

Utjecaj senzora sile na kvalitetu rezultata mjerenja

Čulina, Romana

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:146520>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-11**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Romana Čulina

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Utjecaj senzora sile na kvalitetu rezultata mjerenja

Mentori:

izv. prof. dr. sc. Željko Alar

Student:

Romana Čulina

Zagreb, 2019.

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

Zahvaljujem se mentoru dr.sc. Željku Alaru, izv.prof. na pomoći tijekom izrade diplomskog rada, utrošenom vremenu i trudu, ustupljenoj literaturi te svim korisnim savjetima i prenesenom znanju tijekom studija.

Zahvaljujem se asistentu Danielu Pustičkom, mag. ing. mech. na pomoći u izradi diplomskog rada, prijedlozima, savjetima i podršci.

Zahvaljujem se laborantima Laboratorija za mehanička ispitivanja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu na pomoći pri izradi eksperimentalnog dijela rada.

Na kraju posebno bih se zahvalila svojim roditeljima, obitelji, dečku i prijateljima na podršci, strpljenju i razumijevanju tokom cijelog studija.

Romana Čulina



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: | |
| Ur. broj: | |

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **ROMANA ČULINA** Mat. br.: **0035201156**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj senzora sile na kvalitetu rezultata mjerenja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of the force sensor on the quality of measurement results**

Opis zadatka:

Sila je matematički predstavljena kao vektor koji djeluje u određenoj točki. Ovisno o metodi mjerenja sile, postoje različiti tipovi uređaja za mjerenje sile. Danas se najviše koriste elastični mjerni uređaji koji se sastoje od deformacijskog tijela (dinamometar), pretvornika veličine deformacije i uređaja za očitavanje vrijednosti. Jedna od ključnih komponenti je deformacijsko tijelo.

U radu je potrebno sljedeće:

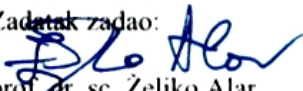
1. Opisati vrste senzora sile koji se danas primjenjuju pri mjerenju različitih vrsta opterećenja te iz literaturnih podataka navesti njihove mjerne sposobnosti.
2. Opisati zahtjeve na materijale koji se koriste za izradu deformacijskog tijela te metode za određivanje deformacijske karakteristike.
3. Eksperimentalno provesti određivanje deformacijske karakteristike jednog senzora sile te odrediti utjecajne faktore na rezultate mjerenja.
4. Analizirati dobivene rezultate i dati zaključke.

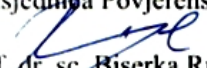
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
26. rujna 2019.

Rok predaje rada:
28. studenog 2019.

Predviđeni datum obrane:
04. prosinca 2019.
05. prosinca 2019.
06. prosinca 2019.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Željko Alar

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

| | |
|---|-----|
| SADRŽAJ | I |
| SAŽETAK..... | VI |
| SUMMARY | VII |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. SILA I MJERENJE SILE | 2 |
| 2.1. Mjerenje sile..... | 3 |
| 2.2. Karakteristike sustava za mjerenje sile | 5 |
| 3. SENZORI SILE..... | 9 |
| 3.1. Elektrootporni tenzometri (mjerne trake) | 10 |
| 3.1.1. Mjerenje u spoju Wheatstoneovog mjernog mosta..... | 15 |
| 3.2. Piezoelektrični pretvarači sile | 16 |
| 3.3. Hidraulički i pneumatski pretvarači sile | 18 |
| 3.4. Druge vrste sustava mjerenja sile..... | 18 |
| 3.4.1. Elastični uređaji | 18 |
| 3.4.2. Vibracijski elementi | 19 |
| 3.4.3. Magnetno-elastični uređaji..... | 20 |
| 3.4.5 Plastična deformacija | 20 |
| 4. DEFORMACIJSKO TIJELO | 21 |
| 4.1. Elastični element | 22 |
| 5. UMJERAVANJE PRIJENOSNIH ETALONA SILE PREMA NORMI HR EN ISO 376:2011 | 24 |
| 5.1. Karakteristike etalona | 26 |
| 5.2. Priprema za umjeravanje..... | 26 |
| 5.3. Rezolucija (r)..... | 27 |
| 5.4. Minimalna sila..... | 27 |
| 5.5. Postupak umjeravanja | 28 |
| 5.6. Kriteriji za ocjenjivanje etalona | 29 |
| 5.7. Klasifikacija posredničkih etalona | 31 |
| 6. EKSPERIMENTALNI DIO | 32 |
| 6.1. Rezultati umjeravanja dinamometra - prije dinamičkog opterećivanja | 36 |
| 6.2. Dinamičko opterećenje dinamometra | 41 |
| 6.3. Rezultati umjeravanja dinamometra - poslije dinamičkog opterećenja | 43 |
| 6.4. Karakterizacija | 48 |
| 6.4.1. Priprema uzorka | 49 |
| 6.4.2. Ispitivanje tvrdoće prema metodi Vickers | 50 |
| 6.4.3. Analiza svjetlosnim mikroskopom | 52 |
| 7. ANALIZA REZULTATA | 54 |
| 8. ZAKLJUČAK..... | 59 |
| LITERATURA..... | 60 |

POPIS SLIKA

| | | |
|----------|--|----|
| Slika 1 | Ideja o ispitivanju vlačne čvrstoće žice (Leonardo da Vinci) [4]..... | 3 |
| Slika 2 | Ispitivanje nosivosti grede (Galileo Galilei) [4]..... | 3 |
| Slika 3 | Nacionalni etalon sile Njemačke u PTB-u [4]..... | 5 |
| Slika 4 | Idealizirani prikaz ponašanja sustava za mjerenje sile [1] | 6 |
| Slika 5 | Osnovni dijagram elastičnog elementa senzora sile [1] | 9 |
| Slika 6 | Dijagram naprezanje – istežanje za niskougljični čelik [7]..... | 11 |
| Slika 7 | Deformacija žice pod djelovanjem opterećenja [7]..... | 12 |
| Slika 8 | Različiti tipovi elektrootpornih mjernih traka i rozeta [7] | 13 |
| Slika 9 | Lijepljenje mjerne trake na ispitni objekt [7] | 14 |
| Slika 10 | Vrste mjernih rozeta [7] | 15 |
| Slika 11 | Wheatstoneov mjerni most..... | 16 |
| Slika 12 | Industrijski piezoelektrični podmetači za opterećenje [1]..... | 17 |
| Slika 13 | Piezoelektrični senzor [8]..... | 17 |
| Slika 14 | Presjeci hidraulične i pneumatske ćelije za silu [8] | 18 |
| Slika 15 | Različite vrste kućišta [1] | 21 |
| Slika 16 | Primjeri različitih deformacijskih tijela [1] | 22 |
| Slika 17 | Pozicije dinamometra pri umjeravanju prema HR EN ISO 376:2011 [13] | 28 |
| Slika 18 | Nosiva konstrukcija „Erichsen 474-2kN“ | 33 |
| Slika 19 | Dinamometar Xforce HP | 34 |
| Slika 20 | Mjerno pojačalo DMP40 | 35 |
| Slika 21 | Prikaz krivulje interpolacije | 40 |
| Slika 22 | Inverzni prikaz krivulje interpolacije | 40 |
| Slika 23 | Prikaz krivulje interpolacije | 47 |
| Slika 24 | Inverzni prikaz krivulje interpolacije | 47 |
| Slika 25 | Prikaz deformacijskog tijela dinamometra s tenzometarskim trakama..... | 49 |
| Slika 26 | Uzorak uliven u polimernu masu | 50 |
| Slika 27 | Vršni kut i otisak penetratora Vickersovog tvrdomjera [18]..... | 50 |
| Slika 28 | Tvrdomjer..... | 51 |
| Slika 29 | Otisak penetratora na uzorku, povećanje 200x | 52 |
| Slika 30 | Prikaz mikrostruktura u nagriženom stanju, povećanje 100x | 53 |
| Slika 31 | Prikaz mikrostruktura u nagriženom stanju, povećanje 500x | 53 |
| Slika 32 | Prikaz nul vrijednosti u neopterećenom stanju..... | 54 |
| Slika 33 | Prikaz nul vrijednosti pri nazivnim vrijednostima sile..... | 54 |
| Slika 34 | Prikaz nul vrijednosti nizova, prije i nakon dinamičkog opterećivanja | 55 |
| Slika 35 | Usporedni prikaz relativne pogreške ponovljivosti s rotacijom u ovisnosti o sili. 56 | |
| Slika 36 | Usporedni prikaz relativne pogreške obnovljivosti bez rotacije u ovisnosti o sili 57 | |
| Slika 37 | Usporedni prikaz relativne pogreške histereze u ovisnosti o sili | 57 |
| Slika 38 | Usporedni prikaz relativnog interpolacijskog odstupanje u ovisnosti o sili..... | 58 |

POPIS TABLICA

| | | |
|------------|--|----|
| Tablica 1 | Pregled potencijalnih zahtjeva za sustav mjerenja sile [1]..... | 8 |
| Tablica 2 | Vrsta i karakteristika senzora sile [1] | 10 |
| Tablica 3 | Materijali mjernih traka [7] | 13 |
| Tablica 4 | Veličine pri umjeravanju prijenosnih etalona [13]..... | 24 |
| Tablica 5 | Klase etalona [13]..... | 27 |
| Tablica 6 | Prikaz četiri klase umjerenih prijenosnih etalona [13]..... | 31 |
| Tablica 7 | Uvjeti okoliša | 33 |
| Tablica 8 | Karakteristike dinamometra [13]..... | 34 |
| Tablica 9 | Karakteristike mjernog pojačala..... | 35 |
| Tablica 10 | Izmjerene vrijednosti i relativna pogreška nule kod predopterećenja..... | 36 |
| Tablica 11 | Izmjerene vrijednosti pri opterećenju u mjernim nizovima $X1$, $X2$, $X3$, $X5$ i pri rasterećivanju u mjernim nizovima $X4'$, $X6'$ | 36 |
| Tablica 12 | Ostatak i relativna pogreška nule nakon rasterećenja u mjernim nizovima..... | 37 |
| Tablica 13 | Izmjerene vrijednosti za test puzanja i pripadajuće pogreške puzanja..... | 37 |
| Tablica 14 | Izračunate vrijednosti pogrešaka | 38 |
| Tablica 15 | Interpolirane vrijednosti u ovisnosti o opterećenju | 39 |
| Tablica 16 | Klasifikacija i pripadajuća najmanja relativna mjerna nesigurnost umjeravanja. 41 | |
| Tablica 17 | Izmjerene vrijednosti nul signala pri dinamičkom opterećenju | 42 |
| Tablica 18 | Izmjerene vrijednosti i relativna pogreška nule kod predopterećenja..... | 43 |
| Tablica 19 | Izmjerene vrijednosti pri opterećenju u mjernim nizovima $X1$, $X2$, $X3$, $X5$ i pri rasterećivanju u mjernim nizovima $X4'$, $X6'$ | 43 |
| Tablica 20 | Ostatak i relativna pogreška nule nakon rasterećenja u mjernim nizovima..... | 44 |
| Tablica 21 | Izmjerene vrijednosti za test puzanja i pripadajuće pogreške puzanja..... | 44 |
| Tablica 22 | Izračunate vrijednosti pogrešaka | 45 |
| Tablica 23 | Interpolirane vrijednosti u ovisnosti o opterećenju | 46 |
| Tablica 24 | Klasifikacija i pripadajuća najmanja relativna mjerna nesigurnost umjeravanja. 48 | |
| Tablica 25 | Rezultati mjerenja mikrotvrdoće | 51 |
| Tablica 26 | Nul vrijednosti u mjernim nizovima prije dinamičkog opterećivanja..... | 55 |
| Tablica 27 | Nul vrijednosti u mjernim nizovima nakon dinamičkog opterećivanja | 55 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|------------|----------|---|
| a | m/s^2 | ubrzanje |
| b | % | relativna pogreška ponovljivosti s rotacijom |
| b' | % | relativna pogreška obnovljivosti bez rotacije |
| c | % | relativna pogreška puzanja |
| d | m | promjer |
| d_0 | m | početni promjer |
| Δd | m | promjena promjera |
| E | N/mm^2 | Youngov modul elastičnosti |
| F | N | sila |
| F_f | N | nazivna sila dinamometra |
| F_{min} | N | minimalna sila primjenjena na dinamometru |
| F_N | N | maksimalna sila umjeravanja |
| f_c | % | relativno interpolacijsko odstupanje |
| f_0 | % | relativno odstupanje nul vrijednosti |
| g | m/s^2 | lokalno gravitacijsko ubrzanje |
| i_f | mV/V | očitanje nakon rasterećivanja |
| i_0 | mV/V | očitanje prije opterećivanja |
| i_{30} | mV/V | očitanje 30 s nakon postizanja zadane sile |
| i_{300} | mV/V | očitanje 300 s nakon postizanja zadane sile |
| k | - | faktor porivanja |
| Δl | m | produljenje |
| l | m | duljina |
| S_0 | m | početna mjerna duljina |
| m | kg | masa |
| r | N | rezolucija indikatora |
| R | Ω | električni otpor |
| R_0 | Ω | promjena električnog otpora |

| | | |
|---------------------|-------------------|---|
| R_e | N/mm ² | granica razvlačenja |
| S_0 | mm ² | početna površina poprečnog presjeka |
| ΔS | mm ² | površina poprečnog presjeka |
| ϑ | °C | temperatura |
| W | % | proširena mjerna nesigurnost |
| U | V | napon |
| ν | % | relativna pogreška histereze |
| Q | C | količina elektriciteta |
| y | mV/V | interpolirana vrijednost otklona |
| X | mV/V | izmjerena vrijednost pri rastućoj sili |
| X_a | mV/V | interpolirana vrijednost otklona |
| X' | mV/V | izmjerena vrijednost pri padajućoj sili |
| X_{max} | mV/V | maksimalna izmjerena vrijednost iz nizova 1, 3 i 5 |
| X_{min} | mV/V | minimalna izmjerena vrijednost iz nizova 1, 3 i 5 |
| X_N | mV/V | otklon koji odgovara maksimalnoj sili umjeravanja |
| \overline{X}_r | mV/V | srednja vrijednost očitavanja kod opterećivanja pri različitim položaju |
| \overline{X}_{wr} | mV/V | srednja vrijednost očitavanja kod opterećivanja pri istom položaju |
| σ | N/mm ² | naprezanje |
| ε | mm/mm | istezanje |

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu promatran je utjecaj senzora sile na kvalitetu rezultata mjerenja.

U teorijskom dijelu rada opisano je općenito značenje sile te osnove mjerenja sile. Detaljnije su opisane vrste senzora sile pri mjerenju različitih vrsta opterećenja te su navedene njihove mjerne sposobnosti. Također, dan je osvrt na zahtjeve za materijale koji se koriste za izradu deformacijskog tijela (dinamometra).

U eksperimentalnom dijelu provedeno je umjeravanje deformacijskog tijela (dinamometra) prije i nakon dinamičkog opterećivanja. Umjeravanja sukladno normi HR EN ISO 376:2011 provedena su na referentnom etalonu sile u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Nakon toga napravljena je karakterizacija osnovnog materijala dinamometra te izmjerena tvrdoća. Rezultati mjerenja su obrađeni i analizirani te su doneseni odgovarajući zaključci.

Ključne riječi: sila, senzor sile, deformacijsko tijelo, elektrootporne mjerne trake, umjeravanje

SUMMARY

In this paper, the influence of force sensors on the quality of measurement results is observed.

The theoretical part of the paper describes the general meaning of force and the basics of force measurement. The types of force sensors used in measuring different types of loads were described in more detail and their measurement capabilities were listed. Also, the requirements for the materials used in the fabrication of the deformation elements were given.

In the experimental part, the calibration of the deformation element was provided before and after the exposure to dynamic strain. The calibration according to HR EN ISO 376 standard was carried out on the primary force standard in the Laboratory for Testing Mechanical Properties of the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture. Furthermore, the characterization and the hardness level of the dynamometer base material was carried out.

The measurement results were processed and analyzed from which a conclusion was made.

Key words: force, force sensor, deformation element, electrical resistance measuring strain gauges, calibration

1. UVOD

Sila je u matematici predstavljena kao vektor koji djeluje u određenoj točki. Mjerila sile prema namjeni mogu biti ispitna (kidalice i preše) i etalonska (prijenosni etaloni sile, referentni etaloni sile i nacionalni etaloni sile).

Sile kojima se djeluje na materijale mogu imati različite iznose te mogu djelovati na različite načine. Prema tome razlikuju se različita opterećenja na materijal – vlak, tlak, smik, savijanje, torzija, zatim statičko i dinamičko opterećenje, kratkotrajno i dugotrajno opterećenje itd.

Danas se najviše koriste elastični mjerni uređaji koji se sastoje od deformacijskog tijela (dinamometar), pretvarača veličine deformacije i uređaja za očitavanje vrijednosti.

Postoji mnogo tipova senzora sile koji se mogu koristiti s instrumentima različitih složenosti.

Kako je jedna od ključnih komponenti elastičnog mjernog uređaja deformacijsko tijelo, bitni su materijali koji se koriste za izradu deformacijskog tijela, kao i potrebni zahtjevi na njih.

Za eksperimentalno određivanja deformacijske karakteristike senzora sile korišten je dinamometar proizvođača Zwick/Roell, Xforce HP nazivne veličine 50 N.

Dinamometar se koristi kao sastavni dio kidalice za mjerenje mehaničkih svojstava materijala, proizvoda i poluproizvoda. Kidalice su prvenstveno koriste za statička ispitivanja i postavlja se pitanje da li taj dinamometar može podnijeti dugotrajna dinamička opterećenja.

Prije svega dinamometar je bilo potrebno umjeriti. Umjeravanje, sukladno normi HR EN ISO 376:2011, provedeno je na referentnom etalonu sile u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Posebno je dano težište na značaj interpolacije krivulje umjeravanja te njen utjecaj na klasifikaciju u određeni razred točnosti.

Nakon umjeravanja dinamometar je bio podvrgnut dinamičkom opterećivanju. Kako bi provjerili utjecaj dinamičkog opterećivanja na mjerne rezultate, uređaj je ponovno umjeravan sukladno normi HR EN ISO 376:2011.

Rezultati mjerenja detaljno su obrađeni i analizirani na temelju kojih su doneseni odgovarajući zaključci.

2. SILA I MJERENJE SILE

Sila je jedan od najelementarnijih pojmova u fizici. To je vektorska veličina (određena je pravcem, smjerom i iznosom) kojom se opisuje međudjelovanje tijela i njegove okoline i kojom se objašnjavaju uzroci gibanja. Oznaka za silu je F . Sila je kao fizikalna veličina definirana kao mjera interakcije među tijelima. Prema SI sustavu mjerna jedinica za silu je 1 Newton [N]. To je ona sila koja masi od 1 kg daje ubrzanje od 1 m/s^2 [1]. U praksi je teško postići ubrzanje od 1 m/s^2 djelujući na tijelo mase 1 kg u svrhu realizacije sile od 1 N, tako da se sila ostvaruje podvrgavanjem tijela mase m lokalnom zemljinom gravitacijskom ubrzanju g , čime djeluje na potporu postignutom silom (izraz 2.1)

$$F = m \cdot a \quad (2.1)$$

Na ovakav način ostvaruje se sila u uređajima koji su direktno opterećivani utezima [1, 2].

Osnovna podjela sila [1, 2]:

- Kontaktne - kako im i samo ime govori, rezultat su fizičkog kontakta dvaju tijela. Postoji više vrsta kontaktnih sila – aktivne, reaktivne, vanjske, unutarnje.
- Volumenske (masene) - vezane su uz postojanje polja sila u nekom prostoru. One ne djeluju neposredno na neki dio tijela, a na ostale dijelove posredno, već istovremeno djeluju na sve čestice tijela, tj. prožimaju ga u njegovom cijelom volumenu. U ovu vrstu sila spadaju elektromagnetske, gravitacijska, inercijalne sile.

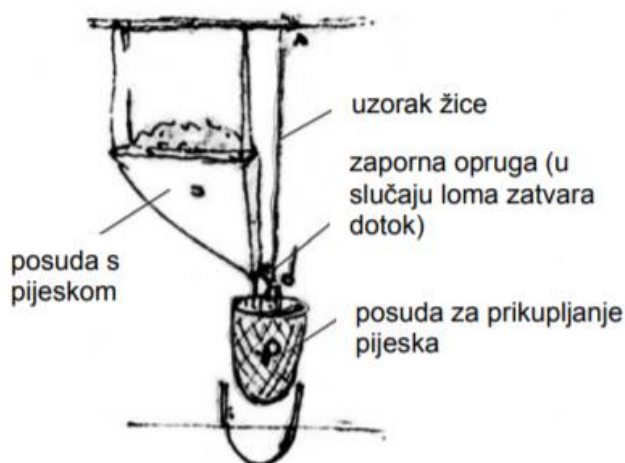
Utjecaj sile na promjenu brzine proučavao je fizičar Newton te svoja zapažanja izrekao u tri zakona (aksioma).

Silu i njezino djelovanje pobliže definiraju tri osnovna zakona – Newtonova zakona [3]:

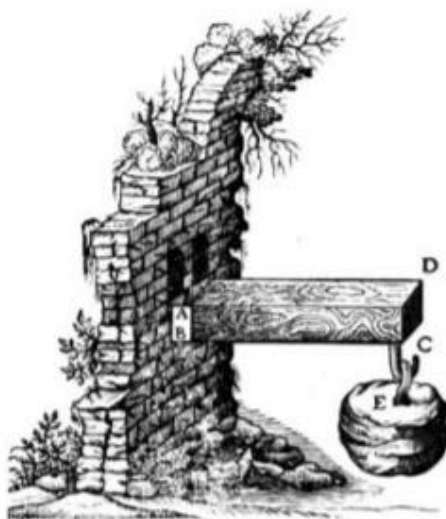
- I. Newtonov zakon: Svako tijelo ostaje u stanju mirovanja ili jednolikog gibanja po pravcu, sve dok neka sila koja djeluje na njega to ne promijeni. Taj se zakon često naziva zakon inercije.
- II. Newtonov zakon: Ubrzanje je proporcionalno sili što djeluje na tijelo, a zbiva se u smjeru djelovanja sile (vidi izraz 2.1).
- III. Newtonov zakon: U međusobnom djelovanju dvaju tijela, ona djeluju jednakim, ali suprotno usmjerenim silama. Taj se zakon često naziva i „princip akcije i reakcije“

2.1. Mjerenje sile

Prvi pisani tragovi o mjerenjima sile datiraju još iz 15.stoljeća kada je umjetnik Leonardo da Vinci izradio studiju o opterećenju savijanjem, koja polazi od pokušaja objašnjenja savijanja užeta preko koluta. Svoja razmišljanja o ispitivanju vlačne čvrstoće žice prikazao je skicom, prikazano na slici 1. Gotovo stotinu godina kasnije Galileo Galilei ispituje nosivost grede jednostrano pričvršćene užetom za zid, što prikazuje slika 2, a svoje rezultate formulirao je u fizikalnoj rečenici: “Čvrstoća raste proporcionalno širini, ali s kvadratom visine grede“. R. Hooke 1678. godine, nakon odgovarajućih pokusa s čeličnim oprugama, spoznaje zakon proporcionalnosti između sile i promjene oblika [4].



Slika 1 Ideja o ispitivanju vlačne čvrstoće žice (Leonardo da Vinci) [4]



Slika 2 Ispitivanje nosivosti grede (Galileo Galilei) [4]

Mjerenje sile predstavlja osnovu za određivanje mehaničkih svojstava nekog materijala ili proizvoda. Mehanička svojstva materijala zauzimaju posebno mjesto među ostalim fizikalnim i kemijskim svojstvima, jer se na osnovu njih dimenzioniraju dijelovi strojeva i uređaja. Samo ispitivanje sile provodi se na uređajima za mjerenje sile a najčešće su to kidalice različitih tipova i oblika. Tijekom uporabe ti uređaji s vremenom gube na preciznosti, zbog čega se kroz jedno umjerno razdoblje provodi periodična kontrola i umjeravanje uređaja za mjerenje sile, kako bi mjerenja bila pouzdana i točna, što je važno sa stanovišta sigurnosti raznih strojnih dijelova.

Sila je matematički predstavljena kao vektor koji djeluje u određenoj točki. Stoga mjerenje sile uključuje određivanje njene veličine i smjera djelovanja. Mjerenje sile može se provesti jednom od ove dvije metode [5]:

- Direktna: obuhvaća izravnu usporedbu s poznatom gravitacijskom silom utega standardne mase. Vrijednosti mase i gravitacije moraju biti točno poznate.
- Indirektna: obuhvaća mjerenje učinka sile na neko tijelo. Primjeri primjene ove metode su:
 - mjerenje akceleracije tijela s poznatom masom koje je izloženo djelovanju sile,
 - mjerenje resultantnog učinka (deformacije) kada se silom djeluje na elastične elemente.

Metoda s elastičnim elementima ima veću primjenu, a razlozi za veću primjenu su:

- a) veliki raspon mjerenja,
- b) mogućnosti kontinuiranog praćenja vrijednosti sile,
- c) jednostavnija uporaba,
- d) njihova otpornost.

Da bi mjerenja bila pouzdana i točna, potrebno je koristiti odgovarajuće mjerne metode i uređaje, koji su pravilno umjereni, te se pridržavati propisanih zahtjeva. Uređaji za mjerenje sile razlikuju se prema metodi mjerenja, konstrukciji, načinu ostvarivanja opterećenja i namjeni. Mjerni uređaji prema namjeni mogu biti:

- ispitni uređaji - oprema za mjerenje sile: kidalice i preše,
- etalonski uređaji - oprema za umjeravanje: nacionalni, referentni i prijenosni etaloni sile.

Ispitni uređaji koriste se u različitim industrijskim granama, a prisutni su u gotovo svim fazama nastanka nekog proizvoda: istraživanju i razvoju, procesu proizvodnje, montaži, ispitivanju i testiranju proizvoda i strojeva, kontroli kvalitete. Etaloni se koriste isključivo za umjeravanje, kako ispitnih uređaja, tako i drugih etalona niže mjeriteljske razine.

Današnji primarni etaloni sile isključivo koriste mehanizam opterećivanja direktno utezima (direktna metoda). Na slici 3 je prikazan jedan takav nacionalni etalon sile Njemačke.



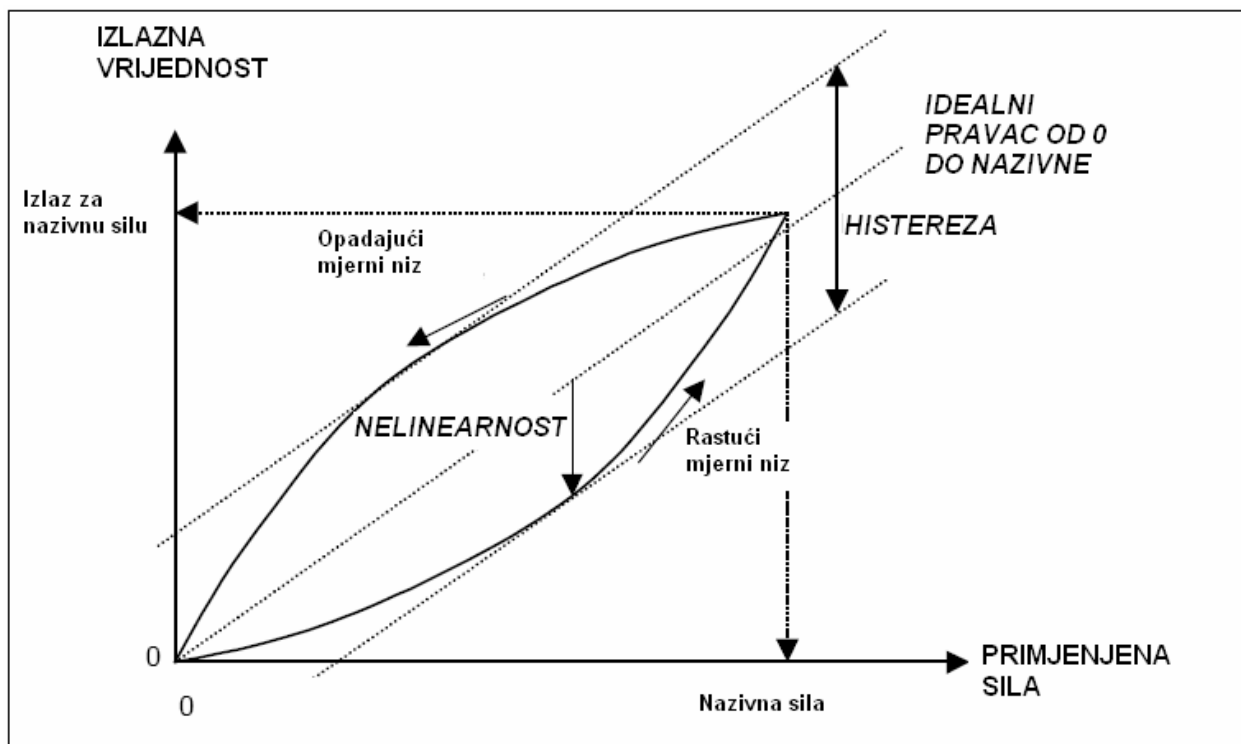
Slika 3 Nacionalni etalon sile Njemačke u PTB-u [4]

2.2. Karakteristike sustava za mjerenje sile

Sustav za mjerenje sile sastoji se od mjernog tijela (npr. elastično tijelo) i dodatnih dijelova:

- za dobivanje očitavanja (npr. mjerno pojačalo),
- za povezivanje komponenti sustava (kabeli),
- za stabilnost sustava (nosači, antivibracijski temelji) itd.

Ponašanje sustava pri mjerenju može se prikazati grafički kao odnos izlazne veličine – očitavanja i ulazne veličine – narinute sile. Takav idealizirani prikaz dan je slikom 4, gdje se narinuta sila povećava od 0 do nazivne sile te potom smanjuje opet do 0.



Slika 4 Idealizirani prikaz ponašanja sustava za mjerenje sile [1]

Iz danog prikaza mogu se vidjeti neke osnovne karakteristike mjernog sustava za silu [6, 1]:

- Nelinearnost je karakteristika svakog mjernog sustava koja pokazuje devijaciju položaja mjernih točaka od idealnog pravca koji povezuje silu od 0 i nazivnu silu ustava.
- Histereza je razlika očitavanja rastućeg i padajućeg mjernog niza kod iste narinute sile.
- Pogreška mjerenja je razlika između očitane vrijednosti i stvarne vrijednosti sile.

Osim već navedenih, svaki mjerni sustav ima i sljedeće karakteristike [6, 1]:

- Ponovljivost je usko slaganje između rezultata uzastopnih mjerenja istih sila u istim mjernim uvjetima.
- Obnovljivost je rasipanje rezultata mjerenja istih sila, ali uz promjenu nekog mjernog

uvjeta (npr. mjeritelja, metode mjerenja i sl.).

- Puzanje je promjena izlaznih podataka uslijed porasta sile ovisna o vremenskom periodu promjene sile.
- Povrat puzanja je promjena izlaznih podataka uslijed smanjenja sile ovisna o vremenskom periodu promjene sile.
- Drift je slabljenje mjeriteljskih značajki mjernog sustava.

Na mjerni sustav i njegovo djelovanje mogu utjecati brojni faktori [6, 1]:

- dugoročna stabilnost samog mjernog sustava koja je određena brojnim faktorima (stabilnost mjernog tijela, skladištenje, transport i upotreba mjernog sustava),
- uvjeti opterećenja: promjena distribucije sile na površinama i dijelovima na koje djeluje opterećenje, narušena aksijalnost djelovanja sile, nepropisno dinamičko opterećenje
- okolišni uvjeti: temperatura, vlaga i tlak zraka, promjene u naponskoj mreži, radio signal.

Ovisno o namjeni i vrsti sustava za mjerenje sile, postoje uvijek određeni zahtjevi za sustav, koji se moraju zadovoljiti kako bi sustav pravilno funkcionirao i davao zadovoljavajuće rezultate mjerenja. Pregled takvih potencijalnih zahtjeva dan je u tablici 1.

Tablica 1 Pregled potencijalnih zahtjeva za sustav mjerenja sile [1]

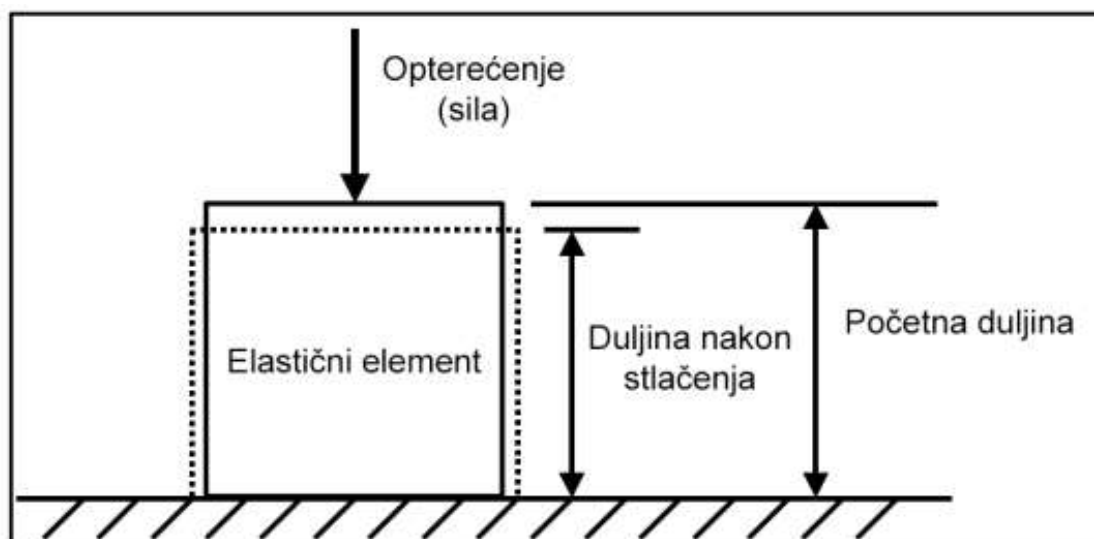
| Primijenjena sila | Uvjeti opterećenja | Umjeravanje |
|-------------------------------------|--------------------------------------|---|
| Najveća dopuštena sila | Otklon | Umjeravanje dinamometra |
| Radni raspon sile | Orijentacija dinamometra | Umjeravanje sustava |
| Nulti pomak sile | Promjene orijentacije dinamometra | Direktno / indirektno umjeravanje |
| Preopterećenje | | |
| Statičko / dinamičko opterećenje | Jednoliki raspored opterećenja | Posrednički etaloni za umjeravanje |
| Zahtijevana nesigurnost | Broj točaka opterećenja | Umjeravanje utezima |
| Bočno opterećenje | Točke fiksiranja | Umjeravanje dodatnih komponenti sustava |
| Koso opterećenje | Direktno opterećenje | |
| Okolišni uvjeti | Dodatni instrumenti | Konfiguracija sustava |
| Temperatura | Analogni / digitalni | Razvodna kutija |
| Vlaga | Rezolucija | Jednostruki most |
| Tlak | Vrsta displeja | Mehanička /električna raspodjela opterećenja |
| Prašina | Dovod struje | |
| Potreba za dodatnim brtvljenjem | Kućište instrumenata | Povezivanje kablovima 7 konektorima |
| | Naponska osjetljivost | |
| Korozivnost atmosfere | Izlazni signali | Dodatni instrumenti |

3. SENZORI SILE

Postoji mnogo tipova senzora sile koji se mogu koristiti s instrumentima različitih složenosti. Prilikom dizajniranja ili navođenja sustava za mjerenje sile aplikacije, korisno je razumjeti osnovni rad senzora sile koji se koristi. U ovom poglavlju opisani su tipovi pretvarača i instrumenata, počevši od tipova koji se najčešće koriste. Sažetak karakteristika različitih uređaja dan je u tablici 2.

Mnogi senzori sile koriste neki oblik elastičnog nosivog elementa ili kombinaciju elemenata. Izlaz može biti u obliku električnog signala kao u zateznim mjernim ćelijama i stanicama za opterećenje tipa LVDT ili mehaničkim indikacijama kao u dokaznim prstenovima i opružnim balansima. Takvi pretvarači generički su poznati kao elastični uređaji i čine većinu svih najčešće korištenih pretvarača sile. Postoji nekoliko različitih elastičnih elemenata pretvarača, ali obično se sastoje od kružnih prstenova, cilindara ili greda [1].

Tip elastičnog uređaja prikazan je na slici 5. Elastični element je u ovom slučaju kružni cilindar izrađen od čelika. Sila se primjenjuje na kraj cilindra, a deformacija se mjeri kao razlika između nekomprimirane i komprimirane duljine. Cilindar se također širi prema van dok se komprimira, a odnos vanjskog širenja i uzdužne kompresije određuje priroda materijala (kroz Poissonov omjer) [1].



Slika 5 Osnovni dijagram elastičnog elementa senzora sile [1]

Svi elastični uređaji dijele ovu zajedničku osnovu, ali metoda mjerenja izobličenja elastičnog elementa znatno se razlikuje. Najčešća metoda je mjerenje uzdužnog i bočnog naprezanja.

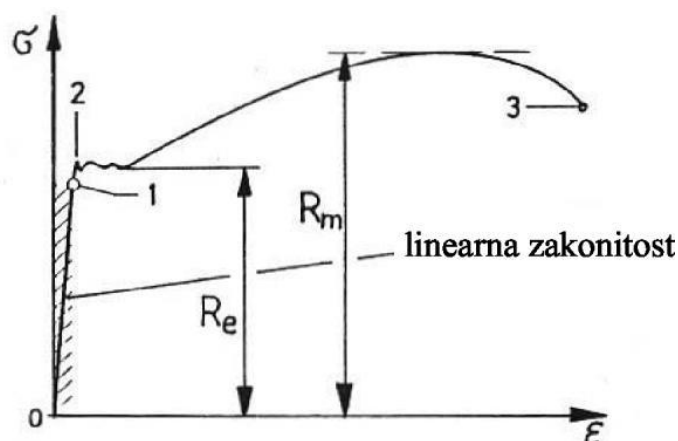
Drugi često korišteni tip mjernog pretvarača sile temelji se na piezoelektričnom fenomenu izloženom određenim kristalnim materijalima gdje se na kristalnoj površini stvara električni naboj, pri čemu je količina naboja proporcionalna primijenjenoj sili. Mnogi drugi fizički odnosi mogu se upotrijebiti u mjernim pretvaračima [1].

Tablica 2 Vrsta i karakteristika senzora sile [1]

| Vrsta pretvornika | Raspon kapaciteta | Odstupanje [%] | Temperaturna osjetljivost [%] |
|-----------------------------------|-------------------|----------------|-------------------------------|
| Poluvodičke trake | 0.01 N do 10 kN | 0.2 do 1 | 0.02 (-40 °C do +80 °C) |
| „Thin film“ trake | 0.1 N do 1 MN | 0.02 do 1 | 0.02 (-40 °C do +80 °C) |
| Mjerne trake sa žicom ili folijom | 5 N do 50 MN | 0.02 do 1 | 0.02 (-40 °C do +80 °C) |
| Piezoelektrične trake | 1.5 mN do 120 MN | 0.3 do 1 | 0.02 (-190°C do +200°C) |
| Hidraulički | 500 N do 5 MN | 0.25 do 5 | 0.05 (+5°C do +40°C) |
| Pneumatski | 10 N do 500 kN | 0.1 do 2 | 0.05 (+5°C do +40°C) |
| Kapacitivne trake | 10 mN do 1 MN | 0.02 do 2 | 0.02 (-40°C do +80°C) |
| Magnetostriktivni | 2 kN do 50 MN | 0.5 do 2 | 0.04 (-40°C do +80°C) |
| Žiroskopski | 50 N do 250 N | 0.001 | 0.0001 (-10 °C do +40 °C) |

3.1. Elektrootporni tenzometri (mjerne trake)

Elektrootpornim mjernim trakama mjeri se deformacija temeljem koje se određuje vrijednost narinute sile. Da bi to bilo moguće ovisnost između sile i deformacije mora biti linearna. Stoga se ova mjerenja provode u linearno-elastičnom području tj. u dijelu gdje vrijedi Hookeov zakon kako je to prikazano slikom 6 koja opisuje ovisnost između naprezanja i istežanja koja kvalitativno odgovara korelaciji između sile i deformacije [7].



Slika 6 Dijagram naprezanje – istezanje za niskouglični čelik [7]

Hookeov zakon za jednoosno stanje naprezanja glasi:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3.1)$$

gdje je:

σ – normalno naprezanje, MPa ili N/mm²;

ε – deformacija ispitnog objekta, $\mu\text{m}/\text{m}$;

E – Youngov modul elastičnosti N/mm² [7].

Linearna $\sigma - \varepsilon$ ovisnost proteže se do vrijednosti granice elastičnosti koja približno odgovara granici razvlačenja (R_e). U elastično plastičnom području pri višim vrijednostima naprezanja ovisnost više nije linearna te u ovom području nije moguće mjeriti putem tenzometarskih traka.

Osnovni princip tenzometrijskog mjerenja leži u činjenici da se deformacijom mjerne trake, koja slijedi deformaciju ispitivanog objekta mijenja električni otpor, a temeljem promjene otpora određuje se deformacija i pripadajuće opterećenje. Djelovanjem vlačnog opterećenja mjerna traka se istovremeno produljuje i sustava (slika 7) te se ovisnost između duljinske (ε) i poprečne deformacije (ε_q) može se iskazati izrazima:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad \varepsilon_q = \frac{\Delta d}{d_0} \quad (3.2)$$

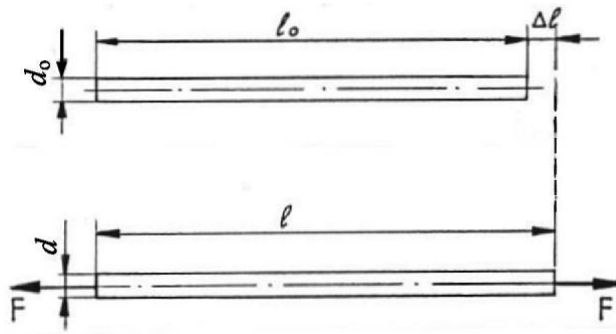
gdje je:

l_0 – početna mjerna duljina žice;

Δl – produljenje žice u smjeru djelovanja opterećenja;

d_0 – početni promjer žice;

Δd – deformacija žice okomito na smjer djelovanja opterećenja [7].



Slika 7 Deformacija žice pod djelovanjem opterećenja [7]

Električni otpor žice u nedeformiranom stanju (R_0) iznosi:

$$R_0 = \rho \cdot \frac{l_0}{S_0} \quad (3.3)$$

gdje je:

ρ - specifični otpor žice, Ωm , a

S_0 - početna površina poprečnog presjeka žice [7].

Promjenom duljine žice mijenja se i njen električni otpor prema izrazu:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (3.4)$$

gdje je:

R – električni otpor deformirane žice, Ω ;

l – duljina deformirane žice, mm;

S – površina poprečnog presjeka deformirane žice, mm^2 [7].

Ako se žica produlji za iznos Δl , istovremeno će se njen poprečni presjek smanjiti za ΔS , odnosno električni otpor promijeniti za iznos ΔR . Relativna promjena električnog otpora može se iskazati jednadžbom:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S} \quad (3.5)$$

ili kao umnožak konstante k i deformacije ε :

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (3.6)$$

Stoga se deformacija trake ε koja je identična deformaciji ispitivanog objekta na tom mjestu određuje iz izraza:

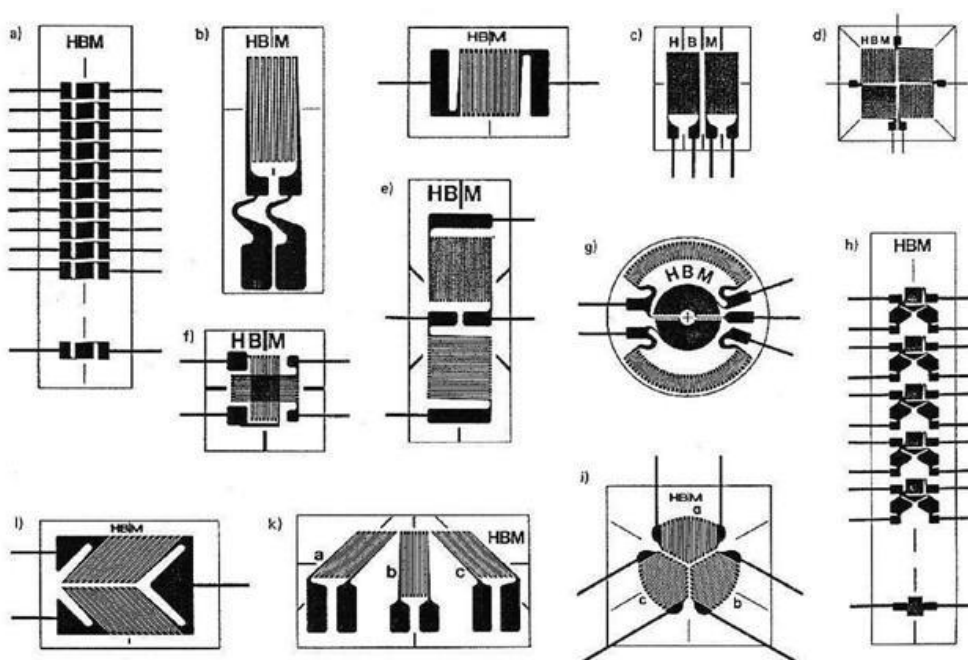
$$\varepsilon = \frac{1}{k} \cdot \frac{\Delta R}{R} \quad (3.7)$$

U praksi se najčešće rabe mjerne trake s vrijednostima faktora k kod metalnih žica u rasponu od 2,0 do 2,1, a kod poluvodiča $k \cong 120$, tablica 3 [7].

Tablica 3 Materijali mjernih traka[7]

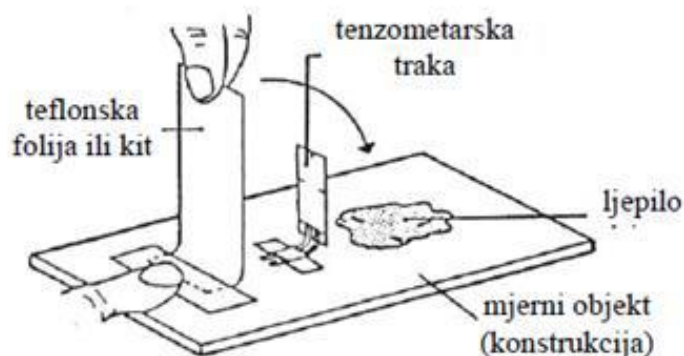
| Oznaka | Sastav | k-faktor | Napomena |
|------------|--|-------------|----------------------------|
| Konstantan | 57÷60 % Cu, 40÷30 % Ni | 2,0 do 2,1 | Najčešće u uporabi |
| Nichrome V | 80 % Ni, 20 % Cr | 2,2 | Za temperature do 650°C |
| Chromel C | 65 % Ni, 20 % Fe, 15 % Cr | 2,5 | |
| Karma | 74 % Ni, 20 % Cr, 3 % Fe, 3 % Al | 2,0 | Vrlo stabilan |
| Izoelastik | 52 % Fe, 36 % Ni, 8 % Cr, V, 0,5 % Mo, 3,5 % Mn, Si, Cu | 3,6 | Za dinamička mjerenja |
| Poluvodič | Silicij, tip p | 110 do 130 | Za laboratorijska mjerenja |
| Poluvodič | Silicij, tip n | -80 do -100 | |

Duljine mjernih traka kreću se od 0,6 pa sve do 120 mm i više, a njihov električni otpor može iznositi 120 Ω , 350 Ω ili 600 Ω . Danas se najčešće rabe trake od konstantana duljine 6 do 10 mm i otpora 120 Ω . Različite izvedbe mjernih traka prikazane su na slici 8.



Slika 8 Različiti tipovi elektrooptpornih mjernih traka i rozeta [7]

Mjerna traka se pričvršćuje na očišćenu površinu ispitnog objekta specijalnim ljepilom kako to prikazuje slika 9. Postavljanje mjerne trake ovisi o smjeru deformacije na površini objekta koji se ispituje. Kod jednoosnih mjernih traka treba paziti da glavno naprezanje djeluje uzduž trake.



Slika 9 Lijepljenje mjerne trake na ispitni objekt [7]

Kod mjerenja na više mjesta konstrukcije, potrebno je sva mjerna mjesta spojiti na preklopnik pomoću kojeg se jedna po jedna tenzometarska traka uključuje u krug mjernog mosta i pri tom bilježi deformacija kod određenog opterećenja. Ove vrijednosti se oduzimaju ili zbrajaju s nul vrijednostima očitanim u neopterećenom stanju i na taj se način određuju vrijednosti deformacija u svim mjernim točkama ispitivanog objekta (npr. na plaštu ili nosačima kuglastog spremnika, cisterni za transport ukapljenih plinova, na dijelovima željezničkih ili cestovnih vozila, na kućištu visokotlačnih ventila, na nosačima mostova, dizalicama i dr). Za mjerenja na konstrukcijama izloženim ravninskom stanju naprezanja (npr. plašt cilindričnog spremnika) potrebna su najmanje dva tenzometra postavljena međusobno okomito i to u slučaju da su poznati glavni pravci naprezanja. Mjerenjem glavnih deformacija ε_1 i ε_2 , pomoću Hookeovog zakona mogu se izračunati glavna naprezanja σ_1 i σ_2 u ispitnoj točki konstrukcije temeljem izraza:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu_p^2} (\varepsilon_1 + \nu_p \cdot \varepsilon_2), \quad (3.8)$$

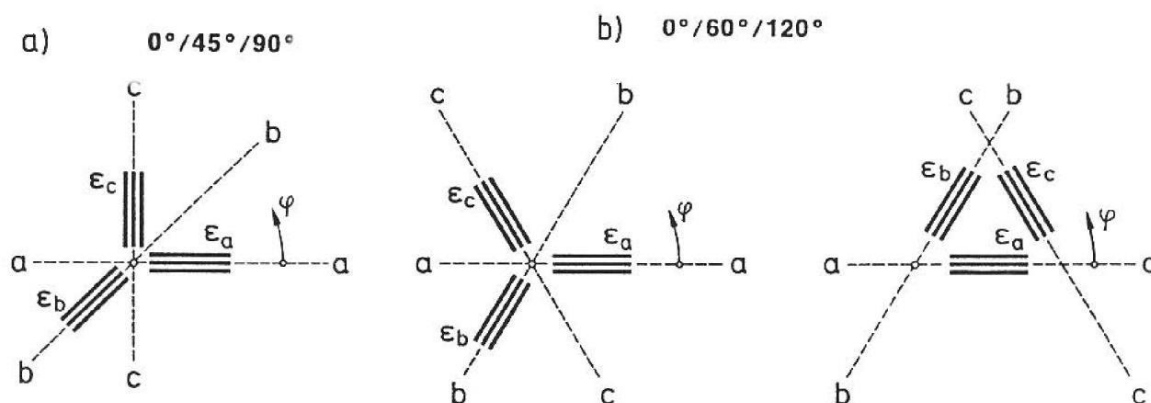
$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu_p^2} (\varepsilon_2 + \nu_p \cdot \varepsilon_1) \quad (3.9)$$

gdje je :

E – modul elastičnosti;

ν_p – Poissonov koeficijent.

Ako u točki konstrukcije u kojoj vlada ravninsko stanje naprezanja nisu poznati pravci glavnih naprezanja, potrebno je mjeriti deformacije u tri smjera. Za takva mjerenja rabe se mjerne rozete tipa: $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ ili $0^\circ/60^\circ/120^\circ$, slika 10. Rozetu čine tri tenzometra postavljena pod određenim kutom [7].

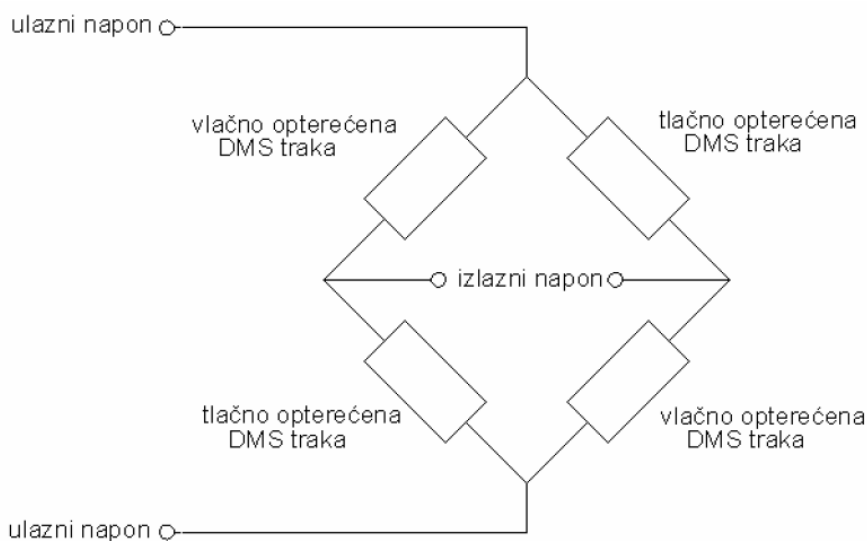


Slika 10 Vrste mjernih rozeta [7]

Za mjerenje zaostalih naprezanja koriste se posebne vrste mjernih rozeta koje se mogu naći u programima specijaliziranih proizvođača mjerne opreme kao što je primjerice renomirana tvrtka HBM ("Hottinger Baldwin Messtechnik") u Njemačkoj.

3.1.1. Mjerenje u spoju Wheatstoneovog mjernog mosta

Za mjerenje promjene otpora tenzometra ΔR upotrebljavaju se najčešće dva instrumenta: potenciometar i mjerni most. Mjerni signal pretvornika (tenzometarska mjerna traka) dovodi se u mosni spoj, kako bi se izmjerila vrijednost promijene napona. Ona se određuje iz razlike potencijala između spojišta grana mosnog spoja. U tu se svrhu mogu koristiti svi električni mosni spojevi koji se koriste za mjerenje električnog otpora, a u primjeni se najčešće nalazi Wheatstoneov most prikazan na slici 11. Ako se na Wheatstone-ov most narine neki ulazni napon zbog deformacije mjernih traka i promjene njihova otpora mijenja se vrijednost izlaznog napona te ova promjena napona predstavlja izlazni signal koji se dodatno pojačava uz pomoć mjernog pojačala. Za spajanje traka u Wheatstone-ov most koriste se aktivne mjerne trake nalijepljene na predmet ispitivanja ili dinamometar, kompenzirajuće trake (pasivni elementi) i metalni (folijski) otpornici koji su velike točnosti i stabilnosti. Ovisno o broju aktivnih mjernih traka u Wheatstone-ovom mostu razlikujemo sljedeće kombinacije: 1/4-ski, 2/4 -ski i puni most s 4 aktivne trake[7].



Slika 11 Wheatstoneov mjerni most

3.2. Piezoelektrični pretvarači sile

Za rad piezoelektričnih senzora iskorišten je princip piezoelektričnog efekta. Piezoelektrični efekt otkrili su braća Curie. Oni su primijetili da izvjesni dielektrični materijal monokristalne strukture, kada se mehanički napreže, razvija električni potencijal.

Ako se na materijal koji ima ove osobine djeluje silom F kristalna rešetka će se deformirati. Uslijed deformacije rešetke javit će se piezoelektricitet, čiji napon se mjeri na elektrodama postavljenim na površine kristala. Količina elektriciteta ovisi o sili kojom se rešetka deformira:

$$Q = d \cdot F \quad (3.10)$$

gdje je:

F -sila deformiranja

d -konstanta kristala [8].

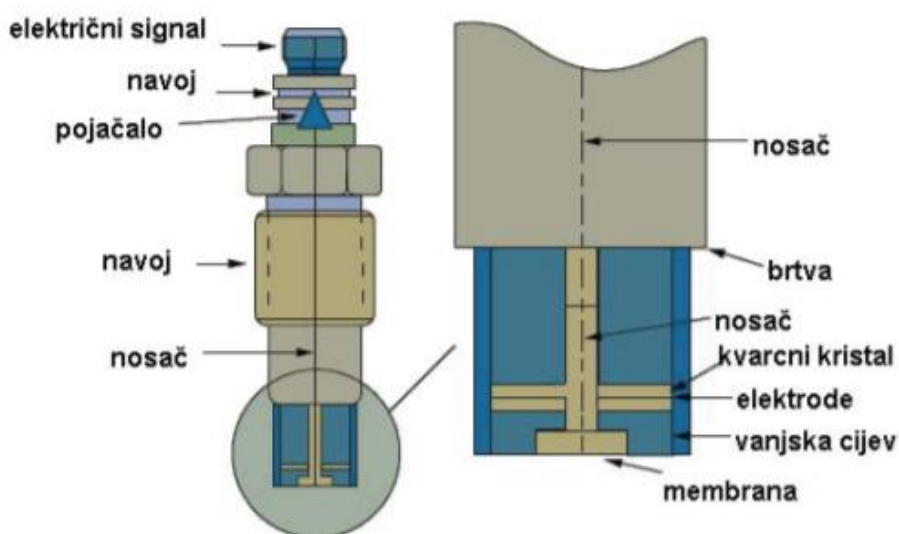
Kada se na određene kristalne materijale narine sila, na površini kristala nastaju električni naboji proporcionalni promjeni primijenjene sile. Da biste iskoristili uređaj pojačalo naboja treba dati signal koji je proporcionalan primijenjenoj sili i dovoljno velik da se mjeri. Prvi pretvarači koji su primijenili piezoelektrični efekt za mjerenje koristili su prirodni kvarc, no danas se koristi uglavnom umjetni kvarc. Zbog toga su ovi uređaji često poznati i kao kvarcni pretvarači sile.

Piezoelektrični kristalni senzori razlikuju se od većine ostalih osjetilnih tehnika jer nije potrebno napajanje, deformacija za generiranje signala je vrlo mala, što ima prednost odziva visoke frekvencije mjernog sustava bez uvođenja geometrijskih promjena na putanju za mjerenje sile [8]. Na slici 12 prikazani su industrijski piezoelektrični podmetači za opterećenje.



Slika 12 Industrijski piezoelektrični podmetači za opterećenje [1]

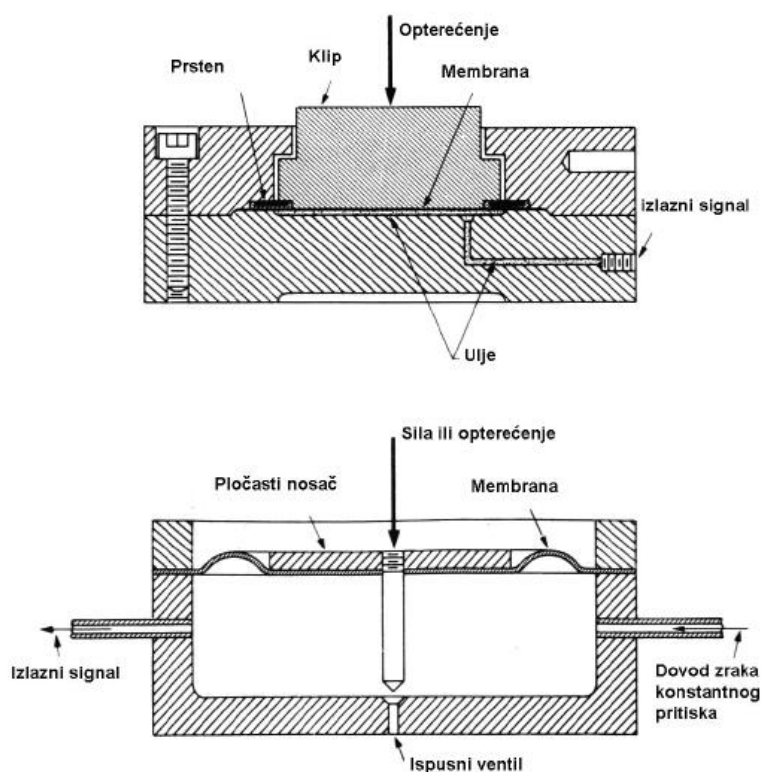
Piezoelektrični senzori omogućuju mjerenje vlačne i tlačne sile. Potrebno je osigurati optimalnu linearnost, a senzor mora biti umjeren nakon postavljanja. Proširenje ovog načela je upotreba igle za mjerenje sile koja je smještena unutar strukture stroja i reagira na sile unutar strukture. Slika 13 prikazuje piezoelektrični senzor. Piezoelektrični senzori prikladni su za mjerenja u laboratorijima i industrijskim uvjetima. Raspon mjerenja je vrlo širok i pretvarači podnose veliko preopterećenje (obično $> 100\%$ izlaza u punoj skali). Male dimenzije senzora, veliki raspon mjerenja i robusno pakiranje čine ih vrlo jednostavnim za korištenje. Mogu raditi u širokom temperaturnom rasponu, čak i pri temperaturama do $350\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Slika 13 Piezoelektrični senzor [8]

3.3. Hidraulički i pneumatski pretvarači sile

Ako se sila nanosi na jednu stranu klipa ili membrane, a na drugoj strani djeluje određeni pritisak, treba uspostaviti ravnotežu sila. Na tom principu rade hidraulički i pneumatski pretvarači za silu, što prikazuje slika 14 [8].



Slika 14 Presjeci hidraulične i pneumatske ćelije za silu [8]

3.4. Druge vrste sustava mjerenja sile

3.4.1. Elastični uređaji

„Loading column“ (nema adekvatnog prijevoda) vjerojatno je najjednostavniji elastični uređaj, jer je to jednostavno metalni cilindar podvrgnut sili duž svoje osi. U ovom se slučaju duljina cilindra mjeri izravno pomoću mjerača ili druge tehnike, a procjena sile može se izvršiti interpoliranjem između duljina izmjerenih za prethodno primijenjene sile. Ovi pretvarači imaju prednost u tome što su jednostavni i robusni, ali glavni nedostatak je snažan utjecaj temperature na izlazu. Takve metode nalaze primjenu u nadgledanju sila kod dugotrajnih praćenja opterećenja na mostnim konstrukcijama i drugim sličnim primjenama.

Linearni varijabilni diferencijalni pretvarači (LVDT) elektromehanički pretvarač koji pravocrtne pomake objekta za koji je mehanički pričvršćen pretvara u odgovarajući električni signal. Ovisno o izvedbi, moguće je mjerenje pomaka od tisućinke milimetra pa sve do 0,5m.

LVDT je u osnovi transformator koji daje izlazni napon izmjenične struje kao funkciju pomaka zasebne pokretne magnetske jezgre. Nedostatak trenja i mala masa jezgre rezultiraju visokom rezolucijom i niskom histerezom, što ovaj uređaj čini idealnim za dinamičke primjene mjerenja.

Kapacitivne stanice za opterećenje koriste senzor kapacitivnosti da osjetite pomake elastičnog elementa. U većini slučajeva senzor se sastoji od dvije paralelne ploče koje stoje jedna nasuprot drugoj. Promjenom duljine opružnog člana nastaje promjena u razmaku između dviju ploča, a time i promjena električne kapacitivnosti. U slučaju malih vaga, poput domaćih vaga, opruga također pruža paralelno vođenje platforme vage.

Optički mjerač naprezanja mogu se oblikovati na način sličan mjeraču naprezanja žica pomoću optičkih vlakana. Otklon elastičnog člana sile s optičkim mjeračem naprezanja, vezan za njega, rezultirat će promjenom duljine optičkih vlakana. Ako se monokromatska svjetlost koristi za napajanje dva mjerila optičkog naprezanja koja imaju različitu razinu naprezanja, tada je fazna razlika između dva snopa koja izlaze iz mjerača mjera primijenjene sile.

Interferencijalno-optička opterećenja stanica koristi se metoda mjerenja pomaka visoke rezolucije. Opruga s vilicom deformirana je silom, a deformacija je u području 40 μm , a promjena otvora vilice mjeri se Michelson-ovim interferometrom.

Za istu rezoluciju, maksimalna elastična deformacija, a s njom i naprezanje materijala, ne moraju biti toliko velike kao u slučaju ćelije opterećenja mjerača naprezanja. Deformacijski element izrađen je od kvarca s vrlo malom temperaturnom ovisnošću. Bilo koja preostala pogreška može se ispraviti uporabom osjetnika temperature i računala. Ovi sustavi imaju ograničen temperaturni raspon od 5 ° C do 40 ° C, histereza i puzanje su posebno mali.

3.4.2. Vibracijski elementi

Senzor sile s vibrirajućom žicom sastoji se od napete feromagnetske žice koja se zavojnicom pobudi u poprečne vibracije. Ove se vibracije detektiraju pomoću sabirne zavojnice. Oba svitka imaju stalne magnetske jezgre i nakon što je žica uzbuđena na svoju rezonantnu frekvenciju,

ona se održava na toj frekvenciji povezivanjem dviju zavojnica kroz pojačalo da bi formirao samooscilirajući sustav. Svaka rezonantna frekvencija mjeri napetost žice i, prema tome, primjenjuje silu u tom trenutku. Prednost vibrirajućeg žičnog senzora sile je njegov izravni frekvencijski izlaz s kojim se može upravljati digitalnim krugom čime se eliminira potreba za analogno-digitalnim pretvaračem, što daje izlaz visoke razlučivosti. Princip vibracijske žice koristi se za mjerenje sile u tlačnim pretvaračima i razini naprežanja u primjeni građevinarstva.

3.4.3. Magnetno-elastični uređaji

Magnetno-elastični sustav za mjerenje sile temelji se na dvije elektromagnetske zavojnice, smještene pod pravim kutom jedne prema drugoj, postavljene na deformacijsko tijelo. Jedna zavojnica (primarna) isporučuje se s izmjeničnom strujom; druga (sekundarna) djeluje kao mjerni svitak. Budući da su pod pravim kutom, ne postoji magnetska spojka između zavojnica sve dok na tijelu pretvarača nema opterećenja. Ako se učitava tijelo pretvarača, obrazac polja se mijenja. Propusnost čelika smanjuje se u smjeru sile i povećava se okomito na njega. Zbog čvrste konstrukcije, visoke razine signala i malog unutarnjeg otpora, magnetno-elastična ćelija za opterećenje može se koristiti u grubim i električno poremećenim okruženjima, poput valjaka. Nominirani kapacitet ovih uređaja kreće se u rasponu od 2 kN do 5 MN.

3.4.5 Plastična deformacija

Plastična deformacija može se koristiti kao metoda trajnog bilježenja primijenjene sile. Sila se primjenjuje na mali (obično metalni) element, koji trpi trajnu deformaciju izvan granice elastičnosti materijala. Deformacija određene veličine, oblika i svojstava materijala može se ilustrirati ispitivanjem sličnih elemenata.

4. DEFORMACIJSKO TIJELO

Dinamometar je mjerni instrument koji omogućuje mjerenje sile. Razlikuje se više vrsta dinamometara ovisno o njihovoj izvedbi, smjeru djelovanja opterećenja (vlak, tlak) i načinu mjerenja deformacije. Dinamometri mogu mjeriti kako vlačnu tako i tlačnu silu, a ostvarene deformacije očituju se u obliku [9]:

- promjene volumena;
- promjene duljine;
- električne ili magnetne promjene.

Dinamometar je u principu građen od tri osnovna dijela:

- kućište;
- elastični element;
- element s određenim električnim otporom.

Funkcije kućišta jesu slijedeće:

- omogućuje montažu dinamometra na druge uređaje;
- osigurava pravilan prijenos sile;
- štiti unutarnje elemente od štetnih vanjskih utjecaja;
- onemogućuje ometanje mjerenja nepoželjnim silama.

Različite vrste kućišta za učitavanje prikazane su na slici 15.



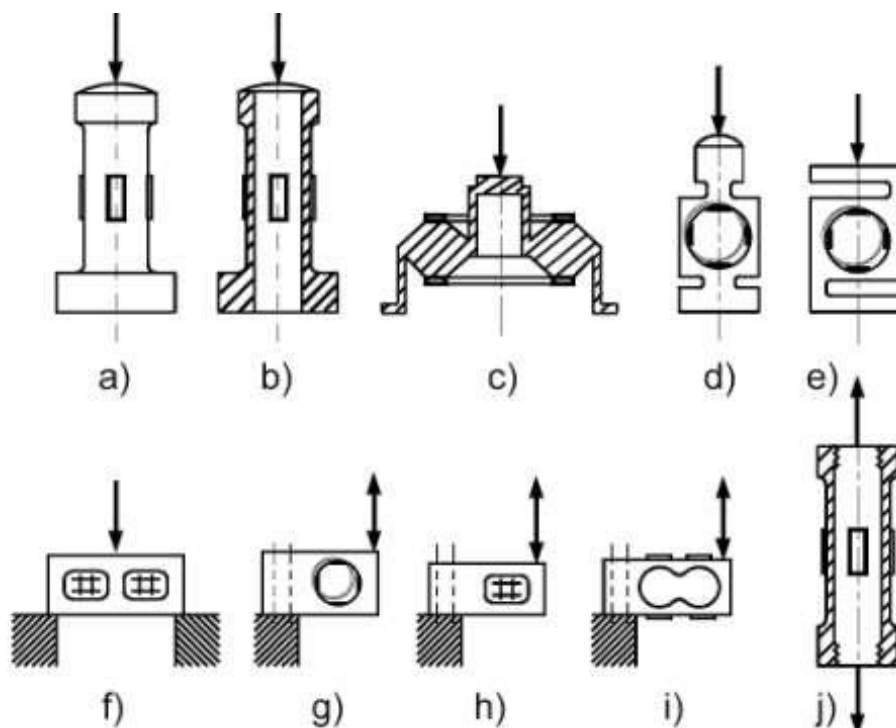
Slika 15 Različite vrste kućišta [1]

Rad dinamometara može biti zasnovan na različitim principima. Dinamometri prema principu rada mogu biti [10]:

- mehanički,
- električni,
- hidraulični,
- pneumatski.

4.1. Elastični element

Oblik elastičnih elemenata koji se koristi u dinamometrima ovisi o brojnim čimbenicima, uključujući raspon sile koja se mjeri, dimenzijske granice, zahtijevane performanse i troškove proizvodnje. Slika 16 prikazuje izbor različitih elastičnih elemenata i daje njihove tipične nazivne vrijednosti. Svaki je element dizajniran za mjerenje sile koja djeluje duž njegove glavne osi, a na njega ne mogu utjecati druge sile, kao što su bočna opterećenja. Strelice na slici 16 označavaju glavnu os svakog elementa [1].



Slika 16 Primjeri različitih deformacijskih tijela [1]

Elastični elementi razlikuju se po obliku, što može utjecati na njihovu točnost i raspon sile koja se može mjeriti pomoću njih. Nazivi i njihovi radni kapaciteti navedeni su prema prethodnoj slici:

- a) tlačni cilindar – 50 kN do 50 MN
- b) tlačni cilindar (šuplji) – 10 kN do 50 MN
- c) torzijski prsten – 1 kN do 5 MN
- d) prstenasti – 1 kN do 1 MN
- e) gredni S-tip (savojni ili smični) – 50 N do 50 kN
- f) gredni (na dva oslonca, smični) – 50 N do 50 kN
- g) pojednostavljeni gredni (smični) – 500 N do 50 kN
- h) gredni (smični) – 1 kN do 500 kN
- i) gredni (savojni) – 5 N do 10 kN
- j) torzijski cilindar – 50 kN do 50 MN

Oblik (konstrukcija) elastičnog elementa ovisi o različitim faktorima kao što su raspon sile koja se mjeri, dimenzijska ograničenja, zahtijevana preciznost mjerenja i troškovi proizvodnje. Materijali koji se koriste kod izrade elastičnih elemenata najčešće su alatni čelici, nehrđajući čelici, aluminij ili legure bakra i berilija. Najvažnije svojstvo materijala je njegova elastičnost, tj. linearna veza između naprezanja i deformacije. Materijal elastičnog elementa također mora omogućiti ponovljivost između ciklusa opterećenja silom, kako bi se osigurala pouzdanost mjernog sustava i mora ostati u području elastične deformacije.

5. UMJERAVANJE PRIJENOSNIH ETALONA SILE PREMA NORMI HR EN ISO 376:2011

Pravila za umjeravanje etalona prema normi HR EN ISO 376:2011 odnose se na one etalone koji se koriste za umjeravanje uređaja za jednoosna tlačna i vlačna naprezanja. Također, u tim etalonima sila se mjeri indirektno, i to na temelju mjerenja elastične deformacije dinamometra. Prema ovoj normi pod pojmom etalona smatra se čitav sklop koji se sastoji od dinamometra, pretvarača signala i uređaja za očitavanje. Osnovne oznake značajne u postupku umjeravanja prijenosnog etalona prikazane su tablicom 4.

Tablica 4 Veličine pri umjeravanju prijenosnih etalona [13]

| Simbol | Jedinica | Veličina |
|-----------|----------|---|
| b | % | relativna pogreška ponovljivosti s rotacijom |
| b' | % | relativna pogreška obnovljivosti bez rotacije |
| c | % | relativna pogreška puzanja |
| F_f | N | nazivna sila dinamometra |
| F_N | N | maksimalna sila umjeravanja |
| f_c | % | relativno interpolacijsko odstupanje |
| f_0 | % | relativno odstupanje nul vrijednosti |
| i_f | mV/V | očitanje nakon rasterećivanja |
| i_0 | mV/V | očitanje prije opterećivanja |
| i_{30} | mV/V | očitanje 30 s nakon postizanja zadane sile |
| i_{300} | mV/V | očitanje 300 s nakon postizanja zadane sile |

| | | |
|---------------------|------|---|
| r | N | rezolucija indikatora |
| v | % | relativna pogreška histereze |
| X | mV/V | izmjerena vrijednost pri rastućoj sili |
| X_a | mV/V | interpolirana vrijednost otklona |
| X' | mV/V | izmjerena vrijednost pri padajućoj sili |
| X_{max} | mV/V | maksimalna izmjerena vrijednost iz nizova 1, 3 i 5 |
| X_{min} | mV/V | minimalna izmjerena vrijednost iz nizova 1, 3 i 5 |
| X_N | mV/V | Otklon koji odgovara maksimalnoj sili umjeravanja |
| $\overline{X_r}$ | mV/V | srednja vrijednost očitavanja kod opterećivanja pri različitom položaju |
| $\overline{X_{wr}}$ | mV/V | srednja vrijednost očitavanja kod opterećivanja pri istom položaju |

Svi dijelovi etalona moraju biti zasebno identificirani. Za dinamometar je potrebno naznačiti nazivnu silu. Dinamometar i dijelovi za povezivanje s opterećenjem moraju biti konstruirani i dimenzionirani tako da osiguraju aksijalno djelovanje bilo vlačne, bilo tlačne sile.

Deformacija opterećenog elastičnog elementa može se mjeriti mehanički, električki, optički ili na neki drugi način, ali s odgovarajućom točnošću i stabilnošću. Način i kvaliteta mjerenja deformacije mogu utjecati na rezultate mjerenja, a time i na klasifikaciju etalona sile.

Osim samog postupka umjeravanja, ovaj standard klasificira ove instrumente prema kriterijima preciznosti. Takvi se kriteriji utvrđuju na temelju mjeriteljskih karakteristika registriranih tijekom umjeravanja, za koje su definirane dopuštene maksimalne vrijednosti. Isti postupak je usvojen za netočnost umjeravanih sila [14].

- Klasa 00 prema normi HR EN ISO 376:2011

Rezervirano je za najviše mjerne standarde

- Klasa 0.5 prema normi HR EN ISO 376:2011

Klasa 0.5 odnosi se na dinamometre koji se koriste za umjeravanje najboljih uređaja za precizno mjerene sile.

- Klase 1 i 2 prema normi HR EN ISO 376:2011

Ove su klase rezervirane za dinamometre koji se koriste za provjeru običnih ili terenskih uređaja za ispitivanje.

HR EN ISO 376:2011 jedina je norma na međunarodnoj razini koji obuhvaća umjeravanje dinamometra. Njegov izvorni opseg proširio se i na nekoliko drugih aspekata, kao što su nemetalni materijali, tvrdi materijali, beton itd [14].

5.1. Karakteristike etalona

Svi dijelovi etalona moraju biti zasebno identificirani, pri čemu je za dinamometar važno naznačiti nazivnu silu. Dinamometar i dijelovi za povezivanje sa sustavom za opterećivanje moraju biti konstruirani i dimenzionirani tako da osiguraju aksijalno djelovanje sile (bilo vlačne, bilo tlačne).

Deformacija opterećenog elastičnog elementa može se mjeriti mehanički, električki, optički ili na neki drugi način, ali s odgovarajućom točnošću i stabilnošću. Način i kvaliteta mjerenja deformacije mogu utjecati na rezultate mjerenja, a time i na klasifikaciju etalona sile [13].

5.2. Priprema za umjeravanje

Prije umjeravanja potrebno je provjeriti da li se etalon uopće može umjeriti. To se može ispitati preliminarnim testovima kao što je test preopterećenjem. U tome se testu četiri puta zaredom etalon izlaže preopterećenju koje bi trebalo biti veće od nazivne sile najmanje 8%, a najviše 12%. Trajanje preopterećenja iznosi od 1 do 1,5 minuta. Barem jedan takav test treba izvršiti proizvođač prije nego što se etalon počne koristiti.

Dalje treba osigurati:

- kod vlačnih ispitivanja – da priključni dijelovi mogu osigurati aksijalnu silu,
- kod tlačnih ispitivanja – da nema interakcije između dinamometra i njegove potpore na uređaju na kojem se umjerava etalon.

Za električne uređaje treba provjeriti da varijacija linijskog napona od $\pm 10\%$ neće imati značajni utjecaj na umjeravanje [13].

5.3. Rezolucija (r)

Rezolucija je ona minimalna promjena ulazne veličine za koju se još detektira promjena izlazne veličine. Kod analogne skale udaljenosti susjednih oznaka na skali trebaju biti jednake, a debljina kazaljke i oznaka približno ista. Rezolucija treba biti određena iz omjera širine kazaljke i središnje udaljenosti dvije susjedne oznake na skali (preporučeni su omjeri: 1:2, 1:5, 1:10). Rezolucija treba biti prebačena u mjernu jedinicu za silu [13].

5.4. Minimalna sila (F_{min})

S obzirom na točnost kojom se može očitati otklon na uređaju u toku umjeravanja ili u toku daljnje upotrebe, minimalna sila F_{min} koja se primjenjuje na etalonu mora zadovoljiti 2 uvjeta: Tablica 5 prikazuje klase etalona po minimalnoj sili.

1. Za određenu klasu mora iznositi:

Tablica 5 Klase etalona [13]

| Klasa etalona | F_{min} |
|---------------|----------------------|
| 00 | $\geq 4000 \times r$ |
| 0,5 | $\geq 2000 \times r$ |
| 1 | $\geq 1000 \times r$ |
| 2 | $\geq 500 \times r$ |

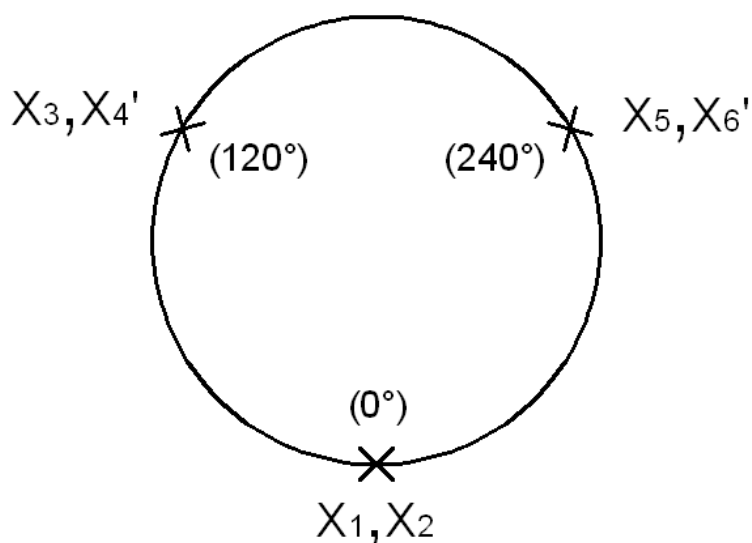
2. Minimalna sila mora biti jednaka ili veća od $0,02 F_f$ - maksimalnog kapaciteta dinamometra.

5.5. Postupak umjeravanja

Prije nego što se etalon optereći silama za umjeravanje u zadanom smjeru (tlak ili vlak), potrebno ga je predopteretiti. Na uređaj se treba tri puta djelovati maksimalnom silom, svaki puta u trajanju od 1 do 1,5 minute. Predopterećenja moraju biti u istom smjeru i moraju djelovati na istom položaju kao i opterećenje, tj. sila koja slijedi nakon njih. Prije svake promjene smjera opterećenja u toku umjeravanja, potrebno je predopteretiti etalon u tom novom smjeru.

Silama za umjeravanje etalon se opterećuje u ukupno 6 mjernih nizova, što je prikazano na slici 17. Prva dva niza sila (X_1 i X_2) su nizovi rastućih iznosa sila, bez da se mijenja položaj dinamometra (tj. položaj na 0°). Zatim slijede još četiri niza opterećenja.

Treći niz (X_3) je rastući, a četvrti (X_4') padajući, oni imaju isti korak, a određuju se za položaj dinamometra zarotiranog za 120° . Zatim se dinamometar rotira na položaj 240° od početnog te se opterećuje petim nizom rastućih sila (X_5) i šestim nizom padajućih (X_6') [13].



Slika 17 Pozicije dinamometra pri umjeravanju prema HR EN ISO 376:2011 [13]

Da bi se mogla odrediti interpolacijska krivulja za rezultate umjeravanja, potrebno je po svakom mjernom nizu imati barem osam mjernih točaka sila različitih iznosa, a one trebaju biti što ravnomjernije raspoređene unutar raspona sile u mjernom nizu.

U svakom mjernom nizu bilježe se i nulta očitavanja (kad ne djeluje sila), i to prije početka djelovanja sile i nakon djelovanja sile najmanje 30 sekundi, a između susjednih nizova mjerenja treba pričekati barem 3 minute.

Značajnija promjena nultih očitavanja može ukazivati na plastičnu deformaciju uslijed preopterećenja dinamometra. Vremenski intervali između mjernih točaka unutar jednog mjernog niza trebaju biti što sličniji, a očitavanja bi se trebala raditi nakon najmanje 30 sekundi od početka djelovanja opterećenja.

U toku umjeravanja uređaji s odvojivim dijelovima trebali bi se barem jednom rastaviti, uglavnom između drugog i trećeg mjernog niza, a nakon sastavljanja potrebno je ponovno predopteretiti uređaj maksimalnom silom i to barem tri puta. Temperatura bi u toku umjeravanja trebala biti između 18° i 28° C i stabilna s promjenom najviše $\pm 1^\circ$ C. Temperaturu treba zabilježiti te treba omogućiti etalonu da postigne stabilnu temperaturu [13].

5.6. Kriteriji za ocjenjivanje etalona

Relativna pogreška obnovljivosti s rotacijom (b)

Računa se za svaku silu umjeravanja, na temelju mjernih nizova 1, 3 i 5, iz sljedećih izraza [13]:

$$b = \left| \frac{X_{max} - X_{min}}{\bar{X}_r} \right| \times 100 \text{ [\%]}, \quad (5.1)$$

pri čemu je

$$\bar{X}_r = \frac{X_1 + X_3 + X_5}{3} \text{ [\%]}. \quad (5.2)$$

Relativna pogreška ponovljivosti bez rotacije (b')

Računa za svaku silu umjeravanja, na temelju nizova 1 i 2, prema izrazu [13]:

$$b' = \left| \frac{X_2 - X_1}{\bar{X}_{wr}} \right| \times 100 \text{ [\%]}, \quad (5.3)$$

pri čemu je

$$\bar{X}_{wr} = \frac{X_1 + X_2}{2} \text{ [\%]}. \quad (5.4)$$

Relativno interpolacijsko odstupanje (f_c)

Određuje se za polinom 1., 2., 3. (ili višeg stupnja) koji određuje ovisnost izlaznih podataka o sili, a dobiven je iz rezultata mjerenja. Iz te vrijednosti može se procijeniti koliko dobro točke interpolirane polinomom X_a aproksimiraju stvarne podatke umjeravanja. Ona se računa iz izraza [13]:

$$f_c = \frac{\bar{X}_r - X_a}{X_a} \times 100 \text{ [\%]} \quad (5.5)$$

Relativno odstupanje nul vrijednosti (f_0)

Dobiva se iz očitavanja nul vrijednosti prije i poslije svakog mjernog niza, i to oko 30 sekundi nakon rasterećenja, prema izrazu [13]:

$$f_0 = \frac{i_f - i_0}{X_N} \quad (5.6)$$

Kod klasifikacije etalona u razmatranje se uzima najveće dobiveno odstupanje nul vrijednosti.

Relativna pogreška histereze (v)

Računa se pri umjeravanju za susjedne mjerne nizove kod kojih je jedan rastući, a drugi opadajući. Histereza znači da pri istoj ulaznoj sili, izlazne vrijednosti neće biti jednake u rastućem i u opadajućem nizu. Iz razlike tih vrijednosti računa se relativna greška histereze [13]:

- za mjerne nizove s rotacijom dinamometra za 120° :

$$v_1 = \left| \frac{X'_4 - X_3}{X_3} \right| \times 100 \text{ [%]} \quad (5.7)$$

- za mjerne nizove s rotacijom dinamometra za 240° :

$$v_2 = \left| \frac{X'_6 - X_5}{X_5} \right| \times 100 \text{ [%]} \quad (5.8)$$

- konačna vrijednost pri nekoj sili je njihova aritmetička sredina:

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \text{ [%]} . \quad (5.9)$$

Relativna pogreška puzanja (c)

Računa razliku rezultata i_{30} dobivenu u 30 s i i_{300} dobivenu 300 s nakon primjene ili uklanjanja najveće sile kalibracije i izražava ovu razliku kao postotak maksimalnog otklona:

$$c = \left| \frac{i_{300} - i_{30}}{X_N} \right| \times 100 \text{ [%]} . \quad (5.10)$$

5.7. Klasifikacija posredničkih etalona

Mjerno područje za koji se klasificira uređaj određuje se tako da se u obzir uzima svaka mjerna točka umjeravanja, jedna za drugom, počevši od maksimalne pa prema minimalnoj. Raspon klasifikacije završava kod zadnje sile za koju su još zadovoljeni uvjeti klasifikacije, a on bi trebao pokriti područje od barem 50 – 100% nazivne sile F_N [13].

Prijenosni etalon može biti klasificiran ili za točno određene vrijednosti sile ili za interpolirane vrijednosti sile. Kod etalona za točno određene vrijednosti sile kriteriji za klasifikaciju su:

- relativne greška ponovljivosti i obnovljivosti,
- relativno odstupanje nul vrijednosti,
- relativna greška histereze.

Kod etalona za interpolirane vrijednosti sile kriteriji za klasifikaciju su:

- relativne greška ponovljivosti i obnovljivosti,
- relativno interpolacijsko odstupanje,
- relativno odstupanje nul vrijednosti,
- relativna greška histereze.

Prema iznosima zadanih kriterija određuje se kojoj od četiri klase pripada umjeravani prijenosni etalon. Da bi etalon u nekom mjernom području pripadao određenoj klasi, moraju istovremeno biti zadovoljeni baš svi kriteriji. U tablici 6 prikazane su četiri moguće klase umjerenih prijenosnih etalona.

Tablica 6 Prikaz četiri klase umjerenih prijenosnih etalona [13]

| Klasa | Relativne pogreške, % | | | | | Nesigurnost primjenjene sile umjeravanja, % (za $k = 2$) |
|------------|-----------------------|-------|-------------|-------------|-------|---|
| | b | b' | f_c | f_0 | ν | |
| 00 | 0,05 | 0,025 | $\pm 0,025$ | $\pm 0,012$ | 0,07 | $\pm 0,01$ |
| 0,5 | 0,10 | 0,05 | $\pm 0,05$ | $\pm 0,025$ | 0,15 | $\pm 0,02$ |
| 1 | 0,20 | 0,10 | $\pm 0,10$ | $\pm 0,050$ | 0,30 | $\pm 0,05$ |
| 2 | 0,40 | 0,20 | $\pm 0,20$ | $\pm 0,10$ | 0,50 | $\pm 0,10$ |

6. EKSPERIMENTALNI DIO

Dinamometar Xforce HP se koristio na kidalici za ispitivanje materijala. S vremenom je pokazivao naznake da se nul signal mijenjao nakon dužih dinamičkih ispitivanja što je utjecalo na rezultate danjih ispitivanja. Dinamometar skinut s kidalice i spojen s DPM 40 najpreciznijem mjerni pojačalom kako bi se mogle identificirati i najmanje promjene na dinamometru.

Eksperimentalni dio projekta se radio kroz nekoliko faza, koje će biti opisane u nastavku rada.

Faze su sljedeće:

1. Umjeravanje dinamometra - prije dinamičkog opterećivanja
2. Dinamičko opterećenje dinamometra
3. Umjeravanje dinamometra - poslije dinamičkog opterećivanja
4. Analiza stanja dinamometra

Umjeravanje je provedeno pomoću seta utega nominalnih vrijednosti 10 N i 20 N, identifikacijskih oznaka 502/60/45, potvrda umjeravanja 15/16 u Laboratoriju za ispitivanja mehaničkih svojstava Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

Postupak umjeravanja dinamometra proveden je sukladno normi HRN EN ISO 376:2011:

- 1) Tri puta predopterećenje do 100% vrijednosti nazivne sile u zahtijevanom smjeru
- 2) Očitanje kod rastuće sile: mjerni nizovi $X1$, $X2$, $X3$, $X5$; Očitanje kod padajuće sile: mjerni nizovi $X4'$, $X6'$
- 3) Dinamometar je nakon mjernih nizova $X2$ i $X4'$, zarotiran za kut od 120° , odnosno 240° , iznova pozicioniran i opterećen

Uz rezultate mjerenja prikazana je proširena mjerna nesigurnost W s faktorom pokrivanja $k=2$ i razinom povjerenja od 95%. Iskazana vrijednost proširene mjerne nesigurnosti ne sadrži nikakav doprinos u pogledu dugoročne nestabilnosti umjeravanog mjerila. Procjena i proračun mjerne nesigurnosti proveden je u skladu s dokumentima EURAMET/cg-04 i HRN EN ISO 376:2011.

Postupak umjeravanja dinamometra provedeno je uz korištenje nosive konstrukcije „Erichsen 474-2kN“ koja je smještena u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Slika 18 prikazuje nosivu konstrukciju na kojoj je provedeno umjeravanje dinamometra, dok su u tablici 7 prikazani uvjeti okoliša u kojem je izvedeno umjeravanje.



Slika 18 Nosiva konstrukcija „Erichsen 474-2kN“

Tablica 7 Uvjeti okoliša

| | |
|---|------------|
| Temperatura okoline na umjernom uređaju | 23,0 °C |
| Temperatura okoline na predmetu umjeravanja | 22,5 °C |
| Atmosferski tlak | 1008,0 hPa |
| Relativna vlažnost | 67 % |



Slika 19 Dinamometar Xforce HP

Tablica 8 Karakteristike dinamometra [13]

| | |
|--------------------|---------------------|
| Proizvođač | Zwick/Roell |
| Tip | Load cell Xforce HP |
| Mjerno područje | 0-50 N |
| Karakteristika | 2 mV/V |
| Nazivna sila | 50 N |
| Godina proizvodnje | 2013. |

Na slici 19 nalazi se korišteni dinamometar Xforce HP, a tablica 8 prikazuje njegove karakteristike. Pri korištenju dinamometra (prijenosnog etalona sile) očitavanje se provodi na mjernom pojačalu DMP40 koje je prikazano na slici 20, čije su karakteristike dane u tablici 9. Mjerno pojačalo je jedan od glavnih elemenata mjernog sustava. Služi za pojačanje izlaznog signala s dinamometra budući da se radi o vrlo malim promjenama napona maksimalnog iznosa do 10 mV uz napon napajanja Wheatstone-ovog mosta od 5 V. Da bi se tako male promjene napona mogle odrediti i očitati sa zadovoljavajućom točnošću, one se moraju dodatno pojačati na mjernom pojačalu.

Osnovni zahtjevi, koji se postavljaju pred mjerna pojačala su: osiguravanje napona (struje) na izlazu koji su proporcionalni veličinama napona (struje) na ulazu pojačala, što manja vlastita potrošnja, što vjernije praćenje promjene mjerene veličine (prenošenje signala bez dodatnih šumova). Pored toga, mjerna pojačala se koriste i za daljnju obradu mjernog signala.

Promjenu deformacije elastičnog elementa u dinamometru električno pojačalo pokazuje kao promjenu napona u mV/V. Pri tome se promjena napona bilježila za svaku promjenu sile za konstantan korak, koji je ovdje iznosio 10% nazivne sile. Također su bilježene i nul vrijednosti. Nakon mjerenja dobiveni podaci su obrađeni i uspoređeni. Pomoću polinoma 3. stupnja dalje su interpolacijom dobivene vrijednosti izlazne promjene napona za različite vrijednosti sila unutar umjeravanog područja.



Slika 20 Mjerno pojačalo DMP40

Tablica 9 Karakteristike mjernog pojačala

| | |
|--------------------------|-----------------------------------|
| Proizvođač | HBM Hottinger Baldwin Messtechnik |
| Tip | DMP40 |
| Tip signala | bruto (abs-Apsolutno) |
| Mjerno područje | 2,5 mV/V |
| Rezolucija | 0,000001 |
| Napon napajanja | 5 V |
| Tip filtra i frekvencija | Bessel, 0,1 Hz |

6.1. Rezultati umjeravanja dinamometra - prije dinamičkog opterećivanja

Prije provedbe mjernih nizova, dinamometar je tri puta predopterećen do iznosa nazivne sile 50 N pri čemu su zabilježena očitavanja kod nazivne vrijednosti kao i očitavanja prije opterećenja i nakon rasterećenja. U tablici 10 prikazani su rezultati mjerenja kod preopterećivanja s pripadnom vrijednošću relativne pogreške nule, izračunate prema izrazu 5.6.

Tablica 10 Izmjerene vrijednosti i relativna pogreška nule kod predopterećenja

| | 0° I | 0° II | 0° III | 120° | 240° |
|--------------------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| $i_0, \text{mV/V}$ | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| $X_N, \text{mV/V}$ | -1,97452 | -1,97638 | -1,97476 | -1,97626 | -1,97471 |
| $i_f, \text{mV/V}$ | -0,00006 | 0,00000 | -0,00008 | 0,00004 | -0,00002 |
| $f_0, \%$ | 0,003 | 0,000 | 0,004 | -0,002 | 0,001 |

U tablici 11 prikazani su rezultati umjeravanja. Kako je korak sile iznosio 10% nazivne sile, svaki mjerni niz sadrži po 9 mjernih točaka.

Tablica 11 Izmjerene vrijednosti pri opterećenju u mjernim nizovima X1, X2, X3, X5 i pri rasterećivanju u mjernim nizovima X4', X6'

| F, N | X1, mV/V 0° | X2, mV/V 0° | X3, mV/V 90° | X4', mV/V | X5, mV/V 180° | X6', mV/V |
|---------------|----------------|----------------|-----------------|-----------|------------------|-----------|
| 10 | -0,395093 | -0,395106 | -0,395161 | -0,395433 | -0,395056 | -0,395168 |
| 15 | -0,592526 | -0,592716 | -0,592787 | -0,593073 | -0,592474 | -0,592560 |
| 20 | -0,789951 | -0,790336 | -0,790900 | -0,790917 | -0,790158 | -0,790053 |
| 25 | -0,987263 | -0,987858 | -0,988339 | -0,988305 | -0,987589 | -0,987440 |
| 30 | -1,184852 | -1,184910 | -1,185945 | -1,186155 | -1,185342 | -1,185201 |
| 35 | -1,382090 | -1,382342 | -1,383702 | -1,383547 | -1,382890 | -1,382813 |
| 40 | -1,579288 | -1,579646 | -1,581668 | -1,581472 | -1,580068 | -1,580113 |
| 45 | -1,776532 | -1,776998 | -1,778888 | -1,778795 | -1,778795 | -1,777558 |
| 50 | -1,974113 | -1,974372 | -1,976017 | - | -1,974728 | - |

Da bi se umjeravani prijenosni etalon mogao klasificirati iz rezultata mjerenja izračunati su kriteriji za klasifikaciju. U tablici 12 prikazan je ostatak i relativno odstupanje nul vrijednosti (f_0) za mjerne nizove X1, X2, X4' i X6', dobiven prema izrazu 5.6.

Tablica 12 Ostatak i relativna pogreška nule nakon rasterećenja u mjernim nizovima

| | X1 0° | X2 0° | X3/X4' 120° | X5/X6' 240° |
|--------------|----------|----------|----------------|----------------|
| i_f , mV/V | -0,00004 | -0,00007 | -0,00004 | -0,00004 |
| f_0 , % | 0,002 | 0,003 | 0,002 | 0,002 |

Tablica 13 prikazuje izmjerene vrijednosti za test puzanja i pripadajuće pogreške puzanja c dobivene prema izrazu 5.10.

Tablica 13 Izmjerene vrijednosti za test puzanja i pripadajuće pogreške puzanja

| | Na nazivnoj sili 240° | Nakon rasterećenja s nazivne sile 240° |
|------------------|--------------------------|---|
| i_0 , mV/V | 0,00000 | 0,00000 |
| i_{30} , mV/V | -1,97581 | -0,00006 |
| i_{300} , mV/V | -1,97576 | -0,00002 |
| c , % | 0,002 | 0,002 |

U tablici 14 prikazani su iznosi ostalih kriterija: relativne pogreške obnovljivosti bez rotacije (b') prema izrazu 5.3, relativne pogreške ponovljivosti s rotacijom (b) prema izrazu 5.1, relativne pogreške histereze (v) prema izrazu 5.9 i relativnog interpolacijskog odstupanja (fc) prema izrazu 5.5. Za svaki iznos sile od 10 do 50 N s korakom od 5 N dane su i srednje vrijednosti očitavanja (X_r i X_{wr}) prema izrazima 5.2 i 5.4.

Tablica 14 Izračunate vrijednosti pogrešaka

| F_i N | $X1, X2$ 0° | | $X1, X3, X5$ $0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$ | | | | |
|------------|-----------------------|-----------|---|-----------|---------------|------------|----------|
| | X_{wr} mV/V | b' % | X_r mV/V | b % | X_a mV/V | f_c % | v % |
| | 10 | -0,395100 | 0,003 | -0,395103 | 0,027 | -0,395069 | 0,009 |
| 15 | -0,592621 | 0,032 | -0,592596 | 0,053 | -0,592651 | -0,009 | 0,031 |
| 20 | -0,790143 | 0,049 | -0,790336 | 0,120 | -0,790241 | 0,012 | 0,008 |
| 25 | -0,987560 | 0,060 | -0,987729 | 0,209 | -0,987822 | -0,009 | 0,009 |
| 30 | -1,184881 | 0,005 | -1,185380 | 0,092 | -1,185375 | 0,000 | 0,015 |
| 35 | -1,382216 | 0,018 | -1,382894 | 0,117 | -1,382884 | 0,001 | 0,008 |
| 40 | -1,579467 | 0,023 | -1,580341 | 0,151 | -1,580330 | 0,001 | 0,008 |
| 45 | -1,776765 | 0,026 | -1,777712 | 0,132 | -1,777697 | 0,001 | 0,007 |
| 50 | -1,974243 | 0,013 | -1,974953 | 0,096 | -1,974967 | -0,001 | - |

Rezultati mjerenja ukazuju na vezu između primijenjene sile i očitane promjene napona, a ona se prikazuje polinomom. Za dobivanje odgovarajućeg polinoma koristi se metoda najmanjih kvadrata koja kompenzira i neke nesavršenosti koje mogu utjecati na oblik interpolacijske krivulje.

U tablici 15 prikazane su vrijednosti promjene izlaznog signala u mV/V dobivene interpolacijom polinoma 3. stupnja za sile u mjernom području od 5 do 50 N s korakom od 5 N. Slika 21 je prikazuje krivulju interpolacije, a slika 22 inverzni prikaz krivulje interpolacije.

Tablica 15 Interpolirane vrijednosti u ovisnosti o opterećenju

| Sila <i>F</i> , N | Interpolacija polinomom 3. stupnja, mV/V | | | | |
|----------------------|--|----------|----------|----------|----------|
| | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 |
| 5 | -0,19751 | -0,21727 | -0,23702 | -0,25678 | -0,27653 |
| 7,5 | -0,29629 | -0,31604 | -0,33580 | -0,35556 | -0,37531 |
| 10 | -0,39507 | -0,41483 | -0,43458 | -0,45434 | -0,47410 |
| 12,5 | -0,49386 | -0,51362 | -0,53338 | -0,55313 | -0,57289 |
| 15 | -0,59265 | -0,61241 | -0,63217 | -0,65193 | -0,67169 |
| 17,5 | -0,69145 | -0,71121 | -0,73096 | -0,75072 | -0,77048 |
| 20 | -0,79024 | -0,81000 | -0,82976 | -0,84952 | -0,86928 |
| 22,5 | -0,88903 | -0,90879 | -0,92855 | -0,94831 | -0,96806 |
| 25 | -0,98782 | -1,00758 | -1,02733 | -1,04709 | -1,06685 |
| 27,5 | -1,08660 | -1,10636 | -1,12611 | -1,14587 | -1,16562 |
| 30 | -1,18537 | -1,20513 | -1,22488 | -1,24463 | -1,26438 |
| 32,5 | -1,28414 | -1,30389 | -1,32364 | -1,34339 | -1,36314 |
| 35 | -1,38288 | -1,40263 | -1,42238 | -1,44212 | -1,46187 |
| 37,5 | -1,48162 | -1,50136 | -1,52110 | -1,54085 | -1,56059 |
| 40 | -1,58033 | -1,60007 | -1,61981 | -1,63955 | -1,65929 |
| 42,5 | -1,67902 | -1,69876 | -1,71850 | -1,73823 | -1,75796 |
| 45 | -1,77770 | -1,79743 | -1,81716 | -1,83689 | -1,85662 |
| 47,5 | -1,87635 | -1,89607 | -1,91580 | -1,93552 | -1,95524 |
| 50 | -1,97497 | -1,99469 | -2,01441 | -2,03413 | -2,05384 |

Jednadžba interpolacije glasi:

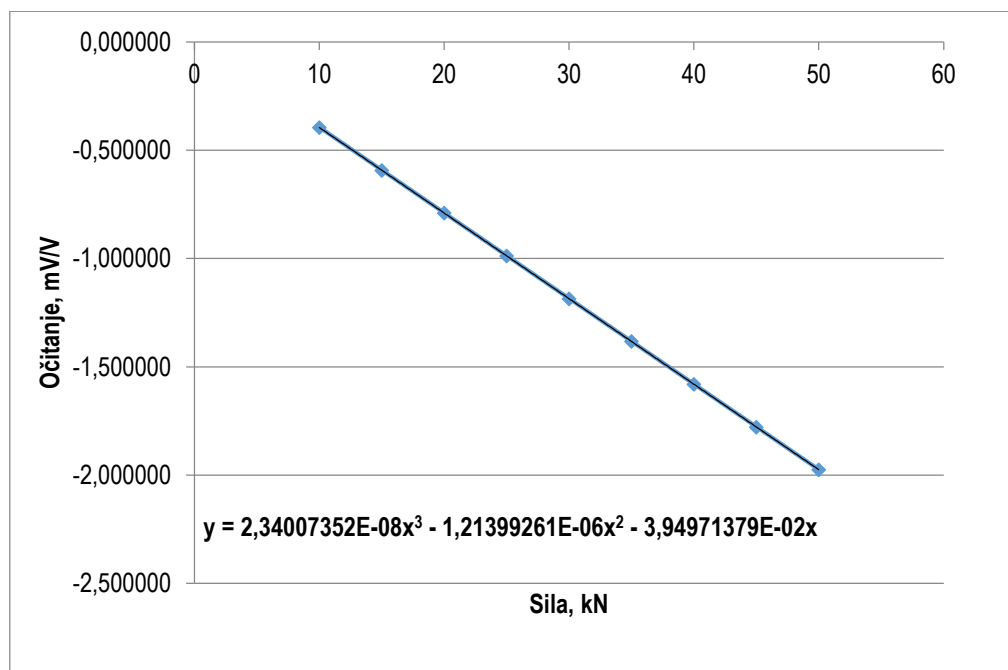
$$X_a = 2,34007352E - 08F^3 - 1,21399261E - 06F^2 - 3,94971379E - 02F \quad (6.1)$$

gdje je F u N.

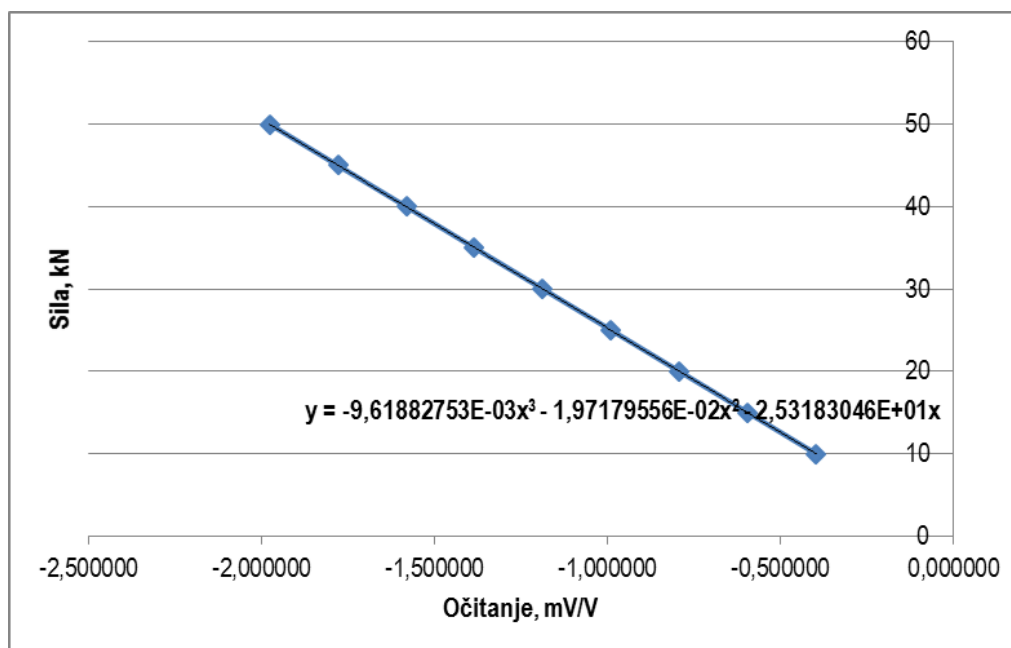
Inverzna jednačba interpolacije za proračun vrijednosti sile na temelju vrijednosti očitavanja X glasi:

$$F_a = -9,61882753E - 03x^3 - 1,97179556E - 02x^2 - 2,53183046E - 01x \quad (6.2)$$

gdje je X u mV/V.



Slika 21 Prikaz krivulje interpolacije



Slika 22 Inverzni prikaz krivulje interpolacije

Da bi se umjeravani dinamometar mogao klasificirati, iz rezultata mjerenja izračunati su kriteriji za klasifikaciju. U tablici 16 prikazana je najmanja mjerna nesigurnost te klasa koja je zadovoljena prilikom različitih opterećenja.

Tablica 16 Klasifikacija i pripadajuća najmanja relativna mjerna nesigurnost umjeravanja

| Opterećenje-tlak N | Klasa | Najmanja mjerna nesigurnost, W % | |
|---------------------------|-------|-------------------------------------|-----------------------|
| | | Rastuće sile | Rastuće/padajuće sile |
| 0 | 1 | 0,109 | 0,110 |
| 10 | 1 | 0,110 | 0,111 |
| 15 | 1 | 0,110 | 0,111 |
| 20 | 1 | 0,110 | 0,110 |
| 25 | 1 | 0,109 | 0,110 |
| 30 | 1 | 0,108 | 0,109 |
| 35 | 1 | 0,107 | 0,107 |
| 40 | 1 | 0,105 | 0,106 |
| 45 | 1 | 0,104 | 0,104 |
| 50 | 1 | 0,101 | 0,102 |

Iz priloženih rezultata vidi se da prema normi HRN EN ISO 376:2011 dinamometar pripada klasi 1 (prema tablici 5).

6.2. Dinamičko opterećenje dinamometra

Nakon prvoga umjeravanja dinamometar smo podvrgnuli dinamičkom opterećenju, u 18 nizova, kako bi mogli provesti određivanje deformacijske karakteristike senzora sile, odnosno elektrootporne mjerne trake te odrediti utjecajne faktore na rezultate mjerenja. U tablici 17 prikazane su izmjerene vrijednosti pri opterećenju.

Tablica 17 Izmjerene vrijednosti nul signala pri dinamičkom opterećenju

| Mjerni niz | F, N | Očitanje, mV/V | Mjerni niz | F, N | Očitanje, mV/V |
|------------|--------|----------------|------------|--------|----------------|
| 1 | 0 | -0,047337 | 10 | 0 | -0,022094 |
| | 50 | -2,021549 | | 50 | -2,000006 |
| 2 | 0 | -0,045301 | 11 | 0 | -0,013625 |
| | 50 | -2,019242 | | 50 | -2,000245 |
| 3 | 0 | -0,044323 | 12 | 0 | -0,013814 |
| | 50 | -2,017335 | | 50 | -1,994463 |
| 4 | 0 | -0,042186 | 13 | 0 | -0,004670 |
| | 50 | -2,015406 | | 50 | -1,990392 |
| 5 | 0 | -0,040300 | 14 | 0 | 0,001584 |
| | 50 | -2,011369 | | 50 | -1,984321 |
| 6 | 0 | -0,034128 | 15 | 0 | 0,010106 |
| | 50 | -2,016560 | | 50 | -1,987282 |
| 7 | 0 | -0,036118 | 16 | 0 | 0,006072 |
| | 50 | -2,013424 | | 50 | -1,980773 |
| 8 | 0 | -0,030830 | 17 | 0 | 0,006754 |
| | 50 | -2,011797 | | 50 | -1,981379 |
| 9 | 0 | -0,028700 | 18 | 0 | 0,011444 |
| | 50 | -2,007143 | | 50 | -1,980411 |

6.3. Rezultati umjeravanja dinamometra - poslije dinamičkog opterećivanja

Kao i kod postupka umjeravanja prije dinamičkog opterećenja, prije provedbe mjernih nizova, dinamometar je tri puta predopterećen do iznosa nazivne sile 50 N pri čemu su zabilježena očitavanja kod nazivne vrijednosti kao i očitavanja prije opterećivanja i nakon rasterećivanja. U tablici 18 prikazani su rezultati mjerenja kod preopterećenja s pripadnom vrijednošću relativne pogreške nule, izračunate prema izrazu 5.6.

Tablica 18 Izmjerene vrijednosti i relativna pogreška nule kod predopterećenja

| | 0° I | 0° II | 0° III | 120° | 240° |
|--------------------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| $i_0, \text{mV/V}$ | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| $X_N, \text{mV/V}$ | -1,96801 | -1,97254 | -1,97233 | -1,97519 | -1,96719 |
| $i_f, \text{mV/V}$ | 0,01020 | 0,00763 | 0,01163 | 0,00803 | 0,01214 |
| $f_0, \%$ | -0,518 | -0,387 | -0,590 | -0,407 | -0,617 |

U tablici 19 prikazani su rezultati umjeravanja. Kako je korak sile iznosio 10% nazivne sile, svaki mjerni niz sadrži po 9 mjernih točaka, a na početku niza očitane su i nul vrijednosti.

Tablica 19 Izmjerene vrijednosti pri opterećivanju u mjernim nizovima X1, X2, X3, X5 i pri rasterećivanju u mjernim nizovima X4', X6'

| F, N | X1, mV/V 0° | X2, mV/V 0° | X3, mV/V 90° | X4', mV/V | X5, mV/V 180° | X6', mV/V |
|-----------|----------------|----------------|-----------------|-----------|------------------|-----------|
| 0 | -0,063082 | -0,061032 | -0,067960 | -0,067960 | -0,077159 | -0,077159 |
| 10 | -0,400653 | -0,397424 | -0,397217 | -0,399723 | -0,398028 | -0,401676 |
| 15 | -0,599107 | -0,595363 | -0,595463 | -0,597471 | -0,596432 | -0,598993 |
| 20 | -0,795842 | -0,794744 | -0,794541 | -0,800771 | -0,793333 | -0,801242 |
| 25 | -0,990745 | -0,991398 | -0,992256 | -0,998201 | -0,991507 | -0,998731 |
| 30 | -1,188480 | -1,189618 | -1,190624 | -1,196135 | -1,189218 | -1,193602 |
| 35 | -1,384954 | -1,388549 | -1,390484 | -1,393373 | -1,391663 | -1,393577 |
| 40 | -1,583856 | -1,586251 | -1,589852 | -1,588888 | -1,589176 | -1,588329 |

| | | | | | | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 45 | -1,783591 | -1,784689 | -1,787691 | -1,786196 | -1,786851 | -1,785848 |
| 50 | -1,982197 | -1,981439 | -1,983489 | - | -1,982941 | - |

Da bi se umjeravani prijenosni etalon mogao klasificirati iz rezultata mjerenja izračunati su kriteriji za klasifikaciju. U tablici 20 prikazan je ostatak i relativno odstupanje nul vrijednosti (f_0) za mjerne nizove $X1$, $X2$, $X3/X4'$ i $X5/X6'$, dobiveno prema izrazu 5.6.

Tablica 20 Ostatak i relativna pogreška nule nakon rasterećivanja u mjernim nizovima

| | $X1$ | $X2$ | $X3/X4'$ | $X5/X6'$ |
|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | 0° | 0° | 120° | 240° |
| i_f, mV/V | -0,00138 | -0,00036 | -0,00236 | -0,00611 |
| f_0, % | 0,070 | 0,018 | 0,119 | 0,308 |

Tablica 21 prikazuje izmjerene vrijednosti za test puzanja i pripadajuće pogreške puzanja c dobivene prema izrazu 5.10.

Tablica 21 Izmjerene vrijednosti za test puzanja i pripadajuće pogreške puzanja

| | Na nazivnoj sili | Nakon rasterećenja s nazivne sile |
|-----------------------------------|-------------------------------|--|
| | 240° | 240° |
| i_0, mV/V | 0,00000 | 0,00000 |
| i_{30}, mV/V | -1,97335 | 0,00424 |
| i_{300}, mV/V | -1,97385 | 0,00420 |
| c, % | 0,025 | 0,002 |

U tablici 22 prikazani su iznosi ostalih kriterija: relativne greške obnovljivosti bez rotacije (b') prema izrazu 5.3, relativne greške ponovljivosti s rotacijom (b) prema izrazu 5.1, relativne greške histereze (v) prema izrazu 5.9 i relativnog interpolacijskog odstupanja (f_c) prema izrazu 5.5. Za svaki iznos sile od 10 do 50 N s korakom od 5 N dane su i srednje vrijednosti očitavanja (X_r i X_{wr}) prema izrazima 5.2 i 5.4

Tablica 22 Izračunate vrijednosti pogrešaka

| F_i N | $X1, X2$ | | $X1, X3, X5$ | | | | |
|------------|------------------|-----------|---------------------------------|----------|---------------|------------|----------|
| | 0° | | $0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$ | | | | |
| | X_{wr} mV/V | b' % | X_r mV/V | b % | X_a mV/V | f_c % | v % |
| 10 | -0,399038 | 0,809 | -0,398632 | 0,862 | -0,397913 | 0,181 | 0,774 |
| 15 | -0,597235 | 0,627 | -0,597001 | 0,610 | -0,596349 | 0,109 | 0,383 |
| 20 | -0,795293 | 0,138 | -0,794572 | 0,3156 | -0,794553 | 0,002 | 0,891 |
| 25 | -0,991071 | 0,066 | -0,991503 | 0,152 | -0,992612 | -0,112 | 0,664 |
| 30 | -1,189049 | 0,096 | -1,189441 | 0,180 | -1,190611 | -0,098 | 0,416 |
| 35 | -1,386752 | 0,259 | -1,389034 | 0,483 | -1,388639 | 0,028 | 0,173 |
| 40 | -1,585053 | 0,151 | -1,587628 | 0,377 | -1,586780 | 0,053 | 0,057 |
| 45 | -1,784140 | 0,062 | -1,786044 | 0,229 | -1,785122 | 0,052 | 0,069 |
| 50 | -1,981818 | 0,038 | -1,982876 | 0,065 | -1,983751 | -0,044 | - |

Rezultati mjerenja ukazuju na vezu između primijenjene sile i očitane promjene napona, a ona se prikazuje polinomom 3. stupnja. Za dobivanje odgovarajućeg polinoma koristi se metoda najmanjih kvadrata koja kompenzira i neke nesavršenosti koje mogu utjecati na oblik interpolacijske krivulje.

U tablici 23 prikazane su vrijednosti promjene izlaznog signala u mV/V dobivene interpolacijom polinoma 3. stupnja za sile u mjernom području od 5 do 50 N s korakom od 5 N. Na slici 23 prikazana je krivulja interpolacije, a na slici 24 je inverzni prikaz krivulje interpolacije.

Tablica 23 Interpolirane vrijednosti u ovisnosti o opterećenju

| Sila F, N | Interpolacija polinomom 3. stupnja, mV/V | | | | |
|----------------|--|----------|----------|----------|----------|
| | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 |
| 5 | -0,19916 | -0,21905 | -0,23894 | -0,25882 | -0,27870 |
| 7,5 | -0,29858 | -0,31845 | -0,33832 | -0,35819 | -0,37805 |
| 10 | -0,39791 | -0,41777 | -0,43762 | -0,45747 | -0,47732 |
| 12,5 | -0,49717 | -0,51701 | -0,53685 | -0,55668 | -0,57652 |
| 15 | -0,59635 | -0,61618 | -0,63601 | -0,65583 | -0,67565 |
| 17,5 | -0,69547 | -0,71529 | -0,73511 | -0,75493 | -0,77474 |
| 20 | -0,79455 | -0,81436 | -0,83417 | -0,85398 | -0,87379 |
| 22,5 | -0,89359 | -0,91340 | -0,93320 | -0,95301 | -0,97281 |
| 25 | -0,99261 | -1,01241 | -1,03221 | -1,05201 | -1,07181 |
| 27,5 | -1,09161 | -1,11141 | -1,13121 | -1,15101 | -1,17081 |
| 30 | -1,19061 | -1,21041 | -1,23021 | -1,25001 | -1,26981 |
| 32,5 | -1,28962 | -1,30942 | -1,32922 | -1,34903 | -1,36883 |
| 35 | -1,38864 | -1,40845 | -1,42826 | -1,44807 | -1,46788 |
| 37,5 | -1,48769 | -1,50750 | -1,52732 | -1,54714 | -1,56696 |
| 40 | -1,58678 | -1,60660 | -1,62643 | -1,64626 | -1,66609 |
| 42,5 | -1,68592 | -1,70576 | -1,72559 | -1,74543 | -1,76528 |
| 45 | -1,78512 | -1,80497 | -1,82482 | -1,84468 | -1,86453 |
| 47,5 | -1,87635 | -1,89607 | -1,91580 | -1,93552 | -1,95524 |
| 50 | -1,97497 | -1,99469 | -2,01441 | -2,03413 | -2,05384 |

Jednadžba interpolacije glasi:

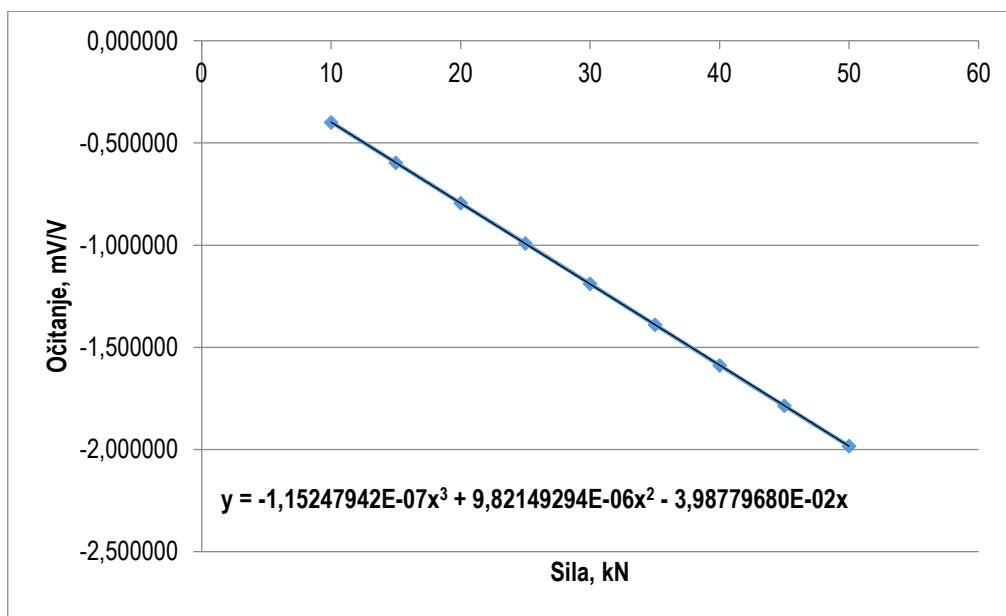
$$X_a = -1,15247942E - 07F^3 + 9,82149294E - 06F^2 - 3,98779680E - 02F \quad (6.3)$$

gdje je F u N.

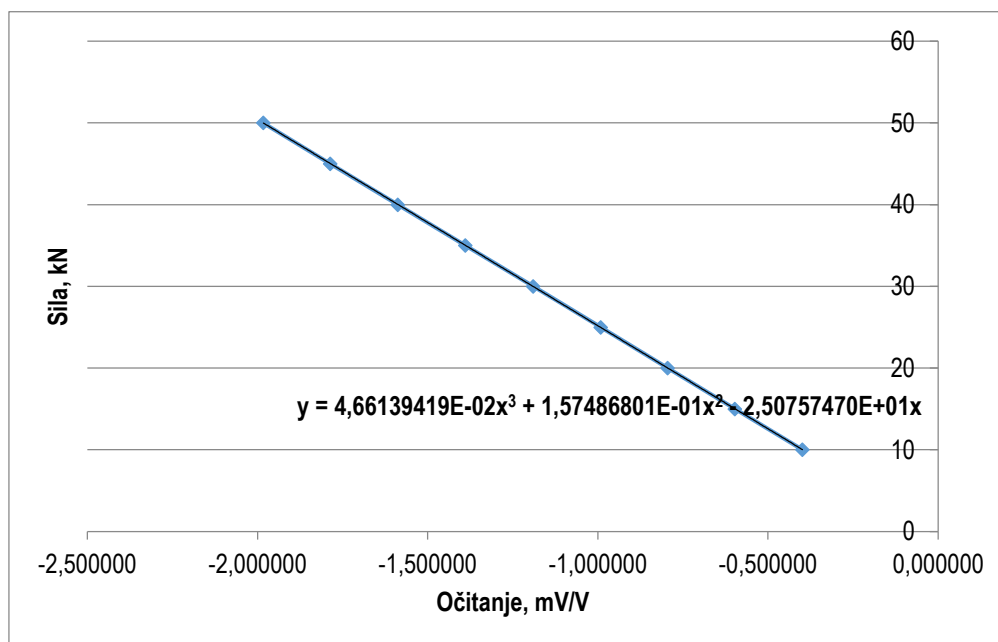
Inverzna jednadžba interpolacije za proračun vrijednosti sile na temelju vrijednosti očitavanja X glasi:

$$F_a = 4,66139419E - 02x^3 + 1,57486801E - 01x^2 - 2,50757470E + 01x \quad (6.4)$$

gdje je X u mV/V.



Slika 23 Prikaz krivulje interpolacije



Slika 24 Inverzni prikaz krivulje interpolacije

Da bi se umjeravani prijenosni etalon mogao klasificirati iz rezultata mjerenja izračunati su kriteriji za klasifikaciju. U tablici 24 prikazana je najmanja mjerna nesigurnost te klasa koja je zadovoljena prilikom različitih opterećenja.

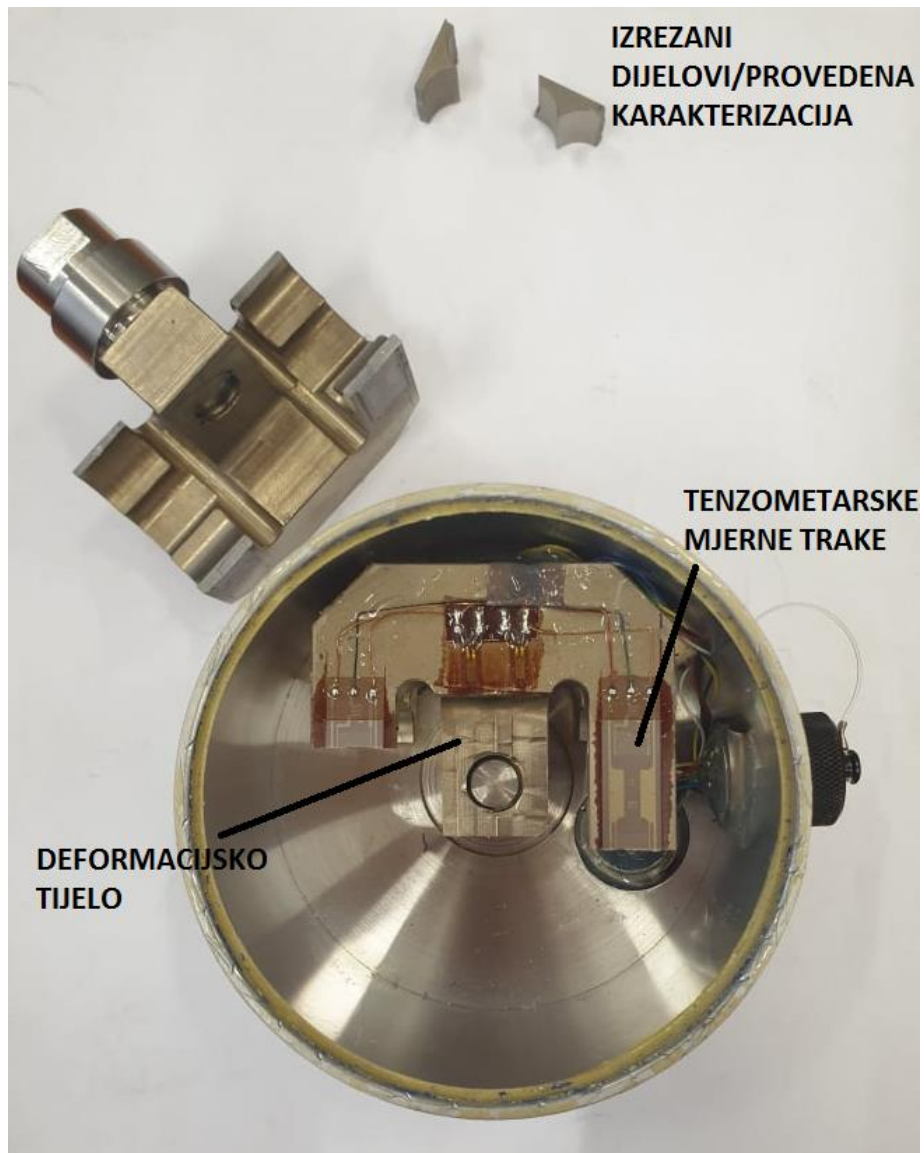
Tablica 24 Klasifikacija i pripadajuća najmanja relativna mjerna nesigurnost umjeravanja

| Opterećenje-tlak N | Klasa | Najmanja mjerna nesigurnost, W % | |
|-----------------------|-------|-------------------------------------|-----------------------|
| | | Rastuće sile | Rastuće/padajuće sile |
| 0 | X | 1,845 | 2,240 |
| 10 | X | 1,673 | 1,897 |
| 15 | X | 1,590 | 1,752 |
| 20 | X | 1,510 | 1,625 |
| 25 | X | 1,437 | 1,516 |
| 30 | X | 1,373 | 1,425 |
| 35 | X | 1,319 | 1,352 |
| 40 | X | 1,277 | 1,297 |
| 45 | X | 1,250 | 1,259 |
| 50 | X | 1,240 | 1,240 |

Iz priloženih rezultata vidi se da prema normi HRN EN ISO 376:2011 dinamometar nije zadovoljio uvijete niti jedne klase (prema tablici 5).

6.4. Karakterizacija

Kako bi najtočnije mogli odrediti što je uzrok promjeni iznosa izlaznog signala pri neopterećenom stanju nakon dinamičkog ispitivanja, bilo ga je potrebno otvoriti i proučiti u čemu je problem. Na slici 25 prikazana je unutrašnjost dinamometra.



Slika 25 Prikaz deformacijskog tijela dinamometra s tenzometarskim trakama

6.4.1. Priprema uzorka

Priprema uzorka za analizu sastoji se od više koraka [16]:

- Izrezivanje
- Ulijevanje uzoraka
- Brušenje
- Poliranje
- Nagrizanje

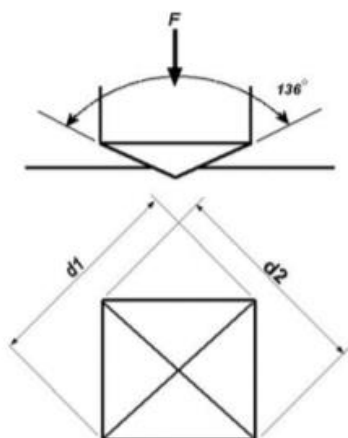
Slika 26 prikazuje uzorak uliven u polimernu masu.



Slika 26 Uzorak uliven u polimernu masu

6.4.2. Ispitivanje tvrdoće prema metodi Vickers

Mikrotvrdoća prema metodi Vickers određuje se mjerenjem dimenzija otiska penetratora u uzorku. Penetrator je četverostrana istostranična piramida izrađena od dijamanta s vršnim kutom od 136° prikazana na slici 27. Mjerenje tvrdoće izvedeno je na FSB-u, metodom HV 5 na uređaju Indentec, slika 28.



Slika 27 Vršni kut i otisak penetratora Vickersovog tvrdomjera [18]

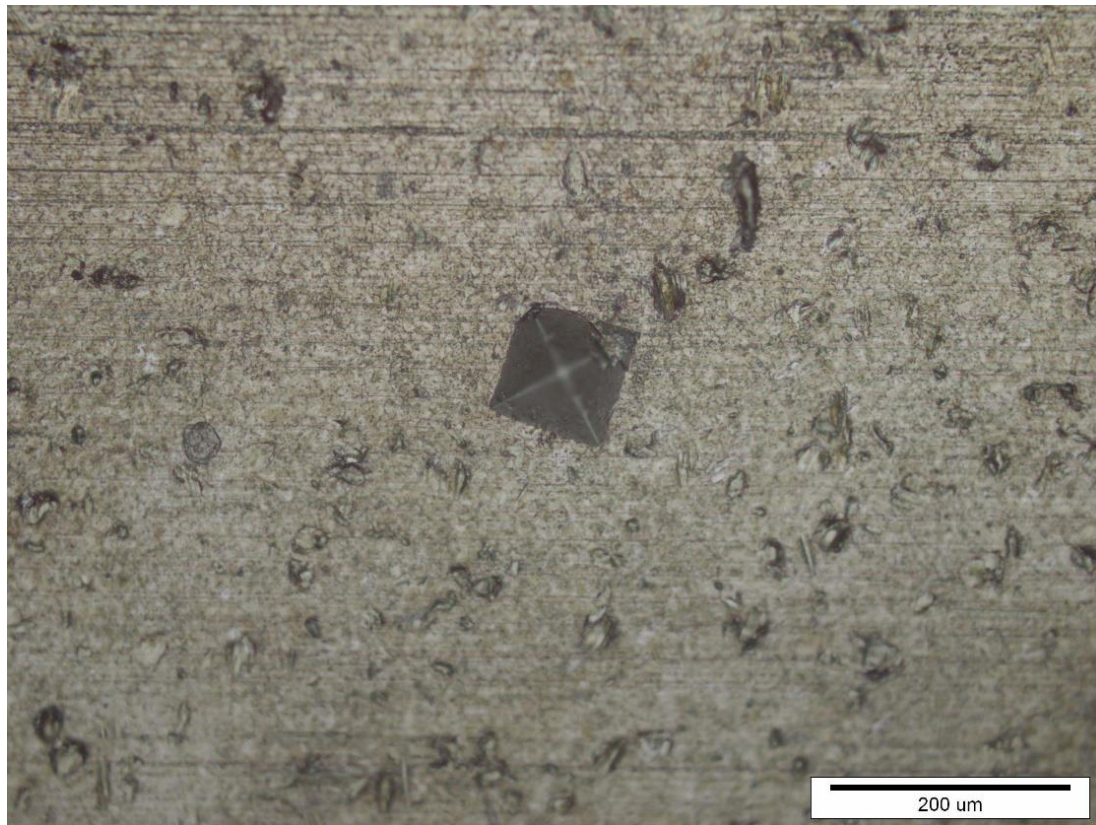


Slika 28 Tvrdomjer

Dimenzije otiska penetratora slikane su na svjetlosnom mikroskopu Olympus GX51, a prikazani su na slici 29. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće dani su u tablici 25.

Tablica 25 Rezultati mjerenja mikrotvrdoće

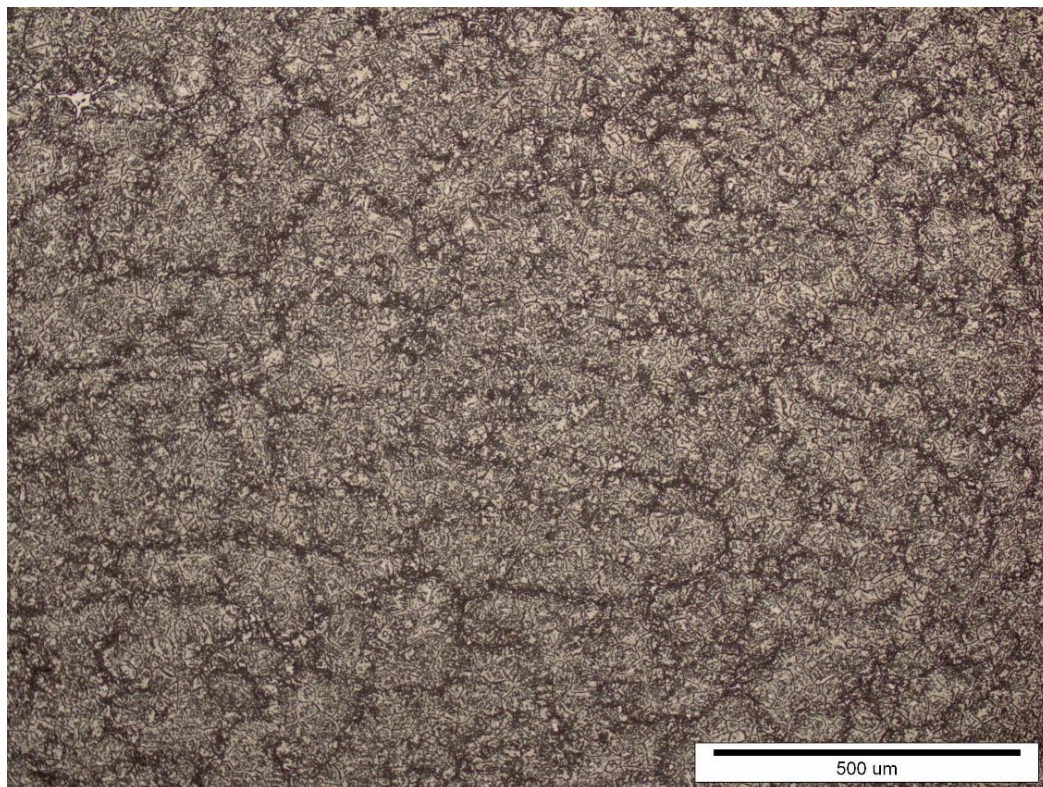
| Redni broj ispitivanja | HV 5 |
|---------------------------|--------------|
| 1 | 515,5 |
| 2 | 507,2 |
| 3 | 518,6 |
| 4 | 526,1 |
| 5 | 527,3 |
| Srednja vrijednost | 518,9 |



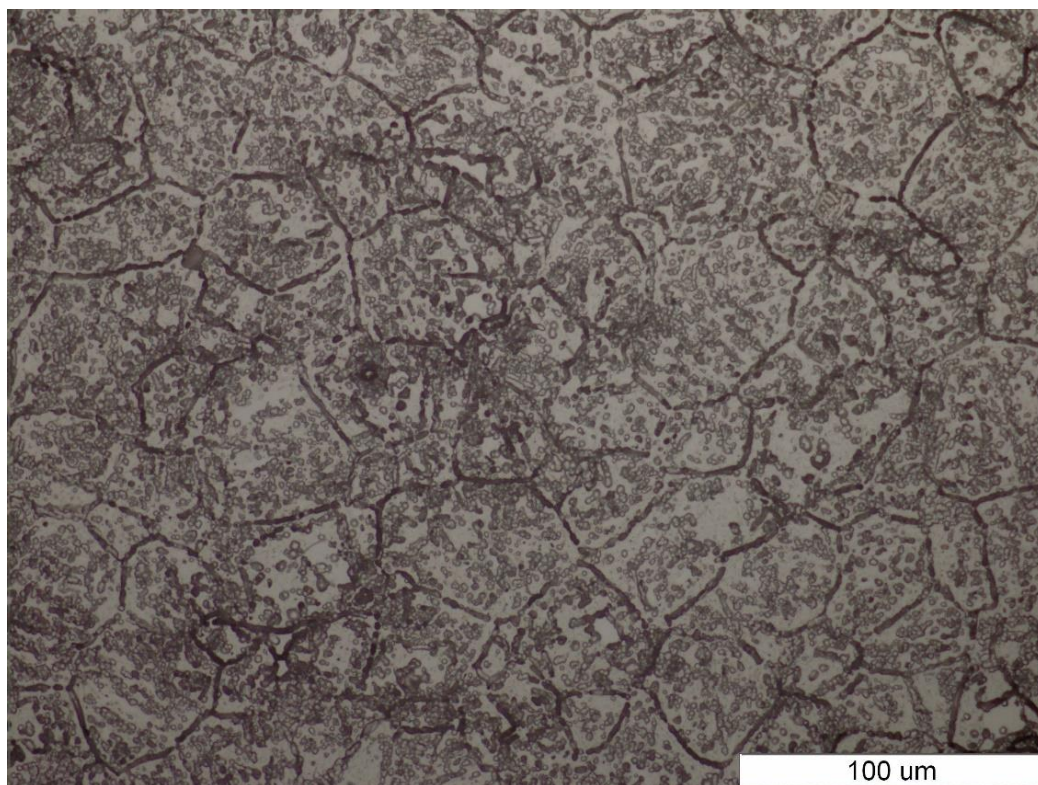
Slika 29 Otisak penetratora na uzorku, povećanje 200x

6.4.3. Analiza svjetlosnim mikroskopom

Uzorci su analizirani na svjetlosnom mikroskopu GX51 nakon elektokemijskog nagrizanja, čiji su parametri 10% tna oksalna kiselina i napon od 12 V u trajanju 1 minute. Pri povećanjima 100 puta i 500 puta uočljiva je mikrostruktura sa jasnim granicama zrna. Uz pomoć Metals Handbooka [17], zaključeno je da osnovni materijal pripada skupini marenezitnim nehrđajućim čelicima, AISI 440C, koji ima dobru otpornost na koroziju te sadrži 0.95-1.2% ugljika. Na slikama 30 i 31 je prikaz mikrostrukture nakon elektokemijskog nagrizanja, povećanja 100 puta i 500 puta.



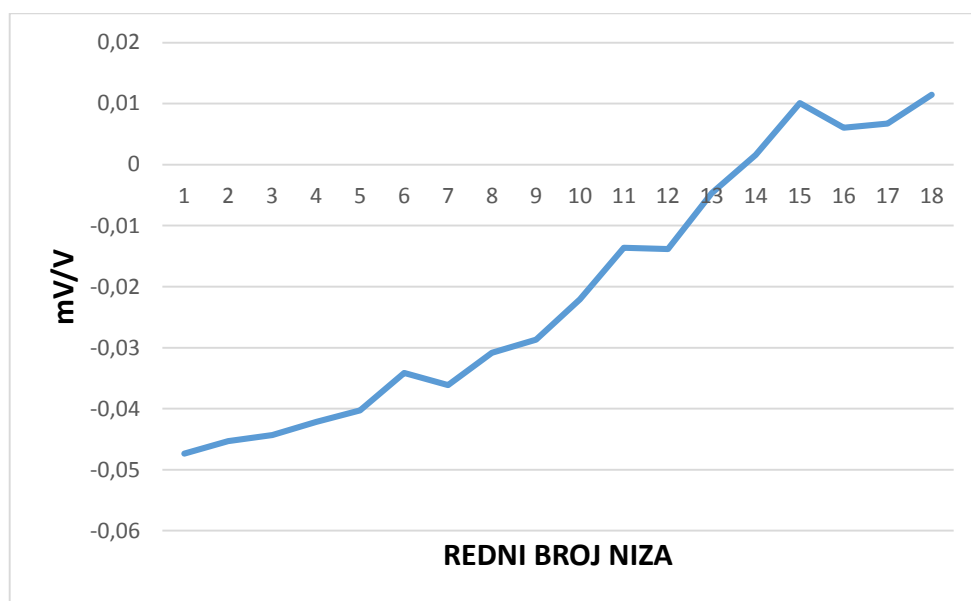
Slika 30 Prikaz mikrostruktura u nagriženom stanju, povećanje 100x



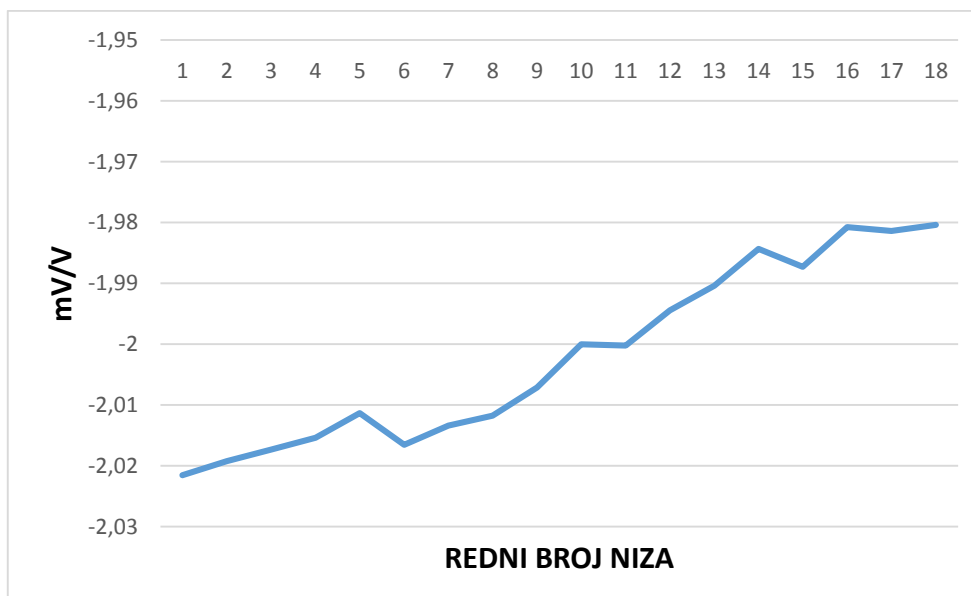
Slika 31 Prikaz mikrostruktura u nagriženom stanju, povećanje 500x

7. ANALIZA REZULTATA

Uslijed dinamičkih opterećivanja došlo je do promjene nul signala. Očitane nul vrijednosti prikazane su na sljedećim slikama, sa vrijednostima iz tablice 17. Slika 32 grafički prikazuje nul vrijednosti u neopterećenom stanju, a slika 33 pri nazivnim vrijednostima sile.



Slika 32 Prikaz nul vrijednosti u neopterećenom stanju



Slika 33 Prikaz nul vrijednosti pri nazivnim vrijednostima sile

Iz prethodnih slika vidljivo je da su nul vrijednosti izlaznih signala uslijed dinamičkog opterećivanja linearno rastle. U neopterećenom stanju vrijednost nul signala je na početku bila $-0,047337$ mV/V, a nakon 18.-og niza je iznosila $+0,011444$ mV/V.

Očitavanje pri nazivnim vrijednostima sile na početku iznosilo $-2,021549$ mV/V, a nakon 18.-og niza $-1,980411$ mV/V.

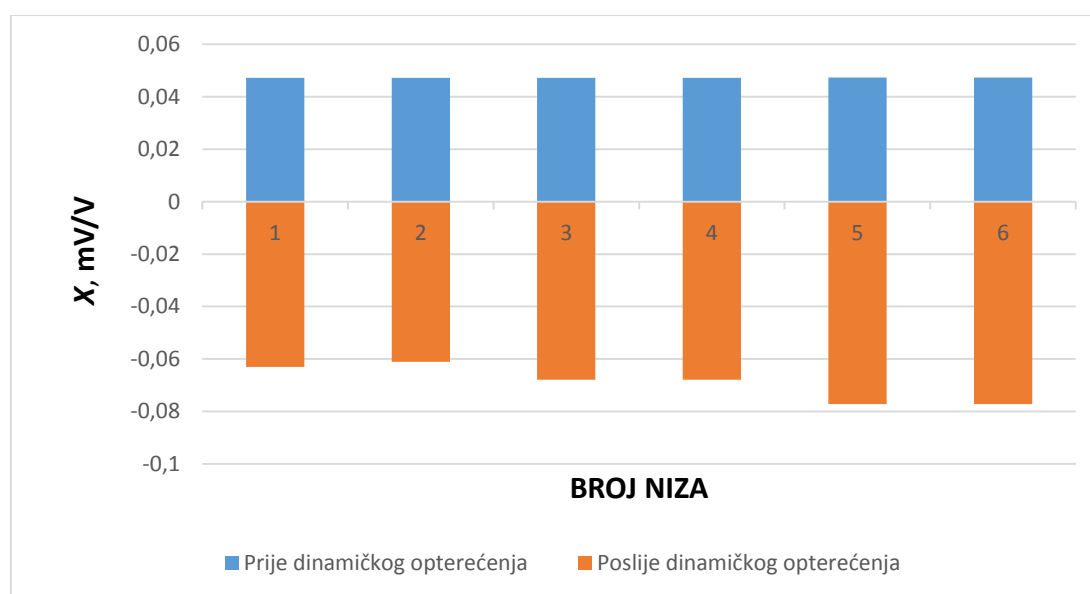
U tablicama 26 i 27 prikazane su očitane nul vrijednosti u mjernim nizovima prije i nakon dinamičkog opterećivanja, čiji su odnosi prikazani grafički na slici 34.

Tablica 26 Nul vrijednosti u mjernim nizovima prije dinamičkog opterećivanja

| F, N | $X1, \text{mV/V}$ 0° | $X2, \text{mV/V}$ 0° | $X3, \text{mV/V}$ 90° | $X4', \text{mV/V}$ | $X5, \text{mV/V}$ 180° | $X6', \text{mV/V}$ |
|----------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------|----------------------------------|--------------------|
| 0 | 0,047337 | 0,047337 | 0,047337 | 0,047337 | 0,047337 | 0,047337 |

Tablica 27 Nul vrijednosti u mjernim nizovima nakon dinamičkog opterećivanja

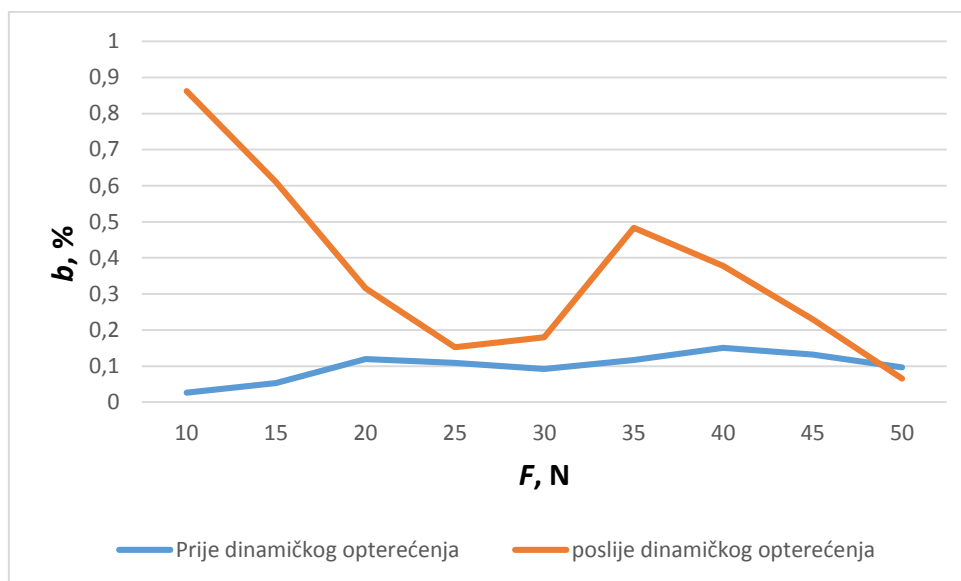
| F, N | $X1, \text{mV/V}$ 0° | $X2, \text{mV/V}$ 0° | $X3, \text{mV/V}$ 90° | $X4', \text{mV/V}$ | $X5, \text{mV/V}$ 180° | $X6', \text{mV/V}$ |
|----------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------|----------------------------------|--------------------|
| 0 | -0,063082 | -0,061032 | -0,067960 | -0,067960 | -0,077159 | -0,077159 |



Slika 34 Prikaz nul vrijednosti nizova, prije i nakon dinamičkog opterećivanja

Iz dijagrama je vidljivo da je nakon dinamičkih opterećenja došlo do potpune promjene nul signala. Prije dinamičkog opterećenja nul signal je bio pozitivne vrijednosti da bi kasnije prešao u negativne vrijednosti. Iz ovog proizlazi pretpostavka da se nešto dogodilo unutar mjernog sustava dinamometra što je uzrok promjenama nul signla.

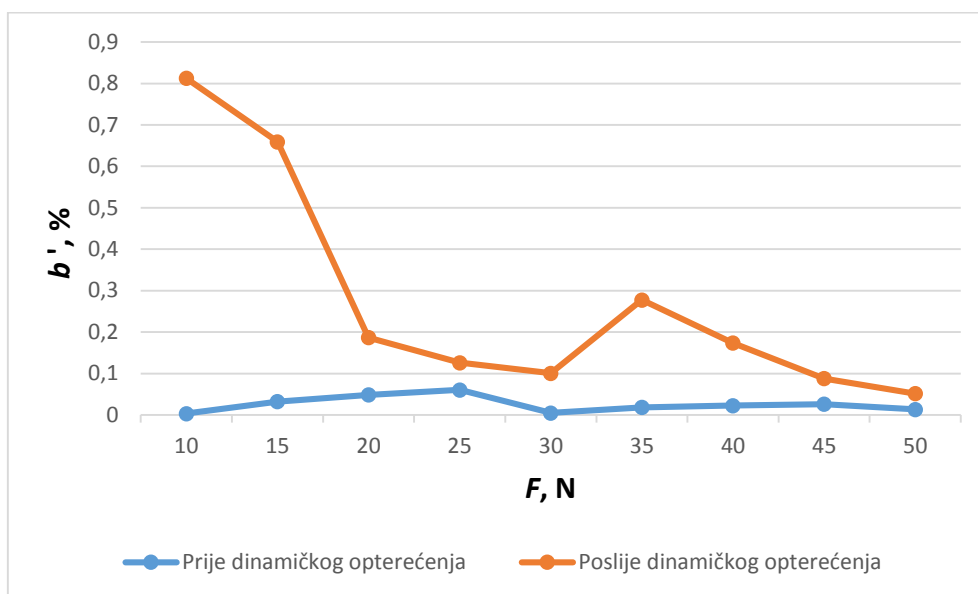
Slika 35 prikazuje relativne pogreške ponovljivosti b , prije i poslije dinamičkog opterećenja za pojedine korake sile u mjernom području dinamometra od 10 N do 50 N.



Slika 35 Usporedni prikaz relativne pogreške ponovljivosti s rotacijom u ovisnosti o sili

Može se vidjeti kako je relativna pogreška ponovljivosti prije dinamičkog opterećenja vrlo mala te uglavnom jednaka. Relativna pogreška ponovljivosti poslije dinamičkog opterećenja je znatno veća i uglavnom se smanjuje s porastom sile, ali u svakom slučaju veća je od ponovljivosti prije dinamičkog opterećenja.

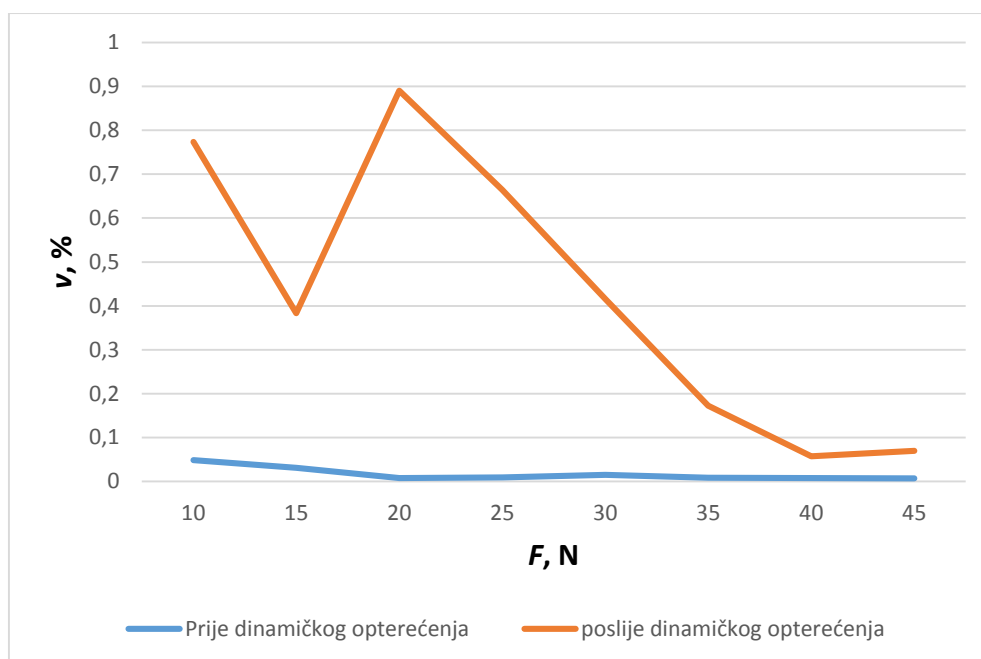
Slika 36 prikazuje relativne pogreške obnovljivosti b' prije i poslije dinamičkog opterećenja za pojedine korake sile u čitavom mjernom području dinamometra od 10 N do 50 N.



Slika 36 Usporedni prikaz relativne pogreške obnovljivosti bez rotacije u ovisnosti o sili

Vidljivo je kako je relativna pogreška obnovljivosti prije dinamičkog opterećivanja jednolika. Relativna pogreška obnovljivosti poslije dinamičkog opterećivanja je znatno veća i uglavnom se smanjuje s porastom sile.

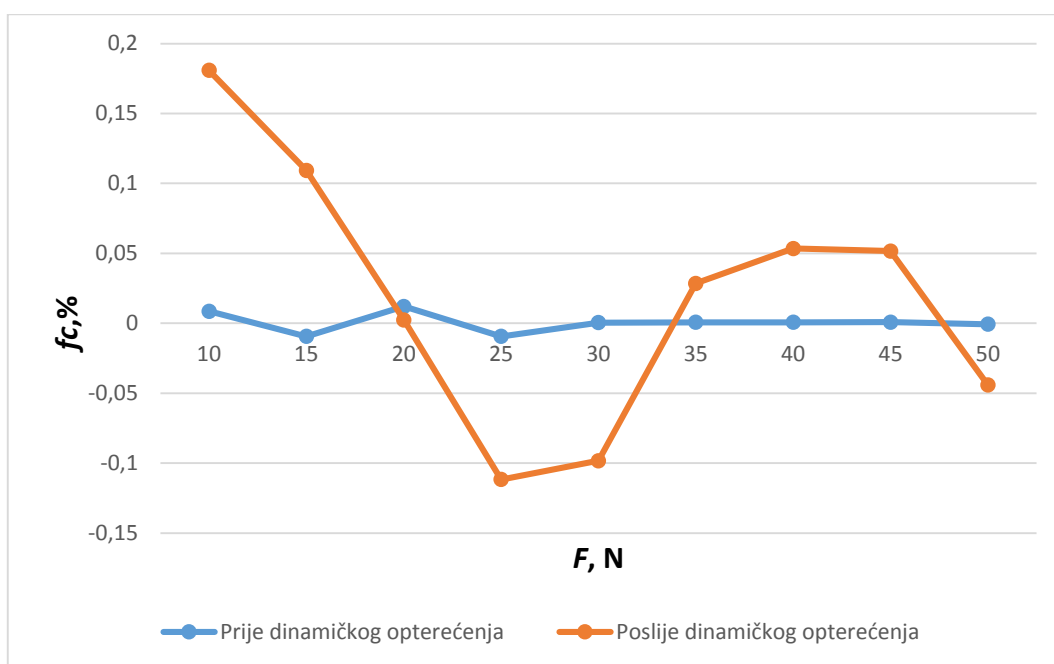
Slika 37 prikazuje relativne pogreške histereze v , prije i poslije umjeravanja dinamometra za pojedine korake sile u čitavom mjernom području dinamometra od 10 N do 50 N.



Slika 37 Usporedni prikaz relativne pogreške histereze u ovisnosti o sili

Razmatranjem pogreške histereze po mjernim točkama, prije dinamičkog opterećivanja, proizlazi da je ova pogreška približno konstantnog iznosa unutar umjeravanog područja. Također vidljivo je da se pogreška histereze poslije dinamičkog opterećivanja ne poklapa sa onom prije i pokazuje najveću vrijednost na sili od 23 N te ona opada s približavanjem nazivnoj vrijednosti.

Slika 38 prikazuje relativne pogreške interpolacije f_c prije i poslije dinamičkog opterećivanja za pojedine korake sile u čitavom mjernom području dinamometra od 10 N do 50 N



Slika 38 Usporedni prikaz relativnog interpolacijskog odstupanje u ovisnosti o sili

Ovdje je vidljivo kako relativna pogreška interpolacije poslije dinamičkog opterećivanja poprilično varira i nema neki izraženi trend ponašanja.

8. ZAKLJUČAK

U ovom radu su provedena ispitivanja dinamometra koji je radio u eksploatacijskim uvjetima gdje su se pojavljivala dinamička i udarna opterećenja. Kroz duže vrijeme ustanovljena su određena odstupanja. Stoga su provedena ispitivanja gdje su primijenjene sile manje od nazivne vrijednosti sile dinamometra, ali su bile dinamičkog karaktera ili čak udarnog.

Iz provedenih ispitivanja, koje se sastojalo od umjeravanja i dinamičkog opterećivanja, doneseni su sljedeći zaključci:

- Primjenom dinamičkih opterećivanja koja su dosegala i 50% nazivne vrijednosti sile te laganim udarnim opterećivanjima (do 20 N) došlo je do promjene svojstava dinamometra. To je ustanovljeno kroz promjenu nul signala te kroz promjenu nazivne vrijednosti.
- Usporedbom nul signala prije i nakon dinamičkog opterećivanja vidljive su drastične promjene vrijednosti. S obzirom da nema naznaka vanjskih oštećenja deformacijskog tijela, promjene izmjerenih rezultata su uzrokovane unutarnjim oštećenjem. Pretpostavlja se da je došlo do defekta tenzometarskih mjernih traka u vidu puzanja, odljepljivanja ili puknuća. Da bi se odredio razlog potrebno je rastvoriti deformacijsko tijelo.
- Detekcija mogućeg problema unutar dinamometra, odnosno na tenzometarskim mjernim trakama, može se pratiti promjenom nul signala. Stoga je potrebno voditi evidenciju nul signala prilikom svakog korištenja deformacijskog tijela.
- Stvarna detekcija ponašanja senzora sile je postupkom umjeravanja. Izuzev jednogodišnjih umjeravanja definiranih normom, preporuča se provođenje internih provjera unutar umjernih razdoblja, ovisno o vrsti i intenzitetu opterećivanja.
- Dinamometar koji je ispitivan pokazao se kao neadekvatan za daljnju primjenu jer je nakon provedenih testova došlo do grubih pogrešaka.

LITERATURA

- [1] Guide to the Measurement of Force, The Institute of Measurement and Control, 1998.
- [2] Živković V.: Primjena posredničkih etalona sile pri umjeravanju referentnog etalona sile, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [3] Muftić O.: Mehanika I (Statika), Tehnička knjiga, Zagreb, 1983.
- [4] Alar Ž.: Analiza utjecajnih faktora na mjernu nesigurnost etalonskog tvrdomjera, doktorska disertacija, Zagreb, 2008.
- [5] Alar Ž.: Procjenjivanje nesigurnosti rezultata mjerenja sile, magistarski rad, Zagreb, 2001.
- [6] Videc M.: Umjeravanje referentnog etalona sile, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2008.
- [7] Meštović K.: Ispitivanje simetričnosti opterećenja referentnog etalona sile, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [8] Mjerna tehnika ,prof.dr. Nermina Zaimović-Uzunović, Zenica, 2006, Mašinski fakultet Katedra za automatizaciju i metrologiju
- [9] J. Božičević, Temelji automatike 2, Mjerni pretvornici i mjerenje, Zagreb, 1991.
- [10] <http://www.am.unze.ba/mik/seminarski2012/Aldin%20Ahmetpahic%20Mjerenje%20sile%20%20prezentacija.ppt>
- [11] http://w14.itrademarket.com/pdimage/11/750911_rajaloadcell.jpg
- [12] Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, Elektroničke komponente mehatroničkih sustava
- [13] ISO 376: Metallic materials – Calibration of force – proving instruments used for the verification of uniaxial testing machines, 2004.
- [14] <https://www.sensy.com/en/technology/standards/iso-376-transfer-reference>
- [15] <https://www.zwickroell.com/en/load-cells/xforce>

- [16] Schauperl Z.: Autorizirana predavanja: Karakterizacija materijala, Sveučilište u Zagrebu, FSB, 2015
- [17] Metals handbook : desk edition / edited by J. R. Davis, Davis & Associates; ASM International Handbook Committee, 2nd edit., 2006.