

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo



Univerza v Ljubljani
Fakulteta za matematiko in fiziko



Meritve mehanskih lastnosti komponent tesnilnega sistema

Partnerji: **Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo**
Laboratorij za numerično modeliranje in simulacije
Center za eksperimentalno mehaniko
Laboratorij za okoljske tehnologije v zgradbah
REFLEX Gornja Radgona d.o.o.
Zavod za gradbeništvo Slovenije
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko

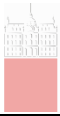
Oznaka ARRS projekta: L2-3172

Naslov ARRS projekta: Razvoj tehničnih smernic za štirislojne zasteklitve

izr. prof. dr. Miroslav Halilovič
vodja projekta



prof. dr. Mihael Sekavčnik
dekan UL FS

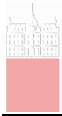


- Partnerji:**
- Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo (UL FS)
 - Laboratorij za numerično modeliranje in simulacije (LNMS)
 - Center za eksperimentalno mehaniko (CEM)
 - Laboratorij za okoljske tehnologije v zgradbah (LOTZ)
 - Aškerčeva 6
 - SI-1000 Ljubljana
- REFLEX Gornja Radgona d.o.o.
- Podgrad 4
- SI-9250 Gornja Radgona
- Zavod za gradbeništvo Slovenije (ZAG)
- Dimičeva ulica 12
- SI-1000 Ljubljana
- Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko
- Jadranska ulica 19
- SI-1000 Ljubljana
- Financiranje:** Projekt je finančno podprt s strani javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije ARRS (raziskovalni projekt L2-3172) in podjetja Reflex d.o.o.
- Oznaka ARRS projekta:** L2-3172
- Naslov ARRS projekta:** Razvoj tehničnih smernic za štirislojne zasteklitve
- Vodja projekta:** izr. prof. dr. Miroslav Halilovič
Tel.: (01) 4771 439
E-mail: miroslav.halilovic@fs.uni-lj.si

Naslov poročila: Meritve mehanskih lastnosti komponent tesnilnega sistema

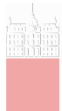
Vodja aktivnosti: izr. prof. dr. Miroslav Halilovič

Avtorji: **dr. Andraž Maček**
izr. prof. dr. Miroslav Halilovič



Kazalo

1. Definicija problema	1
2. Določitev togosti distančnikov in sekundarnega tesnila	1
2.1. Distančniki	1
2.1.1. Izvedba meritev	2
2.1.2. Izmerjeni rezultati.....	3
2.1.3. Določene mehanske lastnosti.....	3
2.2. Sekundarno tesnilo.....	4
2.2.1. Izvedba meritev	4
2.2.2. Izmerjeni rezultati.....	5
2.2.3. Določene mehanske lastnosti.....	6
3. Določitev koeficienta temperaturnega raztezka distančnikov in sekundarnega tesnila.....	7
3.1. Koeficient temperaturnega raztezka distančnikov.....	7
3.2. Koeficient temperaturnega raztezka sekundarnega tesnila.....	8
4. Zaključek.....	9



1. Definicija problema

Za modeliranje mehanskega odziva panela je bilo potrebno določiti mehanske lastnosti posameznih komponent sestava tesnilnega sistema. V okviru predstavljene aktivnosti smo izmerili in določili natezno oz. tlačno togost distančnikov in sekundarnega tesnila (poglavje 2) in temperaturni razteznostni koeficient obeh komponent (poglavje 3).

2. Določitev togosti distančnikov in sekundarnega tesnila

V laboratoriju LNMS smo določili mehanske lastnosti distančnikov in sekundarnega tesnila (zunani sloj - črn elastomer). Mehanska obremenitev je bila zagotovljena z uporabo univerzalnega trgalnega stroja (LNMS-TM1). Odziv na mehansko obremenitev pa je bil merjen z natančnim merilnikom pomika (RDP DCTH100AG-1431A-L10) ali pa z optičnim merilnim sistemom (Dantec Dynamics Q-400), ki deluje na osnovi korelacije digitalnih slik (ang.: *Digital Image Correlation, DIC*).

2.1. Distančniki

S strani proizvajalca panelov smo prejeli vzorce petih različnih tipov distančnikov. Mere prereza in sestav distančnikov so zbrani v preglednici 2.1. Potrebno je določiti togost distančnikov v prečni in vzdolžni smeri.

Preglednica 2.1: Mere in sestav distančnikov.

Oznaka	Višina distančnika [mm]	Širina distančnika [mm]	Sestav distančnika
1	17,48	6,84	pločevina – bel polimer
2	17,54	6,77	pločevina – črn polimer
3	13,38	6,90	pločevina – bel polimer
4	13,38	6,85	pločevina – črn polimer
5	16,58	6,97	pena - folija

2.1.1. Izvedba meritev

Prejeti vzorci distančnikov so bili razrezani na preizkušance dolžine 20 mm (za določitev prečne togosti) in 18,8 mm (za določitev vzdolžne togosti), kot prikazano na sliki 2.1. Višina in debelina distančnika sta ostali nespremenjeni, zapisani sta v preglednici 2.1. Preizkušance smo tlačno obremenili s trgalnim strojem, kjer so bili vstavljeni med dve ravni in vzporedni površini (slika 2.2). Za zagotovitev prave orientacije med preizkusom (obremenitev mora delovati v smeri višine ali dolžine distančnika) je bil uporabljen namenski pripomoček, ki je držal preizkušanec v navpični smeri (slika 2.3).

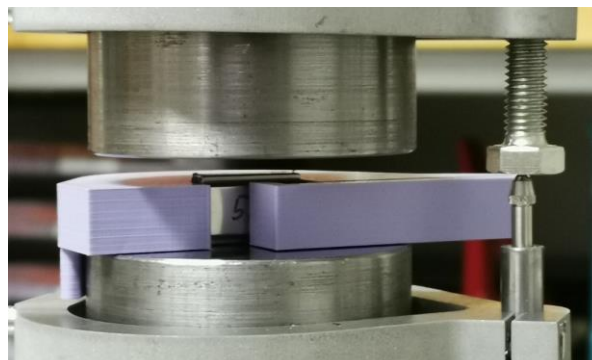
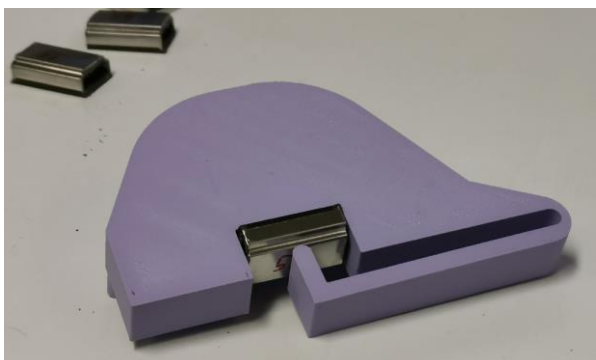
Trgalni stroj je preizkušance obremenjeval s konstantno hitrostjo 0,02 mm/s, vse dokler ni prišlo do porušitve preizkušanca (uklon stranic distančnika).



Slika: 2.1: Primer izrezanih preizkušancev.



Slika: 2.2: Konfiguracija trgalnega stroja za tlačni preizkus.



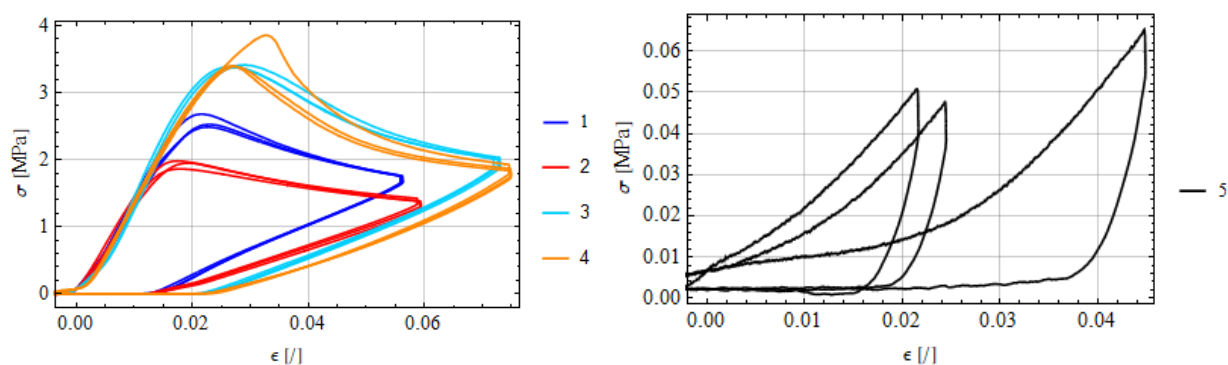
Slika: 2.3: Pripomoček za vpetje preizkušancev.

2.1.2. Izmerjeni rezultati

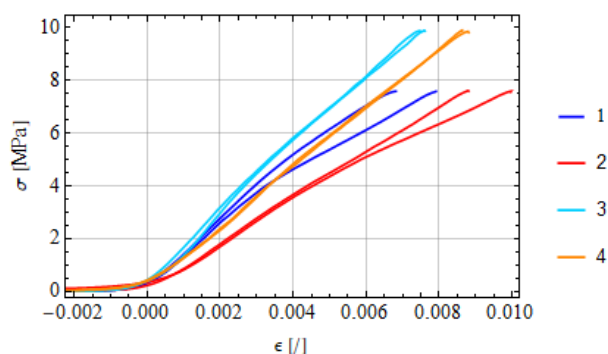
Z opisanimi meritvami smo izmerili silo obremenitve preizkušanca v odvisnosti od skrčka preizkušanca. Določene mehanske lastnosti bodo uporabljene za modeliranje distančnika v poenostavljeni obliki, kot homogen »poln« kos, zato je potrebno določiti njegovo efektivno oziroma nadomestno togost. To smo storili tako, da smo v prvem koraku iz odziva sila-skrček $F(\Delta h)$ izračunali odziv efektivna napetost-deformacija $\sigma(\varepsilon)$:

$$\sigma = \frac{F}{wL}, \quad \varepsilon = \frac{\Delta h}{h},$$

kjer w in h predstavljata širino in višino distančnika (preglednica 2.1), $L=20$ mm pa dolžino preizkušanca (oz. 18,8 mm za vzdolžno togost). Vsi tipi distančnikov so bili preizkušeni s tremi ponovitvami. Izmerjeni odzivi v prečni in vzdolžni smeri so prikazani na sliki 2.4 in 2.5.



Slika: 2.4: Izmerjeni odzivi preizkušancev – distančnikov v prečni smeri.



Slika: 2.5: Izmerjeni odzivi preizkušancev – distančnikov v vzdolžni smeri.

2.1.3. Določene mehanske lastnosti

Prvi del odziva preizkušanca, ki predstavlja obremenjevanje in je relativno linearen, je bil aproksimiran s premico. Naklon te premice predstavlja iskano nadomestno togost distančnika. Togosti za vsak tip distančnika so zbrane v preglednici 2.2, kjer vrednosti predstavljajo povprečno togost vseh treh ponovitev.

Preglednica 2.2: Določene mehanske lastnosti distančnikov.

Oznaka	Nadomestna prečna togost distančnika [MPa]	Nadomestna vzdolžna togost distančnika [MPa]
1	150	1070
2	140	830
3	180	1290
4	155	1150
5	2,45	/

2.2. Sekundarno tesnilo

S strani proizvajalca panelov smo prejeli vzorce sekundarnega tesnila (črn polimer) v obliki ploščatega enoosnega preizkušanca nazivnih mer: debelina 3 mm, širina vratu 6,5 mm, dolžina vratu 25 mm, celotna dolžina 115 mm in širina vpenjalnega dela 25 mm. Pričakujemo, da tesnilo izkazuje hiperelastične mehanske lastnosti, zato so bile izvedene meritve odziva materiala tako na enoosno natezno obremenitev, kot tudi na tlačno.

2.2.1. Izvedba meritev

Prejete preizkušance sekundarnega tesnila smo preizkusili v nateznem in tlačnem območju. Za preizkus v nateznem območju smo prejete preizkušance (slika 2.6) vpeli v trgalni stroj preko samozateznih mehanskih čeljusti (slika 2.7). Preizkušanci so bili obremenjeni s konstantno hitrostjo pomika 0,3 mm/s, njihov odziv pa je bil merjen z optičnim merilnim sistemom DIC. Tri preizkušance smo obremenili natezno pri sobni temperaturi, tri pa pri 60°C.



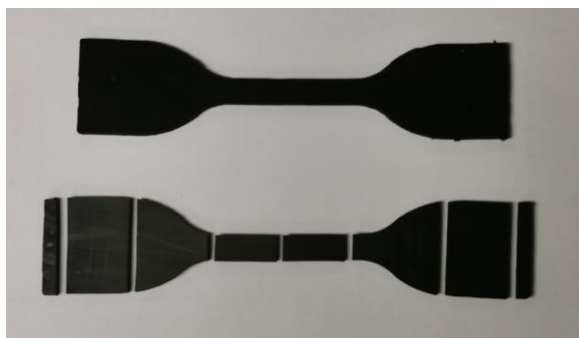
Slika 2.6: Vzorci sekundarnega tesnila.



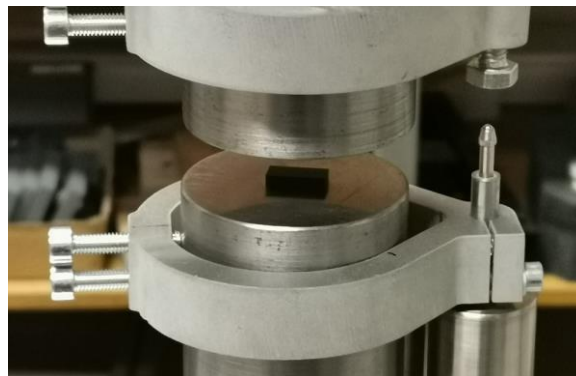
Slika 2.7: Natezni preizkus sekundarnega tesnila.

Z enako eksperimentalno postavitvijo smo en preizkušanec tudi uspešno ciklično obremenili v nateznem in rahlo tlačnem območju (pri sobni temperaturi).

Enega izmed preizkušancev smo razrezali na manjše kose (oblika kvadra, slika 2.8). Posamezne kose smo obremenili tlačno (pri sobni temperaturi) s hitrostjo pomika 0,02 mm/s, odziv pa merili z natančnim merilnikom pomika (slika 2.9).



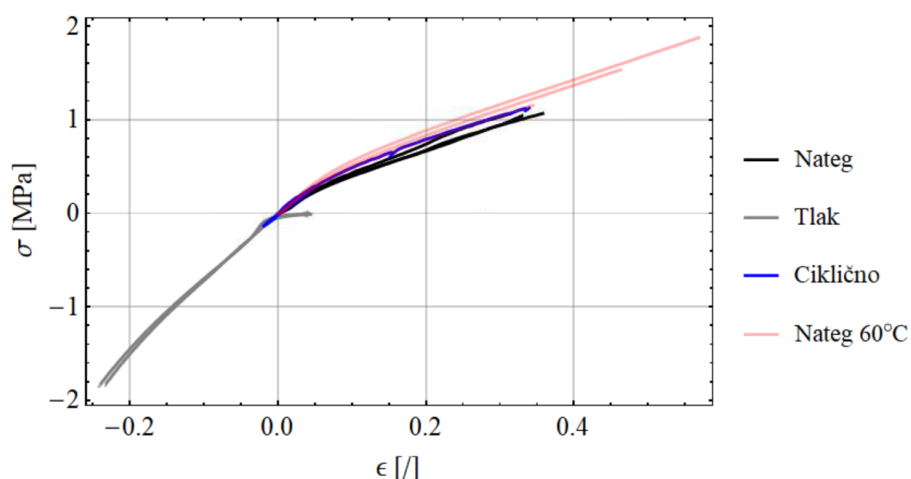
Slika 2.8: Tlačni vzorci sekundarnega tesnila.



Slika 2.9: Tlačni preizkus sekundarnega tesnila.

2.2.2. Izmerjeni rezultati

Neposredno izmerjene odzive preizkušancev: sila v odvisnosti od pomika, smo pretvorili v napetostno-deformacijski odziv, kjer sta tako za napetost kot deformacijo upoštevane inženirske mere. Slika 2.10 prikazuje izmerjene odzive vseh preizkušancev: tlačnih, nateznih in cikličnega z vsemi ponovitvami.



Slika: 2.10: Izmerjeni odzivi preizkušancev – sekundarno tesnilo.

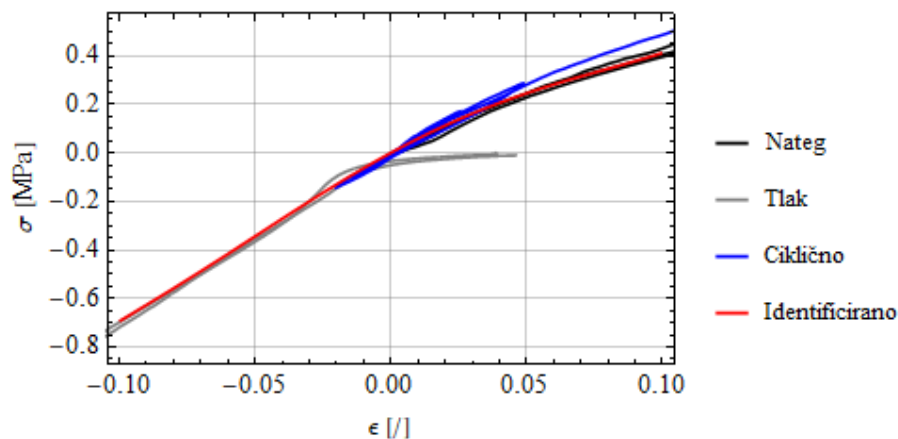
2.2.3. Določene mehanske lastnosti

Izmerjene odzive preizkušancev smo uporabili za identifikacijo parametrov hiperelastičnega konstitutivnega modela, saj se bo ta v nadaljevanju uporabil za numerično modeliranje odziva sekundarnega tesnila. Za identifikacijo se je uporabila vgrajena procedura programa Abaqus.

Izkaže se, da izbira hiperelastičnega modela, ki zagotovi najboljše ujemanje z izmerjenim odzivom zavisi od velikosti opazovanega območja deformacij.

Opazovano manjše območje deformacij $-0,1 < \varepsilon < 0,1$

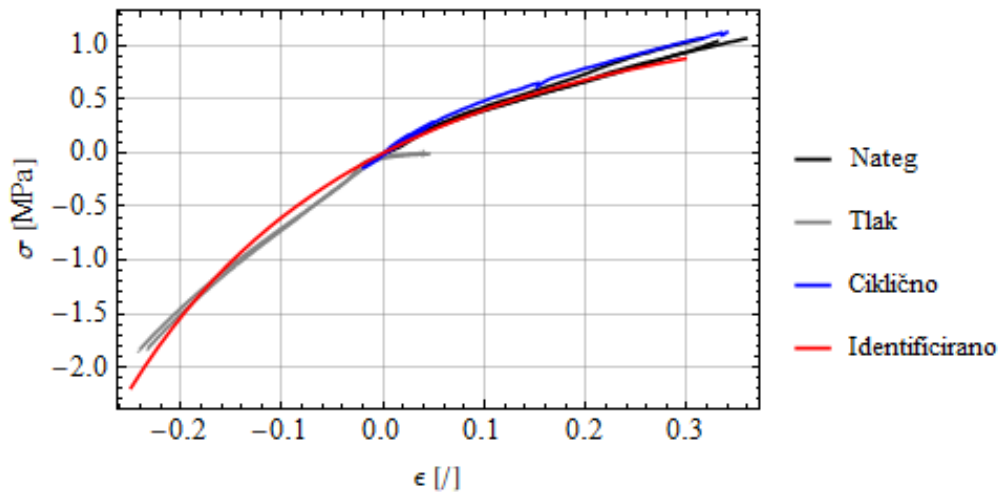
V primeru opazovanja manjših deformacij se izkaže, da najboljše ujemanje z izmerjenim odzivom zagotovi polinomski hiperelastični model druge stopnje s parametri: $D_1 = D_2 = 0$, $C_{01} = 2.613$, $C_{02} = 216.989$, $C_{10} = -1.595$, $C_{11} = -459.256$, $C_{20} = 238.639$. Pridobljeni konstitutivni model je stabilen za omenjeno območje deformacij, pri večjih pa postane nestabilen. Ujemanje odziva konstitutivnega modela z izmerjenim je prikazano na sliki 2.11.



Slika 2.11: Ujemanje odziva identificiranega konstitutivnega modela z izmerjenim odzivom (manjše območje deformacij).

Opazovano večje območje deformacij $-0,25 < \varepsilon < 0,3$

V primeru opazovanja večjih deformacij se izkaže, da najboljše ujemanje z izmerjenim odzivom zagotovi Mooney-Rivlin-ov hiperelastični model s parametri: $D_1 = 0$, $C_{01} = 0.7952$, $C_{10} = 0.01173$. Pridobljeni hiperelastični model je stabilen za neomejene velikosti deformacij. Ujemanje odziva konstitutivnega modela z izmerjenim je prikazano na sliki 2.12.



Slika 2.12: Ujemanje odziva identificiranega konstitutivnega modela z izmerjenim odzivom (večje območje deformacij).

3. Določitev koeficienta temperaturnega raztezka distančnikov in sekundarnega tesnila

Za modeliranje mehanskega odziva panela je bilo potrebno določiti koeficiente temperaturnega raztezka α posameznih komponent sestava panela. V laboratoriju LNMS smo določili lastnosti distančnikov in sekundarnega tesnila (zunanji sloj - črn elastomer). Temperaturna obremenitev je bila zagotovljena z uporabo temperaturne komore (*MTS 651 Environmental Chamber*). Odziv na temperaturno obremenitev pa je bil merjen z optičnim merilnim sistemom (*Dantec Dynamics Q-400*), ki deluje na osnovi korelacije digitalnih slik (ang.: *Digital Image Correlation, DIC*).

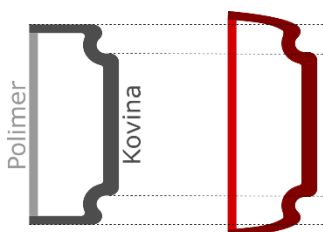
3.1. Koeficient temperaturnega raztezka distančnikov

Distančniki so bili prosto vpeti v temperaturni komori. Temperatura v komori je bila na začetku sobna, nato pa smo jo po korakih segrevali na 40°C, 60°C, 80°C in 100°C. Po dosegu vsake nastavljene temperature smo počakali 10 min, da se je temperatura preizkušancev ustalila in homogenizirala. Po stabilizaciji temperature smo zajeli serijo fotografij z optičnim merilnim sistemom *Q-400*. Po zaključenem segrevanju preizkušancev smo analizirali zajete fotografije in določili deformacije površin preizkušancev pri vsakem temperaturnem koraku. Točke v izmerjenem odzivu *deformacija v odvisnosti od temperature* smo aproksimirali s premico in tako določili koeficient temperaturnega raztezka vsakega distančnika. Izmerjeni koeficienti distančnikov so zbrani v spodnji preglednici 3.1.

Preglednica 3.1: Izmerjeni koeficienti temperaturnega raztezka distančnikov.

Distančnik	Stran, smer	Temperaturni raztezni koeficient α [$\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$]
Kovina + polimer	Kovinska, vzdolž	20
	Kovinska, prečno	
	Polimerna, vzdolž	20
	Polimerna, prečno	220
Pena + folija	Penasta, vzdolž	200
	Penasta, prečno	

Rezultati razkrivajo, da ima distančnik *pena+folija* izotropen temperaturni raztezni koeficient. Distančnik *kovina+polimer* pa ima dve karakteristični vrednosti koeficienta. Kovinska stran se pričakovano tako v vzdolžni kot tudi prečni smeri obnaša kot kovina ($\alpha=20 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Na polimerni strani distančnika pa koeficient zavisi od opazovane smeri. V prečni smeri se polimerna stran distančnika ob segrevanju lahko praktično prosto premika, kot je prikazano na sliki 3.1, in tako izkazuje koeficient enak polimeru ($\alpha=220 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). V vzdolžni smeri pa kovinska osnova distančnika onemogoča prosto raztezanje polimera (slika 3.2), zato je vrednost koeficienta v te smeri enaka kovini ($\alpha=20 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$).



Slika 3.1: Raztezanje distančnika

(kovina+polimer) v prečni smeri ob segrevanju.

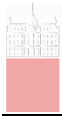


Slika 3.2: Raztezanje distančnika

(kovina+polimer) v vzdolžni smeri ob segrevanju.

3.2. Koeficient temperaturnega raztezka sekundarnega tesnila

Koeficient temperaturnega raztezka sekundarnega tesnila smo določili na enak način, kot smo določili koeficiente distančnikov. Preizkušane sekundarnega tesnila je bil prosto vpet v temperaturni komori, kjer smo ga po korakih segrevali na 40°C, 60°C, 80°C in 100°C. Po dosegu vsake nastavljen temperature smo ponovno počakali 10 min, da se je temperatura preizkušancev ustalila in homogenizirala. Aproksimacija izmerjenega odziva deformacija v odvisnosti od temperature pri ustaljenih stanjih vrne vrednost koeficienta temperaturnega raztezka $208 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.



4. Zaključek

Izmerili smo natezno oz. tlačno togost in koeficient temperaturnega raztezka distančnikov in sekundarnega tesnila, ki predstavljata del tesnilnega sistema večslojnega steklenega izolacijskega panela. Izmerjene in določene mehanske lastnosti distančnikov so zbrane v preglednicah 2.2 in 3.1, sekundarnega tesnila pa v poglavju 2.2.3 in 3.2.