

ISPITIVANJE TVRDOĆE FLEKSIBILNIH MATERIJALA

Očko Kusulja, Ana

Undergraduate thesis / Završni rad

2025

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:198476>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-27**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

STROJARSKI ODJEL

STRUČNI PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ STROJARSTVO

ANA OČKO KUSULJA

**ISPITIVANJE TVRDOĆE FLEKSIBILNIH
MATERIJALA**

ZAVRŠNI RAD

KARLOVAC, 2025.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

STROJARSKI ODJEL

STRUČNI PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ STROJARSTVO

ANA OČKO KUSULJA

**ISPITIVANJE TVRDOĆE FLEKSIBILNIH
MATERIJALA**

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Dr. sc. Tihana Kostadin

Profesor stručnog studija

KARLOVAC, 2025.



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Klasa:
602-07/___-01/___

Ur.broj:
2133-61-04-___-01

Datum:

ZADATAK ZAVRŠNOG / DIPLOMSKOG RADA

* Ime i prezime	ANA OČKO KUSULJA	
OIB / JMBG		---
Adresa		
Tel. / Mob./e-mail		
Matični broj studenta	0110615063	
JMBAG	0248055678	
Studij (staviti znak X ispred odgovarajućeg studija)	<input checked="" type="checkbox"/> Xpreddiplomski	<input type="checkbox"/> specijalistički diplomski
Naziv studija	STRUČNI PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ STROJARSTVO	
Godina upisa	2015.	
Datum podnošenja molbe	14.10.2024.	
Vlastoručni potpis studenta/studentice		

* Naslov teme na hrvatskom: ISPITIVANJE TVRDOĆE FLEKSIBILNIH MATERIJALA

* Naslov teme na engleskom: TESTING OF THE HARDNESS OF FLEXIBLE MATERIALS

Opis zadatka:

Rad se sastoji od teorijskog i eksperimentalnog dijela. U teorijskom dijelu potrebno je opisati fleksibilne materijale, kao i osnovne metode ispitivanja tvrdoće materijala. U eksperimentalnom dijelu opisati korištene materijale i opremu, te tablično i grafički prikazati rezultate ispitivanja tvrdoće za različite fleksibilne materijale. Napraviti osnovnu statističku obradu i analizu dobivenih rezultata, a na kraja rada napisati odgovarajući zaključak. Rad urediti prema uputama za pisanje završnog rada na strojarском odjelu, kako je objavljeno na web stranicama Veleučilišta u Karlovcu.

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i pomoću navedene literature.

Zahvaljujem se prvenstveno svojim roditeljima, koji su mi omogućili bezbrižno studiranje i kroz sve ove godine podršku.

Također bi se zahvalila svojoj mentorici dr. sc. Tihani Kostadin za stručnu pomoć. Također kolegi Bruni Vojnoviću za izradu epruveta za potrebe ispitivanja tvrdoće u eksperimentalnom dijelu rada.

Ana Očko Kusulja

U Karlovcu, 2025.

SAŽETAK

U ovom istraživanju ispitivane su tvrdoće fleksibilnih materijala izrađenih aditivnom proizvodnjom. Detaljno su opisane metode ispitivanja materijala, s posebnim naglaskom na metodu ispitivanja tvrdoće Shore A, koja je prilagođena ispitivanju fleksibilnih materijala. Također su analizirane osnovne razlike između polimernih materijala, uz osvrt na njihovo ponašanje pri povišenim temperaturama.

Eksperimentalni dio uključuje opis korištene opreme, ispitivanih materijala te metode aditivne proizvodnje korištene za izradu testnih epruveta. Prikazani su rezultati ispitivanja tvrdoće, koji su analizirani pomoću aritmetičke sredine i standardne devijacije. Na temelju rezultata doneseni su relevantni zaključci.

Ključne riječi: tvrdoća, metode ispitivanja tvrdoće, Shore A, fleksibilni materijali

SUMMARY

Testing of the hardness of flexible materials

This research is based on testing of the hardness of flexible materials. The material testing methods are described in detail, with special emphasis on the Shore A hardness test method, which is adapted to the testing of flexible materials. The basic differences between polymeric materials are also analyzed, with a focus on their behavior at elevated temperatures.

The experimental part includes a description of the equipment used, the materials tested, and the additive manufacturing method used to produce the test specimens. The hardness test results are presented, which are analyzed using the arithmetic mean and standard deviation. Relevant conclusions are drawn based on the results.

Keywords: hardness, hardness testing methods, Shore A, flexible materials

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	8
POPIS TABLICA.....	9
POPIS GRAFOVA	10
1. UVOD	1
2. TVRDOĆA.....	2
2.1. Određivanje tvrdoće	3
3. METODE ISPITIVANJA TVRDOĆE	4
3.1. Tvrdoća po Brinellu	4
3.2. Tvrdoća po Vickersu.....	5
3.3. Tvrdoća po Rockwellu.....	6
3.4. Tvrdoća po Shoreu.....	8
4. POLIMERNI MATERIJALI.....	10
4.1. Plastomeri.....	11
4.2. Duromeri.....	12
4.3. Elastomeri.....	12
5. EKSPERIMENTALNI DIO	14
5.1. Materijali	14
5.1.1. Termoplastični elastomer – TPE	14
5.1.2. Termoplastični poliuretan -TPU.....	14
5.1.3. Stiren-etilen-butilen-stiren – SEBS	15
5.1.4. Proizvođači korištenih materijala	16
5.2. Postupak izrade materijala za ispitivanje	16
5.3. Oprema i postupak ispitivanja tvrdoće	17
5.4. Prikaz rezultata ispitivanja pojedinih materijala	20
6. Analiza rezultata	30
6.1. Usporedba rezultata s tehničkim listom materijala.....	32
7. ZAKLJUČAK.....	33
LITERATURA	34

POPIS SLIKA

Slika 1. Podjela postupaka prema načinu opterećenja	3
Slika 2. Prikaz ispitivanja tvrdoće po Brinellu [4].....	4
Slika 3. Prikaz Vickers metode ispitivanja [3].....	5
Slika 4. Prikaz HRB metode ispitivanja.....	7
Slika 5. Prikaz HRC metode ispitivanja	7
Slika 6. Grafička usporedba Shore metode [9]	9
Slika 7. Struktura polimera [11].....	10
Slika 8. Podjela polimera prema ponašanju pri povišenim temperaturama	11
Slika 9. Oblik makromolekularne strukture plastomera [1].....	11
Slika 10. Oblik makromolekularne strukture duromera [1]	12
Slika 11. Oblik makromolekularne strukture elastomera [1]	12
Slika 12. Ispitivani uzorci	18
Slika 13. Zorn Stendal DDR.....	19

POPIS TABLICA

Tablica 1. Postupci HRB i HRC.....	6
Tablica 2. Primjer polimernih materijala prema tvrdoći [8]	8
Tablica 3. Usporedba Shore metode	9
Tablica 4. Tablični prikaz rezultata ispitivanja TPU60A	20
Tablica 5. Tablični prikaz rezultata ispitivanja TPU70A	21
Tablica 6. Tablični prikaz rezultata ispitivanja TPU82A	22
Tablica 7. Tablični prikaz rezultata ispitivanja TPU85A	23
Tablica 8. Tablični prikaz rezultata ispitivanja TPU89A	24
Tablica 9. Tablični prikaz rezultata ispitivanja TPE90A	25
Tablica 10. Tablični prikaz rezultata ispitivanja TPU92A	26
Tablica 11. Tablični prikaz rezultata ispitivanja TPU95A	27
Tablica 12. Tablični prikaz rezultata ispitivanja TPU98A	28
Tablica 13. Tablični prikaz rezultata ispitivanja SEBS	29
Tablica 14. Rezultati ispitivanja Shore A metodom	31
Tablica 15. Usporedba rezultata s tehničkim listom materijala.....	32

POPIS GRAFOVA

Graf 1. Grafički prikaz rezultata ispitivanja TPU60A	20
Graf 2. Grafički prikaz rezultata ispitivanja TPU70A	21
Graf 3. Grafički prikaz rezultata ispitivanja TPU82A	22
Graf 4. Grafički prikaz rezultata ispitivanja TPU85A	23
Graf 5. Grafički prikaz rezultata ispitivanja TPU89A	24
Graf 6. Grafički prikaz rezultata ispitivanja TPE90A	25
Graf 7. Grafički prikaz rezultata ispitivanja TPU92A	26
Graf 8. Grafički prikaz rezultata ispitivanja TPU95A	27
Graf 9. Grafički prikaz rezultata ispitivanja TPU98A	28
Graf 10. Grafički prikaz rezultata ispitivanja SEBS	29
Graf 11. Grafički prikaz srednjih vrijednosti rezultata ispitivanja	30
Graf 12. Usporedba rezultata s tehničkim listom materijala	32

POPIS FIZIKALNIH VELIČINA I NJIHOVIH MJERNIH JEDINICA

Fizikalna veličina	Oznaka	Mjerna jedinica
Vlačna čvrstoća	R_m	N/mm ²
Tvrdoća po Brinellu	HB	-
Sila opterećenja	F	N
Promjer kuglice	D	mm
Tvrdoća po Vickersu	HV	-
Tvrdoća po Rockwellu - B	HRB	-
Tvrdoća po Rockwellu - C	HRC	-

1. UVOD

Razvoj polimernih materijala unaprijedio je mnoge industrije zahvaljujući njihovim prilagodljivim svojstvima. Razvijaju se materijali koji odgovaraju specifičnim zahtjevima industrije. Istraživanja polimernih materijala fokusiraju se na razvijanje biorazgradivih i reciklabilnih polimera kako bi se smanjio utjecaj na okoliš. Dinamika ovih materijala čini ih ključnim materijalom za budućnost.

Aditivna proizvodnja bavi se izradom predmeta nanošenjem čestica sloj po sloj. Proces je u potpunoj suprotnosti od tradicionalnih metoda obrada odvajanjem čestica kod kojih se materijal odstranjuje, dok se kod aditivne proizvodnje materijal dodaje. Aditivnom proizvodnjom možemo proizvoditi kompleksne oblike koristeći širok izbor materijala.

Završni rad vezan je za istraživanja kroz interni znanstveni projekt Veleučilišta u Karlovcu pod nazivom: Utjecaj anatomije i kliničara na pozicioniranje dentalnih vodilica – ADAM (ADAM – Advanced Dental Anatomy Modeling).

U ovom dijelu ispitivanja, cilj je istražiti i ispitati tvrdoću fleksibilnih materijala za FDM, koji imaju slična mehanička svojstva kao ljudsko tkivo u usnoj šupljini.

Osnovna namjena bila bi za izradu vjernih fizičkih 3D anatomskih modela koji se mogu koristiti za funkcionalno planiranje operacije. Pri tome se isprinta anatomski model iz elastomera koji ima vrlo slična svojstva kao ljudsko tkivo, te se koristi za izradu plana operacije. Kirurg može rezati, isprobavati i prilagoditi vijke i stezne pločice, dentalne implantate, a glavni cilj je smanjiti vrijeme koji pacijent provede na „stolu“ za vrijeme operacije.

2. TVRDOĆA

Tvrdoća je mehaničko svojstvo koje predstavlja otpornost materijala na prodiranje znatno tvrdog tijela u njegovu površinu. Ovo svojstvo karakteristično je za čvrste tvari, dok tekućine i plinovi nemaju tvrdoću. Ispitivanje tvrdoće predstavlja brzu i ekonomičnu metodu za procjenu mehaničkih svojstava materijala, pri čemu materijal ostaje gotovo netaknut, što ovu metodu svrstava u nerazorna ispitivanja. Važno je napomenuti da tvrdoća nije fizikalna konstanta materijala; njezina vrijednost ovisi o mehaničkim svojstvima materijala i korištenoj metodi mjerenja. Zbog toga tvrdoća nije uključena u SI sustav mjernih jedinica, već se označava oznakom metode, na primjer, 400 HB. [1]

Tvrdoća i vlačna čvrstoća su međusobno povezana svojstva materijala, što omogućuje preračunavanje rezultata mjerenja između ovih dvaju parametara, ovisno o metodi ispitivanja tvrdoće. Na primjer, jednostavnijim ispitivanjem tvrdoće na postojećoj mehaničkoj konstrukciji može se procijeniti vlačna čvrstoća materijala. S druge strane, izravno mjerenje vlačne čvrstoće zahtijevalo bi složenije postupke i značajnija oštećenja konstrukcije.

$$R_m \cong 3,55 \times HB \quad (HB \leq 175) \quad (1)$$

$$R_m \cong 3,38 \times HB \quad (HB > 175) \quad (2)$$

Važno je naglasiti da navedeni odnosi vrijede za čelične materijale i tvrdoće izmjerene uz opterećenje od 29420 N (3000 kg).

Mjerenje tvrdoće u strojarstvu igra ključnu ulogu pri odabiru materijala za određene primjene. Materijali s višom tvrdoćom obično imaju veću otpornost na habanje, što je posebno važno u strojnoj obradi, gdje alati moraju biti tvrdi od obrađivanog materijala. Tvrdoća omogućuje procjenu trajnosti materijala, njegovog ponašanja pod opterećenjem, a odabirom odgovarajućeg materijala mogu se smanjiti troškovi i povećati ekonomičnost proizvodnje. [2]

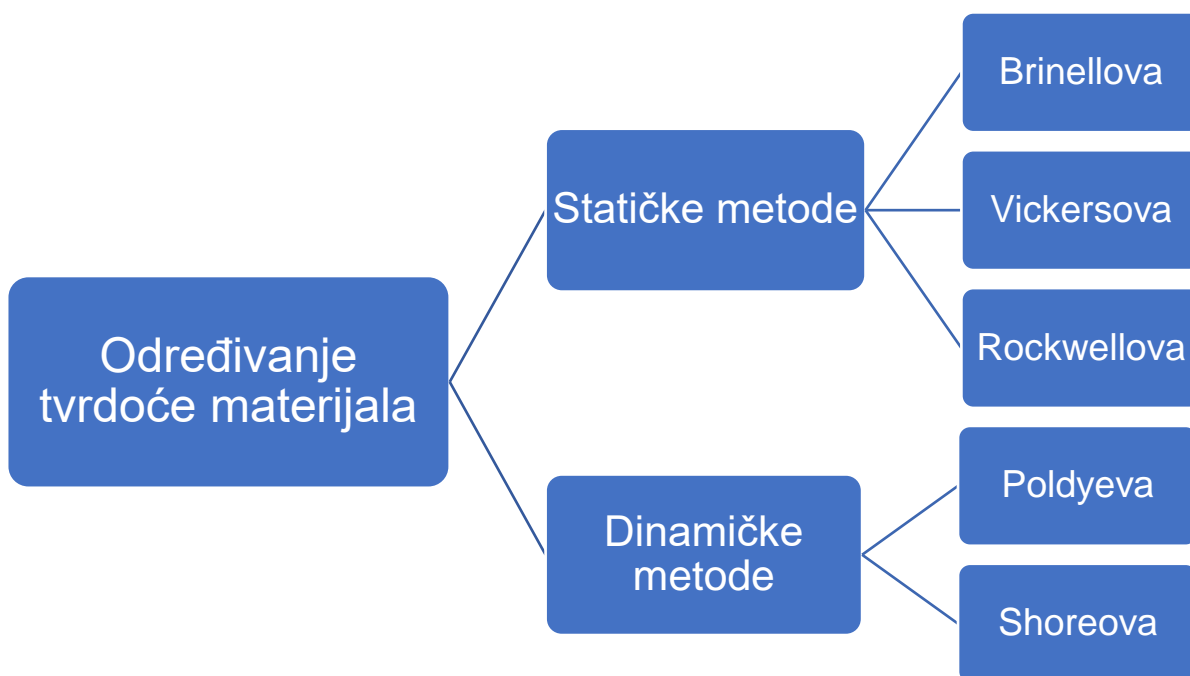
2.1. Određivanje tvrdoće

Uređaji za mjerenje tvrdoće nazivaju se tvrdomjeri, a element koji se utiskuje u površinu ispitanog materijala naziva penetrator ili identor. Penetrator može biti u obliku kuglice, stošca ili piramide, izrađen od materijala tvrdih od ispitanog. Većina metoda mjerenja tvrdoće temelji se na mjerenju veličine ili dubine otiska koji penetrator ostavlja u materijalu.

Postupak određivanja tvrdoće odvija se prema standardiziranim uvjetima i u osnovi uključuje dva glavna koraka:

- utiskivanje penetratora pod određenom silom u ispitivani materijal,
- mjerenje karakterističnih dimenzija otiska prema odabranoj metodi ispitivanja.

Ispitivanje tvrdoće jedno je od najčešće korištenih postupaka za procjenu mehaničkih svojstava materijala. Razvijen je veliki broj metoda, različite metode mogu imati različit utjecaj na dobivene rezultate. Stoga je važno odabrati odgovarajuću metodu koja osigurava pouzdane i usporedive rezultate, prilagođene zahtjevima daljnje primjene materijala. [3]

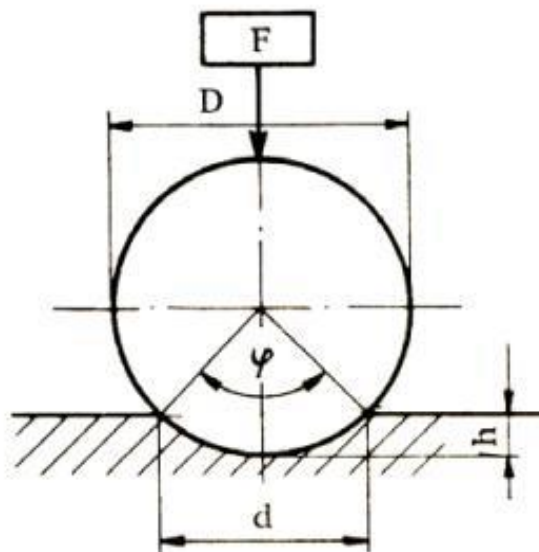


Slika 1. Podjela postupaka prema načinu opterećenja

3. METODE ISPITIVANJA TVRDOĆE

3.1. Tvrdoća po Brinellu

Brinellova metoda ispitivanja tvrdoće materijala jedna je od najšire prihvaćenih i standardiziranih metoda u znanosti o materijalima, osobito za metale. Postupak se temelji na primjeni poznatog opterećenja pomoću kuglice od kaljenog čelika koja se utiskuje u površinu materijala, pri čemu se mjeri promjer nastalog udubljenja. Tvrdoća se određuje kao prosječna vrijednost najmanje dvaju uzastopnih mjerenja.



Slika 2. Prikaz ispitivanja tvrdoće po Brinellu [4]

Kuglica od kaljenog čelika, koja služi kao penetrator, ima normirane promjere od 10, 5, 2,5 i 1 mm, a njezina površina mora biti polirana. Tijekom ispitivanja uzorak se postavlja na stabilnu podlogu kako bi se osiguralo pravilno usmjeravanje sile utiskivanja.

Brinellova tvrdoća definira se kao omjer primijenjene sile i površine nastalog utiska, pri čemu se promjer otiska obično kreće između 2 i 6 mm. Budući da otisak često nije idealnog kružnog oblika, mjere se dva međusobno okomita promjera, d_1 i d_2 , iz kojih se računa aritmetička srednja vrijednost d .

$$H_B = 0,102 \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (3)$$

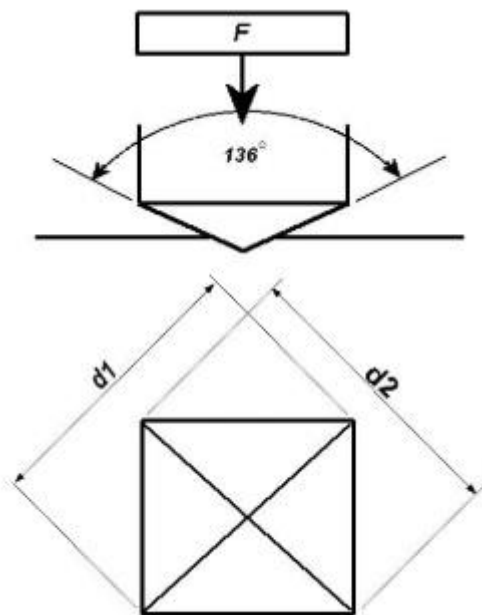
Brinellova tvrdoća je bezdimenzionalna veličina. Uz izmjerenu vrijednost, navode se dimenzija korištene kuglice, primijenjena sila i trajanje utiskivanja. Primjer: 128 HB 5/250/15 (pri tome je 128 iznos tvrdoće, 5 je promjer kuglice, 250 je sila utiskivanja i 15 je vrijeme utiskivanja). [5]

3.2. Tvrdoća po Vickersu

Vickersova metoda razlikuje se od Brinellove po obliku penetratora. Umjesto kuglice, koristi se četverostrana istostranična dijamantna piramida s vršnim kutom od 136° . Nakon primjene opterećenja na površinu materijala, mjeri se površina utiska kvadratnog oblika, pomoću dijagonala.

$$H_v = \frac{0,189 * F}{d^2} \quad (4)$$

$$d = (d_1 + d_2) / 2 \quad (5)$$



Slika 3. Prikaz Vickers metode ispitivanja [3]

Ova metoda je univerzalna, ali zbog malog udubljenja koje stvara, posebno je pogodna za ispitivanje vrlo tankih materijala poput folija, sitnih dijelova i malih površina.

Vickersova metoda otklanja dva osnovna nedostatka Brinellove metode: ograničenost područja mjerenja i ovisnost tvrdoće o sili utiskivanja. Prvi je nedostatak uklonjen uporabom dijamanta kao najtvrdjeg materijala za penetrator, dok je drugi otklonjen optimizacijom oblika penetratora.

Pri ispitivanju, trajanje utiskivanja je između 10 i 15 sekundi. Vickersova tvrdoća predstavlja bezdimenzijsku veličinu, a uz izmjerenu vrijednost navodi se i primijenjena sila. Na primjer, oznaka 640 HV20 znači da izmjerena tvrdoća iznosi 640 HV, uz silu utiskivanja od $20 \cdot 9,81$ N tijekom 10 do 15 sekundi. Ako je vrijeme utiskivanja dulje od 10

do 15 sekundi, na kraju se dodaje vremenska oznaka. Na primjer, oznaka 640HV20/30, oznaka 30 označava vrijeme utiskivanja. [6]

3.3. Tvrdća po Rockwellu

Za razliku od Brinellove i Vickersove metode, Rockwellova metoda ne mjeri veličinu otiska već dubinu prodiranja penetratora. Vrijednost tvrdoće očitava se direktno na skali tvrdomjera nakon rasterećenja, a samo ispitivanje traje 10 sekundi.

Kod Rockwellove metode kao penetratori koriste se dijamantni stožac ili kuglica od kaljenog čelika. Postoje dvije glavne varijante ispitivanja, prilagođene vrsti materijala:

- HRB metoda – namijenjena za ispitivanje mekših i srednje tvrdih materijala, poput aluminija, mekog čelika i bakrenih legura.
- HRC metoda – koristi se za ispitivanje tvrdih materijala.

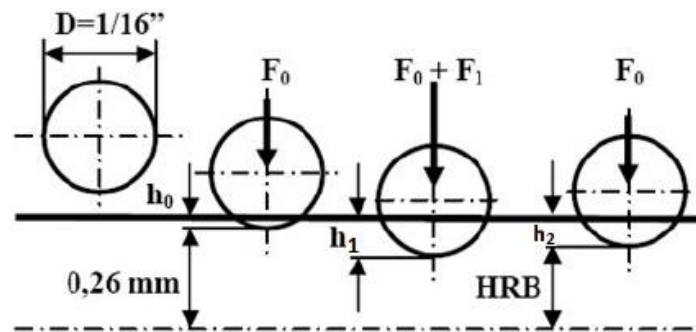
Tablica 1. Postupci HRB i HRC

Kratica	Opterećenje	Penetrator
HRB	100 kg	1/16 inča promjer (1,5875 mm) zakaljena čelična kuglica
HRC	150 kg	120° dijamantni stožac

Rockwellova HRB metoda (gdje slovo *B* dolazi od engleske riječi *ball*) ima raspon mjerenja tvrdoće od 35 do 100 HRB. [7]

Proces mjerenja tvrdoće sastoji se od tri faze:

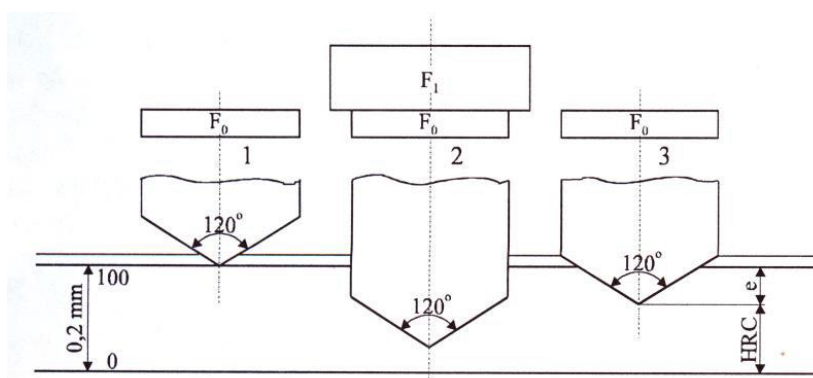
1. **Predopterećenje** – Na uzorak se primjenjuje sila od $F_0 = 98\text{N}$, pri čemu čelična kuglica kao penetrator prodire do dubine h_0 , koja se koristi kao početna referentna točka za mjerenje dubine prodiranja.
2. **Glavno opterećenje** – Na predopterećenje F_0 dodaje se sila $F_1 = 883\text{N}$, čime ukupna sila iznosi $F_0 + F_1 = 981\text{N}$. Ovo opterećenje uzrokuje dodatno prodiranje penetratora do dubine h_1 .
3. **Rasterećenje** – Glavno opterećenje F_1 se uklanja, što omogućuje djelomičan povrat elastičnih deformacija u uzorku. Penetrator se zaustavlja na dubini h_2 , koja je manja od h_1 ($h_2 < h_1$).



Slika 4. Prikaz HRB metode ispitivanja

Rockwellova HRC metoda (gdje slovo C označava englesku riječ *Cone*) koristi dijamanтни stožac kao penetrator. Proces mjerenja tvrdoće provodi se u tri faze:

1. **Predopterećenje** – Na uzorak se primjenjuje sila od $F_0 = 98\text{N}$, pri čemu dijamanтни stožac prodire do dubine h_0 , koja se koristi kao početni referentni položaj za mjerenje.
2. **Glavno opterećenje** – Na predopterećenje F_0 dodaje se sila $F_1 = 1373\text{N}$, čime ukupna sila iznosi $F_0 + F_1 = 1471\text{N}$. Ovo opterećenje utiskuje penetrator na dubinu h_1 .
3. **Rasterećenje** – Glavno opterećenje F_1 se uklanja, što omogućuje djelomičan povrat elastičnih deformacija uzorka. Penetrator se zaustavlja na dubini h_2 , pri čemu vrijedi ($h_2 < h_1$).



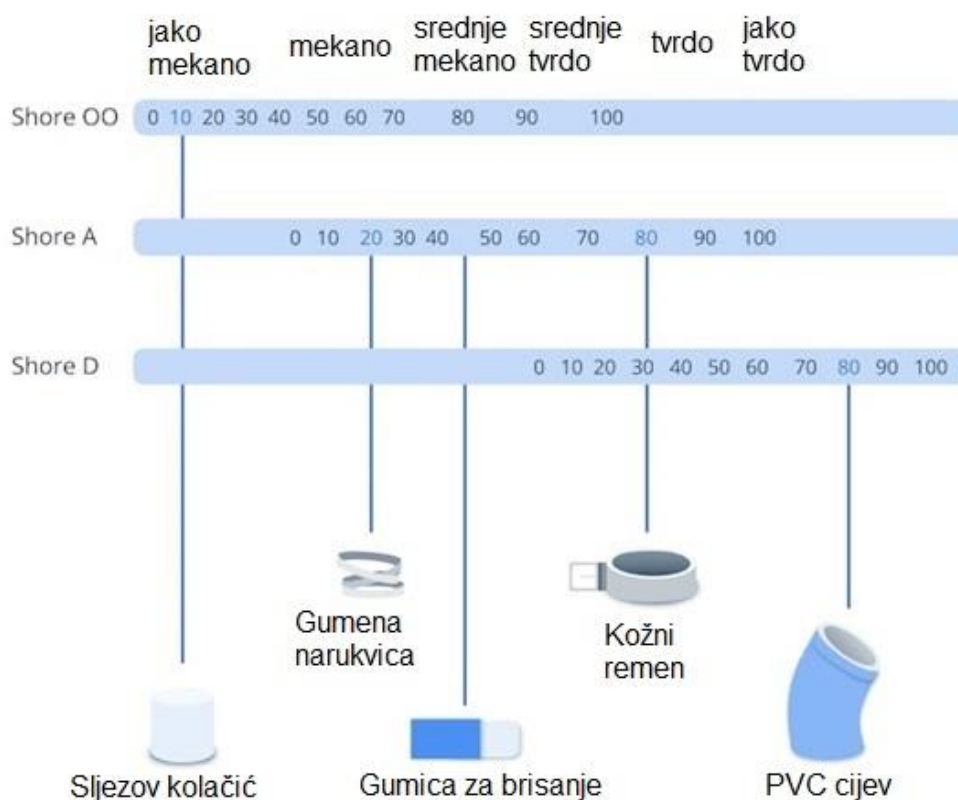
Slika 5. Prikaz HRC metode ispitivanja

3.4. Tvrdoća po Shoreu

Shoreova metoda koristi se za mjerenje tvrdoće polimernih materijala. Metoda se temelji na mjerenju elastičnog odskoka penetratora, pri čemu visina odskoka proporcionalno odgovara tvrdoći materijala. Odnosno dubina prodora penetratora u uzorak obrnuto je proporcionalna tvrdoći materijala – što je prodor veći, tvrdoća uzorka je manja.

Ljestvicu tvrdoće osmislio je Albert Ferdinand Shore 1915. godine, kada je razvio uređaj za mjerenje tvrdoće nazvan "durometar". Iako to nije bio prvi uređaj s tim nazivom, danas se pojam durometar najčešće povezuje upravo s mjerenjem tvrdoće po Shoreu. Skala tvrdoće kreće se od 0, što označava materijale niske tvrdoće, do 100 za materijale visoke tvrdoće.

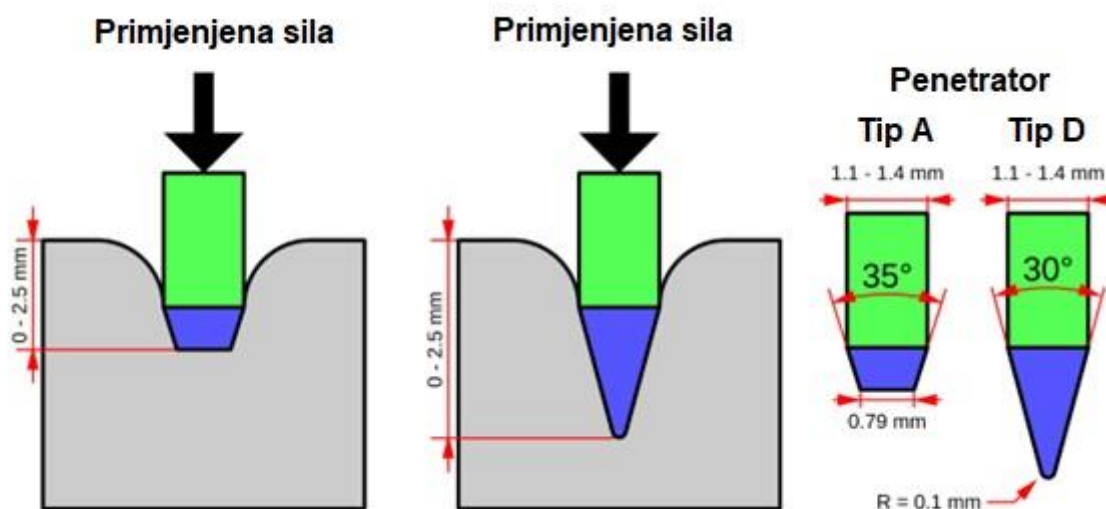
Kod ispitivanja durometrom materijal se ne deformira trajno jer je obično vrlo elastičan, pa se metoda svrstava među nerazorna ispitivanja. Shoreova metoda obuhvaća 12 vrsta mjerenja tvrdoće (A, B, C, D, DO, E, M, O, OO, OOO, OOOS, R), od kojih se najčešće primjenjuju Shore A i Shore D. [8]



Tablica 2. Primjer polimernih materijala prema tvrdoći [8]

Tablica 3. Usporedba Shore metode

Metoda	Penetrator	Ispitivani materijal
Shore A	Kaljena čelična šipka promjera od 1,1 mm do 1,4 mm, s krnjim stošcem vršnog kuta 35°, promjera 0,79 mm na vrhu	Meke plastike, gume
Shore D	Kaljena čelična šipka promjera od 1,1 mm do 1,4 mm, sa stošcem vršnog kuta 30°, 0,1 mm polumjer na vrhu	Tvrde plastike
Shore O	1,2 mm promjer kuglice	Mekše plastike u usporedbi s Shore A metodom



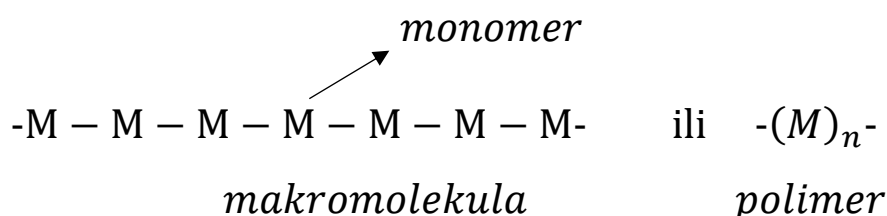
Slika 6. Grafička usporedba Shore metode [9]

Na slici je istaknuta najveća razlika između 2 najčešće korištene metode ispitivanja tvrdoće. Osim oblika vrha penetratora, značajna razlika odnosi se i na vrste ispitivanih materijala. Shore A metoda namijenjena je ispitivanju mekih plastika i guma, dok se Shore D metoda koristi za tvrde plastike.

4. POLIMERNI MATERIJALI

Polimerni materijali čine jednu od najvažnijih skupina tehničkih materijala današnjice. Njihova primjena je vrlo široka – koriste se kao konstrukcijski materijali u zamjeni za metale, drvo, keramiku, staklo i tekstilna vlakna, ali zahvaljujući svojim jedinstvenim svojstvima omogućili su i poseban napredak u različitim područjima ljudske djelatnosti.

Osnova polimernih materijala su polimeri – velike molekule ili makromolekule, koje nastaju povezivanjem manjih molekulskih jedinica, nazvanih monomeri, pomoću kovalentnih veza. Monomeri su osnovne molekulske jedinice, dok je polimer (grč. poly = mnogo + meros = dio) rezultat njihovog međusobnog spajanja u dugačke lance. [10]



Slika 7. Struktura polimera [11]

Prema podrijetlu, polimeri se dijele na prirodne i sintetske:

1. Prirodni polimeri

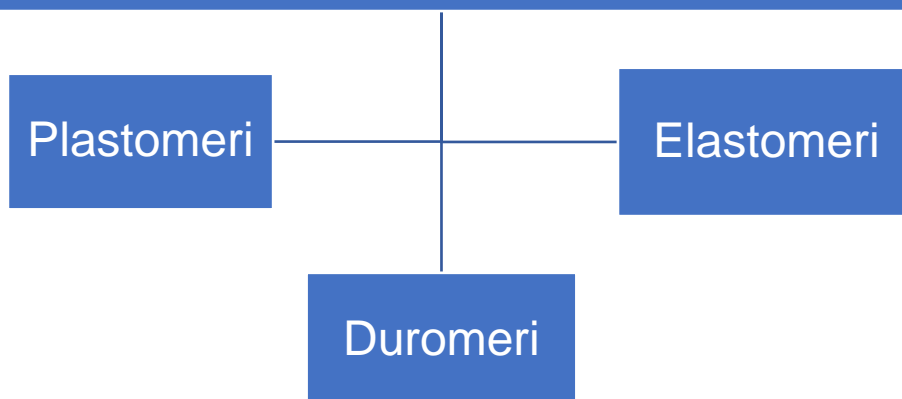
Uključuju biopolimere poput bjelančevina, celuloze, škroba i nukleinskih kiselina, koji su ključni za građevnu strukturu živih organizama. Ostali primjeri: kaučuk, svila i vuna.

2. Sintetski polimeri

Dobivaju se procesom polimerizacije monomera, koji se najčešće proizvode iz nafte i prirodnog plina. Ovi polimeri služe kao osnova za izradu raznih polimernih materijala.

Poseban pojam vezan uz sintetske polimere je stupanj polimerizacije, koji označava broj monomernih jedinica u lancu polimera. Primjeri polimernih materijala uključuju kaučuk, gumu i kemijska vlakna.

Podjela polimernih materijala s obzirom na ponašanje na povišenoj temperaturi

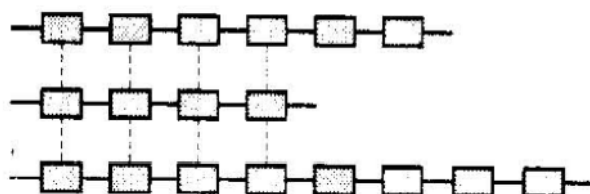


Slika 8. Podjela polimera prema ponašanju pri povišenim temperaturama

4.1. Plastomeri

Plastomeri su sintetski materijali koji pri zagrijavanju omekšaju, a hlađenjem se vraćaju u čvrsto stanje. Pri povišenim temperaturama sekundarne veze između molekula privremeno popuste, što čini materijal savitljivim i pogodnim za oblikovanje. Kada se materijal ohladi, sekundarne veze se ponovno uspostavljaju, materijal se stvrdne i vraća u čvrsto stanje.

Ovaj proces može se ponavljati više puta bez značajnog gubitka svojstava, što plastomere čini idealnima za jednostavnu obradu i reciklažu.



LINEARNE MAKROMOLEKULE
npr.: polietilen visoke gustoće

Slika 9. Oblik makromolekularne strukture plastomera [1]

4.2. Duromeri

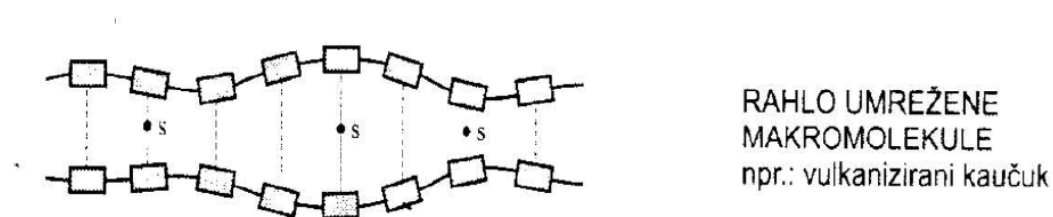
Duromeri su sintetski materijali koji nakon postupka polimerizacije formiraju čvrstu, umreženu strukturu. Njihove makromolekule povezane su kovalentnim vezama, što im daje izrazitu čvrstoću. Zbog umrežene strukture, duromeri ne omekšavaju čak ni pri zagrijavanju. Nakon što jednom prođu kroz proces polimerizacije, više se ne mogu oblikovati, prekomjerno zagrijavanje može dovesti do spaljivanja. Ovo svojstvo onemogućuje reciklažu.



Slika 10. Oblik makromolekularne strukture duromera [1]

4.3. Elastomeri

Elastomeri su sintetski materijali s izraženim svojstvom elastičnosti. Poznatiji pod nazivom guma. Već na sobnoj temperaturi s primjenom malog naprezanja mogu se oblikovati, a nakon uklanjanja naprezanja brzo se vraćaju u prvobitni oblik. Elastičnost postižu zbog svoje rahlo umrežene strukture.



Slika 11. Oblik makromolekularne strukture elastomera [1]

Elastomeri su od velike važnosti u strojarstvu zbog svojih jedinstvenih svojstva koja omogućuju široku primjenu. Osim izraženije elastičnosti tu su i otpornost na vibracije, brtvljenje, dugotrajnost, otpornost na habanje, jednostavna obrada te postojanost na visokim temperaturama.

Osnova elastomera je kaučuk. Za razliku od drugih polimernih materijala, kaučuk se ne isporučuje kao gotova smjesa spremna za oblikovanje. Kako bi se proizvele gumene tvorevine, potrebno je najprije pripremiti kaučukovu smjesu miješanjem kaučuka s različitim dodacima. Nakon toga smjesa se obrađuje postupcima oblikovanja, kako bi se dobila konačna gumena tvorevina. [12]

5. EKSPERIMENTALNI DIO

5.1. Materijali

U svrhu provođena ispitivanja korišteni su materijali:

- Termoplastični elastomer – TPE,
- Termoplastični poliuretan – TPU,
- Stiren-etilen-butilen-stiren – SEBS.

5.1.1. Termoplastični elastomer – TPE

TPE je opći naziv za širok spektar fleksibilnih polimera, koji kombiniraju elastičnost gume s mogućnošću oblikovanja karakterističnom za termoplaste. Oni su elastični pri sobnoj temperaturi, a mogu se oblikovati pod utjecajem topline.

Ovi materijali omogućuju širok spektar primjena zahvaljujući svojoj prilagodljivosti i lakoći obrade.

Osnovna svojstva:

- Fleksibilni i lagani, uz širok raspon tvrdoće (od mekane do tvrde),
- Jednostavna obrada,
- Umjerena otpornost na savijanje, kidanje i habanje,
- Pogodni za recikliranje.

Primjene:

- Ručke alata, sportska oprema, medicinski proizvodi i ambalaža,
- Automobilski dijelovi poput brtvi i ručki.

5.1.2. Termoplastični poliuretan -TPU

TPU je specifična vrsta TPE-a poznata po svojoj visokoj otpornosti na habanje, kidanje i kemikalije. Njegova svojstva čine ga prikladnim za primjene u zahtjevnim uvjetima, gdje je potrebna dugotrajnost i čvrstoća.

Osnovna svojstva:

- Izvanredna otpornost na abraziju, ulja, goriva i kemikalije,
- Veća elastičnost i čvrstoća u usporedbi s drugim TPE materijalima,
- Širok radni temperaturni raspon (do 150 °C),
- Dobra stabilnost pod opterećenjem.

Primjene:

- Automobilska industrija (npr. zaštitni premazi, brtve),
- Elektronika (npr. kabelski omotači),
- Sportska obuća i dodaci,
- Industrijske cijevi i kotači.

5.1.3. Stiren-etilen-butilen-stiren – SEBS

SEBS je vrsta TPE-a iz skupine stirenskih blok kopolimera (TPE-S). Odlikuje se gumastom teksturom, fleksibilnošću i otpornosti na UV zračenje i vremenske uvjete. SEBS je popularan zbog svog ugodnog taktilnog osjećaja i otpornosti na deformaciju. [13]

Osnovna svojstva:

- Visoka elastičnost i mekoća,
- Odlična otpornost na UV zračenje, ozon i vlagu,
- Kemijska otpornost na ulja i masti,
- Jednostavna obrada i kompatibilnost s raznim dodacima i bojama.

Primjene:

- Medicinski proizvodi (npr. rukohvati, elastične trake),
- Dječje igračke i proizvodi za široku potrošnju,
- Automobilski dijelovi (npr. brtve i ručke),
- Elektronika (npr. zaštitni omotači).

5.1.4. Proizvođači korištenih materijala

Za ispitivanje tvrdoće Shore A metodom korišteni su sljedeći fleksibilni materijali proizvođača:

- Recreus Filaflex TPU60A,
- Recreus Filaflex TPU70A,
- Recreus Filaflex TPU82A,
- Azurefilm Flexible TPU85A,
- Plastika Trček TPU Flex 89A,
- Fillamentum Flexfill TPE 90A,
- Fillamentum Flexfill TPE 90A,
- Fillamentum Flexfill TPU 92A,
- Recreus Filaflex TPU95A,
- Fillamentum Flexfill TPU 98A,
- Recreus Filaflex SEBS.

5.2. Postupak izrade materijala za ispitivanje

Aditivna proizvodnja (eng. "Additive Manufacturing"), dio proizvodnoga strojarstva koji se bavi izradom predmeta nanošenjem čestica u tankim slojevima. Najčešće nazivom 3D printanje, proces koji je u suprotnosti od obrade odvajanjem čestica gdje se materijal odstranjuje, kod aditivne proizvodnje se dodaju.

Prednost same aditivne proizvodnje su različite tehnologije, široki izbor materijala i mogućnosti izrade kompleksnih geometrija omogućuju mnoge primjene aditivne tehnologije. Međutim, kao i kod svake tehnologije, aditivna proizvodnja ima i svoje nedostatke. Jedan od njih je visoki trošak proizvodnje u usporedbi s tradicionalnom proizvodnjom kao i ne dovoljna razvijenost tehnologija za proizvodnju velike količine dijelova. Konkretnije metoda kojom su proizvedene testne epruvete naziva se FDM. [14]

FDM (eng. "Fused Deposition Modeling"), predstavlja jednu od najpopularnijih tehnologija 3D printanja u današnjem svijetu. Razvijena u ranim 1990-ima, FDM je revolucionirala način na koji se izrađuju prototipi i funkcionalni dijelovi kako u industriji tako i kod kuće. Postupak izrade je jednostavan, započinje konstruiranjem trodimenzionalnog modela u računalnom programu. Zatim se model prebacuje na radni stroj, kada je potrebno podesiti

parametre (debljina sloja, temperaturu mlaznice, brzina izrade). Radni stroj zagrijava materijal do polutekućeg stanja koji prolazi kroz sapnicu smještenu na glavi uređaja (ekstruder), te se taloži materijal sloj po sloj. Po završetku zadnjeg sloja, predmet se hladi na sobnu temperaturu te se predmet čisti i radi završna obrada (lakiranje, bojanje). [15]

Prednosti FDM metode:

- Jednostavno korištenje,
- Niska cijena materijala,
- Moguća izrada složenijih predmeta,
- Mala veličina uređaja.

Nedostatci FDM metode:

- Limitiran broj primjenjivog materijala,
- Postoji potreba za odstranjivanje materijala,
- Niska kvaliteta izrade (vidljive su linije slojeva),
- Manja čvrstoća proizvoda u odnosu na druge postupke aditivne proizvodnje.

5.3. Oprema i postupak ispitivanja tvrdoće

Uređaj koji se koristio pri ispitivanju tvrdoće elastomera naziva se Zorn Stendal DDR. Uređaj je prikazan na slici 12. Ispitivanje je standardizirano prema ISO 868 standardu, korištene su epruvete dimenzija: 40x40 mm, debljine 2 mm. Korišteni materijali: TPE, TPU, SEBS.

Ispitivanjem tvrdoće navedenim uređajem, materijal neće ostati trajno deformiran jer je općenito vrlo elastičan. Ispitni materijal se postavlja na postolje uređaja, pazeći da je mjerno područje minimalno 9 mm od ruba uzorka.

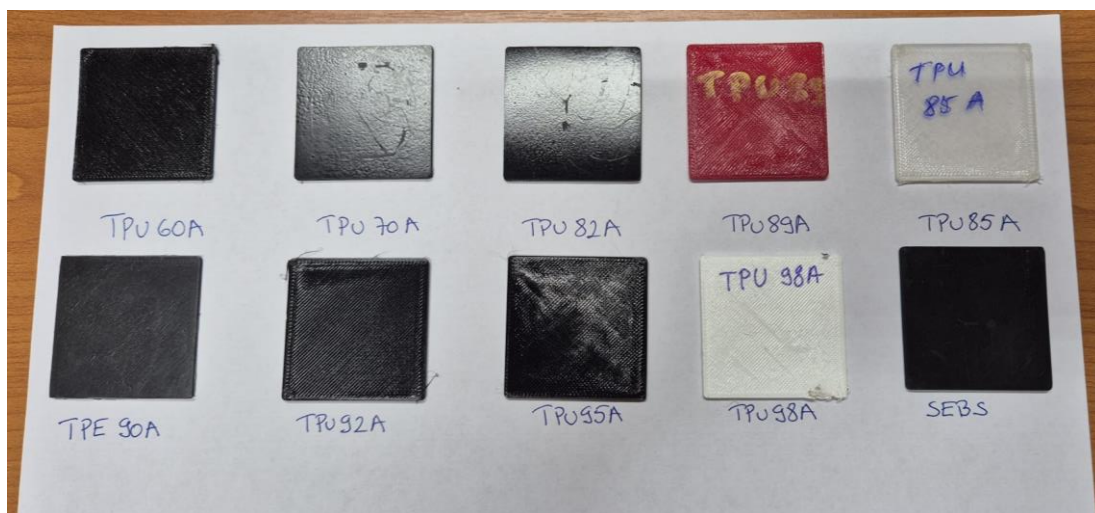
Mjerenje započinje pritiskom na tipku za opterećenje, čime se pokreće penetrator koji dolazi u kontakt s površinom uzorka. Penetrator je kaljena čelična šipka sa stošcem na vrhu. Očitanjem tvrdoće na mjernoj skali uređaja ne mora nužno započeti odmah pri dodiru penetratora s površinom uzorka.

Zbog predopterećenja kaljene čelične šipke i elastičnih karakteristika ispitivanog materijala, opterećenje se zadržava na uzorku 3 do 5 sekundi prije vizualnog očitavanja tvrdoće. Kako bi se osigurala točnost rezultata, postupak se ponavlja pet puta, svaki put na različitom mjernom području.

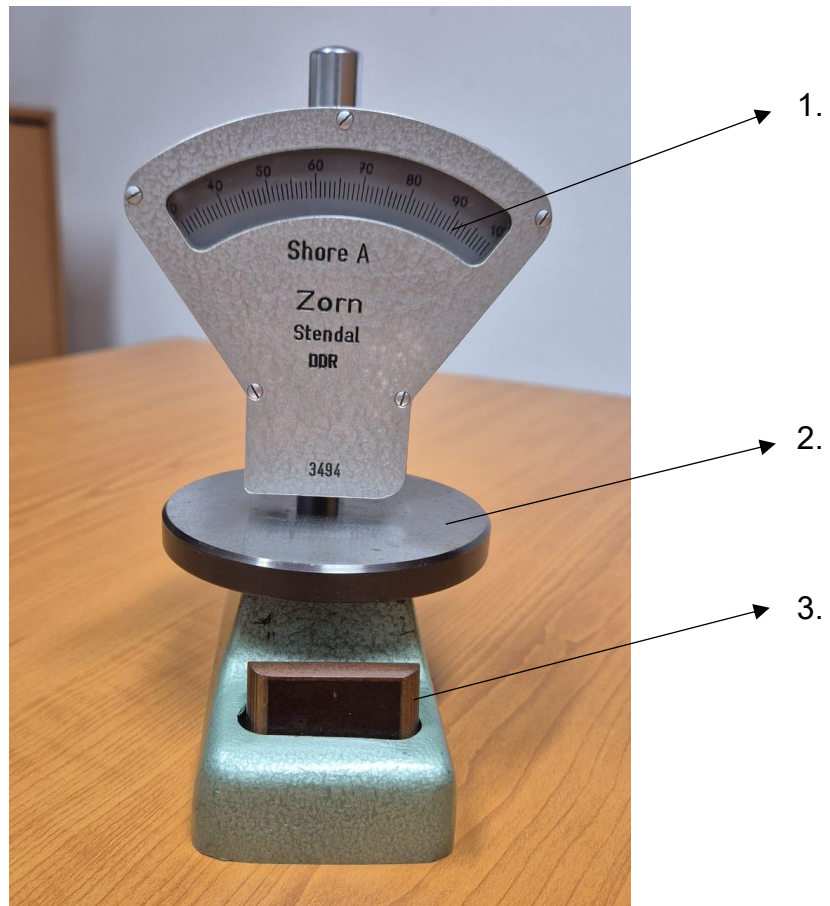
Tijekom ispitivanja, testni uzorak (epruveta) rotira se kako bi osigurali ravnomjerno mjerenje. Tri mjerenja provode se s jedne strane uzorka, a dva s druge strane, čime se dodatno povećava pouzdanost rezultata.

Korišteni uređaj je prijenosan, vrlo jednostavan za korištenje, kompaktan i može se koristiti na licu mjesta gdje je potrebno provesti mjerenje.

Na mjernoj skali, viši brojevi određuju veću otpornost na udubljenje i stoga tvrde materijale. Dakle što manje vrh penetratora deformira uzorak, veća je tvrdoća materijala. S druge strane, niži brojevi na skali označavaju manju otpornost na udubljenje i mekše materijale. [16]



Slika 122. Ispitivani uzorci



Slika 133. Zorn Stendal DDR

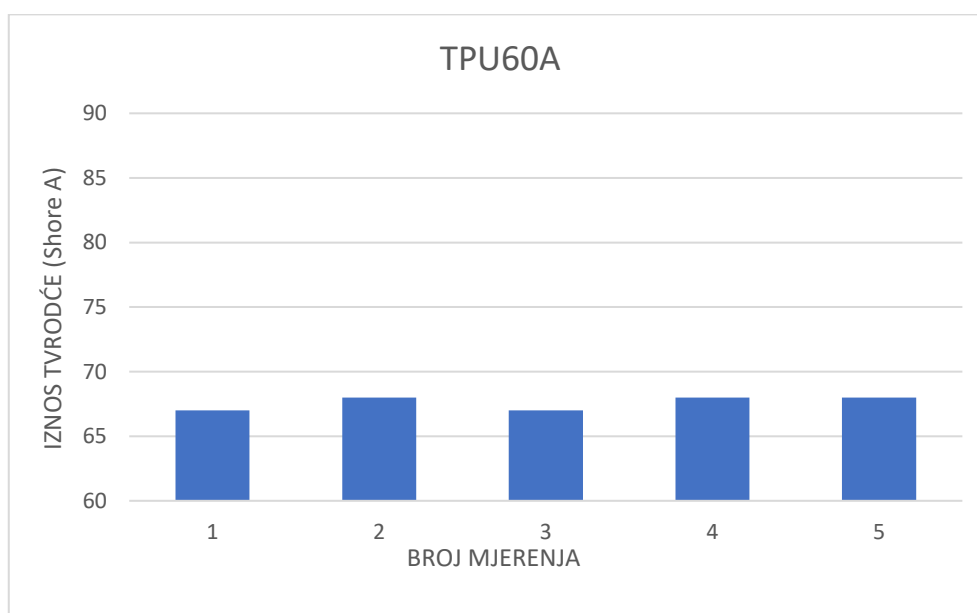
1. Mjerna skala,
2. Postolje,
3. Tipka za opterećenje.

5.4. Prikaz rezultata ispitivanja pojedinih materijala

U ovom poglavlju prikazani su rezultati ispitivanja materijala grafički i tablično. Prikazane vrijednosti su dobivene ispitivanjem Shore A metodom za 10 različitih materijala. Za svaki materijal se postupak ispitivanja ponavlja 5 puta kako bi se srednjom vrijednosti prikazao najtočniji podatak. Također je u tablici za svaki materijal prikazana i vrijednost standardne devijacije. Uz pomoć tablica u ovom poglavlju radi se analiza podataka dobivenih ovim ispitivanjem.

Tablica 4. Tablični prikaz rezultata ispitivanja TPU60A

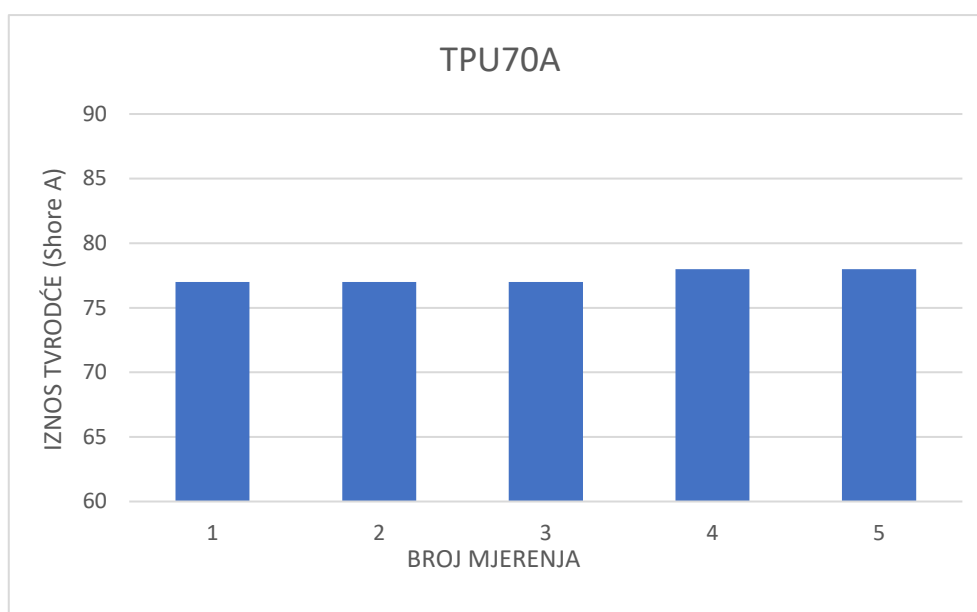
	MATERIJALI
	TPU60A
BROJ MJERENJA	IZNOS TVRDOĆE
1	67
2	68
3	67
4	68
5	68
SREDNJA VRIJEDNOST	67,6
STANDARDNA DEVIJACIJA	0,54772



Graf 1. Grafički prikaz rezultata ispitivanja TPU60A

Tablica 5..Tablični prikaz rezultata ispitivanja TPU70A

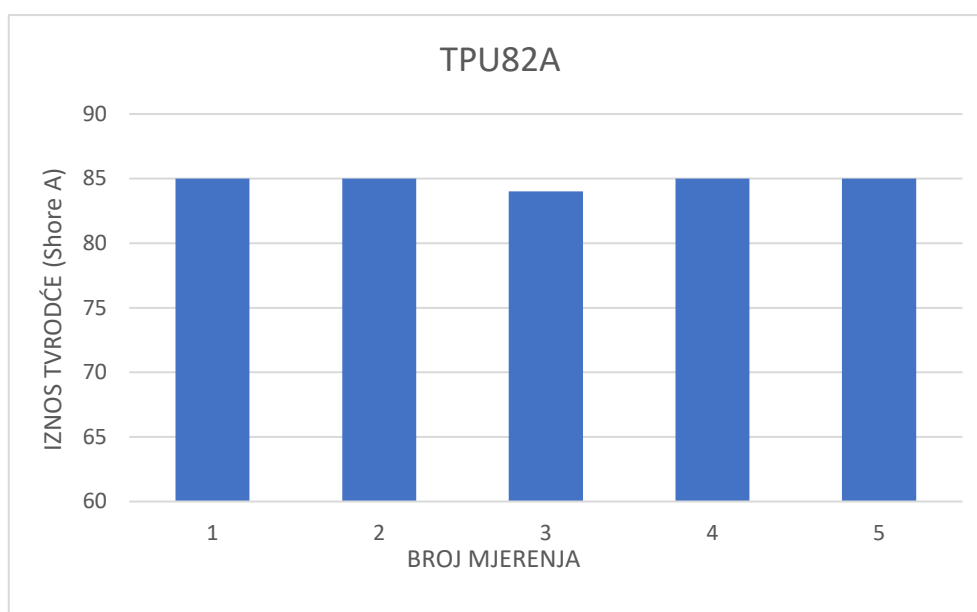
	MATERIJAL
	TPU70A
BROJ MJERENJA	IZNOS TVRDOĆE
1	77
2	77
3	77
4	78
5	78
SREDNJA VRIJEDNOST	77,4
STANDARDNA DEVIJACIJA	0,54772



Graf 2. Grafički prikaz rezultata ispitivanja TPU70A

Tablica 6. Tablični prikaz rezultata ispitivanja TPU82A

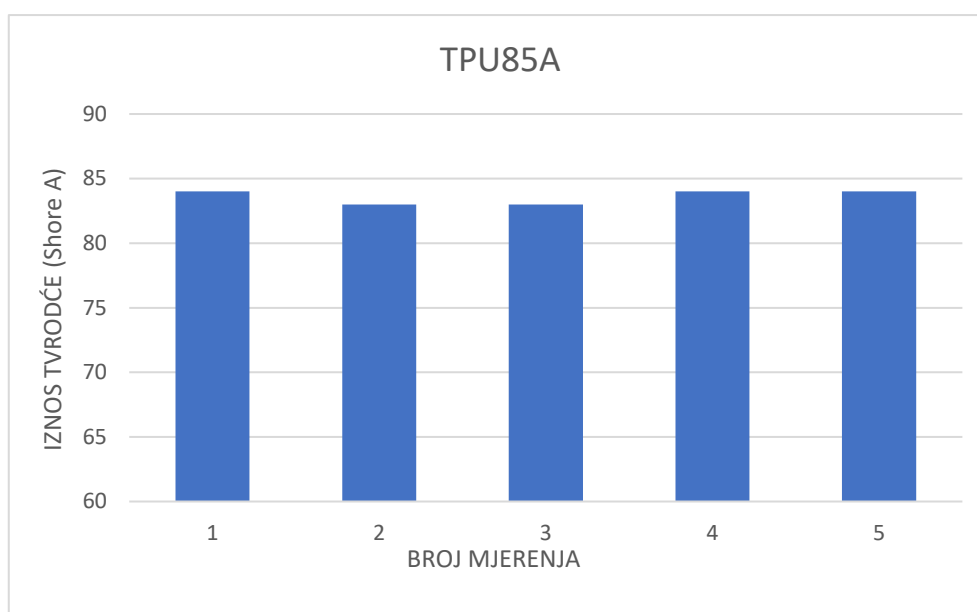
	MATERIJAL
	TPU82A
BROJ MJERENJA	IZNOS TVRDOĆE
1	85
2	85
3	84
4	85
5	85
SREDNJA VRIJEDNOST	84,8
STANDARDNA DEVIJACIJA	0,44721



Graf 3. Grafički prikaz rezultata ispitivanja TPU82A

Tablica 7. Tablični prikaz rezultata ispitivanja TPU85A

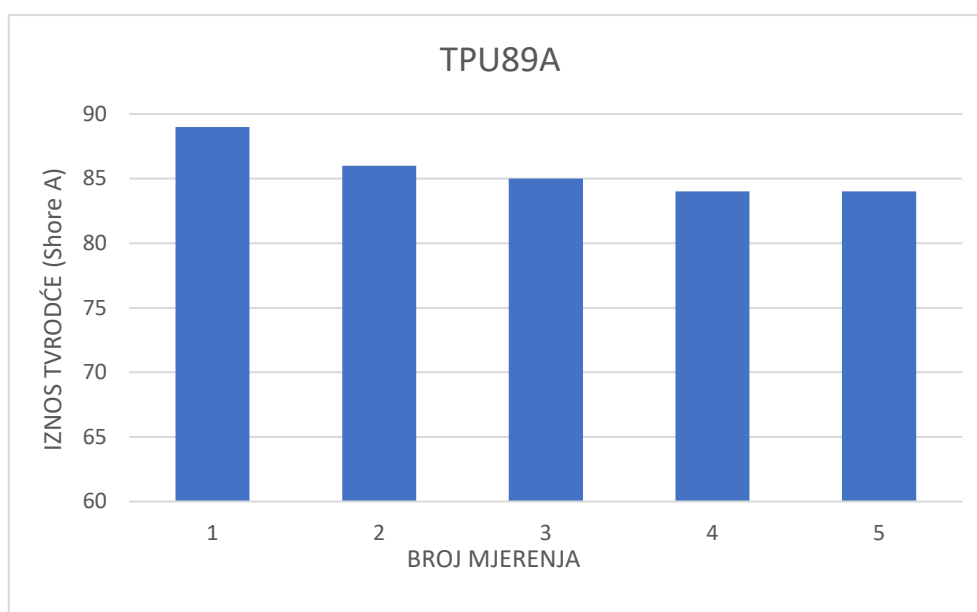
	MATERIJAL
	TPU85A
BROJ MJERENJA	IZNOS TVRDOĆE
1	84
2	83
3	83
4	84
5	84
SREDNJA VRIJEDNOST	83,6
STANDARDNA DEVIJACIJA	0,54772



Graf 4. Grafički prikaz rezultata ispitivanja TPU85A

Tablica 8. Tablični prikaz rezultata ispitivanja TPU89A

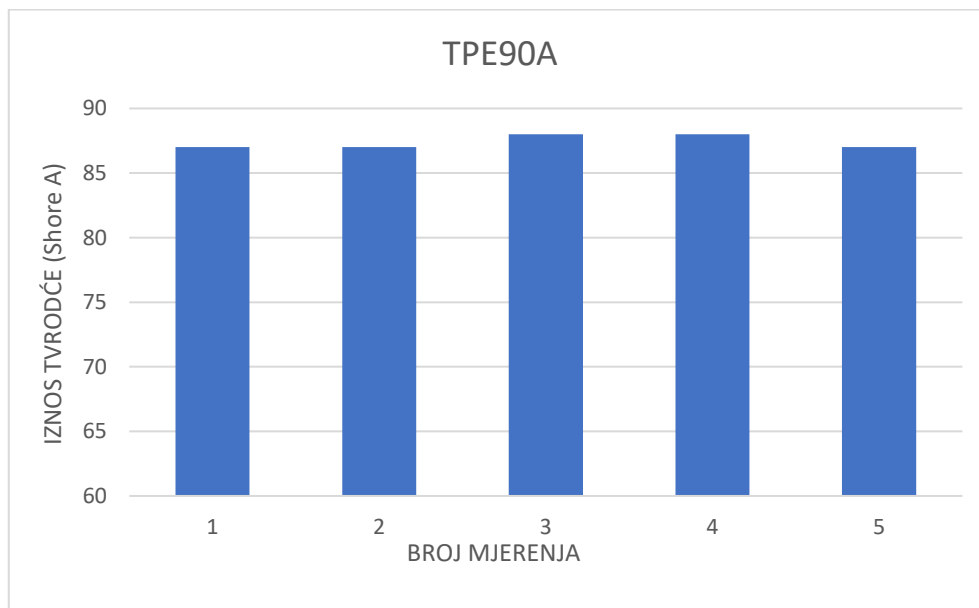
	MATERIJAL
	TPU89A
BROJ MJERENJA	IZNOS TVRDOĆE
1	89
2	86
3	85
4	84
5	84
SREDNJA VRIJEDNOST	85,6
STANDARDNA DEVIJACIJA	2,07364



Graf 5. Grafički prikaz rezultata ispitivanja TPU89A

Tablica 9. Tablični prikaz rezultata ispitivanja TPE90A

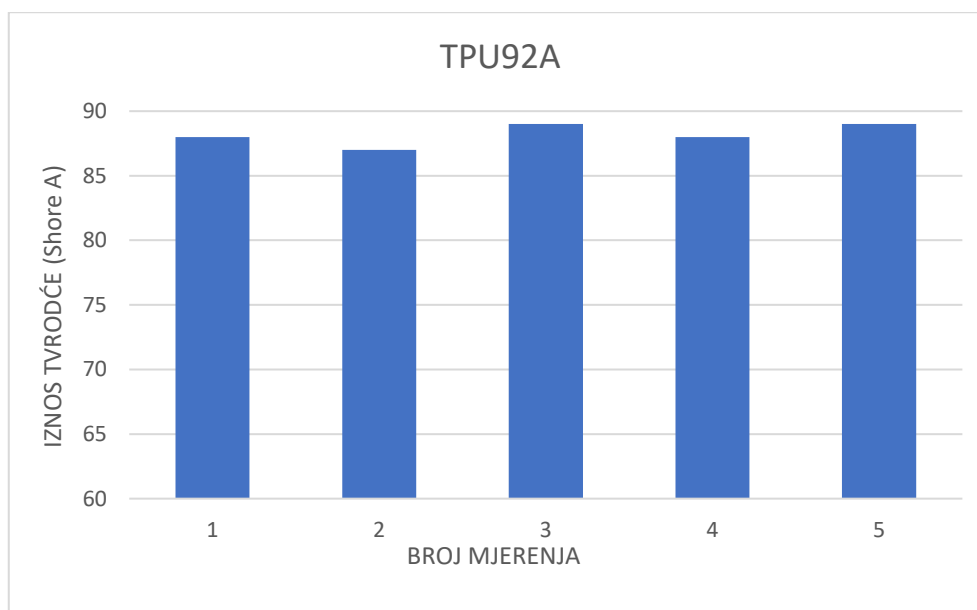
	MATERIJAL
	TPE 90A
BROJ MJERENJA	IZNOS TVRDOĆE
1	87
2	87
3	88
4	88
5	87
SREDNJA VRIJEDNOST	87,4
STANDARDNA DEVIJACIJA	0,54772



Graf 6. Grafički prikaz rezultata ispitivanja TPE90A

Tablica 10.Tablični prikaz rezultata ispitivanja TPU92A

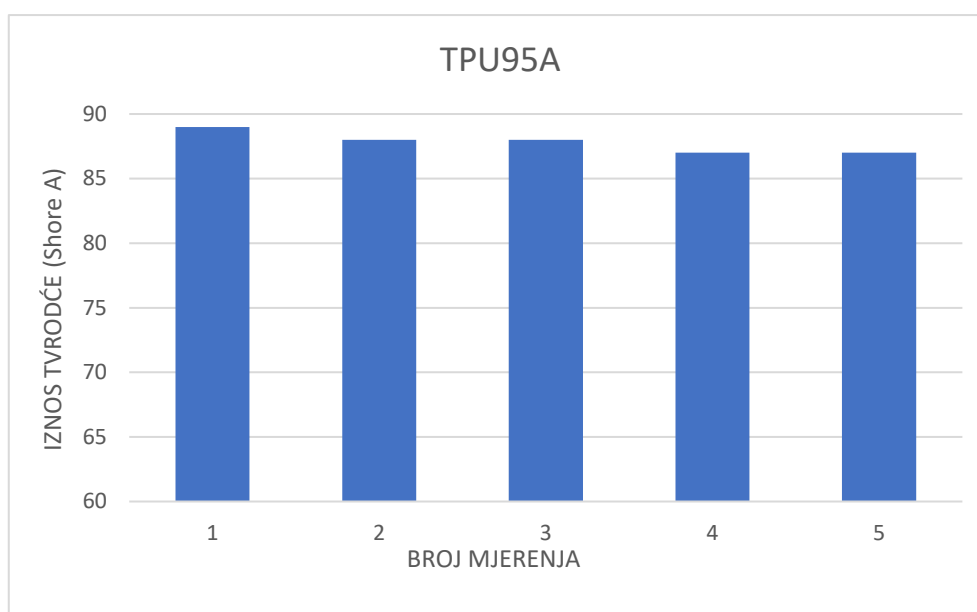
	MATERIJAL
	TPU92A
BROJ MJERENJA	IZNOS TVRDOĆE
1	88
2	87
3	89
4	88
5	89
SREDNJA VRIJEDNOST	88,2
STANDARDNA DEVIJACIJA	0,83666



Graf 7. Grafički prikaz rezultata ispitivanja TPU92A

Tablica 11.Tablični prikaz rezultata ispitivanja TPU95A

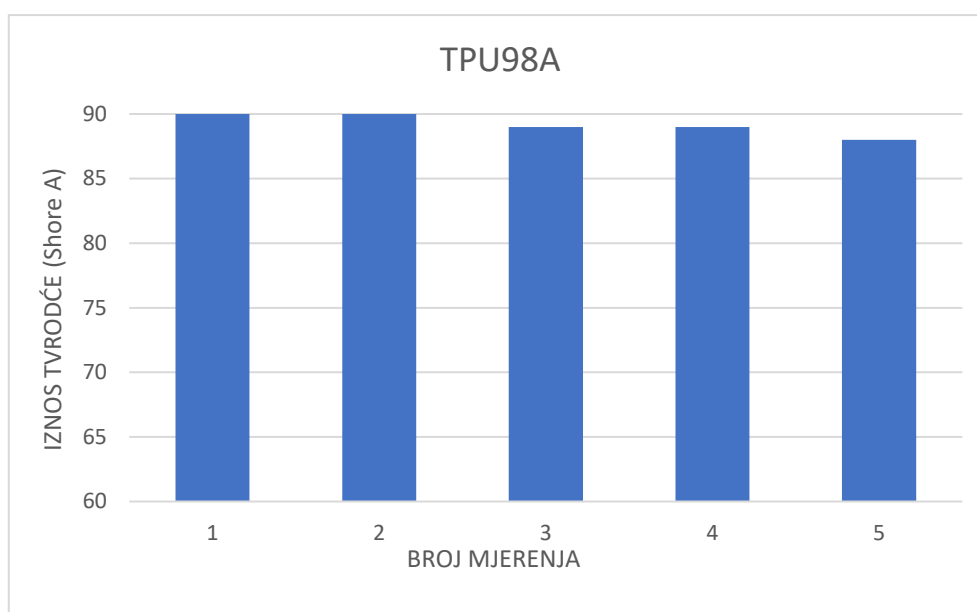
	MATERIJAL
	TPU95A
BROJ MJERENJA	IZNOS TVRDOĆE
1	89
2	88
3	88
4	87
5	87
SREDNJA VRIJEDNOST	87,8
STANDARDNA DEVIJACIJA	0,83666



Graf 8. Grafički prikaz rezultata ispitivanja TPU95A

Tablica 12.Tablični prikaz rezultata ispitivanja TPU98A

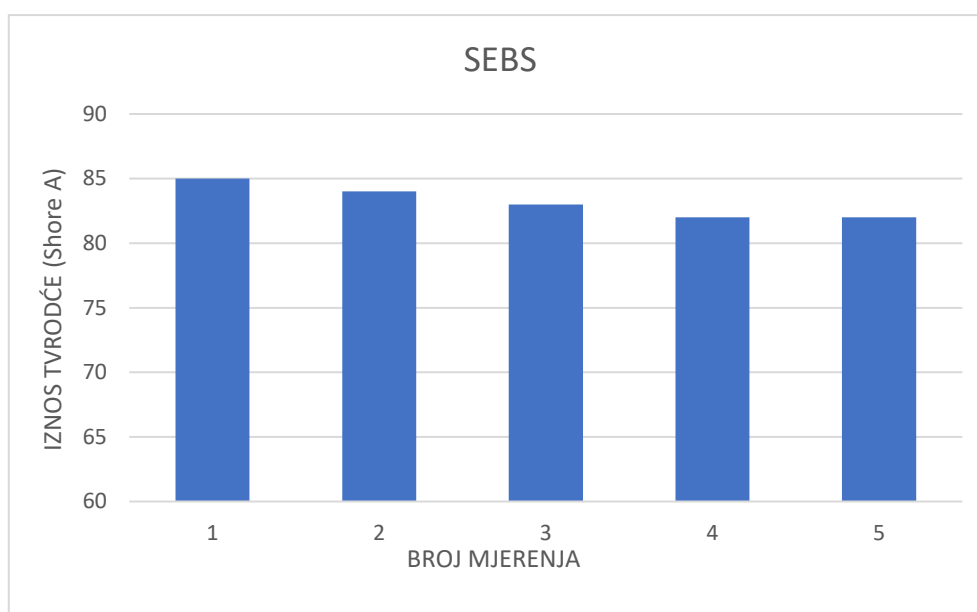
	MATERIJAL
	TPU98A
BROJ MJERENJA	IZNOS TVRDOĆE
1	90
2	90
3	89
4	89
5	88
SREDNJA VRIJEDNOST	89,2
STANDARDNA DEVIJACIJA	0,83666



Graf 9. Grafički prikaz rezultata ispitivanja TPU98A

Tablica 13.Tablični prikaz rezultata ispitivanja SEBS

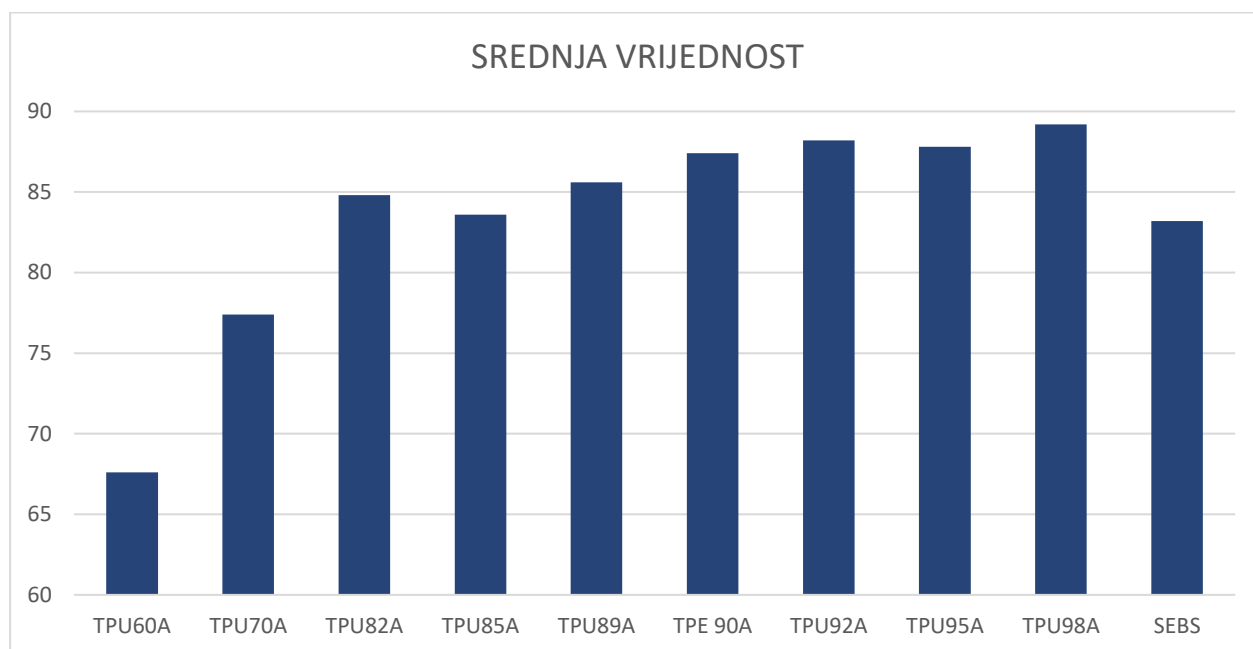
	MATERIJAL
	SEBS
BROJ MJERENJA	IZNOS TVRDOĆE
1	85
2	84
3	83
4	82
5	82
SREDNJA VRIJEDNOST	83,2
STANDARDNA DEVIJACIJA	1,30384



Graf 10. Grafički prikaz rezultata ispitivanja SEBS

6. Analiza rezultata

Rezultati mjerenja grupirani su prema materijalu i broju mjerenja. Za svaki materijal prikazani su pojedini iznosi svakog mjerenja na temelju kojih se izračunava srednja vrijednost pomoću aritmetičke sredine za svaki od 10 ispitanih materijala. Standardna devijacija govori koliko su pojedinačna mjerenja odstupala od srednje vrijednosti.



Graf 11. Grafički prikaz srednjih vrijednosti rezultata ispitivanja

Nakon odrađenog ispitivanja, dobiveni su predvidljivi rezultati, odnosno pretpostavka je da će dobiveni rezultati biti približni veličini u nazivu materijala. Prema dobivenim srednjim vrijednostima daje se zaključiti da materijali koji imaju veću oznaku u nazivu imaju veću tvrdoću u odnosu na materijale s nižom oznakom. Najveća dobivena tvrdoća ispitivanjem je dobivena kod materijala TPU98A, a zatim slijedi TPU92A, dok najmanju tvrdoću ima TPU60A.

Tablica 14. Rezultati ispitivanja Shore A metodom

		MATERIJALI									
BROJ MJERENJA	TPU60A	TPU70A	TPU82A	TPU85A	TPU89A	TPE 90A	TPU92A	TPU95A	TPU98A	SEBS	
	IZNOS TVRDOĆE	IZNOS TVRDOĆE	IZNOS TVRDOĆE	IZNOS TVRDOĆE	IZNOS TVRDOĆE	IZNOS TVRDOĆE	IZNOS TVRDOĆE	IZNOS TVRDOĆE	IZNOS TVRDOĆE	IZNOS TVRDOĆE	
1	67	77	85	84	89	87	88	89	90	85	
2	68	77	85	83	86	87	87	88	90	84	
3	67	77	84	83	85	88	89	88	89	83	
4	68	78	85	84	84	88	88	87	89	82	
5	68	78	85	84	84	87	89	87	88	82	
SREDNJA VRJEDNOST	67,6	77,4	84,8	83,6	85,6	87,4	88,2	87,8	89,2	83,2	
STANDARDNA DEVIJACIJA	0,54772	0,54772	0,44721	0,54772	2,07364	0,54772	0,83666	0,83666	0,83666	1,30384	

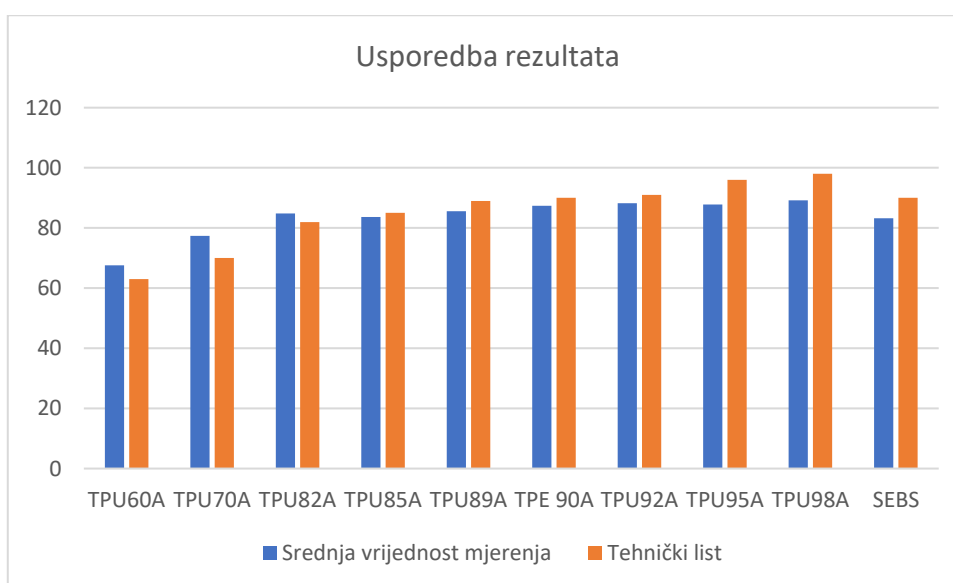
6.1. Usporedba rezultata s tehničkim listom materijala

U tablici broj 15. prikazani su dobiveni rezultati srednjom vrijednosti Shore A metodom ispitivanja. Testne epruvete su nastale aditivnom proizvodnjom, točnije FDM metodom.

Za usporedbu, u tablici su navedene vrijednosti tvrdoće materijala prema tehničkim listovima filamenata, koje su također određene metodom ShoreA. [17], [18], [19], [20]

Tablica 15. Usporedba rezultata s tehničkim listom materijala

Materijali	Srednja vrijednost mjerenja	Tehnički list
TPU60A	67,6	63
TPU70A	77,4	70
TPU82A	84,8	82
TPU85A	83,6	85
TPU89A	85,6	89
TPE90A	87,4	90
TPU92A	88,2	91
TPU95A	87,8	96
TPU98A	89,2	98
SEBS	83,2	90



Graf 12. Usporedba rezultata s tehničkim listom materijala

7. ZAKLJUČAK

Ovim istraživanjem određenih fleksibilnih materijala dobivenih aditivnom proizvodnjom konkretnije FDM metodom, omogućena je usporedba dobivenih rezultata s tehničkim listom filamenata.

Rezultati su pokazali varijacije u tvrdoći ovisno o vrsti materijala i tehnološkim parametrima proizvodnje.

Tvrdoća materija ovisi o postavkama 3D ispisa kao što su: temperatura ispisa, visina sloja, ispunjenost i brzina protoka filameta kroz mlaznicu. Uočena su odstupanja u strukturi slojeva, odnosno pojavljuju se praznine između slojeva uzorka, a koja rezultiraju minimalnim razlikama između izmjerenih vrijednosti i tehničkih listova.

S obzirom na to da su prikazane vrijednosti standardne devijacije rezultata, vidljivo je da su odstupanja mala, stoga srednja vrijednost dobro predstavlja rezultate.

Dodatna istraživanja mogu se usmjeriti na optimizaciju proizvodnih procesa kako bi se smanjila odstupanja u svojstvima materijala koja želimo postići.

LITERATURA

- [1] Kostadin T.: Interna skripta, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2016
- [2] Franz M: Mehanička svojstva materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1998
- [3] <https://www.ispitivanje.com/smjernice-za-ispitivanje-tvrdoce/> (30.10.2024.)
- [4] https://www.researchgate.net/figure/The-principle-diagram-of-the-Brinell-hardness-trial_fig1_326736153 (30.10.2024.)
- [5] Državni zavod za mjeriteljstvo: Metalni materijali, Ispitivanje tvrdoće prema Brinellu, Narodne novine, Zagreb, 2000
- [6] Ivaniš D.: Određivanje tvrdoće materijala Vickersovom metodom uz različita opterećenja, Zagreb, 2009
- [7] Kraut B.: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga, Zagreb, 1988
- [8] [https://www.xometry.com/resources/materials/shore-a-hardness-scale/#:~:text=The%20Shore%20A%20hardness%20\(durometer,value%2C%20the%20harder%20the%20material](https://www.xometry.com/resources/materials/shore-a-hardness-scale/#:~:text=The%20Shore%20A%20hardness%20(durometer,value%2C%20the%20harder%20the%20material) (03.11.2024.)
- [9] <https://www.walker-rubber.co.uk/knowledge-hub/measuring-rubber-hardness-365> (03.11.2024.)
- [10] Maričić S., Kršulja M., Veljović I.: Tehnologija II, Sveučilište u Puli, Pula, 2018
- [11] Pomenić L.: Materijali 1 – Polimeri, Sveučilište u Puli, Pula, 2014
- [12] N. Sonički, Struktura materijala, Veleučilište u Karlovcu, 1. izdanje, 2010
- [13] <https://www.3dprintaj.com/sirok-izbor-opreme-za-3d-print/recreus-filaflex-60a/> (25.11.2024.)
- [14] <https://izit.hr/tehnologije/#fdm> (25.11.2024.)
- [15] Vojnović B.: Mehanička svojstva fleksibilnih materijala izrađenih aditivnom tehnologijom; Karlovac, 2024
- [16] <https://web.archive.org/web/20120324173555/http://www.ccsi-inc.com/t-durometer-testing.pdf> (03.12.2024.)
- [17] <https://recreus.com/gb/3-filaments> (18.01.2025.)
- [18] <https://shop.fillamentum.com/en-in/collections/flexfill-tpu-flexible-filament> (18.01.2025.)
- [19] https://azurefilm.com/product/flexible-filament-85a-black/?_gl=1*1dz20qx*_up*MQ..*_ga*MTMzMzk3MjQ4Mi4xNzM3MjlyMTIy*_ga_P213F6C6P*MTczNzlyMjExOC4xLjAuMTczNzlyMjE1Mi4wLjAuMzMxNzQzODAz (18.01.2025.)
- [20] <https://printer3d.hr/shop/3dtrcek-tpu-89a-0-7kg/> (18.01.2025.)