

Utjecaj frekvencije uzorkovanja podataka na rezultate statičkog vlačnog ispitivanja

Matić, Mislav

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:548137>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-10-03**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mislav Matić

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Danko Ćorić, dipl. ing.

Student:

Mislav Matić

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Danku Ćoriću na pomoći, savjetima i trudu koji je uložio kako bih uspješno napisao ovaj rad, asistentu Tomislavu Rodingeru, mag. ing. mech. na izdvojenom vremenu, savjetima, pristupačnosti i pomoći pri izradi ovog rada te stručnom suradniku Marku Miroslavu Bači, mag. ing. mech. na provedbi potrebnih ispitivanja i pomoći oko eksperimentalnog dijela ovog rada.

Mislav Matić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

| | |
|--|---------|
| Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum: | Prilog: |
| Klasa: 602-14/22-6/1 | |
| Ur. broj: 15-1703-22- | |

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MISLAV MATIĆ** Mat. br.: 0035211058

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj frekvencije uzorkovanja podataka na rezultate statičkog vlačnog ispitivanja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of data sampling frequency on tensile testing results**

Opis zadatka:

Statičko vlačno ispitivanje je jedno od osnovnih ispitivanja kojim se utvrđuju mehanička svojstva materijala. Ponašanje materijala pri razvlačenju ovisi o njegovoj mikrostrukturi koja je opet funkcija kemijskog sastava i tehnoloških parametara obrade. Međutim, dodatan je utjecaj i nekih vanjskih čimbenika: temperature, geometrije epruvete, brzine prirasta deformacije ili opterećenja, ali također i frekvencije uzorkovanja podataka tijekom ispitivanja na računalom upravljanoj kidalici.

U radu je potrebno načiniti sljedeće:

1. Opisati ulogu kidalica.
2. Objasniti postupak statičkog vlačnog ispitivanja sukladno normi HRN EN ISO 6892-1.
3. Ukratko opisati ispitivani materijal.
4. Provesti prateća ispitivanja kidanjem epruveta na kidalici.
5. Obraditi rezultate uz različite frekvencije uzorkovanja podataka i odrediti pripadajuća mehanička svojstva.
6. Analizirati dobivene rezultate i donijeti odgovarajuće zaključke.

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


Zadatak zadan:
29. rujna 2022.

Rok predaje rada:
1. prosinca 2022.

Predviđeni datum obrane:
12. prosinca do 16. prosinca 2022.

Zadatak zadao:


prof. dr. sc. Danko Čorić

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

| | |
|---|------|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | III |
| POPIS TABLICA..... | V |
| POPIS OZNAKA | VI |
| POPIS KRATICA | VIII |
| SAŽETAK..... | IX |
| SUMMARY | X |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. ELASTIČNOST | 4 |
| 3. STATIČKI VLAČNI POKUS..... | 7 |
| 3.1. Norma..... | 7 |
| 3.1.1. ISO organizacija..... | 7 |
| 3.1.2. Norma HRN EN ISO 6892-1 | 8 |
| 3.2. Standardna oprema za provedbu ispitivanja | 9 |
| 3.2.1. Univerzalne ispitivalice..... | 10 |
| 3.2.1.1. Elektromehaničke kidalice..... | 11 |
| 3.2.1.2. Servohidraulične kidalice..... | 12 |
| 3.2.2. Računalna oprema za upravljanje i regulaciju | 13 |
| 3.2.3. Uređaji za mjerenje produljenja..... | 14 |
| 3.2.3.1. Kontaktni ekstenzometri | 15 |
| 3.2.3.2. Beskontaktni ekstenzometri | 18 |
| 3.3. Ispitni uzorci za statičko vlačno ispitivanje | 19 |
| 3.3.1. Odabir i priprema | 21 |
| 3.3.2. Dimenzije i zahtjevi definirani normom HRN EN ISO 6892-1..... | 22 |
| 3.3.3. Označavanje početne mjerne duljine | 24 |
| 3.4. Odgovor materijala na vlačno ispitivanje | 25 |
| 3.5. Uvjeti, način i metode ispitivanja prema normi HRN EN ISO 6892-1 | 35 |
| 3.5.1. Nuliranje vrijednosti sile..... | 35 |
| 3.5.2. Metoda A – ispitivanje na temelju kontrole brzine prirasta deformacije..... | 35 |
| 3.5.2.1. Brzina prirasta deformacije pri određivanju R_{eh} ili $R_{p0,2}$ | 36 |
| 3.5.2.2. Brzina prirasta deformacije pri određivanju donje granice razvlačenja R_{el} | 37 |
| 3.5.2.3. Brzina prirasta deformacije pri određivanju vlačne čvrstoće R_m , istezljivosti A i kontrakcije Z..... | 37 |
| 3.5.3. Metoda B – ispitivanje na temelju kontrole brzine prirasta naprezanja..... | 37 |
| 3.5.3.1. Određivanje gornje i donje granice razvlačenja, R_{eh} i R_{el} | 37 |
| 3.5.3.2. Određivanje konvencionalne granice razvlačenja $R_{p0,2}$ | 39 |
| 3.5.3.3. Određivanje vlačne čvrstoće R_m , istezljivosti A i kontrakcije Z | 39 |
| 3.6. Izbor i označavanje metode ispitivanja..... | 39 |

| | | |
|--------|---|----|
| 3.7. | Preporuke za korištenje računalno upravljane kidalice prema HRN EN ISO 6892-140 | |
| 3.7.1. | Frekvencija uzorkovanja podataka..... | 41 |
| 3.7.2. | Određivanje minimalne frekvencije uzorkovanja prema HRN EN ISO 6892-1 | 42 |
| 4. | EKSPERIMENTALNI DIO | 43 |
| 4.1. | Opis eksperimenta..... | 43 |
| 4.2. | Korištena oprema | 43 |
| 4.3. | Ispitni materijal | 46 |
| 4.3.1. | Opis čelika 50CrV4..... | 46 |
| 4.3.2. | Opis čelika C15E | 47 |
| 4.4. | Ispitni uzorci | 48 |
| 4.5. | Rezultati ispitivanja..... | 49 |
| 4.5.1. | Rezultati ispitivanja za čelik 50CrV4 | 49 |
| 4.5.2. | Rezultati ispitivanja za čelik C15E | 51 |
| 4.6. | Analiza rezultata ispitivanja..... | 54 |
| 4.6.1. | Analiza rezultata za čelik 50CrV4 | 54 |
| 4.6.2. | Analiza rezultata za čelik C15E..... | 55 |
| 4.7. | Određivanje minimalne frekvencije uzorkovanja podataka..... | 55 |
| 5. | ZAKLJUČAK..... | 57 |
| | LITERATURA..... | 59 |

POPIS SLIKA

| | | |
|-----------|--|----|
| Slika 1. | Komponente naprezanja kockastog čvrstog tijela [2] | 4 |
| Slika 2. | Oprema za primjenu statičkog vlačnog pokusa iz 1890. godine [4] | 9 |
| Slika 3. | Dijelovi elektromehaničke kidalice [4] | 11 |
| Slika 4. | Dijelovi hidraulične univerzalne kidalice [4] | 12 |
| Slika 5. | Shematski prikaz zatvorenog kruga servohidrauličnog mehanizma [4] | 13 |
| Slika 6. | Kontroler s namjenskim mikroprocesorima [4] | 13 |
| Slika 7. | Prihvatni ekstenzometar [4] | 14 |
| Slika 8. | Vrste kontaktnih ekstenzometara: a) ekstenzometar s mjernom duljinom od 25 mm i hodom od 3,75 mm prikladan za statička i dinamička ispitivanja; b) ekstenzometar s mjernom duljinom od 50 mm i hodom od 25 mm pogodan za velike uzorke i materijale s velikim istezanjem [4] | 16 |
| Slika 9. | Analogni ekstenzometar [4] | 16 |
| Slika 10. | LVDT ekstenzometar prilikom ispitivanja na različitim uzorcima i u trenutku loma [4] | 17 |
| Slika 11. | Univerzalna kidalica s laserskim ekstenzometrom [4] | 18 |
| Slika 12. | Epruveta za vlačno ispitivanje [3] | 19 |
| Slika 13. | Izvedba glave epruvete: a) prihvat pomoću navoja, b) prihvat pomoću nazubljenih klinova, c) prihvat ramenom glavom, d) prihvat pomoću zatika i e) prihvat tankih epruveta pomoću nazubljenih klinova [4] | 20 |
| Slika 14. | Pravilno i nepravilno postavljanje epruvete [4] | 20 |
| Slika 15. | Izrada epruveta mehaničkom obradom iz poluproizvoda [4] | 21 |
| Slika 16. | Lokacije i orijentacije ispitnih komada na različitim poluproizvodima [4] | 22 |
| Slika 17. | Epruveta kružnog poprečnog presjeka [5] | 23 |
| Slika 18. | Epruveta pravokutnog poprečnog presjeka [5] | 23 |
| Slika 19. | Nepravilno i pravilno izvedena epruveta [4] | 24 |
| Slika 20. | Dijagram $F - \Delta L$ za meki konstrukcijski čelik [3] | 25 |
| Slika 21. | Sastavljena epruveta nakon loma [5] | 26 |
| Slika 22. | Dijagram $\sigma - \varepsilon$ za meki konstrukcijski čelik u normaliziranom stanju [3] | 27 |
| Slika 23. | Primjeri gornje i donje granice tečenja [5] | 29 |
| Slika 24. | Konvencionalna granica razvlačenja za plastičnu deformaciju od 0,2% [7] | 30 |
| Slika 25. | Kvalitativni $\sigma - \varepsilon$ dijagrami za neke metalne materijale [2] | 30 |
| Slika 26. | Različiti stadiji epruvete prilikom statičkog vlačnog ispitivanja [2, 6] | 31 |
| Slika 27. | Kvalitativni stvarni dijagram naprezanje-istezanje za meki konstrukcijski čelik [2] | 34 |
| Slika 28. | Dijagram različitih raspona brzina prirasta deformacije, metoda A [5] | 36 |
| Slika 29. | Usporedni prikaz raspona brzina prirasta naprezanja i raspona brzina prirasta deformacije, metoda B [5] | 38 |
| Slika 30. | Primjer podataka za računalno upravljanu kidalicu [5] | 40 |
| Slika 31. | Računalna oprema korištena za ispitivanje | 45 |
| Slika 32. | Hidraulička kidalica | 45 |
| Slika 33. | Prihvatni ekstenzometar | 46 |
| Slika 34. | Proporcionalno kratki i proporcionalno dugi ispitni uzorak | 48 |
| Slika 35. | $\sigma - \varepsilon$ dijagram (a) s istaknutim područjem elastičnosti (b) za frekvenciju ispitivanja 1 Hz, čelik 50CrV4 | 50 |

| | | |
|-----------|--|----|
| Slika 36. | $\sigma - \varepsilon$ dijagram (a) s istaknutim područjem elastičnosti (b) za frekvenciju ispitivanja 5 Hz, čelik 50CrV4 | 50 |
| Slika 37. | $\sigma - \varepsilon$ dijagram (a) s istaknutim područjem elastičnosti (b) za frekvenciju ispitivanja 10 Hz, čelik 50CrV4 | 50 |
| Slika 38. | $\sigma - \varepsilon$ dijagram (a) s istaknutim područjem elastičnosti (b) za frekvenciju ispitivanja 20 Hz, čelik 50CrV4 | 51 |
| Slika 39. | $\sigma - \varepsilon$ dijagram (a) s istaknutim područjem elastičnosti (b) za frekvenciju ispitivanja 50 Hz, čelik 50CrV4 | 51 |
| Slika 40. | $\sigma - \varepsilon$ dijagram (a) s istaknutim područjem elastičnosti (b) za frekvenciju ispitivanja 1 Hz, čelik C15E | 52 |
| Slika 41. | $\sigma - \varepsilon$ dijagram (a) s istaknutim područjem elastičnosti (b) za frekvenciju ispitivanja 5 Hz, čelik C15E | 53 |
| Slika 42. | $\sigma - \varepsilon$ dijagram (a) s istaknutim područjem elastičnosti (b) za frekvenciju ispitivanja 10 Hz, čelik C15E | 53 |
| Slika 43. | $\sigma - \varepsilon$ dijagram (a) s istaknutim područjem elastičnosti (b) za frekvenciju ispitivanja 20 Hz, čelik C15E | 53 |
| Slika 44. | $\sigma - \varepsilon$ dijagram (a) s istaknutim područjem elastičnosti (b) za frekvenciju ispitivanja 50 Hz, čelik C15E | 54 |

POPIS TABLICA

| | | |
|------------|--|----|
| Tablica 1. | Vrste opterećenja pri ispitivanju mehaničkih svojstava [1] | 3 |
| Tablica 2. | Vrijednosti modula elastičnosti i smičnosti za neke materijale [2] | 6 |
| Tablica 3. | Dimenzije ispitnih uzoraka [5] | 24 |
| Tablica 4. | Rasponi brzina prirasta naprezanja s obzirom na modul elastičnosti materijala [5] | 38 |
| Tablica 5. | Kemijski sastav čelika 50CrV4 [9] | 47 |
| Tablica 6. | Kemijski sastav čelika C15E [9] | 47 |
| Tablica 7. | Rezultati ispitivanja za čelik 50CrV4 | 49 |
| Tablica 8. | Rezultati ispitivanja za čelik C15E | 52 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|--------------|------------------------|---|
| A | % | Istezljivost proporcionalno kratke epruvete |
| $A_{11,3}$ | % | Istezljivost proporcionalno duge epruvete |
| a_0 | mm | Početna debljina tijela epruvete pravokutnog presjeka |
| b_0 | mm | Početna visina tijela epruvete pravokutnog presjeka |
| d | mm | Promjer epruvete |
| d_0 | mm | Početni promjer epruvete |
| E | N/mm ² | Modul elastičnosti |
| F | N | Sila |
| F_e | N | Sila razvlačenja/tečenja |
| F_k | N | Sila u trenutku loma epruvete |
| F_m | N | Maksimalna sila |
| f_{\min} | Hz | Minimalna frekvencija uzorkovanja podataka |
| $f_{\min 1}$ | Hz | Minimalna frekvencija uzorkovanja za prvi uzorak |
| $f_{\min 2}$ | Hz | Minimalna frekvencija uzorkovanja za drugi uzorak |
| G | N/mm ² | Modul smičnosti |
| k | - | Koeficijent proporcionalnosti epruvete |
| L_0 | mm | Početna mjerna duljina epruvete |
| L_e | mm | Mjerna duljina ekstenzometra |
| L_c | mm | Duljina tijela epruvete |
| L_t | mm | Ukupna duljina epruvete |
| L_u | mm | Konačna mjerna duljina epruvete |
| n | - | Koeficijent očvrnuća materijala |
| q | % | Relativna pogreška točnosti mjerenja sile |
| \dot{R} | N/(mm ² ·s) | Brzina prirasta naprezanja |
| R_e | N/mm ² | Granica razvlačenja |
| R_{el} | N/mm ² | Donja granica razvlačenja |
| R_{eh} | N/mm ² | Gornja granica razvlačenja |
| R_k | N/mm ² | Konačno naprezanje |
| R_m | N/mm ² | Vlačna čvrstoća |
| $R_{p0,2}$ | N/mm ² | Konvencionalna granica razvlačenja |
| S_0 | mm ² | Površina početnog poprečnog presjeka epruvete |
| S_u | mm ² | Površina poprečnog presjeka epruvete nakon loma |
| t | s | Vrijeme trajanja ispitivanja |
| v_c | m/s | Brzina traverze kidalice |
| Z | % | Kontrakcija |
| γ | mm/mm | Smična deformacija |
| ΔL | mm | Produljenje epruvete |

| | | |
|---------------------------|-------------------|---|
| ΔL_u | mm | Produljenje nakon kidanja |
| ε | mm/mm | Istezanje/relativno produljenje |
| $\dot{\varepsilon}_{L_e}$ | s ⁻¹ | Brzina prirasta deformacije pomoću mjerne duljine ekstenzometra |
| $\dot{\varepsilon}_{L_c}$ | s ⁻¹ | Procijenjena brzina prirasta deformacije pomoću duljine tijela epruvete |
| ε_s | mm/mm | Stvarno relativno produljenje |
| ε_u | mm/mm | Konačno relativno produljenje |
| σ | N/mm ² | Normalno naprezanje |
| σ_s | N/mm ² | Stvarno naprezanje |
| τ | N/mm ² | Smično naprezanje |
| τ_{stv} | N/mm ² | Stvarno smično naprezanje |
| τ_{teo} | N/mm ² | Teorijsko smično naprezanje |

POPIS KRATICA

| Kratika | Opis |
|----------------|---|
| EN | Europska norma |
| HRN | Hrvatska norma |
| ISO | <i>International organization for standardization</i> – Međunarodna organizacija za standardizaciju |
| LVDT | <i>Linear variable differential transformer</i> – linearni varijabilni pretvarač |
| SI | <i>Système International d'Unités</i> – Međunarodni sustav mjernih jedinica |

SAŽETAK

Statičko vlačno ispitivanje jedno je od osnovnih ispitivanja kojim se utvrđuju mehanička svojstva materijala. Ponašanje materijala pri razvlačenju ovisi o njegovoj mikrostrukturi koja je funkcija kemijskog sastava i tehnoloških parametara obrade. Međutim, dodatan je utjecaj i nekih vanjskih čimbenika: temperature ispitivanja, geometrije epruvete, brzine prirasta deformacije ili opterećenja, ali također i frekvencije uzorkovanja podataka tijekom ispitivanja na računalom upravljanoj kitalici. U ovom radu obrađeni su rezultati statičkog vlačnog ispitivanja čeličnih uzoraka različitog kemijskog sastava ispitanih uz različite frekvencije uzorkovanja podataka, te doneseni odgovarajući zaključci.

Ključne riječi: Statički vlačni pokus, mehanička svojstva, frekvencija uzorkovanja podataka

SUMMARY

Static tensile testing is one of the basic tests used to determine the mechanical properties of materials. The behavior of the material during stretching depends on its microstructure, which is a function of the chemical composition and technological processing parameters. However, there is an added influence of some external factors: temperature, geometry of the test sample, rate of increase of deformation or load, but also the frequency of data sampling during testing on a computer-controlled test machine. In this paper the tensile test results were processed for steel samples of a different chemical composition tested with different data sampling frequencies, and an appropriate conclusion was reached.

Key words: Static tensile testing, mechanical properties, frequency of data sampling

1. UVOD

Glavna tema ovoga rada je opis statičkog vlačnog pokusa sukladno normi HRN EN ISO 6892-1 i opreme koja se koristi za ispitivanje. Provedena su ispitivanja kidanjem epruveta na kidalici te obrađeni rezultati uz različite frekvencije uzorkovanja podataka i određena pripadajuća mehanička svojstva. Prije samog opisa postupka ispitivanja uvodno je dan opis materijala općenito, povezanost strukture i svojstava materijala te način i razlog utvrđivanja mehaničkih svojstva materijala.

Za materijale se općenito može reći da su to čvrste tvari od kojih je nešto izrađeno ili sastavljeno i posjeduju odgovarajuća fizikalna, kemijska i mehanička svojstva. Drugim riječima, to su tvari koje se odgovarajućim postupcima mogu oblikovati u željene predmete određenog oblika, veličine i uporabne vrijednosti. Prema tome, od svih treba istaknuti tehničke materijale iz kojih se izrađuju tehnički proizvodi. Takvi materijali, kako bi zadovoljili potrebne zahtjeve i funkciju proizvoda, trebaju posjedovati povoljnu kombinaciju svojstava. Osim fizikalnih i kemijskih svojstava za tehničku primjenu materijala vrlo su važna mehanička svojstva prema kojima se vrši dimenzioniranje konstrukcija, dijelova i slično.

Eksplozivni rast broja otkrivenih materijala započinje oko četrdesetih godina prošlog stoljeća. Neke procjene govore da je danas na raspolaganju oko 100000 različitih vrsta materijala. Međutim, broj osnovnih vrsta materijala je značajno manji dok se raznovrsnost postiže oscilacijom sastava i strukture materijala pa razlikujemo sljedeće grupe tehničkih materijala:

- Metali i legure,
- Polimeri,
- Keramika i staklo,
- Kompoziti.

Navedeni materijali iz svake skupine imaju različit kemijski sastav i strukturu koji utječu na njihova svojstva odnosno ponašanje. Upravo zbog postizanja željenih svojstva kao što su i mehanička potrebno je poznavati određenu tehnologiju preradbe materijala i njihov sastav i strukturu. [1]

Mehanička svojstva materijala stoga poprimaju veliku važnost naspram ostalih fizikalnih i kemijskih svojstava iz razloga što su upravo ona mjerodavna i odlučujuća pri dimenzioniranju dijelova strojeva, konstrukcija i ostalih elemenata. S druge strane, pomoću mehaničkih svojstava, kvaliteta materijala u prvotnoj i u završnoj kontroli proizvoda se može objektivno ocijeniti. Također se prema željenim mehaničkim svojstvima mogu optimirati tehnološki parametri proizvodnje koji će rezultirati materijalom odgovarajućih karakteristika. [2]

Kako je prethodno rečeno da struktura i kemijski sastav utječu na mehanička svojstva, može se zaključiti da je poznavanjem odnosa strukturnog stanja i mehaničkih svojstava moguće proračunati mehanička svojstva primjenom mikrostrukturnih parametara. No ipak, to je moguće samo ako se radi o idealnim materijalima jer se u realnima nalazi mnoštvo (mikro)strukturnih nepravilnosti koje nije moguće točno detektirati i obuhvatiti u proračunu. Jedan od primjera na kojemu se to može prikazati je teoretsko smično naprezanje potrebno za smicanje kristalnih ravnina idealnog kristala $\alpha\text{-Fe}$ koje utvrđeno proračunom iznosi $\tau_{\text{teo}} \approx 8400 \text{ N/mm}^2$, dok vrijednost utvrđena pokusom na stvarnom, odnosno realnom materijalu, iznosi $\tau_{\text{stv}} \approx 10 \text{ N/mm}^2$. Upravo je nesavršena kristalna struktura, među ostalim uzrokovana velikim brojem dislokacija, razlog tolike razlike između vrijednosti utvrđene eksperimentom i proračunom za jedan te isti materijal. Iz tog razloga vrijedi zaključak da se mehanička svojstva realnih materijala mogu točno odrediti samo eksperimentom. [2]

Zbog toga je za potrebe određivanja mehaničkih svojstava materijala razvijena posebna laboratorijska oprema. Također, pri provođenju takvih ispitivanja često se nastoje oponašati uvjeti u kojima će materijal biti izložen u eksploataciji. Općenito, mehanička svojstva se ispituju na posebno izrađenim i pripremljenim uzorcima, odnosno na *epruvetama* ili *ispitnim uzorcima*, ali se mogu ispitivati i gotovi strojni dijelovi te čak i sklopovi. Kao i sam postupak, tako su i ispitni uzorci normiranih oblika i dimenzija. Ovisno o vrsti eksperimentalnog postupka, epruvete se opterećuju vlačno, tlačno, savojno, uvojno i smično. S druge strane, može se javljati nekoliko različitih opterećenja, pa naprezanje može biti:

- Statičko – iznos naprezanja tijekom ispitivanja se ne mijenja ili je promjena mala.
- Dinamičko – iznos naprezanja tijekom ispitivanja se ciklički mijenja ili je udarnog karaktera.

Vrste opterećenja i način djelovanja opterećenja prikazan je u **tablici 1**.

Tablica 1. Vrste opterećenja pri ispitivanju mehaničkih svojstava [1]

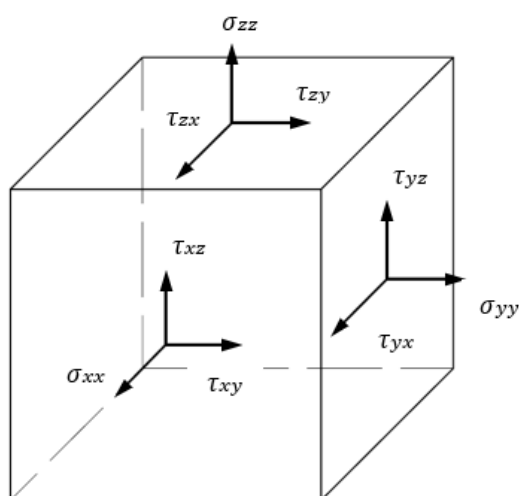
| Način djelovanja opterećenja | Trajanje djelovanja opterećenja | |
|------------------------------|---|-----------------------|
| | Kratkotrajno | Dugotrajno |
| Statičko | Vlačno ispitivanje Tlačno ispitivanje Savojno ispitivanje Uvojno ispitivanje Smično ispitivanje | Ispitivanje puzanjem |
| Dinamičko | Ispitivanje udarnog rada loma | Ispitivanje umaranjem |

Kao što je već navedeno, prilikom ispitivanja mehaničkih svojstava često se pokušavaju oponašati vanjski uvjeti poput povišene ili snižene temperature, utjecaja korozivnih ili nekih drugih medija i slično. Zbog takvih razloga, potrebna oprema za ispitivanje mehaničkih svojstava je vrlo složena i skupa. Od gore navedenih opterećenja, za utvrđivanje osnovnih mehaničkih svojstava provodi se vlačno ispitivanje epruveta u uvjetima statičkog opterećenja, a takvo ispitivanje se naziva statičko vlačno ispitivanje. [1, 2]

2. ELASTIČNOST

Djelovanje bilo kojeg opterećenja na neko čvrsto tijelo izazvat će njegovu deformaciju. Takva deformacija se može odvijati elastično, viskoelastično, kristalno-plastično ili viskozno (staklo-plastično). Kod elastičnog mehanizma će deformacije nakon prestanka djelovanja opterećenja, odnosno nakon rasterećenja iščeznuti, dok kod ostalih mehanizama nije takav slučaj pa dolazi do pojava trajnih deformacija nakon rasterećenja. Kod svih materijala je prisutno elastično ponašanje pri temperaturama puno nižim u odnosu na temperaturu tališta. S druge strane, pri povišenim temperaturama kod metalnih materijala dominira kristalno-plastično ponašanje, a kod polimernih i staklenih materijala viskozno ponašanje. [2]

Kod ocjene mehaničkih svojstava vrlo je važna anizotropija. Gotovo svi materijali s polikristalnom strukturom i nepravilnom orijentacijom malih kristala pokazuju izotropna mehanička svojstva, dok anizotropni materijali poput monokristala, polikristala usmjerenog zrna, granica zrna ili precipitiranih čestica druge faze kao i kompoziti ojačani vlaknima pokazuju različita mehanička svojstva ovisno o smjeru djelovanja opterećenja pa se u eksploataciji oni opterećuju u smjeru svoje najveće mehaničke otpornosti. Elastično područje deformacije vrlo je važno jer u tom području ne dolazi do pojava trajnih, odnosno plastičnih deformacija pa se granična naprezanja ovog područja koriste u proračunima i dimenzioniranju elemenata konstrukcija. U elastičnom području javlja se linearna ovisnost između naprezanja i deformacije koja je definirana Hookeovim zakonom. Na kockastom čvrstom tijelu može se prikazati devet komponenata naprezanja (na slici 1.) [2]



Slika 1. Komponente naprezanja kockastog čvrstog tijela [2]

Komponente σ_{xx} , σ_{yy} i σ_{zz} su čisto normalno naprezanje koja djeluju okomito u odnosu na ravninu, dok su preostale komponente smičnog naprezanja koja se javljaju paralelno sa ravninama, a nezavisne su samo tri komponente jer vrijedi $\tau_{ij} = \tau_{ji}$. Hookeov zakon povezuje svako od navedenih naprezanja s odgovarajućim deformacijama s pomoću elastičnih konstanti. Najveći broj metala pa i njihovih legura kristalizira u kubičnom kristalnom sustavu pa se javljaju samo tri elastične konstante dok su ostale jednake nuli ili su suprotnih smjerova. Za opis elastičnog ponašanja u potpuno izotropnom materijalu potrebne su dvije elastične konstante, a to su:

- Youngov modul, odnosno modul elastičnosti E , kojim se iskazuje odnos jednoosnog naprezanja σ i deformacije ε u istom smjeru i prikazan je jednadžbom (1):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \text{ N/mm}^2 \quad (1)$$

- Modul smičnosti G , koji povezuje smično naprezanje τ i smičnu deformaciju γ te je :

$$G = \frac{\tau}{\gamma}, \text{ N/mm}^2 \quad (2)$$

Ovisno koliko su čvrste veze između atoma u kristalnoj rešetki ili nepravilnoj amorfnoj strukturi, toliko će varirati i vrijednosti, odnosno veličine navedenih elastičnih konstanti. Stoga će vrijednosti elastičnih konstanti biti visoke ako se radi o materijalu čiji su atomi vezani čvrstim vezama kao što je to slučaj kod dijamanta ili volframa, dok s druge strane, ako su veze atoma u materijalu slabije biti će i niske vrijednosti elastičnih konstanti kao što je to slučaj kod većine plastomera, gume i slično. U **tablici 2.** navedeno je nekoliko izotropnih materijala s iznosima elastičnih konstanti. [2]

Tablica 2. Vrijednosti modula elastičnosti i smičnosti za neke materijale [2]

| Materijal | Modul elastičnosti, N/mm ² | Modul smičnosti, N/mm ² |
|------------------------|--|---------------------------------------|
| Dijamant | 1200000 | - |
| Volfram | 360000 | 130000 |
| Čelik | 210000 | 84000 |
| Nikal | 200000 | 80000 |
| Bakar | 105000 | 46000 |
| Aluminij | 70000 | 26000 |
| Olovo | 16000 | 5500 |
| Porculan | 58000 | 24000 |
| Obično staklo | 76000 | 23000 |
| Kristalno staklo | 60000 | 25000 |
| Poli(metil metakrilat) | 4000 | 1500 |
| Tvrda guma | 5000 | 2400 |
| Guma | 100 | 30 |

3. STATIČKI VLAČNI POKUS

Statičkim vlačnim pokusom ispituje se elastično i plastično ponašanje materijala djelovanjem jednoosnog statičkog vlačnog ili rasteznog opterećenja, odnosno naprezanja, gdje za normalna naprezanja vrijedi $\sigma_{xx} \neq 0$, $\sigma_{yy} = 0$ i $\sigma_{zz} = 0$. Ovim načinom ispitivanja se određuju osnovna mehanička svojstva materijala kao što su granica razvlačenja ili tečenja (R_e), vlačna čvrstoća (R_m) itd. Mehanička svojstva dobivena statičkim vlačnim pokusom koriste se pri dimenzioniranju i proračunima u inženjerskom projektiranju uz odgovarajuće faktore sigurnosti i uključena su u specifikacijama materijala kako bi se osigurala njegova kvaliteta. S druge strane, pomoću utvrđenih svojstava mogu se predviđati ponašanja materijala pod drugim oblicima opterećenja, a ne samo kod jednoosnog. Statički vlačni pokus je najčešće korištena metoda ispitivanja mehaničkih svojstava materijala. Ispitivanje se provodi na način da se epruvete ispitnog materijala pomoću adekvatne opreme kontinuirano uz spori prirast naprezanja razvlače sve do njihova loma. [2, 3, 4]

3.1. Norma

3.1.1. ISO organizacija

ISO (Međunarodna organizacija za standardizaciju) je svjetska federacija nacionalnih normizacijskih tijela (članica ISO-a). Posao pripreme međunarodnih normi obično se provodi putem tehničkih odbora ISO-a. Svaka članica zainteresirana za temu za koju je osnovan tehnički odbor ima pravo biti zastupljena u tom odboru. U suradnji sa ISO organizacijom sudjeluju i druge međunarodne organizacije (vladine ili nevladine). Glavni zadatak tehničkih odbora je priprema međunarodnih normi. Nacrti međunarodnih standarda koje su usvojili tehnički odbori šalju se članicama ISO-a na glasovanje. Objava kao međunarodnog standarda zahtijeva odobrenje od najmanje 75 % tijela članica koje daju glas. [5]

3.1.2. Norma HRN EN ISO 6892-1

Norma ISO 6892 sastoji se od sljedećih dijelova pod općim naslovom „*Metalni materijali — Ispitivanje vlačne čvrstoće*“:

- 1. dio: Metoda ispitivanja na sobnoj temperaturi,
- 2. dio: Metoda ispitivanja na povišenoj temperaturi,
- 3. dio: Metoda ispitivanja na niskoj temperaturi,
- 4. dio: Metoda ispitivanja u tekućem heliju

Navedena norma koristi se također i u Republici Hrvatskoj pod imenom HRN EN ISO 6892. Za potrebe ovog rada korišten je prvi dio norme, HRN EN ISO 6892-1 koji specificira metode statičkog vlačnog ispitivanja metalnih materijala i definira mehanička svojstva koja se mogu odrediti na sobnoj temperaturi. Ispitivanje uključuje razvlačenje ispitnog komada vlačnom silom, općenito do loma, za određivanje jednog ili više mehaničkih svojstava. Sobna temperatura određena ovom metodom obuhvaća temperature od 10 °C do 35 °C, osim ako nije drugačije navedeno, dok se ispitivanja koja se provode u kontroliranim uvjetima moraju provoditi na temperaturi od 23 °C ± 5 °C. [5] U normi HRN EN ISO 6892-1 dostupne su dvije metode ispitivanja:

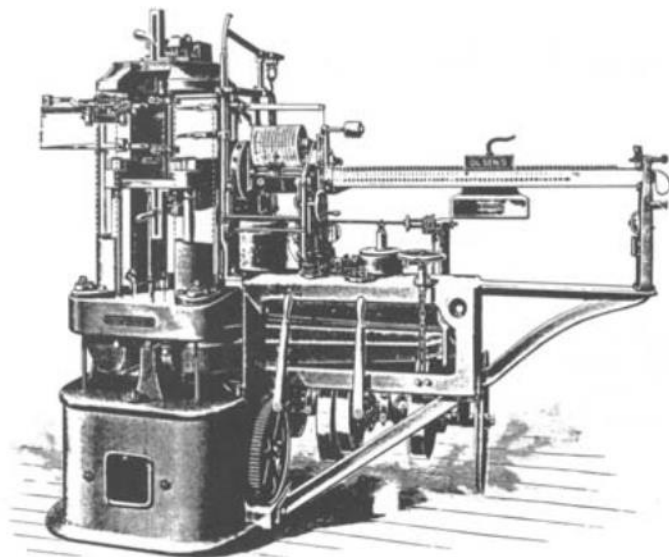
- Metoda A – temelji se na brzini prirasta deformacije u jedinici vremena (uključujući brzinu gibanja traverze kidalice),
- Metoda B – temelji se na brzini prirasta naprezanja u jedinici vremena.

Metoda A ima za cilj minimizirati varijacije brzine ispitivanja pri određivanju parametara osjetljivih na brzinu deformacije i minimizirati mjernu nesigurnost rezultata ispitivanja. U nastavku ovoga rada dan je širi opis obje metode ispitivanja. [5]

3.2. Standardna oprema za provedbu ispitivanja

Oprema za provedbu statičkog vlačnog pokusa sastoji se od nekoliko vrsta uređaja koji se koriste za primjenu kontroliranih vlačnih opterećenja na ispitne uzorke te omogućava upravljanje, kontrolu i reguliranje brzine opterećenja i točno mjerenje sile i deformacije primijenjene na ispitni uzorak. [4]

Komercijalna oprema za vlačno ispitivanje postala je dostupna krajem 19. stoljeća. Najranija oprema bila je izvedena mehanički s ručnim pogonom (kao što su ručne poluge) za primjenu opterećenja i slično. Godine 1890. *Tinius Olsen* je konstruirao i patentirao mehaničku ispitivalicu za ručno upravljanje s kapacitetom sile od 180 kN. Godinu dana kasnije *Olsen* je proizveo prvi autografski stroj koji je mogao prikazati dijagram sila – produljenje. Primjer stroja iz 1890. prikazan je na **slici 2.** [4]



Slika 2. Oprema za primjenu statičkog vlačnog pokusa iz 1890. godine [4]

Oprema za ispitivanje razvijena je od čisto mehaničkih strojeva do naprednijih elektromehaničkih i servohidrauličnih strojeva s naprednom elektronikom i mikroracionalima. Elektronički sklopovi i mikroprocesori povećali su pouzdanost eksperimentalnih podataka uz smanjenje vremena za analizu informacija i podataka. Takva izvedba uređaja i opreme omogućila je brzo i s velikom preciznošću određivanje mehaničkih svojstava, odnosno vlačne čvrstoće, granice razvlačenja, modula elastičnosti, istezanja itd. Konvencionalni strojevi za ispitivanje mehaničkih svojstava uključuju ispitivalice (kidalice) vlačnog i tlačnog opterećenja te univerzalne ispitivalice. [4]

3.2.1. Univerzalne ispitivalice

Iako postoji puno vrsta uređaja za ispitivanje mehaničkih svojstava, danas se ona većinom ispituju na univerzalnim ispitivalicama (kidalicama) koje su, osim za provedbu statičkog vlačnog pokusa, izvedene i za mogućnost ispitivanja tlačnih i savojnih mehaničkih svojstava. Osim univerzalnih ispitivalica, za provedbu statičkog vlačnog pokusa koriste se i kidalice koje mogu raditi samo u režimu vlačnog opterećenja. Glavna uloga kidalice je osigurati potrebnu silu, odnosno odgovarajuće opterećenje na ispitni uzorak, te pomoću ostale opreme odrediti ponašanje materijala u uvjetima vlačnog opterećenja ispisom dijagrama „sila – produljenje“ na temelju kojeg se unosom površine početnog poprečnog presjeka i duljine epruvete konstruira dijagram „naprezanje – istežanje“. [4]

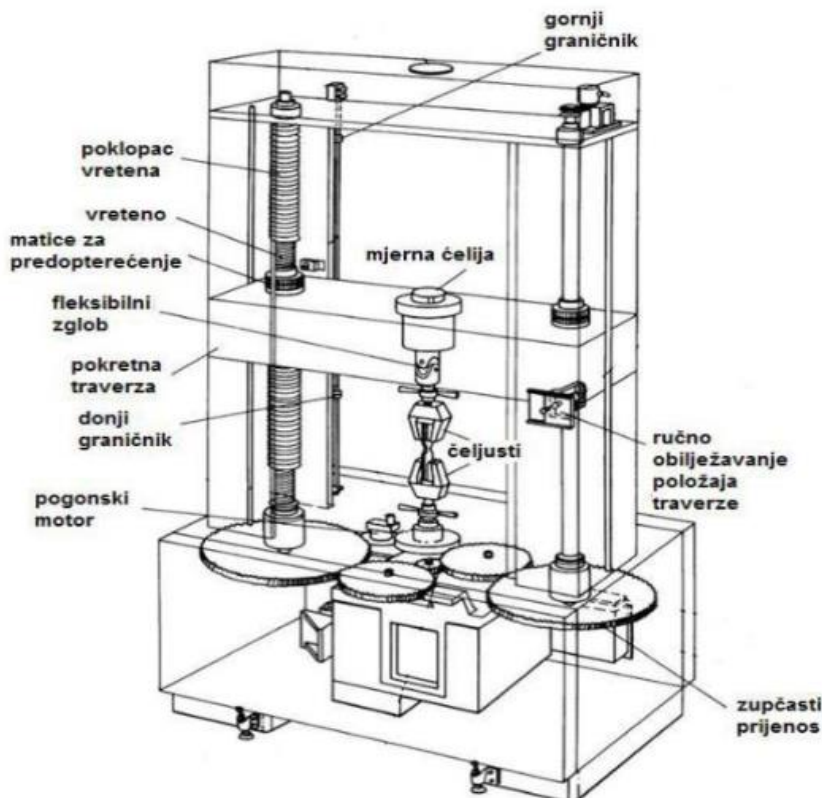
Ispitni uzorak se na kidalici kontinuirano razvlači uz blagi prirast opterećenja sve do pucanja, odnosno loma epruvete. Istovremeno, pri razvlačenju epruvete na kidalici se pomoću mjernih uređaja kontinuirano mjere sila i produljenje epruvete te se preko pisača grafički ili pomoću računala ispisuje dijagram „sila – produljenje“. Kako bi se preciznije mjerilo produljenje, na epruvetu se postavlja kontakti ili beskontaktni ekstenzometar čije se mjerenje bazira na mehaničkom ili elektrooptičkom principu. Ovisno o obliku poluproizvoda, odnosno debljini stjenke, statički vlačni pokus se najčešće provodi na epruvetama okruglog ili četvrtastog poprečnog presjeka. [2] Ispitivalice (kidalice), kao što je već spomenuto, razlikuju se po mehanizmu pomoću kojeg se primjenjuje opterećenje pa se javljaju dvije vrste:

- (Servo)hidraulične ispitivalice,
- Elektromehaničke ispitivalice.

Kod hidrauličkih kidalica primijenjeno opterećenje se ostvaruje pomoću hidrauličkog cilindra s klipom te pripadajućim hidrauličkim napajanjem dok se kod elektromehaničkih opterećenje ostvaruje preko navojnih vretena koje pokreću elektromotori preko sustava zupčanika, odnosno reduktora kako bi se osigurala odgovarajuća brzina. Što se tiče maksimalne sile, zupčano pogonjeni sustavi postižu silu do približno 600 kN, dok hidraulički sustavi mogu postići sile do približno 4500 kN. S druge strane, kod elektromotornih kidalica brzina pokretne traverze je ograničena brzinom vrtnje elektromotora u izvedbi s reduktorom, dok je brzina traverze kod hidrauličkih kidalica ograničena kapacitetom hidrauličke pumpe za osiguranje ravnomjernog tlaka na klip aktuatora ili traverze. [4]

3.2.1.1. Elektromehaničke kidalice

Elektromehaničke kidalice su izvedene s velikim navojnim vretenom provučenim kroz pokretnu traverzu. Izvedba elektromehaničke kidalice zajedno s dijelovima može se vidjeti na slici 3. [4]

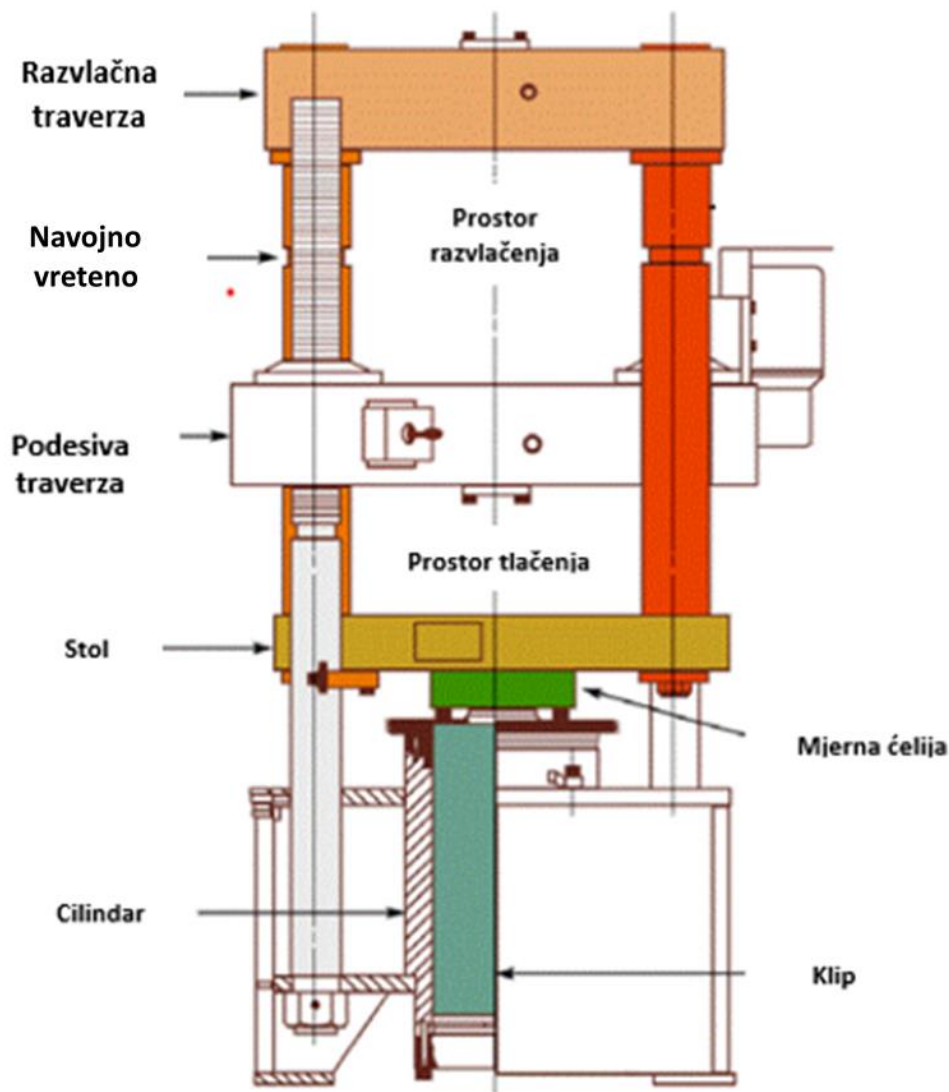


Slika 3. Dijelovi elektromehaničke kidalice [4]

Vijčano vreteno se okreće u oba smjera pomoću elektromotora preko reduktorskog sustava i omogućuje kretanje pokretne traverze prema dolje ili gore. Konvencionalne elektromehaničke kidalice općenito su konstruirane za postizanje brzina pokretne traverze od $1,8 \cdot 10^{-8}$ m/s do $8,5 \cdot 10^{-3}$ m/s. Ispitivalice koje se trenutno koriste izvedene su sa dva ili više navojnih vretena. Za poravnanje i bočnu stabilnost, vretena su poduprta u ležajevima na svakom kraju, a pokretna traverza je vođena stupovima ili vodilicama. Raspon brzina traverze može se postići promjenom brzine elektromotora i promjenom prijenosnog omjera, a servopogonski sustav zatvorene petlje osigurava da se traverza kreće konstantnom brzinom. Suvremeni sustavi kidalica koriste precizne optičke enkodere montirane izravno na prednapregnute dvostruke kuglične vijke. Ležajevi i zupčanici moraju biti adekvatno tretirani jer se usred velikih sila javljaju povećana trenja i trošenja materijala. [4]

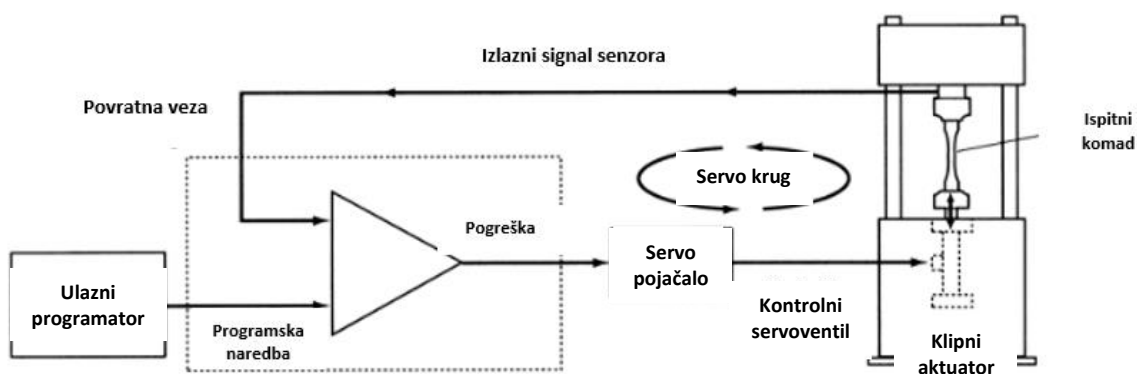
3.2.1.2. Servohidraulične kidalice

Servohidraulični mehanizam kidalice se bazira na radu hidrauličkog klipa koji može biti izvedbe s jednim ili dvostrukim djelovanjem te pomiče pokretnu traverzu gore ili dolje. Međutim, kod većine hidrauličkih kidalica za statičko vlačno ispitivanje javljaju se izvedbe s jednostrukim klipom. **Slika 4.** prikazuje dijelove hidrauličke kidalice. [4]



Slika 4. Dijelovi hidraulične univerzalne kidalice [4]

Servohidraulične kidalice koriste hidrauličku pumpu i servohidraulične ventile koji pokreću klipni aktuator. Na **slici 5.** vidljiv je shematski prikaz servohidrauličnog mehanizma kidalice. [4]

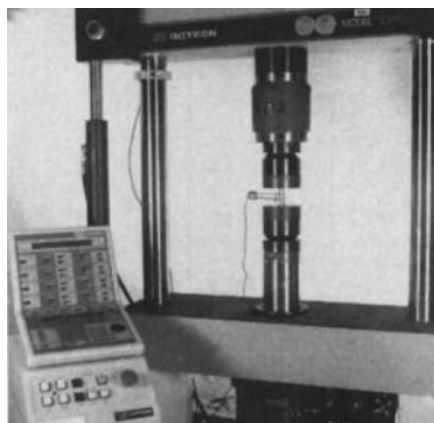


Slika 5. Shematski prikaz zatvorenog kruga servohidrauličnog mehanizma [4]

Klipni aktuator pričvršćen je na jedan kraj uzorka kao što je to prikazano slikom, a njegovo kretanje može se kontrolirati u oba smjera kako bi se provela statička vlačna ispitivanja, ali mogu i tlačna te ciklička opterećenja. Servohidraulični ispitni sustavi imaju sposobnost ispitivanja pri brzinama traverze od samo $45 \cdot 10^{-11}$ m/s do 30 m/s ili više, te nude širi raspon brzina nego elektromehaničke kidalice. Hidraulični aktuatori dostupni su sa širokim rasponom sile. Jedinstveni su po svojoj mogućnosti postizanja sila od 4450 kN ili više. Elektromehaničke kidalice ograničene su kod postizanja velikih sila zbog problema povezanih s niskom krutošću stroja i potrebom za velikim i skupim navojnim vretenima. [4]

3.2.2. Računalna oprema za upravljanje i regulaciju

Suvremene univerzalne kidalice koriste elektroničke uređaje izvedene s mikroprocesorima za upravljanje, vođenje i regulaciju. Jedna klasa kontrolera temelji se na namjenskim mikroprocesorima za ispitivalice. Primjer takvog kontrolera dan je slikom 6. [4]



Slika 6. Kontroler s namjenskim mikroprocesorima [4]

Namjenski mikroprocesori dizajnirani su za obavljanje specifičnih zadataka te imaju zaslone i funkcije unosa koji su ograničeni na određene zadatke. Namjenski mikroprocesor šalje signale eksperimentalnom uređaju i prima informacije od postavljenih senzora, odnosno mjernih instrumenata. Podaci primljeni od senzora mogu se proslijediti osciloskopima ili računalima za prikaz i pohranu. Eksperimentalni rezultati sastoje se od podataka o vremenu i naponu koji se moraju dodatno obraditi kako bi se analiziralo ponašanje materijala. U cilju analize rezultata potrebno je pretvoriti izvorne signale u specifične veličine na temelju poznatih faktora pretvorbe. Primjer je pretvorba napona u pomak ili opterećenje. [4]

Druga klasa kontrolera je osobno računalo (PC) dizajnirano s elektroničkim sučeljem prema eksperimentalnom uređaju i odgovarajućim primjenjivim softverom. Softver uzima opis ispitivanja koje treba izvesti, uključujući podatke o geometriji uzorka te uspostavlja potrebne elektroničke signale. Tijekom provedbe ispitivanja računalo kontrolira ispitivanje i prikuplja, reducira, prikazuje i pohranjuje podatke. Očita prednost PC kontrolera je smanjeno vrijeme za generiranje grafičkih rezultata ili izvješća. Druga prednost je eliminacija nekih proceduralnih pogrešaka ili smanjenje detalja sučelja između operatera i eksperimentalnog uređaja. Neki sustavi su dizajnirani s obje vrste kontrolera. Posjedovanje obje vrste kontrolera pruža maksimalnu fleksibilnost u prikupljanju podataka uz minimalnu količinu vremena potrebnog za obradu podataka prilikom provođenja standardnih eksperimenata. [4] Sustav za mjerenje sile ispitnog uređaja mora biti kalibriran u skladu s normom HRN EN ISO 7500-1. [5]

3.2.3. Uređaji za mjerenje produljenja

Uređaji koji se najčešće koriste za mjerenje produljenja epruvete prilikom vlačnog ispitivanja zovu se ekstenzometri. Osim kontaktnih ekstenzometara još se koriste i druge vrste ekstenzometara i mjernih uređaja kao što su različiti optički ekstenzometri, laserska interferometrija i video ekstenzometri. Primjer kontaktnog ekstenzometra dan je na **slici 7**. [4]



Slika 7. Prihvatni ekstenzometar [4]

Ovi uređaji mogu pružiti visok stupanj točnosti mjerenja istezanja. Stoga se s obzirom na princip mjerenja i postavljanja ekstenzometri dijele na:

- Kontaktne,
- Beskontaktne.

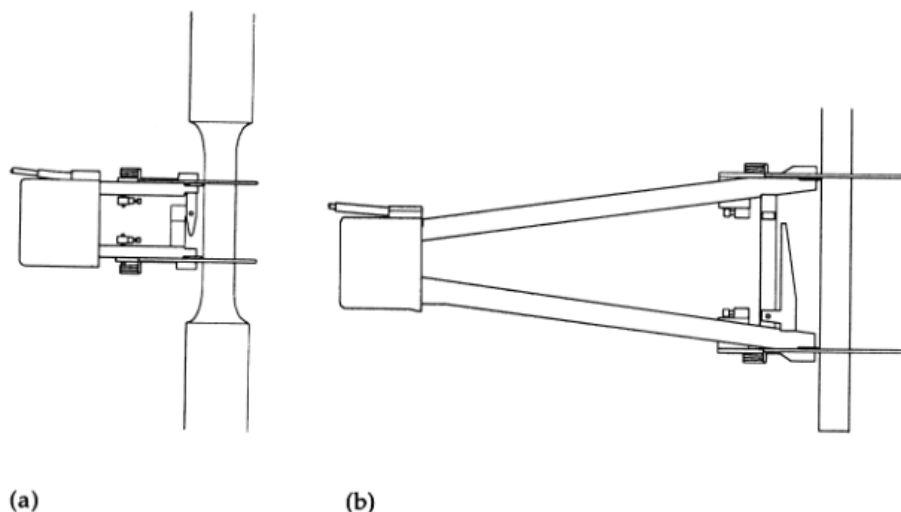
Kontaktne ekstenzometri se postavljaju izravno na ispitni uzorak ili epruvetu kao što je prikazano **slikom 7**. U nastavku su opisani različiti tipovi ekstenzometara. Odabir uređaja za mjerenje deformacija ovisi o različitim čimbenicima:

- Korisni raspon i točnost mjerača,
- Tehnika montaže mjerača,
- Veličina uzorka,
- Uvjeti okoline pri ispitivanju,
- Konfiguracija i analiza elektroničkih krugova za obradu signala.

Posljednja stavka treba uključivati kalibraciju ekstenzometarskog uređaja u njegovom punom radnom rasponu. Osim toga, jedan od izazova rada s ekstenzometrima koji se pričvršćuju je osigurati pravilno montiranje na uzorak. Ako ekstenzometar sklizne dok se uzorak razvlači, mjerni signal će dati krivo očitavanje. [4]

3.2.3.1. *Kontaktne ekstenzometri*

Kako bi se izmjerilo produljenje, kontaktne („clip-on“) ekstenzometar se postavlja na ispitni komad pomoću prihvatnih čeljusti. Ova vrsta uređaja je važna pri ispitivanju metala ili nekih drugih materijala koji pokazuju visoku krutost. Kao što je prikazano na **slici 8**, tipični ekstenzometri imaju fiksne mjerne duljine kao što su 25 ili 50 mm. Također, ekstenzometri se klasificiraju prema maksimalnom postotku produljenja tako da bi tipična jedinica mjerne duljine od 25 mm imala različite modele za 10, 50 ili 100% maksimalnog istezanja. [4]

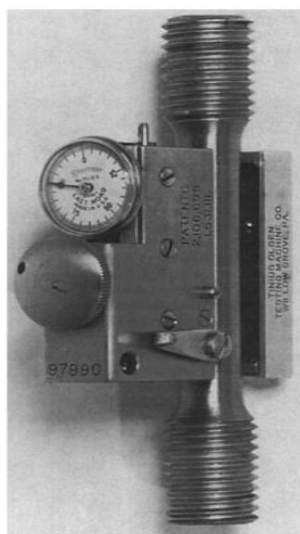


Slika 8. Vrste kontaktnih ekstenzometara: a) ekstenzometar s mjernom duljinom od 25 mm i hodom od 3,75 mm prikladan za statička i dinamička ispitivanja; b) ekstenzometar s mjernom duljinom od 50 mm i hodom od 25 mm pogodan za velike uzorke i materijale s velikim istežanjem [4]

Iako ekstenzometri najčešće mjere aksijalne deformacije, neki se mogu koristiti i za mjerenje poprečne deformacije koje ukazuje na smanjenje širine ili promjera epruvete tijekom vlačnog ispitivanja. Kontaktni ekstenzometri dijele se u tri grupe:

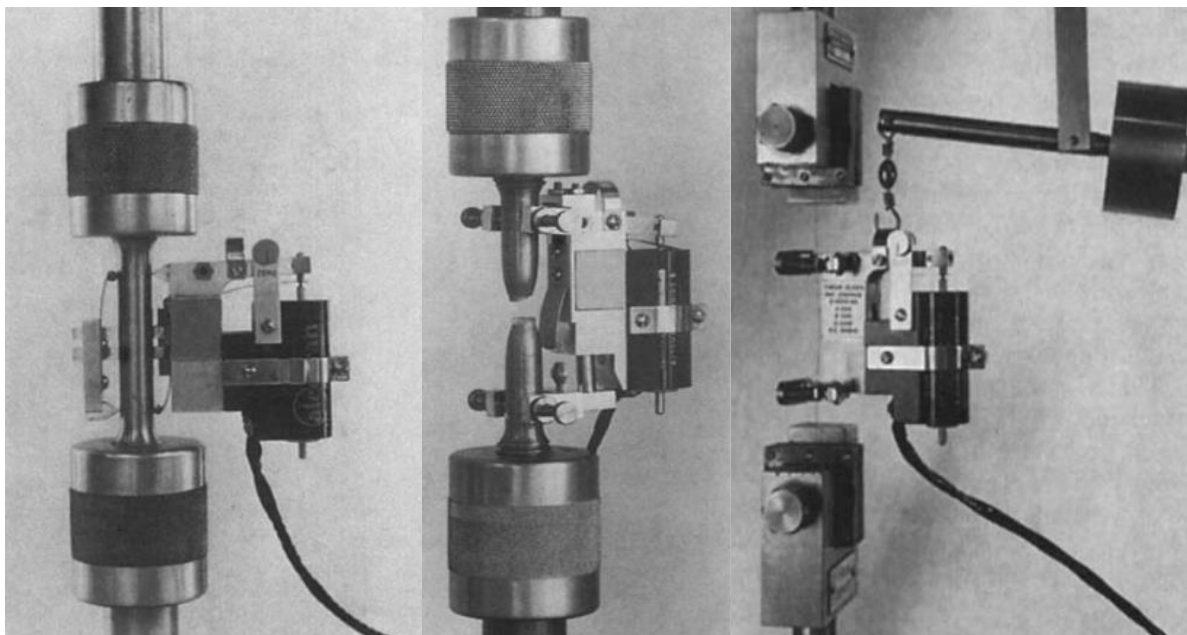
- LVDT ekstenzometri,
- Ekstenzometri s mjerачem produljenja (**slika 8.**),
- Analogni ekstenzometri.

Analogni ekstenzometri se danas vrlo rijetko koriste, a primjer takvog uređaja prikazan je na **slici 9.** Za očitavanje deformacija koristi se mjerni sat. [4]



Slika 9. Analogni ekstenzometar [4]

LVDT ekstenzometri koriste linearni varijabilni pretvarač (engl. „*linear variable differential transformer*“, skraćeno *LVDT*). LVDT je elektromehanički uređaj koji se sastoji od jezgre obavijene sklopom zavojnice. Jezgra je pomični dio čijom se promjenom linearnog pomaka mijenja iznos naponskog signala proporcionalan ukupnom pomaku te se na taj način očitava iznos istezanja prilikom vlačnog ispitivanja. Primjer LVDT ekstenzometra dan je **slikom 10.** [4]



Slika 10. LVDT ekstenzometar prilikom ispitivanja na različitim uzorcima i u trenutku loma [4]

LVDT ekstenzometri su mali, lagani i jednostavni za korištenje. Imaju vrlo širok raspon mjernih duljina i mogu se opremiti dodatnim značajkama za prilagodbu ispitivanja. Pogodni su pri ispitivanju malih uzoraka pa čak i konca, folija i slično, a s druge strane mogu se primijeniti na velikim epruvetama i uzorcima poput armaturnih šipki, čeličnih pravokutnih profila i cijevi promjera do 75 mm.

Princip mjerenja ekstenzometara s mjerачem produljenja temelji se na mjerачima koji su spojeni na metalni element preko strujnog (premosnog) kruga. Otklon elementa (zbog istezanja uzorka) mijenja otpor mjerачa koji proizvodi izlazni signal iz strujnog kruga. Ovaj signal se pojačava i obrađuje pretvaračima signala prije nego što se prikaže na digitalnom čitaču ili računalu. [4]

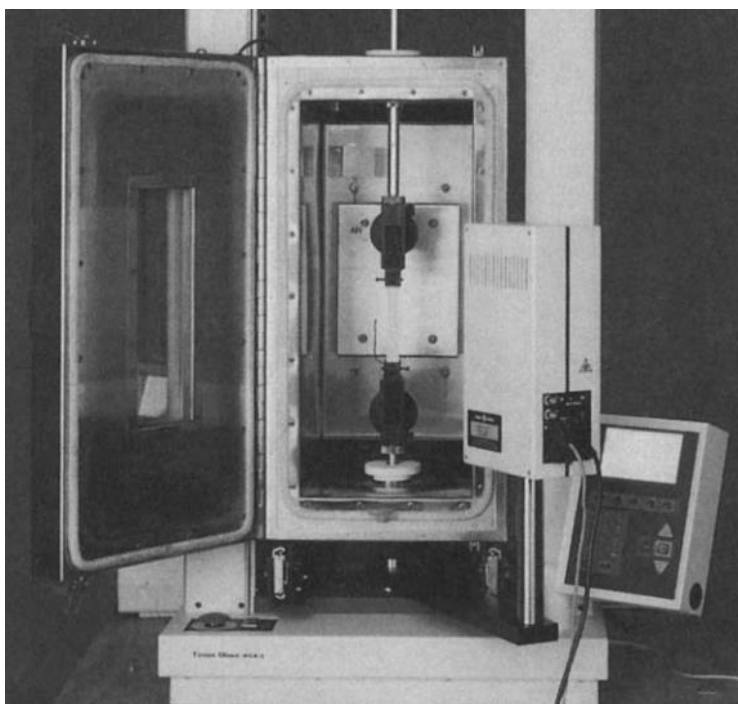
3.2.3.2. Beskontaktni ekstenzometri

Beskontaktni uređaji poput video ekstenzometra također se mogu koristiti za dobivanje mjerenja linearne deformacije. Beskontaktni ekstenzometri se mogu podijeliti s obzirom na princip mjerenja na:

- Video ekstenzometre,
- Optičke ekstenzometre,
- Laserske ekstenzometre.

Optički ekstenzometri posebno su korisni kod materijala kao što su guma, tanki filmovi, plastika i drugi materijali kod kojih bi težina konvencionalnog ekstenzometra izobličila ispitni uzorak i utjecala na dobivena očitavanja. U prošlosti su takvi sustavi za mjerenje produljenja bili skupi, a njihova glavna upotreba bila je prvenstveno u istraživačkim i razvojnim ispitivanjima. Međutim, ove optičke tehnike mjerenja postaju sve dostupnije za konvencionalne ispitivalice mehaničkih svojstava. Također, dostupne su i univerzalne ispitivalice s laserskim ekstenzometrom kao što je prikazano sa **slici 11**. Ovaj laserski ekstenzometar omogućuje precizno mjerenje deformacija tankih uzoraka kao što su filmovi što inače ne bi bilo praktično mehaničkim pričvršćivanjem ekstenzometarskih uređaja. Optički sustavi također omogućuju beskontaktno mjerenje istezanja u komorama gdje se simuliraju odgovarajući okolišni uvjeti.

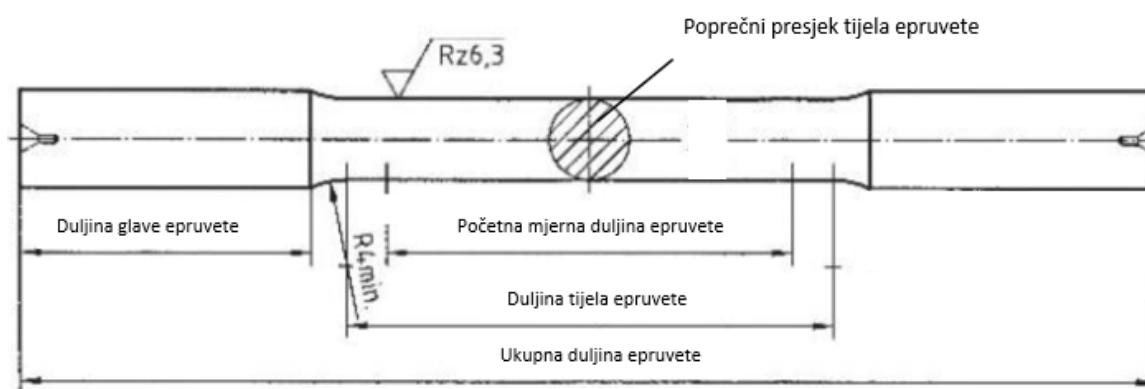
[4]



Slika 11. Univerzalna kidalica s laserskim ekstenzometrom [4]

3.3. Ispitni uzorci za statičko vlačno ispitivanje

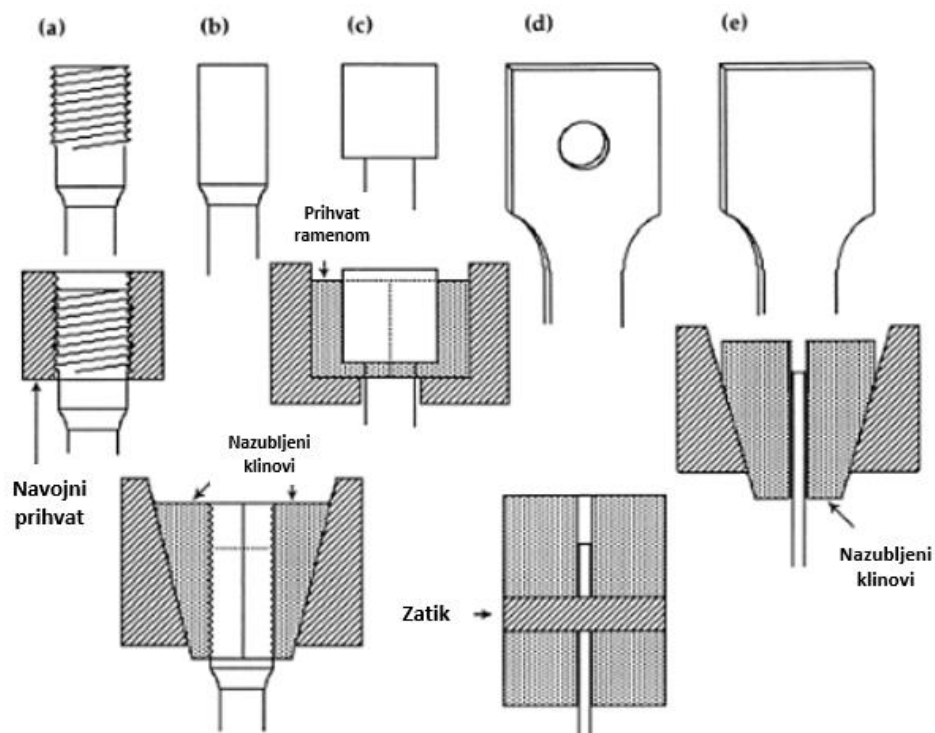
Ovisno o obliku poluproizvoda, statički vlačni pokus provodi se na ispitnim uzorcima koji se nazivaju epruvete. Epruvete su najčešće okruglog i pravokutnog poprečnog presjeka, ali mogu biti i nekih drugi oblika ovisno o obliku poluproizvoda i zahtjevima predmetne norme. Osim što se ovim ispitivanjem određuju mehanička svojstva koja karakteriziraju mehaničku otpornost materijala, utvrđuju se i neka svojstva koja opisuju deformabilnost materijala, pa dimenzije epruvete u uzdužnom smjeru moraju biti u određenim razmjerima s dimenzijama epruvete u poprečnom smjeru. [2] Općenit oblik i dimenzije epruvete predloženi su **slikom 12.**



Slika 12. Epruveta za vlačno ispitivanje [3]

Vrlo značajne dimenzije epruvete preko kojih se određuju vlačna svojstva su početna mjerna duljina i površina poprečnog presjeka epruvete. Kako bi se lokalizirali deformacija i lom na sredini epruvete, promjer, a time i površina poprečnog presjeka, manji su u odnosu na krajeve. Krajevi ili glave epruvete izvedeni su na način kako bi se osigurao odgovarajući prihvat u čeljusti kidalice. Postoje različite izvedbe glava i prihvata epruveta od kojih su neki ilustrirani na **slici 13.** [4]

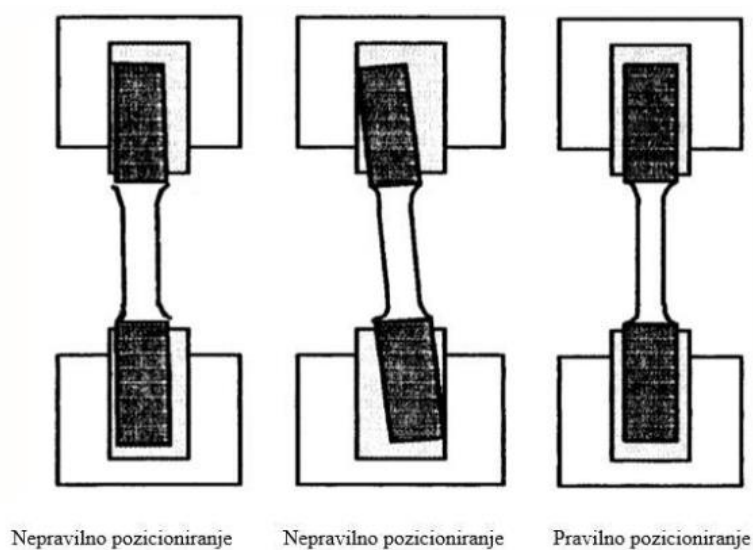
Ispitni komadi moraju se uhvatiti prikladnim napravama, kao što su klinovi, vijčane hvataljke, samozatezajuće konusne čeljusti ili rameni držači. Treba uložiti sve napore kako bi se osiguralo da se ispitni komadi učvrste na takav način koji osigurava aksijalno djelovanje sile i svodi savijanje na najmanju moguću mjeru. Ovo je od posebne važnosti pri ispitivanju lomljivih materijala ili pri određivanju granice razvlačenja (R_e), odnosno konvencionalne granice razvlačenja ($R_{p0,2}$). Kako bi se dobio ravan ispitni komad i osiguralo poravnanje ispitnog komada i držača, može se primijeniti preliminarna sila pod uvjetom da ne prelazi vrijednost koja odgovara 5 % specificirane ili očekivane granice razvlačenja. Treba izvršiti korekciju produžetka kako bi se uzeo u obzir učinak preliminarne sile. [5]



Slika 13. Izvedba glave epruvete: a) prihvat pomoću navoja, b) prihvat pomoću nazubljenih klinova, c) prihvat ramenom glavom, d) prihvat pomoću zatika i e) prihvat tankih epruveta pomoću nazubljenih klinova [4]

Pri odabiru metode prihvata ispitnog uzorka najbitnije je osigurati držanje uzorka pri maksimalnoj sili bez klizanja ili kvara na dijelu zahvata. Ako se epruvete loše montiraju ili uhvate čeljustima, može doći do njihova savijanja što nepovoljno utječe na rezultate ispitivanja.

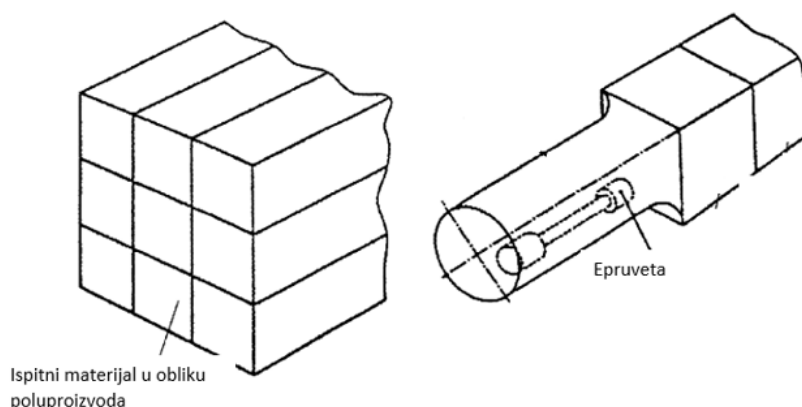
Slika 14. prikazuje usporedbu pravilnog i lošeg postavljanja epruveta. [4]



Slika 14. Pravilno i nepravilno postavljanje epruvete [4]

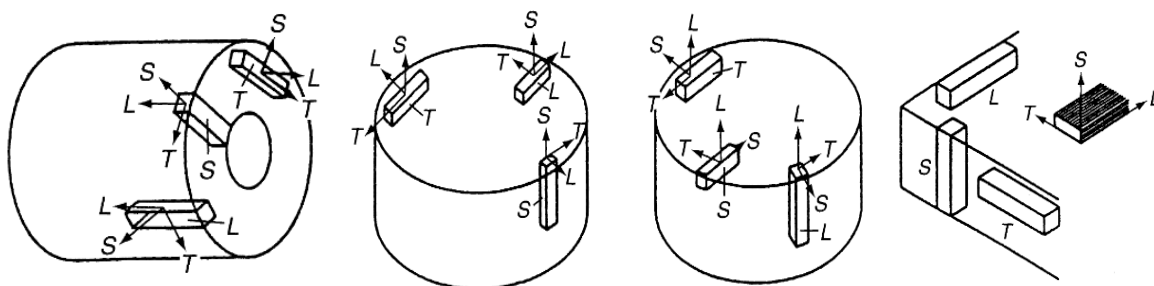
3.3.1. Odabir i priprema

Prije realizacije vlačnog ispitivanja potrebno je utvrditi je li materijal ispitnog uzorka prikladan za ispitivanje. Pri tome ispitne epruvete moraju objektivno predstavljati ispitni materijal u skladu sa zahtjevima, odnosno, epruvete moraju biti uzete iz dijela materijala koji se želi ispitati te moraju biti podvrgnute istim postupcima proizvodnje, odnosno obrade kao i sam materijal. Za izradu epruveta koristi se ispitni materijal u obliku poluproizvoda, a to mogu biti ploče, šipke, trake i slično, kao što je to prikazano **slikom 15**. [4] Oblik i dimenzije ispitnih uzoraka mogu biti ograničeni oblikom i dimenzijama metalnog proizvoda iz kojeg se uzimaju. Ispitni uzorak obično se dobiva strojnom obradom uzorka iz proizvoda, prešanog komada ili odljevka. Međutim, proizvodi jednolikog poprečnog presjeka (profili, šipke, žice itd.) i također lijevani ispitni komadi (željezni lijev) mogu se ispitivati bez strojne obrade. Poprečni presjek ispitnih komada može biti kružni, kvadratni, pravokutni, prstenasti ili u posebnim slučajevima neki drugi ujednačeni presjek. [5]



Slika 15. Izrada epruveta mehaničkom obradom iz poluproizvoda [4]

Uvijek se izrađuje određeni broj epruveta za provedbu ispitivanja koje najčešće varira između 3 i 5. Epruvete se moraju prema zahtjevima i smjernicama norme izraditi i pripremiti radi postignuća što boljih i pouzdanijih rezultata. Naime, nakon izrade ispitnih uzoraka potrebno je dodatno provesti provjeru i identifikaciju epruveta u pogledu opisa materijala, izvora, lokacije i orijentacije izrađenih uzoraka u odnosu na tijelo materijala, status obrade u vrijeme uzorkovanja te podatke o vremenu kada je uzorak uzet. Orijentacija i položaj odabranog materijala za izradu ispitnih uzoraka prikazan je na **slici 16**. Također, važno je da os uzorka bude paralelna sa smjerom valjanja poluproizvoda, usmjerenošću zrna nakon kovanja, itd.[4,5] Svi detalji i ostala pravila izrade epruveta određeni su normom HRN EN ISO 6892-1.



Slika 16. Lokacije i orijentacije ispitnih komada na različitim poluproizvodima [4]

3.3.2. Dimenzije i zahtjevi definirani normom HRN EN ISO 6892-1

Kao što je već napomenuto, poprečni presjek ispitnih uzoraka može biti kružni, kvadratni, pravokutni, prstenasti ili, u posebnim slučajevima, neki drugi ujednačeni presjek. Prema normi, kao generalno pravilo za epruvete kružnog presjeka vrijedi odnos između početne mjerne duljine L_0 i početne površine poprečnog presjeka S_0 opisan jednadžbom (3):

$$L_0 = k \cdot \sqrt{S_0}, \text{ mm} \quad (3)$$

gdje je k koeficijent proporcionalnosti. Općenito je prihvaćena vrijednost za proporcionalno kratku epruvetu $k = 5,65$, dok je za proporcionalno dugu epruvetu $k = 11,3$, pa vrijede jednadžbe (4) i (5):

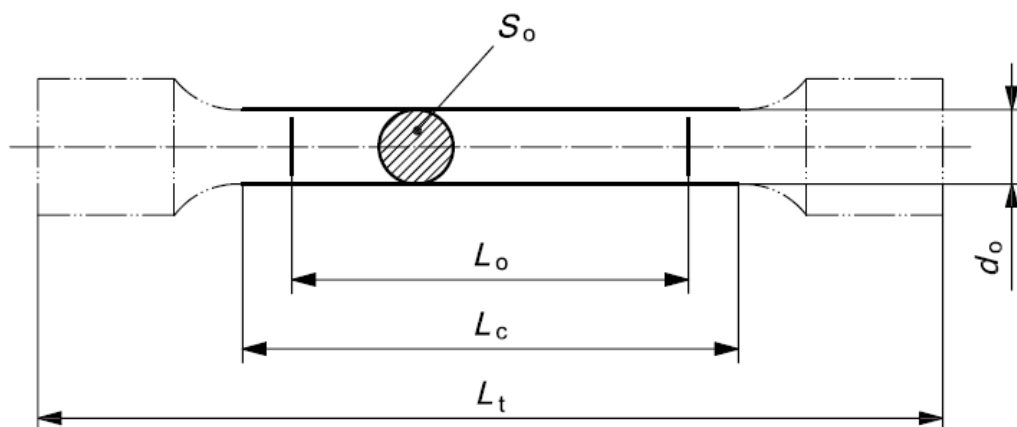
$$L_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0}, \text{ mm} \quad (4)$$

$$L_0 = 11,3 \cdot \sqrt{S_0}, \text{ mm} \quad (5)$$

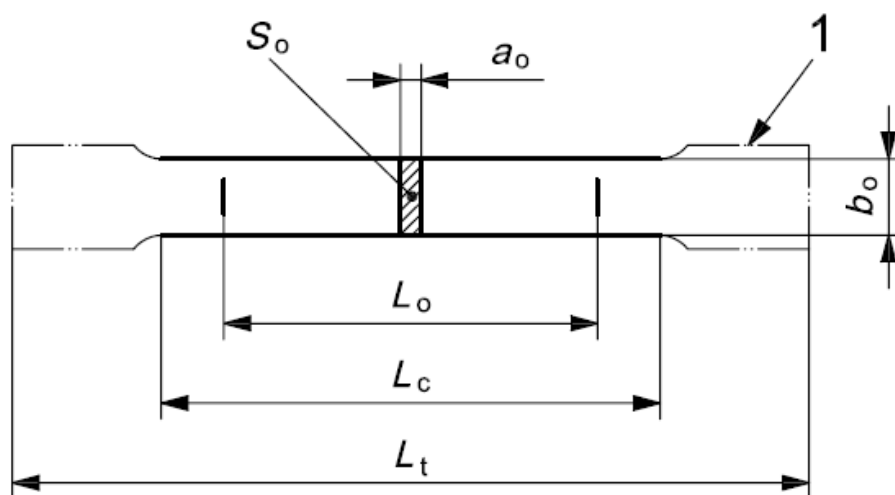
gdje u slučaju epruvete okruglog poprečnog presjeka, početnu površinu S_0 računamo prema jednadžbi (6):

$$S_0 = \frac{d_0^2 \cdot \pi}{4}, \text{ mm}^2 \quad (6)$$

gdje je d_0 početni promjer epruvete, a u slučaju epruvete pravokutnog poprečnog presjeka, površina se računa kao umnožak debljine i širine epruvete (a_0 i b_0). Na slikama 17. i 18. prikazane su epruvete s karakterističnim dimenzijama propisanih normom HRN EN ISO 6892-1, a u tablici 3. dani su primjeri dimenzija epruveta. [5]



Slika 17. Epruveta kružnog poprečnog presjeka [5]



Slika 18. Epruveta pravokutnog poprečnog presjeka [5]

L_0 – početna mjerna duljina,

L_c – duljina tijela epruvete,

L_t – ukupna duljina epruvete,

S_0 – površina početnog poprečnog presjeka epruvete,

d_0 – početni promjer epruvete okruglog poprečnog presjeka,

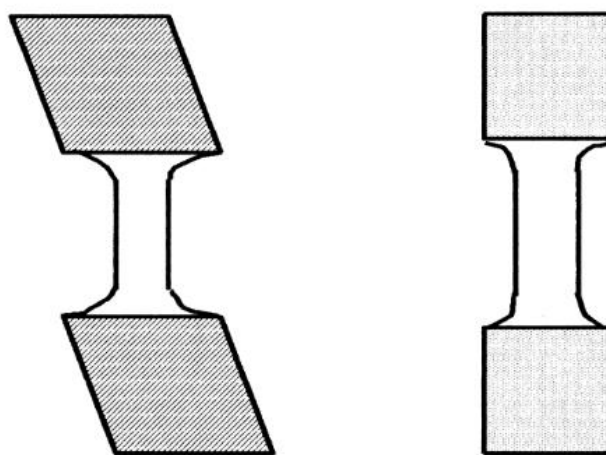
a_0 – početna debljina epruvete pravokutnog poprečnog presjeka,

b_0 – početna širina epruvete pravokutnog poprečnog presjeka.

Tablica 3. Dimenzije ispitnih uzoraka [5]

| Koeficijent proporcionalnosti k | Promjer d , mm | Početna mjerna duljina $L_0 = k \cdot \sqrt{S_0}$, mm | Minimalna duljina tijela epruvete L_c , mm |
|-----------------------------------|------------------|--|--|
| 5,56 | 20 | 100 | 110 |
| | 14 | 70 | 77 |
| | 10 | 50 | 55 |
| | 5 | 25 | 28 |

Dimenzije ostalih vrsta ispitnih uzoraka navedeni su u dodacima norme HRN EN ISO 6892-1 (B-E). Strojno obrađeni ispitni uzorci moraju uključivati prijelazni radijus između prihvatnih glava i tijela epruvete. Dimenzije prijelaznog radijusa su važne radi koncentracija napreznja i preporučuje se da budu definirane u specifikaciji materijala. Prihvatne glave mogu biti takvog oblika da odgovaraju prihvatnim elementima uređaja za ispitivanje. Os ispitnog uzoraka mora se podudarati s osi primjene sile, kao što je predloženo **slikom 19**. Duljina tijela epruvete, L_c , ili slobodna duljina kada nema prijelaznog radijusa, uvijek mora biti veća od početne mjerne duljine, L_0 . [5]



Slika 19. Nepravilno i pravilno izvedena epruveta [4]

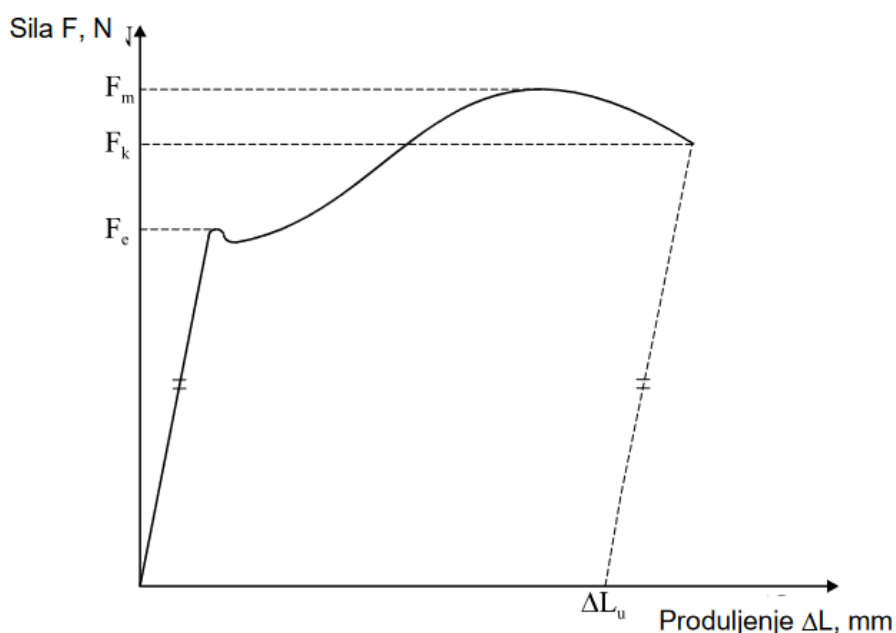
3.3.3. Označavanje početne mjerne duljine

Svaki kraj početne mjerne duljine, L_0 , mora biti označen finim oznakama ili iscrtanim linijama, ali ne zarezima koji bi mogli dovesti do preuranjenog loma. Za proporcionalne ispitne komade, izračunata vrijednost početne mjerne duljine može se zaokružiti na najbliži višekratnik od 5 mm, pod uvjetom da je razlika između izračunate i označene mjerne duljine manja od 10 % L_0 . Početna mjerna duljina označava se s točnošću od ± 1 %.

Ako je duljina tijela epruvete, L_c , znatno veća od početne mjerne duljine, kao na primjer kod neobrađenih ispitnih komada, može se označiti niz preklapajućih mjernih duljina. U nekim slučajevima može biti od pomoći nacrtati na površini ispitnog komada liniju paralelnu s uzdužnom osi, duž koje su označene mjerne duljine. [5]

3.4. Odgovor materijala na vlačno ispitivanje

Izvedbom statičkog vlačnog pokusa dobivaju se podaci u obliku krivulje „sila – produljenje“ pomoću koje se određuju mehanička svojstva. Za vrijeme ispitivanja očitavaju se iznosi sile u N ili kN iskazani na skali kidalice. Kako se radi o jednoosnoj primjeni vlačne sile pri kojoj se ispitno tijelo deformira, doći će do produljenja epruvete i smanjenja poprečnog presjeka. Na pisacu kidalice, odnosno na računaru, crta se $F - \Delta L$ dijagram. Jedan od takvih dijagrama za meki konstrukcijski niskouglični čelik prikazan je **slikom 20**. [2]

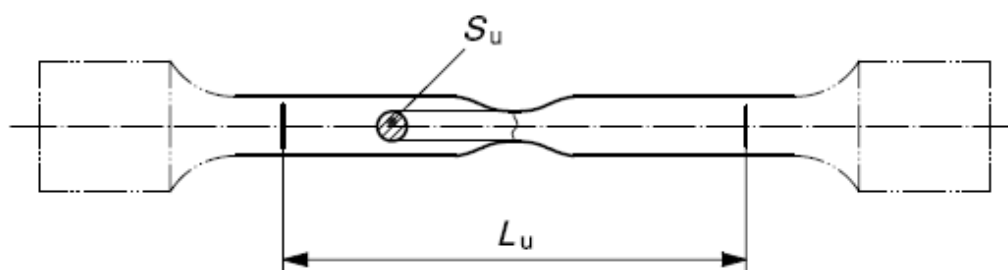


Slika 20. Dijagram $F - \Delta L$ za meki konstrukcijski čelik [3]

Od početka djelovanja vlačne sile pa sve do vrijednosti sile F_e odnosno sile razvlačenja ili tečenja, ovisnost između sile i produljenja je linearna. Nakon dostizanja sile razvlačenja epruveta se nastavlja produljivati iako odmah slijedi mali pad sile. Međutim, kako bi se ispitno tijelo i dalje rastezalo sila počinje opet rasti, ali u tom dijelu više ne postoji linearna ovisnost između prirasta sile i produljenja.

Iznosi sile umjereno rastu dok se iznosi istezanja drastično povećavaju. Rast sile završava dostizanjem maksimalne sile F_m , kada se iznosi sile počinju smanjivati uslijed intenzivnog lokaliziranog smanjenja površine poprečnog presjeka epruvete dok produljenje raste. U konačnici, nedugo nakon postizanja maksimalne sile i sve većeg produljenja dolazi do loma ispitnog komada pri konačnoj sili F_k .

Sastavljanjem puknutih dijelova epruvete u položaj prije loma te mjerenjem razmaka između točaka koje su označavale početnu duljinu L_0 dobiva se iznos konačne mjerne duljine L_u , **slika 21.** [2]



Slika 21. Sastavljena epruveta nakon loma [5]

Prema tome, produljenje se nakon kidanja izražava preko početne mjerne duljine i konačne duljine nakon loma pa vrijedi izraz (7):

$$\Delta L_u = L_u - L_0, \text{ mm} \quad (7)$$

Taj iznos produljenja ujedno je naznačen na apscisi dijagrama na **slici 20.**, a može se utvrditi na način da se iz konačne točke kidanja povuče paralelna linija s linearnim dijelom dijagrama i nađe presjecište s apscisom. [2]

Ako se ne uzme u obzir površina poprečnog presjeka epruvete, iznosi sile ne mogu dati pravi uvid u mehaničku otpornost materijala pri statičkom vlačnom ispitivanju, odnosno potrebno je umjesto sile F uvesti naprezanje σ , koje se određuje izrazom (8):

$$\sigma = \frac{F}{S_0}; \text{ N/mm}^2 \quad (8)$$

gdje je:

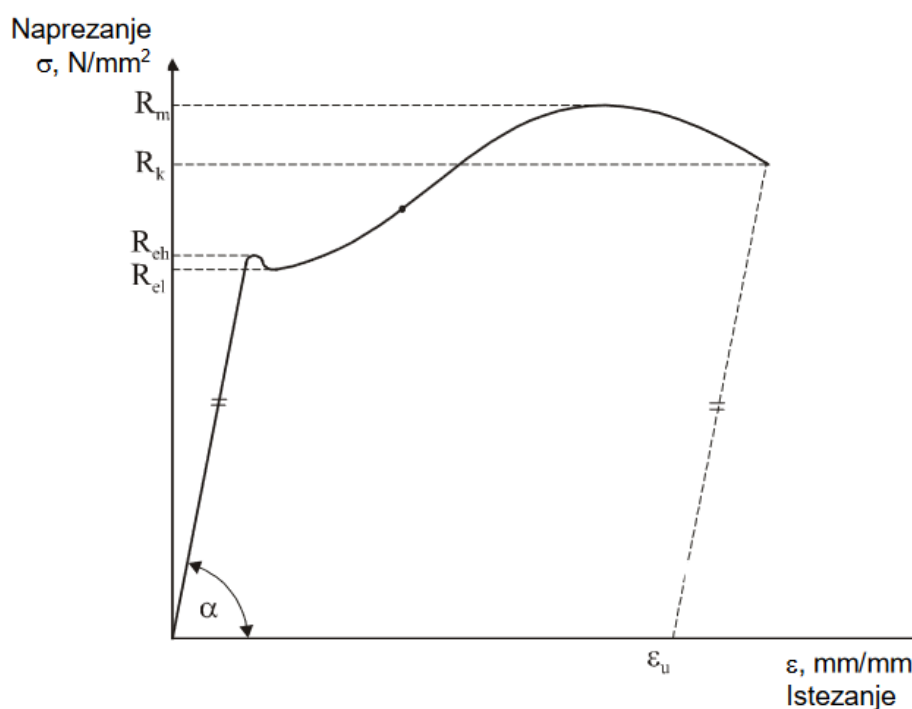
F – sila izražena u N,

S_0 – površina početnog poprečnog presjeka epruvete u mm^2 .

Ako se produljenje ΔL podijeli s početnom mjernom duljinom L_0 dobije se izraz (9) za relativno produljenje, odnosno istezanje ε :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} ; \text{mm/mm} \quad (9)$$

Upravo se takvim preračunavanjem sile i produljenja dobiva „konvencionalni“ ili „inženjerski“ dijagram naprezanje – istezanje, odnosno $\sigma - \varepsilon$ dijagram. [2] Primjer konvencionalnog $\sigma - \varepsilon$ dijagrama za meki konstrukcijski čelik u normaliziranom stanju vidljiv je na **slici 22**.



Slika 22. Dijagram $\sigma - \varepsilon$ za meki konstrukcijski čelik u normaliziranom stanju [3]

Dijagram počinje iz ishodišta Hookeovim pravcem za koji vrijedi Hookeov zakon (10):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \text{N/mm}^2 \quad (10)$$

Iz gornje jednadžbe slijedi da ako je modul elastičnosti E (Youngov modul) veći, za isto istezanje ε potrebno je veće naprezanje σ , pa je nagib Hookeovog pravca strmiji, a kut između pravca i osi apscisa veći. Kao što je spomenuto u 2. poglavlju, modul elastičnosti je mjera krutosti materijala, odnosno čvrstoće veza između strukturnih jedinica (atoma). Naprezanja koja djeluju u području Hookeovog zakona izazivaju elastičnu deformaciju koja nestaje nakon rasterećenja materijala.

Ako promatramo ispitni uzorak pri vlačnom pokusu, onda bi to značilo da se kod uzoraka koji se još uvijek nalaze u području elastičnih deformacija ne bi očitao produljenje nakon rasterećenja. Hookeov pravac završava u točki gdje je iznos naprežanja jednak *granici razvlačenja* R_e , a to je ono naprežanje nakon kojeg se čelična epruveta produljuje bez povećanja naprežanja i gdje počinje područje plastičnih deformacija. Granica razvlačenja R_e izražava se sljedećom jednadžbom [2]:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} ; \text{N/mm}^2 \quad (11)$$

gdje je:

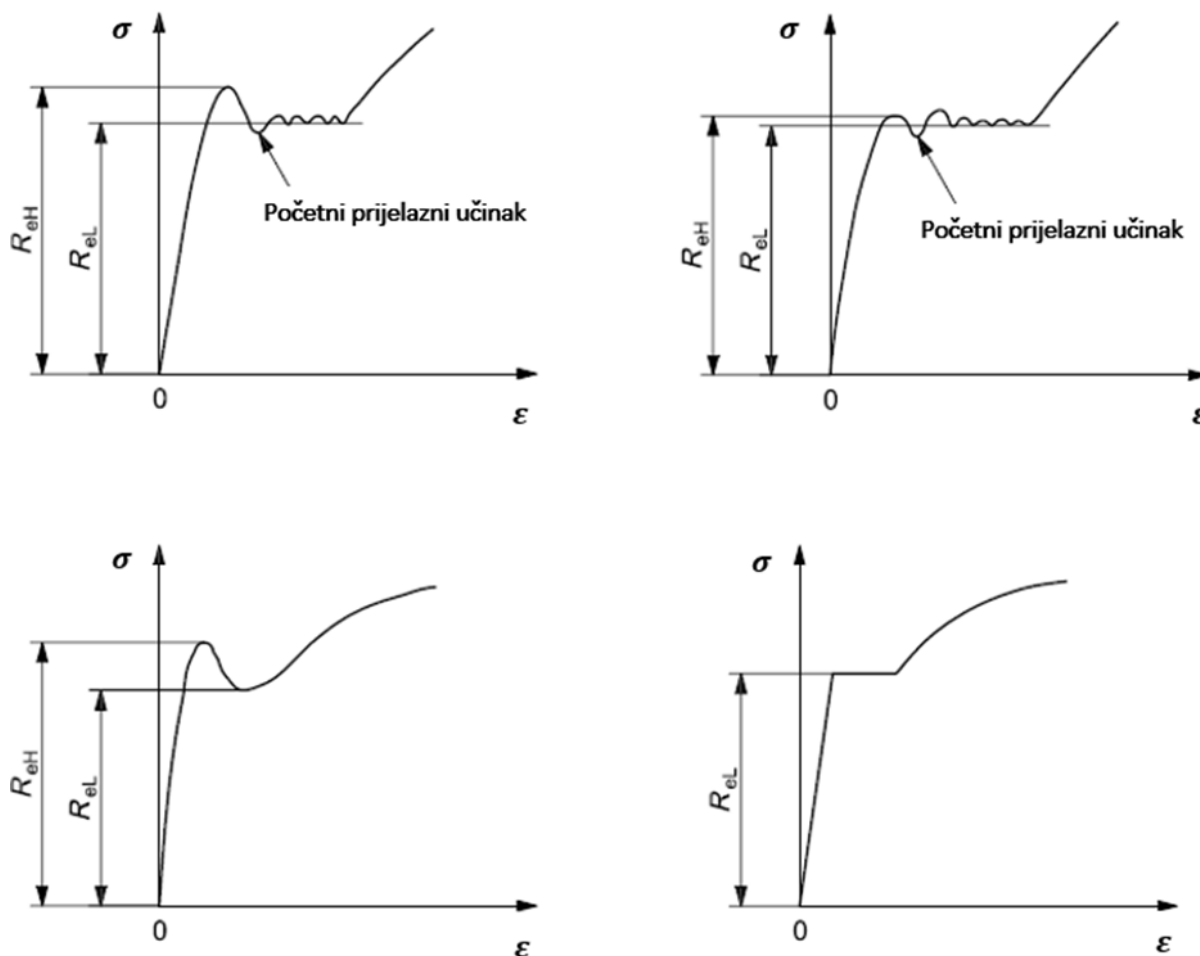
F_e – sila tečenja; N

S_0 – početna površina poprečnog presjeka; mm².

Granicu razvlačenja određuju dvije vrijednosti (slika 22.):

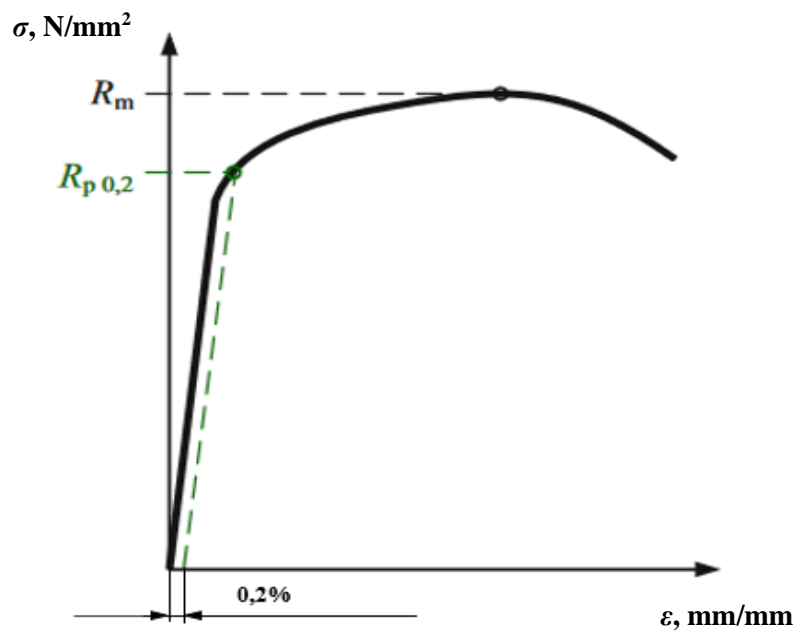
- R_{eh} – gornja granica razvlačenja ili najveća vrijednost naprežanja prije prvog smanjenja sile i
- R_{el} – donja granica razvlačenja, najniža vrijednost naprežanja u području plastičnih deformacija, zanemarujući početne prijelazne učinke.

Prema normi HRN EN ISO 6892-1 može se pojaviti nekoliko različitih oblika krivulja s izraženom gornjom i donjom granicom tečenja. Materijali čiji je prijelaz obilježen gornjom i donjom granicom razvlačenja imaju diskontinuiran prijelaz iz elastičnog u plastično područje deformacije kao što je to prikazano **slikom 23**. [5]

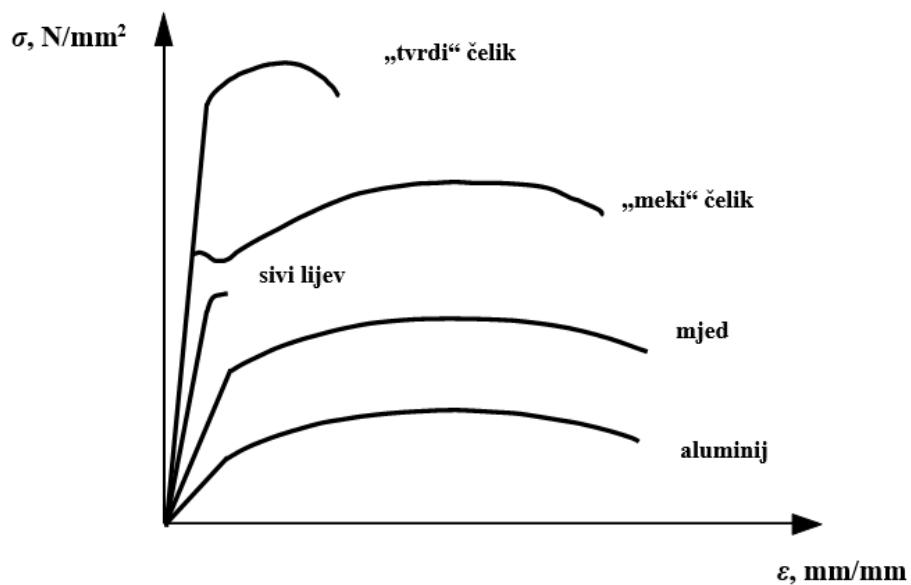


Slika 23. Primjeri gornje i donje granice tečenja [5]

Granica razvlačenja je takvo naprezanje prema kojem se utvrđuje dopušteno naprezanje pri radu strojnih dijelova i dijelova uređaja uzimajući u obzir određeni stupanj sigurnosti. Naprezanja koja su po iznosu veća od granice razvlačenja izazivaju osim elastične i plastičnu ili trajnu deformaciju epruvete. [2] S druge strane, postoje materijali koji imaju kontinuirani prijelaz iz elastičnog u plastično područje deformacije te se kod njih ne može odrediti granica razvlačenja. Kod takvih materijala se utvrđuje *konvencionalna (dogovorena) granica razvlačenja*, $R_{p0,2}$, **slika 24**. To je naprezanje, koje će za razliku od granice razvlačenja R_e , u materijalu ostaviti udio plastične deformacije u iznosu od 0,2%. [2,5] Na **slici 25**. kvalitativnim dijagramima dan je prikaz ponašanja nekoliko različitih materijala pri statičkom vlačnom ispitivanju.



Slika 24. Konvencionalna granica razvlačenja za plastičnu deformaciju od 0,2% [7]



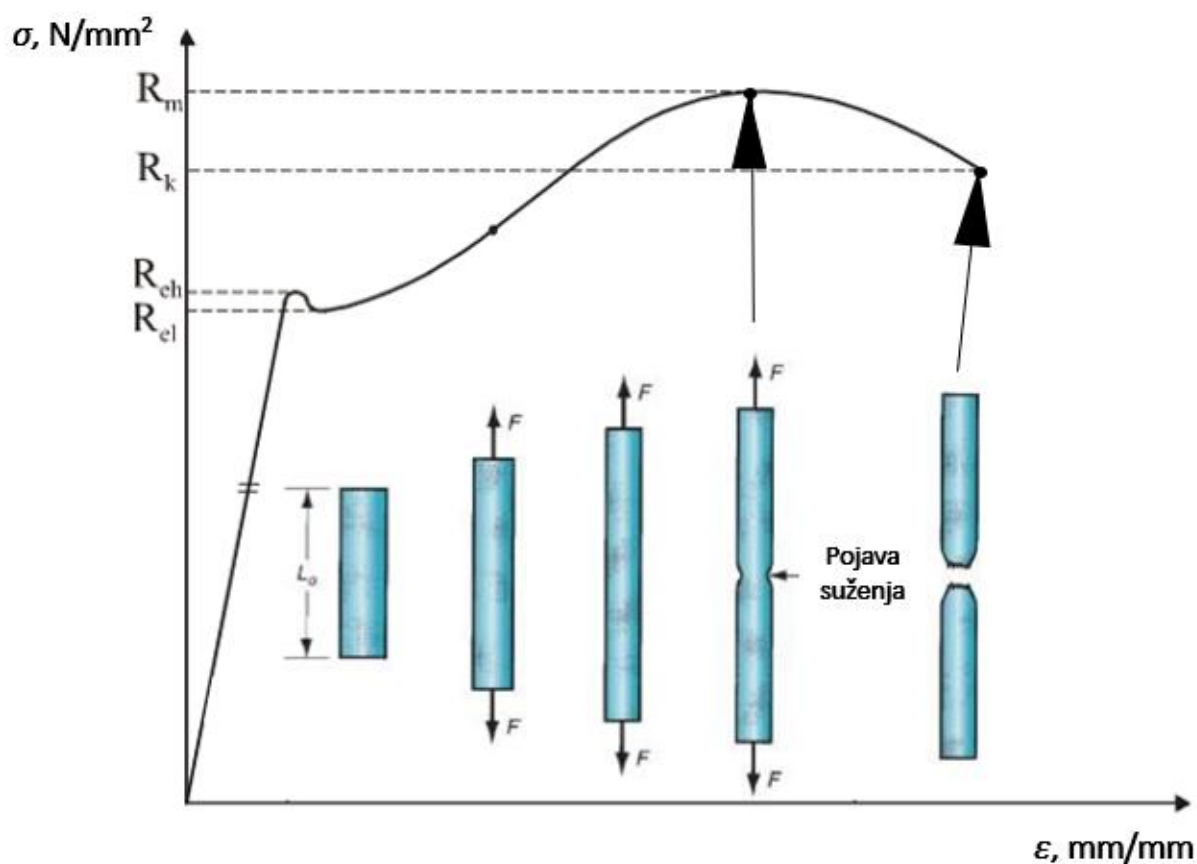
Slika 25. Kvalitativni $\sigma - \epsilon$ dijagrami za neke metalne materijale [2]

Naprezanje koje se javlja pri maksimalnoj sili naziva se *vlačna ili rastezna čvrstoća*, R_m , i računa se iz omjera maksimalne sile i površine početnog poprečnog presjeka:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}; \text{N/mm}^2 \quad (12)$$

Ovo naprezanje, odnosno vlačnu čvrstoću, bilo bi pogrešno nazvati maksimalnim naprežanjem već samo naprežanje pri maksimalnoj sili iz razloga što se površina poprečnog presjeka epruvete od trenutka postizanja maksimalne sile počinje naglo smanjivati pa je stvarno naprežanje unatoč smanjenju sile puno veće nego vlačna čvrstoća.

S druge strane, vlačna čvrstoća je osnovno mehaničko svojstvo na temelju kojeg se materijali vrednuju prema njihovoj mehaničkoj otpornosti. Deformacija epruvete nije više jednolika po čitavom ispitnom dijelu epruvete nakon dostignuća naprežanja R_m , već se lokalizira na jednom mjestu kao što je prikazano **slikom 26.** [2]



Slika 26. Različiti stadiji epruvete prilikom statičkog vlačnog ispitivanja [2, 6]

Ubrzo nakon dostizanja vlačne čvrstoće dolazi do loma epruvete, a naprežanje koje se javlja u trenutku loma ispitnog komada naziva se *konačno naprežanje*, R_k , za koje vrijedi:

$$R_k = \frac{F_k}{S_0} ; \text{N/mm}^2 \quad (13)$$

gdje je F_k konačna sila, a S_0 početna površina poprečnog presjeka. Također, uz navedene parametre statičkim vlačnim pokusom utvrđuje se i *konačno relativno produljenje (konačno istezanje)* materijala, ϵ_u , pomoću izraza:

$$\varepsilon_u = \frac{\Delta L_u}{L_0} ; \text{mm/mm} \quad (14)$$

gdje je ΔL_u produljenje nakon kidanja, a L_0 početna mjerna duljina epruvete.

Ako se ono izrazi u postocima, dolazi se do veličine poznate kao istezljivost A :

$$A = \varepsilon_u \cdot 100, \% \quad (15)$$

Pokraj simbola A uobičajeno se ne navodi dodatna oznaka ako je istezljivost utvrđena na proporcionalnoj kratkoj epruveti ($L_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0}$) dok s druge strane, kad je istezljivost utvrđena na proporcionalno dugoj epruveti ($L_0 = 11,3 \cdot \sqrt{S_0}$) bilježi se indeks 11,3 ($A_{11,3}$). Veličina istezljivosti za proporcionalno kratku epruvetu uvijek će biti veća od istezljivosti $A_{11,3}$ za isti materijal iz razloga što je kod kraćih epruveta nejednolična deformacija u blizini mjesta loma u odnosu na jednolično produljenje, jače zastupljena nego kod dulje epruvete. Na temelju iznosa istezljivosti materijali se međusobno uspoređuju s obzirom na deformabilnost, no u ovom slučaju istezljivost govori samo o deformabilnosti materijala u uzdužnom smjeru epruvete. [2,3]

S obzirom da se epruveta uslijed statičkog vlačnog ispitivanja produljuje i sužava (volumen je nepromijenjen), veličina koja utvrđuje deformabilnost materijala u smjeru poprečnom od djelovanja opterećenja naziva se *kontrakcijom*, Z . Ova veličina određuje relativno suženje površine poprečnog presjeka u odnosu na površinu početnog poprečnog presjeka:

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100, \% \quad (16)$$

gdje je S_0 površina početnog poprečnog presjeka, a S_u površina poprečnog presjeka na mjestu loma epruvete. Kontrakcija Z i istezljivosti A su mehanička svojstva koja se ponajprije koriste za specificiranje materijala pri obradi deformiranjem.

Do sada je bio razmatran *inženjerski*, odnosno *konvencionalni* dijagram naprezanje-istezanje koji kvalitativno odgovara dijagramu sila-produljenje, no međutim, to nije „stvarni“ dijagram ovisnosti između naprezanja i istezanja. Razlog tomu je što se iznosi naprezanja računaju pomoću izraza (8) dijeljenjem sile s površinom početnog poprečnog presjeka, što je ispravno samo u području elastičnih deformacija gdje se unatoč produljenju epruveta ne sužuje. Prema tome, za stvarno naprezanje vrijedi izraz:

$$\sigma_s = \frac{F}{S}; \text{N/mm}^2 \quad (17)$$

gdje je S stvarna površina poprečnog presjeka epruvete u određenom trenutku ispitivanja.

Površina poprečnog presjeka se smanjuje u području plastičnih deformacija pa je stvarno naprezanje σ_s veće od inženjerskog naprezanja σ . Ta razlika se najviše očituje nakon dostizanja maksimalne sile F_m odnosno vlačne čvrstoće R_m zbog lokalizirane deformacije epruvete. U inženjerskom dijagramu istezanje ε se utvrđuje izrazom (9) gdje se produljenje ΔL dijeli s početnom mjernom duljinom L_0 .

Ako se razmotri da je relativno produljenje promjena duljine podijeljena s trenutačnom duljinom, onda se stvarno istezanje ε_s utvrđuje izrazom koji predstavlja sumu produljenje ΔL u pojedinim trenucima ispitivanja, podijeljen s mjernom duljinom epruvete u trenutku neposredno prije toga:

$$\varepsilon_s = \frac{L_1 - L_0}{L_0} + \frac{L_2 - L_1}{L_1} + \frac{L_3 - L_2}{L_2} + \dots + \frac{L_n - L_{n-1}}{L_{n-1}}; \text{mm/mm} \quad (18)$$

$$\varepsilon_s = \ln \frac{L}{L_0}; \text{mm/mm} \quad (19)$$

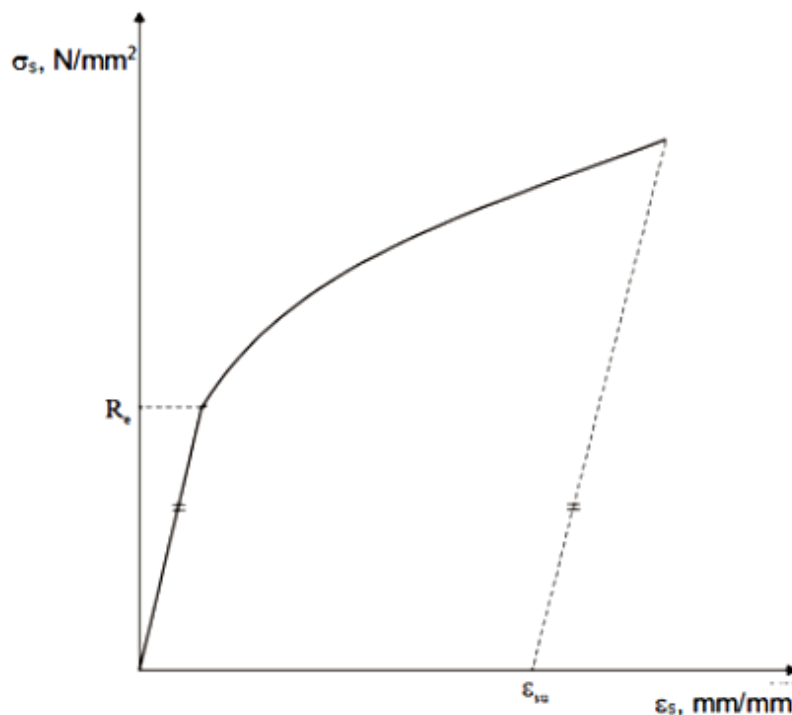
Nakon početka plastične deformacije epruvete, iz nepromijenjenosti volumena slijede izrazi:

$$S_0 \cdot L_0 = S \cdot L \quad (20)$$

$$\frac{L}{L_0} = \frac{S_0}{S} = \frac{\frac{d_0^2 \cdot \pi}{4}}{\frac{d^2 \cdot \pi}{4}} = \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 \quad (21)$$

$$\varepsilon_s = \ln \frac{L}{L_0} = 2 \ln \frac{d_0}{d}; \text{mm/mm} \quad (22)$$

Vrlo je važno izraz za stvarno istezanje primjenjivati u navedenom obliku nakon dostignute maksimalne sile jer se nakon toga epruveta ne produljuje po cijeloj mjernoj duljini jednako, već se deformacija koncentrira na jednom mjestu. Na **slici 27.** prikazan je kvalitativni stvarni dijagram naprezanje – istezanje za meki konstrukcijski čelik.



Slika 27. Kvalitativni stvarni dijagram naprezanje-istezanje za meki konstrukcijski čelik [2]

Za elastično područje dijagrama ($\sigma_s < R_e$), gdje vrijedi Hookeov zakon, iznos za stvarno naprezanje glasi:

$$\sigma_s = E \cdot \varepsilon_s; \text{ N/mm}^2 \quad (23)$$

S druge strane, u plastičnom području je drugačiji izraz:

$$\sigma_s = R_e + k \cdot \varepsilon_s^n; \text{ N/mm}^2 \quad (24)$$

gdje je:

k – konstanta materijala, N/mm^2

n – koeficijent očvrnuća čiji se iznos za metalne materijale kreće od 0,25 do 0,5.

Usporedbom konvencionalnog i stvarnog dijagrama može se zaključiti da konvencionalni dijagram daje dostatne podatke za konstrukcijske svrhe pošto se elementi strojeva i uređaja u eksploataciji ne opterećuju izvan elastičnog područja deformacija u kojem su oba dijagrama identična. No ako je cilj proučavanja ponašanja materijala pri obradi deformiranjem, dostatni podaci biti će dani stvarnim dijagramom $\sigma - \varepsilon$. Također, stvarni dijagram pokazuje zašto vlačna čvrstoća nije maksimalno naprezanje već samo naprezanje pri maksimalnoj sili. [2]

3.5. Uvjeti, način i metode ispitivanja prema normi HRN EN ISO 6892-1

3.5.1. Nuliranje vrijednosti sile

Sustav za mjerenje sile postavlja se na nulu nakon postavljanja opreme za vršenje ispitnog opterećenja, ali prije nego što se ispitni komad stvarno uhvati u čeljusti na oba kraja. Nakon što je postavljena nulta točka sile, sustav za mjerenje sile ne smije se ni na koji način mijenjati tijekom ispitivanja. Korištenje ove metode osigurava da se s jedne strane težina sustava za stezanje kompenzira u mjerenju sile, a s druge strane bilo koja sila koja proizlazi iz operacije stezanja ne utječe na ovo mjerenje.

3.5.2. Metoda A – ispitivanje na temelju kontrole brzine prirasta deformacije

Metoda A ima za cilj minimizirati varijacije brzina ispitivanja tijekom određivanja parametara osjetljivih na brzinu prirasta deformacije i minimizirati mjernu nesigurnost rezultata ispitivanja. U ovom odjeljku opisane su dvije različite vrste kontrole brzine prirasta deformacije:

- Prva je kontrola brzine prirasta deformacije, $\dot{\epsilon}_{L_e}$, koja se temelji na povratnoj informaciji dobivenoj od ekstenzometra.
- Druga je kontrola procijenjene brzine deformacije preko duljine tijela epruvete, $\dot{\epsilon}_{L_c}$, koja se postiže kontrolom brzine odvajanja traverze kidalice pri brzini jednakoj brzini prirasta deformacije pomnoženoj s duljinom tijela epruvete pa vrijedi izraz:

$$v_c = L_c \cdot \dot{\epsilon}_{L_c}; \text{ m/s} \quad (25)$$

Ispitivanje s obzirom na brzinu prirasta deformacije mora zadovoljiti nekoliko sljedećih zahtjeva. U rasponu do i uključujući gornju granicu razvlačenja i konvencionalnu granicu razvlačenja (R_{eh} , $R_{p0,2}$) mora se primijeniti brzina prirasta deformacije, $\dot{\epsilon}_{L_e}$. U ovom rasponu, kako bi se eliminirao utjecaj elastičnih deformacija kidalice pri ispitivanju, potrebna je upotreba ekstenzometra pričvršćenog na ispitni uzorak kako bi se osigurala preciznija kontrola nad brzinom prirasta deformacije. Tijekom diskontinuiranog deformacijskog ponašanja materijala treba primijeniti procijenjenu brzinu prirasta deformacije preko duljine tijela epruvete, $\dot{\epsilon}_{L_c}$. U ovom rasponu nemoguće je kontrolirati brzinu prirasta deformacije pomoću ekstenzometra pričvršćenog na ispitni komad jer se lokalno „tečenje“ može dogoditi izvan mjerne duljine ekstenzometra.

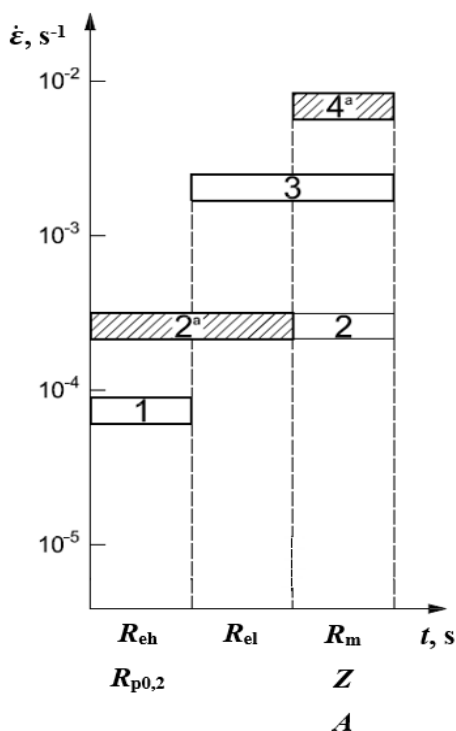
Zahtijevana procijenjena brzina prirasta deformacije $\dot{\epsilon}_{L_c}$ može se održavati u ovom rasponu dovoljno točno korištenjem konstantne brzine odvajanja traverze kidalice, v_c . U području deformacije nakon granice razvlačenja ili konvencionalne granice razvlačenja, svejedno je koristi li se $\dot{\epsilon}_{L_e}$ ili $\dot{\epsilon}_{L_c}$. Korištenje procijenjene brzine $\dot{\epsilon}_{L_c}$ preporučuje se kako bi se izbjegli bilo kakvi problemi s kontrolom brzine koji mogu nastati ako se suženje pojavi izvan mjerne duljine ekstenzometra.

3.5.2.1. Brzina prirasta deformacije pri određivanju R_{eh} ili $R_{p0,2}$

Brzina prirasta deformacije, $\dot{\epsilon}_{L_e}$, mora se održavati što je moguće konstantnijom od početka ispitivanja do i uključujući gornju granicu razvlačenja R_{eh} ili konvencionalnu granicu razvlačenja $R_{p0,2}$. Tijekom određivanja ovih svojstava, brzina prirasta deformacije mora biti u jednom od dva raspona (**vidi sliku 28.**):

- Raspon 1.: $\dot{\epsilon}_{L_e} = 0,0007 \text{ s}^{-1}$, s relativnom tolerancijom od 20%
- Raspon 2.: $\dot{\epsilon}_{L_e} = 0,00025 \text{ s}^{-1}$, s relativnom tolerancijom od 20%

Ako oprema ne dozvoljava kontroliranje navedene brzine prirasta deformacije preko ekstenzometra, mora se koristiti procijenjena brzina opisana jednačbom (25). [5]



Slika 28. Dijagram različitih raspona brzina prirasta deformacije, metoda A [5]

^a – preporučeno

3.5.2.2. Brzina prirasta deformacije pri određivanju donje granice razvlačenja R_{el}

Nakon određivanja gornje granice tečenja R_{eh} , procijenjena brzina prirasta deformacije, $\dot{\epsilon}_{Lc}$, mora se održavati u jednom od sljedeća dva navedena raspona dok ne završi diskontinuirani prijelaz iz elastičnog u plastično područje deformacija:

- Raspon 2.: $\dot{\epsilon}_{Lc} = 0,00025 \text{ s}^{-1}$, s relativnom tolerancijom od $\pm 20 \%$ (preporučeno)
- Raspon 3.: $\dot{\epsilon}_{Lc} = 0,002 \text{ s}^{-1}$, s relativnom tolerancijom od $\pm 20 \%$

3.5.2.3. Brzina prirasta deformacije pri određivanju vlačne čvrstoće R_m , istezljivosti A i kontrakcije Z

Nakon utvrđivanja gornje i donje granice razvlačenja ili konvencionalne granice razvlačenja (R_{el} , R_{eh} , $R_{p0,2}$), procijenjena brzina prirasta deformacije, $\dot{\epsilon}_{Lc}$, mora se održavati u jednom od navedenih raspona:

- Raspon 2.: $\dot{\epsilon}_{Lc} = 0,00025 \text{ s}^{-1}$, s relativnom tolerancijom od $\pm 20 \%$
- Raspon 3.: $\dot{\epsilon}_{Lc} = 0,002 \text{ s}^{-1}$, s relativnom tolerancijom od $\pm 20 \%$
- Raspon 4.: $\dot{\epsilon}_{Lc} = 0,0067 \text{ s}^{-1}$, s relativnom tolerancijom od $\pm 20 \%$ (preporučeno osim ako nije drugačije navedeno)

Ako je svrha ispitivanja samo određivanje vlačne čvrstoće, R_m , tada se procijenjena brzina prirasta deformacije, prema rasponu 3. ili 4., može primijeniti tijekom cijelog ispitivanja. [5]

3.5.3. Metoda B – ispitivanje na temelju kontrole brzine prirasta naprezanja

Brzine prirasta naprezanja moraju biti u skladu sa sljedećim zahtjevima, ovisno o prirodi materijala. Osim ako nije drugačije navedeno, može se koristiti bilo koja prikladna brzina prirasta naprezanja do iznosa naprezanja jednakog polovici granice razvlačenja, R_e . Brzine prirasta naprezanja iznad ove točke navedene su u nastavku. [5]

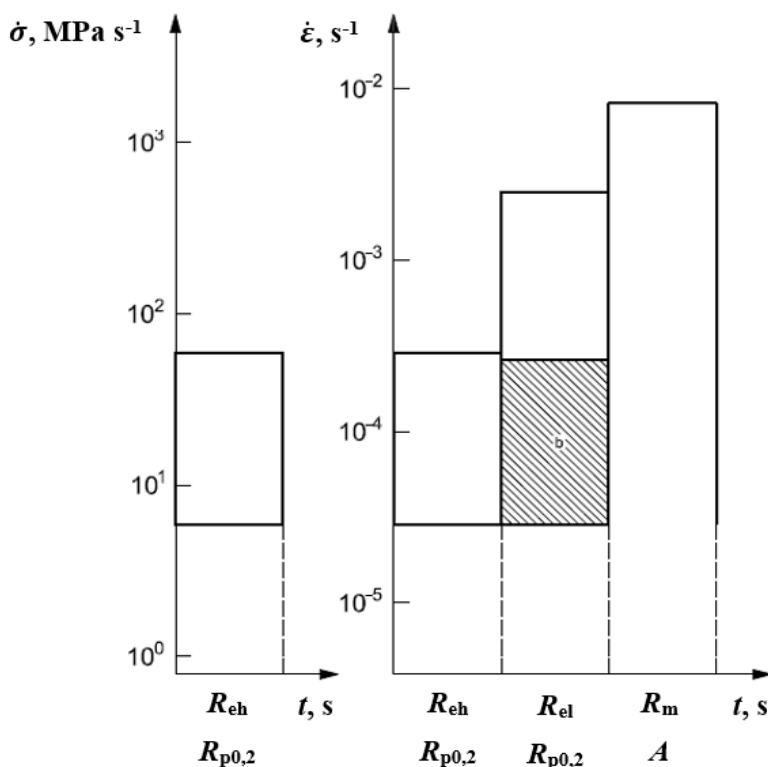
3.5.3.1. Određivanje gornje i donje granice razvlačenja, R_{eh} i R_{el}

Ako ispitna oprema nije u stanju mjeriti ili kontrolirati brzinu prirasta deformacije, brzina odvajanja traverzi kidalice mora se održavati što je moguće konstantnijom i unutar granica koje odgovaraju stopama naprezanja u **tablici 4.** [5]

Tablica 4. Rasponi brzina prirasta naprezanja s obzirom na modul elastičnosti materijala [5]

| Modul elastičnosti materijala E MPa | Brzina prirasta naprezanja $\dot{\sigma}$ MPa·s ⁻¹ | |
|---|---|------|
| | min. | max. |
| < 150 000 | 2 | 20 |
| ≥ 150 000 | 6 | 60 |

Ako se utvrđuje samo donja granica tečenja, procijenjena brzina prirasta deformacije ($\dot{\epsilon}_{Lc}$) mora biti između $0,00025 \text{ s}^{-1}$ i $0,0025 \text{ s}^{-1}$. Navedena brzina prirasta deformacije mora se održavati što je moguće konstantnijom. Ako se ova brzina prirasta deformacije ne može regulirati izravno, mora se fiksirati reguliranjem brzine prirasta naprezanja neposredno prije početka „tečenja“. Ni u kojem slučaju brzina prirasta naprezanja u elastičnom području ne smije premašiti najveće brzine navedene u **tablici 4**. Ako se tijekom istog ispitivanja određuju i gornja i donja granica razvlačenja, moraju se ispuniti uvjeti za određivanje donje granice razvlačenja. Usporedba zahtijevanih brzina prirasta naprezanja i brzina prirasta deformacija prikazana je **slikom 29**. [5]



Slika 29. Usporedni prikaz raspona brzina prirasta naprezanja i raspona brzina prirasta deformacije, metoda B [5]

b – dodatni raspon u slučaju da oprema ne može kontrolirati brzinu prirasta naprezanja

3.5.3.2. Određivanje konvencionalne granice razvlačenja $R_{p0,2}$

Brzina odvajanja traverze kidalice mora se održavati što je moguće konstantnijom i unutar granica koje odgovaraju brzinama prirasta naprezanja u **tablici 4.** unutar elastičnog područja. Unutar plastičnog područja i do konvencionalne granice razvlačenja $R_{p0,2}$, brzina prirasta deformacije ne smije prijeći $0,0025 \text{ s}^{-1}$.

3.5.3.3. Određivanje vlačne čvrstoće R_m , istezljivosti A i kontrakcije Z

Nakon utvrđivanja prethodnih svojstava, brzina prirasta deformacije može se povećati na brzinu (ili ekvivalentnu brzinu odvajanja traverzi) ne veću od $0,008 \text{ s}^{-1}$. Ako se mjeri samo vlačna čvrstoća materijala, tijekom cijelog ispitivanja može se koristiti jedna brzina prirasta deformacije koja ne smije premašiti $0,008 \text{ s}^{-1}$.

3.6. Izbor i označavanje metode ispitivanja

Osim ako nije drugačije dogovoreno, izbor metode (A ili B) i brzine ispitivanja su osobne odluke proizvođača ili ispitnog laboratorija kojeg je dodijelio proizvođač, pod uvjetom da ispunjavaju zahtjeve ovog dijela norme, HRN EN ISO 6892-1. Za izvješćivanje o načinu kontrole ispitivanja i brzinama ispitivanja u skraćenom obliku, može se koristiti sljedeći sustav kratica:

- HRN EN ISO 6892 Annn
- HRN EN ISO 6892 Bn

gdje slovo „A“ definira upotrebu metode A, a slovo „B“ upotrebu metode B. Simboli „nnn“ niz su od najviše tri znaka koji se odnose na brzine prirasta deformacije korištene tijekom svake faze ispitivanja, kao što je definirano na **slici 28.**, a za označavanje brzine prirasta naprezanja ($\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1}$ ili $\text{N}/\text{mm}^2\cdot\text{s}$) odabrane tijekom elastičnog opterećenja dodaje se „n“. Iz toga se mogu navesti različiti primjeri označavanja metoda i načina ispitivanja:

- Primjer 1.: HRN EN ISO 6892-1:2009 A224 - ispitivanje temeljeno na kontroli brzine deformacije, koristeći raspone 2, 2 i 4.
- Primjer 2.: HRN EN ISO 6892-1:2009 B30 - ispitivanje temeljeno na brzini prirasta naprezanja, koje se izvodi pri nazivnoj brzini prirasta naprezanja od $30 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$.
- Primjer 3.: HRN EN ISO 6892-1:2009 B - ispitivanje temeljeno na brzini prirasta naprezanja prema **tablici 4.** [5]

3.7. Preporuke za korištenje računalno upravljane kidalice prema HRN EN ISO 6892-1

Iz norme HRN EN ISO 6892-1 prema dodatku A, dane su preporuke za određivanje mehaničkih svojstava na računalno upravljanoj kidalici. Ove preporuke se posebno odnose na softver i način ispitivanja. Prema normi, računalno upravljana kidalica je uređaj kod kojeg se kontrola i praćenje ispitivanja, mjerenja i obrada podataka obavljaju pomoću računala. Kidalica treba biti izvedena i konstruirana na način da na izlazu daje analogne signale koji nisu softverski obrađeni. U slučaju da kidalica nije u mogućnosti dati potrebne analogne signale, proizvođač kidalice bi trebao osigurati neobrađene digitalne podatke s informacijama o tome kako su ti neobrađeni digitalni podaci dobiveni te kako ih je softver obradio. Te podatke treba dati u osnovnim jedinicama *SI sustava* koje se odnose na silu, istezanje, položaj traverze i dimenzije ispitnog uzorka. Primjer podataka koje kidalica treba dati nalaze se na **slici 50**.

```

A {
  "Reference";"ISO 6892"
  "Identification";"TENSTAND"
  "Material";"DC 04 Steel"
  "Extensometer to crosshead transition";"0.00;"%"
  "Specimen geometry";"flat"
  "Specimen thickness = ao"
  "Specimen width = bo"
  "Cross-sectional area = So"
  "Extensometer gauge length = Le"
  "Extensometer output in mm"
  "Parallel length = Lc"
  "Data acquisition rate 50Hz"
  "Data row for start force reduction (Hysteresis) = Hs"
  "Data row for end force reduction (Hysteresis) = He"
  "Data row for switch to crosshead = Cs"
  "File length N data rows"
  "File width M data columns"
  .
  .
B {
  "ao";"0.711;"mm"
  "bo";"19.93;"mm"
  "So";"14.17;"mm2"
  "Le";"80.00;"mm"
  "Lc";"120.00;"mm"
  "N";"2912"
  "M";"4"
  "Hs";"0"
  "He";"0"
  "Cs";"0"
  .
  .
C {
  "time";"crosshead";"extensometer";"force"
  "s";"mm";"mm";"kN"
  .
  .
  0.40;0.0012;0.0000;0.12694
  0.42;0.0016;0.0000;0.12992
  0.44;0.0020;0.0001;0.13334
  0.46;0.0024;0.0002;0.13699
  0.48;0.0029;0.0003;0.14114
  0.50;0.0035;0.0004;0.14620
  0.52;0.0041;0.0006;0.15124
  0.54;0.0047;0.0007;0.15669
  0.56;0.0054;0.0008;0.16247
  0.58;0.0060;0.0009;0.16794
  0.60;0.0067;0.0012;0.17370
  0.62;0.0074;0.0013;0.17980
  0.64;0.0082;0.0014;0.18628
  .
  .

```

Slika 30. Primjer podataka za računalno upravljanoj kidalici [5]

A – zaglavlje,

B – parametri ispitivanja i dimenzije uzorka,

C – potrebni podaci kidalice.

3.7.1. *Frekvencija uzorkovanja podataka*

Frekvencija uzorkovanja podataka je pojam koji se odnosi na brzinu prikupljanja podataka u jedinici vremena. Kada se radi o kvantitativnim eksperimentima odnosno ispitivanjima, podaci koji se prikupljaju su fizikalne veličine koje se mogu izmjeriti kao što su npr.: duljina, sila, masa, napon i slično. U slučaju statičkog vlačnog ispitivanja podaci koji se prikupljaju su: sila, produljenje, vrijeme, brzina prirasta naprezanja ili istežanja i pozicija traverze kidalice. Općenito, prikupljanje podataka pri svakom ispitivanju se ostvaruje pomoću uređaja kao što su senzori, aktuatori, mjerni instrumenti i ostala mjerna oprema. Međutim, osim senzora i drugih mjernih uređaja, potrebna je i računalna oprema pomoću koje će se generirati i analizirati prikupljeni podaci. Kako signali iz stvarnog svijeta nisu kompatibilni s binarnim formatima signala koje koristi mikroračunalo, potrebno je vršiti prilagodbe i pretvorbe signala stvarnog svijeta u binarne, odnosno digitalne signale.

Pretvorba, odnosno prilagodba signala se ostvaruje pomoću uređaja kao što su pojačala signala, analogno/digitalni pretvarači signala i slično.

Stoga sustav za prikupljanje podataka čini skup navedenih hardverskih i softverskih komponenti koje omogućuju računalu primanje informacija iz stvarnog svijeta od senzora. Dok nije bila razvijena računalna oprema za prikupljanje podataka kakvu danas poznajemo, prikupljanje se provodilo ručno bilježenjem očitavanja različitih mjernih instrumenata u određeno vrijeme. Tradicionalni instrumenti i uređaji zahtijevali su puno vremena i specifične vještine za podešavanje mjernog raspona te za spremanje i dokumentiranje rezultata. Nakon razvoja prvih elektroničkih uređaja prikupljene podatke su bilježili elektronički snimači i ispisivali ih na papiru. Kasnije je računalno prikupljanje podataka zamijenilo papirnate zapise digitalnim prikupljanjem i pohranjivanjem podataka. Korištenje računala u različitim aspektima prikupljanja podataka, kontrole i analize u posljednjih nekoliko godina revolucioniralo je suvremeno istraživanje, razvoj i proizvodnju. [8]

Današnji sustavi za prikupljanje podataka mogu prikupljati velike količine podataka u kratkim vremenskim intervalima te na taj način mogu dati vrlo precizne rezultate nekog ispitivanja. Upravo je cilj ovoga eksperimentalnog rada bio analizirati rezultate statičkog vlačnog ispitivanja s obzirom na različite brzine prikupljanja podataka, odnosno frekvencije uzorkovanja podataka. S obzirom da frekvencija uzorkovanja podataka ovisi isključivo o sustavu za prikupljanje podataka odlučeno je provesti ispitivanja na dva različita materijala.

3.7.2. Određivanje minimalne frekvencije uzorkovanja prema HRN EN ISO 6892-1

Frekvencija uzorkovanja podataka mora biti dovoljno visoka kako bi se mogle odrediti željena mehanička svojstva ispitivanog materijala. Stoga je za određivanje mehaničkih svojstava, kao na primjer gornje granice razvlačenja, R_{eh} , potrebno preko slijedećeg izraza (26) odrediti minimalnu frekvenciju uzorkovanja, f_{min} :

$$f_{min} = \frac{E \dot{\epsilon}}{R_{eh} q} \cdot 100, \text{ Hz} \quad (26)$$

Gdje je:

$\dot{\epsilon}$ – brzina prirasta deformacije, s^{-1}

E – modul elastičnosti, N/mm^2

R_{eh} – gornja granica razvlačenja, N/mm^2

q – relativna pogreška točnosti mjerenja sile, %

Navedeni izraz (26) vrijedi ako je odlučeno da se ispitivanje provodi pomoću metode A, dok se za metodu B minimalna frekvencija uzorkovanja, f_{min} računa preko izraza (27):

$$f_{min} = \frac{\dot{R}}{R_{eh} q} \cdot 100, \text{ Hz} \quad (27)$$

Gdje je:

\dot{R} – brzina prirasta naprezanja, u $N/mm^2 s$

Ako materijal koji se ispituje nema izraženo područje „tečenja“ u izrazima se koristi konvencionalna granica razvlačenja, $R_{p0,2}$, a minimalna frekvencija se u tom slučaju može smanjiti dva puta.

4. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu ovoga rada bilo je potrebno provesti prateća statička vlačna ispitivanja kidanjem ispitnih uzoraka na kidalici te analizirati i usporediti rezultate ispitivanja uz različite frekvencije uzorkovanja podataka sa kidalice određivanjem granice razvlačenja (uključujući gornju i donju) ili konvencionalne granice razvlačenja, vlačne čvrstoće i istežljivosti. Ispitivanja su provedena u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava, Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

4.1. Opis eksperimenta

Za potrebna ispitivanja korišteni su ispitni uzorci različitih materijala. Materijali uzoraka na kojima su provedena ispitivanja su čelici različitih kemijskih sastava i strukture. Za svaki uzorak prilikom ispitivanja korišteno je pet različitih frekvencija uzorkovanja podataka u iznosima od 1, 5, 10, 20 i 50 Hz. Sukladno normi izbor metode ispitivanja, A i B, ovisi o slobodnom odabiru ispitivača, pa je za ova ispitivanja odabrana metoda B, temeljena na kontroli brzine prirasta naprezanja. Kako su oba uzorka čelici ($E > 150000 \text{ N/mm}^2$), zahtijevane brzine prirasta naprezanja su određene rasponom od 6 do 60 $\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1}$ prema **tablici 4**. Međutim, za ispitivanja koja su obrađena u ovom radu korištene su nešto niže brzine prirasta naprezanja, gdje je za prvu seriju uzoraka brzina prirasta naprezanja iznosila $\dot{R}_1 = 4,1 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$, dok je brzina prirasta naprezanja za drugu seriju uzoraka $\dot{R}_2 = 2,65 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$. Prema iskustvu i prijedlogu ispitivača koji dobro poznaje korištenu opremu za statičko vlačno ispitivanje, odabrane su navedene brzine prirasta naprezanja za prvu i drugu seriju uzoraka. Pretpostavke ovog ispitivanja su dobivanje preciznijih rezultata mehaničkih svojstava pri višim frekvencijama uzorkovanja podataka te jasnije definirani dijagrami naprezanje – istežanje zbog veće količine obrađenih podataka u jedinici vremena.

4.2. Korištena oprema

Oprema koja je bila potrebna za provedbu ispitivanja:

- Hidraulička kidalica,
- Kontaktni prihvatni ekstenzometar,
- Računalo s prikladnim softverom.

Sva oprema za izvođenje statičkog vlačnog pokusa je kalibrirana sukladno normi HRN EN ISO 7500-1. Prikupljanje podataka prilikom ispitivanja je ostvareno preko računala s prikladnim softverskim programom za statička vlačna ispitivanja *Tira Test Systems* spojenog zajedno s kidalicom, ekstenzometrom i opremom za prilagodbu signala. Na **slici 31.** dan je prikaz računalne opreme za generiranje podataka statičkog vlačnog pokusa.

Računalom su zabilježene promjene sljedećih veličina preko kojih se formiraju dijagrami sila – produljenje, odnosno naprezanje – istežanje i određuju potrebna mehanička svojstva:

- Vrijeme,
- Pozicija traverze kidalice,
- Sila,
- Istežanje,
- Produljenje,
- Naprezanje,
- Brzina ispitivanja.

Hidraulička kidalica korištena u ovim ispitivanjima dana je **slikom 32.**, a njeni podaci su:

- Proizvođač: VEB WPM, Njemačka,
- Tip: hidraulička,
- Model: EU 40 MOD,
- Mjerno područje: 0 – 400 kN,
- Serijski broj: 990.06/83/85,
- Klasa 1.



Slika 31. Računalna oprema korištena za ispitivanje



Slika 32. Hidraulička kidalica

Podaci ekstenzometra korištenog u ispitivanju (slika 33.):

- Proizvođač: Mess&Feinwerktechnik, Njemačka,
- Model: MFA 2,
- Razmaknutost ticala: 50 mm,
- Hod: 2 mm,
- Serijski broj: 012872,
- Klasa 1 (sukladno normi HR EN ISO 9153).



Slika 33. Prihvatni ekstenzometar

4.3. Ispitni materijal

Za potrebe ovog zadatka korištene su epruvete od dva različita materijala i to niskolegirani čelika za poboljšavanje, 50CrV4 (stara oznaka: Č. 4830) i čelika za cementiranje oznake C15E (stara oznaka: Č. 1221).

4.3.1. Opis čelika 50CrV4

50CrV4 je niskolegirani (udio svakog legirnog elementa je $< 5\%$) čelik za poboljšavanje, kemijskog sastava prikazanog **tablicom 5**. Ovaj čelik spada u skupinu plemenitih čelika za koje općenito vrijedi da sadrže vrlo nizak udio sumpora i fosfora ($< 0,035\%$ S i P). [10]

Tablica 5. Kemijski sastav čelika 50CrV4 [9]

| Čelik, 50CrV4 | Ugljik | Silicij | Mangan | Fosfor | Sumpor | Krom | Vanadij |
|------------------|------------------|-----------------|-------------|-----------|-----------|-------------|-----------------|
| | 0,48 – 0,53 % | 0,15 – 0,3 % | 0,7 – 0,9 % | ≤ 0,035 % | ≤ 0,035 % | 0,8 – 1,1 % | 0,15 – 0,3 % |

Čelik je namijenjen postupku termičke obrade poboljšavanja koje se sastoji od postupka kaljenja i visokotemperaturnog popuštanja kako bi postigao visoku granicu razvlačenja i vlačnu čvrstoću uz visoku žilavost i dinamičku izdržljivost.

Stoga se ovaj čelik koristi za mehanički i dinamički visoko opterećene elemente strojeva i uređaja kao što su opruge, osovine, vratila, zupčanici, poluge i slično. Ovaj čelik se najčešće primjenjuje za lisnate opruge vozila, spiralne, zavojne i tanjuraste opruge većih dimenzija, visokonapregnute opruge vozila, a naročito kod visoko opterećenih opruga te opruga velikih dimenzija. Jedan od najvažnijih zahtjeva za materijale opruge je da se ostvari potrebna elastična deformacija. Upravo visoko područje elastičnosti, odnosno visok iznos granice razvlačenja omogućava primjenu visokih opterećenja opruge. Visoka granica razvlačenja se kod čelika za opruge ostvaruje povišenim udjelom ugljika te legiranjem sa silicijem, manganom, kromom i vanadijem što je slučaj i kod ovog čelika, prikazano u **tablici 5**. Deformacijsko ponašanje ovog čelika je kontinuirano te nema izraženog područja „tečenja“ kao kod „mekših“ čelika, pa se određuje konvencionalna granica razvlačenja, $R_{p0,2}$. Ovi čelici u poboljšanom stanju i ovisno o postupku oblikovanja postižu konvencionalnu granicu razvlačenja od oko 800 N/mm² pa nadalje. Međutim, zbog sigurnosti od krhkog loma istežljivost nije manja od 6 % i uz to sadrže dovoljnu rezervu plastičnosti koja proizlazi iz omjera konvencionalne granice razvlačenja i vlačne čvrstoće ($R_{p0,2}/R_m$). [10]

4.3.2. Opis čelika C15E

Čelik C15E je niskougljični (udio ugljika < 0,25%), nelegirani ili niskolegirani čelik za cementiranje čiji je sastav zajamčen, a prema masenom udjelu nečistoća spada u kvalitetne čelike i sadrži mali broj nemetalnih uključaka. [10] Sadržaj kemijskih elemenata za ovaj čelik prikazan je **tablicom 6**.

Tablica 6. Kemijski sastav čelika C15E [9]

| Čelik, C15E | Ugljik | Mangan | Fosfor | Sumpor |
|-------------|---------------|-------------|-----------|-----------|
| | 0,48 - 0,53 % | 0,3 - 0,6 % | ≤ 0,035 % | ≤ 0,035 % |

Ovaj čelik namijenjen je za postupak toplinske obrade cementiranja koji uključuje postupak pougljičavanja površinskih slojeva, kaljenja i niskotemperaturnog popuštanja. Cementiranjem se nastoji postići visoka tvrdoća na površinskim slojevima kako bi se povećala otpornost na trošenje, a s druge strane da jezgra zadrži visoku žilavost kako bi materijal podnosio dinamička opterećenja. Ovaj čelik može se kaliti samo u vodi i slabe je prokaljivosti zbog niskog udjela ugljika pa se primjenjuje za slabije udarno opterećene dijelove malih presjeka kao što su male osovine i zupčanici, poluge, svornjaci, čahure i slični dijelovi. Čelik pokazuje diskontinuirano deformacijsko ponašanje u području prijelaza iz elastičnog u plastično područje deformacija sa izraženom gornjom i donjom granicom razvlačenja te pokazuje poprilično veliku istezljivost, koja upućuje na veliku žilavost materijala. [10] Deformacijsko ponašanje tijekom razvlačenja ovog čelika analogno je prikazu na **slici 22**.

4.4. Ispitni uzorci

Za potrebne ispitivanja dimenzije epruveta su izvedene sukladno normi HRN EN ISO 6892-1. Korištene su epruvete okruglog poprečnog presjeka sa ravnim glavama izvedenim za prihvatač nazubljenim čeljustima. Ispitivanja su provedena na proporcionalno dugim epruvetama od čelika C15E i proporcionalno kratkim ispitnim uzorcima napravljenim od čelika 50CrV4. Prikaz ovih epruveta dan je slikom **slikom 34**.



Slika 34. Proporcionalno kratki i proporcionalno dugi ispitni uzorak

4.5. Rezultati ispitivanja

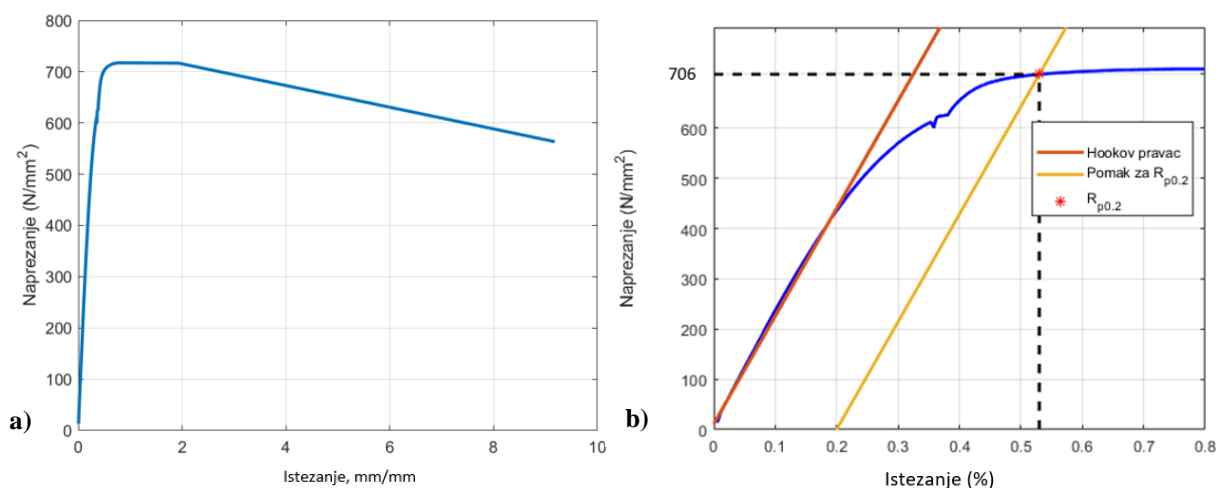
Rezultati ispitivanja prikazani su tablično i dijagramima naprezanje – istezanje ($\sigma - \varepsilon$) za oba materijala s obzirom na frekvenciju uzorkovanja podataka u rasponu od 1 do 50 Hz. Dijagrami i podaci sa kidalice generirani su na računalu pomoću softverskog programa *Tira Test Systems*. U fokusu ovog eksperimenta razmatrao se utjecaj brzine prikupljanja podataka sa kidalice na vrijednosti ispitivanih mehaničkih svojstava.

4.5.1. Rezultati ispitivanja za čelik 50CrV4

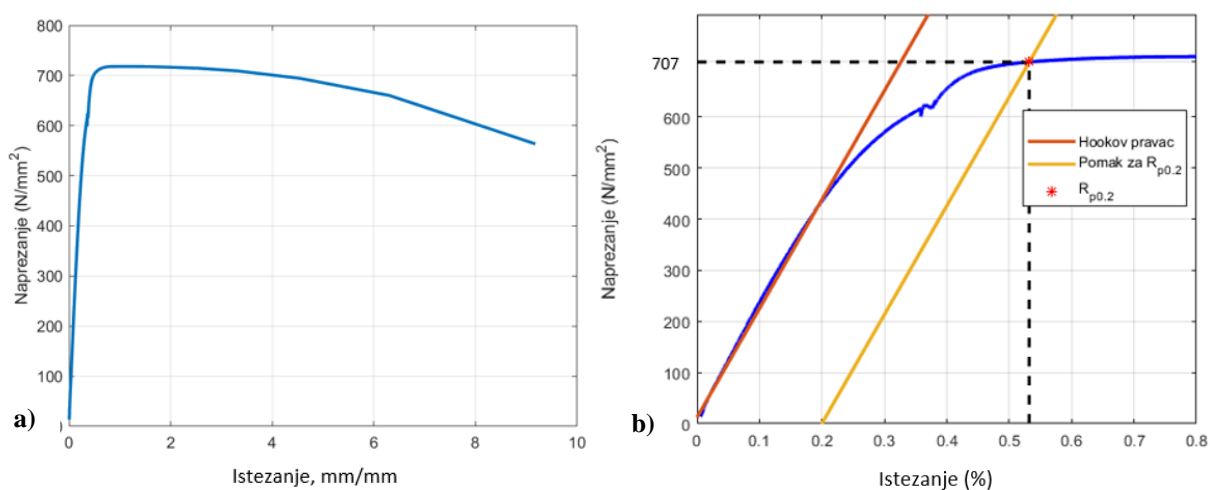
Rezultati ispitivanja za čelik 50CrV4 prikazani su **tablicom 7.**, a pripadajući $\sigma - \varepsilon$ dijagrami su za svaku frekvenciju predloženi **slikama 35. do 39.**

Tablica 7. Rezultati ispitivanja za čelik 50CrV4

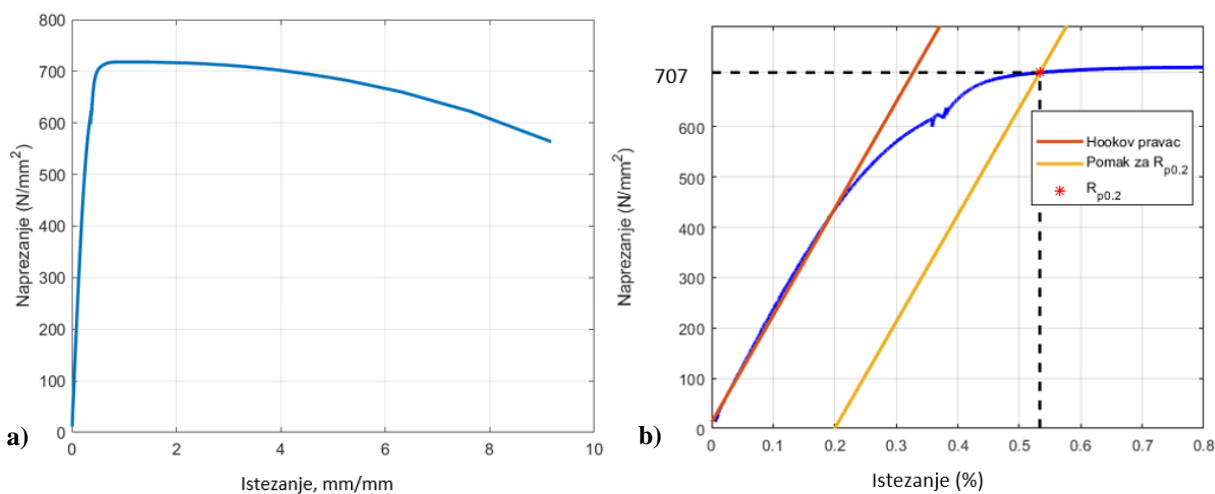
| Frekvencija uzorkovanja podataka, Hz | Konvencionalna granica razvlačenja, $R_{p0,2}$, N/mm ² | Vlačna čvrstoća, R_m , N/mm ² | Istezljivost, A , % |
|--------------------------------------|--|--|-----------------------|
| 50 | 705 | 718 | 15,0 |
| 20 | 705 | 718 | 15,0 |
| 10 | 707 | 718 | 9,2 |
| 5 | 707 | 718 | 9,2 |
| 1 | 706 | 717 | 9,2 |



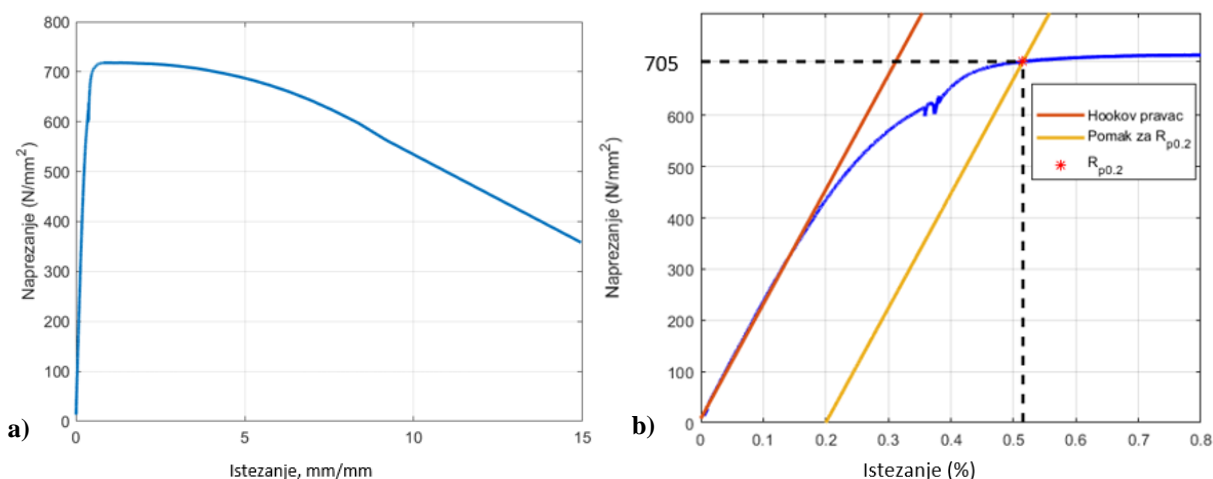
Slika 35. $\sigma - \varepsilon$ dijagram (a) s istaknutim područjem elastičnosti (b) za frekvenciju ispitivanja 1 Hz, čelik 50CrV4



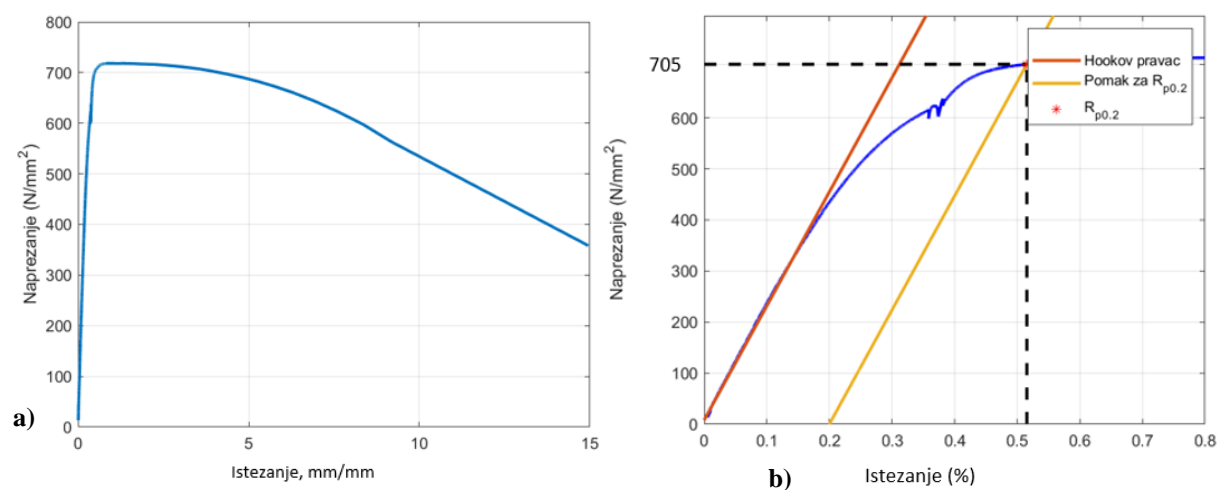
Slika 36. $\sigma - \varepsilon$ dijagram (a) s istaknutim područjem elastičnosti (b) za frekvenciju ispitivanja 5 Hz, čelik 50CrV4



Slika 37. $\sigma - \varepsilon$ dijagram (a) s istaknutim područjem elastičnosti (b) za frekvenciju ispitivanja 10 Hz, čelik 50CrV4



Slika 38. $\sigma - \varepsilon$ dijagram (a) s istaknutim područjem elastičnosti (b) za frekvenciju ispitivanja 20 Hz, čelik 50CrV4



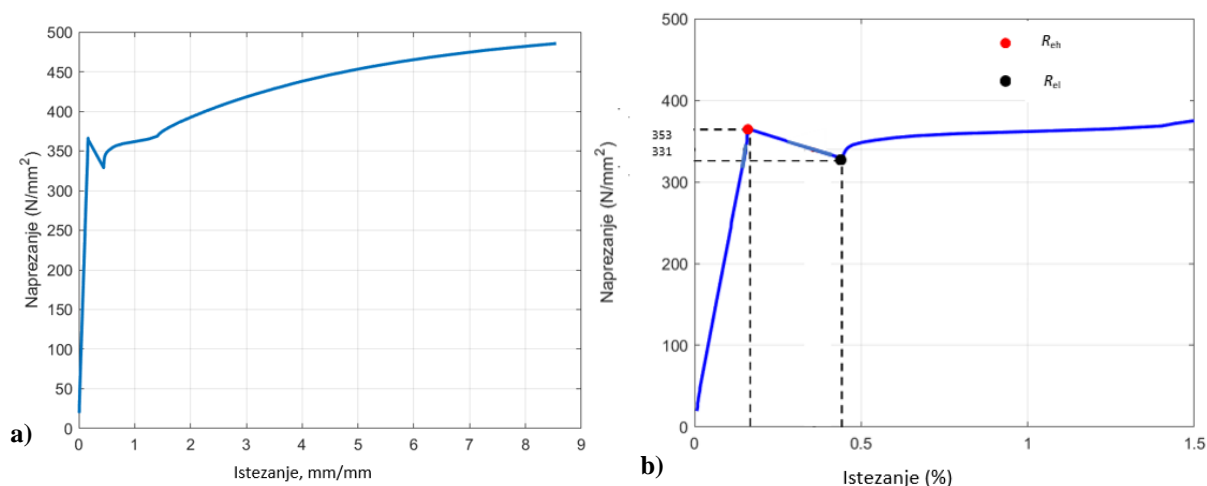
Slika 39. $\sigma - \varepsilon$ dijagram (a) s istaknutim područjem elastičnosti (b) za frekvenciju ispitivanja 50 Hz, čelik 50CrV4

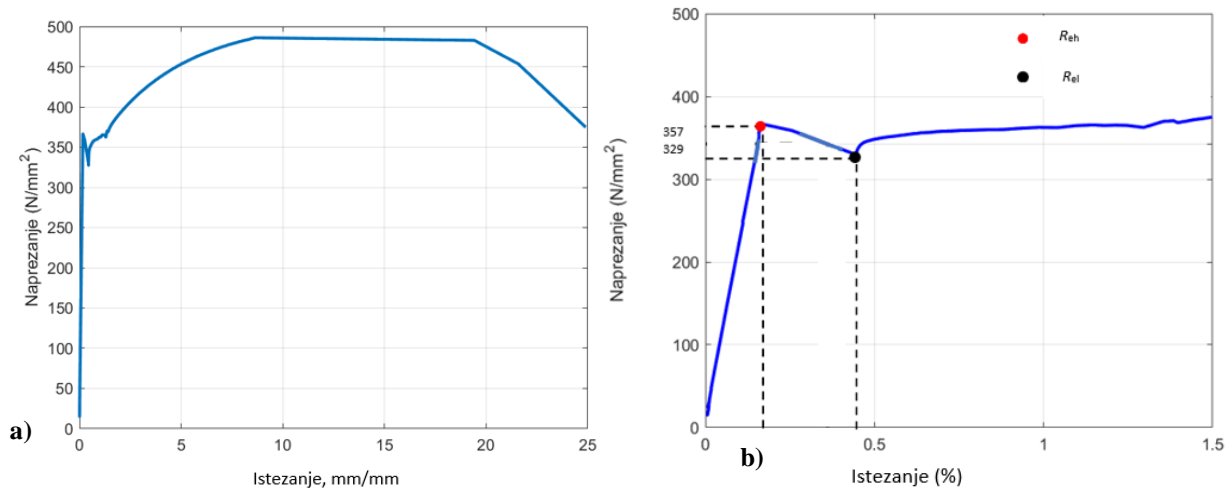
4.5.2. Rezultati ispitivanja za čelik C15E

Rezultati ispitivanja čelika za cementiranje C15E prikazani su **tablicom 8.**, a dijagrami $\sigma - \varepsilon$ za svaku ispitivanu frekvenciju predočeni su **slikama 40.** do **44.**

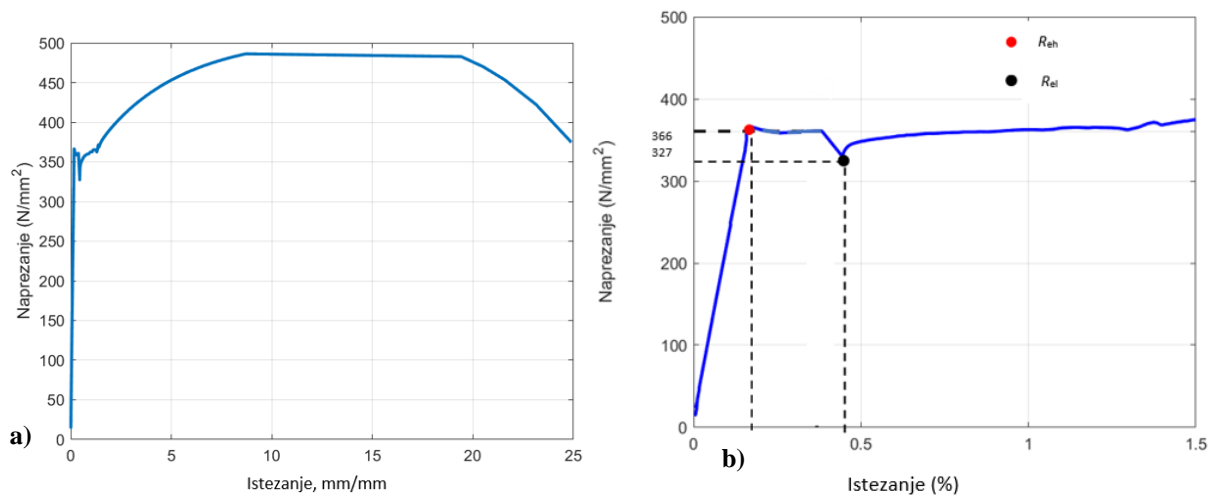
Tablica 8. Rezultati ispitivanja za čelik C15E

| Frekvencija uzorkovanja podataka, Hz | Gornja granica razvlačenja, R_{eh} , N/mm ² | Donja granica razvlačenja, R_{el} , N/mm ² | Vlačna čvrstoća, R_m , N/mm ² | Istezljivost, A, % |
|--------------------------------------|--|---|--|--------------------|
| 50 | 366 | 326 | 486 | 26,6 |
| 20 | 366 | 326 | 486 | 26,6 |
| 10 | 366 | 327 | 486 | 24,9 |
| 5 | 357 | 329 | 486 | 24,9 |
| 1 | 353 | 331 | 485 | 8,5 |

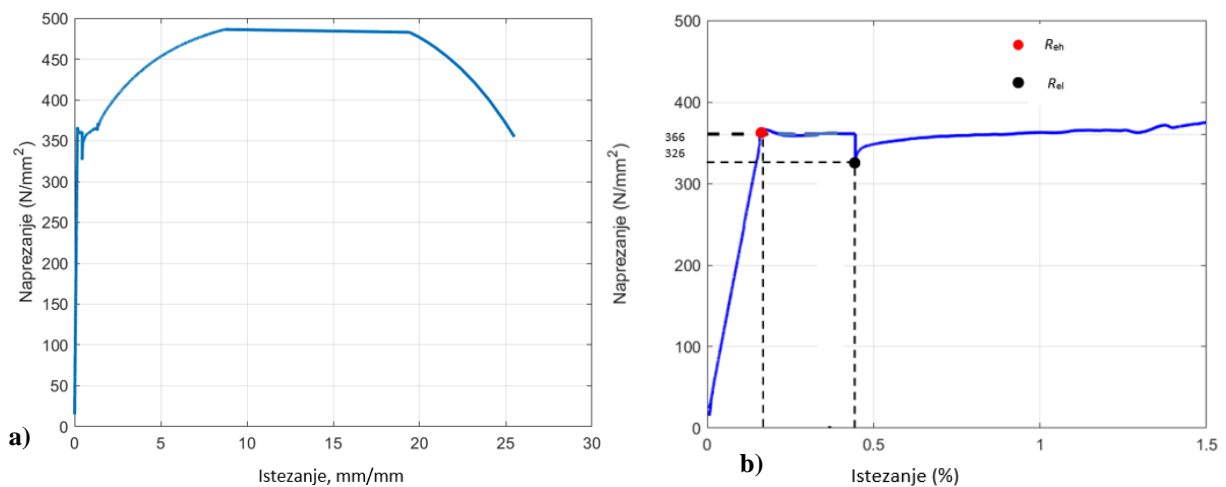
Slika 40. $\sigma - \varepsilon$ dijagram (a) s istaknutim područjem elastičnosti (b) za frekvenciju ispitivanja 1 Hz, čelik C15E



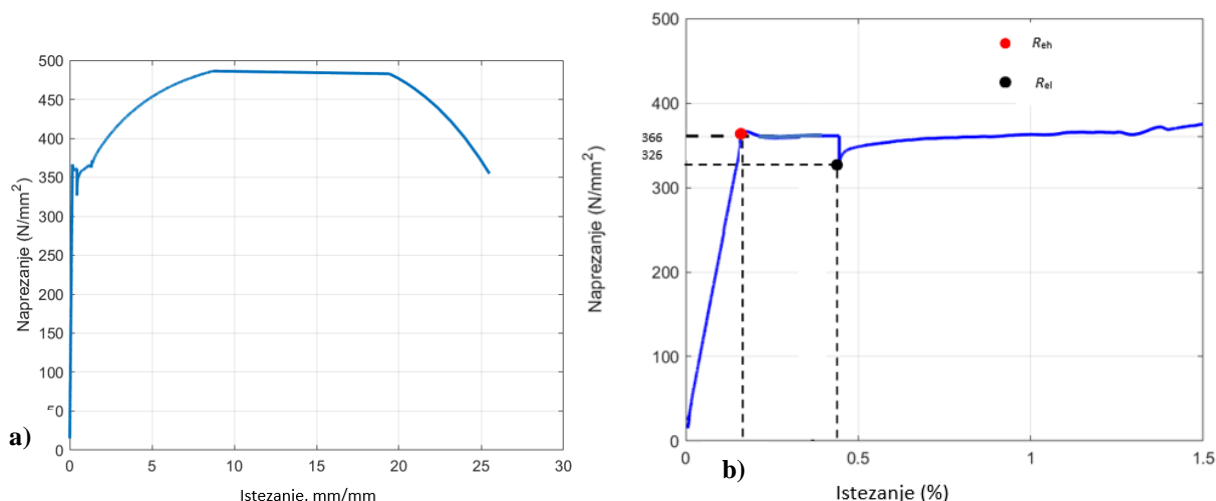
Slika 41. $\sigma - \varepsilon$ dijagram (a) s istaknutim područjem elastičnosti (b) za frekvenciju ispitivanja 5 Hz, čelik C15E



Slika 42. $\sigma - \varepsilon$ dijagram (a) s istaknutim područjem elastičnosti (b) za frekvenciju ispitivanja 10 Hz, čelik C15E



Slika 43. $\sigma - \varepsilon$ dijagram (a) s istaknutim područjem elastičnosti (b) za frekvenciju ispitivanja 20 Hz, čelik C15E



Slika 44. $\sigma - \varepsilon$ dijagram (a) s istaknutim područjem elastičnosti (b) za frekvenciju ispitivanja 50 Hz, čelik C15E

4.6. Analiza rezultata ispitivanja

Iz dobivenih rezultata vlačnih ispitivanja prve i druge serije napravljena je analiza s obzirom na utjecaj različitih frekvencija uzorkovanja podataka. Cilj ove analize je utvrditi koliko frekvencija uzorkovanja, odnosno brzina prikupljanja podataka utječe na izmjerene iznose mehaničkih svojstava, odnosno granicu razvlačenja ili konvencionalnu granicu razvlačenja, vlačnu čvrstoću i istežljivost.

4.6.1. Analiza rezultata za čelik 50CrV4

Što se tiče vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja $R_{p0,2}$ za čelik 50CrV4 može se utvrditi da frekvencija uzorkovanja nema značajniji utjecaj na dobivene rezultate. Najviša dobivena vrijednost granice razvlačenja se postiže za frekvenciju od 10 Hz i iznosi 707 N/mm², dok je za 20 i 50 Hz ostvarena najniža vrijednost u iznosu od 705 N/mm², pa je raspon dobivenih vrijednosti svega 2 N/mm².

Po rezultatima vlačne čvrstoće također se pokazuje da gotovo nema utjecaja frekvencije uzorkovanja na dobivene rezultate jer vlačna čvrstoća pri frekvencijama od 5 do 50 Hz iznosi 718 N/mm², dok jedino pri frekvenciji od 1 Hz iznosi 717 N/mm². Razlikom tih dviju vrijednosti dobiva se raspon od samo 1 N/mm².

S druge strane kod rezultata istezljivosti može se uočiti veća razlika tako da pri nižim frekvencijama (1, 5 i 10 Hz) istezljivost iznosi 9,2% dok kod većih frekvencija uzorkovanja 20 i 50 Hz njena vrijednost raste na 15,0%.

4.6.2. Analiza rezultata za čelik C15E

Analizom rezultata donje i gornje granice razvlačenja te vlačne čvrstoće dobivenih ispitivanjem čelika C15E može se reći da različite frekvencije uzorkovanja podataka određenim intenzitetom utječu na rezultate ovih mehaničkih svojstava. Gornja granica razvlačenja s obzirom na povećanje frekvencije uzorkovanja ima tendenciju rasta do 366 N/mm² dok je pri frekvenciji od 1 Hz njena vrijednost „samo“ 353 N/mm². Za frekvencije uzorkovanja podataka od 1 Hz do 20 Hz iznosi donje granice razvlačenja nešto se značajnije mijenjaju i pokazuju tendenciju pada od početnih 332 N/mm² za frekvenciju 1 Hz na 327 N/mm² pri 10 Hz. Pri većim frekvencijama uzorkovanja podataka 20 Hz i 50 Hz njene vrijednosti se stabiliziraju i iznose 326 N/mm².

Što se tiče dobivenih iznosa vlačne čvrstoće evidentno je da frekvencija uzorkovanja nema izričit utjecaj na njene vrijednosti. Rezultati se razlikuju samo za frekvenciju 1 Hz kada vlačna čvrstoća iznosi 485 N/mm² naspram 486 N/mm² za sve ostale više frekvencije u području do 50 Hz.

Kod dobivenih rezultata istezljivosti može se uočiti da se oni ne razlikuju bitno pri frekvencijama od 5 do 50 Hz, gdje pri frekvencijama od 5 i 10 Hz istezljivost iznosi 24,9%, a pri 20 i 50 Hz ona je malo viša 26,6%. Jedino pri frekvenciji od 1 Hz vrijednost istezljivosti značajnije odstupa i iznosi 8,5%.

4.7. Određivanje minimalne frekvencije uzorkovanja podataka

Provedbom preliminarnih ispitivanja i određivanjem (konvencionalne) granice razvlačenja može se izračunati zahtijevana minimalna frekvencija uzorkovanja podataka. Kako je provedeno ispitivanje pomoću metode B, prema normi za izračun minimalnih frekvencija uzorkovanja koristi se izraz (27), pa minimalna frekvencija uzorkovanja za čelik 50CrV4 slijedi iz izraza:

$$f_{\min 1} = \frac{\dot{R}_1}{R_{p0,2} q} \cdot 100 = 0,58 \text{ Hz} \quad (28)$$

Primijenjena brzina prirasta naprezanja ovdje je iznosila $\dot{R}_1 = 4,1 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$, dok relativna pogreška točnosti mjerenja sile za kidalicu klase 1 iznosi $q = 1\%$. Za $R_{p0,2}$ uvrštena je vrijednost dobivena pri frekvenciji od 50 Hz i iznosi 705 MPa (N/mm^2). Na temelju donje granične frekvencije može se reći da su sve frekvencije uzorkovanja podataka veće ili jednake od 0,58 Hz mjerodavne za ispitivanje mehaničkih svojstava čelika 50CrV4 pri brzini prirasta naprezanja od $4,1 \cdot \text{MPa}\cdot\text{s}^{-1}$.

Pomoću istog izraza (27) određena je i minimalna frekvencija uzorkovanja podataka za drugi čelik C15E:

$$f_{\min 2} = \frac{\dot{R}_2}{R_{\text{eh}} q} \cdot 100 = 0,72 \text{ Hz} \quad (29)$$

Primijenjena brzina prirasta naprezanja kod ovog čelika iznosila je $\dot{R}_2 = 2,65 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$, dok je za gornju granicu razvlačenja uzeta vrijednost od 366 MPa (N/mm^2) određena pri frekvenciji uzorkovanja podataka od 50 Hz. Kod statičkog vlačnog ispitivanja čelika C15E minimalna frekvencija mora iznositi 0,72 Hz. Ako se u obje jednadžbe uvrsti minimalna brzina prirasta naprezanja od $6 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$, propisana normom, tada frekvencije uzorkovanja podataka poprimaju sljedeće vrijednosti:

- $f_{\min 1} = 0,85 \text{ Hz}$; za čelik 50CrV4,
- $f_{\min 2} = 1,64 \text{ Hz}$; za čelik C15E.

Upravo je prema izrazu (27) brzina prirasta naprezanja proporcionalna minimalnoj frekvenciji uzorkovanja podataka, pa se minimalna frekvencija uzorkovanja podataka povećava za veću brzinu prirasta naprezanja uz istu granicu razvlačenja, $R_{p0,2}$ ili R_{eh} .

5. ZAKLJUČAK

Statički vlačni pokus u suštini je vrlo jednostavan i najrašireniji postupak ispitivanja mehaničkih svojstva materijala. Iako se u ovome radu govorilo o ispitivanju metalnih materijala, ovaj postupak ispitivanja može se koristiti za ispitivanje svih materijala. Rezultati ovog ispitivanja uvijek se nastoje prikazati dijagramom naprezanje – istežanje iz kojeg se vrlo jednostavno mogu odrediti mehanička svojstva i ostale karakteristike te ponašanje materijala u uvjetima vlačnog opterećenja. Za potrebe statičkog vlačnog ispitivanja potrebno je držati se pravila koje zahtijeva norma kako bi se osiguralo kvalitetno određivanje mehaničkih svojstava te kako ne bi došlo do određenih grešaka i lošijih rezultata. Također, u tu svrhu važno je prije svega osigurati potrebnu opremu kao što su kidalice, odnosno univerzalne ispitivalice, mjerni uređaji poput ekstenzometra te računalna hardverska i softverska oprema. Sva navedena oprema mora biti umjerena i prilagođena statičkom vlačnom ispitivanju u skladu sa normom HRN EN ISO 6892-1.

Na rezultate statičkog vlačnog pokusa može utjecati puno faktora kao na primjer: brzina ispitivanja, temperatura, elastičnost dijelova kidalice, oblik i dimenzije epruvete, hrapavost površine epruvete, itd. U svrhu ovog rada bilo je potrebno provesti statička vlačna ispitivanja te analizirati utjecaj različitih frekvencija uzorkovanja podataka na rezultate ispitivanja. Ispitivanja su provedena na dvije serije uzoraka različitih čelika i dimenzija epruveta. Kako bi se odredio utjecaj različitih frekvencija uzorkovanja ispitivanjem su određivana sljedeća mehanička svojstva:

- Konvencionalna granica razvlačenja ($R_{p0,2}$) za čelik 50CrV4,
- Gornja i donja granica razvlačenja (R_{eh} , R_{el}) za čelik C15E,
- Vlačna čvrstoća (R_m), za oba čelika,
- Istezljivost (A), za oba čelika.

Iz dobivenih rezultata i dijagrama naprezanje – istežanje može se zaključiti sljedeće:

1. Kod čelika 50CrV4 koji pokazuje kontinuirani prijelaz iz elastičnog u plastično područje deformacije nema velikih oscilacija u rezultatima konvencionalne granice razvlačenja s obzirom na frekvenciju uzorkovanja u području od 1 do 50 Hz.
2. Kod drugog čelika C15E koji sadrži područje „tečenja“ s izraženom gornjom i donjom granicom razvlačenja postoji određen utjecaj frekvencije uzorkovanja podataka na

rezultate granica razvlačenja. Pri nižim frekvencijama zbog manje količine prikupljenih podataka gornja i donja granica razvlačenja ne mogu se precizno definirati zbog naglih promjena napreznja u području tečenja materijala.

3. Različite frekvencije uzorkovanja podataka nemaju značajniji utjecaj na rezultate vlačne čvrstoće i jednog i drugog čelika, jer u tom području deformacija vrijednost napreznja se polaganije mijenja zbog velike deformacije materijala.
4. Analizom rezultata istezljivosti za oba čelika može se zaključiti da različite frekvencije uzorkovanja imaju velik utjecaj na njenu vrijednost. Nakon postignuća vlačne čvrstoće, R_m , na epruveti se počinje stvarati vrat te dolazi do naglog porasta istezanja u kratkom vremenskom intervalu. Sukladno tome pri nižim frekvencija uzorkovanja zbog manje količine prikupljenih podataka u plastičnom području deformacije neposredno prije loma, dobivene vrijednosti istezljivosti su puno niže i čak nerealne s obzirom na deklarirane karakteristike ispitivanog materijala.
5. Više frekvencije uzorkovanja podataka u svakom slučaju pružaju preciznije i točnije mjerenje zbog veće količine podataka obrađenih u jedinici vremena.

LITERATURA

- [1] Ivušić, V., Franz, M., Španiček, Đ., Ćurković, L.: Materijali I, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [2] Franz, M.: Mehanička svojstva materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 1998.
- [3] Ćorić, D., Alar, Ž.: Odabrana poglavlja iz mehaničkih svojstava materijala. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2016.
- [4] Davis, J. R.: Tensile testing - second edition, Ohio: ASM International-The materials information society; 2004.
- [5] International standard ISO 6892-1: Metallic materials-Tensile testing-Part 1: Method of test at room temperature, 2009
- [6] URL: https://prog.lmu.edu.ng/colleges_CMS/document/books/MCE313%20-%20Mechanical%20Properties%20of%20Materials.pdf, (pristupljeno 24.11.2022.)
- [7] Arndt, KD., Brüggemann, H., Ihme, J., Einführung in: Festigkeitslehre für Wirtschaftsingenieure. Springer Vieweg, Wiesbaden. 2014.
- [8] Chidambaram M.: Basics of Data Acquisition and Control, Handbook of Networked and Embedded Control Systems; Department of Chemical Engineering Indian Institute of Technology, Madras, 2005., str. 227-257.
- [9] <https://www.matweb.com>; pristupljeno 19.11.2022.
- [10] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.