističke analize. U ovom radu je predložena metodologija u oceni poluprečnika prelaza osnovnog materijala i metal šava. Štaviše, izvedene vrednosti su upotrebljene kako bi se proračunala odgovarajuća koncentracija napona na raznim lokacijama zavarenog spoja primenom jednačina za aproksimaciju uticaja zareza. Numerički modeli imaju realnu geometriju zavarenog spoja i poređenje jednačina i MKE je pokazalo dobro slaganje za sve modele. Međutim, na mestima sa izraženim zajedima, koncentracija napona je u velikoj meri potcenjena. Stoga je prikazan unapređen pristup čiji je cilj bio da se prošire postojeće jednačine faktora zareza. Rezultati numeričke analize koja je urađena na osnovu skeniranih modela, kao i izgled zavarenih spojeva sa zajednom je prikazan na slici 2.10.

Prikazani pristup za određivanje parametara lokalne geometrije zavarenog spoja može se koristiti za osiguranje kvaliteta u proizvodnji. Osim toga, izvedena aproksimacija za faktor koncentracije napona omogućava mogućnost lokalne procene zamora kritičnih tačaka u zavarenom spoju.

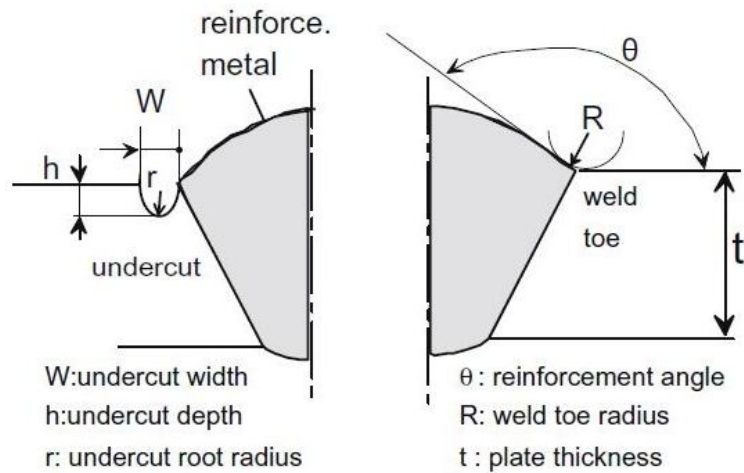


Slika 2.9: Izgled zavarenog spoja sa zajedom koji je skeniran i ispitan [17]

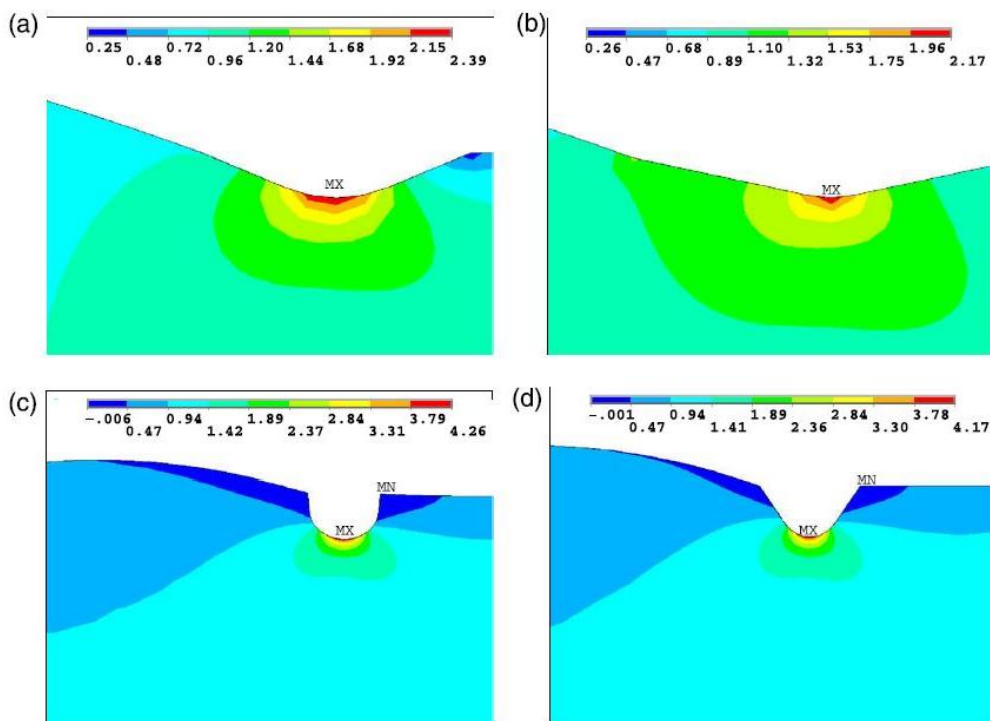


Slika 2.10: Raspodela kocentracije napona na zavarenom spoju sa zajednom [17]

Cerit u svojoj studiji [18] sagledava raspodjelu koncentracije napona u sučeonom zavarenom spoju, u prisustvu grešaka (slika 2.11). Greška prisutna u zavarenom spoju je zajed kome se dubina i radijus vrirani dok je kod nadvišenja menjana vrednost visine, a samim tim i ugao koji zaklapa sa osnovnim materijalom. Ponašanje zavarenog spoja pri jednoosnom zatezanju je ispitano, primarno simulacijom više numeričkih modela primenom MKE. Analizom simuliranih modela MKE utvrđeno je da nadvišenje u zavarenom spoju je vrlo bitan faktor raspodele napona posebno u kombinaciji sa greškom zajedu. Koncentracija napona u greški zajedu raste sa povećanjem dubine i prečnika. Sa smanjenjem ugla između zajedu i nadvišenja dolazi do povećanja koncentracije napona na mestu prelaza između nadvišenja i zajedu prikazanim na slici 2.12. Obe greške deluju kao koncentatori napona na zavareni spoj. Zaključak ove studije je da veće nadvišenje u kombinaciji sa zajedom predstavlja kritično mesto u zavarenom spoju, jer je tu kocentracija napona veća nego u svakom slučaju posebno. Na taj način dobija se mesto koje je podložnije za nastanak prsline, što može uzrokovati lom i otkaz konstrukcije.



Slika 2.11: Parametrii geometrije zavarenog spoja koji su analizirani [18]



Slika 2.12: a) porast koncentracije napona sa povećanjem nadvišenja; b) smanjenje koncentracije napona sa smanjenjem nadvišenja; c) koncentracija napona u zajedu; d) minimalna promena koncentracije napona u zajedu sa povećanjem širine zajedu [18]

Šen [19] u svojoj studiji ističe činjenicu da je prilikom procesa zavarivanja konvencionalnim metodama kod tankih limova teško izbeći inicijalne greške, kao što su savijanje i deformacija materija usled unosa toplote. Najčešći slučaj koji se javlja u praksi po autoru gorepomenute studije je smaknuće. Pimenom novih tehnologija sa manjim unosom toplote, kao što je lasersko ili hibridno-lasersko zavarivanje, ovaj problem se može zaobići. Takođe, na ovaj problem ukazuje i Tomerlin sa svojim saradnicima [20] koji u studiji analizira problem zavarivanja limova debljine 6 mm čelika S690QL. Greške koje prate zavarivanje ovog čelika tehnikama MIG/MAG su najčešće nalepljivanje i neuvarenost korena. Ovaj problem se može izbeći odabirom adekvatnih parametara zavarivanja, kao i odabirom dodatnog materijala, na šta skreće pažnju Odanović [21] u svojoj studiji.

Prikazani radovi analiziraju uticaj pojedinačnih grešaka na integritet zavaraneog spoja i daju dobru analizu koncentracije napona i uticaja grešaka na integritet konstrukcije analizom MKE. Najpre se može istaći studija Cerita [18] u kojem je analiziran uticaj dve greške u zavarenom spoju i njihov međusobni uticaj, kao i uticaj koncentratora napona. Kao i u mnogim drugim studijama, u obrađenim radovima ostavljen je prostor za ispitivanje uticaja drugih grešaka, kao što su smaknuće ili nalepljivanje. Ove greške su takođe prisutne u praksi i to često u kombinaciji sa drugim greškama, što predstavlja uticaj višestrukih grešaka.

### 3. Kontrola kvaliteta, greške i ispitivanje zavarenih spojeva

#### 3.1 Zavarivanje - uvod

Zavarivanje je postupak u kome dolazi do spajanja dva ili više metalnih delova istog ili sličnog hemijskog sastava. Zavarivanjem se stvara nerazdvojiva veza pri kojoj se može koristiti toplotna i mehanička energija sa ili bez dodatnog materijala. Zavarivanje kao proces je jako komplikovan i zahteva znanje iz više naučnih oblasti (metalurgija, mehanika itd). Kao posledica delovanja toplotnog izvora prilikom zavarivanja odvijaju se toploni procesi koji tope dodatni i deo osnovnog materijala stvarajući metalnu kupku. Kao posledica tog procesa (topljenja i očvršćavanja prilikom procesa zavarivanja) javljaju se, kako termičke, tako i razne fizičko-hemijske reakcije koje menjaju strukturu metala šava i zone uticaja toplote, dok se kao posledica toga javljaju zaostali naponi (ali i deformacije). Zbog svega navedenog, zavarivanje se tretira i kao naučna i kao stručna disciplina istovremeno. Pošto pomenute pojave proučavaju posebne faktore počevši od samog toplotnog izvora preko raspodele temperature (vremenske i prostorne), kao i brzine hlađenja zavarenog spoja i stepena mešanja osnovnog i dodatnog materijala, zavarivanje zahteva poznavanje velikog spektra naučno – inženjerskih disciplina. Pored toga, ova oblast iziskuje poznavanje relevantnih standarda i propisa kako bi se u što većoj meri izbegla pojava nepravilnosti (grešaka) u zavarenim spojevima koja može umnogome smanjiti životni vek konstrukcije i dovesti do otkaza iste [22-24].

#### 3.2 Kontrola kvaliteta zavarenih spojeva

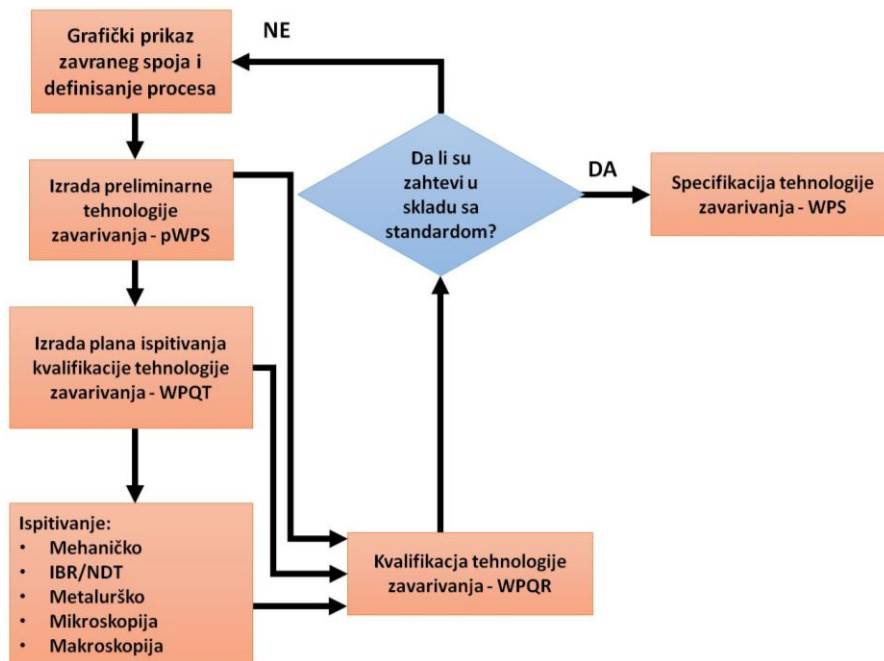
##### 3.2.1 Uvod u kontrolu kvaliteta

Zavarivanje je samo po sebi jako složen postupak i zahteva adekvatnu kontrolu kvaliteta odgovarajućim ispitivanjima pre, tokom i nakon procesa zavrivanja. Standard SRPS EN ISO 3834 [25] obuhvata sve zahteve koje treba ispuniti u fazama izrade konstrukcija da bi se ispoštovao kvalitet proizvoda. Cilj ovog standarda je da prepozna sve faktore koji utiču na kvalitet zavarenog spoja. Standard se sastoji iz šest delova:

1. Kriterijumi za izbor odogovarajućeg nivoa zahteva kvaliteta
2. Opšti zahtevi kvaliteta
3. Standardni zahtevi kvaliteta
4. Osnovni zahtevi kvaliteta
5. Dokumenti sa kojima je nepohodno usaglasiti tvrdnju i usaglasenosti zahteva kvaliteta ISO 3834 – 2, ISO 3834 – 3 ili ISO 3834 – 4
6. Upustva za implementaciju ISO 3834

##### 3.2.2 Specifikacija tehnologije zavarivanja – WPS (eng. *Welding procedure specification*)

WPS je dokument koji ima za cilj da osigura pouzdanost veza svih promenljivih koji imaju uticaj na određenu primenu i da ih detaljno opiše. U praksi većina nepravilnosti (grešaka) nastaje usled neadekvatnog pridržavanja propisane tehnologije zavarivanja. WPS predstavlja osnovu za planiranje kako samog procesa zavarivanja tako i kontrole. Opšta pravila za specifikaciju tehnologije zavarivanja za metalne materijale su obuhvaćeni standardom SRPS EN ISO 15607 [26], dok SRPS EN ISO 15609 [27] definiše okvire za specifikaciju tehnologije elektrolučnog zavarivanja za metalne konstrukcije. WPS koji nije “prošao” kvalifikaciju, već ima samo specifikaciju, je pWPS (eng. *preliminary welding procedure specification*). A to zapravo označava probnu specifikaciju tehnologije zavarivanja. Na slici 3.1 ispod je prikazan algoritam kako se WPS kvalifikuje.



Slika 3.1: Algoritam kvalifikacije WPS-a

Informacije koje WPS lista mora da ima su sledeće:

- Identifikacija proizvođača i specifikacije tehnologije zavarivanja
- Pozivanje na uverenje o kvalifikaciji tehnologije zavarivanja
- Vrsta osnovnog materijala (može da obuhvati grupu) po mogućnosti povezivanjem na odgovarajući standard
- Mere materijala (debljina materijala, spoljašni prečnik cevi)
- Postupak zavarivanja (prema SRPS ISO 4063 [28])
- Priprema spoja (raspored zavara u šavu, šema geometrije pripreme)
- Položaj zavarivanja (prema SRPS ISO 6947 [29])
- Priprema žljeba ili ivica (obrada stranice, čišćenje, podešavanje)
- Tehnika zavarivanja (bez ili sa njihanjem, maksimalna širina zavara, ugao nagiba pištolja, elektrode ili žice)
- Žljebljenje korene strane
- Dodatni materijal (oznaka, naziv proizvođača, mere, brzina dovođenja žice)
- Rukovanje dodatnim materijalom i praškom)

WPS-om se obezbeđuje osnova za ispunjenje zahteva kvaliteta zavarenog spoja. Naravno, odstupanja od propisane WPS liste, kao na primer nepravilnosti (greške) mogu biti tolerisani ako se ustavni naknadnim ispitivanjima metodama bez razaranja da su prihvatljivi. Najveći problem predstavljaju metalurške greške. Metodama bez razaranja nije moguće ispitati mehaničke osobine materijala. SRPS EN ISO 15607 iz tog razloga postavlja zahteve za proveru pre kvalifikacije tehnologije zavarivanja, a samim tim i pre nego što se propisani WPS upotrebi.

### 3.2.3 Kvalifikacija procedure tehnologije zavarivanja WPQR (eng. *Welding procedure qualification report*)

WPQR predstavlja dokument (specifikaciju) za koji su izvršena potrebne provere same tehnologije zavarivanja po standardu SRPS EN ISO 15607. Specifikacija mora da sadrže sve relevantne podatke koji se tiču zavarivanja ispitnog uzorka, kao i rezultate ispitivanja pomenutog ispitnog uzorka. Standardom SRPS EN ISO 15614 [30] se utvrđuju sve metode koje su potrebne za

kvalifikaciju tehnologije zavarivanja. Kvalifikacije se mogu potvrditi jednom od sledećih tipova dokumentacije:

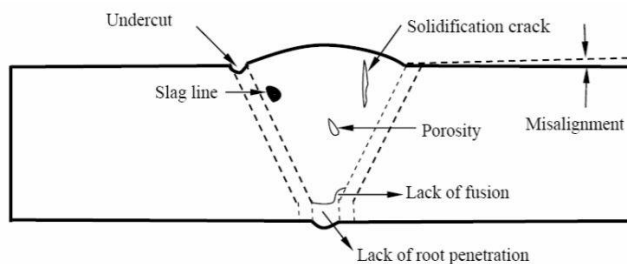
- Prethodno iskustvo u zavarivanju
- Provereni potrošni materijali
- Proba tehnologije zavarivanja
- Standardna tehnologija zavarivanja
- Proba zavarivanja pre početka proizvodnje

### 3.3 Nepravilnosti u zavarenim spojevima

Zavarenu konstrukcija je nemoguće napraviti bez nepravilnosti i grešaka, ali bitno je razlikovati termine vezano za njihovo prisustvo [31]:

- Greška
- Diskonuitet
- Oštećenje

Zavisno od postupka zavarivanja, samim tim i različitosti parametara zavarivanja, kao i položaja i strukture osnovnog i dodatnog materijala, neminovno će doći do pojave nepravilnosti (slika 3.2). Neophodno je uzeti u obzir veliki broj faktora da bi pojava nepravilnosti u spojevima svela na minimum [32]. Pod nepravilnošću se podrazumeva svako odstupanje od projektovanog zavarenog spoja. Pod pojmom greške se podrazumeva nepravilnost koja je neprihvatljiva po adekvatnom standardu vezanom za kriterijume prihvatljivosti, koji se razlikuju međusobno u zavisnosti od metode ispitivanja. Postoji više kategorija grešaka, a sve zajedničko za njih je da dovode do smanjenja nosivosti, samim tim smanjuju upotrebljivost konstrukcije. Iskustva u praksi su dokazala da prethodna tvrdnja može biti pobijena. Iz tog razloga je jako bitno analizirati greške u zavarenim spojevima od slučaja do slučaja. Greške se uglavnom moraju reparirati, što predstavlja proces koji može koštati mnogo i zahtevati dosta vremena za njegovo sprovođenje [22, 33-36]. Treba znati da nepravilnost predstavlja nehomogenost u strukturi materijala i ne mora neminovno biti greška, dok oštećenje predstavlja narušavanje osnovnog stanja zavarenog spoja tokom radnog veka smanjujući mu radni vek [19, 37].



Slika 3.2: Potencijalne nepravilnosti prilikom zavarivanja sučeonih spojeva [31]

#### 3.3.1 Klasifikacija nepravilnosti (grešaka) u zavarenim spojevima

Kao što je ranije pomenuto, svaki postupak zavarivanja je sklon pojavi nepravilnosti, jer se osobine osnovnog i dodatnog materijala (mehaničke, hemijske itd) mogu poprilično razlikovati po zonama zavarenog spoja. Spojevi izvedeni različitim postupcima mogu imati nepravilnosti karakteristične za te postupke. Nepravilnosti u elektrolyčno zavarenim spojevima se mogu razvrstati u tri velike grupe:

- Projektne
- Zavarivačke
- Metalurške.



Projektne nepravilnosti uključuju probleme koji se odnose na detalje projekta i konstrukcije, za pogrešno odabranu pripremu žljeba za datu primenu ili neželjene promene u poprečnom preseku. Metalurške se odnose na promene u metalu osnovnog i dodatnog materijala, dok zavarivačke nepravilnosti odnose na greške nastale tokom zavarivanja i uglavnom su izazvane ljudskim faktorom.

Nepravilnosti u zavarenim spojevima i njihov obim uglavnom zavise od primenjenog procesa zavarivanja, primenjene metode ispitivanja, tipa izvedenog zavarenog spoja, pripreme žljeba, upotrebljenog materijala, uslova rada i atmosferskih uticaja. Česta je pojava da određene specijalne procese zavarivanja prate diskontinuiteti svojstveni samo njima. Da bi se nepravilnosti lakše klasifikovale i identifikovale, u standardu koji služi za klasifikaciju grešaka SRPS EN ISO 6520-1 [38] tipovi grešaka su definisani crtežom i opisom.

Osnove brojanog sistema označavanja, po kome su u standardu podeljeni tipovi grešaka, utvrđuje naziv i klasifikaciju nepravilnosti (grešaka) za zavarene spojeve izvedene topljenjem metala. Greške (nepravilnosti) su svrstane u šest grupa i to:

- Prsline (100)
- Šupljine (200)
- Čvrsti uključci (300)
- Nespojena mesta i neprovar (400)
- Greške oblika i dimenzija (500)
- Razne nesavršenosti (600)

### 3.3.2 Kriterijumi prihvatljivosti zavarenih spojeva

Standard SRPS EN ISO 5817 [1] određuje kriterijum prihvatljivosti nepravilnosti (grešaka) u zavarenim spojevima čelika za procese elektrolučnog zavarivanja. Prisustvo višestrukih grešaka istog tipa ukazuje (u teoriji) na mogućnost prisustva pojedinačnih grešaka isključivo istog tipa. U slučajevima kada se takva situacija dogodi, zbir dozvoljenih nepravilnosti (grešaka) po pravilu mora biti ograničen vrednostima po zadatih kriterijuma prihvatljivosti (odnosno, nivoa kvaliteta). Kriterijum prihvatljivosti po pravilu definiše odgovorni projektant u dogovoru proizvođačem, korisnikom i/ili zainteresovanim trećim licem. Poželjno je i preporučljivo da se kriterijumi prihvatljivosti “dogovore” pre početka proizvodnje, u najboljem slučaju tokom izrade ponude i ugovaranja. Svrha kriterijuma prihvatljivosti je uvođenje osnovnih podataka koje služe kao polazna osnova. Kriterijumi prihvatljivosti (tabela 3.1) se odnose na tipove odnosno vrstu zavarenih spojeva u proizvodnji. Iz pomenutog razloga potrebno je različite nivoe kvaliteta primeniti za pojedinačne zavarene spojeve u istom proizvodu ili mašinskom delu.

Tabela 3.1: Oznake kriterijuma prihvatljivosti zavarenih spojeva

Oznaka kriterijuma prihvatljivosti	Nivo kvaliteta
D	Slab
C	Srednji
B	Strog

Kriterijum prihvatljivosti koji se koristi mora da sagleda više stvari koje utiču na zavareni spoj i to: projektni crtež, naknadnu obradu, vrstu opterećenja koju će konstrukcija trpeti, radne uslove, i posledice po konstrukciju usred otkaza. Pored navedenih faktora, i ekonomski aspekt igra jako važnu ulogu i treba da obuhvati pored troškova zavarivanja i troškove kontrole, ispitivanja i popravke. Nepravilnosti (greške) se navode prema stvarnim dimenzijama, a njihovo otkrivanje i ocena mogu zahtevati primenjivanje više od jedne metode ispitivanja bez razaranja. Otkrivanje i merenje veličine grešaka zavisi je od metode inspekcije i obima ispitivanja određenog standardom primene ili ugovorom.

Ovi nivoi se odnose na kvalitet proizvoda, a ne na podobnost za upotrebu gotovog proizvoda. Standard SRPS EN ISO 5817 je standard koji se stalno unapređuje [2, 39, 40] i primenjuje se na:

- nelegirane i legirane čelike
- procese zavarivanja i njihove podprocesse definisane u skladu sa SRPS EN ISO 4063
- vučne, mehaničke i automatske procese
- sve pozicije zavarivanja
- sučeone spojeve, ugaone spojeve i spojeve štapova
- materijale debljine između 3 i 63 mm

### 3.4 Ispitivanje zavarenih spojeva

Ispitivanja zavarenih spojeva se mogu podeliti u dve grupe, a to su:

- ispitivanje bez razaranja (IBR)
- ispitivanje sa razaranjem

#### 3.4.1 Osnove metoda ispitivanja bez razaranja

Izbor metode za ispitivanje metodom bez razaranja zavarenih spojeva zavisi od mnogo faktora u koje spada i sama priroda greške, pristupačnost spoja, tip spojenih materijala, kao i broj zavarenih spojeva koje treba ispitati, mogućnost otkrivanja metode za ispitivanje, potreban nivo kvaliteta itd. Bez obzira na izabranu metodu, obavezno je držati se propisanih standarda u cilju dobijanja validnih rezultata ispitivanja [41]. Zbog pomenutih faktora je jako bitno poznavati funkciju i značaj zavarenog spoja u konstrukciji i spram toga dati procenu, kao adekvatan obim i vrstu kontrole. Ovim ispitivanjima potrebno je ispitati pouzdanost spoja, ali i konstrukcije. Međutim, potrebno je obratiti i pažnju na ekonomičnost i cenu primenjenih ispitivanja.[23]. Često primenjivanje IBR metoda se može sresti prilikom ocenjivanja sigurnosti zavarenih konstrukcija, poput posuda pod pritiskom sa prslinom u zavarenim spojevima [42, 43].

IBR metode se mogu podeliti u 2 grupe, a to su metode kojima je moguće odrediti površinske i zapremisne greške. U površinske metode spadaju:

- Vizuelno ispitivanje
- Ispitivanje penetrantima
- Ispitivanje magnetima

U zapreminske metode spadaju:

- Ispitivanje ultrazvukom
- Ispitivanje radiografijom
- Ispitivanje vrtložnim strujama
- Ispitivanje probnim pritiskom
- Ispitivanja akustičnim emisijama

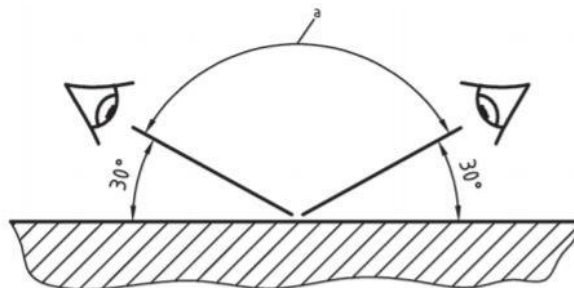
Primena IBR metoda na zavarenim spojevima ima za cilj:

- Kontrolu kvaliteta, koja predstavlja praćenje osobina zavarivača i opreme i kvaliteta potrošnih i osnovnih materijala u upotrebi
- Prihvatanje ili odbacivanje zavarenog spoja prema njegovoj podobnosti za upotrebu u radnim uslovima konstrukcije.

U daljem tekstu biće predstavljene metode IBR koje su primenjene na ispitnim uzorcima u ovoj doktorskoj disertaciji, a to su vizuelno ispitivanje i radiografsko ispitivanje.

### 3.4.1.1 Vizuelno ispitivanje

Vizuelno ispitivanje (eng. *visual testing* – u budućem tekstu VT) se smatra ulaznom metodom IBR kojom se prati odstupanja od projektovanog oblika zavarenog spoja, odnosno uočavanje grešaka posmatranjem. Standard koji propusuje metode i tehniku ove kontrole je definisan standardom SRPS EN ISO 17637 [44]. Prednosti ove metode ispitivanja je ta što je lako izvodljiva, ne košta puno, a samim tim je jedina uvek obavezna IBR metoda. Zbog svega navedenog VT predstavlja prvi korak kontrole u slučaju kada se koristi više metoda IBR, jer se u praksi pokazalo da primena ove metode jako često smanjuje obim ostalih ispitivanja, pružajući pružajući uštedu u novcu i vremenu.



Slika 3.3: Ilustracija vizuelnog ispitivanja [44]

Kao što je na slici 3.3 prikazano, ugao posmatranja spoja mora biti minimum  $30^\circ$ , dok rastojanje treba biti do 600 mm, preporučeno osvetljenje je 500 lx.

Pored ljudskog oka kao mernog instrumenta, potreban je i dodatni alat za ispitivanje i merenje nepravilnosti zavarenih spojeva, vizuelno ispitivanje zavarenih spojeva metodom bez razaranja može biti direktno i indirektno. U pomoćni alat za ispitivanje direktnom metodom spadaju:

- Lenjir ili merna traka
- Pomično merilo sa nonijusom
- Merni listići
- Radijus šabloni
- Lupa

Za indirektno ispitivanje zavarenih spojeva takođe može biti korišćena sledeća oprema:

- Uređaj za merenje profila sa žicom
- Material za uzimanje hladnog otiska zavarenog spoja
- Ogledala, endoskopi, boroskopi, optička vlakna (tv kamere)

Pored alata za merenje nepravilnosti na zavarenim spojevima, prilikom vizuelnog ispitivanja zavarenih spojeva neophodan pribor je:

- Luksmetar - uređaj za detektovanje osvetljenja prilikom ispitivanja
- Lampa - ako nema dnevne svetlosti ili je slaba
- Dobar vid (ispitivači se proveravaju svake godine)
- Procedure i uputstva za ispitivanje

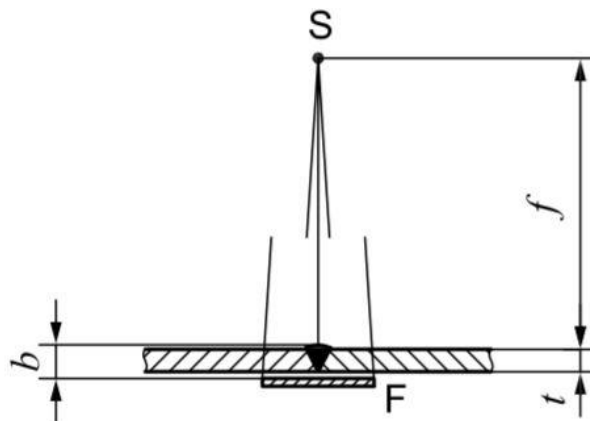
### 3.4.1.2 Radiografsko ispitivanje

Radiografija (eng. *radiographic testing* – u daljem tekstu RT) je metoda IBR koja radijacijom prozračava ispitivane zavarene spojeve i na taj način detektuje nepravilnost (grešku) u samom spoju kao i osnovnom materijalu. Za RT se kao izvor koristi iks ili gama-zraci, a uočljivost grešaka zavisi primenjene radiografske tehnike.

SRPS EN ISO 5579 [45] objašnjava osnovna pravila i tehničke procedure za dobijanje dobrog kvaliteta radiograma. Kvalitet radiograma ne može biti u potpunosti potvrđen korišćenjem indikatora kvaliteta slike (*eng. image quality indicator - IQI*).

SRPS EN ISO 17636 [46] treba da osigura dobijanje ponovljivih rezultata u praksi i time omogući lakše tumačenje dobijenog radiogramskih snimaka sa ciljem da se obezbede rezultati koji su pouzdani i ekonomični. Tehnike koje se koriste su zasnovane, kako na opšte prihvaćenoj praksi, tako i na teoriji.

Između izvora zračenja i ekrana ili filma postavlja se ispitivani uzorak (primer je dat na slici 3.4). Metoda ispitivanja se naziva metoda vizuelnog prozračavanja ako se koristi ekran, a ako se koristi film (filmska emulzija) naziva se fotografska metoda. U industriji se najčešće može sresti fotografska metoda. Osnova fotografske metode određivanja indikacija, koji može predstavljati grešku, sastoji se u dobijanju slike prozračenog uzorka u obliku filma ili fotografije. Zbog svojih prednosti prevashodno zbog velike osetljivosti metode (otkrivanje indikacija) i mogućnosti arhiviranja snimaka, ova metoda je najrasprostranjenija metoda prozračavanja. Svaka indikacija koja se uoči u materijalu pokazuje se na filmu kao zacrnjenje. Kvalitet snimka zavisi od jačine zračenja, rastojanju izvora, debljini materijala koji se prozračava i naknadnoj obradi filma. U naknadnu obradu filma spadaju aktivnosti od razvijanja filma do sušenja istog. Nivo prihvatljivosti za indikacije otkrivene u materijalu radiografijom je određen standardom SRPS EN ISO 10675-1 [47] i dat je u tabeli 3.2.



Slika 3.4: Prozračavanje sučeonog zavarenog spoja (S-izvor,  $f$ -rastojanje od izvora,  $b$  – debljina ispitivanog spoja, F- film,  $t$  – rastojanje od filma do ploče) [46]

Radiografske tehnike se dele u dve klase:

- klasa A: osnovne tehnike
- klasa B: poboljšane tehnike

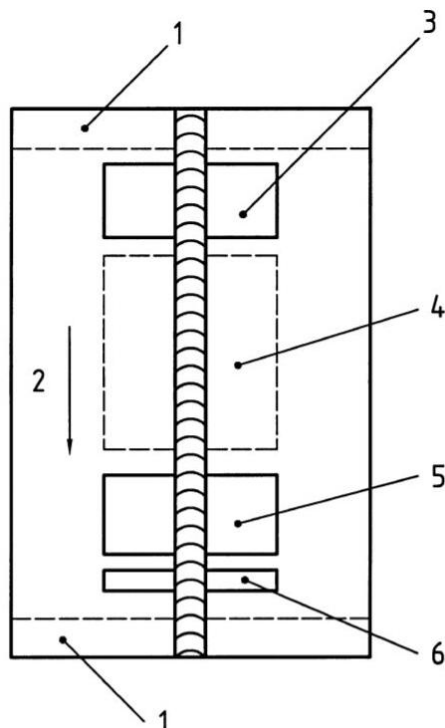
Tabela 3.2: Ocene kriterijuma prihvatljivosti za radijografska ispitivanja

Kriterijumi prihvatljivosti prema SRPS EN ISO 5817	Tehnike ispitivanja i nivoi prema SRPS EN ISO 17636	Nivoi prihvatljivosti prema SRPS EN ISO 10675
B	B	1
C	B	2
D	A	3

### 3.4.2 Osnove metoda ispitivanja razaranjem (mehanička ispitivanja)

Osnova po kojem su urađena ispitivanja u eksperimentalnom delu ove doktorske disertacije, kao što je već ranije pomenuto, je standard za kvalifikaciju tehnologije zavarivanja SRPS EN ISO 15614 [30]. Ovim standardom definisan je postupak i plan uzimanja i sečenja uzoraka namenjenih

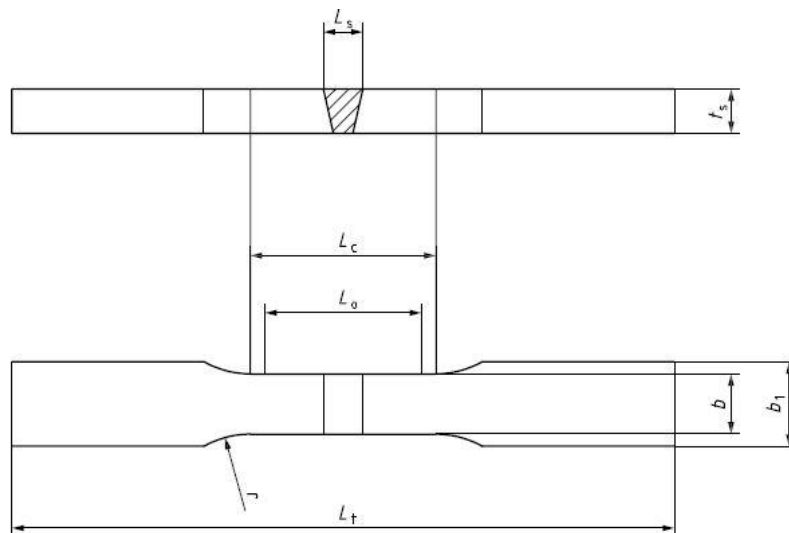
za određenu vrstu mehaničkih ispitivanja, što je prikazano na slici 3.5 u skladu sa datim standardom ispitivane na zatezanje, savijanje, žilavost, mikro i makro struktura i ispitivanje tvrdoće.



Slika 3.5: Lokacije sa ploče sa kojih se vade odgovarajuće epruvete za ispitivanje: 1. Deo koji se odbacuje – širina 25 mm, 2. Pravac zavarivanja, 3. Epruvete za zatezanje i savijanje, 4. Epruvete za ispitivanje žilavosti i ostala ispitivanja, 5. Epruvete za zatezanje i savijanje, 6. Epruvete namenjene za ispitivanje tvrdoće, mikro i makro strukture [30]

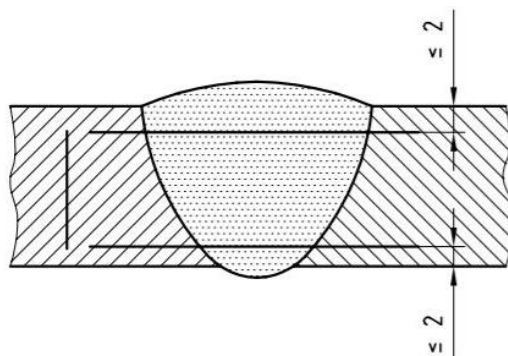
Standard SRPS EN ISO 15614 predviđa da, pre nego što se pristupi vađenju epruveta za ispitivanje metodama sa razaranjem iz zavarenih ploča, ploča mora biti ispitana IBR metodama: vizuelnom metodom u obimu od 100 %, jednom proizvoljnom površinskom metodom ( magnetnim česticama ili penetratnima) takođe u obimu od 100 %, kao i jednom zapreminskom metodom u obimu od 100%. Sam standard zahteva minimum dve epruvete za ispitivanje zatezanjem, minimum 4 epruvete za ispitivanje savijanjem, 2 epruvete za ispitivanje žilavosti, ispitivanje tvrdoće i mikro i makro strukture.

Ispitivanja jednoosnim zatezanjem se sprovode prema standardu SRPS EN ISO 4136 [48]. Epruvete se vade iz zavarenih ploča na takav način da posle mašinske obrade zavareni spoj bude na sredini epruvete (slika 3.6). Takođe, tokom procesa sečenja epruveta veoma je bitno voditi računa da se ne naruše mehaničke karakteristike zavarenog spoja velikim unosom toplote. Svaka epruveta je označena kako bi mogla da se prati sledljivost, odnosno praćenje epruveta od momenta sečenja iz ploče do ispitivanja. Posle ispitivanja epruveta do loma, prelomne površine istih treba ispitati. Ukoliko se na prelomnoj površini ispitnih epruveta uoče nepravilnosti, iste treba pravilno označiti. Rezultati ispitivanja se utvrđuju u skladu sa standardom SRPS EN ISO 6892 [49].

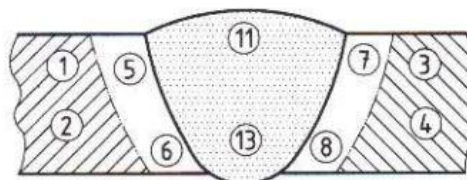


Slika 3.6: Izgled i dimenzije epruvete za zatezanje po standardu ( $L_s$  – širina zavarenog spoja,  $t_s$  – debljina epruvete,  $L_t$  – celokupna dužina epruvete,  $L_c$  – dužina vrata epruvete,  $L_0$  – merna dužina epruvete,  $r$  – poluprečnik,  $b$  – širina vrata epruvete,  $b_1$  – širina epruvete [48])

Tvrdoća se ispituje Vikersovom metodom po opštem standardu SRPS EN ISO 9015 [50], prema skici prikazanoj na slici 3.7. Ispitivanje se sprovodi u metalu šava, u ZUT-u i osnovnom materijalu (slika 3.8) sa ciljem određivanja i utvrđivanja promene tvrdoće duž celog zavarenog spoja. Za materijale debljina većih od 5 mm ispitivanje tvrdoće se mora odraditi na po dva mesta, na 2 mm dubine sa strane lica i korena zavarenog spoja. Vreme od početka primene sile do postizanja ispitne sile ne sme biti manje od 2 sekunde, ali ne veće od 8 sekundi.



Slika 3.7: Ispitivanje tvrdoće Vikers-ovom metodom zavarenih spojeva debljina većih od 5 mm po standard [50]



Slika 3.8: Zone zavarenog spoja – Tačke od 1 do 4 osnovni materijal; od 5 do 8 zona uticaja toplote; od 11 do 13 metal šava [50]

## 4. Osnove stereometrije i metode konačnih elemenata

### 4.1 Merenje deformacija - uvod

U inženjerskoj praksi se primenjuju dva uopštena tipa merenja deformacija kontaktno kao što je merenje ekstenziometrima i mernim trakama, dok se beskontaktno merenje uglavnom izvodi kamerama (optički) i softverima kojima se obrađuju dobijeni rezultati merenja deformacija. Optičkim mernim metodama (odnosno kamerama) merenje položaja tačaka zasniva se na upotrebi referentnih tačaka. Određivanje njihovog položaja prilikom merenja statičkih deformacija, stiže se uvid u veličinu i karakter deformacije objekta koji se posmatra.

Primena beskontaktnog merenja deformacija je jako široka, posebno prilikom primene IBR metoda, gde je pogodna zbog mogućnosti brzog, preciznog a pri tom beskontaktnog merenja [51, 52]. Metoda beskontaktnog merenja je dovela do toga da sam process ispitivanja postane lakši i brži, sa posebnim osvrtom na mogućnost posmatranja deformacija svih zona zavarenog spoja pojedinačno. Ovo je od izuzetne važnosti kod anizotropnih struktura među koje spadaju i zavareni spojevi.

### 4.2 Stereometrija - Digitalna korelacija slike

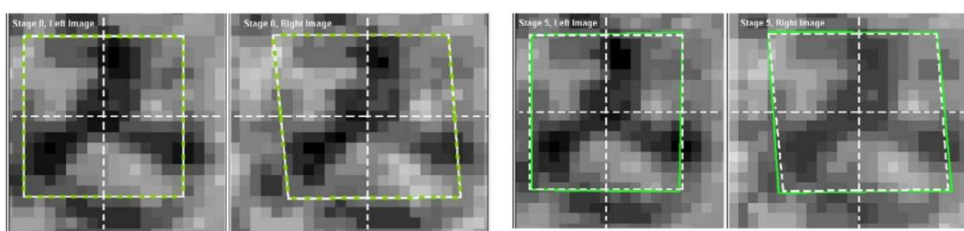
Merenje deformacija stereometrijskom metodom se vrši u tri kordinate. Na element (u ovom slučaju - zavareni spoj) koji se snima nanosi se mreža, odnosno kontrastna stohastička šara. Softverski paket koji se koristi prepoznaje nivoe osvetljenosti delova kontrastne šare. Deformacijom tih tačaka (tačnije, pomeranjem) se menjaju kordinate tačaka, a ta raspodela deformacije se prati i beleži.

Stereometrijsko merenje deformacija (pomeranja) je od posebnog značaja kod heterogenih materijala (kao što su zavareni spojevi) kao i na mestima koncentracije naprezanja i deformacija. Na lokalnom nivou razlike u pogledu količine i brzine deformisanja nije moguće odrediti na drugi način toliko velikom preciznošću kao stereometrijom. Podaci koji su odatle dobijeni mogu se upotrebiti između ostalog i za određivanje parametara Mehanike loma [53, 54].

Digitalna korelacija slika (eng. *digital image correlation* – u daljem tekstu DIC) predstavlja brzu i pouzdanu metodu merenja deformacija, pomeranja i određivanje napona. DIC funkcioniše po principu tako što se mereni uzorak prvo snimi u nedeformisanom stanju, a potom i u deformisanom stanju, a sistem upoređuje te dve date slike i na taj način izračunava tražena pomeranja, napone ili deformacije. Poređenja su moguća zahvaljujući kontrastnoj šari (bela pozadina i crne tačke na njoj), što omogućuje sistemu da prepozna tražena mesta na slici. Sistem za merenje se sastoji od dve kamere, stalka, sistema za napajanje kamera, računara, softvera ARAMIS i USB ključa na kome je sadržana licenca proizvođača koja omogućuje da se sistem pokrene. Izgled opreme je dat na slici 4.1 i 4.2. Merenje je zasnovano na tome da se posmatra površina uzorka sa kontrastnom šarom, kroz sve stadijume deformacije praćenjem pomeranja zadatih piksela. Na slici 4.1 je prikazana promena piksela pre i posle deformacije, a zelenom linijom je prikazan izgled same deformacije posmatrane zone. Da bi merenje moglo da se izvede, potrebno je definiati početnu tačku, od koje počinje proračunavanje ostalih tačaka. Kontrastna šara služi da indetifikaciju ostalih pomeranja tačaka u svrhu proračunavanja [55].



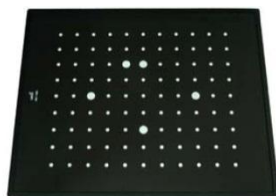
Slika 4.1: Izgled sistema ARAMIS [55]



Slika 4.2: Promena površine pre i posle deformacije (donje slike) [55]

U cilju dobijanja adekvatno merenja naponsko-deformacijskog stanja mernog objekta potrebno je sprovesti tri različite procedure. U prvu grupu spadaju one procedure koje se odnose na aktivnosti pre samog merenja, tj. priprema uzorka i kalibracija, kao i izbor same površine koja će biti merena. Sledeća procedura se tiče merenja tačnije rečeno snimanja slika. U treću grupu spadaju obrada dobijenih rezultata merenja. U zavisnosti od veličine analiziranog objekta bira se i merna zapremina, jer se analizira deo objekta (oblast). Za analizirani objekat ili oblast je bitno da ostane unutar merene zapremine i nakon deformisanja.

Jedna od bitnih stavki koja određuje kvalitet merenja je i kalibracija uređaja, koju je potrebno sprovesti pre neposrednog ispitivanja. Ovo je važno iz razloga što bilo kakvo pomeranje kamera ili sistema zaheva ponovnu kalibraciju. Kalibracija predstavlja proces pravljenja niza fotografija objekta sa referentnim tačkama, kome se menja položaj u odnosu na kamere po zahtevima procedure. Kalibracija se smatra uspešnom ako odstupanje nije veće 0,04 piksela. Ovo odstupanje se računa kao srednje odstupanje svih tačaka tokom kalibracije. Izgled kalibracione ploče je dat na slici 4.3. Kalibracija se ponavlja ako dolazi do pomeranja kamera.



Slika 4.3: Izgled kalibracione ploče za merenje malih objekata [55]

Priprema uzorka mora biti adekvatna, tačnije površina uzorka mora da bude odmašćena i čista, a pored toga mora i imati odgovarajuću kontrastnu šaru koja kako bi se mogao odrediti tačan položaj piksela. Šara mora biti takva da odgovara uzorku, a to može varirati od slučaja do slučaja [56, 57]. Bitno je da postoji izražen kontrast, a da sama površina uzorka bude mat. Treba izbegavati pojavu refleksije, jer se tako onemogućuje tačan proračun piksela u merenoj oblasti.

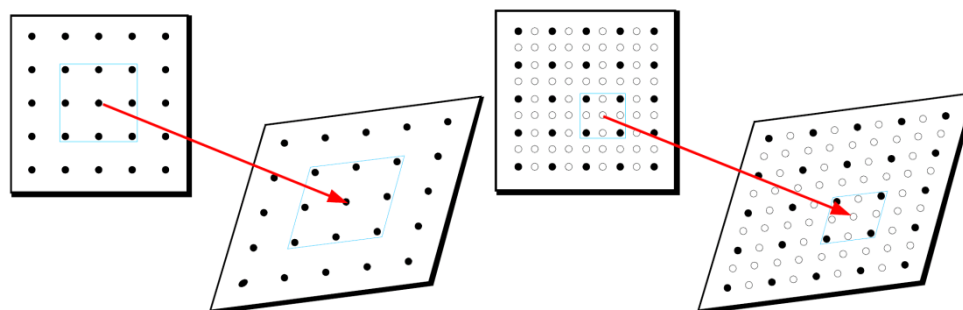
Pre nego što se započne proračun početna tačka mora biti jasno definisana. To je zapravo “mala površina”, a to je površina 15x15 piksela, kojom se počinje proračunavanje i upoređivanje



ostalih tačaka. Početna tačka se definiše u neopterećenom stanju. Ona se definiše ili ručno ili polu-automatski.

Kod većeg broja uzoraka gde su merenja automatizovana, koristi se automatsko definisane tačke.

Sistem meri pomeranja zadate kontrastne šare kao posledicu deformacije objekta koji je sniman (meren). Sistem sam proračunava deformacije. Koriste se dve metode proračuna deformacija: linearna i “*spline strain computation*”, prikazane su na 4.3 (levo). U praksi se uglavnom koristi linearna metoda proračunavanja deformacija. Na slici 4.3 levo prikazane su “male površine” obeležene crnim tačkama. Obeleženim kvadratom (plavom bojom) definisano je da se deformacija mernih tačaka izračunava na osnovu pomeranja postojećeg polja. Glavna prednost ove metode je, nizak nivo smetnji, brz proračun, a referentne tačke za proračun deformacije su stvarno snimljene tačke. Na slici 4.4 (desno) prikazane su direkno izvedene merne tačke iz “malih površina” posmatrane slike, dok bele tačke predstavljaju interpolaciju crnih tačaka. Interpolacijom vrednosti belih tačaka se vrši proračun deformacije. Kod ove metode je prednost mogućnost merenja komplikovanijih geometrija, dok mu je mana veća pojava smetnji prilikom snimanja i duži vremenski period proračuna.



Slika 4.4: Grafički prikaz linearne metode proračunavanja deformacije (levo) i “*spline strain computation*” (desno) [55]

Pogodnosti sistema ARAMIS su brojne, npr. ovaj sistem može obezbediti podatke o poziciji, obliku, deformaciji i pomeranju tačaka ispitnog uzorka. Osim toga, ovaj sistem pruža i veliku preciznost usled adekvatne kalibracije. Snimljeni rezultati mogu biti filtrirani kako bi se šumovi otklonili pa čak ukoliko se desi da nisu svi pikseli snimljeni na slici, sam sistem može interpolacijom da popuni na osnovu postojećih elemenata (piksela) [58]. Takođe je moguća i statistička obrada rezultata koji su snimljeni. Softveskim paketom ARAMIS moguće je prezentovati rezultate na mnogo različitih načina, kao što su na primer: tabele, dijagrami, izveštaji i tako dalje.

Pomenuti sistem se koristi za otkrivanje i praćenje deformacija na površini materijala, i neke od najčešćih upotreba ove metode se mogu naći u studijama koji se tiču zamora i otkaza komponenti, praćenje životnog veka komponente, kao i deformacije izazvane statičkim ili dinamičkim opterećenjima (statičko i dinamičko merenje deformacija) [53, 59].

### 4.3 Metoda konačnih elemenata (MKE)

MKE je jedan od najčešće korišćenih alata koji se primenjuju u numeričkoj analizi. Ova metoda je bazirana na diskretizaciji (deljenju) fizičkog modela na konačan (određen) broj elemenata. Ti elementi treba da budu jednostavnije geometrije i da imaju odgovarajuće granične uslove. Na tim modelima se potom određuju deformacije i pomeranja ponaosob za svaki element, kao i za ceo model. Na osnovu dobijenih rezultata proračunava se naponsko stanje.

Ovi elementi mogu imati jednu, dve ili tri dimenzije i međusobno su povezani u mrežu konačnih elemenata u tačkama koje se nazivaju čvorovi [60]. Pri diskretizaciji je neophodno voditi računa o neprekidnosti modela [61].

Primenom MKE se mogu definisati različiti problem i to na sledeće načine:

- Direktne metode kao što su sile, pomeranja i kombinacija ta dva
- Varijacione metode

Primena MKE se može definisati na više načina. To uključuje metodu definisanja elastičnosti koji se mogu definisati preko direktnih metoda kao što su pomeranje, sile, i kombinacija sile i pomeranja. Takođe se može definisati i preko varijacionih definicija kao što su princip minimum komplementarne energije, principi stacionarnosti energije kao i princip minimum potencijalne energije.

Usled različitih faktora kao što su granični uslovi, geometrija modela, strukture zavarenog spoja i dako dalje, modeliranje metodom konačnih elemenata se oslanja (tačnije obuhvata) na aproksimacije. Aproksimacije se primenjuju zbog lakšeg i jednostavnijeg proračuna, ali samo do te mere da ne utiču nepovoljno na rezultat proračuna.

Kompletan postupak primene MKE se sastoji iz osam faza [61]:

- Modeliranje
- Diskretizacija modela
- Izbor interpolacionog modela za polje pomeranja
- Formiranje matrica krutosti i vektora opterećenja na lokalnom nivou
- Sastavljanje globalne matrice krutosti i vektora opterećenja
- Određivanje nepoznatih pomeranja čvorova
- Proračun deformacijskog i naponskog stanja na lokalnom nivou
- Proračun naponskog stanja u modelu kao celini

Diskretizacija obuhvata izbor broja, dimenzija, veličine i vrste konačnih elemenata u zavisnosti od složenosti problema. Za svaki element je potrebno definisati granične uslove u čvorovima. Veličina elemenata se bira tako da manji elementi budu tamo gde se očekuje najveće opterećenje kako bi mreža bila preciznija. U slučajevima simulacija sa manjim opterećenjima ili slučajevima gde to nije od presudnog značaja mogu se koristiti veći elementi čime sam proračun je lakši i brži. Kod zahtevnijih i složenijih modela primenjuju se konačni elementi sa većim brojem čvorova, a izbor zavisi od broja interpolacija u proračunu. Što se tiče graničnih uslova oni se mogu definisati po opterećenju, naponu ili pomeranjima. Opterećenje može biti, zapreminsko, površinsko ili koncentrisano, dok se pomeranja odnose na translacije i rotacije čvora. Stepni slobode svakog čvora se određuju graničnim uslovima. Ti granični uslovi ograničavaju pomeranja datog čvora ili pak određuju njegovu veličinu. Kod modela koji su napravljeni od konačnih elemenata, granični uslovi se koriste za određivanje (definisanje) oslonca tela koje se posmatra i opterećenje simulira [60, 61].

Interpolacijski modeli definišu funkcije kojima se opisuje ponašanje numeričkog modela.

Matrica krutosti se definiše prvenstveno na lokalnom nivou, a potom i za ceo model. Sama matrica krutosti je simetrična i pozitivno definisana, singularna. Njeni elementi predstavljaju opterećenje sile u svakom čvoru prouzrokovano odgovarajućim hediničnim pomeranjem, dok se vektor opterećenja definiše u čvorovima elemenata kao površinsko, zapreminsko ili pak koncentrisano opterećenje.

Određivanje nepoznatih pomeranja predstavlja fazu numeričke simulacije MKE kojom se određuju pomeranja u čvorovima na osnovu kojih se formira polje pomeranja za komprtan model. Određivanja polja deformacija i napona predstavljaju konačni korak proračuna MKE. U zavisnosti od proračuna ovi rezultati mogu biti usvojeni kao finalni (konačni) ili se u suprotnom postupak ponavlja, sa određenim promenama u samim koracima proračuna MKE [62, 63].

## 5. Tehnologija zavarivanja

### 5.1 Tehnologija zavarivanja - uvod

U ovom poglavlju će biti opisana tehnologija i postupak zavarivanja ploča ispitanih u eksperimentalnom delu ove disertacije. Dat je kratak osvrt na karakteristike osnovnog i dodatnog materijala. Deset ploča dimenzija 250x500 mm je zavareno MIG/MAG postupkom, da bi se formiralo 5 ploča dimanzija 500x500 mm. Temperatura predgrevanja je poračunata da bi se utvrdilo treba li ploče predgrevati tokom zavarivanja ili ne.

Od pet zavarenih ploča, jedna je bila reparna tj. bez grešaka u zavarenom spoju. Ostale četiri ploče su imale određene kombinacije grešaka koje su unete namenski u strogo kontrolisanim laboratorijskim uslovima. Nakon procesa zavarivanja, predmetne ploče su ispitane IBR metodama (VT i RT).

### 5.2 Uopšteno o osnovnom materijalu S275JR

Ovom disertacijom obuhvaćena su ispitivanja čelika S275JR. To je nelegirani, niskougljenični manganski čelik koji spada u grupu feritnih čelika. Zbog svog niskog sadržaja ugljenika i lake mašinske obrade i dobre zavarljivosti, čelik S275JR ima široku rasprostranjenost u industriji. Ovaj čelik je prvi put prepoznat 1990 godine od strane Evropskog komiteta za standardizaciju, prvi put je pomenut u standardu EN 10025 [64].

Čelik S275JR se koristi u vidu profila za izradu nosećih i krovnih stubova i greda za čelične, krovnih limova, nosača za mostove, cevi za izradu cevoda za naftu i gas itd., ima veoma široku primenu u svim granama građevinarstva i mašinstva. S u oznaci S275JR označava konstruktivni čelik sa minimalnom 275 N/mm<sup>2</sup>, dok JR označava da ima zagantovanu žilavost od 27J na sobnoj temperaturi. Plan sečenja tabli da je dat u Dodatku 1.

### 5.3 Dodatni materijal

Dodatni materijal za zavarivanje ploča S275JR je VAC 60, žica koja se koristi za zavarivanje u atmosferi zaštitnog gasa. Koristi se za zavarivanje čelika koji su nelegirani ili niskolegirani do čvrstoće 530 N/mm<sup>2</sup> [65]. Pomenuta žica za zavarivanje ima povećan udeo silicijuma i mangana, čime se omogućuje dobojanje kvalitetnijeg i čistijeg zavarenog spoja. Prečnici žica za zavarivanje su stadardni od 0,8 mm do 1,6 mm (Za potrebe zavarivanja ploča i dobijenih uzoraka namenjenih za dalja ispitivanja prečnik izabrane žice je iznosio 1 mm). Zavarivanje je sprovedeno u zaštitnoj atmosferi gasa mešavine (trgovačkog naziva) M21 koju čini 82% argona i 18% ugljen-dioksida, koji štiti rastop od uticaja spoljne atmosfere i štiti zavareni spoj od neželjenih hemijskih reakcija sa žicom, dok u isto vreme obezbeđuje bolju stabilnost luka i omogućuje bolje uvarivanje, manje razbrizgavanje i gladak zavar. Razlog tome je u prenosu dodatnog materijala sitnim kapima u mlazu [66] MAG postupkom zavarivanja. Takođe, dostupnost i cena dodatnog materijala su bitan faktor pri odabiru dodatnog materijala za zavarivanje. VAC 60 je dodatni materijal koji pruža mogućnost da dobijanja “overmatchin” efekta, odnosno dobijanje boljih mehaničkih karakteristika metala šava u odnosu na osnovni materijal. (čime se nastoji da se izbegne lom u metalu šava). Hemijska svojstva dodatnog materijala, kao i njegova mehanička čistog metala šava svojstva su data u tabelama 5.1 i 5.2.

Tabela 5.1: Mehaničke karakteristike dodatnog materijala čistog metala šava VAC 60[65]

Materijal	Granica tečenja $R_{eH}$ (MPa)	Zatezna čvrstoća $R_m$ (MPa)	Izduženje (%)	Zagarantovana žilavost na $-40^{\circ}\text{C}$ (J)
VAC 60	> 410	510-590	> 22	> 47

Tabela 5.2: Hemijske osobine dodatnog materijala VAC 60[65]

Element	C	Si	Mn	P	S
(%)	0.08	0.9	1.5	< 0.025	< 0.025

## 5.4 Tehnologija i potupak zavarivanja

Zavareno je deset ploča dimenzija 500x200 mm .U cilju lakšeg postavljanja epruveta na samoj kidalici, ploče su morale da budu podvrgnute rezanju acetilenskim gasom. Ploče su zavarene u aktivnoj atmosferi zaštitnog gasa ili MAG postupkom. Kao zaštitnu atmosferu tokom zavarivanja, ovaj postupkom mogu se koristiti ili čist  $\text{CO}_2$  ili mešavina 18%  $\text{CO}_2$  + 82% Argona (mešavina naziva M21). Ovaj postupak zavarivanja omogućava dobijanje spojeva koji imaju dobru čvrstoću i žilavost, s toga je MAG postupak pogodan za zavarivanje niskougleničnih neligarinih čelika. Ovaj postupak je takođe odabran, jer je postojala mogućnost detaljnog praćenja procesa zavarivanja [67] uređajem Kempfi DataCatch, koji je prikazan na slici 5.1.



Slika 5.1: Uređaj za merenje parametara zavarivanja

Osnovni parametri koji se definišu MAG postupkom su napon, brzina dovođenja žice i jačina struje koja direktno zavisi od prečnika žice koja se koristi za zavarivanje [68]. Kada se vrši zavarivanje MAG postupkom struja koja se koristi je uvek jednosmerna struja indirektno polarnosti, a izvor struje je uvek sa blagopadajućom karakteristikom. To obezbeđuje efekat samoregulacije luka (promena dužine luka dovodi do povećanja ili smanjenja jačine struje), a samim time povećava odnosno smanjuje brzinu topljenja žice, čime se luk vraća na odgovajuću dužinu.

### 5.4.1 Temperatura predgrevanja

Predgrevanje osnovnog materijala nije bilo potrebno uraditi, što se može pokazati Seferianovom formulom datom izrazom 5.1 [69].

$$CE = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad (5.1)$$

Koeficijent ugljenika iznosi 0.21 što govori da je čelik dobre zavarljivosti ( $CE < 0.45$ ). I ako outor skustveno zna da predgrevanje za čelik S275JR debljine 12 mm milimetara nije potrebno, svejedno ćemo pokazati to proračunom predgrevanja i međuprolaznih temperatura, uzimajući u obzir debljinu čelika  $d = 12\text{mm}$ , sadržaj vodonika  $HD = 5\text{ ml}/100\text{ gr}$ , kao i količinu unete toplote i sve ostale parametar zavarivanja kao što su brzina zavrivanja, napon, jačina stuje i efikasnost primenjenog postupka zavarivanja  $\eta = 0.8$  [32].

Temperatura koja zavisi od ugljenika je prikazana u formuli 5.2.

$$T_{pCE} = 750 * CE - 150 = 7.5^\circ C \quad (5.2)$$

Temperature predgrevanja na osnovu sadržaja vodonika i debljine ploče se računaju po sledećim formulama 5.3 i 5.4:

$$T_{pd} = 160 * \tanh\left(\frac{d}{35}\right) - 110 = -58.8^\circ C \quad (5.3)$$

$$T_{pHD} = 62 * HD^{0.35} - 100 = 8.9^\circ C \quad (5.4)$$

Količina unete toplote se radi prema formuli 5.5 ( $I$  je prosečna jačina struje,  $U$  je prosečan napon,  $v$  je prosečna brzina zavarivanja):

$$Q = \frac{\eta * I * U}{V_z * 1000} = 0.86 \frac{kJ}{mm} \quad (5.5)$$

Prema ovoj formuli može se sračunati vrednosti količine unete toplote kako za koreni prolaz, tako i za popune pa s toga  $Q_{koren} = 0.86 \frac{kJ}{mm}$ ,  $Q_{popune} = 1.07 \frac{kJ}{mm}$ . Unećemo dobije vrenosti količine unete toplote za koreni prolaz i popune u formle za temperature predgrevanja 5.6 i 5.7:

$$T_{pQ,koren} = (53 * CE - 32) * Q_{koren} - 53 * CE + 32 = 2.92^\circ C \quad (5.6)$$

$$T_{pQ,popuna} = (53 * CE - 32) * Q_{popuna} - 53 * CE + 32 = -1.46^\circ C \quad (5.7)$$

Pošto se saberu sve predhodno dobijene vrednosti temperatura predgrevanja, dobijaju se konačne vrednosti temperatura predgrevanja kako za koreni prolaz, tako i za prolaz popune 5.8 i 5.9.

$$T_{pQ,koren} = T_{pCE} + T_{pd} + T_{pHD} + T_{pQ,koren} = -39.48^\circ C \quad (5.8)$$

$$T_{pQ,popuna} = T_{pCE} + T_{pd} + T_{pHD} + T_{pQ,popuna} = -43.86^\circ C \quad (5.9)$$

Iz dobijenih vrednosti se može zaključiti da predgrevanje čelika S275 pre zavarivanja nije potrebno, i iz tog razloga se neće ni primenjivati.

#### 5.4.2 Priprema žleba

Obaranje ivica žleba na svim pločama je iznosila  $60^\circ$ , zatupljenje je iznosilo 2 mm, ivice su obarene na glodalici, dok je brušenje do metalnog sjaja rađeno brusilicom. Proces je prikazan na slici 5.2.



Slika 5.2: Priprema ploče za obradu brusilicom s leve strane i obrušena površina do metalnog sjaja sa desne

Obrušene ploče su potom pripojene na tri mesta sa korene strane da ne bi dolazilo do pomeranja tokom procesa zavarivanja. Takođe je napravljan i kontra nagib od 5%, da se usled zagrevanja ploča prilikom zavarivanja ne iskrivi usled uticaja zaostalih napona. Njihov uticaj jako nepovoljan na životni vek i funkcionalnost konstrukcije [34, 70]. Usled unosa toplote ploča će se sama vratiti u prvobitan položaj. Izgled pripajanja i kontra nagiba je prikazan na slici 5.3 kao i mesto zastoja tokom zavarivanja ploča slika 5.4.



Slika 5.3: Pripoiji za zavarivanje na ploči 1 (levo) i izgled kontra nagiba (desno)



Slika 5.4: Mesto zastoja tokom zavarivanja

### 5.4.3 Uređaj i parametri zavarivanja

Uređaj koji se koristio za dodavanje žice je Kemppi fastmig mxf 65, a uređaj za zavarivanje je Kemppi fastmig pulse 350. Oba uređaja su prikazana na slici 5.5. Uređaj ima samoregulišuću brzinu dodavanja žice, koja zavisi od napajanja prilikom zavarivanja (tačnije od dužine električnog luka). Brzina zavarivanja korenog prolaza je iznosila od 10 do 11 cm/min, dok je brzina popune iznosila od 11 do 13 cm/min ugao pod kojim je bila žica u odnosu na ploču je  $90^\circ$ , njihanje elektrode 3mm, čelično kupatilo je išlo ispred žice. Zavarivanje je urađeno iz dva dela. Prvi zastoj je bio na sa 250 mm od ivice ploče. Popuna je rađena u dva ili tri prolaza u zavisnosti od tipa kombinacija površinskih grešaka koje su unete na ploče u kontrolisanim uslovima.



Slika 5.5: Kemppi fastmig mxf 65 i Kemppi fastmig pulse 350

### 5.4.4 Ispitivanje bez razaranja zavarenih ploča

Po završetku procesa zavarivanja, a pre pripreme epruveta za mehanička ispitivanja, urađeno je ispitivanje zavarenih ploča IBR metodama. IBR metode koje su bile korišćene su VT i RT. Obe metode su urađene od strane sertifikovanog osoblja u Institutu GOŠA u Smederevskoj Palanci. Ispitivanje VT je urađeno u skladu sa referentnim standardima za klasifikaciju grešaka i kriterijum prihvatljivosti za iste [1, 38], dok RT je takođe urađen u skladu sa referentnim standardima za klasifikaciju i kriterijum prihvatljivosti [46, 47].

Vizuelnom metodom nije ustanovljena ni jedna greška mimo onih koje su nanete namenski u kontrolisanim uslovima. Takođe radiografijom nisu uočene nikakve indikacije u pločama osim onih koje su napravljene planski za potrebe ispitivanja.

## 6. Eksperimentalna ispitivanja

### 6.1 Pregled eksperimentalnih ispitivanja

Posle zavrivanja i IBR ispitivanja zavarenih ploča pristupilo se izradi uzoraka namenjenih mehanička ispitivanja.

Iz ploča od osnovnog materijala kao i iz zavarenih ploča pripremljene su epruvete namenjene za ispitivanja:

- Zatezanjem – tri epruvete osnovnog materijala S275JR
- Zatezanjem – dvadeset zavarenih eperuveta
- Tvrdoće – deset zavarenih epruveta

Izrađene epruvete su dimenzija koje su propisane relavantim standarima za specifikaciju i kvalifikaciju zavarivanja prema preprukama standarda EN ISO 15614.

Iz zavarenih ploča pripremljeno je dvadeset epruveta namenjenih za jednoosno zatezanje i deset epruveta za ispitivanje tvrdoća i mikrostruktura. Iz ploča od osnovnog materijala S275JR su izrađene tri epruvete kako bi se ispitala mehanička svojstva osnovnog materijala, osim toga urađena je i hemijska analiza osnovnog materijala. Deformaciono polje prilikom ispitivanja jednoosnim zatezanjem je praćeno stereometričkim metodama, a rezultati su obrađeni u softverskom paketu ARAMIS i merenjem rastojanja na fotografijama snimljenim HD kamerom.

### 6.2 Ispitivanja osnovnog materijala S275JR

Pre zavarivanja prve ploča pristupilo se hemijskoj analizi ploča u laboratoriji Vojnotehničkog instituta. Ploče su rezane laserski, osam ploča je izrezano na dimenzije 250x500 mm i jedna ploča dimenzija 500x500 mm, detaljan plan rezanja je dat u dodatku 1 koji se nalazi na kraju doktorske disertacije.

Iz ploče dimenzija 500x500 mm je uzet je deo manjih dimenzija u prostorijama Instituta "GOŠA" i poslat na hemijsku analizu i mehanička ispitivanja u institutu VTI. Rezultati hemijske analize su prikazani u tabeli 6.1.

Tabela 6.1: Hemijski sastav legirajućih elemenata čelika S275JR

Broj	C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Cr	Mo	Ni
1	0,137	0,014	0,662	0,009	<0,001	0,020	0,034	0,024	0,004	0,011
2	0,141	0,014	0,657	0,011	<0,001	0,021	0,035	0,023	0,005	0,010
3	0,146	0,015	0,674	0,008	<0,001	0,021	0,036	0,024	0,005	0,010
4	0,145	0,014	0,671	0,008	<0,001	0,022	0,035	0,023	0,005	0,010
5	0,139	0,014	0,675	0,010	<0,001	0,021	0,036	0,024	0,004	0,011
<b>Sr. vrednost</b>	0,142	0,014	0,668	0,009	<0,001	0,021	0,035	0,024	0,005	0,010

Analizom dobijenih rezultata pristupilo se ispitivanju osnovnog materijala sa ciljem dobijanja pravih mehaničkih karaktersitika, a rezultati su pokazali da postoji malo odstupanje od atesne dokumentacije.

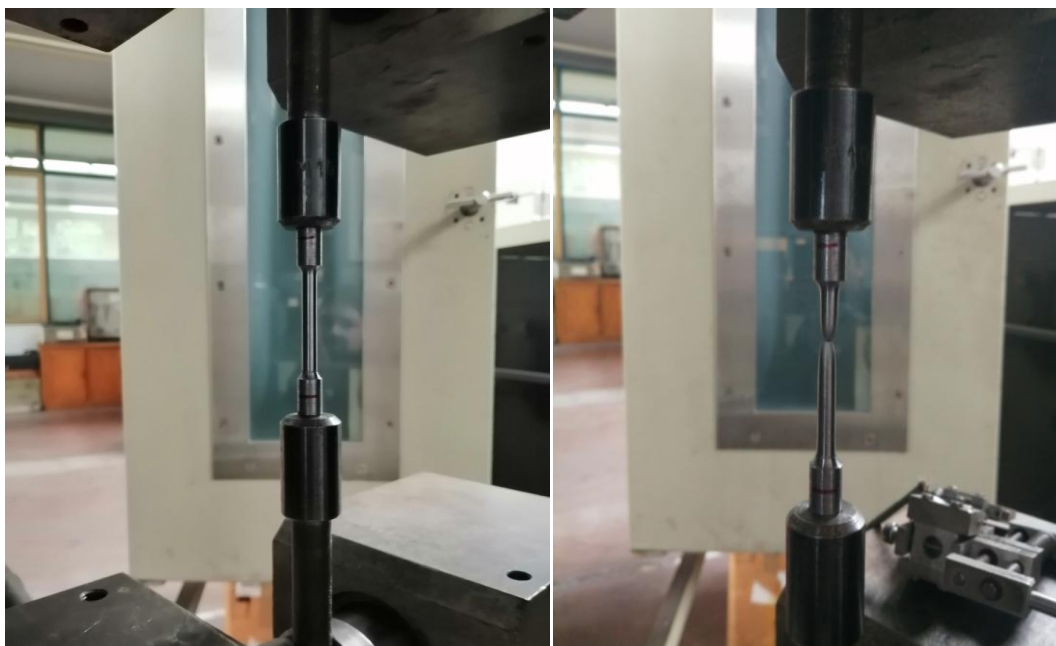
Dimenzije epruveta su urađene u skladu sa preprukama standarda SRPS EN ISO 15614 [30]. Ispitane su tri epruvete da bi mogla da se utvrdi ponovljivost. Izgled epruveta je prikazan na slici 6.1. Dužina epruveta je 150 mm, a prečnik suženog poporečnog preseka  $\varnothing$  6 mm.





Slika 6.1: levo) INSTRON kidalica kapaciteta 250 kN; desno) epruvete za ispitivanje zatezanjem

Ispitivanje epruveta jednoosnim zatezanjem je izvršeno na INSTRON kidalici kapaciteta 250 kN (25 tona), izgled kidalice je prikazan na slici 6.2. Sila ispitivanja je bila 20 kN, dok je brzina deformisanja iznosila 5 mm/min. Tok ispitivanja jedne od epruveta je prikazan na slici 6.2.

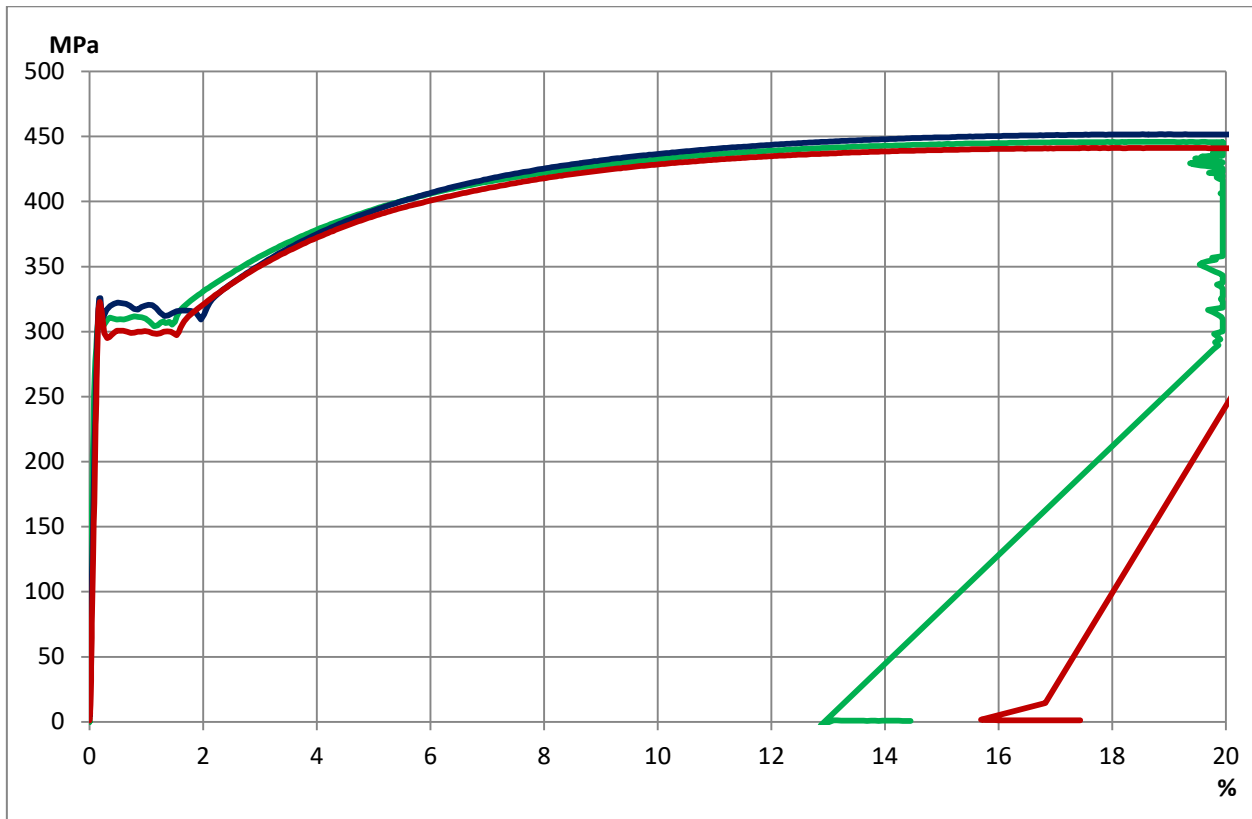


Slika 6.2: Epruveta postavljena na kidalici: levo) pre kidanja), desno) nakon kidanja

Prilikom ispitivanja prve epruveta zatezna čvrstoća čelika S275JR je iznosila 452 MPa, druge 442 MPa i treće 447 MPa, dok je maksimalna sila kidalice iznosila 12,79KN, 12,50KN i 12,63KN, respektivno. Na slici 6.3 su prikazani uporedni dijagram napona-deformacija. Dobijeni rezultati jednoosnog zatezanja epruveta, poput traženog napona tečenja, ali i zatezne čvrstoće, su se kretale u odgovarajućem opsegu i nisu mnogo odstupale od tabličnih vrednosti, vrednosti su date na tabeli 6.2. Na slici 6.4 je prikazan izgled epruveta nakon kidanja.

Tabela 6.2: Granice tečenja i zatezna čvrstoća ispitanog osnovnog materijala S275JR

Broj epruvete	Napon tečenja $R_e$ [MPa]	Zatezna čvrstoća $R_m$ [Mpa]
1	325	452
2	322	442
3	305	447



Slika 6.3: Uporedni dijagram napona deformacija za sve tri epruve



Slika 6.4: Izled epruveta nakon kidanja

Nakon hemijske analize i mehaničkih ispitivanja utvrđeno je sa sigurnošću da je u pitanju čelik S275JR. Sledeći korak je odabir dodatnog materijala za zavarivanje. Odabrati optimalan dodatni material [21] je jako bitan korak u zavarivanju, u suprotnom može doći do pojave ozbiljnih oštećenja koje mogu ugroziti životni vek celokupne konstrukcije [22].

## 6.3 Ispitivanja epruveta iz zavarenih ploča jednoosnim zatezanjem

### 6.3.1 Plan ispitivanja

Dvadeset epruveta koje se ispituju jednoosnim zatezanjem su uzete iz prethodno zavarenih ploča. Iz svake ploče su uzete četiri epruvete; dve su uzete sa početka, a dve sa kraja zavanog spoja, kao što je predviđeno standardom za kvalifikaciju zavarenih spojeva EN ISO 15614. Sve epruvete su fino obušene i nagrižene u rastvoru 5-10% azotne kiseline (Nital), radi lakše identifikacije linije stapanja, zona uticaja toplote i pojava greške nalepljivanja. Ispitivanje jednoosnim zatezanjem je praćeno na dva načina:

- Primenom HD kamere
- Korišćenjem softverskog paketa ARAMIS

U tabeli 6.3 se prikazuje epruvete podeljene tokom ispitivanja, tačnije na koji način su praćene defromacije tokom ispitivanja jednoosnim zatezanjem.

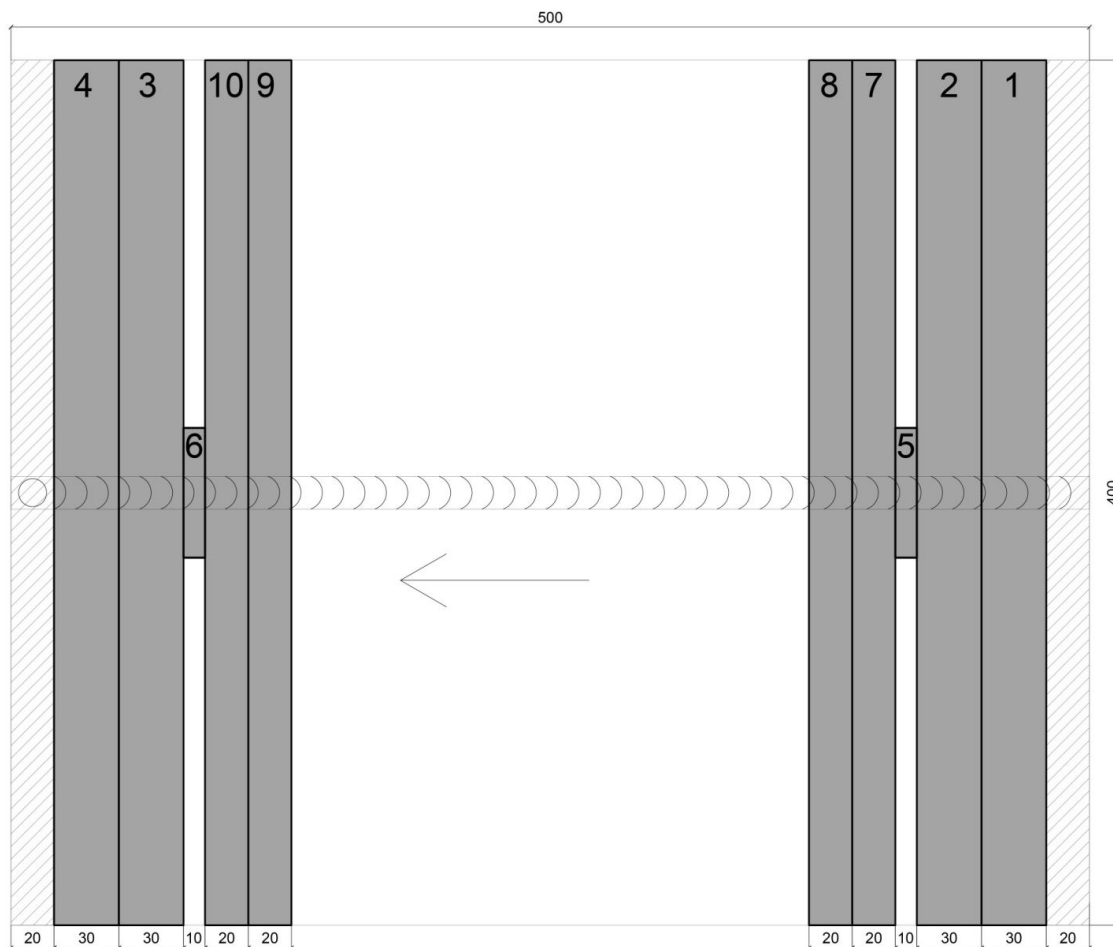
Tabela 6.3: Grupe pruveta, kombinacija grešaka, način praćenja deformacija

Grupa epruveta	Kombinacija grešaka	Uzorci u kojima su pomeranja snimana HD kamerom	Uzorci u kojima su deformacije praćene sistemom ARAMIS
1	Nadvišenje, neuvarena ivica lica šava, neprovaren koren	1.1, 1.2	1.3,1.4
2	Ulegnuće lica šava, neprovaren koren	2.1, 2.2	2.3, 2.4
3	Smaknuće, nadvišenje, neuvarena ivica lica šava	3.1, 3.2	3.3*, 3.4
4	Smaknuće, neuvaren koren šava, neuvarena ivica lica šava	4.1, 4.2	4.3, 4.4
5	Bez grešaka, referentne epruvete	5.1, 5.2	5.3*, 5.4

\*Napomena: Ispitivanja epruveta 3.3 i 5.3 nisu dale validne rezultate.

### 6.3.2 Priprema epruveta za ispitivanje iz zavarenih ploča

Plan i priprema epruveta za ispitivanje je urađen spram standarda za kvalifikaciju zavarivanja SRPS EN ISO 15614 [30]. Dimenzije epruveta i ostale referentne vrednosti epruveta za ispitivanje su takođe definisane pomenutim standardom. Za svaku ploču je urađen plan isecanja epruveta koji se nalazi u dodatku B ove doktorske disertacije. Prethodno zavarene ploče koje su bile laserski isečene. Pre samog sečenja epruvete su bile označene markerom internim oznakama. Na slici 6.5 je data šema vađenja epruveta iz zavarenih ploča. Na šemi su date pozicije na kojima se seku epruvete za jednoosno zatezanje, uzorci za ispitivanje tvrdoće i mikrostrukturno ispitivanje. Kao dodatak, na istoj slici je dat pravac zavarivanja u vidu strelice. Pored toga prikazana su i mesta na krajevima ploča koja se odstranjuju, jer isti ne podležu ispitivanju odsecaju. Za svih pet ploča šema za vađenje epruveta je identična.



Slika 6.5: Šema sečenja epruveta iz zavarene ploče ( sa smerom pravca zavarivanja)

Epruvete su sećene testerom, a hlađene su tečnom emulzijom (na vodenoj bazi), kako ne bi dolazilo do predgevanja i otkazivanja testere. Takođe se ovim postupkom vodilo računa da ne dođe do dodatnog unosa toplote usled trenja, a time remetila mikrostruktura koja je postignuta zavarivanjem. Obrada epruveta je vršena glodalicom i bruslicom.

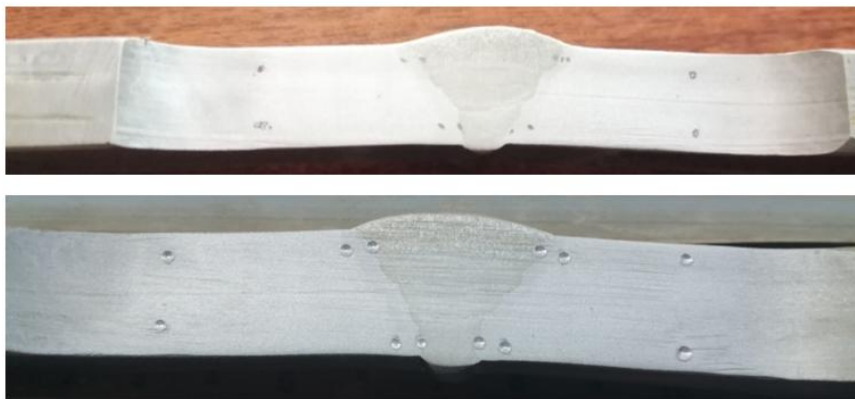
Ideja je bila se epruvete namenjene za ispitivanje jednoosnim zatezanjem budu ispitivane sa dve različite metode.

Prvo će biti reči o prvoj metodi. Prva metoda se sastoji u tome da se na bitne lokacije kao što su linija stapanja i zone uticaja toplote unesu reperne tačke. Ideja je da se pomeranje repernih tačaka tokom ispitivanja prati, a potom meri beskontaktnim metodama tokom ispitivanja jednoosnim zatezanjem. Epruvete prvo moraju biti fino obrušene (u ovom slučaju brusni papir 120mm) (slika 6.6), a potom moraju biti nagrižene u rastvoru 5-10% azotne kiseline kako bi se zone zavarenog spoja jasno videle golim okom. Ovakva priprema epruveta je rađena u institutu "GOŠA". Izgled strukiranog dela epruveta je prikazan na slici 6.6.



Slika 6.6: Izgled strukiranog dela epruvete gde se posle obrade brušenjem: levo) izgled strukiranog dela epruvete posle nagrizanja Nitalom; desno) izgled epruvete posle nagrizanja, na kojoj se jasno vide linija stapanja i zona uticaja toplote

Epruvete su označene na relevantnim prelaznim mestima zavarenog spoja (linija stapanja i ZUT). Bilo je potrebno voditi računa da se ne prave lokalna površinska ojačanja i koncentracije napona na epruvetama. Na slici 6.7 je prikazane su označena i zabušena mesta ispitnih epruveta, primer na slici je za epruvetu 5.1.



Slika 6.7: Prikaz označenih mesta na epruveti

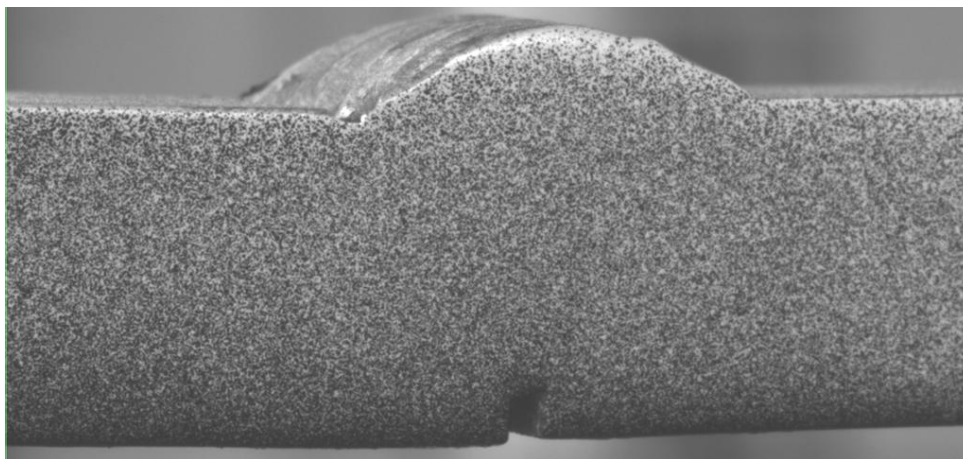
Naneta je adekvatna kontrastna šara na uzorcima u cilju lakšeg praćenja pomeranja zona zavarenog spoja tokom ispitivanja na kidalici. Na slici 6.8 je prikazan primer izgleda epruveta koje su pripremljene za ispitivanje epruveta zatezanjem.



Slika 6.8: Pripremljene epruvete za ispitivanje jednoosnim zatezanjem (epruvete 1.1 i 1.2)

Druga metoda ispitivanja epruveta se odnosi na ispitivanje zatezanjem epruveta i beskontaktnim praćenjem deformacija metodom DIC, uzorci su takođe pripremljeni na identičan način kao i za prvi slučaj. Epruvete su nagrižene, a potom je obeležena ključna mesta (linija stapanja i ZUT).

Potom je na ispitne epruvete za jednoosno zatezanje naneta kontrastna šara (belo-crna), sa ciljem lakšeg praćenja pomeranja kamera prilikom ispitivanja i deformisanja. Primer pripremljene epruvete za ispitivanje zatezanjem je dat na slici 6.9.



Slika 6.9: Primer pripremljene epruvete za ispitivanje zatezanjem i beskontaktnim praćenjem deformacija stereometrijskom metodom posle nanošenja kontrastnih šara

### 6.3.3 Postavka eksperimenta

Kao i u slučaju ispitivanja osnovnog materijala, ispitivanje epruveta jednoosnim zatezanjem je izvršeno na INSTRON kraljici kapaciteta 250 kN (25 tona). Ideja je bila da se proces ispitivanja epruveta snima u HD rezoluciji. Na taj način bi mogle da se uoče promene tokom ispitivanja i adekvatno beleže izdvajanjem odgovarajućeg frejma. Kamera koja je za te potrebe korišćena je Canon. Obezbeđeno je odgovarajuće osvetljenje prostora. Na slici 6.10 prikazana je postavka kamere. Epruvete 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 3.1, 3.2, 4.1, 4.2 su ispitane i analizirane na ovaj način. Brzina deformisanja tokom ispitivanja jednoosnim zatezanjem je tokom ispitivanja svih epruveta iznosili 5 mm/min.



Slika 6.10: Postavka kamere za potrebe eksperimenta

Drugi deo pripreme i izvođenja ovog eksperimenta je urađen na Tehnološko-metalurškom fakultetu u Beogradu. Ispitivanje je rađeno na Shimadzu kidalici kapaciteta 250 KN (25 tona). DIC sistem kojim se prate deformacije na epruvetama tokom ispitivanja jednoosnim zatezanjem, se sastoji od pokretne platforme na koju je prikačen stalak sa dve kamere velike rezolucije koje snimaju pomeranje na epruvetama koje ispitujemo prateći pomeranje rastojanja na nanetim kontrastnim šarama (slika 6.11).



Slika 6.11: Izgled postavke DIC sistema na kidalici Shimadzu u laboratoriji TMF

Pre početka ispitivanja urađena je kalibracija na kalibracionom bloku 25x25 mm da bi se dobila zahtevana preciznost merenja, koja bi potom dala tačne rezultate ispitivanja. Važni podaci vezani za kalibraciju objekta su kalibraciona skala koja iznosi 21000 mmn, kao i koeficijent ekspanzije koji je  $4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Žižna daljina kamere je 50 mm. Dobijeni rezultati kalibracije su



devijacija kalibracije od 0,03 piksela, ugao kamere 25,8 stepeni dok je variranje ugla od -18/13,3 stepeni variranje visine je 2,7 mm, merna zapremina 35/25/15 mm.

## 6.4 Rezultati ispitivanja jednoosnim zastezanjem

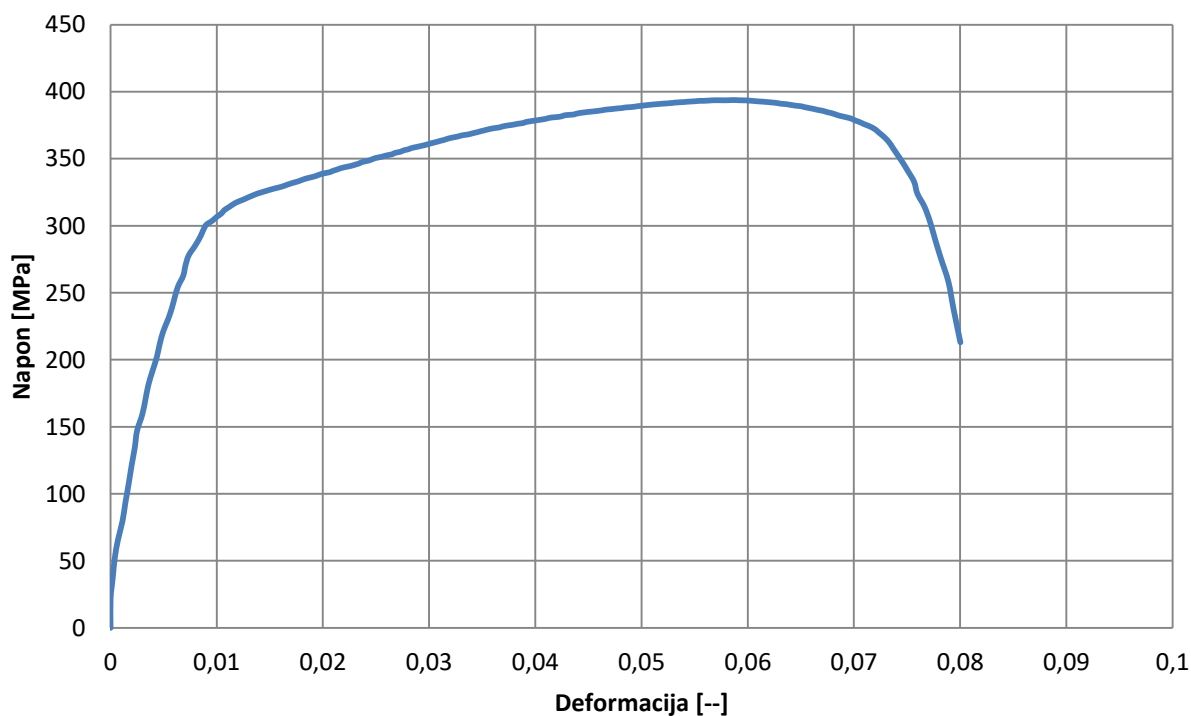
Ovaj deo poglavlja će biti podeljen po grupama epruveta. U okviru svake grupe biće prikazani dijagrama rezultata, merenja deformacija HD kamerama i sistemom Aramis.

Snimanje pomeranja (deformacija) HD kamerama je urađeno tako što su unete reperne tačke i potom mehanički merena ostojanja nastala pomeranjem repernih tačaka.

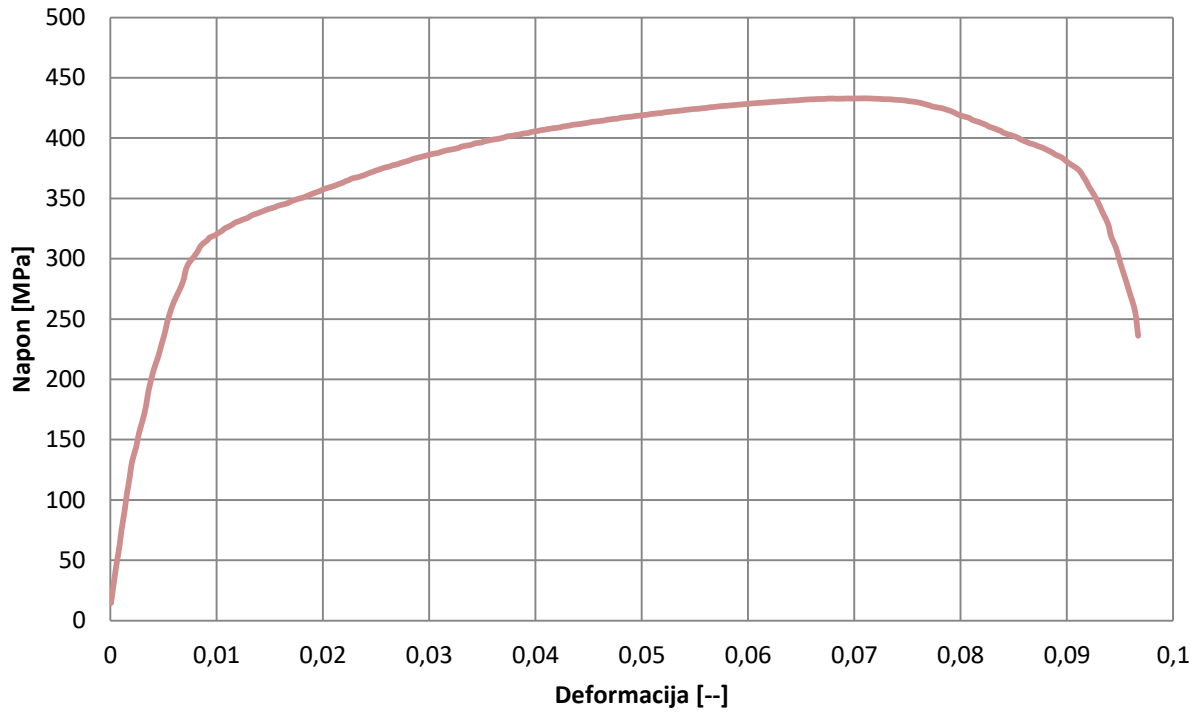
### 6.4.1 Rezultati ispitivanja jednoosnim zatezanjem grupe epruveta 1

#### 6.4.1.1 Prikaz dijagrama napon deformacija grupe epruveta 1

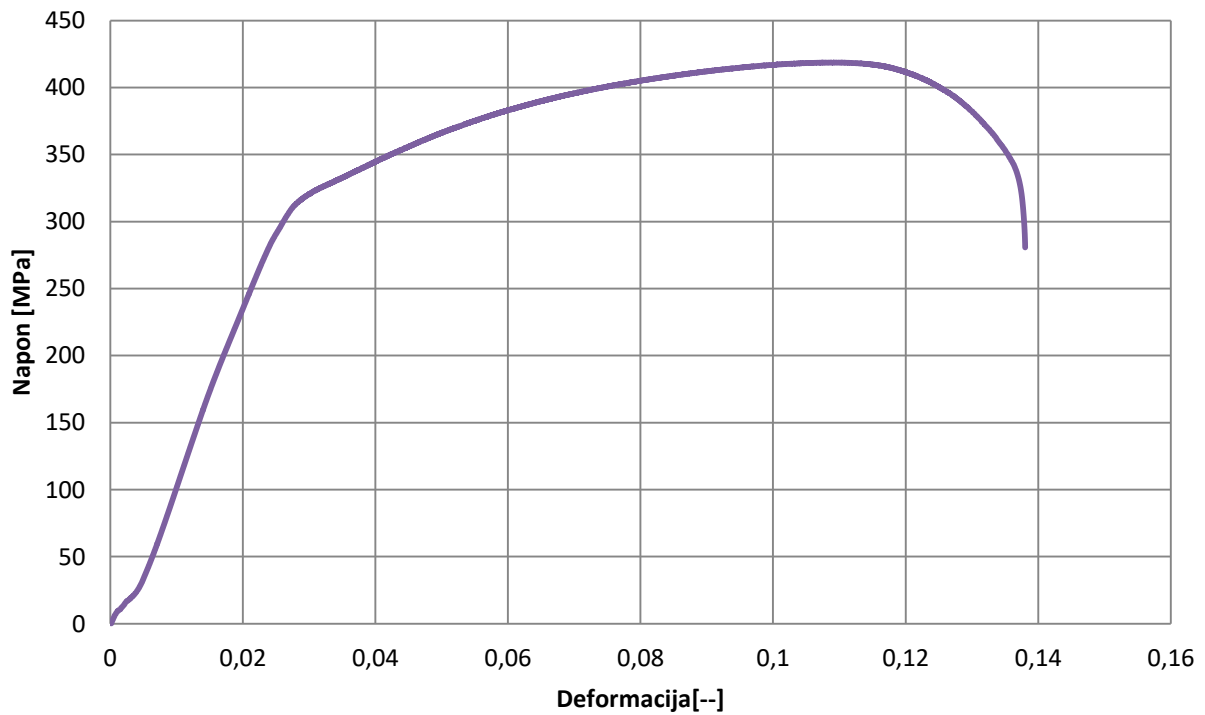
Na slikama 6.12 do 6.15 prikazani su dijagrami napon-deformacija ispitivanja grupe epruveta 1.



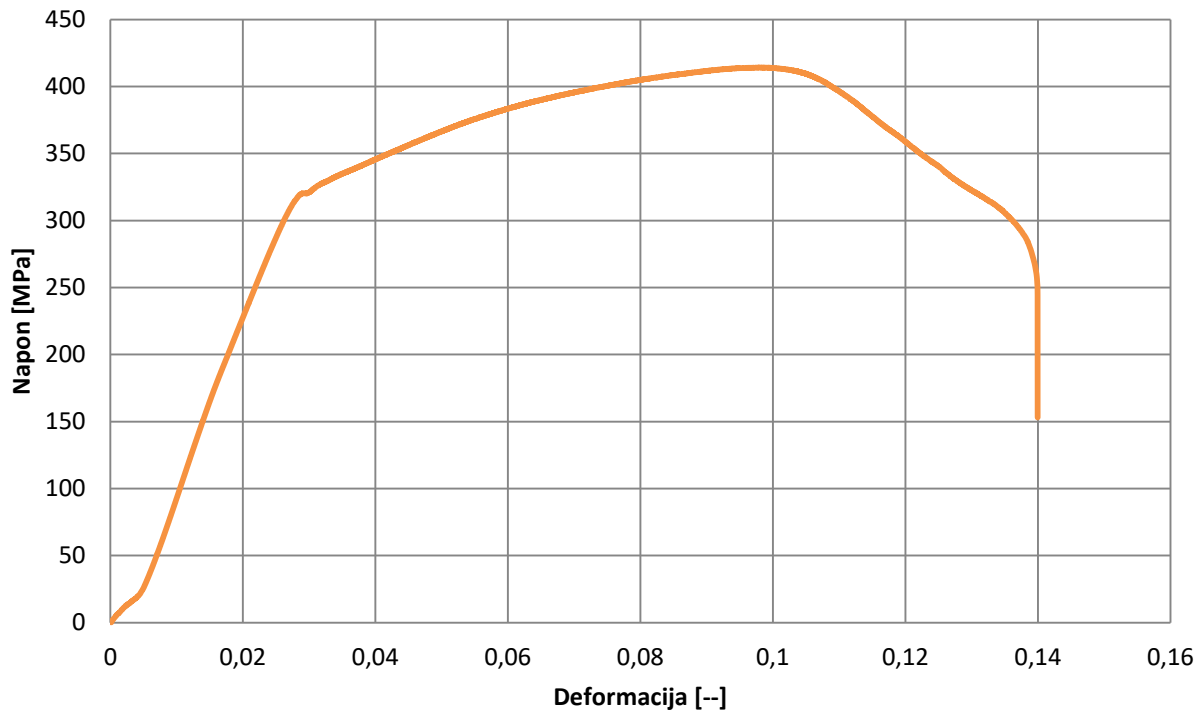
Slika 6.12 : Dijagram Napon-deformacija, epruveta 1.1



Slika 6.13 : Dijagram Napon-deformacija, epruveta 1.2



Slika 6.14 : Dijagram Napon-deformacija, epruveta 1.3



Slika 6.15 : Dijagram Napon-deformacija, epruveta 1.4

#### 6.4.1.2 Pomeranja referentnih tačaka, snimanih HD kamerom

Epruvete 1.1 i 1.2 na koje su unete reperne tačke su snimane HD kamerom i praćeno je merenje i pomeranje zadatih tačaka tokom ispitivanja zatezanjem. Snimanje pomeranja je praćeno sinhrono tokom zatezanja kako bi vreme početka i završetka tokom ispitivanja kidalicom bilo istovremeno. Sve epruvete su podeljene na dve zone: gornju zonu (koja predstavlja zonu lica šava) i donju zonu (koja predstavlja zonu korena zavarenog spoja). Svaka zona ima po šest tačaka: dve tačke su osnovnom materijalu, dve tačke na prelazu između zone uticaja toplote i osnovnog materijala i dve na liniji stapanja. Njihovim pomeranjem se može steći uvid u uoštenu ponašanje svake zone zavrenog spoja.

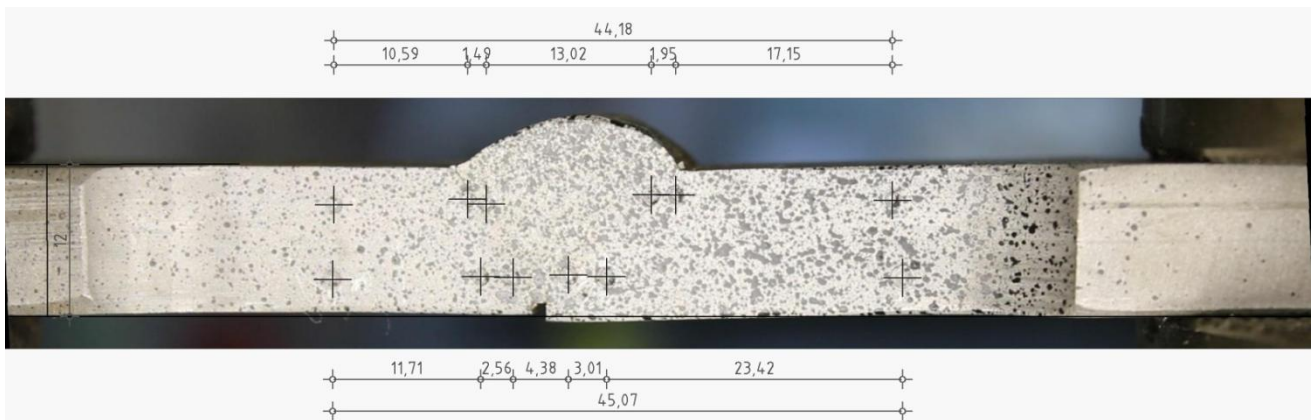
Metoda DIC je bila inspiracija da se testira i uopšte formuliše ova metoda, koja bi omogućila merenje deformacija u uslovima terenskog rada, jer metoda DIC zahteva laboratorijske uslove. Dakle, kao što je već pomenuto pozicionirane su tačke i snimane kamerama visoke rezolucije. Zatim su pomeranja merena korišćenjem jednostavnih softvera za obradu slike. Ova metoda se nije pokazala kao najpreciznija u slučaju ispitivanja koja zahtevaju veliku preciznost, odnosno procenu položaja tačaka ljudskim okom. U doktorskoj disertaciji će detaljno biti prikazana primena ove metodologije za epruvetu 1.1, dok će za ostale epruvete (1.2, 2.1, 2.2, 3.1, 3.2, 4.1, 4.2, 5.1, 5.2) rezultati primene ove metode biti prikazani u dodatku 2.

Međutim, ova metoda je pokazala očekivane rezultate ponašanja pojedinih zona zavarenog spoja. Fotografije na kojima je mereno pomeranje tačaka su direktno povezane sa dijagramom napon-deformacija vreme – napon – deformacija. Tačka 0 predstavlja početni položaj epruvete posle 2 sekunde rada kidalice, tačnije po uspostavljanju ravnotežnog stanja. Tačka 2 (u 6 sekundi) je tačka izabrana u zoni elastičnosti pred ulazak u plastičnu zonu. Sve tačke nakon ove tačke su u plastičnoj zoni. Primer procesa merenja rastojanja je dat na slikama 6.16 – 6.25 a tabele sa vrednostima, rastojanjima i pomeranjima su data ispod (tabele 6.4 – 6.8). Zbog neadekvatne primene ove metode u slučaju merenja malih deformacija primena ove metode je ograničena i nije razmatrana u daljem delu ove doktorske disertacije.

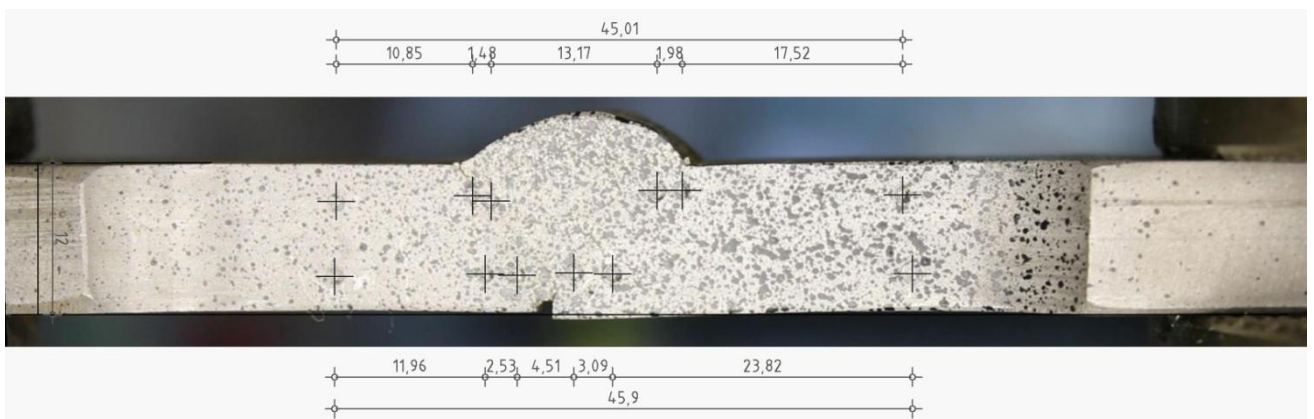
## Epruveta 1.1

Tabela 6.4: Ključne tačke pri jednoosnom zatezanju

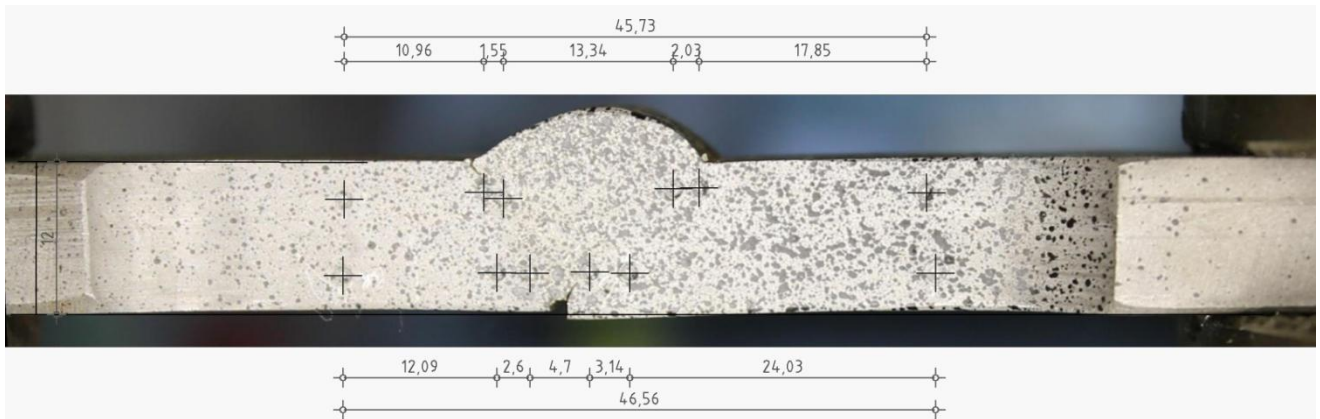
Epruveta 1.1			
Tačke	Napon [MPa]	Deformacija [%]	Vreme [s]
0	/	/	2
1	270	0.7	6
2	309	1	8
3	339	2	12
4	361	3	17
5	379	4	22
6	389	5	26
7	393	6	31
8	375	7	36
9	213	8	39



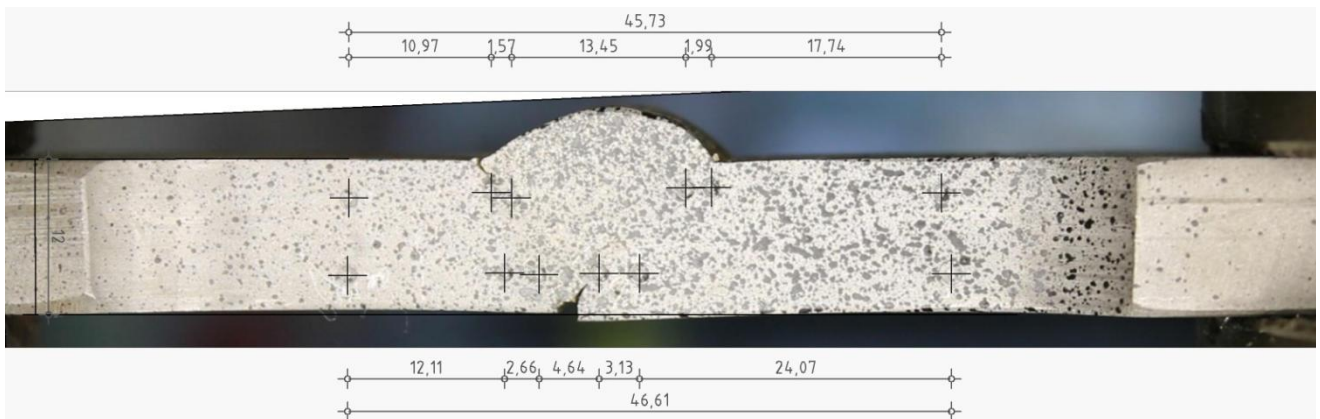
Slika 6.16: Epruveta 1.1 tačka 0



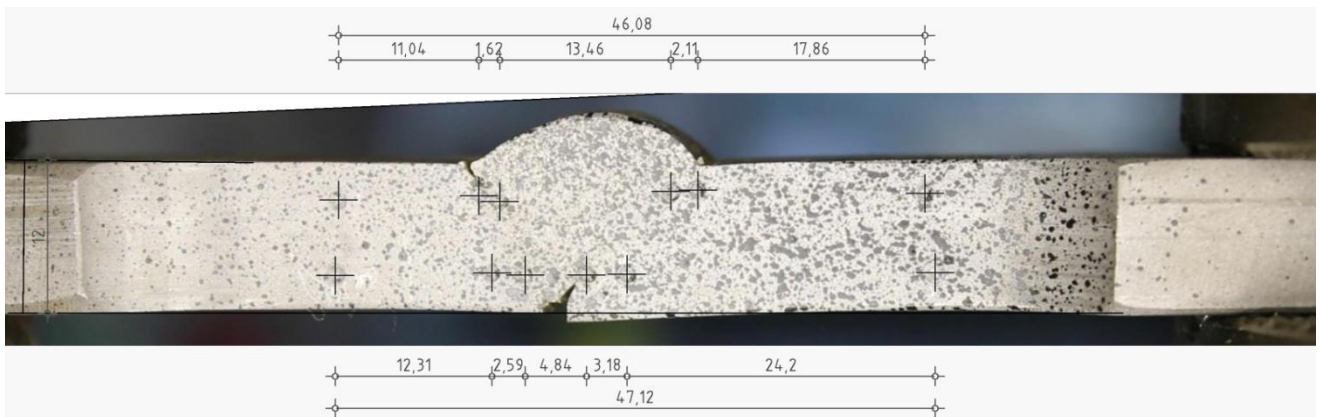
Slika 6.17: Epruveta 1.1, tačka 1



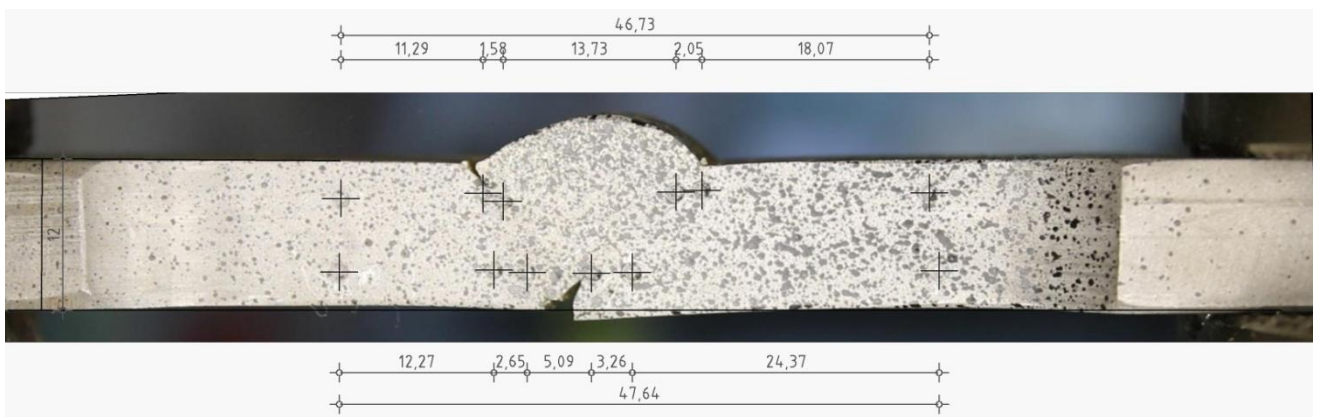
Slika 6.18: Epruveta 1.1, tačka 2



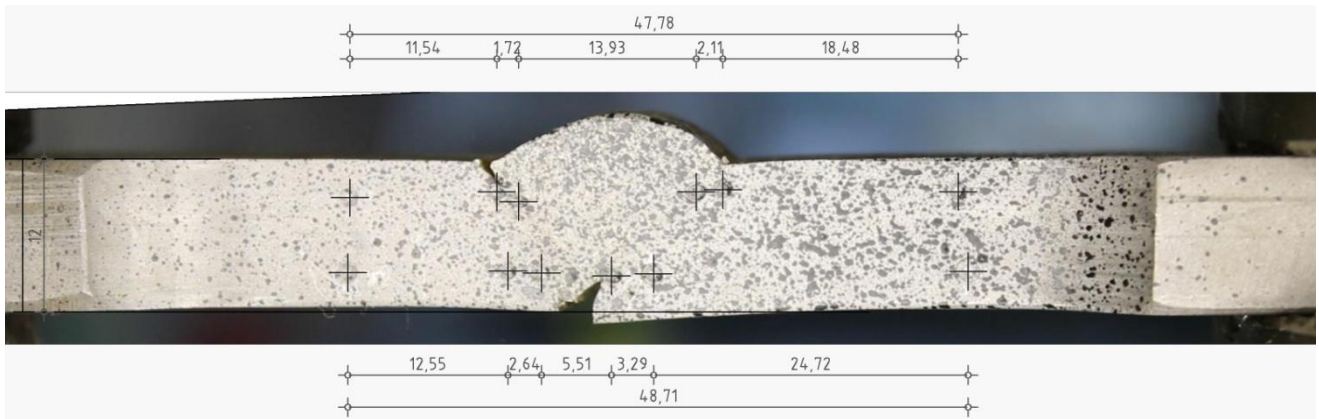
Slika 6.19: Epruveta 1.1, tačka 3



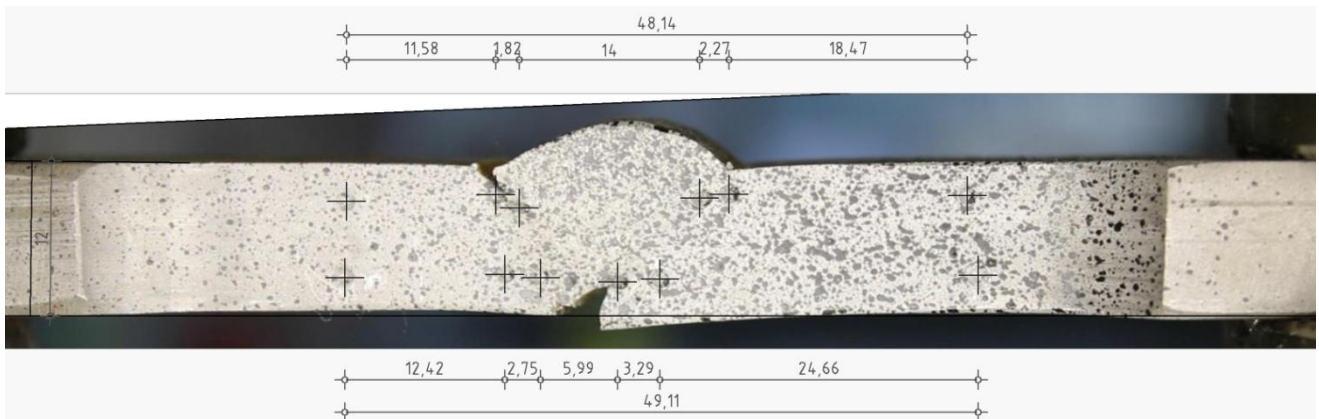
Slika 6.20: Epruveta 1.1, tačka 4



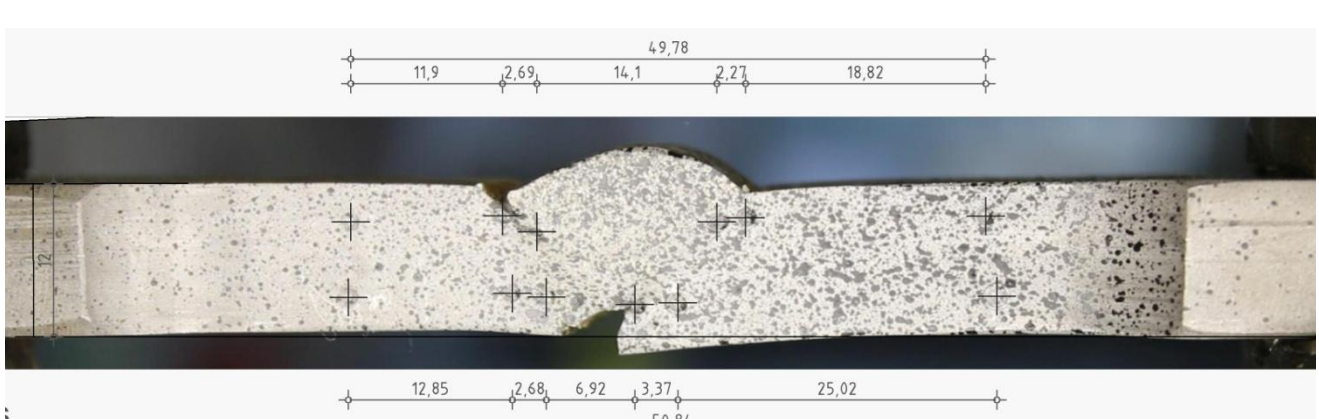
Slika 6.21: Epruveta 1.1, tačka 5



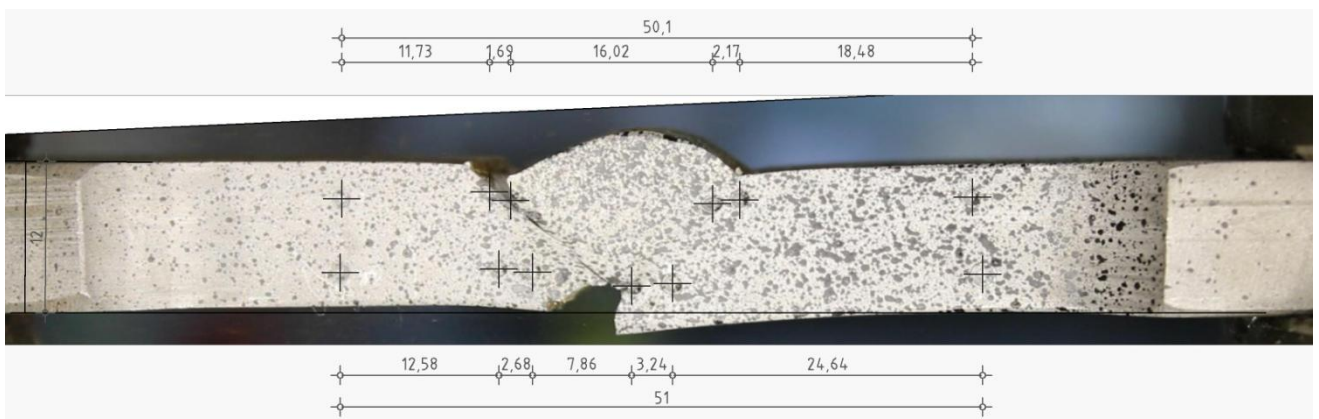
Slika 6.22: Epruveta 1.1, tačka 6



Slika 6.23: Epruveta 1.1, tačka 7



Slika 6.24: Epruveta 1.1, tačka 8



Slika 6.25: Epruveta 1.1, tačka 9

Tabela 6.5: Epruveta 1.1 rastojanja između mernih tačaka gornji pojas (lice šava)

Epruveta 1.1 rastojanja između mernih tačaka gornji pojas (lice šava) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	10,59	1,49	13,02	1,95	17,15
1	10,85	1,48	13,17	1,98	17,52
2	10,96	1,55	13,34	2,03	17,85
3	10,97	1,57	13,45	1,99	17,74
4	11,04	1,62	13,46	2,11	17,86
5	11,29	1,58	13,73	2,05	18,07
6	11,54	1,72	13,93	2,11	18,48
7	11,58	1,82	14	2,27	18,47
8	11,9	1,69	14,1	2,27	18,82
9	11,73	1,69	16,02	2,17	18,48

Tabela 6.6: Epruveta 1.1 rastojanja između mernih tačaka donji pojas (koren)

Epruveta 1.1 rastojanja između mernih tačaka donji pojas (koren) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	11,71	2,56	4,38	3,01	23,42
1	11,96	2,53	4,51	3,09	23,82
2	12,09	2,6	4,7	3,14	24,03
3	12,11	2,66	4,64	3,13	24,07
4	12,31	2,59	4,84	3,18	24,2
5	12,27	2,65	5,09	3,26	24,37
6	12,55	2,64	5,51	3,29	24,72
7	12,42	2,75	5,99	3,29	24,66
8	12,85	2,68	6,92	3,37	25,02
9	12,58	2,68	7,86	3,24	24,64

Tabela 6.7: Epruveta 1.1 pomeranja između mernih tačaka gornji pojas (lice šava)

Epruveta 1.1 pomeranja između mernih tačaka gornji pojas (lice šava) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	/	/	/	/	/
1	0,26	-0,01	0,15	0,03	0,37
2	0,37	0,06	0,32	0,07	0,7
3	0,38	0,08	0,43	0,04	0,59
4	0,45	0,13	0,44	0,16	0,71
5	0,7	0,09	0,71	0,1	0,92
6	0,59	0,23	0,91	0,16	1,33
7	1,03	0,33	0,98	0,32	1,32
8	1,34	0,2	0,99	0,32	1,67
9	1,14	0,2	3	0,22	1,33

Tabela 6.8: Epruveta 1.1 pomeraja između mernih tačaka donji pojas (koren)

Epruveta 1.1 rastojanja između mernih tačaka donji pojas (koren) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	/	/	/	/	/
1	0,25	-0,03	0,13	0,08	0,4
2	0,38	0,04	0,32	0,13	0,61
3	0,4	0,1	0,26	0,12	0,65
4	0,6	0,03	0,46	0,17	0,78
5	0,56	0,09	0,71	0,25	0,95
6	0,84	0,08	1,13	0,28	1,3
7	0,71	0,19	1,61	0,28	1,24
8	1,14	0,12	2,54	0,36	1,6
9	0,87	0,12	3,3	0,23	1,22

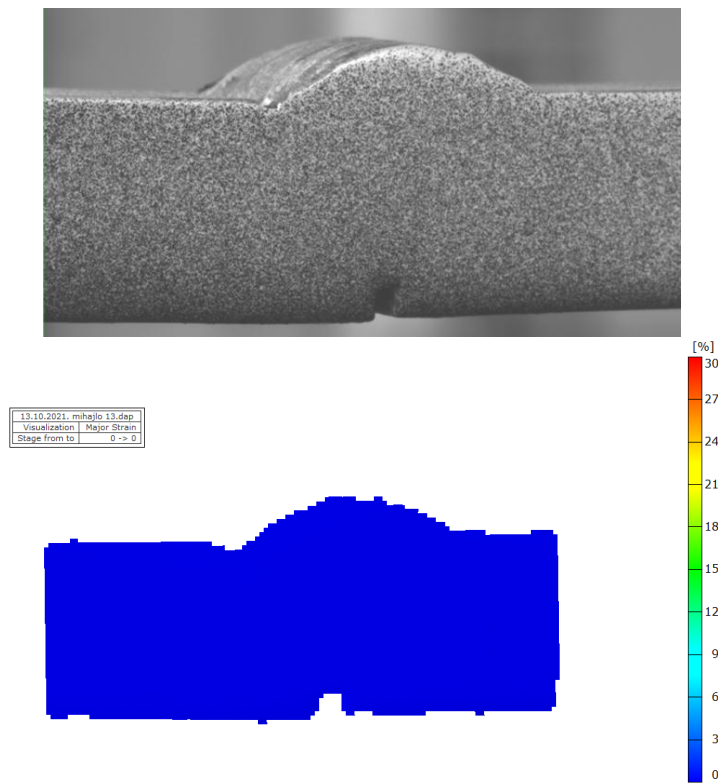
#### 6.4.1.3 Merenje deformacije sistemom ARAMIS za epruvete grupe 1

Deformacije epruveta 1.3 i 1.4 tokom ispitivanja su merene steremetijskom metodom, a rezultati su obrađeni u softverskom paketu ARAMIS. Deformacije su praćene metodom DIC, koraci fotografisanja su označeni kao stage, gde stage 0 odgovara 2 sekundi, stage 2 odgovara 4 sekundi itd. Kao što je prethodno rečeno, softver upoređuje fotografije posmatranog objekta u nedeformisanom stanju i u svim stadijumima deformisanja. Na osnovu toga softver ARAMIS proračunava deformacije. Polja deformacija epruvete grupe 1 prikazani su na sledećim slikama 6.26 - 6.34 za ispitnu epruvetu 1.3 i na slikama 6.35 – 6.39.

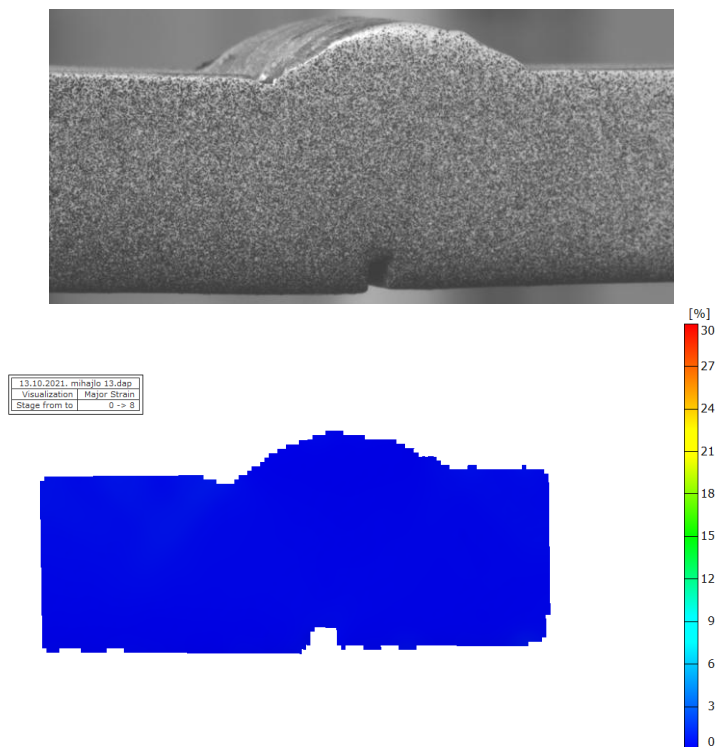
Velika prednost ove metode u odnosu na konvencionalne metode (na primer u odnosu na metodu mernih traka) je upravo dobijanje celog polja deformacije, što je naročito značajno u zonama gde je gradijent promene napona veliki. U ovom slučaju prednost dobijanja celog polja deformacije je to što je moguće deformaciju pratiti u svim zonama istovremeno, a isto tako moguće je bilo pratiti rast prsline kada se ona pojavila. Na svim slikama prikazanim ispod su paralelno date fotografije posmatranog zavarenog spoja i preračunate deformacije.



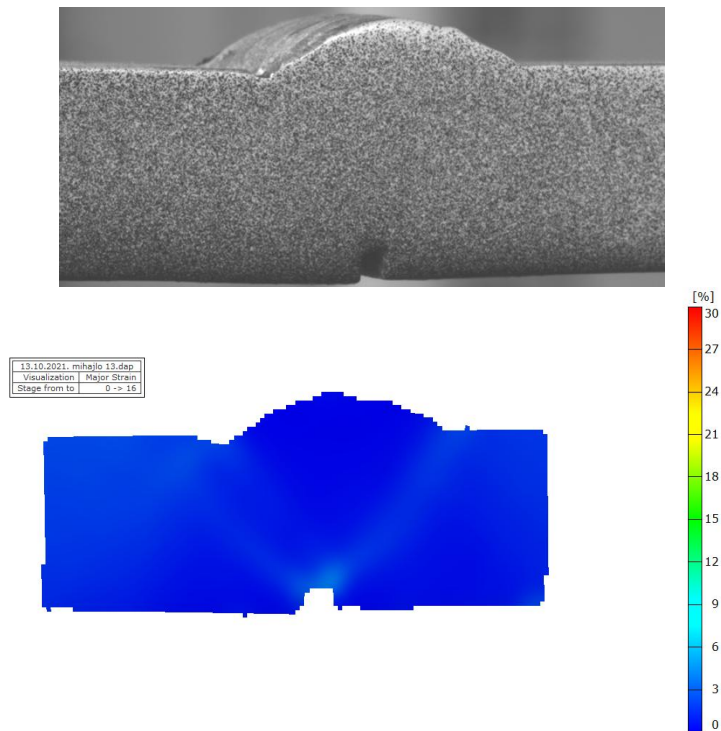
### Epruveta 1.3



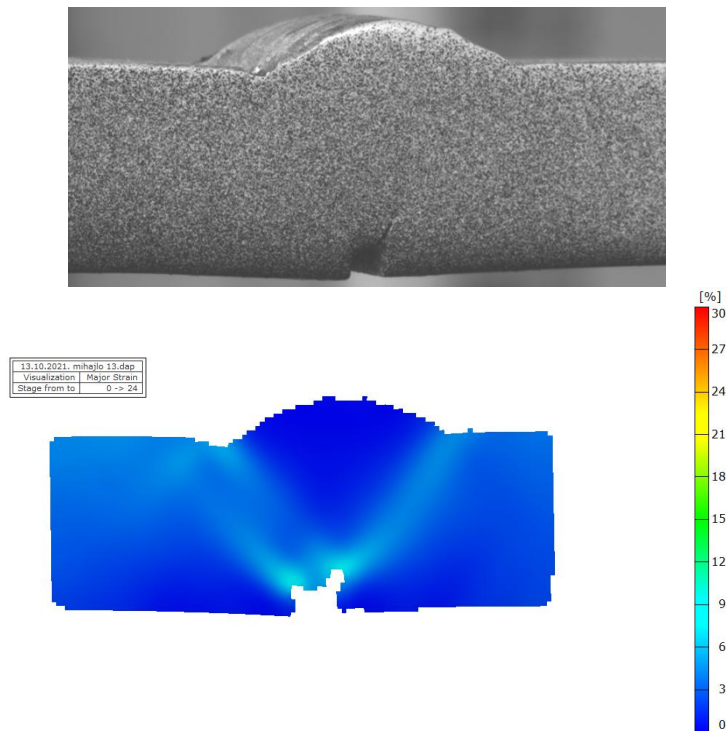
Slika 6. 26: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 0



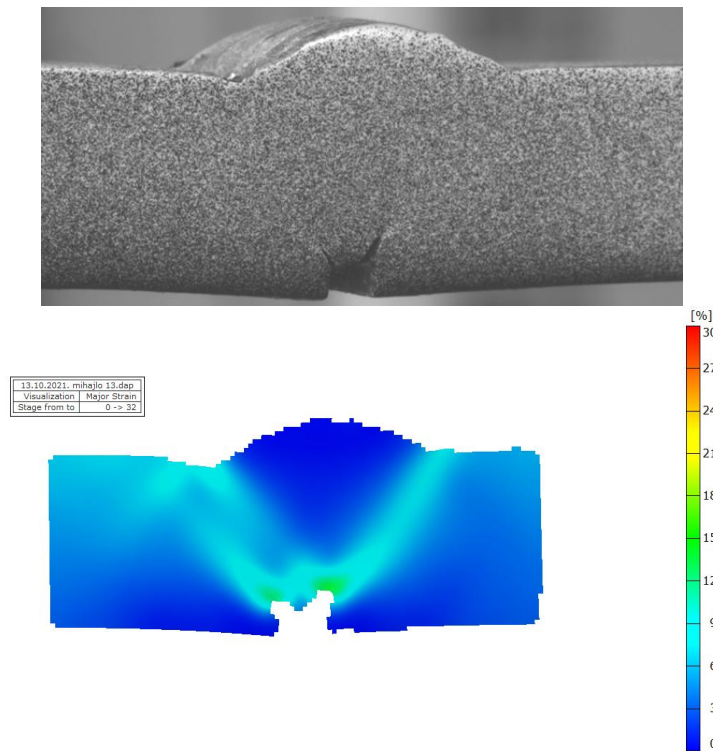
Slika 6.27: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 8



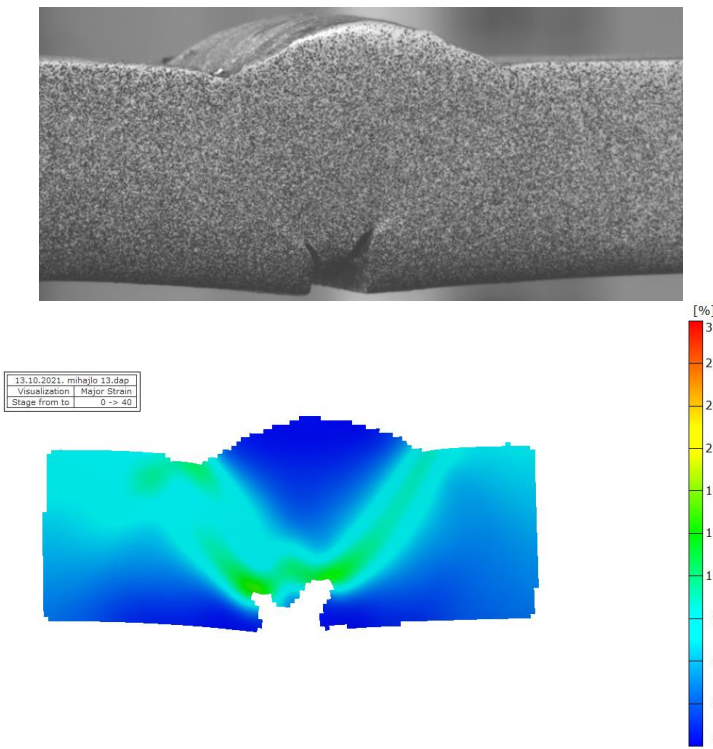
Slika 6.28: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 16



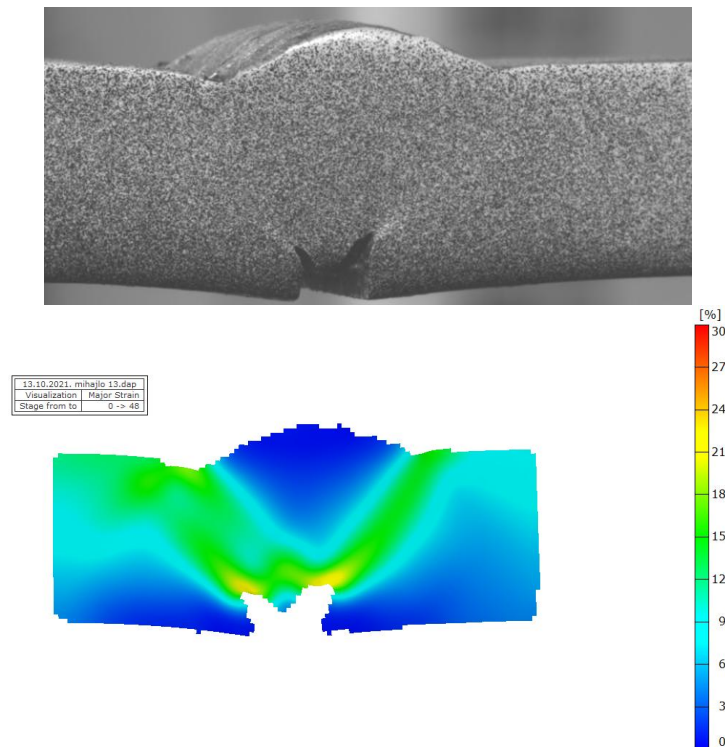
Slika 6.29: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 24



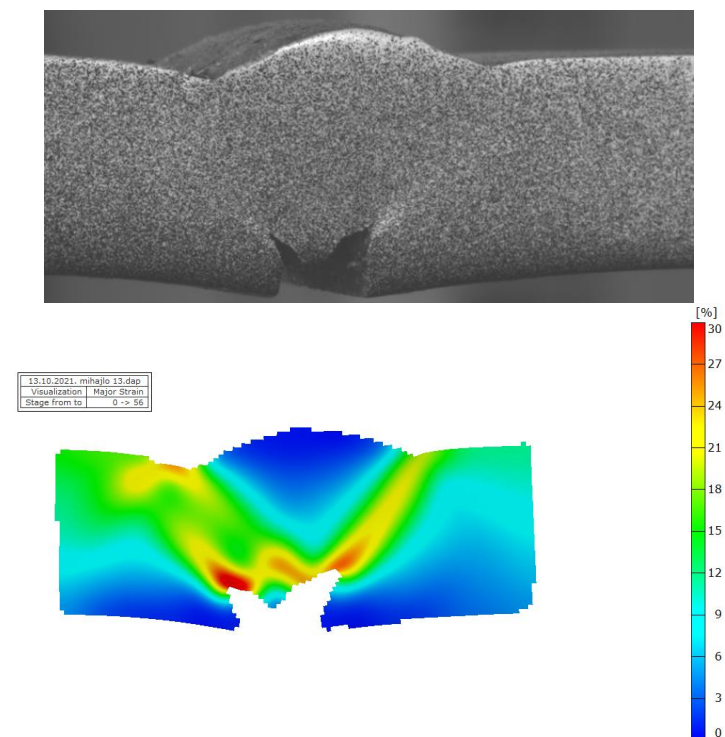
Slika 6.30: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 32



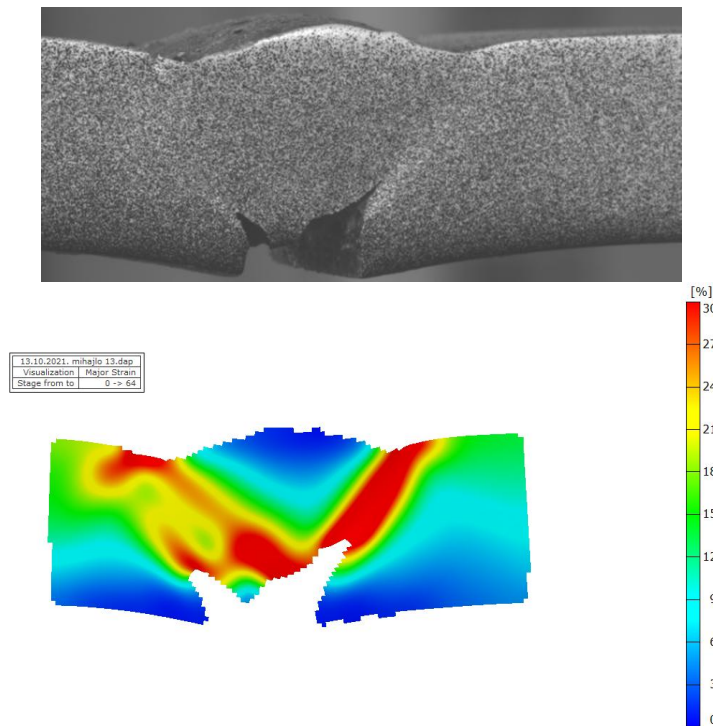
Slika 6.31: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 40



Slika 6.32: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 48

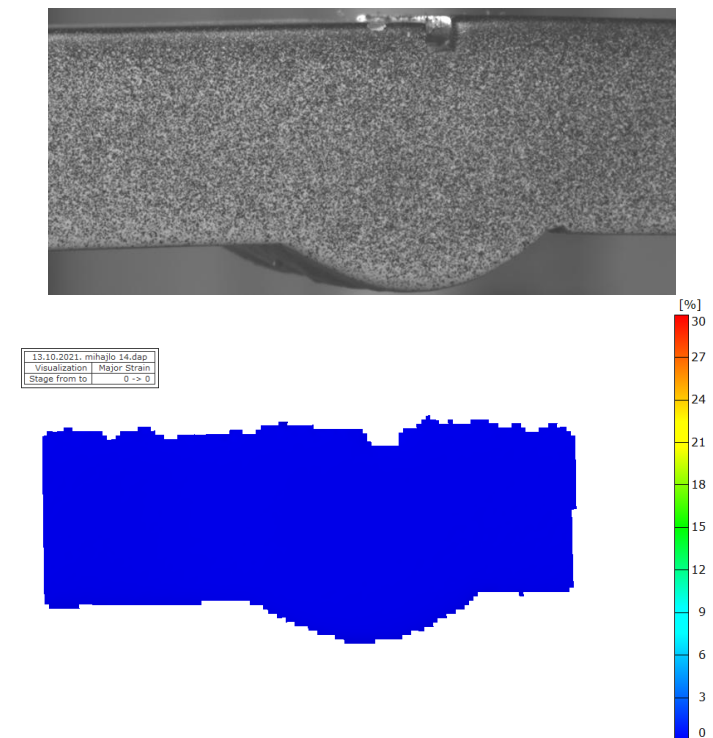


Slika 6.33: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 56

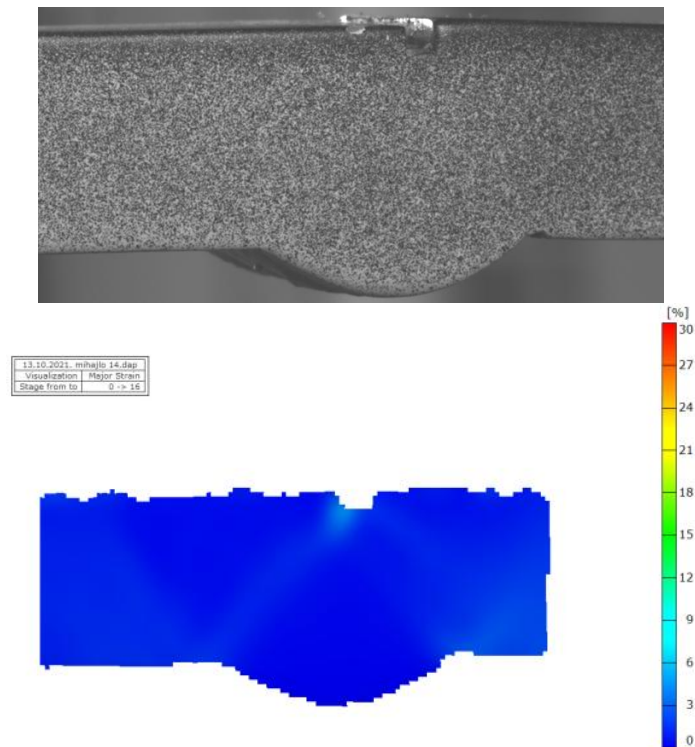


Slika 6.34: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 64

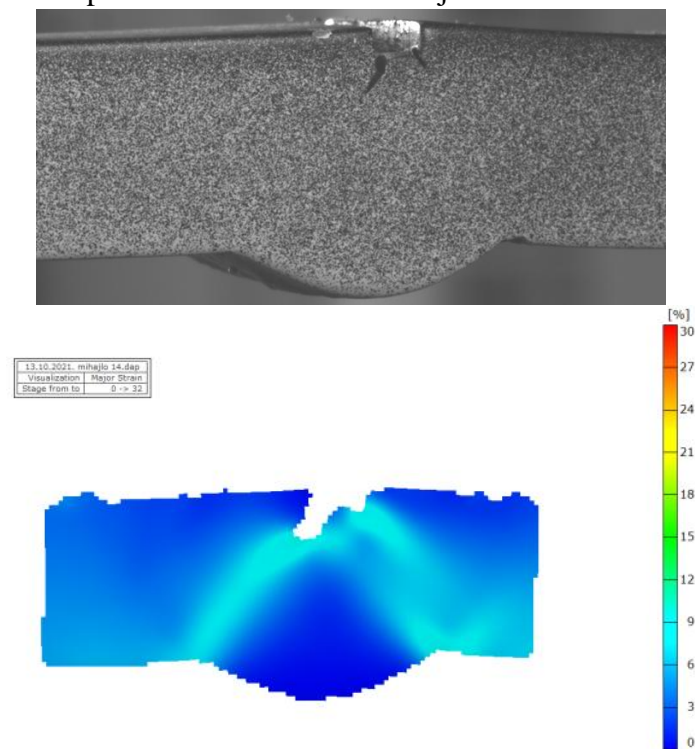
#### Epruveta 1.4



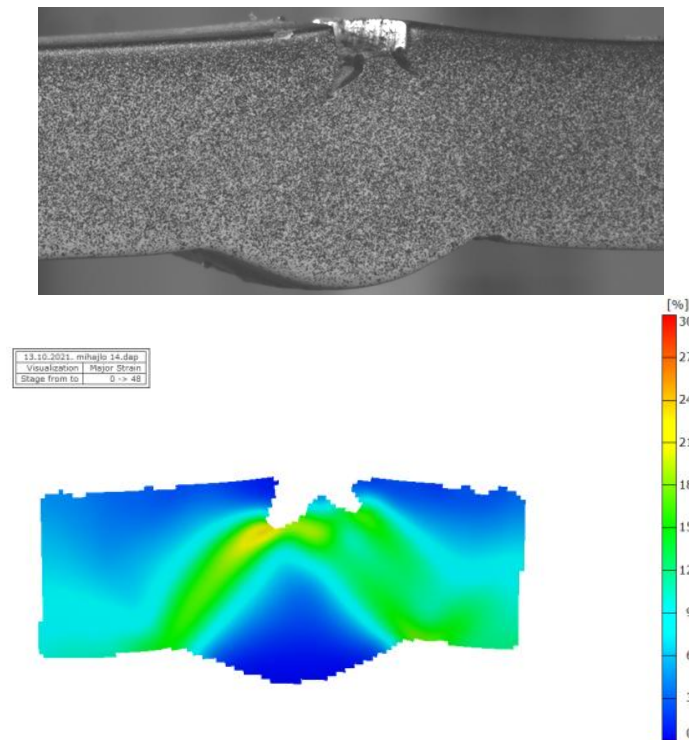
Slika 6.35: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 0



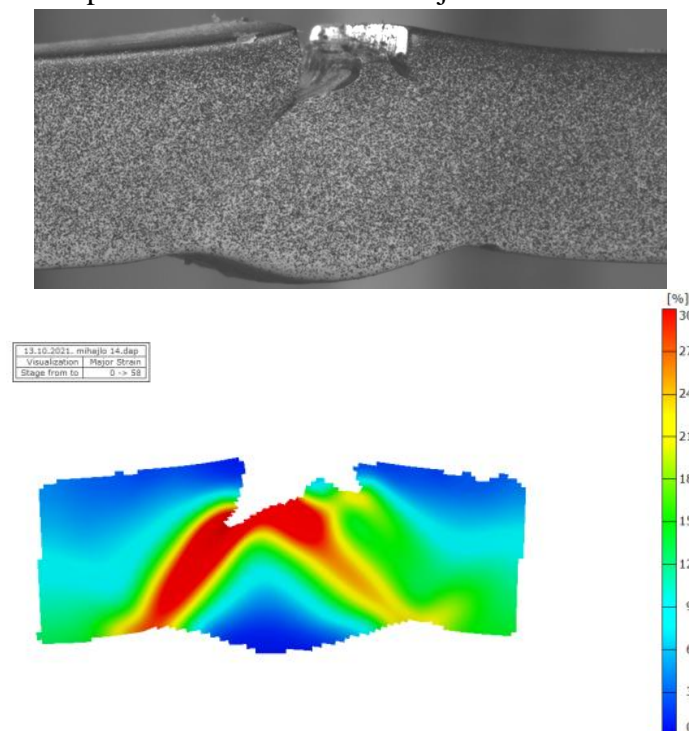
Slika 6.36: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 16



Slika 6.37: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 32



Slika 6.38: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 48

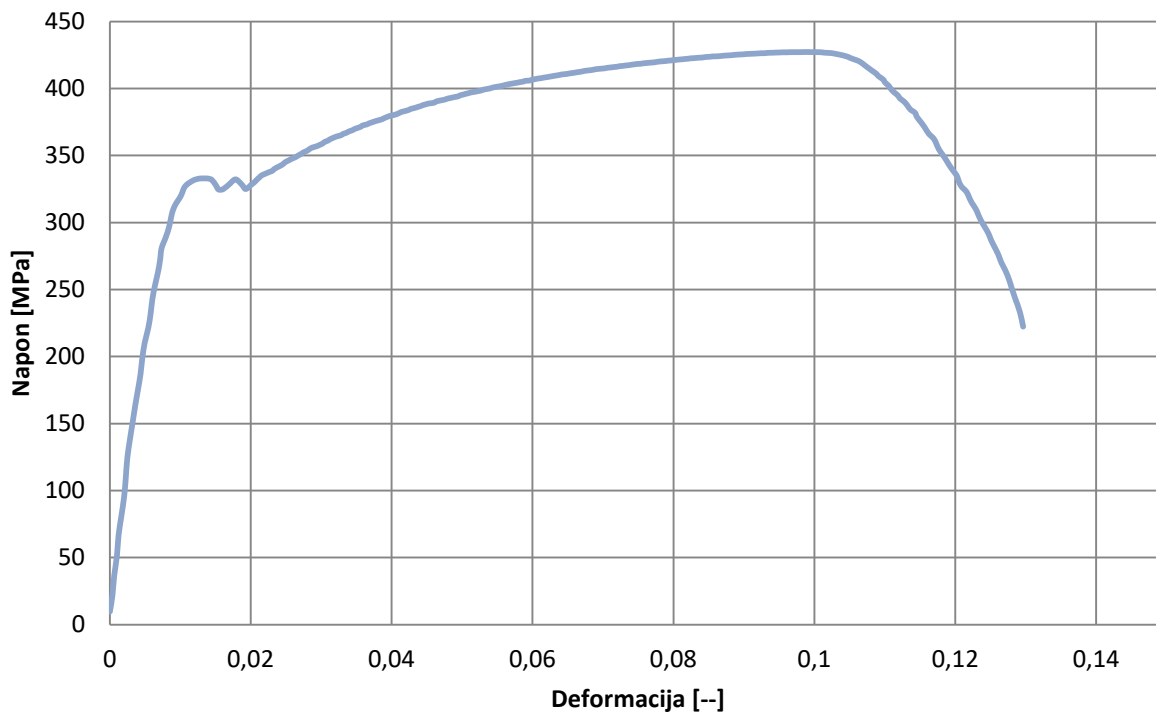


Slika 6.39: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 58

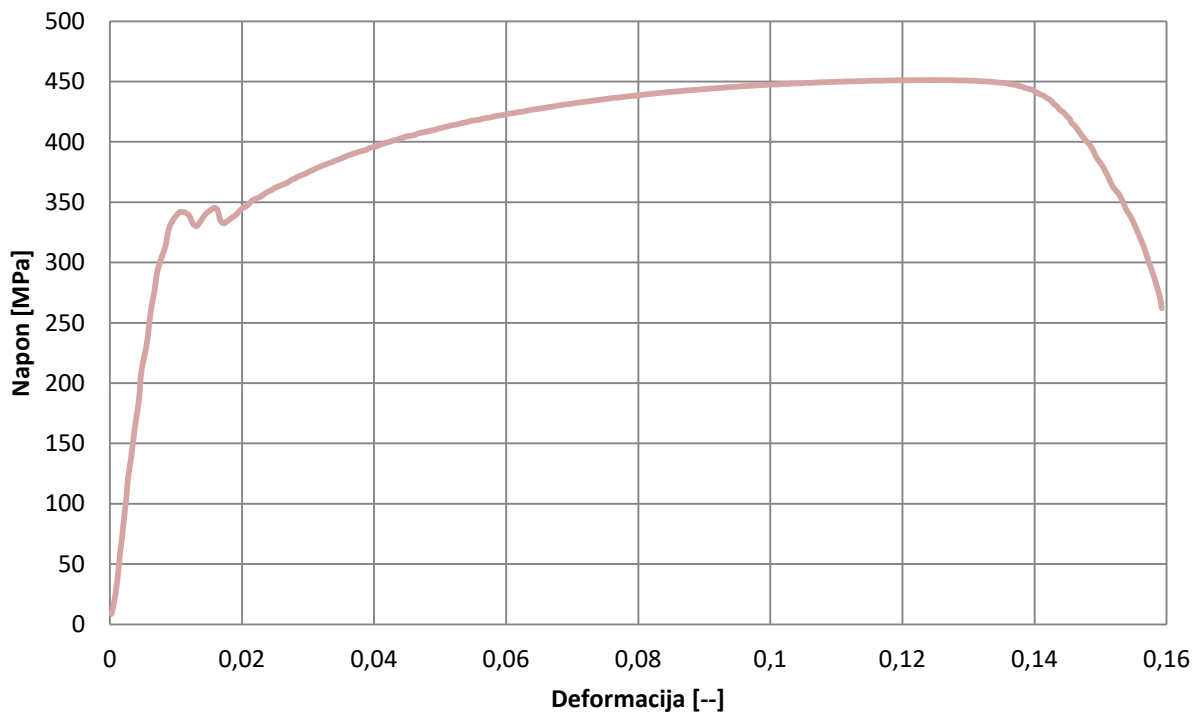
## 6.4.2 Rezultati ispitivanja jednoosnim zatezanjem grupe epruveta 2

### 6.4.2.1 Prikaz dijagrama napon deformacija za epruveta grupe 2

Na slikama 6.40 do 6.43 prikazani su dijagrami napon-deformacija ispitivanja grupe epruveta jedan.

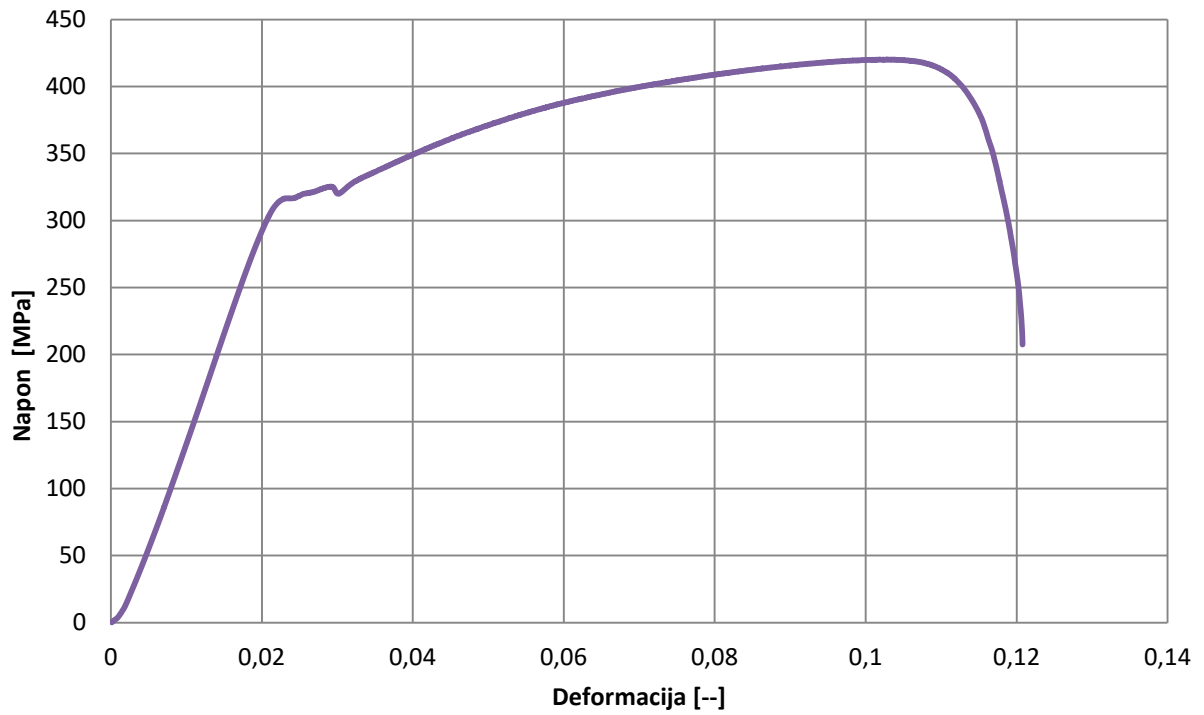


Slika 6.40 : Dijagram Napon-deformacija, epruveta 2.1

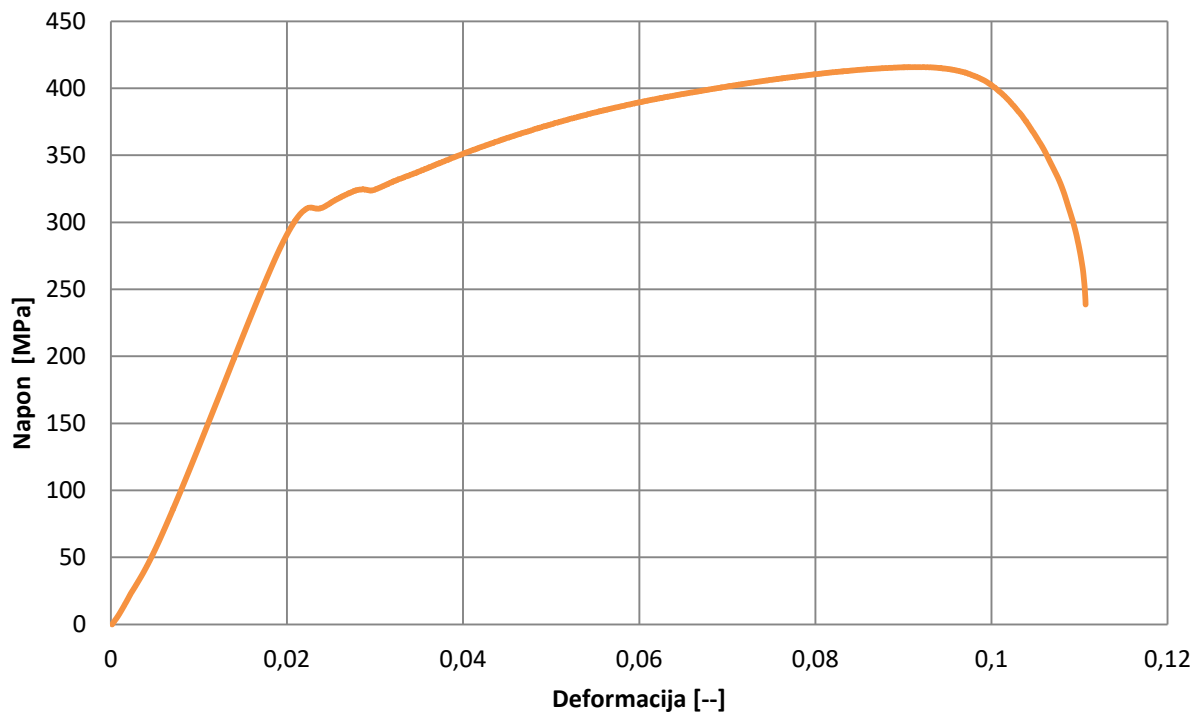


Slika 6.41 : Dijagram Napon-deformacija, epruveta 2.2





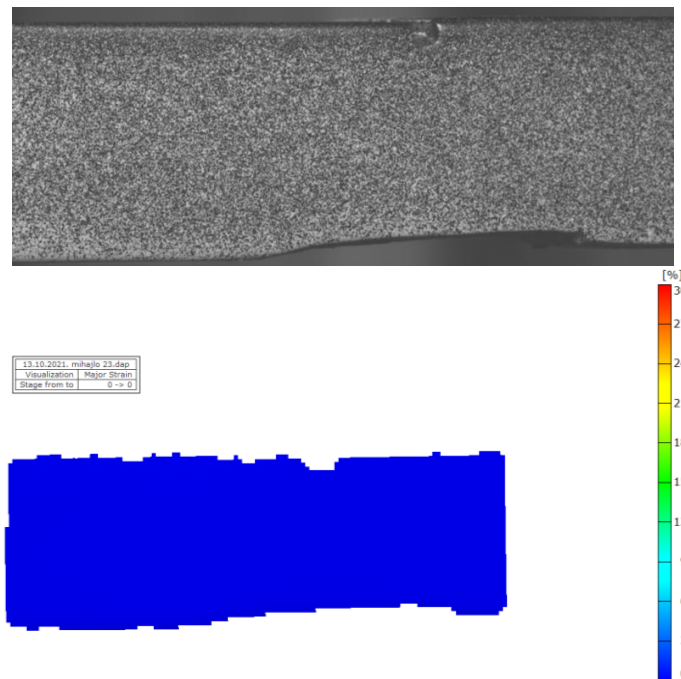
Slika 6.42 : Dijagram Napon-deformacija, epruveta 2.3



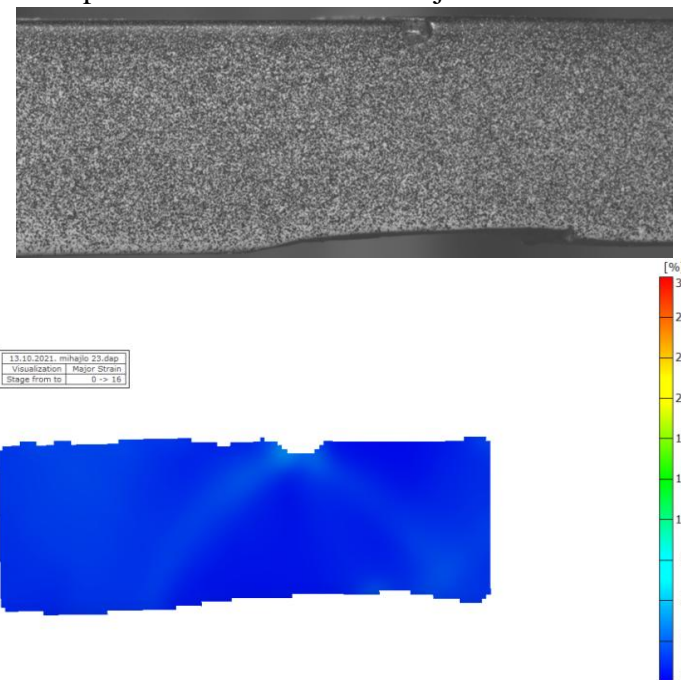
Slika 6.43 : Dijagram Napon-deformacija, epruveta 2.4

### 6.4.2.2 Merenje deformacije sistemom ARAMIS za epruvete grupe 2

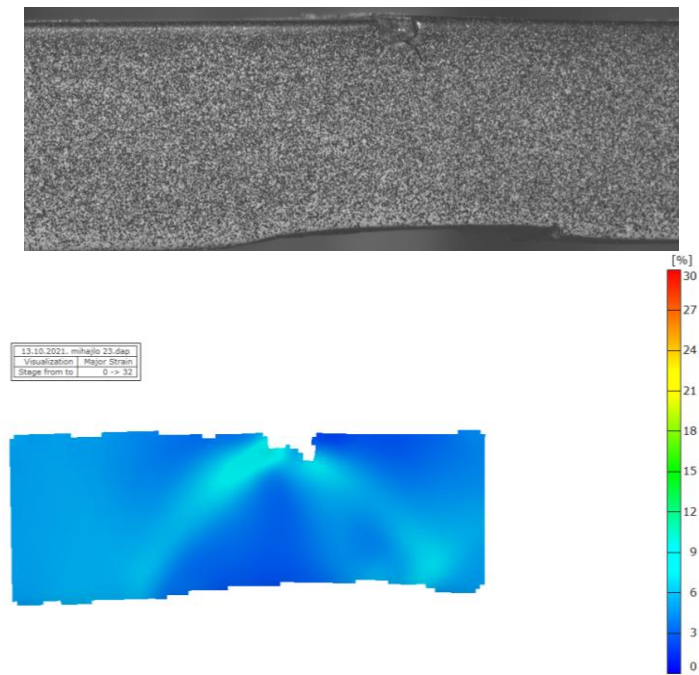
#### Epruveta 2.3



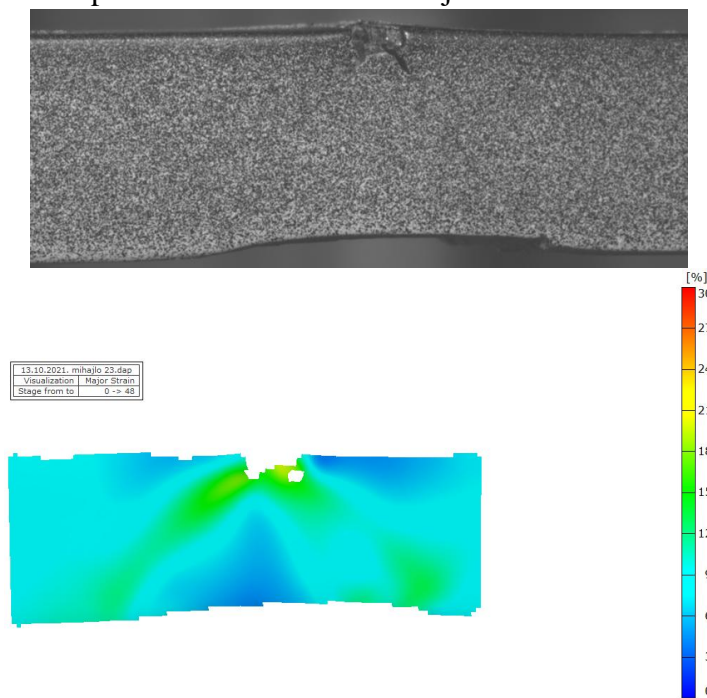
Slika 6.44: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 0



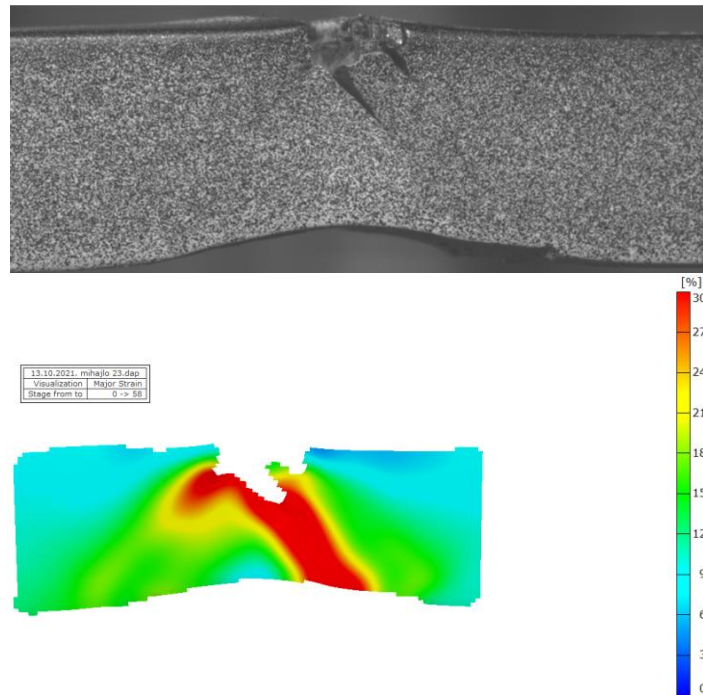
Slika 6.45: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 16



Slika 6.46: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 32

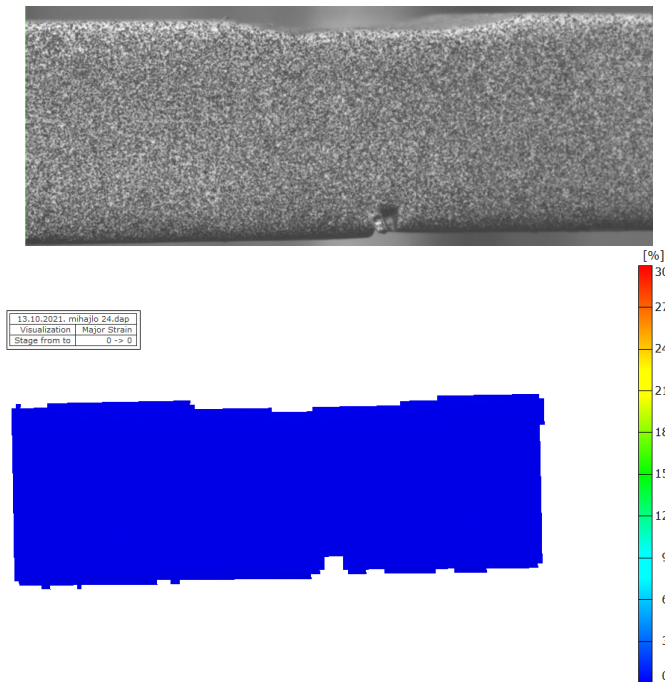


Slika 6.47: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 48

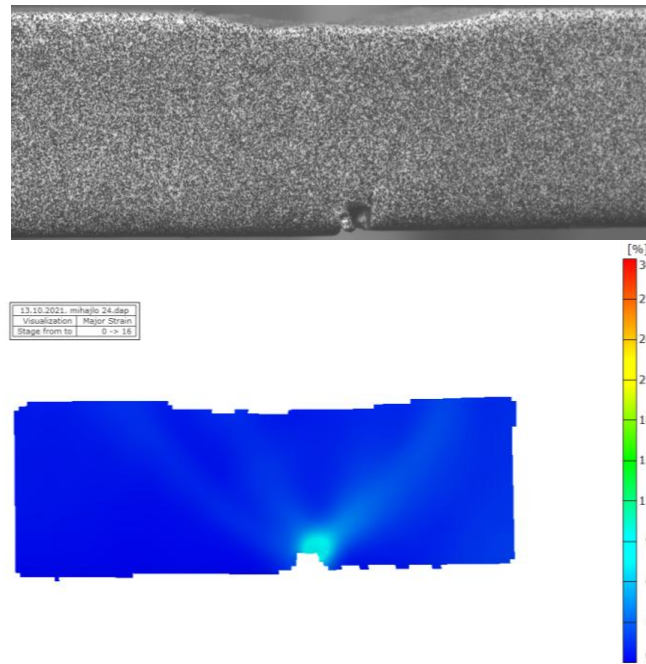


Slika 6.48: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 58

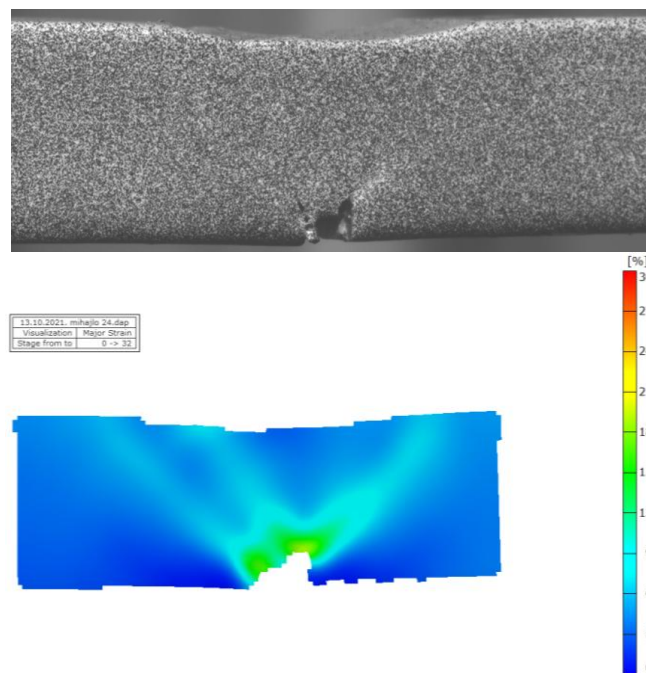
#### Epruveta 2.4



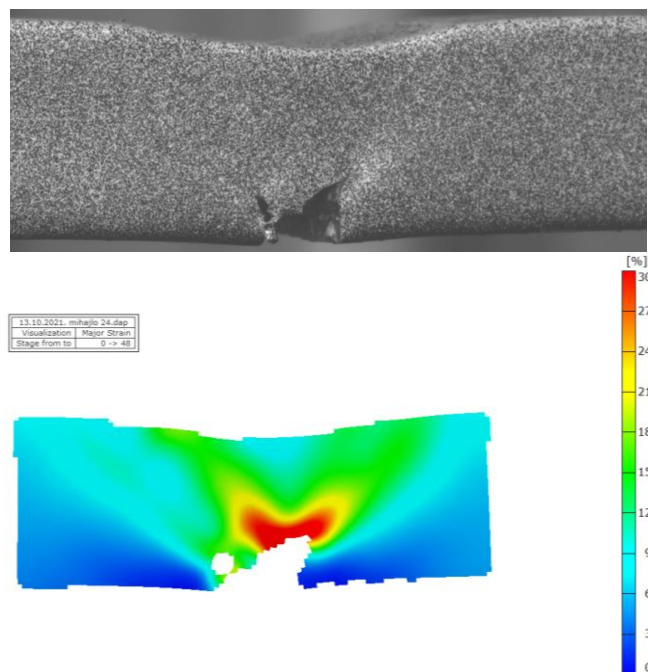
Slika 6.49: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 0



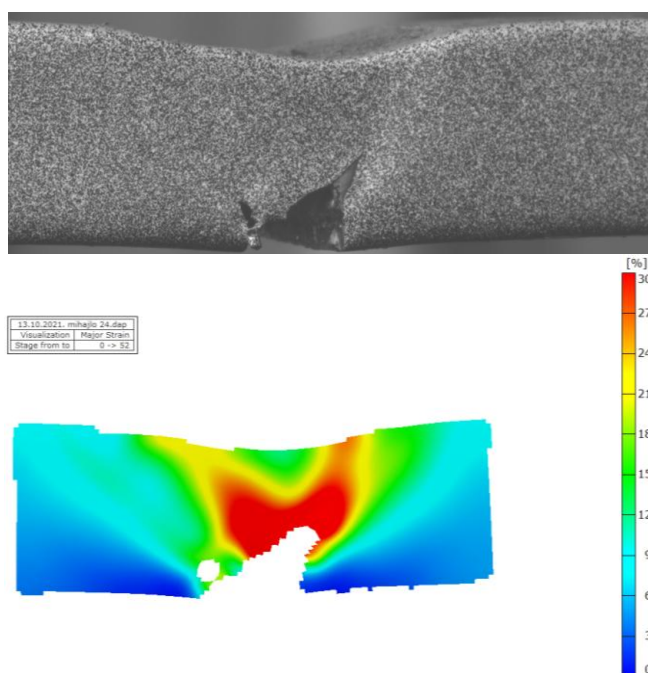
Slika 6.50: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 16



Slika 6.51: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 32



Slika 6.52: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 48

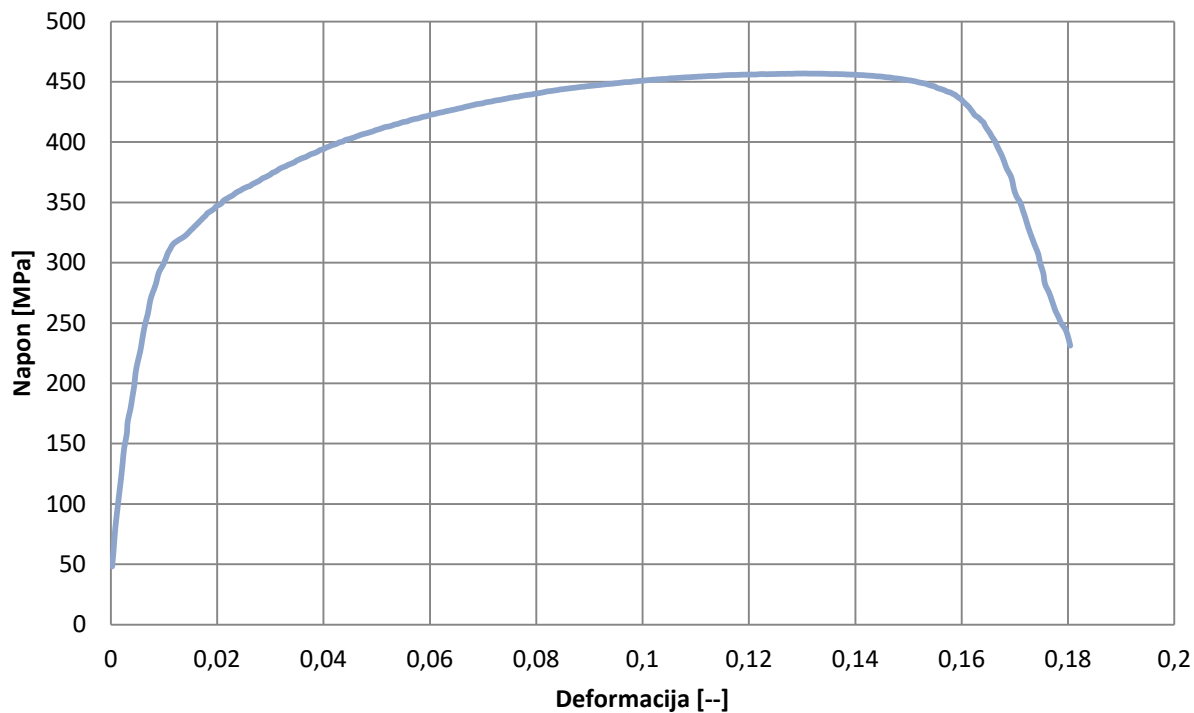


Slika 6.53: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 52

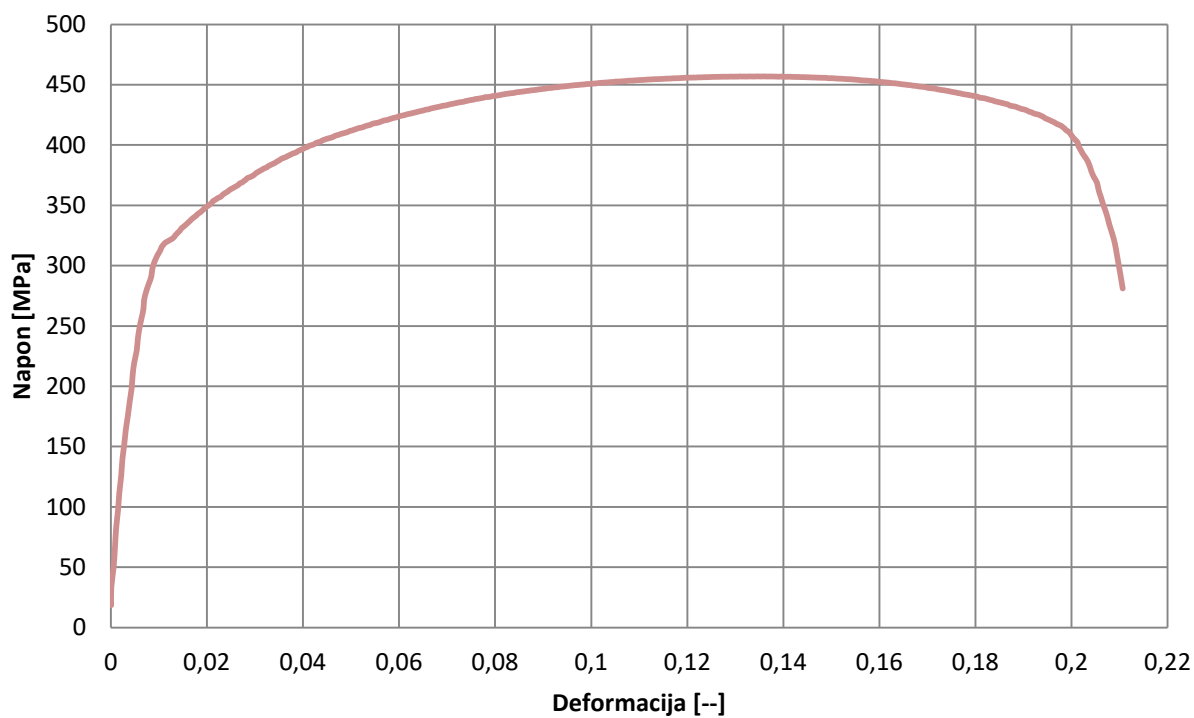
### 6.4.3. Rezultati ispitivanja jedno-osnim zatezanjem grupe epruveta grupe 3

#### 6.4.3.1 Prikaz dijagrama napon deformacija epruveta grupe 3

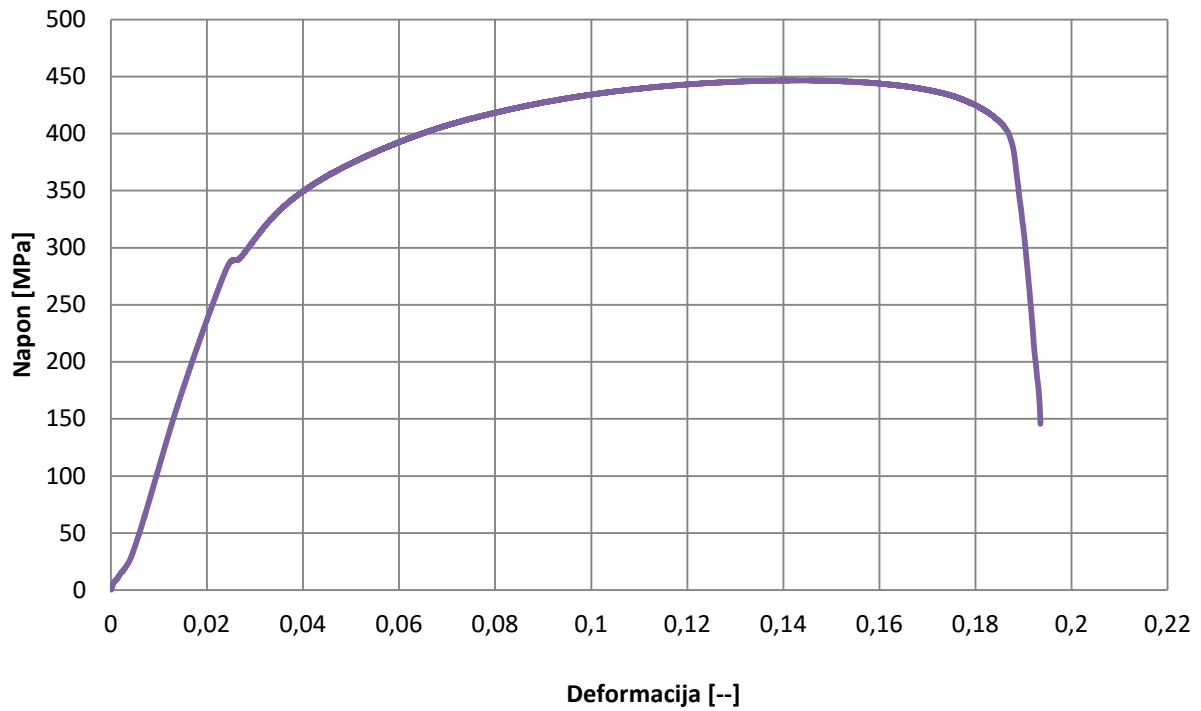
Na slikama 6.54 do 6.57 prikazani su dijagrami napon-deformacija ispitivanja grupe epruveta jedan.



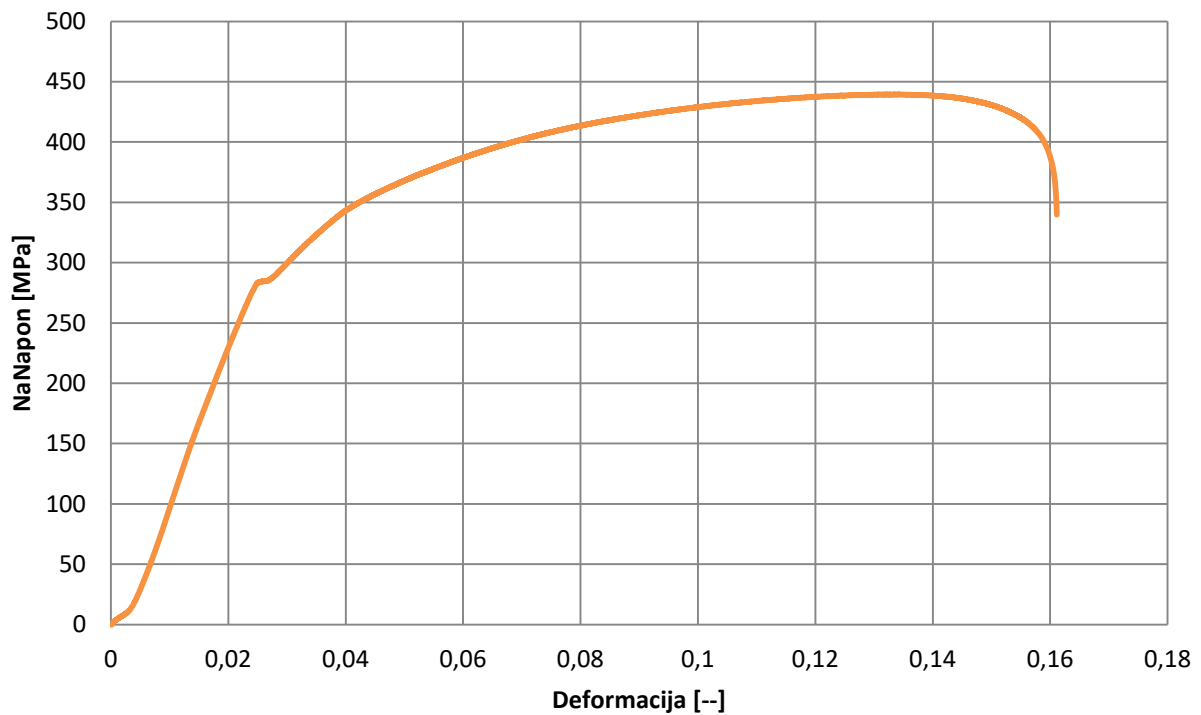
Slika 6.54: Dijagram Napon-deformacija, epruveta 3.1



Slika 6.55: Dijagram Napon-deformacija, epruveta 3.2



Slika 6.56 : Dijagram Napon-deformacija, epruveta 3.3

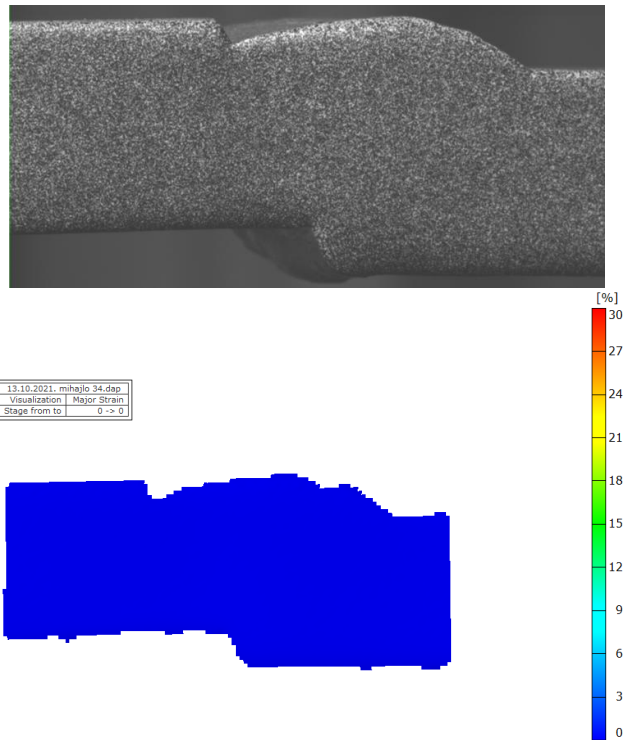


Slika 6.57: Dijagram Napon-deformacija, epruveta 3.4

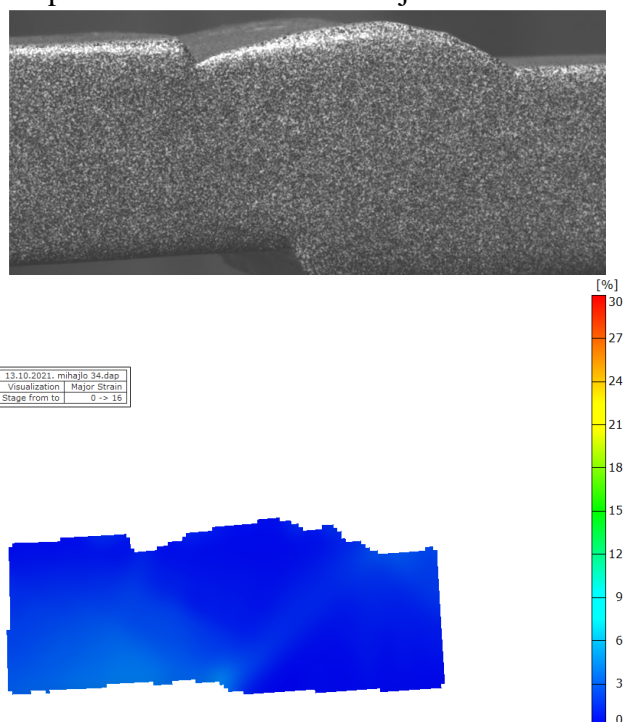


### 6.4.3.2 Merenje deformacije sistemom ARAMIS za epruvete grupe 3

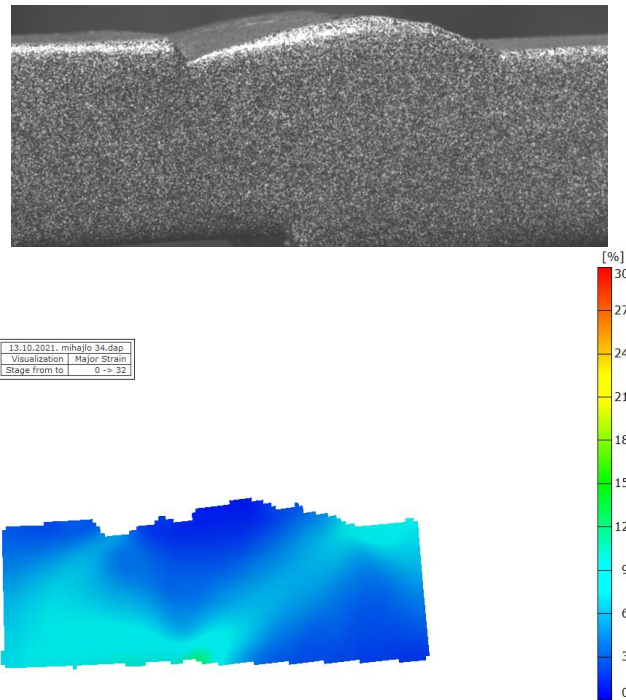
#### Epruveta 3.4



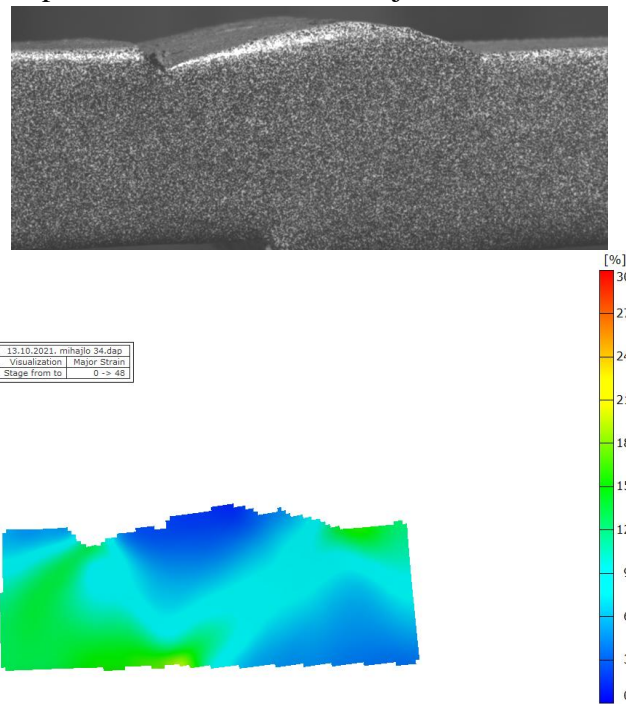
Slika 6.58: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 0



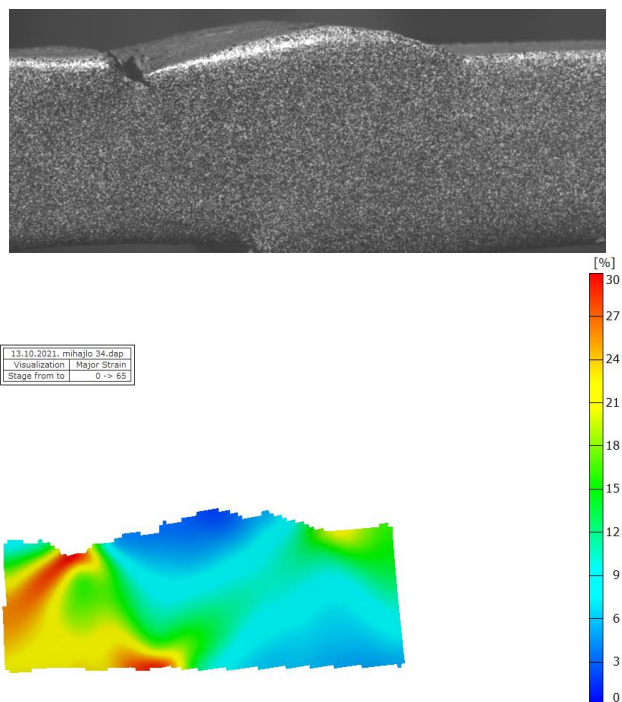
Slika 6.59: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 16



Slika 6.60: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 32



Slika 6.61: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 48

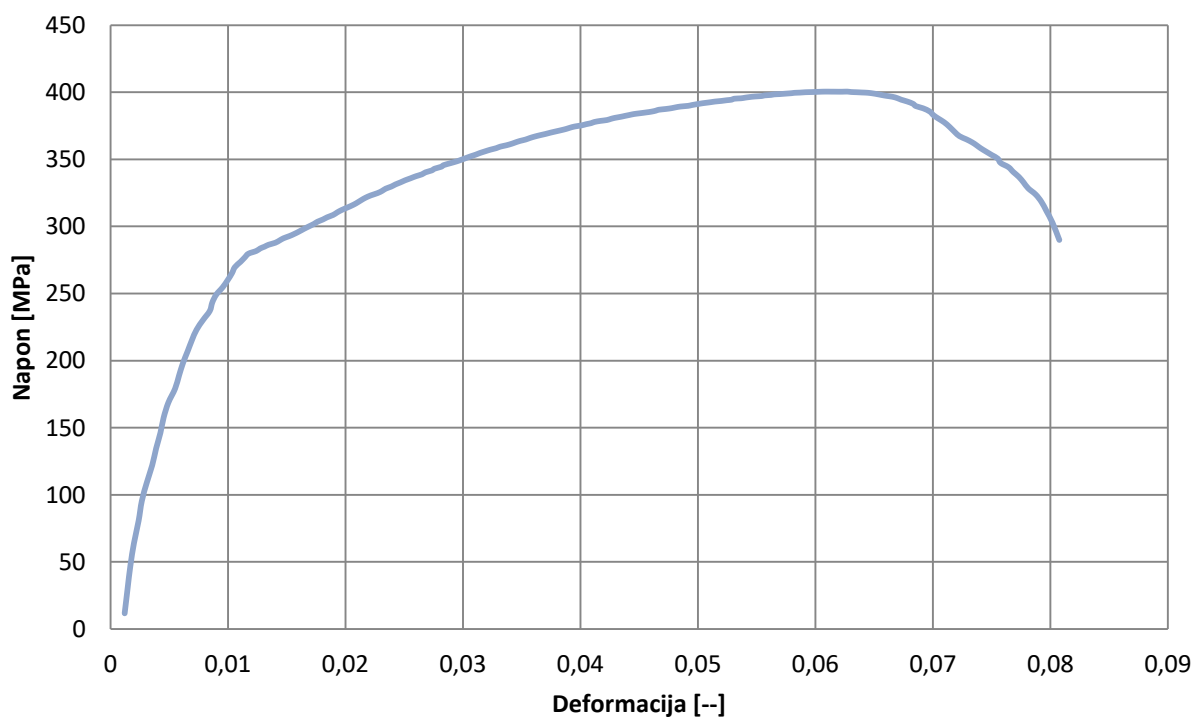


Slika 6.62: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 65

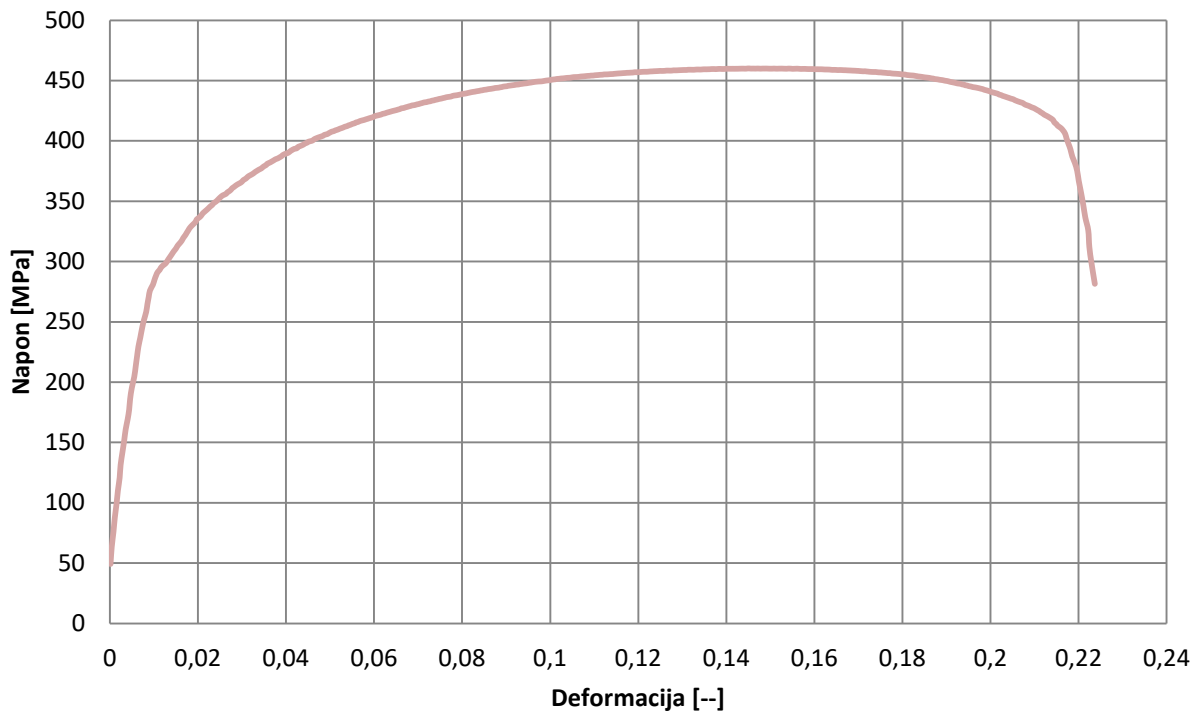
#### 6.4.4 Rezultati ispitivanja jedno-osnim zatezanjem grupe epruveta grupe 4

##### 6.4.4.1 Prikaz dijagrama napon deformacija epruveta grupe 4

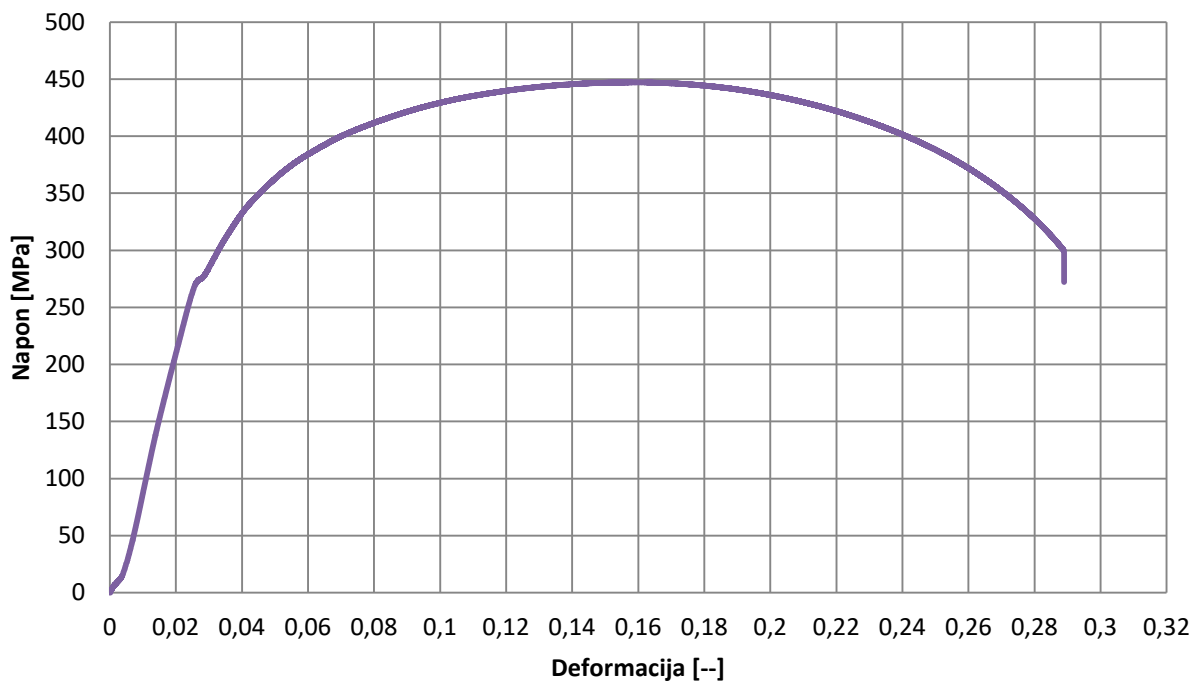
Na slikama 6.72 do 6.75 prikazani su dijagrami napon-deformacija ispitivanja grupe epruveta jedan.



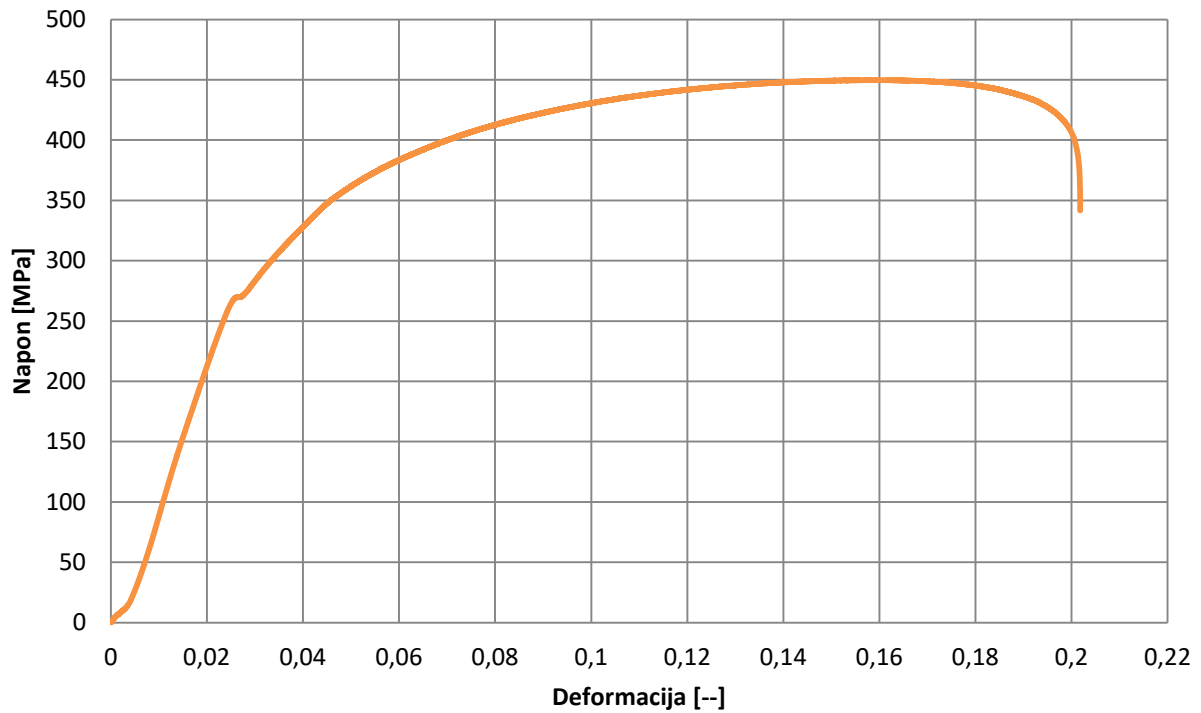
Slika 5.63 : Dijagram Napon-deformacija, epruveta 4.1



Slika 5.64: Dijagram Napon-deformacija, epruveta 4.2



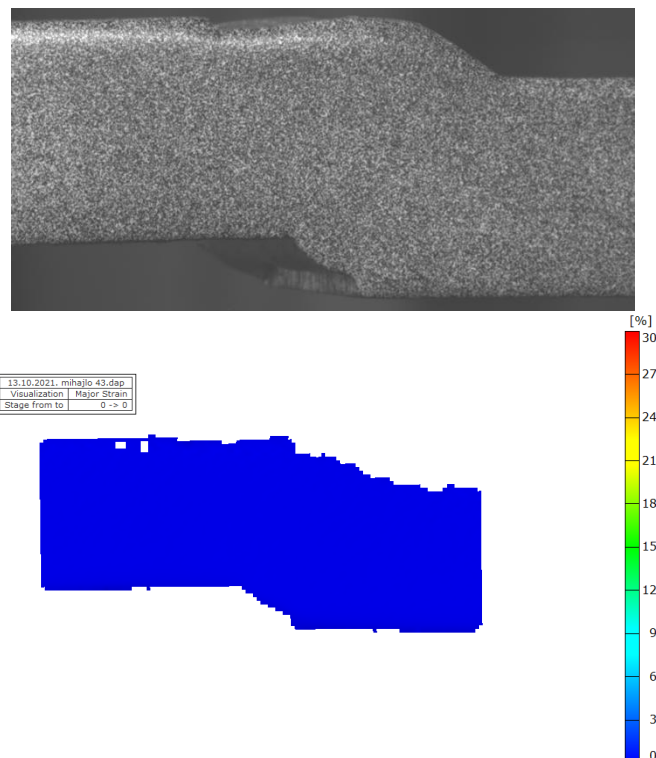
Slika 5.65 : Dijagram Napon-deformacija, epruveta 4.3



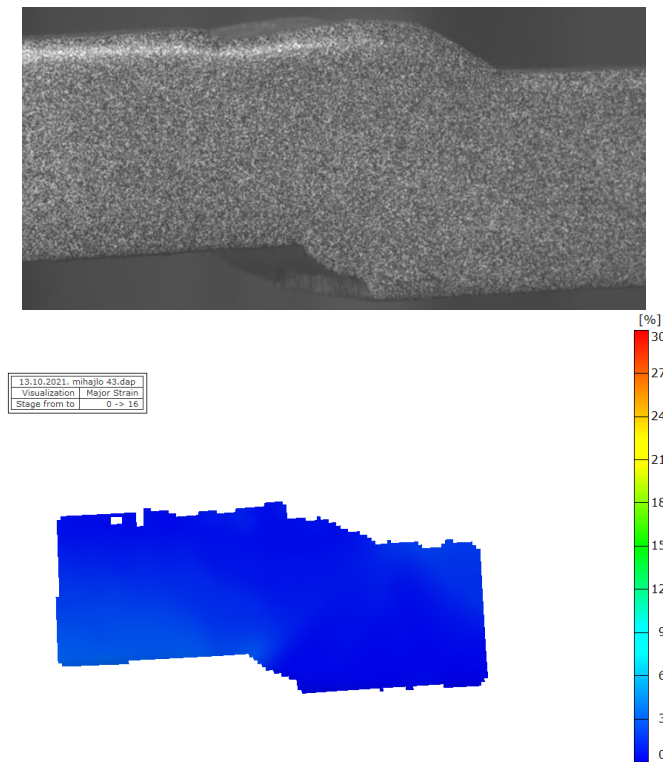
Slika 5.66 : Dijagram Napon-deformacija, epruveta 4.4

#### 6.4.4.2 Merenje deformacije sistemom ARAMIS za epruvete grupe 4

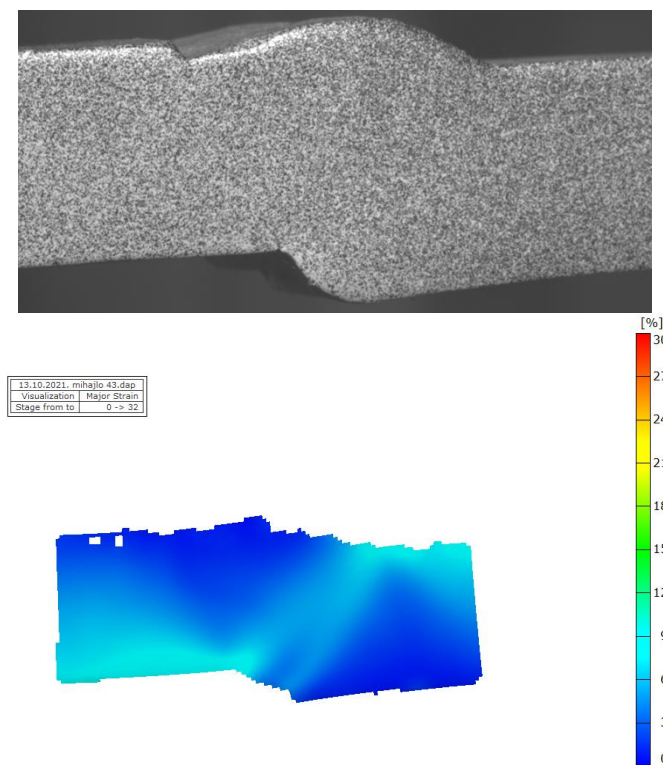
##### Epruveta 4.3



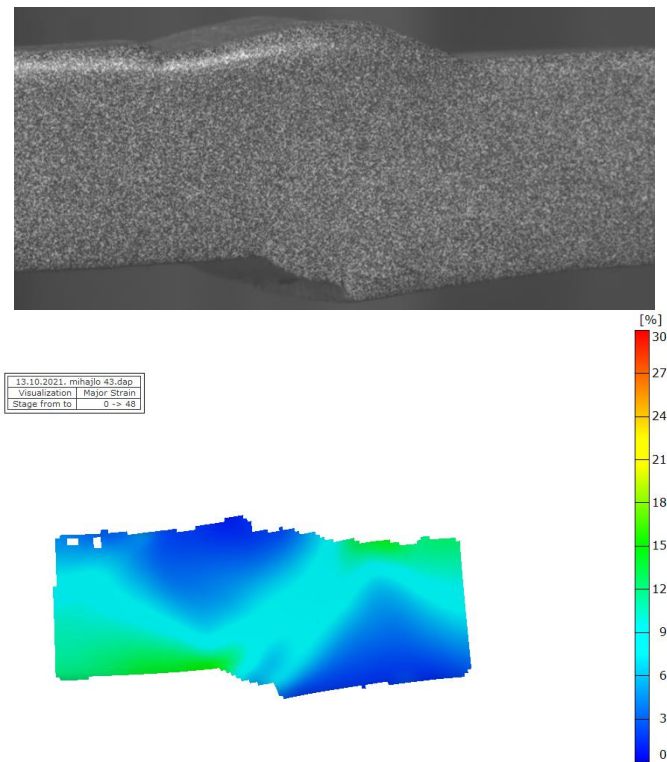
Slika 6.67: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 0



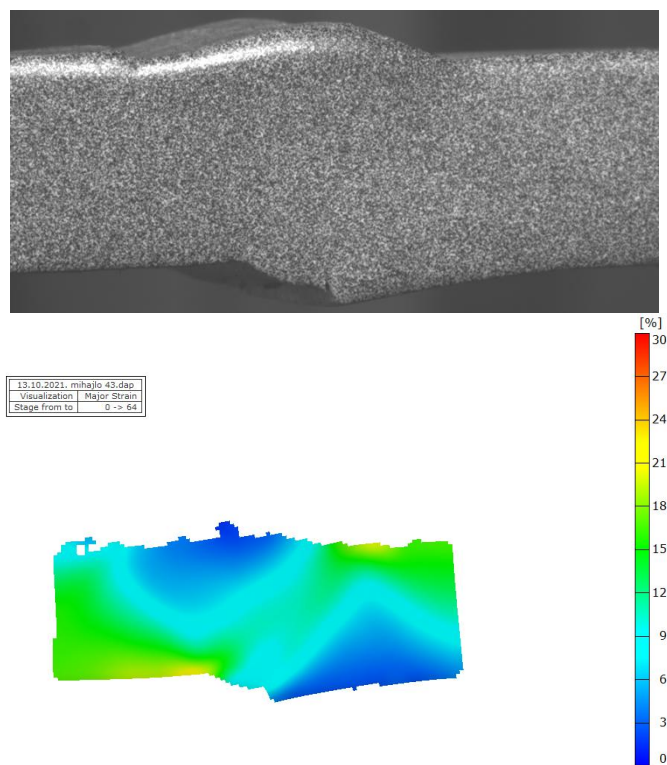
Slika 6.68: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 16



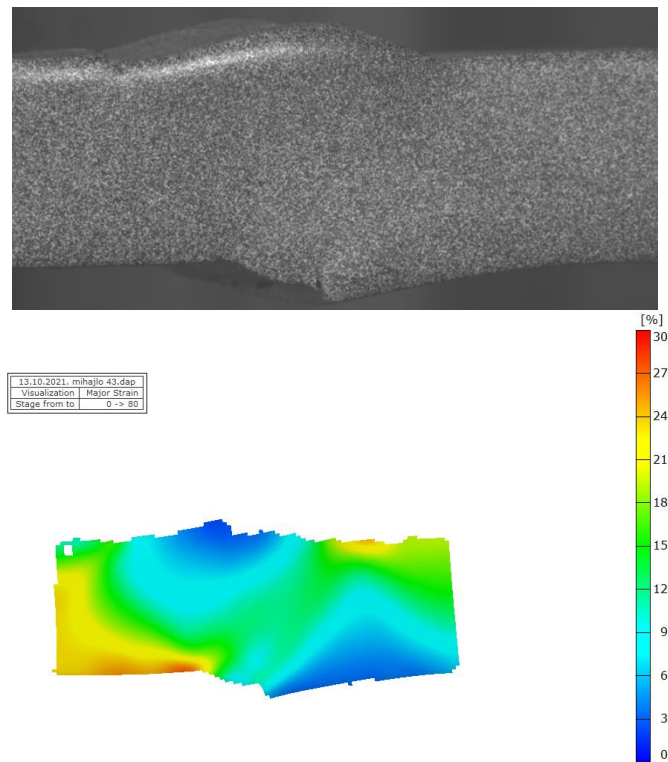
Slika 6.69: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 32



Slika 6.70: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 48

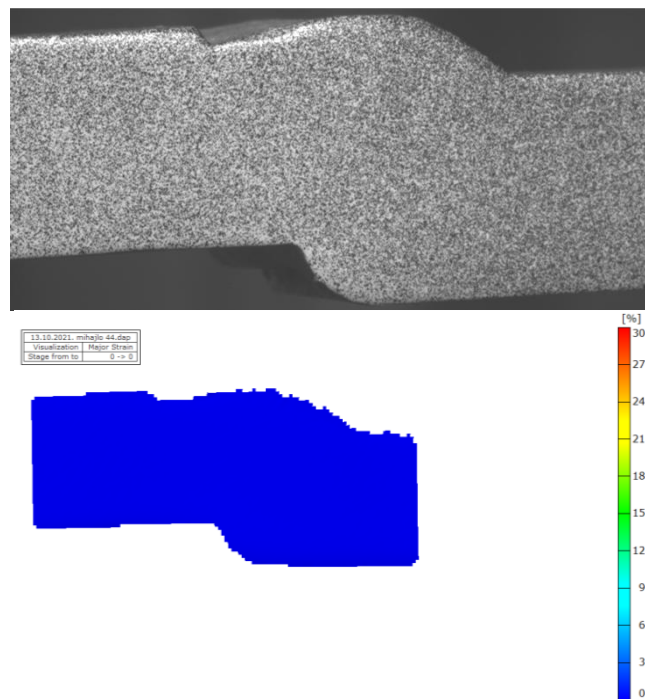


Slika 6.71: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 64



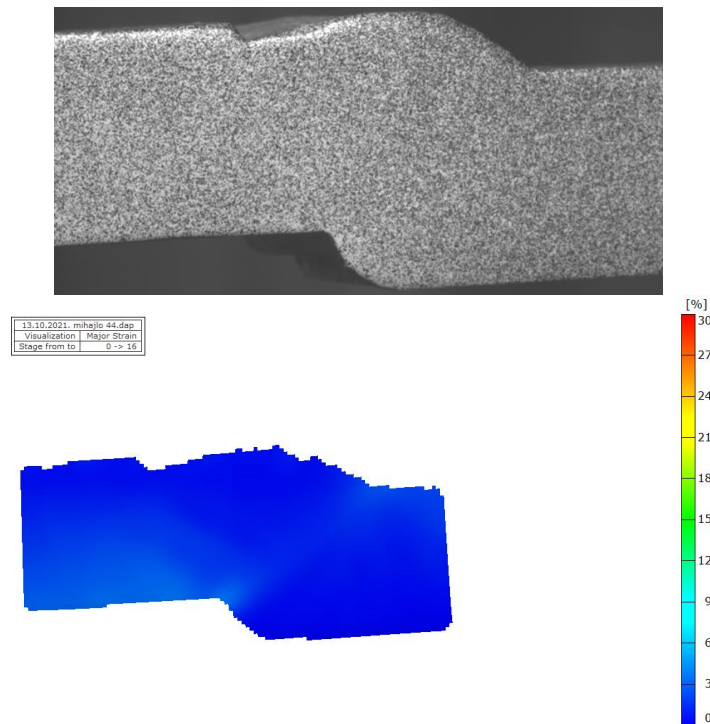
Slika 6.72: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 80

#### Epruveta 4.4

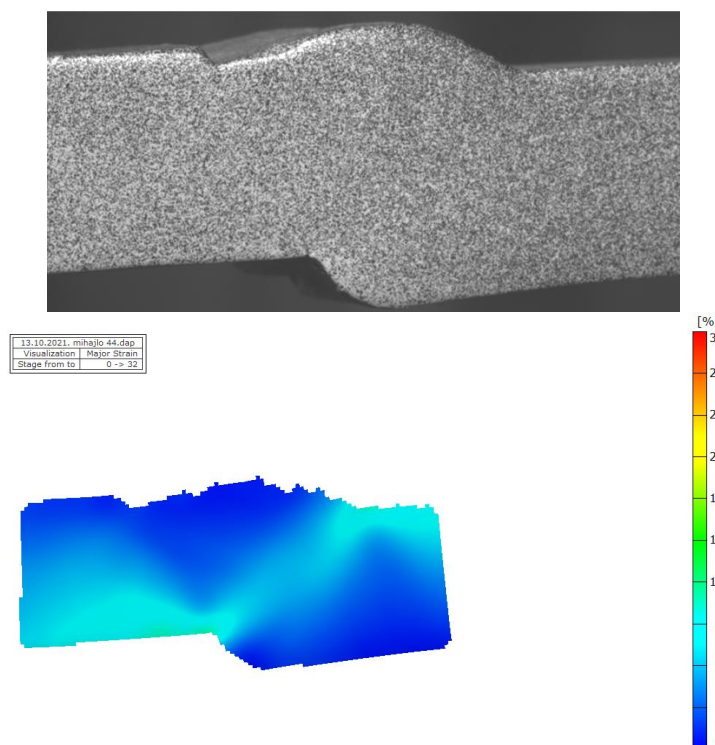


Slika 6.73: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 0

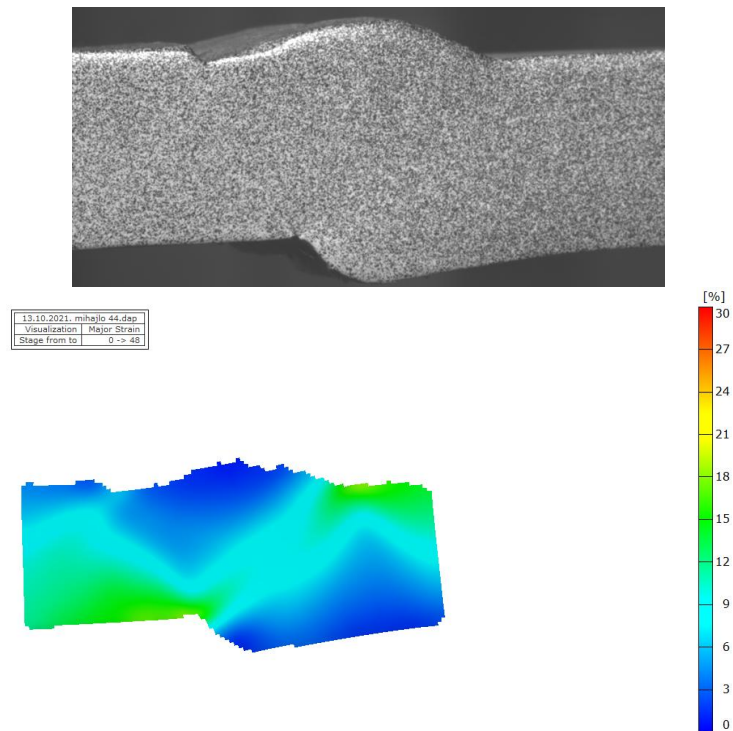




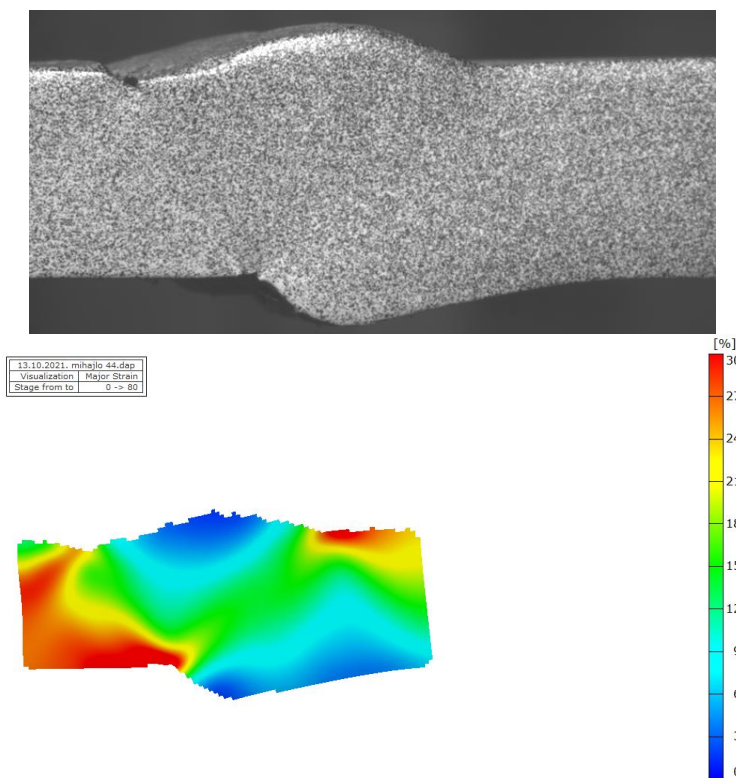
Slika 6.74: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 16



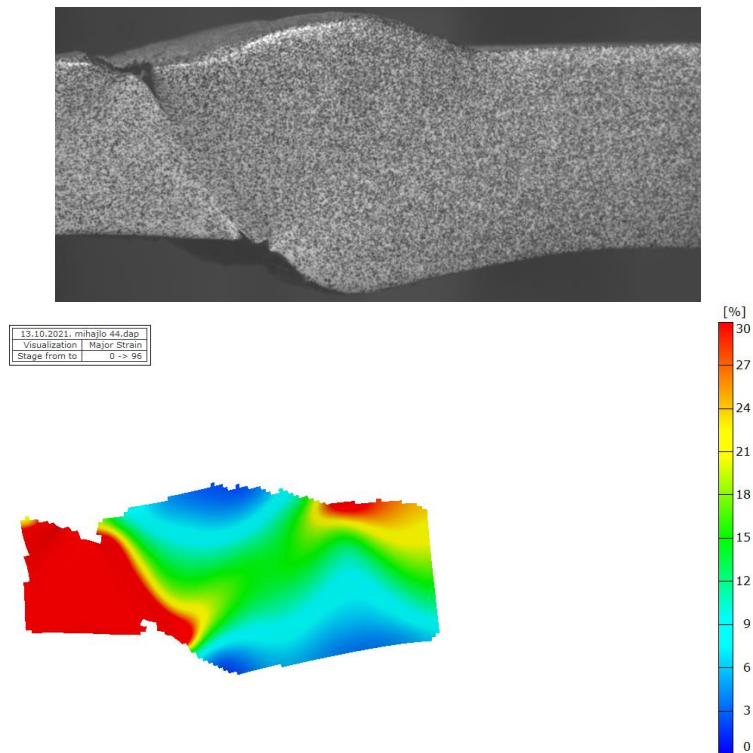
Slika 6.75: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 32



Slika 6.76: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 48



Slika 6.77: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 80

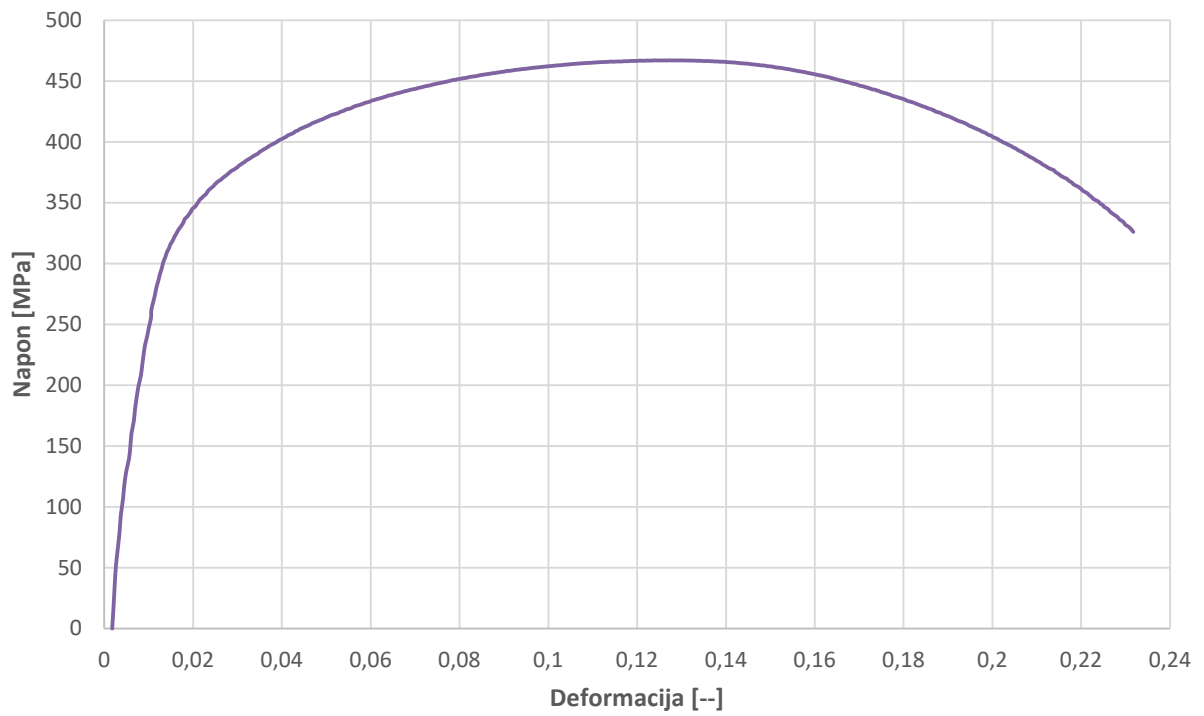


Slika 6.78: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 96

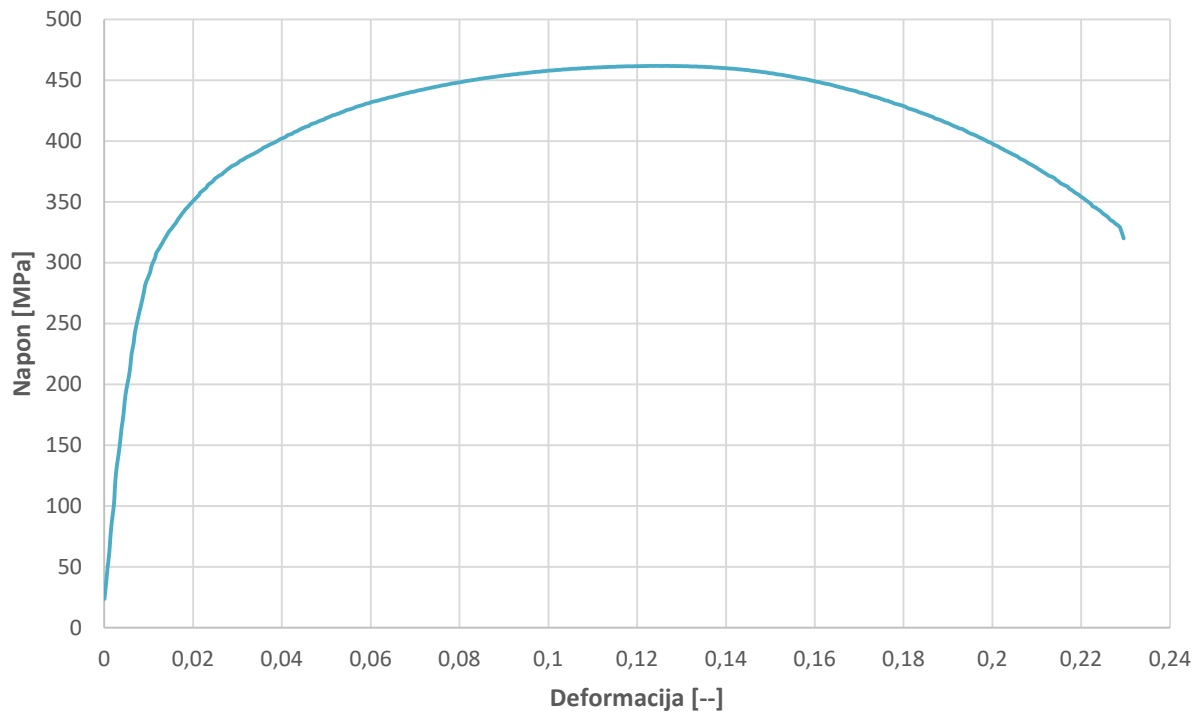
## 6.4.5 Rezultati ispitivanja jednoosnim zatezanjem grupe epruveta grupe 5

### 6.4.5.1 Prikaz dijagrama napon deformacija epruveta grupe 5

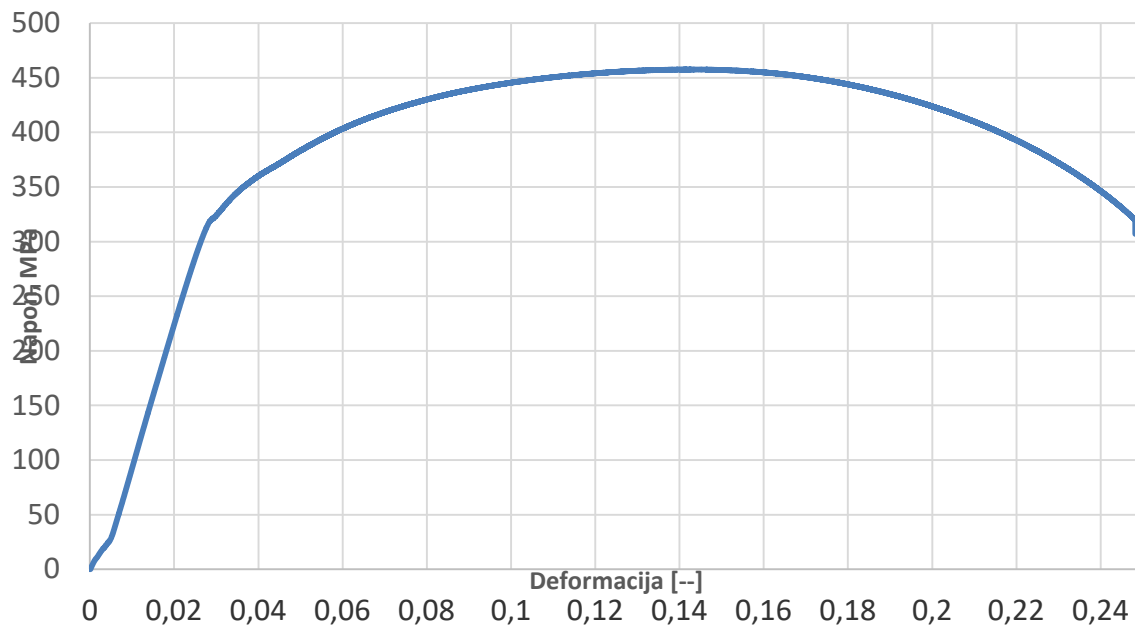
Na slikama 6.88 do 6.90 prikazani su dijagrami napon-deformacija ispitivanja grupe epruveta jedan.



Slika 6.79: Dijagram Napon-deformacija, epruveta 5.1



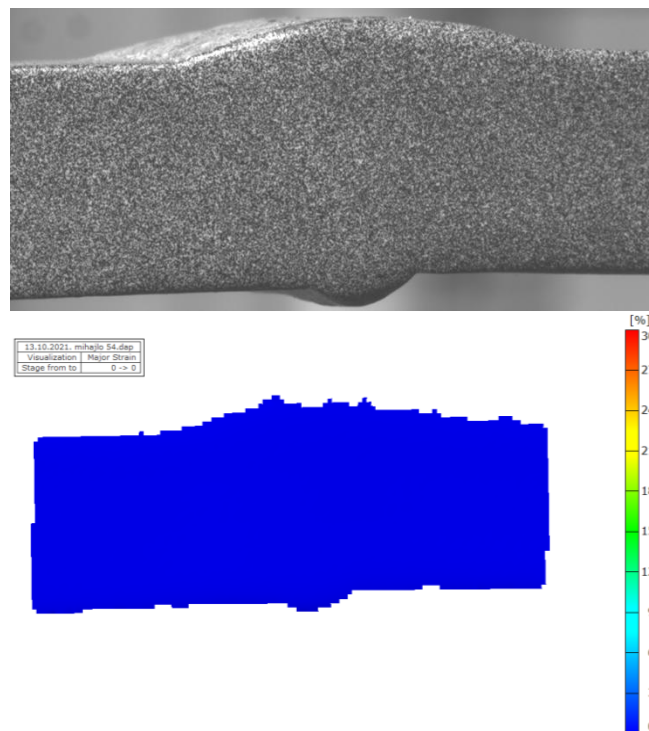
Slika 6.80: Dijagram Napon-deformacija, epruveta 5.2



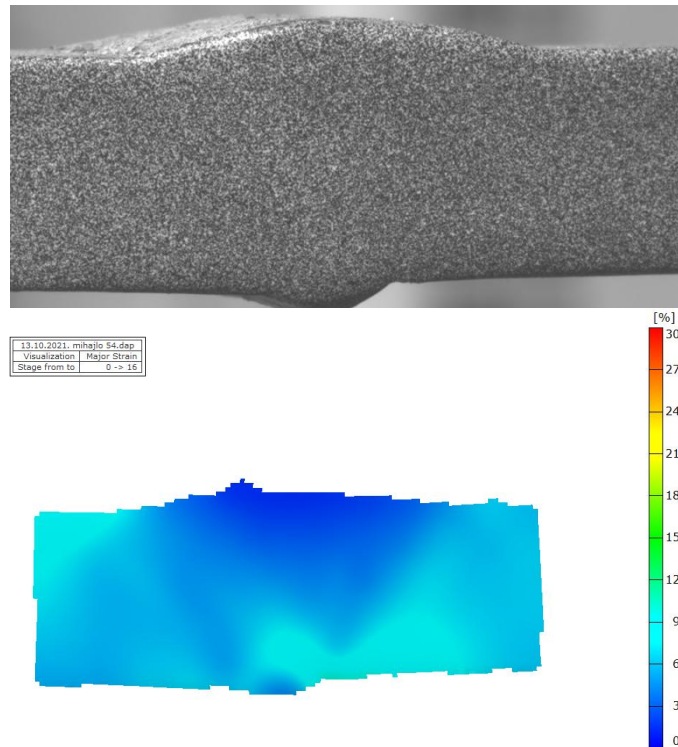
Slika 6.81: Dijagram Napon-deformacija epruveta 5.3

#### 6.4.5.2 Merenje deformacije sistemom ARAMIS za epruvete grupe 5

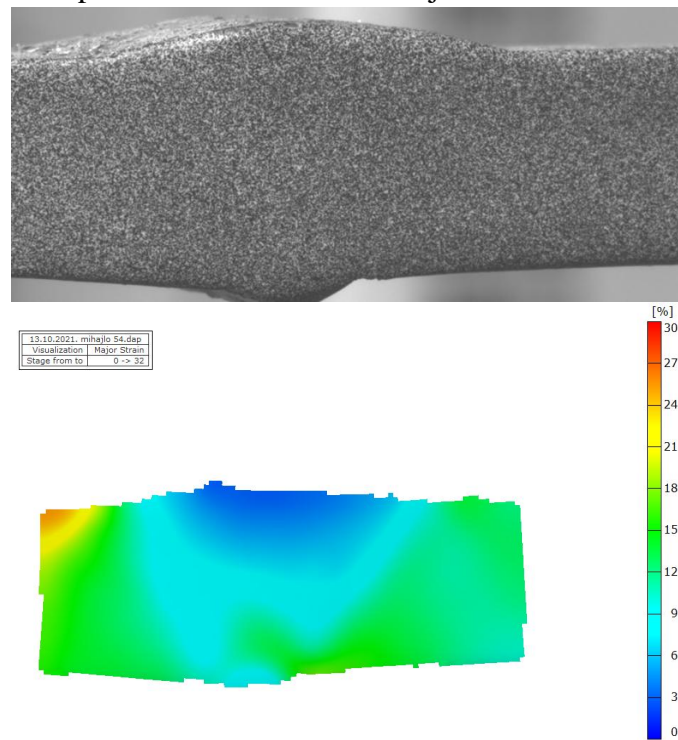
##### Epruveta 5.4



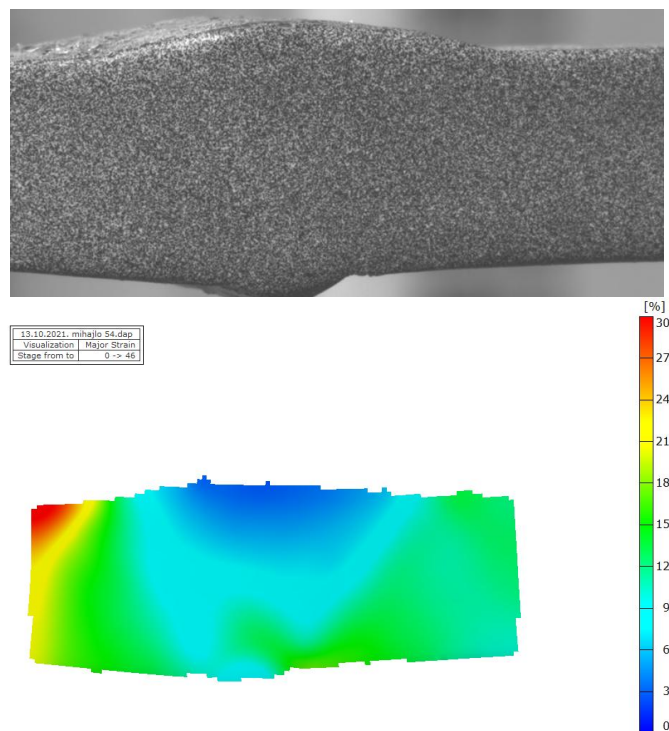
Slika: 6.82 Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 0



Slika 6.83: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 16



Slika 6.84: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 32

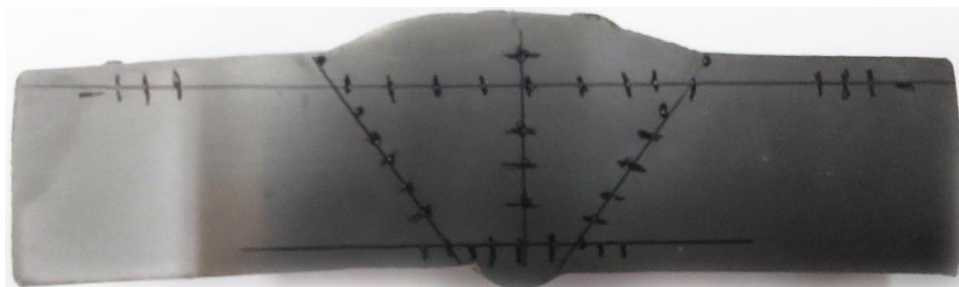


Slika 6.85: Slika epruvete i merene deformacije sistemom ARAMIS. Stage 54

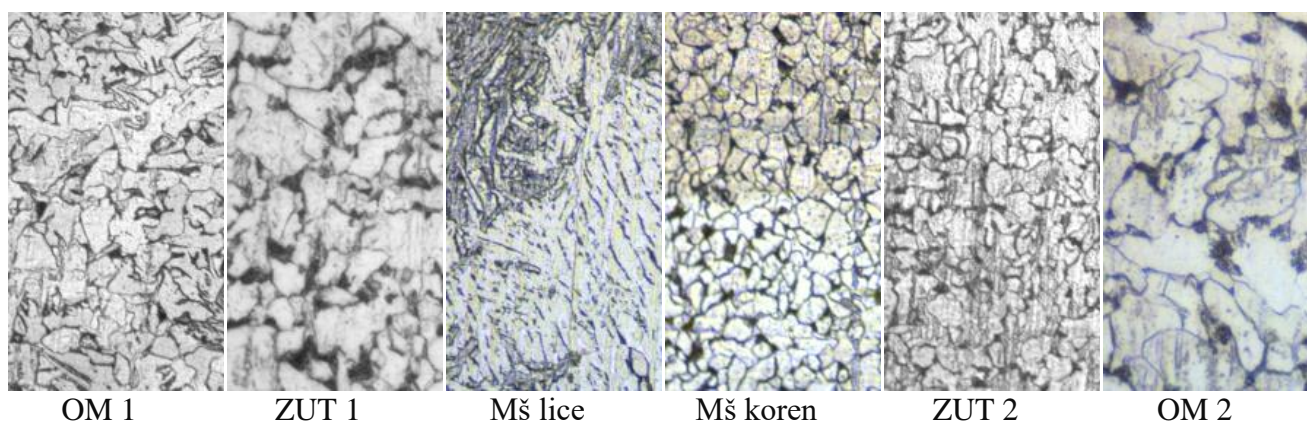
## 6.5 Mikrostrukturno ispitivanje i ispitivanja tvrdoće zavarenog spoja

Tvrdoća je urađena po satandardu SRPS EN ISO 9015, po metodi Vickers - HV5. Uzorci su ispitivani zoni metala šava, u zoni uticaja toplote i osnovnom materijalu kao i u liniji stapanja sa ciljem određivanja i utvrđivanja promene tvrdoće duž celog zavarenog spoja. Ispitivanje tvrdoće je urađeno na dva mesta tj. 2 mm dubine sa strane lica i korena zavarenog spoja. Na ispitnom uzorku 5 je urađeno detaljno ispitivanje tvrdoće sa 19 ubodnih mesta u liniji lica šava, 10 ubodnih mesta u liniji korena, 4 ubodna mesta u ZUT-u sa leve strane metala šava, 4 ubodna mesta u metalu šava i 4 ubodna mesta u ZUT-u sa desne strane metala šava. Za ostale ispitne uzorke biće prikazana samo prosečana vrednost ispitivanja tvrdoća u gornjim i donjim zonama (tabele 6.9 – 6.11). Rezultati tvrdoća za ostale ispitne uszorke su dati u dodatku 3.

Na uzorcima kojima je merena tvrdoća, izvršena je metalografska priprema površine (slike 6.95 i 6.96). Na način takav, da se zadrže otisci nastali merenjem tvrdoća. Kako bi se napravila veza dobijenih vrednosti tvrdoće i mikrostrukture. Nagrizainje površine je rađeno 5% Nitalom. Metalogarfska analiza zavarenog spoja urađena je na svetlosno-optičkom mikroskopu. Pregled poprečnog preseka zavarenog spoja je urađen u opsegu uvećanja od 100 do 1000 puta. Reprezentativni uzorak (epruvete grupe pet) ispitivanja tvrdoće sa skicom je dat na slici ispod, zajedno sa odgovarajućim fotografijama mikrostruktura.



Slika 6.86: Uzorak iz ploče 5 za ispitivanje tvrdoće



Slika 6.87: Mikrostrukture zona zavarenog spoja

Tabela 6.9: Ispitivanje tvrdoće uzorka grupe pet linija sa strane lica šava

Broj merenja	Mesta ispitivanja uzoraka				
	Osnovni material 1	Zona uticaja toplote 1	Metal šava	Zona uticaja toplote 2	Osnovni material 2
1	156	175	183	169	158
2	167	161	180	165	161
3	164	164	182	164	164
4	/	/	182	/	/
5	/	/	180	/	/
6	/	/	187	/	/
7	/	/	183	/	/

Tabela 6.10: Ispitivanje tvrdoće uzorka grupe pet linija sa korene strane

Broj merenja	Mesta ispitivanja uzoraka		
	Zona uticaja toplote 1	Metal šava	Zona uticaja toplote 2
1	155	161	156
2	156	162	157
3	153	164	155

Tabela 6.11: Ispitivanje tvrdoće u levom i desnom ZUT-u kao i sredini šava

Broj merenja	Mesta ispitivanja uzoraka		
	Zona uticaja toplote 1	Metal šava	Zona uticaja toplote 2
1	158	210	158
2	158	190	158
3	161	185	161
4	158	175	158



## 7. Postavka numeričkih modela

### 7.1 Uvod

Kao što je pomenuto u uvodnom delu ove doktorske disertacije, deo prikazanih istraživanja obuhvatao je i detaljnu numeričku analizu (primenom prethodno opisane MKE) ponašanja zavarenih spojeva u prisustvu kombinacija različitih vrsta grešaka. Ova faza istraživanja se odvijala paralelno sa početnim eksperimentima, kako bi se dobila predstava o tome kako treba da izgledaju modeli koji će simulirati zavarene spojeve od čelika S275JR. U tu svrhu su modeli prvo napravljeni za probne epruvete (čelik S235) i na osnovu ovih modela su usvajani svi bitni parametri za razvoj modela, uključujući geometriju, veličinu mreže konačnih elemenata, granične uslove, opterećenje itd.

Razvoj numeričkih modela se postepeno poboljšavao sa svakom sledećom eksperimentalnom fazom, pre svega zahvaljujući primeni ispitivanja metoda sa razaranjem, pomoću kojih je dobijen detaljan uvid u ponašanje realnih epruveta. Na ovaj način je bilo moguće otkrivanje faktora koji su uticali na ponašanje epruveta, a da su vezani za unutrašnje greške, za koje se pretpostavilo da su se javile usled specifičnih uslova zavarivanja.

U ovom poglavlju će biti opisan uvodni deo numeričkih simulacija, čiji su rezultati, kao i potencijalni problem u toku razvoja predloženih modela. Ovaj deo razvoja numeričkih modela obuhvaćen je brojnim radovima, od kojih su neki već pomenuti [71-74]. Treba naglasiti da su ove numeričke proračuni urađene u periodu između zavarivanja i sečenja epruveta i njihovog ispitivanja zatezanjem. Ovo je urađeno kako bi se videlo koliko su numeričke simulacije merodavne u predviđanju ponašanja predmetnih zavarenih spojeva. Poređenjem numeričkim rezultatima sa realnim stanjem dobijene su potrebne informacije o tome šta se sve može unaprediti u postojećim modelima, odnosno koje još dodatne faktore treba uzeti u obzir. Krajnji cilj ove faze bio je da se dobiju reprezentativni numerički modeli, i da se metodologija kojom je to ostvareno primeni na numeričke modele za „pravi“ materijal, u ovom slučaju čelik S275JR. Ovime bi se omogućilo brže i efikasnije simuliranje ponašanja zavarenih spojeva u prisustvu višestrukih grešaka, bez potrebe da se u početku traže prave kombinacije ulaznih parametara. Usled toga, može se zaključiti da, iako je ova faza numeričke analize davala veoma raznolike i ne uvek precizne rezultate, ona je na kraju ipak imala veoma veliki značaj za ostatak istraživanja, jer je dala pouzdanu osnovu za konačne numeričke modele.

U ovom poglavlju će pre svega biti prikazani rezultati prve faze numeričkih simulacija, dok će rezultati druge faze, sa kvalitetnijim čelikom, biti detaljnije analizirani u okviru narednog poglavlja, gde će biti upoređeni rezultati svih ispitivanja rađenih u okviru ovog istraživanja. Ovakav redosled je izabran iz jednostavnog razloga što su rezultate prve faze samo predstavljali osnovu daljeg rada i verifikaciju početnih pretpostavki, dok su rezultati za čelik S275 dobijeni sa ciljem poređenja sa realnim eksperimentima.

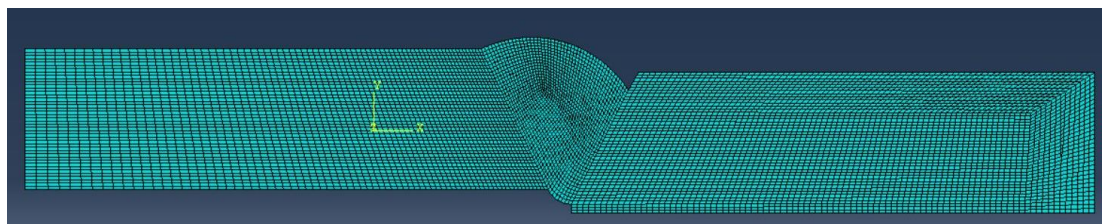
### 7.2 Postavka osnovnog numeričkog modela

Što se izrade numeričkih modela tiče, prvobitna ideja je bila da se krene od osnovne verzije, koja bi služila da se utvrdi koja kombinacija grešaka, od četiri prethodno usvojene, je najnepovoljnija sa tačke gledišta integriteta zavarenog spoja. Sami modeli su napravljeni u dve dimenzije, pri čemu je njihova geometrija definisana na osnovu merenja dimenzija stvarnih epruveta iz sve 4 grupe. Na ovaj način je obezbeđeno da svi numerički modeli imaju greške u zavarenom spoju koje odgovaraju stvarnom stanju. S obzirom da su stvarne greške bile gotovo uniformne duž celog zavarenog spoja, nije bilo potrebe za složenijim modelima koji bi bili trodimenzionalni. Primer jednog od ovih modela se može videti na slikama 7.1 i 7.2, sa graničnim uslovima (leva ivica modela na gornjoj slici), opterećenjem (strelice sa desne strane gornje slike),

kao i sa mrežom konačnih elemenata, koja je očekivano najgušća u oblasti gde su se očekivale najveće vrednosti napona i deformacija i koja je bila od kritičnog značaja za ovu analizu.

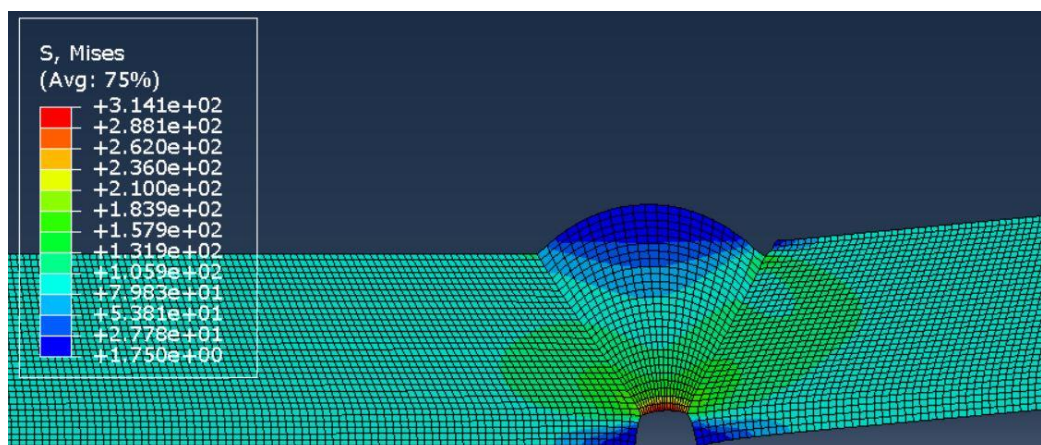


Slika 7.1: Granilni uslovi i opterećenja za jedan od modela [72, 73]

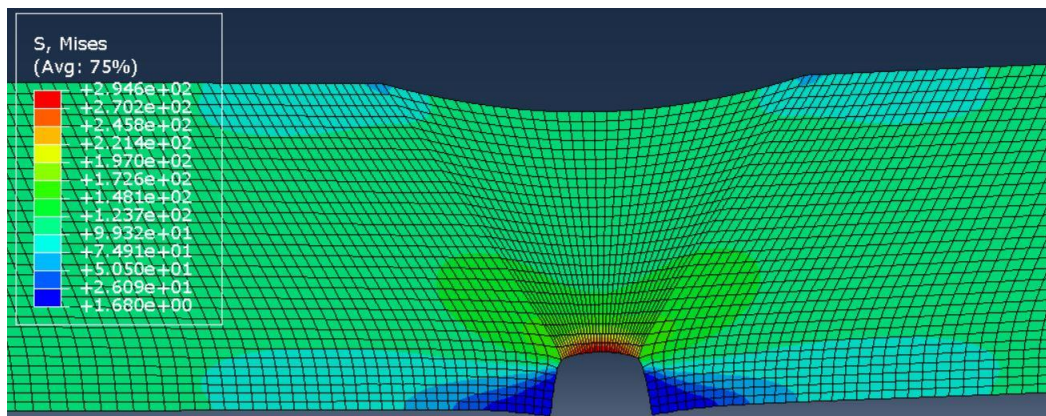


Slika 7.2: Mreža konačnih elemenata za jedan od modela [72, 73]

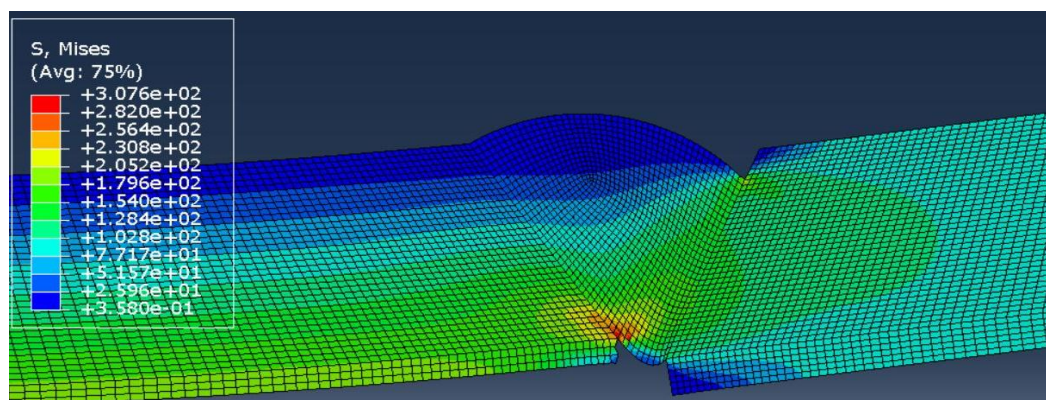
Što se ulaznih parametara tiče, oni su definisani na osnovu podataka iz literature. U ovoj fazi numeričke analize cilj je bio poređenje različitih kombinacija grešaka, tako da je jedino bilo važno da su mehaničke karakteristike (granice tečenja i zatezna čvrstoća približnih vrednosti za sve modele. Sva četiri modela su imali iste granične uslove i opterećenje. Kao što se i očekivalo rezultati rezultati su pokazali da su određene kombinacije grešaka daleko opasnije po zavareni spoj, pre svega u pogledu plastične deformacije. U slučajevima gde je ukupna deformacija prešla nižu granicu tečenja (osnovnog materijala u svim slučajevima). Rezultati dobijeni za naponsko stanje sve četiri kombinacije su prikazani na slikama 7.3 – 7.6.



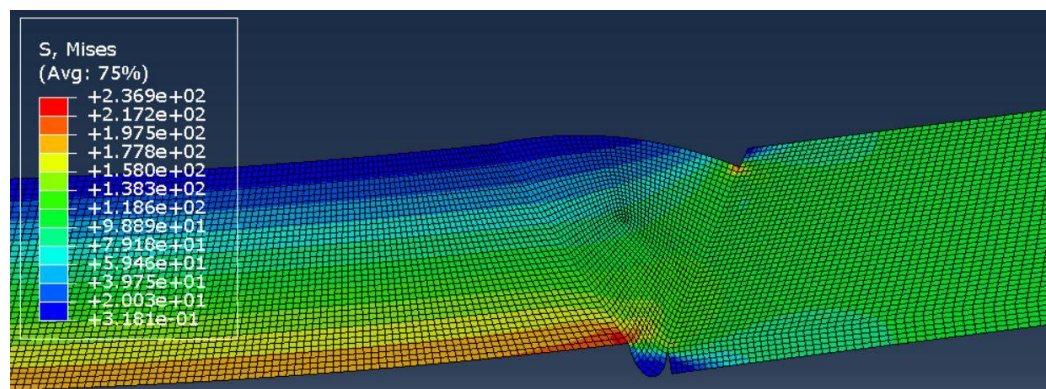
Slika 7.3: Naponsko stanje u sva modelu grupe 1 [72, 73]



Slika 7.4: Naponsko stanje u sva modelu grupe 2 [72, 73]



Slika 7.5: Naponsko stanje u modelu grupe 3 [72, 73]

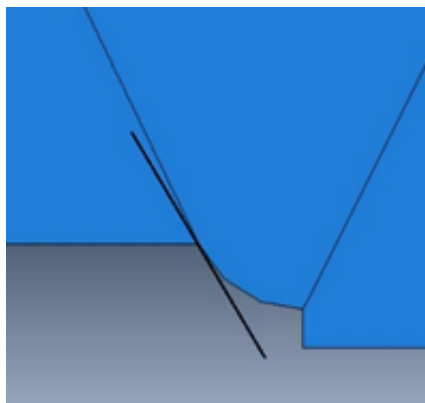


Slika 7.6: Naponsko stanje u modelu grupe 4 [72, 73]

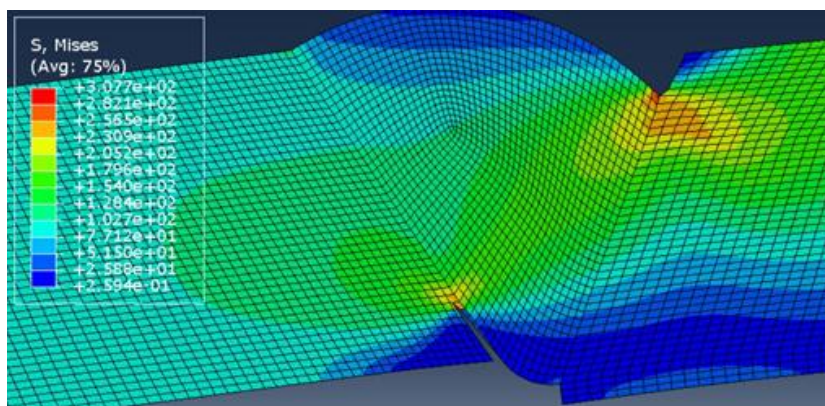
Ovaj početni, poprilično pojednostavljeni numerički model, potvrdio je neke od najosnovnijih pretpostavki o ponašanju realnih epruveta – najkritičniji modeli su bili oni koji su imali smaknuće od oko 2 mm, što je bilo i očekivano. Eksperimenti iz ove faze, opisani u delu doktorata gde su prikazani i rezultati ispitivanja zatezanjem, su potvrdili numeričku analizu. Ovde je potrebno skrenuti pažnju da na gornjoj slici nisu merodavne samo maksimalne vrednosti napona, već i oblasti zavarenog spoja u kojima se nalaze, s obzirom da primera radi, napon od 314 MPa iz prvog slučaja nije ni blizu granice tečenja metala šava (u kom se javio), tako da on neće prouzrokovati plastičnu deformaciju u modelu. Nasuprot njemu, daleko niža vrednost od oko 237 MPa sa treće slike je takođe i opasnija, pošto je prekoračila granicu tečenja osnovnog materijala.

### 7.3 Unapređivanje geometrije i analiza dodatnih uticaja

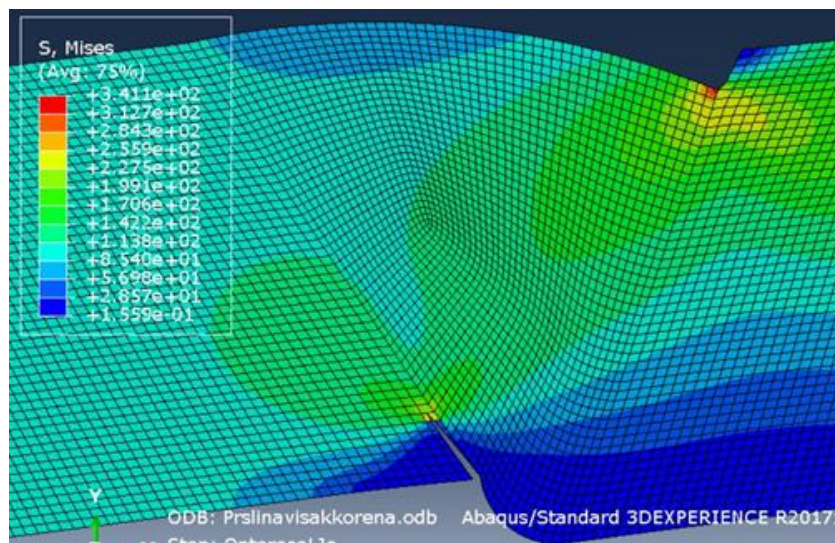
Naredni korak u početnoj fazi numeričkih simulacija bio je da se analizira ponašanje predmetnih zavarenih spojeva sa kombinacijama višestrukih grešaka u prisustvu prsline, uz pretpostavku da će se prsline javiti u delovima gde je prisutan najveći napon, tačnije u delovima koji prvi uđu u plastičnu oblast deformacije. U svim slučajevima, ove oblasti su se nalazile na granici osnovnog materijala i metala šava, sa strane OM (kao posledica značajnog overmatchinga). Cilj ovih simulacija je bio da se utvrdi slaganje sa eksperimentima, u pogledu mesta na kojima se javljaju prsline i u stvarnosti. U ovom slučaju je postojala sumnja da će se numerički i stvarni rezultati odmah poklopiti, zbog realne mogućnosti javljanja unutrašnjih grešaka u zavarenom spoju koje bi mogle dodatno da utiču na raspodelu napona/deformacija u stvarnim epruvetama [71]. Jedan od modela koji su analizirani je prikazan na slici 7.7, sa lokacijom prsline (crna linija), dok slika 7.4 prikazuje rezultate za ova modela sa smaknućem, koji su usvojeni kao merodavni za proračun, nakon što je prethodno pokazano da su oni kritičniji u smislu integriteta zavarenog spoja (što je opisano u prethodnom delu ovog poglavlja).



Slika 7.7: Jedan od modela sa nadvišenjem [71], sa prsline (crna linija)



Slika 7.8: Rezultati numeričkih simulacija za smaknuće sa neuvarenim korenom (raspodela napona) [71]



Slika 7.9: Rezultati numeričkih simulacija za smaknuće sa dobro uvarenim korenom (raspodela napona) [71]

Ovi modeli pružili su neke veoma interesantne rezultate u pogledu ponašanja epruveta. Naime, prslina je u oba slučaja krenula da raste, ali je vrlo brzo, usled geometrije (uslovljene kombinacijama grešaka) i delovanja opterećenja prestala sa rastom, usled zatupljenja vrha, koje se može u manjoj ili većoj meri videti na slici 7.8-7.9. Nakon toga, napon i rezultujuća deformacija su krenuli da se koncentrišu u zajedu sa suprotne strane, opet kao posledica načina na koji se deformisala epruveta sa ovako specifičnim geometrijama.

Dalja eksperimentalna ispitivanja su pokazala veoma, ali ne sasvim slične rezultate. U oba slučaja sa epruvetama koje su urađene sa smaknućem je prslina krenula sa strane korena šava, kao i kod modela, ali bi u određenom trenutku ona prestala da raste, i nova prslina se javila u zajedu, sa strane lica, što je dovelo do mehanizma loma epruvete koji svakako nije očekivan, i očigledno je uslovljen prisustvom više grešaka, pri čemu smaknuće igra ključnu ulogu u ovom slučaju [74] (Slika 7.10).

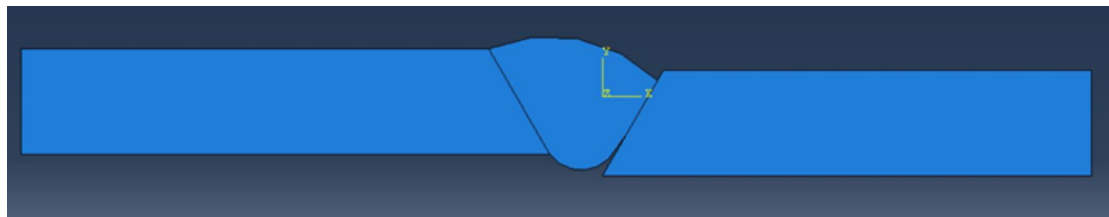


Slika 7.10: Različite faze loma epruveta za kombinaciju sa smaknućem i nadvišenjem [74]

Međutim, kod jednog modela je primećena značajna razlika u ponašanju pri lomu – prslina u korenu se nije javila sa „više“ strane kao što je pretpostavljeno, već se u stvarnosti inicirala sa niže, suprotne strane korena zavarenog spoja [74]. Nakon ovog neslaganja se postavilo pitanje kako je došlo do toga da napon na tom mestu bude veći u odnosu na vrednosti dobijene numeričkim modelom. Pretpostavljeno je da razlog za ovo leži upravo u prisustvu dodatnih, zapreminskih grešaka koje je bilo nemoguće uočiti vizuelnim pregledom. S obzirom na nepovoljnu geometriju i

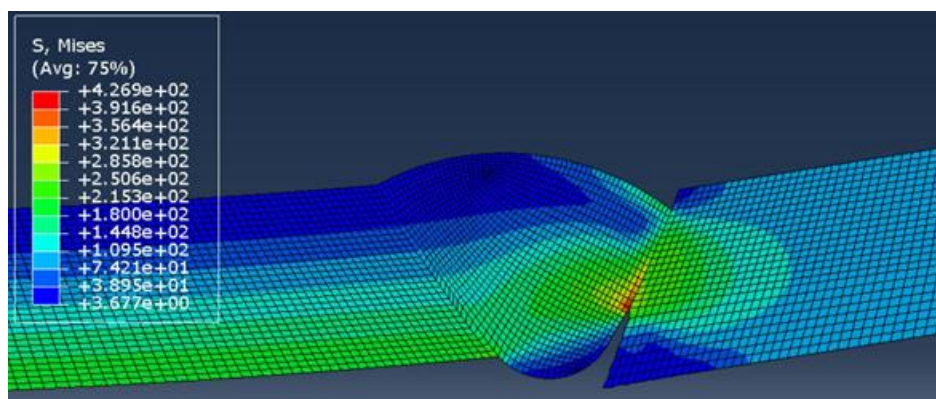
međusobni položaj dve ploče, koji je onemogućio dovoljno dobar pristup sa obe strane korena zavarenog spoja, u obzir je uzeta mogućnost pojave nalepljivanja sa strane donje ploče.

Ova pretpostavka je jednostavno potvrđena posmatranjem prelomne površine predmetnih epruveta nakon njihovog potpunog loma. Utvrđeno je da je zaista došlo do nalepljivanja sa donje strane, celom širinom epruvete, čime je značajno smanjen njen poprečni presek. Ovo je, naravno, rezultiralo u značajno većim naponima od očekivanih, koji su imali veće vrednosti od onih koje su se javljale sa suprotne strane. Potom je izmerene dubina nalepljivanja od 4 mm, i na osnovu toga je postojeći numerički model izmenjen na način koji se može videti na slici 7.11 [74].



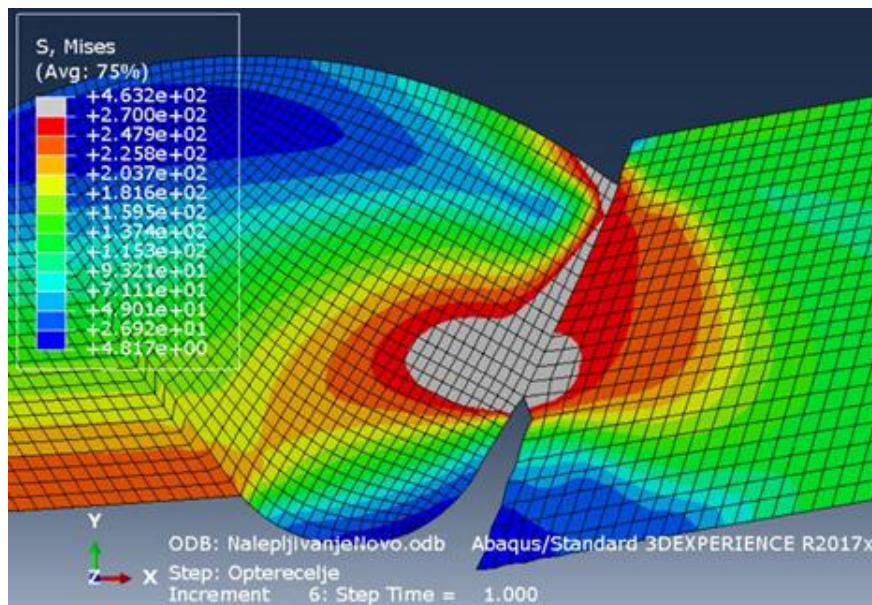
Slika 7.11: Nova geometrija modela sa nadvišenjem i smaknućem, koja uključuje i nalepljivanje sa korene strane niže ploče

Na slici 7.12 ispod se može videti očigledan uticaj izmena modela načinjenih nakon utvrđivanja prisustva nalepljivanja u realnim epruvetama – naponi sa korene strane niže ploče su sada značajno veći u odnosu na višu stranu. Čak i u metalu šava se javljaju veoma visoke vrednosti, bliske njegovoj granici tečenja, dok su u osnovnom materijalu ove vrednosti iznad 250 MPa (granica tečenja je oko 236 MPa). Sa strane više ploče, naponi su ostali nešto niži od granice tečenja OM, nasuprot prvobitnoj verziji modela.



Slika 7.12: Rezultati naponskog stanja za model sa nalepljivanjem [74]

Priča o ovoj, najnovijoj iteraciji u numeričkoj analizi zavarenih spojeva sa višestrukim greškama se ipak nije završila na ovom modelu, pošto je bilo neophodno potvrditi u potpunosti ponašanje modela u poređenju sa eksperimentom. S obzirom na slične vrednosti napona u zajedu (lice šava) i drugoj strani korena, bilo je neophodno uraditi još jedan proračun, sa nešto višim vrednostima opterećenja, kako bi se uočile potencijalne razlike. Slika 7.13 pokazuje rezultate dobijene sa opterećenjem od 120 MPa. Može se videti da u ovom slučaju i vrednosti napona u osnovnom materijalu na mestu zajedu prekoračuju granicu tečenja u značajnoj meri. Iz toga se može zaključiti da bi i u slučaju numeričkog modela, prslina krenula da raste iz ove lokacije, što je bio i slučaj u eksperimentu prikazanom na slici 7.10. Oblasti na slici koje su obeležene sivo su one sa naponima iznad granice od 270 MPa. Ova granice je usvojena kako bi se raspodela nižih vrednosti napona bolje i detaljnije videla, da bi mogle da se uoče razlike u njihovim vrednostima na kritičnim lokacijama (zajed i koren sa strane više ploče).



Slika 7.13: Rezultati naponskog stanja za model sa nalepljivanjem [74], povećano opterećenje

Iz ovog skraćenog prikaza rezultata radova napisanih tokom izrade same disertacije, većinom u njenoj početnoj fazi, se može jasno videti značajna uloga numeričkih simulacija u sveukupnoj analizi, kao i njen napredak sa svakim narednim korakom. Sa jedne strane, eksperimentalna ispitivanja su ukazala na nedostatke numeričkog pristupa u ovom slučaju, ali su i pomogla u unapređivanju modela, kako bi se na kraju dobili što merodavniji rezultati. Na ovaj način je obezbeđena osnova za dalje numeričke proračuna, koji će se zasnivati na rezultatima eksperimentalnih ispitivanja čelika S275, u skoro identičnim uslovima kao i za prethodno ispitani S235 materijal. Pri tome, sada je poznato kakvi sve dodatni problemi mogu da se jave usled nepovoljne geometrije zavarenih spojeva, i na koji način oni mogu da utiču na očekivane rezultate. Najvažniji cilj početne faze numeričkih simulacija je postignut – poslednje verzije modela su u pogledu ponašanja pri zatezanju zavarenih spojeva sa kombinacijama višestrukih grešaka pokazale jako dobro slaganje se eksperimentalnim rezultatima.

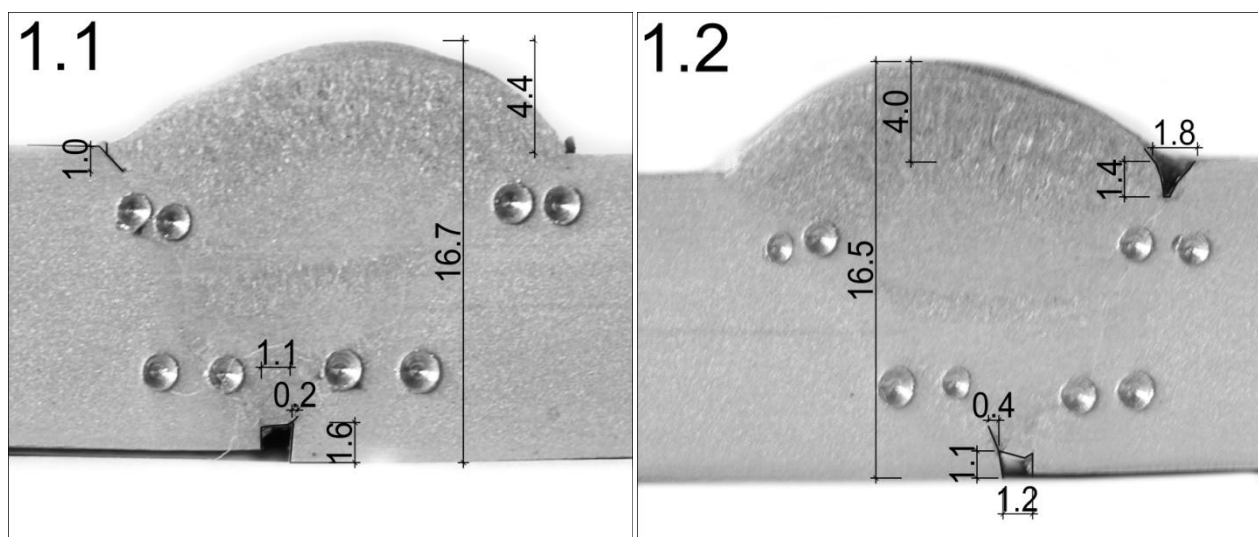
Naravno, izradi modela za epruvete od kvalitetnijeg čelika će se pristupiti još detaljnije, što neće predstavljati veliki problem, s obzirom da je u ovoj fazi istraživanja takođe i utvrđeno na koje se načine može poboljšati i eksperimentalni pristup. Merenje deformacija i određivanje napona će biti praćeno tokom samih eksperimenata primenom odgovarajućih beskontaktnih metoda opisanih u uvodnim poglavljima. Ovime je omogućeno da se mehanizmi deformisanja zavarenog spoja prate tokom vremena u obe faze – i eksperimentalnoj i numeričkoj. Potencijalno dobro slaganje i jednih i drugih rezultata u tom pogledu će predstavljati još jedan dodatni način verifikacije tih rezultata. Može se primetiti da su kod nekih od prikazanih modela geometrije zavarenih spojeva u manjoj ili većoj meri izmenjene. Tu se pre svega misli na greške u korenim delu zavarenog spoja. Ovo je naravno posledica činjenice da je u kasnijim fazama eksperimenata istraživačima na raspolaganju bilo više epruveta sa kojih su mogle da se skinu dimenzije, i da su u kasnijim radovima i greške u zavarenim spojevima bile ravnomernije i pravilnije (u pogledu naših očekivanja).

U narednom poglavlju ove disertacije koje se bude bavilo numeričkom analizom, sami postupci određivanja merodavnih dimenzije će biti mnogo detaljnije opisani. Merenje epruveta, sa posebnim naglaskom na delove oko zavarenih spojeva je u tom slučaju urađeno daleko preciznije, sa manje zaokruživanja i aproksimacija. U prvom slučaju (čelik S235) za ovako detaljnim pristupom jednostavno nije bilo potrebe, jer nije cilj bio da se dobije što veće poklapanje numerike i eksperimentalnih rezultata, već da se dobiju dovoljno dobre simulacije. Nakon svih ispravki koje su učinjene na prikazanim numeričkim modelima, dobijena su slaganja sa rezultatima koja su više nego dovoljno dobra.

Još jedan cilj numeričkih analiza koje su (ili će tek biti) prikazane u okviru ove disertacije je da se dobije model koji se lako može prilagoditi ne samo različitim kombinacijama grešaka u zavarenom spoju, već i različitim materijalima. Ovakvo istraživanje će svakako biti deo budućeg rada na ovu temu, koji će se nadovezivati na rezultate dobijene tokom numeričke analize prikazane ovde.

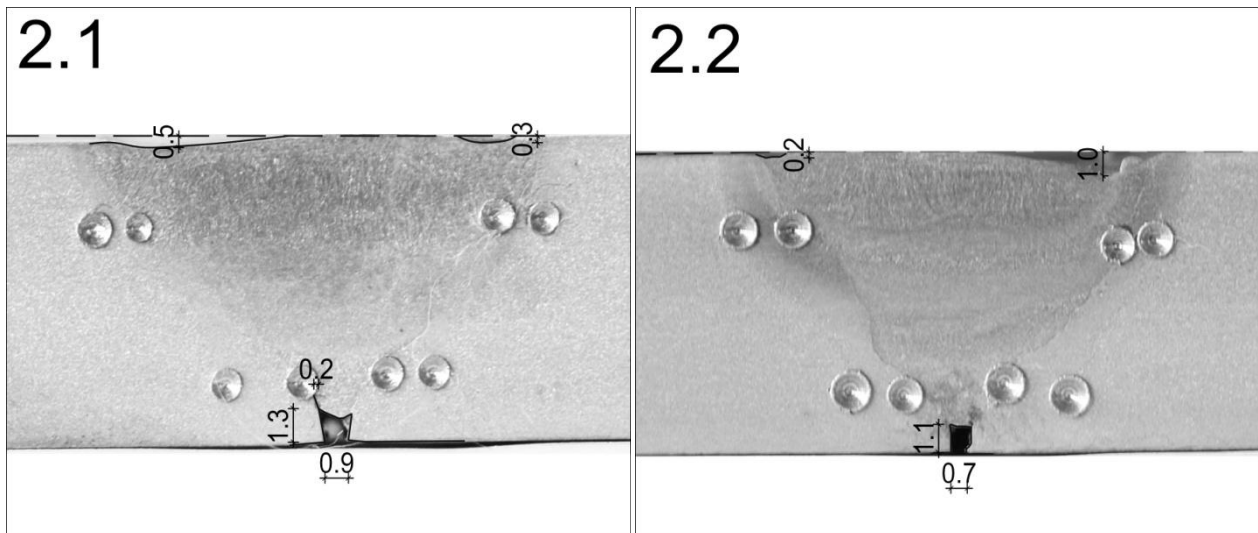
## 7.4 Greške u zavarenom spoju – baza za razvijanje realnih modela

Iz iskustva stečenog na osnovu prethodnih ispitivanja, očekivana je pojava nalepljivanja u epruvatama. Upravo iz tog razloga su epruvete u pipremi eksperimenta brušene finim brusnim papirnom a potom nagrižene Nitalom, jer osim što se posle nanošenja Nitala vide različite zone zavarenog spoja, mogu se videti i tačno premenrili nalepljivanja koja su se javila prilikom zavarivanja. Slike epruveta na kojima su merene greške (koje se razlikuju od grupe do grupe su prikazane na slikama 7.14 – 7.18). Treba napomenuti da epruvete grupe jedan od grešaka sadrže nadvišenje, neuvarenu ivicu lica šava i neuvaren koren. Epruvete grupe dva imaju ulegnuće lica šava i neuvaren koren. Epruvete grupe tri sa greškama smaknuća, nadvišenja i neuvarene ivice. Epruvete grupe četiri sa smaknućem, neprovarenim korenom (u vidu zuba) i nadvišenjem. Za razliku od svih ostalih grupa epruveta, epruvete grupe pet su bez grešaka i sliže kao reper za rezultate ispitivanja. Na osnovu ovih saznanja, numerički model može biti urađen veoma precizno i da prikaže rezultate koji odgovaraju realnim uslovima (na realnim konstrukcijama). Izmerena nalepljivanja kod epruveta grupe jedan je iznosilo od 0,2 mm do 0,4 mm. za grupu epruveta broj dva 0,2 mm, ostale su bile bez nalepljivanja. Kod epruveta grupe tri nalepljivanje je od 0,8 mm do 0,9 mm. Samo u jednoj epruveti kod epruveta grupe četiri je bilo nalepljivanje i ono je iznosilo 0,1mm. Grupa pet nije imala nalepljenja.

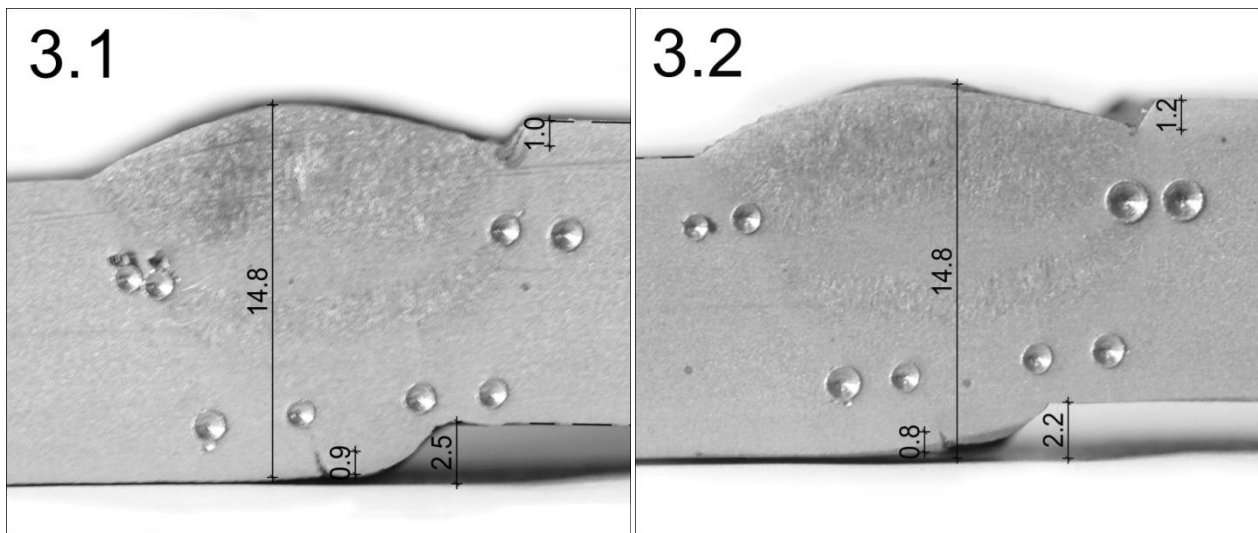


Slika 7.14: Epruvete iz grupe 1 sa detaljnim prikazom premerenih grešaka koje su uzete kao osnova za izradu tačnog numeričkog modela MKE

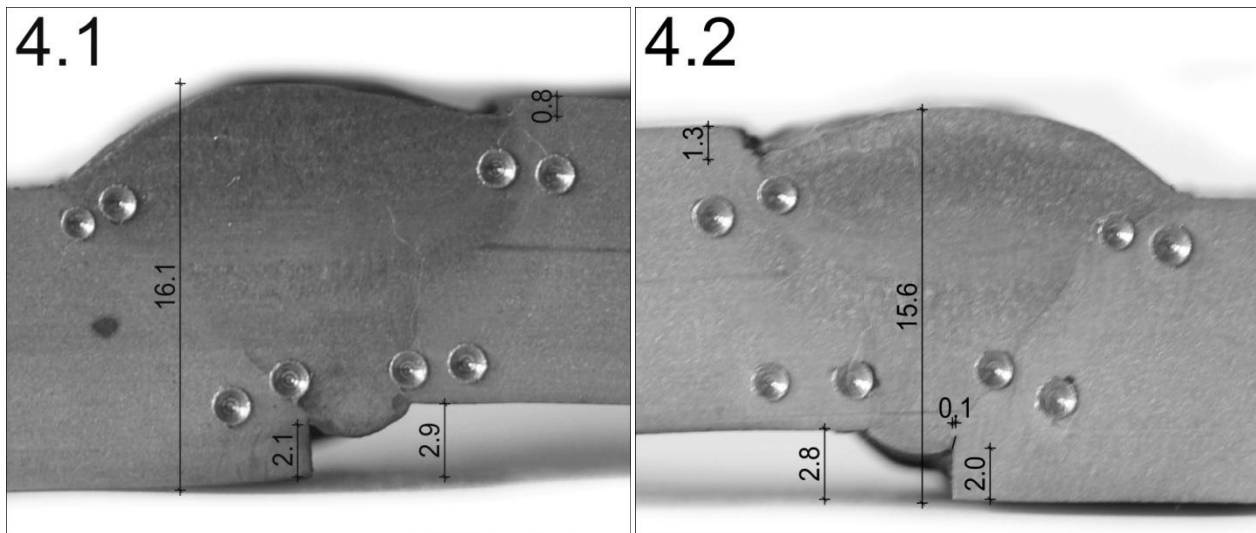




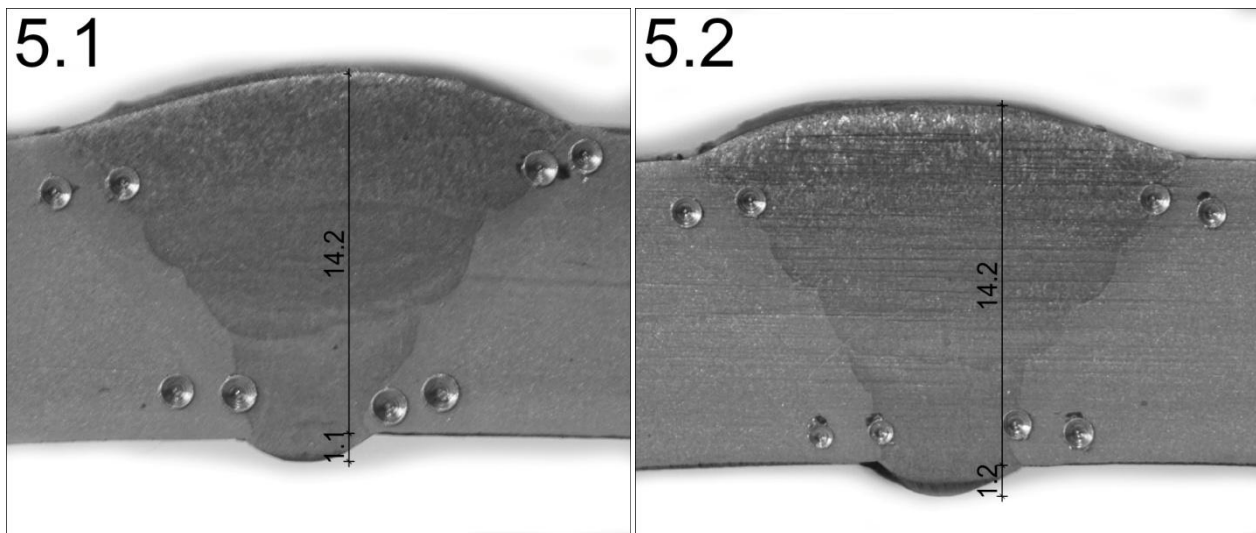
Slika 7.15: Epruvete iz grupe 2 sa detaljnim prikazom premerenih grešaka koje su uzete kao osnova za izradu tačnog numeričkog modela MKE



Slika 7.16: Epruvete iz grupe 3 sa detaljnim prikazom premerenih grešaka koje su uzete kao osnova za izradu tačnog numeričkog modela MKE



Slika 7.17: Epruvete iz grupe 4 sa detaljnim prikazom premerenih grešaka koje su uzete kao osnova za izradu tačnog numeričkog modela MKE



Slika 7.18: Epruvete iz grupe 5 sa koje su uzete kao osnova za izradu tačnog numeričkog modela MKE

## 7.5 Novi numerički modeli za čelik S275

Kao što je već spomenuto u prethodnim poglavljima, jedan od glavnih ciljeva prve faze istraživanja, sa materijalom S235, je bio da se dobije osnova za dalji razvoj numeričkih modela koji bi bili primjenjivi na druge vrste čelike, pre svega one sa boljim mehaničkim osobinama. Nakon što je utvrđeno na šta sve treba obratiti pažnju, odnosno šta treba popraviti i unaprediti u modelima za čelik S235, ista logika je primenjena na sledeću seriju epruveta, koje su zavarene od čelika S275. U oba slučaja su korišćene iste četiri kombinacije grešaka u zavarenim spojevima, u skladu sa opisom iz prethodnih eksperimenata/numeričkih simulacija.

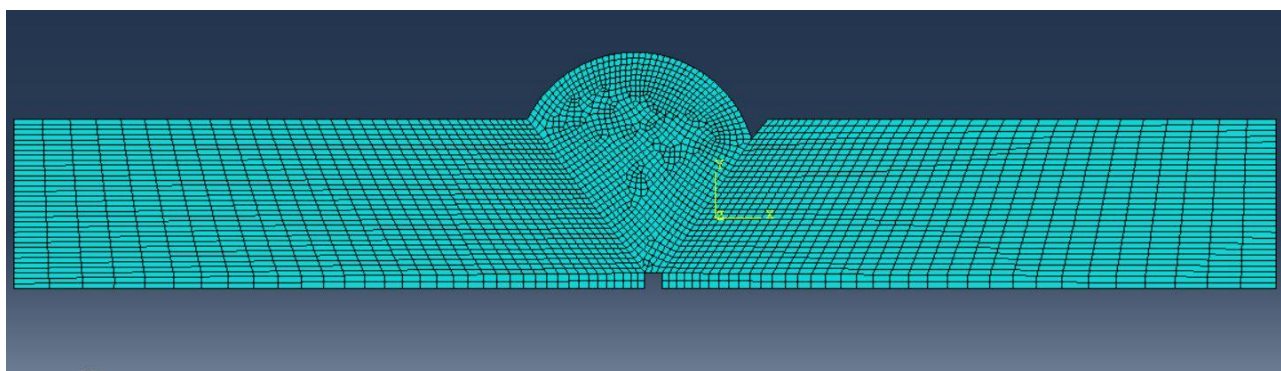
U slučaju čelika S275, prvobitno su urađene po dve epruvete za sve četiri grupe, kao i dve epruvete iz ploče koja je zavarena bez prisustva grešaka u zavarenom spoju, kao referentna ploča. Ovih deset epruveta je potom ispitano kao što je već prethodno objašnjeno, pri čemu su za numeričku analizu od posebnog značaja bili rezultati ispitivanja zatezanjem (mehaničke osobine osnovnog materijala i metala šava za svaku kombinaciju grešaka), kao i detaljno merenje dimenzija epruveta i njihovih grešaka, koje je u ovom slučaju urađeno još preciznije u poređenju sa

prvobitnom fazom (S235 čelik). U ovoj, drugoj fazi numeričkih simulacija, posebna pažnja je posvećena i zoni uticaja toplote, koja nije bila uključena u prvobitnim modelima, već je pretpostavljeno da su njene karakteristike slične osnovnom materijalu. Pošto je utvrđeno kako bi ovi prvobitni, pojednostavljeni numerički modeli trebalo da izgledaju da bi dali dovoljno precizne rezultate, pristupilo se izradi detaljnijih verzija, sa sve zonom uticaja toplote. Dimenzije i geometrija ZUT su usvojene na osnovu slika epruveta koje su prethodno nagrizane, kako bi se na njima jasno videle granice između odgovarajućih oblasti zavarenog spoja.

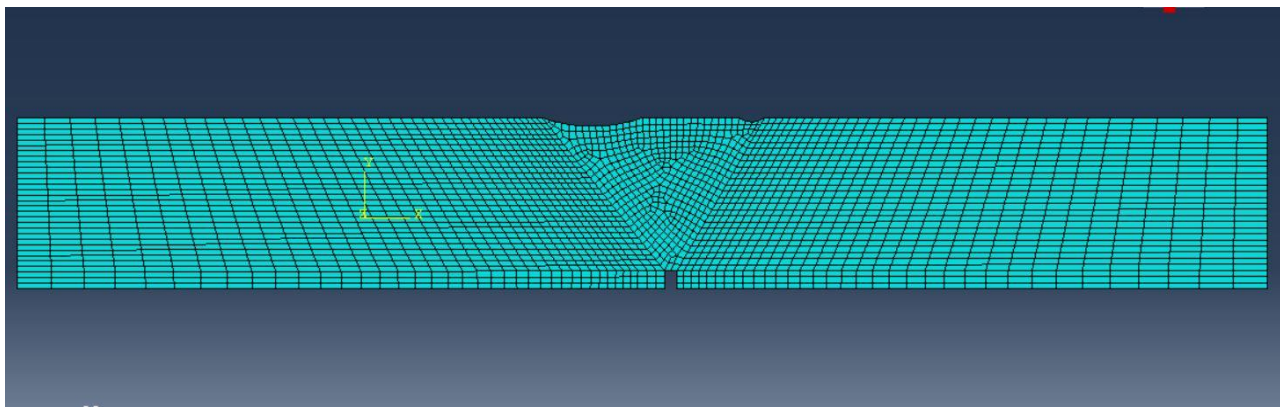
Definisanje graničnih uslova i opterećenja kod ovih modela je bilo vrlo slično kao i u prvoj seriji – epruveta bi sa jedne strane bila fiksirana, a sa druge strane opterećenja na zatezanje. Pri tome, kod izbora strane koja će biti oslonjena, odnosno one koja će biti opterećena se vodilo računa u zavisnosti od eksperimenta, usled asimetričnosti samih epruveta, nakon što je prethodno iskustvo pokazalo da postoji mogućnost značajnih razlika između eksperimentalnih i numeričkih rezultata u slučaju da se ne vodi računa o tome koja strana je zapravo zategnuta. Mreža konačnih elemenata je generisana na vrlo sličan način, sa manjim (finijim) elementima u oblasti zavarenog spoja, pre svega grešaka.

Jedina primetna razlika u definisanju modela u poređenju sa S235 čelikom je u dimenzionisanju epruveta i grešaka. U ovom slučaju su dimenzije merene u milimetrima, sa tačnošću od jedne decimale (dok je kod prve serije svaka dimenzije zaokruživana na ceo broj milimetara). Takođe, uzeta je u obzir i izvesna zakrivljenost samih epruveta u slučajevima kada se javljala (na primer kod epruveta gde je postojalo smaknuće, odnosno treća i četvrta grupa). Nove, unapređene verzije modela su prikazane na slikama 7.14 – 7.18. Kao što se može videti iz donje dve slike, delovi modela koji predstavljaju ploče od čelika S275 nisu više savršeno horizontalni, već odgovaraju zakrivljenju koje se može primetiti i na slikama sa kojih su skidane dimenzije (slike 7.19 – 7.23)

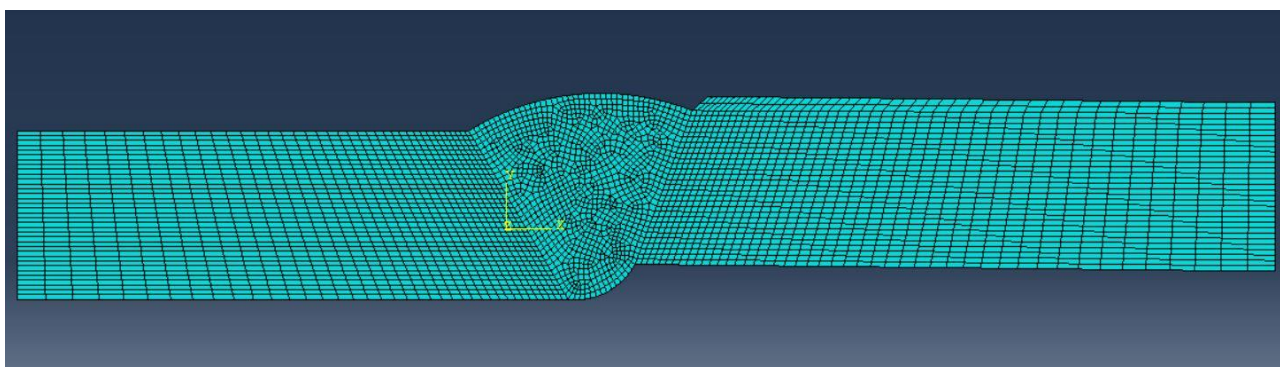
Takođe je potrebno pomenuti da je za potrebe ove analize urađen i peti model, na osnovu stvarnih epruveta koje su isečene iz ploče zavarene bez namerno izazvanih grešaka. Ovaj model je napravljen za potrebe poređenja sa greškama, pre svega kako bi se odredio faktor koncentracije napona u kritičnim oblastima, odnosno da bi se odredilo u kolikoj meri se naponi povećavaju u oblasti grešaka u odnosu na model koji ih nema



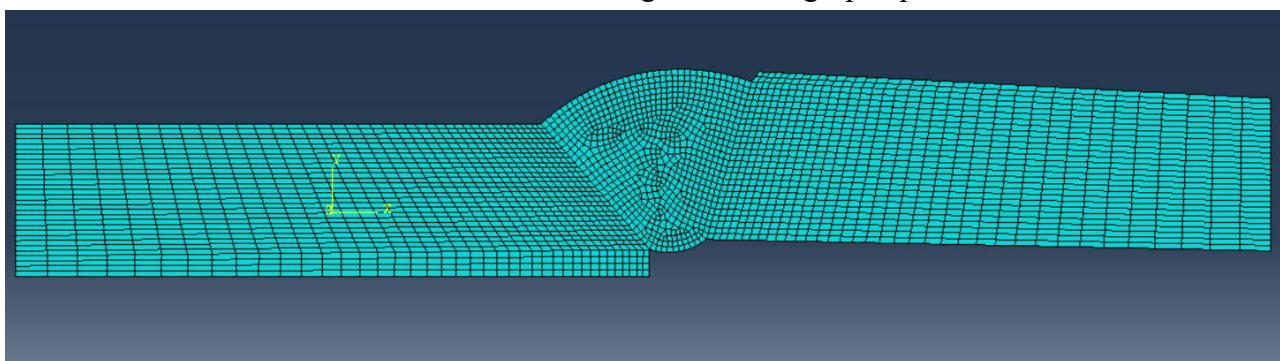
Slika 7.19: Mreža numeričkog modela za grupu epruveta 1



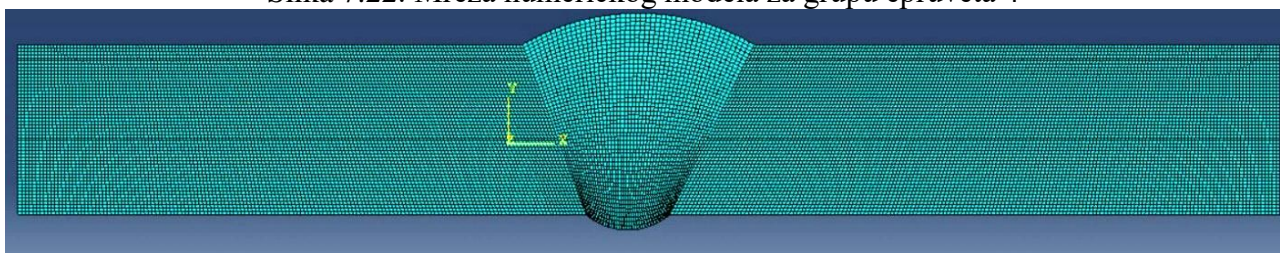
Slika 7.20: Mreža numeričkog modela za grupu epruveta 2



Slika 7.21: Mreža numeričkog modela za grupu epruveta 3



Slika 7.22: Mreža numeričkog modela za grupu epruveta 4

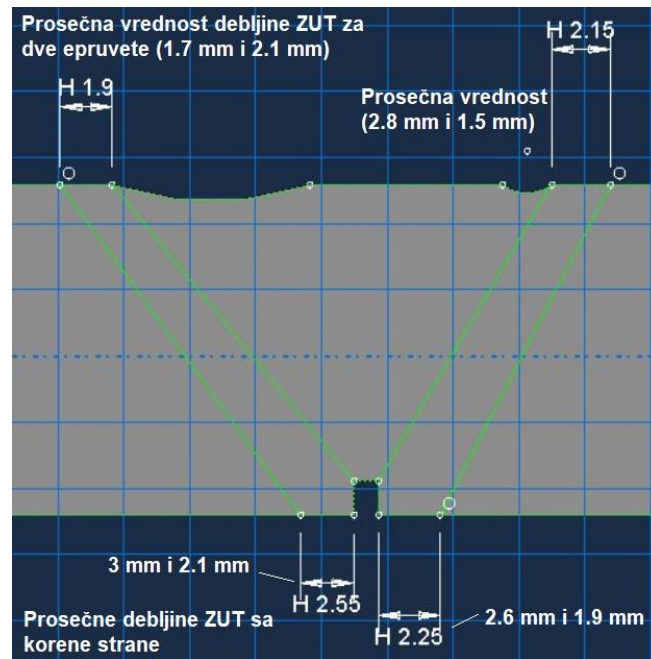


Slika 7.23: Mreža numeričkog modela za grupu epruveta 5

## 7.6 Određivanje mehaničkih osobina zone uticaja toplote

Sledeća faza izrade numeričkih modela je obuhvatala određivanje nepoznatih mehaničkih osobina zone uticaja toplote za sva četiri slučaja. Pri tome je usvojeno ukupno četiri modela, po jedan za svaku grupu, nakon što je zaključeno da su modeli iz istih grupa dovoljno slični među sobom, i da nema potreba za daljim korišćenjem svih osam (koji su opisani u prethodnim poglavljima). Za ovaj deo istraživanja od posebnog značaja su bili rezultati ispitivanjem primenom metode digitalne korelacije slika (prethodno detaljno opisane u poglavlju šest) – konkretno slike

dobijene u trenutku kada je krenula da se javlja početna plastična deformacija. U sva četiri slučaja ovaj trenutak je odgovarao koraku br. osam iz DIC-a, pa su odgovarajuće slike usvojene kao osnova za numeričke modele. Pored gore pomenutih slika, kao dodatna osnova su korišćene i nagrižene epruveta, na kojima se jasno vidi granica između različitih oblasti zavarenog spoja, i sa kojih su izmerene dimenzije zona uticaja toplote, sa obe strane svakog zavarenog spoja. Za potrebe numeričkih proračuna, usvojene su srednje debljine zone uticaja toplote sa strane lica i korena šava, kao što je prikazano na 7.24 ispod.



Slika 7.24: Primer podele zavarenog spoja na različite oblasti za jedan od četiri slučaja (druga grupa grešaka)

U ove modele su unete prethodno poznate vrednosti granica tečenja, zateznih napona i odgovarajućih deformacija za osnovni materijal i metal šava, na osnovu ranije urađenih modela, dok su vrednosti ovih parametara za zonu uticaja toplote određivani iterativno. Cilj je bio da se, sa odgovarajućom kombinacijom mehaničkih osobina ZUT-a, numeričkom simulacijom dobiju vrednosti i raspodela deformacija koja bi odgovarala rezultatima DIC-a, za sve četiri epruvete, odnosno da numerički modeli što vernije predstavljaju rezultate vezane za osmi korak svakog DIC ispitivanja. Određivanje samih mehaničkih osobina je bilo zasnovano na sledećim pretpostavkama:

- Mehaničke osobine ZUT-a će svakako biti bolje u odnosu na osnovni materijal, i približne metalu šava, na osnovu prethodnih iskustava sa zavarenim spojevima od čelika iz grupe srodne onoj u koju spada S275.
- Mehaničke osobine bi trebalo da budu sličnih vrednosti za sva četiri modela.
- Precizno određene mehaničke osobine ZUT-a će dati vrlo slične maksimalne vrednosti deformacija na istim lokacijama kao i kod stvarnih epruveta za ispitivanje DIC-om, uz dovoljno slične raspodele, kako u ZUT-u, tako i u ostatku samog zavarenog spoja.

Na osnovu prethodno iznesenih pretpostavki su usvojene prvobitne vrednosti granice tečenja, zatezne čvrstoće i deformacija. Ove vrednosti su iznosile oko 420 MPa (granica tečenja), 540 MPa (zatezna čvrstoća) i 6% (deformacija). Nakon nekoliko pokušaja, tokom kojih su ove vrednosti varirane, dobijena je raspodela deformacija koja je odgovarala stvarnom stanju, za prvu grupu grešaka. Za sledeća tri modela, postupak je išao značajno brže, s obzirom da su sada okvirne

vrednosti potrebnih mehaničkih osobina bile poznate iz prvog modela, što je u velikoj meri olakšalo pravilnu procenu.

Tabela 7.1: Mehaničke osobine zone uticaja toplote za modele iz sve četiri grupe, određene iterativnim postupkom (navesti kako si dobio vrednosti, MKE, eksperiment itd)

Model	Napon tečenja (MPa)	Zatezna čvrstoća (MPa)	Deformacija (-)
Grupa 1	404	497	0.055
Grupa 2	395	505	0.06
Grupa 3	419	495	0.06
Grupa 4	390	484	0.055
Grupa 5	400	500	0.06

Kao što je prikazano u tabeli 7.1, vrednosti mehaničkih osobina za sve četiri grupe su veoma slične, u rasponu od 390-419 MPa (granica tečenja), 484-505 MPa (zatezna čvrstoća), i 5.5-6% (deformacija). Ovo je jedan od faktora koji potvrđuje validnost dobijenih rezultata, uz prethodno pominjano slaganje numeričkih i stvarnih modela u pogledu deformacija. Takođe, ove vrednosti se nalaze između metala šava i osnovnog materijala, što je takođe očekivano kod ovakvih materijala usled hemijskog sastava i značajnog overmatchinga zavarenog spoja. Što se usvojenih vrednosti deformacija tiče, one su birane tako da budu nešto niže u odnosu na osnovni materijal, budući da zona uticaja toplote po pravilu ima manju plastičnost u poređenju sa osnovnim materijalom, u slučaju predmetnih čelika (nisko-ugljeničnih i niskolegiranih).

Očekivane su vrednosti mehaničkih osobina ZUT-a koje bi bile bliže metalu šava, kao što se može videti iz prvih pretpostavljenih granica tečenja/zateznih čvrstoća. Sa druge strane, u ovom konkretnom slučaju zavarivanja je unos toplote morao da bude nešto manji nego što je uobičajena praksa, kako bi se unele sve neophodne greške (npr. neprovaren koren). Samim tim je dobijen ZUT koji nije izražen toliko kao u slučaju zavarenog spoja bez prisustva grešaka, što je za posledicu imalo manji rast zrna u samom ZUT-u, što bi objasnilo mehaničke karakteristike nešto niže od očekivanih.

## 8. Analiza rezultata

### 8.1 Uvod

Pre donošenja odgovarajućih zaključaka ove doktorske disertacije koja se tiče ponašanja i uticaja višestrukih grepašaka u zavaranom spoju i njihovim uticajem na integritet zavarenog spoja. Analiza rezultata u ovom poglavlju je podeljena u nekoliko potpoglavlja, ispitivanje jednoosnim zatezanjem, merenje tvrdoća i mikrostruktura i rezultati numeričkih simulacija sa čelikom S275JR, pregled dobijenih rezultata i relevantnih parametara su prikazani u prethodnom delu ove disertacije.

### 8.2 Ispitivanje jednoosnim zatezanjem

Eksperimentalni rezultati jednoosnim zatezanjem imali su za cilj da utvrdi mehaničke karakteristike i ponašanje pri lomu epruveta sa namenski unetim površinskim nepravilnostima (greškama). Epruvete su bile podeljene u četiri grupe, dok je peta grupa bila bez unetih grešaka i služila je kao reper za poređenje. Do loma u epruvetama grupa 1, 2, 3, 4 koje su imale namenski unete greške pri sili od 51 - 64 kN je dolazilo ko loma u epruvetama grupe 1 i 2, dok je kod epruveta grupa 3, 4 dolazilo do loma pri silama od 77 – 81 kN. U epruveti grupe 5 sila koja je izazvala lom je iznosila 77 kN. Naponi tečenja su iznosili:

- za grupu 1 su varirale od 74 – 76 kN
- za grupu 2 je iznosila 74 -81 kN
- za grupu 3 su varirale od 68 – 78 kN
- grupa 4 od 63 – 68 kN
- za reprnu epruvetu 5 sila iznosila 75 kN.

Deformacije ispitanih epruveta su iznosile:

- reperne epruvete (epruveta grupe 5) su iznosile 24 - 25%.
- za grupu 1 od 8 – 14 %
- za grupu 2 od 11 -16 %
- za grupu 3 od 16 – 21%
- za grupu 4 od 8 – 28 %.

Veliki raspon rasipanja vrednosti deformacija je jedino iznsio u grupi erpuveta 4, gde su se vrednosti deformacija na četiri ispitane epuvete kretale u rangju 8 – 28%. Ovo se pojava izazvana nezahvalnom gemetrijom zavarenog spoja zbog koga dolazi do deformacijskog ojačavanja materijala. Iz tog razloga dolazi do “prebacivanja” deformacije na drugo mesto u poprečnom preseku (i širenja prsline iz zajedu), čime dolazi do loma u osnovnom materijalu. Vidno je iz ispitivanja da kombinacije grešaka vidno utiču na reserve plastičnosti ispitanih epruveta. Iz rezultata se vidi da su se namenski unete greške ponašale kao što je i predviđeno.

### 8.3 Merenje tvrdoće i analiza mirostrukture

Izmerene vrednosti tvrdoća su u skladu sa očekivanim vrednostima za čelik S275JR, odnosno nije bilo značajnih odstupanja. Pozicije na kojima su merene tvrdoće su označene na skici 6.95, sve vrednosti tvrdoća su bile u granici očekivanog i nije bilo nikakvih odstupanja vrednosti (vrednsoti tvrdoća svih zona zavarenog spoja su date na tabelama u dodatku 3). Po dubini zuta nije bilo nikakvog značajnog odstupanja.

Mikrostrukturnom analizom osnovnog metala, uočena je ravnotežna feritno-perlitna mikrostruktura koja odgovara mikrostrukтури toplovaljanog niskougleničnog čelika. U zoni uticaja toplote, mikrostruktura je feritno perlitna i ne uočava se pojava neravnotežnih mikrokonstituenata niti se uočava značajan porast veličine zrna. U metalu šava uočavaju se mikrostrukturne razlike posmatrajući šav od korena ka licu, kao i od linije stapanja ka centralnom delu metala šava. U zoni

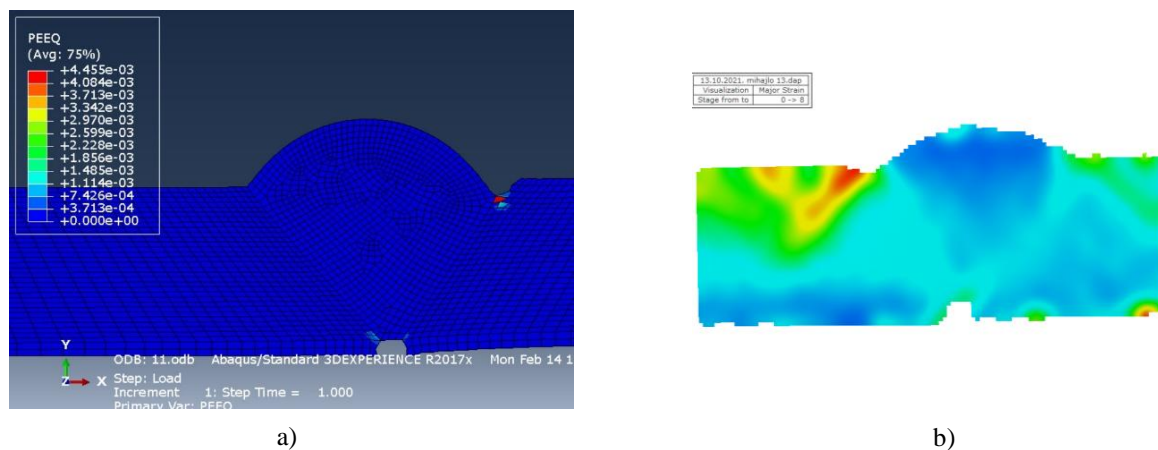
korena šava, uočava se sitnozrna feritnoperlitna mikrostruktura dok je ka licu šava primetna grublja mikrostruktura sa uz pojavu neravnotežnih mikrokonstituenata (beinitni ferit) dok se ista pojava uočava i od centralnog dela metala šava ka liniji stapanja. Ovakva promena mikrostrukture u metalu šava je očekivana, a prisutne razlike su posledica različite brzine odvođenja toplote koja je u zoni lica šava i linije stapanja veća pa rezultira mikrostrukturom koja odgovara livenom stanju. U zoni korena šava, prisutna je sitnozrna mikrostruktura koja je posledica zagrevanja čelika narednim prolazima, što uzrokuje normalizaciju mikrostrukture prehodnog prolaza.

## 8.4 Rezultati numeričkih proračuna sa čelikom S275

U prethodnom poglavlju je dat detaljan opis razvoja numeričkih modela kod kojih je kao osnovni material korišćen čelik S275, uz sve dodatne aproksimacije i unapređenja, na osnovu prethodnog iskustva sa modelima od čelika S235. U početnoj fazi izrade ovih numeričkih modela je utvrđeno da su rezultati za modele iz svake grupe dovoljno slični međusobno, nakon čega je odlučeno da se za svaku grupu usvoji jedan reprezentativni model, kako bi se skratilo vreme proračuna, bez uticaja na preciznost dobijenih rezultata.

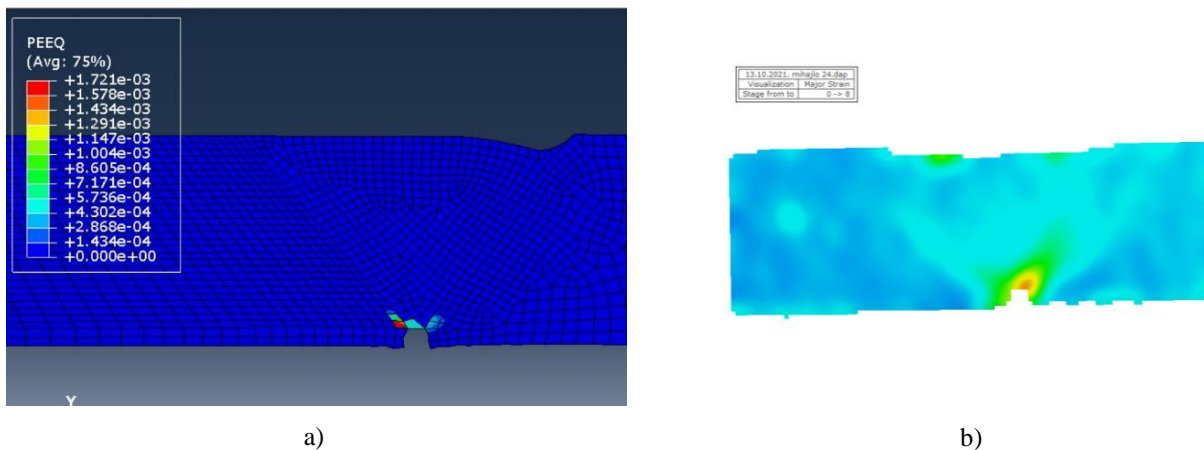
Za izradu ovih modelu su korišćeni ulazni parametri za tri različite oblasti zavarenog spoja, uključujući i zonu uticaja toplote, čije mehaničke osobine su određene postupkom koji je opisan u prethodnom poglavlju. Time je obezbeđena realnija simulacija stvarnog ponašanja epruveta.

Od posebnog značaja za ovu analizu bio je trenutak tokom realnog ispitivanja (praćenog ARAMIS opremom za korelaciju digitalnih slika), u kome dolazi do pojave plastične deformacije u zavarenom spoju, za sve četiri grupe epruveta. U tri od četiri slučaja je procenjeno da ovaj trenutak odgovara osmom koraku DIC-a (8.1 – 8.4), pri čemu su primećene određene razlike u numeričkim i eksperimentalnim rezultatima za treću grupu epruveta, kao što se vidi u nastavku. U okviru ove analize biće prikazani i rezultati dobijeni za unapređeni model, koji su pokazali dobro slaganje sa DIC metodom prikazanim na slici 8.5.

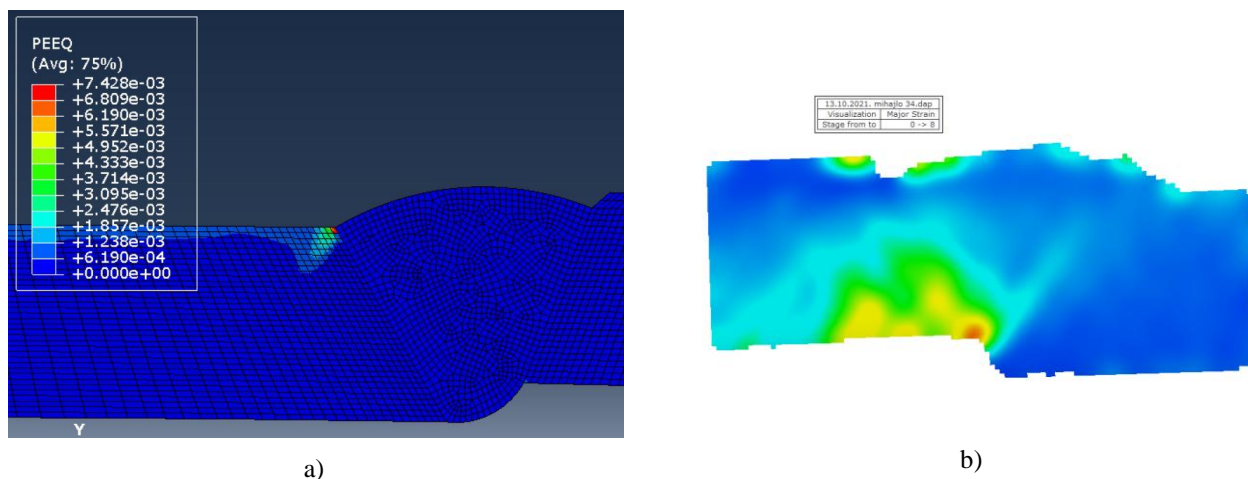


Slika 8.1: Gupa epruveta 1 – uporedni prikaz momenta u trenutku ulaska epruvete (tokom ispitivanja) u plastičnost: a) numerički model, b) deformacije zona eksperimentalno ispitane epruvete merenih sistemom ARAMIS

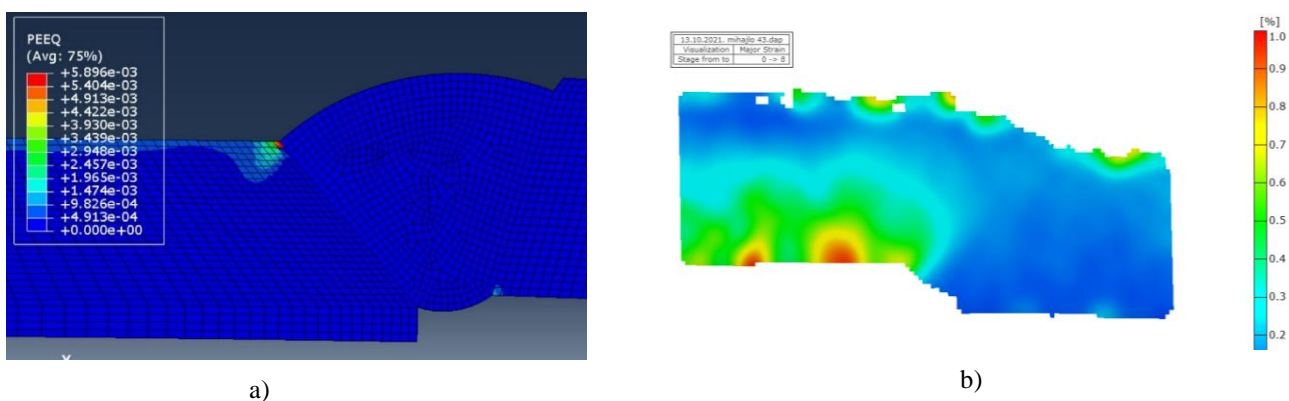




Slika 8.2: Gupa epruveta 2 – uporedni prikaz momenta u trenutku ulaska epruvete (tokom ispitivanja) u plastičnost: a) numerički model, b) deformacije zona eksperimentalno ispitane epruvete merenih sistemom ARAMIS



Slika 8.3: Gupa epruveta 3 – uporedni prikaz momenta u trenutku ulaska epruvete (tokom ispitivanja) u plastičnost: a) numerički model, b) deformacije zona eksperimentalno ispitane epruvete merenih sistemom ARAMIS

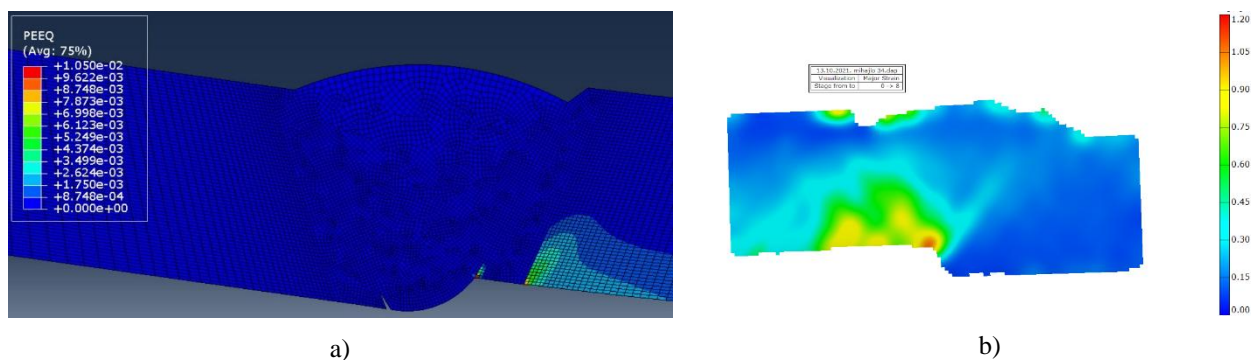


Slika 8.4: Gupa epruveta 4 – uporedni prikaz momenta u trenutku ulaska epruvete (tokom ispitivanja) u plastičnost: a) numerički model, b) deformacije zona eksperimentalno ispitane epruvete merenih sistemom ARAMIS

Kao što se može videti na slikama 8.1 – 8.4, dobijeno je dobro slaganje u pogledu pojave plastičnih deformacija – u numeričkim simulacijama koje odgovaraju osmom koraku primenom metode DIC. Plastičnost tek počinje da se javlja na približno istim mestima kao i u slučaju

eksperimentalnih ispitivanja. Jedina primetna razlika postoji kod modela četvrte grupe gde je plastična deformacija bila nešto veća na prelasku sa metala šava na nižu ploču, u odnosu na raspodelu deformacija u stvarnoj epruveti, mada se i u numeričkoj simulaciji može videti začetak plastične deformacije sa korene strane.

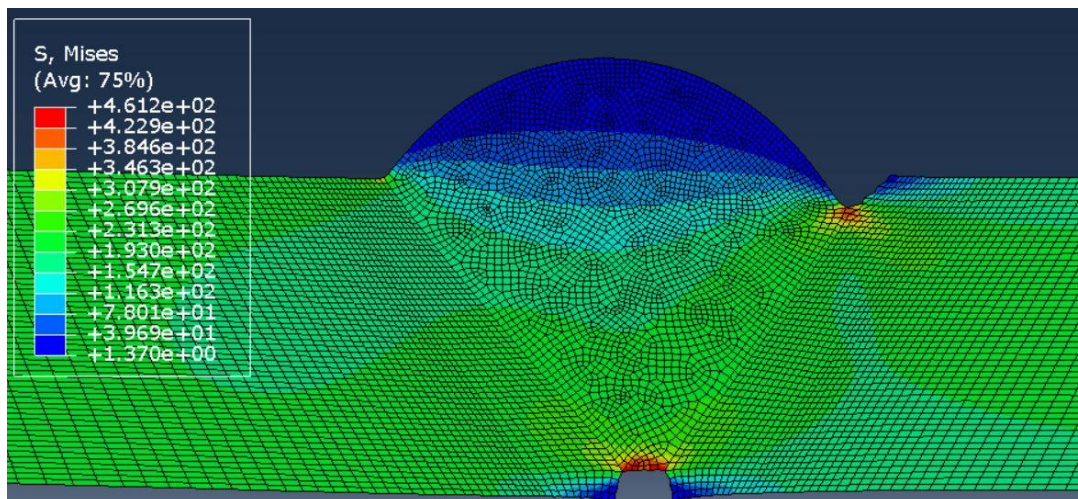
Nakon analize ovih rezultata, osmi korak merenjem deformacija metodom DIC je i definitivno usvojen kao merodavan za ulazak epruveta u plastičnost. Numerički modeli koji su korišćeni za verifikaciju ovih slika su usvojeni kao osnova za dalje simulacije, koje će biti opisane u daljem tekstu.



Slika 8.5: Gupa epruveta 3 – uporedni prikaz momenta u trenutku ulaska epruvete (tokom ispitivanja) u plastičnost nakon izmene modela: a) numerički model, b) deformacije zona eksperimentalno ispitane epruvete merenih sistemom ARAMIS

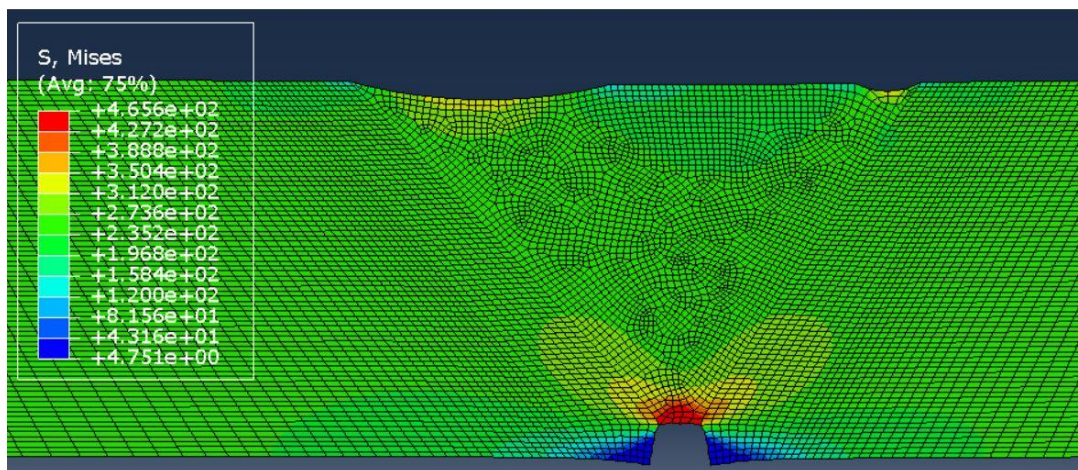
Kao što se može videti sa gornje slike, u slučaju unapređenog modela je dobijena mnogo približnija raspodela deformacija i napona, sa vidnom koncentracijom u korenu zavarenog spoja, sa “više” strane. Sama izmena modela se sastojala u promeni geometrije, budući da je u slučaju unapređene verzije dodato i nalepljivanje u korenu šava, koje se može videti sa donje strane modela na slici 8.5 levo. S obzirom na nešto drugačiju tehnologiju zavarivanja koja je korišćena kod druge serije zavarivanja ploča, dobijeno je i znatno manje nalepljivanje, od oko 0,9 cm, koje je uneto i u model, nakon čega je došlo do očekivane preraspodele napona i deformacija. Treba napomenuti da je i u slučaju četvrte grupe takođe utvrđeno prisustvo nalepljivanja u korenu zavarenog spoja (pošto je i ova grupa imala smaknuće od 2 mm), ali u tom slučaju ono nije imalo nikakav značajan uticaj na krajnji rezultat, odnosno nije bilo promene u pogledu raspodele (i pre svega koncentracije napona).

U narednom delu analize rezultata numeričkih ispitivanja će biti prikazane i raspodele i vrednosti napona za sve četiri grupe, kako bi se stekao bolji uvid u to koja je kombinacija grešaka najnepovoljnija sa tačke gledišta integriteta zavarenog spoja, pri čemu će biti uzete u obzir i lokacije koncentracije napona, usled heterogenosti “*overmatching*” zavarenog spoja.



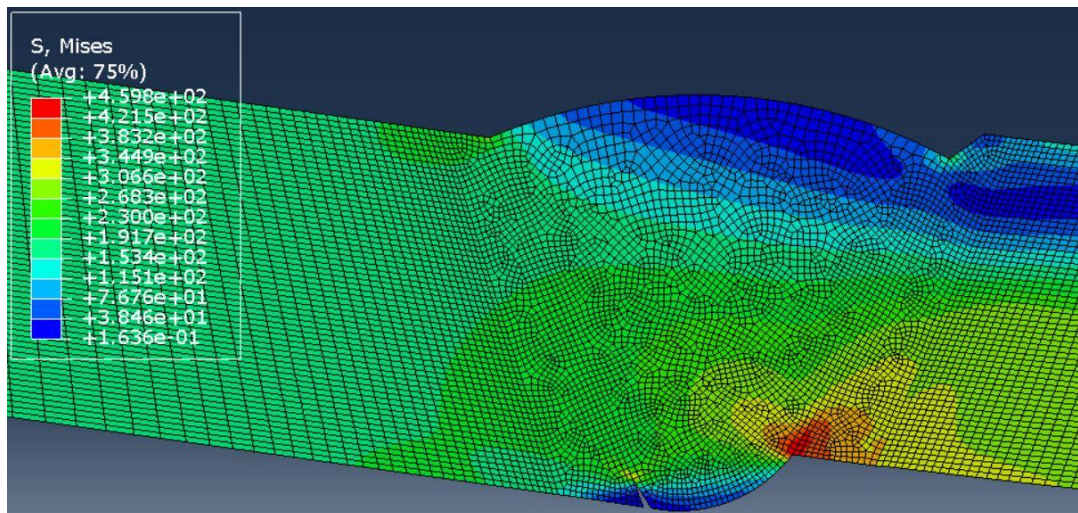
Slika 8.6 Raspodela napona u modelu epruvete iz prve grupe

Kao što se može videti sa slike 8.6, model za prvu grupu epruveta (ivični zajed, preveliko nadvišenje i neprovaren koren) ima dve kritične lokacije na kojima se javlja koncentracija napona, i koje su naravno direktno vezane za izražene promene u geometriji, odnosno oštre prelaze i uglove. Naponi u samom korenu su nešto veći, i dostižu nivo granice tečenja metala šava (oko 462 MPa), u odnosu na maksimalne napone u zajedu sa strane lica šava, gde je maksimalna vrednost oko 422 MPa. Iako su naponi u korenu veći, naponi u zajedu su kritičniji, pošto su i oni prešli granicu tečenja zone uticaja toplote, i to u većoj meri u odnosu na koren. Ako se ova slika uporedi sa slikom gde je prikazan početak plastične deformacije, takođe se može videti da je ivični zajed kritičniji sa tačke gledišta integriteta zavarenog spoja, pošto ulazi u plastičnu zonu mnogo pre nego koren. Ovo je i očekivano, s obzirom na geometriju u okolini zajedu, kao i činjenicu da je napon koncentrisan u liniji stapanja.



Slika 8.8 Raspodela napona u modelu epruvete iz druge grupe

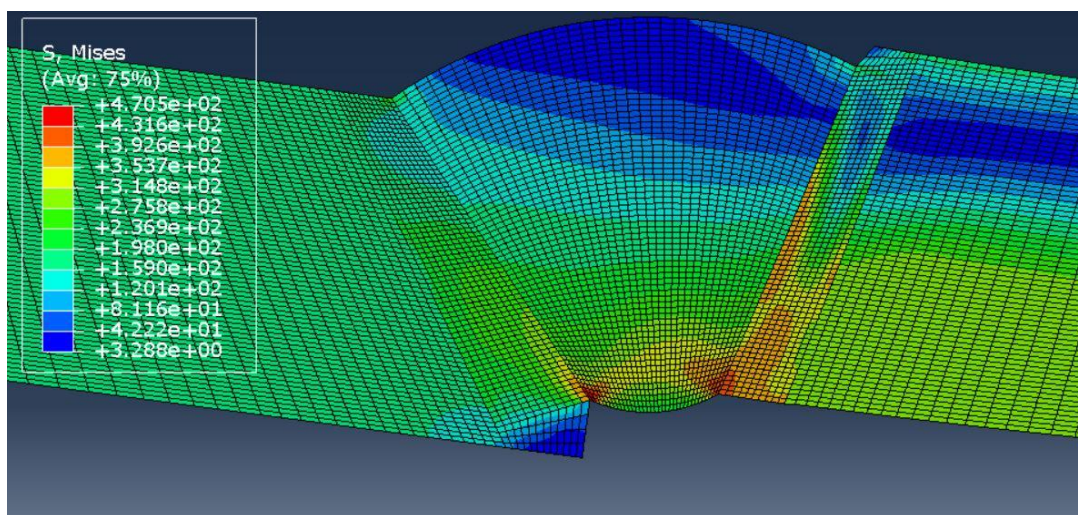
Raspodela napona u slučaju modela epruvete iz druge grupe (slika 8.8) je daleko ravnomernija od svih ostalih, što je i logično, s obzirom na skoro simetričnu geometriju usled izbora grešaka. Ovde se može videti da ulegnuće u licu metala šava nema skoro nikakav uticaj na raspodelu napona i da su vrednosti u korenu daleko kritičnije. Takođe se može videti da su naponi u zoni uticaja toplote i duž linije stapanja dosta niži u poređenju sa prvom grupom, u uglavnom se kreću od 250-270 MPa, osim u oblasti oko korena, ali i tu su njihove vrednosti niže od granice tečenja ZUT-a, za razliku od prve grupe epruveta. Ova raspodela napona odgovara realnom ponašanju epruveta iz ove grupe, kod kojih je lom krenuo iz korena, duž linije stapanja.



Slika 8.9 Raspodela napona u modelu epruvete iz treće grupe

Na slici 8.9 se takođe može videti nalepljivanje ubačeno sa niže strane korena šava, kod modela epruvete iz treće grupe. Kao i u slučaju poređenja plastičnih deformacija sa DIC-om, koncentracija napona/deformacija je najizraženija u korenu, sa više strane. Kao što se može videti na osnovu vrednosti napona oko nalepljivanja, njegova veličina nije bila dovoljna da bi dovela do nekih značajnijih promena u pogledu veličine napona. Sa druge strane, nalepljivanje je ipak imalo određen uticaj u smislu raspodele napona – u modelima gde nalepljivanje nije ubačeno, mesta koncentracije napona su bila nešto drugačija.

Maksimalni napon u ovoj, unapređenoj verziji modela je iznosio 460 MPa, i nalazio se ponovo u oblasti linije stapanja, ali za razliku od prve grupe, sada je maksimalna vrednost bila sa korene strane. Ovo pokazuje značajan uticaj smaknuća na raspodelu napona – u slučaju obe grupe dominantne greške su bile ivični zajed sa strane lica šava i greške u korenu šava, ali je kod treće grupe prisustvo smaknuća “premostilo” koncentraciju napona na suprotnu stranu samog zavarenog spoja.



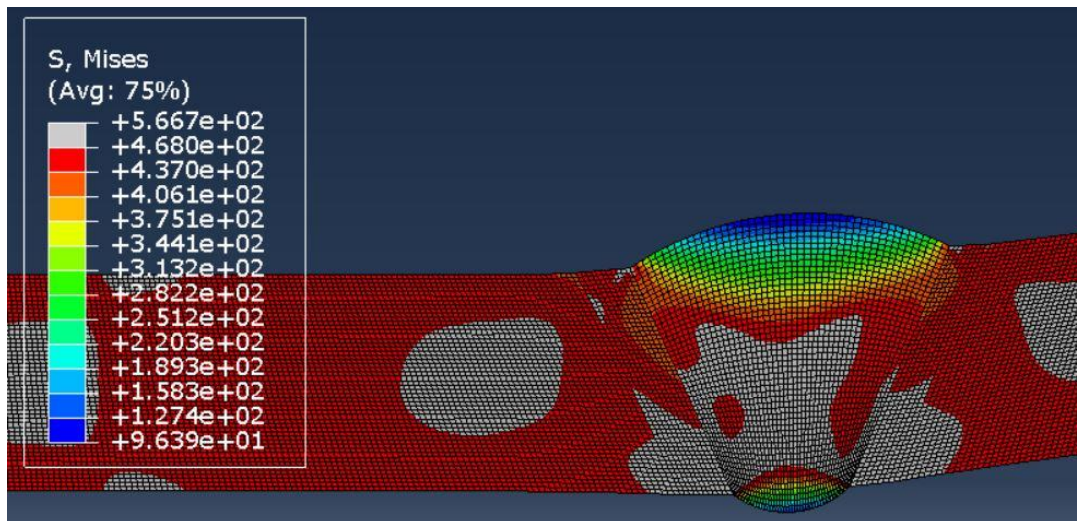
Slika 8.10 Raspodela napona u modelu epruvete iz četvrte grupe

Kod modela četvrte grupe epruveta (slika 8.10) je dobijeno slično ponašanje kao i za treću grupu, s obzirom da je i ovde bilo prisutno smaknuće. Primetne su razlike u koncentracijama i raspodeli vrednosti napona, što je pre svega posledica veoma drugačije geometrije u korenu šava. Oštar prelaz sa osnovnog materijala na metal šava je uticao na napone u dovoljno velikoj meri da “poništi” uticaj nalepljivanja koje se javilo na istom mestu kao i u prethodnom slučaju. Kod ove

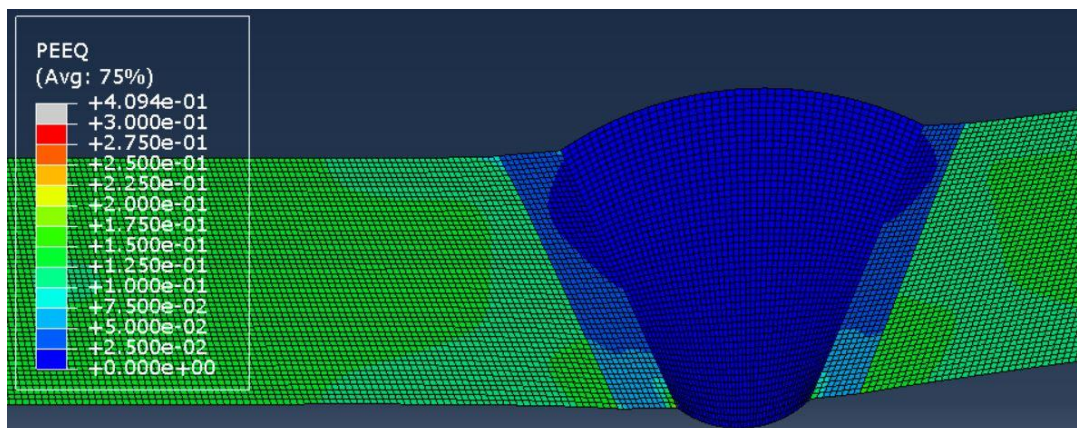
grupe epruveta ubacivanje nalepljivanja nije imalo svrhe, jer je utvrđeno u jednoj od iteracija da neće imati nikakvu značajnu ulogu, odnosno da će raspodela napona ostati skoro pa ista. Stoga je nalepljivanje u ovom slučaju izostavljeno.

Što se samih vrednosti napona tiče, ovde je maksimalna vrednost opet u liniji stapanja, ali sa niže strane korena, i iznosi 470.5 MPa. Određena koncentracija napona je prisutna i u liniji stapanja sa druge strane korena, pri čemu su ovde vrednosti oko 431 MPa. Ovo je jedina grupa kod koje raspodela napona ne odgovara u potpunosti realnom stanju utvrđenom primenom DIC metode – u eksperimentu nije bilo primetne koncentracije napona sa obe strane korena, a koja je prisutna u numeričkom modelima, bez obzira na nalepljivanje. Treba primetiti i da je u slučaju rezultata snimanja DIC kamerama prisutna koncentracija napona u osnovnom materijalu, daleko od zavarenog spoja, što takođe nije bilo očekivano, i nije se dešavalo kod ostalih epruveta. Jedno od pitanja koje bi moglo da se detaljnije analizira u budućem istraživanju bi moglo da bude vezano za ovo delimično neslaganje rezultata, uzimajući u obzir i numerički model i stvarnu epruveta i njenu neuobičajenu raspodelu deformacija pri ulasku u plastičnost.

Na slikama 8.11 i 8.12 su prikazane raspodela napona i deformacija u modelu epruvete bez grešaka, čije su dimenzije uzete sa odgovarajuće slike. Ovaj model je naravno skoro simetričan, budući da nema značajnih geometrijskih anomalija prouzrokovanih potencijalnim greškama, odnosno njihovim kombinacijama.



Slika 8.11 Raspodela napona u modelu epruvete iz pete grupe

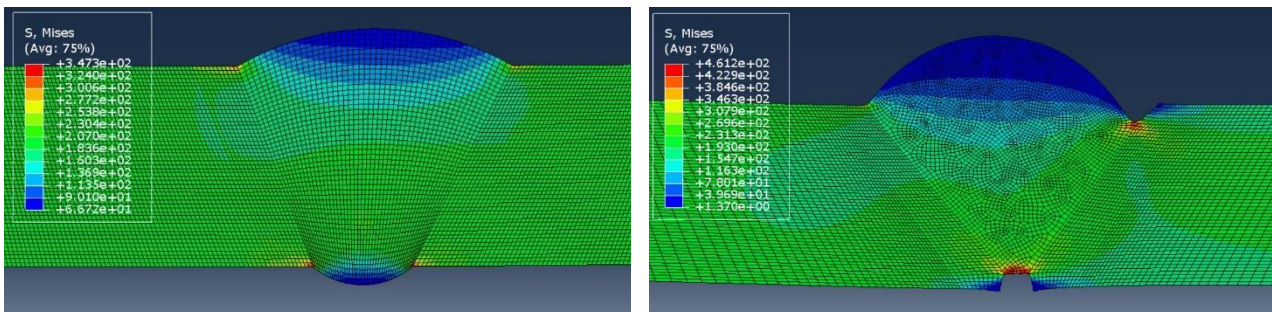


Slika 8.12 Raspodela deformacija u modelu epruvete iz pete grupe

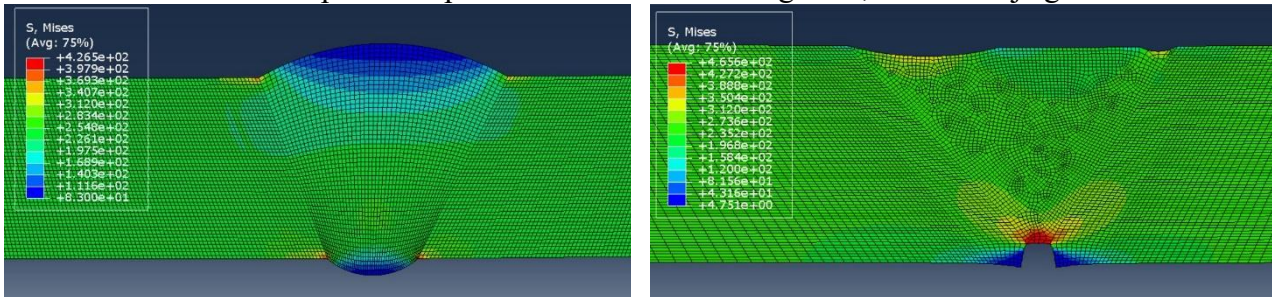
Na slici 8.11 oblasti obeležene crvenom bojom odgovaraju zateznoj čvrstoći slabijeg, osnovnog materijala. Iz ovoga se može videti da bi i u ovom slučaju došlo do loma u osnovnom

materijalu, umesto u okolini linije stapanja, kao kod slučajeva sa greškama. Što se deformacija tiče, njihova raspodela je pokazala dosta sličnosti sa rezultatima DIC-a (slike 6.91 – 6.94). Za potrebe ove simulacije urađeno je nekoliko iteracija, budući da je opet bilo neophodno odrediti mehaničke osobine ZUT-a za slučaj epruvete bez grešaka, koje su prethodno prikazane u uvodnom poglavlju vezanom za numeriku. Ponovo je cilj bio da se dobije slična raspodela deformacija u ZUT-u (kao i u ostalim oblastima zavarenog spoja), što je na kraju i postignuto.

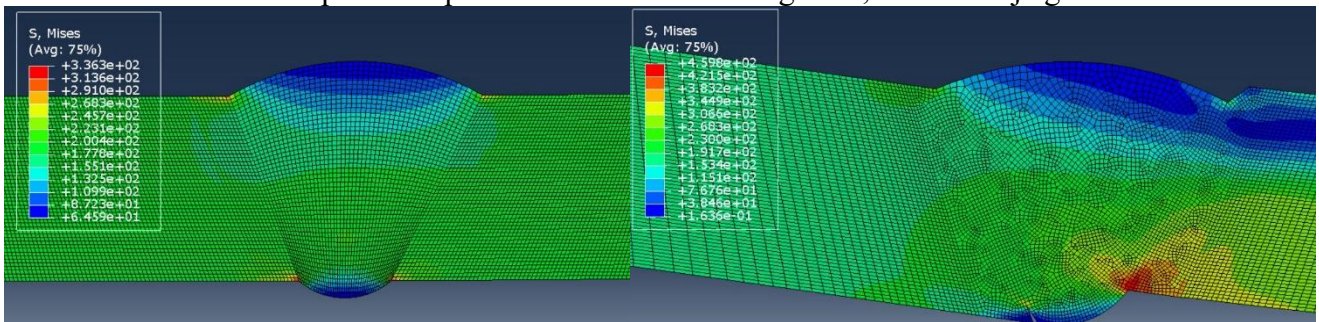
Sledeći korak u upoređivanju epruvete bez grešaka sa ostale četiri kombinacije je obuhvatao numeričku simulaciju gore opisanog modela, ali sa silama koje bi odgovarale trenutku kada modeli sa kombinacijama grešaka kreću da ulaze u plastičnost. Drugim rečima, model bez greške je opterećen sa 4 različite vrednosti zatezne sile, koje su prethodno određene na osnovu rezultata dobijenih iz ARAMIS-a (a koje su bile u rasponu od 188 do 241,7 MPa, kada se pretvore u odgovarajući napon, koji se potom zadaje kao opterećenje). Svaki od četiri dobijena rezultata za napon je nakon toga upoređen sa odgovarajućom grupom epruveta, pri čemu je posebna pažnja posvećena lokacijama koje bi odgovarale samim greškama (npr. gornji deo linije stapanja sa strane lica, zato što je tu bio prisutan zajed u nekoliko slučajeva sa greškama...). Uporedni prikaz modela sa i bez grešaka je dat na slikama 8.13 – 8.16.



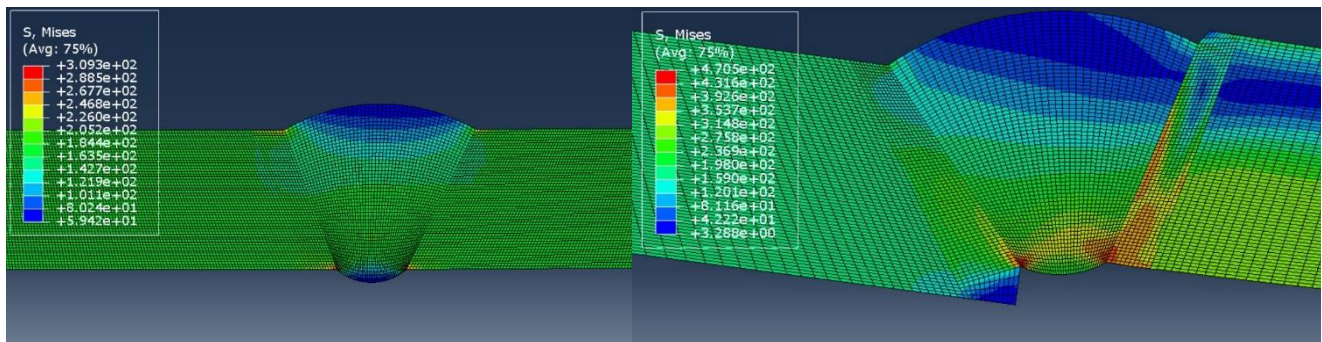
Slika 8.13: Raspodela napona u modelima sa i bez greške, kombinacija grešaka 1



Slika 8.14: Raspodela napona u modelima sa i bez greške, kombinacija grešaka 2



Slika 8.15: Raspodela napona u modelima sa i bez greške, kombinacija grešaka 3



Slika 8.16: Raspodela napona u modelima sa i bez greške, kombinacija grešaka 4

Kao što se može videti sa prethodno prikazanih slika, naponi u modelima sa kombinacijama grešaka su primetno veći, kako u celom modelu, tako i u kritičnim oblastima gde su greške imale najizraženiji uticaj. Treba napomenuti da su opterećenja koja su izazvala pojavu plastičnih deformacija u modelima sa greškama u tri od četiri slučaja bila nedovoljna da izazovu plastičnost u modelu bez greške. Jedino je u slučaju druge grupe postojala zanemarljivo mala plastična deformacija u nekoliko elemenata. Ovo već ukazuje na značaj uticaja prisustva višestrukih grešaka u zavarenom spoju, odnosno na to da izabrane kombinacije grešaka mogu dovesti do značajnog smanjenja integriteta zavarene konstrukcije, time što će „naterati“ zavareni spoj sa greškama da uđe u plastičnu zonu mnogo ranije nego što bi to bio slučaj bez prisustva grešaka.

U ovom delu poglavlja o analizi rezultata će biti dat i detaljan pregled svih kritičnih oblasti, za svaku kombinaciju grešaka. Tabela 8.1 prikazuje odnos napona za svaku pojedinačnu grešku i za model bez greške, opterećen odgovarajućom silom. Faktor koncentracije napona u tabeli je prosto količnik napona u okolini greške i napona u modelu bez grešaka.

Tabela 8.1: Detaljni pregled faktora koncentracije napona za sve četiri grupe grešaka

	Greška	Naponi u okolini greške (MPa)	Naponi u modelu bez greške (MPa)	Faktor koncentracije napona
<b>Model prve grupe grešaka</b>	Nadvišenje	307.9	277.9	1.108
	Ivični zajed	422.9	253.8	1.667
	Neprovaren koren	461.2	183.6	2.512
<b>Model druge grupe grešaka</b>	Greška	Naponi u okolini greške	Naponi u modelu bez greške	Faktor koncentracije napona
	Ulegnuće metala šava	312.0	168.9	1.847
	Neprovaren koren	465.6	226.1	2.059
	--/--	--/--	--/--	--/--
<b>Model treće grupe grešaka</b>	Greška	Naponi u okolini greške	Naponi u modelu bez greške	Faktor koncentracije napona
	Ivični zajed	236.9	245.7	0.964
	Smaknuće (koren)	459.8	309.3	1.487
	Nadvišenje	268.3	291.0	0.929
<b>Model četvrte grupe grešaka</b>	Greška	Naponi u okolini greške	Naponi u modelu bez greške	Faktor koncentracije napona
	Ivični zajed	237.0	226.0	1.05
	Smaknuće (koren)	431.6	309.3	1.395
	Neprovaren koren	470.5	309.3	1.521

Na osnovu ove table se mogu izvući sledeći zaključci o uticaju različitih kombinacija grešaka na integritet zavarenog spoja u smislu faktora koncentracije napona:

- Nadvišenje je imalo zanemarljiv uticaj na vrednosti napona, što je i očekivano – uprkos činjenici da preveliko nadvišenje može dovesti do oštrog prelaza sa lica šava na osnovni metal/zonu uticaja toplote, ono i dalje pojačava poprečni, noseći presek epruvete i samim tim smanjuje napone.

- U slučaju prve grupe, prisustvo nadvišenja pravi razliku od oko 10%, što je zanemarljivo u poređenju sa ostalim greškama, kako u ovoj, tako i u drugim grupama. Kod modela sa smaknućem, nadvišenje čak i smanjuje napone, usled načina na koji se model deformiše. U ovim slučajevima se javljaju i određeni naponi u pravcu normalnom na osu epruvete, koji zapravo smanjuju ekvivalentni napon – usled geometrije zavarenog spoja koja je izazvala složenije naponsko stanje od očekivanog. Kao posledice, na određenim mestima su se javili i pritisni naponi, koji su smanjili ukupni napon (što je pozitivan uticaj u ovakvim slučajevima, jer su pritisni naponi uvek poželjniji od zateznih u konstrukcijama gde bi potencijalno mogle da se jave prsline).
- Ivični zajed je imao veoma različite faktore koncentracije napona, što je zavisilo od prisustva ili odsustva smaknuća – u slučaju bez smaknuća, naponi u ivičnom zajedu su dostigli kritične vrednosti i bili su skoro dva puta veći od napona u modelu bez grešaka. Sa druge strane, kod modela sa smaknućem, grupe 3 i 4, zajed je imao ili niže ili približno jednake napone kao i kod modela bez greške, čime je njegov uticaj na integritet značajno umanjen.
- Što se neprovarenog korena, on je očekivano imao veliki uticaj na koncentraciju napona, i pokazao najveći faktor od svih – u slučaju prve grupe epruveta on je iznosio 2.512, dok je i kod druge grupe napon na mestu neprovarenog korena bio duplo veći u odnosu na model bez greške. Ovo je i bilo očekivano, s obzirom da neprovaren koren značajno smanjuje noseći poprečni presek epruvete.
- Uticaj smaknuća je posmatran na prelazima sa zone uticaja toplote na metal šava sa korene strane, jer je tu bio najizraženiji negativan uticaj ove greške na geometriju i raspodelu napona u zavarenom spoju. Faktori koncentracije napona su bili oko 1.4-1.5 za ove grupe epruveta, što se može objasniti većim vrednostima napona u modelu bez greške na odgovarajućim lokacijama. Interesantan je uticaj smaknuća na ostale greške, koji se u neku ruku može smatrati i povoljnim – kao što se može videti na primeru nadvišenja i ivičnog zajedu u grupama 3 i 4, gde su mahom opale vrednosti napona na ovim lokacijama.
- Međutim, ovo ne znači da je smaknuće poželjno, jer i dalje ima veoma nepovoljan uticaj na koncentraciju napona sa donje, korene strane, uz vrednosti koje prelaze napone tečenja u ZUT-u, pa čak u nekim slučajevima i u metalu šava. U poređenju sa tim, naponi koje izaziva neprovaren koren u modelima bez nadvišenja nisu toliko opasni, jer su koncentrisani u jačem materijalu, metalu šava. Kod smaknuća, ekstremne vrednosti su dobijene i na liniji stapanja i u ZUT-u, što predstavlja ozbiljan problem.

Iz gore pomenute analize naponskih stanja i faktora koncentracije napona u modelima sa i bez grešaka, može se videti koliko uticaja prisustvo grešaka zapravo ima – u situaciji gde grešaka nema je daleko jednostavnije odrediti koje su najkritičnije oblasti (one gde je faktor koncentracije napona najveći). Kod različitih kombinacija grešaka situacija uopšte nije tako „crno-bela“, već treba uzeti u obzir nekoliko faktora zahvaljujući kojima i manje vrednosti faktora koncentracije napona mogu biti daleko nepovoljnije po integritet zavarenog spoja, pa čak i u slučajevima kada određene greške umanjuju uticaj drugih (kao što je pokazano za slučaj smaknuća). Analiza faktora koncentracije napona za sva četiri slučaja je, dakle, potvrdila da su kombinacije grešaka sa smaknućem najgore po integritet zavarenog spoja, pri čemu je 4 grupa najekstremniji slučaj, pošto ima dve kritične lokacije gde naponi dostižu jako velike vrednosti, dovoljne da zavareni spoj pređe u oblast plastične deformacije. Sa druge strane, grupa 1, sa nadvišenjem, se definitivno pokazalo kao manje opasna u poređenju sa grupom 2 (ulegnuće lica šava). U slučaju grupa 3 i 4, nadvišenje je čak rezultiralo u nižim naponima (zbog čega nije ni uzeto u obzir u tabeli za grupu 4, pošto je bila skoro ista situacija kao u trećoj).

U narednom delu analize rezultata biće prikazano poređenje modela sve 4 grupe sa prsline, pri čemu je prsline u svakom modelu inicirana na mestu gde se stvarno javila u eksperimentima. U svrhu što tačnijeg određivanja ovih lokacija i trenutaka inicijacije je ponovo



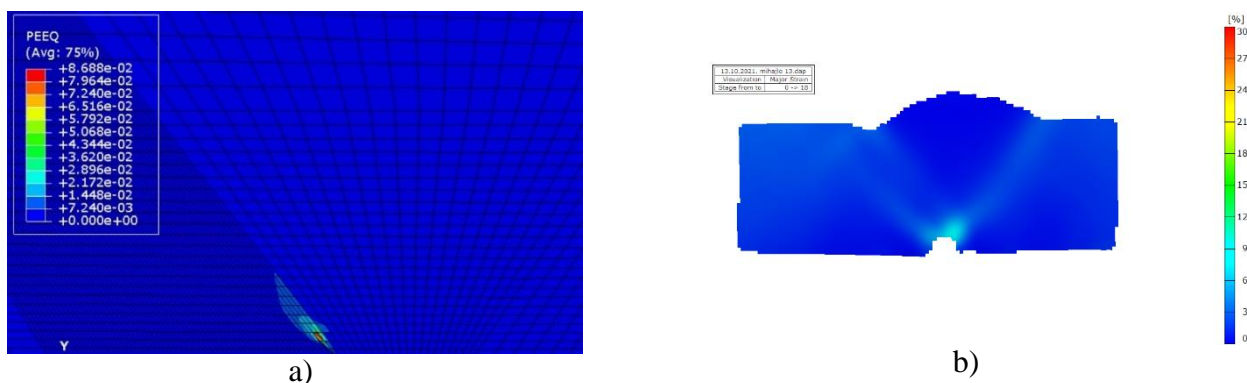
urađeno poređenje sa odgovarajućim fazama ispitivanja metodom digitalne korelacije slika. Cilj je bio da se dobije što približnije ponašanje između numeričkih modela i realnih epruveta. Ovaj deo analize je inspirisan prethodnom analizom loma epruveta, gde je primećeno neobično ponašanje prsline u slučaju jedne od grupa, kao što je opisano u prethodnim poglavljima.

Modeli koji su korišćeni za ovu fazu numeričke analize predstavljaju u određenoj meri izmenjene modele koji su korišćeni za simuliranje ponašanja epruvete sa detaljnim ZUTom, pri čemu su se izmene sastojale u:

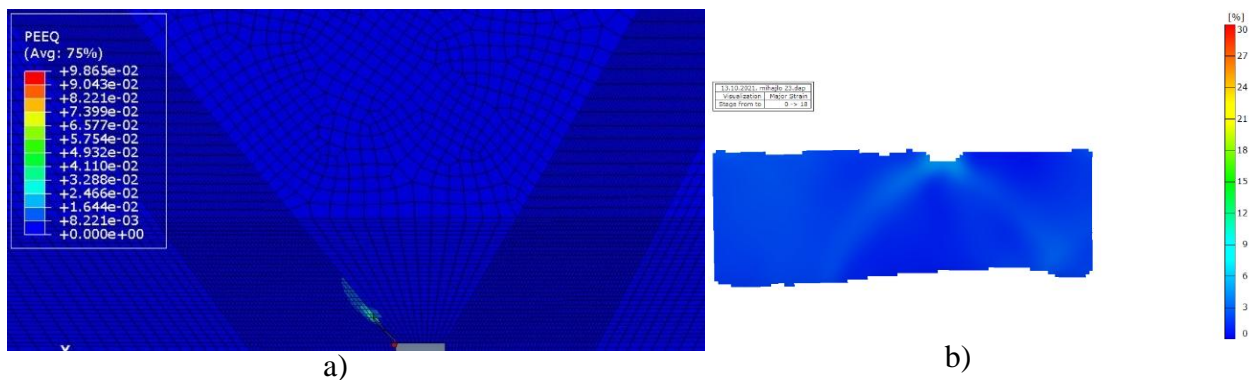
- Ubacivanja prsline na mestu gde je krenula prsline i u realnim uslovima, pri čemu je početna dužina prsline usvojena za svaki model na osnovu odgovarajuće faze DIC-a, ili snimka ispitivanja zatezanjem, u zavisnosti koji je od ta dva rezultata imao merodavniji uticaj (s obzirom da je DIC vezan za ravnomerne vremenske intervale, što je otežalo određivanje tačnog trenutka eksperimenta kada je prsline inicirana).
- Dodatno usitnjavanje mreže u okolini prsline kako bi se dobili precizniji rezultati, što je dovelo do potrebe za većim brojem iteracije, dok nije dobijeno ponašanje koje bi dovoljno dobro odgovaralo stvarnoj situaciji, pre svega u pogledu raspodele i veličine deformacija u kritičnim oblastima.

Krajnji cilj je bio da se odrede naponi koji se javljaju oko vrha prsline, u trenutku koji bi odgovarao njenom iniciranju u epruveti, za koje se očekivalo da budu bliski vrednosti zateznih čvrstoća zone uticaja toplote. Drugim rečima, određeno je stanje deformacija koje odgovara realnosti, i na osnovu tih deformacija su izračunati odgovarajući naponi. Treba napomenuti da je u svim slučajevima sam rast prsline bio zanemarljiv, pošto je cilj bio da se simulira trenutak kad ona nastaje tokom eksperimenta, odnosno rezultati koji bi pokazali primetan rast prsline ne bi bili merodavni, jer bi se odnosili na kasniju fazu ispitivanja zatezanjem/DIC-a.

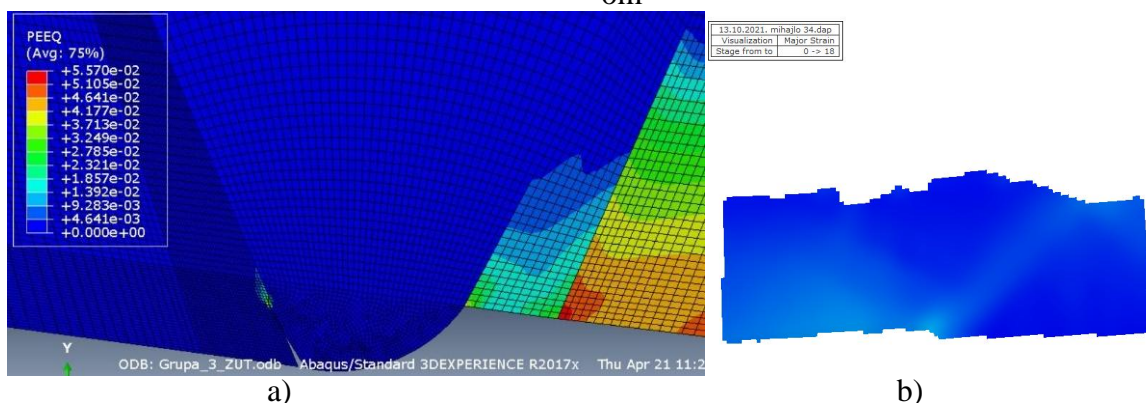
Rezultati numeričkih simulacija i njihovo poređenje sa odgovarajućim fazama DIC-a su prikazani na slikama 8.17 – 8.20. Slike 8.21 – 8.24 su prikazana i naponska stanja za svaki od četiri slučaja, gde se mogu videti maksimalne vrednosti napona u okolini vrha prsline.



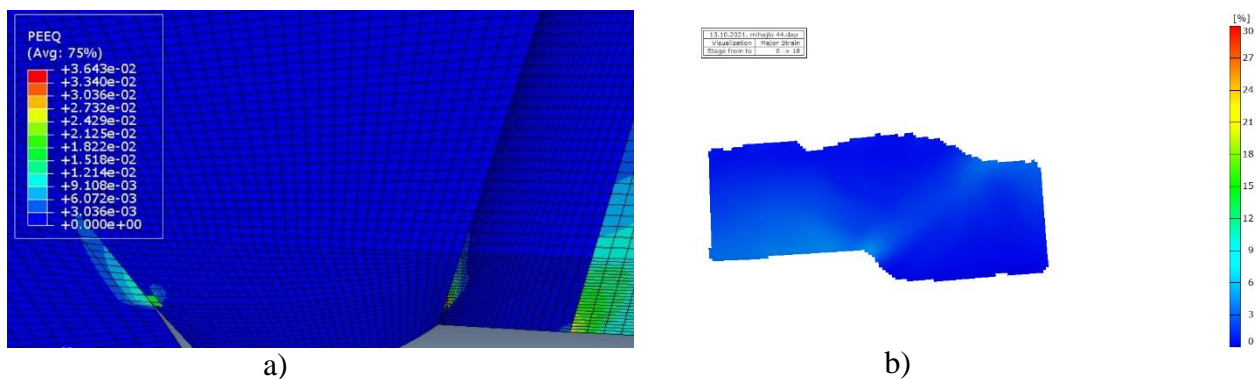
Slika 8.17: Poređenje deformacija grupe 1 – a) numerički rezultati; b) rezultati dobijeni DIC-om



Slika 8.18: Poređenje deformacija grupe 2 – a) numerički rezultati; b) rezultati dobijeni DIC-om

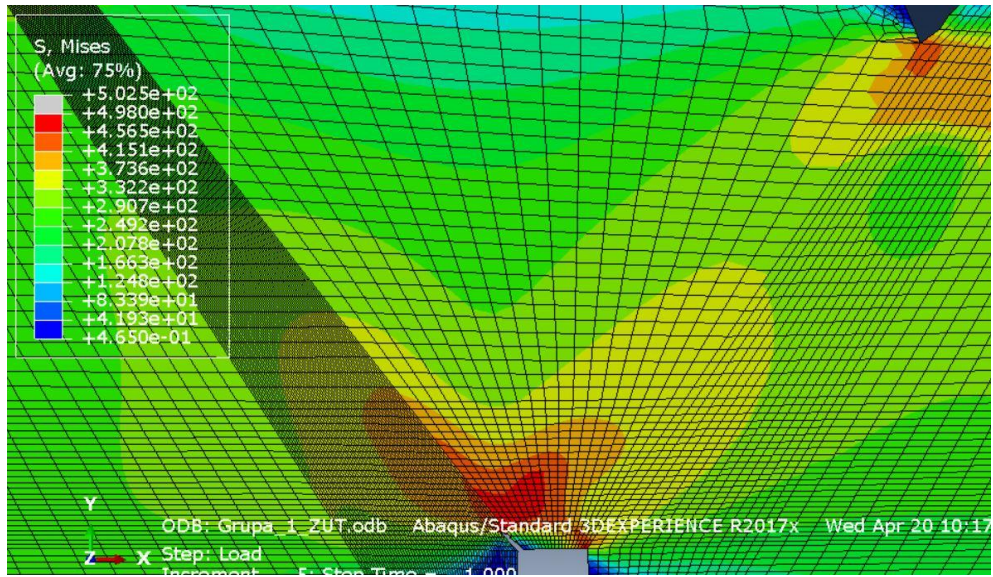


Slika 8.19: Poređenje deformacija grupe 3 – a) numerički rezultati; b) rezultati dobijeni DIC-om

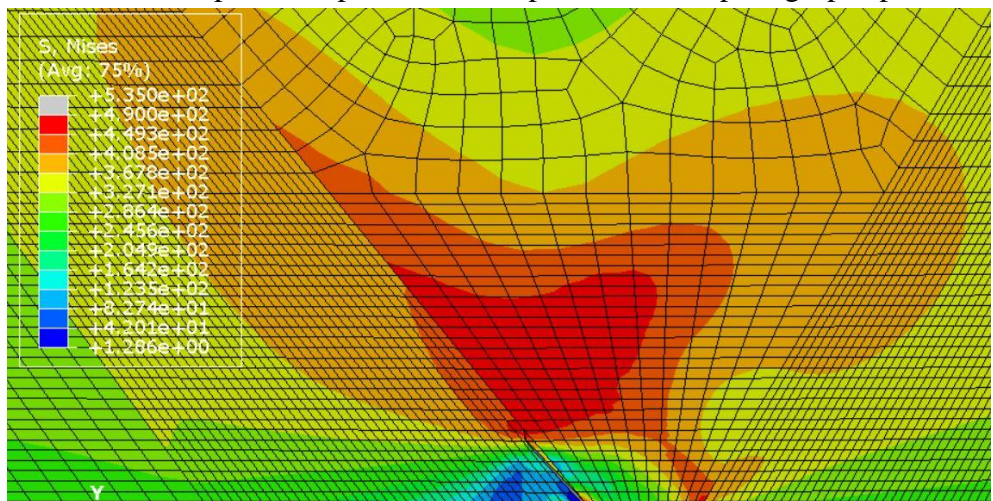


Slika 8.20: Poređenje deformacija grupe 4 – a) numerički rezultati; b) rezultati dobijeni DIC-om

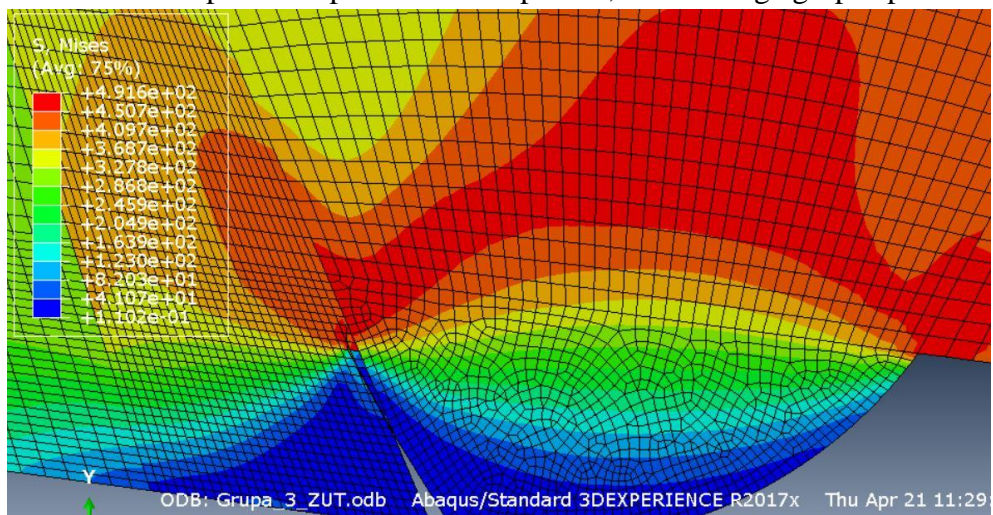
Na osnovu poređenja numeričkih rezultata za deformacije sa vrednostima izmerenim primenom DIC-a se može videti da je postignuto dovoljno približno slaganje, pri čemu je ono bilo izraženije kod modela bez nadvišenja (prva i druga grupa). Kod treće i četvrte grupe su dobijene manje deformacije pri numeričkoj simulaciji, pri čemu su te vrednosti odgovarale trenutku iniciranja prsline. U sva četiri slučaja je opterećenje definisano sa ciljem da prikaže upravo ovaj trenutak, i vrednosti su bile slične za sve modele – uvek su imale vrednosti bliske naponima tečenja (280-300 MPa) pri čemu treba imati na umu da ovo nisu vrednosti napona u kritičnim oblastima zavarenog spoja, već naponi koji odgovaraju zateznoj sili. Nakon velikog broja iteracija, pre svega zarad dobrog definisanja mreže konačnih elemenata, dobijene su vrednosti deformacija koje se mogu videti na gorepomenutim slikama. Budući da su pokazali prihvatljivo slaganje sa realnim deformacijama, ovi modeli su usvojeni kao merodavno za ocenu vrednosti napona u vrhu novonastale prsline.



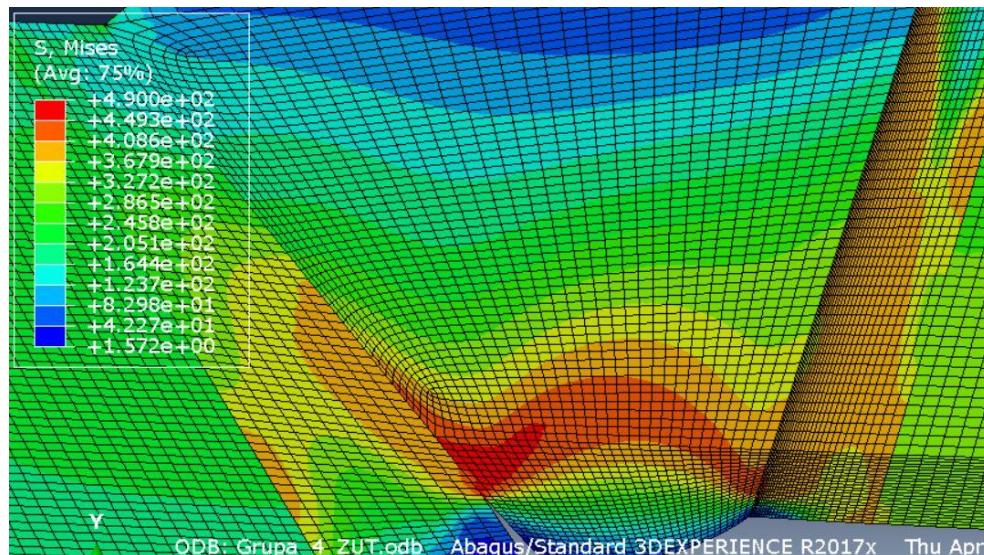
Slika 8.21: Raspodela napona oko vrha prsline, model prve grupe epruveta



Slika 8.22: Raspodela napona oko vrha prsline, model druge grupe epruveta



Slika 8.23: Raspodela napona oko vrha prsline, model treće grupe epruveta



Slika 8.24: Raspodela napona oko vrha prsline, model četvrte grupe epruveta

Na nekim od prikazanih slika (npr. za treću grupu) se može videti da je prslina krenula da raste, što znači da prikazana raspodela napona odgovara trenutku nakon njene inicijacije, koji se pri eksperimentu javljao između 18-tog i 22-gog koraka, u zavisnosti od grupe epruveta. Vrednosti napona pri kojima se prslina javljala, odnosno krenula da raste su bile između 470 MPa (četvrta grupa) i 500 MPa (prva i druga grupa). Ove vrednosti su nešto niže od zateznih napona definisanih u oblasti kroz koju je prslina rasla, odnosno zonu uticaja toplote, u blizini linije stapanja. Ovo potvrđuje da simulacije u velikoj meri odgovaraju realnom stanju u epruvetama tokom početka loma, pri čemu se na osnovu vrednosti nešto nižih od zatezne čvrstoće odogovarajuće oblasti može reći da su numeričke simulacije na strani sigurnosti.

Naravno, rezultate ove faze numeričkih simulacija ipak treba uzeti sa određenom rezervom, budući da su zasnovani na procenama koje nisu uvek bile adekvatno precizne. U nekim slučajevima nije bilo moguće tačno odrediti trenutak kada prslina nastaje u epruveti, zbog čega je usvojena približna početna dužina prsline, na osnovu snimaka/rezultata neposredno pre i posle trenutka inicijacije. Ovakav pristup je recimo primenjen kod treće grupe epruveta, kod kojih se javio praktičan problem pri analiziranju snimaka loma – epruveta se usled svojih grešaka toliko iskrivila tokom zatezanja da je „pobegla“ iz kadra, i trenutak početka loma, odnosno nastajanja prslin se zapravo ne vidi. Stoga je model definisan na osnovu odogovarajućih slika dobijenih DIC-om.

Još jedno ograničenje u vezi definisanja početnih uslova za modele se ogledalo u intervalima u kojima su pravljene slike tokom eksperimenta. Ovo je predstavljalo manji problem kod druge grupe epruveta, gde se na slikama mogu videti trenutci u 22. i 24. sekundi, ali je za nastajanje prsline merodavan 23. sekund, jer pre toga je prslina previše kratka da bi napravila ikakvu razliku, a nakon toga je već primetno porasla – stoga je kao početna dužina usvojena srednja vrednost između koraka 22 i 24.

Detaljnija analiza raspodele napona i deformacija u okolini vrha prsline pri njenoj inicijaciji bi zahtevala dosta temeljniji i detaljniji pristup snimanju samog eksperimenta, kako bi se odogovarajuć trenutak mogao preciznije odrediti. Ovo ostaje kao jedan od potencijalnih pravaca u kojima bi buduće istraživanje ponašanja zavarenih spojeva sa kombinacijama grešaka moglo da krene. Stoga ove rezultate treba pre svega posmatrati kao osnovu za dalji rad.

## 9. Zaključak

Glavni cilj ovog istraživanja bio je utvrđivanje kombinacije realnih grešaka koji predstavljaju potencijalno najveću opasnost po integritet zavarenih spojeva i konstrukcija. Analiziran je uticaj višestrukih grešaka u zavarenom spoju čelika S275JR na integritet zavarene konstrukcije. U tu svrhu su formirani numerički proračunski modeli kao i fizički modeli epruveta, koji su bili ispitivani jednoosnim zatezanjem, dok su deformacije zona zavarenog spoja merene beskontaktnom optičkom metodom. Osnovna ideja je bila da se predvidi ponašanje zavarenih spojeva u radnim uslovima u prisustvu višestrukih površinskih grešaka numeričko-eksperimentalnim pristupom. Utvrđen je napon pri kojem dolazi do pojave prve prsline u zavarenim spojevima sa određenom kombinacijom grešaka. Kao jedan od rezultata ovog ispitivanja određene su karakteristike materijala svih zona zavarenog spoja.

Analiza rezultata jednoosnim zatezanjem, merenja tvrdoća i mikrostruktura kao i rezultati numeričkih simulacija sa čelikom S275JR upoređivanjem različitih metoda analize ponašanja epruveta u prisustvu višestrukih grešaka.

Na osnovu svih prikazanih analiza i njihovih rezultata mogu se izvući sledeći zaključci:

- Formulirana je metodologija ispitivanja zavarenih spojeva sa višestrukim greškama.
- Razvijeni su numeričko-eksperimentalni modeli za ispitivanje zavarenih spojeva sa višestrukim greškama.
- Određene su vrednosti napona pri kojem dolazi do pojave prsline u zavarenom spoju sa višestrukim greškama.
- Pouzdano je utvrđeno koja je najopasnija kombinacija grešaka u zavarenom spoju – kombinacija smaknuća i neprovarenog korena, tj. četvrta grupa grešaka.
- Utvrdene su mehaničke karakteristike zona uticaja toplote numeričko-eksperimentalnim pristupom iterativnim

Različite kombinacije grešaka imaju veoma veliki uticaj na integritet zavarenog spoja, pri čemu su kombinacije sa smaknućem ploča najkritičnije, takođe od velikog značaja je bila i sama priroda ovih kombinacija – smaknuće je kod nekih modela “preraspodelilo” maksimalne vrednosti napona/deformacija u sasvim drugom delu preseka zavarenog spoja u odnosu na nesmaknute modele. Usled primetnog “overmečinga” zavarenog spoja, lomovi su u svim slučajevima kretali iz grešaka u zoni uticaja toplote (pre svega na ili blizu linije stapanja).

Glavni doprinos ovog obimnog istraživanja ogleda se u definisanju i izradi metodologije za pouzdanu ocenu ponašanja zavarenih spojeva u prisustvu više različitih grešaka, budući da ovaj problem dosada nije bio razmatran, čak ni u relevantnim standardima. Pokazano je da primena nekoliko različitih metoda (eksperimentalna, stereometrijska i numerička) daje jako dobre rezultate u pogledu napona i deformacija, i da je moguće precizno simulirati ponašanje realnih modela, uz dobro poklapanje između eksperimenata, DIC-a i numeričke analize. Pri tome je tokom razvoja ove metodologije uočen i veliki broj realnih problema koji se mogu javiti u fazi izrade kako epruveta, tako i numeričkih modela. Iz toga se može videti još jedan doprinos ovog pristupa – rešavanje svih poteškoća na koje se naišlo tokom razvoja same metode. Primena ove metode može imati i značajnu ulogu u praksi, u smislu olakšavanja kontrole kvaliteta i ocene integriteta zavarenih spojeva. Takođe, uvid u detaljno ponašanje zavarenih spojeva za različite kombinacije grešaka se može iskoristiti i za unapređenje tehnologije zavarivanja, kako bi se najopasnije kombinacije grešaka svele na minimum.

Ovim istraživanjima otvorena su mnoga pitanja koja je potrebno dodatno ispitati budućim istraživanjima, tačnije dobijene rezultate ove disertacije treba pre svega posmatrati kao osnovu za dalji rad, kao što je:

- Ponašanje zavarenih spojeva u prisustvu višestrukih grešaka pri zamornom opterećenju
- Istraživanje ovog fenomena na drugim materijalima, konkretno, visokolegiranih i mikrolegiranih čelika, gde bi same mikrostrukture imale mnogo veću ulogu. Ovime bi se i potvrdila metodologija razvijena u okviru ove doktorske disertacije.
- Ponašanje zavarenih spojeva u prisustvu zapreminskih grešaka, inspirisano uticajem nalepljivanja

## 10. Literatura

- [1] SRPS EN ISO 5817 Welding — Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded) — Quality levels for imperfections. 2015.
- [2] S. Sedmak, R. Jovičić, A. Sedmak, M. Arandžević, B. Đorđević, Influence of multiple defects in welded joints subjected to fatigue loading according to EN ISO 5817:2014. *Structural integrity and life*, 2018. 18(1): p. 77-81.
- [3] N. Milovanović, B. Đorđević, U. Tatić, S.A. Sedmak, S. Štrbački, Low-Temperature Corrosion Damage and Repair of Boiler Bottom Panel Tubes. *Structural Integrity and Life*, 2017. 17(2): p. 125-131.
- [4] N. Milovanović, B. Đorđević, A. Sedmak, D. Tanasković, Corrosion Damage and Repair Welding of Pressure Vessels, in *The 4th IIW South-East European Welding Congress*. 2018: Belgrade, Serbia.
- [5] D. Kozak, P. Konjatić, F. Matejiček, D. Damjanović, Weld misalignment influence on the structural integrity of cylindrical pressure vessel *Structural integrity and life*, 2010. 10(2): p. 153-159.
- [6] API Recommended Practice 579, American Petroleum Institute, March 2000. .
- [7] S. Sedmak, R. Jovičić, A. Sedmak, B. Đorđević, Ivica Čamagić, Numerical analysis of different weld geometries of lap welded joint in ammonia transport tanks. *Structural integrity and life*, 2017. 17(3): p. 217-220.
- [8] N. Milošević, A. Sedmak, R. Jovičić, Analysis of strain distribution in overmatching V groove weld using digital image correlation, in *Procedia Structural Integrity*. 2018, Elsevier: Belgrade. p. 1600 - 1604.
- [9] M. Milosevic, N. Milovanović, S. Sedmak, U. Tatic, N. Mitrovic, S. Hloch, and R. Jovicic, Digital image correlation in analysis of stiffness in local zones of welded joints. *Tehnički vjesnik*, 2016. 23(1): p. 19 - 24.
- [10] B. Younise, A. Sedmak, N. Milosević, M. Rakin, B. Medjo, True Stress-strain Curves for HSLA Steel Weldment – Iteration Procedure Based on DIC and FEM, in *Procedia Structural Integrity 2020*, Elsevier.
- [11] N. Milošević, A. Sedmak, I. Martić, R. Prokić-Cvetković, NOVEL PROCEDURE TO DETERMINE ACTUAL STRESS-STRAIN CURVES. *Integritet i vek konstrukcija*, 2021. 21(1): p. 37 - 40.
- [12] N. Milošević, A. Sedmak, G. Bakić 2, V. Lazić, M. Milošević, G. Mladenović, A. Maslarević, Determination of the Actual Stress–Strain Diagram for Undermatching Welded Joint Using DIC and FEM. *Materials*, 2021. 14: p. 1 - 14.
- [13] R. Jovičić, S. Sedmak, U. Tatić, U. Lukić, M. Walid, Stress state around imperfections in welded joints. *STRUCTURAL INTEGRITY AND LIFE*, 2015. 15(1): p. 27-29.
- [14] D. Kozak, D. Damjanović, M. Katanić, Integrity assessment of the butt weld joint with defect according to EN ISO 6520-1, series 400. *Structural integrity and life*, 2016. 16(2): p. 120-124.
- [15] I. Dimić, M. Arsić, B. Međo, A. Stefanović, V. Grabulov, M. Rakin Effect of welded joint imperfection on the integrity of pipe elbows subjected to internal pressure. *Tehnički vjesnik*, 2013. 20(2): p. 285-290.
- [16] J. Tušek, B. Bajcer, B. Taljat, M. Hrženjak, Analysis of lack of fusion in welds at water heaters. *Metalurgija*, 2007. 46(2): p. 111-116.
- [17] M.J. Ottersbock, M. Leitner, M. Stoschka, Characterisation of actual weld geometry and stress concentration of butt welds exhibiting local undercuts. *Engineering Structures*, 2021. 240.
- [18] M. Cerit, O. Kokumer, K. Genel, Stress concentration effects of undercut defect and reinforcement metal in butt welded joint. *Engineering Failure Analysis*, 2010. 17: p. 571 - 578.
- [19] W. Shen, Y. Qui, L. Xu, L. Song, Stress concentration effect of thin plate joints considering welding defects. *Ocean Engineering*, 2019. 184: p. 273 - 288.
- [20] D. Tomerlin, D. Kozak, N. Gubelj, D. Damjanović, Numerička analiza distorzija i zaostalih naprezanja pri zavarivanju kutnih spojeva S690QL limova, in *10. susret Hrvatskog društva za mehaniku*. 2020: Slavonski Brod.
- [21] Z. Odanović, V. Grabulov, M. Arsić, M. Djurdjević, B. Katavić, Selection of the optimal filler material for on-site repair welding of the turbine shaft at the hydropower plant. *Zavarivanje i zavarene konstrukcije*, 2011. 56(4): p. 149-166.

- [22] D. Tanasković, B. Đorđević, U. Tatić, S. Sedmak, M. Gajin, Cracking due to repair welding of the treiber roll. *Structural integrity and life*, 2017. 17(2): p. 133-138.
- [23] L. Jeremić, B. Đorđević, I. Šapić, S.A. Sedmak, N. Milovanović, Manufacturing and integrity of ammonia storage tanks. *Structural Integrity and Life*, 2020. 20(2): p. 123-129.
- [24] D. Tanasković, B. Đorđević, S. Sedmak, M. Arandelović, He effect of exploitation conditions on the damage of a roller reducer toothed shaft and its repair *Machine Design*, 2018. 10(4): p. 147 - 162.
- [25] SRPS EN ISO 3834: 2021- Quality requirements for fusion welding of metallic materials.
- [26] SRPS EN ISO 15607:2020 - Specification and qualification of welding procedures for metallic materials.
- [27] SRPS EN ISO 15609: 2015 - Specification and qualification of welding procedures for metallic materials — Welding procedure specification.
- [28] SRPS EN ISO 4063:2013 Welding and allied processes — Nomenclature of processes and reference numbers. 2013.
- [29] SRPS EN ISO 6947 :2020 - Welding and allied processes — Welding positions.
- [30] SRPS EN ISO 15614 Specification and qualification of welding procedures for metallic materials. 2020.
- [31] G. Bakić, Osnovni mehanizmi oštećenja mašinskih konstrukcija. 2021: Beograd: Mašinski Fakultet, Univerzitet u Beogradu.
- [32] A. Helsing, S. Pehle, M. Kusch, P. Mayr, Potential of error for arc welding processes - where can i make mistakes and how thez affect the component? *Zavarivanje i zavarene konstrukcije*, 2017. 61(1): p. 27-39.
- [33] M. Arandelović, N. Milovanović, B. Đorđević, S. Sedmak, I. Martić, Reparation, inspection and damage analysis of steam boiler. *Welding & Material Testing*, 2020. 3: p. 9-12.
- [34] D. Tanasković, M. Arandelović, B. Đorđević, L. Jeremić, S. Sedmak, M. Gajin, Repair attempts of cold crack on forklift made of C45 steel: Case study. *Welding & Material Testing*, 2020. 4: p. 25-28.
- [35] D. Tanasković, B. Đorđević, M. Arandelović, S. Sedmak, A. Sedmak, M. Đukić, U. Tatić, Repair Welding of Crane Wheels in Steelworks Smederevo, in 8th International Conference on Innovative Technologies for Joining Advanced Materials (TIMA 16). 2016: Timisoara, Romania. p. 180-185.
- [36] D. Tanasković, B. Đorđević, M. Gajin, M. Arandelović, N. Gostović, Damages of burner pipes due to the working conditions and its repair welding, in ECF22 - Loading and Environmental effects on Structural Integrity. 2018: Belgrade, Serbia. p. 404-409.
- [37] D.Q.Q.Wanga, D.D.Yao, Z.B.Gao, Q.Wang, Z.F.Zhang, X.W.Li, Fatigue mechanism of medium-carbon steel welded joint: Competitive impacts of various defects. *International Journal of Fatigue*, 2021. 151: p. 1 - 11.
- [38] SRPS EN ISO 6520-1 Welding and allied processes — Classification of geometric imperfections in metallic materials — Part 1: Fusion welding. 2013.
- [39] A. Hobbacher, M. Kassner., On Relation Between Fatigue Properties Of Welded Joints, Quality Criteria and Groups in Iso 5817. *Welding in the World*, 2012. 56: p. 153–169
- [40] Bertil Jonsson, G. Dobmann., A. F. Hobbache, M. Kassner, G. Marquis, Weld Quality Levels for Fatigue Loaded Structures. *IIW Guidelines on Weld Quality in Relationship to Fatigue Strength* 2016.
- [41] J.R. Deepak, K. Bupesh Raja, D. Srikant, H. Surendran, M.M. Nickolas, Non-destructive testing (NDT) techniques for low carbon steel welded joints: A review and experimental study, in *Materials Today*. p. 3732-3737.
- [42] R. Jovičić, Ocena eksploatacijske sigurnosti posuda pod pritiskom sa prslinom u zavarenom spoju, in *Eksperimentalne i numeričke metode mehanike loma u ocenu integriteta konstrukcija (Monografija sa Sedme međunarodne letnje škole mehanike loma u Velikoj Plani, 1997)*. 2000, TMF i Goša Institut: Beograd. p. 157-170.
- [43] R. Jovičić, R. Prokić-Cvetković, O. Popović, Non-destructive testing of ferritic-austenitic welded joints. *Integritet i Vek Konstrukcija*, 2005. 5(3): p. 119-128.
- [44] SRPS EN ISO 17637:2017 Ispitivanje bez razaranja zavarenih spojeva – Vizuelno ispitivanje spojeva zavarenih topljenjem. 2017.
- [45] SRPS EN ISO 5579:2014 Non-destructive testing — Radiographic testing of metallic materials using film and X- or gamma rays — Basic rules. 2017.
- [46] SRPS EN ISO 17636 Non-destructive testing of welds - Radiographic testing. 2014.

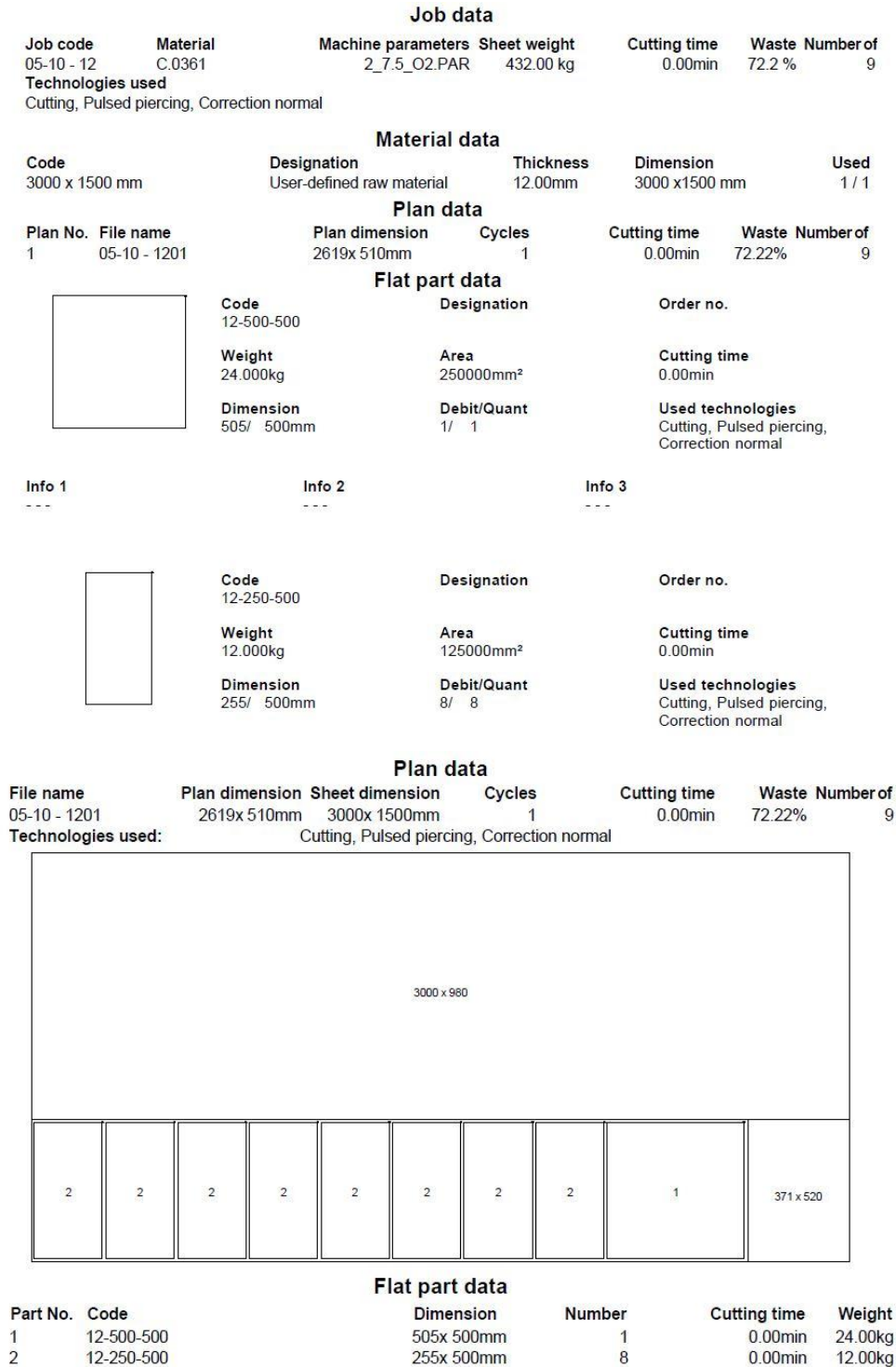


- [47] SRPS EN ISO 10675 Non-destructive testing of welds — Acceptance levels for radiographic testing. 2017.
- [48] SRPS EN ISO 4136:2013 Destructive tests on welds in metallic materials — Transverse tensile test. 2013.
- [49] SRPS EN ISO 6892-1:2020 Metallic materials — Tensile testing — Part 1: Method of test at room temperature. 2020.
- [50] SRPS EN ISO 9015-1:2013 Destructive tests on welds in metallic materials — Hardness testing — Part 1: Hardness test on arc welded joints. 2013.
- [51] H.J.K. Lemmen, R.C. Alderliesten., R. Benedictus, J.C.J. Hofstede, R. Rodi The power of Digital Image Correlation for detailed elastic-plastic strain measurements in WSEAS International Conference on ENGINEERING MECHANICS, STRUCTURES, ENGINEERING GEOLOGY. 2008: Heraklion, Crete Island, Greece.
- [52] Tung, S.-H, C.-H. Sui, Application of digital-image-correlation techniques in analysing cracked cylindrical pipes. *Sadhana*, 2010. 35(5): p. 557-567.
- [53] N. Milošević, Primena stereometrijske metode merenja deformacije na određivanje dijagrama stvarni napon – stvarna deformacija heterogenih zavarenih spojeva. 2021.
- [54] N. Gubeljak, Application of stereometric measurement on structural integrity. *Structural Integrity and Life*, 2006. 6(1-2): p. 65-74.
- [55] A. Petrović, Modelsko ispitivanje čvrstoće struktura složene prostorne geometrije. 2017.
- [56] C. Sebastian , E.A. Patterson, Calibration of a Digital Image Correlation System. *Experimental Techniques*, 2015. 39(11127-1135).
- [57] D. Dubois , H. Zellmer, E. Markiewicz , Experimental and numerical analysis of seat belt bunching phenomenon. *International Journal of Impact Engineering*, 2009. 36(6): p. 763-774.
- [58] B. Đorđević, U. Tatić, S. Sedmak , M. Milošević, A. Sedmak , Digital image correlation technique application on welded joint - advantages and disadvantages, in *International scientific conference on advances in mechanical engineering*. 2016: Debrecen, Hungary. p. 145 - 150.
- [59] SSAB-Armox-Workshop-recommendations.
- [60] T. Maneski, Kompjutersko modeliranje i proračunavanje struktura. 1998.
- [61] S. Sedmak, Procena integriteta i veka zavarenih spojeva mikrolegiranih čelika povišene čvrstoće pri dejstvu statičkog i dinamičkog opterećenja. 2019, Univerzitet u Beogradu: Beograd.
- [62] S. Sedmak, R. Jovičić, A. Sedmak, B. Đorđević, I. Čamagić, Numerical analysis of different weld geometries of lap welded joint in ammonia transport tanks. *Structural integrity and life*, 2017. 17(3): p. 217–220.
- [63] S. Sedmak, Z. Burzić, S. Perković, R. Jovičić, M. Arandelović, Lj. Radović, N. Ilić, Influence of welded joint microstructures on fatigue behaviour of specimens with a notch in the heat affected zone. *Engineering Failure Analysis*, 2019. 106: p. 104162.
- [64] SRPS EN 10025 Hot rolled products of structural steels. 2020.
- [65] Elektrode-Jasenice, Dodatni materijal za zavarivanje. 2010.
- [66] A.C. Davies., *The Science and Practice of Welding*. 1993: Cambridge University Press.
- [67] A. Sedmak, A. Hemer, S. Sedmak, Lj. Milović, A. Grbović, A. Čabrilo, M. Kljajin, Welded joint geometry effect on fatigue crack growth resistance in different metallic materials, *International Journal of Fatigue*, Vol. 106298.
- [68] L. Beara., Utjecaj parametara zavarivanja na svojsktva zavara mikrolegiranih čelika izvedenih elektrolučnim zavarivanjem pod zaštitom CO S2. 1988.
- [69] R. Jovičić, R. Prokić-Cvetković, Olivera Popović, Nenad Milošević, Methods for calculating the preheat temperature welding the high strength steels *Zavarivanje i zavarene konstrukcije*, 2016(3): p. 113-119.
- [70] A. Manai, R. Ulrich., F. von Bock und Polach, M. Al-Emrani, A probabilistic study of welding residual stresses distribution and their contribution to the fatigue life. *Engineering Failure Analysis*, 2020. 118.
- [71] M. Arandelović, S. Sedmak, R. Jovičić, A. Sedmak, Z. Radaković, Finite element analysis of effects of multiple defects on welded joint integrity, in *8th International congress of Serbian society of Mechanics*. 2021: Kragujevac, Serbia. p. 172 - 173
- [72] M. Arandelović, S. Sedmak, R. Jovičić, D. Kozak, B. Đorđević. Numerical simulation of crack growth in a welded joint with defects, *Procedia Structural Integrity*. in *Procedia Structural Integrity*. 2021.

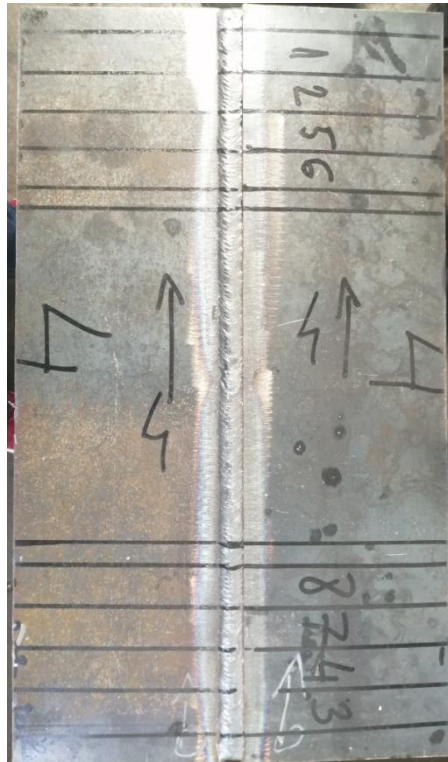
- [73] M. Arandelović, S. Sedmak, R. Jovičić, S. Perković, Z. Burzić, B. Đorđević, Z. Radaković, Numerical simulation of welded joint with multiple various defects. *Structural integrity and life*, 2021. 21(1): p. 103-107.
- [74] M. Arandelović, S. Sedmak, R. Jovičić, S. Perković, Z. Burzić, D. Radu, Z. Radaković, Numerical and Experimental Investigations of Fracture Behaviour of Welded Joints with Multiple Defects. *Materials*, 2021. 14(17): p. 4832.

# 11. Dodatak disertaciji

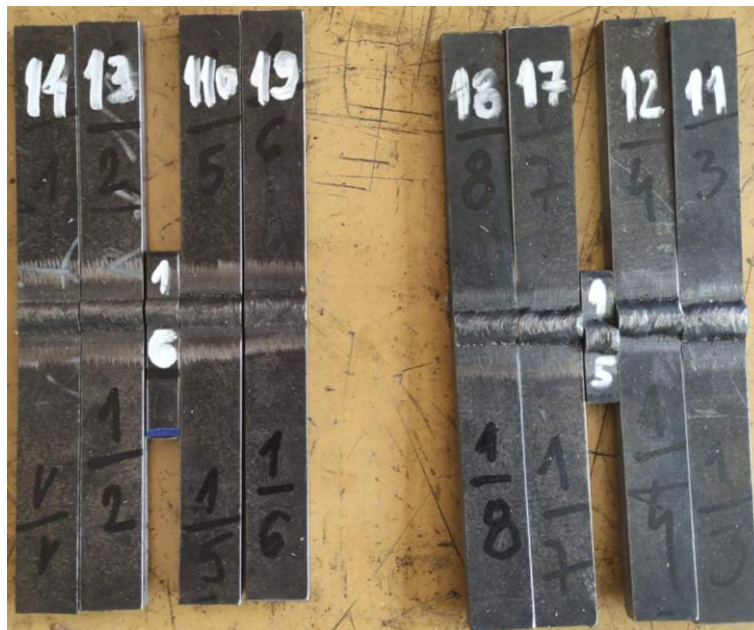
## Dodatak 1 – Plan rezanja ploča



Slika 11.1 - Plan rezanja ploča čelika S275JR



Slika 11.2: Radionički plan sečenja epruveta na zavarenoj ploči



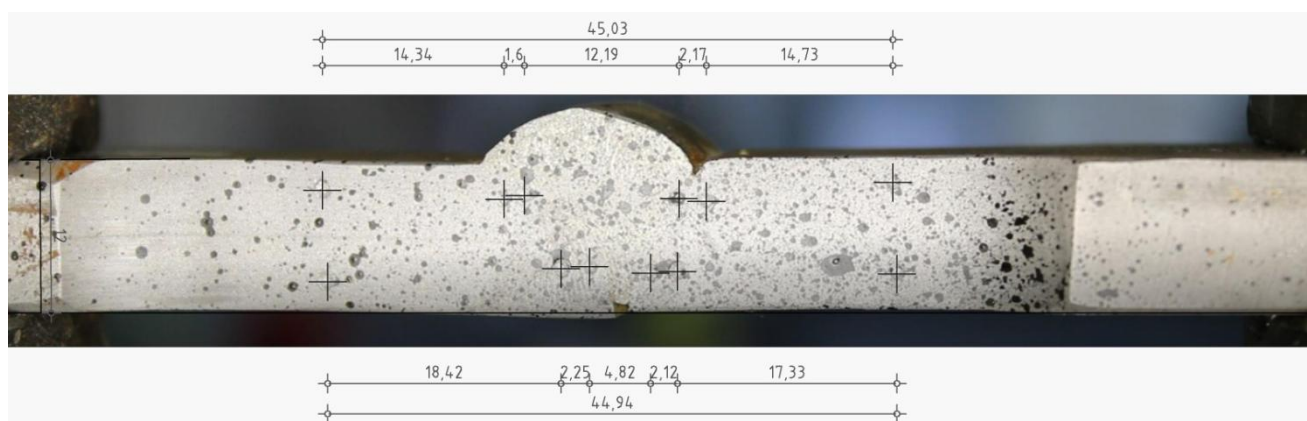
Slika 11.3: Mašinski isečene epruvete iz zavarene ploče

## Dodatak 2 – Metodologija merenja pomeranja na epruvetama za jednoosno zatezanje (epruvete 1.2, 2.1, 2.2, 3.1, 3.2,4.1, 4.2, 5.1, 5.2)

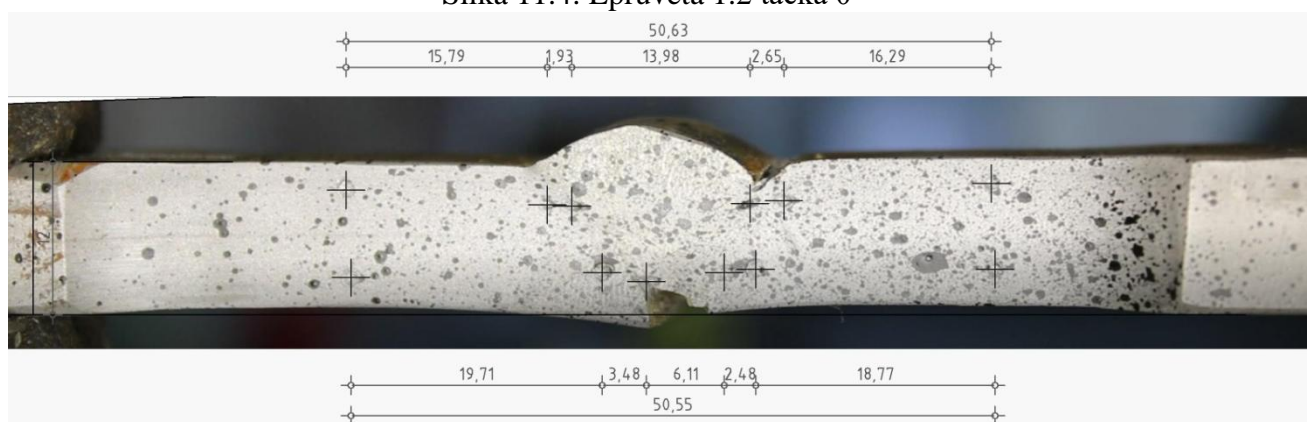
### Epruveta 1.2

Tabela 11.1:

Epruveta 1.2			
Tačke	Napon [MPa]	Deformacija [%]	Vreme [s]
0	/	/	2
1	290	0.7	7
2	321	1	9
3	357	2	15
4	386	3	21
5	405	4	26
6	419	5	32
7	428	6	38
8	432	7	44
9	417	8	50
10	380	9	55



Slika 11.4: Epruveta 1.2 tačka 0



Slika 11.5: Epruveta 1.2 tačka 10

Tabela 11.2: Epruveta 1.2 rastojanja između mernih tačaka gornji pojas (lice šava)

Epruveta 1.2 rastojanja između mernih tačaka gornji pojas ( lice šava) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	14,34	1,6	12,19	2,17	14,73
1	14,44	1,6	12,05	2,27	14,66
2	14,36	1,72	12,12	2,39	14,73
3	14,61	1,74	12,31	2,28	15,12
4	15,05	1,72	12,57	2,27	15,45
5	15,04	1,8	12,62	2,29	15,6
6	15,08	1,88	12,67	2,45	15,68
7	15,35	1,73	12,99	2,48	15,94
8	15,6	1,87	13,4	2,57	16,24
9	15,79	1,93	13,98	2,65	16,29
10	/	/	/	/	/

Tabela 11.3: Epruveta 1.2 rastojanja između mernih tačaka donji pojas (koren)

Epruveta 1.2 rastojanja između mernih tačaka donji pojas (koren) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	18,42	2,25	4,82	2,12	17,33
1	18,55	2,25	4,72	2,23	17,21
2	18,6	2,35	4,75	2,22	17,38
3	18,68	2,41	4,85	2,28	17,65
4	19,23	2,4	5,2	2,72	17,99
5	19,23	2,58	5,26	2,21	18,07
6	19,15	2,88	5,15	2,36	18,22
7	19,33	2,96	5,38	2,28	18,47
8	19,61	3,02	5,84	2,27	18,86
9	19,71	3,48	6,11	2,48	18,77
10	/	/	/	/	/

Tabela 11.4: Epruveta 1.2 pomeranja između mernih tačaka gornji pojas (lice šava)

Epruveta 1.2 pomeranja između mernih tačaka gornji pojas ( lice šava) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	/	/	/	/	/
1	0,1	0	-0,14	0,1	-0,07
2	0,02	0,12	-0,07	0,22	0
3	0,27	0,14	0,12	0,11	0,39
4	0,71	0,12	0,38	0,1	0,72
5	0,7	0,2	0,43	0,12	0,87
6	0,74	0,28	0,48	0,28	0,95
7	1,01	0,13	0,8	0,21	1,21
8	1,26	0,27	1,21	0,4	1,51
9	1,45	0,33	1,79	0,48	1,56
10	/	/	/	/	/

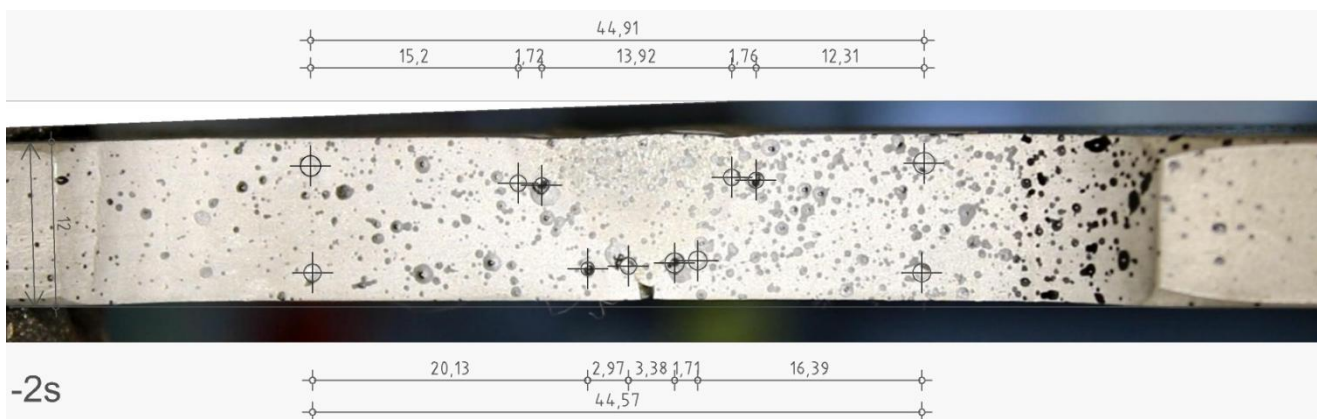
Tabela 11.5: Epruveta 1.2 pomeraja između mernih tačaka donji pojas (koren)

Tabela: Epruveta 1.2 pomeraja između mernih tačaka donji pojas (koren) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	/	/	/	/	/
1	0,13	0	-0,1	0,11	-0,12
2	0,18	0,1	-0,07	0,1	0,05
3	0,26	0,16	0,03	0,16	0,32
4	0,81	0,15	0,38	0,6	0,66
5	0,81	0,33	0,44	0,09	0,74
6	0,73	0,63	0,33	0,24	0,89
7	0,91	0,71	0,56	0,16	1,14
8	1,19	0,77	1,02	0,15	1,53
9	1,29	1,23	1,29	0,36	1,44
10	/	/	/	/	/

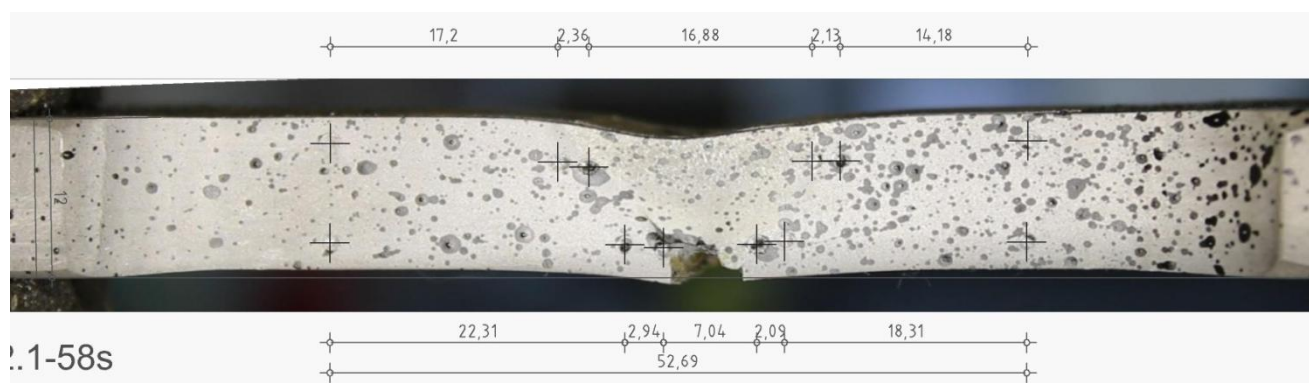
**Epruveta 2.1**

Tabela 11.6:

Epruveta 2.1			
Tačke	Napon [MPa]	Deformacija [%]	Vreme [s]
0	/	/	2
1	280	0.7	6
2	328	2	11
3	378	4	21
4	406	6	30
5	420	8	40
6	427	10	49
7	343	12	58



Slika 11.6: Epruveta 2.1 tačka 0



Slika 11.7: Epruveta 2.1 tačka 7

Tabela 11.7: Epruveta 2.1 rastojanja između mernih tačaka gornji pojas (lice šava)

Epruveta 2.1 rastojanja između mernih tačaka gornji pojas (lice šava) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	15,2	1,72	13,96	1,76	12,31
1	15,42	1,79	14,24	1,83	12,55
2	15,61	1,86	14,25	1,97	12,71
3	15,92	1,92	14,45	1,96	12,96
4	16,28	1,95	14,86	1,9	13,26
5	16,68	2,05	15,2	1,99	13,64
6	17,22	2,14	15,7	2,01	14,05
7	17,2	2,36	16,88	2,13	14,18

Tabela 11.8: Epruveta 2.1 rastojanja između mernih tačaka donji pojas (koren)

Epruveta 2.1 rastojanja između mernih tačaka donji pojas (koren) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	20,13	2,97	3,28	1,71	16,39
1	20,53	3	3,46	1,92	16,65
2	20,69	3,02	3,63	1,88	16,91
3	21,07	3,09	3,74	2	17,13
4	21,33	3,02	4,24	1,96	17,45
5	21,7	2,92	4,77	1,99	17,86
6	22,21	2,91	5,41	2,03	18,23
7	22,31	2,94	7,04	2,09	18,31

Tabela 11.9: Epruveta 2.1 pomeranja između mernih tačaka gornji pojas (lice šava)

Epruveta 2.1 pomeranja između mernih tačaka gornji pojas (lice šava) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	/	/	/	/	/
1	0,22	0,07	0,28	0,07	0,24
2	0,41	0,14	0,29	0,21	0,4
3	0,72	0,2	0,49	0,2	0,65
4	1,08	0,23	0,9	0,14	0,95
5	1,48	0,33	1,24	0,23	1,33
6	2,02	0,42	1,74	0,25	1,74
7	2	0,64	2,92	0,37	1,87



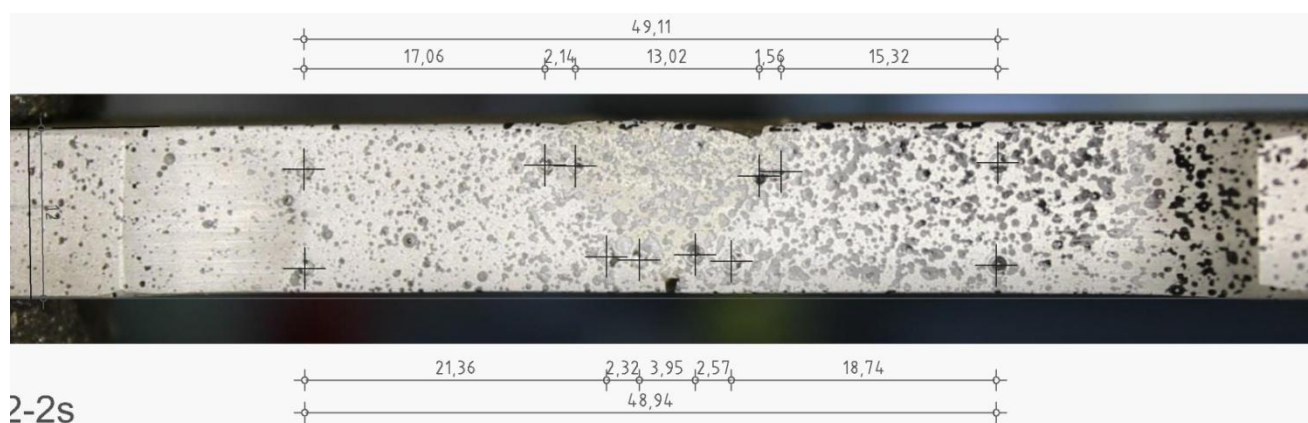
Tabela 11.10: Epruveta 2.1 pomeraja između mernih tačaka donji pojas (koren)

Epruveta 2.1 pomeraja između mernih tačaka donji pojas (koren) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	/	/	/	/	/
1	0,4	0,03	0,18	0,21	0,26
2	0,56	0,05	0,35	0,17	0,52
3	0,94	0,12	0,46	0,29	0,74
4	1,2	0,05	0,96	0,25	1,06
5	1,57	-0,05	1,49	0,28	1,47
6	2,08	-0,06	2,13	0,32	1,84
7	2,18	-0,03	3,76	0,38	1,92

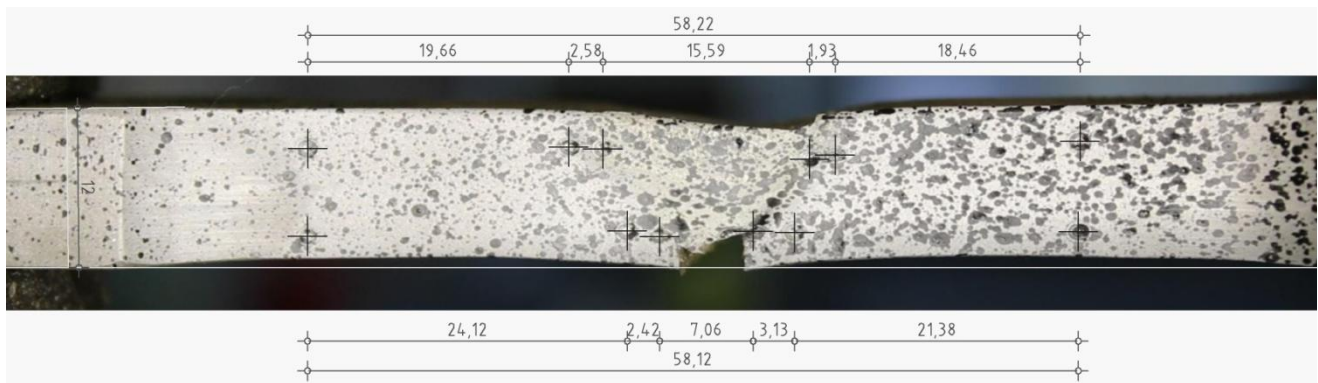
## Epruveta 2.2

Tabela 11.11:

Epruveta 2.2			
Tačke	Napon [MPa]	Deformacija [%]	Vreme [s]
0	/	/	2
1	286	0.7	6
2	340	2	12
3	393	4	20
4	421	6	30
5	437	8	40
6	447	10	49
7	450	12	58
8	443	14	68
9	357	16	73



Slika 11.8: Epruveta 2.2 tačka 0



Slika 11.9: Epruveta 2.2 tačka 9

Tabela 11.12: Epruveta 2.2 rastojanja između mernih tačaka gornji pojas (lice šava)

Epruveta 2.2 rastojanja između mernih tačaka gornji pojas (lice šava) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	17,06	2,14	13,02	1,56	15,32
1	17,19	2,16	13,1	1,5	15,46
2	17,53	2,2	13,24	1,55	15,77
3	17,81	2,27	13,38	1,56	16,14
4	18,24	2,3	13,58	1,67	16,39
5	18,53	2,29	13,71	1,68	16,75
6	19,02	2,43	13,87	1,72	17,36
7	19,44	2,46	14,09	1,71	17,81
8	19,87	2,47	14,68	1,9	18,4
9	19,66	2,58	15,59	1,93	18,46

Tabela 11.13: Epruveta 2.2 rastojanja između mernih tačaka donji pojas (koren)

Epruveta 2.2 rastojanja između mernih tačaka donji pojas (koren) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	21,36	2,32	3,95	2,57	18,74
1	21,6	3,24	4,01	2,62	18,92
2	21,92	2,28	4,15	2,67	19,24
3	22,29	2,33	4,18	2,85	19,46
4	22,74	2,35	4,39	2,86	19,75
5	22,83	2,47	4,57	2,95	19,99
6	23,34	2,45	4,81	3,02	20,54
7	23,71	2,45	5,12	3,07	21
8	24,04	2,43	5,77	3,36	21,39
9	24,12	2,42	7,06	3,13	21,38

Tabela 11.14: Epruveta 2.2 pomeranja između mernih tačaka gornji pojas (lice šava)

Epruveta 2.2 pomeranja između mernih tačaka gornji pojas (lice šava) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	/	/	/	/	/
1	0,13	0,02	0,08	-0,06	0,14
2	0,46	0,06	0,22	-0,01	0,45
3	0,75	0,13	0,36	0,01	0,82
4	1,18	0,16	0,56	0,11	1,07
5	1,47	0,15	0,69	0,12	1,43

6	1,96	0,29	0,85	0,16	2,04
7	2,38	0,32	1,07	0,15	2,49
8	2,81	0,33	1,66	0,34	3,08
9	2,6	0,44	2,57	0,37	3,13

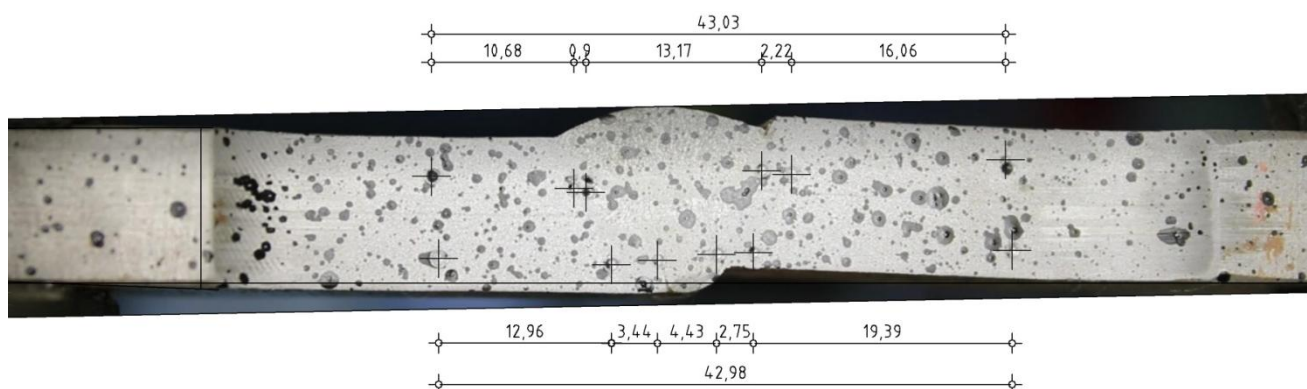
Tabela 11.15: Epruveta 2.2 pomeraja između mernih tačaka donji pojas (koren)

Epruveta 2.2 pomeraja između mernih tačaka donji pojas (koren) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	/	/	/	/	/
1	0,24	-0,08	0,06	0,05	0,18
2	0,56	-0,04	0,2	0,1	0,5
3	0,93	0,01	0,23-	0,28	0,72
4	1,38	0,03	0,44	0,29	1,01
5	1,47	0,15	0,62	0,38	1,25
6	1,96	0,13	0,86	0,45	1,8
7	2,35	0,13	1,17	0,5	2,26
8	2,68	0,11	1,82	0,79	2,65
9	2,76	0,1	3,11	0,56	2,55

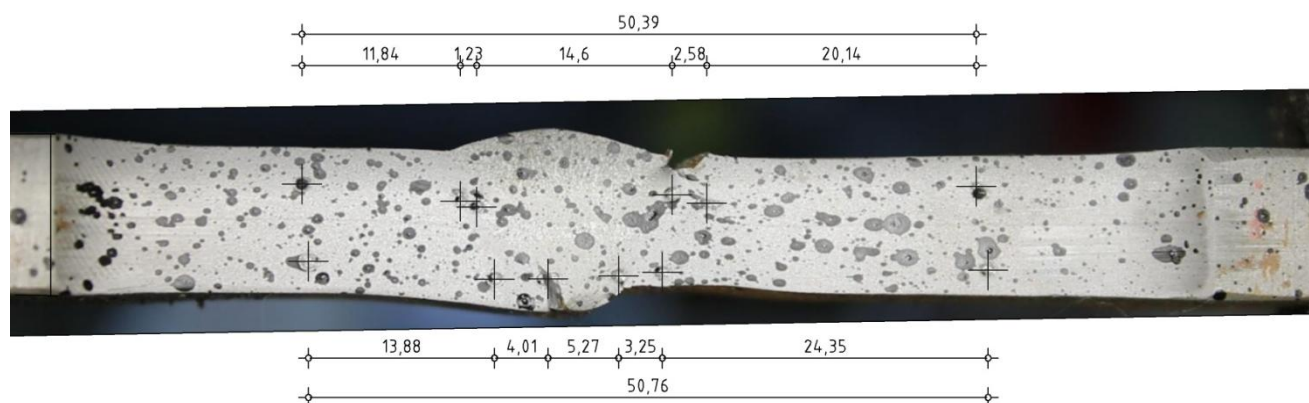
### Epruveta 3.1

Tabela 11.16:

Epruveta 3.1			
Tačke	Napon [MPa]	Deformacija [%]	Vreme [s]
0	/	/	2
1	258	0.7	5
2	348	2	12
3	394	4	21
4	422	6	30
5	440	8	40
6	450	10	49
7	455	12	58
8	455	14	67
9	433	16	77



Slika 11.10: Epruveta 3.1, tačka 0



Slika 11.11: Epruveta 3.1, tačka 9

Tabela 11.17: Epruveta 3.1 rastojanja između mernih tačaka gornji pojas (lice šava)

Epruveta 3.1 rastojanja između mernih tačaka gornji pojas (lice šava) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	10,68	0,9	13,17	2,22	16,06
1	10,65	1	13,21	2,28	16,1
2	10,86	1,09	13,26	2,36	16,29
3	10,95	1,12	13,43	2,34	16,61
4	11,11	1,14	13,48	2,51	16,66
5	11,29	1,28	13,82	2,34	17,3
6	11,5	1	14,07	2,28	17,69
7	11,76	1,17	14,13	2,43	18,38
8	11,79	1,17	14,36	2,52	18,94
9	11,84	1,23	14,6	2,58	20,14

Tabela 11.18: Epruveta 3.1 rastojanja između mernih tačaka donji pojas (koren)

Epruveta 3.1 rastojanja između mernih tačaka donji pojas (koren) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	12,96	3,44	4,43	2,75	19,39
1	12,95	3,44	4,52	2,74	19,63
2	13,01	3,53	4,57	2,86	20,02
3	13,16	3,64	4,73	2,88	20,38
4	13,29	3,68	4,68	2,97	20,67
5	13,45	3,82	4,91	2,92	21,29
6	13,54	3,76	5,06	2,95	21,68
7	13,82	3,83	5,1	3,04	22,43
8	13,82	3,9	5,2	3,18	23,01
9	13,88	4,01	5,27	3,25	24,35

Tabela 11.19: Epruveta 3.1 pomeranja između mernih tačaka gornji pojas (lice šava)

Epruveta 3.1 pomeranja između mernih tačaka gornji pojas (lice šava) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	/	/	/	/	/
1	-0,03	0,1	0,04	0,06	0,04
2	0,18	0,19	0,09	0,14	0,23
3	0,27	0,22	0,26	0,12	0,55
4	0,43	0,24	0,31	0,19	0,6
5	0,61	0,38	0,38	0,12	1,24
6	0,82	0,1	0,9	0,06	1,63
7	1,08	0,27	0,96	0,21	2,23
8	1,11	0,27	1,19	0,3	2,88
9	1,16	0,33	1,43	0,36	4,08

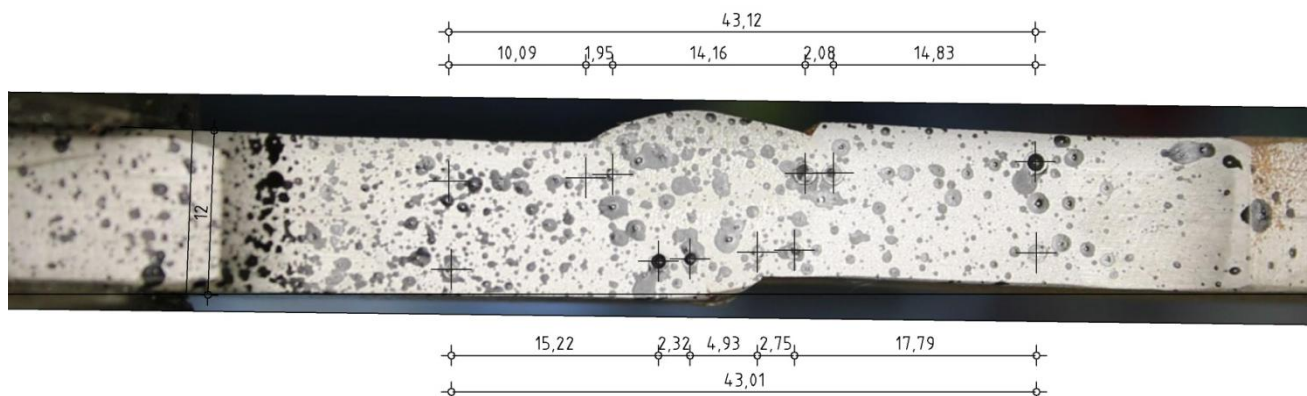
Tabela 11.20: Epruveta 3.1 pomeraja između mernih tačaka donji pojas (koren)

Epruveta 3.1 pomeranja između mernih tačaka donji pojas (koren) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	/	/	/	/	/
1	-0,01	0	0,09	-0,01	0,24
2	0,05	0,09	0,14	0,11	0,63
3	0,2	0,2	0,3	0,16	0,99
4	0,33	0,24	0,25	0,22	1,28
5	0,49	0,28	0,58	0,17	1,9
6	0,58	0,32	0,63	0,2	2,29
7	0,86	0,39	0,67	0,29	3,04
8	0,86	0,46	0,77	0,43	3,62
9	0,92	0,57	0,84	0,5	4,96

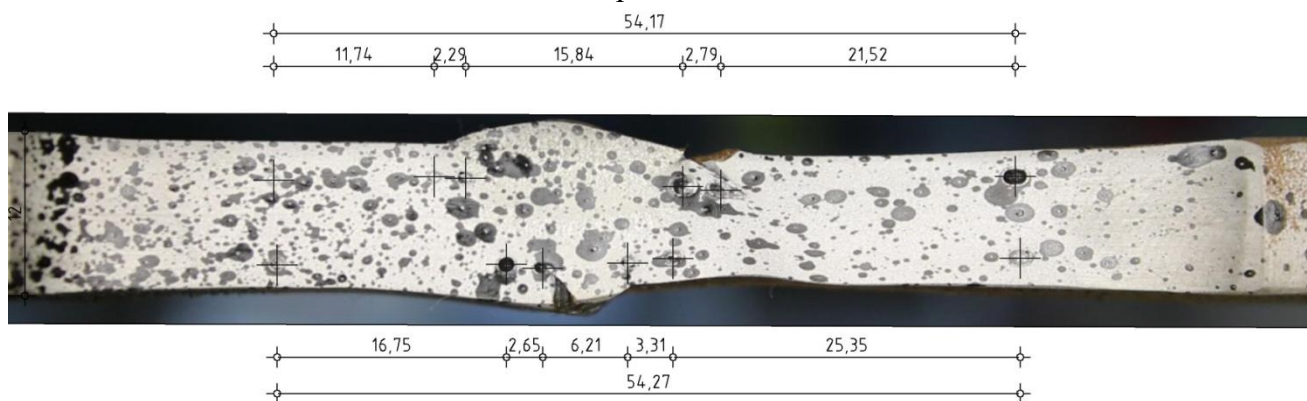
## Epruveta 3.2

Tabela 11.21:

Epruveta 3.2			
Tačke	Napon [MPa]	Deformacija [%]	Vreme [s]
0	/	/	2
1	271	0.7	6
2	349	2	13
3	396	4	22
4	424	6	32
5	441	8	41
6	450	10	50
7	455	12	60
8	456	14	69
9	452	16	78
10	440	18	88
11	406	20	97



Slika 11.12: Epruveta 3.2, tačka 0



Slika 11.13: Epruveta 3.2, tačka 11

Tabela 11.22: Epruveta 3.2 rastojanja između mernih tačaka gornji pojas (lice šava)

Epruveta 3.2 rastojanja između mernih tačaka gornji pojas (lice šava) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	10,09	1,95	14,16	2,08	14,83
1	10,12	1,96	14,33	2,08	15,15
2	10,47	1,98	14,56	2,21	15,38
3	10,57	2,07	14,67	2,12	15,63
4	10,74	2,1	14,72	2,15	15,79
5	11,03	2,14	14,99	2,21	16,3
6	11,25	2,12	15,15	2,2	16,58
7	11,58	2,22	15,5	2,28	17,39
8	11,56	2,18	15,58	2,25	17,85
9	11,67	2,27	15,6	2,52	18,69
10	11,55	2,14	15,64	2,64	19,54
11	11,74	2,29	15,84	2,79	21,52

Tabela 11.23: Epruveta 3.2 rastojanja između mernih tačaka donji pojas (koren)

Epruveta 3.2 rastojanja između mernih tačaka donji pojas (koren) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	15,22	2,32	4,93	2,75	17,79
1	15,35	2,35	5,07	2,62	18,27
2	15,56	2,4	5,1	2,83	18,71
3	15,65	2,47	5,28	2,73	18,99
4	15,66	2,54	5,36	2,77	19,19
5	15,97	2,55	5,61	2,81	19,75
6	16,14	2,58	5,79	2,85	20,06
7	16,48	2,63	5,98	2,94	20,85
8	16,46	2,67	6,05	2,97	21,45
9	16,59	2,69	6,08	3,02	22,41
10	16,41	2,52	6,18	3,04	23,48
11	16,75	2,65	6,21	3,31	25,35

Tabela 11.24: Epruveta 3.2 pomeranja između mernih tačaka gornji pojas (lice šava)

Epruveta 3.2 pomeranja između mernih tačaka gornji pojas (lice šava) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	/	/	/	/	/
1	0,03	0,01	0,17	0	0,32
2	0,38	0,03	0,4	0,13	0,55
3	0,48	0,12	0,51	0,04	0,8
4	0,65	0,15	0,56	0,07	0,96
5	0,94	0,19	0,83	0,13	1,47
6	1,16	0,17	0,99	0,12	2,02
7	1,49	0,27	1,34	0,2	2,56
8	1,47	0,23	1,42	0,17	3,02
9	1,58	0,32	1,44	0,44	3,86
10	1,46	0,19	1,48	0,56	4,71
11	1,65	0,34	1,68	0,71	6,69

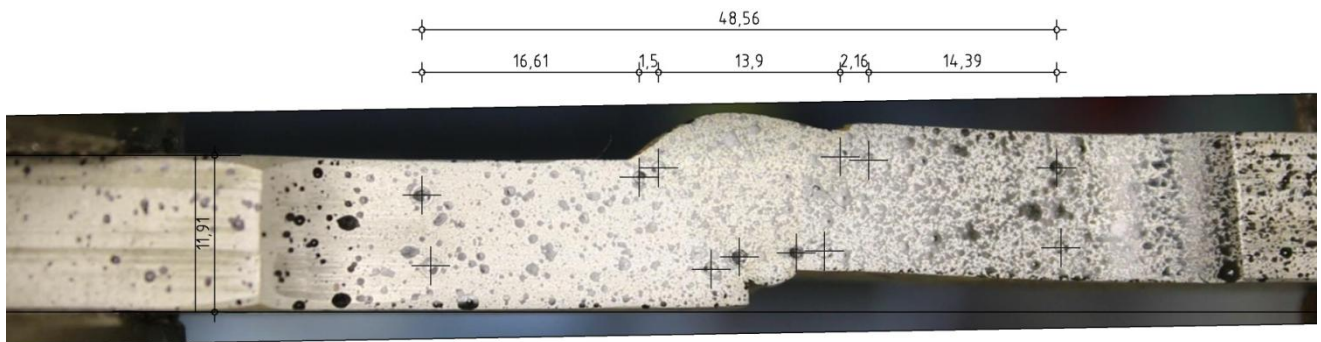
Tabela 11.25: Epruveta 3.2 pomeranja između mernih tačaka donji pojas (koren)

Epruveta 3.2 pomeranja između mernih tačaka donji pojas (koren) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	/	/	/	/	/
1	0,13	0,03	0,14	-0,13	0,48
2	0,34	0,08	0,17	0,07	0,92
3	0,43	0,15	0,35	-0,02	1,2
4	0,44	0,22	0,43	0,02	1,4
5	0,75	0,23	0,68	0,06	1,96
6	0,92	0,26	0,86	0,1	2,27
7	1,26	0,31	1,05	0,21	3,06
8	1,24	0,35	1,12	0,24	3,66
9	1,37	0,37	1,15	0,27	4,62
10	1,19	0,2	1,25	0,29	5,96
11	1,53	0,33	1,28	0,56	7,56

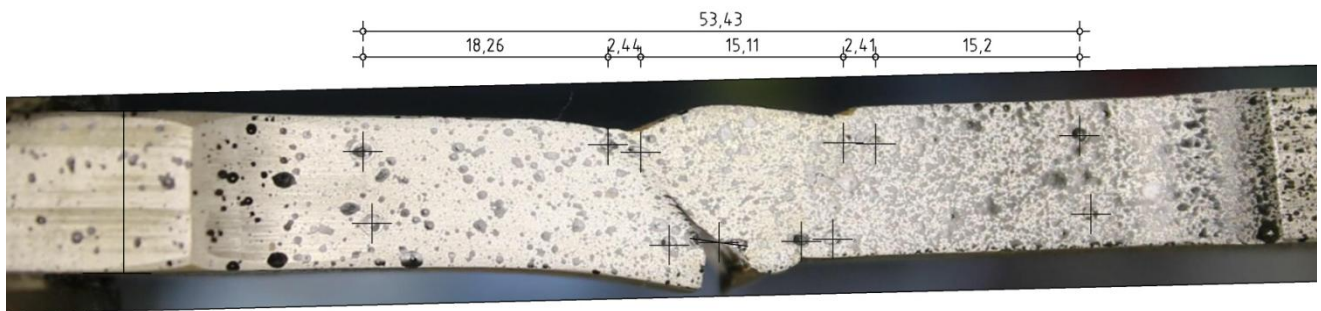
## Epruveta 4.1

Tabela 11.26:

Epruveta 4.1			
Tačke	Napon [MPa]	Deformacija [%]	Vreme [s]
0	/	/	2
1	223	0.7	4
2	265	1	6
3	314	2	10
4	350	3	15
5	375	4	20
6	391	5	25
7	400	6	30
8	382	7	34
9	302	8	38



Slika 11.14: Epruveta 4.1, tačka 0



Slika 11.15: Epruveta 4.1, tačka 9



Tabela 11.26: Epruveta 4.1 rastojanja između mernih tačaka gornji pojas (lice šava)

Epruveta 4.1 rastojanja između mernih tačaka gornji pojas (lice šava) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	16,61	1,5	13,9	2,16	14,39
1	16,69	1,56	13,98	2,19	14,48
2	16,82	1,53	14,1	2,17	14,6
3	17,03	1,58	14,17	2,14	14,7
4	17,23	1,69	14,27	2,19	14,81
5	17,36	1,81	14,38	2,16	14,85
6	17,72	1,81	14,51	2,22	15,1
7	17,96	2	14,75	2,21	15,19
8	18,31	2,1	15,14	2,26	15,39
9	18,26	2,44	15,11	2,41	15,2

Tabela 11.27: Epruveta 4.1 rastojanja između mernih tačaka donji pojas (koren)

Epruveta 4.1 rastojanja između mernih tačaka donji pojas (koren) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	21,46	2,16	4,34	2,18	18,08
1	21,5	2,19	4,34	2,22	18,35
2	21,6	2,21	4,43	2,14	18,57
3	21,62	2,38	4,52	2,2	18,67
4	21,68	2,49	4,79	2,24	18,93
5	21,66	2,73	4,84	2,26	19,07
6	21,91	2,74	5,09	2,33	19,31
7	21,96	3,19	5,18	2,36	19,29
8	22,19	3,52	5,63	2,3	19,5
9	22,18	3,7	6,15	2,33	19,27

Tabela 11.28: Epruveta 4.1 pomeranja između mernih tačaka gornji pojas (lice šava)

Epruveta 4.1 pomeranja između mernih tačaka gornji pojas (lice šava) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	/	/	/	/	/
1	0,08	0,06	0,08	0,03	0,09
2	0,21	0,03	0,2	0,01	0,21
3	0,42	0,08	0,27	-0,02	0,31
4	0,62	0,19	0,37	0,03	0,42
5	0,75	0,31	0,48	0	0,46
6	1,11	0,31	0,61	0,06	0,71
7	1,35	0,5	0,85	0,05	0,8
8	1,7	0,6	1,24	0,1	1
9	1,65	0,94	1,21	0,25	0,81

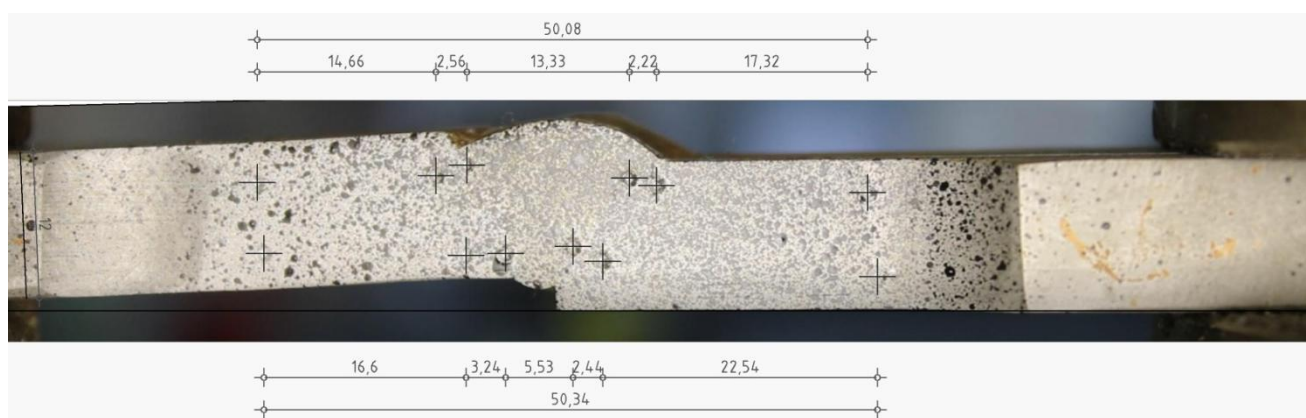
Tabela 11.29: Epruveta 4.1 pomeranja između mernih tačaka donji pojas (koren)

Epruveta 4.1 pomeranja između mernih tačaka donji pojas (koren) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	/	/	/	/	/
1	0,04	0,03	0	0,04	0,27
2	0,14	0,05	0,09	-0,04	0,49
3	0,16	0,22	0,18	0,02	0,59
4	0,22	0,33	0,45	0,06	0,85
5	0,2	0,57	0,5	0,08	0,99
6	0,45	0,58	0,75	0,15	1,23
7	0,5	1,03	0,84	0,18	1,21
8	0,73	1,36	1,29	0,12	1,42
9	0,72	1,54	1,81	0,15	1,19

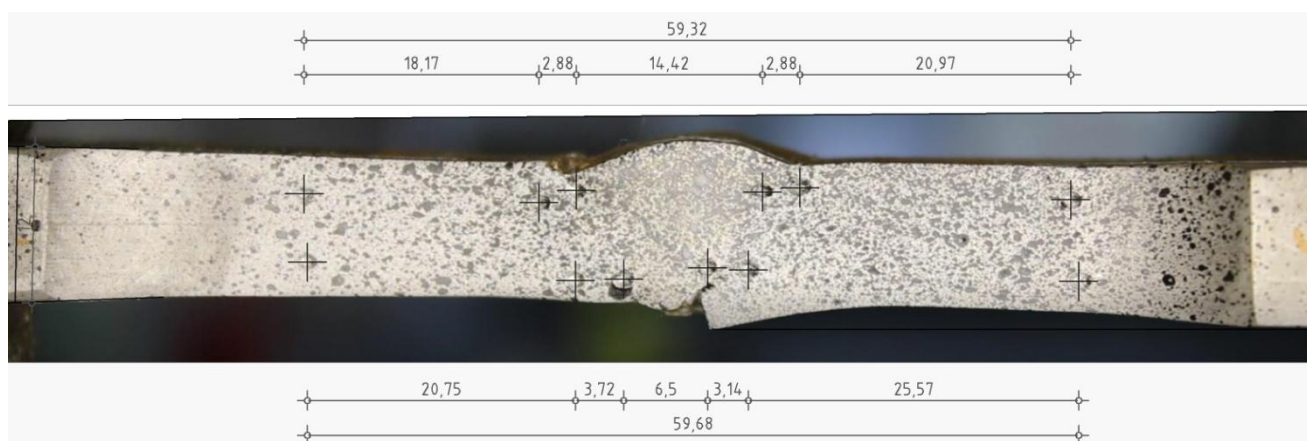
## Epruveta 4.2

Tabela 11.30:

Epruveta 4.2			
Tačke	Napon [MPa]	Deformacija [%]	Vreme [s]
0	/	/	2
1	244	0.7	5
2	336	2	11
3	389	4	20
4	420	6	30
5	439	8	39
6	450	10	49
7	457	12	58
8	459	14	67
9	459	16	77
10	455	18	86
11	440	20	95



Slika 11.16: Epruveta 4.2, tačka 0



Slika 11.17: Epruveta 4.2, tačka 11

Tabela 11.31: Epruveta 4.2 rastojanja između mernih tačaka gornji pojas (lice šava)

Epruveta 4.2 rastojanja između mernih tačaka gornji pojas (lice šava) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	14,66	2,56	13,33	2,22	17,32
1	14,59	2,51	13,25	2,22	17,27
2	14,79	2,55	13,25	2,34	17,41
3	15,04	2,59	13,52	2,45	18,06
4	15,21	2,59	13,6	2,72	18,34
5	15,81	2,65	13,78	2,58	18,93
6	15,94	2,66	13,9	2,71	19,34
7	16,35	2,76	14,24	2,72	19,91
8	16,6	2,76	14,17	2,77	20,18
9	17,03	3,04	14,14	2,79	20,56
10	18,17	2,88	14,42	2,88	20,97
11	19,12	3,29	14,45	2,88	20,91

Tabela 11.32: Epruveta 4.1 rastojanja između mernih tačaka donji pojas (koren)

Epruveta 4.1 rastojanja između mernih tačaka donji pojas (koren) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	16,6	3,24	5,53	2,44	22,54
1	16,58	3,31	5,38	2,53	22,35
2	16,99	3,32	5,54	2,46	22,36
3	17,42	3,48	5,74	2,56	22,95
4	17,71	3,48	5,72	2,79	23,15
5	18,1	3,51	5,95	2,81	23,69
6	18,36	3,55	6,03	3	24,02
7	18,93	3,62	6,22	3,1	24,62
8	19,16	3,67	6,17	3,15	24,78
9	19,73	3,68	6,4	3,09	25,19
10	20,75	3,72	6,5	3,14	25,57
11	22,04	3,81	6,5	3,19	25,61

Tabela 11.33: Epruveta 4.2 pomeranja između mernih tačaka gornji pojas (lice šava)

Epruveta 4.2 pomeranja između mernih tačaka gornji pojas (lice šava) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	/	/	/	/	/
1	-0,7	-0,05	-0,08	0	-0,05
2	0,13	-0,01	-0,08	0,12	0,09
3	0,38	0,04	0,19	0,23	0,74
4	0,55	0,04	0,27	0,5	1,02
5	1,15	0,09	0,45	0,36	1,61
6	1,28	0,1	0,57	0,49	2,02
7	1,69	0,2	0,91	0,5	2,59
8	1,94	0,2	0,84	0,55	2,86
9	2,73	0,48	0,81	0,57	3,24
10	3,51	0,32	1,12	0,66	3,65
11	4,46	0,73	1,15	0,66	5,59

Tabela 11.34: Epruveta 4.2 pomeranja između mernih tačaka donji pojas (koren)

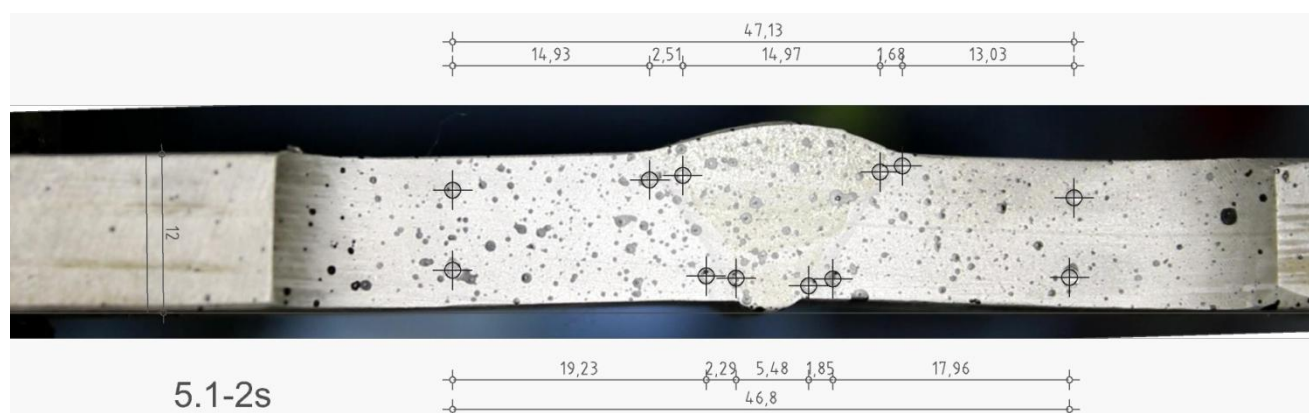
Epruveta 4.2 pomeranja između mernih tačaka donji pojas (koren) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	/	/	/	/	/
1	-0,02	0,07	-0,15	-0,09	-0,19
2	0,39	0,08	0,01	0,02	-0,18
3	0,82	0,24	0,21	0,12	0,41
4	1,11	0,24	0,19	0,35	0,61
5	1,5	0,27	0,42	0,37	1,15
6	1,76	0,31	0,5	0,56	1,48
7	2,33	0,38	0,69	0,66	2,08
8	2,56	0,43	0,64	0,71	2,12
9	3,13	0,44	0,87	0,65	2,65
10	4,15	0,48	0,97	0,7	3,03
11	5,44	0,57	0,97	0,75	3,07

## Epruveta 5.1

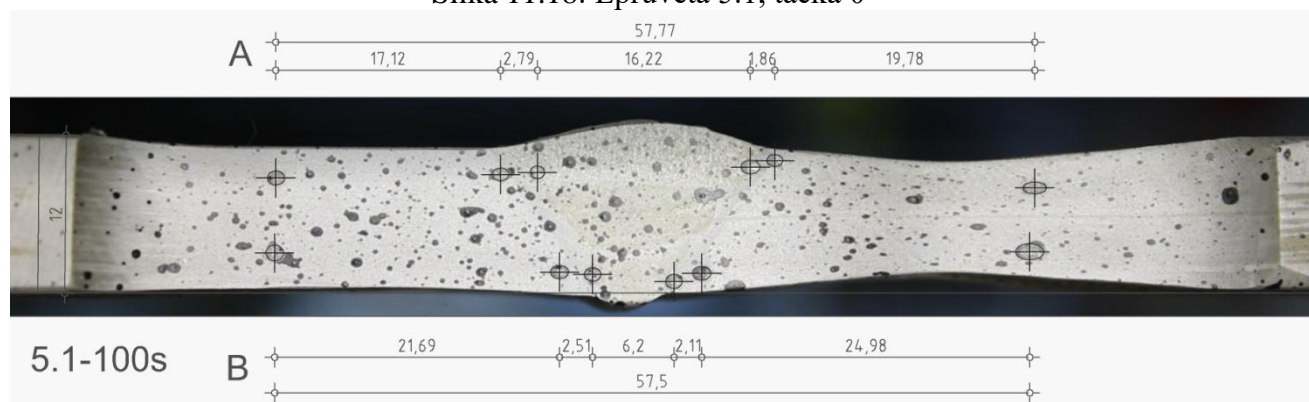
Tabela 11.35:

Epruveta 5 - 1			
Tačke	Napon [MPa]	Deformacija [%]	Vreme [s]
0	/	/	2
1	275	1	12
2	341	2	17
3	401	4	26
4	431	6	35
5	451	8	46
6	461	10	54
7	466	12	62
8	467	13	68
9	466	14	73

10	457	16	82
11	409	20	100



Slika 11.18: Epruveta 5.1, tačka 0



Slika 11.19: Epruveta 5.1, tačka 11

Tabela 11.36: Epruveta 5.1 rastojanja između mernih tačaka gornji pojas (lice šava)

Epruveta 5.1 rastojanja između mernih tačaka gornji pojas (lice šava) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	14.93	2.51	14.97	1.68	13.03
1	15.19	2.48	15.29	1.68	13.37
2	15.11	2.49	15.14	1.66	13.47
3	15.24	2.52	15.13	1.68	13.59
4	15.56	2.59	15.37	1.73	14.01
5	15.77	2.63	15.36	1.75	14.3
6	16.05	2.62	15.46	1.79	14.52
7	16.72	2.74	15.81	1.82	15.43
8	16.87	2.67	15.83	1.83	15.84
9	16.92	2.68	15.85	1.91	16.1
10	16.86	2.78	15.97	1.81	17.12
11	17.12	2.79	16.22	1.86	19.78

Tabela 11.37: Epruveta 5.1 rastojanja između mernih tačaka donji pojas (koren)

Epruveta 5.1 rastojanja između mernih tačaka donji pojas (koren) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	19.23	2.29	5.48	1.85	17.96
1	19.51	2.3	5.57	1.94	18.43
2	19.52	2.31	5.55	1.94	18.46
3	19.63	2.36	5.62	1.95	18.59
4	20.05	2.39	5.81	2	19.09
5	20.26	2.42	5.82	2.06	19.38
6	20.05	2.42	5.86	2.07	19.69
7	21.25	2.55	6.01	2.08	20.47
8	21.38	2.54	6.04	2.11	21.06
9	21.48	2.51	6.06	2.12	21.42
10	21.46	2.55	6.05	2.15	22.43
11	21.69	2.51	6.2	2.11	24.98

Tabela 11.38: Epruveta 5.1 pomeranja između mernih tačaka gornji pojas (lice šava)

Epruveta 5.1 pomeranja između mernih tačaka gornji pojas (lice šava) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	/	/	/	/	/
1	0.26	-0.03	0.32	0	0.34
2	0.18	-0.02	0.17	-0.02	0.44
3	0.31	0.01	0.16	0	0.56
4	0.63	0.07	0.4	0.05	0.98
5	0.84	0.08	0.39	0.07	1.27
6	1.12	0.12	0.49	0.09	1.49
7	1.79	0.11	0.84	0.14	2.4
8	1.94	0.23	0.86	0.15	2.81
9	1.99	0.17	0.89	0.23	3.07
10	1.93	0.27	1	0.13	4.09
11	2.19	0.28	1.25	0.15	6.75

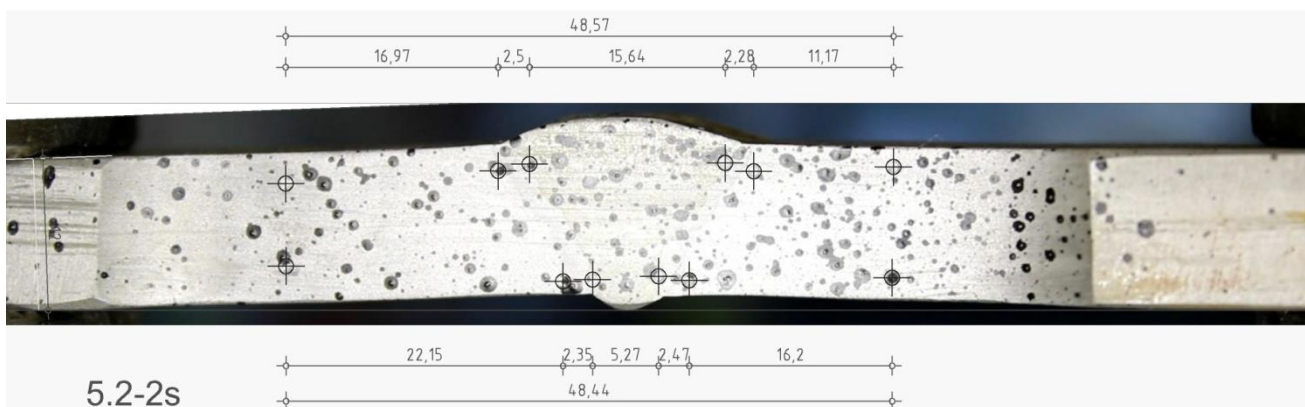
Tabela 11.39: Epruveta 5.1 pomeranja između mernih tačaka donji pojas (koren)

Epruveta 5.1 pomeranja između mernih tačaka donji pojas (koren) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	/	/	/	/	/
1	0.28	0.01	0.09	0.09	0.47
2	0.29	0.02	0.07	0.09	0.5
3	0.40	0.07	0.14	0.1	0.63
4	0.82	0.1	0.33	0.15	1.13
5	1.03	0.13	0.34	0.21	1.42
6	0.82	0.13	0.38	0.22	1.73
7	2.02	0.16	0.53	0.23	2.51
8	2.15	0.15	0.56	0.26	3.1
9	2.25	0.12	0.58	0.27	3.46
10	2.23	0.16	0.57	0.3	4.47
11	2.46	0.12	0.72	0.26	7.02

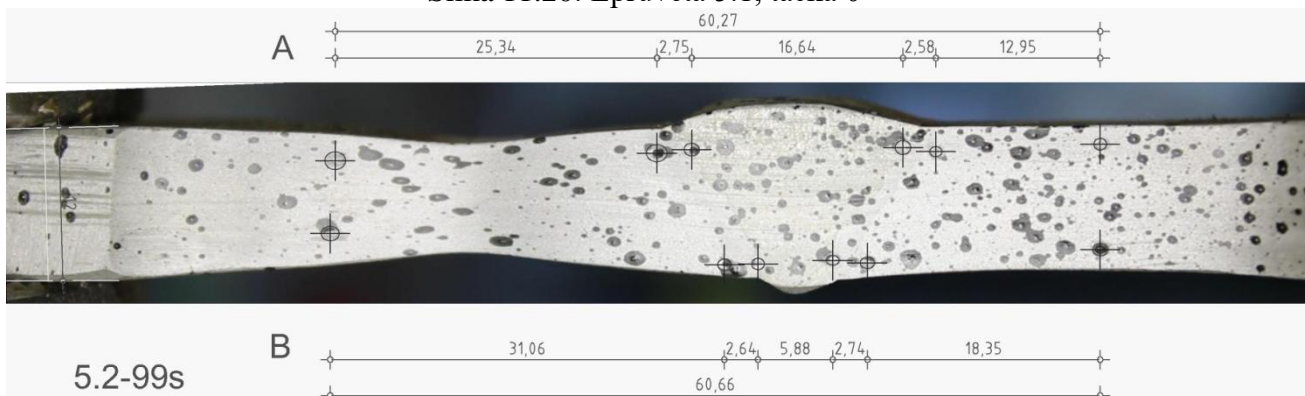
**Epruveta 5.2**

Tabela 11.40:

Epruveta 5.2			
Tačke	Napon [MPa]	Deformacija [%]	Vreme [s]
0	/	/	2
1	250	0.7	7
2	344	2	12
3	398	4	22
4	429	6	32
5	447	8	41
6	456	10	50
7	461	12	60
8	462	13	63
9	460	14	69
10	451	16	78
11	395	20	99



Slika 11.20: Epruveta 5.1, tačka 0



Slika 11.21: Epruveta 5.1, tačka 11

Tabela 11.41: Epruveta 5.2 rastojanja između mernih tačaka gornji pojas (lice šava)

Epruveta 5.2 rastojanja između mernih tačaka gornji pojas (lice šava) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	16,97	2,5	15,64	2,28	11,17
1	17,04	2,46	15,61	2,3	11,21
2	17,33	2,48	15,67	2,31	11,32
3	17,89	2,57	15,96	2,38	11,72
4	18,41	2,53	16,25	2,42	11,99
5	18,64	2,54	16,08	2,61	12,19
6	18,98	2,71	16,32	2,43	12,4
7	19,93	2,69	16,55	2,55	12,74
8	20,16	2,63	16,56	2,55	12,75
9	20,73	2,74	16,48	2,57	12,85
10	21,89	2,69	16,52	2,58	12,88
11	25,34	2,75	16,64	2,58	12,95

Tabela 11.42: Epruveta 5.2 rastojanja između mernih tačaka donji pojas (koren)

Epruveta 5.2 rastojanja između mernih tačaka donji pojas (koren) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	22,15	2,35	5,27	2,47	16,2
1	22,27	2,29	5,3	2,43	16,27
2	22,59	2,31	5,37	2,49	16,47
3	23,13	2,46	5,56	2,53	16,98
4	23,62	2,53	5,71	2,61	17,27
5	24	2,58	5,74	2,66	17,42
6	24,48	2,55	5,72	2,7	17,72
7	25,43	2,56	5,86	2,71	18,14
8	25,76	2,56	5,82	2,76	18,12
9	26,36	2,65	5,82	2,79	18,19
10	27,5	2,65	5,85	2,76	18,19
11	31,06	2,64	5,88	2,74	18,35

Tabela 11.43: Epruveta 5.2 pomeranja između mernih tačaka gornji pojas (lice šava)

Epruveta 5.2 pomeranja između mernih tačaka gornji pojas (lice šava) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	/	/	/	/	/
1	0,07	-0,04	-0,03	0,02	0,04
2	0,36	-0,02	0,03	0,03	0,15
3	0,92	0,07	0,32	0,1	0,55
4	1,44	0,03	0,61	0,14	0,82
5	1,67	0,04	0,44	0,33	1,02
6	2,01	0,21	0,68	0,15	1,23
7	2,96	0,19	0,91	0,27	1,57
8	3,19	0,13	0,92	0,27	1,58
9	3,76	0,24	0,84	0,29	1,68
10	4,92	0,19	0,88	0,3	1,71
11	8,37	0,25	1	0,3	1,78



Tabela 11.44: Epruveta 5.2 pomeranja između mernih tačaka donji pojas (koren)

Epruveta 5.2 pomeranja između mernih tačaka donji pojas (koren) [mm]					
Tačka	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
0	/	/	/	/	/
1	0,12	-0,06	0,03	-0,04	0,07
2	0,44	-0,04	0,1	0,02	0,27
3	0,98	0,11	0,39	0,06	0,78
4	1,47	0,18	0,44	0,14	1,07
5	1,85	0,23	0,47	0,19	1,22
6	2,33	0,2	0,45	0,23	1,52
7	3,48	0,21	0,59	0,24	1,94
8	3,61	0,21	0,55	0,29	1,92
9	4,21	0,3	0,55	0,32	1,99
10	5,35	0,3	0,58	0,29	1,99
11	8,91	0,29	0,61	0,27	2,15

### Dodatak 3 – Prikaz vrednosti tvrdoća za eperuvete grupe 1, 2, 3, 4

Tabela 11.45: Ispitivanje tvrdoće uzorka grupe jedan sa korene strane

Broj merenja	Oznaka uzoraka						
	Osnovni material 1	Zona uticaja toplote 1	Linija stapanja 1	Metal šava	Linija stapanja 5	Zona uticaja toplote 5	Osnovni material 5
1	143	161	175	175	178	161	148
2	143	158	178	178	180	158	148
3	137	154	/	172	/	160	154

Tabela 11.46: Ispitivanje tvrdoće uzorka grupe jedan sa srane lica šava

Broj merenja	Oznaka uzoraka						
	Osnovni material 1	Zona uticaja toplote 1	Linija stapanja 1	Metal šava	Linija stapanja 5	Zona uticaja toplote 5	Osnovni material 5
1	137	154	183	168	183	161	154
2	137	161	175	168	175	154	148
3	137	161	/	175	/	154	148

Tabela 11.47: Ispitivanje tvrdoće uzorka grupe dva sa korene strane

Broj merenja	Oznaka uzoraka						
	Osnovni material 1	Zona uticaja toplote 1	Linija stapanja 1	Metal šava	Linija stapanja 5	Zona uticaja toplote 5	Osnovni material 5
1	132	154	175	171	186	154	154
2	137	161	178	175	175	161	148
3	127	152	/	161	/	161	148

Tabela 11.48: Ispitivanje tvrdoće uzorka grupe dva sa srane lica šava

Broj merenja	Oznaka uzoraka						
	Osnovni	Zona	Linija	Metal	Linija	Zona	Osnovni

	material 1	uticaja toplote 1	stapanja 1	šava	stapanja 5	uticaja toplote 5	material 5
1	127	148	175	175	175	161	148
2	127	148	/	161	/	154	148
3	132	161	/	161	/	154	148

Tabela 11.49: Ispitivanje tvrdoće uzorka grupe tri sa korene strane

Broj merenja	Oznaka uzoraka						
	Osnovni material 1	Zona uticaja toplote 1	Linija stapanja 1	Metal šava	Linija stapanja 5	Zona uticaja toplote 5	Osnovni material 5
1	154	161	183	171	168	158	148
2	154	168	182	175	162	161	151
3	151	161	/	168	/	154	148

Tabela 11.50: Ispitivanje tvrdoće uzorka grupe tri sa srane lica šava

Broj merenja	Oznaka uzoraka						
	Osnovni material 1	Zona uticaja toplote 1	Linija stapanja 1	Metal šava	Linija stapanja 5	Zona uticaja toplote 5	Osnovni material 5
1	154	154	175	175	161	161	148
2	154	161	/	183	175	154	148
3	154	161	/	175	/	154	148

Tabela 11.51: Ispitivanje tvrdoće uzorka grupe četiri sa korene strane

Broj merenja	Oznaka uzoraka						
	Osnovni material 1	Zona uticaja toplote 1	Linija stapanja 1	Metal šava	Linija stapanja 5	Zona uticaja toplote 5	Osnovni material 5
1	143	162	175	164	168	153	154
2	137	161	168	166	175	156	148
3	137	161	/	168	/	158	148

Tabela 11.52: Ispitivanje tvrdoće uzorka grupe četiri sa srane lica šava

Broj merenja	Oznaka uzoraka						
	Osnovni material 1	Zona uticaja toplote 1	Linija stapanja 1	Metal šava	Linija stapanja 5	Zona uticaja toplote 5	Osnovni material 5
1	137	154	168	161	175	154	148
2	137	161	/	175	/	154	148
3	137	161	/	175	/	154	148

## БИОГРАФИЈА

Михајло С. Аранђеловић рођен је 23.10.1985 у Београд, Република Србија. По националности Србин и држављанин Републике Србије. Основну школу је завршио у Параћину са одличним успехом и награђен је Вуковом дипломом. Гимназију је завршио у Параћину, смер математички, такође је завршио са одличним успехом.

Грађевински факултет је уписао 2004 године. Мастер академске студије на смеру Заваривање и заварене конструкције је завршио у предвиђеном року од две године. Дипломски Рад из предмета Технологија заваривања са насловом „Репарација кранских точкова у железари Смедерево и техно-економска анализа" одбранио са максималном оценом 10.

Након завршетка основних студија ступа у радни однос у ФГМ Матокс Параћин као шеф градилишта 2011 године, 2017 ступа у радни однос у Иновационом центру машинског факултета као истраживач-приправник Иновационом центру Машинског Факултета у Београду као сарадник и помоћник приликом организовања наставе на енглеском језику, техничка подршка приликом аудио и видео снимања наставе (за потребе фирме SGM из Берлина) под руководством проф. др Александра Седмака. 2017 године уписао је докторске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду као истраживач приправник на пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја TP35040 „Развој савремених метода дијагностике и испитивања машинских структура“. 2020 почиње да ради у контлоном телу као инспектор за посуде под притиском.

Такође је активно помагао изради неколико докторских дисертација и мастер радова. Кандидат је учествовао бројним домаћим и међународним конференцијама са својим и радовима својих колега. Такође је учествовао у организовању следећих међународних конференција:

- ECF22 (водећа међународна конференција посвећена лому)

Кандидат поседује знања из програмских пакета Microsoft Office, Solid Works, ABAQUS. Од страних језика, познаје енглески језик (писање, читање) и основе руског и немачког. Кандидат поседује сертификате IWE/EWE (међународни инжењер заваривања), IWI-C (међународни инспектор заваривања), VT2 (сертификат за визуелну контролу)

У Београду 18/08/2022.

Прилог 1.

## Изјава о ауторству

Потписани-а           Михајло Аранђеловић          

број индекса           Д30/2017          

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

          УТИЦАЈ ВИШЕСТРУКИХ ГРЕШАКА У ЗАВАРЕНОМ СПОЈУ НА ИНТЕГРИТЕТ          

          ЗАВАРЕНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ          

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

**Потпис докторанда**

У Београду, 18.08.2022



Прилог 2.

## Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора - Михајло Аранђеловић

Број индекса - Д30/2017

Студијски програм \_\_\_\_\_

Наслов рада - УТИЦАЈ ВИШЕСТРУКИХ ГРЕШАКА У ЗАВАРЕНОМ СПОЈУ НА  
ИНТЕГРИТЕТ ЗАВАРЕНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ

Ментор - Професор емеритус Александар Седмак

Потписани - Михајло Аранђеловић

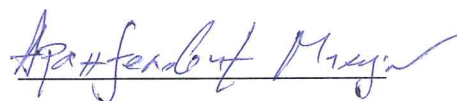
Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 18.08.2022



Прилог 3.

## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

УТИЦАЈ ВИШЕСТРУКИХ ГРЕШАКА У ЗАВАРЕНОМ СПОЈУ НА ИНТЕГРИТЕТ

---

ЗАВАРЕНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ

---

која је моје ауторско дело.

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

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

### 1. Ауторство

2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

**Потпис докторанда**

У Београду, 18.08.2022



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

2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

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

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