

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE

**MJERENJE DEFORMACIJE MATERIJALA MEHANIZMOM  
PUZANJA**

Student: Denis Žagar

Mentor: dr.sc. Sebastijan Orlić

## Sadržaj

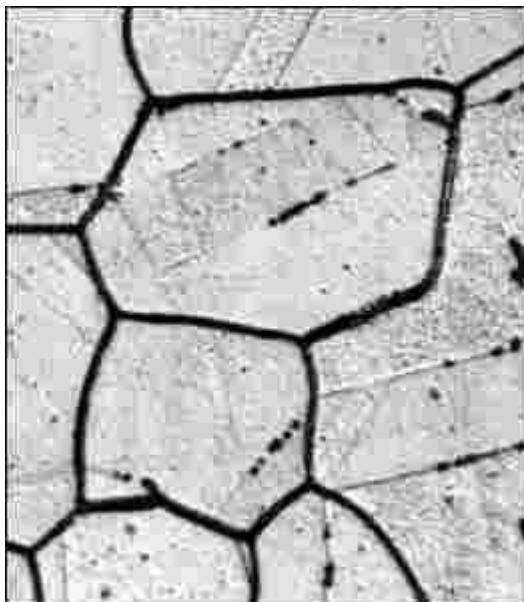
1.	Uvod .....	1
2.	Opći dio.....	2
2.1.	Mehanizmi puzanja .....	4
3.	Aparatura.....	6
4.	Postupak mjerenja.....	8
5.	Dobiveni podaci i obrada podataka.....	11
6.	Mogućnosti za daljnji razvoj metode .....	13
7.	Zaključci .....	14
8.	Literatura .....	15

## **1. Uvod**

Deformacija puzanjem materijala je vrlo važan fenomen za proučavanje u današnje vrijeme kad se obraća velika pozornost na sigurnost i kvalitetu proizvoda. Kako bi mogli predvidjeti ponašanje materijala u realnim uvjetima bitna su testiranja istoga prije plasiranja na tržiste. Kao što nam je poznato materijali imaju svojstvo toplinskog istezanja, gdje im se povećanjem temperature povećava i sami volumen što uzrokuje naprezanja te šteti operativnoj funkciji materijala. U ovom radu je razvijena vrlo jednostavna metoda za proučavanja mehanizma i stupnja puzanja. Razumijevanje mehanizma puzanja nam omogućuje predviđanje svojstava materijala u realnim uvjetima kao i razvoj novih materijala s poboljšanim željenim svojstvima. Težište je stavljen na jednostavnost metode zbog mogućnosti široke uporabe kao i smanjenja cijene takvog ispitivanja. Kao ispitni materijal odabrana je žica za lemljenje zbog jednostavnosti njenog oblikovanja i velikog toplinskog istezanja.

## 2. Opći dio

Puzanje je fenomen gdje pod dugotrajnim opterećenjem (utjecajem konstantne sile) i ovisno o temperaturi dolazi do prijenosa materijala u masi materijala pomoću difuzije te se materijal počinje postupno rastezati. Također se može pojasniti i na način da je puzanje materijala toplinski aktivirani, nepovratni proces, koji nastaje uslijed djelovanja konstantne sile, tijekom duljeg vremenskog perioda i utjecajem povišene temperature. Kao i svi difuzijski procesi, i ovaj je pokretan gradijentom slobodne energije, odnosno kemijskog potencijala koji nastaje primjenom naprezanja. Naprezanje utječe na zrna u materijalu tako što ih izdužuje u smjeru djelovanja naprezanja. To se događa tako što atomi koji nisu unutar zrna raspoređeni u smjeru naprezanja imaju tendenciju difundirati u dio gdje je naprezanje veće, te se na taj način zrno izduljuje. Budući da se to događa unutar zrna, unutar manjih zrna ti atomi moraju prijeći manji put, pa su materijali koji imaju sitnija zrna podložniji puzanju.

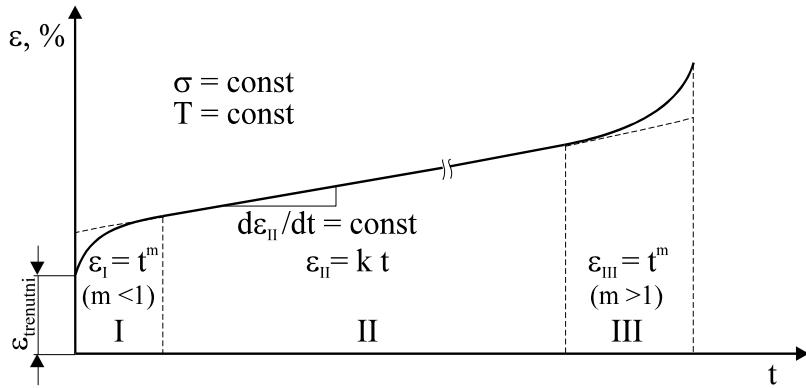


Slika 1. Zrna i granice zrna u masi materijala (SEM mikrografija)

Na pojavu puzanja utječe :

- Temperatura tališta materijala
- Vrsta kristalne rešetke i kemijske veze
- Mikrostruktura materijala

U većini slučajeva temperatura pri kojoj se događa puzanje je oko 30% temperature tališta tog materijala. U slučaju plastika i olovnih materijala, kakav je i ispitivani materijal u ovom radu, puzanje se događa već pri sobnim temperaturama[1,2].



Slika 2. Grafički prikaz puzanja materijala

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

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

$$\varepsilon_1 = t^m$$

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

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

$$\varepsilon_2 = k \cdot t$$

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

$$\varepsilon_3 = t^m$$

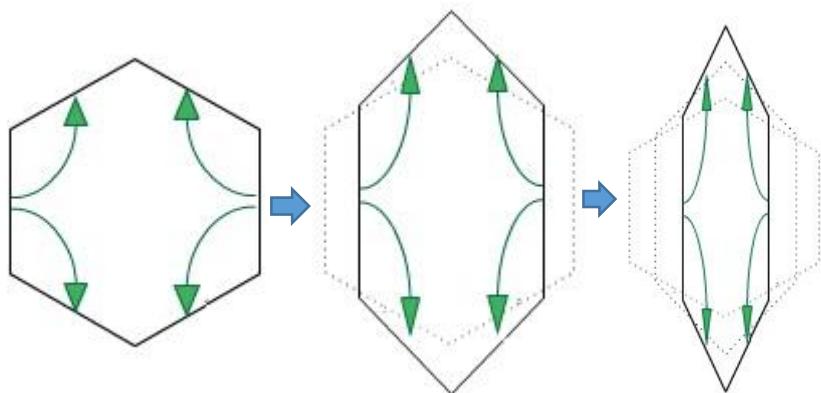
a eksponent m je veći od 1. U tom trećem stadiju puzanja dolazi konačno i do loma epruvete[3].

## 2.1. Mehanizmi puzanja

### Difuzijsko puzanje

#### a) Nabarro – Herringovo puzanje

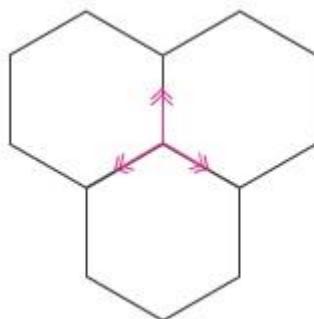
Nabarro-Herringovo puzanje gotovo da ne ovisi o naprezanju, već o veličini kristalnog zrna, te zbog toga brzina puzanja opada povećanjem veličine kristalnog zrna. Da bi došlo do difuzije u materijalu, susjedna stranica rešetke ili intersticijska stranica u kristalnoj strukturi mora biti slobodna. Ova vrsta difuzije se događa u masi zrna te je preferirana pri visokim temperaturama.



Slika 3. Slikoviti prikaz Nabarro-Herringovog mehanizma puzanja

#### b) Coble-ovo puzanje

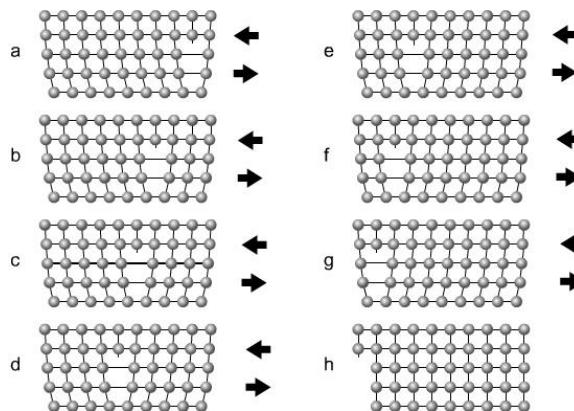
Kod Coble-ovog puzanja, difuzija se odvija na granicama zrna kako bi se ona produžila na osi naprezanja, te je kod ovog mehanizma mnogo važnija veličina zrna nego kod Nabarro-Herringovog mehanizma. Također ovaj mehanizam puzanja je preferiran pri nižim temperaturama nego Nabarro-Herringov mehanizam, iako postoji mala ovisnost o temperaturi jer pri povećanju temperature, povećava se i difuzija na granicama zrna.



Slika 4. Slikoviti prikaz Coble-ovog mehanizma puzanja

## Dislokacijsko puzanje

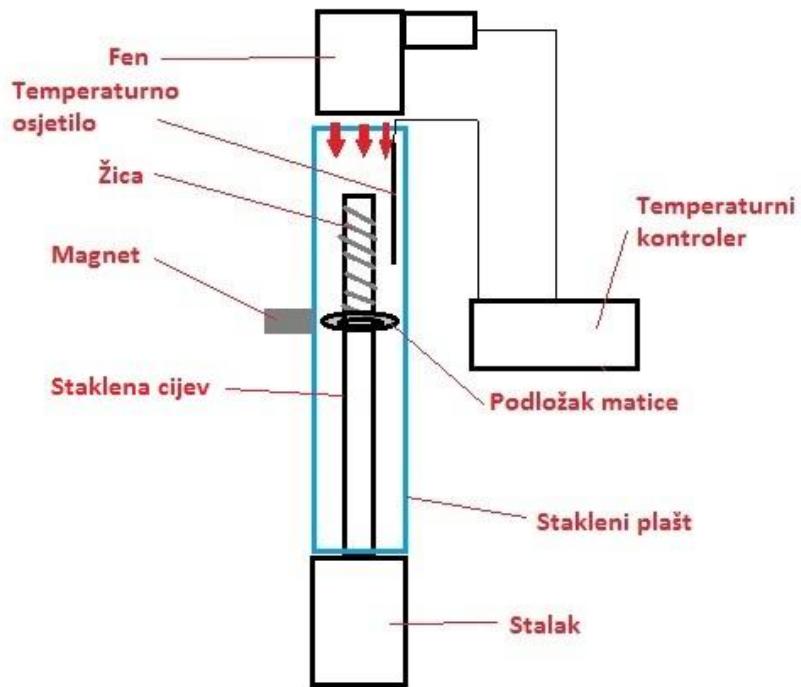
Ovaj mehanizam puzanja uključuje gibanje dislokacija kroz materijal, te se pojavljuje pri visokim naprezanjima. Mehanizmu dislokacijskog puzanja je potrebno malo topline da bi se pokrenulo kretanje dislokacija, te se može odvijati pri niskim temperaturama[4,5].



Slika 5. Slikoviti prikaz dislokacijskog puzanja

### 3. Aparatura

Aparatura za provođenje ispitivanja predviđena je prema shemi:



Slika 6. Shema aparature

Dijelovi aparature:

- Magnet (neodimijski) – služi za držanje i otpuštanje podloška matice u trenutku početka mjerena
- Podložak matice – unutarnji promjer 13 mm, a vanjski 25 mm, služi za zadržavanje namotane žice u početnoj poziciji prije početka mjerena, te je poželjno da unutarnji promjer bude neznatno veći od promjera staklene cijevi na koju je žica namotana kako bi ju mogao zadržati u željenom položaju
- Stalak – u njega se stavlja staklena cijev kako bi ona čvrsto stajala u uspravnom položaju
- Staklena cijev – na staklenu cijev se namotava žica kojoj mjerimo puzanje, te je staklena iz razloga što želimo smanjiti trenje između žice i cijevi kako bi žica nesmetano puzala
- Stakleni plašt – može biti i pleksiglas, kod plašta je bitno da bude proziran kako bi se nesmetano moglo pratiti mjereno te kako se toplina iz fena ne bi raspršivala u okolinu

- Žica – Cockson Electronics, Fluitin 1532, promjer: 0,75 mm, sastav: S-Sn60Pb38Cu2 – koristi se „lemna“ žica zbog velikog toplinskog istezanja, te je lakše primijetiti promjene pri nižim temperaturama, na staklenu cijev namotava se 25 namotaja kako bi se mjerjenje moglo vršiti između 12. i 13. namotaja, također je važno napomenuti da bi žica trebala biti što manjeg promjera kako bi puzanje, odnosno istezanje žice bilo što primjetljivije



Slika 7. Žica namotana na graduiranoj pipeti (cijev)

- Temperaturno osjetilo – Termocouple type J – postavljeno unutar staklenog plašta u blizini namotane žice kako bi davalо što bolju povratnu informaciju o temperaturi temperaturnom kontroleru
- Fen – Remington Pro-air shine (2300 W) – služи za zagrijavanje ispitivane, namotane žice za lemljenje
- Temperaturni kontroler – Cole–Palmer Instrument Co. Digi-Sense temperature controler R/S 89000-10 - služи za kontroliranje temperature unutar staklenog plašta gdje mu temperaturno osjetilo daje povratnu informaciju o temperaturi te potom po potrebi regulira zagrijavanje, odnosno rad fena
- Snimač/štoperica – mobitel - za potrebe određivanja vremenskog intervala od 60 s nakon kojeg se vrši očitavanje
- Selfie štap – držač mobitela na optimalnoj poziciji

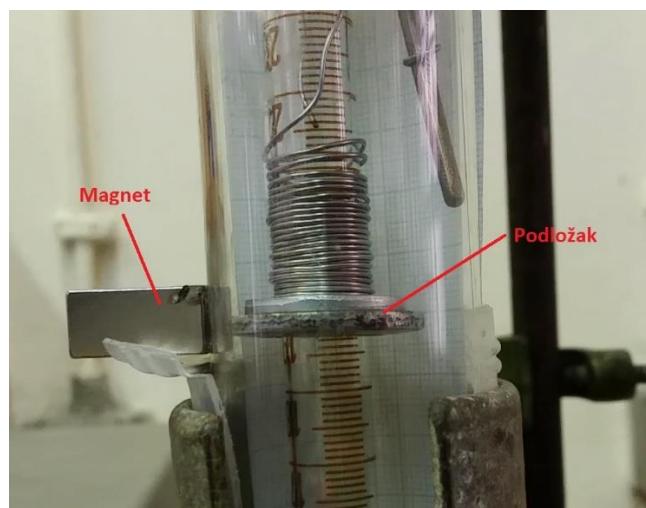


Slika 8. Fotografija sastavljene aparature

#### 4. Postupak mjerjenja

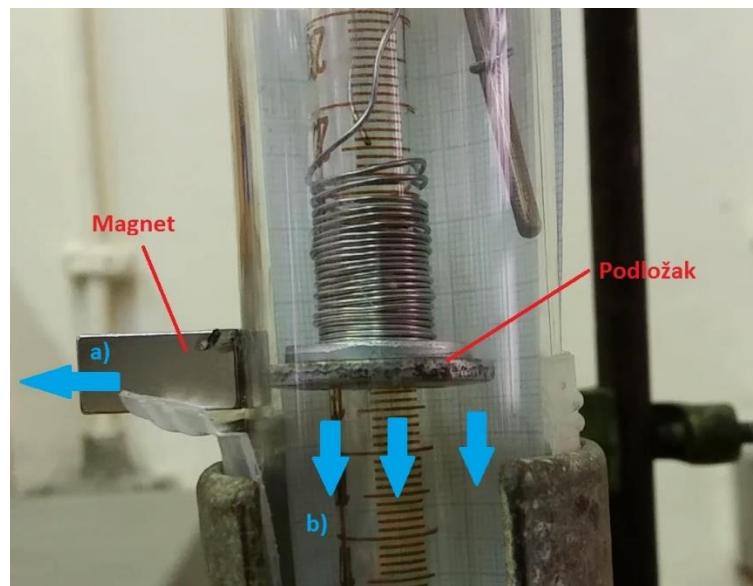
Nakon što je aparatura sastavljena prema shemi, prema sljedećim koracima se provodi mjerjenje:

- i. Magnetom se ručno podiže podložak matice u položaj gdje drži žicu, te se ostavljaju magnet i podložak u tom položaju



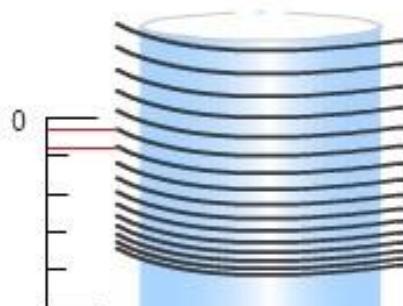
Slika 9. Početni položaj magneta i podloška matice

- ii. Uključi se temperaturni kontroler, te se na kontroleru namjesti željena temperatura
- iii. Čeka se postizanje željene temperature, te kad je postignuta čeka se 1 min kako bi sustav u svim svojim dijelovima izjednačio temperaturu
- iv. Nakon postizanja željene temperature u sustavu, magnet se ručno odmiče od staklene cijevi (a), te podložak matice koji drži žicu opada pod utjecajem sile teže (b)



Slika 10. a) smjer odmicanja magneta; b) smjer pada podloška matice

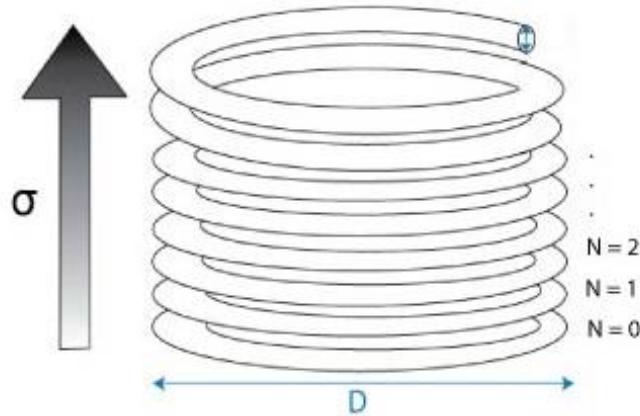
- v. U trenutku odmicanja magneta od staklenog plašta i početka pada podloška matice, pokreće se štoperica kojom se mjeri vremenski interval od 60s
- vi. U trenutku kada štoperica pokaže 60s vrši se očitavanje razmaka između 12. i 13. (srednjih) navoja žice na milimetarskoj skali koja je postavljena uz ili iza žice



Slika 11. Prikaz očitavanja razmaka navoja

Napomena:

- razmak između navoja se očitava kod navoja koji su u sredini (u našem slučaju 12. i 13.) zbog toga što je kod njih vrijednost naprezanja zapravo prosjek naprezanja u žici uslijed djelovanja težine same žice



Slika 12. Prikaz smjera rasta naprezanja u žici

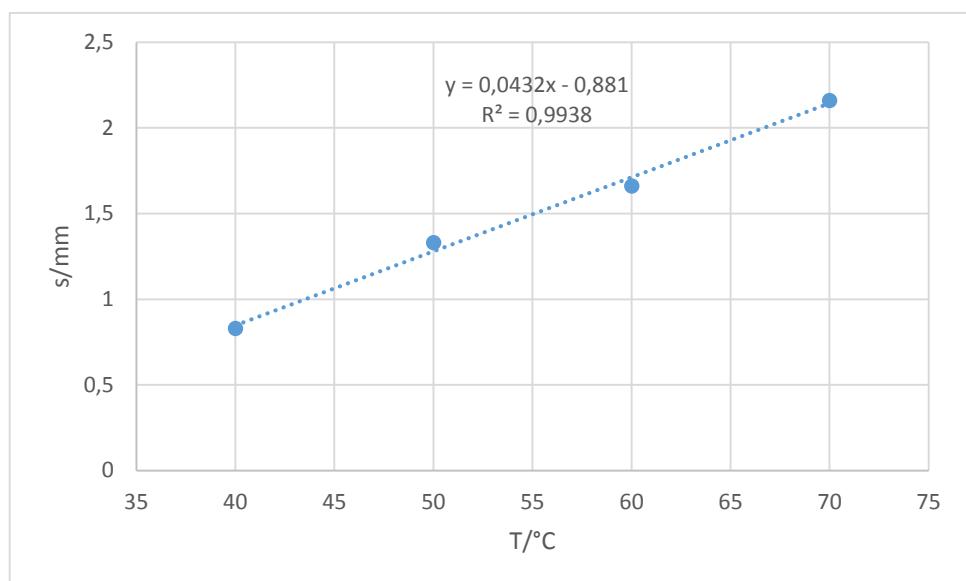
- mjerjenje se treba provoditi na minimalno dvije različite temperature kako bi se mogao konstruirati graf i dobiti podaci potrebni za proračune
- poželjno je provesti 3 mjerjenja po temperaturi kako bi se smanjila mogućnost pogreške
- radi pojednostavljenja očitavanja rezultata mjerjenja, poželjno je mjerjenje snimati video kamerom, te poslije iz video isječka očitati rezultat

## 5. Dobiveni podaci i obrada podataka

Tablica 1. Podaci dobiveni mjerjenjem razmaka između 12. i 13. navoja pri različitim temperaturama nakon 60 sekundi

T/°C	Δs <sub>1</sub> /mm	Δs <sub>2</sub> /mm	Δs <sub>3</sub> /mm	Δs <sub>sr</sub> /mm
40	1	0,5	1	0,83
50	1,5	1,5	1	1,33
60	1	2	2	1,66
70	2	2	2,5	2,16

Napomena: vrijednosti s<sub>sr</sub>/mm su prosjek 3 mjerjenja razmaka pri istoj temperaturi

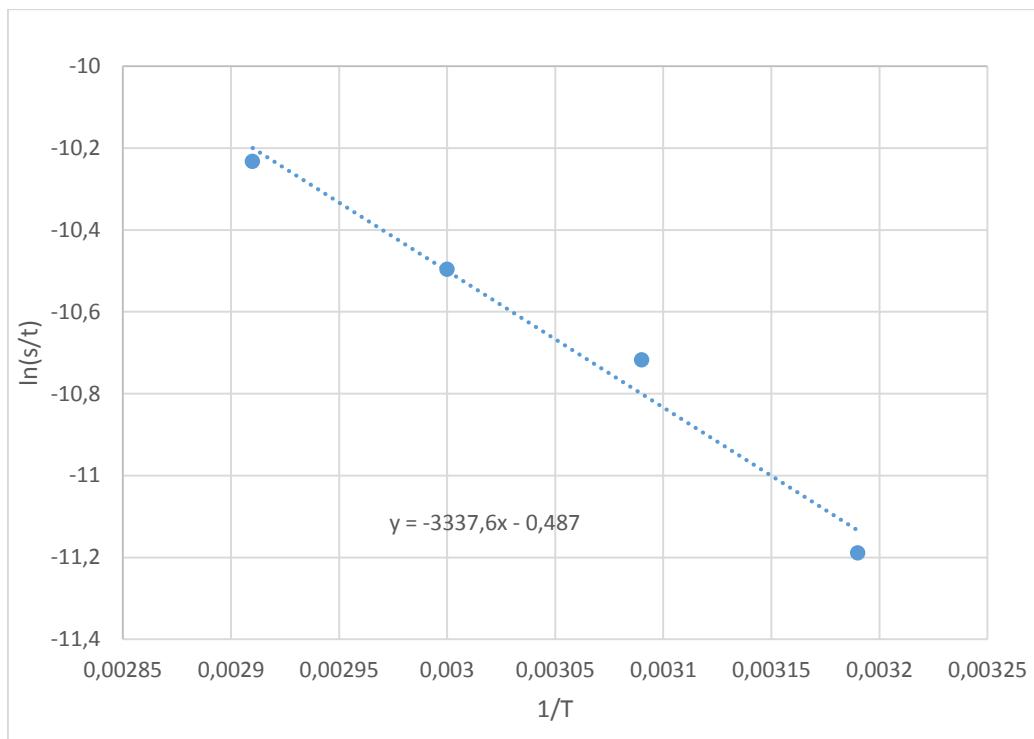


Graf 1. Prikaz ovisnosti razmaka 12. i 13. navoja o temperaturi

Iz dobivenog grafā može se uočiti kako su mjerena dobra zbog linearnosti pravca, što znači da se materijal linearno isteže kako je i očekivano, iako se ne može iz tih podataka izračunati koeficijent linearnog istezanja zbog toga što je žica spiralno postavljena na staklenu cijev, n rezultat dobro služi za provjeru očitanja i rada same aparature.

Tablica 2. Prikaz podataka dobivenih mjerjenjem razmaka između 12. i 13. navoja nakon 60 sekundi

T/°C	Δs <sub>sr</sub> /mm	1/T	s/t mm/s	ln(s/t) m/s
40	0,83	0,00319	0,01383	-11,1886
50	1,33	0,00309	0,02216	-10,71722
60	1,66	0,003	0,02766	-10,4955
70	2,16	0,00291	0,036	-10,2319



Graf 2. Prikaz odnosa recipročne vrijednosti temperature i prirodnog logaritma razmaka nakon 60 sekundi

Iz grafa 2. najvažniji podatak nam je nagib pravca koji služi za izračun energije aktivacije iz izraza:

$$\text{Nagib pravca} = -E_a / R$$

$$-E_a / R = -3337,6$$

$$E_a = 3337,6 * R$$

$$E_a = 27,75 \text{ kJ/mol}$$

## **6. Mogućnosti za daljnji razvoj metode**

Mogućnosti za daljnji razvoj metode su velike. Prva promjena koja bi trebala uslijediti je postavljanje industrijskog fena, tj. fena koji je izdržljiviji te može postići više temperature kako bi se mogli ispitivati i materijali višeg tališta, jer da bi došlo do pojave puzanja potrebno je postići oko 30% temperature tališta ispitivanog materijala. Također, jedna od ideja je markiranje mjerenih navoja te pomoću markacije očitavanje pomaka optičkim senzorima, koji bi udaljenost dvaju navoja mogli očitati mnogo preciznije nego ljudsko oko. Još jedna od ideja je postavljanje automatskog izmicanja magneta od staklenog plića, pri čemu bi podložak matice pao, štoperica se aktivirala, te bi mjerenje započelo. Nakon toga pri vremenu od 60 sekundi, prije spomenuti optički senzori bi očitali vrijednost razmaka između navoja. Uglavnom, sve se svodi na daljnju automatizaciju mjerenja čime bi se povećala i sama preciznost i konstantnost mjerenja.

## **7. Zaključci**

Iz dobivenih rezultata za energiju aktivacije koja iznosi 27,5 kJ/mol možemo zaključiti da se radi o difuzijskom puzanju koje literaturno iznosi oko 30 kJ/mol. Također zbog rada pri relativno niskim temperaturama i naprezanjima zaključujemo da se događa Coble-ov tip puzanja, odnosno difuzija materijala se događa u području granica zrna samog materijala. Kako su eksperimentalne vrijednosti vrlo bliske teoretskim može se reći da je sastavljena aparatura funkcionalna, što je i cilj rada. Važno je naglasiti da sastavljena aparatura ima brojne prednosti pred drugim metodama za ispitivanje puzanja materijala, a to su jednostavnost aparature, cijena, brzina samoga eksperimenta i rad pri niskim temperaturama, te je metoda vrlo perspektivna za daljnji razvoj.

## **8. Literatura**

1. "Ispitivanje materijala", doc. dr. sc. Stoja Rešković, Metalurški fakultet Sveučilišta u Zagrebu, [www.scribd.com/doc](http://www.scribd.com/doc), 2010.
2. "Karte mehanizama deformacija", Marko Jakovac, Mehanika materijala, Tehnički fakultet Rijeka, [www.riteh.uniri.hr](http://www.riteh.uniri.hr), 2011.
3. [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1447838351-0-mehanickasvojstvamaterijala.doc](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1447838351-0-mehanickasvojstvamaterijala.doc) (datum pristupa: 5.2.2016)
4. <http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/creep/index.php> (datum pristupa: 23.1.2016)
5. <http://bs.scribd.com/doc/197599368/Nauka-o-Materijalima-Fuad-Catovic#scribd>  
(datum pristupa: 28.1.2016)