

Metode provjere i umjeravanja tenzometara

Vrančić, Daniel

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:820199>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-01**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Daniel Vrančić

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Dr. sc. Željko Alar, izv. prof.

Student:

Daniel Vrančić

Zagreb, 2018.

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

Ovom bih se prilikom htio zahvaliti svojem mentoru izv.prof. dr.sc Željku Alaru, ljudima iz tvrtke Laboring te laborantu Romanu na pomoći i suradnji oko izrade moga završnog rada.

Daniel Vrančić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodegradnje	
Datum:	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Daniel Vrančić** Mat. br.: **0035202608**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Metode provjere i umjeravanja tenzometara**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Tensometers - Verification and calibration methods**

Opis zadatka:

Mjerenje zategnutosti upletene čelične užadi je jako bitna provjera pri održavanju žičara, dalekovoda, nosivih konstrukcija mostova te sličnih elemenata gdje se koriste čelična upletena užad. Uredaji koji se danas koriste u tu svrhu nazivaju se tenzometri.

U radu je potrebno:


1. Opisati primjenu žičane užadi te vrste opterećenja u eksploataciji.
2. Opisati vrste i primjenu tenzometara.
3. Dati pregled i opis metoda za provjeru i umjeravanje tenzometara.
4. Eksperimentalno provesti umjeravanje tenzometra različitim metodama.
5. Analizirati dobivene rezultate i dati zaključke.

Zadatak zadan:
30. studenog 2017.

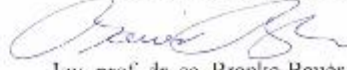
Rok predaje rada:
1. rok: 23. veljače 2018.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.
3. rok: 21. rujna 2018.

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

Zadatak zadao:


Izv. prof. dr. sc. Željko Alar

Predsjednik Povjerenstva:


Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

Sažetak

POPIS SLIKA.....	III
POPIS TABLICA	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY.....	VIII
1. UVOD	9
2. ČELIČNO UŽE.....	11
2.1 Primjena čelične užadi.....	12
2.2 Vrste opterećenja i oštećenja	13
2.2.1. Mehaničko trošenje	13
2.2.2. Pojava umora zbog savijanja užeta	13
2.2.3. Korozijska oštećenja	14
2.2.4. Otkazivanje zbog vlačnog preopterećenja	15
2.2.5. Smični lom.....	15
2.3. Vrste čelične užadi.....	17
2.3.1 Čelična užad za normalnu namjenu	17
2.3.2. Specijalna čelična užad	19
3. TENZOMETRIJA.....	22
3.1 Uvod	22
3.2 Vrste tenzometara	23
3.2.1 Akustični tenzometar	23
3.2.2. Optički tenzometar.....	24
3.2.3 Električni tenzometar	25
3.2.4. Mehanički tenzometar.....	27
4.METODE ZA PROVJERU I UMJERAVANJE TENZOMETARA.....	28
4.1.Umjeravanje.....	28

4.2. Umjeravanje tenzometra	29
4.2.1. Metoda umjeravanja primjenom mjernih utega	29
4.2.2. Metoda umjeravanja primjenom dinamometra i kidalice	30
5. EKSPERIMENTALNI DIO	31
5.1. Plan ispitivanja	31
5.2. Tenzometar T60 C8	31
5.3. Umjeravanje metodom M1 (tvrtka Laboring)	33
5.3.1. Faze pripreme umjeravanja	33
5.3.2. Faze provedbe umjeravanja	35
5.4. Umjeravanje metodom M2	40
5.4.1 Faze provedbe umjeravanja	41
5.5 Obrada rezultata	43
5.6. Obrada rezultata dobivenih metodom pomoću mjernih utega	46
6. ANALIZA REZULTATA	
6.1. Analiza rezultata dobivenih metodom pomoću mjernih utega	47
6.2. Analiza rezultata dobivenih na FSB-u	48
6.3. Usporedba rezultata	49
7.0. ZAKLJUČAK	53

POPIS SLIKA

Slika 1. Struktura čelične žice	11
Slika 2. Primjena čelične užadi kod žičara.....	12
Slika 3. Mehaničko trošenje čeličnih žica bez pojave unutarnjih pukotina	13
Slika 4. Savojni lom umora materijala užeta u spojnim nitima	14
Slika 5. Korozijski oštećeno čelično uže.....	14
Slika 6. Tipičan duktilni lom završen konusnim smicanjem.....	15
Slika 7. Prikaz vizualnog pregleda kojim je moguće ispitati samo 20% površine spojnih žica	16
Slika 8. Struktura čelične užadi klase 6 x 19.....	17
Slika 9. Struktura čelične užadi klase 6 x 37.....	18
Slika 10. Struktura čelične užadi klase 19 x 7 otporne na rotaciju	20
Slika 11. Struktura Superflex čeličnog užeta	21
Slika 12. Struktura pocinčane čelične užadi klase 7 x 7 i klase 7 x 19	21
Slika 13. Akustični tenzometar	23
Slika 14. Optički tenzometar.....	24
Slika 15. Dijagram σ/ϵ za niskouglični čelik	25
Slika 16. Lijepljenje mjerne trake na površinu objekta.....	26
Slika 17. Mehanički tenzometar.....	27
Slika 18. Etaloni	29
Slika 19. Mjerna oprema metode pomoću mjernih utega	30
Slika 20. Kidalica	30
Slika 21. Mehanički tenzometar T60 C8.....	32
Slika 22. Mjerna skala tenzometra T60 tipa.....	33
slika 23. Tablica rezultata.....	34
Slika 24. Tester momenta sile Drumwillow L	35
Slika 25. Poluga TEP P3 pričvršćena na tester	36
Slika 26. Čelično uže postavljeno na polugu	36
Slika 27. Čelično uže opterećeno utezima i podržavano dizalicom.....	37
Slika 28. Mjerenje tenzometrom na čeličnoj užadi 1/8" opterećenoj utezima	39
Slika 29. Kidalica Erichsen	40
Slika 30. MGC uređaj za namještanje sile	41
Slika 31. Postupak mjerenja tenzometrom.....	42
Slika 32. Dijagramski prikaz rezultata umjeravanja dobivenih metodom M1.....	47

Slika 33. Dijagramski prikaz rezultata umjeravanja dobivenih metodom M2.....	48
Slika 34. Dijagram usporedbe apsolutne pogreške dobivene metodom M1 i metodom M2 ...	49
Slika 35. Dijagram srednjeg očitavanja tenzometra pojedinih mjerenjenja dobivenih umjeravanjem metodom pomoću mjernih utega i metodom pomoću elastičnog mjernog uređaja	50
Slika 36. Dijagram ponovljivosti pojedinih mjerenja dobivenih umjeravanjem metodom M1 i metodom M2	51
Slika 37. Dijagram usporedbe relativnih pogrešaka pojedinih mjerenja dobivenih umjeravanjem metodom M1 i metodom M2.....	51
Slika 38. Dijagram usporedbe proširenih mjernih nesigurnosti pojedinih mjerenja dobivenih umjeravanjem metodom M1 i metodom M2.....	52

POPIS TABLICA

Tablica 1. Ovisnost promjera užeta o sili kidanja i o minimalnoj prekidnoj sili	19
Tablica 2. Sastav materijala i k-faktor žice tenzometarske trake	26
Tablica 3. Rezultati umjeravanja tenzometra T60 C8 metodom M1	39
Tablica 4. Rezultati umjeravanja tenzometra T60 C8 pomoću elastičnog mjernog uređaja....	43
Tablica 5. Faktor pretvorbe	43
Tablica 6. Komponente mjerne nesigurnosti.....	45
Tablica 7. Obradeni podaci dobiveni metodom M1	46
Tablica 8. Obradeni podaci dobiveni metodom M2.....	46

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
ϵ	mm/mm	Deformacija
Δl	mm	Produljenje
l	mm	Duljina
\bar{N}	-	Srednja vrijednost očitane sile
ΔN	-	Apsolutna pogreška tenzometra
N_0	lb	Stvarna sila napetosti
Δ	%	Relativna pogreška tenzometra
b'	lb	Ponovljivost
k	-	Proširena mjerna nesigurnost
f	-	Faktor pretvorbe

SAŽETAK

U teoretskom dijelu rada opisana je primjena čeličnih užadi, vrste opterećenja koje djeluju na njih te sama primjena čeličnih užadi. Čelično uže je savitljivo uže, sastavljeno od više čeličnih žica, velike čvrstoće jednostruko ili dvostruko opletenih oko jezgre užeta. Mjerni instrumenti koji se koriste za mjerenje deformacija i naprezanja čeličnih užadi nazivaju se tenzometri. U eksperimentalnom dijelu rada vrši se umjeravanje tenzometra pomoću dvije poznate metode. Prva metoda je metoda pomoću mjernih utega, a druga metoda pomoću elastičnog mjernog uređaja. Svaka od ove dvije metode koristi specifičnu opremu za umjeravanje, a sam postupak umjeravanja je jednostavan. Na samom kraju rada provedena je obrada i analiza rezultata te su doneseni određeni zaključci.

Ključne riječi: čelično uže, tenzometar, mjerni utezi, elastični mjerni instrument

SUMMARY

In the theoretical part of this study is described application of steel ropes, types of overtures that act on it and application of steel ropes. The steel rope is flexible rope made of multiple wire of high strength which are single or double wrapped around the rope core. The measuring instruments used to measure deformation and strain of steel ropes are called tensometers. In the experimental part of this study, calibration is performed using two known methods. The first method using metering weight, and the other method using an elastic measuring device. Each of these two methods uses specific calibration equipment and the calibration procedure is simple. In the end, the processing and analysis of the results were carried out and certain conclusions were drawn.

Key words: steel rope, tensometer, metering weights, elastic measuring device

1. UVOD

Još od davne povijesti čovjek je bio prisiljen koristiti materijale velike mehaničke čvrstoće i izdržljivosti. Kada je u pitanju produktivnost i napredak, mnogi će se složiti da su rudarske aktivnosti preteča gotovo svakom značajnom tehnološkom razvoju naše povijesti.

Materijale koji danas koristimo razlikuju se po svojstvima. Svako svojstvo nosi neke prednosti i neke mane. Jedna od najvažnijih svojstava upravo su mehanička svojstva materijala koja se definiraju kao mehanička otpornost materijala. [1]

Mehanička svojstva posljedica su strukturnog stanja materijala. Strukturno stanje materijala dobiva se obradom i oblikovanjem materijala specifičnog kemijskog sastava određenim postupkom. Podešavanjem parametara obrade i parametara koji su karakteristični za materijal u mogućnosti smo podešavati mehanička svojstva. Potrebno je izabrati dobar materijal i određeni postupak kojim ćemo dobiti željena mehanička svojstva materijala. [1]

Tako je u čovjek u saznanju da su mehanička svojstva jedna od najvažnijih svojstava materijala izumio prije nekoliko stotina godina čelično uže koje se pokazalo kao materijal velike mehaničke izdržljivosti zbog svoje specifične konstrukcijske izvedbe.

Postepenim razvojem čeličnih užadi došlo je do razvoja mnogih metoda u pogledu kontrole samih čeličnih užadi. Mjerni instrumenti koji mjere deformacije i naprezanja čeličnih užadi nazivaju se tenzometri, a skup metoda za određivanje deformacija mehaničkih konstrukcija ili njihovih dijelova naziva se tenzometrija. Naprezanja i deformacije ne mogu se direktno mjeriti, nego se mjere neke druge veličine koje ovise o napreznju, odnosno deformaciji, te se zatim računski određuju iznosi naprezanja i deformacije. Tenzometri mogu biti mehanički, električni, optički te akustični. Razvojem tenzometara, koji prvenstveno služe za provjeru napetosti čelične užadi, došlo je do razvoja metoda za umjeravanje tenzometara. [7]

Umjeravanje je skup postupaka kojima se u određenim uvjetima uspostavlja odnos između vrijednosti veličina koje pokazuje neko mjerilo ili mjerni sustav, ili vrijednosti koje prikazuje neka tvarna mjera ili neka referencijska tvar i odgovarajućih vrijednosti ostvarenih etalonima. Umjeravanje se mora provesti kad neko mjeriteljsko svojstvo instrumenta ima zamjetan utjecaj na rezultate mjerenja. Umjeravanje mora provesti osposobljeni laboratorij, a odnosi se na nove i već postojeće instrumente. [12]

Stoga, proces umjeravanja važan je dio u tenzometriji jer sam tenzometar treba biti umjeren kako bi bio pouzdan za mjerenje te bi imao nezamjetan utjecaj na rezultate mjerenja.

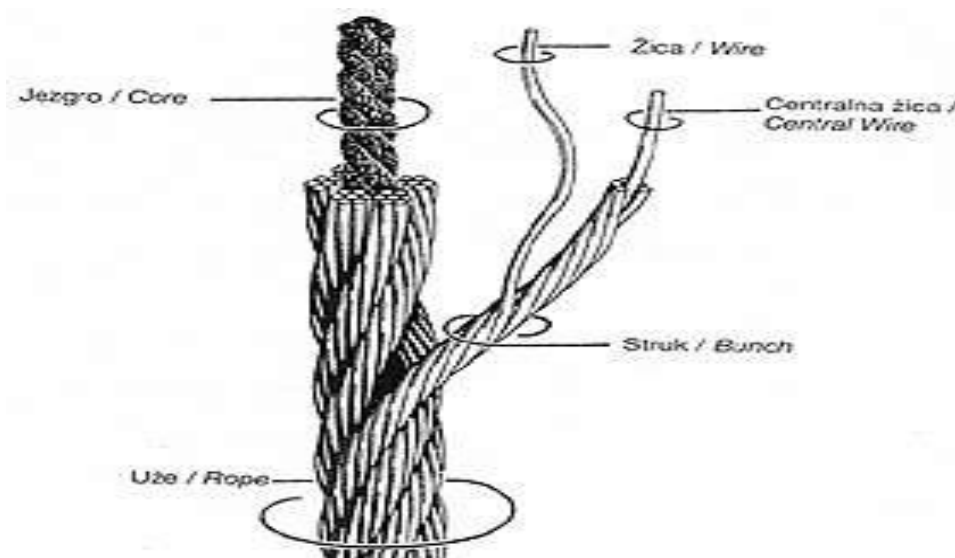
Kako bi se prikazala važnost umjeravanja tenzometara, u eksperimentalnom dijelu je proveden postupak umjeravanja mehaničkog tenzometra T60 C8 pomoću dvije najčešće korištene metode u praksi, metoda pomoću mjernih utega te metoda pomoću elastičnog mjernog uređaja.

Nakon umjeravanja provedena je analiza i obrada mjernih rezultata te je grafički prikazana usporedba oba mjerenja.

2. ČELIČNO UŽE

Čelično uže je savitljivo uže sastavljeno od više čeličnih žica velike čvrstoće jednostruko ili dvostruko opletene oko jezgre užeta. Spiralno uže ima oko jezgre omotano nekoliko redova žica koje čine jednostruku zavojnicu. Takvo konstrukcijski izvedeno uže pruža velike prednosti u pogledu velikih izdržljivosti na opterećenja, ali nedostatak je slaba savitljivost te se na njegovom razvoju radilo još niz godina. [2]

Povjesno gledano, žičana užad razvila su se iz lanaca od kovanog željeza, koji su imali velik mehanički neuspjeh. Nedostaci u čeličnim užadima su manje primjetni radi konstrukcijske izvedbe pomoću čeličnih niti koje lako preuzimaju teret i podnose visoka opterećenja. Čelične užadi razvijene su počevši s primjenama za izgradnju rudnika 1830-ih. Čelične užadi koriste se dinamički za podizanje tereta dizalicom i u dizalu, te za prijenos mehaničke snage. Čelične užadi također se koriste za prijenos snage u mehanizmima, kao što su Bowden kabel ili kontrolni sustavi aviona povezani s polugama i papučama u kokpitu. [2] Struktura čeličnog užeta prikazana je na slici 1.



Slika 1. Struktura čelične žice [2]

2.1 Primjena čelične užadi

Čelične užadi uvelike se koriste u strojarstvu, građevini, automobilskoj industriji te općenito u primjerima kao što su dizalice, podzemna rudarstva, iskop rudače, sječa drveća. Široka primjena čeličnih užadi je kod tramvaja, dizala, raznih žičara, mostova. Važnu ulogu u primjeni ima i odabir samog užeta zbog toga što trajnost užeta uvelike ovisi o vanjskim i unutarnjim čimbenicima. Prilikom korištenja užadi važno je posvetiti pažnju zaštiti prema djelovanju abrazije, umoru materijala, otpornosti na drobljenje, otpornosti na gubitak i deformaciju metala, otpornosti na rotaciju i same radne uvjete kojima su čelična užad izložena. Za neuobičajene radne uvjete potreban je poseban dizajn. Najčešće korišten materijal je visokougljični čelik (neprevučeni). Da bi se poboljšala otpornost na koroziju, u onim primjenama gdje je potrebna velika otpornost na koroziju, koristi se pocinčana žica ili žica od nehrđajućeg čelika. U nekim primjenama, gdje je čišće djelovanje ili je potreban duži vijek trajanja, koristi se plastično impregnirano čelično užje. [3] Na slici 2. prikazan je primjer primjene čelične užadi kod žičara.



Slika 2. Primjena čelične užadi kod žičara [4]

2.2 Vrste opterećenja i oštećenja

Radni vijek čeličnih užadi je ograničen zbog promjene njihovih svojstava tijekom eksploatacije pod djelovanjem raznih sila i opterećenja. Stalni nadzor tijekom eksploatacije omogućava kontrolu razvoja oštećenja te kontrolu procesa starenja užadi. Na taj način se može smanjiti česta zamjena užadi.

Čelične užadi su najčešće izložene slijedećim opterećenjima i oštećenjima:

2.2.1. Mehaničko trošenje

Mehaničko trošenje čeličnih užadi nastaje zbog skidanja površinskog sloja materijala pri abraziji. Slika 3. prikazuje mehaničko trošenje čeličnih žica bez pojave unutarnjih pukotina. Trošenje može biti smanjeno odgovarajućim podmazivanjem. Trošenje na velikim kolutima za namotavanje više slojeva može biti smanjeno izborom užeta pogodne konstrukcije. Zbog trošenja užeta na koluturima, kolutima i susjednim užetima, početna nosivost će se vrlo brzo smanjivati. Sve dok je brzina smanjivanja početnog poprečnog presjeka uslijed trošenja veća od brzine rasta unutarnje pukotine, u žicama užeta neće doći do loma od umora materijala. [5]



Slika 3. Mehaničko trošenje čeličnih žica bez pojave unutarnjih pukotina [5]

2.2.2. Pojava umora zbog savijanja užeta

Unutarnje pukotine se javljaju zbog savijanja užeta na mjestu kontakta spojnih dijelova užeta i bubnja, odnosno koluture, ili na mjestu kontakta između žica unutar pojedinačnog struka. Unutarnja pukotina, koja je poprečna na uzdužnu os žice, nastaje tokom rada zbog višestrukog savijanja. [5]



Slika 4. Savojni lom umora materijala užeta u spojnim nitima [5]

Otpornost na umor čeličnih užadi se povećava povećanjem broja žica i smanjenjem njihovog presjeka na spojnim mjestima. Ovo povećanje otpornosti na zamor istovremeno utječe i na smanjenje opornosti užeta na habanje (slika 4.). [5]

2.2.3. Korozijska oštećenja

Korozija je obično reakcija metala sa kisikom. Kod čeličnih užadi se razlikuje atmosferska korozija, koja proizvodi ravnomjerni sloj produkata korozije od lokalnih oblika korozije, kao što je pitting, koji stvara duboke jamice na mjestima gdje je zaštitni sloj oštećen ili nedostaje. Korodirana čelična užad tokom rada gube čvrstoću i savitljivost. Na korodiranoj površini žice dolazi do lakšeg stvaranja zamornih mjesta u odnosu na zaštićenu površinu. Pri visokim lokalnim naprezanjima nastaju pukotine od napetosne korozije. Sklonost prema koroziji se može umanjiti smanjenjem izloženosti površine zraku, što se može postići galvanskom zaštitom. Plastične prevlake se koriste za zaštitu jezgri užeta. Istovremeno, i unutrašnje i vanjsko prodmazivanje čeličnog užeta mogu smanjiti ili spriječiti koroziju. Na slici 5. prikazano je korozijski oštećeno čelično uže. [5]



Slika 5. Korozijski oštećeno čelično uže [5]

2.2.4. Otkazivanje zbog vlačnog preopterećenja

Do otkazivanja užeta dolazi kada pri zatezanju zbog preopterećenja dođe do prekoračenja vlačne čvrstoće materijala žice. Lom je tada duktilan, sa izraženim suženjem i karakterističnim konusom klizanja završnog lom. Do otkazivanja zbog preopterećenja će doći samo ako je ukupni poprečni presjek materijala, izložen kombiniranom zatezanju i smicanju, veći od 50% ukupnog poprečnog presjeka materijala užeta. Na slici 6. prikazan je izgled površine nakon vlačnog preopterećenja. [5]



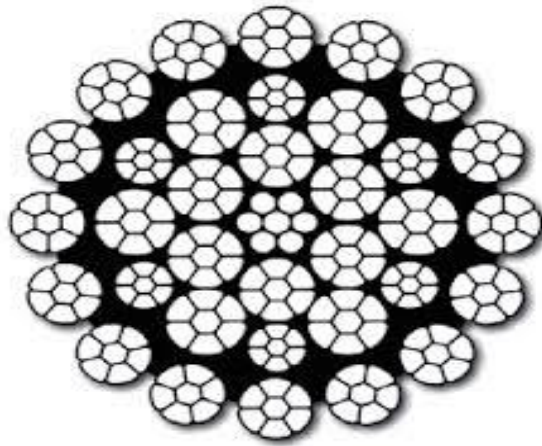
Slika 6. Tipičan duktilni lom završen konusnim smicanjem [5]

2.2.5. Smični lom

Smični lom se najčešće javlja kao kombinacija visokih zateznih naprezanja i istovremenog djelovanja sile na niti. Prijelomna površina je pod kutem od 45° u odnosu na uzdužnu os žice, u pravcu maksimalnog tangencijalnog naprezanja. [5]

Čelična užad dizalica su izložena nepovoljnim uvjetima eksploatacije i velikim opterećenjima tokom rada, zbog čega dolazi do prikazanih oštećenja. Važno je da se spriječi pojava katastrofalnih otkaza, pa se stanje užadi mora neprekidno kontrolirati. To je osnovni razlog zbog kojeg kontrola užadi mora biti stalna, od trenutka prijema materijala, tokom ugradnje i naročito tokom eksploatacije. [5]

Zbog sigurnosti, na užadi se često vrši vizualni pregled. Tokom vizualnog pregleda moguće je utvrditi samo stanje vidljivih djelova spojenih žica. Međutim, površina poprečnog presjeka spoljnjih žica predstavlja samo oko 40% ukupnog poprečnog presjeka užeta. Ipak, vrlo često vidljivih 20% poprečnog presjeka izgleda dobro, dok je veliki broj prekinutih žica u užetu skriven u unutrašnjosti. Čelična užad sa unutrašnjim prekidima žica bez ikakvog znaka oštećenja na površinskim nitima predstavljaju vrlo opasan slučaj. [5] Na slici 7. je prikazano da se samo 20% površine spojnih žica može ispitati vizualnim pregledom.



Sika 7. Prikaz vizualnog pregleda kojim je moguće ispitati samo 20% površine spojnih žica [5]

2.3. Vrste čelične užadi

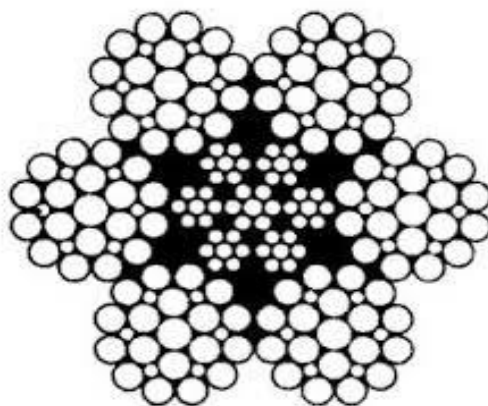
Najčešći čimbenici, abrazija i umor, stvaraju velike probleme u uporabi čeličnih užadi. Male (više brojčane) vanjske žice odupiru se umoru, ali se lako troše pomoću abrazije. Veće vanjske žice imaju izvrsnu otpornost na abraziju, ali se brže troše i oštećuju savijanjem. Stoga je potrebno konstruirati različite vrste i dimenzije čeličnih užadi ovisno o opterećenjima i radnim uvjetima. Svaka konstrukcija žičane užadi spada u klasifikaciju. Klasifikacije se identificiraju brojem niti i nominalnim brojem žica. Stvarni broj žica mora biti unutar raspona određenog za danu klasu. Na primjer, užad unutar razreda 6 x 19 sadrže 6 niti koje se sastoje od 15 do 26 žica. Opće klasifikacije su 7 x 7, 7 x 19, 6 x 26, 6 x 36 i 19 x 7. [6]

2.3.1 Čelična užad za normalnu namjenu

Ova skupina čeličnih užadi najčešća je u primjeni. Ne podnose neka velika opterećenja kao što je slučaj kod specijanih te se ne podvrgavaju posebnim postupcima izrade, nego u većini slučajeva potrebni zahtjevi se postižu povećanjem broja žica i segmenata u čeličnoj užadi. [6]

- **čelična užad klase 6 x 19:**

Ova klasa je najčešće korištena i nalazi se gotovo svim industrijama. Sa svojom dobrom kombinacijom fleksibilnosti i otpornosti na trošenje, užad u ovoj klasi mogu biti prilagođena specifičnim potrebama različitih vrsta strojeva i opreme. Oznaka 6 x 19 je samo nominalna. 6 x 19 klasifikacijska žica pružaju izvrsnu ravnotežu između otpornosti na umora i otpornosti na trošenje. Ona će davati dug životni vijek s koloturima. 6 x 26 uže je najfleksibilnije uže u ovoj klasifikaciji i najčešće se koristi. [6] Na slici 8 prikazana je struktura čelične užadi klase 6 x 19.

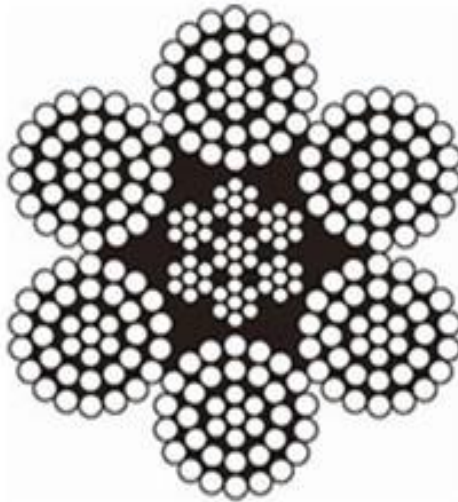


Slika 8. Struktura čelične užadi klase 6 x 19 [6]

- **čelična užad klase 6 x 37:**

6 x 37 žica ima široku primjenu na putničkim dizalicama, strojevima za rudarstvo i zemljani rad i raznim tehnikama dizanja i industrijske opreme. 6 x 37 čelične užadi imaju treći sloj žice koji ih čini fleksibilnijim, iako je manje otporan na abraziju od konopa od 6 x 19 klasifikacije.

Svaki segmenat sadrži brojne, relativno male promjere žice. Kako se broj žica u svakom segmentu povećava, povećava se fleksibilnost. [6] Na slici 9 prikazana je struktura čelične užadi klase 6 x 37.



Slika 9. Struktura čelične užadi klase 6 x 37 [6]

U tablici 1. prikazano je kako se računске sile kidanja i minimalna prekidna sila mjenjaju s promjnom promjera užeta.

Tablica 1. Ovisnost promjera užeta o sili kidanja i o minimalnoj prekidnoj sili [6]

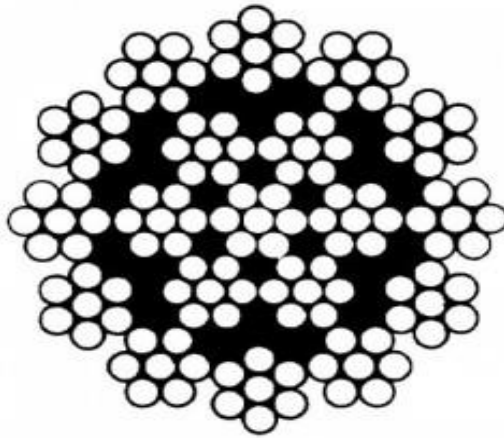
promjer užeta [mm]	masa užeta [kg/m]	1770 N/mm ²	
		računska sila kidanja [kN]	minimalna prekidna sila [kN]
6	0,125	22,80	18,80
8	0,221	40,50	33,40
10	0,346	63,30	52,20
11	0,419	76,50	63,10
12	0,498	91,10	75,10
13	0,585	107,00	88,20
14	0,678	124,00	102,00
16	0,886	162,00	134,00
18	1,12	205,00	169,00
20	1,38	253,00	209,00
22	1,67	306,00	253,00
24	1,99	364,00	301,00
26	2,34	428,00	353,00
28	2,71	496,00	409,00
30	3,11	561,00	482,00
32	3,54	648,00	534,00
34	3,85	731,00	607,00
36	4,48	820,00	676,00
38	4,63	913,00	753,00
40	5,54	1.010,00	835,00
42	5,51	1.116,00	921,00
44	6,70	1.220,00	1.010,00

2.3.2. Specijalna čelična užad:

Kod ovih tipova užadi nalazimo više različitih dimenzija žica koje se međusobno dodiruju uzdužno, čime je povećana površina dodira to jest, specifični pritisak je smanjen na minimum. Specijalna užad koristi se tamo gdje su povećana naprezanja na savijanje te za užad koja prelazi preko koloturnika ili bubnjeva na namatanje. [6]

- Čelična užad klase 19 x 7 otporno na rotaciju

19 x 7 rotacijski otporno čelično užde je posebna vrsta čelične užadi osmišljena da se odupre tendenciji vrtnje ili rotacije pod opterećenjem. To se postiže polaganjem 6 žica oko jezgre u jednom smjeru, zatim polaganjem 12 žica oko prve operacije u drugom smjeru. Često se koristi za podizanje neosiguranog tereta s jednim dijelom užeta. Ovaj jedinstveni dizajn ipak nameće određena ograničenja na primjenu i rukovanje užeta. Na slici 9. prikazana je struktura čelične užadi klase 19 x 7 otporne na rotaciju. [6] Na slici 10 prikazana je struktura čelične užadi klase 19 x 7 otporne na rotaciju.



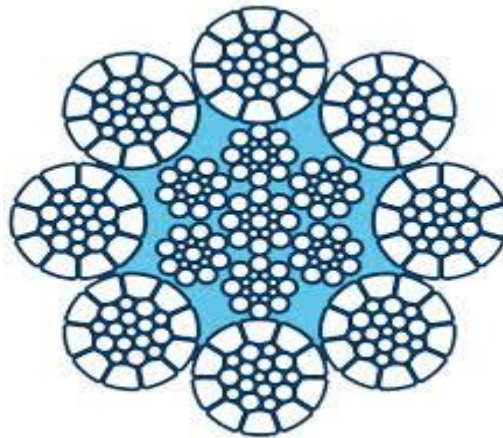
Slika 10. Struktura čelične užadi klase 19 x 7 otporne na rotaciju [6]

- **Superflex - čelična užad za velika opterećenja**

Ova konstrukcija s ravnim plohama ima ravnu dodirnu površinu vanjskih žica, uspoređujući uže s užadima. Ovaj dodir s površinom omogućuje dulji vijek trajanja svake žice prije prekidanja. Prilikom izrade ove konstrukcije, izražena je maksimalna ravnoteža između visoke čvrstoće, rastezljivosti, otpornosti na umor, otpornosti na abraziju i strukturne stabilnosti. Superflex čelično uže je široko korišteno u raznim primjenama kao što su velike teretne dizalice, ribolov i rudarstvo. [6] Na slici 11 prikazana je struktura Superflex čeličnog užeta.

Prednosti:

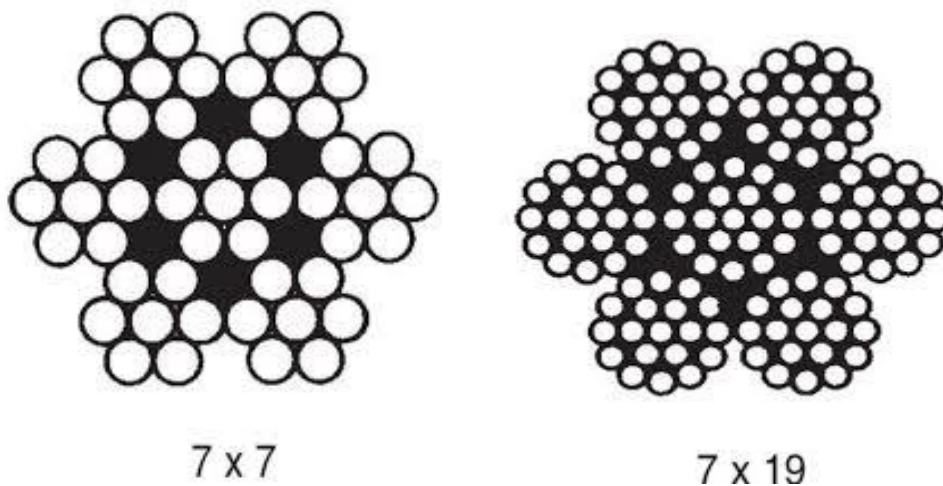
- visoka fleksibilnost
- dulji životni vijek
- visoka otpornost na deformaciju
- dulji život žice prije prekida
- visoka korozijska otpornost
- izvrsna otpornost na abraziju.



Slika 11. Struktura Superflex čeličnog užeta [6]

a) Pocinčana čelična užad

Pocinčano čelično uže preporučuje se kada je potrebna visoka čvrstoća, otpornost na umor i minimalno rastezanje. Najčešće korištena pocinčana čelična užad su klase 7 x 7 te 7 x 19 koja su prikazana na slici 11. [6] Na slici 12 prikazana je struktura pocinčane čelične užadi klase 7 x 7 i 7 x 19.



Slika 12. Struktura pocinčane čelične užadi klase 7 x 7 i klase 7 x 19 [6]

3. TENZOMETRIJA

Tenzometrija je skup metoda za određivanje deformacija mehaničkih konstrukcija ili njihovih dijelova. Mjeri se pomoću mehaničkih, električnih ili optičkih mjernih uređaja, kojima se u osnovi mjere mikrodeformacije, na temelju kojih se izračunavaju ukupne deformacije i naprezanja. Ovisno o metodi mjerenja i vrsti ispitivanja, mjerene deformacije (takozvane mjerne osnovice) mogu biti manje od jednoga milimetra pa do nekoliko centimetara. Mjerni uređaj naziva se tenzometar. [7]

3.1 Uvod

Naprezanja i deformacije ne mogu se direktno mjeriti, nego se mjere neke druge veličine koje ovise o naprezanju, odnosno deformaciji, te se zatim računski određuju iznosi naprezanja i deformacije. U praksi se obično govori o mjerenju deformacije, ali zapravo se mjeri produljenje Δl između dviju točaka A i B na površini ispitivanog objekta, a koje su prije opterećivanja bile udaljene za iznos $AB = l$. Po definiciji srednja je deformacija određena izrazom: [7]

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

Kod linearne promjene deformacije ili kad je ona konstantna, prava je deformacija na sredini mjerne dužine AB i jednaka je srednjoj deformaciji. Mjerači deformacije (tenzometri) mjere srednju deformaciju, te treba uzimati mjernu duljinu l što manju, ali još toliku da se mjerenjem produljenja Δl dobivaju pouzdani rezultati. Mjerna duljina l ovisi od dimenzija konstrukcije i željene točnosti mjerenja, npr. kod velikih konstrukcija (mostova, zgrada, dizalica) mjerna je duljina 10 cm i više, dok je kod strojeva $0,6 \div 1$ cm, a na mjestima nagle promjene naprezanja i deformacija (mjesto koncentracije naprezanja) je oko $1 \div 2$ mm. U praksi se danas redovito koriste elektrootpornički tenzometri različitih duljina. Produljenje Δl može se mjeriti direktno mehanički ili indirektno mjerenjem drugih veličina. [7]

3.2 Vrste tenzometara

Prema principu koji se rabi razlikuju se razni tipovi tenzometara:

- mehanički
- akustični
- optički
- električni.

Električni tenzometri mogu biti:

- elektrootpornički
- elektroinduktivni
- elektrokapacitivni.

3.2.1 Akustični tenzometar

Akustični tenzometar omogućuje mjerenje napetosti bez izravnog kontakta, pomoću mikrofona za hvatanje vibracija. Uz mikrofona koji se drži pored instrumenta, nalazi se prikaz rezultata koji se pokazuje na LCD zaslonu u boji. Mjerenje se provodi tako da se uzmeju tri zasebna očitavanja, a prikazuje se prosječna frekvencija. Korisnik zatim uspoređuje prosječnu vrijednost s objavljenom specifikacijom i podešava mjereni dio po potrebi. Nakon podešavanja frekvencija mjerenog dijela se može ponoviti kako bi se potvrdila da je unutar specifikacije. [8]

Najčešće se koristi za mjerenje napetosti remena u automobilima, raznim strojevima, biciklima. [9] Na slici 13. prikazan je primjer akustičnog tenzometra.



Slika 13. Akustični tenzometar [8]

3.2.2. Optički tenzometar

Optički tenzometri koriste se u istraživanju, razvoju i kontroli kvalitete za proučavanje površina i sučelja. Najprije je razvijen za mjerenje kontaktnih kuteva i površina. Također su sposobni mjeriti površinsku napetost te hrapavost površine. Optički tenzometri su svestrani instrumenti. Oni omogućuju istraživanje svojstava materijala kao što su: prijanjanje, homogenost, hrapavost površine, čistoća, stabilnost emulzije i pjene. [10]

Optički tenzometri se koriste u velikom broju industrija u pogledu biomaterijala, kemikalija, lijekova, hrane, papira i ambalaže. [10] Na slici 14 prikazan je primjer optičkog tenzometra.



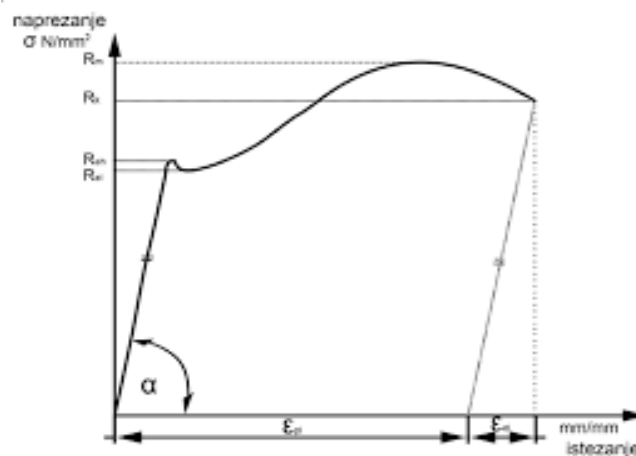
Slika 14. Optički tenzometar [10]

3.2.3 Električni tenzometar

U praksi se najviše koriste elektrootpornički tenzometri, kraće tenzometarske trake (ili mjerne trake), a sama metoda mjerenja naziva se metoda tenzometrije. Ako se žica čvrsto zalijepi na površinu neopterećene konstrukcije, kod opterećivanja konstrukcija će se deformirati i izazvati deformaciju žice. Osnovni princip tenzometrijskog mjerenja leži u činjenici da se deformacijom žice mjerne trake, koja slijedi deformaciju na površini ispitivanog objekta mijenja njen električni otpor. Iz mjerenja promjene otpora tenzometra određuje se iznos deformacije u pravcu osi trake u mjernoj točki ispitivanog objekta. Kod mjerenja elektrootporničkim trakama međuzavisnost naprezanja i deformacija smatra se linearnom, jer se mjerenja na konstrukcijama provode u linearno-elastičnom području tj. u području u kojem vrijedi Hookeov zakon. Hookeov zakon za jednoosno stanje naprezanja (kod osnog opterećenja i savijanja), glasi: [7]

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Dijagrami rastezanja $\sigma = f(\varepsilon)$ određuju se u laboratorijima pokusom rastezanja ispitne epruvete. Za žilave materijale, npr. niskouglični čelik, grafički prikaz (slika 15.) ovisnosti $\sigma = f(\varepsilon)$ ima izgled: [7]



Slika 15. Dijagram σ / ε za niskouglični čelik [7]

Kao metalni vodič najčešće se koristi žica konstantnog promjera od oko $20 \mu\text{m}$. Zbog svoje velike duljine žica je savijena vijugavo i zalijepljena na podlogu od papira ili između dva listića folije, tako da je duljina mjerne trake u praksi od 0,6 do 120 (700) mm. Tenzometarske trake upotrebljavaju se u mjernom području od -270 do $1000 \text{ }^\circ\text{C}$. Mjerne se trake izrađuju od žice

otpora od 120 Ω , 350 Ω ili 600 Ω . Za mjerenje na čeličnim konstrukcijama uglavnom se koriste tenzometri izrađene fotonagrizanjem tanke folije metala, npr. konstantana, koja je umetnuta između dvaju listića (folijski tenzometri). Najčešće se u praksi rabe tenzometri duljine traka 6 ... 10 mm i električnog otpora 120 Ω . U tablici 2. prikazane su vrijednosti k-faktora žice za pojedine sastave materijala.[7]

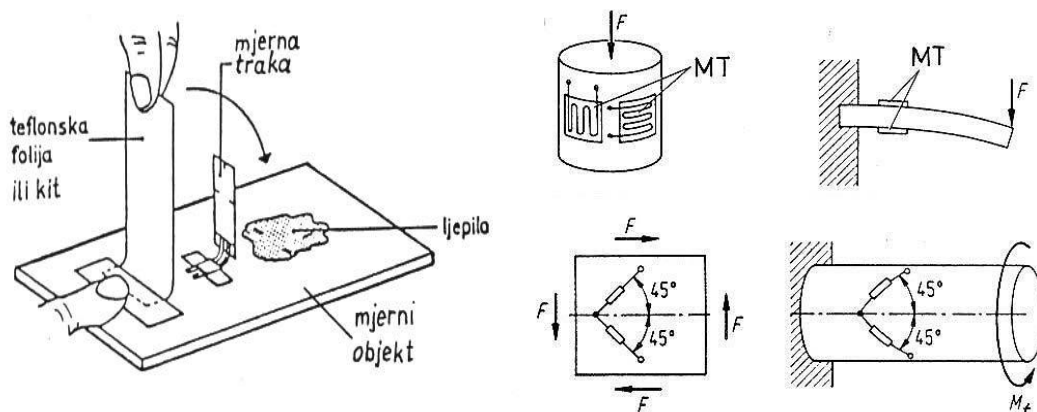
Tablica 2. Sastav materijala i k-faktor žice tenzometarske trake [7]

Oznaka	Sastav	k - faktor	Napomena
Konstantan	57÷60 % Cu, 40÷30 % Ni	2,0÷2,1	najčešće u upotrebi
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 ÷ 130	za laboratorijska mjerenja
Poluvodič	Silicij, tip n	-80 ÷ -100	

U praksi se najčešće rabe mjerne trake s vrijednostima faktora k :

- kod metalnih žica tenzometra: $k = (2,00 \div 2,10) \pm 1\%$,
- kod poluvodiča $k = 120$

Mjerna se traka specijalnim ljepljivom prilipljuje na očišćenu površinu mjernog objekta. Kod jednoosnih mjernih traka treba pritom paziti da se pravac glavnog naprezanja σ_1 , odnosno σ_2 , podudara s pravcem žica na traci. Postupak lijepljenja mjerne trake ovisi o pravcu deformacije na površini objekta koji se ispituje.[7] Sam postupak postavljanja trake prikazan je na slici 16.



Slika 16. Lijepljenje mjerne trake na površinu objekta [7]

3.2.4. Mehanički tenzometar

U praksi se mehanički tenzometri nešto rijede koriste, iako njihova kvaliteta nije upitna. Danas se najčešće rabe u avio i vojnoj industriji radi ispitivanja zategnutosti čeličnih užadi na lopaticama aviona, helikoptera. Velika prednost im je jednostavnost rukovanja, ali sama mjerna skala tenzometra je dosta grube raspodjele pa rezultati ponekad nemaju veliku točnost, već se dobivaju rezultati mjerenja s malom preciznošću. Mehanički tenzometar postavlja se direktno na čelično uže tako da se uže postavi između dvije stegne točke čime instrument ostaje fiksno postavljen. Potom se na skali tenzometra očitava dobiveni rezultat. Na slici 17. prikazan je primjer mehaničkog tenzometra.



Slika 17. Mehanički tenzometar [11]

4. METODE ZA PROVJERU I UMJERAVANJE TENZOMETARA

Kako je tenzometrija skup metoda za određivanje deformacija mehaničkih konstrukcija ili njihovih dijelova, tako ujedno i ne postoji jedinstvena, normirana metoda za provjeru i umjeravanje tenzometara. Glavni utjecajni faktor je upravo upotreba specifične opreme koja se koristi tokom samog postupka umjeravanja. Tako se danas najčešće koriste dvije metode:

- Metoda pomoću mjernih utega
- Metoda s elastičnim mjernim uređajem (kidalica + dinamometar)

Ostale metode su manje poznate, ali dosta laboratorija razvija vlastitu jedinstvenu metodu umjeravanja što ih čini rijeđe korištenima u praksi.

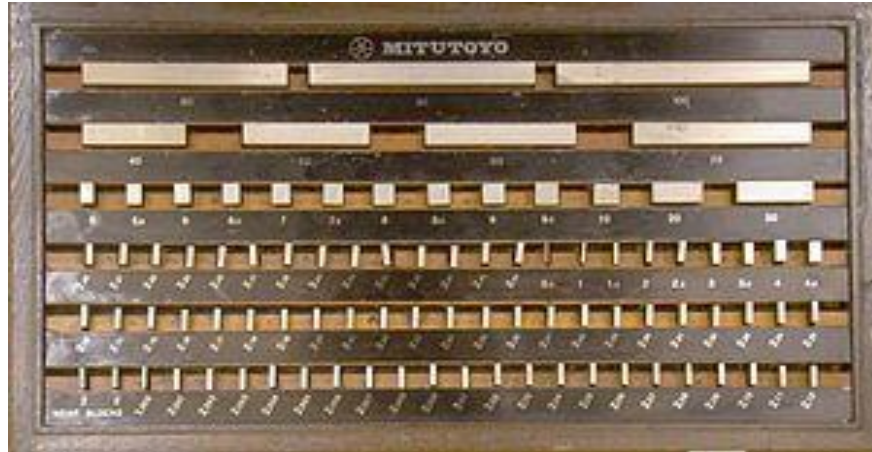
4.1. Umjeravanje

Umjeravanje je skup postupaka kojima se u određenim uvjetima uspostavlja odnos između vrijednosti veličina koje pokazuje neko mjerilo ili mjerni sustav, ili vrijednosti koje prikazuje neka tvorna mjera ili neka referencijska tvar i odgovarajućih vrijednosti ostvarenih etalonima. Umjeravanje se mora provesti kad neko mjeriteljsko svojstvo instrumenta ima zamjetan utjecaj na rezultate mjerenja. Umjeravanje mora provesti osposobljeni laboratorij, a odnosi se na nove i već postojeće instrumente. Moraju postojati kriteriji za ponovno umjeravanje. Kod umjeravanja je važno odrediti mjernu nesigurnost, a to je parametar pridružen rezultatu kojeg mjerenja koji opisuje rasipanje vrijednosti koje bi se razumno mogle pripisati mjerenoj veličini. Umjerni i ispitni laboratoriji moraju dokazati sljedivost rezultata mjerenja. [12]

Sljedivost je svojstvo mjernog rezultata kojim se rezultat dovodi u vezu s navedenim referencijskim etalonima (obično je to državni ili međunarodnim) korištenjem neprekinutih lanaca umjeravanja od kojih svako umjeravanje doprinosi utvrđenoj mjernoj nesigurnosti. Lanac sljedivosti je neprekidan lanac usporedaba, od kojih svaka ima utvrđenu mjernu nesigurnost. Time se osigurava da mjerni rezultat ili vrijednost etalona bude povezana s referentnim etalonima na višoj razini. Sljedivost prema SI mjernim jedinicama treba biti postignuta pozivanjem na odgovarajući primarni etalon ili na prirodnu konstantu. [12]

Umjeravanje mjerila provodi se mjernim etalonima, odnosno mjerilima koja služe kao referenca za utvrđivanje vrijednosti veličina i pridružene mjerne nesigurnosti za dodjelu mjernih rezultata druge veličine iste vrste, uspostavljajući mjeriteljsku sljedivost. Mjerni etalon precizniji je od

mjerila, na višoj je razini hijerarhijske ljestvice sljedivosti i ima manju mjernu nesigurnost od mjerila koja se njime umjeravaju.[13] Na slici 18 prikazani su mjerni etaloni.



Slika 18. Etaloni [13]

4.2. Umjeravanje tenzometra

Za umjeravanje tenzometra danas se najčešće koriste dvije metode. Iako postoji niz metoda koje se koriste u tu svrhu, ali su to jedinstvene metode svojstvene pojedinom laboratoriju ili su rijetko korištene pa stoga i manje poznate.

4.2.1. Metoda umjeravanja primjenom mjernih utega

Metoda umjeravanja primjenom mjernih utega vrlo je jednostavna i gruba metoda umjeravanja radi svoje jednostavne i specifične opreme, no ova metoda također ima i svoje nedostatke. Nasuprot jednostavnosti, ova metoda je osjetljiva na nepravilno rukovanje te zahtjeva veliku preciznost prilikom samog procesa umjeravanja. Od mjerne opreme najčešće se koriste etalonski utezi različitih težina, čelične užadi raznih promjera te poluga preko koje se obješaju utezi za čeličnu užad. Najveći nedostatak ove metode je sama preciznost, jer utezi se u većini slučajeva ne mogu smjestiti simetrično tako da ravnomjerno opterećuju čelično uže. Na slici 19. prikazana je mjerna oprema potrebna za umjeravanje metodom pomoću mjernih utega.



Slika 19. Mjerna oprema metode pomoću mjernih utega [15]

4.2.2. Metoda umjeravanja primjenom dinamometra i kidalice

Metoda umjeravanja primjenom dinamometra pronašla je veliku primjenu u industriji zbog svoje velike preciznosti u postupku umjeravanja. Nedostatak dinamometra je taj, što za ostvarenje određenog opterećenja zahtjevaju pomoćni uređaj (kidalicu). No, upravo ta njena preciznost u većini slučajeva predstavlja problem tokom umjeravanja jer svako nepravilno rukovanje mjeritelja se očituje na rezultatu mjerenja.



Slika 20. Kidalica [14]

5. EKSPERIMENTALNI DIO

5.1. Plan ispitivanja

Motiv za odabir teme ovog rada proizašao je iz samog interesa za čeličnim užadima, odnosno zbog interesa kolika je zapravo njihova čvrstoća, kolika je izdržljivost i sigurnost u dugotrajnim eksploatacijskim uvjetima. Je li isto ponašanje materijala čeličnih užadi u Hrvatskoj ili Kolumbiji, koliko puta čelična užad u dizalima mogu sa sigurnošću biti u pogonu bez kontrole i kada se ona zapravo trebaju mijenjati, čime se vrše njihova ispitivanja i kako se to radi, mnogo je zanimljivosti, pitanja i interesa kojima se vodio ovaj rad.

Plan eksperimentalnih ispitivanja je sljedeći:

- za eksperimentalni dio korišten je mehanički tenzometar T60 C8
- izbor tenzometra
- umjeravanje u tvrki Laboring pomoću mjernih utega i polužnim sustavom - metoda M1
- umjeravanje na FSB-u pomoću kidalice i dinamometra - metoda M2
- obrada rezultata
- analiza rezultata.

5.2. Tenzometar T60 C8

Tenzometar T60 C8 (slika 21.) spada u skupinu mehaničkih tenzometara. Sam postupak mjerenja ovim tenzometrom je dosta jednostavan, ali zahtjeva oprez pri korištenju. Tenzometar se postavlja tako da drži čelično uže između dvije spojne točke na čeljustima te nakon što je stabilno postavljen na čelično uže s njegove skale se očitava dobivena vrijednost u funtama. Zbog nejednakosti površine čelične užadi tokom očitavanja se mogu pojaviti male varijacije rezultata, stoga je tenzometar tokom mjerenja potrebno postavljati na 3 do 5 različitih mjesta po čeličnoj užadi i očitati sa skale rezultate kako bi se dobio najveći stupanj točnosti rezultata. Tenzometar T60 mora bit korišten na vrstama čeličnih užadi za koje je namijenjen odnosno kalibriran. T60 klase C8 ima mogućnost mjerenja užadi klase 7 x 7 ili 7 x 19, veličina 1/16", 3/32", 1/8", 1/4". Korištenjem tenzometra na drugim čeličnim užadima neće dati točne rezultate.



Slika 21. Mehanički tenzometar T60 C8 [11]

Najčešća uporaba tenzometara ovoga tipa je u avio i vojnoj industriji pri kontroli zategnutosti čeličnih užadi na lopaticama aviona, helikopterima.

Specifikacije tenzometra:

-proizvođač/tip tenzometra: Pacific Scientific/ C8 (T60-1001)

-radno područje: 10 - 200 lb (4.55 - 90.9 kg)

-rezolucija: 1 lb (0.45 kg)

Za razliku od vrste C8, tenzometar tipa C9 ima mogućnost mjerenja većih opterećenja te je njegovo radno područje 150-400 lb (68.18 - 204.55 kg). [12]

Na slici 22. prikazana je mjerna skala tenzometara T60 C8



Slika 22. Mjerna skala tenzometra T60 tipa C8

5.3. Umjeravanje metodom M1 (tvrtka Laboring)

Postupak umjeravanja tenzometra vrši se pomoću jedinstvene metode LAB-PO-0034 tvrtke Laboring, a sam postupak temelji se na uporabi jednostavne opreme poput etalonskih mjernih utega, poluge, testera momenta sile, što ovu metodu čini jednostavnom i točnom.

5.3.1. Faze pripreme umjeravanja

Uzima se tenzometar T60 C8 i postavlja se na stol za mjerenje momenta sile.

Nakon toga vrši se vizualni pregled tenzometra. Ako se utvrdi neko oštećenje ili nedostatak radi kojih bi umjeravanje bilo nemoguće provesti, prekida se postupak umjeravanja, te se kontaktira servis.

U tablicu se upisuje debljina užadi, tenzometarskih kockica i masa (opterećenja) na kojima će se provoditi umjeravanje. Umjeravanje na svakoj kombinaciji tenziometarskih kockica i masa (opterećenja) vrši se u pet točaka, ravnomjerno raspoređenih po radnom području tenzometra. Opterećenje se upisuju u jedinicama (kg). Redoslijed upisivanja je takav da se upisuju promjeri

užadi od najmanjeg do najvećeg, te za svaki promjer užeta, opterećenja od najmanjeg do najvećeg, redom u stupce (2) do (11). Izgled tablice prikazan je u tablici 3.

Tablica 3. Tablica rezultata

(A)		Uže:	Uže:	Uže:	Uže:	Uže:	Uže:	Uže:	Uže:
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(10)
(A)		Zadana masa (kg)	Zadana masa (kg)	Zadana masa (kg)	Zadana masa (kg)	Zadana masa (kg)	Zadana masa (kg)	Zadana masa (kg)	Zadana masa (kg)
R.br.		OČITANE VRIJEDNOSTI NA SKALI TENZIOMETRA							
(1)	1								
(2)	2								
(3)	3								
(4)	4								
(5)	5								

Prije umjeravanja potrebno je upisati sve relevantne podatke: - okolišni uvjeti

- ispitivač

- postupak

- korištena etalonska oprema

Osnovni podaci pri umjeravanju tenzometra T60 C8 su sljedeći:

PODACI O MJERILU:

Proizvođač/Tip: Pacific Scientific/ C8 (T60-1001)

Serijski broj: 23124

PODACI O MJERENJU:

Ispitivač: Daniel Vrančić

Postupak: LAB-PO-0034

Datum i vrijeme početka mjerenja: 02.09.2018.

Temp. Zraka: 23.8 (°C)

Tlak zraka: 998 (hPa)

Rel. vlažnost zraka: 52 (%RH)

Razlučivost skale tenzometra: 1 lb (0.45 kg)

KORIŠTENA ETALONSKA OPREMA:

- etalonski utezi Tehnica sn 1-21
- etalonski uteg TEP sn 000-012.

5.3.2. Faze provedbe umjeravanja

Ako se u bilo kojem trenutku provedbe mjerenja s tenzometrom utvrdi nešto što onemogućava daljnje umjeravanje, prekida se umjeravanje.

Na stabilni stol za mjerenje momenta sile postavlja se tester momenta sile Drumwillow L koji prati moment pričvršćene poluge TEP P3 te kontrolira njeno djelovanje na sam stol radi sigurnosti. Tester se za stol pričvršćuje vijcima (slika 24.).



Slika 24. Tester momenta sile Drumwillow L

Na tester se priključuje poluga TEP P3 (slika 25.). Konstrukcija ove poluge TEP P3 je posebno konstrukcijski određena, simetrična, te duljina od njene početne točke (mjesto na kojem se postavlja na nosač) do krajnje točke (mjesto protezanja čelične užadi) iznosi točno jedan metar.



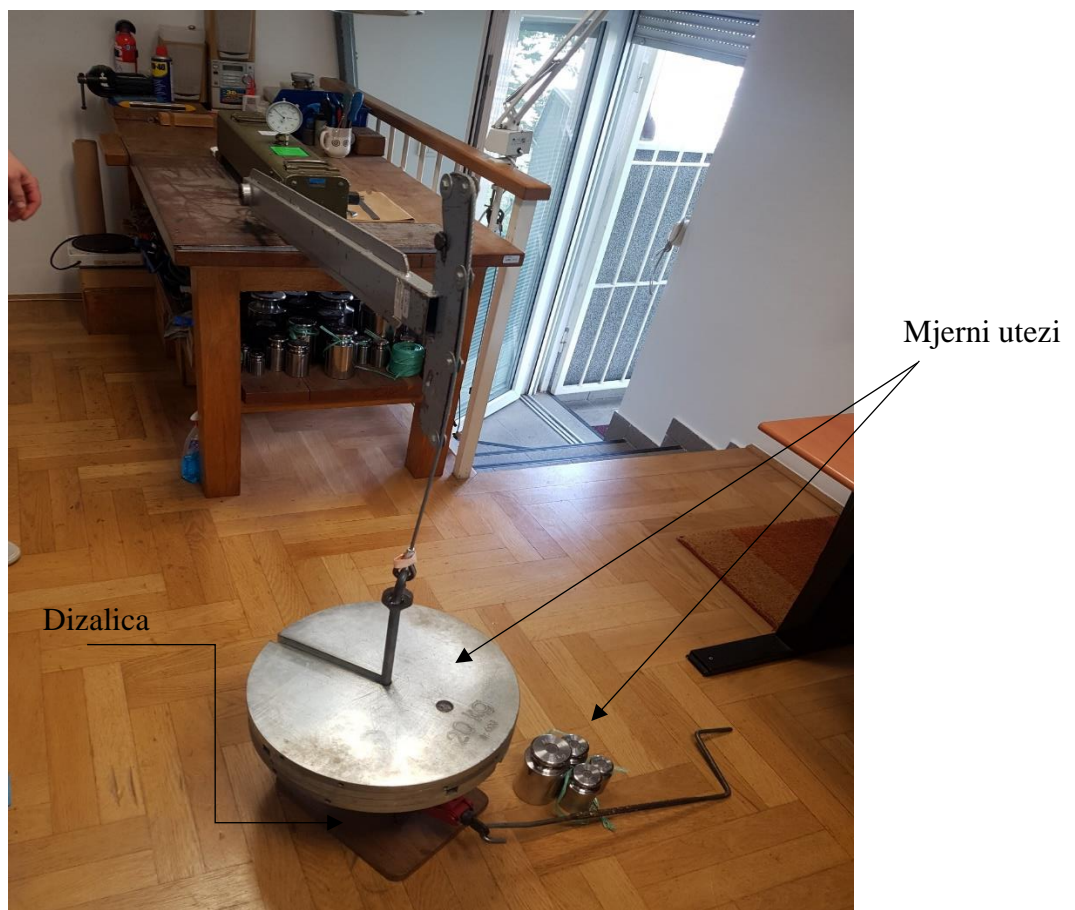
Slika 25. Poluga TEP P3 pričvršćena na tester

Zatim se na pričvršćenu polugu postavlja čelično uže upisano u prvom stupcu (2) - (6) u tablici za koje još nisu izvršena mjerenja (slika 26.).



Slika 26. Čelično uže postavljeno na polugu

Na užu se vješa specijalni uteg mase 5 kg, a zatim po potrebi, odnosno prema onome što je zapisano u tablici, na njega postavlja specijalne utege mase 20 kg. Ako traženu masu (opterećenje) nije moguće postići korištenjem samo specijalnih utega, na vrh specijalnih utega stavljaju se obični utezi, tako da težište obješene mase bude što bliže osi užeta. Za utege ukupne mase veće od 20 kg koristi se ručna dizalica, tako da se postavi ispod užeta na način da se os užeta i centralna os dizalice poklapaju, te utezi postave na dizalicu tako da ne vise na užetu, nego su samo priključeni kukom na užu, a podržava ih dizalica. Zatim se dizalica polagano spušta pomoću svoje posebne poluge sve dok utezi slobodno ne vise. Prije nego što će utezi početi slobodno visjeti, treba usporiti spuštanje dizalice i vrlo pažljivo osloboditi utege podrške dizalice tako da ne bi došlo do njihanja užeta s utezima (slika 27.).



Slika 27. Čelično uže opterećeno utezima i podržavano dizalicom

U tenzometar se postavlja odabrana tenzometarska kockica za dani stupac tablice. Zatim se ljestvica tenzometra nulira (kod nekih tenzometara položaj nule je različit za različite promjere užeta, što treba imati na umu). Zatim se tenzometar postavlja u radni položaj na užu, pritišće poluga tenzometra za učvršćenje užeta i očitava pokazivanje ljestvice tenzometra tako da je smjer gledanja okomit na ravninu ljestvice. Očitanje se upisuje u prvi slobodan redak (1)-(5) danog stupca tablice u relativnim jedinicama tenzometra ili jedinicama koje su označene na tenzometru (funte i kilogrami u našem slučaju). Nakon toga se tenzometar skida s užeta i nulira se. Postupak postavljanja specijalnih utega ponavlja se 4 puta, tako da su na kraju mjerenja za dani stupac izvršena sveukupno 5 puta i sva očitavanja upisana u retke (1) - (5).

Postupak od postavljanja čeličnog užeta pa sve do mjerenja tenzometrom te očitavanja mjernog rezultata ponavlja se za slijedeće stupce, tj. stupce (3), (4), (5) itd. dane tablice dok nisu izvršena mjerenja za sve stupce s vrijednostima predviđenim za umjeravanje.

Zatim se s uređaja za praćenje uvjeta okoliša očitavaju uvjeti okoliša u laboratoriju za moment sile, te se ispunjavaju polja:

- temperatura zraka
- tlak zraka
- relativna vlažnost

Nakon toga se provjerava je li temperatura okoliša izlazila iz okvira navedenih u postupku LAB-PO-0034 u razdoblju od početka do završetka mjerenja. Dopuštene temperature su između $+15^{\circ}\text{C}$ i $+25^{\circ}\text{C}$, a maksimalne varijacije temperature $\pm 3^{\circ}\text{C}$. Ukoliko su uvjeti okoliša bili ili izlazili izvan zadanih granica, rezultati u tablici se poništavaju, a umjeravanje se ponavlja.

Postupak mjerenja tenzometrom prikazan je na slici 28.



Slika 28. Mjerenje tenzometrom na čeličnoj užadi 1/8" opterećenoj utezima

Dobiveni rezultati su prikazani u Tablici 3.

Tablica 3. Rezultati umjeravanja tenzometra T60 C8 metodom M1

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	
(A)		Zadana masa (kg)	Zadana masa (kg)	Zadana masa (kg)	Zadana masa (kg)	Zadana masa (kg)	
		15	25	45	65	85	
R.br.		OČITANE VRIJEDNOSTI NA SKALI TENZIOMETRA					Jedinice
(1)	1	33 [15]	56 [25.45]	102 [46.36]	145 [65.91]	186 [84.55]	lbs [kg]
(2)	2	33 [15]	56 [25.45]	101 [45.9]	145 [65.91]	185 [84.09]	lbs [kg]
(3)	3	33 [15]	55 [25]	100 [45.45]	144 [65.45]	186 [84.55]	lbs [kg]
(4)	4	33 [15]	55 [25]	102 [46.36]	144 [65.45]	186 [84.55]	lbs [kg]
(5)	5	34 [15.45]	55 [25]	102 [46.36]	144 [65.45]	186 [84.55]	lbs [kg]

5.4. Umjeravanje metodom M2

Postupak umjeravanja tenzometra proveden je pomoću metode na elastičnom mjernom uređaju uz korištenje kidalice „Erichsen 474-2kN“ kao pomoćnog mjernog uređaja (slika 29.), koji je smješten u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

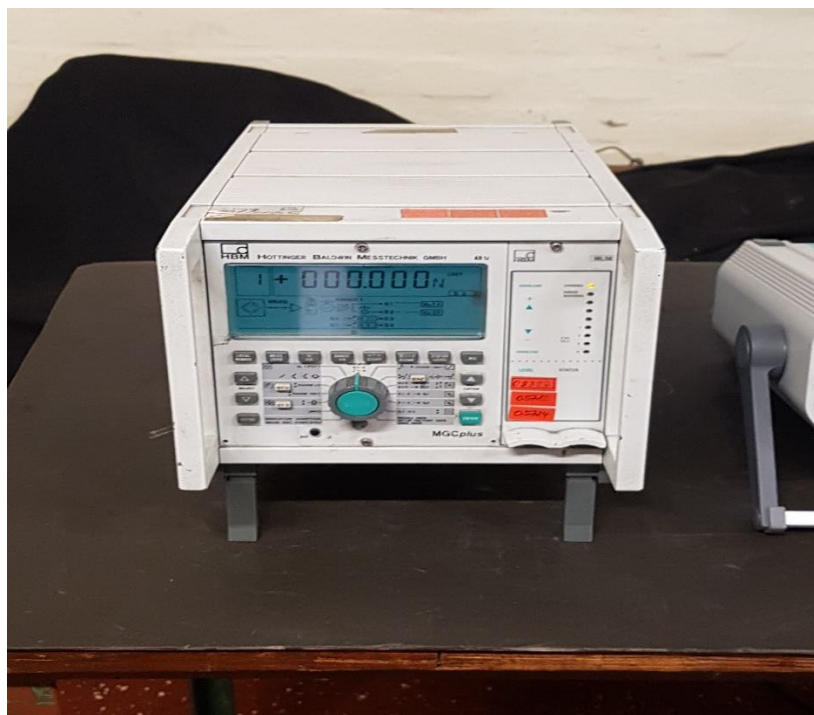


Slika 29. Kidalica Erichsen

5.4.1 Faze provedbe umjeravanja

Postupak umjeravanja tenzometra provodio se na pet različitih opterećenja, čime smo masu ovoga puta zamjenili djelovanjem sile, odnosno kilograma njutnima. Postupak se provodio na opterećenjima od 147.1, 245.2, 441.3, 637.5, te 833.6 njutna. Potrebno je voditi računa prilikom pretvorbe kilograma u njutne jer u tablici ostaju kilogrami kao mjerna jedinica te se proračun provodi prema gore već navedenom postupku.

Čelično uže od 1/8" postavlja se među čeljusti kidalice tako da su obje strane užadi pravilno obuhvaćene u čeljustima bez ispadanja. Pri korištenju dinamometra (prijenosnog etalona sile) očitavanje se provodi na mjernom pojačalu MGC koje je prikazano na slici 30. Proširena mjerna nesigurnost ovog sustava je 0.12%.



Slika 30. MGC uređaj za namještanje sile

Nakon namještenog opterećenja na čelično uže postavlja se mehanički tenzometar i očitava se dobivena vrijednost s mjerne skale u funtama te se vrijednost zapisuje (slika 31.). Mjerenje pri svakom pojedinom opterećenju vrši se 5 puta, ali na različitim mjestima čelične užadi, te se kasnije izračunava njihova srednja vrijednost kako bi se mogućnost pogreške što više smanjila. Prilikom postavljanja tenzometra treba biti pažljiv zbog osjetljivosti samog uređaja za mjerenje.



Slika 31. Postupak mjerenja tenzometrom

Postupak se ponavlja još četiri puta dok nismo pokrili sve vrijednosti opterećenja, rezultati se upisuju u tablice te obrađuju u paketu „Excell“ čime dobivamo tehnički izračun potreban za analizu umjeravanja (tablica 4.).

Tablica 4. Rezultati umjeravanja tenzometra T60 C8 pomoću elastičnog mjernog uređaja

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	
(A)		Zadana masa (kg/N)	Zadana masa (kg/N)	Zadana masa (kg/N)	Zadana masa (kg/N)	Zadana masa (kg/N)	
		15/147,1	25 /245,2	45/ 441,3	65 /637,5	85 /833,6	
R.br.		OČITANE VRIJEDNOSTI NA SKALI TENZIOMETRA					Jedinice
(1)	1	36 [16.36]	58 [26.36]	105 [47.73]	150 [68.12]	192 [87.27]	lbs [kg]
(2)	2	38 [17.27]	60 [27.27]	106 [48.18]	151 [68. 64]	191 [86.82]	lbs [kg]
(3)	3	36 [16.36]	59 [26.82]	105 [47.73]	150 [68.18]	190 [86.36]	lbs [kg]
(4)	4	37 [16.82]	59 [26.82]	105 [47.73]	152 [69.09]	191 [86.82]	lbs [kg]
(5)	5	36 [16.36]	58 [26.36]	105 [47.73]	150 [68.18]	190 [86.36]	lbs [kg]

5.5 Obrada rezultata

Obrada rezultata se provodi sukladno postupku obrade rezultata. Za obradu se koriste određeni faktori pretvorbe koji su prikazani u tablici 5.

Tablica 5. Faktor pretvorbe

Jedinice na tenzometru	Faktor pretvorbe f
(kg)	1
(N)	9,8065
(lbs)	2,2

Program za izračun svih podataka se provodi prema slijedećim izrazima :

Srednja vrijednost očitane sile napetosti na skali tenzometra

- izraz za srednju vrijednost očitane sile napetosti (\overline{N}) je :

$$\overline{N} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{n} \quad (5.1)$$

što u ovom slučaju (n=5) iznosi :

$$\overline{N} = \frac{N_1 + N_2 + \dots + N_5}{5} \quad (5.2)$$

gdje indeksi 1, 2... 5 označavaju redni broj mjerenja, odnosno redke (1)-(5) stupca (2)-(6) u tablici.

Apsolutna pogreška tenzometra

- mnogi tenzometri nemaju skalu u nekim konkretnim fizikalnim jedinicama, nego u relativnim jedinicama. Tada je račun apsolutne i relativne pogreške nemoguć, te se ne primjenjuje.

Izraz za apsolutnu pogrešku tenzometra (ΔN) je:

$$\Delta N = \overline{N} - N_0 \quad (5.3)$$

gdje je N_0 stvarna sila napetosti.

Relativna pogreška tenzometra

- izraz za relativnu pogrešku tenzometra (Δ) je:

$$\Delta = \frac{\overline{N} - N_0}{N_0} * 100 (\%). \quad (5.4)$$

Ponovljivost

- izraz za ponovljivost (b') je:

$$b' = \max \Delta(N_1, N_2, N_3, N_4, N_5) \quad (5.5)$$

dakle, najveća razlika između mjerenja.

Proširena ($k=2$) mjerna nesigurnost

- komponente mjerne nesigurnosti dane su u tablici 6.

Tablica 6. Komponente mjerne nesigurnosti

Simbol	Izvor mjerne nesigurnosti	Raspodjela (djelitelj)	Iznos komponente
A	Mjerna nesigurnost etalonskih utega	Normalna (2)	Uzima se iz Potvrde o umjeravanju
B	Ponovljivost	Pravokutna (1.73)	$\max\Delta(N_1, N_2, N_3, N_4, N_5)$
C	Razlučivost skale tenzometra (najmanji procjenjivi dio podjele skale tenzometra)	Pravokutna (1.73)	Ovisno o mjerilu koje se umjerava

Mjerna nesigurnost umjeravanja utega nekoliko redova veličine manja je od gore spomenutih doprinosa, pa se isto zanemaruje.

Izraz za proširenu ($k=2$) mjernu nesigurnost umjeravanja tenzometra je:

$$u_{k=2} = 2 \sqrt{\frac{A^2}{4} + \frac{B^2}{3} + \frac{C^2}{3}} \quad (5.6).$$

Zaokruživanje rezultata

- rezultati za mjernu nesigurnost iskazuju se sa jednom ili najviše dvije značajne znamenke, u skladu sa publikacijom EA-4/02: Izražavanje mjerne nesigurnosti pri umjeravanju. Ako je prva značajna znamenka proširene mjerne nesigurnosti 1 ili 2, rezultat se zaokružuje na dvije značajne znamenke, a ako je prva značajna znamenka proširene mjerne nesigurnosti 3, 4, 5, 6, 7, 8 ili 9, rezultat se zaokružuje na jednu značajnu znamenku. Ako se zaokruživanjem brojčana vrijednost mjerne nesigurnosti smanjuje za više od 5%, treba se upotrebljavati vrijednost zaokružena na više.

Zaokružene vrijednosti ($k=2$) mjerne nesigurnosti, upisuju se u bijela polja u tablici 'Zaokružene vrijednosti'. Zatim se u bijela polja upisuju i zaokružene vrijednosti za srednje očitavanje tenzometra, apsolutnu pogrešku i ponovljivost, na jednak broj decimalnih mjesta kao i proširena mjerna nesigurnost.

5.6. Obrada rezultata dobivenih metodom pomoću mjernih utega

U tablici 7. prikazani su rezultati dobiveni na temelju sljedećih formula: 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6.

Tablica 7. Obradeni podaci dobiveni metodom M1

TEHNIČKI IZRAČUN						
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	Jedinice
Faktor pretvorbe f	2,2000	2,2000	2,2000	2,2000	2,2000	-
Zadana sila napetosti	33,00	55,00	99,00	143,00	187,00	pounds
Srednje očitavanje tenz.	33,20	55,40	101,40	144,40	185,80	pounds
Apsolutna pogreška	0,20	0,40	2,40	1,40	-1,20	pounds
Relativna pogreška	0,6	0,7	2,4	1,0	-0,6	%
Ponovljivost	1,00	1,00	2,00	1,00	1,00	pounds
Razlučivost skale tenz.	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	pounds
Proš. mjer. nesigurnost	1,291	1,291	2,380	1,291	1,291	pounds

5.7. Obrada rezultata dobivenih metodom pomoću elastičnog mjernog instrumenta

U tablici 8. prikazani su obradeni podaci dobiveni umjeravanjem tenzometra T60 C8 metodom pomoću elastičnog mjernog uređaja.

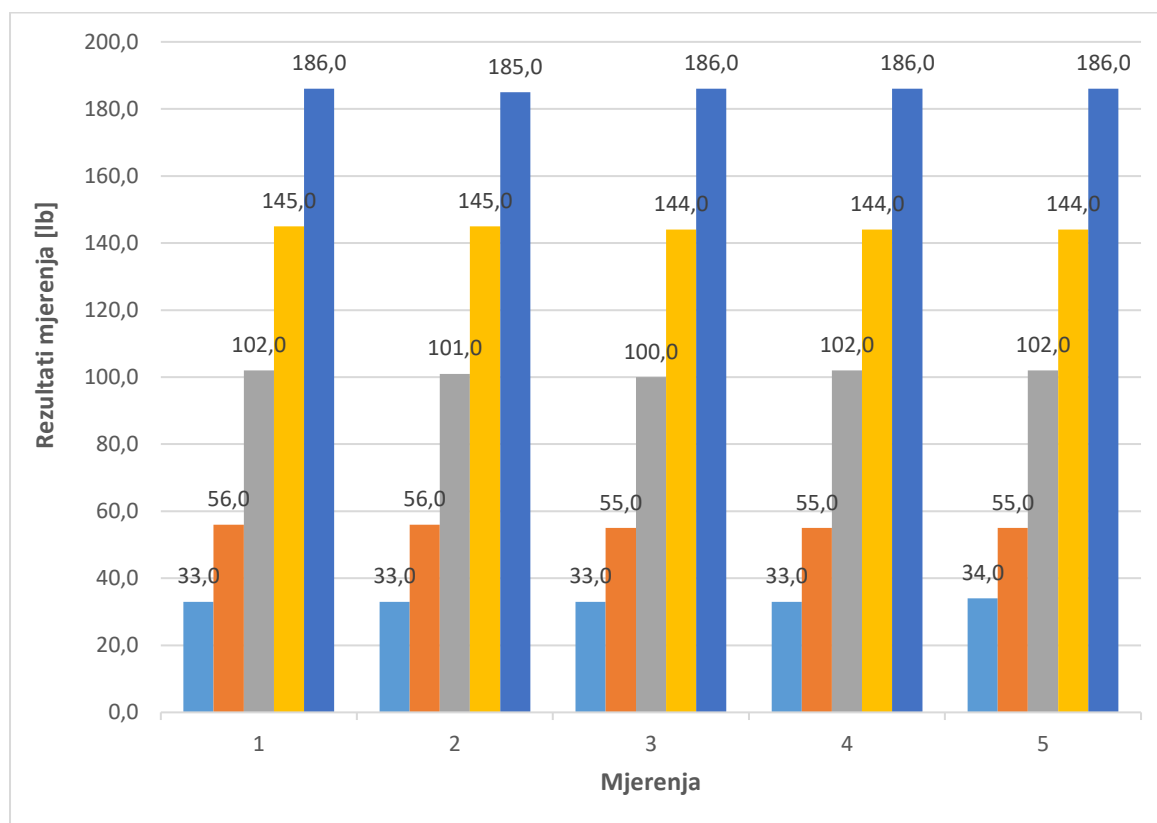
Tablica 8. Obradeni podaci dobiveni metodom M2

TEHNIČKI IZRAČUN						
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	Jedinice
Faktor pretvorbe f	2,2000	2,2000	2,2000	2,2000	2,2000	-
Zadana sila napetosti	33,00	55,00	99,00	143,00	187,00	pounds
Srednje očitavanje tenz.	36,60	58,80	105,20	150,60	190,80	pounds
Apsolutna pogreška	3,60	3,80	6,20	7,60	3,80	pounds
Relativna pogreška	10,9	6,9	6,3	5,3	2,0	%
Ponovljivost	2,00	2,00	1,00	2,00	2,00	pounds
Razlučivost skale tenz.	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	pounds
Proš. mjer. nesigurnost	2,380	2,380	1,291	2,380	2,380	pounds

6. ANALIZA REZULTATA

6.1. Analiza rezultata dobivenih metodom pomoću mjernih utega

Na slici 32. je dijagramski prikaz rezultata umjeravanja dobivenih metodom M1.



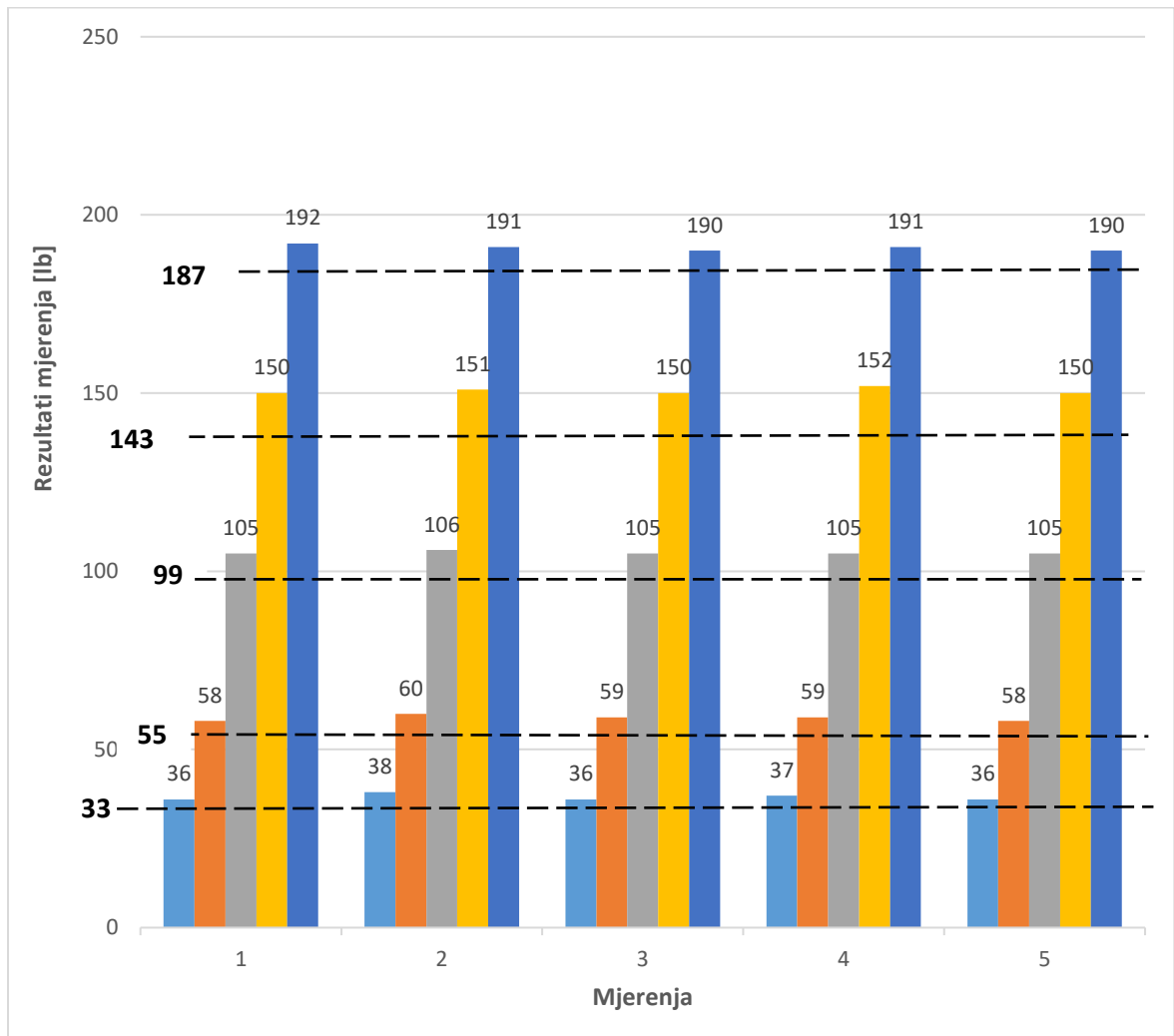
Slika 32. Dijagramski prikaz rezultata umjeravanja dobivenih metodom M1

S dijagrama je vidljivo da odstupanje tokom prvog, a i ostalih mjerenja nije variralo više od 1 funte (0.45 kg) što nam govori da je ponovljivost ove metode vrlo dobra s obzirom na zadano opterećenje u početku.

Tako za prvo mjerenje zadana sila napetosti iznosi 33 funte (15 kg), a rezultati mjerenja ne izlaze izvan 34 (15.45 kg) kao gornje granice, odnosno 33 (15 kg) kao donje granice mjerenja. Jedinstvena metoda tvrtke Laboring pokazala se kao jako točna metoda za umjeravanje tenzometara.

6.2. Analiza rezultata dobivenih na FSB-u

Na slici 33. su prikazani dijagrami sa svim rezultatima umjeravanja metodom M2.

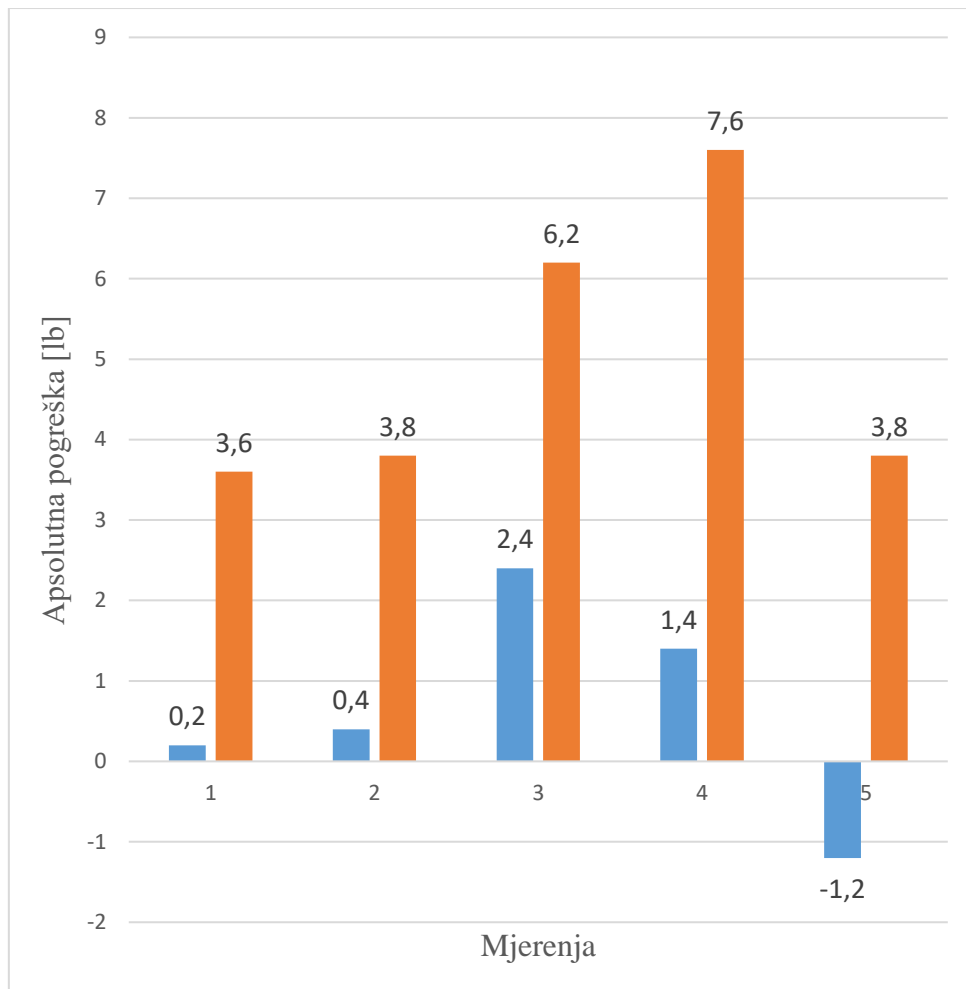


Slika 33. Dijagramski prikaz rezultata umjeravanja dobivenih metodom M2

S dijagrama je vidljivo da odstupanje tokom prvog, a i ostalih mjerenja nije variralo više od 2 funte (0.91 kg) tj. 8.92 N, što nam daje zadovoljavajuću ponovljivost ove metode s obzirom na opterećenje zadano u početku. Tako za prvo mjerenje zadana sila napetosti iznosi 33 funte (15 kg) tj. 147.1 N, a rezultati mjerenja ne izlaze izvan 38 funti (17.27 kg) tj. 169.37 N, kao gornje granice, odnosno 36 funti (16.36 kg) tj. 160.44 N, kao donje granice mjerenja. Iz ovoga je vidljivo da kod primjene kidalice i dinamometra dolazi do povećanog odstupanja od referentne vrijednosti koje su označene isprekidanom linijom na dijagramu. Ovo je obrađeno u poglavlju 6.3.

6.3. Usporedba rezultata

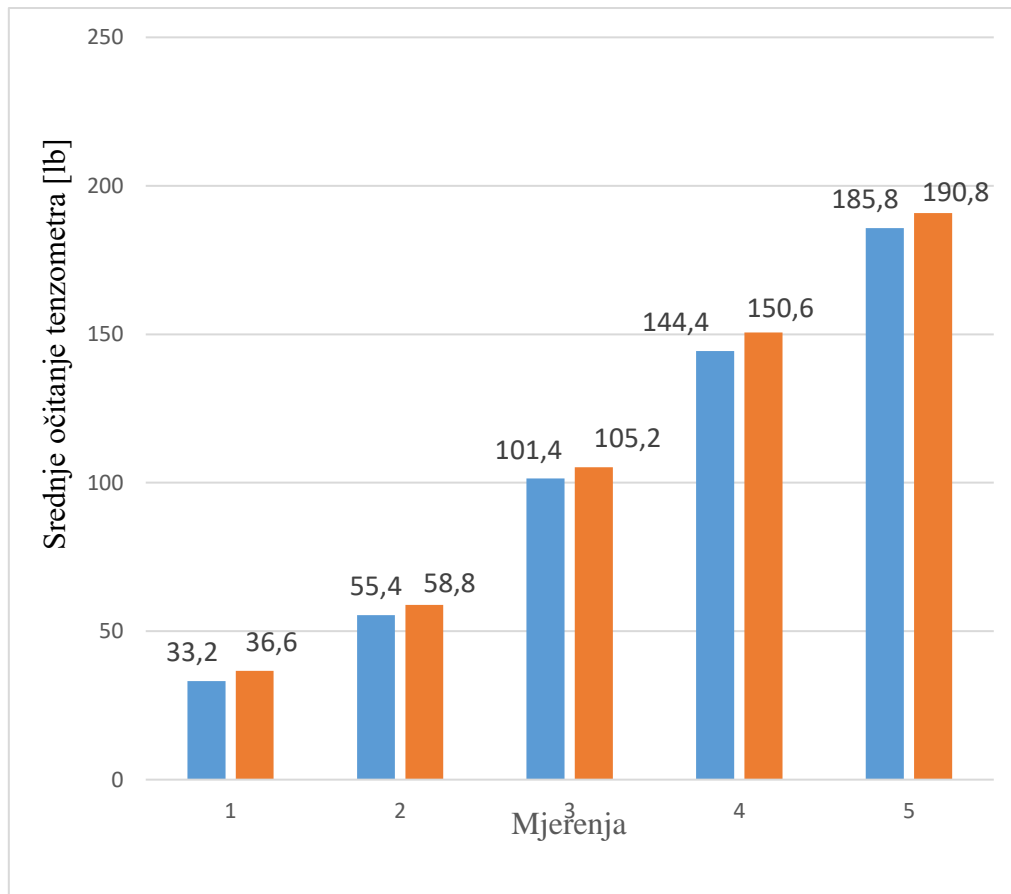
Na slici 34 prikazane su vrijednosti apsolutnih grešaka obiju metoda, odnosno rezultata dobivenih metodom M1 i metodom M2.



Slika 34. Dijagram usporedbe apsolutne pogreške dobivene metodom M1 i metodom M2

Isti problem povećanog odstupanja rezultata dobivenih metodom M2 se pokazao i na ostalim mjernim točkama. Iz ovoga možemo zaključiti da ova metoda, iako ima dobru ponovljivost, stvara sustavnu pogrešku.

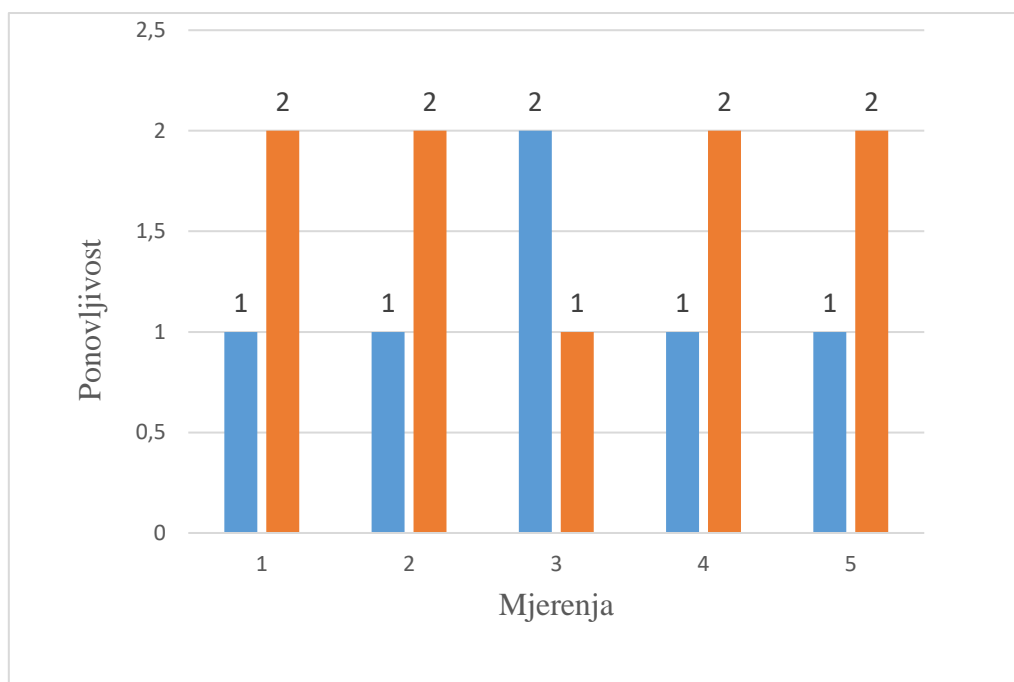
Na slici 35. prikazana su srednja očitavanja tenzometra dobivena umjeravanjem metodom M1 i metodom M2.



Slika 35. Dijagram srednjeg očitavanja tenzometra pojedinih mjerenjenja dobivenih umjeravanjem metodom pomoću mjernih utega i metodom pomoću elastičnog mjernog uređaja

Na dijagramu je vidljivo da rezultati dobiveni metodom M1 i metodom M2 s porastom opterećenja približno jednako rastu, odnosno rasipanja rezultata obiju metoda porastom opterećenja su podjednaka. U ovom slučaju metoda M2 nam daje lošije rezultate obzirom na referentnu vrijednost te su rasipanja rezultata ovom metodom veća nego kod metode M1.

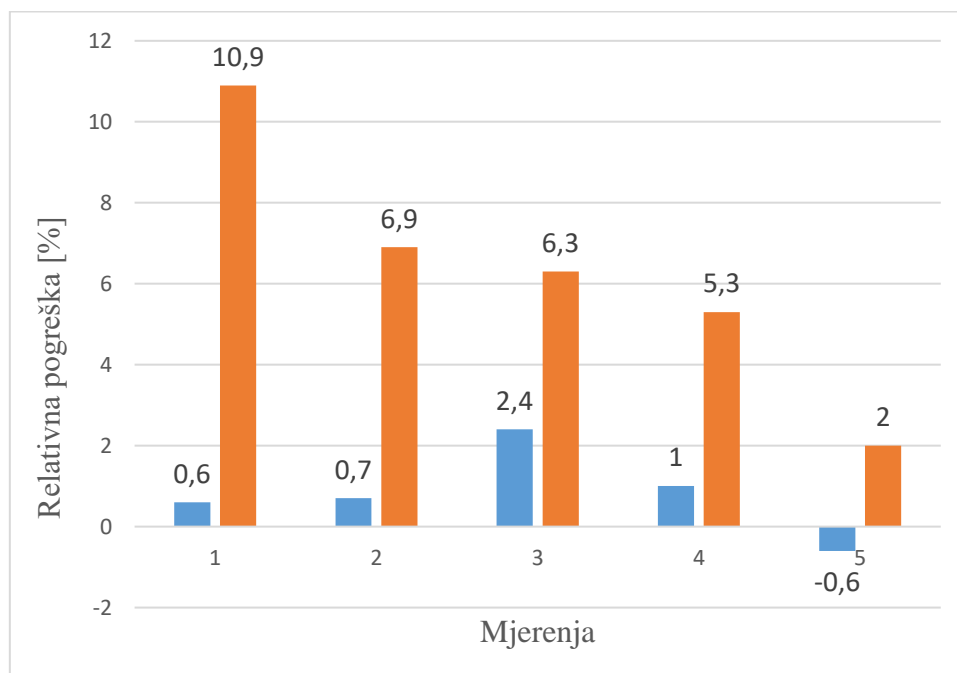
Na slici 36. prikazana su vrijednosti ponovljivosti dobivene umjeravanjem tenzometra metodom M1 i metodom M2.



Slika 36. Dijagram ponovljivosti pojedinih mjerenja dobivenih umjeravanjem metodom M1 i metodom M2

Ponovljivost obje metode je relativno dobra pogotovo ako se uzme u obzir da je ralučivost uređaja 1 ls.

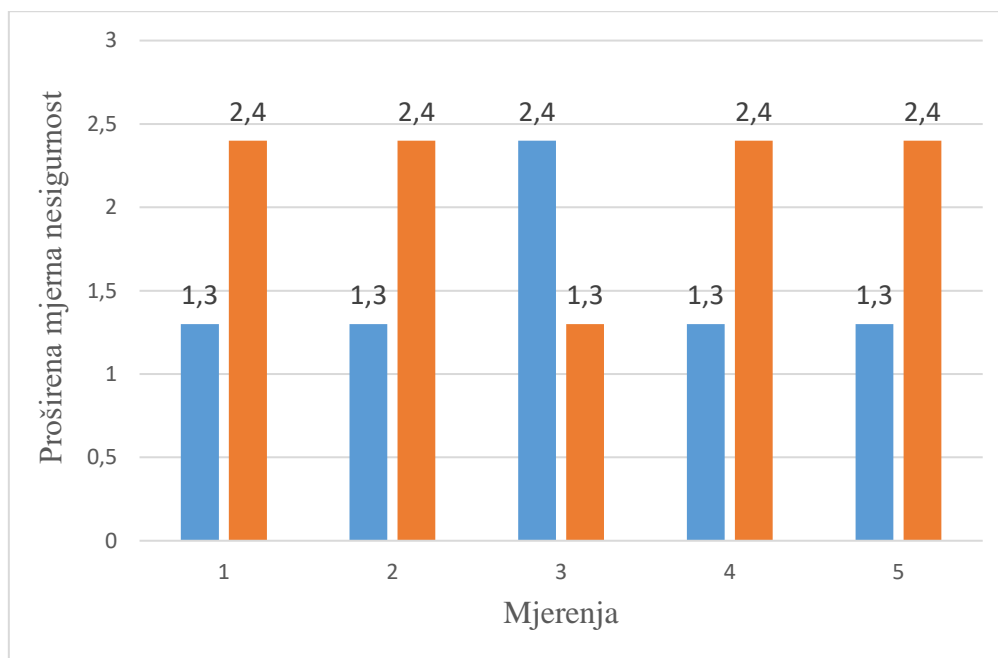
Na slici 37. prikazane su vrijednosti relativne pogreške dobivene umjeravanjem tenzometra metodom M1 i metodom M2.



Slika 37. Dijagram usporedbe relativnih pogrešaka pojedinih mjerenja dobivenih umjeravanjem metodom M1 i metodom M2

Relativna pogreška kod metode M1 je na svim točkama podjednaka odnosno nije značajno promjenjiva u odnosu na vrijednost opterećenja. Metoda M2 ima značajno veliku pogrešku pri malim silama. Što su sile veće to je pogreška manja i približava se pogrešci metode M1. Osnovni problem metode M2 je osjetljivost uređaja i stabilnost pomoćnog uređaja (kidalice). Održavanje točne vrijednosti opterećenja na primjenjenoj kidalici nije bilo moguće. Drugi problem je bio kako postaviti tenzometar na opterećeno užje jer dolazi do utjecaja mase samog tenzometra na vrijednosti pokazivanja.

Na slici 38. prikazane su vrijednosti proširene mjerne nesigurnosti dobivene umjeravanjem tenzometra metodom M1 i metodom M2.



Slika 38. Dijagram usporedbe proširenih mjernih nesigurnosti pojedinih mjerenja dobivenih umjeravanjem metodom M1 i metodom M2

Proširena mjerna nesigurnost za obje metode ima konstantnu vrijednost. Razlog tome je što najveći udio nesigurnosti proizlazi iz standardne nesigurnosti uslijed razlučivosti

7.0. ZAKLJUČAK

Primjena tenzometara u utvrđivanju napetosti čelične užadi kod nekih specifičnih objekata može biti od presudne važnosti s aspekta sigurnosti, stoga je njihova provjera i umjeravanje od presudnog značaja. Na temelju dobivenih vrijednosti umjeravanja te obrade i analize dobivenih rezultata u ovom radu mogu se donijeti sljedeći zaključci:

- mjerenje sila opterećivanja užeta nije jednostavan postupak. Stoga on zahtjeva puno znanja i iskustva. Današnji mehanički tenzometri su vrlo jednostavni mjerni uređaji za primjenu, ali s dosta slabom razlučivošću. Povjerenje u takve rezultate možemo često puta uzeti samo s kvalitativne strane, ali ne i u potpunosti s kvantitativne.
- metode umjeravanja nisu standardizirane što je dodatni problem kod umjeravanja tenzometara. Ako netko razvija novu metodu, pogotovo ovu s uporabom elastičnih mjernih uređaja, vrlo lako možemo unijeti jako velike pogreške. Ovo predstavlja problem za korisnika tenzometara jer na temelju rezultata umjeravanja možemo donijeti krive zaključke o stanju mjerila ili tu pogrešku prenijeti na samo mjerenje na terenu.
- iskustvo mjeritelja predstavlja bitan utjecaj kod metoda umjeravanja tenzometara. Pogotovo se to očituje pri odabiru metode umjeravanja, pomoćne opreme kao što je izbor čeličnog užeta koje služi kao pomoćno sredstvo pri umjeravanju.
- provedba međulaboratorijskih usporedbi između umjernih laboratorija u velikoj mjeri bi pomogla pri utvrđivanju izvora nesigurnosti pri umjeravanju tenzometara, njihovu kvantifikaciju te na kraju i pokušaju razvoja norme za umjeravanje tenzometara.

LITERATURA

- [1] Podloge za predavanja iz kolegija „Mehanička svojstva materijala“
- [2] <http://www.manmonthly.com.au/features/twisting-the-history-of-steel-wire-rope/>
- [3] <https://www.sampsistemi.com/applications/steeltwire-ropes/>
- [4] https://www.google.hr/search?q=primjena+%C4%8Deli%C4%8Dne+u%C5%BEadi+kod+%C5%BEi%C4%8Dara&hl=hr&source=lnms&sa=X&ved=0ahUKEwj_yrW7i8fdAhVEtYsKHVt4B1EQ_AUICSgA&biw=1920&bih=894&dpr=1
- [5] <http://divk.inovacionicentar.rs/ivk/pdf/195-IVK3-2007-DM-DJ-IA.pdf>
- [6] <https://superslings.ca/Products/Slings/WireRope/WireRopeTypes.aspx>
- [7] http://www.sfsb.unios.hr/ksk/cvrstoca/web_cvrstoca/N_eksperiment/N_d.pdf
- [8] <https://courses.engr.illinois.edu/ece445/getfile.asp?id=5218>
- [9] <https://www.checkline.com/product/GE-50576-A/GE%E2%80%9150576-A>
- [10] https://particular.ie/brochures/supplier_brochures_pdf/optical_tensiometers_theta_brochure.pdf
- [11] <https://www.skygeek.com/t60-1001-c8-1a.html>
- [12] <http://www.svijet-kvalitete.com/index.php/umjeravanje/260-umjeravanje-instrumen>
- [14] <https://repozitorij.vuka.hr/islandora/object/vuka%3A494/datastream/PDF/view>
- [13] „Radne upute“ preuzete iz firme Laboring
- [14] <https://www.google.hr/search?q=kidalica&oq=kidalica&aqs=chrome..69i57j0l5.947j1j8&sourceid=chrome&ie=UTF-8>
- [15] https://www.mt.com/hr/hr/home/products/Industrial_Weighing_Solutions/weights.htm