

Određivanje modula elastičnosti metalnih materijala jednoosnim vlačnim ispitivanjem

Vrban, Antonio

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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:235:350184>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-20**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Antonio Vrbanić

Zagreb, svibnja 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof.dr.sc. Željko Alar, mag.ing.mech.

Student:

Antonio Vrban

Zagreb, svibnja 2024

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

Zahvaljujem se prvenstveno svom mentoru prof.dr.sc. Željku Alaru na ukazanom povjerenju da ću završiti ovaj zadatak, te na ustupljenoj literaturi i pomoći pri rješavanju usputnih problema.

Također želio bih se zahvaliti asistentu Danielu Pustičkom, mag. ing mech. na svojoj pruženoj pomoći, znanju i savjetima tijekom pisanja i izrade ovog diplomskog rada, te laborantu Romanu Divjaku oko pomoći izvedbe eksperimentalnog dijela završnog rada

Na kraju, najviše se zahvaljujem svojoj obitelji i svim prijateljima koji su mi pružili podršku tijekom izrade rada i diplomskog studija.

Antonio Vrban



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:

Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Antonio Vrban**

JMBAG: 35218129

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Određivanje modula elastičnosti metalnih materijala jednoosnim vlačnim ispitivanjem**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Determination of the modulus of elasticity of metallic materials using a uniaxial tensile test**

Opis zadatka:

Modul elastičnosti ili Youngov modul je jedno od važnijih mehaničkih svojstava materijala. On predstavlja mjeru krutosti materijala i jednak je omjeru vlačnog naprezanja i linijske vlačne deformacije u području Hookeovog pravca. Pri određivanju modula elastičnosti vrlo bitno je poznavanje utjecajnih veličina na samo mjerenje te procjena mjernih nesigurnosti za pojedine veličine.

U radu je potrebno:

1. Opisati značenje Youngovog modula elastičnosti te postupke njegovog određivanja
2. Prema literaturnim izvorima opisati utjecajne veličine na određivanje modula elastičnosti te modele procjene mjerne nesigurnosti
3. Eksperimentalno provesti ispitivanje i određivanje modula elastičnosti te provesti procjenu mjerne nesigurnosti
4. Analizirati dobivene rezultate te dati zaključke.

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

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

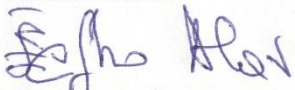
7. ožujka 2024.

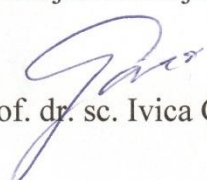
9. svibnja 2024.

13. – 17. svibnja 2024.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Željko Alar


Prof. dr. sc. Ivica Garašić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
Popis Tablica	IV
OPIS OZNAKA	V
SAŽETAK	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD	1
1.2 Ispitivanje materijala	1
1.2. Mehanička svojstva	2
2. VRSTE MEHANIČKIH SVOJSTAVA	5
2.1. Vlačna čvrstoća	5
2.2. Tvrdća	7
2.3. Žilavost	8
2.4. Duktilnost	9
2.5. Krhkost	10
2.6. Elastičnost	11
2.7. Plastičnost	12
2.8. Krutost	13
2.9. Puzanje	14
2.10. Umor materijala	15
3. STATIČKO VLAČNO ISPITIVANJE	17
3.1. Općenito	17
3.2. Dijagram naprežanja i istežanja	18
3.3. Ispitni uzorci	21
3.4. Kidalice	23
3.5. Ekstenziometri i mjerne trake	25
3.6. Mjerna nesigurnost	26
3.7. Analiza podataka	29
4. MODUL ELASTIČNOSTI	31
4.1. Općenito o modulu elastičnosti	31
4.2. Metode promijene iznosa modula elastičnosti	31
4.3. Postupci za određivanje Youngovog modula	33
4.4. Modeli procijene mjerne nesigurnosti	36
4.5. Validacija softvera	38
5. EKSPERIMENTALNI DIO	40
5.1. Opis ispitivanja	40
5.2. Tablice sa rezultatima	47

6. ANALIZA REZULTATA.....	48
6.1. Analiza mehaničkih svojstava	48
6.2. Procjena i analiza mjerne nesigurnosti.....	52
ZAKLJUČAK	57
LITERATURA.....	58

POPIS SLIKA

Slika 1.	Vlačno i tlačno naprezanje [3]	3
Slika 2.	Utjecaj hladnog oblikovanja na vlačnu čvrstoću [3]	6
Slika 3.	Test prema Brinellu pod a), test prema Vickersu pod b) [1]	7
Slika 4.	Dijagram udarni rad loma - temperatura [5]	9
Slika 5.	Metoda imaginarnih presjeka [7]	12
Slika 6.	Shema ispitivanja krutosti [9]	14
Slika 7.	Dijagram puzanja [5]	15
Slika 8.	Dijagram naprezanja i istezanja za konstrukcijski čelik [5]	19
Slika 9.	Ispitni uzorak za statičko vlačno ispitivanje [11]	21
Slika 10.	Načini prihvata ispitnih uzoraka [11]	23
Slika 11.	Pravilno postavljanje epruvete [11]	26
Slika 12.	Epruvete s grubom površinom	40
Slika 13.	Epruvete sa glatkom površinom	40
Slika 14.	Označen ispitni uzorak sa grubom površinom	41
Slika 15.	Mjerenje hrapavosti površine	42
Slika 16.	Kidalica WPM Leipzig EU 40 mod	43
Slika 17.	Ekstenzometar MFA 2	44
Slika 18.	Suženje na uzorku i lom epruvete	45
Slika 19.	Prikaz prozora softvera kidalice	45
Slika 20.	Mjerenje produljenja nakon loma L_u	46
Slika 21.	Mjerenje konačnog promjera d_u	46
Slika 22.	Dijagram vrijednosti modula elastičnosti	48
Slika 23.	Srednje vrijednosti modula elastičnosti s korigiranim vrijednostima	49
Slika 24.	Dijagram vrijednosti vlačne čvrstoće	49
Slika 25.	Dijagram vrijednosti gornje granice razvlačenja	50
Slika 26.	Dijagram vrijednosti istežljivosti nakon loma	50
Slika 27.	Dijagram vrijednosti kontrakcije	51
Slika 28.	Dijagram vrijednosti mjerne nesigurnosti za nebrušene epruvete	54
Slika 29.	Dijagram vrijednosti mjerne nesigurnosti za nebrušene epruvete	54
Slika 30.	Dijagram vrijednosti mjerne nesigurnosti za brušene epruvete	55
Slika 31.	Dijagram vrijednosti mjerne nesigurnosti za brušene epruvete	55
Slika 32.	Rezultati proširene mjerne nesigurnosti	56

Popis Tablica

Tablica 1. Promjeri nebrušenih epruveta	41
Tablica 2. Promjeri brušenih epruveta	42
Tablica 3. Hrapavosti epruveta.....	43
Tablica 4. Rezultati nebrušenih epruveta.....	47
Tablica 5. Rezultati brušenih epruveta	47
Tablica 6. Rezultati proširene mjerne nesigurnosti	53

OPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
ϑ_p	K	Prijelazna temperatura
E	N/mm ²	Youngov modul elastičnosti
ε	mm/mm	Istezanje
σ	N/mm ²	Normalno naprezanje
F_m	N	Maksimalna sila
F_k	N	Konačna sila
R_e	N/mm ²	Granica tečenja
R_{eH}	N/mm ²	Gornja granica razvlačenja
R_{eL}	N/mm ²	Donja granica razvlačenja
R_m	N/mm ²	Vlačna čvrstoća
F	N	Normalna sila
A_0	mm ²	Početna poprečna površina
L_0	mm	Početna duljina mjernog segmenta
ΔL	mm	Promjena duljine mjernog segmenta
ν	-	Poissonov omjer
$-e_y$	mm	promjena dimenzije u smjeru osi y
e_x	mm	promjena dimenzije u smjeru osi x
ε_T	mm/mm	ukupna deformacija
ε_p	mm/mm	plastični dio deformacije
ε_e	mm/mm	elastični dio deformacije
K	-	koeficijent proporcionalnosti
u_c	-	sastavljena mjerna nesigurnost
L_e	mm	mjerna duljina ekstenzometra
S_0	mm ²	početna površina poprečnog presjeka
S_E	kN/mm	nagib pravca sila-produljenje
$u(S_E)$	-	nesigurnost izmjerenog nagiba pravca sila-produljenje
$u(L_E)$	-	nesigurnost izmjerene duljine ekstenzometrom
$u(S_0)$	-	nesigurnost izvorne površine poprečnog presjeka
U	-	proširena mjerna nesigurnost

SAŽETAK

Ispitivanje materijala je ključno za razumijevanje i primjenu različitih inženjerskih i tehnoloških koncepta. Mehanička svojstva materijala igraju važnu ulogu u određivanju njihove primjene i performansi u različitim uvjetima. U ovom radu navedena su i objašnjena najvažnija mehanička svojstva, te su o svakom svojstvu rečene najbitnije karakteristike, postupci ispitivanja, važnost pri eksploataciji te su prikazani najvažniji dijagrami. Posebna pozornost dana je statičkom vlačnom ispitivanju, te su prikazane stvarne i inženjerske krivulje naprezanja i istežanja kao i formule za određivanje najbitnijih veličina. Navedene su standardne dimenzije ispitnih uzoraka i njihovi oblici, te način uglavljivanja u kidalice, nakon čega su opisane glavne vrste kidalice, ekstenzometara i mjernih traka. Poglavlje o statičko vlačnom ispitivanju zaključeno je sa pravilima kojih se treba pridržavati kako bi se smanjila mjerna nesigurnost i objašnjena je pravilna analiza podatka. Nadalje, opisane su glavne karakteristike modula elastičnosti kojeg još nazivamo i Youngov modul. Objašnjene su metode promijene i izračuna Youngovog modula. Također opisan je postupak analize i validacije softvera kojim se određuje modul elastičnosti. Na kraju provedeno je i samo statičko vlačno ispitivanje na ranije pripremljenim uzorcima te je napravljena analiza utjecaja brzine ispitivanja i hrapavosti površine ispitnih uzoraka na rezultate statičkog vlačnog ispitivanja.

Ključne riječi:

Mehanička svojstva, modul elastičnosti, ispitivanje materijala, statičko vlačno ispitivanje

SUMMARY

Material testing is crucial for understanding and applying various engineering and technological concepts. The mechanical properties of materials play a significant role in determining their application and performance under different conditions. In this work, the most important mechanical properties are listed and explained, covering their key characteristics, testing procedures, importance in exploitation, and presenting the most important diagrams. Special attention is given to static tensile testing, including real and engineering stress-strain curves, as well as formulas for determining key parameters. Standard dimensions of specimens and their shapes, as well as the method of fitting into grips, are provided, followed by descriptions of the main types of grips, extensometers, and measuring tapes. The chapter on static tensile testing is concluded with rules to be followed to reduce measurement uncertainty, and the proper data analysis is explained. Furthermore, the main characteristics of the modulus of elasticity, also known as Young's modulus, are described, along with methods for its determination and calculation. The process of analysis and validation of software used to determine the modulus of elasticity is also described.. Finally, static tensile testing was performed on previously prepared specimens, followed by an analysis of the impact of testing speed and surface roughness of the specimens on the results of static tensile testing.

Key words:

Mechanical properties, modulus of elasticity, material testing, static tensile testing

1. UVOD

1.2 Ispitivanje materijala

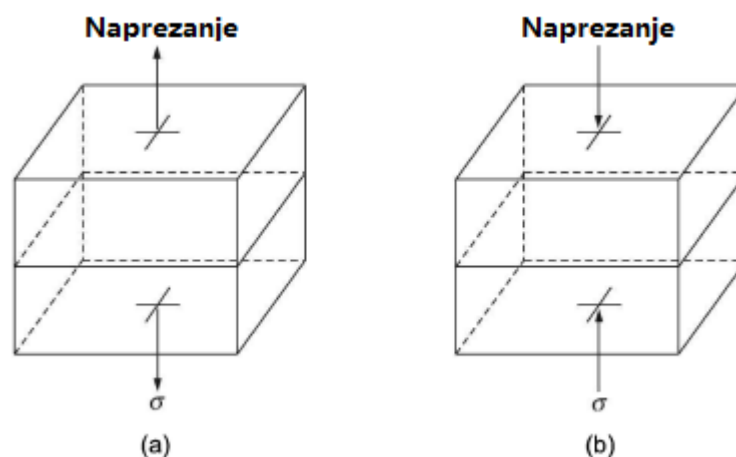
Ispitivanje materijala ključan je aspekt znanosti o materijalima i inženjerstva koji pruža neprocjenjive uvide u svojstva, ponašanje i performanse različitih materijala u različitim uvjetima. Ispitivanja obuhvaćaju širok spektar tehnika i metoda usmjerenih na procjenu mehaničkih, fizikalnih, kemijskih i termalnih svojstava materijala. Osnovna svrha ispitivanja materijala je procjena prikladnosti, pouzdanosti i sigurnosti materijala za određenu primjenu. Također, ispitivanje igra ključnu ulogu u osiguravanju kvalitete proizvoda, optimizaciji performansi i usklađivanju s industrijskim standardima i propisima. Postupnim izlaganjem materijala kontroliranim ispitivanjima i eksperimentima, inženjeri i znanstvenici mogu prikupiti bitne podatke kako bi donijeli ispravne odluke u odabiru materijala, dizajnu i procesima proizvodnje. Ispitivanje materijala obuhvaća različite testove prilagođene ispitivanju različitih svojstava i karakteristika materijala. Pa tako mehaničkim ispitivanjima procjenjujemo mehanička svojstava kao što su čvrstoća, krutost, duktilnost, žilavost, tvrdoća i otpornost na zamor. Često mehanička ispitivanja uključuju ispitivanje vlačne čvrstoće, ispitivanje savijanja, ispitivanje lomne žilavosti i ispitivanje tvrdoće. Nadalje, fizikalnim ispitivanjima moguće je ocijeniti fizikalna svojstava poput gustoće, toplinske provodljivosti, koeficijenta toplinskog širenja, električne provodljivosti i magnetskih svojstava. Kemijskim ispitivanjima utvrđivanje se kemijski sastav, čistoće, otpornost na koroziju i reaktivnost. Toplinskim ispitivanjima istražuju se toplinska svojstava kao što su toplinska provodljivost, specifični toplinski kapacitet, točka taljenja i koeficijent toplinskog širenja, korištenjem metoda poput diferencijalne skenirajuće kalorimetrije (DSC), termogravimetrijske analize (TGA) i mjerenja toplinske provodljivosti. Ispitivanje materijala može se provoditi različitim metodama i instrumentima ovisno o specifičnom svojstvu koje se ispituje i željenoj točnosti i preciznosti rezultata. Uobičajene metode ispitivanja uključuju; laboratorijsko ispitivanje koje se provodi u kontroliranim laboratorijskim okruženjima pomoću specijalizirane opreme i instrumenata, dalje, nedestruktivne metode (NDT) poput ultrazvučnog ispitivanja, radiografskog ispitivanja i vizualnog pregleda omogućuju procjenu svojstava materijala bez oštećenja uzorka, te ispitivanja na terenu koja se provode se na licu mjesta ili u stvarnim okruženjima kako bi se procijenila kvaliteta materijala u stvarnim radnim uvjetima. Ispitivanje materijala vodi se po međunarodnim standardima, industrijskim specifikacijama i regulatornim zahtjevima kako bi

se osigurala dosljednost, pouzdanost i usporedivost rezultata ispitivanja. Organizacije poput ASTM International, ISO-a i ASME-a razvijaju i održavaju standarde za postupke ispitivanja materijala, umejranje opreme i interpretaciju podataka. Podaci dobiveni iz ispitivanja materijala analiziraju se i interpretiraju kako bi se dobili korisni uvidi u ponašanje i performanse materijala [1].

1.2. Mehanička svojstva

Mehanička svojstva materijala su karakteristike koje se iskazuju kod materijala podvrgnutog vanjskoj mehaničkoj sili. Drugim riječima, mehanička svojstva govore o reakciji materijala na primijenjenu silu. Ovisno o prirodi primijenjene sile, mehanička svojstva se mogu podijeliti u dvije kategorije, statička i dinamička mehanička svojstva. Vlačna čvrstoća, tvrdoća, krutost te žilavost neki su primjeri statičkih svojstava, dok su primjeri dinamičkih svojstava čvrstoća pri udaru i umor materijala. Statička mehanička svojstva su karakteristike materijala prikazane pod uvjetima stalno primijenjene sile, dok su dinamička mehanička svojstva karakteristike pod uvjetima dinamičkog (fluktuirajućeg) opterećenja. Budući da su gotovo svi inženjerski proizvodi podvrgnuti ili statičkom ili dinamičkom opterećenju tijekom uporabe, poznavanje različitih mehaničkih svojstava izuzetno je bitno. Mehanička svojstva ne samo da određuju odabir materijala već određuju i lakoću s kojom se navedeni materijal može oblikovati u željene oblike i veličine različitim postupcima oblikovanja materijala. Budući da je materijal podvrgnut različitim silama tijekom uporabe i oblikovanja, osnovno znanje o različitim vrstama sila je bitno kako bi se razumjelo ponašanje materijala tijekom eksploatacije. Vanjska sila na predmet teži ga deformirati. Predmet pruža otpor bilo kakvoj promjeni u svojoj veličini i/ili obliku zbog vanjske sile. Unutarnji otpor koji predmet pruža vanjskoj sili se naziva naprezanje. U uobičajenoj praksi, riječ "naprezanje" definirana je kao omjer primijenjene sile i početne površine predmeta na kojoj sila djeluje. Materijal se deformira kada je podvrgnut vanjskoj primijenjenoj sili. Razina deformacije može biti izuzetno niska, umjerena ili visoka ovisno o prirodi materijala, veličini primijenjene sile i mnogim drugim varijablama. Pod svim tim uvjetima, materijal se smatra u stanju naprezanja. Naprezanje se može objasniti kao popratna promjena dimenzija objekta pod djelovanjem sile. U ovom trenutku, trebalo bi biti jasno da je ponašanje materijala pod utjecajem vanjske primijenjene sile promatrano uzimajući u obzir određene pretpostavke o materijalu u razmatranju i primijenjenoj sili. Pretpostavljeno je da je

materijal predmeta pod primijenjenom silom savršen, homogen i izotropan. Objekt se smatra savršenim kada je materijal od kojeg je napravljen slobodan od bilo kakve vrste diskontinuiteta, tj. materijal je kontinuiran kroz cijeli volumen. Homogeni materijal pokazuje identične značajke na svakoj točki unutar mase dok je izotropni materijal onaj koji pokazuje slična svojstva u svim smjerovima, tj. njegova svojstva ne pokazuju nikakve varijacije ni s pravcem ni s orijentacijom. Važno je spomenuti da nijedan od materijala proizvedenih komercijalno i oblikovanih uobičajenim postupcima oblikovanja ne ispunjava navedene značajke. Svaki materijal sadrži praznine, diskontinuitete, segregirane zone/regije, faze s različitim svojstvima, zaostala naprezanja na različitim područjima, mješovite veličine i oblike zrna, dendrite, inkluzije i mnoge druge nedostatke. Prema još jednoj pretpostavci, primijenjena sila jednoliko je raspoređena po cijeloj masi i njena intenzivnost je slična na svakoj točki poprečnog presjeka preko kojeg djeluje. U najjednostavnijem slučaju, vanjska primijenjena sila može biti paralelna s glavnom osi predmeta. Rezultantno naprezanje naziva se osno naprezanje, popularno poznato kao jednoosno naprezanje i paralelno je s navedenom osi. Slično tome, na predmet djeluju i dvoosna i troosna naprezanja. Postoje dva osnovna tipa naprezanja, tj. normalna naprezanja i tangencijalna (smična) naprezanja. Normalna naprezanja uvijek djeluju u smjeru koji je okomit (normalan) na površinu pod naprezanjem dok tangencijalna naprezanja djeluju paralelno s opterećenom površinom. Normalna naprezanja mogu biti vlačne ili tlačne prirode kao što je prikazano na slici 1.[2]



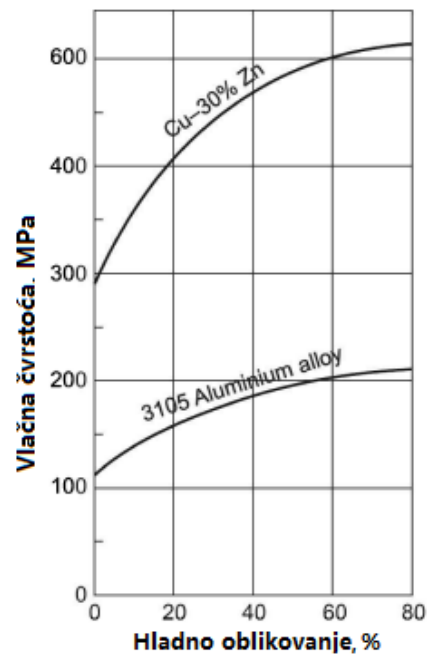
Slika 1. Vlačno i tlačno naprezanje [3]

Kada jednoosna sila teži rastezati ili izdužiti predmet, poznata je kao vlačna sila, a naprezanje koje se razvija kao rezultat ove sile naziva se vlačnim naprežanjem. Jednolična jednoosna sila koja teži stisnuti ili skratiti predmet naziva se tlačnom silom, a rezultirajuće naprezanje poznato je kao tlačno naprezanje. Sva ostala naprezanja su ili slična tim osnovnim naprežanjima ili su kombinacije tih naprežanja. Primjerice, tangencijalno naprezanje koje djeluje na način da želi uviti vratilo je smično naprezanje dok je savijanje naprezanje kombinacija vlačnih, tlačnih i smičnih naprežanja. Kada su metalni materijali podvrgnuti vanjskim silama, dolazi do deformacije. Do određene veličine vanjske sile, materijali povrate svoju originalnu veličinu i oblik nakon uklanjanja vanjske sile, tj. deformacija nije trajne prirode. Takva karakteristika materijala poznata je kao elastičnost, a deformacija koja se događa tijekom primjene sile poznata je kao elastična deformacija. Kako iznosi vanjskog primijenjenog opterećenja rastu, materijali odstupaju od ovog ponašanja. Drugim riječima, materijali ne mogu zadržati svoju originalnu veličinu i oblik nakon uklanjanja vanjske sile i deformacija koja se dogodila je trajne prirode. Ova karakteristika materijala naziva se plastičnost, a deformacija se naziva plastična deformacija. Materijali koji podliježu značajnoj plastičnoj deformaciji nazivaju se duktilni materijali, dok se oni koji ne pokazuju ili pokazuju malu plastičnu deformaciju nazivaju krhki materijali. Zlato, bakar, aluminij, čelici i mjed su primjeri duktilnih materijala, dok su staklo, keramika, dijamant, sivi lijev i bijeli lijev tipični primjeri lomljivih materijala [4].

2. VRSTE MEHANIČKIH SVOJSTAVA

2.1. Vlačna čvrstoća

Postoji mnogo inženjerskih primjena u kojima je materijal podvrgnut jednoosnoj vlačnoj sili. Vlačna čvrstoća govori o sposobnosti materijala da izdrži vlačne sile bez loma. Može se definirati kao maksimalno naprezanje koje metal može izdržati bez loma. Mjeri se kao omjer maksimalne jednoosne vlačne sile koju materijal može izdržati u odnosu na izvornu poprečnu površinu na kojoj je djelovala vlačna sila. Vlačna čvrstoća je najčešće korišteno mehaničko svojstvo. Sastavni je dio gotovo svih nacionalnih i međunarodnih standarda koji se odnose na metale i njihove legure. Ovo svojstvo se često koristi za karakterizaciju metalnih materijala. Na temelju vlačne čvrstoće, može se dobiti procijena o nekim drugim mehaničkim svojstvima poput tvrdoće, otpornosti na umor te oblikovljivosti legure. Budući da se u duktilnim materijalima odvija značajna plastična deformacija, vlačna čvrstoća ne može se koristiti kao valjani kriterij za izbor duktilnih materijala. Nasuprot tome, vlačna čvrstoća koristi se kao valjani kriterij za lomljive materijale jer ti materijali nisu skloni plastičnoj deformaciji ili pokazuju malu plastičnu deformaciju kada na njih djeluju jednoosne vlačne sile. Čisti metali i čvrste otopine su materijali jednofazne strukture. Materijal jednofazne strukture ima određenu vrijednost vlačne čvrstoće koja može ili ne mora zadovoljiti zahtjeve eksploatacije pod određenim uvjetima. Oblikovanje materijala ispod temperature rekristalizacije poznato je kao hladno oblikovanje. Hladno oblikovanje povećava vlačnu čvrstoću. Zapravo, vlačna čvrstoća jednofaznih materijala može se povećati samo hladnim oblikovanjem. Što je veći stupanj hladnog oblikovanja, veća je vlačna čvrstoća materijala. Utjecaj hladnog oblikovanja na poboljšanje vlačne čvrstoće razlikuje se od materijala do materijala. Međutim, njeno poboljšanje hladnim oblikovanjem nije osobito preferirano jer narušava mnoga fizička svojstva te druga mehanička svojstva. Utjecaj hladnog oblikovanja na vlačnu čvrstoću nekih materijala prikazan je na slici 2.[5].

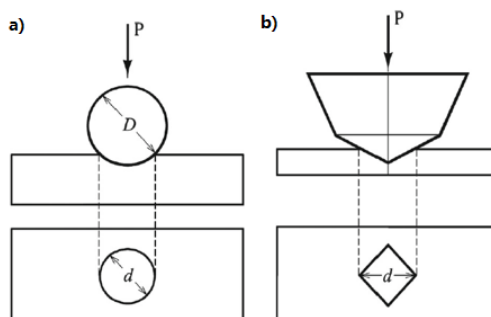


Slika 2. Utjecaj hladnog oblikovanja na vlačnu čvrstoću [3]

Jedna od često korištenih metoda za poboljšanje vlačne čvrstoće je legiranje, odnosno unošenje jednog ili više elemenata u metal koji se razmatra. Gotovo sve legure pokazuju povećanu vlačnu čvrstoću u usporedbi s njihovim odgovarajućim nelegiranim metalima. To je zbog naprezanja koja se razvijaju u kristalnoj rešetci kao rezultat razlike u atomskim veličinama između osnovnog metala i legirnih elemenata. Što je veća razlika u atomskim veličinama osnovnih i legirnih atoma, to je veća vlačna čvrstoća. Legura s jednom fazom ima nižu vlačnu čvrstoću od legure s dva ili više legirnih elemenata. Vlačna čvrstoća općenito se smanjuje s povećanjem temperature, a povećava se sa smanjenjem temperature. Također, što su finija zrna materijala, to je bolja vlačna čvrstoća. Za određeni sastav, lijevani metal, u usporedbi s kovanim metalom, posjeduje višu vlačnu čvrstoću.

2.2. Tvrdća

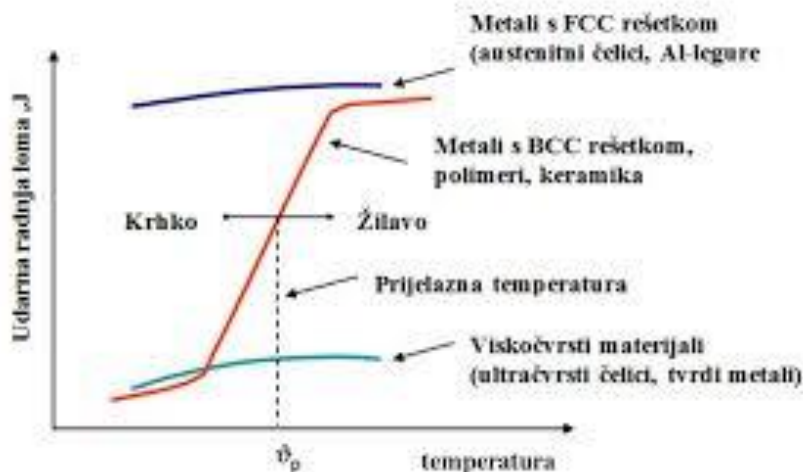
Tvrdoća je jedno od najstarijih svojstava koje je bilo poznato i primitivnom čovjeku te je već tada imalo značajnu svrhu. To je, vjerojatno, jedino svojstvo koje je definirano na različite načine. Na primjer, tvrdoća se može definirati kao svojstvo materijala koje mu omogućuje da se odupre abraziji, trošenju, plastičnoj deformaciji, obradi ili rezanju. Za metalurga ili inženjera materijala, tvrdoća se definira kao otpor materijala plastičnoj deformaciji prodiranjem. Tvrdoća čistih metala manja je od njihovih odgovarajućih legura. Dvofazne ili višefazne legure imaju bolju tvrdoću od jednofaznih legura. Tvrdoća materijala može se znatno povećati toplinskom obradom ili hladnim oblikovanjem. Međutim, tvrdoća materijala opada s porastom temperature. Tvrdoća, slično vlačnoj čvrstoći, je svojstvo koje se najopsežnije mjeri i koristi za metale i legure. Vrijednost tvrdoće materijala može se koristiti za dobru procjenu različitih svojstava poput vlačne čvrstoće, duktilnosti, otpornosti na trošenje, otpornosti na umor, obradivosti i oblikovljivosti. Mjerenje tvrdoće važan je alat za inspekciju i kontrolu kvalitete materijala. Zapravo, vlačna čvrstoća materijala može se dobiti množenjem vrijednosti tvrdoće s odgovarajućim faktorom. Neke metode utiskivanja za mjerenje modula elastičnosti i tvrdoće materijala na makro, mikro i nano razini. Za ispitivanje makroindentacije predstavljamo; Brinell, Meyer, Vickers i Rockwell metode ispitivanja, za mikroindentaciju; Vickers, a za nanoindentaciju; elastičnu kontaktnu metodu i nanoindentacijska ispitivanja. Ispitivanje utiskivanja je jednostavna i često korištena tehnika za mjerenje tvrdoće i povezanih mehaničkih svojstava materijala na jednostavan i brz način. Metoda se sastoji od dodira materijala kojeg promatramo s drugim materijalom čija su svojstva poznata. U tipičnom testu, tvrdi utiskivač poznate geometrije utiskuje se u mekši materijal primjenom unaprijed određenog opterećenja, a dimenzije rezultirajućeg otiska se mjere i povezuju s indeksnim brojem tvrdoće. Na slici 3. prikazana je shema metode prema Brinellu pod a), te prema Vickersu pod b) [1].



Slika 3. Test prema Brinellu pod a), test prema Vickersu pod b) [1]

2.3. Žilavost

Jednostavnim riječima, žilavost materijala predstavlja njegovu otpornost na lom. Može se definirati kao svojstvo materijala koje mu omogućuje apsorpciju energije i plastično deformiranje prije loma. Količina apsorbirane energije pokazatelj je čvrstoće materijala. Žilavost je složeno svojstvo jer ovisi o čvrstoći i duktilnosti materijala. Stoga se kaže da je materijal koji ima visoku vlačnu čvrstoću u kombinaciji s dobrom duktilnošću žilavi materijal. Materijal koji ima visoku vlačnu čvrstoću, ali lošu duktilnost ili nisku vlačnu čvrstoću, ali dobru duktilnost, ne pokazuje dobru žilavost. Bilo koji čimbenik koji će značajno smanjiti duktilnost materijala također će smanjiti žilavost materijala. Jedan takav čimbenik je temperatura. Dakle, žilavost gotovo svih materijala, osim onih s kristalnom strukturom s kubičnom plošnom rešetkom, smanjuje se pri smanjenju temperature. Slično tome, bilo koji parametar koji će značajno smanjiti vlačnu čvrstoću također će smanjiti žilavost. Materijalu koji ne podnosi plastičnu deformaciju nedostaje žilavosti. Žilavost materijala može se poboljšati legiranjem. Međutim, za legirni sustav, maksimalna čvrstoća se opaža samo u uskom rasponu sastava. To je očito jer je maksimalna čvrstoća rezultat optimalne kombinacije vlačne čvrstoće i duktilnosti koja se može postići samo na određenom sastavu ili u uskom rasponu sastava. Odljeveni materijal ima nižu čvrstoću od odgovarajućeg obrađenog materijala. Smanjenje veličine zrna rezultira značajnim poboljšanjem čvrstoće materijala. Kao skup metalnih materijala, legure metala s kubičnom plošnom rešetkom pokazuju bolju čvrstoću od legura metala sa prostornom kubičnom rešetkom. Legure metala s heksagonalnom kristalnom rešetkom općenito se ne koriste za primjene koje zahtijevaju dobru čvrstoću. Metali s prostornom rešetkom mogu se uspješno koristiti samo iznad određene temperature poznate kao temperatura prijelaza iz žilavog u krhki. Ta temperatura varira od materijala do materijala. Srećom, ova temperatura je uglavnom niža od sobne temperature. Na slici 4. prikazana je dijagram sile ovisne o produljenju, za različite vrste metala, koji nam govori o žilavosti materijala [4].



Slika 4. Dijagram udarni rad loma - temperatura [5]

2.4. Duktilnost

Kao što je već rečeno, materijal podvrgnut vanjskoj sili doživljava plastičnu deformaciju. Duktilnost se može definirati kao sposobnost materijala da podnese plastičnu deformaciju bez loma kada je podvrgnut jednoosnoj vlačnoj sili. Duktilnost zapravo mjeri opseg deformacije koju materijal može podnijeti bez pucanja. U strukturnim komponentama uvijek se traži određena minimalna duktilnost. Duktilnost omogućuje određenu plastičnu deformaciju prije loma materijala te tako izbjegava naglo pucnje istog, što je izuzetno nepoželjno s tehničkog i ekonomskog stajališta. Zapravo, zbog duktilnosti materijal može raspodijeliti lokalizirana naprezanja. Takva raspodjela lokaliziranih naprezanja odgovorna je za smanjeno prisustvo koncentracije naprezanja na defektima ili nedostacima koji su glavni izvor slabosti materijala. Duktilnost se odavno definira kao svojstvo materijala koje mu omogućuje da se izvuče u tanku žicu. Ovo svojstvo nije potrebno samo u vučenju žice već i u vučenju cijevi, valjanju, kovanju i sličnim operacijama. Gotovo svi metali s prostorno centriranom kubičnom rešetkom i njihove legure pokazuju dobru duktilnost pri sobnoj temperaturi i stoga imaju dobru oblikovnost. Nasuprot tome, metali s heksagonalnom kubičnom rešetkom i njihove legure koji pokazuju vrlo lošu duktilnost pri sobnoj temperaturi mogu se oblikovati samo na povišenim temperaturama. Većina metala s prostorno centriranom kubičnom rešetkom i njihove legure ima umjerenu duktilnost pri sobnoj temperaturi te se stoga

moгу oblikovati kako pri sobnoj tako i pri povišenim temperaturama. Čisti metali i legure monofazne strukture obično posjeduju bolju duktilnost od legura dvofazne ili višefazne strukture. Međutim, kod nekih metala s heksagonalnom kubičnom rešetkom, duktilnost se povećava legiranjem. Duktilnost legure uglavnom ovisi ne samo o veličini, obliku i raspodjeli faza, već i o tvrdoći i lomljivosti faza. Odljeveni materijali, općenito, pokazuju lošu duktilnost u usporedbi s obrađenim materijalima. Što su sitnija zrna materijala, to je bolja duktilnost materijala. Duktilnost metalnih materijala, općenito, opada s padom temperature. Međutim, metalni materijali s prostorno centriranom kubičnom rešetkom i njihove legure izuzetak su od ove generalizirane tvrdnje jer ovi materijali zadržavaju dobru duktilnost čak i pri temperaturama ispod nula stupnjeva. Zato se većinom koriste metali s prostorno centriranom kubičnom rešetkom za primjenu na niskim temperaturama. Međutim, svi metalni materijali pokazuju poboljšanje u duktilnosti pri povišenim temperaturama, tj. duktilnost raste s porastom temperature. Duktilnost je obično obrnuto povezana s vlačnom čvrstoćom u smislu da se jedno povećava na račun drugoga. Izuzeci od ove tvrdnje su legure s fino izrađenim zrnima koje pokazuju dobru kombinaciju vlačne čvrstoće i duktilnosti [3].

2.5. Krhkost

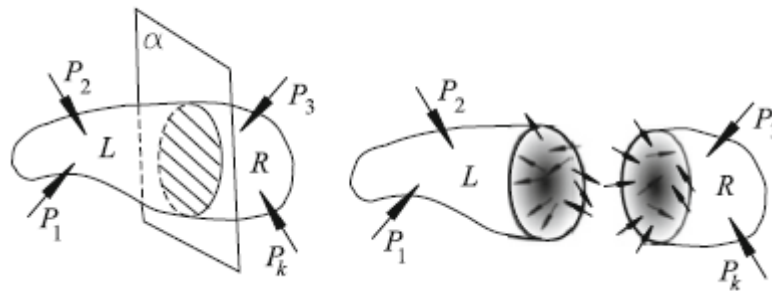
Krhkost podrazumijeva lom čvrstog materijala pod djelovanjem naprezanja na dva ili više dijelova. Djelovanje naprezanja može biti vlačno, tlačno, smično ili zakretno. Lom se događa kada dođe do kohezivnog otkaza metala što rezultira lomom metala na komadiće. Lom rezultira stvaranjem novih površina. Strojni i konstrukcijski elementi često propadaju tijekom korištenja zbog loma. Nakon loma, komponenta koja se promatra postaje beskorisna i mora se zamijeniti. Zapravo, kada je komponenta izložena vanjskom naprezanju, prolazi kroz elastičnu deformaciju, a zatim plastičnu deformaciju koja se nastavlja kontinuirano sve dok se ne dosegne stadij u kojem daljnja plastična deformacija nije moguća i komponenta puca na dva ili više dijelova. Stoga se lom ponekad naziva krajnjim rezultatom plastične deformacije. Međutim, to ne znači da je neophodna određena plastična deformacija da bi došlo do loma. Dva procesa pomažu u lomu komponente, a to su nukleacija pukotine i propagacija pukotine. Lom se događa u svim materijalima pod svim uvjetima korištenja. Lomovi se općenito dijele na dvije glavne kategorije, i to na žilave i krhke lomove. Ova klasifikacija temelji se na tome je li došlo do

plastične deformacije prije frakture ili nije. Značajna plastična deformacija događa se prije i tijekom propagacije pukotine u slučaju žilavog loma. Zbog toga se apsorbira puno energije prije nego što dođe do loma. Na površini loma vidi se značajna plastična deformacija. Za razliku od žilavog loma, krhki lom događa se bez plastične deformacije, tj. pukotina se širi bez makrodeformacije te uz vrlo male mikrodeformacije. To rezultira vrlo malom apsorpcijom energije povezanom s krhkim lomom. Još jedna važna razlika između ova dva loma povezana je s brzinom propagacije pukotine. Kod krhkih lomova, brzina propagacije pukotine je vrlo visoka. Zapravo, nakon što se pukotina stvori, njeno širenje se nastavlja i materijal se konačno lomi bez povećanja magnitude primijenjenog naprezanja. Kod žilavog loma, pukotina se širi polako i dolazi do loma samo povećanjem magnitude primijenjenog naprezanja. Lom može biti mješovite prirode, tj. mješavina i žilavog i krhkog. Lomovi se također klasificiraju na temelju kristalografskog načina loma te samog izgleda istog. Na temelju kristalografskog načina loma, lomovi su poznati kao smični ili razdvojni, dok kod materijala s kristalnom strukturom, lom može biti transkristalni ili interkristalni [6].

2.6. Elastičnost

Kod interakcije sila, udaljenosti između čestica unutar čvrstog tijela se mijenjaju. Ta promjena udaljenosti definira deformaciju tijela. Sposobnost tijela da zadrži početne dimenzije i oblik nakon uklanjanja sila naziva se elastičnost. Fizička priroda elastičnosti leži u sljedećem. Poznato je da je položaj atoma u čvrstom tijelu karakteriziran određenim redoslijedom (nepravilan redoslijed za amorfna tijela i pravilan redoslijed za kristalna tijela). Sposobnost čvrstog tijela da zadrži poredak atoma u opterećenom stanju i udaljenost između atoma u neopterećenom stanju definira elastičnost u fizičkom smislu. Poremećaji u početnom poretku atoma nazivaju se strukturnim nedostacima. Oni se nalaze u svim stvarnim čvrstim tijelima, osim možda u umjetnim monokristalima. Kada su izloženi silama, strukturni nedostaci se polako diverzificiraju. Ako deformacije uzrokovane navedenom diverzifikacijom nedostataka u strukturi materijala nestanu ubrzo nakon uklanjanja opterećenja, nazivaju se reverzibilnima. Nestanak takvih deformacija naziva se elastičnim nakondjelovanjem. Interakcije čestica unutar čvrstog tijela formiraju sustav unutarnjih sila. Neke od njih djeluju prema Newtonovom zakonu gravitacije i pojavljuju se samo kod velikih astronomskih tijela. Takve sile unutar inženjerskih

struktura zanemarivo su male i nećemo ih uzeti u obzir. Metoda imaginarnih presjeka, prikazana na slici 5. omogućuje nam otkrivanje unutarnjih sila, te prenosi unutarnje sile u kategoriju vanjskih opterećenja primijenjenih na svaki od razdvojenih dijelova tijela kojeg promatramo [7].



Slika 5. Metoda imaginarnih presjeka [7]

Koristeći princip uzajamnog djelovanja, ova opterećenja primijenjena na svaku stranu presjeka jednaka su po vrijednosti i suprotne po smjeru. Maksimalno naprezanje kod kojeg se još uvijek primjećuju stabilne trajne deformacije naziva se elastična granica. Kod naprezanja koja ne prelaze prirodnu elastičnu granicu, javljaju se nestabilne trajne deformacije. Za praktično određivanje elastičnog ograničenja, trajna deformacija uvjetno je postavljena na temelju tehničkih mogućnosti mjerenja. Vrijednost određena na ovaj način naziva se uvjetna elastična granica. U inženjerstvu, elastična granica često se izjednačuje s granicom proporcionalnosti.

2.7. Plastičnost

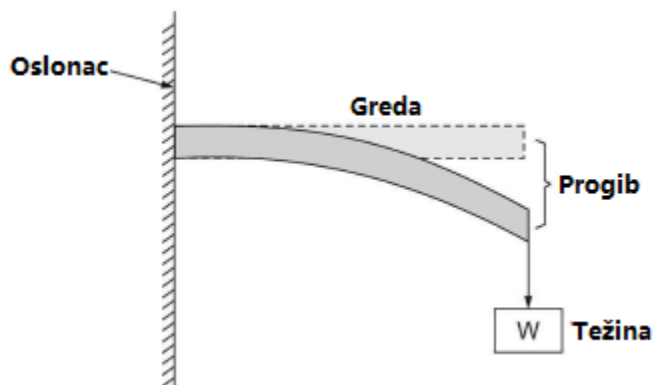
Razlika u udaljenosti između različitih čestica tijela prije i nakon opterećenja karakterizira trajnu deformaciju. Eksperimenti pokazuju da trajne deformacije nastaju u specifičnim uvjetima u svim stvarnim čvrstim tijelima. U mnogim slučajevima, trajne deformacije su gotovo jednake kao i elastične ili ih čak i premašuju. Studije su pokazale da su za neka tijela (čelik, neželjezni metali, njihove legure, itd.), trajne deformacije praćene rezidualnom promjenom volumena tijela. Nazvat ćemo ih plastičnim deformacijama. Za elastična tijela (lijevano željezo, tla, stijene, itd.), karakteristična je rezidualna promjena

volumena. U tom se slučaju uvijek razdvaja onaj dio trajne deformacije koji nije povezan s promjenom volumena tijela. Nazvat ćemo ovaj dio trajne deformacije čisto plastičnim ili jednostavno plastičnom deformacijom. Razlika između potpune neelastične deformacije i čisto plastične deformacije naziva se omekšavajuća deformacija. Eksperimentima je otkriveno da je ova komponenta neelastične deformacije pratila plastičnu deformaciju u nekim uvjetima. U nastavku, koristit ćemo izraz "složena deformacija" da označimo takvu deformaciju čvrstog tijela kada sadrži sva tri prethodno definirana tipa deformacije, npr. plastičnu i omekšavajuću deformaciju. Proučavanje složene deformacije čvrstog tijela treba uključiti mehaniku plastične deformacije, odnosno matematičku teoriju plastičnosti. Zadatak teorije plastičnosti je opisati ponašanje opterećenja materijala koji dobivaju ireverzibilne deformacije pod uvjetom da ovisnost između naprezanja i deformacija nije ovisna o vremenu. To vrijedi u prvom redu za metale i njihove legure obično korištene u inženjerstvu pri normalnim temperaturama. Stoga, teorija plastičnosti zapravo opisuje ponašanje čelika, mjedi, legura aluminija i nekih drugih materijala i legura pri normalnim i niskim temperaturama. Pri visokim temperaturama pod opterećenjem dolazi do puzanja materijala i veza između naprezanja i deformacija uvelike ovisi o vremenu. Teorija puzanja opisuje ove pojave i nećemo ih istaknuti, osim u slučajevima kada se puzanje nalazi čak i pri normalnim temperaturama[8].

2.8. Krutost

Kada je greda ili šipka izložena vanjskoj sili, savija se u smjeru koji je paralelan sa smjerom primijenjene sile. Količina savijanja koja se događa pri tome mjera je krutosti materijala. Što je manje savijanje promatranog objekta, to je bolja njegova krutost. Zapravo, krutost govori o sposobnosti materijala da se odupre savijanju pod djelovanjem primijenjene sile. Krutost materijala uglavnom ovisi o njegovom obliku. Kruti materijal ima visoki modul elastičnosti. Budući da je za materijal modul elastičnosti gotovo konstantan, krutost materijala može se poboljšati samo povećanjem momenta inercije materijala jer je veličina savijanja obrnuto proporcionalna momentu inercije materijala. Kada su uključene vlačne, tlačne ili savojne sile, Youngov modul određuje krutost, dok pod uvjetima smicanja ili torzijske sile, modul krutosti zamjenjuje Youngov modul i određuje čvrstoću materijala. Kruti materijal ne mora nužno biti i jak. Na primjer, čelik se više savija u usporedbi s lijevanim željezom. Čelik

se dalje savija dok se lijevano željezo lomi s povećanjem sile. Pojednostavljenu shemu ispitivanja krutosti možemo vidjeti na slici 6.[9].



Slika 6. Shema ispitivanja krutosti [9]

2.9. Puzanje

Svi materijali podliježu trajnoj deformaciji pod stalnim naprezanjem. Takva deformacija koja ovisi o vremenu naziva se puzanje. Puzanje se javlja pri svim temperaturama. Stoga je puzanje fenomen koji ovisi o vremenu, ali ne ovisi o temperaturi. Potreba za naglašavanjem temperature proizlazi iz činjenice da se značajno puzanje, kod većine metala i legura, događa pri povišenim temperaturama što stvara pogrešan dojam da je puzanje fenomen ovisan o temperaturi. Otpornost na puzanje možemo definirati kao sposobnost materijala da odoli progresivnoj promjeni dimenzija tijekom produljenog vremenskog razdoblja pod stalnim opterećenjem. Puzanje se obično mjeri u smislu stalnog nominalnog naprezanja koje će proizvesti određenu količinu deformacije u danom materijalu u danom vremenu pri konstantnoj temperaturi. Visoka naprezanja i visoke temperature snižavaju otpornost na puzanje. Poznavanje svojstva puzanja bitno je jer se puzanje događa pri mnogo nižim naprezanjima od vlačne čvrstoće. Problem puzanja je ozbiljniji kod metala s niskim točkama taljenja i njihovih legura. Većina legura željeza odolijeva puzanju do 698 K (425 °C) i za većinu primjena, temperatura eksploatacije ne prelazi tu temperaturu, odnosno 698 K (425 °C). Budući da puzanje nastaje zbog klizanja granica zrna, svaki postupak koji će spriječiti klizanje granica zrna poboljšat će otpornost materijala na puzanje. Stoga se otpornost na puzanje materijala

naprezanjem obično poznatim kao granično naprezanje. Dinamička izdržljivost može se definirati kao ono naprezanje koji materijal može izdržati tijekom određenog broja ciklusa naprezanja, obično jednakog ili većeg od 10^7 ciklusa. Budući da je otpornost na umor otprilike polovica vlačne čvrstoće za određeni materijal, bilo koji postupak ili parametar koji će poboljšati vlačnu čvrstoću očito će poboljšati i otpornost na umor. Otpornost na umor vjerojatno je jedino mehaničko svojstvo koje jako ovisi o glatkoći površine. Što je veća glatkoća površine objekta, to je veća njegova otpornost na umor. Pjeskarenje i površinsko kaljenje su važni tretmani koji znatno poboljšavaju otpornost na umor. Odljeveni materijali imaju lošu otpornost na umor u usporedbi s obrađenim materijalima. Čist materijal, tj. materijal bez uključaka i nečistoća, pokazuje bolju otpornost na umor [10].

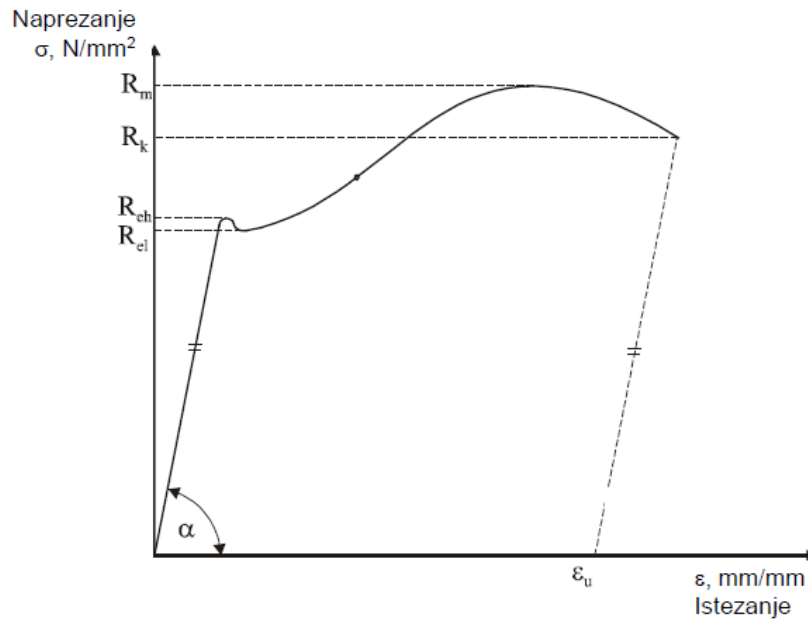
3. STATIČKO VLAČNO ISPITIVANJE

3.1. Općenito

Statičko vlačno ispitivanje je temeljni i najčešće korišteno ispitivanje za karakterizaciju mehaničkog ponašanja materijala. Ispitivanje se sastoji od povlačenja uzorka materijala i mjerenja opterećenja te odgovarajuće izduženosti. Glavna svojstva izmjerena iz ispitivanja uključuju Youngov modul, granicu tečenja, maksimalnu vlačnu čvrstoću, otpornost na lom, duktilnost, elastičnost, vlačnu čvrstoću i Poissonov omjer. Vlačna svojstva koriste se pri odabiru materijala za inženjerske primjene i u istraživanju i razvoju novih materijala ili procesa. Vlačna svojstva često se uključuju u materijalne specifikacije kako bi se osigurala kvaliteta. Također, često se mjere tijekom razvoja novih materijala i procesa kako bi se različiti materijali i procesi mogli usporediti. Vlačna čvrstoća materijala često je primarni interes. Čvrstoća se može mjeriti ili naprezanjem koje izaziva značajne plastične deformacije ili maksimalnim naprezanjem koje materijal može izdržati. Ove mjere čvrstoće koriste se kod dimenzioniranja dijelova. Također je zanimljiva i duktilnost materijala, koja je mjera koliko se materijal može deformirati prije nego što dođe do loma. Rijetko se duktilnost direktno uključuje u dimenzioniranje; radije se uključuje u materijalne specifikacije radi osiguravanja kvalitete i čvrstoće. Niska duktilnost u vlačnom ispitivanju često je praćena niskim otporom na lom pri drugim oblicima opterećenja. Elastična svojstva također mogu biti zanimljiva, ali za mjerenje tih svojstava tijekom vlačnih ispitivanja moraju se koristiti posebne tehnike, a preciznija mjerenja mogu se obaviti ultrazvučnim tehnikama.[11]

3.2. Dijagram naprezanja i istezanja

Dijagram naprezanja i istezanja je osnovni dijagram u mehanici materijala koji se koristi za prikazivanje ponašanja materijala pod utjecajem vanjskog opterećenja. Ovaj dijagram pruža važne informacije o mehaničkim svojstvima materijala, uključujući njegovu čvrstoću, elastičnost, plastičnost i krhkost. Najvažnije točke i veličine u dijagramu su slijedeće. Za većinu materijala, početni dio dijagrama, nazvan Hookeov pravac, je linearan. To znači da se materijal ponaša elastično, tj. vraća se u svoje prvobitno stanje nakon uklanjanja opterećenja. Nagib Hookeovog pravca određuje Youngov modul. Granica proporcionalnosti, R_p , je točka na dijagramu naprezanja i istezanja gdje linearni dio Hookeovog pravca prestaje i počinje krivulja s neelastičnim deformacijama. Ova granica označava kraj linearnog elastičnog ponašanja materijala. Nadalje, granica razvlačenja, R_e , je točka na dijagramu koja označava kraj potpuno elastičnog ponašanja materijala i početak plastičnih deformacija. To je naprezanje pri kojem se materijal počinje trajno se deformirati. Granicu razvlačenja karakteriziraju dvije vrijednosti; gornja granica razvlačenja, R_{eh} i donja granica razvlačenja R_{el} . Naprezanje pri maksimalnoj sili, R_m , označava naprezanje koje materijal može podnijeti prije nego što dođe do otkaza. Kovencionalna granica razvlačenja, $R_{p0.2}$, označava naprezanje na 0,2% istezanja materijala. Koristi se u slučajevima kada nije moguće precizno odrediti granicu proporcionalnosti. Konačno naprezanje je točka na dijagramu gdje dolazi do potpunog otkaza materijala. Nakon granice razvlačenja, dijagram naprezanja i istezanja obično prikazuje zavojnu krivulju koja predstavlja plastične deformacije materijala. Dijagram naprezanja i istezanja je osnova za razumijevanje ponašanja materijala pod opterećenjem i važan je u procesu dizajniranja i procjene sigurnosti konstrukcija. Na slici 8. prikazan je dijagram naprezanja i istezanja za konstrukcijski čelik [12].



Slika 8. Dijagram naprezanja i istezanja za konstrukcijski čelik [5]

Modul elastičnosti je konstanta materijala koja ovisi o čvrstoći veze između atoma u kristalnoj rešetki ili amorfnoj strukturi. Inženjersko naprezanje, ili nominalno naprezanje, σ , definira se kao:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

gdje je F vlačna sila, a A_0 je početna poprečna površina mjernog uzorka. Inženjerska deformacija, ili nominalna deformacija, ϵ , definira se kao:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

gdje je L_0 početna duljina mjernog segmenta, a ΔL je promjena u duljini mjernog segmenta ($L - L_0$). Kada se podaci o sili-produljenju pretvore u inženjersko naprezanje i deformaciju, može se iscrtati krivulja naprezanje-istezanje koja je identična krivulji sila-produljenje. Prednost bavljenja naprezanjem naspram deformacije umjesto opterećenja naspram produljenja je ta što je krivulja naprezanja i deformacije gotovo neovisna o dimenzijama uzorka. Kao što je ranije spomenuto početni dio krivulje naziva se Hookeovim pravcem za koji vrijedi Hookeov zakon:

$$\sigma = E * \epsilon \quad (3)$$

U elastičnom rasponu, omjer, ν , magnituda poprečne kontrakcijske deformacije i aksijalne deformacije naziva se Poissonov omjer:

$$\nu = \frac{-e_y}{e_x} \quad (4)$$

gdje je $-e_y$ promjena dimenzije u smjeru osi y, a e_x promjena dimenzije u smjeru osi x. Budući da su elastične deformacije obično vrlo male, potrebno je vrlo osjetljivo mjerenje deformacije pomoću ekstenzometra kako bi se dobila razmjerno točna vrijednost Youngovog modula i Poissonovog omjera u vlačnom ispitivanju. Kada naprezanje postane dovoljno veliko, odnos između naprezanja i deformacije više neće biti linearna, a deformacija postaje trajna prilikom popuštanja. Deformacija koja ostaje naziva se plastična deformacija. Plastična deformacija obično odgovara odstupanju od linearnog pravca. (Za neke materijale, elastična deformacija može biti nelinearna, pa stoga ova pojava nije uvijek prisutna). Nakon što je počela plastična deformacija, ukupna deformacija sastoji se od elastičnog i plastičnog dijela. To se može izraziti kao:

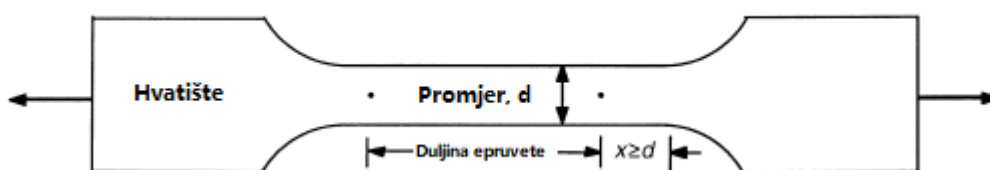
$$\varepsilon_T = \varepsilon_e + \varepsilon_p \quad (5)$$

gdje je ε_p plastični dio deformacije, a ε_e elastični dio. Primamljivo je definirati granicu elastičnosti kao naprezanje pri kojem prvi put dolazi do plastične deformacije i proporcionalnu granicu kao naprezanje pri kojem krivulja naprezanja i deformacije prvi put odstupa od linearne. Međutim, niti jedna definicija nije vrlo korisna, jer mjerenje naprezanja pri kojem prvi put dolazi do plastične deformacije ili prvog odstupanja od Hookeovog pravca ovisi o tome koliko se točno može mjeriti deformacija. Što su manje plastične deformacije koje se mogu osjetiti i što su manja odstupanja od linearnog dijela koja se mogu detektirati, to su manje granice elastičnosti i proporcionalnosti. Kako bismo izbjegli ovaj problem, početak plastičnosti obično se opisuje pomoću konvencionalne granice razvlačenja. Može se naći konstruiranjem pravca paralelnog s Hookeovim pravcem, ali pomaknutim za $\varepsilon = 0,002$ ili 0,2%. Konvencionalna granica razvlačenja je naprezanje pri kojem taj pravac presijeca krivulju naprezanja i deformacije. Razlog je taj da ako bi materijal bio opterećen na ovo naprezanje, a zatim rasterećen, put vraćanja bio bi duž ovog pomaknutog pravca i rezultirao bi plastičnom deformacijom od $\varepsilon = 0,2\%$. Prednost definiranja konvencionalne granice razvlačenja na ovaj način je što je takav

parametar lako reproducirati i ne ovisi previše o osjetljivosti mjerenja. Ponekad, iz praktičnosti, istezanje u metalima se definira naprezanjem potrebnim za postizanje određenog ukupnog pomaka (npr. $\varepsilon_T = 0.005$ ili 0.5% izduženja). Nastavak vlačnog opterećenja uzorka događa se širenje deformiranog područja duž mjernog dijela umjesto povećanja deformacije unutar deformiranog područja. Vlačna čvrstoća definirana je kao najviša vrijednost inženjerskog naprezanja. Do maksimalnog opterećenja, deformacija bi trebala biti uniformna duž mjernog dijela. Kod duktilnih materijala deformacija se počinje lokalizirati, formirajući vrat. Manje duktilni materijali lome se prije nego što se pojavi vrat. U ovom slučaju, lomna žilavost je vlačna čvrstoća. Doista, vrlo krhki materijali (npr. staklo na sobnoj temperaturi) ne teku prije loma. Takvi materijali imaju dobru vlačnu čvrstoću, ali ne i granicu tečenja [11].

3.3. Ispitni uzorci

Tipičan ispitni uzorak za vlačno ispitivanje prikazan je na slici 9. Ima proširene krajeve ili ramena za prihvat. Važan dio uzorka je tijelo ispitnog uzorka. Poprečni presjek tijela ispitnog uzorka sužen je u odnosu na ostatak uzorka kako bi se deformacija i lom lokalizirali u ovom području. Duljina mjernog segmenta je područje na kojem se vrše mjerenja i centrirano je unutar sužene sekcije



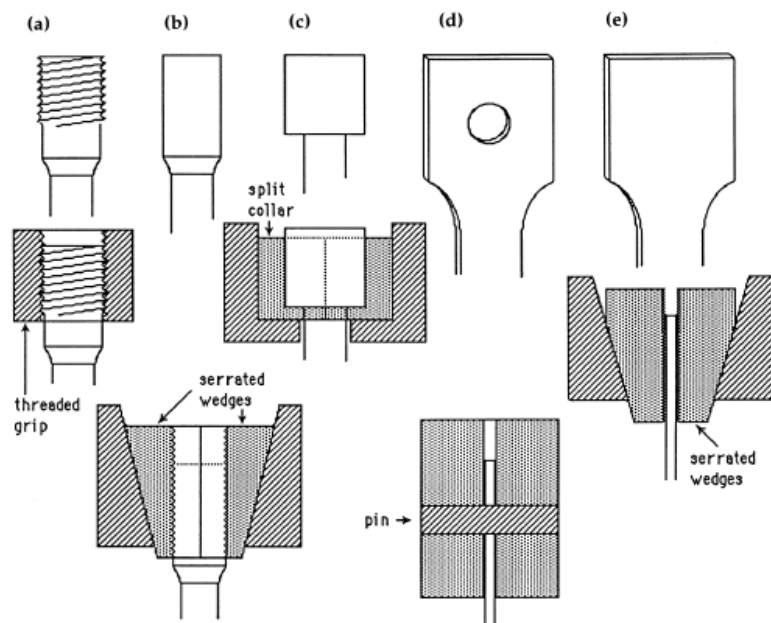
Slika 9. Ispitni uzorak za statičko vlačno ispitivanje [11]

Razmaci između krajeva mjernog segmenta i ramena trebali bi biti dovoljno veliki kako veći krajevi nebi ograničavali deformaciju unutar mjernog segmenta, a duljina mjernog segmenta trebala bi biti veća u odnosu na njen promjer. Mjerno područje uzorka gdje se vrše mjerenja pomaka ima uniformni presjek koji je manji od ramena, te je duže u odnosu na svoj promjer ili dubinu (obično četiri puta od promjera). Dužina mjernog područja između mjernog dijela i

ramena trebala bi biti najmanje jednaka promjeru ili debljini uzorka. Oblik i dimenzije uzoraka za ispitivanje mogu biti ograničeni oblikom i dimenzijama metalnog proizvoda iz kojeg se uzorci uzimaju. Uzorak se obično dobiva obradom uzorka iz proizvoda ili lijevanjem. Međutim, proizvodi jednolikog poprečnog presjeka (profil, šipke, žice itd.) i lijevani uzorci (tj. lijevano željezo i legure neželjeznih metala) mogu se ispitivati i bez obrade. Poprečni presjek uzoraka može biti kružni, četverokutni, pravokutni, kružni prstenasti ili, u posebnim slučajevima, neki drugi jednoliki poprečni presjek. Preferirani uzorci imaju izravnu vezu između izvorne duljine kalupa, L_0 , i izvorne poprečne površine, S_0 , izražene formulom:

$$L_0 = k * S_0 \quad (6)$$

gdje je k koeficijent proporcionalnosti, i nazivaju se proporcionalni uzorci. Međunarodno prihvaćena vrijednost za k je 5,65. Izvorna duljina kalupa ne smije biti manja od 15 mm. Kada je poprečni presjek uzorka premali za ispunjavanje ovog zahtjeva s $k = 5,65$, može se koristiti veća vrijednost k (po mogućnosti 11,3) ili neproporcionalni uzorak. Za neproporcionalne uzorke, izvorna duljina kalupa, L_0 , neovisna je o izvornom poprečnom presjeku, S_0 . Detaljan opis standardnih testnih uzoraka daje Američko društvo za ispitivanje i materijale prema standardu ASTM E8 ili drugi standardizacijske organizacije, poput Međunarodne organizacije za standardizaciju (ISO), Njemačkog instituta za normizaciju (DIN) i Japanskih industrijskih standarda (JIS). Postoje različiti načini hvatanja uzorka, neki od kojih su ilustrirani na slici 10. Kraj epruvete može biti oblikovan u navojni prihvat, može biti zakovan, mogu se koristiti i spojeni krajevi, ili se gornji dio hvata može držati između klinova [6].



Slika 10. Načini prihvata ispitnih uzoraka [11]

Najvažniji kriterij prilikom odabira metode prihvata ispitnih uzoraka je osigurati da se uzorak može držati pri maksimalnom opterećenju bez klizanja u dijelu hvata, a savijanje treba biti svedeno na minimum.

3.4. Kidalice

Najčešći uređaji koji se koriste za ovu vrstu ispitivanja nazivaju se kidalice. Kidalice ispituju materijale na razvlačenje, tlačjenje ili savijanje. Okvir kidalice trebao bi osigurati radni prostor kako bi se mogao smjestiti uzorak, ekstenzometar i drugi pribori. Ključna karakteristika okvira kidalice je krutost. Općenito, potrebno je razmotriti aksijalnu, lateralnu i torzijsku krutost. U većini rutinskih ispitivanja na istezanje, aksijalna krutost je najvažniji parametar. Visoka vrijednost krutosti okvira minimizira deformacije okvira i time elastičnu energiju pohranjenu u okviru tijekom ispitivanja. Deformacije okvira te prekomjerna elastična energija pohranjena u okviru smanjuju točnost mjerenja i utječu na rezultate ispitivanja. Kidalice mogu biti elektromehaničke, servohidraulične ili pokretane s električnim aktuatorom. Glavna razlika je u načinu primjene opterećenja. Elektromehaničke kidalice temelje se na elektromotoru promjenjive brzine; sustavu redukcije brzine; te jednom, dva ili četiri vretena koja pomiču

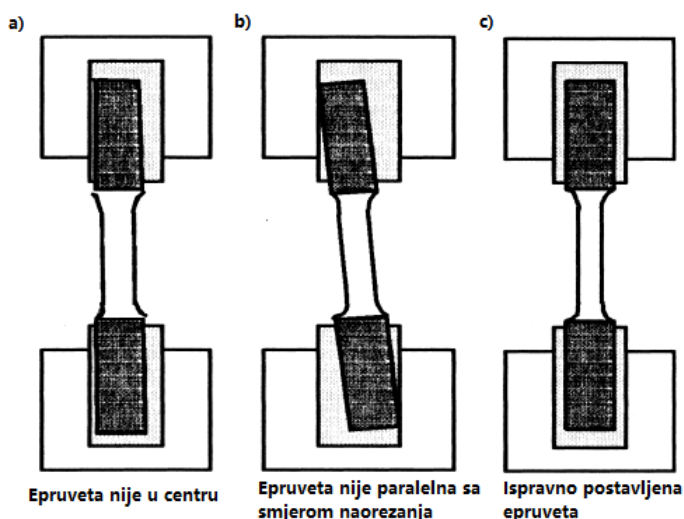
nosivu konstrukciju prihvatnih naprava u željenom smjeru te se na taj način osigurava odgovarajuće tlačno ili vlačno opterećenje. Ovaj pokret opterećuje uzorak rastezanjem ili tlačenjem. Brzine pomicanja traverze mogu se mijenjati mijenjanjem brzine motora. Mikroprocesorski zatvoreni servo sustav može se implementirati za precizno upravljanje brzinom prečke. Koriste se za statička i kvazi-statička ispitivanja. Ovi uređaji dostupni su u kapacitetima sile od manje od 5 kN do više od 600 kN, a brzinski rasponi od 11 mm min⁻¹ do 2000 mm/min mogu biti osigurani. Hidraulične kidalice temelje se na jednostrukom ili dvostrukom klip koji pomiče prečku gore ili dolje. Međutim, većina statičkih hidrauličnih kidalica ima jednostruki klip ili bat. U ručno upravljanim uređajima, operater podešava otvor tlačno kompenziranog igličastog ventila kako bi kontrolirao brzinu opterećenja. Povratne informacije od linearnog senzora položaja (često linearnog varijabilnog diferencijalnog transformatora - LVDT) montiranog u aktuatoru koriste se za postizanje kontrole položaja. Također su dostupne operacije upravljanja opterećenjem i deformacijom. Servohidraulične kidalice sposobne su za rad u širokom frekvencijskom rasponu (od DC do 500 Hz) i stoga zadovoljavaju zahtjeve vrlo širokog raspona primjena. Ti uređaji dostupni su za pokrivanje kapaciteta sile od manje od 10 kN do više od 1 MN. Općenito, elektromehaničke kidalice sposobne su za širi raspon brzina ispitivanja i veće pomake traverze, dok su hidraulični uređaji ekonomičniji za generiranje većih sila. Kidalica s elektro aktuatorom ima sličnu mehaničku strukturu kao servohidraulična: međutim, hidraulički aktuator zamijenjen je jednim valjkom s kugličnim ležajevima koji se pokreće iz servomotora putem redukcijuskog prijenosa. Kao i kod servohidraulične kidalice, kontrola položaja osigurana je putem linearnog senzora položaja. Također su osigurane kontrola opterećenja i deformacije. Uređaji s električnim aktuatorom imaju tipičnu maksimalnu radnu frekvenciju od 1 Hz i sposobni su raditi vrlo sporo (1 μm/h u kontroli deformacije). Dobro su prilagođeni ispitivanju puzanja i umora gdje su potrebni dugi periodi držanja [13].

3.5. Ekstenziometri i mjerne trake

Istezanje uzorka tijekom opterećenja može se mjeriti na nekoliko načina, ovisno o veličini uzorka, uvjetima okoline i zahtjevima mjerenja za točnost i preciznost očekivanih razina napreznja. Jednostavan način je koristiti brzinu prečke prateći opterećenje kao funkciju vremena. Za skup podataka opterećenja i vremena, napreznje u uzorku i količina deformacije mogu se izračunati. Kada se pretpostavi da je pomak kidalice jednak pomaku uzorka, greška nastaje činjenicom da je cijeli okvir kidalice deformiran pod stanjem napreznja. Taj učinak povezan je s konceptom krutosti stroja, kako je već raspravljeno. Rastezanje uzorka tijekom primjene opterećenja može se izravno mjeriti različitim vrstama uređaja, poput priključnih ekstenzometara, izravno montiranih mjernih traka i različitih optičkih uređaja. Ti se uređaji učestalo koriste i mogu pružiti visoku razinu točnosti u mjerenju deformacija. Druge naprednije instrumentacije, poput laserske interferometrije i video ekstenzometara, također su dostupne. Odabir uređaja za mjerenje deformacija ovisi o različitim čimbenicima; raspon upotrebljivosti i točnost mjernog uređaja, tehnike montaže mjernog uređaja, veličina uzorka, okolišni uvjeti ispitivanja i analiza za obradu signala. Posljednja stavka trebala bi uključivati umjeravanje uređaja za mjerenje deformacija tijekom cijelog njegovog radnog raspona, kao i kompenzaciju temperature kada je potrebno. Većina ćelija dizajnirana za upotrebu u kidalicama za ispitivanje materijala koristi senzore sile kako bi pretvorile deformacije elastičnih elemenata u električne signale. Mjerne ćelije dostupne su za upotrebu u statičkom ili kvazi-statičkom ispitivanju te za dinamički rad. Puni kapacitet opterećenja kreće se od manje od 10 N do preko 5 MN. Općenito, moderni dizajni ekstenzometara zajedno s njihovim sustavima za umjeravanje i mjerenje sposobni su lako zadovoljiti zahtjeve različitih međunarodnih standarda. Nadalje, sposobnost preciznog mjerenja sile unutar $\pm 0.5\%$ očitavanja može se zadržati do malog dijela ispitnog uzorka (npr. 1/250). Ova velika prednost može značajno smanjiti potrebu za zamjenom ćelija kako bi odgovarale zahtjevima pojedinačnih ispitivanja. Osim preciznosti, važni su i drugi parametri mjerne ćelije. Ćelija bi trebala biti neosjetljiva na vanjske sile i momente. Budući da je mjerna ćelija u kidalici dio niza opterećenja, trebala bi imati visoku aksijalnu i lateralnu krutost, a metoda pričvršćivanja ne bi trebala nepovoljno utjecati na poravnanje niza opterećenja. Na kraju, temperaturni koeficijenti širenja trebali bi biti vrlo niski kako bi osigurali stabilno ponašanje u promjenjivim okolnostima ispitivanja [11].

3.6. Mjerna nesigurnost

Mjerna nesigurnost je sumnja u rezultat mjerenja. To je kvantitativna procjena razine nesigurnosti povezane s mjerenjem određene veličine ili svojstva. Mjerna nesigurnost važna je za donošenje pouzdanih odluka temeljenih na rezultatima mjerenja, jer omogućuje procjenu granica pouzdanosti dobivenih podataka. Ovdje, ispitni uzorci moraju biti što je moguće sličniji kako bi se razlike u rezultatima ispitivanja, koliko je to moguće, odrazile samo na varijabilnosti u procesu ispitivanja. Iz materijala kojeg želimo ispitati se izrađuju višestruki ispitni uzorci koji moraju biti pripremljeni sukladno normi HRN EN ISO 6892-1:2019. Evo nekoliko pravila koja se preporučuju kod ispitivanja; prvo, kako se svaki ispitni uzorak izrađuje, treba ju identificirati s opisom materijala, izvorom, lokacijom i orijentacijom u odnosu na ostatak materijala, statusom obrade u trenutku uzimanja uzorka i datumom i vremenom kada je uzorak dobiven. Drugo, epruvete se moraju pažljivo izrađivati, s pažnjom na nekoliko detalja. Os epruvete mora biti pravilno usklađena s pravcem valjanja materijala, uzorkom zrna kovanja ili složenim slojem. Hladno oblikovanje ispitnog dijela epruvete mora se minimizirati. Dimenzije epruvete moraju biti unutar dopuštenih tolerancija utvrđenih postupkom ispitivanja. Područja prihvata na svakom kraju epruvete moraju biti paralelna s osi tijela ispitnog uzorka, također trebaju biti u sredini prihvatnog mehanizma kao što je slučaj pod c na slici 11. Slučaj pod a nije dobar jer tijelo ispitnog uzorka nije u sredini prihvatnog mehanizma, dok slučaj pod b također nije ispravan jer prihvatni mehanizam nije paralelan s osi tijela ispitnog uzorka [11].



Slika 11. Pravilno postavljanje epruvete [11]

Svaki ispitni uzorak mora odgovarati originalnom uzorku. Postavljanje ispitivanja zahtijeva da se oprema pravilno uskladi s ispitivanjem koji se provodi. Tijekom postavljanja ispitivanja treba paziti na nekoliko potencijalnih problema, uključujući nepravilno poravnanje uzorka ili istrošen prihvatni mehanizam. Poravnanje dviju točaka hvatišta uzorka važno je jer bilo kakvo opterećenje izvan središta uzrokovat će savijanje uzorka. To je ključno prilikom ispitivanja lomljivih materijala, a može izazvati probleme čak i kod duktilnih materijala. Postavljanje u aksijalnost će biti određeno okvirom kidalice, prihvatnim mehanizmom koji se koristi te samim uzorkom. Neusklađenost također može izazvati pogreške u mjerenju opterećenja zbog pojavljivanja savojnih sila u kidalici. Takve se pogreške mogu smanjiti korištenjem sfernih sjedala ili "U spojeva" u postavljanju. Istrošen prihvatni mehanizam može doprinijeti odstupanju od aksijalnosti. Neujednačeni otisci duž širine glave uzorka pokazatelj su problema s klipnim prihvatnim mehanizmom. Prihvatni mehanizam s razdvojenim hvataljkama također može uzrokovati neaksijalno opterećenje. Neujednačeno trošenje prihvatnog mehanizma i pogrešno postavljanje ispitnog uzorka u kidalicu potencijalna su problematična područja. Za mnoga ispitivanja potrebna su mjerenja deformacije. Uobičajeno se mjere ekstenzometrima, ali se često koriste i naponske mjerne trake, pogotovo na malim uzorcima ili gdje se želi mjeriti Poissonov omjer. Ako su potrebna mjerenja deformacije, odgovarajući instrumenti za mjerenje deformacije moraju biti pravilno instalirani. Posebnu pažnju treba posvetiti nuliranju ekstenzometra (mehaničke nule). Nulta očitavanja deformacije trebala bi se dosljedno ponavljati ako je mehanička nula pravilno postavljena. Drugim riječima, nakon što je ekstenzometar instaliran i postavljen na nulu, naknadne instalacije trebale bi zahtijevati minimalno ponovno podešavanje nule. Sljedeća opća pravila za postupak ispitivanja mogu se primijeniti na gotovo svako statičko vlačno ispitivanje. Mjerna područja senzora sile i ekstenzometra moraju biti tako odbrana da su mjerni rezultati unutar njihovih granica. Rasponi se mogu odabrati na temelju prethodnog iskustva za određeno ispitivanje ili podataka o specifikacijama materijala. Mnogi računalno bazirani ispitni sustavi imaju automatski odabir raspona i zapisivat će podatke čak i ako je početno odabrani raspon premalen. Identitet svakog uzorka trebao bi biti provjeren, a bitne identifikacije trebaju biti točno zabilježene za zapisnike i izvještaje o ispitivanju. Dimenzije potrebne za izračun poprečnog presjeka suženog dijela trebale bi biti izmjerene i zabilježene. Ove se mjere trebaju ponavljati za svaki uzorak; ne bi se trebalo pretpostavljati da je priprema uzorka savršeno konzistentna. Nula na indikatoru opterećenja i nula na osi opterećenja na grafikonu trebaju biti postavljene prije nego što se uzorak postavi u prihvatni

mehanizam. Nule se nikada ne bi trebale ponovno postavljati nakon što je uzorak na svom mjestu. Uzorak se stavlja u stezaljke i osigurava se zatvaranjem stezaljki. Ako se prednaprezanje mora ukloniti prije početka ispitivanja, trebalo bi ga fizički otpustiti pomicanjem mehanizma za opterećenje. U nekim slučajevima prednaprezanje može biti poželjno i može se namjerno uvesti. Za materijale za koje je početni dio krivulje linearan, početna deformacija može se postaviti za prednaprezanje produživanjem početnog ravnog dijela krivulje naprezanje-istezanje do nultog opterećenja i mjerenjem deformacije od te točke. Važno je da se ispitivanje provodi odgovarajućom brzinom ispitivanja. Neki materijali su osjetljivi na brzinu ispitivanja, a različite brzine dat će različite rezultate. Također, mnogi instrumenti za mjerenje opterećenja i deformacije ispitnih uređaja nisu sposobni reagirati dovoljno brzo za točno bilježenje rezultata ispitivanja ako se koristi prevelika brzina ispitivanja. Tehničar bi trebao pažljivo nadgledati ispitivanje i biti svjestan mogućih problema. Jedan uobičajeni znak problema je dijagram opterećenja naspram deformacije u kojem početni dio krivulje nije ravan. To može ukazivati na opterećenje uzorka koje nije aksijalno, nepravilnu instalaciju ekstenzometra ili činjenicu da uzorak nije bio ravan u početku. Još jedan potencijalni znak problema je oštar pad očitnog opterećenja tijekom ispitivanja. Takav pad može biti karakterističan za materijal, ali također može ukazivati na probleme poput klizanja između uzorka i prihvatnog mehanizma ili klizanje može biti uzrokovano istrošenim umetcima s tupim zubima, posebno kod tvrdih, glatkih uzoraka. Uzorci izrezani iz cijevi mogu imati zakrivljene krajnje dijelove koji se spljošte s povećanjem sile, što omogućava umetcima relativno kretanje u odnosu na tijelo prihvatnog mehanizma. Kratki krajnji dijelovi na okruglim uzorcima također se mogu zgnječiti od strane stezaljki na kidalici, s istim rezultatom. Ako se površine za klizanje ne podmazuju, mogu se pomicati u nepredvidivim koracima praćenim padovima očitavanja opterećenja. Kada se koriste klinaste hvataljke, uzorak se mora instalirati tako da je sila stezanja sadržana unutar tijela prihvatnog mehanizma. Postavljanje uzorka previše blizu otvorenog kraja tijela prihvatnog mehanizma rezultira pretjeranim naprežanjem na tijelu istog, te umetcima i čest je uzrok kvara hvataljki. Podaci se općenito mogu grupirati u "sirove podatke", što predstavlja isključivo očitavanja a mjerne opreme, i "izračunate podatke", što predstavlja rezultate ispitivanja dobivene nakon prvog koraka analize. U najjednostavnijem ispitivanju statičkog vlačnog ispitivanja, sirovi podaci obuhvaćaju jedno mjerenje maksimalne sile i mjerenja dimenzija koja se koriste za određivanje poprečnog presjeka ispitnog uzorka. Prvi korak analize

je izračun "vlačne čvrstoće", definirane kao sila po jediničnoj površini potrebna za lom uzorka. Složenija ispitivanja zahtijevat će više informacija, koje obično dolaze u obliku grafa sile naspram produljenja. Računalni ispitni uređaji mogu prikazati graf u digitalnom obliku, te sačuvati mjerenja povezana s grafom. Trajni zapis sirovih ispitnih podataka važan je jer omogućuje dodatne analize ako je to potrebno, i jer omogućuje pronalaženje i ispravljanje pogrešaka u analizi putem referiranja na originalne podatke. Zapisi o ispitivanju mogu biti potrebni mnogim odjelima unutar organizacije, uključujući odjele za metalurgiju, inženjerstvo, komercijalne i pravne odjele. Odjeli za inženjerstvo i metalurgiju obično su najviše zainteresirani za poznavanje svojstava materijala, ali mogu koristiti i sirove podatke za provjeru pogrešaka ili dodatne analize. Odjel za metalurgiju želi znati kako varijacije u sirovinama ili obradi mijenjaju svojstva proizvoda koji se proizvodi i ispituje, a odjel za inženjerstvo želi znati svojstva materijala u svrhe dizajna.

3.7. Analiza podataka

Analiza ispitnih podataka provodi se na nekoliko razina. Prvo, tehničar promatra ispitivanje u tijeku i može primijetiti da ispitni uzorak klizi ili da uzorak puca izvan suženog dijela. Te se opservacije mogu smatrati dovoljnim za proglašavanje ispitivanja nevažeće. Neposredno nakon ispitivanja provodi se analiza prvog nivoa prema zahtjevima izračuna postupka ispitivanja. ASTM ispitne specifikacije obično prikazuju potrebne jednadžbe s objašnjenjem i možda primjerom. Ova analiza može biti jednostavna poput dijeljenja maksimalne sile s poprečnim presjekom ili može zahtijevati složenije izračune. Rezultati ove prve razine analize su mehanička svojstva materijala koji se ispituje. Nakon završetka ispitivanja provedenih na uzorku, može se provesti statistička analiza. Statistička analiza daje prosječne vrijednosti za reprezentaciju uzorka u sljedećoj bazi podataka te pruža informacije o homogenosti materijala i ponovljivosti ispitivanja. Rezultati ispitivanja na svakom uzorku materijala mogu se pohraniti u bazu podataka za buduću upotrebu. Baza podataka omogućuje širok raspon analiza korištenjem statističkih metoda za povezivanje podataka o mehaničkim svojstvima s drugim informacijama o materijalu. Na primjer, omogućuje određivanje postoji li značajna razlika između ispitanog materijala i sličnog materijala dobivenog od drugog dobavljača ili putem drugog proizvodnog puta. Nadalje, Izvješće o testiranju obično sadrži rezultate testova

provedenih na jednom uzorku koji se sastoji od nekoliko ispitnih tijela. Često se koriste ASTM specifikacije za ispitivanja u kojima su opisani zahtjevi za izvještavanje. Potrebe određenog korisnika vjerojatno će odrediti oblik za identifikaciju materijala, ali prijavljeni rezultati vjerojatno će biti oni navedeni u ASTM ispitnoj specifikaciji. Informacije sadržane u izvještaju o ispitivanju obično bi trebale uključivati identifikaciju opreme za ispitivanje, ispitnog materijala i postupka ispitivanja; sirove i izračunate podatke za svaki uzorak; te kratak statistički sažetak za uzorak. Svaki dio ispitne opreme korištene za ispitivanje trebao bi biti identificiran, uključujući serijske brojeve, kapacitet ili raspon korišten, te datum certifikacije ili datum isteka certifikata. Identifikacija ispitnog materijala trebala bi uključivati vrstu materijala (legura, broj dijela, itd.); specifičnu seriju, grupu i narudžbu s koje je uzorak uzet, točku u obradnom slijedu (stanje, temperatura, itd.) u kojoj je uzorak uzet; i bilo koje uvjete ispitivanja ili predispitivanja (temperatura ispitivanja, starenje, itd.). Identifikacija postupka ispitivanja obično će se prijaviti referenciranjem na standardni postupak ispitivanja poput onih objavljenih od strane ASTM-a ili možda na patentiranu specifikaciju koja potječe iz organizacije za ispitivanje. Sirovi podaci se zapisuju za svaki uzorak ili se uključuje referenca na sirove podatke tako da se podaci mogu dobiti iz datoteke kada su potrebni. Često se zapisuje samo dio sirovih podataka. Na primjer, dimenzije, te se referencira informacija na grafu sile naspram produljenja. Tablica izračunatih svojstava za svaki uzorak također se zapisuje. Izračuni u ovom trenutku prva su razina analize podataka. Obično su potrebni izračuni definirani u postupku ispitivanja [16].

4. MODUL ELASTIČNOSTI

4.1. Općenito o modulu elastičnosti

Modul elastičnosti je mjera krutosti materijala. To je otpor deformaciji koji materijal pruža za određeno opterećenje unutar elastičnog područja. Kvantitativno, modul elastičnosti, E , izražen je kao omjer naprezanja prema elastičnoj deformaciji. Što je veći modul, manja je elastična deformacija za određenu razinu naprezanja, i stoga je materijal krući. Zahvaljujući ovoj važnoj karakteristici, modul elastičnosti je kriterij konstruiranja za komponente koje su izložene mehaničkim opterećenjima gdje se deformacija ograničava unutar elastičnog područja. Što je niži modul elastičnosti, materijal je fleksibilniji. Određeni materijali poput čelika prate Hookov zakon kroz cijelo elastično područje, dok drugi materijali poput nekih neželjeznih materijala, betona, lijevanih željeza, itd., nemaju linearan odnos u elastičnom području. Modul elastičnosti, pri određenoj temperaturi i tlaku, funkcija je dviju stvari: međuatomskih sila koje pak variraju s vrstom veze koja se nalazi u određenom materijalu, te rasporeda atoma u odnosu na druge. [14]

4.2. Metode promijene iznosa modula elastičnosti

Za svaki čisti metal ili metalnu leguru u ravnoteži sastav i kristalna struktura su konstantni, pa tako i modul elastičnosti. Može se donekle promijeniti značajnim mijenjanjem ili sastava materijala ili njegove kristalne strukture. Sastav metala može se promijeniti legiranjem s nekim drugim elementom koji je taljiv u njemu. Uvođenje stranih atoma u dani metal promijenit će reverzibilnu silu koju proizvodi dana deformacija i time utjecati na modul elastičnosti. Općenito, relativno velik dodatak legure potreban je kako bi se postigla čak i relativno mala promjena u elastičnom modulu. Među metalnim materijalima, čelik je najčešće korištena legura. Inženjerski čelici obično sadrže nekoliko postotaka legiranih elemenata i stoga je elastični modul za takve čelike rijetko povećan. Slično je i s komercijalnim mjedima u kojima sadržaj cinka varira od gotovo nule do otprilike 40%, ali poboljšanje elastičnog modula nije značajno. Zapravo, drastično povećanje sadržaja cinka u legurama može čak smanjiti elastični modul za 5-6%. Stoga se općenito ideja dodavanja legura metalu kako bi se poboljšao modul

elastičnosti, rijetko koristi. Poput legiranja, hladna deformacija duktilnog metala još je jedan način za minimalno poboljšanje modula elastičnosti. Modul elastičnosti također se može promijeniti donekle mijenjanjem kristalne strukture putem toplinske obrade. Na primjer, kod čelika, ravnotežna struktura ferita i karbida može se promijeniti u metastabilni martenzit postupkom otvrdnjavanja. Međutim, u ovom slučaju, isti atomi prisutni su u istom omjeru nakon toplinske obrade kao i prije, osim drastične promjene u njihovom rasporedu. Takva promjena u atomskom rasporedu rezultira samo malom promjenom razmaka atoma u odnosu na druge. Promjena u elastičnom modulu kao rezultat martenzitne transformacije tako je mala da nema inženjerskog značaja. Stoga se ovaj način mijenjanja elastičnog modula općenito ignorira. Modul elastičnosti stoga je neovisan o vrsti obrade materijala. Ipak, postupci poput hladnog oblikovanja i toplinske obrade dani su određenim komponentama poput čeličnih opruga s idejom da se poboljša njihova krutost. Navedeni postupci radije poboljšavaju elastični limit čelika tako da čelične opruge mogu nositi više opterećenja bez trajne deformacije. Međutim, modul elastičnosti s porastom temperature opada što pak utječe na kohezijsku čvrstoću materijala. Modul elastičnosti važan je prilikom odabira materijala za primjene poput opruga i prilikom dizajniranja konstrukcija. U slučaju opruga, što je niža vrijednost modula elastičnosti, veće je savijanje za dano opterećenje. Čelična opruga savija se dvostruko više od volframove opruge istih dimenzija pod istim opterećenjem. U odljevcima, što su veći ostaci naprezanja, veći će biti modul elastičnosti. Krutost materijala koji ne slijedi Hookov zakon očito nije konstantna, već varira s naprežanjem. U takvim slučajevima, krutost se daje kao prosječna vrijednost temeljena na nagibu pravaca povučениh kroz određene točke na krivulji naprezanja i deformacije, poznatiji kao tangencijalni modul i sekantni modul [16].

4.3. Postupci za određivanje Youngovog modula

Postoje različiti postupci za određivanje Youngovog modula, a najučestaliji su ukratko opisane u nastavku teksta. Prva i najvažnija metoda je statičko vlačno ispitivanje. Ova metoda uključuje primjenu poznate sile na uzorak materijala, obično u obliku epruvete, te mjerenje resultantne deformacije koja se javlja pod utjecajem te sile. U procesu ispitivanja, uzorak se postavlja u kraljicu koja omogućuje primjenu sile na određenom mjestu. Zatim se primjenjuje opterećenje na uzorak, često primjenjujući ravnomjernu distribuciju sile duž duljine epruvete. Tokom primjene sile, mjere se deformacije koje se događaju na uzorku. To uključuje mjerenje produljenja ili deformacije na bilo koji drugi način koji odgovara obliku uzorka i uvjetima ispitivanja. Na temelju prikupljenih podataka o primijenjenoj sili i resultantnoj deformaciji, Youngov modul se može izračunati koristeći relevantne formule. Ova metoda omogućuje dobivanje informacija o krutosti i elastičnosti materijala, što je ključno za razumijevanje njegove sposobnosti da podnese opterećenja i deformacije u različitim inženjerskim aplikacijama [17].

Metoda ultrazvuka je tehnika koja se koristi za određivanje elastičnih svojstava materijala, posebno metala. Ova metoda se temelji na primjeni ultrazvučnih valova na materijalu i analizi povratnog odraza tih valova. Kada se ultrazvučni valovi susretnu s granicom između različitih slojeva ili struktura unutar materijala ili kada naiđu na defekt poput pukotine ili nepravilnosti, dio valova se reflektira nazad prema izvoru. Analizom vremena potrebnog za povratni odraz i promjenom amplitude valova, moguće je dobiti informacije o unutarnjoj strukturi materijala, kao i o njegovim elastičnim svojstvima. Ova metoda omogućuje određivanje brzine širenja zvuka u materijalu, što je povezano s njegovim Youngovim modulom i drugim mehaničkim karakteristikama. Prednosti metode ultrazvuka uključuju visoku osjetljivost na male promjene u strukturi materijala, mogućnost neprekidnog nadzora materijala tijekom procesa proizvodnje i relativno brze rezultate. Međutim, primjena ove metode može biti ograničena na određene vrste materijala i zahtijeva posebnu opremu i obuku za rad s ultrazvučnom opremom. Unatoč tome, metoda ultrazvuka je važan alat u istraživanju materijala i industrijskoj praksi za procjenu elastičnih svojstava materijala i otkrivanje defekata. Procjena modula elastičnosti ovom metodom ima dosta veliko rasipanje rezultata te povećanu mjernu nesigurnost. [18].

Metoda instrumentirane nanoindentacije predstavlja sofisticiranu tehniku koja se koristi za određivanje elastičnih svojstava materijala na nano razini. Ova tehnika uključuje upotrebu

uređaja nazvanog instrumentirani indentacijski tvrdomjer koji može precizno primjenjivati mikroskopska opterećenja na površinu materijala i istovremeno mjeriti rezultatne deformacije. Tijekom ovog postupka, mjere se sila koja se primjenjuje na uzorak i dubina penetracije vrha indentatora u materijal. Analizom rezultata, uključujući odnos primijenjene sile i dubine penetracije, moguće je izračunati različite mehaničke parametre materijala, uključujući Youngov modul.[19] Ova metoda omogućuje precizno određivanje elastičnih svojstava materijala na mikroskopskoj razini, što je posebno važno u područjima kao što su nanotehnologija, materijali visoke čvrstoće i biomedicinska istraživanja. Prednosti metode nanoindentacije uključuju visoku preciznost, sposobnost mjerenja elastičnih svojstava materijala na malim prostorima i mogućnost istraživanja materijala na nano razini. Međutim, ova metoda zahtijeva posebnu opremu i stručno znanje za provođenje i analizu rezultata. Unatoč tome, nanoindentacija je postala ključna tehnika u istraživanju materijala i razvoju naprednih materijala s precizno definiranim mehaničkim svojstvima [20].

Metoda rezonancije predstavlja jednu od tehnika koja se koristi za precizno određivanje elastičnih svojstava tankih filmova i premaza. Ova tehnika temelji se na principu promjene frekvencije oscilacija sustava kada je izložen različitim opterećenjima. Postupak metode rezonancije uključuje postavljanje tankog filma ili premaza na posebnu podlogu ili nosač. Zatim se sustav, koji uključuje film ili premaz, postavlja u rezonanciju, što znači da se stvara oscilacija ili vibracija pri određenoj frekvenciji. Kada se sustav stavi u rezonanciju, mjere se promjene u frekvenciji oscilacija ili vibracija koje se događaju kada se na film ili premaz primjenjuje opterećenje ili naprezanje. Na temelju tih promjena u frekvenciji, moguće je izračunati elastična svojstva materijala, uključujući Youngov modul. Jedna od glavnih prednosti metode rezonancije je njena visoka osjetljivost na male promjene u elastičnim svojstvima materijala. Također, ova tehnika omogućuje mjerenje elastičnih svojstava tankih filmova i premaza bez potrebe za uništavanjem uzorka, što je čini korisnom u istraživanju materijala i razvoju tankih slojeva za različite primjene. Ipak, važno je napomenuti da metoda rezonancije zahtijeva određenu razinu stručnosti i sofisticiranu opremu za provedbu mjerenja i analizu rezultata. Unatoč tome, ova tehnika ostaje važan alat u istraživanju i karakterizaciji materijala, posebno u područjima nanoznanosti, površinskih premaza i mikroelektronike.

Metoda simulacije predstavlja moćan alat za određivanje mehaničkih karakteristika materijala, uključujući Youngov modul, putem računalnih simulacija. Ova tehnika koristi sofisticirane matematičke modele kako bi se simuliralo ponašanje materijala pod različitim

uvjetima opterećenja. Jedan od najčešćih pristupa u ovoj metodi je korištenje metoda konačnih elemenata (MKE). MKE se temelji na diskretizaciji materijala na manje elemente, čime se omogućuje rješavanje kompleksnih mehaničkih problema numeričkim putem. Korištenjem MKE, mogu se modelirati različiti oblici opterećenja, uključujući tlačne, vlačne, savijanje i skrućivanje, te se analizirati njihov utjecaj na mehanička svojstva materijala. Računalne simulacije omogućuju analizu ponašanja materijala u različitim uvjetima, što omogućuje predviđanje mehaničkih karakteristika materijala pri različitim opterećenjima. Također, ova metoda omogućuje istraživanje utjecaja različitih parametara, poput mikrostrukture, temperature, brzine opterećenja i drugih, na mehanička svojstva materijala. Prednost korištenja metode simulacije je u tome što omogućuje brzo i relativno jeftino procjenjivanje mehaničkih svojstava materijala bez potrebe za fizičkim eksperimentima. Osim toga, računalne simulacije pružaju detaljan uvid u unutarnje procese i mehanizme koji utječu na mehaničko ponašanje materijala, što olakšava dizajn i optimizaciju materijala za različite primjene. Ipak, važno je napomenuti da uspješna primjena metode simulacije zahtijeva kvalitetne materijalne modele i provjerene numeričke tehnike, kao i razumijevanje fizičkih procesa koji se događaju unutar materijala. Posebno treba naglasiti da je ova metoda samo procjena vrijednosti pojedinih veličina pa tako i modula elastičnosti.

4.4. Modeli procijene mjerne nesigurnosti

Pri procjeni mjernih nesigurnosti kod određivanja modula elastičnosti, koriste se različiti modeli koji uzimaju u obzir različite faktore i varijable. Neke od uobičajenih metoda za procjenu mjernih nesigurnosti u određivanju modula elastičnosti objašnjene su niže u tekstu.

Modeli standardne devijacije koriste se za procjenu nesigurnosti mjerenja analizirajući varijance pojedinih mjerenja kroz statističke metode. Glavni cilj ovih modela je utvrditi koliko se mjerenja razlikuju od srednje vrijednosti, tj. koliko su podaci raspršeni oko prosječne vrijednosti. Ovi modeli obično uključuju analizu ponovljivosti mjerenja, što znači da se isto mjerenje provodi više puta kako bi se dobila serija podataka. Nakon toga se koriste različite statističke metode, poput izračuna standardne devijacije, kako bi se odredila razina varijabilnosti mjerenja. Što je veća standardna devijacija, to je veća varijabilnost rezultata, što ukazuje na veću nesigurnost u mjerenju. Osim toga, modeli standardne devijacije također mogu uključivati procjenu preciznosti uređaja koji se koristi za mjerenje. To može obuhvatiti analizu instrumentalne nesigurnosti, odnosno koliko je precizan i pouzdan uređaj u reproduciranju istih mjerenja pod istim uvjetima. Koristeći ove modele, moguće je kvantificirati nesigurnost u mjerenjima i dati pouzdanost rezultatima, što je ključno za interpretaciju dobivenih podataka i donošenje ispravnih zaključaka [21].

Modeli propagacije pogreške su metodologija koja se koristi za analizu utjecaja pogrešaka mjerenja na konačnu mjernu nesigurnost prilikom određivanja modula elastičnosti. Ovi modeli proučavaju kako se pogreške u pojedinačnim mjerenjima prenose kroz proces mjerenja i kako te pogreške utječu na rezultate. Koristeći matematičke metode, kao što su teorija pogrešaka ili metoda Monte Carlo simulacije, modeli propagacije pogreške procjenjuju kako se pogreške u ulaznim veličinama, poput mjernih podataka ili parametara mjernih uređaja, prenose na konačne rezultate mjerenja. To uključuje identifikaciju i kvantifikaciju različitih faktora koji mogu doprinijeti nesigurnosti, poput sistematskih pogrešaka, slučajnih pogrešaka ili nesigurnosti u umejranju instrumenata. Ovi modeli omogućuju detaljnu analizu kako pojedini faktori utječu na konačnu mjernu nesigurnost i pružaju uvid u to koje mjere mogu biti poduzete kako bi se smanjila nesigurnost u mjerenjima. Primjena matematičkih metoda omogućuje preciznije procjene nesigurnosti i bolje razumijevanje kompleksnih interakcija između različitih faktora u procesu mjerenja modula elastičnosti.

Modeli umjeravanja su metodologija koja se koristi za procjenu nesigurnosti povezanih s umjeravanjem instrumenata ili uređaja koji se koriste za mjerenje modula elastičnosti materijala. Kada se koriste instrumenti za mjerenje, važno je osigurati da su precizni i pouzdani te da daju točne rezultate. Umjeravanje se koristi za utvrđivanje odnosa između mjerenja koje instrument daje i stvarnih vrijednosti koje se mjeri. Modeli umjeravanja uključuju analizu nesigurnosti povezane s procesom umjeravanja samih instrumenata. To uključuje procjenu nesigurnosti povezanih s standardima umjeravanja koji se koriste za usporedbu s instrumentom, kao i nesigurnosti povezane s metodama umjeravanja koje se primjenjuju. Analiza nesigurnosti standarda umjeravanja obično uključuje razmatranje preciznosti samih standarda, kao i procesa njihovog umjeravanja i održavanja. Nesigurnosti vezane uz metode umjeravanja mogu uključivati različite faktore, poput upotrebe standardnih postupaka, stručnost tehničkog osoblja ili uvjeta okoline tijekom umjeravanja. Korištenjem modela umjeravanja, korisnici mogu bolje razumjeti i procijeniti nesigurnosti povezane s mjerenjem modula elastičnosti te osigurati pouzdanost i preciznost rezultata. Ovi modeli omogućuju identifikaciju i kvantifikaciju potencijalnih izvora pogrešaka tijekom umjeravanja instrumenata, što pomaže u donošenju informiranih odluka o prihvatljivosti rezultata mjerenja.

Modeli simulacije predstavljaju pristup procjeni mjernih nesigurnosti korištenjem numeričkih simulacija, često zasnovanih na računalnim programima ili alatima. U ovom kontekstu, numeričke simulacije omogućuju simuliranje procesa mjerenja kako bi se analizirali utjecaji različitih varijabli na rezultate mjerenja modula elastičnosti. Kada se koriste numeričke simulacije, prvo se modelira fizički proces mjerenja modula elastičnosti. Ovo može uključivati simuliranje interakcije između ispitnog uzorka i uređaja za mjerenje, primjenu sile ili naprezanja na uzorak te mjerenje rezultirajućih deformacija. Nakon modeliranja, provode se simulacije s različitim vrijednostima ulaznih varijabli kako bi se analizirali njihovi utjecaji na rezultate mjerenja. Kroz ove simulacije, mogu se procijeniti različiti faktori koji mogu utjecati na mjernu nesigurnost, uključujući geometriju uzorka, svojstva materijala, točnost i preciznost instrumenata za mjerenje, te varijacije u uvjetima okoline. Analiza rezultata simulacija omogućuje identifikaciju potencijalnih izvora pogrešaka i kvantifikaciju njihovog utjecaja na konačnu mjernu nesigurnost. Prednost korištenja modela simulacije je u tome što omogućuju detaljnu analizu i razumijevanje složenih interakcija u procesu mjerenja, te pružaju mogućnost procjene nesigurnosti u uvjetima koji su teško reproducirati eksperimentalno. Međutim, ovi

modeli zahtijevaju dobru poznavanje fizikalnih procesa i precizne podatke o svojstvima materijala i uvjetima mjerenja kako bi rezultati simulacija bili pouzdani.

Modeli prihvatljivosti rezultata predstavljaju pristup procjeni mjernih nesigurnosti temeljen na usporedbi dobivenih rezultata s unaprijed definiranim kriterijima kvalitete ili normama. Ovi modeli fokusiraju se na ocjenu prihvatljivosti rezultata mjerenja i identificiranje eventualnih odstupanja od zadanih standarda ili očekivanih vrijednosti. Prilikom primjene modela prihvatljivosti rezultata, prvo se određuju relevantni kriteriji kvalitete ili norme koji se primjenjuju na određeni tip mjerenja modula elastičnosti. To mogu biti industrijski standardi, međunarodne norme ili specifični zahtjevi projekta ili aplikacije. Zatim se dobiveni rezultati mjerenja uspoređuju s tim kriterijima kako bi se utvrdilo jesu li u skladu s očekivanjima ili postavljenim standardima. U slučaju da rezultati mjerenja ispunjavaju ili premašuju zadane kriterije kvalitete, smatraju se prihvatljivima, a nesigurnost mjerenja smatra se unutar prihvatljivih granica. Međutim, ako rezultati ne ispunjavaju postavljene standarde ili norme, potrebno je dodatno istražiti uzroke odstupanja i eventualno provesti korektivne mjere kako bi se osigurala pouzdanost i kvaliteta mjerenja. Ovi modeli mogu biti korisni u situacijama kada je definiranje točnih statističkih ili matematičkih modela mjernih nesigurnosti teško ili nepraktično. Umjesto toga, fokusiraju se na praktične aspekte primjenjivosti rezultata u odnosu na postavljene standarde i norme, što može biti posebno važno u industrijama gdje su jasno definirani kriteriji kvalitete i sigurnosti [22].

4.5. Validacija softvera

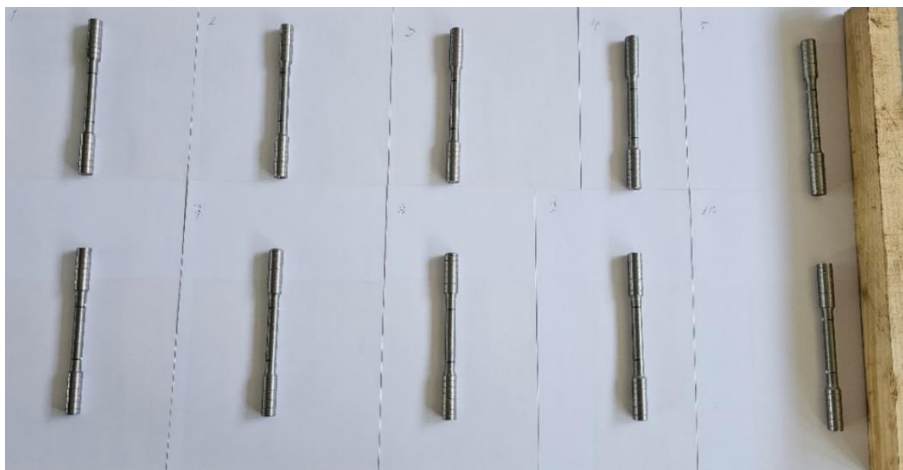
Validacija softvera koji se koristi za određivanje modula elastičnosti i svojstava vlačnog ispitivanja je važna tema koja se treba razmotriti, posebno jer u mnogim modernim ispitnim uređajima nije dostupan analogni izlaz krivulje naprežanja i deformacije, a u nekim slučajevima prikazuju se samo svojstva istezanja pod unaprijed određenim uvjetima, bez digitaliziranih očitavanja koji definiraju krivulju naprežanja i deformacije. Računalni softver validiran je korištenjem teorijskog pristupa analiziranjem numeričkih referentnih podataka kako bi se simulirala krivulja naprežanja i deformacije, te usporedili računalno izračunata svojstva s poznatim vrijednostima. Osim toga, softver je korišten paralelno sa softverom ispitnog uređaja tijekom ispitivanja materijala s dobro utvrđenim karakteristikama. Referentni materijal za istezanje bio bi idealan za ovaj zadatak. Za obavljanje bilo kojeg od ova dva pristupa na ispitnim

uređajima za istezanje jasno je da je potrebno osigurati načine za unošenje digitaliziranih referentnih podataka ili omogućiti izlazne točke koje će omogućiti slanje analognih signala iz senzora opterećenja i deformacije ispitnog stroja u neovisni sustav za analizu softvera. Sučelja potrebna za postizanje ovih zahtjeva trebala bi u budućnosti biti standardizirana i specificirana u ispitnom standardu. Mjerenja modula elastičnosti korištenjem postojećih statičkih metoda značajno su ograničena, prije svega zbog nesigurnosti povezane s mjerenjem deformacije pomoću ekstenzometara. Očekuje se da će nesigurnosti obično iznositi $\pm 10\%$ kada se prate postojeći standardi i metode ispitivanja. Stoga postoji dovoljno prostora za razvoj poboljšanih statičkih metoda radi smanjenja nesigurnosti u mjerenju modula elastičnosti. U konstruiranju s duktilnim materijalima, važno je razumjeti ne samo vrijednost modula elastičnosti, već i oblik krivulje naprezanja i deformacije. Primjenom poboljšane metode analize podataka putem mjerenja tangencijalnog i sekantnog modula moguće je smanjiti nesigurnosti na $\pm 1\%$ ili čak i manje, pod uvjetom da se koriste točne metode mjerenja deformacije koje uzimaju u obzir savijanje. Ovi potencijalni napredci u tehnici mogli bi otvoriti put za implementaciju poboljšanih statičkih metoda. Postoji i potencijal za sustavna usporedna ispitivanja u kojima se provode pažljivo umjerena mjerenja i koriste različite statičke i dinamičke tehnike na brojnim materijalima kako bi se potvrdile različite metode. Ponekad su dobiveni nedovoljno uvjerljivi rezultati, vjerojatno zbog izazova u razdvajanju nesigurnosti povezane s homogenošću materijala od one pripisane u metodi ispitivanja. Stoga bi daljnji, detaljniji rad na usporedbi bio vrlo koristan za rasvjetljavanje izbora metoda s kojima se suočavaju tehnolozi prilikom određivanja najprikladnije tehnike za mjerenje modula elastičnosti specifičnih materijala [14].

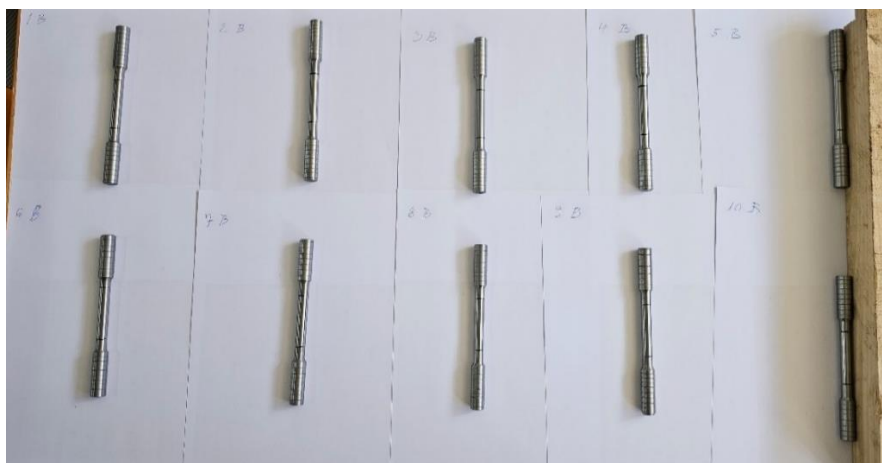
5. EKSPERIMENTALNI DIO

5.1. Opis ispitivanja

Ispitivanje je provedeno na dvadeset uzoraka, deset ispitnih uzoraka nije bilo brušeno, dok je drugih deset ispitnih uzoraka bilo fino brušeno. Također, ispitivanje je provedeno dvjema različitim brzinama, odnosno najbržom dozvoljenom brzinom koja iznosi 7,5 mm/min, te najsporijom dozvoljenom brzinom koja iznosi 0,75 mm/min. Obje brzine definirane su sukladno normi HRN EN ISO-6892-1:2019 normi. Uzorci su kružnog poprečnog presjeka, mjerne duljine $L_0 = 50$ mm i promjera poprečnog presjeka $d_0 = 10$ mm. Uzorci su također izrađeni prema normi HRN EN ISO 6892-1:2019. Epruvete s grubom površinom prikazane su na slici 12. dok su epruvete sa glatkom površinom prikazane na slici 13.



Slika 12. Epruvete s grubom površinom



Slika 13. Epruvete sa glatkom površinom

Na uzorcima su označene dvije linije koje označavaju mjernu duljinu $L_0 = 50$ mm kako je prikazano na slici 14. Iscrtavanje je napravljeno na način da se na pomičnom mjerilu postavila duljina od 50 mm a zatim su se pomoću markera iscrtale linije.



Slika 14. Označen ispitni uzorak sa grubom površinom

Početni promjer ispitnog uzorka mjeri se na 3 različita mjesta na epruveti, između ranije spomenutih oznaka udaljenih 50 mm, što je određeno normom HRN EN ISO 6892-1:2019. Potrebno je odrediti prosjek 3 izmjerena promjera kako je prikazano u tablicama 1. i 2. Prije početka ispitivanja unosi se izračunati promjer poprečnog presjeka kako bi se dobile površine poprečnog presjeka čime se izračunava vlačna čvrstoća i granica razvlačenja.

Tablica 1. Promjeri nebrušenih epruveta

Nebrušene epruvete				
R.br.	d_1	d_2	d_3	d_0
/	mm	mm	mm	mm
1	10,02	10,02	9,98	10,01
2	9,98	10,01	9,95	9,98
3	9,94	10,04	10,09	10,02
4	9,87	9,92	10,00	9,93
5	10,00	9,98	10,02	10,00
6	9,95	10,00	10,03	9,99
7	9,97	10,00	10,03	10,00
8	10,06	10,01	10,08	10,05
9	10,05	10,01	10,08	10,05
10	9,94	9,92	9,90	9,92

Tablica 2. Promjeri brušenih epruveta

Brušene epruvete				
R.br.	d_1	d_2	d_3	d_0
/	mm	mm	mm	mm
1	9,98	9,99	9,95	9,97
2	10,00	10,00	9,99	10,00
3	9,98	9,99	9,96	9,98
4	10,00	10,02	10,03	10,02
5	9,97	9,98	9,98	9,98
6	10,03	10,02	10,00	10,02
7	9,97	9,98	9,97	9,97
8	10,00	10,00	10,03	10,01
9	9,98	9,97	9,97	9,97
10	10,00	10,01	9,98	10,00

Norma HRN EN ISO 6892-1:2019 propisuje maksimalno odstupanje d_0 od $\pm 0,03$ mm, te je vidljivo da nebrušene epruvete ne zadovoljavaju normu što je i očekivano. Hrapavost uzoraka mjerena je ručnim uređajem za ispitivanje hrapavosti prikazanim na slici 15. Proizvođač je tvrtka Taylor Hobson Limited iz Engleske. Model uređaja je: Surtronic Duo. Uređaj svojim ticalom određuje hrapavost površine kada je postavljen na epruvetu koja se nalazi u vodoravnom položaju. Brušene epruvete su imale trideset puta glađu površinu što se može vidjeti u 3. tablici.



Slika 15. Mjerenje hrapavosti površine

Tablica 3. Hrapavosti epruveta

R.br.	Hrapavost	
	Brušene	Nebrušene
	R_a	R_a
/	μm	μm
1	0,31	4,95
2	0,21	10,34
3	0,4	8,9
4	0,28	7,78
5	0,37	10,38
6	0,29	11,16
7	0,53	11,33
8	0,27	9,51
9	0,34	9,59
10	0,33	10,26

U laboratoriju je ispitivanje provedeno na računalno upravljanoj kidalica WPM Leipzig EU 40 mod, klase točnosti 0,5 sukladno normi HRN EN ISO 7500-1:2019 koja je prikazana na slici 16. Nazivno mjerno područje kidalice je od 0 do 400 kN. Temperatura kod ispitivanja iznosila je $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ [24].

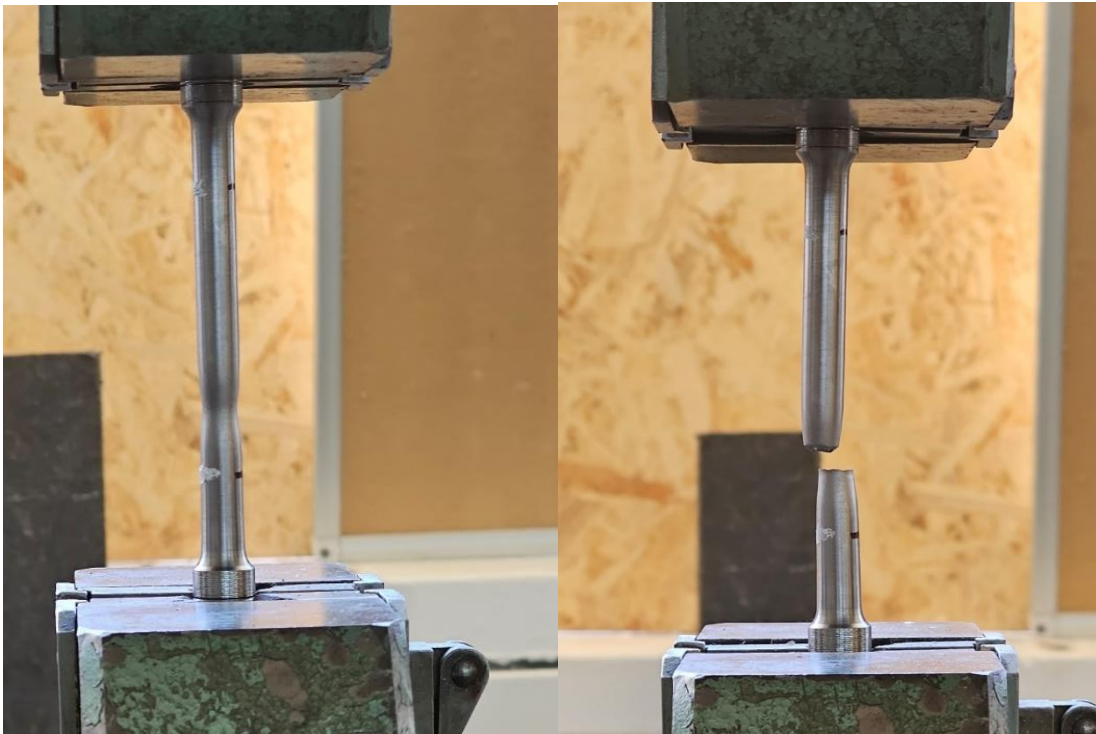
**Slika 16. Kidalica WPM Leipzig EU 40 mod**

Produljenje do granice razvlačenja mjereno je ekstenzometrom MFA 2 koji je prikazan na slici 17. Ekstenzometar je klase točnosti 1 sukladno normi HRN EN ISO 9513:2012. Ispitivanje je provođeno tako da se uzorak opteretio do sile predopterećenja, nakon čega je postavljen ekstenzometar te je nastavljeno opterećenje uzorka do trenutka kada produljenje iznosi 0,8 % početne duljine. Zatim se ekstenzometar skida s uzorka i ispitivanje se nastavlja do loma.



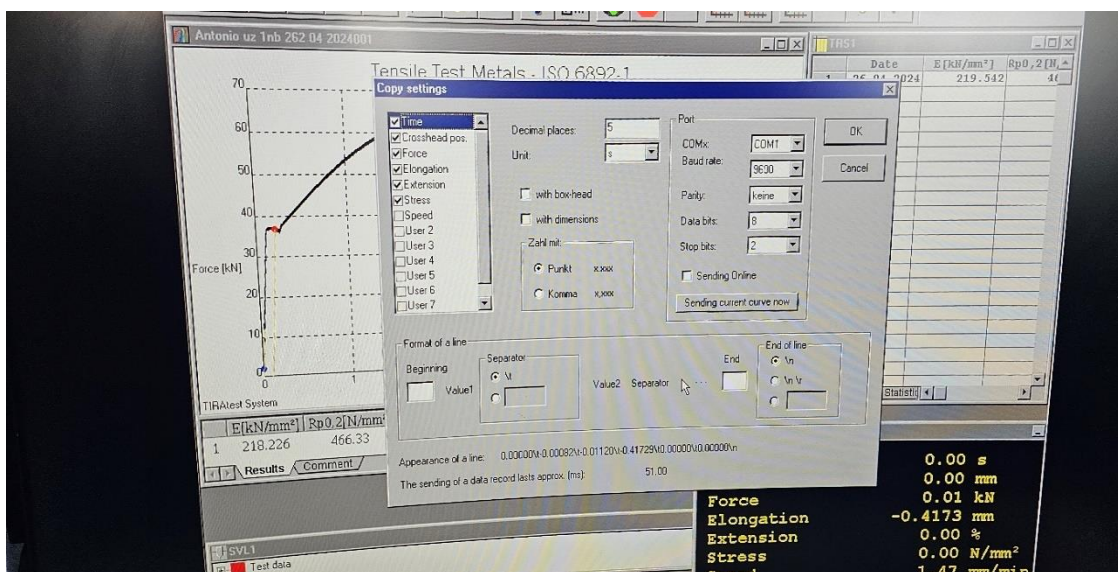
Slika 17. Ekstenzometar MFA 2

Prije samog pucanja uzorka dolazi do nastanka suženja na istome. Suženje na uzorku i trenutak neposredno nakon loma uzorka prikazano je na slici 18.



Slika 18. Suženje na uzorku i lom epruvete

Na kraju ispitivanja, softverski paket za kontrolu statičkog vlačnog ispitivanja izračunava i prikazuje veličine; modul elastičnosti E , vlačnu čvrstoću R_m , gornju granicu razvlačenja R_{eH} , silu kidanja F_k i maksimalnu silu F_m . Ekran programa prikazan je na slici 19.



Slika 19. Prikaz prozora softvera kidalice

Nakon provedenog ispitivanja dobivene su vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja i vlačne čvrstoće, a dimenzije uzoraka nakon ispitivanja su ručno izmjerene korištenjem pomičnog mjerila. Mjerenje produljenja L_u prikazano je na slici 20. Mjerenje konačnog promjera d_u prikazano je na slici 21.



Slika 20. Mjerenje produljenja nakon loma L_u



Slika 21. Mjerenje konačnog promjera d_u

5.2. Tablice sa rezultatima

Rezultate ispitivanja možemo vidjeti u tablicama 3. i 4. Kao što je ranije spomenuto, ispitivanje za prvih 5 uzoraka u obje tablice provedeno je najsporijom dozvoljenom brzinom koja iznosi 0,75 mm/min, što je označeno tamno plavom bojom u tablici. Ispitivanje za drugih 5 uzoraka provedeno je najbržom dozvoljenom brzinom koja iznosi 7,5 mm/min, što je označeno svijetlo plavom bojom u tablici. U tablicama su navedene vrijednosti za neke važnije veličine koje je odredio softverski paket kidalice. Također, može se primijetiti da je kod pojedinih nebrušenih ispitnih uzoraka došlo do loma izvan područja L_0 ili na granici područja L_0 . Takve pojave su moguće i događaju se zbog blagog konusa pri krajevima ispitnog uzorka što je problem obrade uzoraka. Također kod nekih ispitnih uzoraka je došlo do loma izvan srednje trećine mjerne duljine tijela epruvete i na presjeku loma su uočene vizualnom metodom sitne segregacije no nije se provodila daljnja fraktografska analiza stanja materijala.

Tablica 4. Rezultati nebrušenih epruveta

Nebrušene epruvete											
R.br.	E	F_m	F_k	S_U	L_U	R_m	R_k	R_{eH}	A	Z	Napomena
/	N/mm ²	N	kN	mm	mm	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%	%	
1	218,23	65,20	57,78	49,61	59,62	829,05	734,70	466,30	19,24	36,91	izvan L_0
2	246,40	63,49	57,43	56,05	55,50	811,62	734,16	456,14	11,00	28,35	Na granici L_0
3	220,53	64,73	60,16	56,72	55,40	820,34	762,42	454,06	10,80	28,12	izvan L_0
4	211,92	62,61	57,56	55,79	56,20	808,45	743,25	442,88	12,40	27,97	izvan L_0
5	211,44	64,44	60,84	58,74	57,75	820,48	774,64	465,74	15,50	25,22	
6	201,95	63,78	60,59	59,55	57,90	813,16	772,49	440,52	15,80	24,07	Na granici L_0
7	222,60	64,48	61,27	59,96	57,80	820,98	780,11	470,69	15,60	23,65	
8	353,00	65,20	57,78	60,65	59,00	821,91	728,38	473,30	18,00	23,54	
9	257,34	64,71	61,01	59,42	56,35	816,28	769,60	466,44	12,70	25,05	izvan L_0
10	230,07	63,10	60,85	61,90	57,45	816,42	787,31	464,77	14,90	19,91	

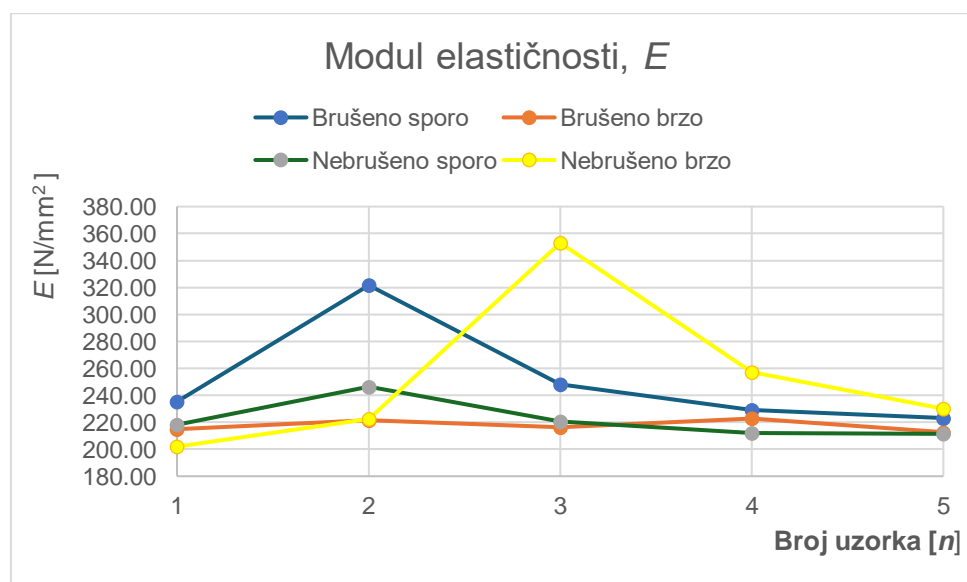
Tablica 5. Rezultati brušenih epruveta

Brušene epruvete											
R.br.	E	F_m	F_k	S_U	L_U	R_m	R_k	R_{eH}	A	Z	Napomena
/	N/mm ²	N	kN	mm	mm	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%	%	
1	235,47	65,50	56,98	48,00	60,10	838,44	729,38	476,00	20,20	38,55	
2	321,63	65,60	56,43	47,15	61,80	835,80	718,97	477,79	23,60	39,93	
3	248,08	65,63	56,14	45,34	60,95	839,54	718,14	474,18	21,90	42,00	
4	229,14	66,06	56,09	44,75	61,75	838,31	711,79	458,88	23,50	43,22	
5	223,17	65,52	59,09	53,82	59,22	838,69	756,39	452,69	18,44	31,11	
6	214,86	66,26	57,69	48,13	61,20	840,28	731,60	460,30	22,40	38,97	
7	221,55	64,62	54,72	48,13	59,75	834,97	707,05	456,14	19,50	37,81	
8	216,28	66,10	57,63	46,54	61,05	839,93	732,30	487,86	22,10	40,86	
9	222,79	65,14	56,01	45,94	59,85	839,43	721,78	466,39	19,70	40,80	
10	212,71	66,12	57,67	47,15	61,30	842,43	734,77	485,91	22,60	39,93	

6. ANALIZA REZULTATA

6.1. Analiza mehaničkih svojstava

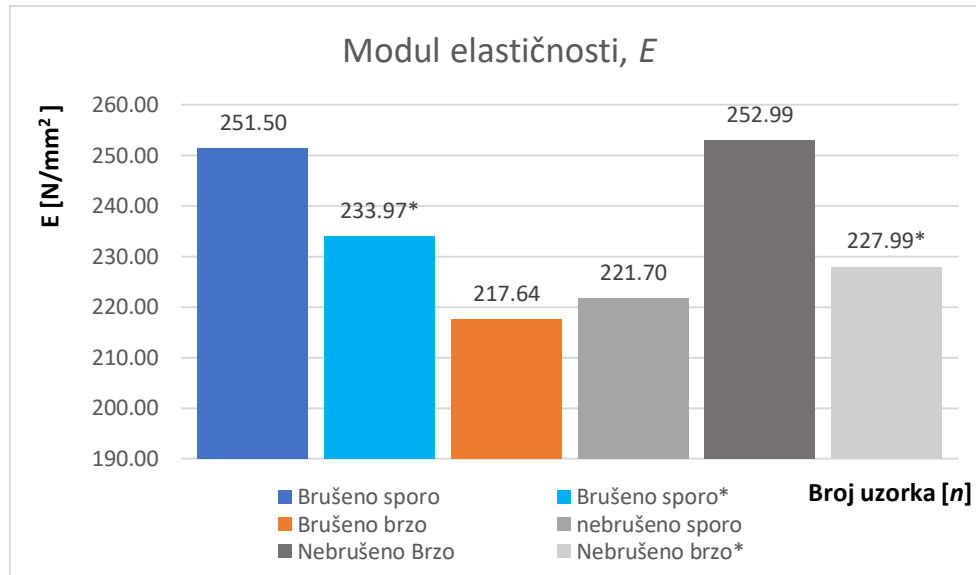
Na dijagramima u nastavku plavom bojom su prikazani rezultati za brušene epruvete koje su ispitivane manjom brzinom, a narančastom bojom rezultati za brušene epruvete koje su ispitivane većom brzinom. Nadalje, zelenom bojom su prikazani rezultati za nebrušene epruvete koje su ispitivane manjom brzinom, a žutom bojom rezultati za nebrušene epruvete koje su ispitivane većom brzinom. Dijagram sa vrijednostima modula elastičnosti prikazan je na slici 22.



Slika 22. Dijagram vrijednosti modula elastičnosti

Iz dijagrama je vidljivo da brušene epruvete koje su ispitivane manjom brzinom ispitivanja pokazuju više vrijednosti modula elastičnosti od brušenih epruveta koje su ispitivane većom brzinom. Također možemo vidjeti da nebrušene epruvete ispitivane većom brzinom pokazuju više vrijednosti modula elastičnosti od brušenih epruveta koje su ispitivane manjom brzinom. Kod nekih ispitnih uzoraka je uočena pojava povećanih vrijednosti modula elastičnosti (uzorak 2 brušeno sporo i uzorak 3 nebrušeno brzo) te je utvrđeno da kod tih ispitnih uzoraka nije došlo do loma epruvete u srednjoj trećini ispitnog tijela. Ovo ukazuje na problem nehomogenosti materijala. Iz ovoga se može postaviti pitanje da li je pet ispitnih uzoraka dovoljno za

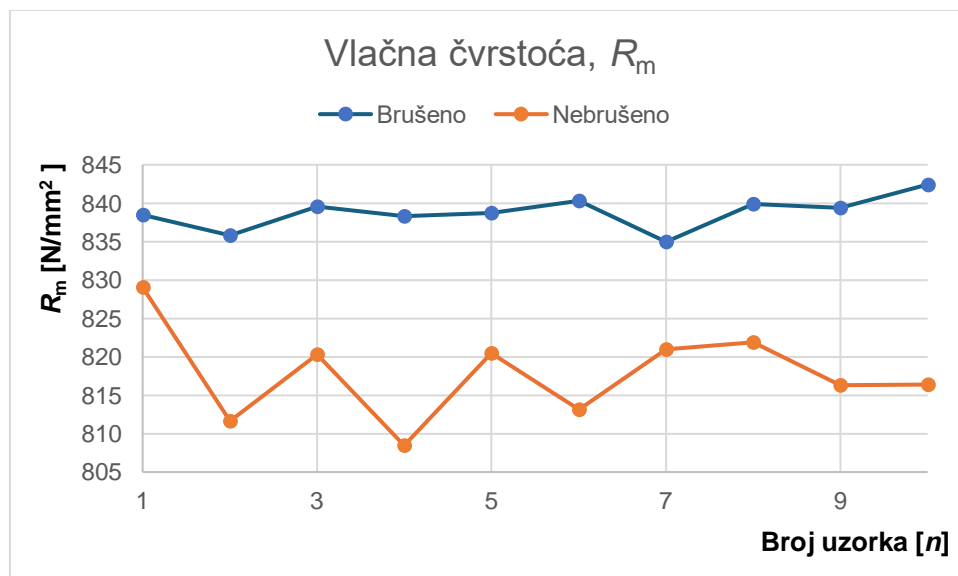
određivanje modula elastičnosti. Na slijedećoj slici 23. su prikazani rezultati modula elastičnosti bez ranije spomenutih epruveta sa velikim odstupanjem.



* Ukazuje na korekciju iznosa modula elastičnosti gdje su izuzeti rezultati uzorak 2 i uzorak 3 sa slike 23.

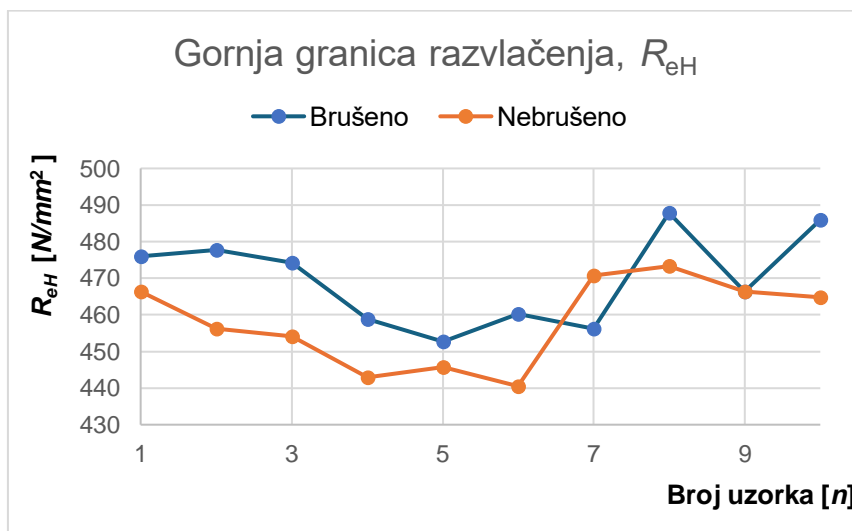
Slika 23. Srednje vrijednosti modula elastičnosti s korigiranim vrijednostima

Nadalje, slika 24. prikazuje vrijednosti vlačne čvrstoće.



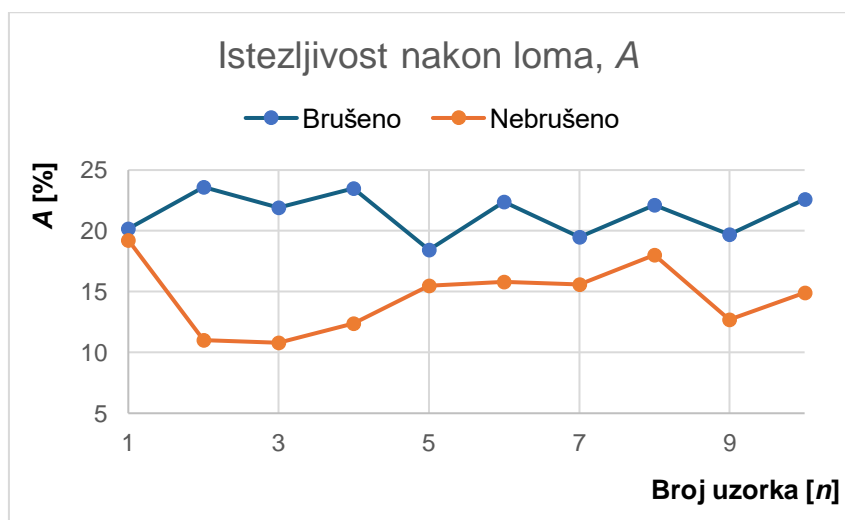
Slika 24. Dijagram vrijednosti vlačne čvrstoće

Na dijagramu je vidljivo da su vrijednosti vlačne čvrstoće ujednačene kod obje vrste uzoraka, s time da brušene epruvete imaju nešto višu vlačnu čvrstoću nego nebrušene. Također, kod nebrušenih epruveta primijećeno je veće rasipanje u rezultatima vrijednosti vlačne čvrstoće, naročito pri manjim brzinama ispitivanja. U nastavku, slika 25. prikazuje vrijednosti gornje granice razvlačenja.



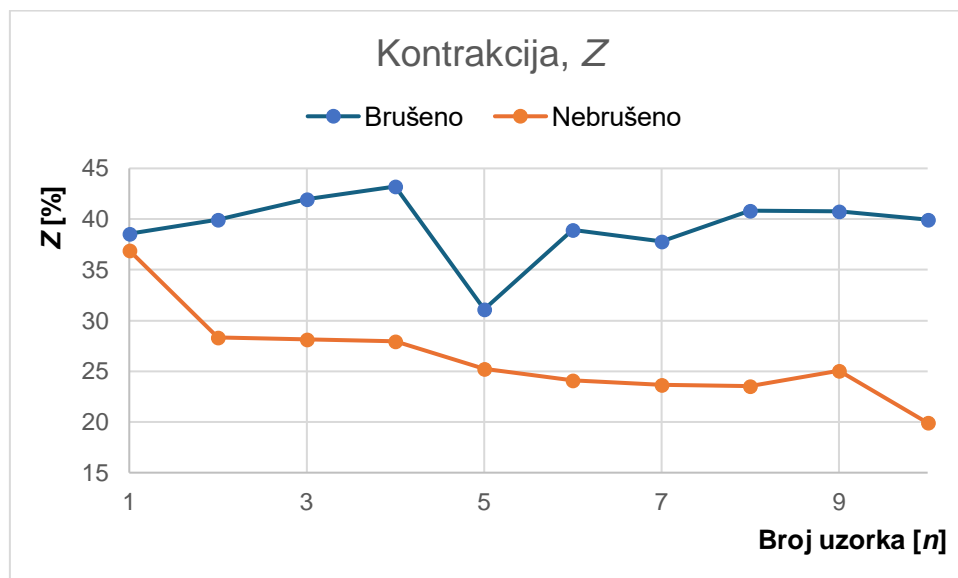
Slika 25. Dijagram vrijednosti gornje granice razvlačenja

Pri nižim brzinama ispitivanja vrijednosti gornje granice razvlačenja su više kod brušenih epruveta. Pri većim brzinama ispitivanja primijećeno je znatno rasipanje vrijednosti i kod brušenih i kod nebrušenih epruveta. Vrijednosti istezljivosti nakon loma prikazane su na slici 26.



Slika 26. Dijagram vrijednosti istezljivosti nakon loma

Na dijagramu se može primijetiti da su vrijednosti za brušene epruvete veće i kreću se u rasponu od 18 do 23 %, dok se za nebrušene kreću u rasponu od 10 do 19 %. Za obje vrste epruveta nije primijećen utjecaj brzine ispitivanja na rezultate istezljivosti. Slika 27. prikazuje vrijednosti kontrakcije za obje vrste uzoraka.



Slika 27. Dijagram vrijednosti kontrakcije

Brušene epruvete imaju više vrijednosti kontrakcije od nebrušenih, te to vrijedi za obje brzine ispitivanja. Također, vrijednosti kontrakcije kod nebrušenih epruveta su manje pri većim brzinama ispitivanja. Na dijagramu je vidljivo da brušena epruveta broj 5 ima znatno nižu kontrakciju u usporedbi s ostalim brušenim epruvetama.

6.2. Procjena i analiza mjerne nesigurnosti

Procjena mjerne nesigurnosti mjerenja modula elastičnosti provedena je sukladno normi HRN EN ISO 6892-1:2019. Kombinirana mjerna nesigurnost modula elastičnosti sastoji se od standardnih nesigurnosti sljedećih komponenti: nagiba pravca sila-produljenje, mjerenja duljine ekstenzometra te površine presjeka ispitnog uzorka. Procjena mjerne nesigurnosti mjerenja početnog promjera, d_0 i konačnog promjera d_u dobiva se slijedećom jednadžbom:

$$u_{d_i} = \frac{s_{d_i} \cdot t}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

gdje je:

t – faktor studentove razdiobe;

s_{d_i} – standardna devijacija mjerenja promjera;

n – broj mjerenja.

Faktor Studentove razdiobe t proizlazi iz razine pouzdanosti i stupnjeva slobode. Procjena mjerne nesigurnosti početne površine poprečnog presjeka, S_0 i konačne površine poprečnog presjeka, S_u , izračunava se iz slijedeće formule:

$$u_{S_i} = \sqrt{\frac{d_i^2 \pi^2 u_{d_i}^2}{4}} \quad (8)$$

gdje je:

d_i – srednja vrijednost mjerenja promjera;

u_{d_i} – mjerna nesigurnost promjera.

Procjena mjerne nesigurnosti početne duljine, L_0 , i konačne duljine, L_u , ispitnog uzorka izračunava se prema formuli:

$$u_{L_i} = \frac{s_{L_i} \cdot t}{\sqrt{n}} \quad (9)$$

gdje je:

t – faktor studentove razdiobe;

s_{L_i} – standardna devijacija mjerenja duljine;

n – broj mjerenja.

Kombiniranu mjernu nesigurnost modula elastičnosti računamo prema izrazu:

$$u_c(E) = \sqrt{\left(\frac{L_e}{S_0}\right)^2 * u_{(S_E)}^2 + \left(\frac{S_E}{S_0}\right)^2 * u_{(L_e)}^2 + \left(-\frac{S_E L_e}{S_0^2}\right)^2 * u_{(S_0)}^2} \quad (10)$$

Gdje je u_c mjerna nesigurnost, S_0 izvorna površina presjeka, L_e mjerna duljina ekstenzometra, S_E nagib pravca sila-produljenje, $u_{(S_E)}$ nesigurnost nagiba pravca sila-produljenje, $u_{(L_e)}$ nesigurnost izmjerene duljine ekstenzometrom, $u_{(S_0)}$ nesigurnost izvorne površine presjeka.

Za razinu pouzdanosti od 95 %, kombinirana nesigurnost mora se pomnožiti s faktorom pokrivenosti, $k = 2$ da bismo dobili mjernu nesigurnost $U(E)$:

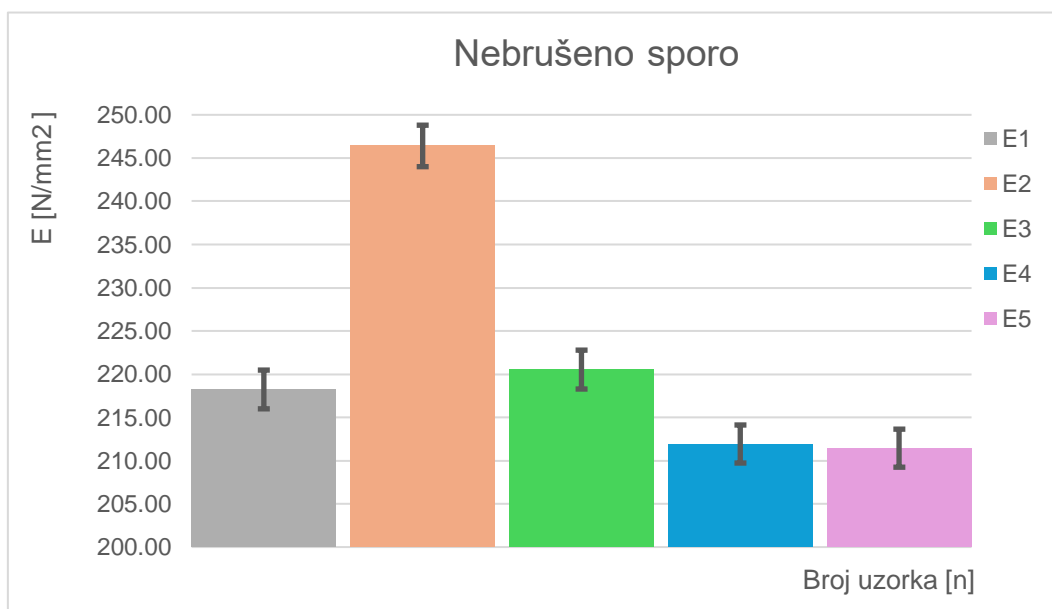
$$U(E) = k * u_c(E) \quad (11)$$

Tablica 6. prikazuje rezultate modula elastičnosti te pripadajuće im proširene proširene mjerne nesigurnosti za obje vrste epruveta.

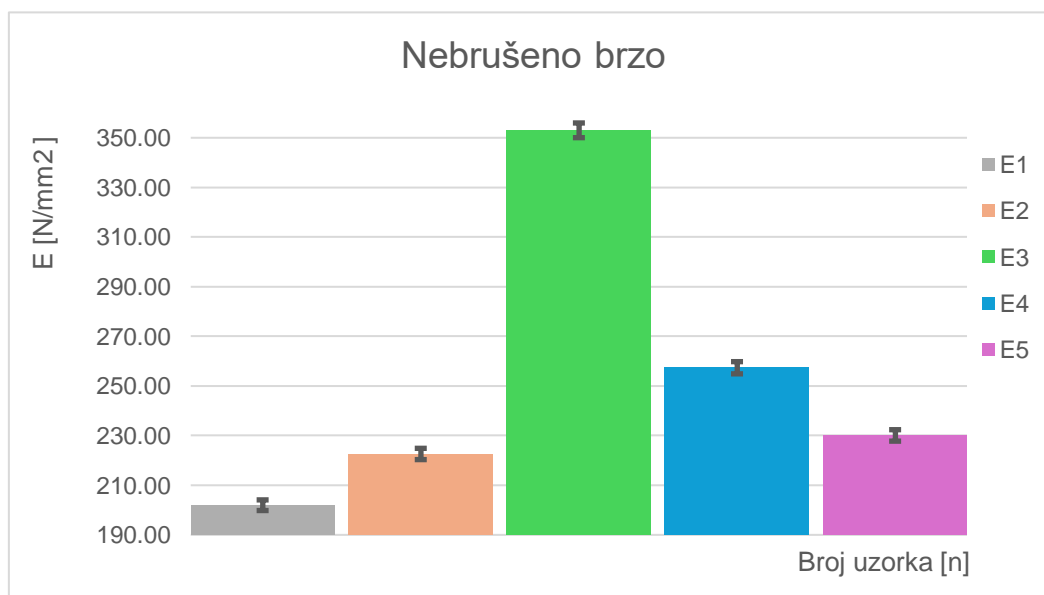
Tablica 6. Rezultati proširene mjerne nesigurnosti

R.br.	Nebrušene epruvete		Brušene epruvete	
	E	$U_{(E)}$	E	$U_{(E)}$
/	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
1	218,23	2,24412	235,47	2,35265
2	246,40	2,40416	321,63	2,81393
3	220,53	2,25743	248,08	2,42306
4	211,92	2,20735	229,14	2,31685
5	211,44	2,20453	223,17	2,28279
6	201,95	2,14847	214,86	2,23488
7	222,60	2,26937	221,55	2,27350
8	353,00	2,96473	216,28	2,24311
9	257,34	2,46469	222,79	2,28062
10	230,07	2,31217	212,71	2,22238

Vrijednosti modula elastičnosti i proširene mjerne nesigurnosti nebrušenih epruveta ispitivanih manjom brzinom prikazane su slici 28., a većom brzinom na slici 29.

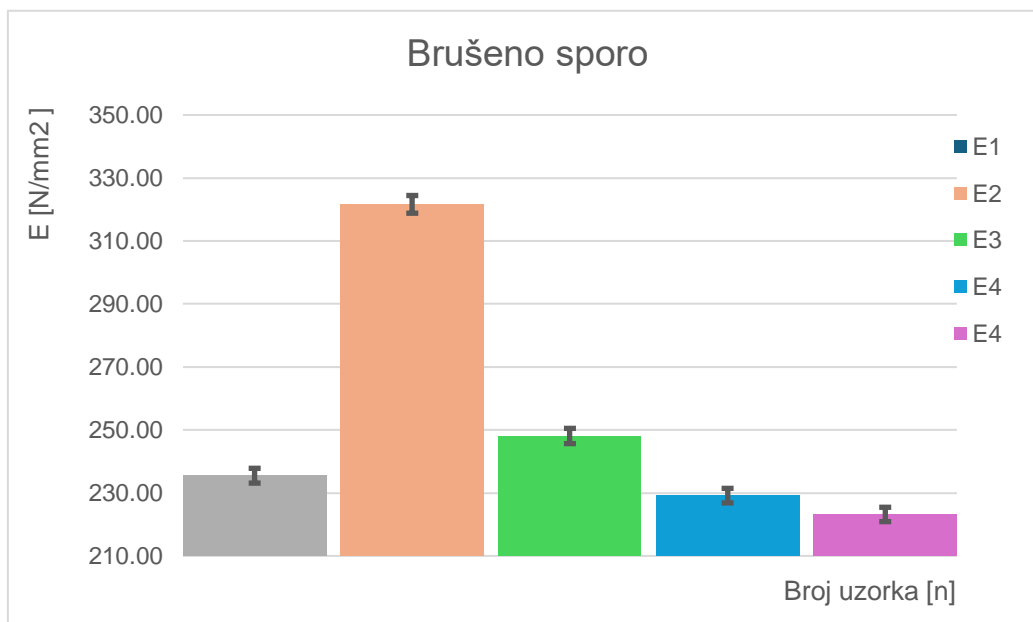


Slika 28. Dijagram vrijednosti mjerne nesigurnosti za nebrušene epruvete

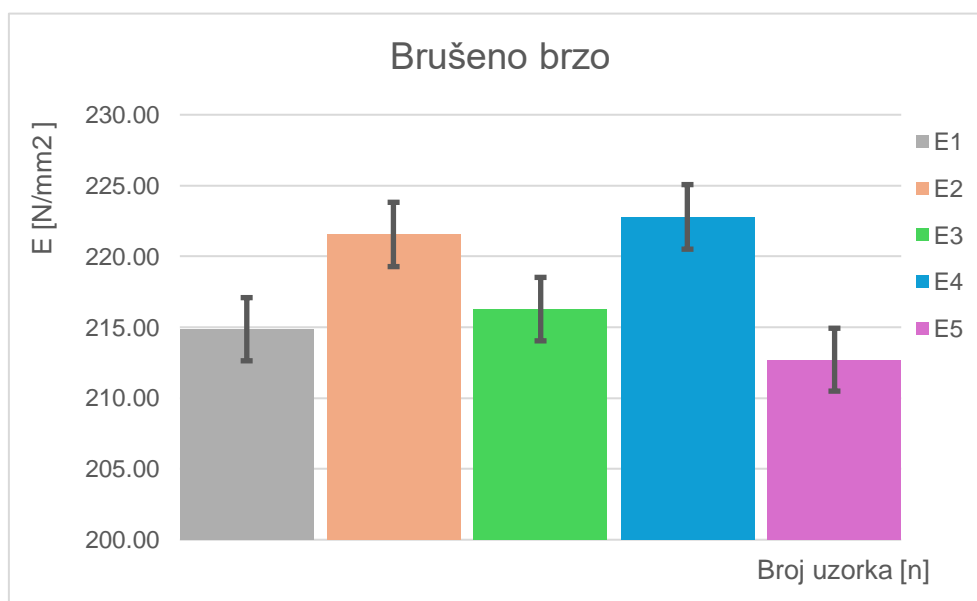


Slika 29. Dijagram vrijednosti mjerne nesigurnosti za nebrušene epruvete

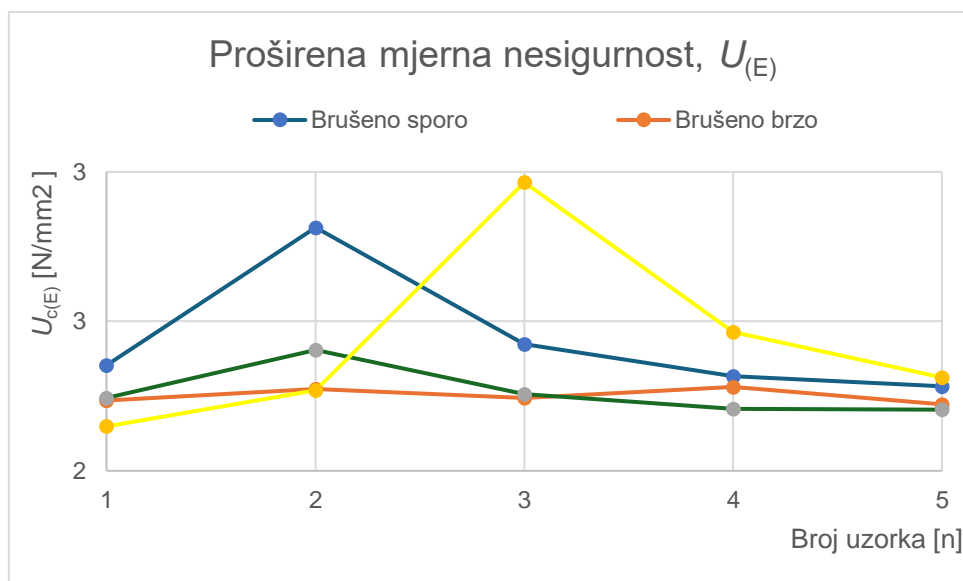
Vrijednosti modula elastičnosti i proširene mjerne nesigurnosti brušenih epruveta ispitivanih manjom brzinom prikazane su slici 30., a većom brzinom na slici 31.



Slika 30. Dijagram vrijednosti mjerne nesigurnosti za brušene epruvete



Slika 31. Dijagram vrijednosti mjerne nesigurnosti za brušene epruvete



Slika 32. Rezultati proširene mjerne nesigurnosti

Razmatrajući dijagramske prikaze pripadajućih mjernih nesigurnosti rezultatima mjerenja modula elastičnosti može se zamijetiti da stanje površine kao i brzina ispitivanja utječu i na veličinu mjernih nesigurnosti. Također iz vrijednosti mjernih nesigurnosti se vidi da kod ispitnih uzoraka gdje je došlo do loma tijela ispitnog uzorka izvan srednje trećine da su i mjerne nesigurnosti povećane u odnosu na ostale rezultate. Kod nebrušenih ispitnih uzoraka je razlika veličine mjernih nesigurnosti s obzirom na primijenjenu brzinu ispitivanja nešto veća nego kod brušenih ispitnih uzoraka. Ova razlika biva izraženija kod primjene kontaktnih ekstenzometara kakav je i bio primijenjen u ovom radu. S obzirom na prikazani primijenjeni model procjene i proračuna mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja modula elastičnosti može se postaviti pitanje da li je model uzeo baš sve utjecajne faktore. Odmah je uočljivo da nije uzeta u obzir brzina ispitivanja a razmatrajući proces ispitivanja svakako bi se tu trebalo ispitati utjecaj vibracija na kidalici tijekom ispitivanja, mjerna strategija kao broj ispitnih uzoraka itd. U ovom radu je za svaku skupinu uzeto pet ispitnih uzoraka što u svakom slučaju nije dovoljan broj uzoraka za kvantifikaciju pojedine utjecajne veličine. Svakako da tu treba razmotriti i utjecaj okolišnog medija.

ZAKLJUČAK

Nakon kratkog opisa mehaničkih svojstava, statičkog vlačnog ispitivanja te modula elastičnosti opisan je i postupak samog određivanja modula elastičnosti statičkim vlačnim ispitivanjem. Nakon opisa popraćenog slikama i tablicama komentirani su rezultati te je provedena analiza i proračun mjerne nesigurnosti modula elastičnosti.

Na temelju provedenih istraživanja doneseni su sljedeći zaključci:

1. Stanje površine tijela ispitnog uzorka značajno utječe na rezultate modula elastičnosti i njima pripadajuće mjerne nesigurnosti. Stoga pri određivanju vrijednosti modula elastičnosti tijela ispitnih uzoraka bi obavezno morala biti polirana što je i preporuka mnogih autora iz literaturnih izvora.
2. Brzina ispitivanja također utječe na rezultate mjerenja modula elastičnosti, no da bi se donijeli konkretniji zaključci potrebno je provesti ispitivanja sa širim spektrom brzina i većim brojem ispitnih uzoraka.
3. Mjerna strategija u smislu broja ispitnih uzoraka za određivanje modula elastičnosti je vrlo bitna osobito kod nehomogenih materijala. Većim brojem uzoraka za ispitivanje dobit će se relevantniji rezultati ali s druge strane to znatno poskupljuje ispitivanje.
4. Izbor odgovarajuće opreme za ispitivanje i njena mjerna sposobnost svakako značajno utječe na rezultate ispitivanja te na procijenjene i proračunate mjerne nesigurnosti. Primjenom kidalica klase 0,5 i ekstenzometara klase 00 dobit će se precizniji rezultati modula elastičnosti te niže mjerne nesigurnosti.
5. Iz analize rezultata mjerenja i modela procjene i proračuna mjerne nesigurnosti vidljivo je da primijenjeni model procjene i proračuna mjerne nesigurnosti nije u potpunosti korektan i treba ga značajno proširiti s utjecajnim faktorima ispitne opreme, broja uzoraka i procesa samog ispitivanja. Za ovakvo proširenje modela procijene mjerne nesigurnosti zahtjeva se detaljnije poznavanje kako ispitne opreme tako i cijelog procesa ispitivanja te bolja teoretska znanja o mikrostrukтури materijala te deformacijama u elastičnom području.

LITERATURA

- [1] Gdoutos E.,Konsta-Gdoutos M.: Mechanical Testing of Materials, Springer,Arlington, 2023.
- [2] Franz M.: Mehanička svojstva materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1998.
- [3] Bhargava A.K., Sharma C.P.: Mechanical behaviour and testing of materials, PHI Learning Private Limited, Delhi,2014.
- [4] Smith W.F.: Principles of materials science and engineering, Second edition, McGraw-Hill Publishing Company, 1990.
- [5] Alar Ž., Ćorić D.: Odabrana poglavlja iz mehaničkih svojstava materijala, podloge uz predavanja, FSB, Zagreb, 2021.
- [6] Anderson, Ted L.: Fracture mechanics, fundamentals and applications, 2017
- [7] Molotniko V., Molotnikova A.: Theory of Elasticity and Plasticity, Springer, Rostov on Don, 2021.
- [8] Altenbach H., Manuk S., Hakobyan M.V., Sahakyan A.V.: Solid Mechanics, Theory of Elasticity and Creep, Springer, Yerevan, 2023.
- [9] Askeland D. R., Fulay P. P., Wright W. J.: Science and engineering of materials, Cengage Learning, Stamford, 2010.
- [10] Marc A. Meyers; Krishan K. Chawla: Mechanical Behavior of Materials, Cambridge University Press, 2009.
- [11] Davis J.R.: Tensile Testing, second edition, ASM International, Ohio,2004.
- [12] Filetin, T., Franz M., Španiček Đ., Ivušić V.: Svojstva i karakteristike materijala – Katalog opisa, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [13] Alfirević I., Nauka o čvrstoći I, Tehnička knjiga d.d.,zagreb,1995.
- [14] Dyson B.F., Loveday S., Gee G.: Materials Metrology and Standards for Structural Performance, Springer Science, Teddington, 1995.
- [15] Gabauer, W.: The Determination of Uncetainties in Tensile Testing, Voest-Alpine Stahl Linz GmbH, Linz, 2000.
- [16] Kuhn H., Medlin D.:Mechanical Testing and Evaluation,Volume 8, ASM International, Ohio,2000.
- [17] Figliola R. S., Beasley D.E.: Theory and design for mechanical measurements, John Wiley & Sons, New York, 1991.

- [18] Runje B.: Teorija i tehnika mjerenja, Predavanja iz kolegija Teorija i tehnika mjerenja, Zagreb, 2014.
- [19] <https://link.springer.com/article/10.1557/jmr.2004.19.1.3>, pristupljeno 5.5.2024.
- [20] Hay J.: Introduction to instrumented indentation testing, Springer, 2009.
- [21] Bell S.: A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement, Crown Copyright, Teddington, 1999.
- [22] JCGM; Evaluation of measurement data, Guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM, 2008.
- [23] International standard ISO 6892-1: Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature, 2019.
- [24] Potvrda o umjeravanju br.: 0075/23, Laboratorij za ispitivanje mehaničkih svojstava Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2023.