

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta *za gradbeništvo
in geodezijo*



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
fgg@fgg-uni-lj.si

UNIVERZITETNI
ŠTUDIJSKI PROGRAM
GRADBENIŠTVO
PROMETNA SMER

Kandidat/-ka:
MAKSI PODOBNIK

**OBNAŠANJE LAMELIRANEGA KONSTRUKCIJSKEGA STEKLA PRI
POVIŠANIH TEMPERATURAH**

**BEHAVIOUR OF LAMINATED STRUCTURAL GLASS AT ELEVATED
TEMPERATURES**

Mentor/-ica:
prof. dr. Vlatko Bosiljkov

Predsednik komisije:

Somentor/-ica:
asist. dr. David Antolinc

Član komisije:

Ljubljana, 2019

Spodaj podpisani/-a Maksi Podobnik študent/-ka Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, z vpisno številko 26111216, avtor/-ica pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Obnašanje lameliranega konstrukcijskega stekla pri povišanih temperaturah,

IZJAVLJAM,

- 1.* a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;
2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnegazaključnega dela študija;
3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;
4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeliin, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;
5. da soglašam z uporabo elektronske oblike pisnega zaključnega dela študija zapreverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;
6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravicoshranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;
7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem deluštudija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija;
8. da dovoljujem uporabo mojega rojstnega datuma v zapisu COBISS.

V Ljubljani, 28. 9. 2019

Podpis avtorja/-ice: _____

* Obkrožite varianto a) ali b).

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo

»Ta stran je namenoma prazna,«

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	666.1(043.2)
Avtor:	Maksi Podobnik
Mentor:	prof. dr. Vlatko Bosiljkov
Somentor:	asist. dr. David Antolinc
Naslov:	Obnašanje lameliranega konstrukcijskega stekla pri povišanih temperaturah
Tip dokumenta:	diplomska naloga
Obseg in oprema:	49 str., 2 pregl., 25 sl., 25 graf.
Ključne besede:	lamelirano steklo, EVA, PVB, upogibna obremenitev, povišana temperatura

Izvleček

V sodobni arhitekturi so vedno večje zahteve po transparentnosti fasadnega stavbnega ovoja. Unikaten in najbolj primeren material kateri nam to omogoča je steklo. V primeru, da so stekleni elementi tudi v funkciji konstrukcijskega materiala, jim je potrebno zagotoviti ustrezno nosilnost, togost in obstojnost. Izboljšanje mehanskih lastnosti lahko dosežemo s toplotno obdelavo oziroma kaljenjem stekla, večjo varnost po poružitvi pa z lepljenjem steklenih šip med seboj. Tako obdelano in lamelirano steklo imenujemo konstrukcijsko steklo. Ker je tovrstno steklo kot element stavbnega ovoja izpostavljeno različnim vremenskim razmeram, so pomembne lastnosti stekla ter vmesnega povezovalnega sloja, ki je bil uporabljen v postopku lameliranja. Izpostavljenost lameliranega stekla vlažnim pogojem okolja lahko povzroči delaminacijo, prav tako lahko UV žarki povzročijo obarvanje in propadanje vmesnega povezovalnega sloja. Velik vpliv na togost in nosilnost lameliranega stekla ima temperatura. Pri neposredni izpostavljenosti sončnim žarkom se steklo in polimerni material med šipami segrejeta kar povzroči, da se polimernemu materialu spremeni viskoznost.

V sklopu diplomske naloge smo preizkušali vpliv povišane temperature na obnašanje lameliranega konstrukcijskega stekla. Meritve smo izvajali na dveh vrstah preizkušancev v temperaturni komori pri povišanih temperaturah. Prvi so imeli za vmesni sloj EVA, drugi pa PVB folijo. Vse preizkušance smo obremenjevali s konstantno hitrostjo in opazovali njihov odziv pri tritočkovnem upogibu. Merili smo poves na sredini preizkušanca, deformacije na natezni strani na sredini razpona preizkušanca in strižni zdrs med steklenima paneloma. Rezultati so pokazali, da so preizkušanci z EVA vmesnem sloju že pri sobni temperaturi bolj togi v primerjavi s preizkušanci kateri so imeli PVB vmesno povezovalno plast. Vse vrednosti deformacij, pomikov in zdrsov pa so se pričakovano pri obeh vrstah preizkušancev povečevale z višanjem temperature, zaradi spremembe viskoznosti vmesne povezovalne plasti in s tem znižanja njenega strižnega modula.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDK:	666.1(043.2)
Author:	Maksi Podobnik
Supervisor:	prof. Vlatko Bosiljkov Ph.D.
Co-advisor:	asist. David Antolinc Ph.D.
Title:	Behaviour of laminated structural glass at elevated temperatures
Document type:	Graduation Thesis – University studies
Scope and tools:	49 p., 2 tab., 25 fig., 25 graph.
Keywords:	laminated glass, EVA, PVB, bending load, elevated temperature

Abstract

One of the common requirements in modern architecture is the transparency of building envelope and its structural elements. The material which can provide this at very high aesthetic level beside load bearing capacity, stiffness and durability is glass. The enhancement of glass can be achieved with tempering of glass plates and with gluing them together into laminate with the polymer interlayers. This type of glass can be named structural glass and it can be in real application exposed to atmospheric conditions which can dramatically influence the short or long term behaviour of laminated glass. Under external atmospheric conditions the laminated glass become prone to delamination and UV degradation of interlayer. The essential influence on laminated glass stiffness has temperature due to the changed viscosity of polymeric interlayer.

Within this thesis the influence of elevated temperature on the behaviour of laminated glass was investigated. We conducted the three point bending test in the environmental chamber under elevated temperature for two types of laminated glass, one with EVA and the other with PVB interlayer. All specimens were loaded with the constant load rate. During the experiment conduction we observed and measured the midspan deflection, longitudinal tension deformation at the bottom glass sheet and shear deformation between the glass sheets. The results show that the specimens with EVA interlayer have higher stiffness at room temperature comparing to those with PVB interlayer. Based on the measured values and results at elevated temperatures we can confirm and conclude that both types of specimens lost the initial stiffness because of viscosity change of interlayer and thus lower shear modulus.

ZAHVALA

Zahvalila bi se mojemu mentorju, prof. dr. Vlatku Bosiljkovu, in somentorju, asist. dr. Davidu Antolincu, za vodstvo, pomoč in usmerjanje pri izdelavi diplomske naloge.

Gospodu Franciju Čeponu bi se rada zahvalila za pomoč pri izvajanju testov v laboratoriju.

Predvsem pa bi se rada zahvalila družini, prijateljem in sošolcem, ki so mi bili skozi študij v veliko pomoč in oporo.

»Ta stran je namenoma prazna.«

KAZALO VSEBINE

Stran za popravke	I
Bibliografsko-dokumentacijska stran in izvleček	III
Bibliographic-documentalistic information and abstract.....	IV
Kazalo preglednic.....	VIII
Kazalo grafov.....	IX
Kazalo slik.....	X
Kratice.....	XI
1 UVOD.....	1
2 PREGLED LITERATURE	2
2.1 Kaljeno steklo	2
2.2 Lamelirano steklo.....	3
2.3 EVA	4
2.4 PVB.....	5
2.5 Pregled raziskovalnih člankov obravnavane tematike	7
3 EKSPERIMENTALNA ANALIZA LAMELIRANEGA STEKLA PRI POVIŠANIH TEMPERATURAH	15
3.1 Opis preizkušancev	15
3.2 Opis postavitve tritočkovnega upogibnega preizkusa.....	16
3.3 Protokol obremenjevanja	18
3.4 Rezultati eksperimentalne analize	19
3.4.1 Pomik na sredini preizkušanca	20
3.4.2 Zdrs med ploščama	25
3.4.3 Deformacija.....	28
3.4.4 Togost	31
4 ZAKLJUČEK.....	34
VIRI.....	35

KAZALO PREGLEDNIC

Tabela 1: Primerjava pomika in napetosti na sredini preizkušanca ter zdrsa med plastmi pri štiri-točkovnem upogibnem testu, izvedenem na preizkušancih z različnimi povezovalnimi sloji pri različnih temperaturah (Serafinavičius, T. in sod. 2013, str. 1003).....	10
Tabela 2: Izračunana togost preizkušancev z različnimi vmesnimi sloji pri različnih temperaturah	31

KAZALO GRAFOV

Graf 1: Pomik na sredini preizkušanca v odvisnosti od časa in temperature (Serafinavičius, T. in sod. 2013, str. 1001)	9
Graf 2: Zdrs med plastmi v odvisnosti od časa in temperature (Serafinavičius, T. in sod. 2013, str. 1002)	9
Graf 3: Napetost na sredini preizkušanca v odvisnosti od časa in temperature (Serafinavičius, T. in sod. 2013, str. 1002).....	9
Graf 4: Grafi prikazujejo pomik na sredini preizkušanca v odvisnosti od časa obremenjevanja pri različnih temperaturah (Kruger, G. 1998, str. 161)	14
Graf 5: Pomik v odvisnosti od sile za preizkušance s folijo EVA; sobna temperatura	20
Graf 6: Pomik v odvisnosti od sile za preizkušance s folijo PVB; sobna temperatura	21
Graf 7: Pomik v odvisnosti od sile za EVA; 40 °C	22
Graf 8: Pomik v odvisnosti od sile za PVB; 40 °C	22
Graf 9: Pomik v odvisnosti od sile za vmesni sloj EVA; 60 °C.....	24
Graf 10: Pomik v odvisnosti od sile za PVB; 60 °C	24
Graf 11: Zdrs med steklenima ploščama pri vmesnem sloju EVA; sobna temperatura	25
Graf 12: Zdrs med steklenima ploščama pri vmesnem sloju PVB; sobna temperatura	26
Graf 13: Zdrs med ploščama v odvisnosti od sile pri vmesnem sloju EVA; 40 °C	26
Graf 14: Zdrs med ploščama pri vmesnem sloju PVB; 40 °C.....	27
Graf 15: Zdrs v odvisnosti od sile pri EVA; 60 °C	27
Graf 16: Zdrs med ploskvami pri PVB; 60 °C	28
Graf 17: Deformacija v odvisnosti od sile pri EVA; sobna temperatura	28
Graf 18: Deformacija v odvisnosti od sile pri PVB; sobna temperatura	29
Graf 19: Deformacija v odvisnosti od sile pri vmesnem sloju EVA; 40 °C.....	29
Graf 20: Deformacija v odvisnosti od sile pri PVB; 40 °C	30
Graf 21: Deformacija v odvisnosti od sile pri EVA; 60 °C.....	30
Graf 22: Deformacija v odvisnosti od sile za PVB; 60 °C.....	31
Graf 23: togosti preizkušancev z vmesnim slojem EVA v odvisnosti od temperature	32
Graf 24: togosti preizkušancev z vmesnim slojem PVB v odvisnosti od temperature.....	32
Graf 25: primerjava izračunanih povprečnih vrednosti za preizkušance z vmesnim slojem EVA in PVB	33

KAZALO SLIK

Slika 1: Porušni vzorec kaljenega stekla (levo) in delci porušenega kaljenega stekla (desno)	2
Slika 2: Lamelirano steklo	3
Slika 3: Kemijska struktura EVA (Hidalgo, G. 2014, str. 2)	4
Slika 4: Zamreženje molekul EVA folije med postopkom lameliranja (Hidalgo, G. 2014, str. 5)	5
Slika 5: Peč, v kateri se lahko vrši proces lameliranja (Hidalgo, G. 2014, str. 5)	5
Slika 6: Kemijska struktura PVB (Hidalgo, G. 2014, str. 2)	6
Slika 7: Avtoklav oziroma parni sterilizator (Hidalgo, G. 2014, str. 6)	6
Slika 8: Prerazporeditev molekul PVB pri postopku lameliranja (Hidalgo, G. 2014, str. 6)	7
Slika 9: Odstopanje PVB od stekla zaradi prodiranja vode (Hidalgo, G. 2014, str. 4)	7
Slika 10: Postavitev štiri-točkovnega upogibnega testa znotraj toplotne komore (Serafinavičius, T. in sod. 2013, str. 999)	8
Slika 11: Štiri točkovni preizkus na kaljenem steklu (Pankhardt, K. 2010, str. 120)	11
Slika 12: Štiri točkovni preizkus na nekaljenem steklu (Pankhardt, K. 2010, str. 120)	11
Slika 13: Shema strižnega testa (Kruger, G. 1998, str. 156)	12
Slika 14: Shema upogibnega testa (Kruger, G. 1998, str. 159)	13
Slika 15: Pripravljeni preizkušanci lameliranega stekla	15
Slika 16: Shema tritočkovnega upogibnega preizkusa lameliranega stekla	16
Slika 17: Postavitev za tritočkovno obremenjevanje in merilnik zdrsa v laboratoriju	16
Slika 18: Toplotna komora v kateri lahko izvajamo mehanske preiskave	17
Slika 19: Naprava za tritočkovni upogib znotraj toplotne komore in merilnika zdrsa ob straneh	17
Slika 20: Namestitev preizkušanca v napravo	18
Slika 21: Merilni listič deformacij	18
Slika 22: Porušitev vzorca	19
Slika 23: Preizkušanje znotraj toplotne komore	21
Slika 24: Pri povišanih temperaturah vmesni sloj izgublja svojo togost in nosilnost	23
Slika 25: Porušitev preizkušanca z vmesnim slojem EVA pri 60 °C	23

KRATICE

EVA	etilen vinil acetat
PVB	polivinil butiral

»Ta stran je namenoma prazna.«

1 UVOD

Vulkansko steklo so uporabljali že v kameni dobi, silikatno steklo pa se je pojavilo kasneje, v času Rimljanov, vendar bolj v gospodinjstvih in industriji. Spadalo je med luksuzne materiale, zato proizvodnja ni bila močno razširjena vse do srednjega veka. Takrat se je raba povečala predvsem z izdelovanjem posode, nakita in oken. Kasneje, v 10. stoletju, so pričeli tudi z izdelovanjem barvnih stekel za okna cerkev, kapel in bazilik.

V moderni arhitekturi je vedno pogostejše iskanje transparentnosti, čigar rezultat je pojav vse več stavb s steklenimi ovoji. Da bi to še povečali, se je pojavila ideja uporabe stekla tudi kot del primarne konstrukcije. V tem primeru mora steklo odigrati vlogo konstrukcijskega materiala, ki nosi velike obtežbe ter ob enem zagotovi varnost, stabilnost in trajnost gradbenega elementa. Eden od načinov, kako doseči večjo nosilnost, je toplotna obdelava stekla oziroma kaljenje. Tako obdelane plošče lahko med seboj tudi zlepimo in s tem dosežemo večjo varnost.

V okviru diplomske naloge sem opazovala odziv lameliranega stekla pri tritočkovnem upogibnem preizkusu, izpostavljenega različnim temperaturam. Preizkušala sem tudi odziv glede na vrsto folije, ki se uporablja kot vmesna povezovalna plast oz. lepilo med steklenimi šipami. Folija, ki veže plošče kaljenega stekla med seboj, je polimerni material, ki se mu pri povišanih temperaturah spremeni viskoznost. Na podlagi preizkusov sem skušala določiti togost lameliranega stekla v odvisnosti od temperature.

2 PREGLED LITERATURE

2.1 Kaljeno steklo

Za konstrukcijsko steklo je najprimernejše, da je obdelano s kaljenjem. To je proces, kjer stekleni element segrejemo za 100 °C višje od temperature steklastega prehoda (620–675 °C) in ga hitro ohladimo z vpihovanjem zraka. Zunanja površina steklene plošče se tako hitreje ohladi kot notranjost, kar povzroči nastajanje zaostalih napetosti (natege v notranjosti plošče in tlake na površini). S tem procesom povečamo nosilnost stekla, saj mora zunanja obremenitev najprej razbremeniti tlačne napetosti na površini. Zmanjšamo velikost mikrorazpok na površini in jim tudi preprečimo večanje, vse dokler so tlačne napetosti na površini zaradi kaljenja večje od nateznih napetosti, ki jih povzroča zunanja obtežba. Dejanska nosilnost kaljenega stekla je potem sestavljena iz nosilnosti neobdelanega stekla in tlačnih zaostalih napetosti na površini stekla [1, 2].

Stekla, obdelana na tak način, shranjujejo veliko energije, ki pa se sprosti ob poružitvi ravnotežja. Razpoke se hitro razširijo v obliki goste mreže, zaradi česar so drobcji stekla manjši, kar prikazuje slika 1.



Slika 1: Porušni vzorec kaljenega stekla (levo) in delci porušenega kaljenega stekla (desno)

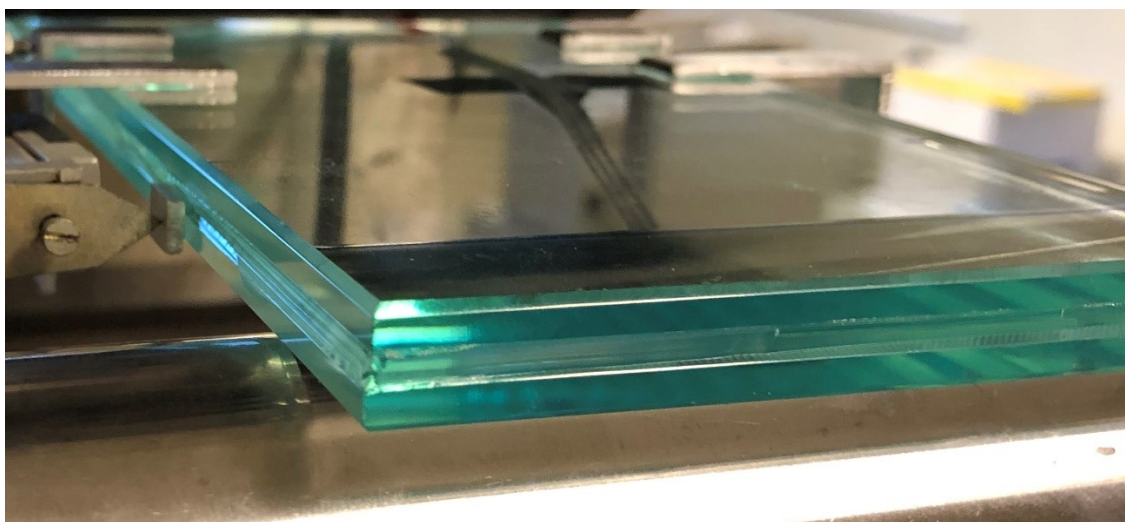
Delno kaljeno steklo pa je deležno počasnejšega ohlajanja kot samo kaljeno steklo. Posledica tega so manjše zaostale napetosti [2].

Poznamo tudi kemično utrjevanje stekla, ki omogoča zaostale napetosti po prerezu brez termičnih efektov, kot sta ukrivljenost in deformacija. Pri tem procesu se stekleni elementi potopijo v raztopino kalijevega klorida pri 300 °C. Kalciji ioni se na površini zamenjajo z večjimi kalijevimi ioni in tako se tvorijo tlačne napetosti. Obstaja pa možnost, da se bodo razpoke, ki segajo izven tlačne cone, povečale kar same, brez dodatnega obremenjevanja [2].

2.2 Lamelirano steklo

Lamelirano steklo (slika 2) je sestavljeno iz dveh ali več steklenih plošč, ki so med seboj zlepljene s prozornim polimernim materialom. Za vezavo se najpogosteje uporabljata foliji EVA (etilen vinil acetat) in PVB (polivinil butiral).

V procesu lameliranja se s stiskanjem plošč izloči zračne mehurčke, ki se ujamejo med plasti stekla in folije, s toplotno obdelavo pa se doseže transparentnost vmesnega povezovalnega sloja [3].



Slika 2: Lamelirano steklo

S kaljenjem povečujemo nosilnost steklenih panelov, lameliranje pa nam zagotavlja tudi določeno nosilnost po porušitvi panela.

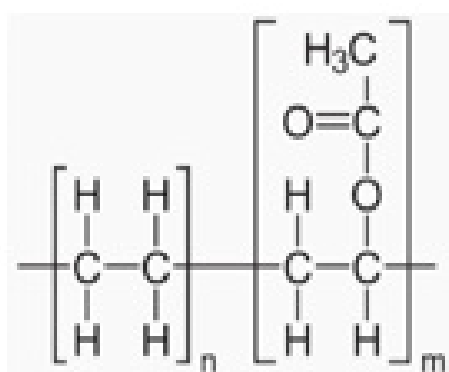
Prednost lameliranega stekla se izkaže v primeru razpokanja stekla, za katerega je značilna porušitev plasti na manjše delce. Vmesna povezovalna folija med plastema zadrži delce na mestu, da ti ne ogrožajo okolice. Neporušene plasti stekla pa ohranijo določeno stopnjo nosilnosti. Ker so povezovalni sloji polimerni, je treba poleg strižnega modula upoštevati tudi temperaturno odpornost materiala. Z višanjem temperature in trajanjem obtežbe se manjša vrednost strižnega modula povezovalnega sloja [1].

Obnašanje lameliranega stekla po porušitvi je odvisno tudi od stopnje kaljenja. Kaljenje samo povečuje natezno trdnost stekla, a hkrati negativno vpliva na obnašanje po porušitvi, saj manjši kosi stekla odpadejo, kar povečuje podajnost [1].

2.3 EVA

Kratica EVA pomeni etilen vinil acetat, ki je polimerni material. Za lameliranje ga uporabljamo v obliki folije.

Pri kemijski strukturi EVA folije (slika 3) lahko opazimo, da je sestavljena iz dveh različnih enot, ki se ponavljata. Od tega, kolikokrat in v kakšnem zaporedju se katera enota ponovi v molekuli, so odvisne materialne lastnosti [4].



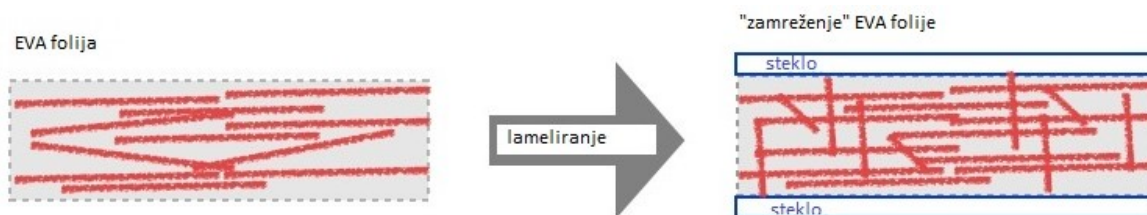
Slika 3: Kemijska struktura EVA (Hidalgo, G. 2014, str. 2)

Pri lameliranem steklu je EVA, predvsem zaradi svojih optičnih ter mehanskih lastnosti, pogosto uporabljen material. Je tudi odličen adhezijski material, kar pomeni, da je njegova sprijemnost s steklom zelo dobra.

Glede na adhezijo bi za lameliranje lahko uporabljali tudi druge materiale. Ker pa so ti večinoma v tekočem stanju, bi potrebovali različne dodatke, s katerimi bi reagirali, to pa ne bi bilo lahko delo za proizvajalce lameliranih stekel. EVA se dobavi v obliki folije, kar omogoči lažjo uporabo in pripravo za lameliranje.

Kar zadeva hitrost prenosa vodne pare je EVA v veliki prednosti pred PVB, saj ima le-ta 8–9 krat večjo nagnjenost k prodiranju vode. Ta lastnost da EVA foliji veliko prednost, predvsem kar se tiče skladiščenja in uporabe v različnih vremenskih razmerah.

Med samim postopkom lameliranja se EVA pretvori iz prostih »plavajočih« molekul v »zamreženo« maso, kot prikazuje Slika 4. Pretvarja vmesni material v elastičen, fleksibilen in ne več temperaturno staljen izdelek. Lamelirana struktura postane nov stabilen in elastičen vmesni sloj med stekli, ki zagotavlja zahtevane mehanske lastnosti. Ta proces se vrši v majhnih pečeh (slika 5), kjer se uravnava vakuum in temperaturo. Cena teh pa je nižja od tistih, ki se navadno uporabljajo za PVB, kar je še ena dodatna prednost EVA folije [4].



Slika 4: Zamreženje molekul EVA folije med postopkom lameliranja (Hidalgo, G. 2014, str. 5)

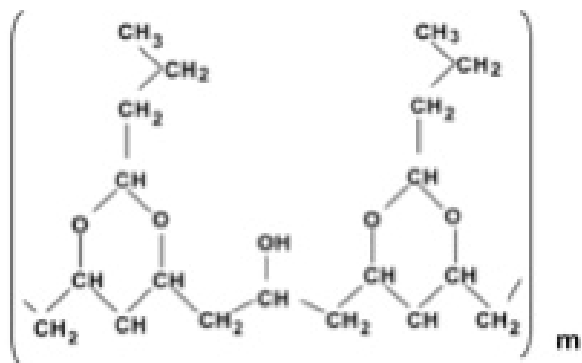


Slika 5: Peč, v kateri se lahko vrši proces lameliranja (Hidalgo, G. 2014, str. 5)

EVA se uporablja tudi v solarni industriji. Stabilizatorji v foliji zagotavljajo odpornost na UV žarke, ki zmanjšujejo trdnost, povečujejo raztezke pri lomu in povzročajo celo obarvanje [5]. Prav zaradi tega je pomembno tudi, kako dobro folija prenaša visoke temperature. Raziskave [6] so pokazale, da je EVA sprejemljivo stabilen material na temperaturah med 25 °C in 90 °C, vendar pa se pri temperaturah okoli 60 °C že pričinja mehčati in topiti.

2.4 PVB

Polivinil butiral, PVB, spada med amorfne termoplaste. Molekula materiala je sestavljena iz ene same enote, ki ima določeno število ponovitev v polimerni verigi, kar prikazuje slika 6.



Slika 6: Kemijska struktura PVB (Hidalgo, G. 2014, str. 2)

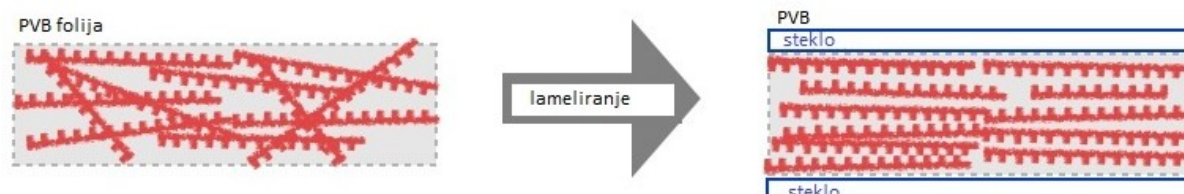
Je trdna smola, ki je topna v organskih topilih, ne pa v ogljikovodikih, ter je odporna na baze in kisline. Zaradi togosti in nezadostnih elastičnih lastnosti se PVB dodaja mehčalce in raznorazne dodatke, ki vplivajo na sposobnost vpijanja vode. Pogosti dodatki so npr. blokatorji ultravijoličnega sevanja ali različni pigmenti. PVB je zaradi ugodnega raztezanja pri lomu, visoke odpornosti na razpad, prilagodljive adhezije s steklom in stabilnosti glede na ultravijolično sevanje in temperature eden najpogostejše uporabljenih materialov pri lameliranju. V primerjavi z EVA je cenejši tako njen proizvodni proces lameliranja kot tudi folija sama [4].

Za izboljšanje adhezije je med samim lameliranjem na elemente dodan tudi pritisk. Ta proces se izvaja v avtoklavih oz. parnih sterilizatorjih (slika 7), ki dosega temperature 100–150 °C [3].

Med postopkom lameliranja pri PVB ne pride do »zamreženja« molekul kot pri EVA, pač pa le do njihove prerazporeditve (slika 8) [4].



Slika 7: Avtoklav oziroma parni sterilizator (Hidalgo, G. 2014, str. 6)



Slika 8: Prerazporeditev molekul PVB pri postopku lameliranja (Hidalgo, G. 2014. str. 6)

Edina ovira, ki se pojavi, je higroskopnost. Zaradi kapilarnosti pride pri PVB do prodiranja vode okoli robov, kar negativno vpliva na trajnost in mehansko odpornost lameliranja in lahko povzroči odstopanje folije od stekla (slika 9).



Slika 9: Odstopanje PVB od stekla zaradi prodiranja vode (Hidalgo, G. 2014, str. 4)

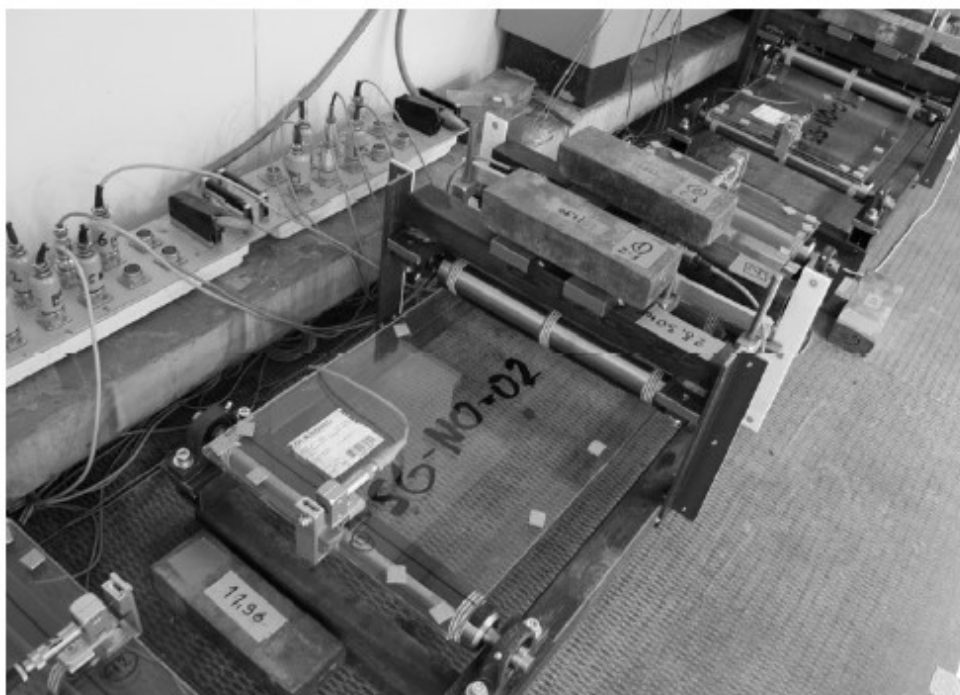
PVB je najbolj stabilna in nosilna pri sobnih temperaturah, če pa jo želimo uporabiti na višjih temperaturah (nad 50 °C), je priporočljivo, da v procesu formiranja materiala modificiramo folijo, ki bo lahko posledično bolje prenašala višje temperature [7].

2.5 Pregled raziskovalnih člankov obravnavane tematike

Obravnavanje problema odziva lameliranega stekla na povišane temperature lahko zasledimo v naslednjih treh člankih.

Serafinavičius, in sodelavci [8] so se ukvarjali z dolgotrajnim štiri točkovnim preizkusom na lameliranem steklu pri različnih temperaturah. Njihovi preizkušanci so bili sestavljeni iz dveh 6 milimetrov debelih steklenih nekaljenih plošč, ki se najpogosteje uporabljajo pri oknih. Med njima pa so uporabili 1.52 milimetrov debel sloj EVA, PVB ali pa SG (Sentry Glas) folije. Dolgi so bili 1100 milimetrov in široki 360 milimetrov. Vsega skupaj so imeli 9 preizkušancev, saj so za vsako vrsto folije opravljali preizkus na treh vzorcih, da so pri predstavitvi rezultatov dobili povprečne vrednosti.

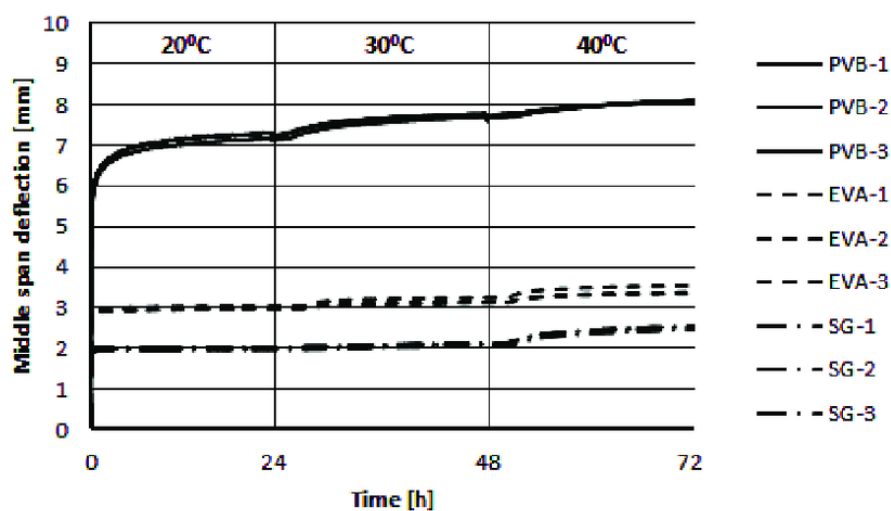
Preizkus so izvajali v skladu z EN 1288-3:2000. Potekal je v toplotni komori, pri temperaturah $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ter 50 % vlažnosti. Preizkus je trajal po 24 ur pri eni temperaturi, kar je skupno 72 ur obremenjevanja s konstantno obtežbo 0,512 kN, ne pa do porušitve vzorca. Merili so pomik na sredini razpona, zdrs med plastmi in vzdolžno deformacijo. Slika 10 prikazuje postavitev štiri točkovnega preizkusa znotraj toplotne komore.



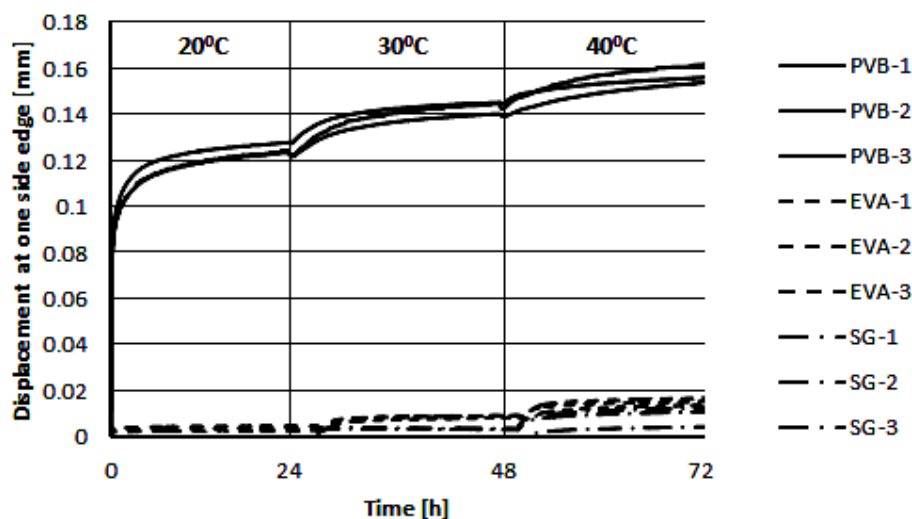
Slika 10: Postavitev štiri-točkovnega upogibnega testa znotraj toplotne komore (Serafinavičius, T. in sod. 2013, str. 999)

Ob nanosu obtežbe pri času 0 že pride do pomikov na sredini (6 mm), in sicer največ pri PVB. Ta vrednost se v naslednjih 24 urah poviša še za 1 mm in po 72 urah kaže maksimalno vrednost pomika 8 mm, kar pomeni, da se pomik glede na temperaturo povečuje. Pri vzorcih s SG v prvih 48 urah niso zaznali skoraj nobene spremembe v pomiku na sredini razpona, pri EVA pa zelo malo. Pri obeh so šele v zadnjih 24 urah izmerili največji pomik 2.5 mm pri SG in 3.5 mm pri EVA. Iz tega lahko razberemo, da ima folija PVB najmanjšo togost že pri sobni temperaturi, ki pa se še zmanjšuje pri povišanih temperaturah.

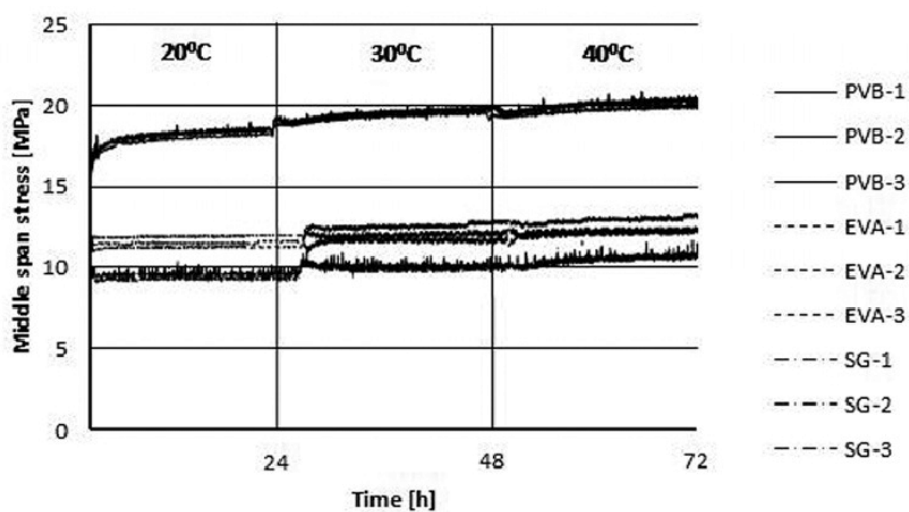
Grafi njihovih preiskav, ki predstavljajo izmerjene količine v odvisnosti od časa in temperature, izgledajo za vse primere približno enako. Vse izmerjene količine imajo najvišje vrednosti pri PVB foliji. To prikazujejo graf 1, graf 2 in graf 3.



Graf 1: Pomik na sredini preizkušanca v odvisnosti od časa in temperature (Serafinavičius, T. in sod. 2013, str. 1001)



Graf 2: Zdrs med plastmi v odvisnosti od časa in temperature (Serafinavičius, T. in sod. 2013, str. 1002)



Graf 3: Napetost na sredini preizkušanca v odvisnosti od časa in temperature (Serafinavičius, T. in sod. 2013, str. 1002)

Prišli so do zaključkov (tabela 1), da so razlike med PVB in EVA pri pomiku na sredini 57 %, med PVB in SG 71 % in med EVA in SG 31 %. Pri zdrsuh so te razlike 92 %, 99 % in 87 % ter pri natezni napetosti 31 %, 46 % in 22 %.

Tabela 1: Primerjava pomika in napetosti na sredini preizkušanca ter zdrsuh med plastmi pri štiri-točkovnem upogibnem testu, izvedenem na preizkušancih z različnimi povezovalnimi sloji pri različnih temperaturah (Serafinavičius, T. in sod. 2013, str. 1003)

Interlayer	Measurement definition	+ 20°C	+ 30°C	+ 40°C
PVB	Deflections [mm]	7.10	7.60	8.00
EVA		3.00	3.20	3.40
SG		2.00	2.10	2.50
PVB	Volatile displacements [mm]	0.120	0.140	0.150
EVA		0.005	0.010	0.017
SG		0.000	0.001	0.005
PVB	Tensile stresses [MPa] determinate according to the values of recorded longitudinal strains	17.5	18.8	20.0
EVA		12.1	13.0	13.5
SG		9.3	10.0	11.0

Podoben preizkus je v svojem članku opisala tudi Kinga Pankhardt [9], le da je pri preizkusu poleg temperature in vrste folije spreminjala tudi število slojev 6 milimetrskega stekla. Preizkuse je izvršila tako za nekaljeno (slika 12) kot tudi kaljeno steklo (slika 11).

Tudi v njenem primeru je bil uporabljen štiri točkovni upogibni preizkus na preizkušancih dolžine 1000 mm in širini 360 mm, vendar je za razliko od zgoraj opisanega preizkusa namesto s konstantno silo obremenjevala s konstantno hitrostjo. Preizkuse je izvajala do porušitve vzorca.



Slika 11: Štiri točkovni preizkus na kaljenem steklu (Pankhardt, K. 2010, str. 120)



Slika 12: Štiri točkovni preizkus na nekaljenem steklu (Pankhardt, K. 2010, str. 120)

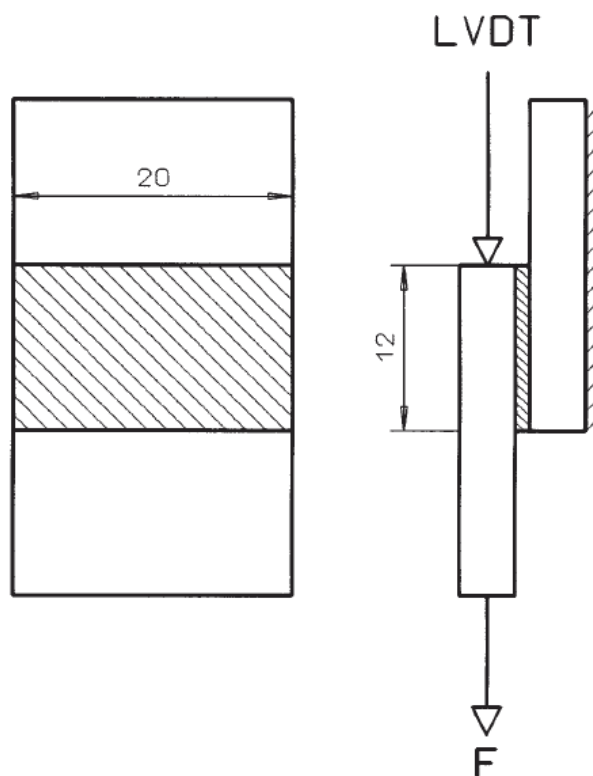
Meritve je izvajala pri sobni temperaturi (+23 °C), +60 °C ter pri –20 °C. Rezultati so pokazali, da temperatura vpliva tako na toplotno neobdelano (nekaljeno) lamelirano steklo kot tudi na kaljeno steklo.

Prišla je do zaključka, da naj bo tip vmesne plasti pri lameliranju skrbno izbran glede na nosilnost stekla in da je zmanjšanje upogibne togosti pri različnih temperaturah odvisno prav od vrste vmesne plasti.

Tudi Gunter Krüger [10] je preizkušal vpliv temperature na obnašanje lameliranega stekla. Opravil je strižni in upogibni preizkus pri temperaturah v razponu med +20 °C do +40 °C. Raziskoval je viskoelastične lastnosti PVB folije, ki se najpogosteje uporablja pri lameliranem steklu.

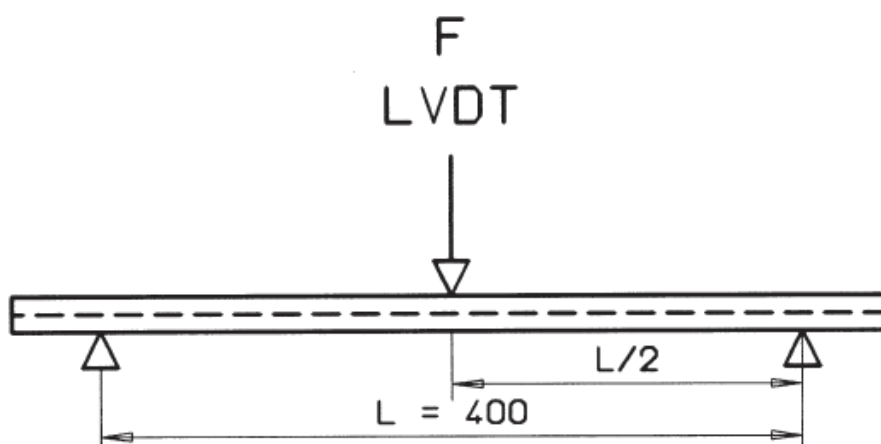
Obnašanje upogibno obremenjenega stekla je odvisno od prenosa strižnih sil v vmesnem sloju, to pa določa njegova togost. Pri sobni temperaturi 23 °C se PVB obnaša viskoelastično. Pod dolgotrajno obtežbo je precej nagnjen k lezenju, s padajočo temperaturo se strižni moduli tudi povečujejo.

Preizkus so izvajali na lameliranem steklu iz dveh 4 milimetrov debelih steklenih plošč in 0.76 milimetrov debelo PVB folijo. Pri strižnem testu, kot ga prikazuje slika Slika 13, so preizkušance obremenjevali 1000 sekund s konstantno silo 50 N in s tem povzročili konstantno strižno napetost 0.2 N/mm^2 v vmesnem sloju. Zdrs med plastema pa so merili med obremenjevanjem in še dodatnih 1000 sekund po razbremenitvi.



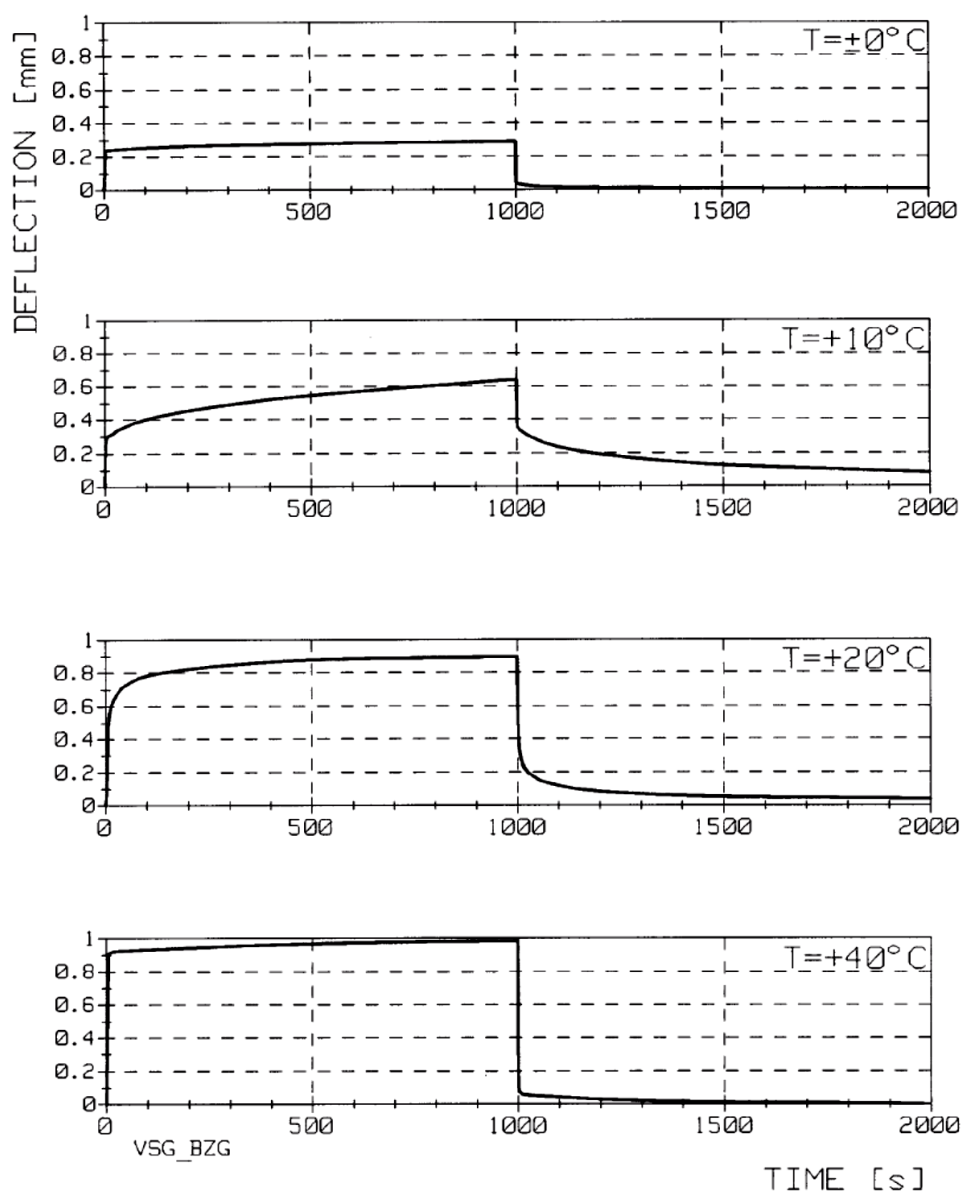
Slika 13: Shema strižnega testa (Kruger, G. 1998, str. 156)

Za meritev upogiba so izvedli tritočkovni upogibni preizkus (slika 14), kjer so koncentrirano silo 20 N nanesli na sredino razpona plošče. Pomike so merili pri temperaturah $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $+10 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $+20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ in $+40 \text{ }^{\circ}\text{C}$.



Slika 14: Shema upogibnega testa (Kruger, G. 1998, str. 159)

Ugotovili so, da se pri nizkih temperaturah PVB in posledično tudi steklo obnašata bolj elastično. Pri zviševanju temperature se zaradi zmanjšanja strižne togosti PVB sloja povečajo tako pomiki na sredini razpona plošče kot tudi zdrs med ploščama (graf 4). Pri temperaturi nad $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ se sprijemnost med ploščama zmanjšuje, deformacija lameliranega stekla pa je odvisna predvsem od elastične deformacije steklenih plošč. Zaradi nastajanja lezenja že pri srednjih temperaturah na upogibno togost lepljenega stekla pri $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ najbolj vpliva trajanje obremenjevanja.



Graf 4: Grafi prikazujejo pomik na sredini preizkušanca v odvisnosti od časa obremenjevanja pri različnih temperaturah (Kruger, G. 1998, str. 161)

3 EKSPERIMENTALNA ANALIZA LAMELIRANEGA STEKLA PRI POVIŠANIH TEMPERATURAH

3.1 Opis preizkušancev

Preizkus smo izvajali za PVB in EVA folijo, saj smo želeli narediti primerjavo glede njunega odziva na povišane temperature. Dimenzije preizkušancev smo si izbrali glede na mere toplotne komore, v kateri so potekali preizkusi na višjih temperaturah. Sestavljeni so bili iz dveh kaljenih steklenih plošč dimenzij 350/100/5 mm in vmesnega sloja debeline 0,76 mm. Pri različnih temperaturah smo preizkus izvajali na petih preizkušancih za vsako folijo, saj lahko tako izločimo natančnejše povprečne vrednosti rezultatov.

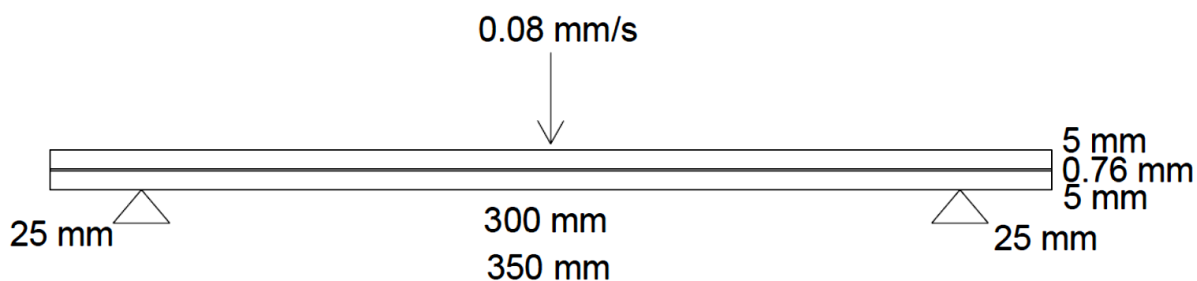
Preizkušance smo opremili z deformetri, ki so merili zdrs med steklenima paneloma in povs na sredini razpona. Na polovici razpona plošče, 30 mm od roba, kot prikazuje slika15, pa smo na spodnji stekleni panel prilepili tudi merilni listič, ki je meril deformacijo preizkušanca. Vsi merilniki so bili povezani z računalnikom in so sproti, med izvajanjem preizkusa, shranjevali podatke v datoteko.



Slika 15: Pripravljene preizkušanci lameliranega stekla

3.2 Opis postavitve tritočkovnega upogibnega preizkusa

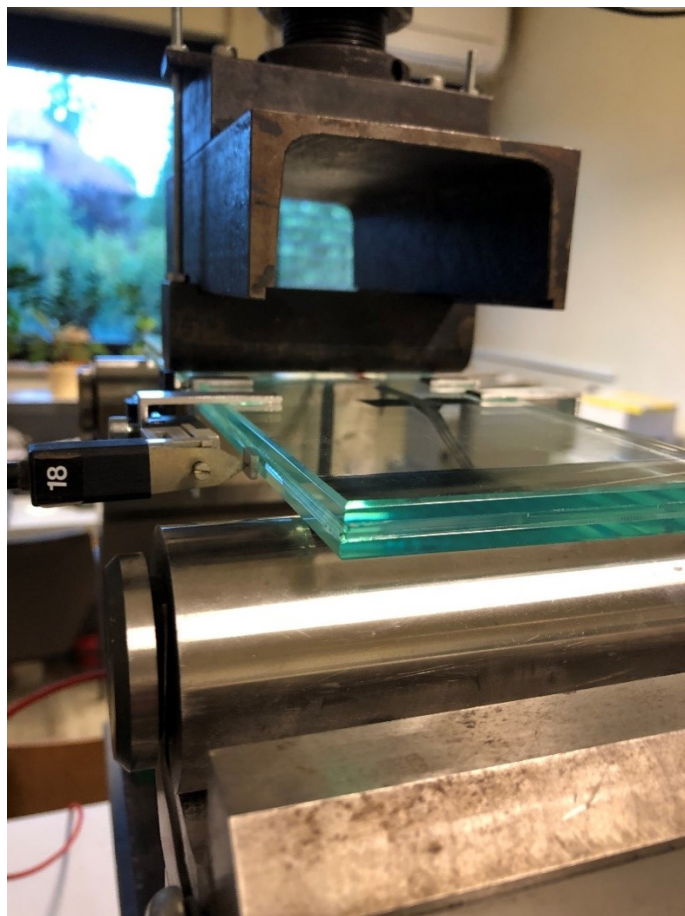
Preizkušanci so bili podprti na razdalji 300 mm (slika 16), obremenjevali pa smo jih na sredini s stalno hitrostjo 0,08 mm/s.



Slika 16: Shema tritočkovnega upogibnega preizkusa lameliranega stekla

Preizkuse na sobni temperaturi smo obremenjevali brez komore, za povišane temperature pa smo okoli iste naprave postavili toplotno komoro, ki je prikazana na sliki 18 in 19.

Slika 17 prikazuje napravo za tritočkovni upogib, ob strani pa lahko vidimo merilnik za zdrs med plastmi.

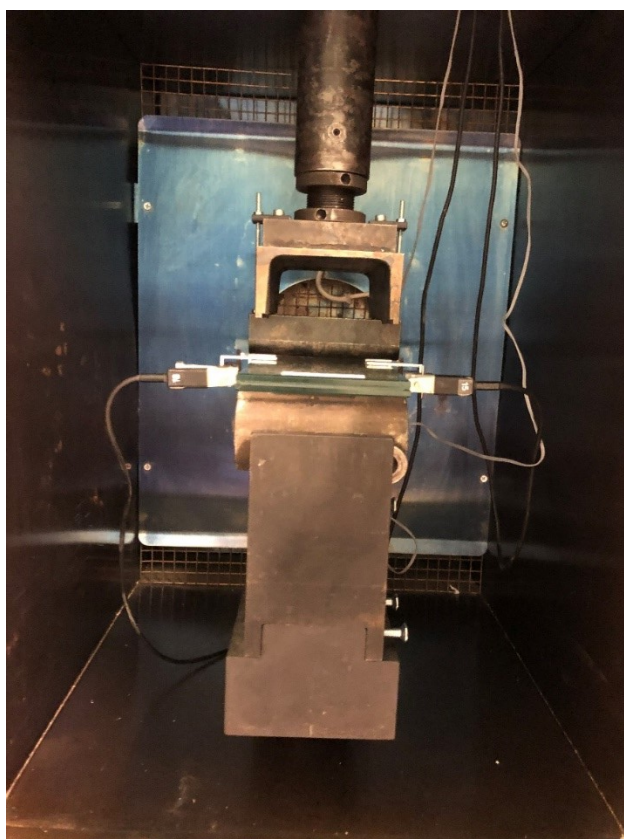


Slika 17: Postavitev za tritočkovno obremenjevanje in merilnik zdrsa v laboratoriju



Slika 18: Toplotna komora v kateri lahko izvajamo mehanske preiskave

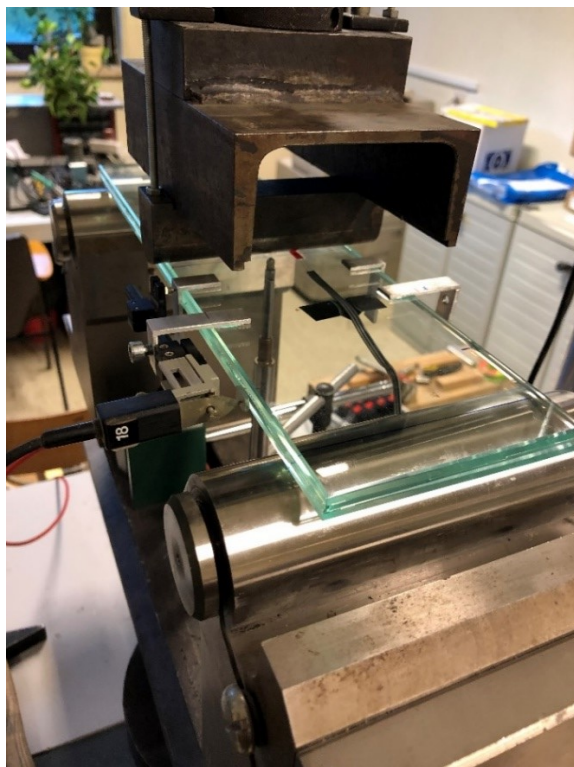
Komori je možno nastaviti le željeno temperaturo, ne pa tudi drugih posebnih pogojev in parametrov.



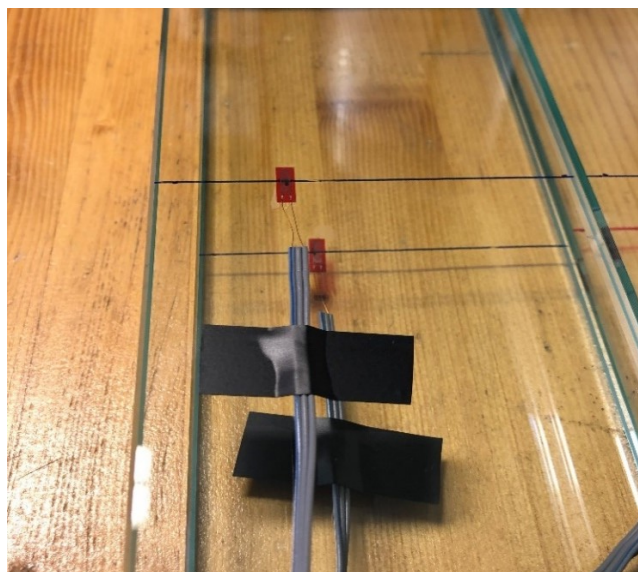
Slika 19: Naprava za tritočkovni upogib znotraj toplotne komore in merilnika zdrsa ob straneh

3.3 Protokol obremenjevanja

Preizkušance smo položili na valja v razmaku 300 mm, ki sta služila kot podpori. Nato smo ob straneh namestili deformetra za zdrs med plastema. Deformeter za merjenje pomika panela se je moral plošče na spodnji strani dotikati in biti nameščen točno na sredini. Prav tako smo morali preveriti, da je bil merilni listič deformacij (slika 21) na spodnji strani preizkušanca. Namestitev preizkušanca na podpore prikazuje slika 20.



Slika 20: Namestitev preizkušanca v napravo



Slika 21: Merilni listič deformacij

Za preizkuse pri višjih temperaturah smo preizkušance predhodno segrevali v pečici, da bi dosegli željeno temperaturo. Pri preizkusih na 40 °C so imeli preizkušanci le okoli 33 °C–35 °C, saj smo imeli težave z nastavljanjem peči, v kateri so se segrevali, kot tudi pri prenosu preizkušanca od pečice do komore, pri čemer je lahko temperatura padla za celih 10 °C. Pri preizkusih na 60 °C se nam je dotičnim težavam uspelo izogniti. Vsem preizkušancem smo namerili okoli 60 °C.

Obremenjevali smo na sredini panela s hitrostjo 0,08 mm/s in preizkus izvajali do porušitve obeh steklenih plošč (slika 22).



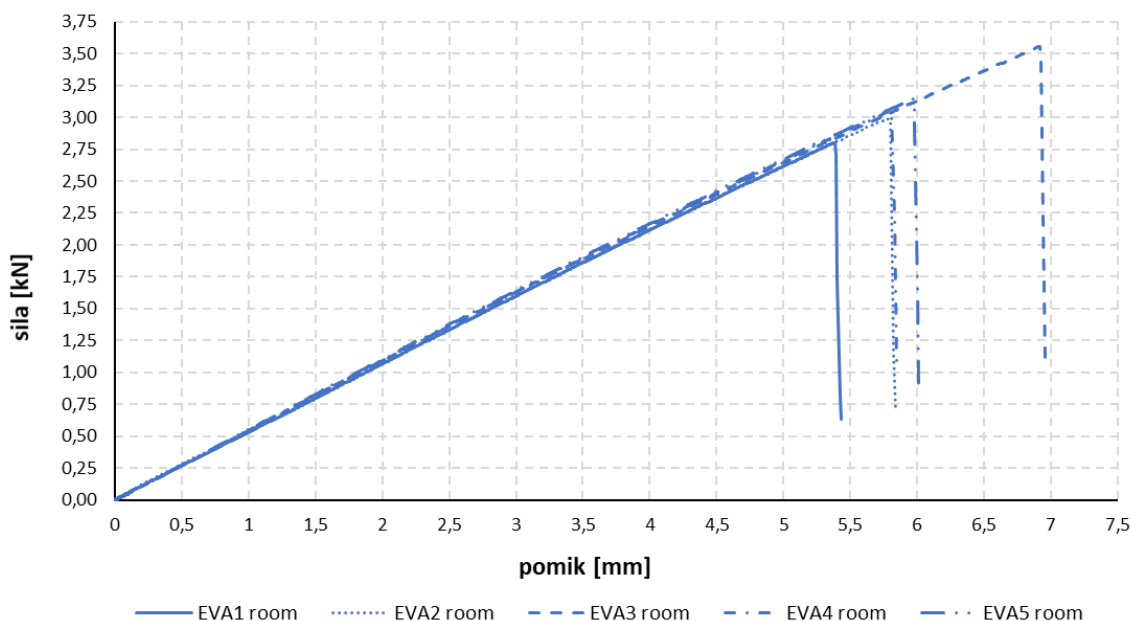
Slika 22: Porušitev vzorca

3.4 Rezultati eksperimentalne analize

Merilniki so izmerjene količine skozi preizkus zapisovali v excelovo datoteko. Te podatke smo nato obdelali in oblikovali grafe, ki prikazujejo pomik na sredini plošče, zdrs med ploščama ter deformacijo, in sicer v odvisnosti od sile.

3.4.1 Pomik na sredini preizkušanca

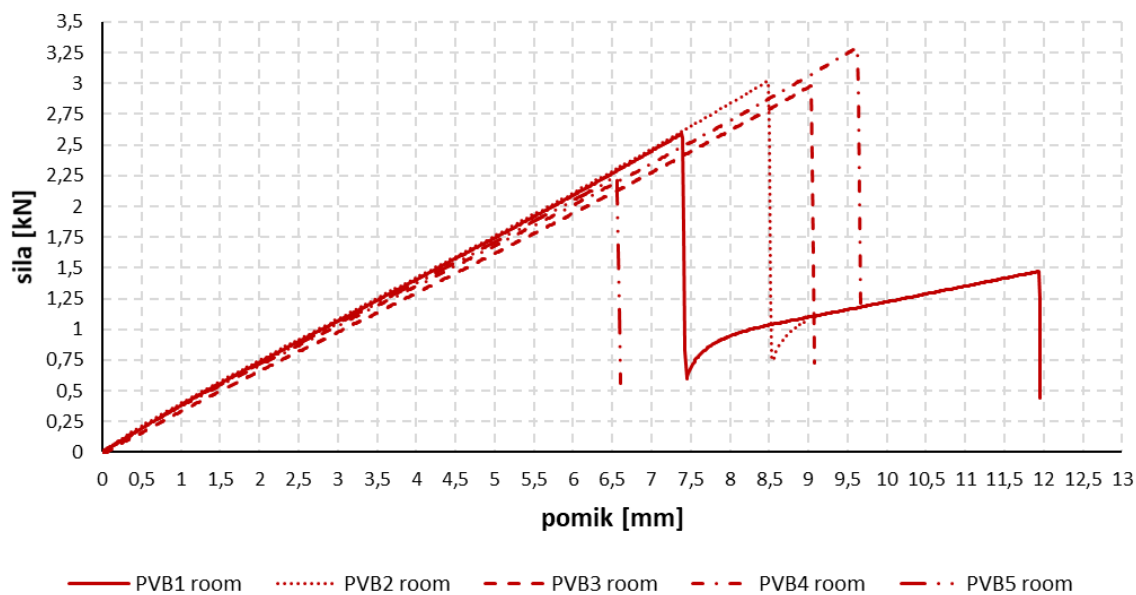
Preizkusi pri sobni temperaturi so se izvajali na približno 23 °C. Iz grafa 5 lahko razberemo, do kakšnega pomika na sredini plošče s folijo EVA je prišlo pri določeni sili. Vidimo, kolikšna je bila maksimalna dosežena sila, ki jo je preizkušanec prenesel, preden je prišlo do porušitve prve plošče. Največje dosežene sile se gibljejo od 2,75 kN pa do približno 3,50 kN, pomiki pa od 5,25 do 7,00 mm. Potek grafa je linearen, kar pomeni, da sta sila in pomik premo sorazmerna.



Graf 5: Pomik v odvisnosti od sile za preizkušance s folijo EVA; sobna temperatura

Graf 6 je enake oblike kot pri EVA, razlikujejo se le vrednosti. Preizkušanci s PVB so porušitev dosegli pri nekoliko nižjih silah kot tisti z EVA. Pomiki pa so bili večji. Maksimalne izmerjene sile se gibljejo med 2,25 in 3,25 kN, njim pripadajoči pomiki pa med 6,5 in 9,5 mm. To nam pove, da je folija EVA pri sobni temperaturi bolj toga in prenese nekoliko večje obremenitve.

Pri preizkušancu PVB1 lahko vidimo, da graf prikazuje dva »vrhova«. Do tega je prišlo, ker smo preizkus izvajali do porušitve obeh steklenih plošč.



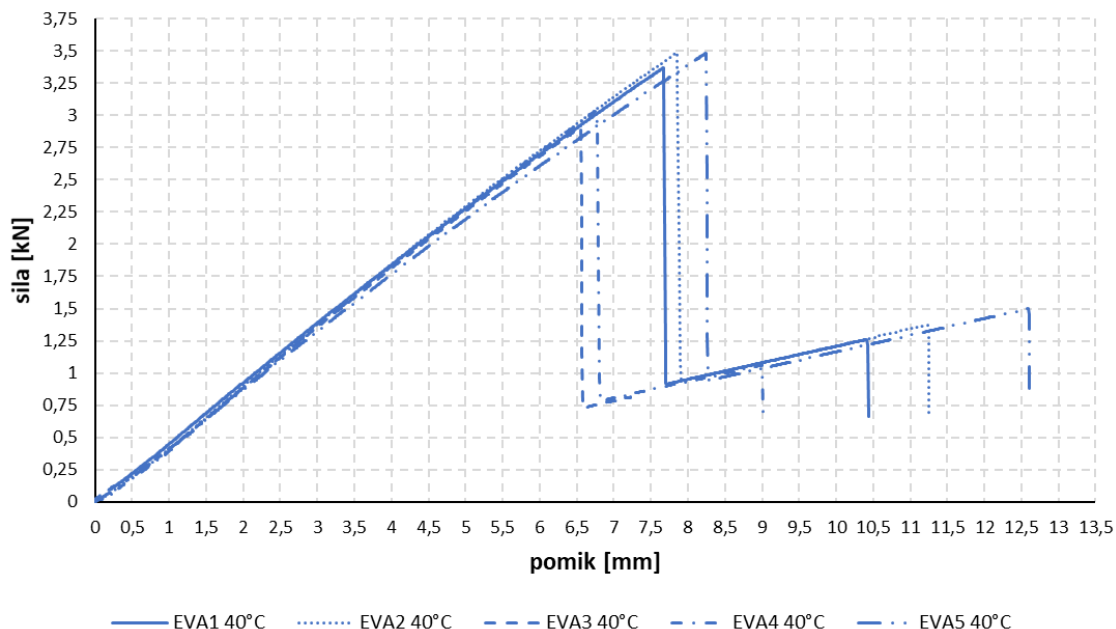
Graf 6: Pomik v odvisnosti od sile za preizkušance s folijo PVB; sobna temperatura

Preizkuse pri 40 °C in 60 °C smo izvajali v toplotni komori (slika 23), preizkušance pa smo predhodno segreli. Med samim preizkusom na 40 °C so imeli dejansko temperaturo med 33 °C in 35 °C, na 60 °C pa natanko 60 °C.



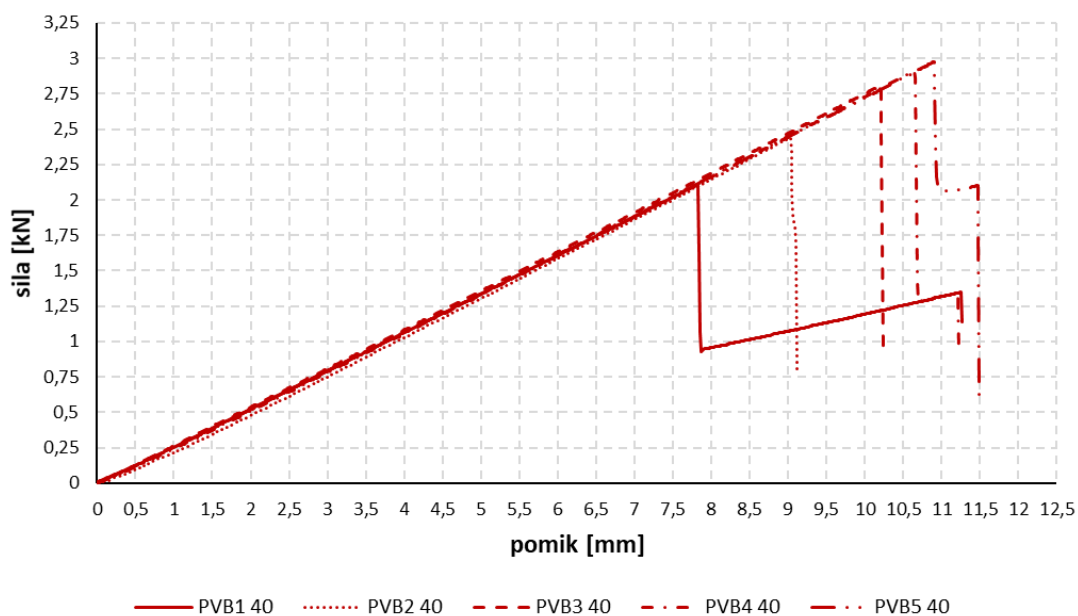
Slika 23: Preizkušanje znotraj toplotne komore

V primerjavi s sobno temperaturo so preizkušanci pri 40 °C prenašali približno enako visoke maksimalne sile, le da so bili pri tem izmerjeni večji pomiki na sredini plošče, kot to prikazuje graf 7. Gibljejo se med 6,5 in 8,5 mm. Vse preizkuse smo izvajali do porušitve obeh steklenih ploskev.



Graf 7: Pomik v odvisnosti od sile za EVA; 40 °C

Pri EVA foliji in PVB meritve, prikazane z grafom 8, kažejo približno enake maksimalne dosežene sile kot pri sobni temperaturi (graf 6) ter za približno 1 mm večje pomike izmerjene na sredini preizkušanca. Pri preizkusih na 40 °C se lastnosti vmesnih slojev že tako spremenijo, da se njihova nosilnost ob porušitvi ploskev povsem zmanjša, to pa prikazuje slika 24.



Graf 8: Pomik v odvisnosti od sile za PVB; 40 °C



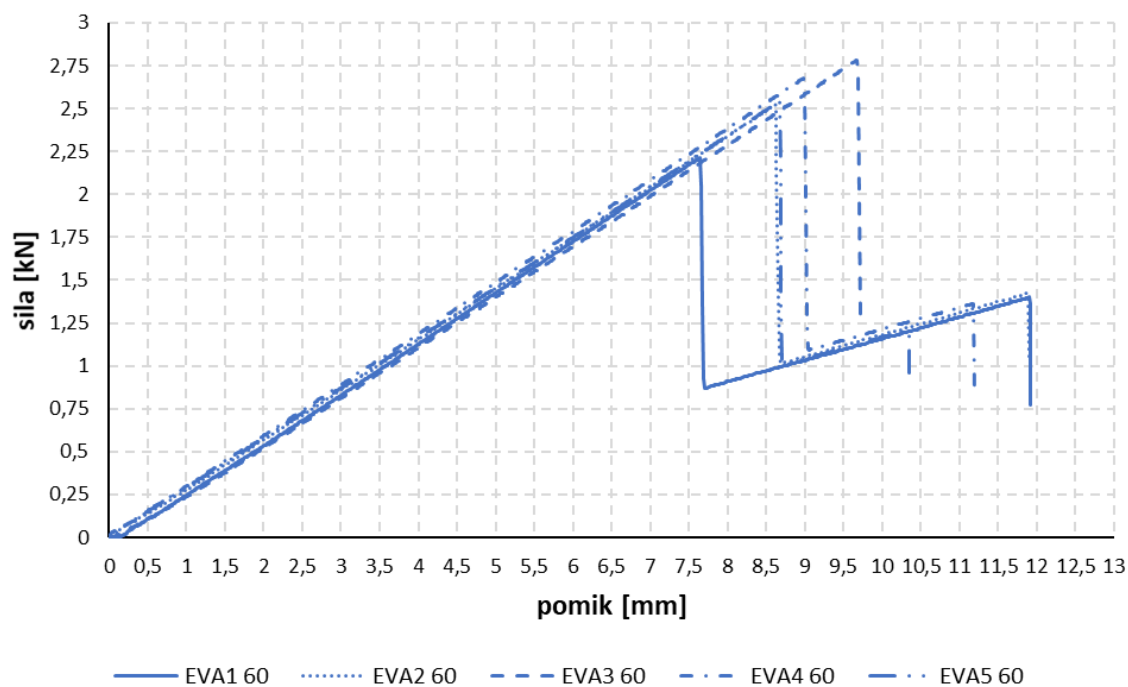
Slika 24: Pri povišanih temperaturah vmesni sloj izgublja svojo togost in nosilnost.

Pri preizkusih na 60 °C so se vsi preizkušanci z vmesnim slojem EVA ob porušitvi obeh ploskev popolnoma prelomili, kot je razvidno iz slike 25. EVA folija pri visokih temperaturah izgubi svojo togost in se tako zmehča, da se pri taki sili pretrga.



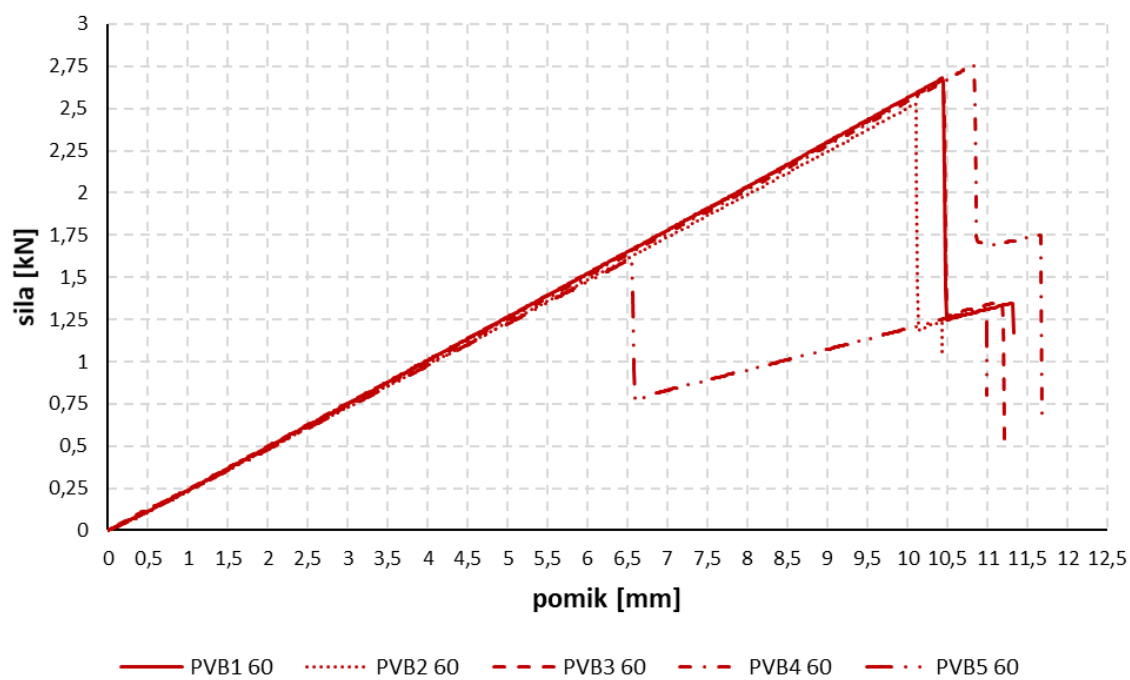
Slika 25: Porušitev preizkušanca z vmesnim slojem EVA pri 60 °C

Pri 60 °C (Graf 9) pa že lahko opazimo, da so tudi izmerjene maksimalne sile nižje. Pomiki pa so za nekaj milimetrov večji kot pri sobni temperaturi (Graf 5) in 40 °C (Graf 7).



Graf 9: Pomik v odvisnosti od sile za vmesni sloj EVA; 60 °C

Enako opazimo tudi pri PVB (Graf 10), le da so pomiki v tem primeru približno enaki kot pri 40 °C (Graf 8), in sicer med 10 in 11 mm.

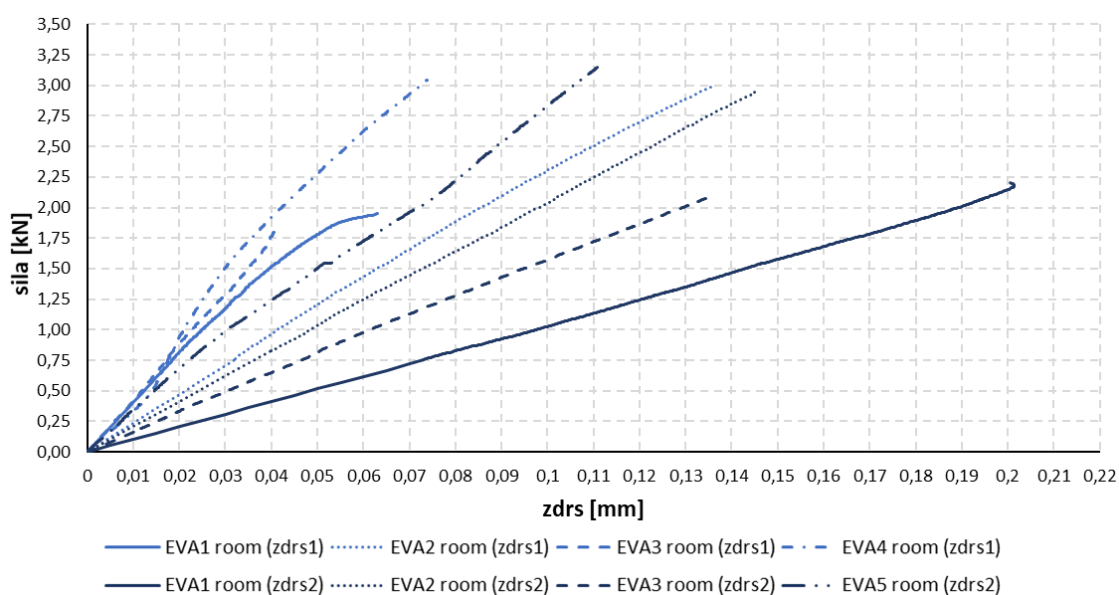


Graf 10: Pomik v odvisnosti od sile za PVB; 60 °C

3.4.2 Zdrs med ploščama

Zdrs med steklenima ploščama smo merili na levi in desni strani, zato imamo grafe za oba merilnika. Zdrsi so večinoma premo sorazmerni s silo in naraščajo linearno. Do različnih odstopanj lahko pride zaradi nepravilnega delovanja merilnika. Pri nekaterih preizkušancih so zaradi upogiba in deformacije merilniki celo odpadli, zato pri teh grafih podatki ne potekajo do maksimalne dosežene sile ali pa so podatki popolnoma napačni in neuporabni.

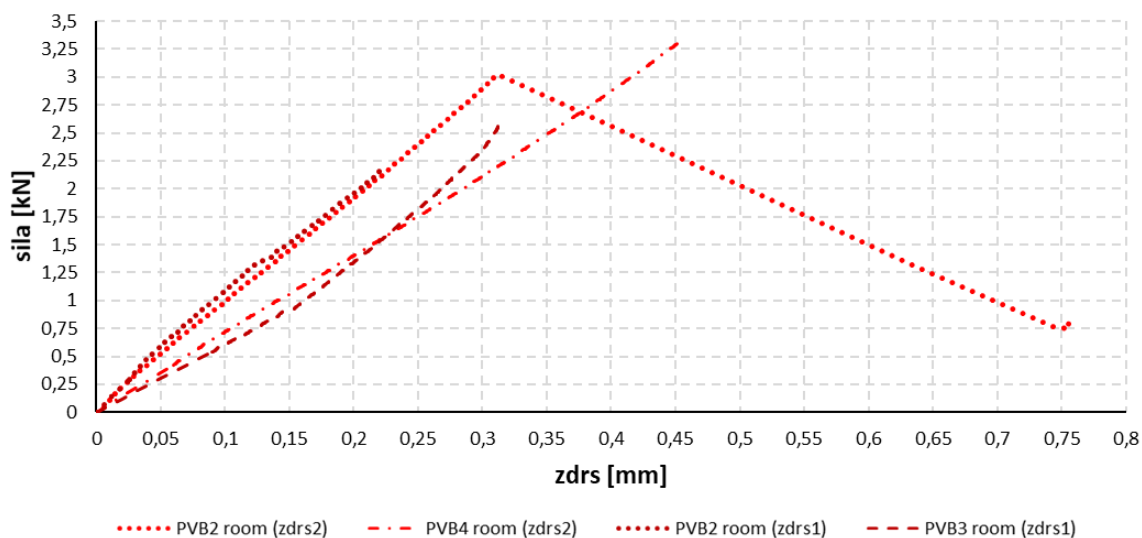
Graf 11 prikazuje zdrse, izmerjene pri preizkušancih z vmesnim slojem EVA pri sobni temperaturi. Zdrsi se gibljejo med 0,07 in 0,20 mm.



Graf 11: Zdrs med steklenima ploščama pri vmesnem sloju EVA; sobna temperatura

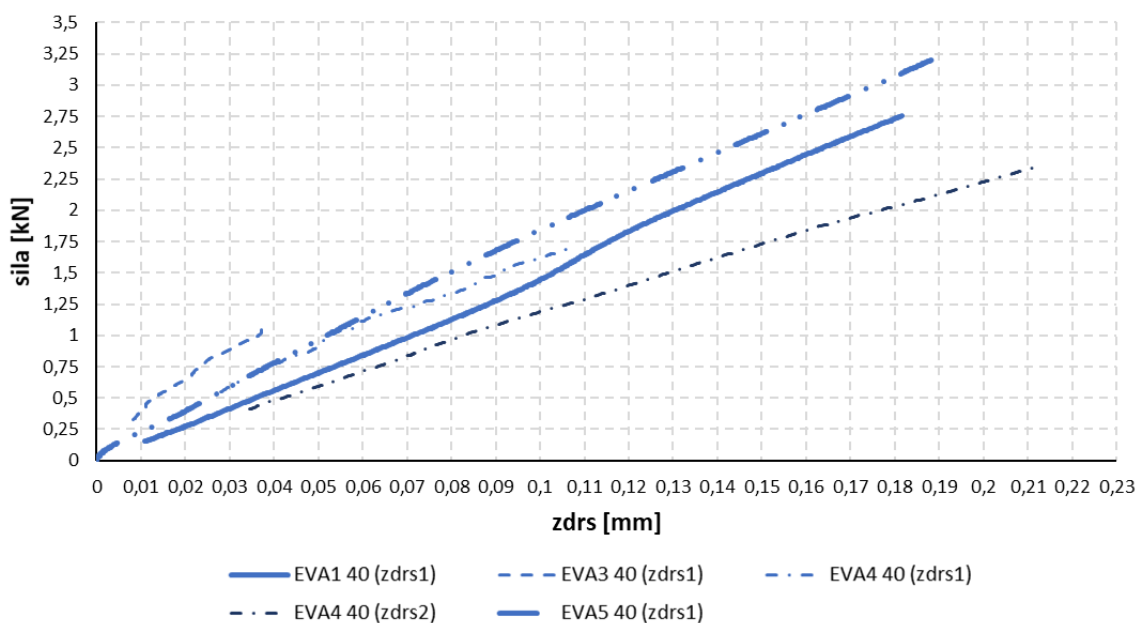
Če primerjamo zdrse pri EVA (Graf 11) in PVB (Graf 12), so bili slednji precej večji pri maksimalni doseženi sili. To je posledica večje togosti EVA folije in njenih dobrih adhezijskih lastnosti.

Zdrse smo izmerili med 0,30 in 0,45 mm, kar je več kot pri EVA (Graf 11).



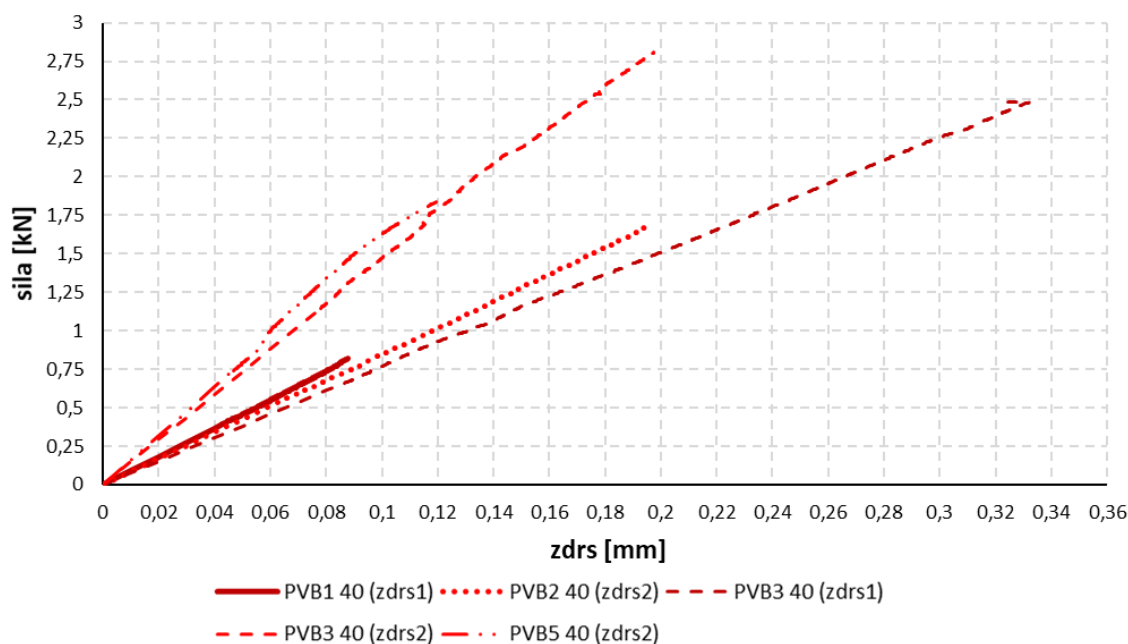
Graf 12: Zdrs med steklenima ploščama pri vmesnem sloju PVB; sobna temperatura

Na grafu 13 lahko razberemo, da so bile dosežene maksimalne sile približno enake kot pri sobni temperaturi. Izmerjeni zdrs med ploskvami pa so bili le nekoliko večji in se gibljejo med 0,18 in 0,21 mm. To pomeni, da dana temperatura že začne povzročati spremembe v togosti folije EVA.



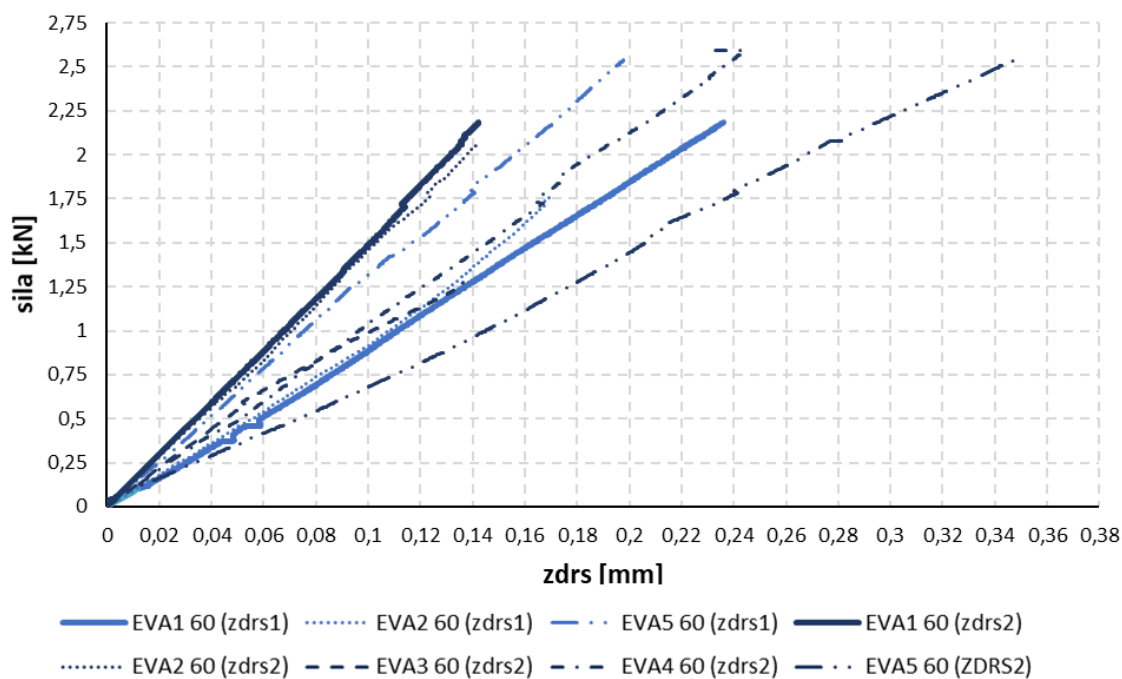
Graf 13: Zdrs med ploščama v odvisnosti od sile pri vmesnem sloju EVA; 40 °C

Enako kot pri EVA (Graf 13) so se tudi pri PVB (Graf 14) z višanjem temperature povečali tudi zdrsi. Izmerili smo jih med 0,20 in 0,34 mm.



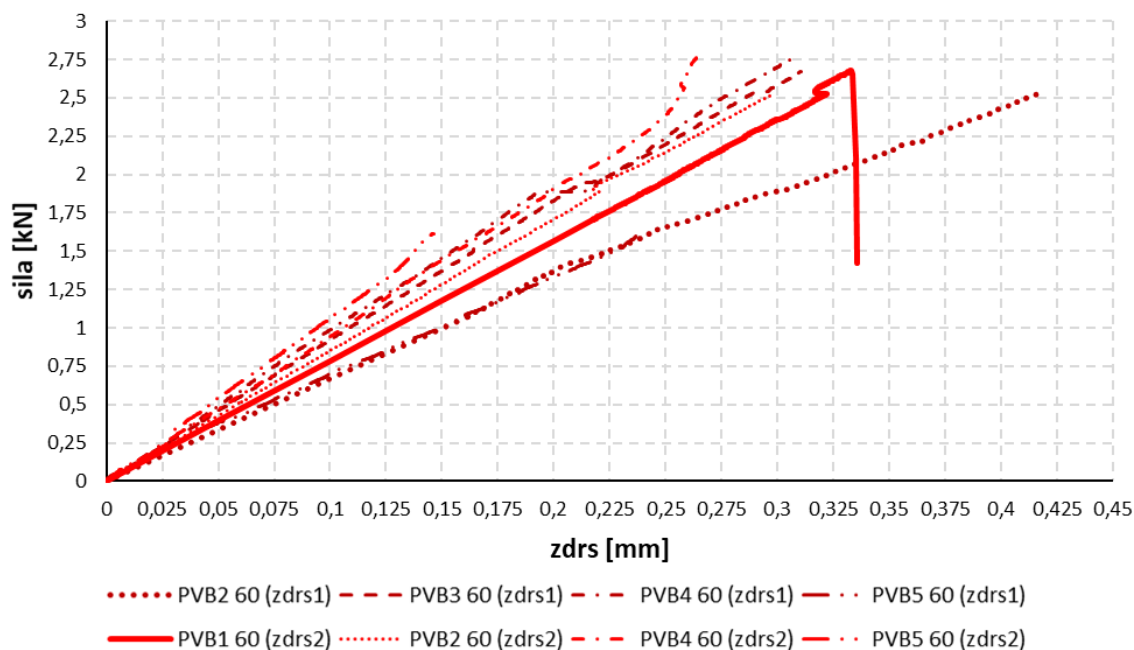
Graf 14: Zdrs med ploščama pri vmesnem sloju PVB; 40 °C

Meritve pri 60 °C za EVA (Graf 15) kažejo, da so bili zdrsi precej večji kot pri sobni temperaturi in 40 °C. Vmesni sloj je vedno bolj mehak, viskozen in elastičen. Enako tudi pri PVB (Graf 16).



Graf 15: Zdrs v odvisnosti od sile pri EVA; 60 °C

Zdrs (Graf 16) so dosegli med 0,25 in 0,43 mm.

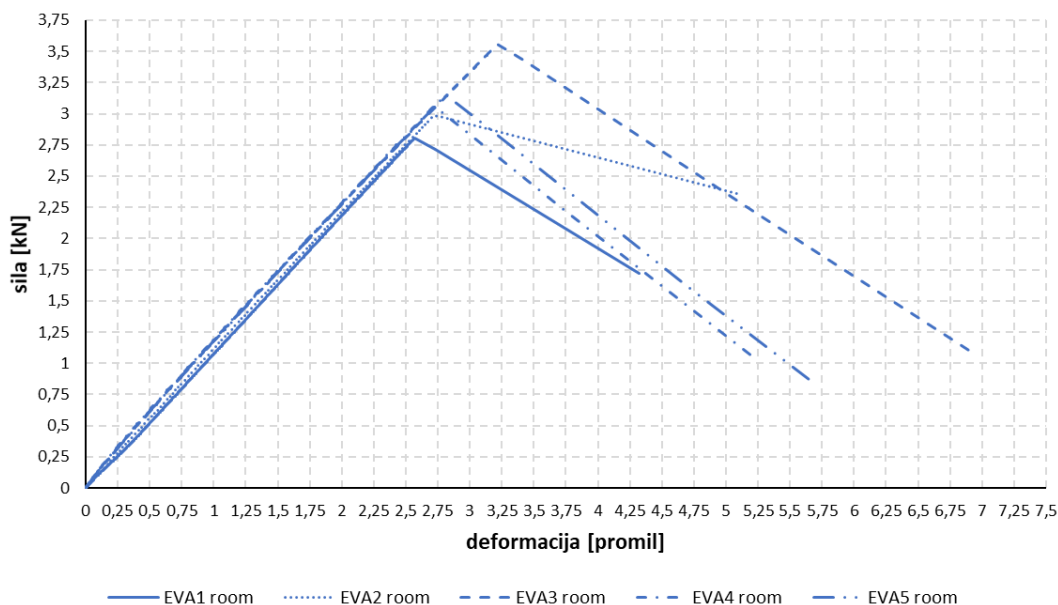


Graf 16: Zdrs med ploskvami pri PVB; 60 °C

3.4.3 Deformacija

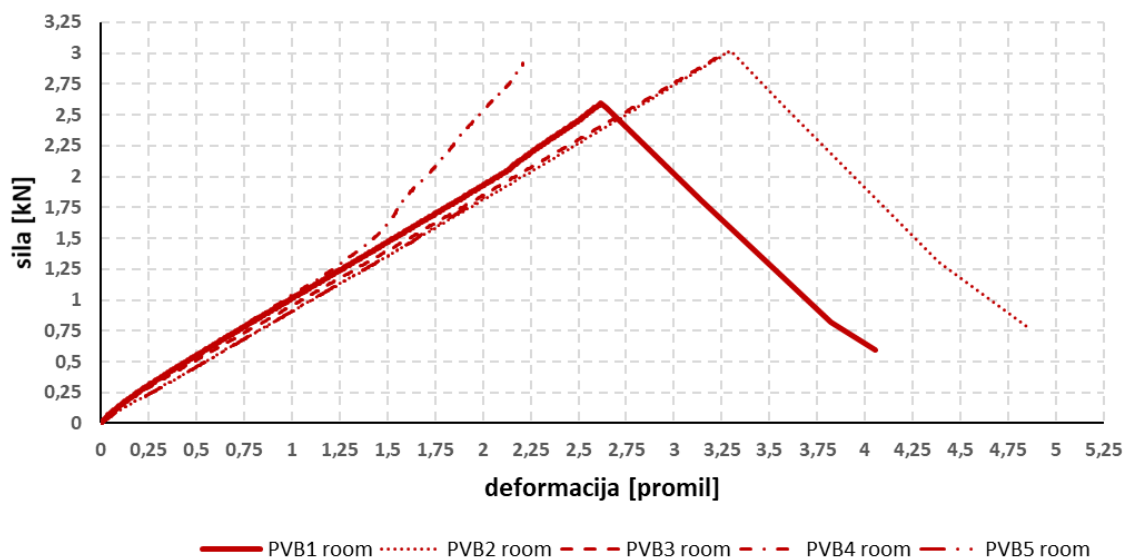
Deformacije smo merili na spodnji ploskvi preizkušancev. Posledično se vse deformacije po poružitvi zmanjšajo, saj se ob tem sprosti napetost v spodnji ploskvi. Nekateri lističi so se ob poružitvi tudi poškodovali, zato tiste meritve niso uporabne.

Na preizkušancih z vmesnim slojem EVA (Graf 17) smo pri maksimalnih doseženih silah izmerili deformacije 2,5–3,25 %.



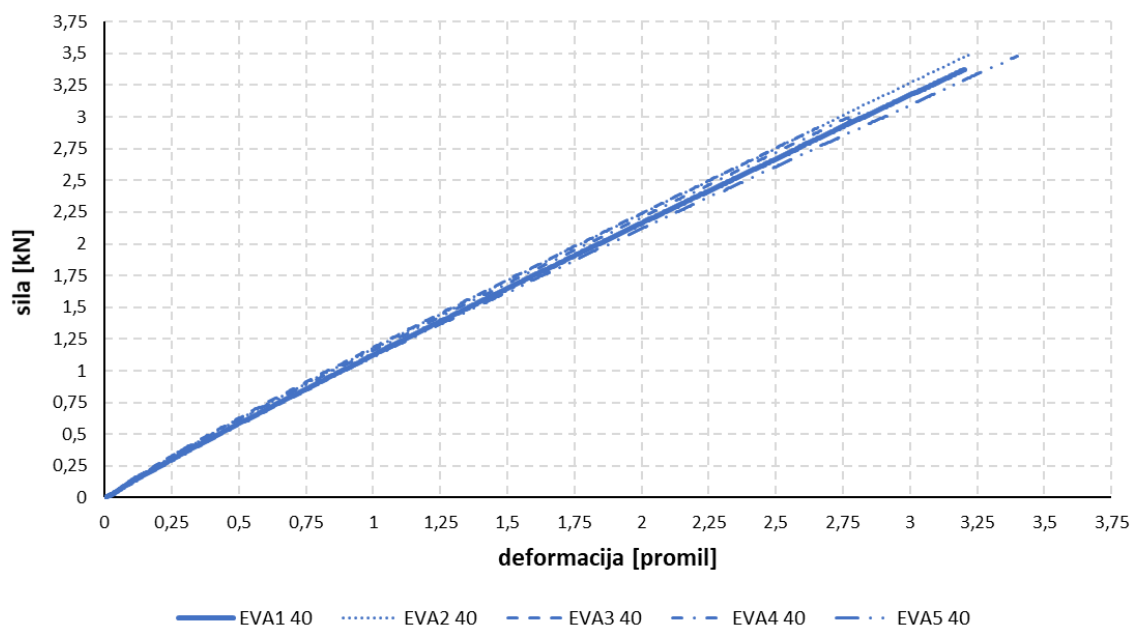
Graf 17: Deformacija v odvisnosti od sile pri EVA; sobna temperatura

Pri meritvah, izvedenih na sobni temperaturi, so vrednosti deformacij za vmesni sloj PVB (Graf 18) približno enake kot za EVA (Graf 17). Vrednosti se prav tako gibljejo med 2,5 in 3,25 promila.



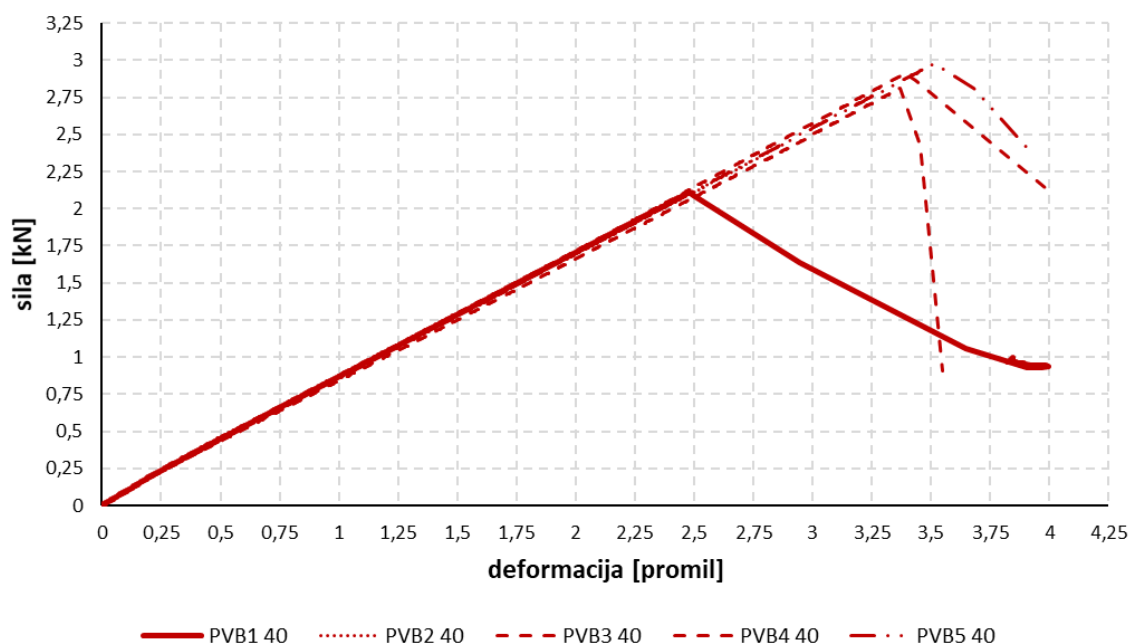
Graf 18: Deformacija v odvisnosti od sile pri PVB; sobna temperatura

Za preizkušance z vmesnim slojem EVA lahko ob primerjavi rezultatov pri sobni temperaturi (Graf 17) in 40 °C (Graf 19) opazimo, da so bile deformacije večje, vendar je ta razkorak precej majhen.



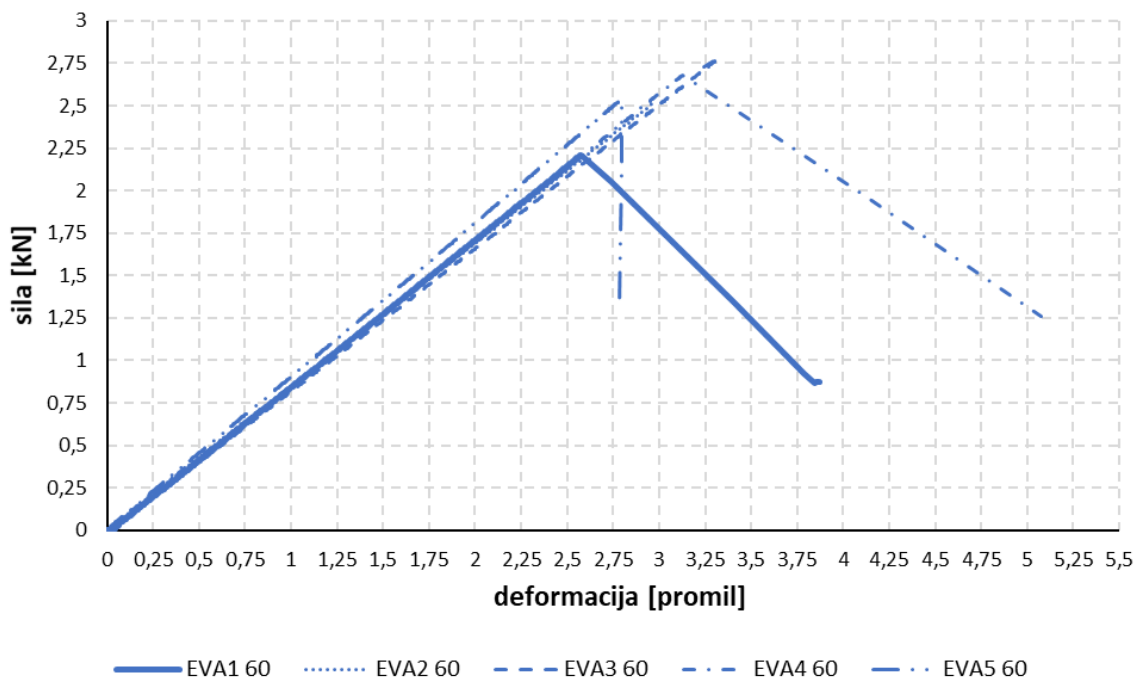
Graf 19: Deformacija v odvisnosti od sile pri vmesnem sloju EVA; 40 °C

Enako kot pri sobni temperaturi se tudi pri 40 °C deformacije pri vmesnem sloju EVA (Graf 19) skoraj ne razlikujejo od izmerjenih pri vmesnem sloju PVB (Graf 20).



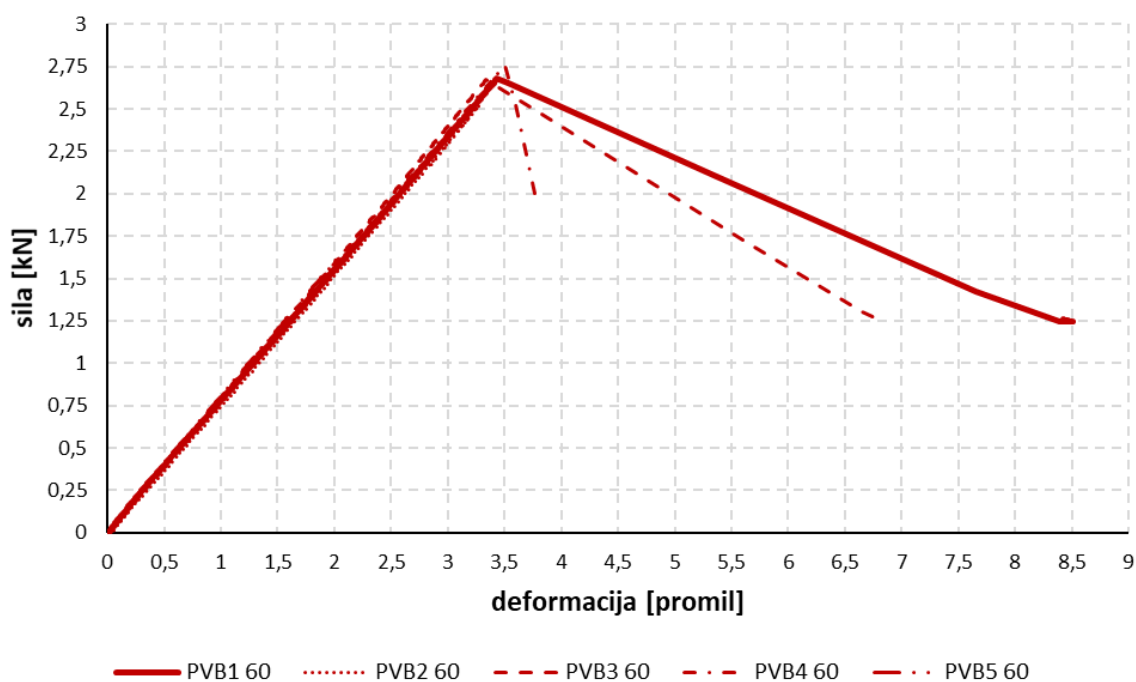
Graf 20: Deformacija v odvisnosti od sile pri PVB; 40 °C

Izmerjene deformacije pri 60 °C za preizkušance z vmesnim slojem EVA (Graf 21) so večje pri nižjih maksimalnih doseženih silah kot pri sobni temperaturi (Graf 17).



Graf 21: Deformacija v odvisnosti od sile pri EVA; 60 °C

Deformacije pri preizkušanjih s PVB (Graf 22) so približno enake kot pri preizkusu na 40 °C (Graf 20), pri čemer velja pripomniti, da so bile dosežene nižje maksimalne sile, ki so jih preizkušanci prenesli.



Graf 22: Deformacija v odvisnosti od sile za PVB; 60 °C

3.4.4 Togost

Togost je izračunana kot razmerje med maksimalno izmerjeno silo in pripadajočim pomikom. Enota je torej kN/mm.

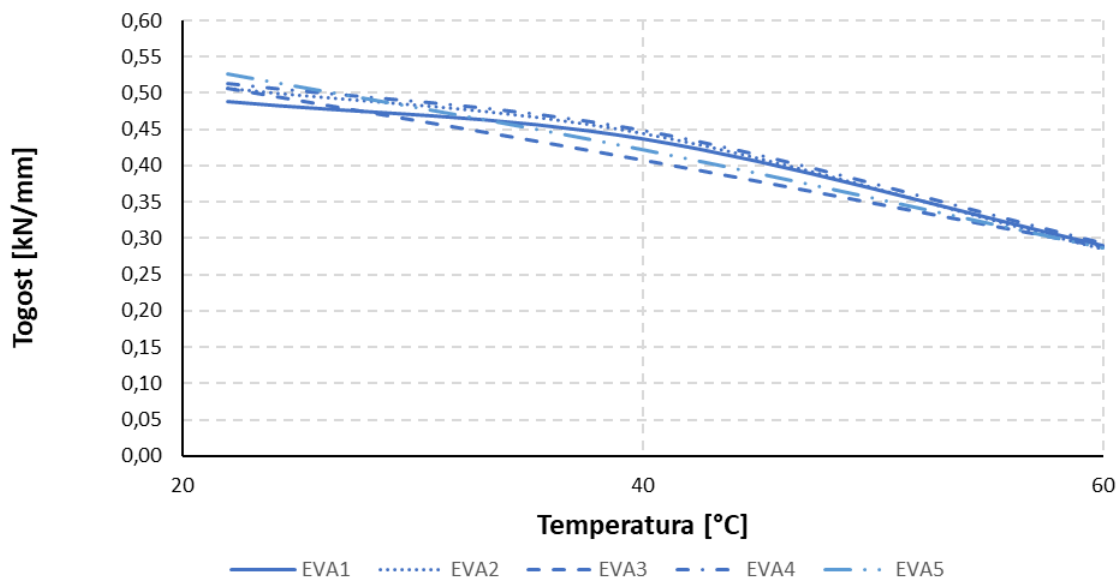
Iz razpredelnice (Tabela 2) lahko vidimo, da so togosti PVB folije pri vseh temperaturah manjše kot EVA. Glede na temperaturo pa se pri obeh ob višjih temperaturah togosti nižajo. Posledica tega je zmanjšanje viskoznosti vmesnega sloja.

Tabela 2: Izračunana togost preizkušancev z različnimi vmesnimi sloji pri različnih temperaturah

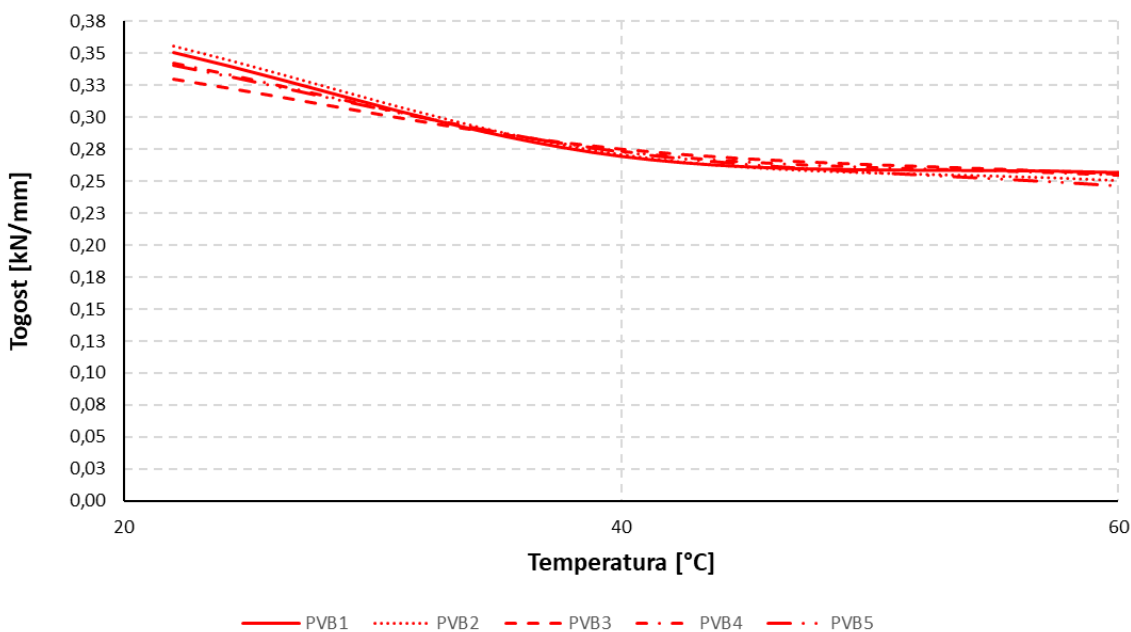
	room	40°C	60°C
EVA1	0,4883	0,4370	0,2894
EVA2	0,5066	0,4444	0,2842
EVA3	0,5066	0,4076	0,2877
EVA4	0,5138	0,4490	0,2927
EVA5	0,5268	0,4226	0,2870
PVB1	0,3509	0,2694	0,2567
PVB2	0,3557	0,2707	0,2503
PVB3	0,3300	0,2754	0,2558
PVB4	0,3423	0,2734	0,2547
PVB5	0,3409	0,2728	0,2460

Vrednosti iz razpredelnice 2 so prikazane tudi na grafu 23 in 24. Vidimo, da potek grafa ni linearen. Pri preizkušancih z vmesnim slojem EVA, kar prikazuje graf 23, togost hitreje pada pri višjih temperaturah, saj je EVA že pri sobni temperaturi bolj toga.

Pri preizkušancih z vmesnim slojem PVB (graf 24) pa togost hitreje pada pri nižjih temperaturah.

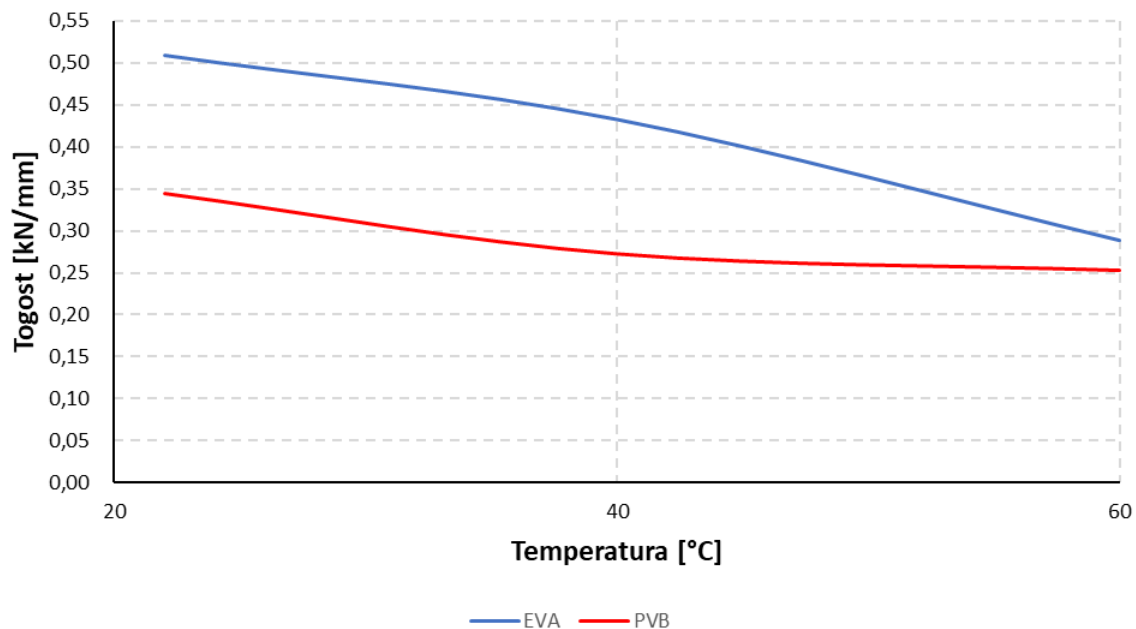


Graf 23: togosti preizkušancev z vmesnim slojem EVA v odvisnosti od temperature



Graf 24: togosti preizkušancev z vmesnim slojem PVB v odvisnosti od temperature

Graf 25 pa prikazuje razliko povprečnih vrednosti vseh petih preizkušancev z EVA in PVB.



Graf 25: primerjava izračunanih povprečnih vrednosti za preizkušance z vmesnim slojem EVA in PVB

4 ZAKLJUČEK

Iz predhodno pridobljenih informacij lahko povzamemo, da je EVA sicer boljši material za povezovalni sloj pri lameliranju, vendar tudi dražji. Vse vrednosti meritev deformacij in pomikov, ki so jih izvajali v opisanih člankih, so bile višje pri preizkušancih z vmesnim slojem PVB, kot pri tistih z vmesnim slojem EVA.

Kot v raziskovalnih člankih, smo tudi mi prišli do podobnih zaključkov. Pri opazovanju in merjenju odziva preizkušancev, lahko ugotovimo, da se vse izmerjene vrednosti povečujejo z višanjem temperature. To pomeni, da se togost vmesnega sloja pri višjih temperaturah zmanjšuje. Preizkušanci z vmesnim slojem EVA, so se pri preizkusih na 60 °C po poružitvi obeh steklenih plasti celo prelomili, kar pomeni, da je bila EVA folija pri tej temperaturi sama po sebi popolnoma nenosilna. Ta ugotovitev preseneča, saj bi lahko sodeč po izmerjenih vrednostih, zaključili, da je sloj EVA bolj nosilen, kot PVB. Tudi iz izračunanih togosti vidimo, da imajo preizkušanci z vmesnim slojem EVA kar nekoliko višjo togost, kot tisti z vmesnim slojem PVB. Izdelani grafi prikazujejo, da pri preizkušancih z EVA folijo togost hitreje pada pri razponu med 40 °C in 60 °C, pri tistih z PVB folijo pa se hitreje spreminja pri temperaturah med 20 °C in 40°C.

Pri uporabi lameliranega konstrukcijskega stekla vsekakor ne smemo zanemariti vpliva temperature, še posebej kadar je kot fasadni sloj stalno izpostavljen različnim vremenskim razmeram. Pri temperaturnem razponu od sobne temperature do 40 °C spremembe sicer niso tako razvidne, vendar velja pripomniti, da se lahko steklo pod stalnim vplivom sonca segreje tudi na višje temperature, kjer so spremembe že očitnejše in lahko močno vplivajo na lastnosti in nosilnost samega lameliranega stekla.

VIRI

- [1] Babič, A. 2013. Upogibne preiskave in modeliranje lameliranega stekla. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Babič) 84 f.
- [2] Antolinc, D. 2014. Uporaba steklenih panelov za potresno varno gradnjo objektov. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba D. Antolinc) 160 f.
- [3] Frlan, M. 2011. Mehanske lastnosti lameliranega stekla. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Frlan) 87 f.
- [4] Hidalgo, G. 2014. Glass Laminated Structures with EVA or PVB. A Comparison Analysis.
<https://www.novogenio.com/blog/glass-laminated-structures-with-eva-or-pvb.-a-comparison-analysis>
(Pridobljeno 08. 04. 2019)
- [5] Weller, B., Wunsch, J., Harth, K. 2005. Experimental Study on Different Interlayer Materials for Laminated Glass. Dresden, Germany, Technische Universität Dresden, Institute of Building Construction
- [6] Polansky, R., Pinkerova, M., Bartunkova, M., Prosr, P. 2013. Mechanical behavior and thermal stability of EVA encapsulant material used in photovoltaic modules. Journal of ELECTRICAL ENGINEERING, VOL. 64, NO. 6, 2013, 361–365
- [7] Amin Samieian, M., Cormie, D., Smith, D., Wholey, W., Blackman, B., Dear, J., Hooper, P. 2018. Temperature effects on laminated glass at high rate. London, Imperial College London, Department of Mechanical Engineering,
- [8] Serafinavičius, T., Lebet, J., Louter, C., Lenkimas, T., Kuranovas, A. 2013. Long-term laminated glass four point bending test with PVB, EVA and SG interlayers at different temperatures. Procedia Engineering 57 (2013) 996 – 1004.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581300859X> (Pridobljeno 08. 04. 2019)
- [9] Pankhardt, K. 2010. Temperature dependant flexural stiffness of load bearing laminated glass panes. Debrecen, Hungary, Department of Civil Engineering, Debrecen University
- [10] Kruger, G. 1998. Temperature effects on the structural behavior of laminated glass. Otto-Graf-Journal Vol.9
<https://www.scribd.com/document/54501181/Temperature-Effects-on-the-Structural-Behavior-of-Laminated-Safety-Glass> (Pridobljeno 08. 04. 2019)