Utjecajni faktori na mjernu nesigurnost određivanja Yongovog modula elastičnosti

Mahenić, Luka

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:502807

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Luka Mahenić

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor: Student:

Prof.dr.sc. Željko Alar dipl.ing. Luka Mahenić

Zagreb,2019 godina.

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

Zahvaljujem se prvenstveno mojem mentoru Željku Alar na posvećenom vremenu i trudu oko izrade ovog diplomskog rada.

Također želio bih se zahvaliti dečkima iz laboratorija s kojima sam odradio eksprimentalnio dio rada.
I na kraju zahvalio bi se prvenstveno svojoj obitelji koji su bili cijelo vrijeme podrška tijekom cijelog mog školovanja do sada, također i djevojci, prijateljima i kolegama s fakulteta s kojima sam zajedno prošao put do izrade ovog rada.

Luka Mahenić

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: **LUKA MAHENIĆ** Mat. br.: 0035200159

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecajni faktori na mjernu nesigurnost određivanja Yongovog modula elastičnosti**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influencing factors on the measurement uncertainty when determining the Young's modulus of elasticity**

Opis zadatka:

Youngov modul elastičnosti je jedno od važnijih mehaničkih svojstava materijala, a za njegovo određivanje potrebna je vrlo kvalitetna oprema za točno mjerenje sile i pomaka u elastičnom području materijala. Definiranje i kvantifikacija utjecajnih faktora na određivanje modula elastičnosti zahtijeva jako puno provedenih ispitivanja te dobro poznavanje metode ispitivanja.

U radu je potrebno sljedeće:
1. Opisati način određivanja modula elastičnosti statičkim vlačnim ispitivanjem te definirati izvore mjerne nesigurnosti.
2. Iz literaturnih podataka istražiti modele procjene i proračuna mjerne nesigurnosti pri određivanju modula elastičnosti.
3. Eksperimentalno provesti statičko vlačna ispitivanja na čeličnim uzorcima na različitim kidalicama s različitim mjernim sustavima za pomak.
4. Analizirati dobivene rezultate i dati zaključke.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventulano 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

1. UVOD ... 1
2. MEHANIČKA SVOJSTVA MATERIJALA ... 3
2.1. Čvrstoća materijala ... 3
2.2. Krutost materijala ... 3
2.3. Duktilnost ... 5
2.4. Žilavost ... 5
2.5. Puzanje materijala ... 7
2.6. Umor materijala ... 9
2.7. Tvrdoća ... 10
3. MODUL ELASTIČNOSTI ... 11
3.1. Povijest proučavanja elastičnosti materijala ... 11
3.2. Definicija ... 11
3.3. Elastične konstante ... 13
3.3.1. Poissonov koeficijent ... 13
3.3.2. Coulombov modul ... 14
3.3.3. Obujamni modul elastičnosti ... 15
3.4. Vrijednosti modula elastičnosti ... 15
4. STATIČKO VLAČNO ISPITIVANJE ... 17
5. PROCJENA I PRORAČUN MJERNE NESIGURNOSTI ... 23
5.1. Općenito ... 23
5.2. Youngov modul elastičnosti ... 23
6. EKSPRIMENTALNI DIO ... 27
6.1. Plan ispitivanja ... 27
6.2. Određivanje hrapavosti uzoraka ... 28
6.3. Umjeravanje opreme za ispitivanje ... 30
6.3.1 Umjeravanje kidalica ... 30
6.3.2. Umjeravanje ekstenzometar ... 32
6.3.3. Pomak traverze ... 33
6.4. Određivanje modula elastičnosti ... 35
6.4.1. Ispitivanje pomoću kontaktnog ekstenzometra ... 37
6.4.2 Ispitivanje pomoću pomaka traverze ... 41
7. ANALIZA REZULTATA ... 45
7.1 Analiza rezultata grubo obrađenih epruveta ... 46
7.2 Analiza rezultata za fino obrađene epruvete ... 49
7.3. Pomak traverze ... 51
8. ZAKLJUČAK ... 54
9. LITERATURA ... 56

POPIS SLIKA

Slika 1. Kruća opruga [5] 4
Slika 2. Manje kruća opruga [6] 4
Slika 3. Usporedba žilavosti za dva različita materijala 7
Slika 4. Dijagram puzanja [1] 8
Slika 5. Model širenja pukotine pri naprezanju[8] 9
Slika 6. Shemaski prikaz nastanka loma pri umoru materijala.[1] 10
Slika 7. Dijagram naprezanja [14] 12
Slika 8. Prikaz epruvete prije i nakon ispitivanja [20] 17
Slika 9. Dijagram sila – produljenje[1] 20
Slika 10. Konvencionalni dijagram naprezanje-istezanje[1] 21
Slika 11. Kidalice Zwick/ Roell [22] 22
Slika 12. Surftronic duo 29
Slika 13. Kidalica WPN 36
Slika 14. Računalo povezano s kidalicom 37
Slika 15. Kontaktni ekstenzometar 38
Slika 16. Podjela finih i grubih epruveta 39
Slika 17. Prikaz slomljenih epruveta 45
Slika 18. Izračunate vrijednosti na sljedećim rasponima za uzorak 1 46
Slika 19. Izračunate vrijednosti na sljedećim rasponima za uzorak 2 47
Slika 20. Izračunate vrijednosti na sljedećim rasponima za uzorak 3 47
Slika 21. Izračunate vrijednosti na sljedećim rasponima za uzorak 7 48
Slika 22. Izračunate vrijednosti na sljedećim rasponima za uzorak 10 48
Slika 23. Izračunate vrijednosti na sljedećim rasponima za uzorak 4 49
Slika 24. Izračunate vrijednosti na sljedećim rasponima za uzorak 5 49
Slika 25. Izračunate vrijednosti na sljedećim rasponima za uzorak 6 50
Slika 26. Izračunate vrijednosti na sljedećim rasponima za uzorak 8 50
Slika 27. Izračunate vrijednosti na sljedećim rasponima za uzorak 9 51
Slika 28. Izračunate vrijednosti na sljedećim rasponima za uzorak 14 52
Slika 29. Dijagram sila-produljenje za uzorak 14 53

POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrijednosti Poissonov koefcijenta[17] 14
Tablica 2. Modul smika za određene materijale[18] 15
Tablica 3. Vrijednosti modula elastičnosti za određene materijale[19] 16
Tablica 4. Tolerancije poprečnih dimenzija ispitnih uzoraka[21] 19
Tablica 5. Plan ispitivanja 27
Tablica 6. Ispitni uzorci 28
Tablica 7. Izmjerene vrijednosti hrapavosti 29
Tablica 8. Podjela epruveta 30
Tablica 9. Izmjerene vrijednosti 31
Tablica 10. Ostatak sile i relativno nulto odstupanje 31
Tablica 11. Izračunate vrijednosti pogrešaka nesigurnosti 31
Tablica 12.Izmjerene vrijednosti i izračunate vrijednosti pogrešaka i nesigurnosti 32
Tablica 13. Kriterij za klasifikaciju 32
Tablica 14. Razred mjerne točnosti 33
Tablica 15. Izmjerene vrijednosti i izračunate vrijednosti pogrešaka i nesigurnosti 34
Tablica 16. Kriterij za klasifikaciju 34
Tablica 17. Razred točnosti mjernog područja 35
Tablica 18. Rezultati učitanih sila i produljenja za 5 grubih epruveta 39
Tablica 19. Rezultati modula elastičnosti za 5 grubih epruveta 40
Tablica 20. Rezultati učitanih sila i produljenja za 5 finih epruveta 40
Tablica 21. Rezultati modula elastičnosti za 5 finih epruveta 41
Tablica 22. Rezultati učitanih sila i produljenja za 5 grubih epruveta 42
Tablica 23. Rezultati modula elastičnosti za grube epruvete 42
Tablica 24. Rezultati učitanih sila i produljenja za 5 finih epruveta 43
Tablica 25. Rezultati modula elastičnosti za fine epruvete 43
Tablica 26. Prikaz produljenja i promjera nakon pucanja. 44

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	/	Istezljivost
A	mm^2	Površina
b	/	Odsjek na y os
d_0	mm	Početni polumjer
E	N/mm^2	Modul elastičnosti
e_f	/	Produljenje
F	N	Sila
F_{max}	N	Maksimalna sila
G	N/mm^2	Modul smika
HV		Tvrdoća
l_0	mm	Početna duljina epruvete
m	/	Nagib pravca
q	/	Smanjene površine pri lomu
r	/	Koeficijent korelacije
R_{eh}	N/mm^2	Gornja granica razvlačenja
R_m	N/mm^2	Vlačna čvrstoća
s_0	mm^2	Početni poprečni presjek
S_b	/	Standardna devijacija presjecanja
S_x	/	Standardna devijacija za x
S_{xy}	/	Empirijska kovarijanca
S_y	/	Standardna devijacija za y
u	/	Proširena mjerna nesigurnost
ue	/	Kontinuirana standardna mjerna nesigurnost
us_0	/	Nesigurnost presjeka
Z	/	Kontrakcija
ε_{axial}	/	Uzdužno (aksijalno produljenje)
ε_{trans}	/	Poprečno (transverzalno) suženje ili skupljanje
τ	N/mm^2	Coulombov modul
ε	/	Deformacija
σ	N/mm^2	Naprezanje
ν	/	Poissonov omjer,
Δl	mm	Produljenje epruvete

SAŽETAK

U diplomskom radu opisan je modul elastičnosti. Modul elastičnosti određivan je na 20 ispitnih uzoraka. Uzorci su podijeljeni u dvije grupe prema hrapavosti površine. Svi uzorci su od iste vrste materijala. Ispitivanje je provedeno pomoću kontaktnog ekstenzometra i pomaka traverze. Nakon provedenih ispitivanja provedena je analiza rezultata i uzeta je u obzir mjerna nesigurnosti . Uspoređeni su rezultati dobiveni objema metodama i donesen je zaključak.

Ključne riječi: modul elastičnosti, kontaktni ekstenzometar, pomak traverze

SUMMARY

The work describes the physical principle of the materials elasticity i.e. Young’s modulus of elasticity. Samples were split in 2 groups according to the surface roughness. All samples were made of the same type of material. The test was peformed using a contact extensometer and shift of the traverse. After the test was performed analysis of the results was carried out with measurement uncertainty . The results were compared and a conclusion was reached.

Key words: young's modulus, contact extensometer, shift of the traverse

1. UVOD

Materijali se odlikuju raznovrsnim fizikalno-kemijskim svojstvima, od gustoće, tališta, kemijske postojanosti otpornosti na koroziju, otpornosti na trošenje, električne i toplinske vodljivosti, magnetske permeabilnosti, specifičnog toplinskog kapaciteta i toplinskog rastezanja sve do prozirnosti ili boje. Ovisno o svojim fizikalno-kemijskim svojstvima materijali posjeduju i raznovrsna tehnološka svojstva, koja daju uvid u njihovo ponašanje pri raznim postupcima obrade i spajanja, poput lijevkosti, kovkosti, rezljivosti, zakaljivosti, zavarljivosti ili lemljivosti. Mehaničko ponašanje materijala, kao i mnoga tehnološka svojstva, u prvom su redu određeni mehaničkim svojstvima materijala. Jedno od njih je i već spomenuta gustoća, definirana kao omjer mase i obujma ili kao masa jediničnog obujma materijala.

Otpornost materijala općenito se može definirati kao skupina zahtijeva koji se postavljaju na materijal s gledišta eksploatacijskih karakteristika proizvoda. Pored otpornosti materijala tu su još i neki drugi zahtjevi:

· funkcionalnost,

· pouzdanost,

· trajnost i sl.

Pod otpornošću materijala podrazumijeva se otpornost mehaničkom opterećenju ili mehanička otpornost, otpornost vanjskim utjecajima (otpornost koroziji, visokoj ili niskoj temperaturi), te otpornost trošenju ili tribološka otpornost. Ovakvu podijelu ne treba uzimati strogo budući da se sve tri vrste otpornosti u većoj ili manjoj mjeri prekrivaju.

Mehanička otpornost materijala određena je njegovim mehaničkim svojstvima. Mehanička svojstva zauzimaju istaknuto mjesto među ostalim fizikalnim i kemijskim svojstvima jer se temeljem njih dimenzioniraju dijelovi strojeva i elementi konstrukcija.

Prilikom dimenzioniranja potrebno je sagledati intenzitet, način te trajanje svih mogućih mehaničkih opterećenja koja će se pojaviti tijekom eksploatacije. Stoga se strojni dijelovi odnosno dijelovi konstrukcija dimenzioniraju na osnovu onih mehaničkih svojstava koja karakteriziraju mehaničku otpornost materijala za određene eksploatacijske uvjete.

Osnovni je cilj da se tijekom eksploatacije ne pojavi lom, odnosno plastična ili trajna deformacija što bi funkcionalno onemogućilo rad strojnog dijela ili čitave konstrukcije.

Mehanička svojstva materijala, kao i sva ostala svojstva, posljedica su strukturnog stanja materijala. Strukturno stanje nekog materijala dobiva se obradom materijala određenog (kemijskog) sastava određenim tehnološkim postupkom. Tako se izborom materijala i odgovarajućeg tehnološkog postupka postiže ciljano (mikro)strukturno stanje koje će dati željena (mehanička) svojstva. Poznavanjem korelacije mikrostruktura – mehanička svojstva moguće je unaprijed proračunati mehanička svojstva koristeći određene (mikro)strukturne parametre. Međutim, to vrijedi samo za idealne tvari [1].

U radu ćemo usporediti mjerne nesigurnosti između dva načina određivanja modula elastičnosti. Određivati će se modul elastičnosti pomoću kontaktnog ekstenzometra MFA 2 i pomaka traverze kidalice. Ispitivanja će se vršiti na istoj vrsti materijala. Izvesti će se ukupno 20 ispitivanja. 10 komada epruveta će se finije izraditi, a preostalih 10 komada će biti grubije izrađeno. Na kraju će se rezultati analizirati i donijeti ćemo zaključke.

2. MEHANIČKA SVOJSTVA MATERIJALA

Mehanička svojstva materijala povezana su s ponašanjem pod opterećenjem ili kod vlačnih, tlačnih ili smičnih naprezanja.

Svojstva se određuju ispitivanjima u odgovarajućim uvjetima, uobičajena mehanička svojstva su vlačna čvrstoća, granica elastičnosti, čvrstoća puzanja, zamor materijala, duktilnost, udarna čvrstoća , tvrdoća i modul elastičnosti. Obično naprezanje može biti elastično (prisutno samo tijekom naprezanja) ili plastična (trajna) deformacija.

Mehanička svojstva korisna su u određivanju da li se materijal može proizvesti u željenom obliku ili ne, a također odolijevaju predviđenim mehaničkim silama.

Riječi mehanički i fizički često se pogrešno koriste naizmjenično. Navedena su mehanička svojstva. Ponekad se modul elastičnosti smatra fizičkim svojstvom materijala jer je svojstvo koje se ne može bitno promijeniti postupcima poput toplinske obrade ili hladnog rada. Mehanička svojstva materijala objašnjena su dalje u tekstu [2].

2.1. Čvrstoća materijala

Čvrstoćom konstrukcije ili dijela konstrukcije nazivamo sposobnost prenošenja opterećenja bez pojave loma [3]. Da bi neka konstrukcija očuvala svoju čvrstoću, najveća naprezanja na kritičnim mjestima ne smiju biti veća od dopuštenih vrijednosti naprezanja za materijal od kojeg je kostrukcija izrađena.

2.2. Krutost materijala

Krutost materijala je svojstvo koje teži da se materijal vrati u početni položaj nakon što je bio podvrgnut opterečenjem [4]. Na slikama 1 i 2 prikazane su dvije različite opruge s obzirom na krutost.

Slika 1. Kruća opruga [5]

Slika 2. Manje kruća opruga [6]

2.3. Duktilnost

Duktilnost je sposobnost deformiranja prije loma. Suprotna sposobnost je krutosti. Duktilnost može biti izražena ili u obliku postotka najvećeg produljenja ili maksimalnog smanjenja površine. U našem sadašnjem stupnju razumijevanja, duktilnost je kvalitativno i subjektivno svojstvo materijala. Općenito, mjerenja duktilnosti opisuju tri načina:

1. U kojoj se mjeri metal može deformirati bez loma prilikom obrade metala kao što su valjanje i istiskivanje.
2. Općenito sposobnost metala da teče plastično prije loma. Visoka duktilnost ukazuje na to da materijal "dopušta pogreške" i vjerojatno će se lokalno deformirati bez loma ako konstruktor pogriješi u proračunu naprezanja ili predviđanju teških opterećenja.
3. Služiti kao pokazatelj promjena u razini nečistoća ili u preradbenim uvjetima. Za procjenu materijala mogu se odrediti mjerenja duktilnosti iako ne postoji direktna veza između duktilnosti mjerenja i trenutnih perfomansa u radu.

Uobičajene mjere duktilnosti koje su dobivene testovima napetosti su inženjersko naprezanje pri lomu e_f (obično se naziva produljenje) i smanjenje površine pri lomu q [7]. Formule su sljedeće:

$$e_f = \frac{L_F - L_0}{L_0} \tag{2.3.1.}$$

$$q = \frac{A_F - A_0}{A_0} \tag{2.3.2.}$$

2.4. Žilavost

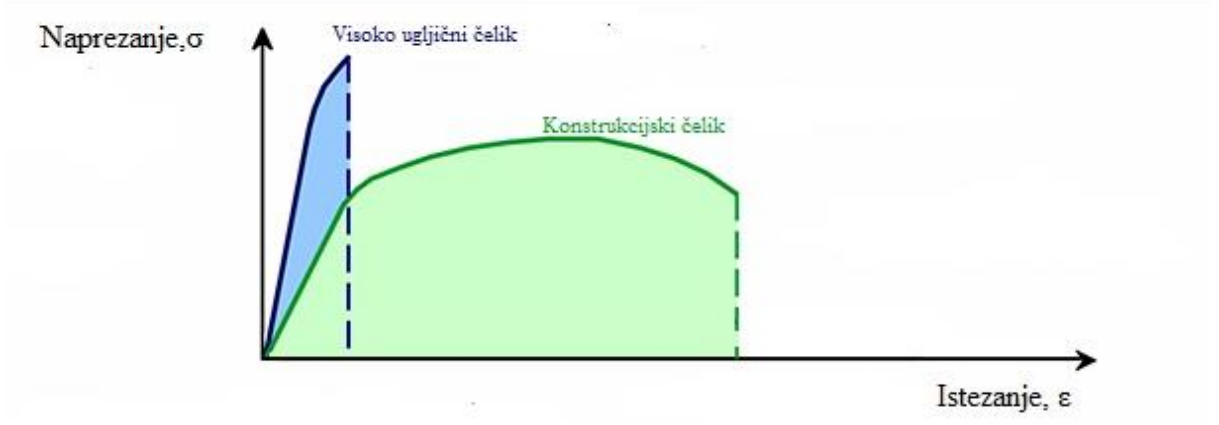
Područje ispod krivulje grafa naprezanja-istezanja je žilavost materijala, tj. energije koju materijal može apsorbirati prije pucanja. Također se može definirati kao otpornost materijala na širenje pukotina.

U znanosti o materijalima i metalurgiji, žilavost je definirana kao otpornost na lom kada je materijal pod opterećenjem. Ona se definira kao količina energije koju materijal može apsorbirati prije pucanja, a mogu se pronaći pronalaženjem područja (tj.izračunavanjem integrala) ispod krivulje naprezanja-istezanje. Sposobnost metala da se plastično deformira i apsorbira energiju u procesu prije nego što se prelomi naziva se žilavost. Naglasak ove definicije trebao bi biti stavljen na sposobnost apsorbiranja energije prije loma. Podsjetimo da je duktilnost mjera koliko se nešto plastično deformira prije loma, ali samo jer je materijal duktilan ne čini ga tvrdim. Materijal visoke čvrstoće i visoke duktilnosti će imati veću žilavost od materijala niske čvrstoće i visoke duktilnost. Stoga je jedan način mjerenja žilavosti izračunavanje površine ispod krivulja naprezanje-istezanje.

Žilavost materijala je njegova sposobnost apsorbiranja energije u plastičnom rasponu. Sposobnost izdržavanja povremenih naprezanja iznad maksimalnih naprezanja bez preloma je posebno poželjno u dijelovima kao što su spojnice teretnih automobila, zupčanici, lanci i kuke za dizalice. Žilavost je svojstvo koje nije lako točno odrediti i definirati. Jedan od načina gledanja na žilavost je uzeti u obzir ukupnu površinu ispod krivulje naprezanja-istezanja. Ovo područje je pokazatelj količine rada po jedinici volumena koji se može odraditi na materijalu, a da ne prouzrokuje pucanje.

Slika 3. prikazuje krivulje naprezanja materijala sa visokom i niskom žilavošću.
Visoko ugljični čelik ima veću izdržljivost i zateznu čvrstoću od konstrukcijskog čelika. Međutim konstrukcijski čelik je duktilniji i ima veće ukupno produljenje. Ukupna površina pod krivuljom naprezanja je veća za konstrukcijski čelik, pa je time i čvršći materijal. Ovaj graf prikazuje da je žilavost parametar koji sadrži i čvrstoću i duktilnost [7].

.



Slika 3. Usporedba žilavosti za dva različita materijala

2.5. Puzanje materijala

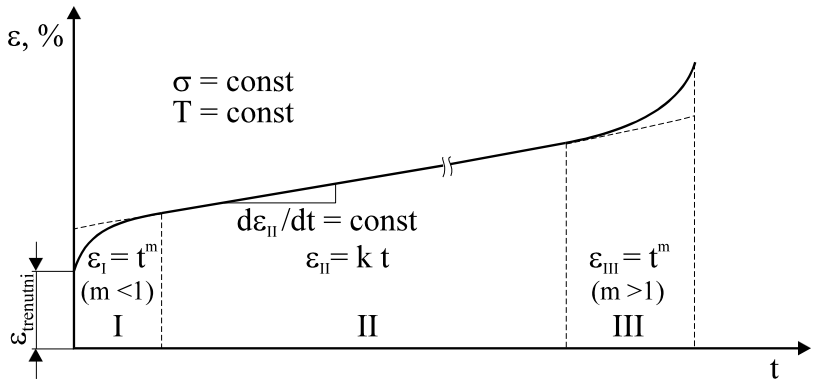
Puzanje materijala je toplinski aktiviran, ireverzibilan proces deformacije materijala koji nastaje u uvjetima dugotrajnog dijelovanja konstantnog opterećenja na povišenoj temperaturi. Stoga na pojavu puzanja materijala utječu slijedeći parametri:

- temperatura tališta materijala;
- tip atomske veze i kristalne rešetke materijala;
- mikrostrukturno stanje materijala.

Temperatura tališta T_t (krutišta) materijala predstavlja teoretski gornju granicu korištenja materijala u konstrukcijske svrhe. Budući da je puzanje materijala toplinski aktiviran proces u kojem nastupa difuzija te oporavak taj proces značajnije nastupa u temperaturnom području :

$$T > 0{,}3 \cdot T_t \text{, K} \qquad (2.5.1.)$$

Što za čelike iznosi oko 700 K, aluminijske slitine oko 350 K, dok olovo i polimerni materijali pužu već na sobnoj temperaturi. U tom pogledu najpogodniji materijali su keramika i teško taljivi prijelazni metali zbog visoke temperature tališta.



Slika 4. Dijagram puzanja [1]

Slika 4. prikazuje dijagram koji ne počinje u ishodištu koordinatnog sustava zbog toga što dolazi do trenutnog istezanja u trenutku opterećivanja epruvete. Dijagram, odnosno sam proces puzanja, podijeljen je u tri stadija.

U prvom stadiju koji se naziva i početni stadij puzanja istezanje se ostvaruje prema izrazu

$$\varepsilon_I = t^m \tag{2.5.2.}$$

a vrijednost eksponenta m je manja od 1, pa se nakon naglog prirasta istezanja u jedinici vremena na početku opterećivanja prirast postupno smanjuje do prijelaza u slijedeći stadij. U ovom stadiju je deformacija velika zbog sređivanja nepravilnosti kristalne rešetke.

U drugom stadiju puzanja koji se naziva stadijem konstantne brzine (gradijenta) puzanja kao što i ime govori prirast istezanja u jedinici vremena je približno konstantan te je dijagram je približno pravac za koji vrijedi:

$$\varepsilon_{II} = k \cdot t \tag{2.5.3.}$$

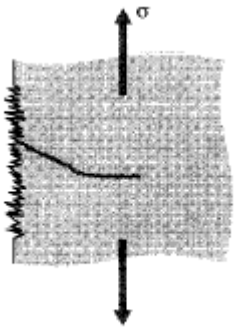
Nakon drugog stadija puzanja nastupa treći, završni stadij puzanja kada opet dolazi do sve većeg prirasta istezanja u jedinici vremena (porast brzine puzanja) te vrijedi:

$$\varepsilon_{III} = t^m \tag{2.5.4.}$$

a eksponent m je veći od 1. U tom trećem stadiju puzanja dolazi konačno i do loma epruvete [1] .

2.6. Umor materijala

Koncept "umora materijala" pojavio se nekoliko puta kao posljedica rasta pukotina u zrakoplovu „Comet“ što je dovelo do katastrofe. Kada su pukotine postale dovoljno velike i počele se širiti dovelo je do havarije. Umor materijala kako govore tehnolozi, postupak je u kojem se proizvodi šteta koja se nakuplja zbog konstatnog ponavljanja opterećenja. Proces je opasan jer jednokratno opterećenje ne bi dovelo do lošeg djelovanja na materijal, a analiza naprezanja bi dovela do krive pretpostavke sigurnosti. U jednom popularnom prikazu umora metala smatra se da će postupak zamora započeti unutrašnjom ili površinskom greškom u kojoj su napetosti koncentrirane, a sastoji se u početku od smicanja uz ravnine klizanja. Tijekom više ciklusa, ovo klizanje stvara upad i ekstruziju te počinju nalikovati pukotini. Prava pukotina propagira prema unutrašnjosti iz područja upada može se širiti u početku duž jedne od originalnih kliznih ravnina, ali se s vremenom okreće kako bi se širio poprečno od glavnog naprezanja kao što je prikazano na slici 5 [8].

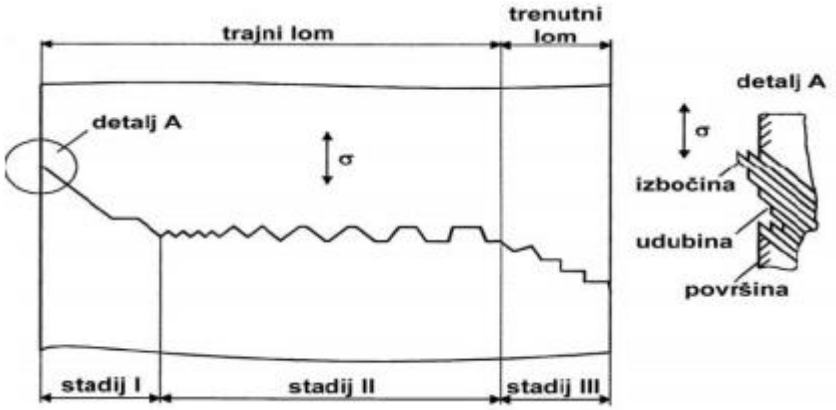


Slika 5. Model širenja pukotine pri naprezanju[8]

Klasični pristup nauke o čvrstoći uzima u obzir činjenicu da naprezanja u blizini provrta, utora i sličnih geometrijskih diskontinuiteta mogu prijeći granicu tečenja, ali se pretpostavlja da će se materijal jednostavno plastično deformirati te da će nastati preraspodjela koncentriranih naprezanja. To često nije točno, jer kod mnogih materijala ne dolazi do preraspodjele naprezanja. Kad se oko pukotina u takvom materijalu pojave velike koncentracije naprezanja, nastaje nestabilno širenje pukotine koje može uzrokovati lom i kod veličina naprezanja mnogo manjih od granice tečenja čak i kod duktilnih materijala niske čvrstoće [9].

Proces umora se sastoji od tri faze (slika 6):

- iniciranje pukotine,
- propagacija pukotine do kritične veličine,
- lom (preostalog dijela poprečnog presjeka)



Slika 6. Shemaski prikaz nastanka loma pri umoru materijala.[1]

2.7. Tvrdoća

Tvrdoća je mehaničko svojstvo koje predstavlja otpornost materijala prema prodiranju nekog drugog znatno tvrđeg tijela u njegovu strukturu ili površinu. Ono je svojstvo čvrstih tvari. Također se može reći da je tvrdoća svojstvo materijala da se bez pojave deformacija suprostavi prodiranju drugog tijela, no ona se sa strojarskog aspekta može odnositi i na otpornost savijanju, prodiranju, abraziji ili rezanju. Tvrdoća nije svojstvo materijala određeno točnim definicijama fundamentalnih jedinica mase, duljine i vremena, pa se stoga ne nalazi u SI sustavu mjernih jedinica. Vrijednost tvrdoće je rezultat definiranog postupka mjerenja [10].

3. MODUL ELASTIČNOSTI

3.1. Povijest proučavanja elastičnosti materijala

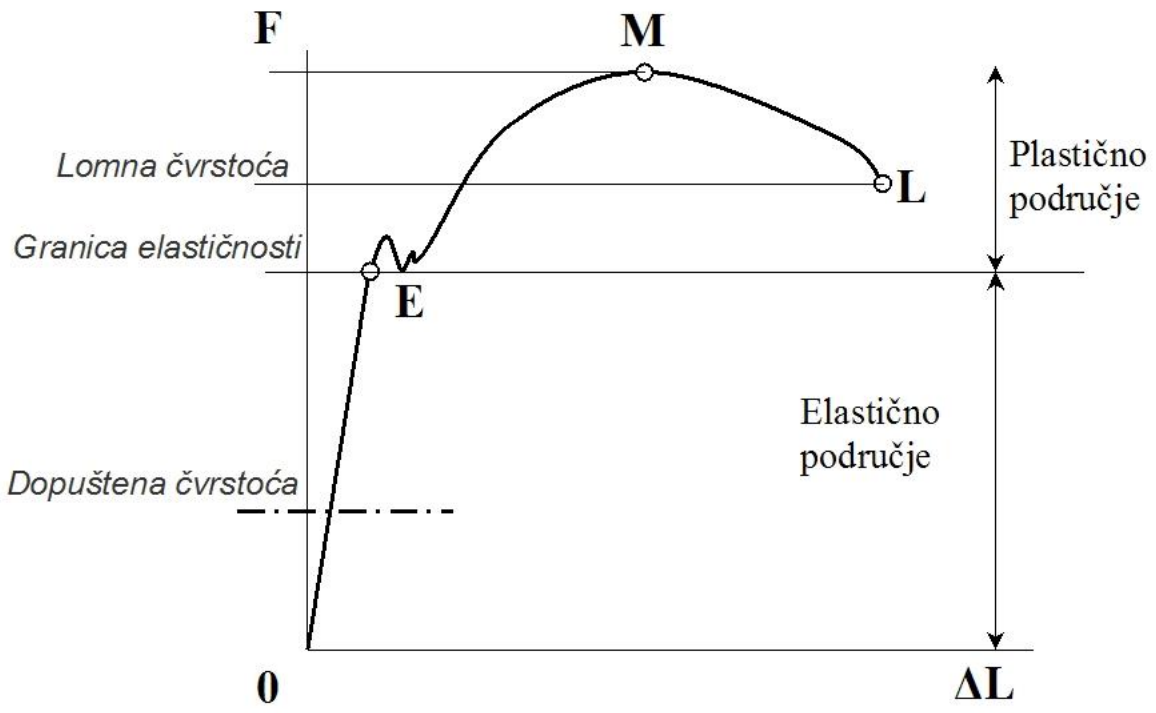
Fizičku teoriju elastičnih tijela i njihovo ponašanje pod djelovanjem vanjskih sila istražio je i detaljno proučio engleski znanstvenik Thomas Jung iz devetnaestog stoljeća. Međutim, sam koncept elastičnosti razvijen je 1727. godine od strane švicarskog matematičara, fizičara i filozofa Leonarda Eulera. Prvi eksperimenti vezani uz modul elastičnosti provedeni su 1782. godine, odnosno 25 godina prije rada Tomasa Junga, mletačkog matematičara i filozofa Jacopa Ricattija.

Zasluga Thomasa Junga leži u činjenici da je teoriji elastičnosti dao vitki moderni izgled, koji je kasnije ukrašen u obliku jednostavnog, a zatim generaliziranog Hookeovog zakona [11].

3.2. Definicija

Modul elastičnosti može se također pronaći pod nazivom modul elastičnosti, Young-ov modul itd. Često se označava slovom *E*, sa ili bez dodataka (*EX*, *EY*). Treba imati na umu da postoje i drugi moduli koji imaju potpuno različita značenja kao što su tangentni modul, sekantni modul itd [12].

Youngov modul elastičnosti ili samo modul elastičnosti predstavlja mjeru krutosti materijala i jednak je omjeru vlačnog naprezanja i linijske vlačne deformacije, u linearnom ili elastičnom dijelu dijagrama naprezanja (slika 7.). Krutost materijala je važna veličina pri određivanju stabilnosti i sigurnosti neke konstrukcije. Youngov modul elastičnosti vrijedi i za tlačna naprezanja kod većine materijala [13].



Slika 7. Dijagram naprezanja [14]

Formula za izračunavanje modula elastičnosti:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\frac{F}{A_0}}{\frac{\Delta L}{L_0}} = \frac{FL_0}{A_0 \Delta L} \tag{3.2.1}$$

E – Youngov modul elastičnosti (N/mm2);

F – sila koja produljuje šipku ili štap (N);;

A_0 - početni poprečni presjek šipke ili štapa u mirovanju (mm2);

ΔL - produljuje šipke ili štapa (m);

L_0 - početna duljina šipke ili štapa (m);

σ – naprezanje u šipki ili štapu (N/mm2)

ε – omjer produljenja šipke ili štapa i njene duljine (bez dimenzije ili ΔL / Lo)

3.3. Elastične konstante

Različite kombinacije deformacija i naprezanja koja su ih prouzročila čine konstante ili module kojima se karakteriziraju elastično-deformacijski odgovori materijala na primijenjena naprezanja. Budući da one nisu konstante za različita stanja naprezanja, bolje ih je nazivati modulima.

Postoje 4 elastične konstante ,a jedna od njih je modul elastičnosti koji je već objašnjen u prethodnim odlomcima.

3.3.1. Poissonov koeficijent

Poissonov omjer ili Poissonov koeficijent (υ) se određuje kao omjer poprečnog smanjenja i uzdužnog produljenja nekog materijala prilikom vlačnog ispitivanja na kidalici. Bio bi jednak 0,5 ako se obujam tijela prilikom rastezanja ne bi promijenio. Dobio je naziv prema Siméonu Poissonu (1781. – 1840.), francuskom fizičaru i matematičaru. Ako se materijal tlači u smjeru jedne osi, onda se on širi u smjeru druge dvije osi [13].

Većina materijala ima Poissonov omjer u području od 0 do 0,5. Čelik i tvrdi polimeri imaju Poissonov omjer oko 0,3. Guma ima gotovo vrijednost 0,5, dok za pluto iznosi 0. Za ostale vrijednosti Poissonovog koeficijenta dane su u tablici 1. Poissonov omjer vrijedi:[16]

$$\upsilon = -\frac{d\varepsilon_{trans}}{d\varepsilon_{axial}} = -\frac{d\varepsilon_y}{d\varepsilon_x} = -\frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_x} \qquad (3.3.1.1.)$$

gdje je:

υ - Poissonov omjer,

ε_{trans}- poprečno (transverzalno) suženje ili skupljanje

ε_{axial}- uzdužno (aksijalno produljenje)

Tablica 1. Vrijednosti Poissonov koefcijenta[17]

Materijal	Poissonov koeficijent
zlato	0,42
zasićena glina	0,40–0,50
titanij	0,34
staklo	0,18–0,3
pluto	~ 0,00
pjena	0,10–0,40
pijesak	0,20–0,45
nehrđajući čelik	0,30–0,31
magnezij	0,35
lijevano željezo	0,21–0,26
legure aluminija	0,33
guma	~ 0,50
glina	0,30–0,45
čelik	0,27–0,30
beton	0,2
bakar	0,33

3.3.2. Coulombov modul

Coulombov modul ili modul smicanja je linerna ovisnost posmičnih naprezanja i kutnih deformacija [3]. Moduli smika za određene materijale dani su u tablici 2.

$$\tau = G\gamma \tag{3.3.2.1.}$$

γ- kutna deformacija

τ – tangencjalna naprezanja

G – modul smicanja

Tablica 2. Modul smika za određene materijale[18]

materijal	modul smicanja [N / mm²]
dijamant	478 000
aluminij oksid (safir)	175
čelik	79,3
bakar	44,7
titanij	41,4
staklo	26,2
aluminij	25,5
polietilen	1170
guma	0,6

3.3.3. Obujamni modul elastičnosti

Ako se uzorak materijala optereti jednolikim tlakom *p* u svim smjerovima, promjenit će se njegov volumen. Eksperimenti pokazuju da je obujamna deformacija proporcionalna tlaku *p*, tj. gdje je *K* obujamni (volumenski) modul elastičnosti odnosno modul kompresibilnosti ili stlačivosti.

Veličine *E, G, v, K* koje karakteriziraju elastična svojstva tijela nazivaju se zajedničkim idenom konstante elastičnosti. Za elastično tijelo dovoljno je poznavati samo dvije konstante jer se ostale mogu iz njih izračunati.[3]

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = 3K(1-2\nu) \qquad (3.3.3.1.)$$

3.4. Vrijednosti modula elastičnosti

Vrijednosti modula elastičnosti mogu se kretati od 0,01 GPa kao što ima guma male deformacije do silicijev karbid koji ima 450 GPa vrijednost modula elastičnosti. U tablici 3. prikazane su vrijednosti modula elastičnosti za ostale materijale.

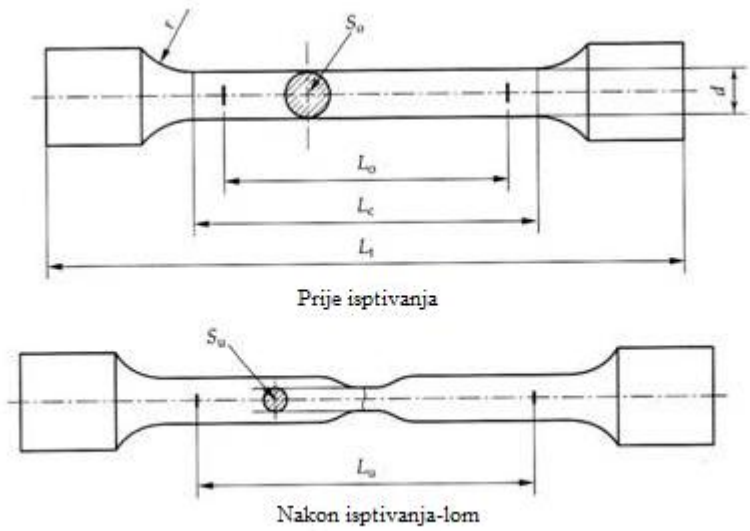
Tablica 3. Vrijednosti modula elastičnosti za određene materijale[19]

Materijal	*E*, GPa
Guma (male deformacije)	0,01–0,1
PTFE (Teflon)	0,5
Polietilen male gustoće	0,2
Polietilen velike gustoće (HDPE)	0,8
Polipropilen	1,5-2
Proteinska ljuska virusa (kapsida)[5]	1–3
Polietilentereftalat ili Dacron	2-2,7
Polistiren	3-3,5
Najlon	2–4
Borovo drvo (uzduž vlakana)	8,963
Hrastovo drvo (uzduž vlakana)	11
Beton velike čvrstoće (tlak)	30
Magnezij metal (Mg)	45
Aluminij	69
Staklo	50–90
Aramidna vlakna	70,5–112,4
Zubna caklina (uglavnom kalcijev fosfat)	83
Mjed i bronca	100–125
Titanij (Ti)	
Titanijevi spojevi	105–120
Bakar (Cu)	117
Stakloplatika (70/30 težinski, uzduž vlakana)	40–45
Poliesterska stakloplatika [14]	17,2
Ugljikova stakloplatika (50/50 težinski, uzduž vlakana)	125–150
Ugljikova stakloplatika (70/30 težinski, uzduž vlakana) [15]	181
Silicij	130-185
Kovano željezo	190–210
Čelik	200
Berilij (Be)	287
Molibden (Mo)	329
Volfram (W)	400–410
Safir (Al2O3) uzduž C-osi	435
Silicijev karbid (SiC)	450

4. STATIČKO VLAČNO ISPITIVANJE

Statički vlačni pokus je postupak ispitivanja kojim se utvrđuju osnovne značajke mehaničkih svojstava, te je to ujedno i najčešće primjenjeno ispitivanje mehaničkog svojstva. Prirast sile pri statičkom vlačnom ispitivanju u jedinici vremena mora biti takav da prirast proizvedenog naprezanja bude ≤10 N/mm^2 u sekundi. Za tako sporo opterećivanje je najprikladniji hidraulični pogon kidalice. Kod hidrauličkog sistema moguće je u svakom trenutku rasteretiti ispitni uzorak [1].

Na slici 8. prikazane su kotirane oznake epruvete prije ispitivanja i nakon loma.



Slika 8. Prikaz epruvete prije i nakon ispitivanja [20]

Oznake na epruvetama:

d - početni promjer epruvete, mm;

L_0 - početna mjerna duljina epruvete, mm;

L_t – ukupna duljina epruvete, mm;

L_u– ukupna duljina epruvete nakon loma, mm;

S_0 – ploština (površina) početnog presjeka epruvete, mm^2

Formula za izračun površine poprečnog presjeka epruvete:

$$S_0 = \frac{d_0{}^2 \cdot \pi}{4}, \text{ mm}^2 \tag{4.1}$$

U nastavku se nalaze dvije formule pomoću kojih određujemo početnu duljinu epruveta s obzirom na njegov poprečni presjek.

Kratke epruvete:

$$L_0 = 5{,}65 \cdot \sqrt{S_0} \tag{4.2}$$

Duge epruvete:

$$L_0 = 11{,}3 \cdot \sqrt{S_0}\,. \tag{4.3}$$

Normalna epruveta ima početni promjer d_0=20 mm i početnu mjernu duljinu L_0=200 mm.

Oblik epruveta:

Ispitni uzorci mogu biti ograničeni oblikom i dimenzijama materijala iz kojeg su ispitni uzorci uzeti. Ispitni uzorak se uglavnom uzima strojnom obradom iz proizvoda, odljevka ili isprešanog lima. Ipak, proizvodi standardnog poprečnog presjeka (žice, šipke, cijevi itd.) i odliveni ispitni uzorci (npr. lijevano željezo i neobojene legure) mogu se ispitati bez strojne obrade uzorka.

Priprema uzoraka:

Strojno obrađeni ispitni uzorci moraju imati prijelazni radijus između zahvatnih glava i ispitne duljine uzorka, ako su oni različitih dimenzija. Dimenzije prijelaznih radijusa su važne i jasno su definirane. Zahvatne glave mogu biti bilo kojeg oblika kojeg je moguće adekvatno stegnuti u prihvat kidalice. Os ispitnog uzorka i os prihvatne sile moraju se poklapati.

Tolerancije dimenzija uzorka i oblika:

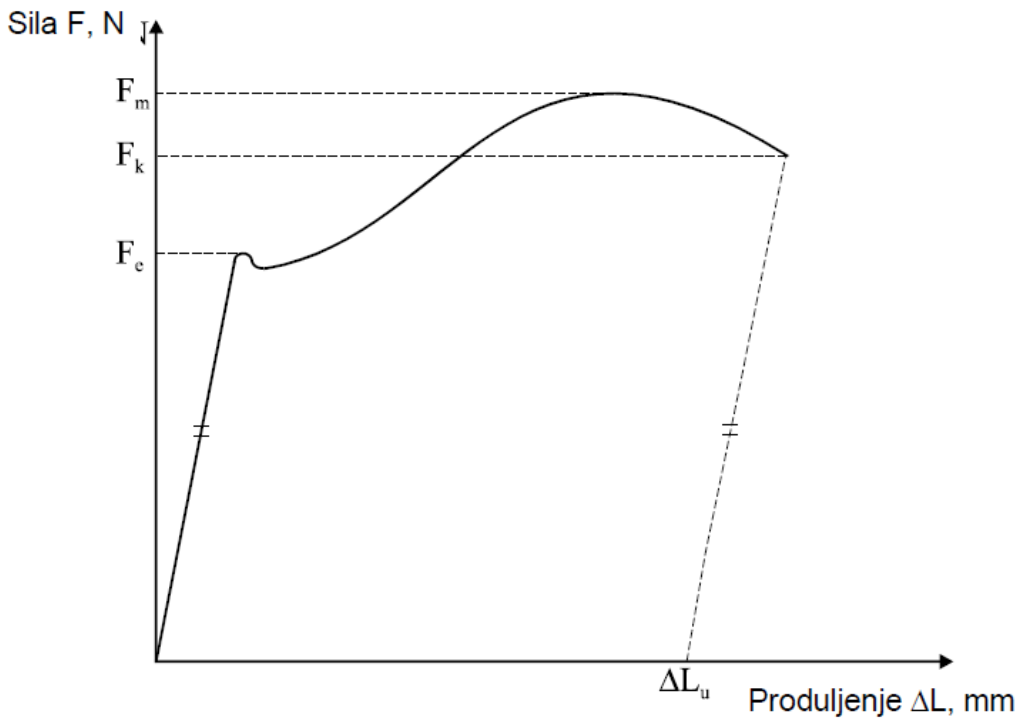
Kako niti jedno mjerenje nikada nije točno treba se uvijek uzeti još tolerancija na tu mjeru. U tablici 4. prikazana su dopuštena odstupanja dimenzija i oblika uzoraka. Ako za primjer uzmemo nazivni promjer od 20 mm dopušteno odstupanje iznosi ±0,1 mm, što znači da promjer svakog ispitnog uzorka mora biti između 19,9 mm i 20,1 mm. Tolerancija oblika za ispitne uzorke istog nazivnog promjera iznosi 0,05 mm. To znači da razlika između najmanje i najveće dimenzije pojedinog uzorka neće biti veća od 0,05 mm

Tablica 4. Tolerancije poprečnih dimenzija ispitnih uzoraka[21]

Oznaka	Nazivna poprečna dimenzija [mm]	Tolerancija nazivne strojno obrađene dimenzije[mm]	Tolerancija oblika
Promjer strojno obrađenog ispitnih uzoraka kružnog poprečnog presjeka i poprečna dimenzija ispitnih uzoraka pravokutnog poprečnog presjeka strojno obrađeni sa sve četiri strane	≥ 3 ≤ 6	± 0,02	0,03
	> 6 ≤ 10	± 0,03	0,04
	> 10 ≤ 18	± 0,05	0,04
	>18 ≤ 30	± 0,10	0,05
Poprečna dimenzija ispitnih uzoraka pravokutnog poprečnog presjeka strojno obrađeni na dvije suprotne strane	≥ 3 ≤ 6	± 0,02	0,03
	> 6 ≤ 10	± 0,03	0,04
	> 10 ≤ 18	± 0,05	0,06
	> 18 ≤ 30	± 0,10	0,12
	> 30 ≤ 50	± 0,15	0,15

Ispitni uzorci moraju biti stegnuti na prikladne načine, naprimjer klinovima, vijčanim spojevima, paralelnim vilicama ili držačima. Potrebno je osigurati dobar prihvat kako ne bi došlo do mogućeg savijanja. Ovo je vrlo važno kada se ispituju krhki materijali ili kada se određuje granica razvlačenja. Kako bi se dobio ravan ispitni uzorak i osiguralo poravnanje ispitnog uzorka i stezne naprave, može se primijeniti sila prednaprezanja pod uvjetom da ne prelazi vrijednost koja odgovara 5 % određene ili očekivane granice razvlačenja.

Prilikom isptivanja bilježi se sila opterečenja epruvete te njeno produljenje ,a pisač koji se nalazi uz kidalicu ispisuje graf koji je prikazan na slici 9.



Slika 9. Dijagram sila – produljenje[1]

Na dijagramu su prikazani sljedeće točke:

F_e – sila tečenja, N

F_m- maksimalna sila naprezanja epruvete, N

F_k- sila loma epruvete, N

ΔL_u- ukupno produljenje epruvete, mm

Do sile F_e linenarna je ovisnost sile i produljenja epruvete. Nakon sile razvlačenja dolazi do deformacije epruvete i njezinog produljenja. Ako silu nastavimo povečavati dolazi do produljivanja epruvete. Na sili F_m tj. na maskimalnoj sili dolazi do smanjivanja poprečnog presjeka epruvete te je nakon toga potrebna manja sila da bi se epruveta i dalje produljivala. Konačno na vrijednosti sile F_k dolazi do pucanja epruvete i kraja ispitivanja.

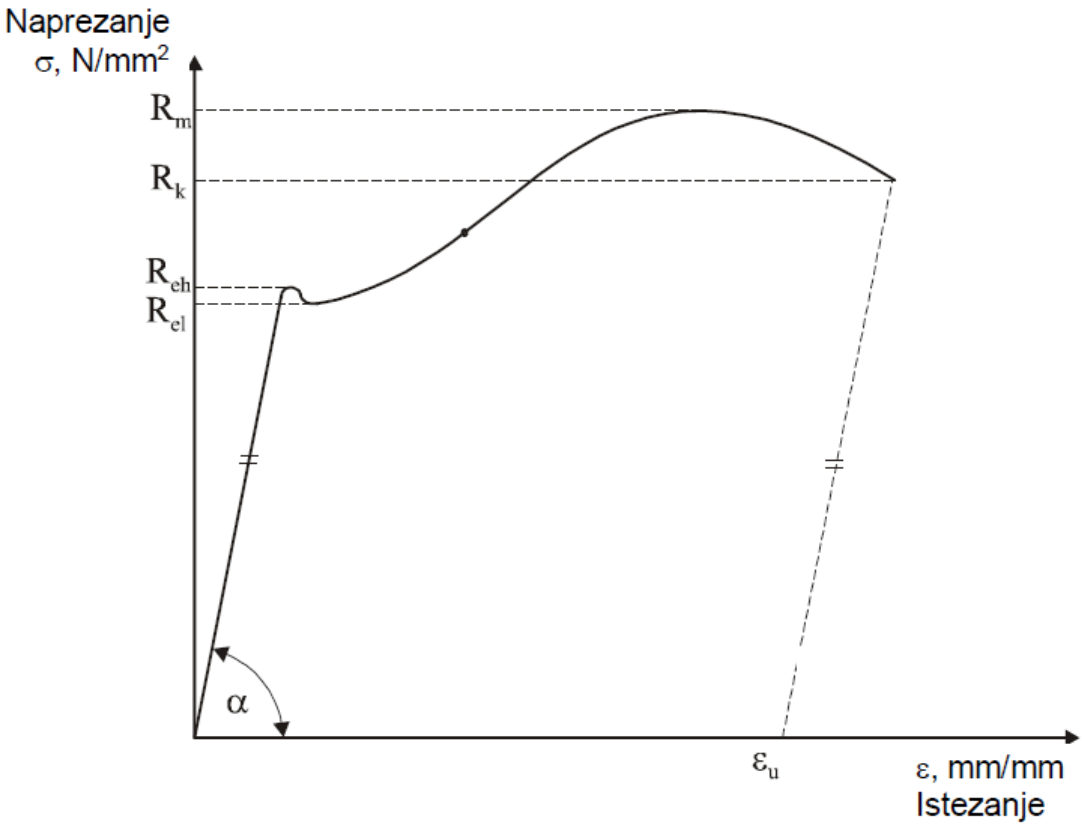
Ukupno produljenje može se izračunati po sljedećoj formuli:

$$\Delta L_u = L_u - L_0 \tag{4.4}$$

L_u– ukupna duljina epruvete nakon loma, mm;

L_0 - početna mjerna duljina epruvete, mm;

Dijagram sila - produljenje ne daje pravu sliku o mehaničkim svojstvima pa je potrebno prikazati "inženjerski" ili "konvencionalni" dijagram naprezanje- istezanje prikazan na slici 10.



Slika 10. Konvencionalni dijagram naprezanje-istezanje[1]

Na dijagramu su prikazane sljedeće točke:

R_{el} – donja granica razvlačenja, N/mm^2

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

R_m – vlačna čvrstoća, N/mm^2

R_k – konačno naprezanje, N/mm^2

Uređaj na kojem se provodi statičko vlačno ispitivanje naziva se kidalica.

Na slici 11. prikazane su moderne kidalice njemačke tvrtke Zwick/Roell.

Slika 11. Kidalice Zwick/ Roell [22]

5. PROCJENA I PRORAČUN MJERNE NESIGURNOSTI

5.1. Općenito

Tijekom svakog ispitivanja i mjerenja potrebno je procjeniti i proračunati mjernu nesigurnost te ju prikazati uz dobiveni rezultat. Mjerna nesigurnost je parametar pridružen rezultatu mjerenja, koji opisuje rasipanje vrijednosti koje se mogu opravdano pripisati mjerenoj veličini. Postoje dvije vrste greške mjerenja: sistematska i slučajna greška. Sistematska greška se pripisuje činjenici da mjerena veličina ima određeno odstupanje dok slučajna greška se pojavljuje uslijed činjenice da ponavljana mjerenja daju različite vrijednosti, koje se ne mogu predvidjeti na osnovu prethodne vrijednosti [23].

5.2. Youngov modul elastičnosti

Određivanje modula elastičnosti provodi se po normi ASTM E 111-97. Ova metoda isptivanja odnosi se na raspon materijala, temperaturu i naprezanja kod kojih dolazi do elastičnog ponašanja i puzanja koje je zanemarivo u odnosu na naprezanje koje nastaje uslijed opterećenja.

Procedura uključuje 2 koraka:

1. Utvrđivanje gornje granice (kraj Hookovog pravca) pomoću linearne regresije. Gornja granica je dosegnuta ako je nagib pravca minimalan. Početak računanja ovisi o predopterećenju i ovisi o željama mjeritelja na kidalici.

2. Nakon 1. koraka linearna regersija započinje opet na gornjoj granici, ali u suprotnom smjeru za određivanje donje granice regresije. Ako je nagib pravca minimalan dobijemo donju granicu koju koristimo za daljnje računanje modula elastičnosti.[24]

Forumula za linijsku regresiju:

$$y = mx + b \tag{5.2.1}$$

Nagib:

$$m = \frac{n\sum_{i=1}^{n} x_i y_i - \sum_{i=1}^{n} x_i \sum_{i=1}^{n} y_i}{n\sum_{i=2}^{n} x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right)^2} \tag{5.2.2}$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i - m\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \tag{5.2.3}$$

Empirijska kovarijanca :

$$S_{xy} = \frac{1}{n-1}\left[\sum_{i=1}^{n} x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i \sum_{i=1}^{n} y_i}{n}\right] \tag{5.2.4}$$

Standardna devijacija za x:

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1}\left[\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right)^2}{n}\right]} \tag{5.2.5}$$

Standardna devijacija za y:

$$S_y = \sqrt{\frac{1}{n-1}\left[\sum_{i=1}^{n} y_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} y_i\right)^2}{n}\right]} \tag{5.2.6}$$

Koeficijent korelacije:

$$r = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} \tag{5.2.7}$$

Standardna devijacija nagiba:

$$S_m = \sqrt{\frac{\left(1-r^2\right)S_y^2}{(n-2)S_x^2}} \tag{5.2.8}$$

Standardna devijacija presjecanja:

$$S_b = \sqrt{S_m^2 \frac{(n-1)S_x^2 + \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right)^2}{n}}{n}} \tag{5.2.9}$$

Poveznica između gornje i donje granice:

$$S_{m(rel)} = \frac{S_m}{m} \rightarrow \min \tag{5.2.10}$$

Kombinirana nesigurnosti modula elastičnosti:

Linearna regresija se koristi za određivanje linernog odnosa između sile I pomaka.

$$E = \frac{FL_0}{eS_0} = m_E \frac{L_0}{S_0} \tag{5.2.11}$$

$$F = m_E e + b_E \tag{5.2.12}$$

Koeficijent osjetljivosti povezani s mjernom nesigurnošću:

$$\frac{\partial E}{\partial m_E} = \frac{L_0}{S_0} \tag{5.2.13}$$

$$\frac{\partial E}{\partial L_0} = \frac{m_E}{S_0} \tag{5.2.14}$$

$$\frac{\partial E}{\partial S_0} = -\frac{m_E L_0}{{S_0}^2} \tag{5.2.15}$$

Nesigurnost presjeka:

$$u_{S_0} = \sqrt{\frac{d_0^2 \pi^2 u_{d_0}^2}{4}} \tag{5.2.16}$$

Kontinuirana standardna mjerna nesigurnost:

$$u_E = \sqrt{\left(\frac{L_0}{S_0}\right)^2 S_{m_E}^2 + \left(\frac{m_E}{S_0}\right)^2 u_{L_u}^2 + \left(\frac{m_E L_0}{S_0^2}\right)^2 u_{S_0}^2} \tag{5.2.17}$$

Proširena mjerna nesigurnost:

$$u = k \cdot u_E \tag{5.2.18}$$

6. EKSPRIMENTALNI DIO

Za određivanje modula elastičnosti postoji više metoda. U ovom radu određivao se modul elastičnosti na 20 ispitnih epruveta istog materijala, ali različite hrapavosti. Ispitivanje je provedeno pomoću dva ekstenzometra.

6.1. Plan ispitivanja

U okviru rada provedena su isptivanja na 20 epruveta prema normi HRN EN ISO 6892-1:2016 sukladno planu prikazano u tablici 5. Na svim uzorcima proveden je statično vlačni pokus te se uz pomoć kontaktnog ekstenzometra i pomaka traverza određene deformacije na određenim silama pa je moguće izračunati modul elastičnosti. Nakon toga svi su se rezultati obradili i usporedili.

Tablica 5. Plan ispitivanja

Redni broj	Postupak	Opis
1	Priprema uzoraka	Epruvete su izrađene na Fakultetu strojarstva i brodogradnje prema normi HRN EN ISO 6892-1:2016.
2	Umjeravanje kidalice, ekstenzometra i pomaka traverze	Umjeriti svu opremu potrebnu za izradu ovog diplomskog rada.
3	Određivanje hrapavosti uzorka	Provedeno na svim ispitnim uzorcima.
4	Statičko vlačno ispitivanje pomoću ekstenzometra	Provedeno na različitim rasponima sila na 10 epruveta do loma.
5	Statičko vlačno isptivanje pomoću pomaka traverze	Provedeno na različitim rasponima sila na 10 epruveta do loma.
6	Analiza rada	Prikazati utjecaj pogrešaka i usporedba dobivenih rezultata.

U tablici 6. su prikazani rezultati određivanja početnog promjera i početne mjerne duljine tijela ispitnih uzoraka.

Tablica 6. Ispitni uzorci

Broj epruvete	*d*,mm	*lo*,mm
1	10,27	50
2	10,17	50
3	10,19	50
4	10,10	50
5	10,16	50
6	9,93	50
7	10,08	50
8	9,96	50
9	10,04	50
10	9,95	50
11	10,06	50
12	10,00	50
13	10,29	50
14	9,56	50
15	10,05	50
16	9,98	50
17	9,57	50
18	9,85	50
19	10,04	50
20	10,24	50

6.2. Određivanje hrapavosti uzoraka

Ispitivanje hrapavosti provedeno je pomoću ručnog uređaja. Proizvođač je tvrtka Taylor Hobson Limited iz Leicestera iz Engleske. Model uređaja je: Surtronic Duo. Serijski broj uređaja je 112 291. Na slici 12. prikaz je uređaja za mjerenje hrapavosti.

Specifikacije uređaja:

- Poprečna dužina: 5 mm (0.2in)
- Mjerna dužina: 4 mm (0.16in)
- Brzina mjerenja: 2 mm/s (0.16in)
- Raspon mjerenja 200 µm (8 000 µin)
- Rezolucija: 0.05 µm (2 µin)
- Rezolucija prikaza Ra: 0.01 µm (0.4 µin)

Slika 12. Surftronic duo

Tablica 7. Izmjerene vrijednosti hrapavosti

Broj epruvete	Vrijednost hrapavosti,µm					Srednja vrijednosr Ra,µm
1	5,85	2,30	5,38	4,70	4,40	4,557
2	3,34	3,32	4,16	3,36	3,43	3,522
3	2,32	3,30	4,30	4,16	2,73	3,362
4	4,35	2,38	3,41	2,35	3,42	3,182
5	1,32	1,34	1,30	2,23	1,34	1,506
6	2,03	1,76	1,38	1,31	1,30	1,556
7	4,09	3,35	3,73	4,39	4,35	3,982
8	1,17	0,38	0,32	1,49	0,71	0,814
9	1,04	0,17	0,47	0,5	0,46	0,528
10	5,28	5,05	8,43	7,59	4,11	6,092
11	1,75	1,38	1,16	1,33	1,52	1,428
12	3,14	7,54	4,54	5,00	5,58	5,160
13	1,33	0,77	0,31	0,36	0,39	0,632
14	3,28	3,44	4,16	3,46	3,36	3,540
15	5,53	4,52	7,06	4,09	4,32	5,104
16	2,72	1,35	2,57	2,32	3,43	2,478
17	3,39	4,30	5,05	6,24	5,30	4,856
18	5,31	4,37	4,59	3,59	3,36	4,244
19	2,49	2,43	2,32	2,42	3,36	2,604
20	1,70	1,50	1,39	1,43	1,51	1,506

U tablici 7. su prikazani rezultati mjerenja hrapavosti na tijelu ispitnih uzoraka.

Pomoću uređaja za mjerenje hrapavosti mjerena je hrapavost kod svih 20 epruveta po 5 puta. Nakon izmjerenih rezultata izračunata je srednja vrijednost hrapavosti kod svake epruvete. Svih 20 izračunatih srednjih vrijednosti hrapavosti uzeto je u obzir i izračunat je medijan.

Nakon toga ispitni uzorci su podijeljeni u dvije grupe prema hrapavosti na fine i grube u grupe po 10.

U tablici 8. prikazana je podjela na fine i grube epruevete koje su bile potrebne za izvedbu daljnjeg ispitivanja.

Tablica 8. Podjela epruveta

Broj epruvete	
Grube	Fine
1	4
2	5
3	6
7	8
10	9
12	11
14	13
15	16
17	19
18	20

6.3. Umjeravanje opreme za ispitivanje

Prije provedbe ispitivanja provedeno je umjeravanje kidalice. Nakon toga je provedeno umjeravanje oba ekstenzometra koja su primjenjena pri ispitivanju modula elastičnosti.

6.3.1 Umjeravanje kidalica

Umjeravanje kidalice je provedeno sukladno normi HRN EN 7500-1:2018. U tablici 9,10 i 11 su prikazani rezultati umjeravanja te njihova obrada.

Tablica 9. Izmjerene vrijednosti

F_i, kN	X_i, mV/V	X_1, mV/V	X_2, mV/V	X_2', mV/V	X_3, mV/V	X_c, mV/V
0,000	0,00000	0,00000	0,00000	-	0,00000	-
2,000	-0,40008	-0,39929	-0,40107	-0,40109	-0,40056	-
4,000	-0,80021	-0,79946	-0,80253	-0,80174	-0,80013	-
7,000	-1,40045	-1,40074	-1,40134	-1,40083	-1,40090	-
10,00	-2,00072	-2,00541	-2,00600	-	-2,00450	-
10,00	-0,20041	-0,20153	-0,20047	-0,20095	-0,20014	-
20,00	-0,40079	-0,40251	-0,40140	-0,40188	-0,40123	-
40,00	-0,80150	-0,80381	-0,80281	-0,80320	-0,80273	-
80,00	-1,60294	-1,60626	-1,60578	-	-1,60541	-
80,00	-0,31964	-0,32018	-0,32017	-0,32025	-0,32015	-
160,00	-0,63944	-0,64034	-0,64056	-0,64064	-0,64055	-
240,00	-0,95936	-0,96096	-0,96122	-0,96164	-0,96095	-
320,00	-1,27936	-1,28167	-1,28184	-1,28269	-1,28170	-
400,00	-1,59943	-1,60245	-1,60264	-	-1,60267	-

Tablica 10. Ostatak sile i relativno nulto odstupanje

F_{io}, kN	F_{io1}, kN	F_{io2}, kN	F_{io3}, kN	F_{ioc}, kN
	0,010	0,020	0,040	-
f_0, %	f_{01}, %	f_{02}, %	f_{03}, %	f_{0c}, %
	0,002	0,005	0,010	-

Tablica 11. Izračunate vrijednosti pogrešaka nesigurnosti

F_i, kN	X_{sr}, mV/V	ΔF_i i F_c, %	q, %	b, %	v, %	a, %	U, %
2,000	-0,40031	-	-0,06	0,44	0,00	0,500	0,42
4,000	-0,80071	-	-0,06	0,38	0,10	0,250	0,31
7,000	-1,40099	-	-0,04	0,04	0,04	0,143	0,17
10,00	-2,00530	-	-0,23	0,07	-	0,100	0,16
10,00	-0,20071	-	-0,15	0,69	-0,24	0,100	0,44
20,00	-0,40171	-	-0,23	0,32	-0,12	0,050	0,24
40,00	-0,80312	-	-0,20	0,13	-0,05	0,025	0,16
80,00	-1,60582	-	-0,18	0,05	-	0,013	0,13
80,00	-0,32017	-	-0,16	0,01	-0,02	0,013	0,13
160,00	-0,64048	-	-0,16	0,03	-0,01	0,006	0,13
240,00	-0,96104	-	-0,18	0,03	-0,04	0,004	0,13
320,00	-1,28174	-	-0,19	0,01	-0,07	0,003	0,13
400,00	-1,60259	-	-0,20	0,01	-	0,003	0,13

Iz obrađenih rezultata se može zaključiti da je kidalica klasificirana kao razred točnosti 1 u mjernom području od 2 kN do 400 kN. Sukladno normi HRN EN ISO 6892-1: 2016 za ispitivanje mehaničkih svojstava metalnih materijala potrebna je kidalica najmanjeg razreda točnosti 1 što znači da kidalica zadovoljava ovaj uvjet.

6.3.2. Umjeravanje ekstenzometar

Umjeravanje ekstenzometra je provedeno sukladno normi HRN EN ISO 9513:2012. U tablici 12,13 i 14 prikazani su rezultati umjeravanja i kriteriji za klasifikaciju ekstenzometra.

Tablica 12.Izmjerene vrijednosti i izračunate vrijednosti pogrešaka i nesigurnosti

l_i, mm	l_{t1}, mm	q_{b1}, mm	q_{rb1}, %	l_{t2}, mm	q_{b2}, mm	q_{rb2}, %	r / l_i, %	$l_i - l_t$ μm	q_{rb} %	U
0,0100	0,0098	0,0002	-1,80	0,0096	0,0004	-4,00	1,00	-0,3	-2,90	3,03
0,0200	0,0196	0,0004	-1,90	0,0195	0,0005	-2,50	0,50	-0,4	-2,20	0,67
0,0400	0,0396	0,0004	-1,00	0,0392	0,0008	-1,95	0,25	-0,6	-1,48	0,96
0,0600	0,0595	0,0005	-0,83	0,0598	0,0002	-0,27	0,17	-0,3	-0,55	0,58
0,1000	0,0994	0,0006	-0,56	0,0996	0,0004	-0,40	0,10	-0,5	-0,48	0,18
0,1500	0,1493	0,0007	-0,47	0,1495	0,0005	-0,36	0,07	-0,6	-0,41	0,12
0,2000	0,1992	0,0008	-0,41	0,2001	-0,0001	0,05	0,05	-0,4	-0,18	0,46
0,4000	0,3986	-0,0014	-0,36	0,3997	-0,0003	-0,07	0,03	-0,9	-0,21	0,30
0,6000	0,5978	-0,0022	-0,36	0,5994	-0,0006	-0,09	0,02	-1,4	-0,23	0,27
1,0000	0,9960	-0,0040	-0,40	0,9991	-0,0009	-0,09	0,01	-2,5	-0,25	0,31
1,3500	1,3436	-0,0064	-0,47	1,3478	-0,0022	-0,16	0,01	-4,3	-0,32	0,31
1,7000	1,6918	-0,0082	-0,48	1,6966	-0,0034	-0,20	0,01	-5,8	-0,34	0,29
2,0000	1,9913	-0,0087	-0,44	1,9956	-0,0044	-0,22	0,01	-6,6	-0,33	0,22

Tablica 13. Kriterij za klasifikaciju

Klasa	q_{Le},	$(r / l_i) \cdot 100$	r, μm	q_{rb},	$l_i - l_t$ μm
0,2	±0,2	0,1	0,2	±0,2	±0,6
0,5	±0,5	0,25	0,5	±0,5	±1,5
1	±1	0,5	1,0	±1	±3,0
2	±2	1,0	2,0	±2	±6,0
[a] izbor veće vrijednosti		[a]		[a]	

Na temelju dobivenih rezultata može se zaključiti da ekstenzometar MFA ima sljedeće mjerne sposobnosti:

Iz rezultata je vidljivo da ovaj ekstenzometar ima sposobnosti određivati modul elastičnosti je iznad pomaka od 20 µm zadovoljava klasu 1 koja je tražena sukladno normi HRN EN ISO 6892-1:2018.
U tablici 14. je prikazan razred točnosti za ekstenzometar.

Tablica 14. Razred mjerne točnosti

- **bez primjene mjerne nesigurnosti**

u mjernom području, mm	*Smjer*	*od l_{min}, **mm***	*do l_{max}, **mm***	*klasa*
0,01-2,0 mm	uzlazno	0,0120	2,0000	0,5

- **s primjenjenom mjernom nesigurnosti**

0,01-2,0 mm	uzlazno	0,0100	2,0000	2

0,02-2,0 mm	uzlazno	0,0200	2,0000	1

0,06-2,0 mm	uzlazno	0,0600	2,0000	0,5

6.3.3. Pomak traverze

Umjeravanje pomaka traverze je provedeno sukladno normni HRN EN ISO 9513:2012. U tablici 15 i 16 su prikazani rezultati umjeravanja te kriteriji klasifikacije

Tablica 15. Izmjerene vrijednosti i izračunate vrijednosti pogrešaka i nesigurnosti

l_i, mm	l_{t1}, mm	q_{b1}, mm	q_{rb1}, %	l_{t2}, mm	q_{b2}, mm	q_{rb2}, %	r / l_i, %	$l_i - l_t$ μm	q_{rb} %	U, %
0,010	0,0126	-0,0026	26,00	0,0113	-0,0013	13,00	20,00	2,0	19,50	1155
0,020	0,0215	-0,0015	7,50	0,0271	-0,0071	35,50	10,00	4,3	21,50	578
0,040	0,0400	0,0000	0,00	0,0373	0,0027	-6,75	5,00	-1,4	-3,37	289
0,060	0,0641	-0,0041	6,83	0,0607	-0,0007	1,17	3,33	2,4	4,00	193
0,100	0,1080	-0,0080	8,00	0,1051	-0,0051	5,10	2,00	6,6	6,55	116
0,150	0,1533	-0,0033	2,20	0,1543	-0,0043	2,87	1,33	3,8	2,53	77
0,200	0,2108	-0,0108	5,40	0,1975	0,0025	-1,25	1,00	4,1	2,07	58
0,400	0,4107	0,0107	2,68	0,4075	0,0075	1,87	0,50	9,1	2,28	29
0,600	0,6104	0,0104	1,73	0,6045	0,0045	0,75	0,33	7,5	1,24	19
1,000	1,0101	0,0101	1,01	1,0048	0,0048	0,48	0,20	7,4	0,74	12
1,350	1,3671	0,0171	1,27	1,3558	0,0058	0,43	0,15	11,5	0,85	9
1,700	1,7170	0,0170	1,00	1,7021	0,0021	0,12	0,12	9,6	0,56	7
2,000	2,0157	0,0157	0,78	1,9990	-0,0010	-0,05	0,10	7,3	0,37	6

Tablica 16. Kriterij za klasifikaciju

Klasa	q_{Le},	$(r / l_i) \cdot 100$	r, μm	q_{rb},	$l_i - l_t$ μm
0,2	±0,2	0,1	0,2	±0,2	±0,6
0,5	±0,5	0,25	0,5	±0,5	±1,5
1	±1	0,5	1,0	±1	±3,0
2	±2	1,0	2,0	±2	±6,0
[a] izbor veće vrijednosti		[a]		[a]	

U tablici 17. je prikazan razred točnosti za pomak traverze.

Tablica 17. Razred točnosti mjernog područja

- **bez primjene mjerne nesigurnosti**

u mjernom području, mm	*Smjer*	*od l_{min},* ***mm***	*do l_{max},* ***mm***	*klasa*
0,6-2,0 mm	uzlazno	0,6	2,0	2
1,0-2,0 mm	uzlazno	1,0	2,0	1

- **s primjenjenom mjernom nesigurnosti**

0,6-2,0 mm	uzlazno	0,6	2,0	bez klase
1,0-20 mm	uzlazno	1,0	2,0	bez klase

Iz navedenih rezultata može se vidjeti da pomak traverze ima razred točnosti 1. tek od pomaka od 1,0 mm.

6.4. Određivanje modula elastičnosti

Ispitivanja su provedena na univerzalnoj kidalici. Proizvođač je tvrtka WPN iz Njemačke. Model kidalice je EU 40 MOD. Kidalica je prozvedena 1986. godine, a modernizirana je 2003. godine. Mjerno područje je od 0 do 400 kN. Serijski broj kidalice je 990.06/83/85. Kidalica je prilikom modernizacije spojena s računalom preko programa TireTest.

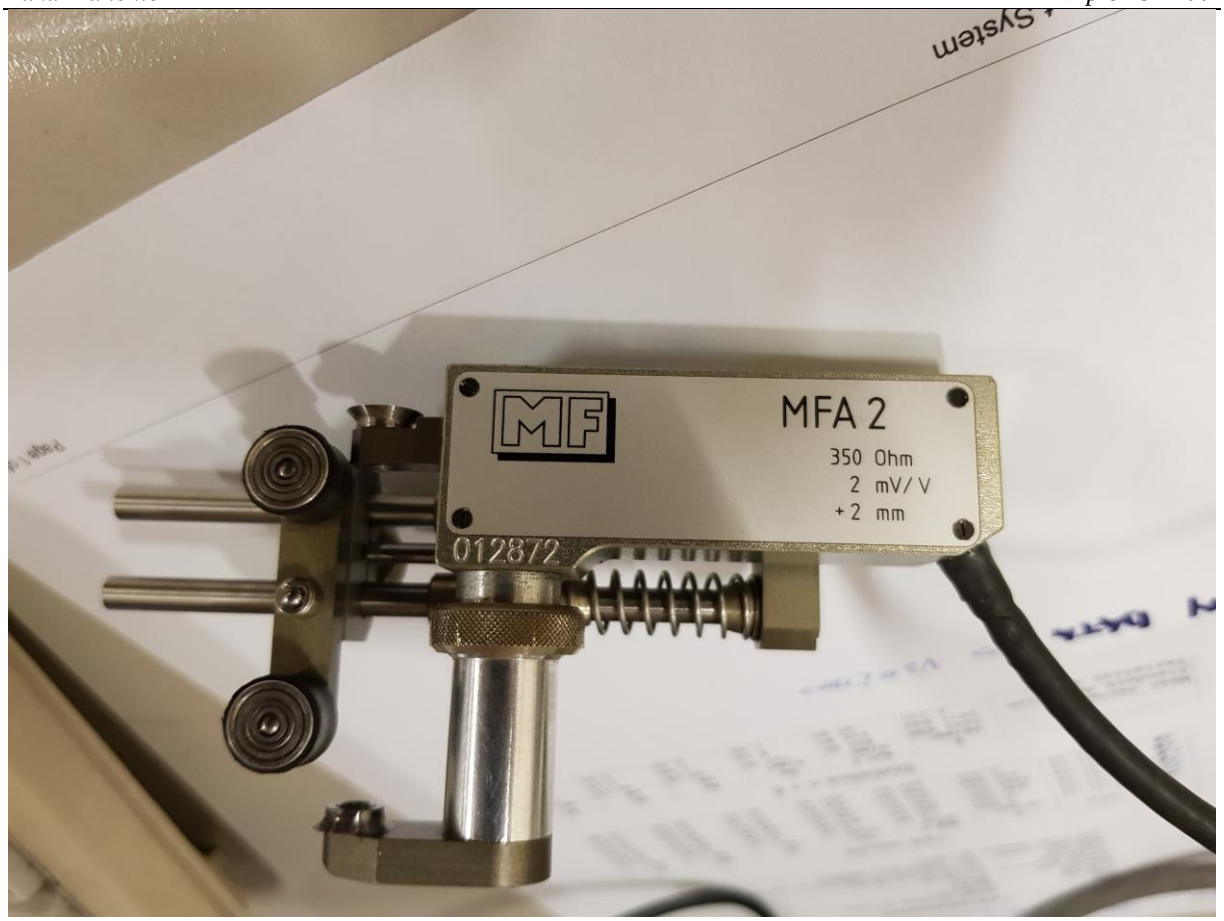
Slika 13. Kidalica WPN

Slika 14. Računalo povezano s kidalicom

6.4.1. Ispitivanje pomoću kontaktnog ekstenzometra

Prvo ispitanje modula elastičnosti provedeno je pomoću kontaktnog ekstenzometra. Predopterečenje na kidalici je iznosilo 1,7 kN. Rezultati su bilježeni na Hookovom pravcu. Zapisivano je produljenje epruvete svakih 5 kN. Karakteristike ekstenzometra su sljedeće:

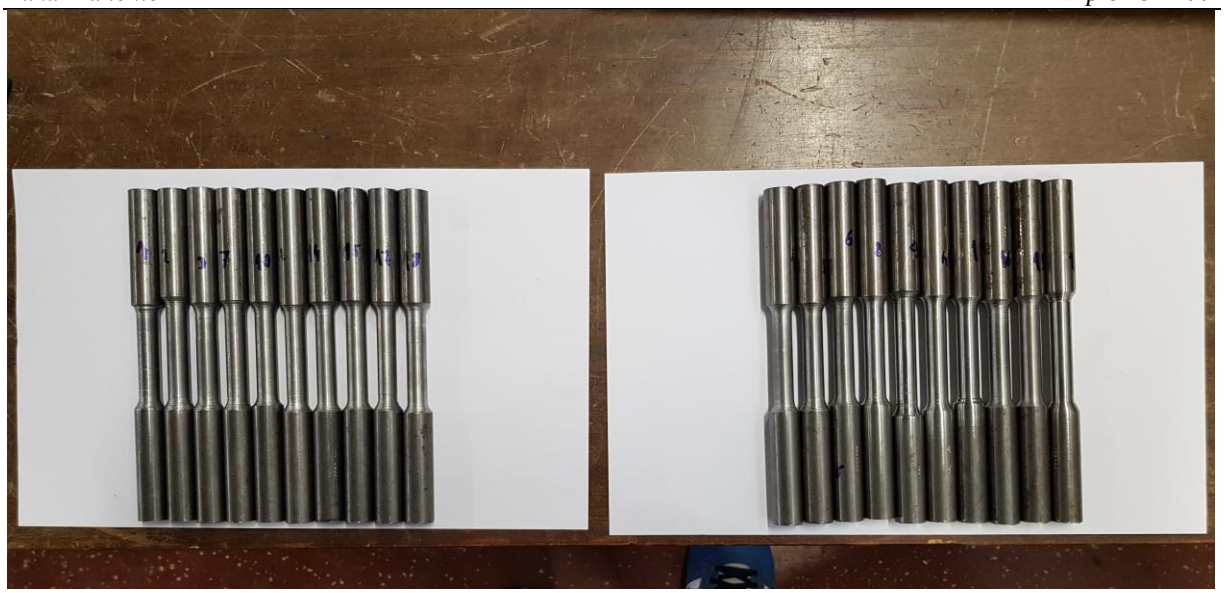
- Proizvođač: Mess & Feinwerktechnik, Njemačka
- Vrsta: MFA 2
- Rezolucija: 0,01 mm
- Klasa: 0,5
- Serijski broj: 012872



Slika 15. Kontaktni ekstenzometar

Ispitivanje je provedeno na svih 20 epruveta. Pomoću kontaktnog ekstenzometra provedeno je ispitivanje na 10 epruveta, a pomoću pomaka traverze ostalih 10. U grupu od 10 epruveta uzeto je 5 epruveta manje hrapavosti i 5 veće hrapavosti.

Na slici 16. prikazana je podjela epruveta na fine i grube epruvete.



Slika 16. Podjela finih i grubih epruveta

6.4.1.1. Ispitivanje grubih epruveta

Proveden je statičko vlačni pokus do loma epruveta. Nakon loma epruveta isčitane su vrijednosti produljenja epruveta na zadanim silama opterećenja. U tablici 18. prikazani su rezultati za 5 grubih epruveta.

Tablica 18. Rezultati učitanih sila i produljenja za 5 grubih epruveta

Uzorak 1	F,N	5000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000	55000	60000
	Δl	0.0144	0.0292	0.0447	0.0626	0.0809	0.1116	0.1234	0.1613	0.1697	0.1975	0.2058	0.226
Uzorak 2	F,N	5000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000	55000	60000
	Δl	0.011	0.0275	0.0451	0.062	0.0802	0.1101	0.1251	0.1575	0.1513	0.1798	0.1886	0.1945
Uzorak 3	F,N	5000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000	55000	60000
	Δl	0.0076	0.023	0.04	0.0577	0.0759	0.117	0.1234	0.149	0.1592	0.1827	0.1895	0.1974
Uzorak 7	F,N	5000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000	55000	60000
	Δl	0.0104	0.028	0.045	0.072	0.0825	0.1126	0.1245	0.1586	0.1623	0.1957	0.2013	0.2142
Uzorak 10	F,N	5000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000	55000	60000
	Δl	0.0022	0.0056	0.017	0.0448	0.0539	0.0862	0.1031	0.145	0.1631	0.1985	0.2149	0.2497

Ne temelju rezultata prikazanih u tablici 18. izračunate su vrijednosti modula elastičnosti između sljedećih točaka.

Tablica 19. Rezultati modula elastičnosti za 5 grubih epruveta

Raspon,kN	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 7	Uzorak 10
10-20	299401	289855	288184	227273	255102
10-30	242718	242131	212766	236407	248139
10-40	227101	230769	238095	229709	215208
10-50	237671	262640	250470	238521	207361.3
15-30	224215	230769	194805	221893	216763
15-40	214408	222420	229358	220070	195312.5
15-50	229058	259837	245270	232250	192837.5
20-30	204082	207900	168634	246305	241545.9
20-40	202634	209424	219058	230947	199600.8
20-50	222387	254669	240000	242522	195185.4

6.4.1.1. Ispitivanje finih epruveta

Proveden je statičko vlačni pokus do loma epruveta. Nakon loma epruveta isčitane su vrijednosti produljenja epruveta na zadanim silama opterečenja. U tablici 20. prikazani su rezultati za 5 finih epruveta.

Tablica 20. Rezultati učitanih sila i produljenja za 5 finih epruveta

Uzorak 4	F,N	5000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000	55000	60000
	Δl,mm	0.0106	0.0257	0.043	0.0595	0.078	0.1075	0.1201	0.1562	0.1613	0.1863	0.1917	0.2086
Uzorak 5	F,N	5000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000	55000	60000
	Δl,mm	0.0069	0.0219	0.0382	0.0552	0.0727	0.1025	0.1157	0.1521	0.1753	0.217	0.2312	0.26
Uzorak 6	F,N	5000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000	55000	60000
	Δl,mm	0	0.0045	0.0175	0.0259	0.0423	0.0782	0.0873	0.1265	0.1535	0.202	0.2215	0.2661
Uzorak 8	F,N	5000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000	55000	60000
	Δl,mm	0.0105	0.026	0.0436	0.0605	0.0797	0.1112	0.1257	0.1659	0.1951	0.2302	0.248	0.2848
Uzorak 9	F,N	5000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000	55000	60000
	Δl,mm	0.013	0.0287	0.0456	0.0629	0.0818	0.112	0.126	0.164	0.1874	0.2248	0.2399	0.2707

Ne temelju rezultata prikazanih u tablici 20. izračunate su vrijednosti modula elastičnosti između sljedećih točaka.

Tablica 21. Rezultati modula elastičnosti za 5 finih epruveta

Raspon,kN	Uzorak 4	Uzorak 5	Uzorak 6	Uzorak 8	Uzorak 9
10-20	295858	300300	467290	289855	292398
10-30	244499	248139	271370	234742	240096
10-40	229885	230415	245902	214439	221729
10-50	249066	205023	202532	195886	203978
15-30	232558	233281	247117	221893	225904
15-40	220848	219491	229358	204415	211149
15-50	244243	195749	189702	187567	195313
20-30	208333	211416	191205	197239	203666
20-40	206825	206398	198807	189753	197824
20-50	236593	185414	170358	176783	185300

6.4.2 Ispitivanje pomoću pomaka traverze

Drugo ispitivanje modula elastičnosti provedeno je pomoću pomaka traverze. Predopterečenje je iznosilo 1,7 kN te je eksteznometar bio postavljen samo na kratko i odmah maknut. Brzina opterećenja iznosila je 400 N/s .

6.4.2.1. Ispitivanje grubih epruveta

Proveden je statičko vlačni pokus do loma epruveta. Nakon loma epruveta isčitane su vrijednosti produljenja epruveta na zadanim silama opterečenja. U tablici 22. prikazani su rezultati za 5 grubih epruveta.

Tablica 22. Rezultati učitanih sila i produljenja za 5 grubih epruveta

Uzorak 12	F,N	5000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000	55000	60000
	Δl,mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Uzorak 14	F,N	5000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000	55000	60000
	Δl,mm	0.0123	0.0292	0.0405	0.0479	0.0544	0.0599	0.0651	0.07	0.0746	0.0793	0.0855	0
Uzorak 15	F,N	5000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000	55000	60000
	Δl,mm	0.0011	0.0077	0.0255	0.0376	0.0491	0.0591	0.0682	0.0766	0.0846	0.0925	0.1012	0.112
Uzorak 17	F,N	5000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000	55000	60000
	Δl,mm	0.0082	0.0214	0.0285	0.0346	0.0395	0.0441	0.048	0.0517	0.0555	0.0589	0.0634	
Uzorak 18	F,N	5000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000	55000	60000
	Δl,mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Ne temelju rezultata prikazanih u tablici 22. izračunate su vrijednosti modula elastičnosti između sljedećih točaka.

Tablica 23. Rezultati modula elastičnosti za grube epruvete

Raspon,kN	Uzorak 12	Uzorak 14	Uzorak 15	Uzorak 17	Uzorak 18
10-20	0	534759.4	334448.2	757575.8	0
10-30	0	651465.8	389105.1	881057.3	0
10-40	0	735294.1	435413.6	990099	0
10-50	0	798403.2	471698.1	1066667	0
15-30	0	773195.9	446428.6	961538.5	0
15-40	0	847457.6	489236.8	1077586	0
15-50	0	902061.9	522388.1	1151316	0
20-30	0	833333.3	465116.3	1052632	0
20-40	0	904977.4	512820.5	1169591	0
20-50	0	955414	546448.1	1234568	0

6.4.2.2. Ispitivanje finih epruveta

Proveden je statičko vlačni pokus do loma epruveta. Nakon loma epruveta isčitane su vrijednosti produljenja epruveta na zadanim silama opterećenja. U tablici 24. prikazani su rezultati za 5 finih epruveta.

Tablica 24. Rezultati učitanih sila i produljenja za 5 finih epruveta

Uzorak 11	F,N	5000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000	55000	60000
	Δl,mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Uzorak 13	F,N	5000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000	55000	60000
	Δl,mm	0.0143	0.0286	0.037	0.0423	0.0464	0.05	0.0534	0.0566	0.0593	0.062	0.0648	0.0679
Uzorak 16	F,N	5000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000	55000	60000
	Δl,mm	0.0108	0.0273	0.038	0.0463	0.0534	0.0595	0.0654	0.0708	0.0758	0.0805	0.0856	0.0913
Uzorak 19	F,N	5000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000	55000	60000
	Δl,mm	0.0107	0.0261	0.0394	0.0481	0.0553	0.0616	0.0672	0.0725	0.0774	0.0821	0.087	0.0929
Uzorak 20	F,N	5000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000	55000	60000
	Δl,mm	0.0102	0.0249	0.0353	0.0424	0.0487	0.0543	0.0591	0.0637	0.0682	0.0724	0.0761	0.0803

Ne temelju rezultata prikazanih u tablici 24. izračunate su vrijednosti modula elastičnosti između sljedećih točaka.

Tablica 25. Rezultati modula elastičnosti za fine epruvete

Raspon,kN	Uzorak 11	Uzorak 13	Uzorak 16	Uzorak 19	Uzorak 20
10-20	0	729927	526315.8	454545.5	571428.6
10-30	0	934579.4	621118	563380.3	680272.1
10-40	0	1071429	689655.2	646551.7	773195.9
10-50	0	1197605	751879.7	714285.7	842105.3
15-30	0	1153846	697674.4	675675.7	789473.7
15-40	0	1275510	762195.1	755287	880281.7
15-50	0	1400000	823529.4	819672.1	943396.2
20-30	0	1298701	757575.8	740740.7	840336.1
20-40	0	1398601	816326.5	819672.1	938967.1
20-50	0	1522843	877193	882352.9	1000000

Na temelju pregleda rezultata modula elastičnosti može se ustanoviti nerealne vrijednosti. Do ovoga je došlo zbog primjene ekstenzometra pomaka traverze koji je prilikom umjeravanja u području do 20μm imamo odstupanje do 20 % ,a uključivanjem mjerne nesigurnosti je to još i gore. Ovi rezultati neće biti ni razmatrani u analizi zbog ovolike grube pogreške.

U tablici 26. prikazani su rezultati produljenja epruvete nakon pucanja.

Tablica 26. Prikaz produljenja i promjera nakon pucanja.

Uzorak	*d*, mm	*lo*, mm	*lu, mm*	*du*, mm	Način ispitivanja	Grupa
1	10,27	50	54,00	8,48	ekstenzometar	gruba
2	10,17	50	55,10	7,44	ekstenzometar	gruba
3	10,19	50	54,60	7,96	ekstenzometar	gruba
4	10,10	50	55,08	7,50	ekstenzometar	fina
5	10,16	50	54,89	7,80	ekstenzometar	fina
6	9,93	50	54,35	7,50	ekstenzometar	fina
7	10,08	50	55,05	8,02	ekstenzometar	gruba
8	9,96	50	54,42	8,10	ekstenzometar	fina
9	10,04	50	55,98	7,89	ekstenzometar	fina
10	9,95	50	55,31	7,94	ekstenzometar	gruba
11	10,06	50	54,69	7,82	pomak traverze	fina
12	10,00	50	55,08	7,75	pomak traverze	gruba
13	10,29	50	55,03	8,10	pomak traverze	fina
14	9,56	50	54,44	7,05	pomak traverze	gruba
15	10,05	50	54,53	8,15	pomak traverze	gruba
16	9,98	50	54,28	8,05	pomak traverze	fina
17	9,57	50	54,76	7,45	pomak traverze	gruba
18	9,85	50	55,63	7,98	pomak traverze	gruba
19	10,04	50	54,14	7,68	pomak traverze	fina
20	10,24	50	54,78	8,22	pomak traverze	fina

7. ANALIZA REZULTATA

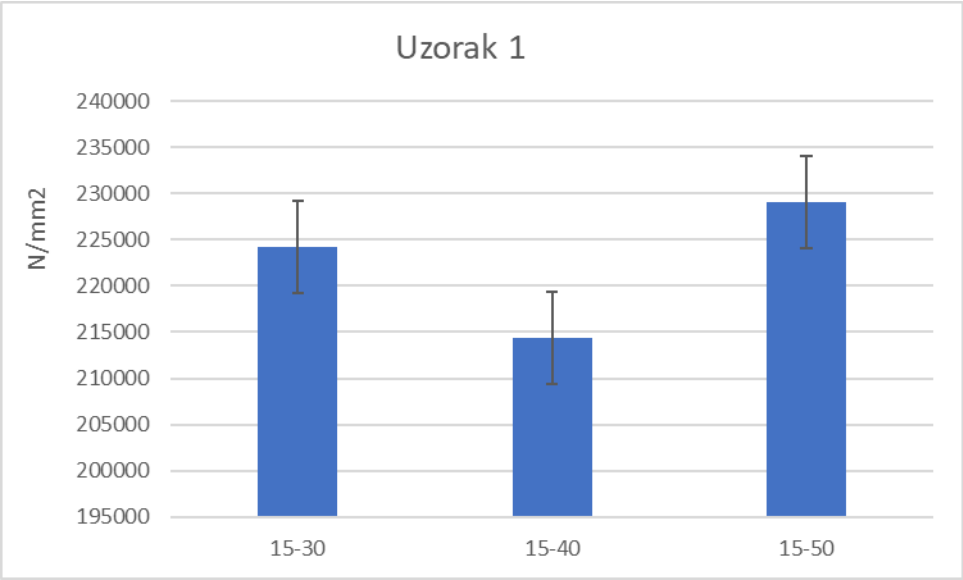
Nakon provedenih ispitivanja potrebno je provesti analizu rezultata. Analiza rezultata pokazuje da dobiveni rezultati odstupaju od teorijskih vrijednosti.

Slika 17. Prikaz slomljenih epruveta

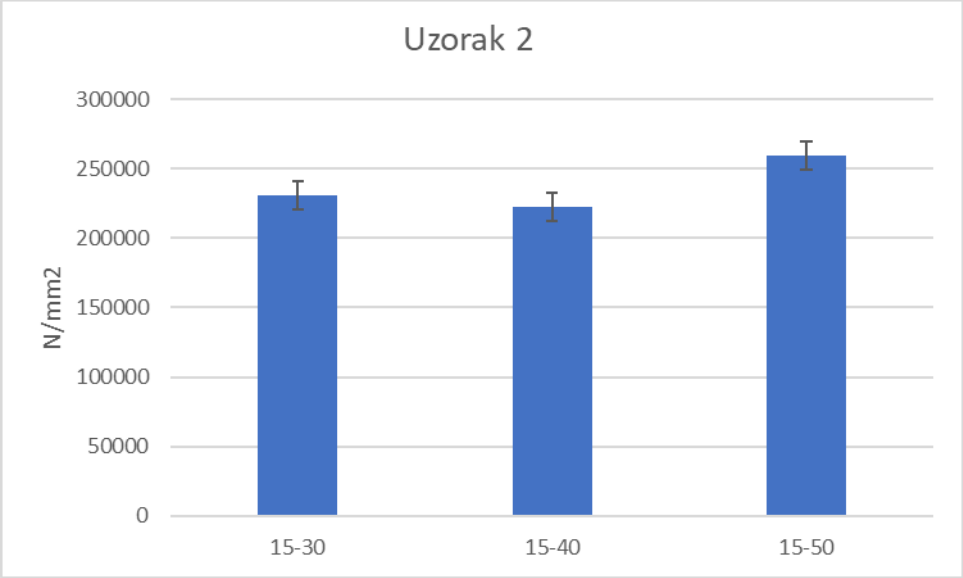
Na slici 17. vidljivo je da su sve epruvete prelomljene. Osim toga vidljivo je da neki ispitni uzorci nisu pucali u srednjoj trećini što je znnak da epruvete ili nisu dobro izrađene ili je kvaliteta materijala bila jako loša. To je jedan od razloga zašto izračunate vrijednosti modula elastičnosti znatno odskaču od teorijske vrijednosti. Zbog ovoga možemo reći da kvaliteta materijala značajno utječe na rezultate određivnja modula elastičnosti.

7.1 Analiza rezultata grubo obrađenih epruveta

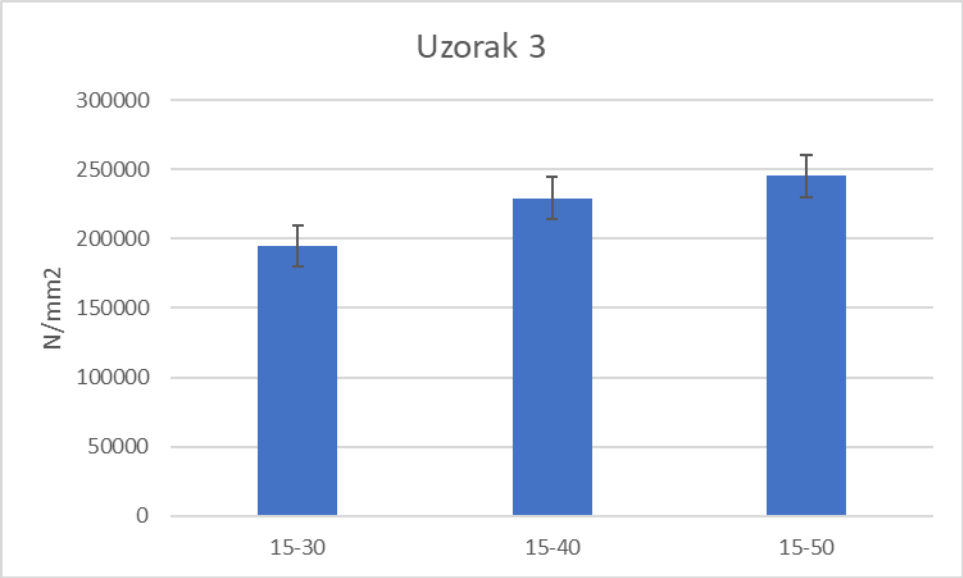
U sljedećim dijagramima su prikazani izračunati rezultati modula elastičnosti za grube epruvete pomoću kontaktnog ekstenzometra MFA 2. Iz pregledani rezultata za pojedina područja uzeto je područje s donjom granicom od 15 kN. Kada je uzeta vrijednost modul elastičnosti u području sile 10 kN onda su pomaci bili blizu donje granice ekstenzometra za klasu 1, a ako bi bilo uzeto u obzir i mjerna nesigurnost ekstenzometar onda bi ekstenzometar prešao u klasu 2. Ovo znači da je na toj točci povećana pogreška pa nije dalje razmatrano. Također gornja granica je bila 50 kN jer postoji mogućnost da pri silama iznad 50 kN dolazi do pojave plastične deformacije,a to znači da nismi više na Hookovom pravuc odnosno elastičnom području.



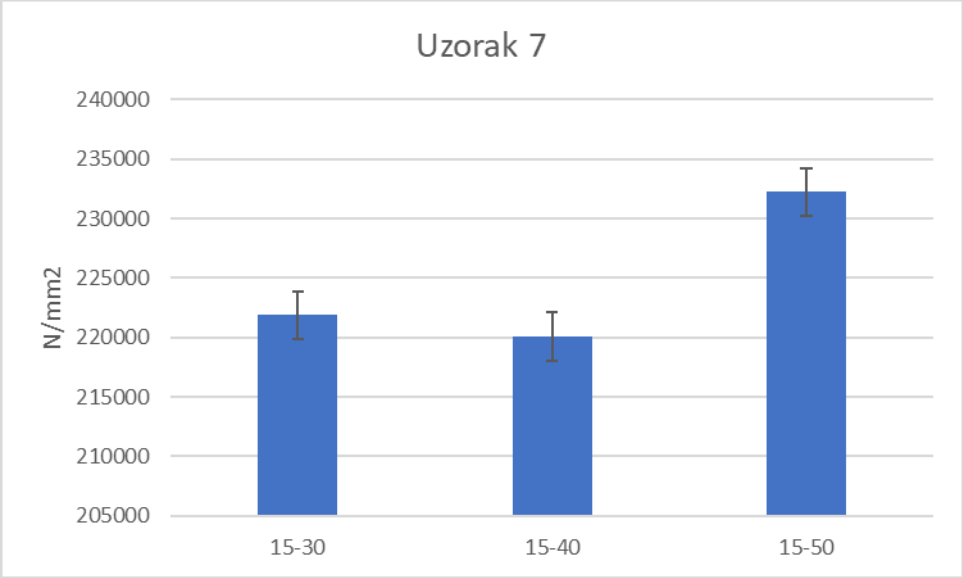
Slika 18. Izračunate vrijednosti na sljedećim rasponima za uzorak 1



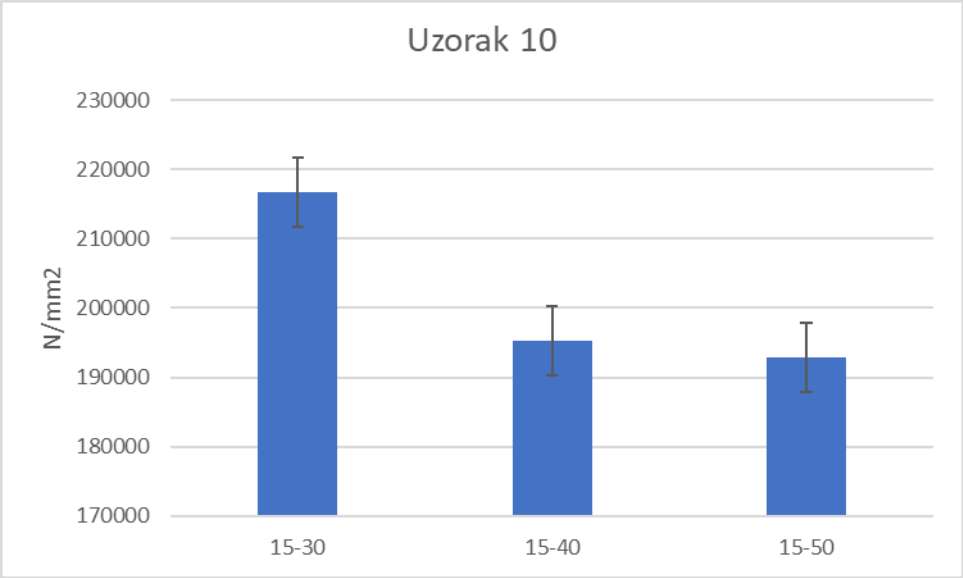
Slika 19. Izračunate vrijednosti na sljedećim rasponima za uzorak 2



Slika 20. Izračunate vrijednosti na sljedećim rasponima za uzorak 3



Slika 21. Izračunate vrijednosti na sljedećim rasponima za uzorak 7



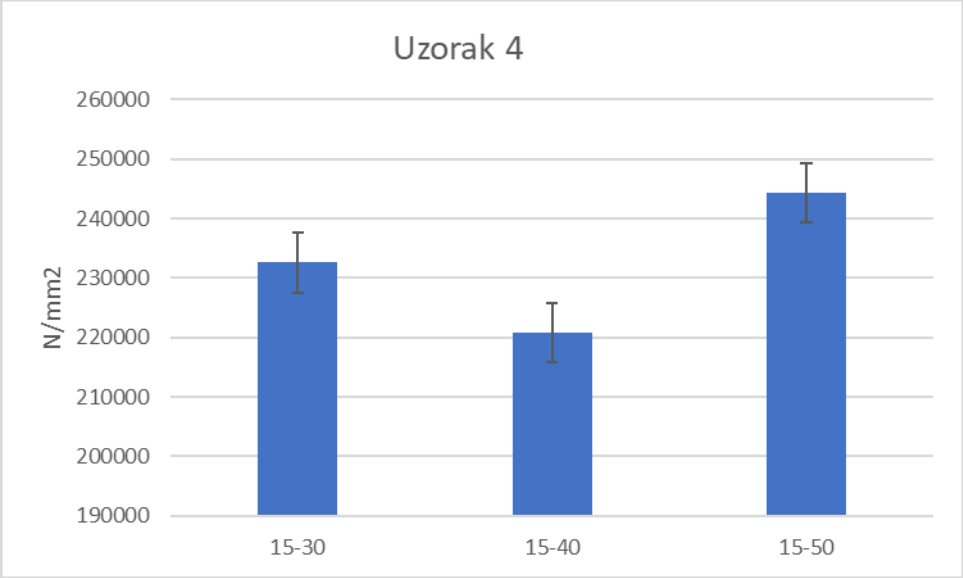
Slika 22. Izračunate vrijednosti na sljedećim rasponima za uzorak 10

Iz dijagrama je vidljivo da rezultati modula elastičnosti dosta variraju kako unutar jedne epruvete tako između različitih epruveta i kreću se između 192837 N/mm^2 do 259836 N/mm^2. Pored toga može se vidjeti da je područje od 15 do 40 kN najpogodnije za određivanje modula elastičnosti. Uzrok velikih oscilacijama rezultata su svakako gruba obrada epruveta jer prilikom opterećivanja ekstenzometar može skliznuti s brijega u udolinu i registrirati pomak koji nije stvarni pomak tijela epruvete zbog opterećenja.

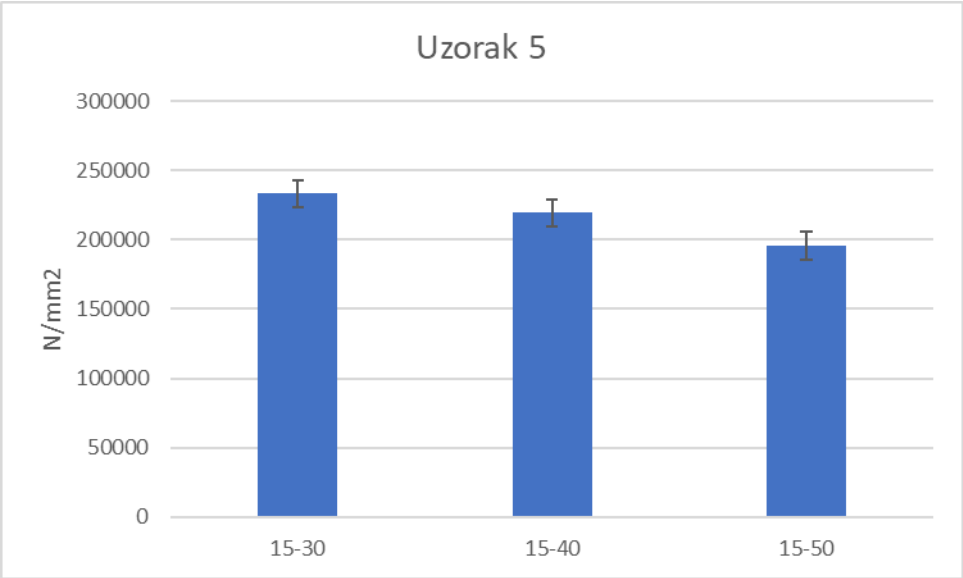
7.2 Analiza rezultata za fino obrađene epruvete

U dijagramima br. 23, 24, 25, 26 i 27 su prikazani rezultati modula elastičnosti te procjenjene vrijednosti mjernih nesigurnosti za fino obrađene ispitne uzorke. I u ovom slučaju je primjenjen isti ekstenziometar MFA2.

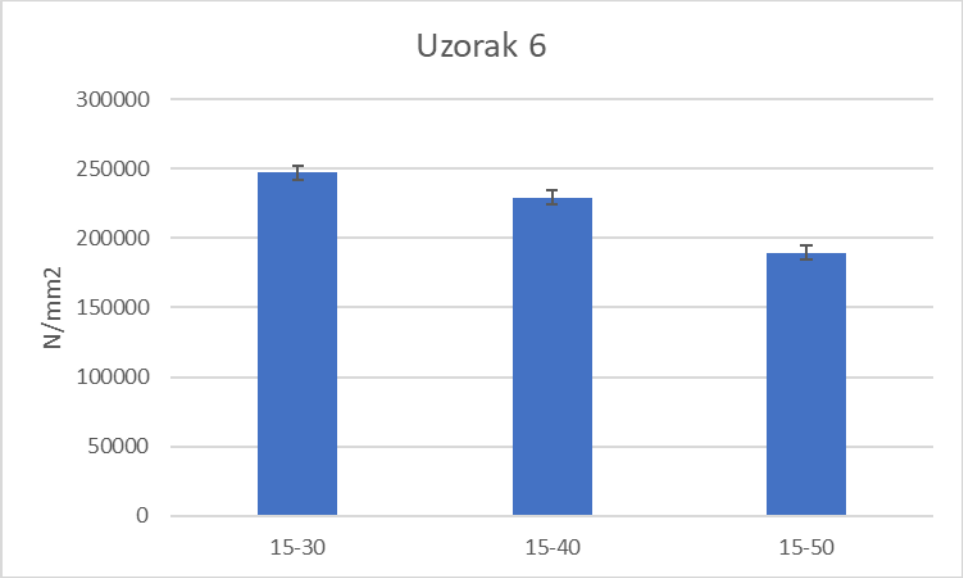
Sljedećih 5 dijagrama prikazuje vrijednosti modula elastičnosti za fine epruvete.



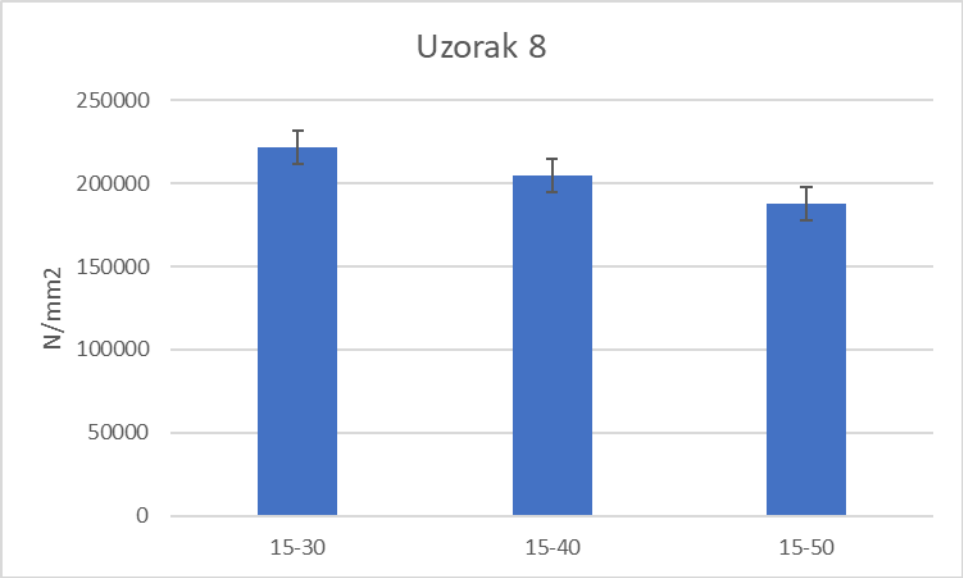
Slika 23. Izračunate vrijednosti na sljedećim rasponima za uzorak 4



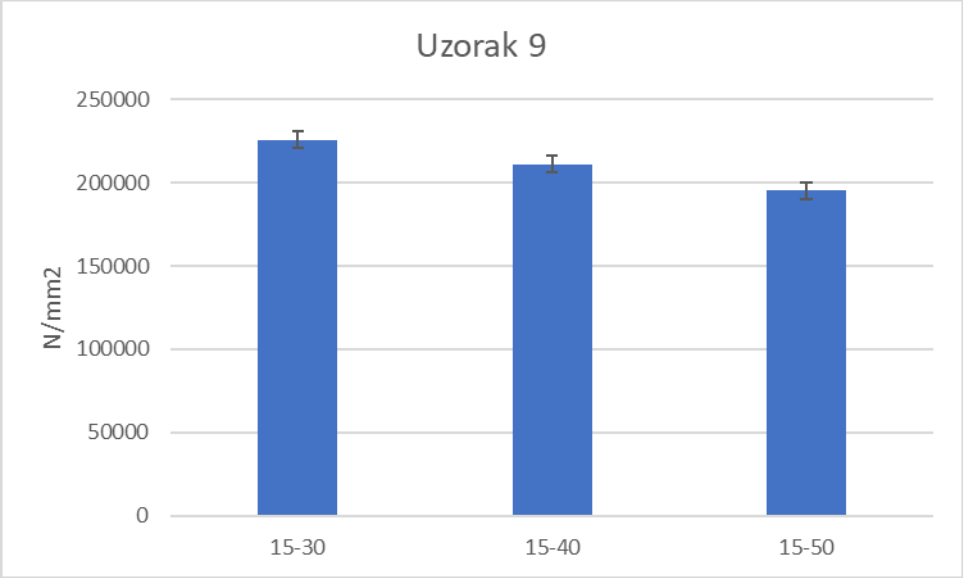
Slika 24. Izračunate vrijednosti na sljedećim rasponima za uzorak 5



Slika 25. Izračunate vrijednosti na sljedećim rasponima za uzorak 6



Slika 26. Izračunate vrijednosti na sljedećim rasponima za uzorak 8

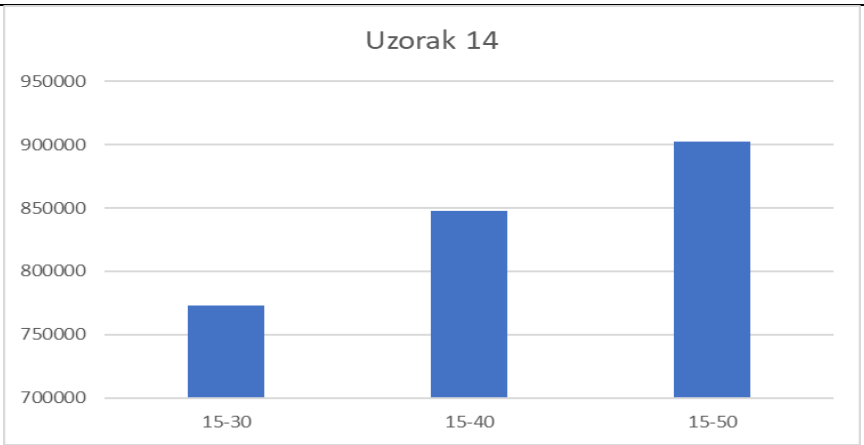


Slika 27. Izračunate vrijednosti na sljedećim rasponima za uzorak 9

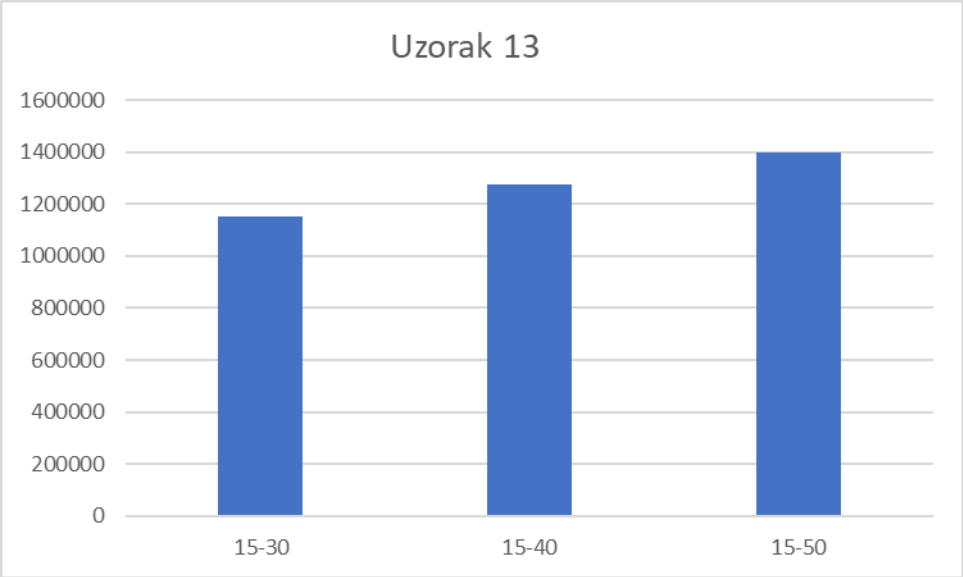
Prethodni dijagrami prikazuju modul elastičnosti u rasponima od 15 kN-30 kN, 15 kN-40 kN i 15 kN-50 kN. U odnosu na grubo obrađene epruvete, primjećena je manja fluktuacija rezultata, no ipak je ostala vrlo velika razlika unutar različitih područja, što se može pripisati nehomogenosti ispitinih uzoraka. Ono što se zaključuje je smanjenje mjernih nesigurnosti što se pripisuje kvaliteti izrade ispitnih uzoraka. Na temelju spoznaje da je kod grubih epruveta najbolje područje od 15 kN do 40 kN za određivanje modula elastičnosti u svakom slučaju može se ustanoviti i za fino obrađene ispitne uzorke. Za to područje su vrijednosti modula elastičnosti između 210 000 i 220 000 N/mm^2. Stoga proizlazi da je vrlo važno definirati mjerno područje ujutar elastičnog područja za određivanje modula elastičnosti.

7.3. Pomak traverze

Sljedeće dva dijagrama prikazuju dobivene module elastičnosti pomakom traverze. Uzorak 14 je epruveta grube obrade. Prikazani su dobiveni rezultati modula elastičnosti na tri različita raspona.



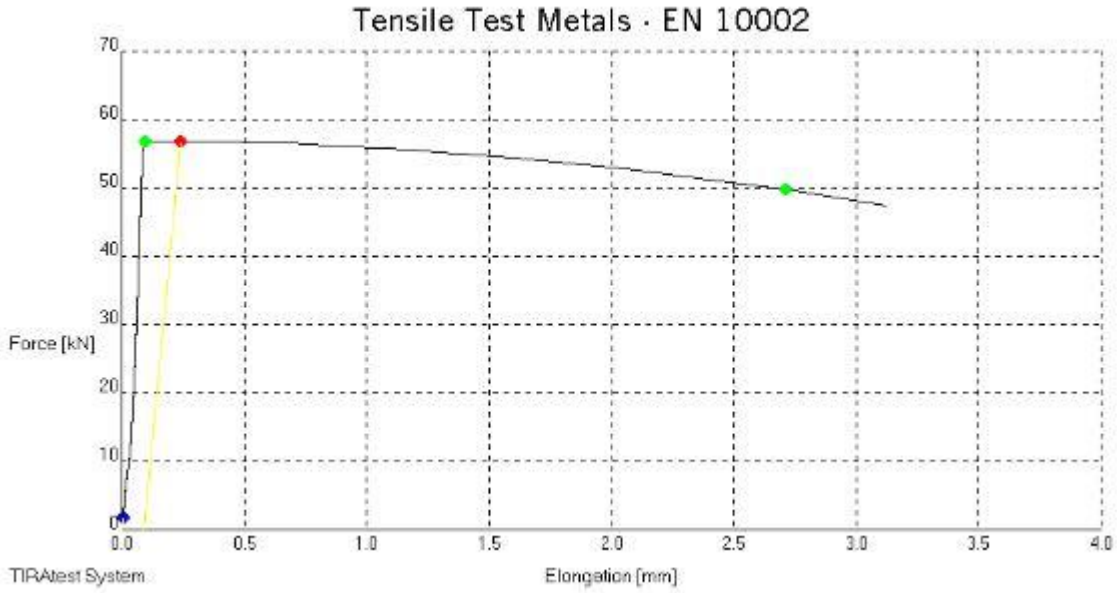
Slika 28. Izračunate vrijednosti na sljedećim rasponima za uzorak 14



Slika 29. Izračunate vrijednosti na sljedećim rasponima za uzorak 13

Na slici 28. i 29. je prikazan dijagram kidanja ispitnog uzorka 14 i 13 koji je iz grupe fino obrađenih ispitnih uzoraka. Ovdje se može zamjetiti da pravac u elastičnom području nije potpuno linearan što se, osim pogrešaka mjerenja sile i produljenja, može pripisati nehomogenosti u materijalu odnosno pogreškama pri izradi uzoraka.

U cijelom istraživanju u obzir nije uzeta brzina ispitivanja koja definitivno ima znatan utjecaj na rezultate ispitivanja modula elastičnosti.



Slika 29. Dijagram sila-produljenje za uzorak 14

Iz ovih dijagram se vidi koliki je utjecaj ekstenzometra na rezultate modula elastičnosti jer dobiveni rezulatit potpuno nerealni podacima. Ovdje nisu ni računate mjerne nesigurnosti jer je to besmisleno.

8. ZAKLJUČAK

U radu je provedeno ispitivanje modula elastičnosti te itraživanje utjecaja pojedinih izvora nesigurnosti na rezultate mjerenja modula elastičnosti. Prvenstveno su razmatrani utjecaji opreme za mjernje sile i produljenja te kvaliteta izrade ispitnih uzoraka.

Iz analize rezulatata dobiveni su sljedeći zaključci:

- Određivanje modula elastičnosti je znatno zahtjevnije ispitivanje u odnosu na ispitivanje ostalih mehaničkih svojstava. Shodno tome puno su veći zahtjevi na mjernu sposobnost opreme te na kvalitetu izrade ispitnih uzoraka.
- Izvori nesigurnosti za određivanje modula elastičnosti su podijeljeni na dvije osnovne grupe: vezani uz opremu te vezani uz materijal. Kod izvora veznaih za opremu, nesigurnost proizlazi iz određivanja nagiba Hookovog pravca gdje preciznost mjerenja produljenja te sile ima presudan značaj. Iz provedenih ispitivanja i analiziranih rezultata vidljivo je da klasifikacija kidalice i ekstenzometra (minimalni razred točnosti 1) te primjena njhove mjerne nesigurnosti može značajno utjecati na mjerne rezultate modula elastičnosti i i njegove procijenjene mjerne nesigurnosti.
- Kvaliteta ispitnih uzoraka utječe na rezultate modula elastičnosti. U radu je praćeno samo utjecaj hrapavosti i pokazalo se da grublja obrada tijela ispitnog uzorka daje višestruku veće mjerne nesigurnosti nego polirana površina. Te mjerne nesigurnosti bi bile još izraženije kada bi u obzir uzeli i odstupanje ispitnih uzoraka od oblika.
- Izbor mjernog područja također može značajno utjecati na mjerne rezultate modula elastičnosti. Iz dijagrama sila-produljenje su vidljivi nelinearne deformacije u pojedinim segmentima Hookovog pravca. Ukoliko uzimamo uže područje dijagrama kao mjerodavno možemo dobiti drugačiji nagib, a to dovodi i do promjene vrijednosti modula elastičnosti.
- Kvaliteta materijala također utječe na rezultate mjerenja modula elastičnosti: razni uključci, nehomogenosti materijala, te ostale pogreške dovode do promjene nagiba Hookovog pravca na lokalnim mjestima što rezultira i utjecajem na modul elastičnosti.

Iz svega navedenog generalno možemo zaključiti da je određivanje modula elastičnosti s procjenom i proračunom pripadajućih mjernih nesigurnosti je znatno kompletiraniji proces

koji zahtjeva puno više iskustva te jako dobro poznavanje opreme na kojoj se provodi ispritivanje i materijala kojeg se ispituje.

9. LITERATURA

[1] Odabrana poglavlja iz mehaničkih svojstava materijala, Prof..dr.sc. Mladen Franz, Doc.dr.sc. Danko Ćorić

[2] http://www.mechanicalengineeringsite.com/13-mechanical-properties-material-must-know/#Introduction (14.10.2019)

[3] Nauka o čvrstoći I, prof.dr. Ivo Alfirević

[4] https://www.fictiv.com/hwg/design/engineering-fundamentals-refresh-strength-vs-stiffness-vs-hardness (21.10)

[5] https://webshop.schachermayer.com/cat/hr-HR/product/zastitna-opruga-gu-secury/102299307(21.10)

[6] https://www.theshop.hr/opruga-za-trampolin-14-cm/38.01191/product/(21.10)

[7] http://www.bu.edu.eg/portal/uploads/Engineering,%20Shoubra/Civil%20Engineering/2469/crs-6270/Files/MECHANICAL%20PROPERTIES.pdf (26.10.2019)

[8] D.Roylance, Fatigue, Departmen od Materials Science and Engineering, MIT Cambridge, 2001

[9] M. Husnjak; Mehanika loma, Fakultet strojarstvo i brodogradnje, 2009

[10] Inženjerski priručnik: Prvi svezak – Materijali, Školska knjiga, Zagreb, 1998, str. 289-292

[11] https://hr.sodiummedia.com/4336060-modulus-of-elasticity-what-is-it-determination-of-elastic-modulus-for-materials (3.11.2019)

[12] Elastic modulus, Materion brush performance alloys Technical tidbits, Issue No. 48 December 2012

[13] "Konstrukcijski elementi I", Tehnički fakultet Rijeka, Božidar Križan i Saša Zelenika, 2011.

[14] https://hr.wikipedia.org/wiki/Dijagram_naprezanja#/media/Datoteka:%C4%8Cvrsto%C4%87a1.jpg (4.11.2019)

[15] https://rudar.rgn.hr/~smihalic/nids_snjezanamihalic/03_poglavlje.pdf (4.11.2019)

[16] "Elementi strojeva", Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Split, Prof. dr. sc. Damir Jelaska, 2011

[17] https://hr.wikipedia.org/wiki/Poissonov_omjer (4.11.2019)

[18] https://sl.wikipedia.org/wiki/Stri%C5%BEni_modul (4.11.2019)

[19] https://hr.wikipedia.org/wiki/Youngov_modul_elasti%C4%8Dnosti (7.11.2019)

[20] http://me.aut.ac.ir/staff/solidmechanics/alizadeh/Tensile%20Testing.htm (7.11.2019)

[21] Hrvatski zavod za norme; Engleska verzija norme HRN EN ISO 6892-1:2009, 2010

[22] https://www.zwickroell.com/en(5.11.2019)

[23] https://bs.wikipedia.org/wiki/Mjerna_nesigurnost (4.11.2019)

[24] https://www.zwickroell.com/en(5.11.2019)
The Determination of Uncertainties in Tensile Testing; W. GABAUER VOEST-ALPINE STAHL LINZ GmbH

PRILOZI

I. CD-R disc