

# Karakterizacija i analiza ponašanja metalnih materijala za razvoj i primjenu lakih konstrukcija

---

**Grman, Bruno**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:833897>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-15**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**KARAKTERIZACIJA I ANALIZA PONAŠANJA METALNIH  
MATERIJALA ZA RAZVOJ I PRIMJENU LAKIH  
KONSTRUKCIJA**

Rijeka, rujan 2024.

Bruno Grman

0035216262

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**KARAKTERIZACIJA I ANALIZA PONAŠANJA METALNIH  
MATERIJALA ZA RAZVOJ I PRIMJENU LAKIH  
KONSTRUKCIJA**

Mentor: Prof. dr. sc. Robert Basan

Komentor: Izv. Prof. dr. sc. Tea Marohnić

Rijeka, rujan 2024.

Bruno Grman

0035216262

Rijeka, 14.03.2024.

Zavod: Zavod za konstruiranje  
Predmet: CAE u razvoju proizvoda

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Bruno Grman (0035216262)**  
Studij: Sveučilišni diplomski studij strojarstva (1100)  
Modul: Konstruiranje i mehatronika (1111)

Zadatak: **Karakterizacija i analiza ponašanja metalnih materijala za razvoj i primjenu lakih konstrukcija / Characterization and analysis of the behavior of metallic materials for the development and application of lightweight designs**

### Opis zadatka:

Za odabrane metalne materijale pripremiti i izraditi ispitne uzorke različitih geometrija i provesti sustavno ispitivanje mehaničkih svojstava i njihovog ponašanja. Ispitivanja provesti sukladno relevantnim ISO normama koristeći odgovarajuće uzorke i statički ispitni stroj. Analizirati dobivene rezultate te ih primijeniti na ispitnom uzorku sličnom komponenti čije ponašanje treba numerički modelirati i provjeriti eksperimentom. Rad treba uključivati pregled stanja tehnike, opis korištenih metoda i alata te kritičku analizu rezultata i njihov utjecaj na primjenu ispitivanih materijala u lakim konstrukcijama.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanja diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku: 20.03.2024.

Mentor:  
prof. dr. sc. Robert Basan

Komentor:  
izv. prof. dr. sc. Tea Marohnić

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:  
izv. prof. dr. sc. Igor Bonefačić

## IZJAVA

Sukladno članku 8. Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta u Rijeci, ja, Bruno Grman, student diplomskog studija strojarstva, izjavljujem da sam samostalno izradio diplomski rad na temu „Karakterizacija i analiza ponašanja metalnih materijala za razvoj i primjenu lakih konstrukcija“ pod vodstvom prof. dr. sc. Roberta Basana i komentorice izv. prof. dr. sc. Tee Marohnić.

Rijeka, rujan 2024.

---

Bruno Grman

0035216262

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Basan Robertu i komentorici izv. prof. dr. sc. Marohnić Tei što su mi omogućili izradu diplomskog rada u okviru kolegija CAE u razvoju proizvoda, njihovom vodstvu i stručnim smjernicama kroz izradu diplomskog rada kao i kroz sve moje godine studiranja na Tehničkom fakultetu u Rijeci. Također zahvalio bi se asistentici mag. ing. mech. Marković Eli na korisnim savjetima i upoznavanjem s laboratorijskom opremom.

Zahvaljujem se svim svojim najbližima koji su me podržavali kroz čitavo obrazovanje.

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJTAVA I PONAŠANJA MATERIJALA .....</b>	<b>2</b>
2.1. Mehaničko ponašanje materijala pri djelovanju statičkog opterećenja .....	2
2.2. Pregled norme HRN EN ISO 6892-1 .....	14
<b>3. MATERIJALI.....</b>	<b>21</b>
3.1. Aluminij i aluminijske legure .....	21
3.2. Korozijski postojani čelici.....	23
<b>4. EKSPERIMENTALNA OPREMA .....</b>	<b>25</b>
4.1. Oprema za ispitivanje mehaničkih svojstava i ponašanja materijala .....	25
4.2. Oprema za određivanje kemijskog sastava materijala .....	30
<b>5. ISPITIVANJE .....</b>	<b>33</b>
5.1. Opis ispitnih uzoraka .....	33
5.2. Statički vlačni pokus .....	37
5.3. Određivanje modula elastičnosti.....	40
5.4. Određivanje kemijskog sastava .....	50
5.5. Rezultati ispitivanja .....	52
<b>6. PRIMJENA EKSPERIMENTALNIH PODATAK U NUMERIČKOJ ANALIZI.....</b>	<b>67</b>
6.1. Opis modela za numeričku analizu i analitički proračun .....	68
6.2. Linearna analiza metodom konačnih elemenata.....	72
6.3. Nelinearna analiza metodom konačnih elemenata.....	77
6.4. Usporedba rezultata linearne i nelinearne analize .....	84
<b>7. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>87</b>
<b>LITERATURA.....</b>	<b>89</b>
<b>POPIS SLIKA.....</b>	<b>93</b>
<b>POPIS TABLICA .....</b>	<b>97</b>
<b>SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI.....</b>	<b>98</b>
<b>SUMMARY AND KEYWORDS.....</b>	<b>99</b>

<b>PRILOG 1</b> .....	<b>100</b>
<b>PRILOG 2</b> .....	<b>101</b>
<b>PRILOG 3</b> .....	<b>102</b>
<b>PRILOG 4</b> .....	<b>103</b>
<b>PRILOG 5</b> .....	<b>104</b>



## 1. UVOD

Poznavanje mehaničkih svojstva i ponašanja materijala ključno je za primjenu prilikom konstruiranja lakih konstrukcija. Za izradu lakih konstrukcija u industrijskoj praksi sve više se koriste različite legure aluminija i korozijski postojani čelici. Legure aluminija i korozijski postojani čelici odlikuju se povoljnim mehaničkim svojstvima kao što su visok omjer čvrstoće i mase, visoka korozijska postojanost i niska gustoća te su zbog toga povoljne za izradu lakih konstrukcija. Podaci o mehaničkim svojstvima i ponašanju materijala mogu se odrediti eksperimentalnim ispitivanjem koje je dugotrajno i skupo, ali najtočnije.

Stoga je u sklopu ovog diplomskog rada provedeno eksperimentalno ispitivanje mehaničkih svojstva i ponašanje legure aluminija AlMgSi0,5/EN AW-6060 i korozijskih postojanih čelika AISI 304 i AISI 316L. Eksperimentalno ispitivanje sastoji se od statičkog vlačnog pokusa kako bi se odredila mehanička svojstva i ponašanje materijala te ispitivanja kemijskog sastava spektrometrijom.

Statički vlačni pokus provodi se na kidalici Galdabini Quasar 50 kako bi se odredila mehanička svojstva materijala (modul elastičnosti -  $E$ , granica tečenja -  $R_{p0,2}$ , vlačna čvrstoća -  $R_m$ ...) prema normi ISO 6892-1, 2019. Modul elastičnosti određuje se pomoću sustava za korelaciju digitalne slike što je dopušteno normom HRN EN ISO 6892-1, 2019. Za određivanje mehaničkih svojstva materijala izrađeni su setovi ispitnih uzoraka prethodno navedenih materijala. Dimenzije i oblici ispitnih uzoraka također su određeni prema normi HRN EN ISO 6892-1, 2019. Setovi ispitnih uzoraka polomljeni su na kidalici te su rezultati naknadno obrađeni. Ispitivanje kemijskog sastava materijala proveden je koristeći se spektrometrom s tinjajućim izbojem LECO GDS500A kako bi se kemijski sastav ispitivanih materijala usporedio s vrijednostima u atestima.

Za materijal AlMgSi0,5/EN AW-6060 koristeći se eksperimentalno dobivenim podacima o mehaničkim svojstvima provedene su linearna i nelinearna numerička analiza. Cilj usporedbe linearnog i nelinearnog modela je prikaz i potvrda moguće veličine pogreške aproksimacije plastičnog područja linearnim modelom u odnosu na nelinearni model.

## 2. ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA I PONAŠANJA MATERIJALA

Prilikom konstruiranja pojedinačnih strojnih elemenata i različitih konstrukcija glavni zadatak konstruktora je osigurati trajnost, sigurnost i funkcionalnost pojedinačnih konstrukcijskih elemenata ili cjeline. Kako bi se osigurala spomenuta svojstva, potrebno je izbjeći pretjerano deformiranje odnosno lom konstrukcije uslijed djelovanja radnih opterećenja.

S konstruktorskog stajališta, osnova za izbjegavanje oštećenja ili u krajnjem slučaju loma konstrukcije, jest poznavanje vrste (statičko ili cikličko) i veličine opterećenja na konstrukciji radne okoline odnosno radnih uvjeta te mehaničkih svojstava i ponašanja materijala. Radna okolina može imati značajan utjecaj na svojstva i ponašanje materijala. Materijali izloženi povišenim i sniženim temperaturama kao i agresivnim okolinama imaju znatno različito ponašanje. Osim toga, mehanička svojstva materijala uvelike ovise o strukturnom stanju materijala. Poznavanjem odnosa struktura materijala – mehanička svojstva moguće je odrediti mehanička svojstva samo za idealne materijale. Kako materijali u stvarnom svijetu nisu idealni te su u njima prisutne strukturne nepravilnosti, mehanička svojstva precizno se mogu odrediti jedino eksperimentalno. Mehanička svojstva i ponašanje materijala određuju se provođenjem različitih standardiziranih ispitivanja na odgovarajućim eksperimentalnim strojevima i standardnim ispitnim uzorcima, još nazivanih epruvetama. Ispitni uzorci mogu biti napregnuti na vlak, tlak, savijanje i uvijanje [1].

Postupci ispitivanja mehaničkih svojstava materijala mogu se podijeliti na statička (monotona) i dinamička (ciklička). Kod statičkih ispitivanja iznos opterećenja tijekom ispitivanja mijenja se polagano kako bi se naprezanje moglo promatrati kao statičko, dok se kod dinamičkih ispitivanja intenzitet opterećenja mijenja ciklički. Osnovna mehanička svojstva i ponašanje materijala određuju se jednoosnim statičkim vlačnim opterećenjem uzorka, postupkom koji se uobičajeno naziva statički vlačni pokus.

### 2.1. Mehaničko ponašanje materijala pri djelovanju statičkog opterećenja

Statičko ispitivanje je jedan od osnovnih načina i oblika ispitivanja materijala u cilju karakterizacije ponašanja materijala u području elastičnih i elastoplastičnih deformacija odnosno elastičnom i plastičnom području. Ovim ispitivanjem dobivaju se podaci o svojstvima materijala kao što su granica tečenja  $R_e$ , vlačna čvrstoća  $R_m$ , modul elastičnosti  $E$ , istežljivost  $A$  i suženje

poprečnog presjeka Z. Statički vlačni pokus provodi se na uređajima koji se nazivaju univerzalne kidalice ili skraćeno kidalice. Kidalice (slika 2.1) kontinuirano vlačno opterećuju ispitni uzorak do loma te pritom bilježe silu i produljenje ispitnog uzorka, odnosno pomak traverze. Osim mogućnosti vlačnog opterećenja uz pomoć odgovarajuće opreme, kidalice se mogu prilagoditi i podesiti za provođenje tlačnog, savojnog i torzijskog opterećenja. Opterećenje na kidalici se može ostvariti mehanički ili hidraulički [1].



Slika 2.1. Univerzalna kidalica [2]

Ispitni uzorci koji se opterećuju na kidalicama mogu biti standardni, nestandardni i stvarni strojni elementi. Nestandardni ispitni uzorci vrlo rijetko se koriste i mogu biti različitih oblika poprečnog presjeka i dimenzija. Najčešće korišteni ispitni uzorci su standardni ispitni uzorci. Standardni ispitni uzorci mogu biti kružnog, kvadratnog i pravokutnog poprečnog presjeka. Oni moraju biti standardnih dimenzija kako bi se osigurala ispravnost, pouzdanost i usporedivost dobivenih rezultata. Na slici 2.2 prikazan je standardni ispitni uzorak pravokutnog poprečnog presjeka, a na slici 2.3 set standardnih ispitnih uzoraka kružnog poprečnog presjeka.

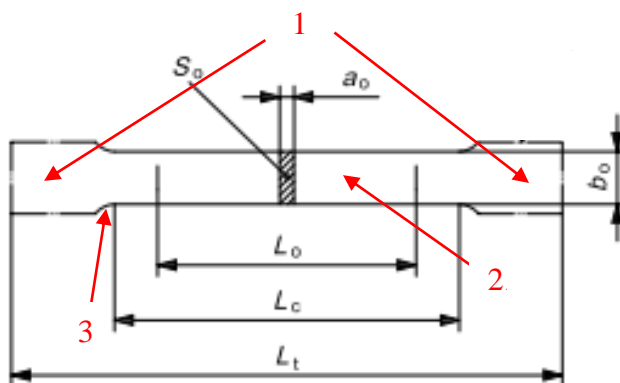


Slika 2.2. Standardni ispitni uzorak pravokutnog poprečnog presjeka

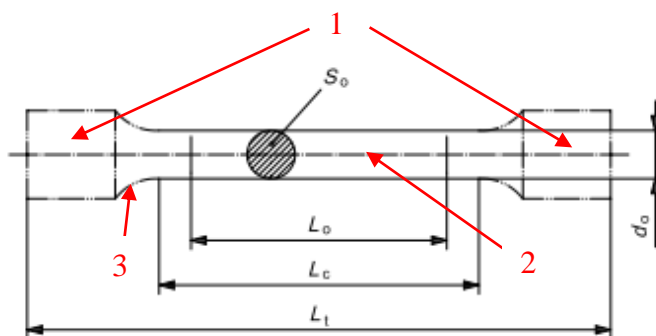


Slika 2.3. Set standardnih ispitnih uzoraka kružnog poprečnog presjeka

Na slici 2.4 i 2.5 prikazane su karakteristične dimenzije i izgled standardnih ispitnih uzoraka pravokutnog i kružnog poprečnog presjeka prema ISO 6892-1 2019. Kroz ovaj diplomski rad standardni ispitni uzorci skraćeno će se nazivati samo ispitni uzorci.



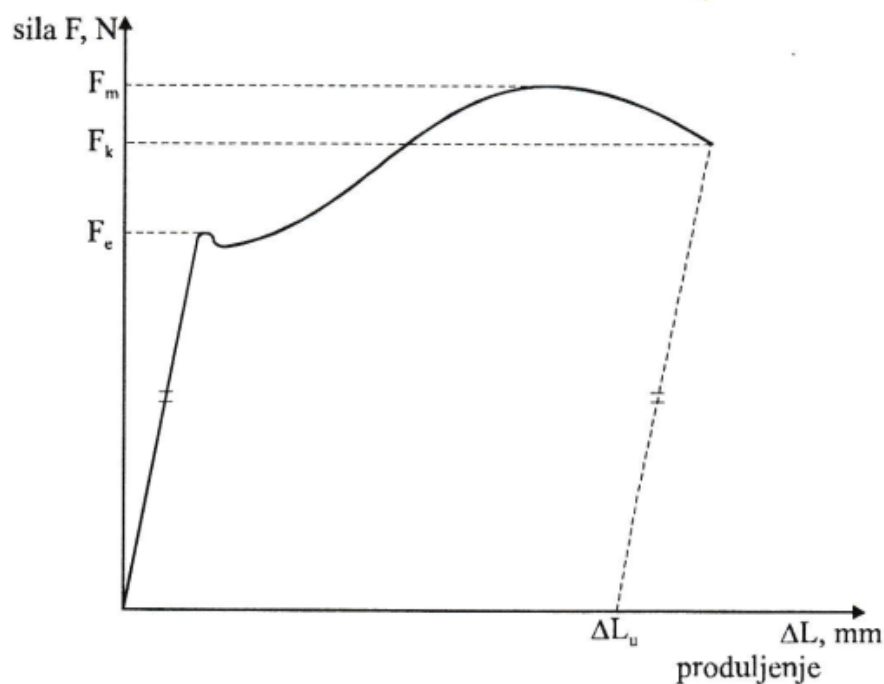
Slika 2.4. Standardni ispitni uzorak pravokutnog poprečnog presjeka prema ISO 6892-1 2019 [3]



Slika 2.5. Standardni ispitni uzorak kružnog poprečnog presjeka prema ISO 6892-1 2019 [3]

Svi ispitni uzorci imaju standardan izgled. Na slikama 2.4 i 2.5 označeni su osnovni dijelovi ispitnih uzoraka. Ispitni uzorak sastoji se od krajeva ispitnih uzoraka (1) koji se postepeno spajaju sa strukom ispitnog uzorka (2) manjih dimenzija pomoću prijelaznih radijusa (3). Krajevi ispitnih uzoraka (1) služe kako bi se ispitni uzorak učvrstio u čeljusti kidalice. Struk ispitnog uzorka (2) manje dimenzije nego krajevi ispitnog uzorka (1) služi kao područje ispitivanja. Razlog manje dimenzije struka ispitnog uzorka u odnosu na krajeve je kako bi se osigurao lom ispitnog uzorka u području struka.

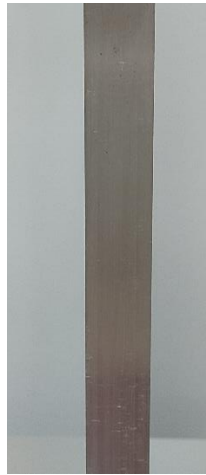
Prilikom izvođenja ispitivanja, ispitni uzorak se učvrsti u kidalicu te zatim pokretanjem kidalice dolazi do pomicanja traverze određenom brzinom. Brzina pomicanja traverze određena je normom te nam ovisi o području kojeg ispitujemo (elastično ili plastično) i podacima koje želimo dobiti. Ona je izražena u mm/min. Ispitni uzorak se postepeno opterećuje te softver bilježi silu kidanja  $F$  i produljenje  $\Delta L$  sve do loma, te se iscrtava dijagram sila–produljenje  $F$ – $\Delta L$ . Na slici 2.6 prikazan je tipični dijagram sila – produljenje za konstrukcijski čelik.



Slika 2.6. Dijagram sila – produljenje  $F$  –  $\Delta L$  za konstrukcijski čelik [4]

Dijagram sila–produljenje  $F$ – $\Delta L$  može se podijeliti na dva karakteristična područja. U prvom području ovisnost sile i produljenja je linearan te se naziva elastično područje. Elastično područje specifično je po tome što u njemu vrijednost sile linearno raste sve dok se ne dostigne sila tečenja  $F_e$ . Bilo koje produljenje u elastičnom području je reverzibilno, odnosno prestankom

djelovanja opterećenja materijal se vraća u prvobitni oblik. Izgled ispitnog uzorka u elastičnom području prikazan je na slici 2.7. Na ispitnom uzorku na slici 2.7 nisu vidljive nikakve deformacije.



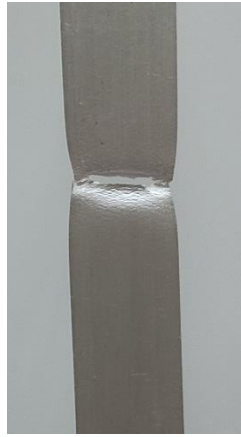
*Slika 2.7. Karakterističan izgled epruvete u elastičnom području*

Nakon dostizanja sile tečenja prelazi se u drugo karakteristično područje koje se naziva plastično područje. U plastičnom području prvobitno dolazi do malog pada sile te zatim sila nastavlja nelinearno rasti sve dok se ne dostigne vrijednost  $F_m$  – maksimalna sila prilikom ispitivanja [4]. U toj točki dolazi do značajnog smanjenja površine poprečnog presjeka ispitnog uzorka (*engl. necking*) prikazanog na slici 2.8.



*Slika 2.8. Smanjenje površine poprečnog presjeka (engl. Necking)-čelik AISI 304*

Posljedica smanjenja površine poprečnog presjeka je smanjivanje potrebne sile za daljnje kidanje ispitnog uzorka. Sila pada nelinearno sve do vrijednosti  $F_k$  – sila loma ispitnog uzorka [4]. Na slici 2.9 prikazan je izgled ispitnog uzorka pri vrijednosti sile loma  $F_k$ .



*Slika 2.9. Izgled polomljenog ispitnog uzorka pri lomnoj sili*

Nakon loma ispitnog uzorka ispitivanje se zaustavlja, ispitni uzorka se skida s kidalice te se ponovno sastavlja i mjeri kako bi se dobilo produljenje epruvete nakon kidanja koje se računa prema izrazu (1):

$$\Delta L_u = L_u - L_0 \quad (1)$$

gdje je:

- $\Delta L_u$  – ukupno produljenje duljine ispitnog uzorka [mm]
- $L_u$  – duljina ispitnog uzorka nakon kidanja [mm]
- $L_0$  – početna duljina ispitnog uzorka [mm].

Vrijednost ukupnog produljenja ispitnog uzorka  $\Delta L_u$  može se odrediti grafički kao što je prikazano na slici 2.6. Kako bi se ta vrijednost odredila grafički potrebno je u točki na dijagramu sila–produljenje  $F$ – $\Delta L$  koja odgovara sili loma  $F_k$  povući pravac koji je paralelan s linearnim dijelom u dijagramu sve dok pravac ne presječe apscisu. Sjecište pravca i apscise predstavlja produljenje ispitnog uzorka.

Dijagram sila–produljenje  $F$ – $\Delta L$  sam po sebi nije dobar pokazatelj mehaničkih svojstva materijala, niti su ona prikazana na njemu. Potrebno je iz dobivenih podataka o sili izračunati inženjersko naprezanje, na način da se sila podijeli s početnom površinom poprečnog presjeka ispitnog uzorka kao u izrazu (2):

$$S = \frac{F}{A_0} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (2)$$

gdje je:

- $S$  – inženjersko naprezanje [N/mm<sup>2</sup>]
- $F$  – vlačna sila [N]
- $A_0$  – početna površina poprečnog presjeka ispitnog uzorka [mm<sup>2</sup>].

Nakon toga, produljenje ispitnog uzorka  $\Delta L$  potrebno je podijeliti s početnom duljinom ispitnog uzorka  $L_0$  kako bi se dobilo relativno produljenje (inženjerska deformacija) ili istežanje prikazano izrazom (3):

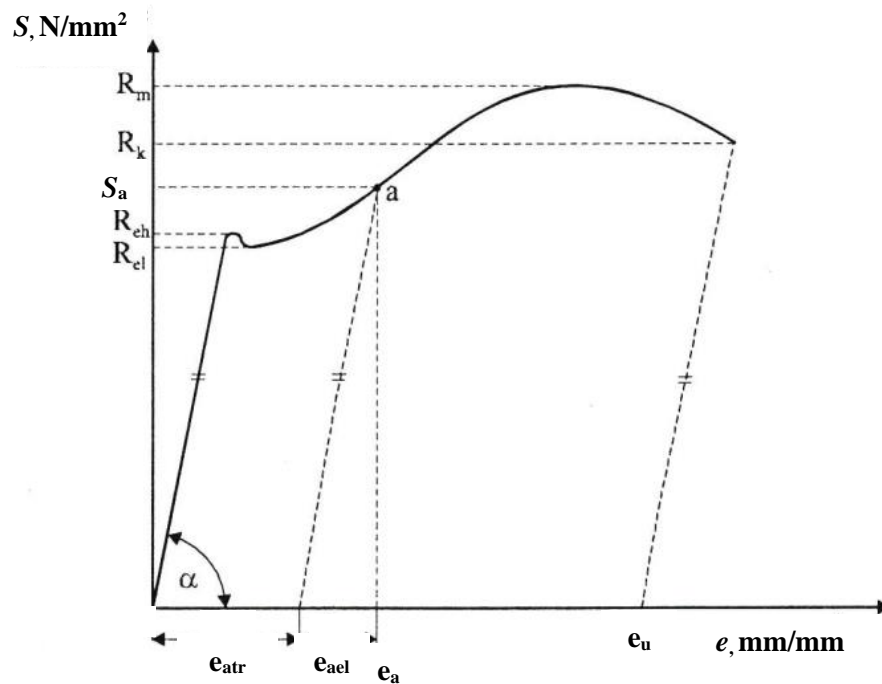
$$e = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3)$$

gdje je:

- $e$  – inženjerska deformacija (relativno produljenje) [mm/mm]
- $\Delta L$  – produljenje ispitnog uzorka [mm]
- $L_0$  – početna duljina ispitnog uzorka [mm].

Na temelju proračunatog inženjerskog naprezanja i relativnog produljenja iscrtava se dijagram inženjersko naprezanje–inženjerska deformacija  $S$ – $e$ . Ovakav dijagram dobar je pokazatelj mehaničkih svojstva materijala. Važno je napomenuti da se u ovom dijagramu ne uzima u obzir smanjenje poprečnog presjeka odnosno povećanje duljine ispitnog uzorka uslijed djelovanja vlačne sile [4]. Na slici 2.10 prikazan je dijagram inženjersko naprezanje–inženjerska deformacija  $S$ – $e$  za prethodno navedeni konstrukcijski čelik.





Slika 2.10. Dijagram inženjersko naprezanje-inženjerska deformacija S-e konstrukcijskog čelika [4]

Kao i dijagram sila–produljenje  $F-\Delta L$  ovaj dijagram također započinje linearno, te ima dva karakteristična područja (elastično i plastično). U dijagramu inženjersko naprezanje–inženjerska deformacija  $S-e$  pravac u elastičnom području naziva se Hookeov pravac i u tom području vrijedi opći Hookeov zakon koji glasi:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (4)$$

gdje je:

- $\sigma$  – naprezanje [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]
- $E$  – modul elastičnosti [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]
- $\varepsilon$  – relativno produljenje (deformacija) [ $\text{mm}/\text{mm}$ ]

Izgled ispitnog uzorka u elastičnom području isto je predstavljen slikom 2.7.

Modul elastičnosti je mjera za krutost materijala. U dijagramu na slici 2.10 prikazan je nagibom pravca u linearnom području. Što je pravac strmiji modul elastičnosti je veći i obratno. Svako naprezanje u elastičnom području uzrokovati će elastičnu deformaciju te nakon

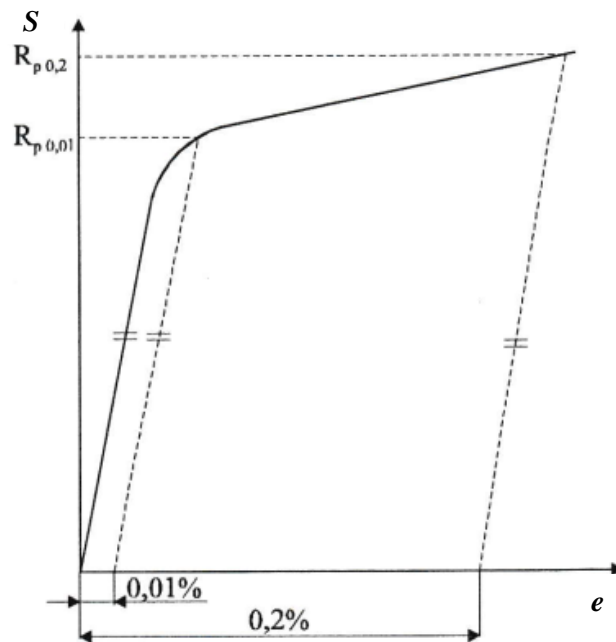
rasterećenja deformacija nestaje, odnosno materijal se vraća u prvobitni oblik. Elastično područje vrijedi sve do granice tečenja  $R_e$ . Granica tečenja je ono naprezanje kod kojeg se ispitni uzorak počinje plastično deformirati bez povećanja sile [2]. Ona se utvrđuje izrazom (5):

$$R_e = \frac{F_e}{A_0} \quad (5)$$

gdje je:

- $R_e$  – granica tečenja [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]
- $F_e$  – sila tečenja [N]
- $A_0$  – površina početnog poprečnog presjeka [ $\text{mm}^2$ ]

Granicu tečenja opisuju dvije karakteristične vrijednosti,  $R_{eh}$  – gornja granica tečenja i  $R_{el}$  – donja granica tečenja. Gornja granica tečenja maksimalna vrijednost naprezanja prije prvog pada sile [3]. Donja granica tečenja je najmanje naprezanje tijekom tečenja materijala [3]. Ovakav način određivanja granice tečenja vrijedi za materijale koji nemaju kontinuirani prijelaz iz elastičnog u plastično područje. Materijali koji imaju kontinuirani prijelaz iz elastično u plastično područje nemaju izraženu granicu prijelaza. Stoga se za takve materijale prema dogovoru određuje konvencionalna granica razvlačenja. Konvencionalna granica tečenja je ono naprezanje koje će u materijalu ostaviti određenu plastičnu deformaciju. Na slici 2.11 prikazan je materijal koji ima kontinuirani prijelaz iz elastičnog u plastično područje.



Slika 2.11. Materijal s kontinuiranim prijelazom iz elastičnog u plastično područje [4]

Na slici 2.11 može se uočiti dvije konvencionalne granice tečenja  $R_{p0,2}$  i  $R_{p0,01}$ . Prema dogovoru to su dvije najčešće korištene konvencionalne granice tečenja. Konvencionalna granica tečenja  $R_{p0,2}$  predstavlja naprezanje koje će uzrokovati deformaciju od 0,2%.

Prolaskom kroz elastično područje ulazi se u plastično područje. Najbitnija veličina tamo je vlačna čvrstoća  $R_m$ . Vlačna čvrstoća predstavlja naprezanje pri najvećoj sili. Nakon dosegnute vlačne čvrstoće dolazi do pojave *engl. neckinga* te se naprezanje lokalizira na jednom mjestu (slika 2.8). Naprezanje pri lomu ispitnog uzorka naziva se konačno naprezanje  $R_k$  te je predstavljeno izrazom (6):

$$R_k = \frac{F_k}{A_0} \quad (6)$$

gdje je:

- $R_k$  – konačno naprezanje [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]
- $F_k$  – konačna sila [N]
- $A_0$  – površina početnog poprečnog presjeka [ $\text{mm}^2$ ]

Izgled ispitnog uzorka nakon loma predstavljen je slikom 2.9.

Statičkim vlačnim pokusom također se određuje istezljivost  $A$  i suženje (kontrakcija) poprečnog presjeka  $Z$ . Istezljivost  $A$  predstavljena je izrazom (7):

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100\% \quad (7)$$

gdje je:

- $A$  – istezljivost [%]
- $L_u$  – duljina ispitnog uzorka nakon kidanja [mm]
- $L_0$  – početna duljina ispitnog uzorka [mm].

Suženje poprečnog presjeka predstavljeno je izrazom (8):

$$Z = \frac{A_0 - A_u}{A_0} \cdot 100\% \quad (8)$$

gdje je:

- $Z$  – suženje (kontrakcija) ispitnog uzorka [%]
- $A_0$  – površina početnog poprečnog presjeka ispitnog uzorka [mm<sup>2</sup>]
- $A_u$  – površina konačnog poprečnog presjeka ispitnog uzorka [mm<sup>2</sup>]

Sve prethodno obrađene vrijednosti od granice tečenja pa sve do suženja (kontrakcije) predstavljaju i vrijede za dijagram inženjersko naprezanje–inženjerska deformacija  $S$ – $e$ , odnosno pojednostavljeni dijagram u kojem se kako je već prethodno rečeno ne uzima u obzir smanjenje površine poprečnog presjeka. U stvarnosti prilikom kidanja ispitnog uzorka, njegov poprečni presjek se smanjuje i duljina ispitnog uzorka se povećava. Smanjenje poprečnog presjeka vrlo je teško kontinuirano pratiti i mjeriti. Stoga je vrijednosti stvarnog naprezanja  $\sigma$  i stvarne deformacije  $\varepsilon$  moguće izračunati iz inženjerskog naprezanja  $S$  i inženjerske deformacije  $e$  koristeći se izrazima (9) i (10) [4]:

$$\sigma = S(1 + e) \quad (9)$$

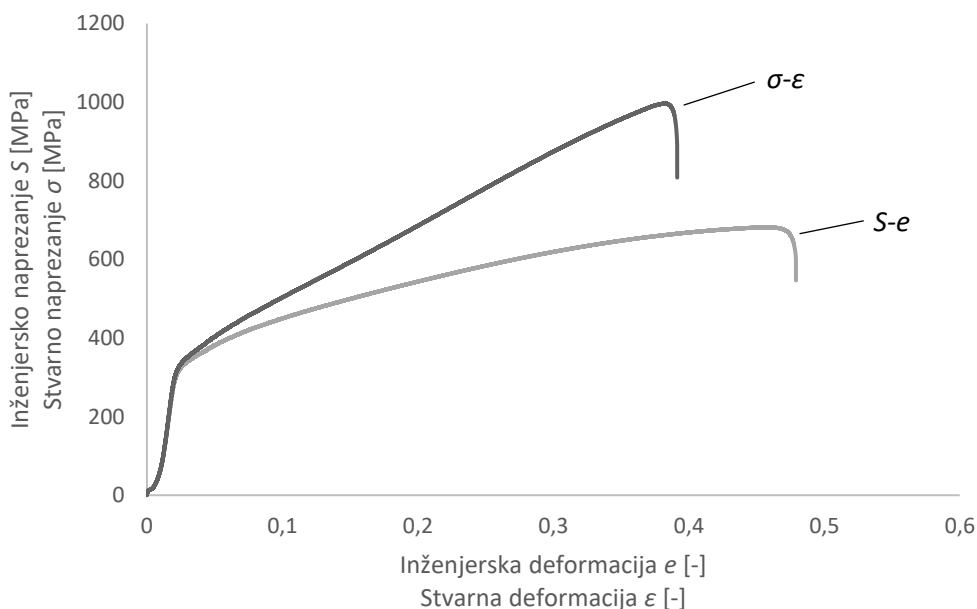
$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad (10)$$

gdje je:

- $\sigma$  – stvarno naprezanje [N/mm<sup>2</sup>]
- $S$  – inženjersko naprezanje [N/mm<sup>2</sup>]
- $e$  – inženjerska deformacija [mm/mm]
- $\varepsilon$  – stvarna deformacija [mm/mm].

Vrijednosti dobivene koristeći se izrazima (9) i (10) vrijede sve do pojave izraženog smanjenja poprečnog presjeka (*engl. neckinga*).

Na slici 2.12 prikazana je usporedba stvarnog i inženjerskog dijagrama naprezanje – deformacija.



Slika 2.12. Stvarni i inženjerski dijagram naprezanje-deformacija

Usporedbom krivulja na slici 2.12 može se doći do zaključka da su dijagram identični u elastičnom području. Stoga prilikom konstruiranja svejedno nam je kojim ćemo se dijagramom služiti jer konstrukcije uglavnom proračunavamo u elastičnom području i ne želimo da dođe do trajnih (plastičnih) deformacija. U slučaju da se one ipak nepredviđeno dogode koristeći se dijagramom inženjersko naprezanje–inženjerska deformacija  $S$ – $e$  nalazimo se na strani sigurnosti jer su naprežanja u plastičnom području znatno manja u odnosu na ona u dijagramu stvarno naprezanje–stvarna deformacija  $\sigma$ – $\varepsilon$ .

## 2.2. Pregled norme HRN EN ISO 6892-1

Norma HRN EN ISO 6892-1 je međunarodna norma za provođenje ispitivanja metalnih materijala i definiranja svojstva koja se mogu odrediti pri sobnoj temperaturi. Puni naziv norme je „Metalni materijali – Vlačno ispitivanje – Metoda ispitivanja pri sobnoj temperaturi (*engl. Metallic materials – Tensile testing – Method of test at room temperature*). Norma obuhvaća i vodi ispitivača kroz cjelokupni proces ispitivanja metalnih materijala kroz nekoliko poglavlja i dodataka. Poglavlja i dodaci su redom:

- Princip metode
- Ispitni uzorci
- Definiranje poprečnog presjeka ispitnih uzoraka
- Definiranje izvorne mjerne duljine
- Preciznost ispitnih strojeva
- Uvjeti ispitivanja
- Zasebna poglavlja o pojedinom mehaničkom svojstvu (kao što su  $R_{eh}$ ,  $R_{el}$ ,  $R_m$ ...)
- dodaci A do L.

Prije definiranja principa ispitivanja, norma ispitivača prvo upozna s pojmovima relevantnim za provođenje ispitivanja. Relevantni pojmovi, njihove definicije i oznake prilikom provođenja statičkog vlačnog pokusa prema HRN EN ISO 6892-1 [3] su:

- mjerna duljina (*engl. gauge length*),  $L$  [mm] – duljina struka epruvete gdje se mjeri produljenje prilikom ispitivanja [mm]
- izvorna mjerna duljina (*engl. original gauge length*),  $L_0$  [mm] – udaljenost između prethodno, proizvoljno postavljenih oznaka na struku ispitnog uzorka [mm]
- mjerna duljina nakon puknuća (*engl. final gauge length after fracture*),  $L_u$  [mm] – izmjerena udaljenost između prethodno postavljenih oznaka nakon puknuća, kada se ispitni uzorak pažljivo ponovno sastavio
- paralelna duljina (*engl. parallel length*),  $L_c$  [mm] – duljina struka koja ne uzima u obzir prijelazne radijuse
- početna debljina plosnatih uzoraka,  $a_0$  [mm]


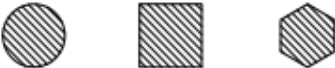
- početna širina plosnatih uzoraka,  $b_0$  [mm]
- početni promjer cilindričnih uzoraka,  $d_0$  [mm]
- početna površina poprečnog presjeka ispitnih uzoraka,  $S_0$  [mm<sup>2</sup>]
- površina poprečnog presjeka ispitnih uzoraka nakon loma,  $S_u$  [mm<sup>2</sup>]
- maksimalna sila (*engl. maximum force*),  $F_m$  [N] – najveća sila koju ispitni uzorak može izdržati prilikom ispitivanja
- naprezanje (*engl. stress*),  $R$  [N/mm<sup>2</sup>] – sila podijeljena sa početnom površinom poprečnog presjeka u bilo kojem trenutku ispitivanja (oznaka  $R$  u normi predstavlja isključivo inženjersko naprezanje)
- vlačna čvrstoća (*engl. tensile strength*),  $R_m$  [N/mm<sup>2</sup>] – naprezanje pri maksimalnoj sili
- gornja granica tečenja (*engl. upper yield strength*),  $R_{eh}$  [N/mm<sup>2</sup>] – najveće naprezanje prije prvog smanjenja sile
- donja granica tečenja (*engl. lower yield strength*),  $R_{eL}$  [N/mm<sup>2</sup>] – najmanje naprezanje tijekom tečenja
- modul elastičnosti (*engl. modulus of elasticity*),  $E$  [N/mm<sup>2</sup>] – mjera krutosti materijala
- produljenje (*engl. elongation*) – porast izvorne mjerne duljine u bilo kojem trenutku ispitivanja
- deformacija (*engl. strain*),  $e$  [mm/mm] – omjer između produljenja i originalne duljine ispitnog uzorka (oznaka  $e$  predstavlja isključivo inženjersku deformaciju)
- brzina ispitivanja (*engl. testing rate*)

- brzina deformacije (*engl. strain rate*),  $\dot{\epsilon}_{L_c} \left[ \frac{mm}{s} \right]$  – porast deformacije u vremenu mjereno ekstenzometrom
- brzina gibanja traverze (*engl. crosshead separation rate*),  $v_c$  [mm/s]– pomak traverze u jedinici vremena
- lom (*engl. fracture*) – događaj koji se pojavi prilikom razdvajanja ispitnog uzorka na dva dijela

Zatim redom slijede poglavlja o opisu postupka ispitivanja, definiranju oblika i dimenzija ispitnih uzoraka, metodama ispitivanja (metoda A i metoda B), zasebna poglavlja za svako svojstvo materijala i primjer ispravnog dijagrama inženjersko naprezanje–inženjerska deformacija  $S$ – $e$  za metalne materijale.

Statički vlačni pokus uključuje naprezanje ispitnog uzorka vlačnim opterećenjem do loma kako bi se odredilo jedno ili više prethodno definiranih svojstava. Ispitivanje se provodi pri sobnoj temperaturi između 10 °C i 35 °C. Ispitni uzorci dobivaju se strojnom obradom gotovih poluproizvoda. Općenito, poluproizvodi su dobiveni hladnim ili toplim valjanjem materijala u trake ili šipke. Površina poprečnog presjeka ispitnih uzoraka (tablica 2.1) može biti kružna, kvadratna, pravokutna ili bilo kojeg drugog jednoličnog poprečnog presjeka [3]. Kako bi se osigurao ispravan odabir dimenzija poprečnog presjeka i duljine ispitnog uzorka one su dane i opisane u pripadajućim aneksima.

Tablica 2.1. Podjela ispitnih uzoraka prema poprečnom presjeku i pripadajući aneksi [3]

Tip gotovog poluproizvoda		Odgovarajući aneks
Limovi – Trake – Plosnati dijelovi  a - debljina	Žice – Šipke – Presjeci 	
$0,1 \leq a \leq 3$	–	B
–	$\leq 4$	C
$a \geq 3$	$\geq 4$	D
Cijevi		E

Ispitni uzorci imaju međusobno zavisnu vezu između izvorne mjerne duljine  $L_0$  i početne površine poprečnog presjeka  $S_0$  koja je predstavljena izrazom (11):



$$L_0 = k\sqrt{S_0} \quad (11)$$

gdje je:

- $L_0$  – izvorna mjerna duljina [mm]
- $k$  – koeficijent proporcionalnosti [-]
- $S_0$  – početna površina poprečnog presjeka [mm<sup>2</sup>]

Ovisno o vrijednosti koeficijenta  $k$  ispitni uzorci mogu se podijeliti na kratke ( $k = 5,65$ ) i duge ( $k = 11,3$ ). Najčešće korištena vrijednost koeficijenta proporcionalnosti je 5,65. Prilikom određivanja izvorne mjerne duljine mora se osigurati da ona ne bude manja od 15 mm kako bi se osigurala pouzdanost ispitivanja.

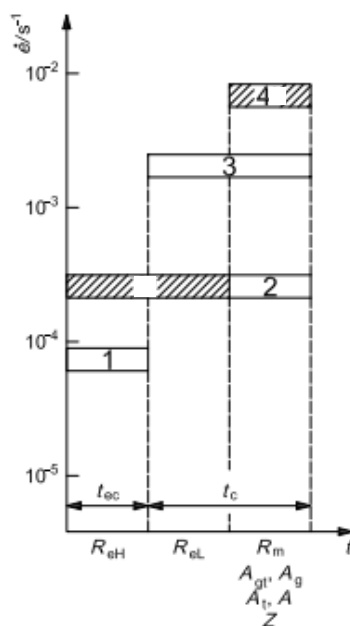
Ispitivanje se provodi prema metodi A ili metodi B. Metoda A bazirana je na promjeni brzine deformacije dok metoda B bazirana je na promjeni brzine naprezanja. Nadalje metoda A može se podijeliti na metode A1 i A2. Kod metode A1 brzina promjene deformacije kontrolira se pomoću informacija dobivenih od strane ekstenzometra. Metoda A2 koristi se za provođenje ispitivanja bez ekstenzometra. Koristeći se izrazom (12) računa se brzina gibanja traverze  $v_c$ .

$$v_c = L_c \cdot \dot{\epsilon}_{L_c} \quad (12)$$

gdje je:

- $v_c$  – brzina gibanja traverze [mm/s]
- $L_c$  – paralelna duljina [mm]
- $\dot{\epsilon}_{L_c}$  – brzina deformacije  $\left[ \frac{\text{mm}}{\text{s}} \right]$

Brzina gibanja traverze ovisi o paralelnoj duljini ispitnog uzorka i brzini deformacije koja se aproksimira. Za određivanje pojedinih mehaničkih svojstva ne postoji univerzalna brzina kojom se može provesti ispitivanje. Stoga su brzine deformacije podijeljene u četiri osnovne grupe u ovisnosti o svojstvima koja se ispituju prikazane na slici 2.13.



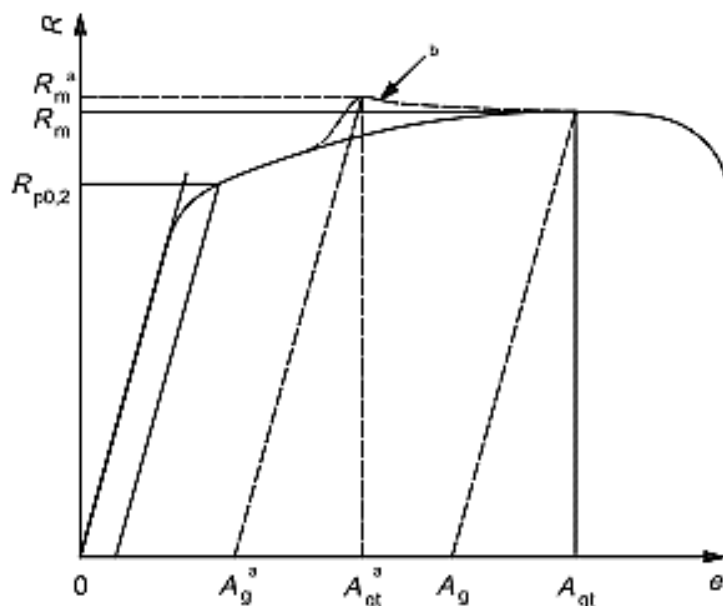
Slika 2.13. Brzine deformacije i pripadajuća mehanička svojstva [3]

Prema slici 2.13 grupe i njihove odgovarajuće brzine su:

- Grupa 1 –  $\dot{\epsilon}_{Lc} = 0,000\ 07\ s^{-1}$ ,
- Grupa 2 –  $\dot{\epsilon}_{Lc} = 0,000\ 25\ s^{-1}$ ,
- Grupa 3 –  $\dot{\epsilon}_{Lc} = 0,002\ s^{-1}$  i
- Grupa 4 –  $\dot{\epsilon}_{Lc} = 0,0067\ s^{-1}$ .

Grupa 1 predstavlja najmanju brzinu deformacije te se pomoću te brzine može odrediti gornja granica tečenja  $R_{eH}$ . Također u normi prema Aneksu G, samo prethodno navedena brzina deformacije je dozvoljena za korištenje prilikom određivanja modula elastičnosti metalnih materijala. Prilikom određivanja modula elastičnosti potrebno je vrlo sporo proći kroz elastično područje kako bi ekstenzometar zabilježio što više malih pomaka. Pomoću brzine deformacije u grupi 2 može se odrediti gornja granica tečenja  $R_{eH}$  i donja granica tečenja  $R_{eL}$ . Predzadnja grupa, grupa 3 koristi se za određivanje donje granice tečenja  $R_{eL}$ , vlačne čvrstoće  $R_m$ , produljenja  $A$  i kontrakcije  $Z$ . Ispitivanja najčešće kombiniraju dvije grupe brzina kako bi se ispitivanje izvelo ispravno i efikasno uz što manji utrošak vremena. Jedna od najčešćih kombinacija je korištenje grupe 1 kako bi se odredila granica tečenja i modul elastičnosti te grupe 3 kako bi se odredila vlačna čvrstoća, produljenje i kontrakcija. Prilikom kombiniranja dvije grupe brzina deformacije potrebno je osigurati postepeni prijelaz između brzina kako bi se osiguralo dobivanje ispravnih

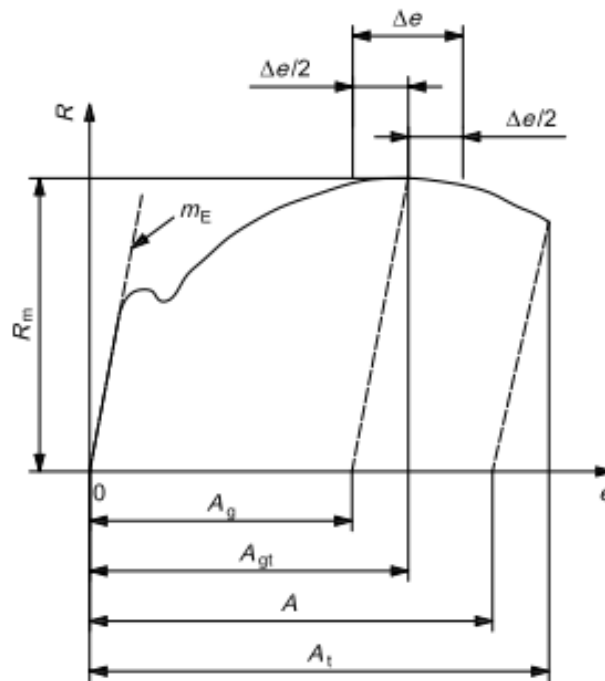
rezultata [3]. Slika 2.14 prikazuje ispravan i neispravan rezultat promjene brzine deformacije iz niže u višu.



Slika 2.14. Rezultat ispravne i neispravne promjene brzine deformacije [2]

Na slici 2.14 punom crtom nacrtana je krivulja inženjersko naprezanje–inženjerska deformacija  $S-e$  dobivena postepenom promjene brzine iz niže u višu. Prilikom nagle promjene brzine deformacije iz niže u višu dobiva se iscrtkana krivulja. Promatranjem iscrtkane krivulje na mjestu  $b$  može se uočiti nagli porast naprezanja. Na tom mjestu došlo je do naglog porasta brzine deformacije što je uzrokovalo značajan porast sile prilikom ispitivanja na kidalici. Veliki porast sile uzrokovao je ne ispravni oblik dijagrama inženjersko naprezanje–inženjerska deformacija  $S-e$ . Rezultat toga je dobivanje „lažnih“ vrijednosti naprezanja. Na slici 2.14 nalazi se ispravna vrijednost vlačne čvrstoće  $R_m$  i vrijednost  $R_{m^a}$  što predstavlja „lažno“ naprezanje.

Određivanjem parametara ispitnog uzorka i brzina ispitivanja dobivene su sve potrebne informacije za provođenje ispitivanja kako bi se dobili validni podaci. Prema normi, na slici 2.15 prikazan je dijagram inženjersko naprezanje–inženjerska deformacija  $S-e$  dobro provedenog ispitivanja metalnog materijala s diskontinuiranim tečenjem.



Slika 2.15. Rezultat ispitivanja metalnog materijala prema normi HRN EN ISO 6892-1[3]

Na slici 2.15 nalaze se sljedeće veličine:

- vlačna čvrstoća,  $R_m$
- pravac modula elastičnosti  $m_E$
- postotno produljenje nakon loma,  $A$
- postotno plastično produljenje pri maksimalnoj sili  $A_g$
- postotno totalno produljenje pri maksimalnoj sili  $A_{gt}$
- postotno totalno produljenje pri lomu  $A_t$
- inženjerska deformacija  $e$ .

### 3. MATERIJALI

Legure aluminija i korozijski postojani čelici sve veću primjenu nalaze pri konstruiranju lakih konstrukcija zbog svojih povoljnih svojstva kao što su niska gustoća, visok omjer čvrstoće i mase i korozijska postojanost. Cilj ovog rada je dobiti podatke o mehaničkim svojstvima legura aluminija i korozijskih postojanih čelika. Stoga je u sklopu ovog diplomskog rada provedeno ispitivanje legura aluminija AlMgSi0,5 i korozijskih postojanih čelika AISI 316L i AISI 304. U sljedeća dva poglavlja dan je kratki pregled prethodno spomenutih grupa materijala.

#### 3.1. Aluminij i aluminijske legure

Aluminij pripada lakim metalima niskog tališta. U zemljinoj kori približno ga ima oko 7,5% u obliku spojeva oksida ili mješavine oksida. Najčešća rudača za dobivanje aluminija je boksit. Postupak dobivanja aluminija je sljedeći

Iz boksita se izluživanjem pomoću NaOH dobiva glinica ( $Al_2O_3$ ). Nakon izluživanja glinica se podvrgava elektrolizi te se naposljetku dobiva aluminij. Prethodno opisanim postupkom dobiva se čisti aluminij ili tehnički čisti aluminij [5]. Tehnički čisti aluminij ima sljedeća karakteristična svojstva:

- niska gustoća
- otpornost na koroziju
- nemagnetičnost
- visoka električna vodljivost
- visoka toplinska vodljivost
- hladna deformabilnost
- reciklabilnost
- nisko talište
- nizak modul elastičnosti
- loša zavarljivost.

Tehnički aluminij se uglavnom kao inženjerski materijal primjenjuje zbog njegove niske gustoće, hladne deformabilnosti (plošno centrirana rešetka, FCC) i korozijske postojanosti. Korozijska postojanost temelji se na postojanju oksidnog sloja na površini metala. Oksidni sloj se prilikom oštećenja brzo regenerira i nadomješta novim.

Tehnički čisti aluminij svoju primjenu uglavnom nalazi u kućanstvu, građevinarstvu i kemijskoj i prehrambenoj industriji. Od njega se izrađuje kuhinjsko posuđe, posude i rezervoari u kemijskoj i prehrambenoj industriji i krovovi u građevinarstvu. Tehnički čisti aluminij sam po sebi ima vrlo nisku čvrstoću stoga nije pogodan za izradu konstrukcija. Zbog toga se on legira kako bi mu se poboljšala mehanička i tehnološka svojstva. Najčešći legirni elementi su: silicij, magnezij i bakar [5]. Aluminijske legure mogu biti lijevane i gnječene.

Lijeivane aluminijske legure se mogu podijeliti u tri grupe prema najčešćim legirnim elementima, Al-Si, Al-Mg i Al-Cu.

One imaju vrlo dobru livljivost te se mogu lijeivati svim konvencionalnim postupcima lijeivavanja. Lijeivane legure se prvenstveno koriste u automobilskoj (izrada blokova motora) i zrakoplovnoj industriji.

Gnječene legure izrađuju se hladnim deformiranjem iz poluproizvoda. Ovim postupkom povećava se čvrstoća legure. Osnovna primjena gnječenih legura je izrada šipki različitih profila i plosnatih traka.

Okvirni pregled komercijalnih aluminijskih legura u općim i konstrukcijskim primjenama i njihova svojstva:

- **AlMgSi0,5/EN AW 6060** (vlačna čvrstoća od 130 N/mm<sup>2</sup> do 245 N/mm<sup>2</sup>) [6]
  - Široko korištena legura aluminija prikladna za primjene gdje nisu potrebni visoki zahtjevi čvrstoće. Pogodna je za strojnu obradu i mogu se postići visoke kvalitete hrapavosti površine. Koristi se za kućanstva prilikom izrade namještaja, u građevini, strojarstvu i elektrotehnici.
- **AlMgSi0,7/EN AW 6005A** (vlačna čvrstoća od 270 N/mm<sup>2</sup>) [7]
  - Legura aluminija opće namjene. Koristi se za izradu srednje opterećenih konstrukcija. Tipično se koriste za izradu ljestva i u brodogradnji.
- **AlMgSi1/EN AW 6082** (vlačna čvrstoća od 205 N/mm<sup>2</sup> do 310 N/mm<sup>2</sup>) [8]
  - Legura aluminija s vrlo dobrom korozijskom postojanošću i odličnom kombinacijom mehaničkih i tehnoloških svojstva. Odlikuje se relativno visokom čvrstoćom, vrlo dobrom obradivosti i zavarljivosti. Svoju primjenu nalazi u

strojarstvu pri izradi visoko opterećenih i lakih konstrukcija. Vrlo dobro podnosi uvjete dinamičkih opterećenja.

### 3.2. Korozijski postojani čelici

Čelik je legura željeza i ugljika do 2% sadržaja ugljika. U svim čelicima prisutni su prateći elementi poput silicija i magnezija i nečistoća poput sumpora i fosfora. Općenito čelici se odlikuju sljedećim karakteristikama:

- visoka čvrstoća,
- visok modul elastičnosti,
- visoka istežljivost
- dobra tehnološka svojstva (obradivosti, rezljivosti i zavarljivosti),
- dobra toplinska vodljivost,
- električni vodič i
- visoka gustoća.

Prethodno navedene karakteristike čelika su općenite te one variraju u ovisnosti o vrsti čelika, odnosno mehanička svojstva svakog čelika ovise o kemijskom sastavu, mikrostrukturi i obliku i dimenzijama poluproizvoda.

S obzirom na prethodno navedeno, čelici se općenito mogu podijeliti prema: mikrostrukturi, području primjene i kemijskom sastavu.

Čelici se prema mikrostrukturi mogu podijeliti na: feritne, perlitne i austenitne čelike.

U ovisnosti o području primjene čelike dijelimo na: konstrukcijske, alatne i specijalne čelike.

Prema kemijskom sastavu čelike dijelimo na one zajamčenog ili nezajamčenog kemijskog sastava te na ugljične (nelegirane) ili legirane. Legirani čelici dijele se na nisko i visoko legirane čelike. U grupu legiranih čelika spadaju korozijski postojani čelici. Korozijski postojani čelici su čelici koji sadrže minimalno 12% kroma ili sadrže homogenu monofaznu mikrostrukturu, odnosno mikrostruktura mora biti isključivo samo feritna, austenitna ili martenzitna bez karbida, oksida i ostalih spojeva kako bi čelik bio korozijski postojan [9].

Okvirni pregled komercijalnih korozijskih postojanih čelika u općim i konstrukcijskim primjenama i njihova svojstva:

- **AISI 303** (vrijednost vlačne čvrstoće oko 510 N/mm<sup>2</sup>) [9]
  - AISI 303 je austenitni korozijski postojani čelik. Odlikuje se vrhunskom strojnom obradivosti zbog povećanog udjela sumpora kao legirnog elementa. Zbog povećanog udjela sumpora smanjena mu je korozijska postojanost. Ovaj čelik nije pogodan za hladno deformiranje i ima lošu zavarljivost. Primjenu nalazi u automobilskoj industriji, kuhinjskoj opremi i općem strojarstvu.
  
- **AISI 304** (vrijednost vlačne čvrstoće oko 500 N/mm<sup>2</sup> do 700 N/mm<sup>2</sup>) [10]
  - AISI 304 je austenitni krom-nikal čelik te je jedan od najpoznatijih i najčešće korištenih korozijski postojanih čelika. Karakterizira ga vrhunska korozijska postojanost, visoka čvrstoća i niski sadržaj ugljika što ga čini pogodnog za zavarivanje. Koristi se u općem strojarstvu, prehrambenoj i kemijskoj industriji.
  
- **AISI 316L** (vrijednost vlačne čvrstoće oko 500 N/mm<sup>2</sup> do 700 N/mm<sup>2</sup>) [11]
  - AISI 316L je korozijski postojani, austenitni krom-nikal-molibden čelik. Karakterizira ga dobra otpornost na opću koroziju, interkristalnu koroziju, ne oksidirajuće kiseline i dobra otpornost na klor. Može se primijeniti pri visokim temperaturama do 550°C. Svoje primjene nalazi u strojarstvu, kemijskoj i farmaceutskoj industriji.

U sklopu ovog diplomskog rada provedeno je ispitivanje mehaničkih svojstva i ponašanja aluminijevih legura i korozijskih postojanih čelika navedenih u uvodu ove cjeline koristeći se opremom koja će biti opisana u sljedećem poglavlju.

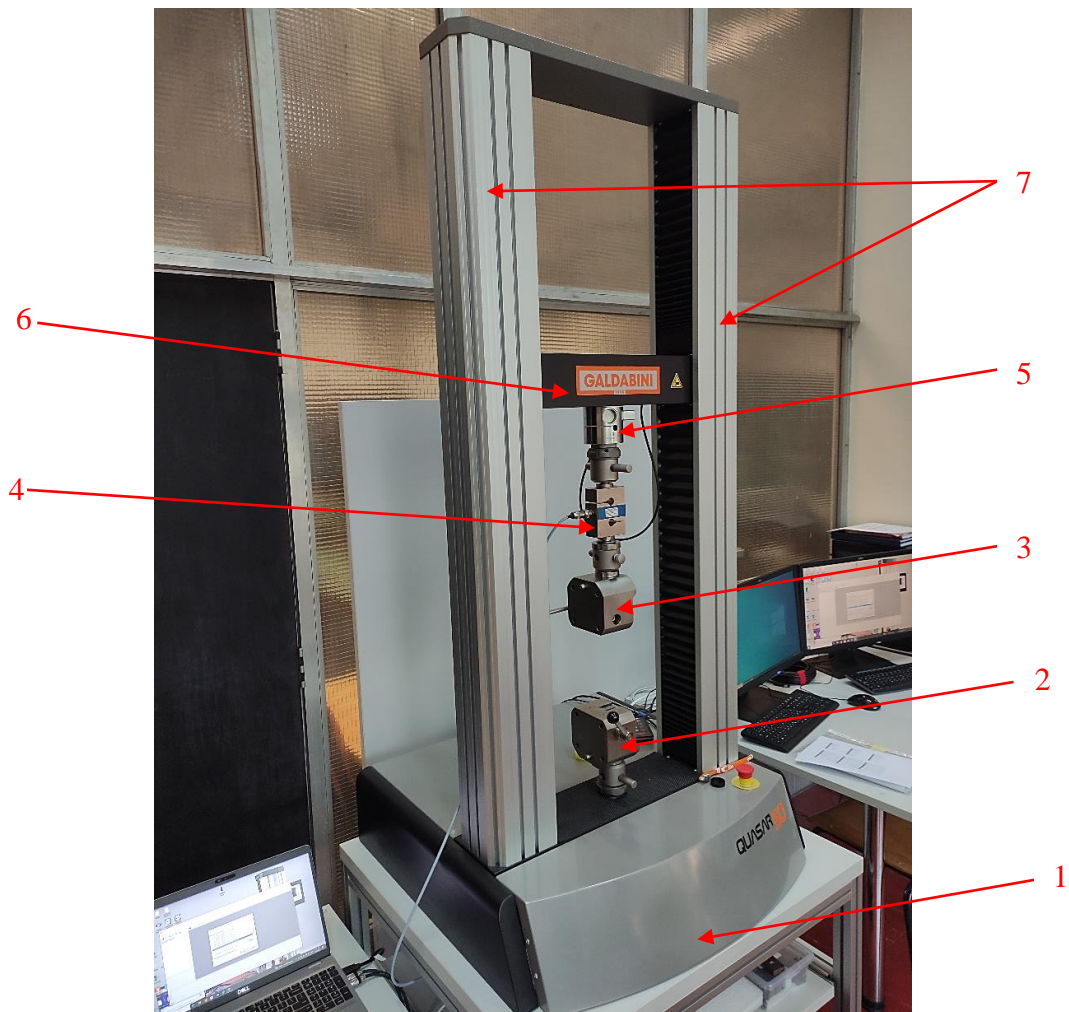


## 4. EKSPERIMENTALNA OPREMA

Kako bi se provelo ispitivanje mehaničkih svojstva i ponašanja materijala potrebna je odgovarajuća oprema. Korištena oprema može se podijeliti u dvije grupe. Oprema za ispitivanje mehaničkih svojstva i ponašanja materijala i oprema za određivanje kemijskog sastava materijala. U opremu za ispitivanje mehaničkih svojstva i ponašanja materijala pripada kidalica s odgovarajućom programskom potporom i dodatnim uređajima te sustav za korelaciju digitalne slike – DIC (*engl. Digital Image Correlation*) i njegoa prateća programska oprema.

### 4.1. Oprema za ispitivanje mehaničkih svojstava i ponašanja materijala

Statičko vlačno ispitivanje provodi se na univerzalnoj kidalici Galdabini Quasar 50 prikazanoj na slici 4.1. Gabariti kidalice su 1641 mm x 790 mm. Kapacitet kidalice iznosi 50 kN. Kalibrirana je prema normi ISO 7500-1.



Slika 4.1. Univerzalna kidalica Galdabini Quasar 50

Na slici 4.1 označeni su osnovni dijelovi kidalice te su oni redom:

- 1) postolje s pogonom kidalice
- 2) donja čeljust (nepomična)
- 3) gornja čeljust (pomična)
- 4) dodatna mjerna ćelija
- 5) osnovna mjerna ćelija
- 6) pomična traverza
- 7) vertikalni stupovi s vretenima

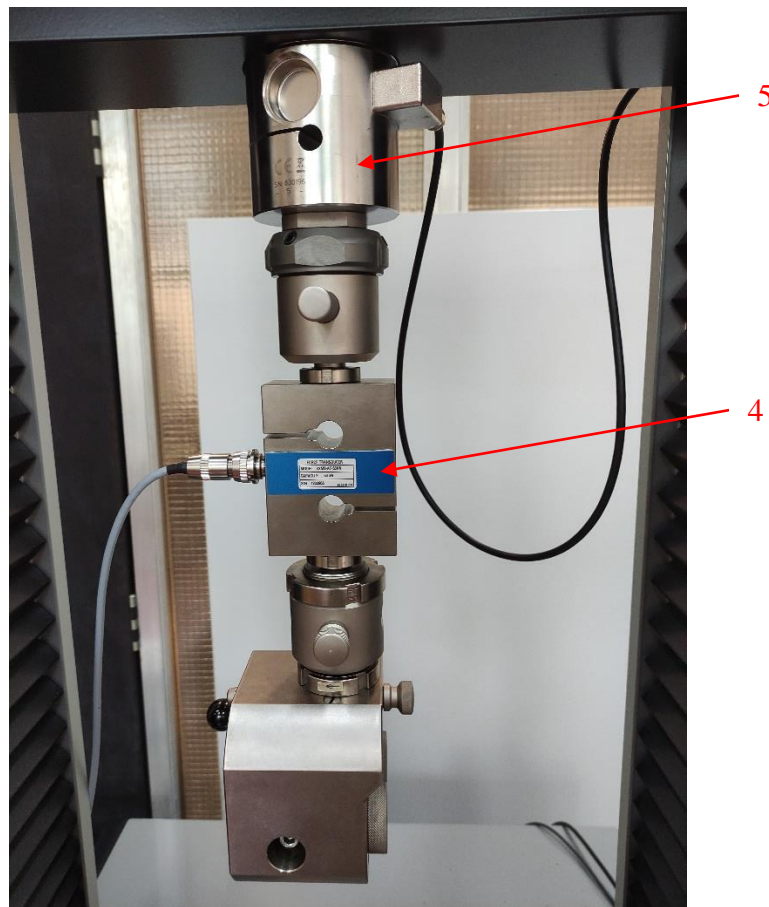
U postolju kidalice (1) nalazi se elektromotor koji pogoni vertikalna vretena koja se nalaze u stupovima (7). Vretena su fiksna te se okreću u svome ležištu. Na vretena povezana je pomična traverza (6). Vertikalni pomak traverze izveden je na principu matice i vretena. Ako je vreteno fiksno i okreće se, matica ima vertikalni pomak po vretenu gore ili dolje u ovisnosti u smjeru okretanja vretena. U ovom slučaju traverza predstavlja maticu te je na tom principu izveden vertikalni pomak traverze. Ispitni uzorci postavljaju se i učvršćuju između nepomične (2) i pomične (3) čeljusti. Na slici 4.2 prikazana je nepomična čeljust.



*Slika 4.2. Nepomična čeljust kidalice*

Nepomična i pomična čeljust kidalice iste su izvedbe. Jedna je postavljena na bazu kidalice dok je druga postavljena na pomičnu traverzu. Pritezanje ispitnih uzoraka izvodi se mehanički pomoću ručice koja se može primijetiti na slici 4.2. Ručica pomiče nazubljene klinaste prihvatne elemente koji zahvaćaju i stežu ispitni uzorak.

Na slici 4.3 detaljnije su prikazane osnovna mjerna ćelija (5) i dodatna ugrađena mjerna ćelija (4).



Slika 4.3. Osnovna i dodatna mjerna ćelija

Mjerne ćelije (*engl. Load Cell*) su elektro-mehanički senzori za mjerenje sile. Opterećenjem mjerne ćelije ona se deformira, dolazi do promjene otpora te se dobivaju podaci o sili. Obje mjerne ćelije kapaciteta su 50 kN.

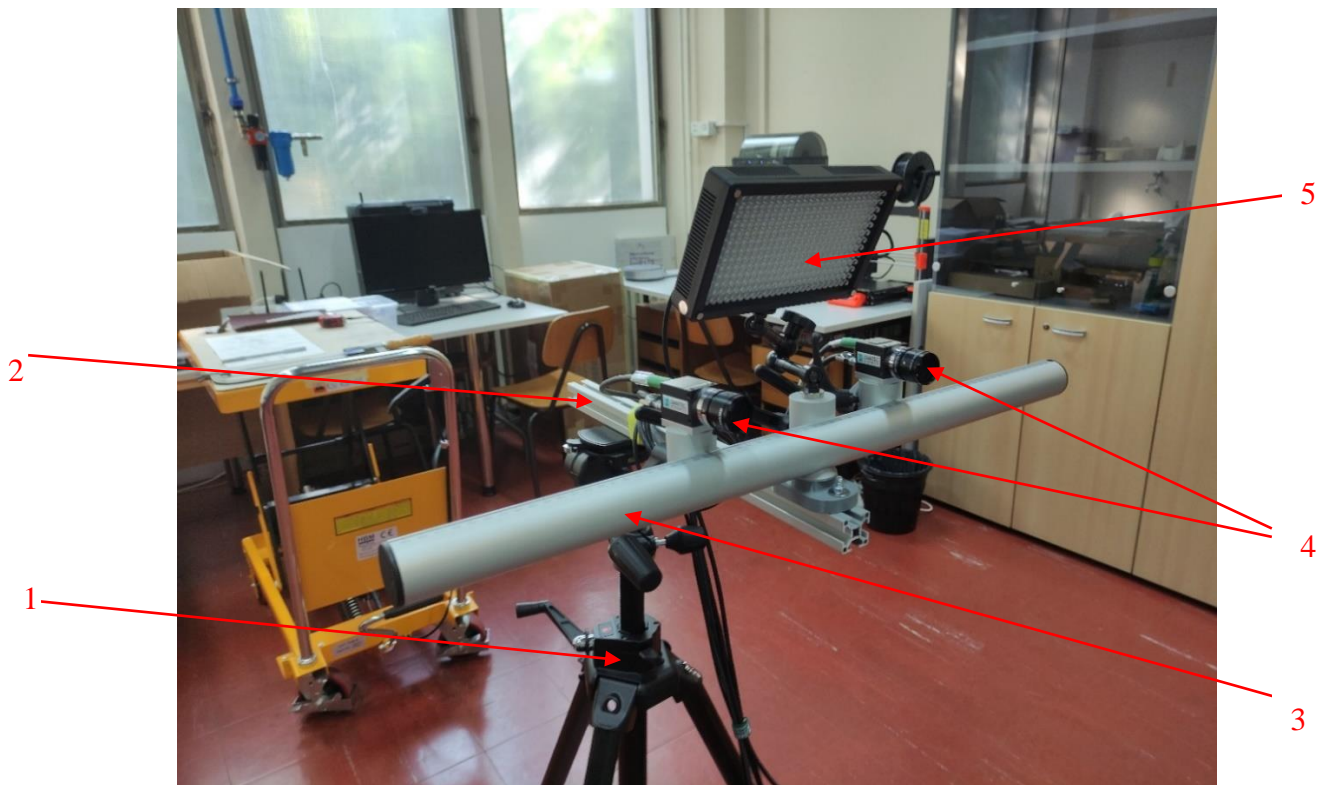
Kidalice dolazi s programom za provođenje ispitivanja. U programu su definirani svi potrebni standardi za provođenje ispitivanja kao što su HRN EN ISO 6892-1 (ispitivanje metalnih materijala), HRN EN ISO 527 (norma za ispitivanje polimernih materijala) i preostali drugi standardi. Za provođenje ispitivanja potrebno je odabrati odgovarajuću normu u ovisnosti o ispitivanom materijalu. Nakon toga program vodi ispitivača kroz definiranje osnovnih parametara ispitivanja. Osnovni parametri koje je redom potrebno definirati su: mjerne jedinice, poprečni presjek i dimenzije ispitnog uzorka, brzina ispitivanja po pojedinim fazama, uvjeti promjene brzina (prelazak zadane granice opterećenja, postignuće određene deformacije), uvjet

zaustavljanja ispitivanja (pad opterećena ispod 50%, ručno,...) i odabir grafičkog prikaza rezultata. Prethodnom opisanom opremom i naknadnom obradom podataka moguće je dobiti sljedeća mehanička svojstva: vlačnu čvrstoću  $R_m$ , granicu tečenja  $R_e$ , istežljivost  $A$  i kontrakciju  $Z$ .

Za određivanje modula elastičnosti uglavnom se koristi ekstenzometar kao dodatna oprema koja se postavlja na ispitni uzorak prije pokretanja ispitivanja. U ovom diplomskom radu kao zamjena za ekstenzometar koristi se sustav za digitalnu korelaciju slike. Prema normi ISO 6892-1 propisano je da se za određivanje modula elastičnosti osim korištenja ekstenzometra mogu se koristiti ostali uređaji ili sustavi za određivanje modula elastičnosti.

Korelacija digitalne slike (*engl. Digital Image Correlation*) predstavlja beskontaktnu mjernu tehniku koja korištenjem referentnih točaka na površini promatranog tijela dobiva informacije o pomaku, deformaciji i obliku. Ona omogućava dobivanje informacije o pomaku većeg broja točaka koji se pojavljuju na površini materijala u usporedbi s ostalim metodama koje mogu dobiti informacije o pomaku u samo jednom smjeru (npr. elektrootporne mjerne trake) [12].

Sustav za korelaciju digitalne slike tvrtke Dantec Dynamics prikazan je na slici 4.4.



Slika 4.4. Sustav za korelaciju digitalne slike

Osnovni dijelovi sustava za korelaciju digitalne slike prikazani su na slici 4.4 i oni su:

- 1) tronožac
- 2) nosač
- 3) mjerna letva
- 4) kamere
- 5) reflektor toplog i hladnog svjetla

Cijela konstrukcija postavljena je na tronožac (1). Tronožac (1) osigurava vertikalni pomak kamera (4). Na tronožac je montiran nosač na koji je povezana mjerna letva (3). Mjerna letva sadrži mjernu skalu i na njoj su postavljene kamere (4). Kamere (4) razlučivosti 3,1 megapiksela se pomoću mjerne skale postavljaju na točno određene pozicije te se uvijek može odrediti udaljenost između njih. Reflektor toplog i hladnog svjetla (5) osvjetljava ispitni uzorak prilikom provođenja ispitivanja.

Prethodno opisana oprema dolazi s pratećim softverom *Istra 4D v4.8*.

Princip rada metode korelacije digitalne slike temelji se na praćenju prethodno nanesenog uzorka na ispitno tijelo pomoću niza slika. Na slici 4.5 prikazan je ispravno nanesen uzorak na ispitno tijelo odnosno *engl. Raster*. Metoda se izvodi u tri koraka koja su redom: nanošenje uzorka na ispitno tijelo, slikanje uzorka tijekom opterećenja i analiziranje slika kako bi se dobio površinski pomak nanesenog uzorka [12].



*Slika 4.5. Uzorak na ispitnom tijelu*

Prva slika naziva se referentna slika. Metoda korelacije digitalne slike uspoređuje referentnu sliku nedeformiranog uzorka sa slikama s deformiranim uzorcima. Na temelju toga pomoću algoritama računa se pomak između referentne i ostalih slika. Metoda može zabilježiti

vrlo male pomake te je zbog toga pogodna i pouzdana za određivanje modula elastičnosti kao i za dobivanje informacija o lokalnim deformacijama čiji je uzrok konzentator naprežanja.

Prije primjene metode korelacije digitalne slike potrebno je provesti kalibraciju sustava i kamera pomoću kalibracijske ploče (slika 4.6) kako bi se dobili ispravni i pouzdani rezultati.



*Slika 4.6. Kalibracijska ploča*

#### **4.2. Oprema za određivanje kemijskog sastava materijala**

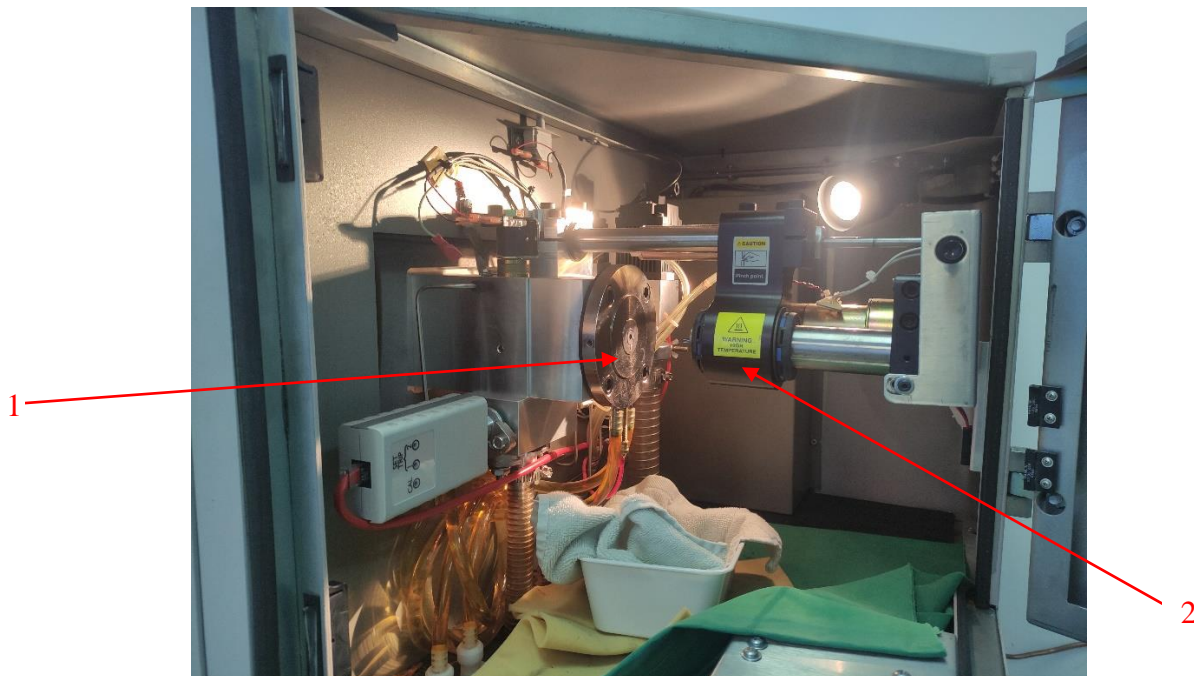
Kemijski sastav materijala ispitivao se koristeći se LECO GDS500A spektrometrom prikazanom na slici 4.7. LECO GDS500A spada u spektrometre s tinjajućim izbojem.



*Slika 4.7. LECO GDS500A spektrometar*

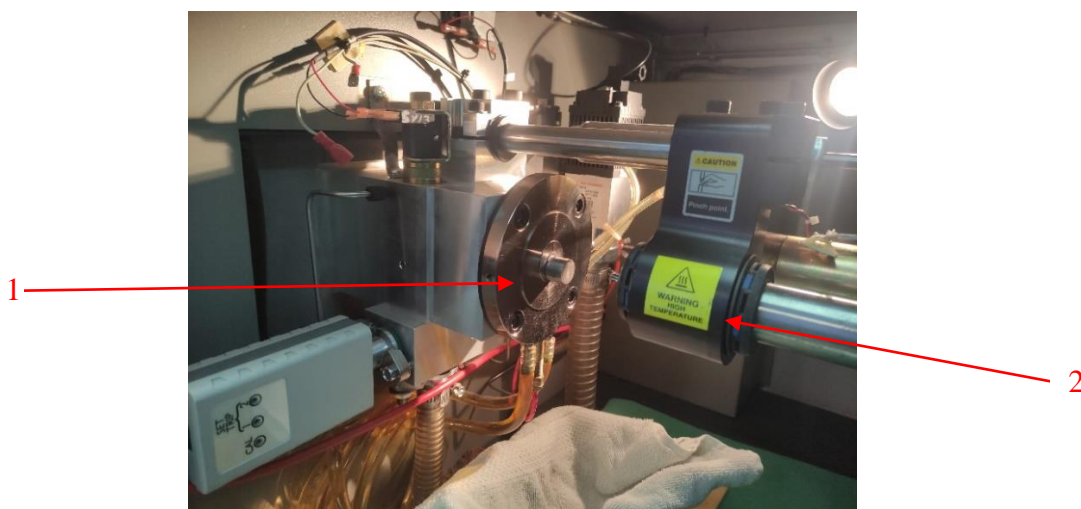
Spektrometar radi na principu tinjajućeg izboja, gdje ionizirani argon skida materijal s površine ispitnog uzorka. Pobuđeni atomi uzorka vraćaju se u prvobitno stanje niže energije uz emitiranje svjetla karakterističnih valnih duljina za svaki kemijski element.

Na slici 4.8 prikazana je komora za ispitivanje kemijskoga sastava.



*Slika 4.8. Komora za ispitivanje kemijskog sastava*

Ispitni uzorak postavlja se na ploču s brtvom (1) te se on prihvaća i steže pomoću vakuuma. Na slici 4.9 prikazan je stegnuti uzorak.



*Slika 4.9. Prihvaćen i stegnuti uzorak*

Nakon postavljanja uzorka zatvaraju se vrata komore te se komora ispunjava argonom. Zatim se pomiče konjić (2) kako bi se dodatno prihvatio uzorak i uspostavio tok struje. Kod ove metode ispitni uzorak predstavlja katodu, a unutar ploče s brtvom (2) nalazi se anoda. Struja teče od katode prema anodi te se postiže visoka temperatura i nastaju teški ioni (plazma) argona. Ioni argona odstranjuju materijal s površine uzorka. Valne duljine pojedinog kemijskog elementa detektirane su senzorima te se rezultat ispisuje na računalu.

Karakteristike LECO GDS500A spektrometra su sljedeće:

- brza analiza uzorka
- dubine prodiranja do 200 mikrona
- pokrivanje intervala valne duljine od 165 nm do 460 nm
- maksimalna veličina uzorka koji se mogu prihvatiti: 400x300x40 mm
- ispitivanje visokolegiranih čelika, niskolegiranih čelika, obojenih metala i legura aluminijskih
- spora kalibracija sustava
- metoda razara ispitni uzorak.



## 5. ISPITIVANJE

Ispitivanje mehaničkih svojstva i ponašanja korozijski postojanih čelika i aluminijevih legura provedeno je u Laboratoriju za konstruiranje i analizu proizvoda na Tehničkom fakultetu u Rijeci. Ispitivanje kemijskog sastava materijala također provedeno je na Tehničkom fakultetu u Rijeci na zavodu za inženjerstvo materijala. Ispitni uzorci izrađeni su u suradnji s tvrtkom E-Tehnika. Ukupno je ispitano dvije vrste korozijski postojanih čelika i aluminijevih legura. Ispitani su sljedeći materijali:

- AlMgSi0,5 – debljine 5 mm
- AlMgSi0,5 – debljine 3 mm
- Korozijski postojan čelik – AISI 316L – debljine 3 mm
- Korozijski postojan čelik – AISI 304 – debljine 3 mm

Pomoću kidalice Galdabini Quasar 50 određeni su dijagrami naprezanje – istežanje, a pomoću sustava za korelaciju digitalne slike određeni su moduli elastičnosti za prethodno navedene materijale.

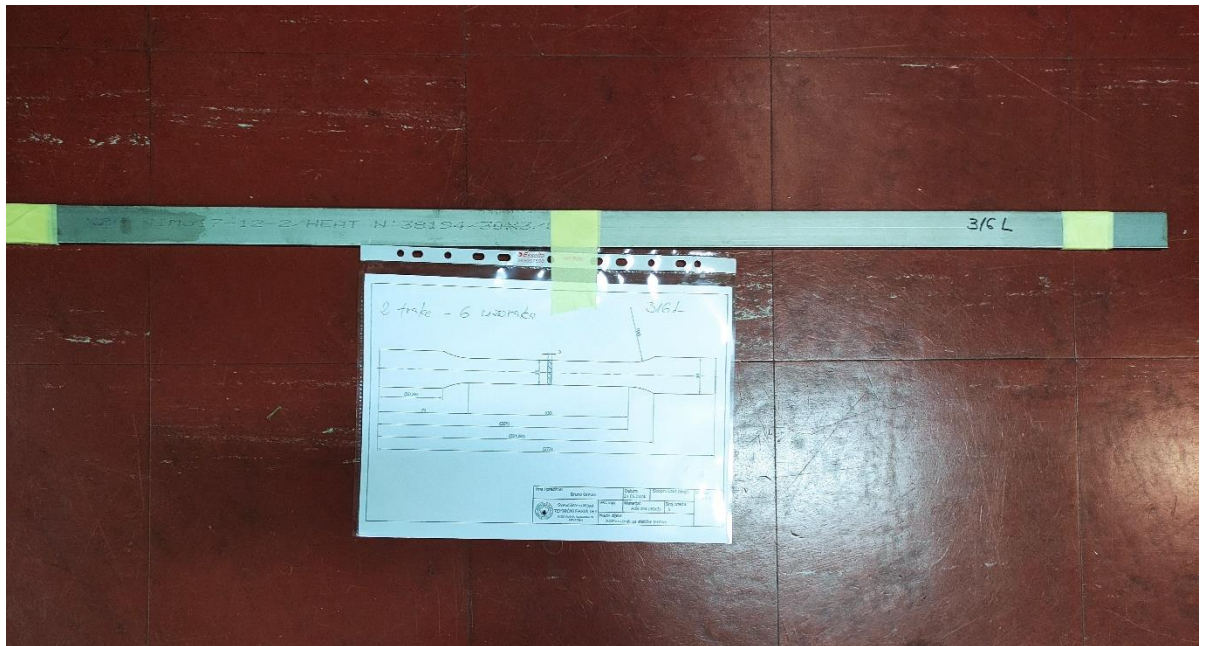
### 5.1. Opis ispitnih uzoraka

Plosnati ispitni uzorci za statički vlačni pokus izrađeni su prema normi HRN EN ISO 6892-1 [3]. Za određivanja dimenzija ispitnih uzoraka koristi se tablica 5.1. Vrijednosti navedene u tablici 5.1 su preporuke. Norma zahtijeva ispunjenje minimalne paralelne duljina ispitnog uzorka. Ostale vrijednosti dimenzija mogu odstupati od tablice.

Tablica 5.1. Okvirne dimenzije plosnatih ispitnih uzoraka prema HRN EN ISO 6892-1[3].

Širina ispitnog uzorka $b_0$ [mm]	Izvorna mjerna duljina $L_0$ [mm]	Minimalna paralelna duljina $L_c$ [mm]	Aproksimirana ukupna duljina $L_t$ [mm]
$40 \pm 0,7$	200	220	450
$25 \pm 0,7$	200	212,5	450
$20 \pm 0,7$	80	90	300

Norma zahtijeva da su ispitni uzorci izrađeni od poluproizvoda odnosno šipki (slika 5.1) ako je to moguće i da uvijek moraju biti naknadno strojno obrađeni.



Slika 5.1. Poluproizvod čelika AISI 316L

Ispitni uzorci uvijek će imati prijelazni radijus s dijela koji se postavlja u čeljusti kidalice i struka ispitnog uzorka. Prijelazni radijus mora iznositi minimalno 12 mm. Paralelna duljina ispitnih uzoraka  $L_c$  ne smije biti manje od  $L_0 + b_0/2$ . Ako ima dovoljno materijala za izradu ispitnih uzoraka norma preporuča koristiti se paralelnom duljinom  $L_c = L_0 + 2b_0$ . Za izradu ovog diplomskog rada osigurano je dovoljno materijala stoga se paralelna duljina računa pomoću izraza  $L_c = L_0 + 2b_0$ . Početna debljina materijala  $a_0$  u ovom diplomskom radu jednaka je debljinama poluproizvoda. Početna širina struka ispitnih uzoraka  $b_0$  usvojena je prema tablici 5.1. Norma zahtijeva da prilikom određivanja dimenzija poprečnog presjeka pravokutnih ispitnih uzoraka uvijek mora biti zadovoljeno da omjer širine i debljine ne prelazi 8:1. U skladu sa svim prethodno navedenim smjericama odabrane i određene su dimenzije ispitnih uzoraka. Primjer postupak određivanja dimenzija ispitnog uzorka A opisan je dalje u tekstu.

Dimenzije poluproizvoda su 1000x30x3 mm. Iz toga se usvaja debljina ispitnog uzorka 3 mm. Odabrana početna širina ispitnog uzorka prema tablici 5.1 iznosi 20 mm. Ona se postiže naknadnom strojnom obradom. Potrebno je prvo provjeriti omjer širine i duljine zadan izrazom 13.

$$\frac{b_0}{a_0} \leq 8 \quad (13)$$

$$\frac{20}{3} \leq 8$$

$$6,667 \leq 8$$

Omjer širine i duljine ispitnog uzorka iznosi 6,667 što je manje ili jednako od 8 te je prvi zahtjev ispunjen. Iz tablice 5.1 uzima se izvorna mjerna duljina  $L_0$  od 80 mm no radi sigurnosti ona se uvećava za 10 mm. Uzimanjem u obzir uvećanja od 10 mm dobiva se iznos paralelne duljine od  $L_0 = 90$  mm. Zatim pomoću izraza 14 računa se paralelna duljina ispitnog uzorka.

$$L_c = L_0 + 2b_0 \quad (14)$$

$$L_c = 90 + 2 \cdot 20$$

$$L_c = 130 \text{ mm}$$

Paralelna duljina ispitnog uzorka  $L_c$  iznosi 130 mm. Kako bi se dobila ukupna duljina ispitnog uzorka  $L_t$  potrebno je odrediti prijelazni radijus i duljinu šireg dijela ispitnog uzorka koja služi za pritezanje. Prijelazni radijus odabire se proizvoljno i on iznosi 45 mm. On ne smije biti manji od 12 mm i taj uvjet je zadovoljen. Duljina ispitnog uzorka šireg dijela koji služi za pritezanje ovisi o dimenzijama čeljusti kidalice. Prema iskustvu prethodno provedenih ispitivanja na kidalici dovoljna duljina šireg dijela iznosi 50 mm. Ukupna duljina ispitnog uzorka  $L_t$  iznosi 272 mm. Prethodno usvojene i izračunate dimenzije objedinjene su i prikazane u tablici 5.2.

Tablica 5.2. Dimenzije plosnatog ispitnog uzorka A, korozijski postojani čelici AISI 316L i AISI 304

Dimenzije plosnatog ispitnog uzorka A debljine 3 mm		
$a_0$	3	mm
$b_0$	20	mm
$L_0$	90	mm
$L_c$	130	mm
$L_t$	272	mm
$R$	45	mm

U tablici 5.3 i 5.4 prikazane su odabrane dimenzije plosnatih ispitnih uzoraka B i C. Dimenzije ispitnih uzoraka B i C dobivene su provođenjem istog postupka kao za ispitni uzorak A.

Dimenzije poluproizvoda su 1000x30x3 mm. Iz toga se usvaja debljina ispitnog uzorka 3 mm. Odabrana početna širina ispitnog uzorka prema tablici 5.1 iznosi 20 mm. Provođenjem prethodno opisanog postupka za ispitni uzorak A dobivene su vrijednosti u tablici 5.3.

Tablica 5.3. Dimenzije plosnatog ispitnog uzorka B, aluminijska legura AlMgSi 0,5

Dimenzije plosnatog ispitnog uzorka B debljine 3 mm		
$a_0$	3	mm
$b_0$	20	mm
$L_0$	130	mm
$L_c$	170	mm
$L_t$	300	mm
$R$	25	mm

Dimenzije poluproizvoda su 1000x30x5 mm. Iz toga se usvaja debljina ispitnog uzorka 5 mm. Odabrana početna širina ispitnog uzorka prema tablici 5.1 iznosi 25 mm. Provođenjem prethodno opisanog postupka za ispitni uzorak A dobivene su vrijednosti u tablici 5.4.

Tablica 5.4. Dimenzije plosnatog ispitnog uzorka C, aluminijska legura AlMgSi 0,5

Dimenzije plosnatog ispitnog uzorka C debljine 5 mm		
$a_0$	5	mm
$b_0$	25	mm
$L_0$	200	mm
$L_c$	250	mm
$L_t$	372	mm
$R$	25	mm

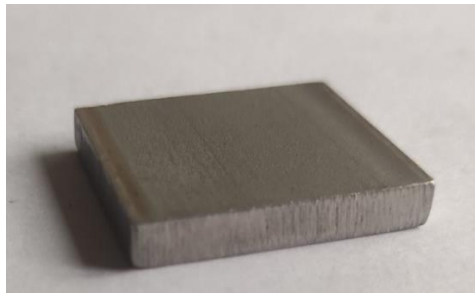
Na temelju odabranih dimenzija koristeći se softverom Autodesk Inventor 2023 izrađeni su odgovarajući 3D modeli ispitnih uzoraka. Iz odgovarajućih 3D modela izrađeni su radionički crteži ispitnih uzoraka. Na temelju radioničkih crteža ispitnih uzoraka tehnologijom glodanja izrađeni su ispitni uzorci. Primjer obrađenoga ispitnog uzorka prikazan je na slici 5.2.



Slika 5.2. Ispitni uzorak AlMgSi0,5 debljine 5 mm

Za provođenje ispitivanja mehaničkih svojstva i ponašanja materijala izrađena su 4 kompleta ispitnih uzoraka, odnosno jedan materijal jedan komplet. Komplet ispitnih uzoraka sadrži 5 ispitnih uzoraka.

Primjer ispitnog uzorka za određivanje kemijskog sastava prikazan je na slici 5.3. Ispitni uzorci dobivaju se iz poluproizvoda rezanjem ručnom pilom za metalne materijale. Osnovne dimenzije ispitnih uzorka su 30x20 mm, a debljina ispitnih uzoraka varira u ovisnosti o debljini poluproizvoda te iznosi 3 mm ili 5 mm. Prema prethodno opisanome koriste se ispitni uzorci dimenzija 30x20x3 mm i 30x20x5 mm.



*Slika 5.3. Primjer ispitnog uzorka za određivanje kemijskog sastava*

Površina ispitnog uzorka za određivanje kemijskoga sastava mora biti brušena i polirana kako bi se dobili dobri rezultati. Sveukupno se izrađuje 4 ispitna uzorka za provođenje ispitivanja kemijskog sastava.

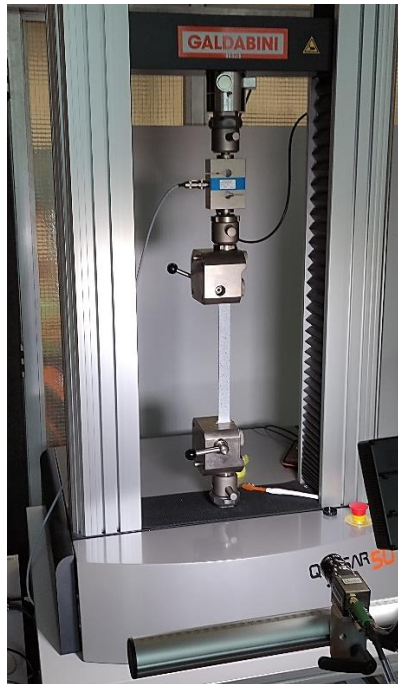
## 5.2. Statički vlačni pokus

Statički vlačni pokus proveden je koristeći se kidalicom Galdabini Quasar 50 opisanom u prethodnom poglavlju. Prije provođenja ispitivanja potrebno je odrediti stvarne dimenzije ispitnog uzorka (širina i debljina) koristeći se pomičnim mjerilom i na ispitnom uzorku pomoću markera zabilježiti izvornu mjernu duljinu  $L_0$  kratkim crnim crticama kao što je prikazano na slici 5.4.



*Slika 5.4. Primjer označene izvorne mjernje duljine*

Ispitni uzorak zatim se postavlja u čeljusti kidalice kao što je prikazano na slici 5.5.



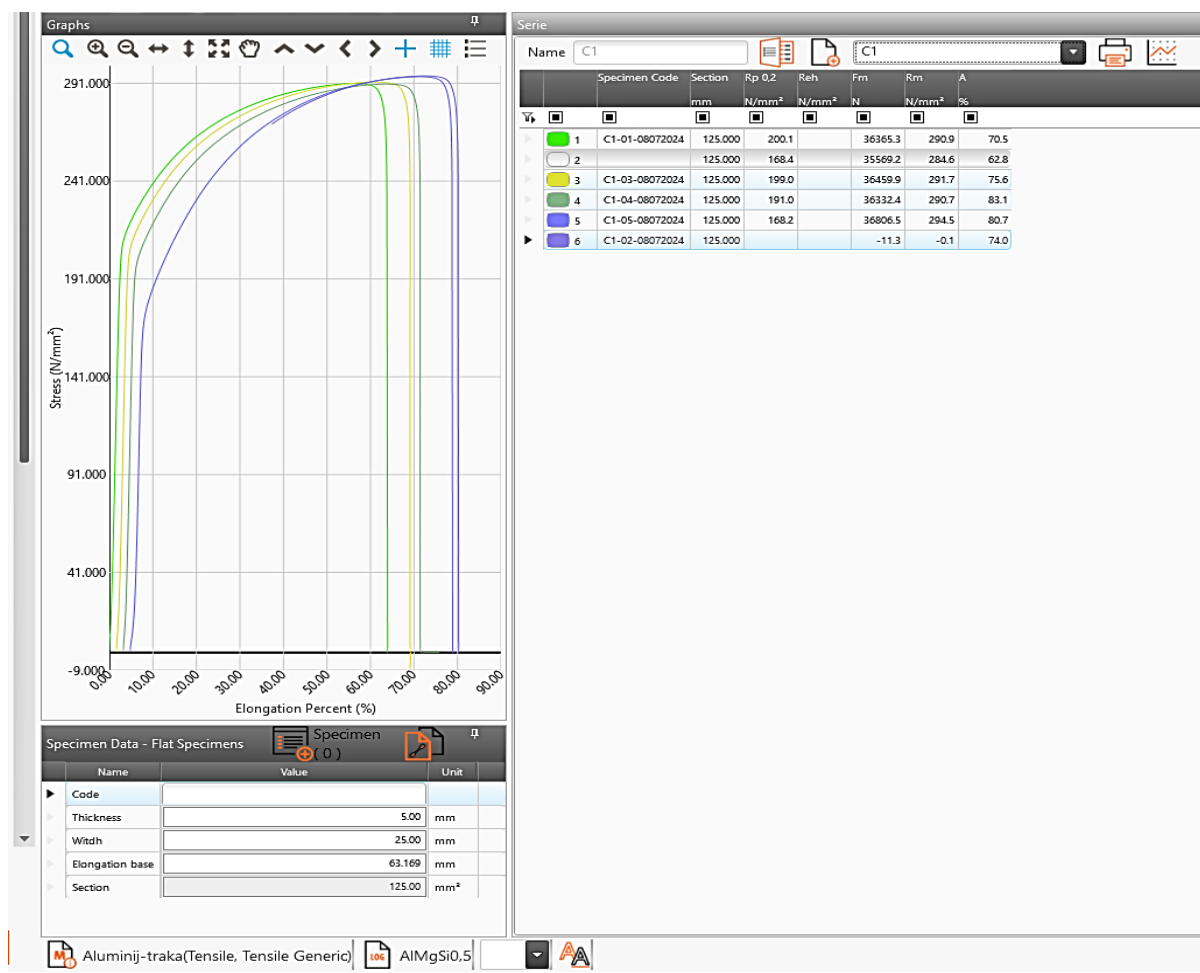
*Slika 5.5. Ispitni uzorak postavljen u čeljusti kidalice*

Ispitivanje se pokreće pritiskom naredbe *engl. Start* u programu kidalice. Kidalica bilježi podatke o sili  $F$  i produljenju ispitnog uzorka  $\Delta L$ . Podaci o sili  $F$  i produljenju  $\Delta L$  prikupljeni su pri frekvenciji od 100 Hz. Ispitivanje završava konačnim lomom epruvete, prikazanom na slici 5.6.



*Slika 5.6. Završetak ispitivanja*

Kida se komplet ispitnih uzoraka (pet ispitnih uzoraka) za pojedini materijal, odnosno u kompletu se kida jedan po jedan ispitni uzorak te se za svaki bilježe sila i produljenje. Program u stvarnom vremenu iscrtava dijagram sila-produljenje. Na slici 5.7 prikazan je izgled sučelja programa s rezultatima ispitivanja.

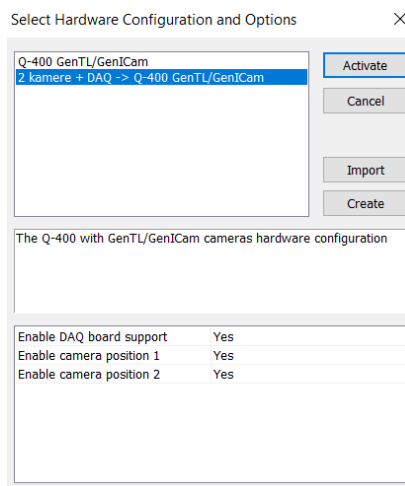


Slika 5.7. Prikaz rezultata ispitnog seta ispitnih uzoraka

Sirovi podaci zabilježeni u programu kidalice preuzimaju se u obliku Microsoft Excel datoteka te se oni naknadno obrađuju kako bi se dobili dijagrami sila-produljenje  $F-\Delta L$ , inženjersko naprezanje-inženjerska deformacija  $S-e$  i stvarno naprezanje-stvarna deformacija  $\sigma-\varepsilon$ . Pomoću dijagrama dobivaju se vrijednosti osnovnih mehaničkih svojstva: modula elastičnosti- $E$ , granice tečenja- $R_e$ , vlačne čvrstoće- $R_m$ , istezljivosti- $A$  i kontrakcije- $Z$ . Na prethodno opisani način ispitani su materijali AlMgSi0,5 debljine 5 i 3 mm i čelici AISI 316L i AISI 304.

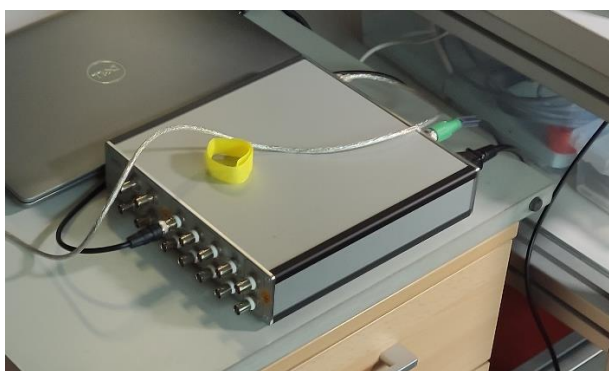
### 5.3. Određivanje modula elastičnosti

Modul elastičnosti materijala određuje se sustavom korelacije digitalne slike. Postupak određivanja modula elastičnosti započinje pokretanjem programa Istra 4D v4.8 kao bi se odabrao i aktivirao željeni sustav kamera. Na slici 5.8 prikazan je prozor odabira kamera.



Slika 5.8. Prozor odabira kamera u programu Istra 4D v4.8

Za određivanje modula elastičnosti odabrane su dvije kamere i DAQ kontroler (*engl. Data acquisition*). DAQ kontroler prikazan je na slici 5.9.

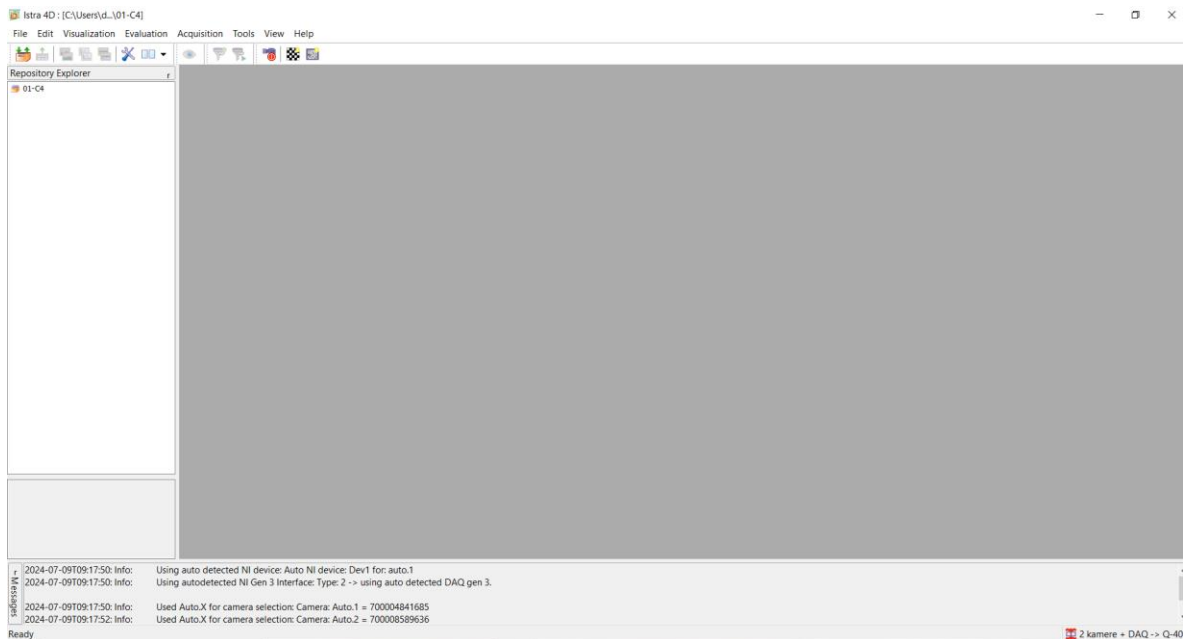


Slika 5.9. DAQ kontroler

DAQ kontroler povezuje kamere s mjernim ćelijama postavljenim na kidalici kako bi se uzimale slike u zavisnosti o opterećenju.

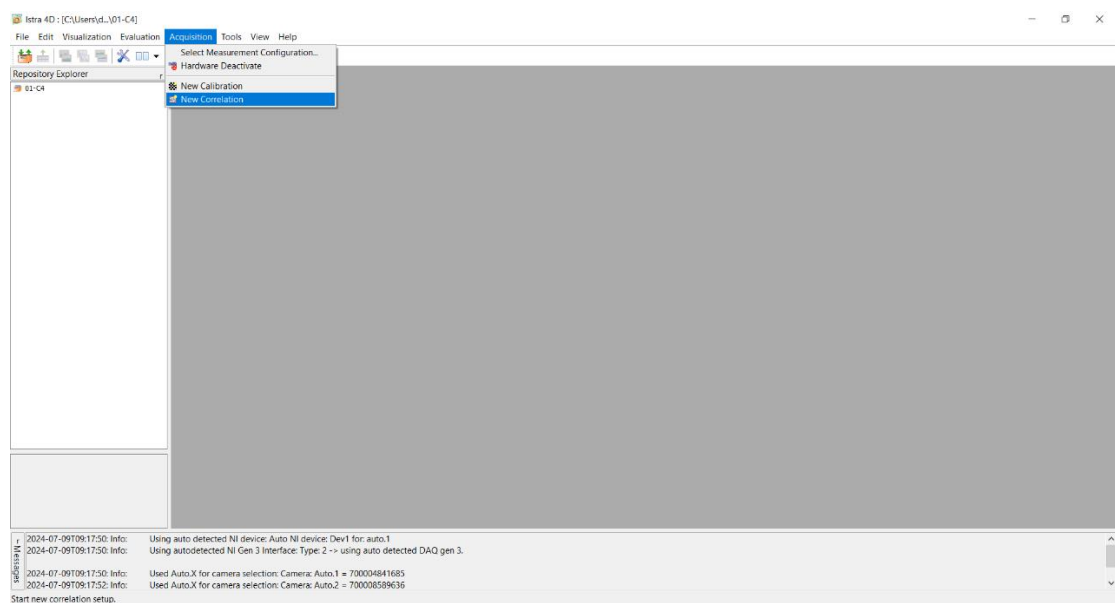


Aktiviranjem sustava otvara se početni prozor programa prikazan na slici 5.10.



Slika 5.10. Početni prozor sustava Istra 4D v4.8

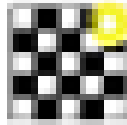
Zatim se odabire padajući izbornik Akvizicija (*engl. Acquisition*) kao na slici 5.11.



Slika 5.11. Padajući izbornik Akvizicija

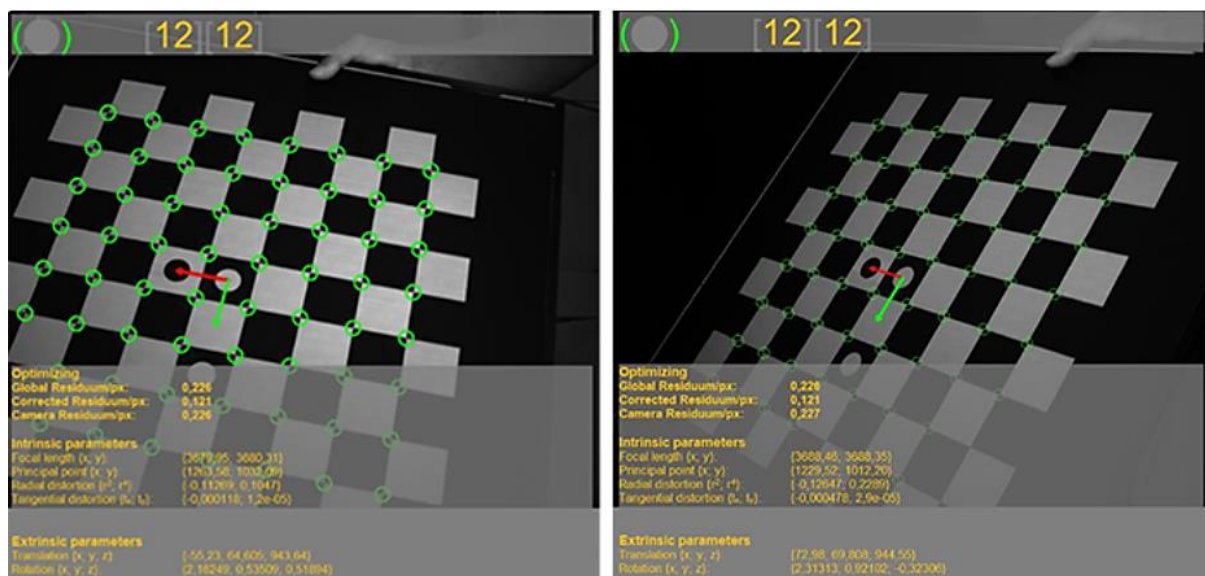
U padajućem izborniku odabire se naredba Nova korelacija (*engl. New Correlation*). Zatim je potrebno pričekati oko 5 minuta dok kamere sustava nisu zagrijane i spremne za rad.

Nakon što kamere postignu radnu temperaturu i spremne su za rad potrebno je provesti njihovu kalibraciju. Naredba za kalibraciju prikazana je na slici 5.12.



Slika 5.12. Naredba za kalibraciju kamera

Kamere se kalibriraju pomoću kalibracijske ploče opisane u prethodnom poglavlju. Kalibracija je vrlo jednostavna i brza. Kalibracijska ploča drži se u ruci i pozicionira ispred čeljusti kidalice. Zatim kamere uzimaju 12 slika. Kalibracijska ploča u svakoj slici postavljena je u drugi položaj (malo se zakrene), ali udaljenost od kamera uvijek mora biti ista kako bi kalibracija bila dobra i uspješna. Kvalitetna i ispravna kalibracija prikazana je na slici 5.13.



Slika 5.13. Ispravna kalibracija kamera [13]

Na slici 5.13 prikazan je primjer kalibracije lijeve i desne kamere. Ispravna kalibracija može se prepoznati prema vrijednosti fokalne duljine (*engl. Focal length*). Vrijednost fokalne duljine desne kamere po  $x$  osi iznosi 3688,46, a po  $y$  osi 3688,35. Razlika vrijednosti fokalnih duljina  $x$  i  $y$  osi ne smije biti veća od 1 za pojedinačnu kameru inače kalibracija nije

zadovoljavajuća te je treba ponovno provesti. U ovom primjeru kalibracija je dobro provedena [13].

Nakon provedbe kalibracije sustava potrebno je pripremiti ispitne uzorke. Na ispitne uzorke nanosi se raster, odnosno nasumični točkasti uzorak koristeći se bijelim i crnim sprejem (slika 5.14).



*Slika 5.14. Bijeli i crni sprej*

Ispravnost rezultata metode korelacije digitalne slike uvelike ovisi o kvaliteti rastera, stoga je potrebno slijediti osnovne smjernice kako bi se postigao optimalni oblik rastera. Osnovne smjernice su:

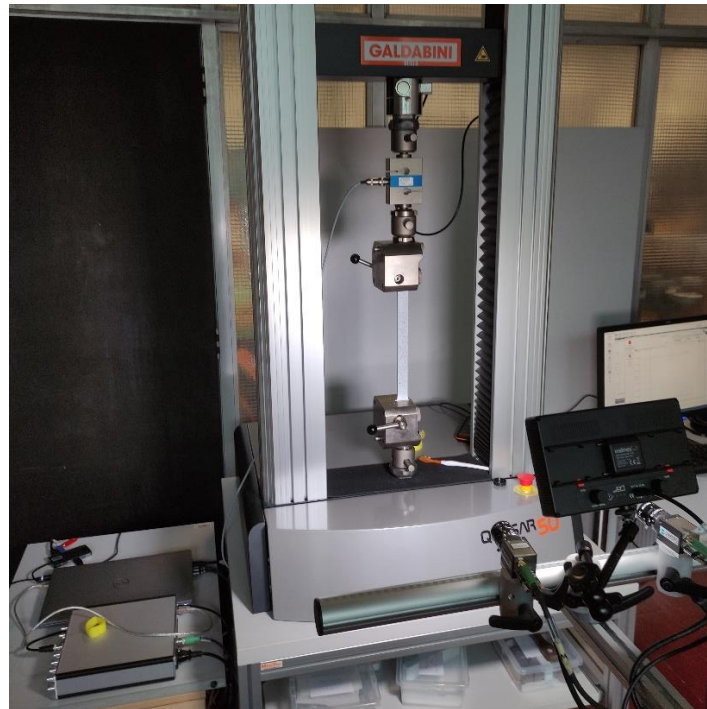
- cijela površina ispitnog uzorka koja se promatra mora biti prekrivena uzorkom
- značajke koje čine raster (točkice) nasumično su postavljene
- točkice ne smiju biti prevelike niti premalene
- površine materijala s metalnim sjajom moraju biti pobožane kako nebi reflektirale svjetlost

Na slici 5.15 prikazan je ispitni uzorak s ispravno nanesenim rasterom.



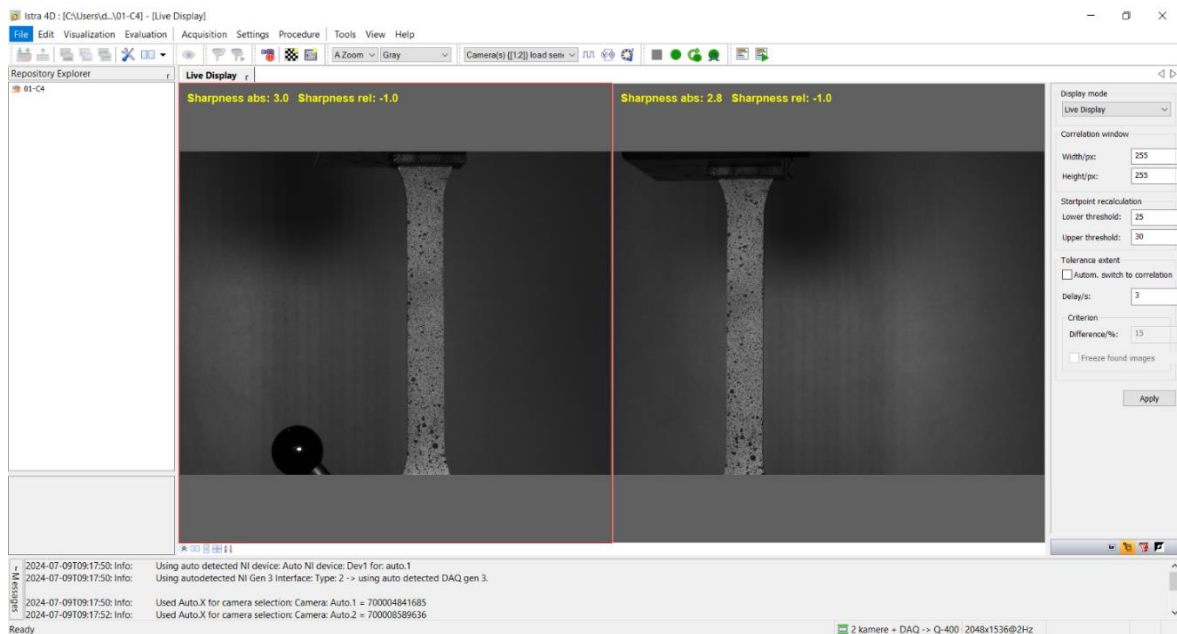
*Slika 5.15. Ispitni uzorak s ispravnim rasterom*

Ispitni uzorak s nanesenim rasterom postavlja se u čeljusti kidalice kao na slici 5.16.



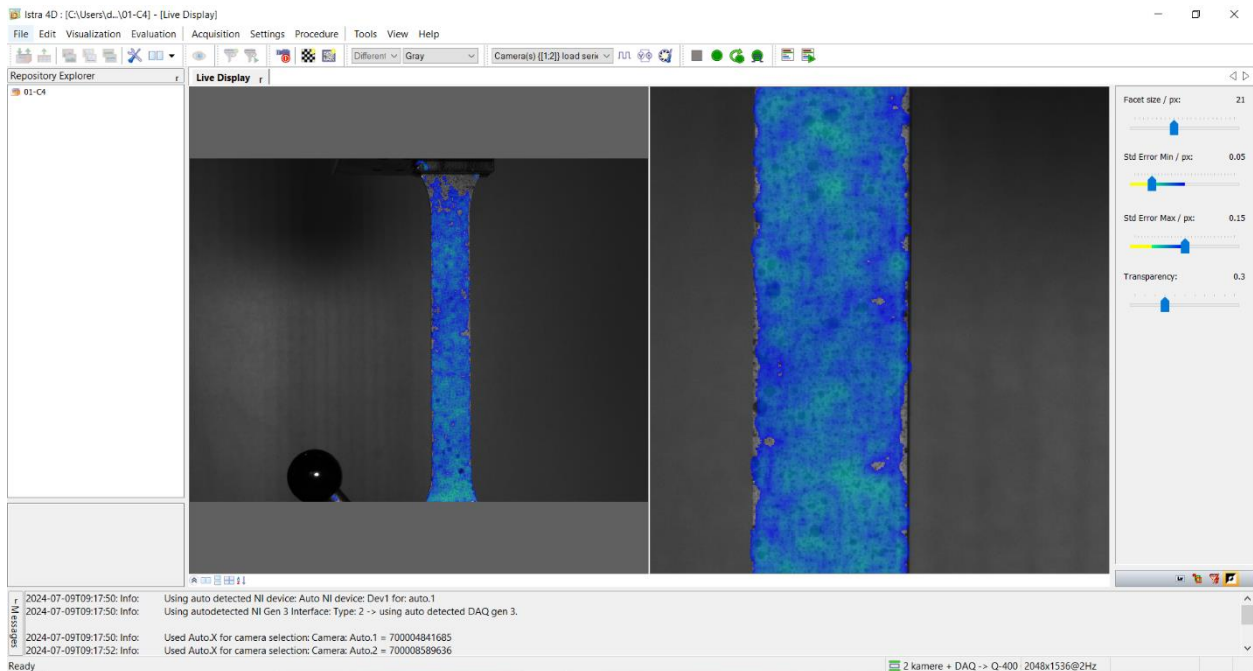
*Slika 5.16. Postavljeni ispitni uzorak u čeljustima kidalici*

Na slici 5.17 prikazan je prozor uživo sa slikom kamere. Pomoću ovog prozora podešava se oštrina kamere (*engl. Sharpness abs*). Oštrina je zadovoljavajuća kada je slika dovoljno čista i jasna.



Slika 5.17. Prozor uživo programa Istra 4D v4.8

Zatim je na slici 5.18 prikazana je evaluacija kvalitete rastera.



Slika 5.18. Evaluacija kvalitete rastera

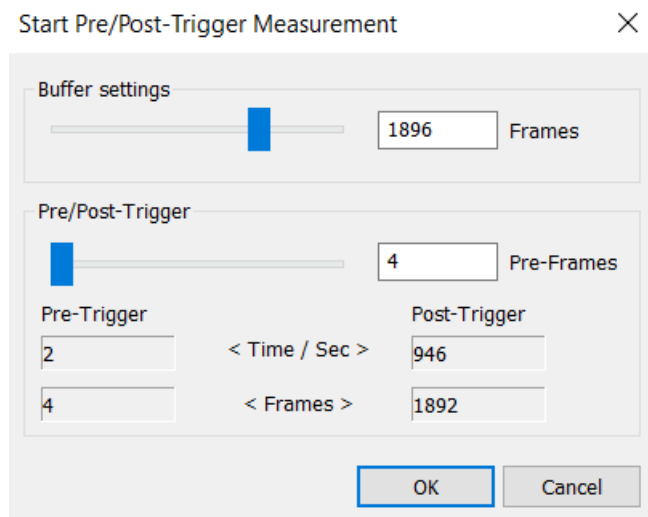
Na slici 5.18 prikazan je ispravan raster. Može se primijetiti potpuno prekrivena ispitna površina uzorka (plava boja). Kvalitetu rastera možemo poboljšati mijenjanjem veličine fasete

(*engl. Facet size*). Najčešće korištene veličine faseta su 15, 17, 19, 21, 23 i 25. One su uvijek neparan broj.

Nakon kalibracije, podešavanja kamera i evaluacije kvalitete rastera može se započeti s snimanjem. Pritiskom naredbe *engl. Send Pre/Post-Trigger* prikazane na slici 5.19 otvara se prozor (slika 5.20).



Slika 5.19. Naredba *Send Pre/Post-Trigger Measurement*



Slika 5.20. Prozor *Start Pre/Post-Trigger Measurement*

Prozor na slici 5.20 omogućuje odabir broja slika koje će se snimiti prilikom ispitivanja. U ovom primjeru uzima se 1896 slika tokom ispitivanja, te sveukupno 4 slike prije i poslije ispitivanja (2 slike prije početka ispitivanja i 2 poslije ispitivanja). Pritiskom naredbe Ok uzimaju se prve dvije slike. Zatim je potrebno pokrenuti ispitivanje na kidalici te u programu Istra 4D v4.8 pritisnuti naredbu prikazanu na slici 5.21 kako bi započela akvizicija slika.



Slika 5.21. Naredba za početak akvizicije slika

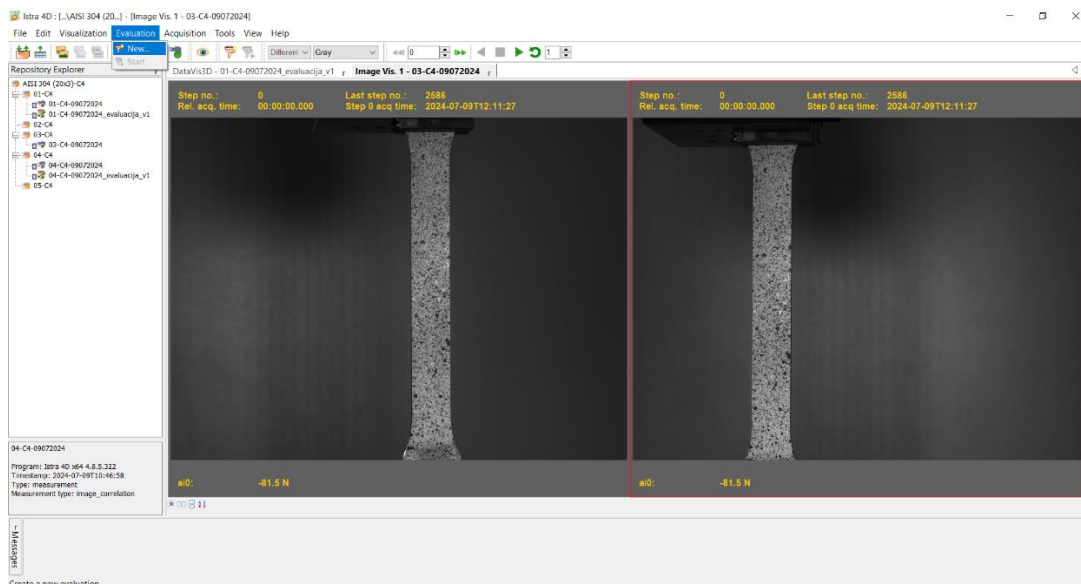
Kada sustav snimi prethodni zadani broja slika tada je ispitivanje završilo i slike se mogu spremi pritiskom naredbe Spremi prikazane na slici 5.22.



Slika 5.22. Naredba Spremi

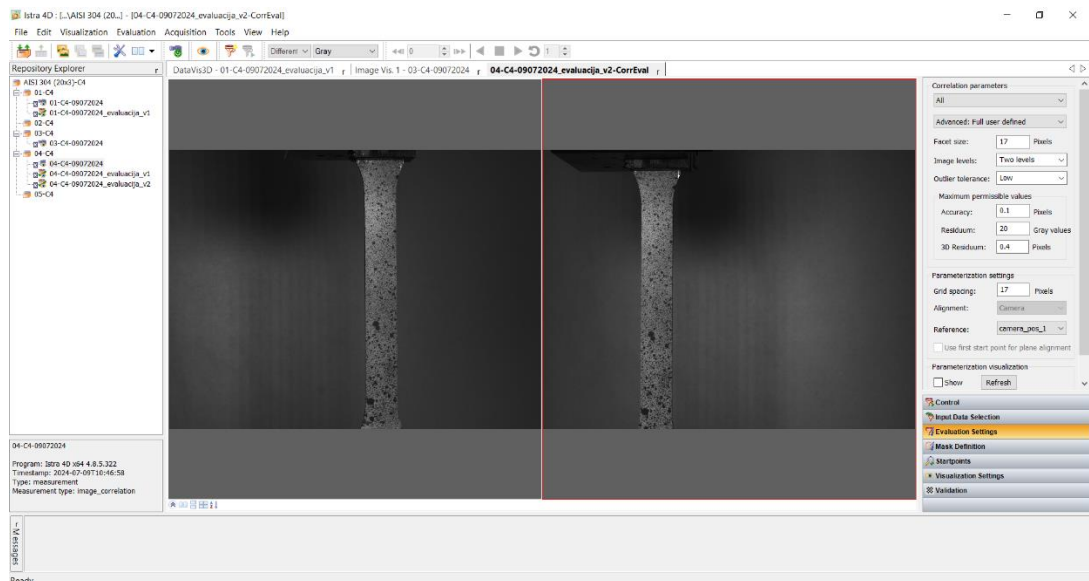
Zatim slijedi obrada prikupljenih slika. Obrada prikupljenih slika biti će prikazana kroz slike 5.23 do 5.27.

U padajućem izborniku Evaluacija (slika 5.23), odabire se nova evaluacija.



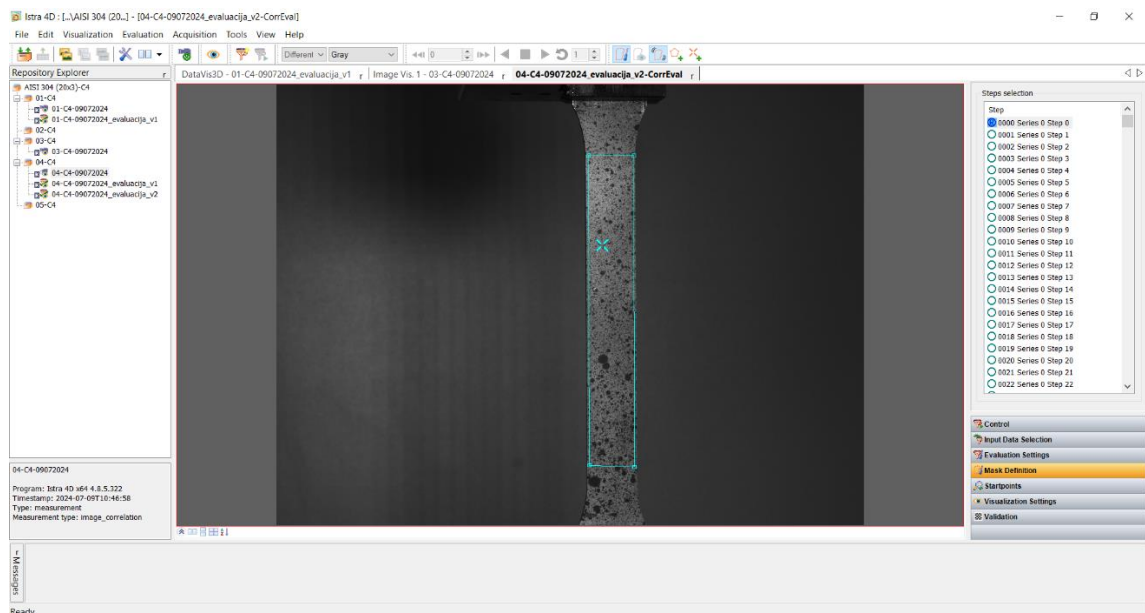
Slika 5.23. Padajući izbornik Evaluacija

Zatim je potrebno odabrati prethodno obavljenu kalibraciju i pritisnuti naredbu Ok. Tada se otvara prozor postavki evaluacije prikazan na slici 5.24.



Slika 5.24. Prozor postavke evaluacije

U prozoru postavke evaluacije odabire se opcija *engl. Advanced: Full user defined* te se ponovno podešava veličina fasete. Zatim potrebno je otvoriti prozor Definiranje Maske prikazan na slici 5.25.

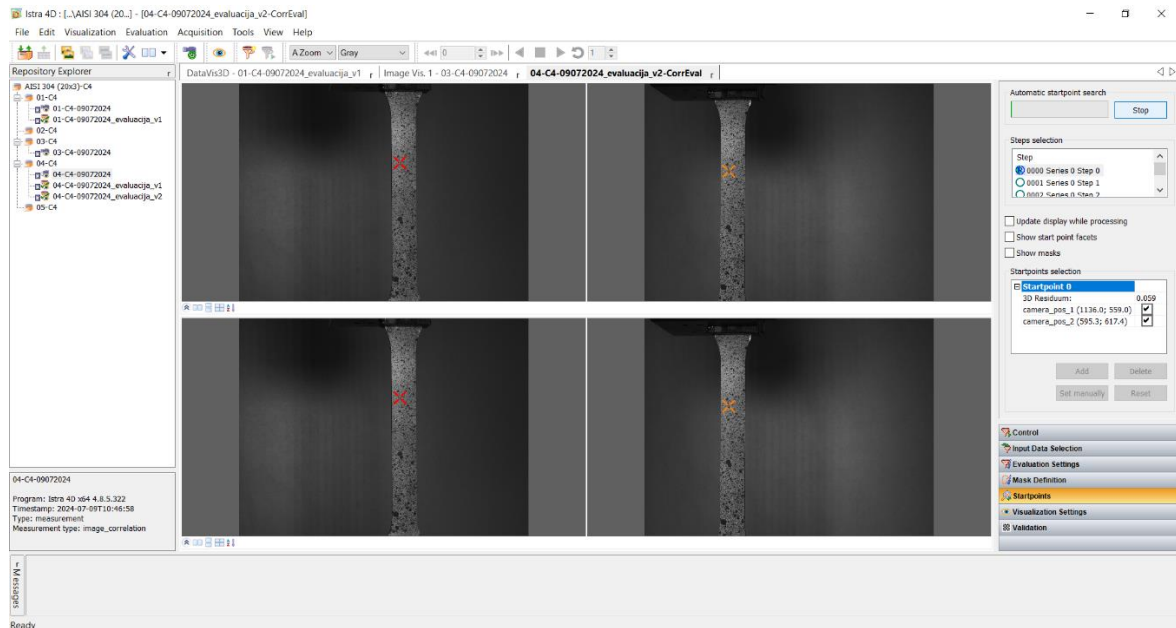


Slika 5.25. Prozor Definiranje Maske

U prozoru Definiranje Maske potrebno je nacrtati masku (pravokutnik) koja obuhvaća područje koje se želi obraditi. Unutar maske potrebno je definirati početnu točku (označenu kao



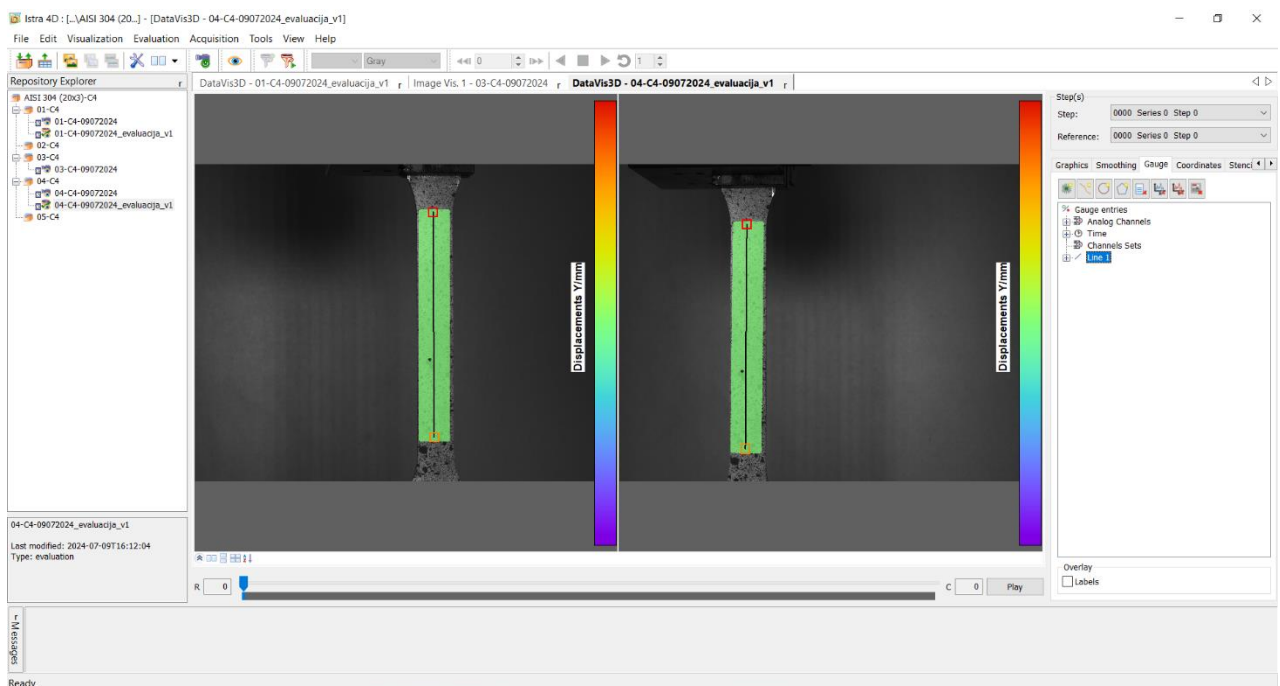
križić). Zatim potrebno je otvoriti prozor Početne točke prikazan na slici 5.26 i započeti obradu podataka.



Slika 5.26. Prozor Početne točke

Ako je vrijednost 3D rasapa prevelika softver neće započeti obradu podataka. Mogući i najčešći razlog velikog 3D rasapa je loša kalibracija.

Rezultat obrade podataka prikazan je na slici 5.27.

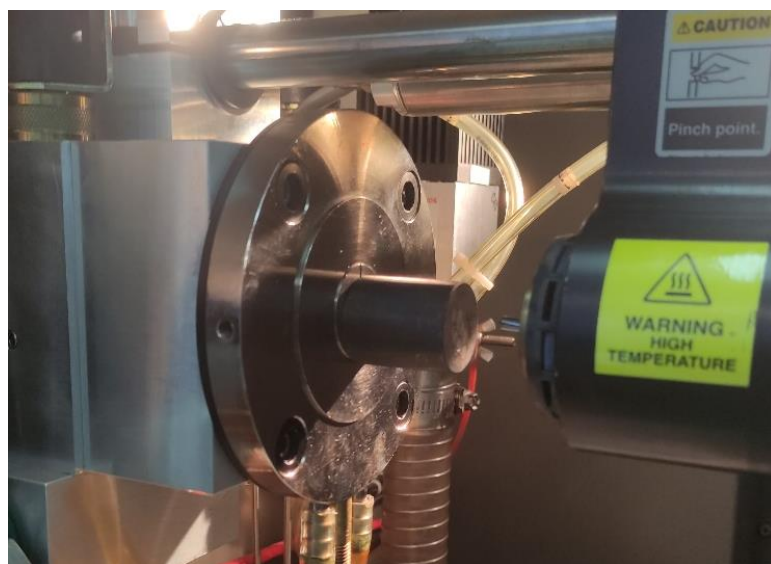


Slika 5.27. Rezultat obrade podataka

U zelenom polju prikazanom na slici moguće je pomoću naredbe *engl. Gauge* nacrtati linije određene duljine. Na slici 5.27 nacrtana je Linija 1. Zatim je moguće izvesti podatke o produljenju Linije 1 u zavisnosti o opterećenju u obliku tekstne datoteke. Kao što je objašnjeno u prethodnom poglavlju, sustav korelacije digitalne slike može „snimiti“ vrlo male pomake i pogodan je za određivanje modula elastičnosti. Tekstna datoteka se zatim učitava u Microsoft Excel gdje slijedi danja obrada podataka. Na prethodno opisani način ispitani su materijali AlMgSi0,5 debljine 5 i 3 mm i čelici AISI 316L debljine 3 mm i AISI 304 debljine 3 mm.

#### 5.4. Određivanje kemijskog sastava

Kemijski sastav određuje se LECO GDS500A spektrometrom. Postupak određivanja kemijskog sastava je sljedeći. Prvo je potrebno postići radnu temperaturu uređaja paljenjem (ispitivanjem) uzorka za zagrijavanje stroja prikazanog na slici 5.28. Zagrijavanje uređaja traje oko 30 minuta.



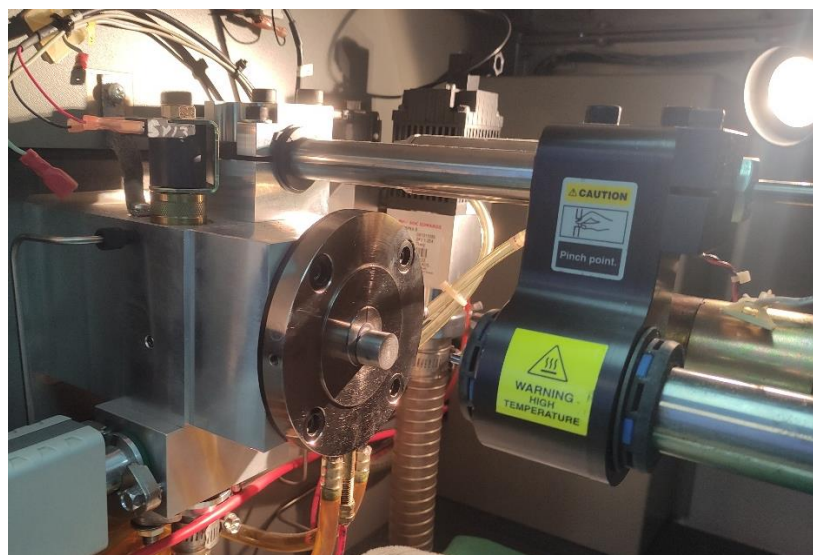
Slika 5.28. Uzorak za zagrijavanje uređaja

Potom je potrebno provesti kalibraciju uređaja koristeći se setovima kalibracijskih uzoraka prikazanih na slici 5.29.



*Slika 5.29. Set kalibracijskih uzoraka za ispitivanje visokolegiranih čelika [14]*

Nakon završetka kalibracije moguće je započeti ispitivanje kemijskog sastava. Ispitni uzorci postavljaju se u komoru prikazanoj na slici 5.30. Vrata komore se zatvaraju te počinje ispitivanje.



*Slika 5.30. Postavljeni uzorak za određivanje kemijskog sastava*

Na prethodno opisani način ispitani su materijali AlMgSi0,5 debljine 5 i 3 mm i čelici AISI 316L i AISI 304.

## 5.5. Rezultati ispitivanja

Podaci prikupljeni statičkim vlačnim pokusom sastoje se od izmjerene sile i produljenja ispitnog uzorka. Oni su naknadno obrađeni kako bi se dobili podaci o mehaničkim svojstvima materijala. Iz podataka o sili  $F$  i izračunate površine stvarnog poprečnog presjeka ispitnog uzorka  $A_0$  pomoću izraza (2) računa se inženjersko naprezanje  $S$ :

$$S = \frac{F}{A_0}$$

Pomoću produljenja ispitnog uzorka  $\Delta L$  i izvorne mjerne duljine  $L_0$  koristeći se izrazom (3) računa se inženjerska deformacija  $e$ :

$$e = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Korištenjem izraza (2) i (3) dobivaju se podaci o inženjerskom naprezanju i inženjerskoj deformaciji te je moguće iscrtati dijagrame inženjersko naprezanje-inženjerska deformacija  $S-e$ . Na temelju dijagrama inženjersko naprezanje-inženjerska deformacija  $S-e$  moguće je odrediti vlačnu čvrstoću  $R_m$ , konvencionalnu granicu tečenja  $R_{p0,2}$ , konačno naprezanje  $R_k$ , istežanje  $A$  i kontrakciju  $Z$ .

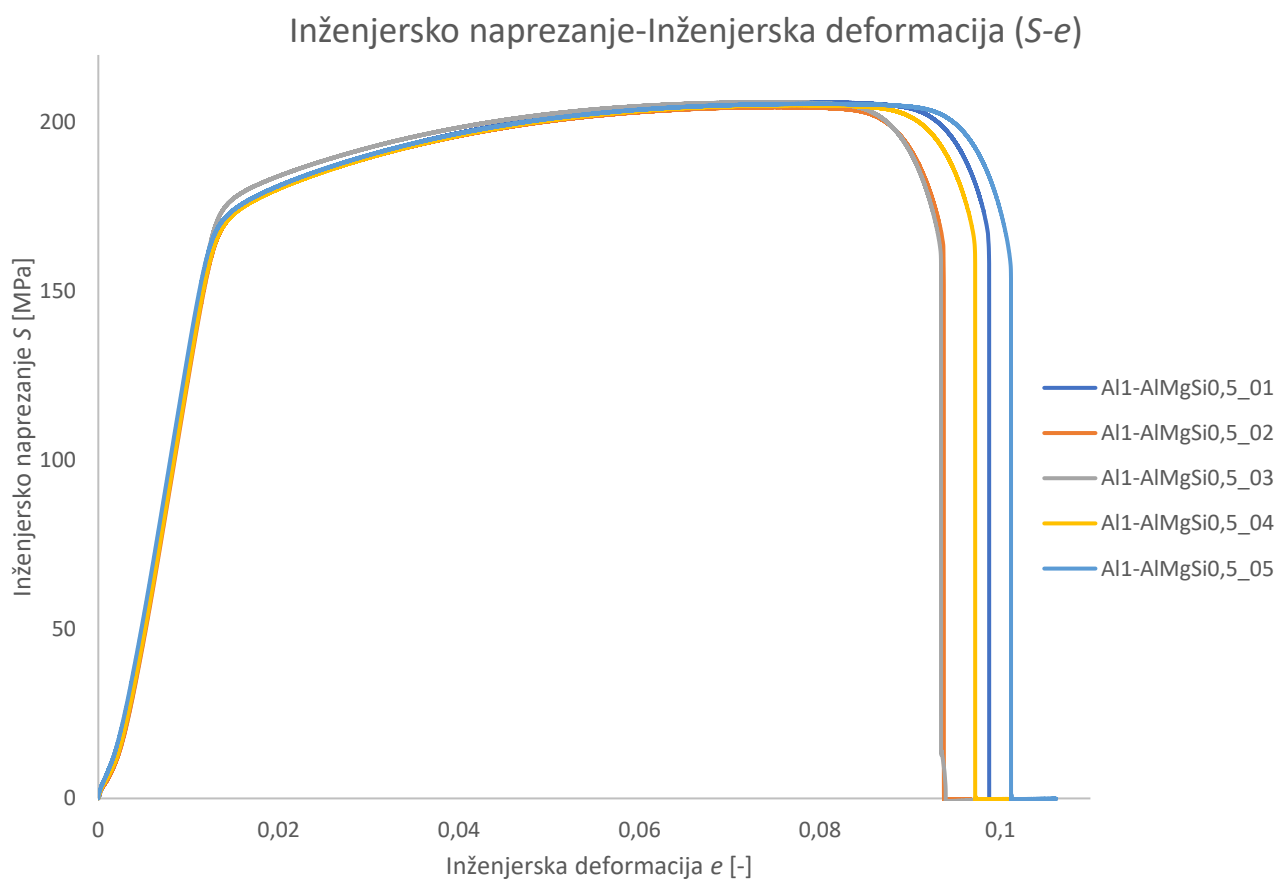
Modul elastičnosti  $E$  ispitivanih materijala određen je samo za jedan ispitni uzorak u setu koristeći se metodom korelacije digitalne slike. Metodom korelacije digitalne slike prikupljeni su podaci o sili  $F$  i produljenju ispitnih uzoraka  $\Delta L$ . Prikupljeni podaci obrađuju se koristeći se izrazima (2) i (3) te se iscrtava dijagram inženjersko naprezanje-inženjerska deformacija  $S-e$ .

Na slici 5.41 prikazan je komplet polomljenih ispitnih uzoraka legure aluminija AlMgSi0,5 debljine 5 mm oznake A11.



Slika 5.31. Komplet polomljenih ispitnih uzoraka legure aluminija Al1 - AlMgSi0,5 debljine 5 mm

Na slici 5.32 prikazan je dijagram inženjersko naprežanje-inženjerska deformacija  $S-e$  prethodno polomljenog kompleta ispitnih uzoraka AlMgSi0,5 debljine 5 mm.



Slika 5.32. Dijagram inženjersko naprežanje-inženjerska deformacija  $S-e$  za leguru aluminija Al1-AlMgSi0,5

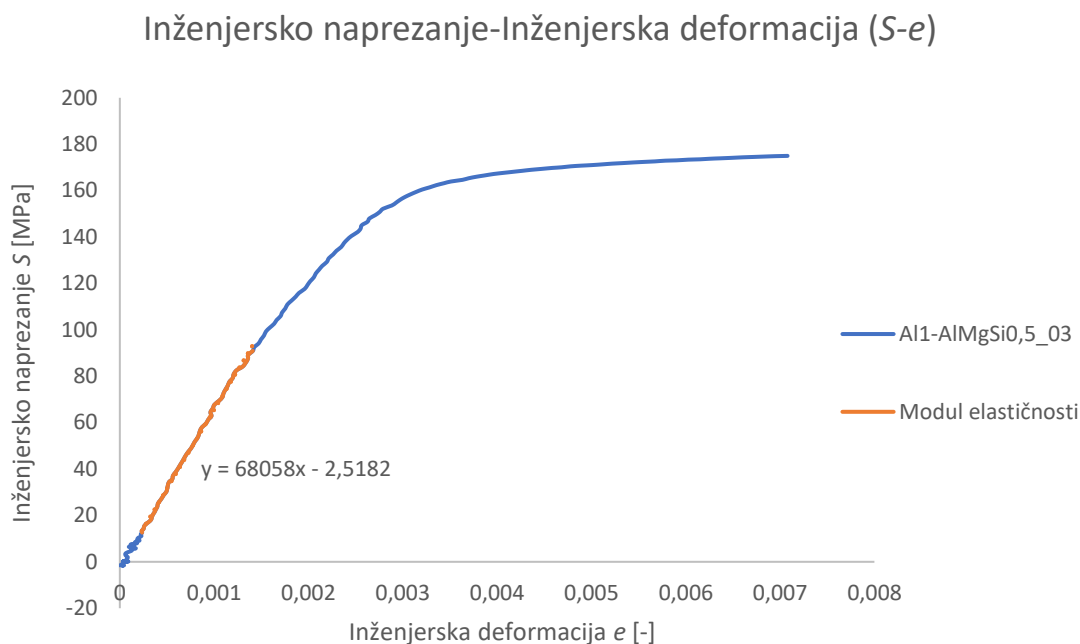
Analizom rezultata prikazanih na slici 5.32 može se doći do zaključka da krivulje pojedinih ispitnih uzoraka nemaju prevelika međusobna odstupanja te su rezultati ispitivanja konzistentni. Dijagrami inženjersko naprezanje-inženjerska deformacija  $S-e$  prikazani na slici 5.32 daju uvid u mehaničko ponašanje materijala prilikom opterećivanja. Na slici 5.32 na početku krivulje može se primijetiti nelinearno područje koje se naziva *engl. Toe region*. Ovo nelinearno područje javlja se zbog stiskanja materijala čeljustima gdje dolazi stvaranja nabora materijala. Prilikom opterećivanja prvo se nabori moraju izravnati (nelinearni dio) zatim se ulazi u linearno područje. U linearnom području vlada linearni odnos naprezanja i deformacije. Zatim nakon prolaska linearnog područja ulazi se u plastično područje. Legura aluminija AlMgSi0,5 predstavlja materijal koji ima kontinuirani prijelaz iz elastičnog u plastično područje što se može primijetiti na slici 5.32. Prolaskom kroz plastično područje dolazi se do točke maksimalnog naprezanja. Poslije maksimalnog naprezanja dolazi do postepenog pada naprezanja i konačnog loma uzorka. Svi materijali obrađeni u ovom diplomskom radu imaju prethodno opisano mehaničko ponašanje.

Na temelju dijagrama prikazanog na slici 5.32 i tabličnih podataka proračunati su podaci o mehaničkim svojstvima pojedinih uzoraka pomoću izraza opisanim u prethodnim poglavljima te su ona prikazana u tablici 5.5.

Tablica 5.5. Mehanička svojstva pojedinih ispitnih uzoraka legure aluminija Al1-AlMgSi0,5

	Al1- AlMgSi0,5_01	Al1- AlMgSi0,5_02	Al1- AlMgSi0,5_03	Al1- AlMgSi0,5_04	Al1- AlMgSi0,5_05
$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	206,06	204,61	206,02	205,21	205,56
$R_{p0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	174	172	177	174	174
$R_k$ [N/mm <sup>2</sup> ]	166	163	164	163	161
$A$ [%]	19,30	19,64	19,20	18,60	19,80
$Z$ [%]	48,55	44,97	37,22	34,26	34,81

Modul elastičnosti određen je za ispitni uzorak Al1-AlMgSi0,5\_03. Na slici 5.33 prikazan je dijagram inženjersko naprezanje-inženjerska deformacija  $S-e$  za ispitni uzorak Al1-AlMgSi0,5\_03 iz kojeg je pomoću linearne regresije određen modul elastičnosti.



*Slika 5.33. Dijagram inženjersko naprezanje-inženjerska deformacija S-e legure aluminija Al1-ALMgSi0,5-03*

Modul elastičnosti za materijal Al1-ALMgSi0,5 debljine 5 mm iznosi 68058 N/mm<sup>2</sup>.

Prema podacima iz tablice 5.5 izračunate su prosječne vrijednosti mehaničkih svojstava materijala. Prosječne vrijednosti mehaničkih svojstava materijala prikazane su u tablici 5.6.

*Tablica 5.6. Prosječne vrijednosti mehaničkih svojstava legure aluminija Al1-ALMgSi0,5 debljine 5 mm*

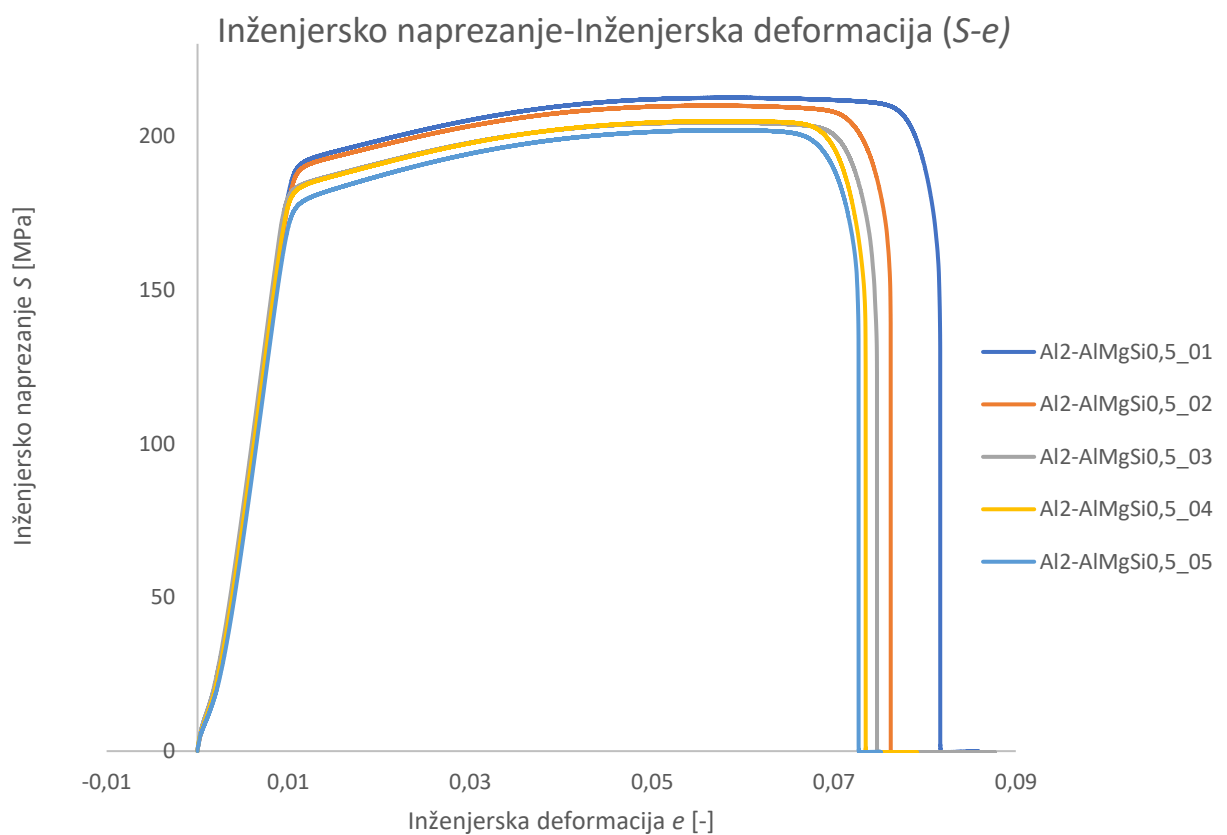
	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_{p0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_k$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$A$ [%]	$Z$ [%]
Al1-ALMgSi0,5 (5 mm)	205,50	174,20	163,40	68058	19,31	39,96

Na slici 5.34 prikazan je komplet polomljenih ispitnih uzoraka legure aluminija ALMgSi0,5 debljine 3 mm oznake Al2.



Slika 5.34. Komplet polomljenih ispitnih uzoraka legure aluminija Al2-AlMgSi0,5 debljine 3 mm

Na slici 5.35 prikazan je dijagram inženjersko naprežanje-inženjerska deformacija  $S$ - $e$  prethodno polomljenog kompleta ispitnih uzoraka AlMgSi0,5 debljine 3 mm.



Slika 5.35. Dijagram inženjersko naprežanje-inženjerska deformacija  $S$ - $e$  za leguru aluminija Al2-AlMgSi 0,5

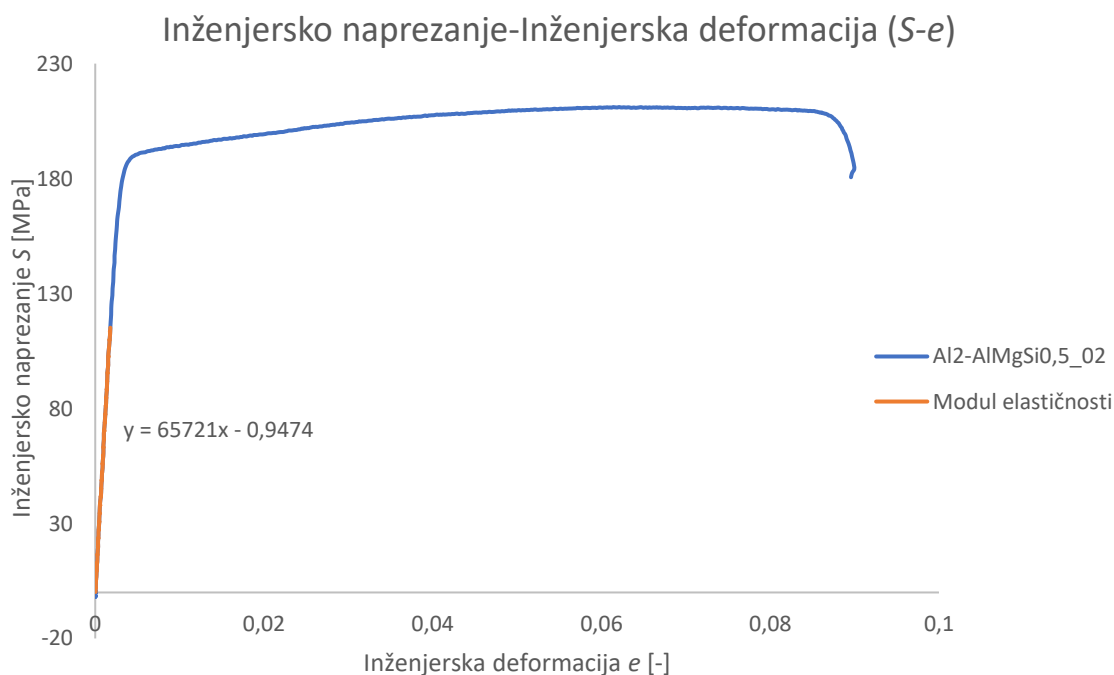


Analizom rezultata prikazanih na slici 5.35 može se doći do zaključka da krivulje pojedinih ispitnih uzoraka nemaju prevelika međusobna odstupanja te su rezultati ispitivanja konzistentni. Na temelju dijagram prikazanog na slici 5.35 i tabličnih podataka proračunati su podaci o mehaničkim svojstvima pojedinih uzoraka pomoću izraza opisanim u prethodnim poglavljima te su ona prikazana u tablici 5.7.

Tablica 5.7. Mehanička svojstva pojedinih ispitnih uzoraka legure aluminija Al2-AlMgSi0,5 debljine 3 mm

	Al2-AlMgSi0,5_01	Al2-AlMgSi0,5_02	Al2-AlMgSi0,5_03	Al2-AlMgSi0,5_04	Al2-AlMgSi0,5_05
$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	212,5	209	204,47	204,88	201,95
$R_{p0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	192,88	191,24	185,42	184,85	180,72
$R_k$ [N/mm <sup>2</sup> ]	188	187	178	175	173
$A$ [%]	28,82	28,97	27,79	27,06	26,76
$Z$ [%]	17,84	24,10	18,11	22,14	16,69

Modul elastičnosti određen je za ispitni uzorak Al2-AlMgSi0,5\_02. Na slici 5.36 prikazan je dijagram inženjersko naprezanje-inženjerska deformacija  $S-e$  za ispitni uzorak Al2-AlMgSi0,5\_02 iz kojeg je pomoću linearne regresije određen modul elastičnosti.



Slika 5.36. Dijagram inženjersko naprezanje-inženjerska deformacija  $S-e$  legure aluminija Al2-AlMgSi0,5-02

Modul elastičnosti za materijal Al2-AlMgSi0,5 debljine 3 mm iznosi 65721 N/mm<sup>2</sup>.

Prema podacima iz tablice 5.7 izračunate su prosječne vrijednosti mehaničkih svojstva materijala. Prosječne vrijednosti mehaničkih svojstava prikazane su u tablici 5.8.

Tablica 5.8. Prosječne vrijednosti mehaničkih svojstava legure aluminija Al2-AlMgSi0,5 debljine 3 mm

	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_{p0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_k$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$A$ [%]	$Z$ [%]
Al2-AlMgSi0,5 (3 mm)	206,74	187,02	180,20	65721	27,88	19,77

Tablicom 5.9 dana je usporedba prosječnih vrijednosti mehaničkih svojstava legura aluminija Al1 i Al2. Legure Al1 i Al2 predstavljaju leguru aluminija AlMgSi0,5. Razlika između ispitnih uzoraka Al1 i Al2 je u njihovoj debljini.

Tablica 5.9. Tablica usporedbe prosječnih vrijednosti mehaničkih svojstava legura aluminija Al1 i Al2

	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_{p0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_k$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$A$ [%]	$Z$ [%]
Al1-AlMgSi0,5 (5 mm)	205,49	174,20	163,40	68058	19,31	39,96
Al1-AlMgSi0,5 (3 mm)	206,74	187,02	180,20	65721	27,88	19,77

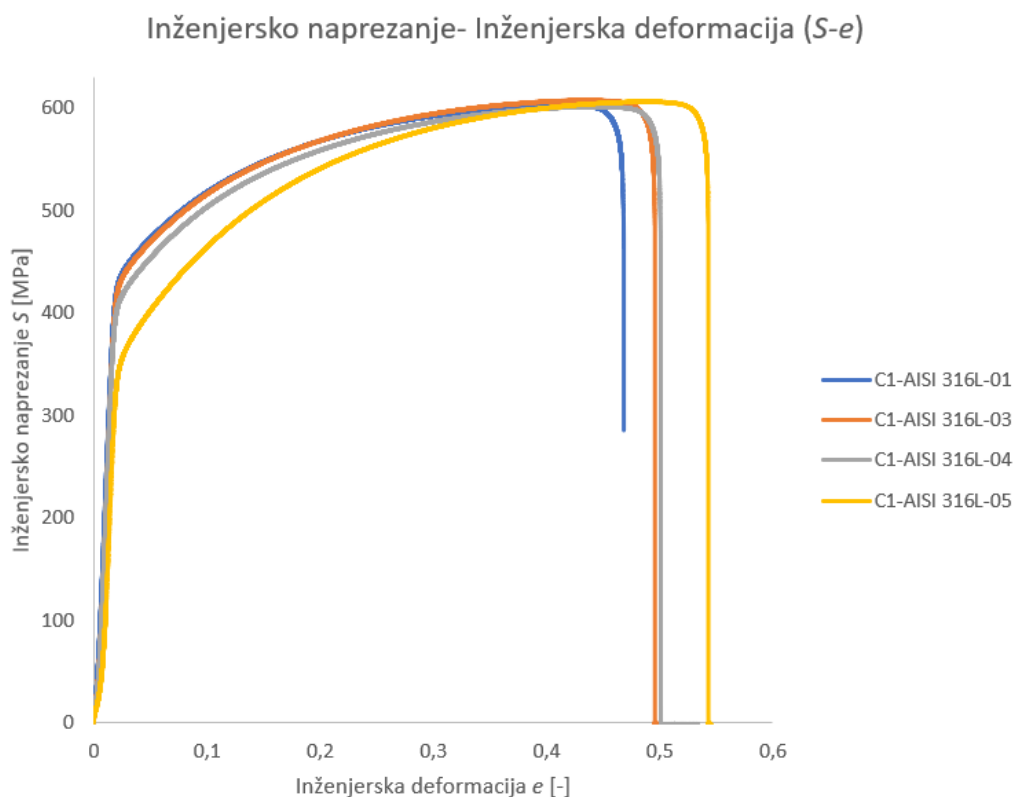
Usporedbom prosječnih vrijednosti mehaničkih svojstava materijala za dvije različite debljine u tablici 5.9 može se primijetiti da vrijednost vlačne čvrstoće  $R_m$ , konvencionalne granice tečenja  $R_{p0,2}$  i modula elastičnosti  $E$  nemaju prevelika odstupanja. Povećana odstupanja javljaju se kod istezljivosti  $A$  i kontrakcije  $Z$  ispitnih uzoraka. Legura Al1 debljine 5 mm pokazuje manju vrijednost istezljivost  $A$  u odnosu na vrijednost kontrakcije  $Z$ . Kod legure Al2 zapaženo je obrnuto mehaničko ponašanje u odnosu na leguru Al1. Legura Al2 debljine 3 mm pokazuje veću vrijednost istezljivost  $A$  u odnosu na vrijednost kontrakcije  $Z$ . Usporedbom vrijednosti istezljivosti  $A$  legura Al1 i Al2 može se zaključiti da legura Al2 ima veću istezljivost u odnosu na leguru Al1, a usporedbom vrijednosti kontrakcije  $Z$  legura Al1 ima skoro dvostruko veću mogućnost kontrakcije naspram legure Al2. Analizom prosječnih vrijednosti mehaničkih svojstva pojedinih legura aluminija došlo se je do zaključka da njihovo ponašanje ne odstupa od početno predviđenog i da su rezultati uskladu s atestima.

Na slici 5.37 prikazan je set polomljenih ispitnih uzoraka korozivski postojanog čelika AISI 316L oznake C1.



Slika 5.37. Komplet polomljenih ispitnih uzoraka korozivski postojanog čelika C1-AISI 316L

Na slici 5.38 prikazan je dijagram inženjersko naprežanje-inženjerska deformacija  $S$ - $e$  prethodno polomljenog kompleta ispitnih uzoraka korozivski postojanog čelika AISI 316L oznake C1.



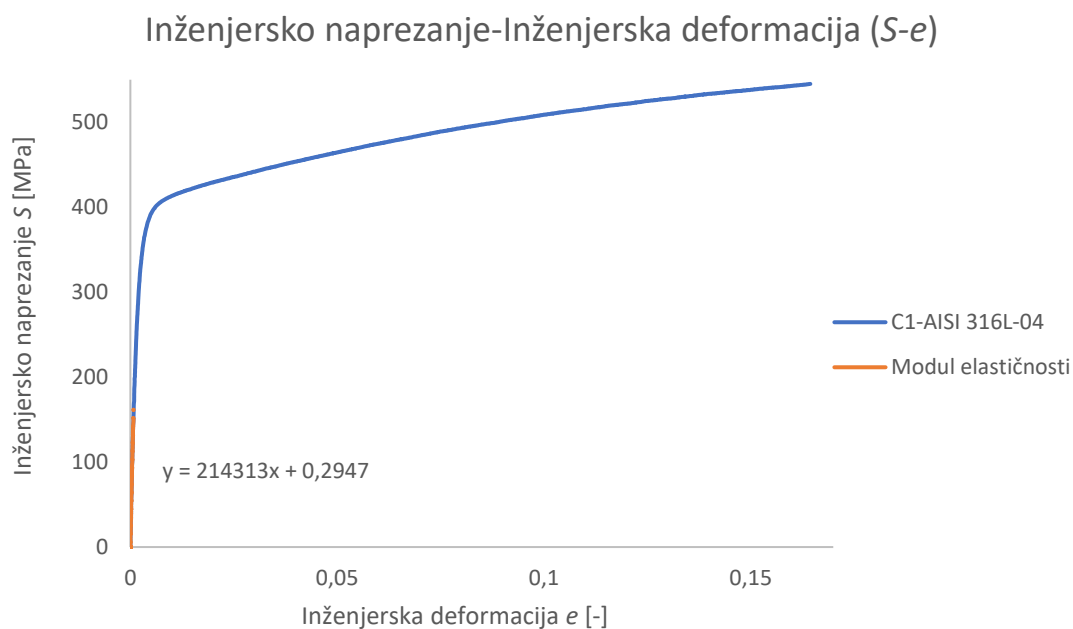
Slika 5.38. Dijagram inženjersko naprežanje-inženjerska deformacija  $S$ - $e$  za korozivski postojani čelik C1-AISI 316L

U tablici 5.10 prikazana su mehanička svojstva pojedinih ispitnih uzoraka korozijski postojanog čelika AISI 316L.

Tablica 5.10. Mehanička svojstva pojedinih ispitnih uzoraka korozijski postojanog čelika-C1-AISI 316L

	C1-ASI 316L-01	C1-ASI 316L-03	C1-ASI 316L-04	C1-ASI 316L-06
$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	602,68	607,48	601,45	605,84
$R_{p0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	422	425	414	362
$R_k$ [N/mm <sup>2</sup> ]	540	537	534	545
$A$ [%]	36,87	37,13	34,22	37,52
$Z$ [%]	55,98	56,69	58,13	58,21

Modul elastičnosti određen je za ispitni uzorak C1-ASI 316L-04. Na slici 5.39 prikazan je dijagram inženjersko naprežanje-inženjerska deformacija  $S-e$  za ispitni uzorak C1-ASI 316L-04 iz kojeg je pomoću linearne regresije određen modul elastičnosti.



Slika 5.39. Dijagram inženjersko naprežanje-inženjerska deformacija  $S-e$  korozijski postojanog čelika C1-AISI 316L-04

Modul elastičnosti za materijal C1-AISI 316L iznosi 214313 N/mm<sup>2</sup>.

Prema podacima iz tablice 5.10 izračunate su prosječne vrijednosti mehaničkih svojstava materijala. Prosječne vrijednosti mehaničkih svojstava prikazani su u tablici 5.11.

Tablica 5.11. Prosječne vrijednosti mehaničkih svojstava korozijski postojanog čelika C1-AISI 316L

	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_{p0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_k$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$A$ [%]	$Z$ [%]
C1-AISI 316L	604,36	420,33	539	214313	36,19	57,26

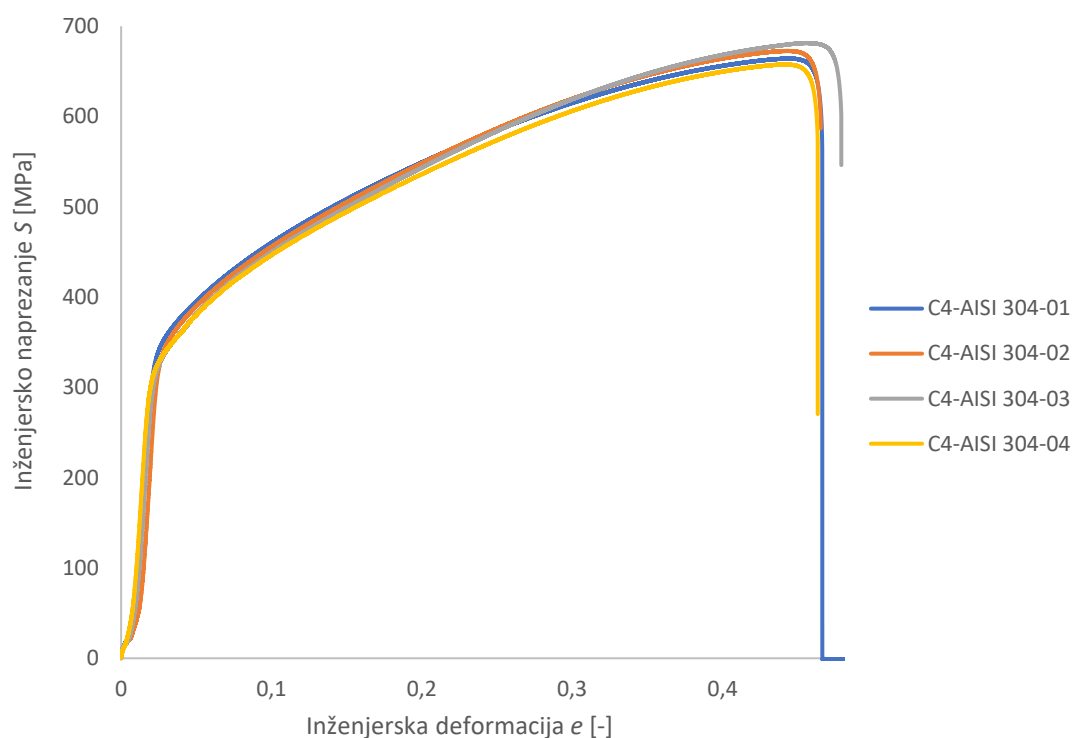
Na slici 5.40 prikazan je komplet polomljenih ispitnih uzoraka korozijski postojanog čelika AISI 304 oznake C4.



Slika 5.40. Komplet polomljenih ispitnih uzoraka korozijski postojanog čelika C4-AISI 304

Na slici 5.41 prikazan je inženjersko naprezanje-inženjerska deformacija  $S-e$  prethodno polomljenog kompleta ispitnih uzoraka korozijski postojanog čelika AISI 304 oznake C4.

## Inženjersko naprezanje - Inženjerska deformacija (S-e)



Slika 5.41. Dijagram inženjersko naprezanje-inženjerska deformacija S-e za korozijski postojani čelik C4-AISI 304

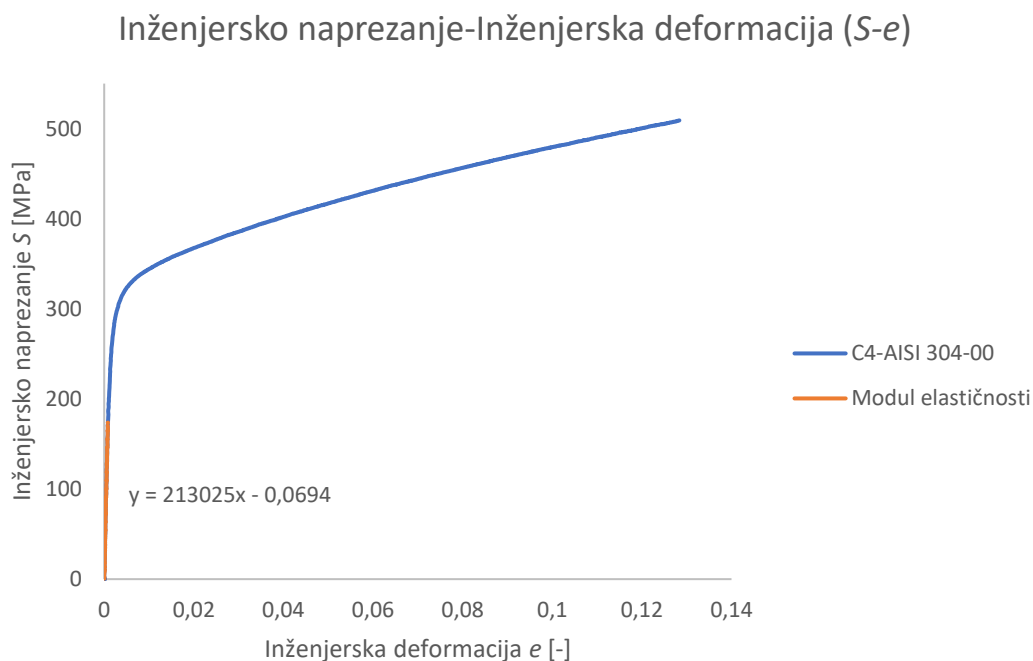
U tablici 5.10 prikazana su mehanička svojstva pojedinih ispitnih uzoraka korozijski postojanog čelika AISI 304.

Tablica 5.12. Mehanička svojstva pojedinih ispitnih uzoraka korozijski postojanog čelika C4-AISI 304

	C4-AISI 304-01	C4-AISI 304-02	C4-AISI 304-03	C4-AISI 304-04
$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	664,38	672,82	681,58	657,81
$R_{p0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	337	323	319	316
$R_k$ [N/mm <sup>2</sup> ]	635	643	647	638
A [%]	34,83	34,96	31,92	32,06
Z [%]	54,70	51,90	51,07	50,27

Modul elastičnosti određen je za ispitni uzorak C4AISI 304-00 koji se koristio samo za određivanje modula elastičnosti. Na slici 5.42 prikazan je dijagram inženjersko naprezanje –

inženjerska deformacija za ispitni uzorak C4-00 iz kojeg je pomoću linearne regresije određen modul elastičnosti.



Slika 5.42. Dijagram inženjersko naprezanje-inženjerska deformacija S-e korozivno postojanog čelika C4-AISI 304-00

Modul elastičnosti za materijal C4-AISI 304 iznosi 213025 N/mm<sup>2</sup>.

Prema podacima iz tablice 5.12 izračunate su prosječne vrijednosti mehaničkih svojstava materijala. Prosječne vrijednosti mehaničkih svojstava prikazane su u tablici 5.13.

Tablica 5.13. Prosječne vrijednosti mehaničkih svojstava korozivno postojanog čelika C4-AISI 304

	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_{p0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_k$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$A$ [%]	$Z$ [%]
C4-AISI 304	669,15	323,75	640,75	213025	33,44	51,98

Tablicom 5.9 dana je usporedba prosječnih vrijednosti mehaničkih svojstava dvije vrste korozivno postojanih čelika AISI 316L i AISI 304.

Tablica 5.14. Tablica usporedbe prosječnih vrijednosti mehaničkih svojstava korozijski postojanih čelika C1 i C4

	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_{p0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_k$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$A$ [%]	$Z$ [%]
C1-AISI 316L	604,36	420,33	539	214313	36,19	57,26
C4-AISI 304	669,15	323,75	640,75	213025	33,44	51,98

Usporedbom prosječnih vrijednosti mehaničkih svojstava korozijskih postojanih čelika došlo se je do sljedećeg zaključka. Čelik AISI 304 ima znatno veću vrijednost vlačne čvrstoće  $R_m$  u iznosu od 669,15 N/mm<sup>2</sup> u odnosu na čelik AISI 304 čija vrijednost vlačne čvrstoće iznosi 604,36 N/mm<sup>2</sup>. Usporedbom vrijednost konvencionalne granice tečenja  $R_{p0,2}$  pojedinih čelika može se primijetiti da čelik AISI 316L ima znatno veću vrijednost konvencionalne granice tečenja  $R_{p0,2}$  u odnosu na čelik AISI 304. Vrijednost konvencionalne granice tečenja  $R_{p0,2}$  za AISI 316L iznosi 420,33 N/mm<sup>2</sup>, a za AISI 304 iznosi 323,75 N/mm<sup>2</sup>. Lom ispitnog uzorka čelika AISI 316L javlja se pri 539 N/mm<sup>2</sup>, a čelika AISI 304 pri 640,75 N/mm<sup>2</sup> što je znatno više. Modul elastičnosti oba čelika su konzistentni i nema velikih odstupanja. Također oba čelika imaju slične vrijednosti istezljivosti  $A$  i kontrakcije  $Z$ . Analizom prosječnih vrijednosti mehaničkih svojstva pojedinačnog korozijski postojanog čelika došlo se je do zaključka da njihovo ponašanje ne odstupa od početno predviđenog i da su rezultati uskladu s atestima.

Rezultati ispitivanja kemijskog sastava legura aluminija i korozijski postojanih čelika dani su tablicama 5.15, 5.16, 5.17 i 5.18.

U tablicama 5.15 i 5.16 predstavljeni su rezultati ispitivanja kemijskog sastava legura aluminija.

Tablica 5.15. Kemijski sastav legure aluminija Al1-AlMgSi0,5

Al1-AlMgSi0,5									
/	Si [%]	Fe[%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]	Cr [%]	Zn [%]	Ti [%]	Al [[%]]
Atest:	0,48	0,192	0,001	0,07	0,58	0,003	0,009	0,064	98,60
Izmjereno:	0,15	0,289	0	0,001	0,423	0,006	0,029	0,0133	98,9



Tablica 5.16. Kemijski sastav legure aluminija Al2-AlMgSi0,5

Al2-AlMgSi0,5									
/	Si [%]	Fe[%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]	Cr [%]	Zn [%]	Ti [%]	Al [%]
Atest:	0,48	0,192	0,001	0,07	0,58	0,003	0,009	0,064	98,60
Izmjereno:	0,148	0,183	0	0,0014	0,448	0,006	0,0012	0,0174	99

Vrijednosti kemijskog sastava legura aluminija predstavljeni tablicama 5.15 i 5.16 su u skladu s atestima osim vrijednosti kemijskog sastava silicija. Razlog odstupanja vrijednosti silicija je nalazi se u kalibraciji ispitnog uređaja. Uređaj nije uspio postići zadovoljavajuću kalibraciju na silicij stoga vrijednosti odstupaju. Kako ostale vrijednosti kemijskog sastava odgovaraju onima u atestu može se zaključiti da vrijednost silicija sigurno nije 0,15% (tablica 5.15) i 0,148% (tablica 5.16) već je bliže vrijednosti u prethodno navedenim tablicama.

U tablicama 5.17 i 5.18 predstavljeni su rezultati ispitivanja kemijskog sastava korozivskih postojanih čelika.

Tablica 5.17. Kemijski sastav korozivski postojanog čelika C1-AISI 316L

C1-AISI 316L								
/	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]
Atest:	0,022	0,51	0,91	0,038	0,00006	17,1	10	0,064
Izmjereno:	0	0,702	1,6	0,0177	0,0042	16,3	10,4	1,92

Vrijednosti kemijskog sastava korozivskog postojanog čelika u tablici 5.17 odgovaraju atestima te nema nikakvih abnormalnosti.

Tablica 5.18. Kemijski sastav korozivski postojanog čelika C4-AISI 304

C4-AISI 304							
/	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]
Atest:	0,063	0,331	1,16	0,032	0,008	18,13	8,12
Izmjereno:	0	0,32	0,83	0,0134	0,0013	14,3	7,17

Vrijednosti kemijskog sastava korozivskog postojanog čelika u tablici 5.18 su u skladu s atestima osim vrijednosti kemijskog sastava kroma. Razlog odstupanja kemijskog sastava kroma nalazi se u kalibraciji ispitnog uređaja. Uređaj nije uspio postići zadovoljavajuću kalibraciju na krom stoga vrijednosti odstupaju. Kako ostale vrijednosti kemijskog sastava odgovaraju onima u

atestu može se doći do zaključka da vrijednost kroma sigurno nije 14,3% (tablica 5.18) već je bliže vrijednosti u prethodno navedenoj tablici.

## 6. PRIMJENA EKSPERIMENTALNIH PODATAK U NUMERIČKOJ ANALIZI

Numerička analiza jedna je od osnovnih metoda rješavanja problema u strojarstvu uz analitičku i eksperimentalnu metodu. Kod numeričke analize problem se modelira i opisuje koristeći se linearnim, nelinearnim i parcijalnim diferencijalnim jednačinama koje se zatim rješavaju uvođenjem dodatnih rubnih uvjeta. Numerička analiza daje približno točna rješenja problema. Ona služi za približno rješavanje kompleksnih problema, poput modeliranja ponašanja dijelova aviona prilikom leta gdje najčešće nije moguće primijeniti analitičku i eksperimentalnu metodu. Najčešći oblik numeričke analize u strojarstvu predstavlja analiza metodom konačnih elemenata.

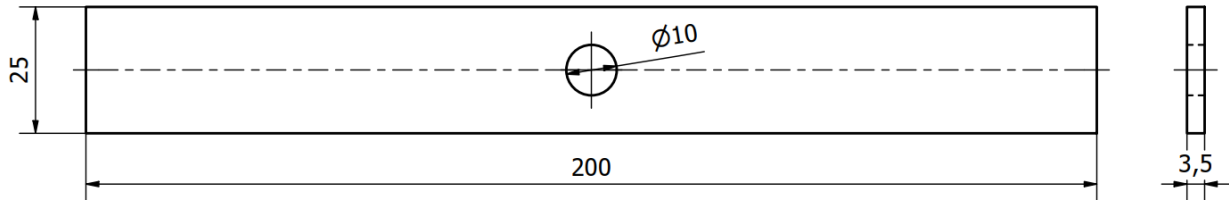
Metoda konačnih elemenata diskretizira kompleksnu geometriju na veliki broj manjih segmenata koji se nazivaju konačni elementi. Ponašanje jednog konačnog elementa definirano je jednačinama koje modeliraju njegovo ponašanje kao naprimjer element koji može prenositi samo aksijalno opterećenje (štapni element). Kombinacijom više vrsta elemenata modelira se ponašanje nekog predmeta prilikom opterećenja.

Analiza metodom konačnih elemenata pokušava se približiti što je bliže moguće stvarnoj situaciji. Konstrukcije se u pravilu dimenzioniraju u području gdje vrijedi Hookeov zakon  $\sigma = E \cdot \varepsilon$ . U linearnom području ponašanje materijala je vrlo jednostavno, no ako bi se konstrukcija htjela dimenzionirati u razumnom dijelu plastičnog područja ili pratiti ponašanje materijala ulaskom u plastično područje potrebno je modelirati ponašanje u plastičnom području. U plastičnom području odnos naprezanja i deformacije je nelinearan i ponašanje je složeno. Plastično područje može se aproksimirati linearnom analizom i tako činiti veliku pogrešku ili napraviti potpunu nelinearnu analizu. Kako bi modeli bili ispravni potrebno je koristiti se eksperimentalnim podacima.

Stoga je u ovom diplomskom radu provedena linearna i nelinearna numerička analiza korištenjem mehaničkih svojstava dobivenih statičkim vlačnim ispitivanjem. Izvršena je usporedba rezultata linearne i nelinearne analize kako bi se prikazala i potvrdila moguća veličina pogreške aproksimacije plastičnog područja linearnim modelom u odnosu na nelinearni model.

### 6.1. Opis modela za numeričku analizu i analitički proračun

Geometrija modela za linearnu i nelinearnu analizu je pravokutna šipka dimenzija prikazanih na slici 6.1.



Slika 6.1. Dimenzije geometrije modela za numeričku analizu

Materijal modela za linearnu i nelinearnu analizu je legura aluminija, AlMgSi0,5/EN AW 6060. Osnovna mehanička svojstva legure aluminija dobivena vlačnim eksperimentom su:

- modul elastičnosti:  $E = 68058 \text{ MPa}$ ,
- konvencionalna granica tečenja:  $R_{p0,2} = 174,2 \text{ MPa}$  i
- Poissonov broj:  $\nu = 0,33$ .

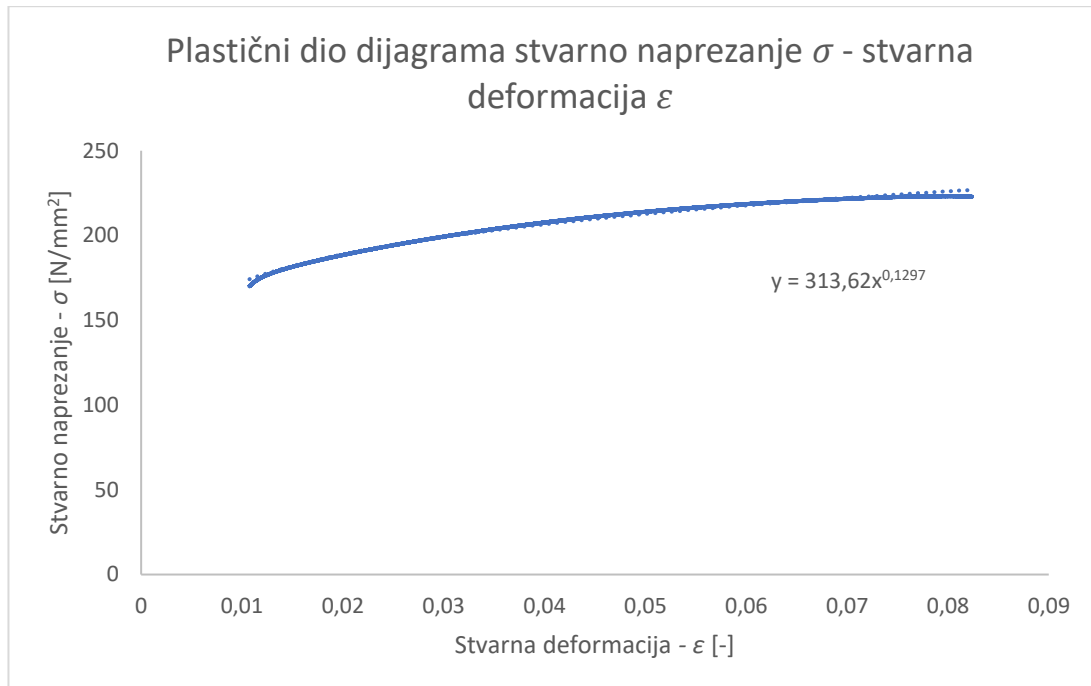
Na osnovi eksperimentalno dobivenih podataka i Ramberg–Osgood-ovog izraza za monotono opterećenje (17) korištenjem programa MS Excel određeni su koeficijent deformacijskog očvršćivanja  $K$  i eksponent deformacijskog očvršćivanja  $n$  koji su potrebni za nelinearnu analizu.

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (17)$$

Gdje je:

- $\sigma$  – stvarno naprežanje [ $\text{N/mm}^2$ ]
- $E$  – modul elastičnosti [ $\text{N/mm}^2$ ]
- $K$  – koeficijent deformacijskog očvršćivanja [ $\text{N/mm}^2$ ]
- $n$  – eksponent deformacijskog očvršćivanja [-]

Na slici 6.2 prikazano je plastični dio krivulje stvarno naprezanje – stvarana deformacija  $\sigma - \epsilon$  na temelju koje su određeni parametri  $K$  i  $n$ .



Slika 6.2. Plastični dio dijagrama stvarno naprezanje–stvarana deformacija  $\sigma-\epsilon$

Prema dijagramu na slici 6.2 parametri vrijednosti parametara su:

- $K = 313,62 \text{ N/mm}^2$
- $n = 0,1297$

Prije provođenja linearne i nelinearne analize proveden je analitički proračun koji će se usporediti s linearnom analizom kako bi se mogli verificirati rezultati.

Pravokutna ploča izrađena je sa središnjim provrtom koji predstavlja konzentror naprezanja. Maksimalno naprezanje šipke računa se korištenjem teorijskog faktora koncentracije naprezanja  $K_t$  predstavljenog izrazom (18) [15].

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{nom}}} \quad (18)$$

Gdje je:

- $K_t$  – teorijski faktor koncentracije naprezanja  $[\text{N/mm}^2]$
- $\sigma_{\max}$  – maksimalno normalno naprezanje  $[\text{N/mm}^2]$
- $\sigma_{\text{nom}}$  – nominalno naprezanje  $[\text{N/mm}^2]$

Nominalno naprezanje računa se prema izrazu (19):

$$\sigma_{\text{nom}} = \frac{F}{(w - d) \cdot t} \quad (19)$$

Gdje je:

- $\sigma_{\text{nom}}$  – nominalno naprezanje [N/mm<sup>2</sup>]
- $F$  – opterećenje [N]
- $w$  – širina ploče [mm]
- $d$  – promjer provrta [mm]
- $t$  – debljina ploče [mm]

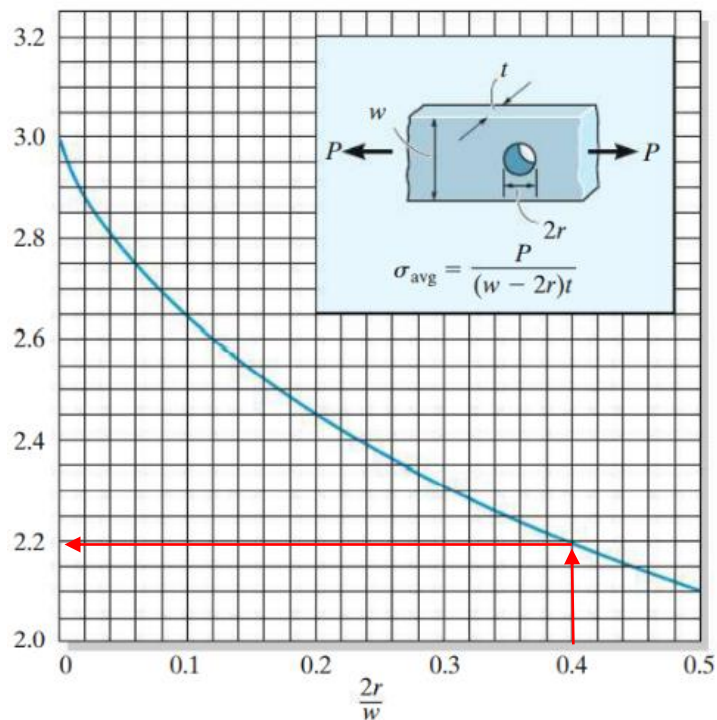
Širina ploče iznosi  $w = 25$  mm, promjer provrta iznosi  $d = 10$  mm, debljina ploče iznosi  $t = 3,5$  mm i vrijednost opterećenja iznosi  $F = 11000$  N. Vrijednost opterećenja odabrana je tako da se osigura ulazak materijala u plastično područje. Prethodno navedene vrijednosti uvrštavaju se u izraz:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{nom}} &= \frac{F}{(w - d) \cdot t} \\ \sigma_{\text{nom}} &= \frac{11000}{(25 - 10) \cdot 3,5} \\ \sigma_{\text{nom}} &= 209,52 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Nominalno naprezanje iznosi 209,52 N/mm<sup>2</sup>.

Kako bi se izračunalo maksimalno naprezanje potrebno je odrediti teorijski faktor koncentracije naprezanja  $K_t$ . Teorijski faktor koncentracija naprezanja  $K_t$  određuje se pomoću dijagrama prikazanog na slici 6.3. Za određivanje faktora koncentracije naprezanja potrebna je vrijednost predstavljena izrazom (20) [15].

$$\frac{2r}{w} = \frac{2 \cdot 5}{25} = 0,4 \quad (20)$$



Slika 6.3. Dijagram teorijskog faktora koncentracije naprezanja za provrte [15]

Iz dijagrama na slici 6.3 za  $\frac{2r}{w} = 0,4$  faktor koncentracije naprezanja  $K_t$  iznosi 2,2.

Maksimalno naprezanje računa se prema izrazu (21):

$$\sigma_{\max} = K_t \cdot \sigma_{\text{nom}} \quad (21)$$

$$\sigma_{\max} = 2,2 \cdot 209,52$$

$$\sigma_{\max} = 460,944 \text{ N/mm}^2$$

Maksimalno naprezanje iznosi 460,944 N/mm<sup>2</sup>.

Prethodno provedeni proračun pretpostavlja linearno elastično ponašanje materijala te služi za verifikaciju rezultata dobivenih linearnom analizom.

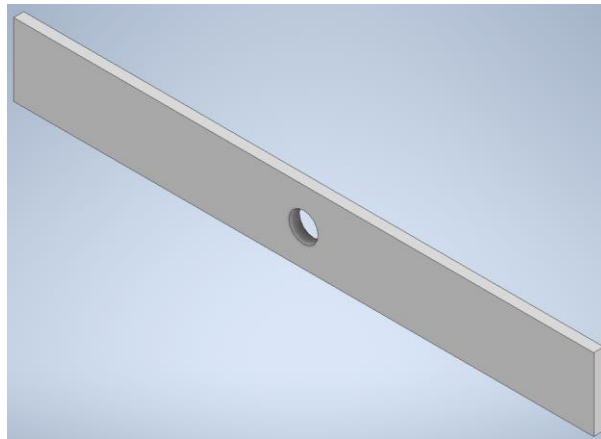
Na temelju eksperimentom dobivenih mehaničkih svojstva za odabrani materijal i analitičkog proračuna napravljene su linearna i nelinearna analiza.

## 6.2. Linearna analiza metodom konačnih elemenata

Linearna analiza metodom konačnih elemenata provodi se u programu Autodesk Inventor Professional 2023. Linearna analiza temelji se na dvije glavne pretpostavke:

- deformacije nemaju utjecaj na ponašanje strukture modela i
- odnos naprezanja i deformacije je linearan.

Analiza metodom konačnih elemenata započinje definiranjem mehaničkih svojstva materijala. Odabrani materijal je AlMgSi0,5/EN AW 6060. Za model prema slici 6.4 definirani su mehanička svojstva i ponašanje materijala.

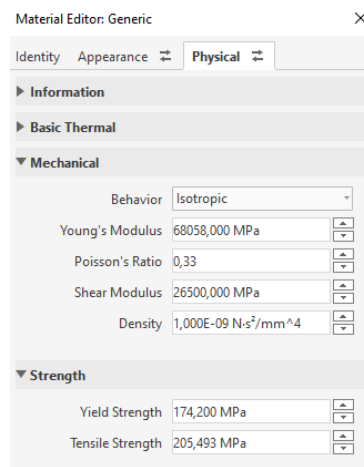


*Slika 6.4. Model za linearnu analizu*

Opcijama prikazanim na slici 6.5 definirano je izotropno ponašanje materijala, odnosno materijal ima jednaka mehanička svojstva u svim smjerovima i 5 osnovnih parametara kako slijedi:

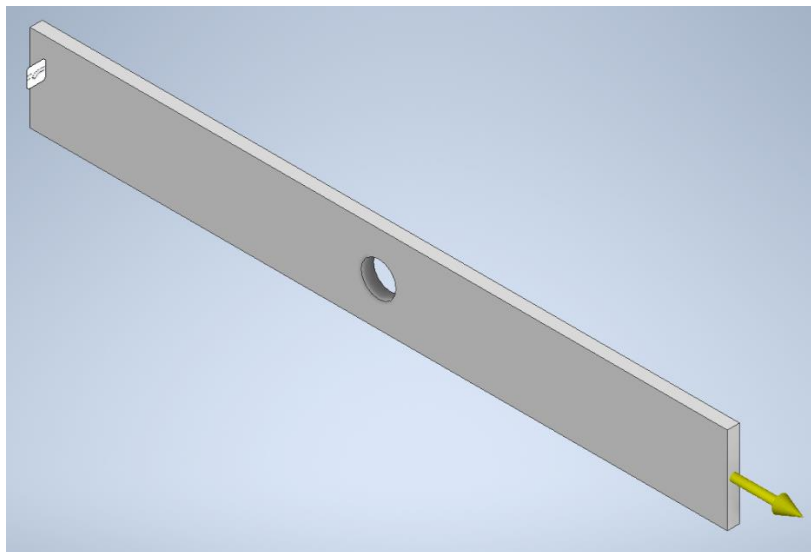
- modul elastičnosti,  $E = 68058 \text{ N/mm}^2$ ,
- Poissonov koeficijent  $\nu = 0,33$ ,
- modul smicanja,  $G = 26500 \text{ N/mm}^2$ ,
- granica tečenja,  $R_e = 174,2 \text{ N/mm}^2$  i
- vlačna čvrstoća,  $R_m = 205,493 \text{ N/mm}^2$ .





Slika 6.5. Prozor za definiranje mehaničkih svojstva materijala AlMgSi0,5

Zatim potrebno je definirati rubne uvjete modela, odnosno oslonce i opterećenja. Na slici 6.6 prikazan je model s definiranim rubnim uvjetima.

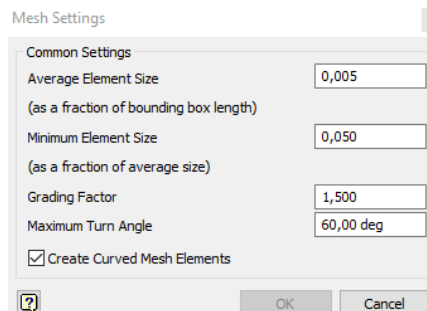


Slika 6.6. Definirani rubni uvjeti oslonaca i opterećenja

Pravokutna ploča na slici 6.6 uklještena je s lijeve strane što predstavlja postavljanje ispitnog uzorka u čeljust kidalice, a s desne strane omogućen je pomak što predstavlja pomičnu čeljust. Opterećenje uzorka postavljeno je na desnu stranu te ono iznosi  $F = 11000$  N.

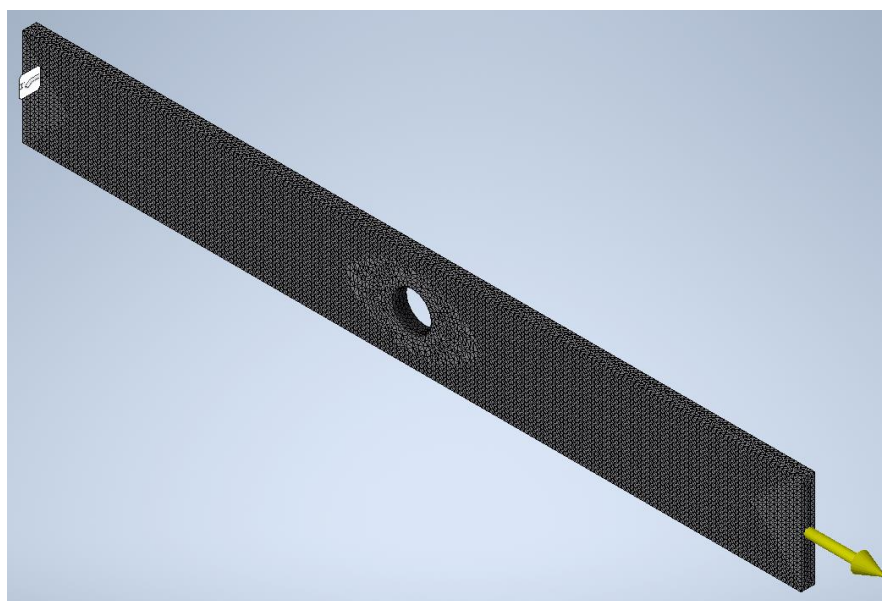
Nakon definiranja mehaničkih svojstava materijala i rubnih uvjeta modela potrebno je izraditi mrežu konačnih elemenata. Za potrebe ove analize definirana je srednja veličina

elementa u iznosu od 0,005 i minimalna veličina elementa od 0,050. Odabir je prikazan na slici 6.7.



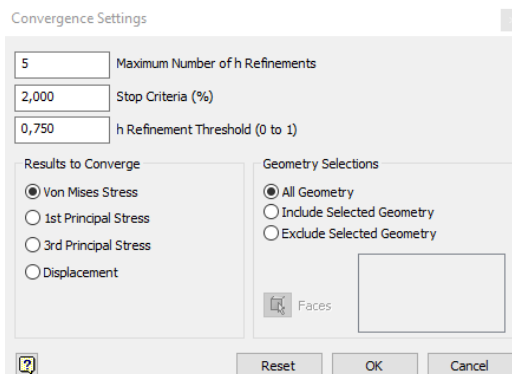
*Slika 6.7. Parametri mreže konačnih elemenata*

Potpuno omreženi model prikazan je na slici 6.8.



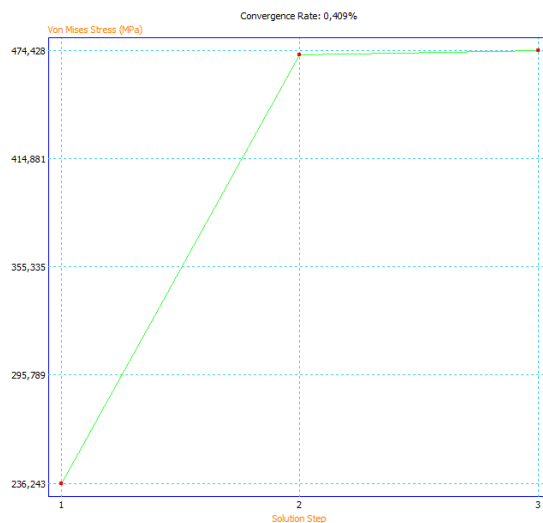
*Slika 6.8. Potpuno omreženi model*

Prije pokretanja simulacije potrebno je odrediti postavke konvergencije rezultata. Za potrebe ovog diplomskog rada postavljena je konvergencija od 2%. Konvergencija rezultata se odvija u odnosu na naprezanje prema von Misesu. Postavke konvergencije prikazane su na slici 6.9.



Slika 6.9. Postavke konvergencije modela

Definirani su svi rubni uvjeti i postavke mreže te je ploča spremna za računalnu simulaciju. Provedena je računalna simulacije te je provjerena prvo provjerena konvergencija rezultata prikazana na slici 6.10.

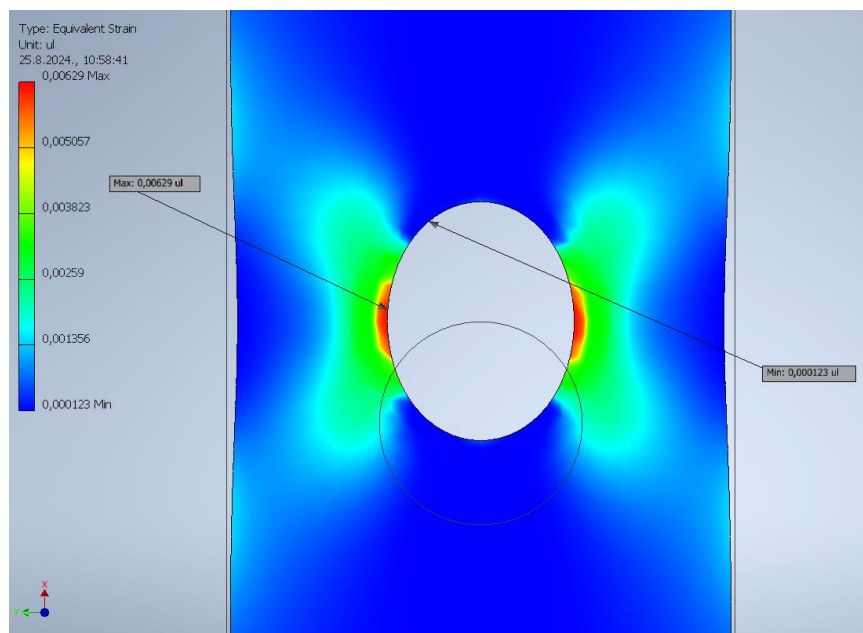


Slika 6.10. Konvergencija rezultata

Prema slici 6.10 model je konvergirao rješenju u 3 koraka te konvergencija simulacije iznosi 0,409% što je znatno ispod zadani 2% te je model zadovoljavajuće konvergirao.

Rezultati odrađene simulacije prikazani su na slikama 6.11 i 6.12.

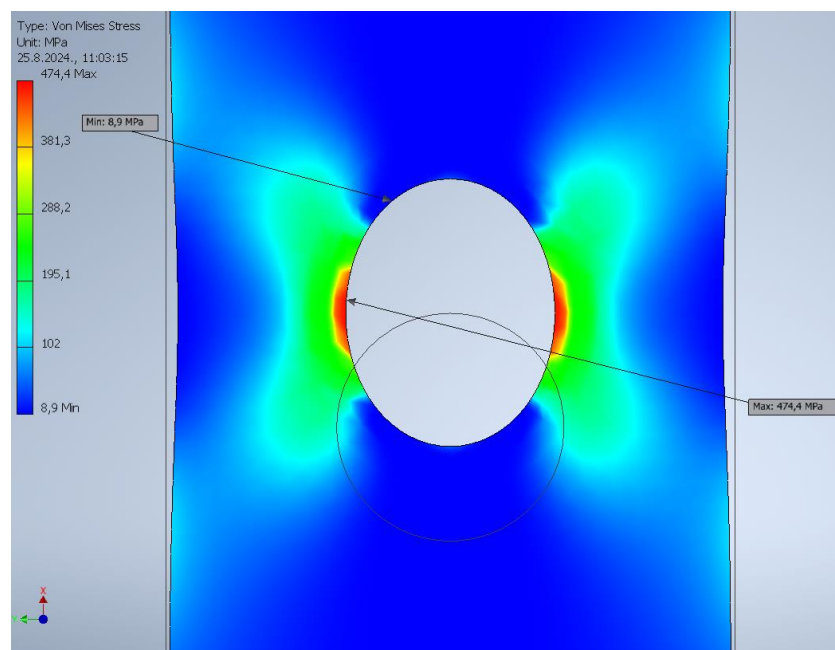
Na slici 6.11 prikazana je raspodjela ukupne deformacija pravokutne ploče.



Slika 6.11. Raspodjela ukupne deformacije - linearna analiza

Maksimalna deformacija kod linearne analize iznosi 0,00629, a minimalna deformacija iznosi 0,00012.

Na slici 6.12 prikazana je raspodjela naprezanja na pravokutnoj ploči prema von Misesu.

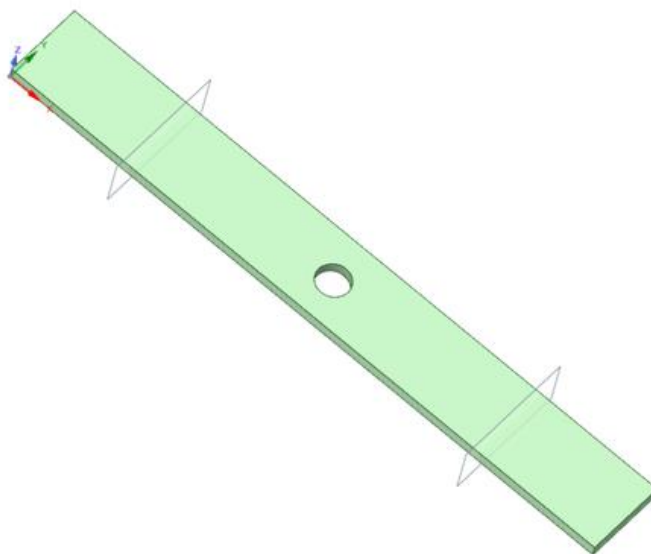


Slika 6.12. Raspodjela naprezanja prema von Misesu - linearna analiza

Prema slici 6.12 maksimalno naprezanje iznosi  $474,4 \text{ N/mm}^2$ , a minimalno naprezanje  $8,9 \text{ N/mm}^2$ . Maksimalno naprezanje dobiveno računalnom simulacijom iznosi  $474,4 \text{ N/mm}^2$ , a maksimalno naprezanje dobiveno analitičkim proračunom iznosi  $460,944 \text{ N/mm}^2$ . Zbog minimalne razlike u maksimalnim naprezanjima računalne simulacije i analitičkog proračuna može se doći do zaključka da je računalna simulacija ispravno provedena i rezultati su valjani.

### 6.3. Nelinearna analiza metodom konačnih elemenata

Koristeći se programom Ansys 2024 R2 Student provedena je nelinearna analiza. Nelinearna analiza u odnosu na linearnu analizu uzima u obzir utjecaj deformiranja modela prilikom djelovanja opterećenja i nelinearni odnos naprezanja i deformacije tj. stvarno ponašanje materijala. Postupak metode analizom konačnih elemenata kod nelinearne analize isti je kao kod prethodno opisane linearne analize. Na slici 6.13 prikazana je geometrija modela. Geometrija modela jednaka je onoj u prethodnom potpoglavlju.



*Slika 6.13. Geometrija modela u programu Ansys 2024*

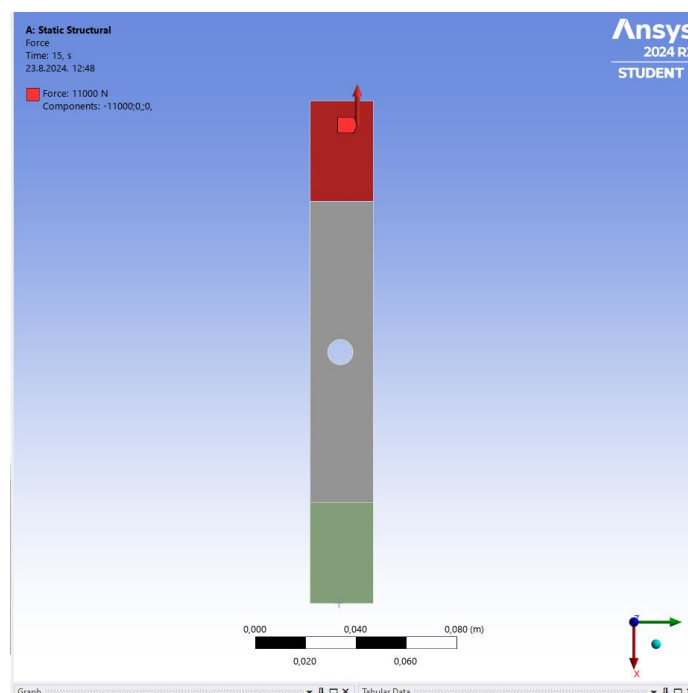
Za geometriju na slici 6.13 definirana su ista mehanička svojstva materijala kao u prethodnom poglavlju. Prilikom odabira ponašanja materijala potrebno je odabrati ponašanje materijala kao na slici 6.14.

Properties of Outline Row 5: AlMgSi0,5					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
5	Isotropic Elasticity				
11	Multilinear Isotropic Hardening	Table			
14	Strain-Life Parameters				

Slika 6.14. Ponašanje materijala - nelinearna analiza

Prema slici 6.14 odabrano je multilinerano izotropno očvršćujuće ponašanje materijala.

Zatim su postavljeni rubni uvjeti opterećenja i oslonaca. Na slici 6.15 prikazani su definirani rubni uvjeti.



Slika 6.15. Definirani rubni uvjeti - nelinearna analiza

Rubni uvjeti oslonaca predstavljaju fiksna učvršćenja koja simuliraju uvjete učvršćenja u čeljusti kidalice. Fiksna učvršćenja postavljena su na crvenu i zelenu površinu. Rubni uvjet

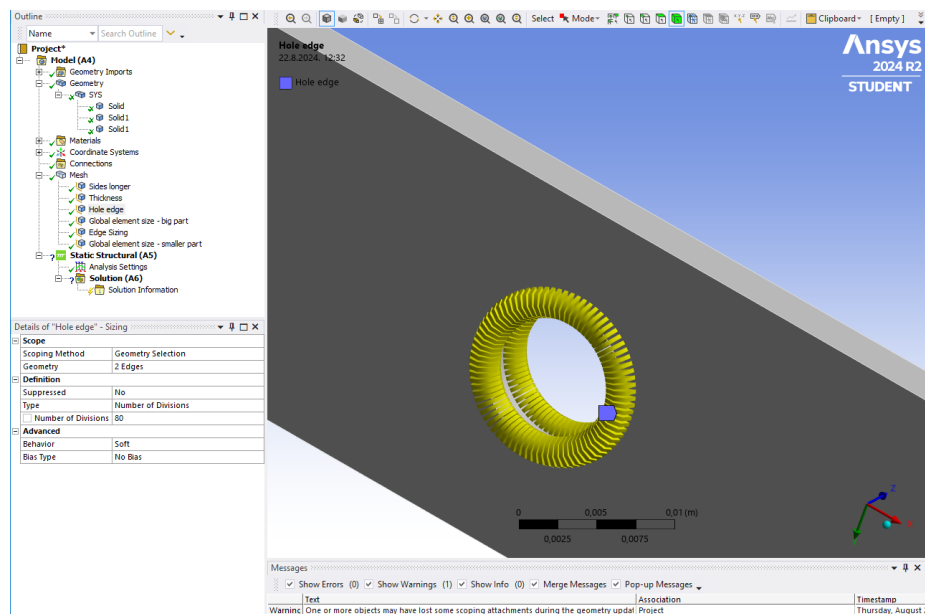
opterećenja postavljen je na crvenu površinu. Opterećenje se definira u 11 koraka prikazana na slici 6.16.

Tabular Data			
	Steps	Time [s]	Force [N]
1	1	0,	0,
2	1	1,	1000,
3	2	2,	2000,
4	3	3,	= 3000,
5	4	4,	= 4000,
6	5	5,	= 5000,
7	6	6,	= 6000,
8	7	7,	= 7000,
9	8	8,	= 8000,
10	9	9,	= 9000,
11	10	10,	= 10000

Slika 6.16. Definiranje rubnih uvjeta opterećenja - nelinearna analiza

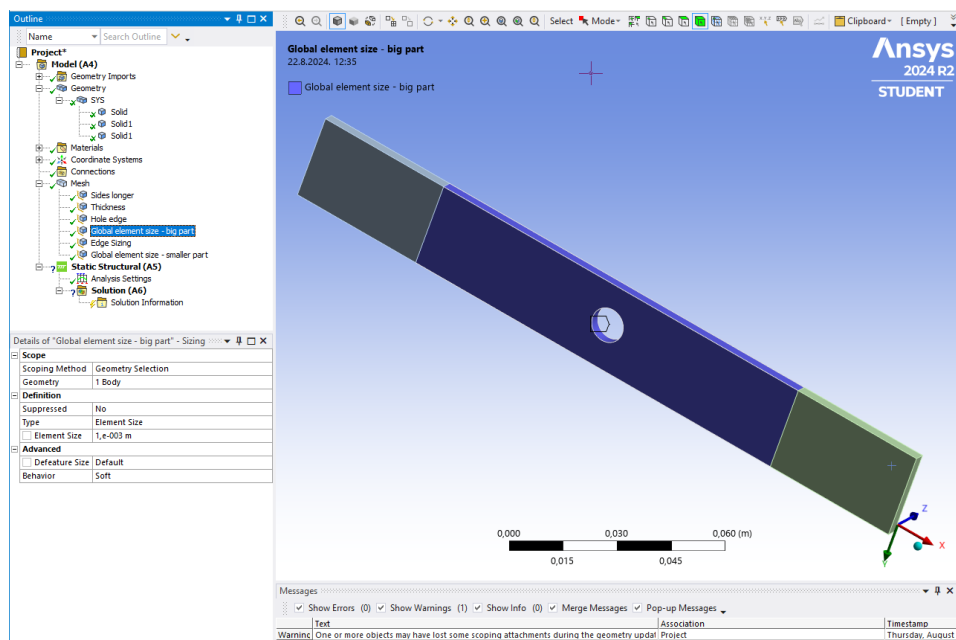
Opterećenje se postavlja u segmentima jer velika promjena opterećenja uzrokuje ne konvergiranje modela, te se stoga opterećenje postepeno dodaje.

Zatim je potrebno definirati parametre mreže konačnih elemenata. Prvo je potrebno definirati podjele bridova i veličinu elemenata na provrtu modela. Provrt modela potrebno je detaljno opisati, odnosno postaviti više elemenata kako bi se dobili precizniji rezultati. Brid provrta prikazan na slici 6.17 definiran je sa 80 segmenata.



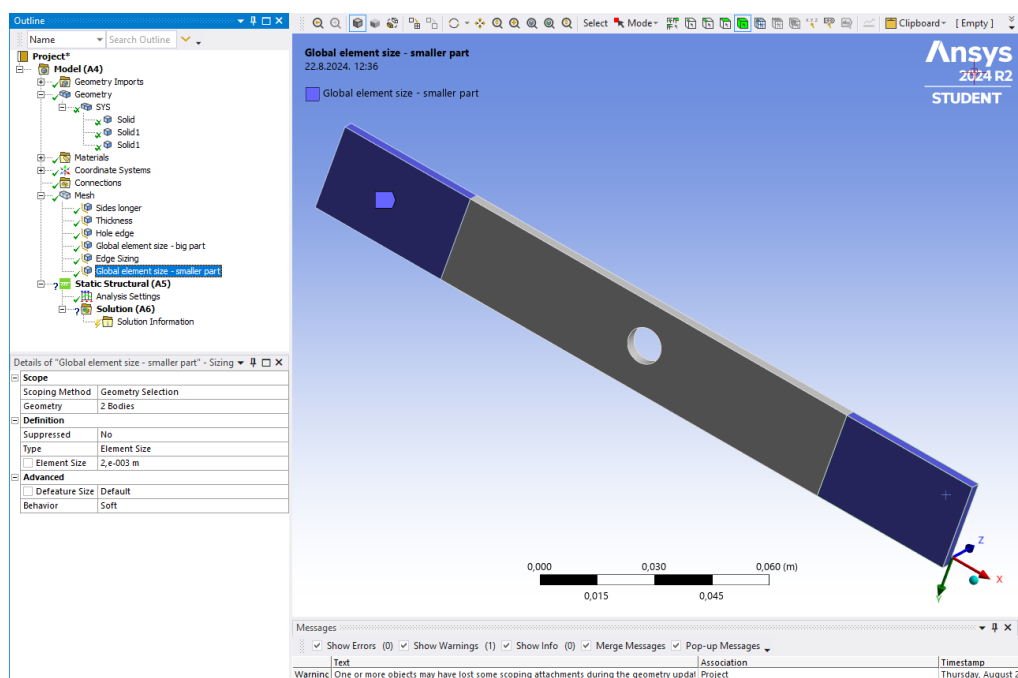
Slika 6.17. Definiranje parametara mreže konačnih elemenata oko provrta

Na slici 6.18 prikazano je definiranje veličine konačnih elemenata za provrt i središnji dio modela. Definirana veličina konačnih elemenata iznosi 0,001 m.



Slika 6.18. Definiranje veličine konačnih elemenata za središnji dio

Na slici 6.19 prikazano je definiranje podjele bridova i veličine konačnih elemenata za dijelove koji su učvršćeni.

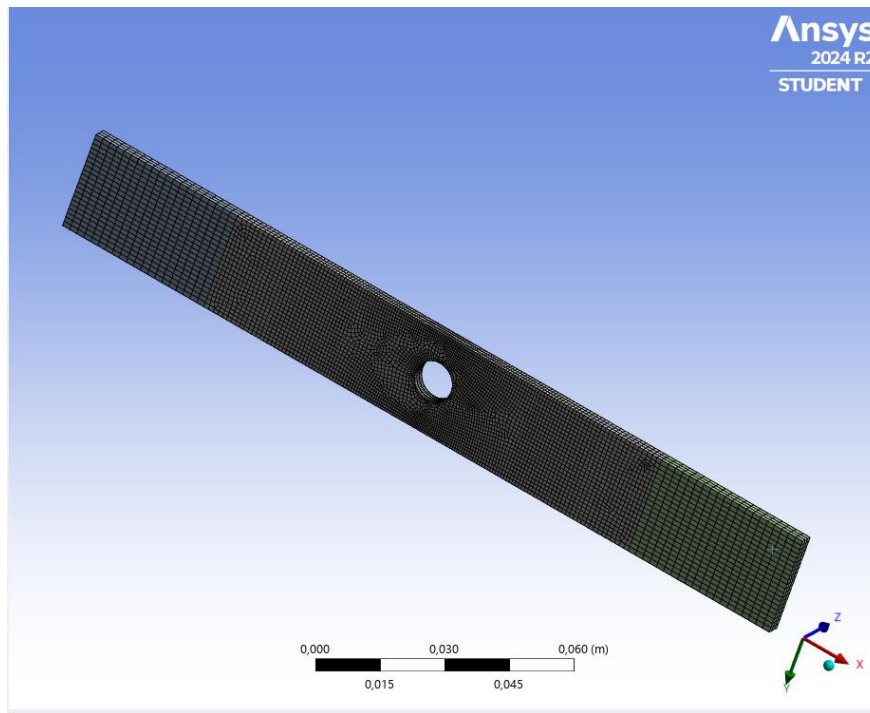


Slika 6.19. Definiranje mreže konačnih elemenata za dijelove koji su učvršćeni



Bridovi učvršćenih dijelova na slici 6.19 podijeljeni su na 20 segmenata, a veličina konačnih elemenata na označenim površinama iznosi 0,002 m. Definiranjem parametara mreže konačnih elemenata model je spreman za generiranje mreže konačnih elemenata.

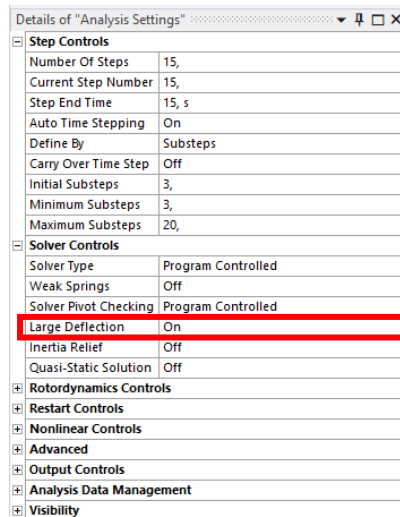
Na slici 6.20 prikazan je omreženi model.



Slika 6.20. Potpuno omreženi model - nelinearna analiza

Na slici 6.20 mogu se primijetiti razlike u gustoći mreže konačnih elemenata. Krajevi modela imaju grubu mrežu, središnji dio finu mrežu, a oko provrta može se primijetiti vrlo fina mreža.

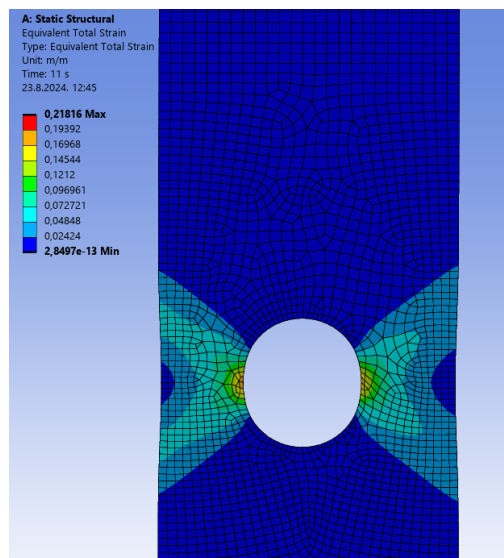
Prije pokretanje simulacije potrebno je uključiti značajku *engl. Large deflection* prikazanu na slici 6.21. Uključivanjem prethodno navedene značajke omogućili smo elasto-plastičnu analizu.



Slika 6.21. Prozor postavke analize

Zatim su pokretanjem solvera dobiveni rezultati prikazani na slikama 6.22, 6.23 i 6.24.

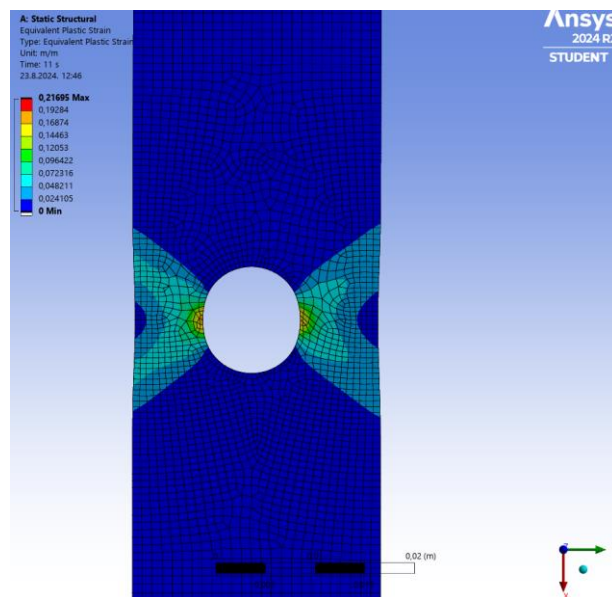
Na slici 6.22 prikazana je raspodjela ukupne deformacije pravokutne šipke.



Slika 6.22. Raspodjela ukupne deformacije - nelinearna analiza

Maksimalna deformacija kod nelinearne analize iznosi 0,21816, a minimalna deformacija iznosi  $2,8497 \cdot 10^{-13}$ .

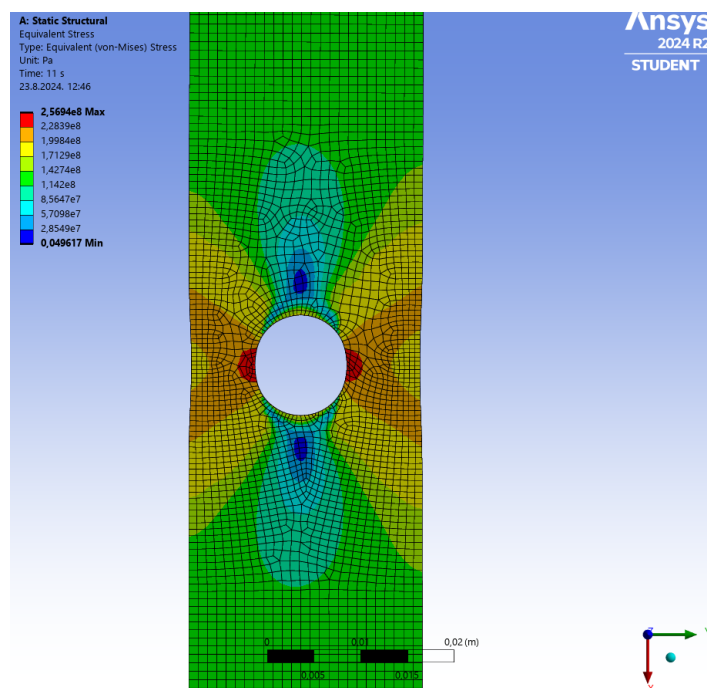
Na slici 6.23 prikazana je raspodjela plastične deformacije pravokutne šipke.



Slika 6.23. Raspodjela plastična deformacija - nelinearna analiza

Maksimalna plastična deformacija kod nelinearne analize iznosi 0,21695, a minimalna plastična deformacija iznosi 0.

Na slici 6.24 prikazana je raspodjela ekvivalentnih napreznja prema von Misesu.



Slika 6.24. Raspodjela napreznja prema von Misesu - nelinearna analiza

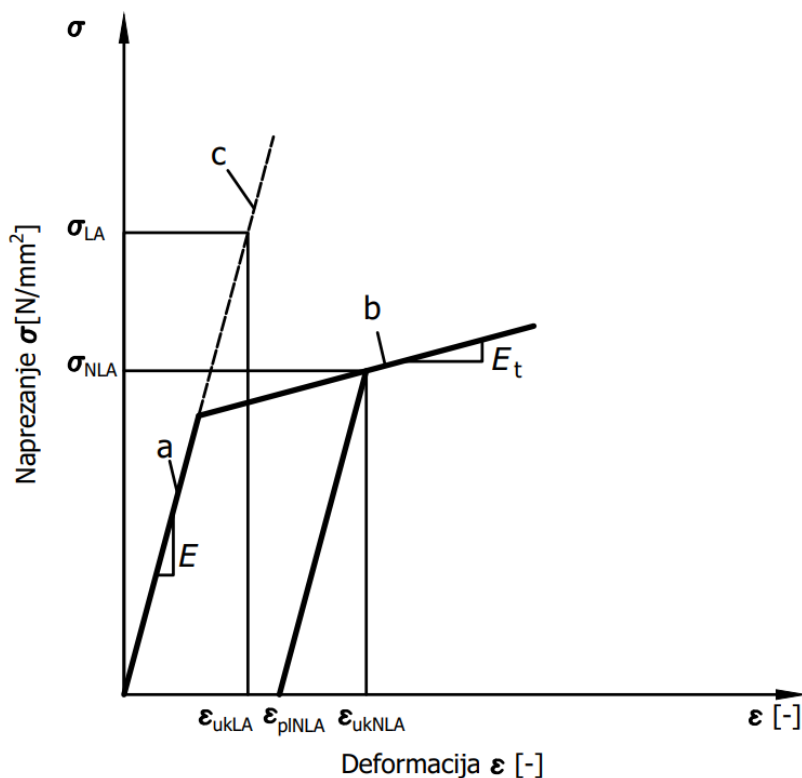
Prema slici 6.24 maksimalno naprezanje iznosi  $256,94 \text{ N/mm}^2$ , a minimalno naprezanje  $4,9617 \cdot 10^{-8} \text{ N/mm}^2$ .

#### 6.4. Usporedba rezultata linearne i nelinearne analize

Prethodno dobiveni rezultati linearne i nelinearne analize uspoređeni su kako bi se prikazala i potvrdila moguća pogreška aproksimacije plastičnog područja korištenjem linearne analize u odnosu na nelinearnu analizu.

Maksimalno naprezanje u koncentratoru naprezanja pri linearnoj analizi iznosi  $474,4 \text{ N/mm}^2$ , a maksimalno naprezanja pri nelinearnoj analizi iznosi  $256,94 \text{ N/mm}^2$ . Usporedbom prethodno navedenih naprezanja može se uočiti da je vrijednost maksimalnog naprezanja pri linearnoj analizi skoro dvostruko veće naspram vrijednosti naprezanja dobiveno nelinearnom analizom. Ukupna deformacija kod linearne analize iznosi  $0,00629$ , dok ukupna deformacija nelinearne analize iznosi  $0,21816$ . Vrijednost ukupne deformacije nelinearne analize dijeli se na plastični i elastični dio. Plastični dio deformacije nelinearne analize iznosi  $0,21695$ , a elastični dio razlika je ukupne i plastične deformacije te on iznosi  $0,0012$ . Vrijednost ukupne deformacije linearne analize u iznosu od  $0,00629$  znatno je manja od vrijednosti ukupne deformacije  $0,21816$  kod nelinearne analize. Iz prethodnog opisanog može se zaključiti da linearna analiza ne sadržava vrijednosti plastične deformacije kao nelinearna analiza, već cjelokupna deformacija je elastična. Prema prethodno uspoređenim vrijednosti naprezanja i deformacija može se zaključiti da aproksimacija nelinearnog područja linearnom analizom daje velika odstupanja i poprilično je nepouzdana te je treba koristiti uz oprez i samo u primjerenim slučajevima.

Prethodno opisane usporedbe pokrijepljene su i prikazane ilustrativnim dijagramom multilinearno izotropno očvršćujućeg ponašanja materijala na slici 6.25 [16]. Dijagram na slici 6.25 nadopunjen je linearnim ponašanjem materijala prikazanog iscertkanom crtom i oznakom *c*.



Slika 6.25. Ilustrativni dijagram multilinearne izotropno očvršćujućeg ponašanja materijala [16]

Dijagramom na slici 6.25 prikazana je usporedba linearnog i multilinearne izotropno očvršćujućeg ponašanja materijala. Linije *a* i *c* predstavljaju linearno ponašanje materijala (linearnu analizu) dok linije *a* i *b* predstavljaju multilinearne izotropno očvršćujuće ponašanje materijala (nelinearna analiza).

U dijagramu su prikazane oznake:

- $\sigma_{LA}$  – naprezanje pri linearnoj analizi,
- $\sigma_{NLA}$  – naprezanje pri nelinearnoj analizi,
- $\varepsilon_{ukLA}$  – ukupna deformacija pri linearnoj analizi,
- $\varepsilon_{ukNLA}$  – ukupna deformacija pri nelinearnoj analizi i
- $\varepsilon_{plNLA}$  – plastična deformacija pri nelinearnoj analizi.

Prethodno opisane usporedbe mogu se primijetiti na dijagramu prikazanom na slici 6.25. Ako se usporede vrijednosti naprezanja  $\sigma_{LA}$  i  $\sigma_{NLA}$  u dijagramu se može uočiti znatno veće naprezanje pri linearnoj analizi u odnosu na nelinearnu analizu. Razlog tome vrlo je jasan iz dijagrama na slici 6.25. Plastično područje (linija *b*) pokušava se linearizirati (linija *c*) te zbog

toga dolazi do velike razlike u vrijednostima naprezanja. Vrijednost ukupne deformacije linearne analize  $\varepsilon_{ukLA}$  znatno je manja u odnosu na vrijednost ukupne deformacije nelinearne analize  $\varepsilon_{ukNLA}$ . Razlog tome također je pokušaj linearizacije (linija *c*) elastičnog područja (linija *b*). Također iz dijagrama je moguće primijetiti da kod linearne analize izostaje vrijednost plastične deformacije jer se plastično područje opisuje kao elastično, a kod nelinearne analize dobiva se ukupna deformacija koja je sastavljena od elastične i plastične  $\varepsilon_{pINLA}$  deformacije.

Slijedom navedenog se može zaključiti da korištenje linearne analize prilikom opisivanja plastičnog područja rezultira velikom pogreškom. Takve aproksimacije općenito bi se trebale izbjegavati jer dobiveni rezultati ne prikazuju stvarno ponašanje materijala/konstrukcije. Linearna analiza pogodna je samo za primjenu u elastičnom području. Pravo ponašanje materijala/konstrukcije dobiva se korištenjem nelinearne analize.

## 7. ZAKLJUČAK

U okviru rada provedeno je ispitivanje mehaničkih svojstva legura aluminija i korozivskih postojanih čelika na kidalici Galdabini Quasar 50 u skladu s normom HRN EN ISO 6892-1. Norma HRN EN ISO 6892-1 vodi ispitivača kroz proces ispitivanja i omogućuje jednostavno, brzo i sistematsko ispitivanje mehaničkih svojstva i ponašanja materijala.

Dimenzije i oblik ispitnih uzoraka definirani su prateći smjernice iz norme HRN EN ISO 6892-1 te su ispitni uzorci izrađeni iz poluproizvoda (šipke) obradom odvajanja čestica. Modul elastičnosti materijala određivao se koristeći se sustavom za korelaciju digitalne slike što je prema normi ISO 6892-1 dopušteno. Materijali koji su bili predmet ispitivanja su: AlMgSi0,5/EN AW-6060 (debljine 3 mm i 5 mm), AISI 304 i AISI 316L. Setovi ispitnih uzoraka prethodno navedenih materijala uspješno su polomljeni na kidalici. Izrađeni su dijagrami stvarno naprezanje–stvarana deformacija  $S-e$  za navedene materijale i dimenzije te su te pomoću navedenih dijagrama i tabličnih podataka dobivena mehanička svojstva materijala. Dobivene vrijednosti mehaničkih svojstava ( $E$ ,  $R_{p0,2}$ ,  $R_m$ ,...) i ponašanje ispitivanih materijala ne odstupaju od atesta i zadovoljavajući su. Prema prethodnome može se zaključiti da je ispitivanje provedeno ispravno i dosljedno te se rezultati mogu usporediti s bilo kojim ispitivanjem provedenim prema normi HRN EN ISO 6892-1.

Koristeći se spektrometrom s tinjajućim izbojem LECO GDS500A ispitan je kemijski sastav prethodno navedenih materijala. Vrijednosti kemijskog sastava legura aluminija AlMgSi0,5 (debljine 3 mm i 5 mm) su u skladu s atestima osim vrijednosti kemijskog sastava silicija. Odstupanja vrijednosti silicija mogu se pripisati kalibraciji ispitnog uređaja. Kako ostale vrijednosti kemijskog sastava odgovaraju onima u atestu može se doći do zaključka da vrijednosti silicija od 0,148% i 0,15% nisu realne i da su u stvarnosti bliže vrijednostima u atestima od 0,48%. Vrijednost kemijskog sastava korozivski postojanog čelika AISI 316L odgovaraju atestima te nema nikakvih odstupanja. Vrijednosti kemijskog sastava korozivski postojanog čelika AISI 304 odgovaraju atestima osim vrijednosti kroma. Razlog odstupanja vrijednosti kroma također leži u problematičnoj kalibraciji ispitnog uređaja. Kako ostale vrijednosti kemijskog sastava odgovaraju onima u atestu može se doći do zaključka da vrijednost kroma sigurno nije 14,3% nego je bliže vrijednosti kroma u atestu od 18,13%.

Na temelju eksperimentom dobivenih mehaničkih svojstva za odabrani materijal i analitičkog proračuna napravljena je linearna i nelinearna analiza kako bi se prikazala i potvrdila moguća veličina pogreške aproksimacije plastičnog područja linearnim modelom u odnosu na nelinearni model. Linearna analiza provedena je u programu Autodesk Inventor Professional

2023. Linearna analiza potkrijepljena je analitičkim proračunom. Analitički proračun pretpostavlja linearno elastično ponašanje materijala te služi za verifikaciju rezultata dobivenih linearnom analizom. Rezultati linearne analize odgovaraju onima dobivenim analitičkim proračunom. Nelinearna analiza provedena je u programu Ansys 2024 R2 Student. Rezultati obje analize međusobno su uspoređeni te je ustanovljeno da je naprezanje dobiveno linearnom analizom skoro dvostruko veće od naprezanja dobivenog nelinearnom analizom. Vrijednosti ukupne deformacije linearne analize znatno su manje u odnosu na vrijednosti ukupne deformacije nelinearne analize.

Iz toga se može zaključiti da korištenjem linearne analize prilikom opisivanja i modeliranja ponašanja materijala u plastičnom području rezultira velikom pogreškom. Takve aproksimacije općenito bi se trebale izbjegavati jer dobiveni rezultati ne prikazuju stvarno ponašanje materijala/konstrukcije. Linearna analiza pogodna je samo za primjenu u elastičnom području. Pravo ponašanje materijala/konstrukcije dobiva se korištenjem nelinearne analize.



## LITERATURA

- [1] Dowling, E. N.: "Mechanical behavior of materials", Prentice-Hall International INC, Blacksburg, 1993.
- [2] Ispitivanje: "Univerzalna kidalica NL SCIENTIFIC", s Interneta, <https://nl-test.com/products/steel-testing-equipments/product/561-servotec-fully-automatic-universal-testing-machine-300kntt-6000-x-023n>, 25.8.2024.
- [3] Norma HRN EN ISO 6892-1, 2019.
- [4] Franz, M.: "Mehanička svojstva materijala", Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, Zagreb, 1998.
- [5] Golubić, S.: "Tehnički materijali, 1. dio: Metalni materijali", Sveučilište u Bjelovaru, Bjelovar, 2019.
- [6] Materijali: "Legura aluminija AlMgSi0,5/EN AW-6060", s Interneta, [https://www.alumerogroup.eu/fileadmin/user\\_upload/downloads/folder/technologien/ALUMERO Legierungen EN-AW-6060 EN.pdf](https://www.alumerogroup.eu/fileadmin/user_upload/downloads/folder/technologien/ALUMERO Legierungen EN-AW-6060 EN.pdf), 25.8.2024.
- [7] Materijali: "Legura aluminija AlMgSi0,7/EN AW-6005A", s Interneta, [https://www.alumerogroup.eu/fileadmin/user\\_upload/downloads/folder/technologien/ALUMERO Legierungen EN-AW-6005A EN.pdf](https://www.alumerogroup.eu/fileadmin/user_upload/downloads/folder/technologien/ALUMERO Legierungen EN-AW-6005A EN.pdf), 25.8.2024.
- [8] Materijali: "Legura aluminija AlMgSi1/EN AW-6082", s Interneta, [https://www.alumerogroup.eu/fileadmin/user\\_upload/downloads/folder/technologien/ALUMERO Legierungen EN-AW-6082 EN.pdf](https://www.alumerogroup.eu/fileadmin/user_upload/downloads/folder/technologien/ALUMERO Legierungen EN-AW-6082 EN.pdf), 25.8.2024.
- [9] Materijali: "Korozijski postojani čelik AISI 303", s Interneta, <https://www.stahlportal.com/en/stainless-steel/aisi-303/>, 25.8.2024.
- [10] Materijali: "Korozijski postojani čelik AISI 304", s Interneta, <https://www.stahlportal.com/en/stainless-steel/aisi-304/>, 25.8.2024.
- [11] Materijali: "Korozijski postojani čelik AISI 316L", s Interneta, <https://www.stahlportal.com/en/stainless-steel/aisi-316-aisi-316l/>, 25.8.2024.

- [12] Basan, R.; Marković, E.; Bjelobradić, S.; Ortner, P.: “Laboratorijske vježbe A, Mjerenje pomaka i deformacije metodom korelacije digitalne slike i elektrootpornim mjernim trakama“, Materijal s predavanja-Tehnički fakultet Rijeka, Rijeka, 2024.
- [13] Određivanje modula elastičnosti: “Kalibracijska ploča DANTEC DYNAMICS“, s Interneta, <https://www.dantecdynamics.com/solutions/stress-strain-espi-dic/solid-mechanics-dic/measurement-principles-of-dic/>, 25.8.2024.
- [14] Određivanje kemijskog sastava: “Kalibracijski uzorci za visokolegirani čelik“, s Interenta, <https://store.ametek.co.uk/sample-set-high-alloyed-steel-cr-crni/>, 25.8.2024.
- [15] Dixit, N.: “Analysis on a plate with hole – stress concentration“, s Interneta, <https://skill-lync.com/student-projects/analysis-on-a-plate-with-a-hole-37>, 25.8.2024.
- [16] Skotny, L.: “The difference between linear and nonlinear FEA?“, s Interneta, <https://enterfea.com/difference-between-linear-and-nonlinear-fea/>, 25.8.2024.

**POPIS OZNAKA**

$A$  – istezljivost [%]

$A_0$  – početna površina poprečnog presjeka ispitnog uzorka [ $\text{mm}^2$ ]

$A_u$  – površina konačnog poprečnog presjeka ispitnog uzorka [ $\text{mm}^2$ ]

$a_0$  – početna debljina plosnatih uzoraka [mm]

$b_0$  – početna širina plosnatih uzoraka [mm]

$d_0$  – početni promjer cilindričnih uzoraka [mm]

$E$  – modul elastičnosti [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]

$e$  – inženjerska deformacija (relativno produljenje) [mm/mm]

$\dot{e}_{Lc}$  – brzina deformacije  $\left[ \frac{\text{mm}}{\text{s}} \right]$

$\varepsilon$  – relativno produljenje (deformacija) [mm/mm]

$\varepsilon_{ukLA}$  – ukupna deformacija pri linearnoj analizi [mm/mm]

$\varepsilon_{ukNLA}$  – ukupna deformacija pri nelinearnoj analizi [mm/mm]

$\varepsilon_{pINLA}$  – plastična deformacija pri nelinearnoj analizi [mm/mm]

$F$  – vlačna sila [N]

$F_e$  – sila tečenja [N]

$F_k$  – konačna sila [N]

$F_m$  – maksimalna sila [N]

$\sigma$  – stvarno naprezanje [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]

$\sigma_{nom}$  – nominalno naprezanje [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]

$\sigma_{max}$  – maksimalno normalno naprezanje [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]

$\sigma_{LA}$  – naprezanje pri linearnoj analizi [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]

$\sigma_{NLA}$  – naprezanje pri nelinearnoj analizi [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]

$K$  – koeficijent deformacijskog očvršćivanja [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]

$K_t$  – teorijski faktor koncentracije naprežanja [ $\text{N/mm}^2$ ]

$k$  – koeficijent proporcionalnosti [-]

$\Delta L$  – produljenje ispitnog uzorka [mm]

$\Delta L_u$  – ukupno produljenje duljine ispitnog uzorka [mm]

$L_u$  – duljina ispitnog uzorka nakon kidanja [mm]

$L$  – mjerna duljina (*engl. gauge length*) [mm]

$L_c$  – paralelna duljina (*engl. parallel length*) [mm]

$L_0$  – početna duljina ispitnog uzorka [mm]

$L_0$  – izvorna mjerna duljina (*engl. original gauge length*) [mm]

$L_u$  – mjerna duljina nakon puknuća (*engl. final gauge length after fracture*) [mm]

$n$  – eksponent deformacijskog očvršćivanja [-]

$R$  – naprežanje (*engl. stress*) [ $\text{N/mm}^2$ ]

$R_e$  – granica tečenja [ $\text{N/mm}^2$ ]

$R_{eh}$  – gornja granica tečenja [ $\text{N/mm}^2$ ]

$R_{el}$  – donja granica tečenja [ $\text{N/mm}^2$ ]

$R_{p_{x,x}}$  – konvencionalna granica tečenja koja uzrokuje trajnu deformaciju od  $x, x\%$  [ $\text{N/mm}^2$ ]

$R_k$  – konačno naprežanje [ $\text{N/mm}^2$ ]

$R_m$  – vlačna čvrstoća [ $\text{N/mm}^2$ ]

$S$  – inženjersko naprežanje [ $\text{N/mm}^2$ ]

$t$  – debljina ploče [mm]

$\nu$  – poissonov broj [-]

$v_c$  – brzina gibanja traverze [mm/s]

$w$  – širina ploče [mm]

$Z$  – suženje (kontrakcija) ispitnog uzorka [%]

**POPIS SLIKA**

Slika 2.1. Univerzalna kidalica [2] .....	3
Slika 2.2. Standardni ispitni uzorak pravokutnog poprečnog presjeka .....	3
Slika 2.3. Set standardnih ispitnih uzoraka kružnog poprečnog presjeka .....	4
Slika 2.4. Standardni ispitni uzorak pravokutnog poprečnog presjeka prema ISO 6892-1 2019 [3] .....	4
Slika 2.5. Standardni ispitni uzorak kružnog poprečnog presjeka prema ISO 6892-1 2019 [3].....	4
Slika 2.6. Dijagram sila – produljenje $F - \Delta L$ za konstrukcijski čelik [4] .....	5
Slika 2.7. Karakterističan izgled epruvete u elastičnom području .....	6
Slika 2.8. Smanjenje površine poprečnog presjeka (engl. Necking)-čelik AISI 304 .....	6
Slika 2.9. Izgled polomljenog ispitnog uzorka pri lomnoj sili .....	7
Slika 2.10. Dijagram inženjersko naprezanje-inženjerska deformacija S-e konstrukcijskog čelika [4] .....	9
Slika 2.11. Materijal s kontinuiranim prijelazom iz elastičnog u plastično područje [4].....	11
Slika 2.12. Stvarni i inženjerski dijagram naprezanje-deformacija .....	13
Slika 2.13. Brzine deformacije i pripadajuća mehanička svojstva [3] .....	18
Slika 2.14. Rezultat ispravne i neispravne promjene brzine deformacije [2] .....	19
Slika 2.15. Rezultat ispitivanja metalnog materijala prema normi HRN EN ISO 6892-1[3] .....	20
Slika 4.1. Univerzalna kidalica Galdabini Quasar 50 .....	25
Slika 4.2. Nepomična čeljust kidalice .....	26
Slika 4.3. Osnovna i dodatna mjerna ćelija .....	27
Slika 4.4. Sustav za korelaciju digitalne slike .....	28
Slika 4.5. Uzorak na ispitnom tijelu .....	29
Slika 4.6. Kalibracijska ploča .....	30
Slika 4.7. LECO GDS500A spektrometar .....	30
Slika 4.8. Komora za ispitivanje kemijskog sastava .....	31
Slika 4.9. Prihvaćen i stegnuti uzorak .....	31
Slika 5.1. Poluproizvod čelika AISI 316L .....	34
Slika 5.2. Ispitni uzorak AlMgSi0,5 debljine 5 mm .....	36
Slika 5.3. Primjer ispitnog uzorka za određivanje kemijskog sastava .....	37
Slika 5.4. Primjer označene izvorne mjerne duljine .....	37
Slika 5.5. Ispitni uzorak postavljen u čeljusti kidalice .....	38
Slika 5.6. Završetak ispitivanja .....	38
Slika 5.7. Prikaz rezultata ispitanog seta ispitnih uzoraka .....	39

Slika 5.8. Prozor odabira kamera u programu Istra 4D v4.8.....	40
Slika 5.9. DAQ kontroler .....	40
Slika 5.10. Početni prozor sustava Istra 4D v4.8 .....	41
Slika 5.11. Padajući izbornik Akvizicija .....	41
Slika 5.12. Naredba za kalibraciju kamera.....	42
Slika 5.13. Ispravna kalibracija kamera [13].....	42
Slika 5.14. Bijeli i crni sprej.....	43
Slika 5.15. Ispitni uzorak s ispravnim rasterom .....	44
Slika 5.16. Postavljeni ispitni uzorak u čeljustima kidalici.....	44
Slika 5.17. Prozor uživo programa Istra 4D v4.8.....	45
Slika 5.18. Evaluacija kvalitete rastera .....	45
Slika 5.19. Naredba Send Pre/Post-Trigger Measurement.....	46
Slika 5.20. Prozor Start Pre/Post-Trigger Measurement .....	46
Slika 5.21. Naredba za početak akvizicije slika .....	47
Slika 5.22. Naredba Spremi.....	47
Slika 5.23. Padajući izbornik Evaluacija.....	47
Slika 5.24. Prozor postavke evaluacije.....	48
Slika 5.25. Prozor Definiranje Maske .....	48
Slika 5.26. Prozor Početne točke.....	49
Slika 5.27. Rezultat obrade podataka .....	49
Slika 5.28. Uzorak za zagrijavanje uređaja .....	50
Slika 5.29. Set kalibracijskih uzoraka za ispitivanje visokolegiranih čelika [14].....	51
Slika 5.30. Postavljeni uzorak za određivanje kemijskog sastava .....	51
Slika 5.31. Komplet polomljenih ispitnih uzoraka legure aluminija Al1 - AlMgSi0,5 debljine 5 mm.....	53
Slika 5.32. Dijagram inženjersko naprezanje-inženjerska deformacija S-e za leguru aluminija Al1-AlMgSi0,5.....	53
Slika 5.33. Dijagram inženjersko naprezanje-inženjerska deformacija S-e legure aluminija Al1-AlMgSi0,5-03.....	55
Slika 5.34. Komplet polomljenih ispitnih uzoraka legure aluminija Al2-AlMgSi0,5 debljine 3 mm.....	56
Slika 5.35. Dijagram inženjersko naprezanje-inženjerska deformacija S-e za leguru aluminija Al2-AlMgSi 0,5.....	56

Slika 5.36. Dijagram inženjersko naprežanje-inženjerska deformacija S-e legure aluminija Al2- AlMgSi0,5-02.....	57
Slika 5.37. Komplet polomljenih ispitnih uzoraka korozijski postojanog čelika C1-AISI 316L .	59
Slika 5.38. Dijagram inženjersko naprežanje-inženjerska deformacija S-e za korozijski postojani čelik C1-AISI 316L.....	59
Slika 5.39. Dijagram inženjersko naprežanje-inženjerska deformacija S-e korozijski postojanog čelika C1-AISI 316L-04.....	60
Slika 5.40. Komplet polomljenih ispitnih uzoraka korozijski postojanog čelika C4-AISI 304....	61
Slika 5.41. Dijagram inženjersko naprežanje-inženjerska deformacija S-e za korozijski postojani čelik C4-AISI 304 .....	62
Slika 5.42. Dijagram inženjersko naprežanje-inženjerska deformacija S-e korozijski postojanog čelika C4-AISI 304-00 .....	63
Slika 6.1. Dimenzije geometrije modela za numeričku analizu.....	68
Slika 6.2. Plastični dio dijagrama stvarno naprežanje–stvarana deformacija $\sigma-\varepsilon$ .....	69
Slika 6.3. Dijagram teorijskog faktora koncentracije naprežanja za provrte [15].....	71
Slika 6.4. Model za linearnu analizu .....	72
Slika 6.5. Prozor za definiranje mehaničkih svojstva materijala AlMgSi0,5.....	73
Slika 6.6. Definirani rubni uvjeti oslonaca i opterećenja .....	73
Slika 6.7. Parametri mreže konačnih elemenata .....	74
Slika 6.8. Potpuno omreženi model .....	74
Slika 6.9. Postavke konvergencije modela.....	75
Slika 6.10. Konvergencija rezultata .....	75
Slika 6.11. Raspodjela ukupne deformacije - linearna analiza.....	76
Slika 6.12. Raspodjela naprežanja prema von Misesu - linearna analiza .....	76
Slika 6.13. Geometrija modela u programu Ansys 2024.....	77
Slika 6.14. Ponašanje materijala - nelinearna analiza .....	78
Slika 6.15. Definirani rubni uvjeti - nelinearna analiza .....	78
Slika 6.16. Definiranje rubnih uvjeta opterećenja - nelinearna analiza .....	79
Slika 6.17. Definiranje parametara mreže konačnih elemenata oko provrta .....	79
Slika 6.18. Definiranje veličine konačnih elemenata za središnji dio.....	80
Slika 6.19. Definiranje mreže konačnih elemenata za dijelove koji su učvršćeni .....	80
Slika 6.20. Potpuno omreženi model - nelinearna analiza .....	81
Slika 6.21. Prozor postavke analize .....	82
Slika 6.22. Raspodjela ukupne deformacije - nelinearna analiza.....	82

---

Slika 6.23. Raspodjela plastična deformacija - nelinearna analiza .....	83
Slika 6.24. Raspodjela naprežanja prema von Misesu - nelinearna analiza.....	83
Slika 6.25. Ilustrativni dijagram multilinearne izotropno očvršćujućeg ponašanja materijala [16] .....	85



**POPIS TABLICA**

Tablica 2.1. Podjela ispitnih uzoraka prema poprečnom presjeku i pripadajući aneksi [3] .....	16
Tablica 5.1. Okvirne dimenzije plosnatih ispitnih uzoraka prema HRN EN ISO 6892-1[3].....	33
Tablica 5.2. Dimenzije plosnatog ispitnog uzorka A, korozijski postojani čelici AISI 316L i AISI 304.....	35
Tablica 5.3. Dimenzije plosnatog ispitnog uzorka B, aluminijska legura AlMgSi 0,5 .....	36
Tablica 5.4. Dimenzije plosnatog ispitnog uzorka C, aluminijska legura AlMgSi 0,5 .....	36
Tablica 5.5. Mehanička svojstva pojedinih ispitnih uzoraka legure aluminija Al1-AlMgSi0,5 ...	54
Tablica 5.6. Prosječne vrijednosti mehaničkih svojstava legure aluminija Al1-AlMgSi0,5 debljine 5 mm.....	55
Tablica 5.7. Mehanička svojstva pojedinih ispitnih uzoraka legure aluminija Al2-AlMgSi0,5 debljine 3 mm.....	57
Tablica 5.8. Prosječne vrijednosti mehaničkih svojstava legure aluminija Al2-AlMgSi0,5 debljine 3 mm.....	58
Tablica 5.9. Tablica usporedbe prosječnih vrijednosti mehaničkih svojstava legura aluminija Al1 i Al2 .....	58
Tablica 5.10. Mehanička svojstva pojedinih ispitnih uzoraka korozijski postojanog čelika-C1-AISI 316L.....	60
Tablica 5.11. Prosječne vrijednosti mehaničkih svojstava korozijski postojanog čelika C1-AISI 316L .....	61
Tablica 5.12. Mehanička svojstva pojedinih ispitnih uzoraka korozijski postojanog čelika C4-AISI 304 .....	62
Tablica 5.13. Prosječne vrijednosti mehaničkih svojstava korozijski postojanog čelika C4-AISI 304.....	63
Tablica 5.14. Tablica usporedbe prosječnih vrijednosti mehaničkih svojstava korozijski postojanih čelika C1 i C4 .....	64
Tablica 5.15. Kemijski sastav legure aluminija Al1-AlMgSi0,5.....	64
Tablica 5.16. Kemijski sastav legure aluminija Al2-AlMgSi0,5.....	65
Tablica 5.17. Kemijski sastav korozijski postojanog čelika C1-AISI 316L .....	65
Tablica 5.18. Kemijski sastav korozijski postojanog čelika C4-AISI 304.....	65

## SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

S obzirom na povećani interes za primjenu legura aluminija i korozijski postojanih čelika prilikom izrade lakih konstrukcija u industriji, u ovom diplomskom radu provedeno je eksperimentalno ispitivanje mehaničkih svojstava i ponašanja materijala. Materijali koji su ispitani su legura aluminija AlMgSi0,5/EN AW-6060 te korozijski postojani čelici AISI 304 i AISI 316L. Eksperimentalno ispitivanje sastojalo se od statičkog vlačnog pokusa kako bi se odredila mehanička svojstva i ponašanje materijala i ispitivanja kemijskog sastava spektrometrijom. Statički vlačni pokus proveden je na kidalici Galdabini Quasar 50 nadopunjenoj sustavom za korelaciju digitalne slike proizvođača Dantec Dynamics kako bi se odredila mehanička svojstva materijala ( $E$ ,  $R_{p0,2}$ ,  $R_m, \dots$ ) koristeći se normom HRN EN ISO 6892-1, 2019. Ispitivanje kemijskog sastava materijala proveden je koristeći se spektrometrom s tinjajućim izbojem LECO GDS500A kako bi se kemijski sastav ispitivanih materijala usporedio s vrijednostima u atestima. Također u ovom radu za materijal AlMgSi0,5/EN AW-6060 koristeći se eksperimentalno dobivenim podacima o mehaničkim svojstvima provedene su linearna i nelinearna numerička analiza uzorka sa središnjim provrtom. Rezultati numeričkih analiza uspoređeni su kako bi se prikazala i potvrdila moguća veličina pogreške aproksimacije plastičnog područja linearnim modelom u odnosu na nelinearni model.

### Ključne riječi

HRN EN ISO 6892-1, vlačno ispitivanje, AlMgSi0,5/EN AW-6060, AISI 304, AISI 316L, korelacija digitalne slike (DIC), linearna AMKE, nelinearna AMKE

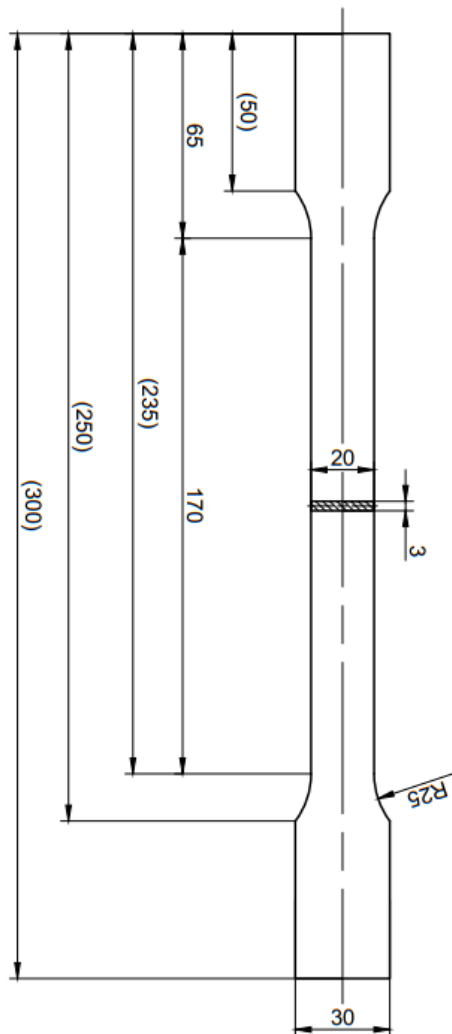
## SUMMARY AND KEYWORDS

Based on the increased industry interest and application of aluminium alloy and corrosion-resistant steel (CRES) in lightweight designs, a characterization and analysis of the behaviour of previously mentioned alloys has been conducted in this study. Analysed materials are aluminium alloy AlMgSi0,5/EN AW-6060 and corrosion-resistant steels AISI 304 and AISI 316L. Experimental test consists of tensile test for characterization and analysis of the behaviour of materials and glow discharge mass spectrometry (GDMS) for the analysis of chemical composition of the materials. Tensile test was carried out using Galdabini Quasar 50 universal testing machine i.e tensile testing machine supplemented with Dantec Dynamics digital image correlation system (DIC). Tensile tests were conducted in accordance with HRN EN ISO 6892-1, 2019 norm. Testing of chemical composition of the materials was carried out using a LECO GDS500A glow discharge spectrometer in order to validate chemical composition of tested materials with that of the certificates. Furthermore, using experimental gathered data, linear and non-linear numerical analysis of aluminum alloy AlMgSi0,5/EN AW-6060 was conducted. The results of numerical analysis were compared in order to determine the possible error due to the approximation of the plastic region using a linear model instead of non-linear model.

### Keywords

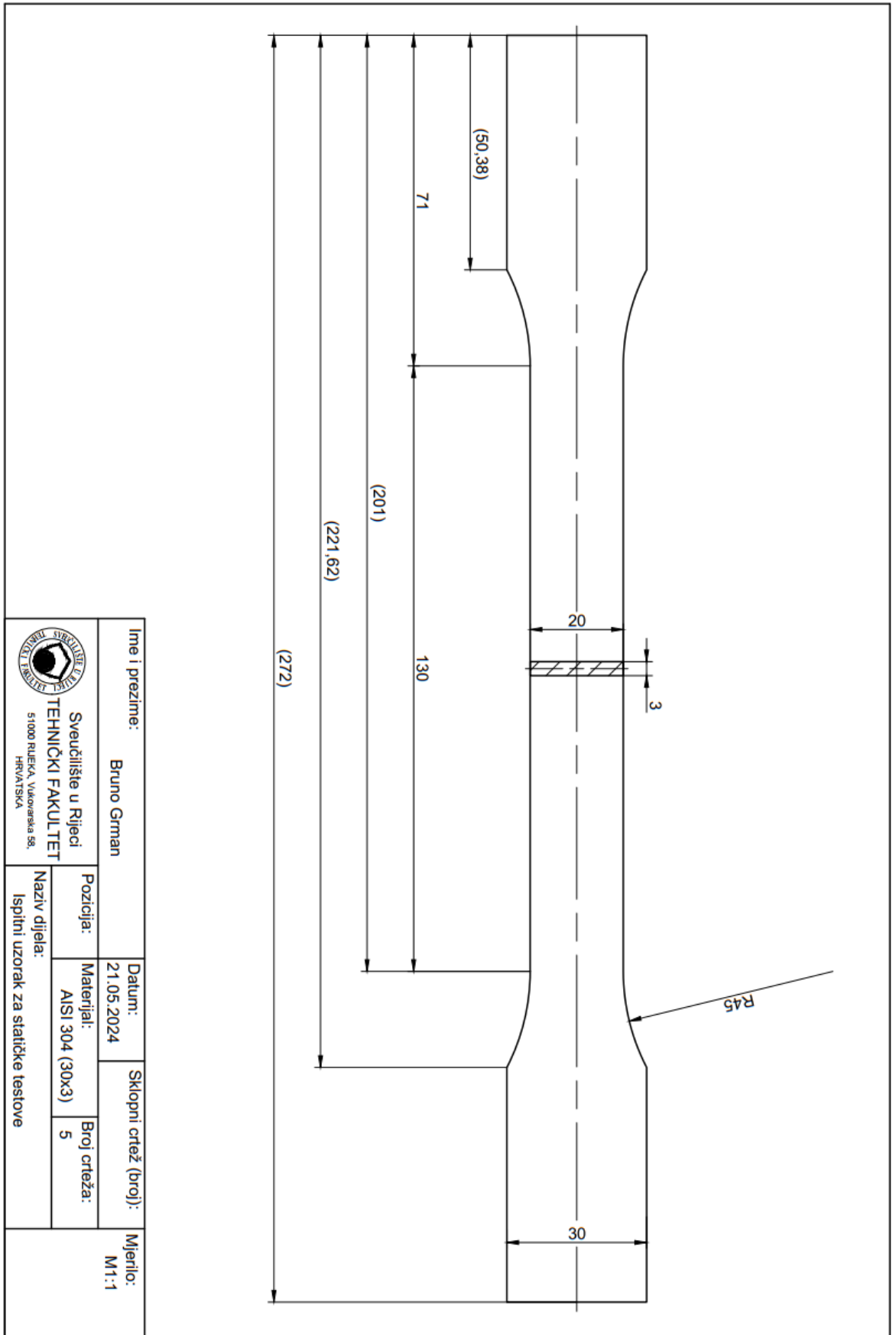
HRN EN ISO 6892-1, tensile testing, AlMgSi0,5/EN AW-6060, AISI 304, AISI 316L, digital image correlation (DIC), linear FEA, non-linear FEA

## PRILOG 1



Ime i prezime:		Bruno Grman		Datum:		21.05.2024		Sklopni crtež (broj):		Mjerilo:	
Sveučilište u Rijeci		TEHNIČKI FAKULTET		Pozicija:		Materijal:		Broj crteža:		M1:2	
51000 RIJEKA, VUKOVIĆSKA 58, HRVATSKA		Ispitni uzorak za statičke testove (20x3)		Naziv dijela:		AlMgSi0,5 (30x3)		3			

## PRILOG 2



## PRILOG 3

**EXALCO S.A.**  
**ALUMINIUM INDUSTRY**

P.O. BOX 1123 - 41110 LARISSA - GREECE  
 FACTORY : 5 KLM NATIONAL ROAD LARISSA - ATHENS  
 PHONE : (+30 2410) 688688  
 FAX : (+30 2410) 688570



## EN STANDARDS

EN 573-3  
 EN 755-1  
 EN 755-2  
 EN 755-3  
 EN 755-4  
 EN 755-5  
 EN 755-6  
 EN 12020

**Inspection Certificate 3.1**

According to EN 10204:2004

Shipping No:	<b>110839</b>
STRYKOW	POLAND

**ALLOY - TEMPER 6060 T66**

SAMPLE PROFILE 8021 AT -30X5 -30X5  
 ORDER NO. PL1001/CZZ22C01030-1 ORDER LINE NUMBER 31  
 DATE OF INSPECTION 09/07/2022 CUSTOMER ITEM CODE ALPP 30/5  
 EXTRUSION LOT NO. 427005 CASTING NO. 51380

The extruded products are in compliance with the requirements of the order. The stated values are representative for the profiles extruded and comply with the following European Standards:

Tolerances on dimensions and form as approved by Drawing  
 Technical conditions for inspection\_delivery according to EN  
 755-1:2016

Chemical composition and form according to EN  
 573-3:2019

CHEMICAL COMPOSITION								
0,30 - 0,60	0,10 - 0,30	0,00 - 0,10	0,00 - 0,10	0,35 - 0,60	0,00 - 0,05	0,00 - 0,15	0,00 - 0,10	
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0,48	0,192	0,001	0,07	0,58	0,003	0,009	0,064	98,60

The chemical composition test results are obtained by the aluminium billet supplier. Traceability procedures are being operated and the corresponded inspection documents can be provided


MECHANICAL PROPERTIES		
TENSILE STRENGTH Rm(N/mm2)	YIELD STRENGTH Rp 0.2 (N/mm2)	ELONGATION A %
EN 755-2 [ > 215 ]	EN 755-2 [ > 160 ]	EN 755-2 [ > 8 ]
<b>234,5</b>	<b>176,4</b>	<b>11,64</b>

The material hardness is tested after the heat treatment procedures. Traceability procedures and the corresponding inspection documents can be provided.  
 Mechanical properties as 755-2 indicated are derived from tensile tests as per EN 6892-1:2019 and the number of specimens comply with the regulations described in EN 755-1.



D. Papachristos  
 Quality Manager

Item drawing



**PRILOG 4**

 <b>NOVA TRADING S.A.</b> ul. Starotoruńska 5 87-100 Toruń, Polska		<b>CERTIFICATE</b> excerpt from <b>CERTIFICATE 3.1 / EN 10204</b>		Nr atestu / Certificate no.: <b>321 / 2021</b> Data / Date: <b>17.06.2022</b>																						
Zamawiający / Customer: <b>NT</b>		Wystawiający dokument / Originator of the document: <b>Dział Jakości NT / Quality Department NT</b>		Nr zamówienia NT / NT order no.: <b>5/152644/008/2022</b> Nr zamówienia Klienta / Purchaser order no.: -																						
Znak wytwórcy / Manufacturers mark: <b>NT</b>		Informacje dodatkowe / Supplementary information: -		-																						
Wymagania (normy) / Requirements: <b>ASTM A484/A484M, EN10058</b>		Kod producenta materiału / Materials manufacturer code: <b>152644</b>		Nr atestu prod. materiału / Certificate no of manufacturer: -																						
Opis Wyrobu / PRODUCT DESCRIPTION		SKŁAD CHEMICZNY / CHEMICAL COMPOSITION [%]						WŁAŚNOŚCI MECHANICZNE / MECHANICAL PROPERTIES		BADANIA DODATKOWE / ADDITIONAL TESTS																
LP	Nr wytopu / Heat number	Gatunek / Grade	Grubość / Thickness [mm]	Szerokość / Width [mm]	Waga netto / Net weight [kg]	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Cu	Mo	Nb	Ni	Fe	Mg	Zn	Ti	AL	INNEZ / OTHER	Rm [MPa]	Rp0.2 [MPa]	A <sub>5</sub> [%]	A80
1	WG220426-10	1.4301	4	25	2026	0,055	0,348	1,03	0,038	0,005	0,05	18,07				8,06							562	273	51	
2	WG220501-11	1.4301	5	25	1711	0,051	0,329	1,11	0,04	0,01	0,054	18,1				8,1							573	289	54	
3	WG220429-10	1.4301	3	30	5414	0,063	0,331	1,16	0,032	0,008	0,052	18,13				8,12							589	296	57	
4	WG220429-10	1.4301	5	30	4038	0,063	0,331	1,16	0,032	0,008	0,052	18,13				8,12							593	288	55	
5	WG220427-10	1.4301	3	40	1734	0,059	0,34	1,09	0,035	0,002	0,056	18,04				8,08							563	259	59	
6	WG220426-10	1.4301	4	40	6046	0,055	0,348	1,03	0,038	0,005	0,05	18,07				8,06							582	270	53	
7	WG220424-10	1.4301	6	60	2980	0,05	0,319	1,2	0,033	0,007	0,055	18,09				8,11							576	290	58	
8	WG220429-10	1.4301	3	30	499	0,063	0,331	1,16	0,032	0,008	0,052	18,13				8,12							589	296	57	
9																										
10																										

Deklaruję, że wyrob spełnia wymagania określone w zamówieniu i w normach europejskich. / We certify that the product complies with the requirements of the order and european norm

Powyższe informacje na podstawie badań i informacji dostarczonych przez producenta wyrobu. / The above results come from adequate tests and / or data supplied by the materials manufacturer.	Stempel Działu Jakości / Stamp of the inspection representative.
	Dział upoważniony / Authorised representative:  <b>Asystent Działu Jakości</b> <b>Michał Grobelny</b>

PRILOG 5

		Registered seat and Administration offices/Sede Legale e amministrativa: via Bresciani 16 46040 Sacotelo degli Ippoliti Mantova-Italy Tel. +39 - 0376 685 1 Fax. +39 - 0376 685 600 www.marcegaglia.com		Type/Tipo 3.1 CERTIFICATO DI COLLAUDO EN10204 Number/Numero 10522224831 Create # 01/04/2022												
Customer/Cliente PROFILINOX S.P.A. VIA NOBEL 3A Q.RE IND.LE S.P. 43122 PARMA IT		Consignee/Destinatario Merct PROFILINOX S.P.A. VIA NOBEL 3A Q.RE IND.LE S.P. 43122 PARMA IT		Delivery/N° Consegna 8265805791 O/Del 01/04/2022 Delivery note nr/N° doc. di 1005003456												
		Quality Control/Controllo Qualità Q.M.D./RESP. A.Venturini		Pages/Pagine 14/14												
Batch/N° Partita	Quantity/Q.ta	Heat/Colata	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	N (%)	Rm [N/mm <sup>2</sup> ]	Rp 0.2 [N/mm <sup>2</sup> ]	RP 1 [N/mm <sup>2</sup> ]	A (%)	HRB
<b>54000030 PXP 30x3x4000 A316L EN 1.4404X2CrNiMo17-12-2. WNR1.4404. A316L / AISI316. X5CrNiMo17-12-2. WNR1.4401. A316 EN10028-7.EN10088-2.EN10088-4. ASTM A240. ASME SA240. ASTM A480. ASME SA480 1191470067/110 000-808159 Data 31/03/2022</b>																
22NS001051	496 KG	38194	.022	.510	.910	.0380	.0006	17.10010.0002.030	.0400	617	416	507	51.8	86		
22NS001052	492 KG	38194	.022	.510	.910	.0380	.0006	17.10010.0002.030	.0400	617	416	507	51.8	86		
22NS001413	494 KG	38198	.021	.530	.930	.0360	.0006	17.10010.0002.030	.0390	607	402	497	53.7	85		
<b>54000102 PXP 80x6x4000 A316L EN 1.4404X2CrNiMo17-12-2. WNR1.4404. A316L / AISI316. X5CrNiMo17-12-2. WNR1.4401. A316 EN10028-7.EN10088-2.EN10088-4. ASTM A240. ASME SA240. ASTM A480. ASME SA480 1191483178/360 . Data 24/03/2022</b>																
22NT000752	387 KG	Y210508B50-5	.014	.325	1.032	.0365	.0029	16.73510.1422.181	.0141	603	394	493	53.9	84		
Remarks/Note: - Certifichiamo che i prodotti sopra elencati sono conformi alle prescrizioni dell'ordine - Documento validato in conformità ad EN10204 par. 5 - Le Norme citate sono intese nell'edizione in corso di validità al momento dell'ordine - Durabilità: NPD - Sostanze Pericolose: NPD - Per Impieghi strutturali, costruzioni e Ingegneria civile		- DoP disponibili su <a href="http://www.marcegaglia.com/brochure/quality/top.html">http://www.marcegaglia.com/brochure/quality/top.html</a> - Processo di fabbricazione: forno ad arco-VOD/OD-colata continua - Trattamento di solubilizzazione a 1050°C - Cofil finit 1D material conforming to NACE MR0175/MRO103 - ISO15156-MRO15156-3										 0474 13 MARCEGAGLIA S.p.A. - 46040 Sacotelo Mantova - Italy EN 10088-4:2008				

PROFILINOX SPA - CONFORM TO THE ORIGINAL

Invoice N. 447 of 29/06/2022 - Item BCC00440 - 30 X 3 L=1000  
Quantity 31 kg - Heat 38194 - Order N. 691994 - 40 - Order ref.: 585