

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Iva Mikulić

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zdravko Schauperl, dipl. ing.

Student:

Iva Mikulić

Zagreb, 2015.

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

Zahvaljujem se svom mentoru, prof. dr. sc. Zdravku Schauperlu, na pruženoj pomoći, razumijevanju, korisnim savjetima i informacijama potrebnim za izradu ovog rada. Isto tako zahvaljujem se prof. dr. sc. Amiru Ćatiću, prof. dr. sc. Janošu Kodvanju i Božidaru Bušetinčanu na ustupljenim materijalima, korisnim informacijama za izradu ovog završnog rada i na samoj pomoći prilikom izrade.

Također zahvalu upućujem svojoj obitelji i Kristianu na pomoći, bezuvjetnoj podršci i razumijevanju.

Iva Mikulić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Iva Mikulić** Mat. br.: 0035181264

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ojačanje dentalnih polimera staklenim vlaknima**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Glass fiber reinforced dental acrylic resin**

Opis zadatka:

U mobilnoj protetici vrlo često se koriste dijelovi izrađeni od akrilnih polimera. Obzirom da su ti dijelovi u primjeni izloženi mehaničkim opterećenjima, često se događaju lomovi koje je potrebno sanirati. Stoga je u ovom završnom radu potrebno istražiti mogućnosti ojačanja dentalnih akrilnih polimera staklenim vlaknima.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je izraditi uzorke kompozitnih materijala od akrilnog polimera ojačanog staklenim vlaknima, te provesti ispitivanja osnovnih mehaničkih svojstava. Osim tih ispitivanja potrebno je i analizirati mikrostrukturu dobivenog kompozita s posebnim naglaskom na adheziju matrice i ojačala. Dobivene rezultate je potrebno obraditi te donijeti zaključke o mogućnosti ojačanja dentalnih akrilata sa staklenim vlaknima.

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


Zadatak zadan:
25. studenog 2014.

Zadatak zadao:


Prof.dr.sc. Zdravko Schauerl

Rok predaje rada:
1. rok: 26. veljače 2015.
2. rok: 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 2., 3., i 4. ožujka 2015.
2. rok: 21., 22., i 23. rujna 2015.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	V
1. UVOD.....	1
2. POLIMERI I KOMPOZITI	3
2.1. Polimeri.....	3
2.2. Kompoziti.....	4
2.2.1. Polimerni kompoziti.....	5
2.3. Primjena polimera i kompozita u stomatologiji	5
2.3.1. Akrilati	6
2.3.2. Ostali polimeri u stomatologiji	7
2.3.3. Kompoziti u stomatologiji	7
3. EKSPERIMENTALNI DIO	9
3.1. Izrada uzoraka	11
3.1.1. Materijali, uređaji i pribor	11
3.1.2. Izrada pločica od akrilata (A).....	16
3.1.3. Izrada kompozitnih pločica AO ₁	19
3.1.4. Izrada kompozitnih pločica AO ₂	22
3.2. Ispitivanje mehaničkih svojstava	25
3.2.1. Ispitivanje udarnog rada loma.....	25
3.2.2. Statičko vlačno ispitivanje	28
3.2.3. Ispitivanje savijanja u tri točke	31
4. REZULTATI	35
4.1. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma.....	35
4.2. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja.....	36
4.3. Rezultati ispitivanja savijanja u tri točke	39
5. ZAKLJUČAK.....	43
LITERATURA.....	45
PRILOZI.....	46

POPIS SLIKA

Slika 1: Ojačanje za AO ₁ [9]	12
Slika 2: Ojačanje za AO ₂ [9]	12
Slika 3: Ivomat – uređaj za tlačno – toplinsku polimerizaciju	13
Slika 4: Vibrator i kalup	14
Slika 5: Špatulica za miješanje	14
Slika 6: Mjerni cilindar	15
Slika 7: Stezaljka za vađenje kalupa	15
Slika 8: Miješanje akrilata u mjernom cilindru	16
Slika 9: Uljevanje smjese (akrilata) u kalup	17
Slika 10: Umetanje kalupa u Ivomat	17
Slika 11: Uljevanje vode u Ivomat za polimerizaciju A	18
Slika 12: Uvjeti odvijanja polimerizacije	18
Slika 13: Uljevanje prvog sloja akrilata za izradu AO ₁	19
Slika 14: Stavljanje ojačanja prilikom izrade AO ₁	20
Slika 15: Uljevanje drugog sloja akrilata za izradu AO ₁	20
Slika 16: Uljevanje vode u Ivomat za polimerizaciju AO ₁	21
Slika 17: Stavljanje ojačanja prilikom izrade AO ₂	22
Slika 18: Uljevanje vode u Ivomat za polimerizaciju AO ₂	23
Slika 19: Konačan izgled epruveta od materijala A	24
Slika 20: Konačan izgled epruveta od materijala AO ₁	24
Slika 21: Konačan izgled epruveta od materijala AO ₂	25
Slika 22: Charpy-ev bat	26
Slika 23: Epruveta u čeljusti Charpy-evog bata	27
Slika 24: Univerzalni stroj za ispitivanje Messphysik BETA 50-5	29
Slika 25: Postavljanje epruvete za statičko vlačno ispitivanje	30
Slika 26: Položaj graničnika na epruveti	30
Slika 27: Stroj za ispitivanje savijanja u tri točke	32
Slika 28: Ispitivanje savijanja u tri točke	33
Slika 29: Položaj epruvete prilikom ispitivanja savijanja u tri točke	34
Slika 30: Dijagram statičkog vlačnog ispitivanja za A	37
Slika 31: Dijagram statičkog vlačnog ispitivanja za AO ₁	38
Slika 32: Dijagram statičkog vlačnog ispitivanja za AO ₂	38
Slika 33: Dijagram ispitivanja savijanja u tri točke za A	40
Slika 34: Dijagram ispitivanja savijanja u tri točke za AO ₁	41
Slika 35: Dijagram ispitivanja savijanja u tri točke za AO ₂	42

POPIS TABLICA

Tablica 1: Prednosti i nedostaci polimernih materijala [4]	4
Tablica 2: Broj pločica koje je potrebno izraditi	9
Tablica 3: Dimenzije i broj epruveta po normi	10
Tablica 4: Konačne dimenzije epruveta	11
Tablica 5: Dimenzije epruveta za ispitivanje udarnog rada loma	27
Tablica 6: Dimenzije epruveta za statičko vlačno ispitivanje	28
Tablica 7: Dimenzije epruveta za ispitivanje savijanja u tri točke.....	31
Tablica 8: Rezultati ispitivanja udarnog rada loma.....	35
Tablica 9: Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja za A	36
Tablica 10: Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja za AO ₁	36
Tablica 11: Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja za AO ₂	36
Tablica 12: Rezultati ispitivanja savijanja u tri točke za A	39
Tablica 13: Rezultati ispitivanja savijanja u tri točke za AO ₁	40
Tablica 14: Rezultati ispitivanja savijanja u tri točke za AO ₂	41

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	-	akrilat
AO ₁	-	akrilat ojačan gustim staklenim vlaknima
AO ₂	-	akrilat ojačan rijetkim staklenim vlaknima
URL	J	udarni rad loma
S ₀	mm ²	poprečni presjek
F _m	N	maksimalna sila
R _m	MPa	vlačna ili rastezna čvrstoća
A _{gt}	%	ukupno istezanje
E	GPa	modul elastičnosti
F _{max}	N	maksimalna sila
s _{max}	mm	maksimalni pomak
E _f	GPa	modul elastičnosti
σ _{fM}	MPa	savijanje (naprezanje)
ε _{fM}	%	deformacija prilikom savijanja
d _{fM}	mm	defleksija prilikom savijanja

SAŽETAK

Završni rad je koncipiran tako da u prvom dijelu daje kratki opis i definicije polimera i kompozita te polimernih materijala koji se koriste u dentalnoj medicini, pri čemu je naglasak na akrilatima. Između ostalog, razrađuje se problematika primjene akrilnih polimera prilikom izrade dentalnih proteza zbog čestih lomova istih. U eksperimentalnom dijelu rada je opisan postupak izrade uzoraka i način ispitivanja osnovnih mehaničkih svojstava – žilavost, vlačna čvrstoća i savojna svojstva. Nadalje, prikazani su rezultati pomoću tablica i dijagrama, koji su se analizirali i usporedili.

U skladu sa zadatkom rada, na temelju dobivenih rezultata ispitivanja izvedeni su odgovarajući zaključci o smislu ojačavanja dentalnih akrilata sa staklenim vlaknima.

1. UVOD

Iz dana u dan se povećava potreba svakog ljudskog bića da širi vlastite i tuđe, već postojeće, spoznaje o svijetu u kojem živi. U ljudskoj je prirodi da čovjek proučava i istražuje, a na temelju toga donosi brojne zaključke. Na taj način, iz dana u dan se obogaćuju mnoga područja znanosti te se unapređuje tehnologija i kvaliteta života.

Tehnološki napredak je povezan, između ostalog, i sa razvojem materijala. Zbog toga su pojedine epohe u razvoju civilizacije dobile ime po materijalu čije je korištenje obilježilo pojedinu epohu (kamen, bakar, bronca i željezo). Očito je da su u prošlosti prednost prilikom korištenja imali metali. S vremenom se težilo modificiranju već postojećih i razvoju novih vrsta metalnih materijala, a ta težnja traje i dan danas.

Kako primjena materijala nije ograničena samo na jedno područje ljudskog djelovanja, već se koristi u raznim granama djelatnosti, bilo je potrebno istraživati i razvijati i druge grupe materijala jer jedna vrsta materijala, sa sličnim svojstvima unutar te grupe, ne može zadovoljiti sve zahtjeve u potpunosti. Razvoj novih materijala ili unapređenje postojećih zasniva se na korištenju stečenih znanja o ponašanju poznatih materijala, a ona predstavljaju osnovu za dizajniranje novih materijala i predviđanje njihovih karakteristika. U skladu s time, osim metala, sve više se koriste materijali poput keramike i polimera.

Široka proizvodnja i upotreba sintetskih materijala, te činjenica da je 1979. godine proizvodnja polimera premašila proizvodnju čelika, govori o tome da je započelo novo tehnološko razdoblje. Stoga je 20. stoljeće nazvano: „polimerno doba“ [1]. Raspon primjene je širok zbog zahvalnih svojstava pa ne postoji grana djelatnosti u kojoj se ne koristi u bilo kojem obliku.

Iako je sve veća raširenost polimera, njihova mehanička svojstva su relativno loša pa ih je potrebno ojačavati. Na taj način nastaju kompoziti. Kompoziti istovremeno mogu postići visoku čvrstoću, visoku krutost i malu masu, otpornost na različite medije i druge kombinacije svojstava [2]. Takvi, relativno novi materijali u upotrebi, traže svoju primjenu, a neki od njih već zamjenjuju konvencionalne materijale.

Osim traženih svojstava, materijal mora ispunjavati i druge zahtjeve, a neki od njih su: cijena, kvaliteta izrade, vijek trajanja te sve više se zahtijeva povoljan učinak materijala na čovjeka i okoliš.

Područja u kojima se osobito trebaju razvijati što kvalitetniji materijali s povoljnim učinkom na čovjeka su medicina i dentalna medicina. Oni moraju biti otporni na tjelesne izlučevine, imati dugi vijek trajanja i biti pristupačni cijenom. Također, možda najbitnije, moraju biti biorazgradivi, neagresivni i da ne izazivaju alergije. Moraju imati dobra mehanička svojstva kako bi se spriječili lomovi i deformacije. Kako bi se to osiguralo, potrebno je konstantno unapređenje, istraživanje i širenje postojećih znanstvenih vidika.

Upravo sve prethodno navedeno je temeljni cilj ovog završnog rada koji se sastoji od dva dijela, teorijskog i eksperimentalnog, a čija tema je mogućnosti ojačanja dentalnih polimera staklenim vlaknima. Razlog izbora navedene teme su lomovi koji su vrlo česti u mobilnoj protetici prilikom izlaganja dentalnih proteza mehaničkim opterećenjima. Osnova ovog rada je istražiti mogućnosti ojačanja dentalnih akrilnih polimera (akrilata) staklenim vlaknima i usporediti uzorke od izrađenih kompozita s dvije vrste staklenih vlakana međusobno te s postojećim akrilatom koji se upotrebljava prilikom izrade dentalnih proteza na svakodnevnoj bazi. Istraživanje je provedeno na način da su se izradili uzorci, provela ispitivanja osnovnih mehaničkih svojstava te na kraju donijeli zaključci o rezultatima i o smislu upotrebe ispitivanih materijala u budućnosti.

2. POLIMERI I KOMPOZITI

2.1. Polimeri

Postoji velik broj tvari i materijala koje je moguće smatrati polimerima. Pripadnost skupini polimera uvjetovana je prije svega zajedničkim karakteristikama u strukturi, a sličnosti u fizikalnim svojstvima samo su posljedica toga. Kod utvrđivanja pripadnosti skupini polimera ne treba polaziti od fizikalnih svojstava, jer skupina polimera ima daleko najširi raspon kako tipova tako i intenziteta fizikalnih svojstava. Upravo i sama definicija kaže da su polimeri skupni naziv za tvari i materijale čiji osnovni sastojak su makromolekule [3].

Polimere možemo dijeliti po postanku i po kemijskom sastavu. Po postanku ih dijelimo na [3]:

1. prirodne (npr. prirodni kaučuk, celuloza, škrob...)
2. sintetske (npr. polietilen, epoksidne smole...).

Po kemijskom sastavu se dijele na organske i anorganske polimere [3].

U tehničke svrhe rijetko kada se primjenjuju čisti polimeri (polimerizati), pogotovo kada su poželjna bolja mehanička svojstva. Zbog toga se čistom polimeru dodaje neki dodatak ili se primjenjuju posebni postupci prerade te se tada govori o polimernom materijalu [4]. Iako, u skladu s prethodno navedenim, skupina polimernih materijala ima široki raspon tipova materijala i njihovih svojstava, u Tablici 1 su navedene prednosti i nedostaci većine polimernih materijala.

Tablica 1: Prednosti i nedostaci polimernih materijala [4]

Prednosti	Nedostaci
mala gustoća	ovisnost svojstava o raznim faktorima
dobra kemijska postojanost	veća toplinska rastezljivost
dobra otpornost na trošenje	nizak modul elastičnosti
mali faktor trenja	mala površinska tvrdoća
dobro prigušivanje vibracija	podložnost starenju
dobra toplinska svojstva	mala toplinska vodljivost
dreradljivost deformiranjem	utjecaj prerade na svojstva
ekonomična serijska izrada dijelova	neekonomična proizvodnja malih količina

2.2. Kompoziti

Kompozitni materijali, odnosno kompoziti, proizvedeni su umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s jasnom granicom između njih. Posljedica je dobivanje materijala takvih svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe [4].

Iz navedene definicije se može zaključiti kako su svi višefazni materijali kompoziti, no sam naziv – kompoziti se upotrebljava za one kombinacije dvaju ili više materijala koji se mogu rabiti kao samostalni materijali [4].

Temeljna podjela kompozita je na metalne, keramičke i polimerne kompozite. Također ih možemo razvrstati na kompozite s česticama, vlaknima ojačane kompozite i strukturne kompozite. Kompozitni materijali se sastoje od najmanje dvaju tvari – osnovnog materijala (matrice) i dodatnog materijala (ojačala ili punila) [4].

Zadaća ojačala je da budu nosivi elementi kompozita, tj. da osiguraju visoku čvrstoću, visoki modul elastičnosti – krutost i otpornost na trošenje. Zadaće matrice su da drži ojačala zajedno, štiti ih od vanjskih utjecaja, ima važnu funkciju u prijenosu opterećenja na ojačalo, daje vanjsku formu kompozitu, određuje njegovo ponašanje s obzirom na djelovanje atmosfere itd...[5].

2.2.1. Polimerni kompoziti

Polimerni kompoziti su najraširenija vrsta kompozita. Proizvodi od polimernih kompozita zastupljeni su u raznim granama industrijske proizvodnje, gdje vrlo uspješno zamjenjuju klasične konstrukcijske materijale. Tako ih se, primjerice, susreće u automobilskoj industriji, brodogradnji, građevinarstvu, elektrotehnici i elektronici, a sve više u zrakoplovstvu, vojnoj industriji te u raznim svemirskim programima [3,4].

Polimer kao matrica osigurava dobru žilavost, obradljivost i izuzetnu korozivnu otpornost. Od polimernih kompozita najrašireniji su vlaknima ojačani – vlaknasti polimerni kompoziti. Njihove prednosti su: veća specifična čvrstoća i krutost, postojanost prema većini kiselina i lužina, relativno niska cijena i velika mogućnost prigušenja vibracija, dok su nedostaci: osjetljivost na raslojavanje, neplastičnost te mogućnost širenja pukotina duž vlakana. Vlakna mogu biti duga ili kratka, te se pojavljuju u obliku viskera, niti ili žice čiji promjeri su u rasponu od 1 µm do 1 mm. Volumni udio vlakana u kompozitu može iznositi i više od 70 % [3,4].

2.3. Primjena polimera i kompozita u stomatologiji

Prilikom promatranja postojećih, poboljšavanju ili traženju novih materijala koji se koriste u dentalnoj protetici pri izradi proteza, vrlo je važno uskladiti saznanja iz svih navedenih područja znanosti. Kako bi se postigla bolja i jeftinija rješenja, brojni proizvođači vrlo ozbiljno i dugotrajno preispituju i poboljšavaju postojeće, kao što istražuju i pronalaze nove materijale [1].

Potrebno je odabrati materijal koji će imati što bolja mehanička svojstva, uz zadovoljavajući estetski učinak i dr. Istodobno se mora razmišljati o izboru materijala za određenu namjenu, odnosno o dostupnim materijalima u tom trenutku, koji ujedno mogu osigurati tražena svojstva za konkretnu primjenu. Pri odabiru stanovitu ulogu igra stalno praćenje literature i novih spoznaja. Ponekad se pojavljuju proizvodi koji nisu prošli takav, strogi put postupaka proizvodnje i provjere, pa su moguće i neželjene posljedice [1].

Materijali koji se koriste u stomatološkoj protetici mogu se razvrstati u sljedeće grupe [1]:

1. nemetali
2. neplemeniti metali
3. plemeniti metali
4. legure

2.3.1. Akrilati

Akrilati su polimeri koji se dobivaju spajanjem jednostavnih kemijskih spojeva, tzv. monomera, pri čemu kao produkt te sinteze nastaje polimer. Prema osnovnoj kemijskoj strukturi akrilati najčešće pripadaju esterima metakrilatne kiseline. U stomatologiji se koristi više estera metakrilatne kiseline, ali najširu primjenu ima metil metakrilat (MMA¹). Akrilati su dvokomponentni sustavi koji se sastoje iz tekućeg i krutog dijela koji je u obliku praška. Agregatno stanje komponenti određeno je stupnjem polimerizacije MMA, kao osnovne tvari. Naime, tekućina je nepolimerizirani MMA, odnosno monomer, dok je prašak polimerizat metil metakrilat (PMMA²), tj. polimer [6].

Akrilati su prozirne, bezbojne tvari koje je potrebno obojiti kako bi bliže imitirale tkiva i organe usne šupljine koje zamjenjuju. Kao pigmenti se koriste soli žive, željeza i kadmija.

Koriste se najviše pri izradi zubnih proteza, još od 1937. godine. Klasificiramo ih prema načinu odvijanja polimerizacije i prema tvrdoći [6].

Prema načinu iniciranja reakcije polimerizacije [6]:

- a) toplopolimerizirajući – pod utjecajem topline u vodenoj kupki
- b) hladnopolimerizirajući – polimerizacija na sobnoj temperaturi
- c) svjetlosnopolimerizirajući (fotosenzibilni) – vidljiva svjetlost je aktivator polimerizacije te se koriste specijalni aparati

Prema tvrdoći mogu biti tvrdi ili meki [6].

Kao i svi materijali koji imaju primjenu u medicini i dentalnoj medicini, pored ostalih karakteristika, akrilati prvenstveno moraju biti biološki prihvatljivi, tj. kompatibilni sa tkivom. Brojna istraživanja ukazuju kako se radi o biokompatibilnim materijalima, s čijom primjenom treba biti oprezan zbog mogućih alergija [6].

Akrilati su materijali koji imaju zadovoljavajuću transparentnost, malu specifičnu težinu, bez mirisa su i bez okusa. Jednostavno se obrađuju i popravljaju. Sve veća popularnost akrilata je zahvaljujući lakoći izrade te prihvatljivoj cijeni. Kako bi se što više koristili potrebno je da, između ostalog, posjeduju odgovarajuća mehanička i fizikalna svojstva. Međutim, navedena

¹ MMA – Methyl methacrylate; metil metakrilat; $\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)\text{COOCH}_3$

² PMMA – Poly(methyl methacrylate); polimetil metakrilat;

svojstva nisu na željenom nivou. Naime, akrilati nemaju potrebnu čvrstoću i tvrdoću, nešto je niža otpornost na abraziju od željene i imaju veći modul elastičnosti što ih čini krutima i lakše lomljivima. Nadalje, apsorbiraju vodu što je posljedica konstantnog oslobađanja malih količina ostataka monomera, nisu dimenzionalno stabilni materijali (deformiraju se za vrijeme polimerizacije, zagrijavanjem...) i porozni su. Porozan akrilat je sklon lomu, a može i utjecati na promjenu boje čime se umanjuje estetski dojam. Bez obzira na spomenute nedostatke i izvjesna ograničenja, još uvijek su nezamjenjivi u stomatologiji sa naglaskom na područje stomatološke protetike [6].

2.3.2. Ostali polimeri u stomatologiji

Akrilati su razmjerno slabi i lomljivi materijali. Ipak, među svakodnevno upotrebljavanima, bolji su kopolimeri i oni umereženi nego li homopolimeri, te akrilati s razgranatim polimerskim lancima od onih linearne građe [1].

Međutim, svi ti materijali imaju slaba mehanička svojstva, stoga neprestano postoji potreba pronalaženja boljih i pristupačnijih materijala. Udarne čvrstoće akrilatne smole može biti znatno poboljšana modifikacijom polimera dodavanjem sastojaka koji ne ulaze u polimerizacijsku reakciju, kao npr. elastomera, koji mogu absorbirati energiju udarca, pa tako spriječiti lom proteze. U tome smislu koriste se kopolimeri akrilatnih smola i elastomera. Tipični primjeri takvog materijala su metil-metakrilat-butadin ili metil-metakrilat-butadin-stiren kopolimeri. Iako povećavaju udarnu čvrstoću i do deset puta, ti materijali nisu često korišteni, uglavnom zbog visoke cijene. Svojstva ovih materijala spriječavaju nastanak napuklina, pokazujući tako visoki stupanj otpornosti na lom. Ipak, ovi su materijali slabije umorne čvrstoće, što vremenom, može dovesti do loma proteze. U takvu vrstu materijala spadaju i vinilni kopolimeri. Postoji nekoliko takvih proizvoda, a neki od njih su kopolimer metil-metakrilata i hidroksietil-metakrilat [1].

2.3.3. Kompoziti u stomatologiji

Kao i ostali materijali koji se koriste u stomatologiji, akrilati imaju izvjesna ograničenja. Međutim, iskorišteni u punom potencijalu, zauzimaju značajno mjesto u stomatologiji te su i dalje nezamjenjivi materijali prilikom izrade dentalnih proteza. Bez obzira na loša svojstva,

prednosti akrilata i dalje zasjenjuju njihove nedostatke te ih se najviše upotrebljava jer potencijalni materijali koji bi ih mogli zamijeniti nemaju značajno bolja svojstva, a puno su skuplji. Upravo to je razlog zašto bi se problemu moglo pristupiti s druge strane, odnosno umjesto da se materijal zamijeni nekim drugim koji ima puno veću cijenu, zašto se svojstva istoga ne bi mogla poboljšati kao što je i provedeno u ovom završnom radu. Poboljšavanje svojstava je moguće postići obogaćivanjem akrilata dodacima, u ovom slučaju ojačanjem u obliku staklenih vlakana. Na taj način se od polimernog materijala – akrilata dolazi do kompozita – akrilata ojačanog staklenim vlaknima, koji se još ne primjenjuje u svakodnevnoj praksi, ali sukladno dobivenim rezultatima ispitivanja bi se isto moglo i razmotriti.

3. EKSPERIMENTALNI DIO

Smisao rada je ispitivanje uzoraka od tri vrste materijala u svrhu usporedbe njihovih mehaničkih svojstava. Ispitivala su se tri mehanička svojstva: žilavost, vlačna čvrstoća i savojna svojstva. Prilikom pregleda rezultata bilo je potrebno odrediti materijal s boljim mehaničkim svojstvima, odnosno materijal koji bi bolje podnosio brojna opterećenja koja svakodnevno podnose proteze za zube.

Kako bi ispitivanje bilo moguće, prije svega su se morale odrediti normirane dimenzije epruveta potrebnih za sva tri ispitivanja – ispitivanje udarnog rada loma, statičko vlačno ispitivanje i ispitivanje savijanja u tri točke. Kako bi rezultati bili što točniji i sa što manje odstupanja, za svako ispitivanje je bilo potrebno izraditi šest epruveta od svake vrste materijala. Međutim, kako je uzorke bilo najlakše izraditi na način da se izrade pločice, morao se izračunati točan broj potrebnih pločica za svaku vrstu materijala, što prikazuje Tablica 2.

Tablica 2: Broj pločica koje je potrebno izraditi

OZNAKA MATERIJALA	BROJ PLOČICA	
	debljina 4 mm	debljina 2 mm
A	3 pločice dimenzija 80 mm x 80 mm	1 pločica dimenzije 80 mm x 80 mm
AO ₁	3 pločice dimenzija 80 mm x 80 mm	1 pločica dimenzije 80 mm x 80 mm
AO ₂	3 pločice dimenzija 80 mm x 80 mm	1 pločica dimenzije 80 mm x 80 mm

Materijali od kojih su se izrađivali uzorci su akrilat s oznakom **A**, akrilat s prvom vrstom ojačanja (gusta staklena vlakna) koji se označio oznakom **AO₁** i akrilat s drugom vrstom ojačanja (rijetka staklena vlakna) koji se označio oznakom **AO₂**. Navedene oznake će se dalje upotrebljavati u tekstu označavajući izrađene kompozite.

Iz dobivenih pločica su se izrezivale epruvete na potrebne dimenzije. Tablica 3 prikazuje pregled potrebnih dimenzija i broj epruveta po vrstama materijala za svaki tip ispitivanja sukladno normi za svako mehaničko svojstvo koje je bilo potrebno ispitivati.

Tablica 3: Dimenzije i broj epruveta po normi

	OZNAKA MATERIJALA		
	A	AO ₁	AO ₂
STATIČKO VLAČNO ISPITIVANJE	6 epruveta -dimenzije: <u>duljina (l) 150 mm</u> debljina (h) 4 mm širina (b) 20 mm	6 epruveta -dimenzije: <u>duljina (l) 150 mm</u> debljina (h) 4 mm širina (b) 20 mm	6 epruveta -dimenzije: <u>duljina (l) 150 mm</u> debljina (h) 4 mm širina (b) 20 mm
ISPITIVANJE ŽILAVOSTI	6 epruveta -dimenzije: duljina (l) 80 mm debljina (h) 4 mm širina (b) 10 mm	6 epruveta -dimenzije: duljina (l) 80 mm debljina (h) 4 mm širina (b) 10 mm	6 epruveta -dimenzije: duljina (l) 80 mm debljina (h) 4 mm širina (b) 10 mm
ISPITIVANJE SAVIJANJA U TRI TOČKE	6 epruveta -dimenzije: duljina (l) 20 mm debljina (h) 2 mm širina (b) 10 mm	6 epruveta -dimenzije: duljina (l) 20 mm debljina (h) 2 mm širina (b) 10 mm	6 epruveta -dimenzije: duljina (l) 20 mm debljina (h) 2 mm širina (b) 10 mm

Prilikom izrade pločica za epruvete za statičko vlačno ispitivanje, došlo je do ograničavajućeg čimbenika. Naime, kako bi rad imao smisla, pločice su morale biti izrađene istim postupcima kojima se izrađuju akrilatne proteze. Ti postupci uključuju tlačno – toplinsku polimerizaciju akrilata čime se izbjegava porozitet materijala. Kako su dimenzije uređaja bile 80 mm x 80 mm, bilo je očito da se neće moći ostvariti potrebna duljina epruvete od 150 mm. Jedini način, u tom slučaju, bio bi napraviti pločice bez tlačno – toplinske polimerizacije, tj. pustiti akrilat da se polimerizira „na stolu“. Ali, takav akrilat je u pravilu porozan, ima uključine zraka kao posljedicu miješanja akrilata i zaostali monomer unutar svoje strukture, što dovodi do lošijih mehaničkih svojstava.

Duljina epruvete za statičko vlačno ispitivanje se zato smanjila na 80 mm. Tablica 4 prikazuje izmijenjene dimenzije epruveta na temelju ograničenja Ivomata – uređaja za tlačno – toplinsku polimerizaciju. Kako su dimenzije pločica za statičko vlačno ispitivanje zbog ograničenja smanjene na 80 mm x 80 mm, pločice za druga dva ispitivanja su se također izrađivale istih dimenzija radi olakšane izrade – mogućnost korištenja istog kalupa.

Tablica 4: Konačne dimenzije epruveta

	OZNAKA MATERIJALA		
	A	AO ₁	AO ₂
STATIČKO VLAČNO ISPITIVANJE	6 epruveta -dimenzije: <u>duljina (l) 80 mm</u> debljina (h) 4 mm širina (b) 20 mm	6 epruveta -dimenzije: <u>duljina (l) 80 mm</u> debljina (h) 4 mm širina (b) 20 mm	6 epruveta -dimenzije: <u>duljina (l) 80 mm</u> debljina (h) 4 mm širina (b) 20 mm
ISPITIVANJE ŽILAVOSTI	6 epruveta -dimenzije: duljina (l) 80 mm debljina (h) 4 mm širina (b) 10 mm	6 epruveta -dimenzije: duljina (l) 80 mm debljina (h) 4 mm širina (b) 10 mm	6 epruveta -dimenzije: duljina (l) 80 mm debljina (h) 4 mm širina (b) 10 mm
ISPITIVANJE SAVIJANJA U TRI TOČKE	6 epruveta -dimenzije: duljina (l) 20 mm debljina (h) 2 mm širina (b) 10 mm	6 epruveta -dimenzije: duljina (l) 20 mm debljina (h) 2 mm širina (b) 10 mm	6 epruveta -dimenzije: duljina (l) 20 mm debljina (h) 2 mm širina (b) 10 mm

3.1. Izrada uzoraka

Prvi korak je bio izraditi uzorke u obliku pločica od tri vrste materijala na temelju dimenzija prikazanih u Tablici 2. Nakon što su se izradile pločice bilo ih je potrebno izbrusiti kako bi površina bila što ravnija. Nakon brušenja su se iz njih izrezale epruvete na potrebne dimenzije sukladno Tablici 4 ovisno o vrsti mehaničkog ispitivanja.

3.1.1. Materijali, uređaji i pribor

Materijali od kojih je bilo potrebno izraditi pločice su:

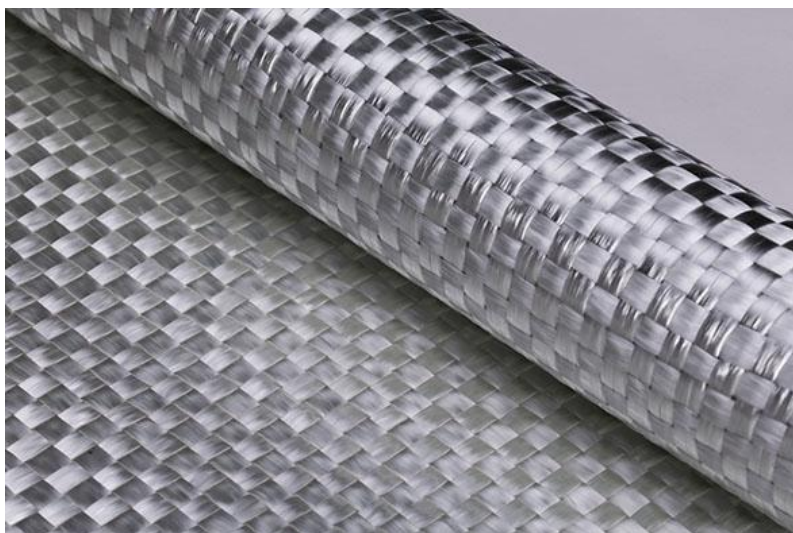
1. A – akrilat
2. AO₁ – akrilat ojačan gustim tkanjem staklenih vlakana
3. AO₂ – akrilat ojačan rijetkim tkanjem staklenih vlakana

Staklena vlakna koja su korištena prilikom izrade kompozitnih pločica su vlakna u obliku staklene tkanine tvrtke Kelteks. Slika 1 prikazuje staklena vlakna ST 160 u obliku tkanine kojom se ojačavao akrilat kako bi se dobio kompozit AO₁.



Slika 1: Ojačanje za AO₁[9]

Slika 2 prikazuje staklena vlakna u obliku tkanine LK 206 čijim se dodavanjem u akrilat dobio kompozit AO₂.



Slika 2: Ojačanje za AO₂[9]

Uređaji koji su bili od iznimne važnosti prilikom izrade akrilatnih i kompozitnih pločica su Ivomat, kalup i vibrator.

Ivomat, prikazan na Slici 3, je uređaj koji služi za tlačno – toplinsku polimerizaciju. Polimerizacija se odvija u vodenoj kupelji uz mogućnost kontrole temperature, tlaka i vremena sukladno naputcima proizvođača korištenog polimernog materijala.

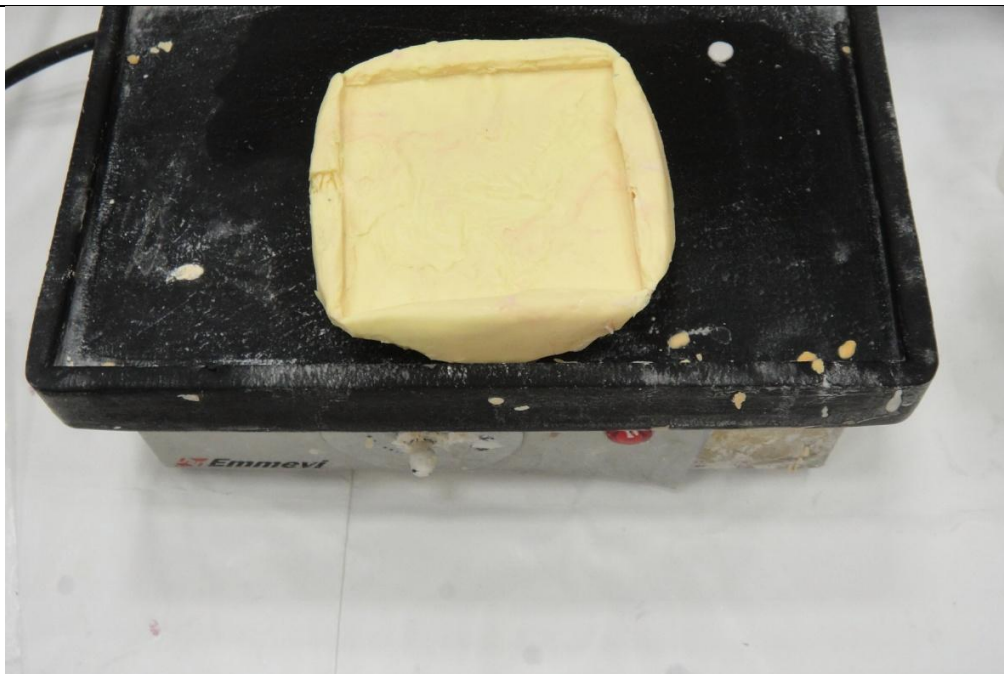


Slika 3: Ivomat – uređaj za tlačno – toplinsku polimerizaciju

Prilikom izrade dentalnih proteza, kiveta³ koja je ispunjena akrilatom se spušta u Ivomat te na taj način akrilat polimerizira. U ovom slučaju izrade uzoraka se umjesto kivete spuštao posebno izrađeni kalup potrebne debljine, dimenzije 80 mm x 80 mm, ispunjen akrilatom u jednom slučaju i ispunjen kompozitnim materijalom u druga dva slučaja.

Vibrator služi za vibriranje kalupa tijekom ulijevanja smjese kako bi se ista ravnomjerno ulila u kalup i kako bi doticaj smjese i voštanog objekta – kalupa bio što precizniji, a na površinu izašle eventualne uključevine. Slika 4 prikazuje vibrator i kalup.

³ Kiveta – kalup koji služi za izradu dentalnih proteza i ulaže se u uređaj za polimerizaciju



Slika 4: Vibrator i kalup

Osim navedenih uređaja, za miješanje akrilata su potrebni špatulica za miješanje i ulijevanje smjese u kalup (Slika 5) i posebna dozirajuća posudica – mjerni cilindar (Slika 6). Mjerni cilindar za polimer označava količinu materijala koja je potrebna za jednu ili dvije proteze srednje veličine. Oznaka na mjernom cilindru za monomer je izražena u mililitrima [7].



Slika 5: Špatulica za miješanje



Slika 6: Mjerni cilindar

Kako bi se kalup što jednostavnije stavio u Ivomat zbog nastojanja da se ostvari što veća dimenzija pločica, potrebno je koristiti stezaljku prikazanu na Slici 7 koja osim stavljanja, olakšava i vađenje kalupa.



Slika 7: Stezaljka za vađenje kalupa

3.1.2. Izrada pločica od akrilata (A)

Materijal od kojeg su se izrađivale pločice je ProBase Cold⁴. To je samostvrdnjavajući materijal za temelje proteze. Ima odlična svojstva lijevanja i oblikovanja. Iznimno je pouzdan i lagan prilikom upotrebe, čak i kad postoje dva ili više kalupa. Materijal je dostupan u raznim nijansama [7].

Sastoji se od dvije komponente – praška i tekućine.

Prašak se sastoji od polimetil metakrilata, omekšivača, benzoil peroksida, katalizatora i pigmenta. Tekućina se sastoji od metil metakrilata, dimetakrilata i katalizatora [7].

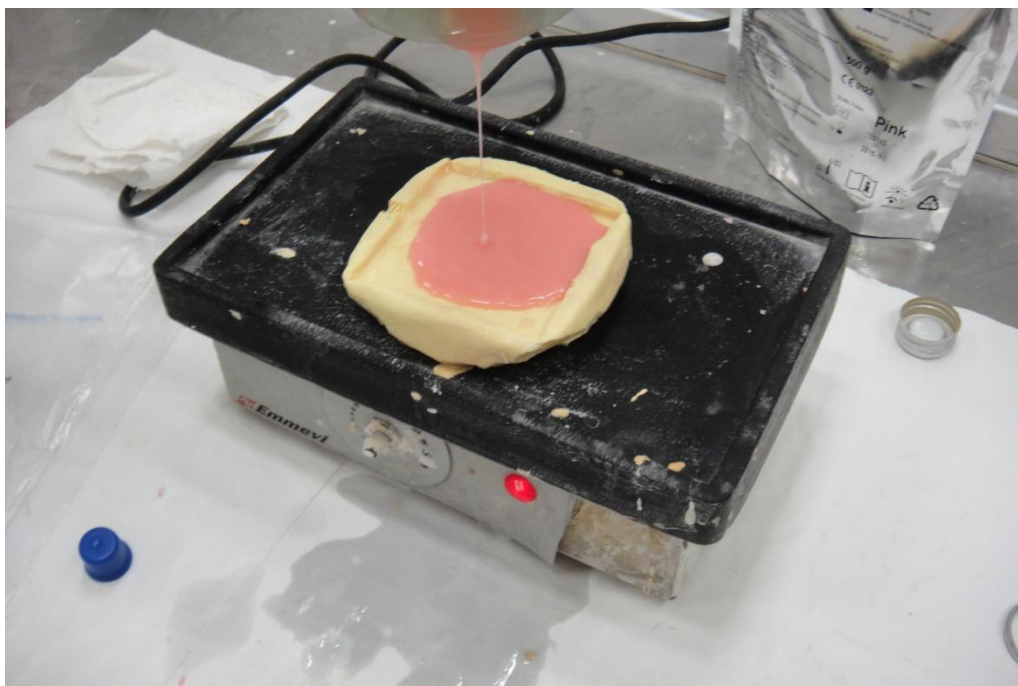
U mjernom cilindru se miješaju tekućina i prašak u omjeru koji nalažu upute za upotrebu pojedinog materijala, kao što prikazuje Slika 8. Najčešće je to takav omjer da tekućina bude zasićena praškom.



Slika 8: Miješanje akrilata u mjernom cilindru

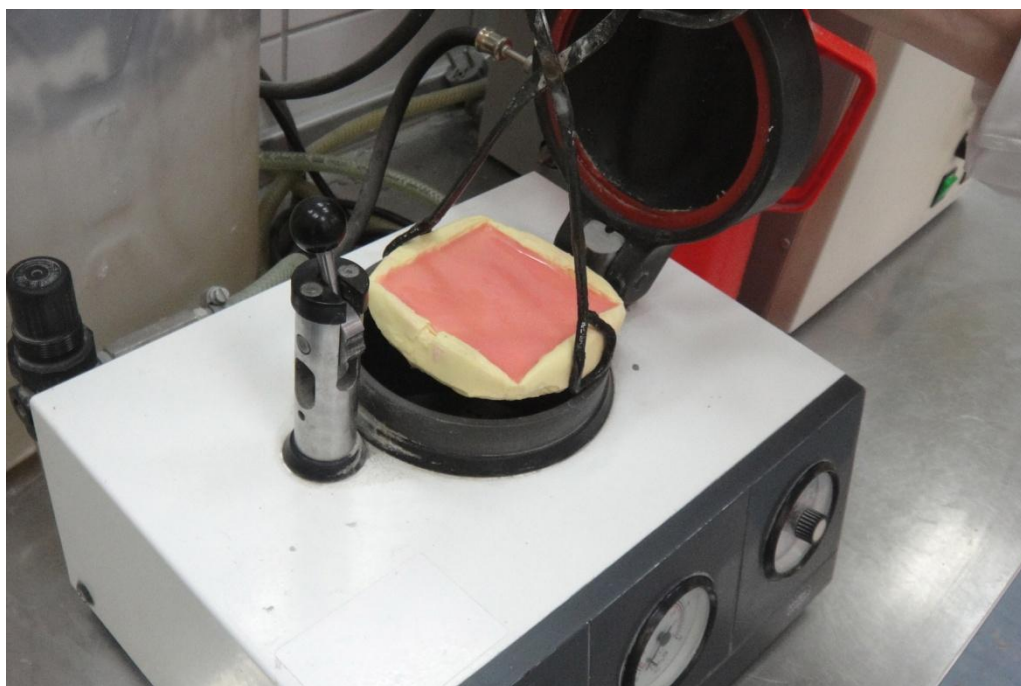
Nakon nekog vremena smjesa po svojoj konzistenciji postaje slična tijestu i lako se modelira i oblikuje u željenu formu. Mješavinu je dobro ostaviti da stoji petnaest sekundi kako bi se omogućio izlazak zaostalog zraka. Kada se postigne željena forma, smjesa se ulijeva u izrađeni kalup koji je postavljen na vibratoru kao na Slici 9 kako bi se što ravnomjernije rasporedila.

⁴ ProBase Cold – akrilat za izradu dentalnih proteza tvrtke Ivoclar vivadent



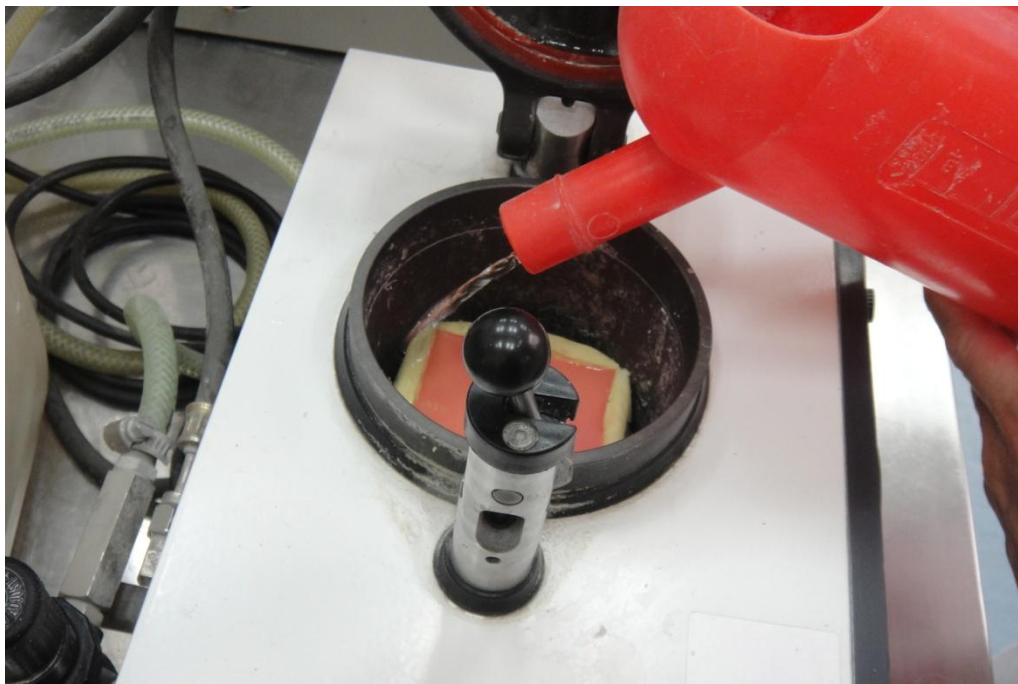
Slika 9: Ulijevanje smjese (akrilata) u kalup

Nakon što se smjesa jednoliko rasporedi, kalup se pomoću stezaljke stavlja u Ivomat, što je prikazano na Slici 10.



Slika 10: Umetanje kalupa u Ivomat

Nakon što se kalup uloži u Ivomat, potrebno je uliti vodu jer se tlačno – toplinska polimerizacija odvija u vodenoj kupelji, što prikazuje Slika 11. Zatim se namjeste temperatura, tlak i vrijeme. Polimerizacija se odvija pri 80 bara, 23 °C i traje 15 minuta. Tlačne i toplinske uvjete odvijanja polimerizacije te njeno trajanje prikazuje Slika 12.



Slika 11: Ulijevanje vode u Ivomat za polimerizaciju A



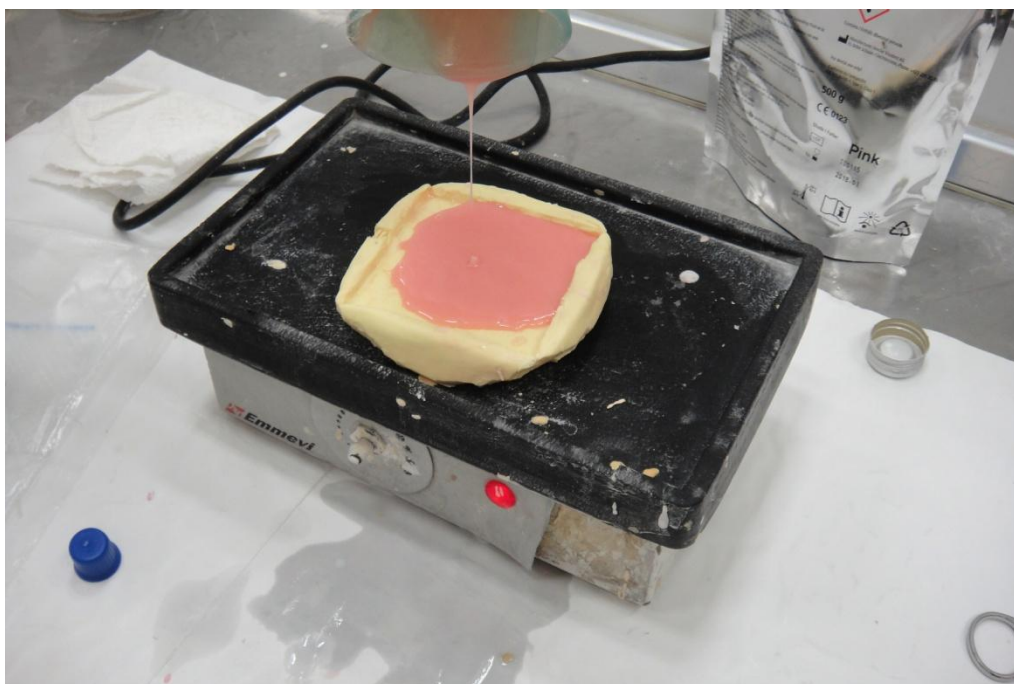
Slika 12: Uvjete odvijanja polimerizacije

Nakon što se izvadi iz Ivomata, pločica je tvrda te zbog relativno grube površinske teksture i neravnina mora se pobrusiti kako bi se dobila glatka, ravnomjerna ploha.

Postupak izrade se ponavlja još dva puta za pločicu debljine 4 mm kako bi se dobile potrebne 3 pločice i jednom za pločicu debljine 2 mm.

3.1.3. Izrada kompozitnih pločica AO₁

Postupak miješanja materijala je jednak kao i u poglavlju 3.1.2. No, kako bi se dobila kompozitna pločica, smjesa akrilata se ulijeva u kalup na način da se prvo ulije jedan sloj što prikazuje Slika 13.



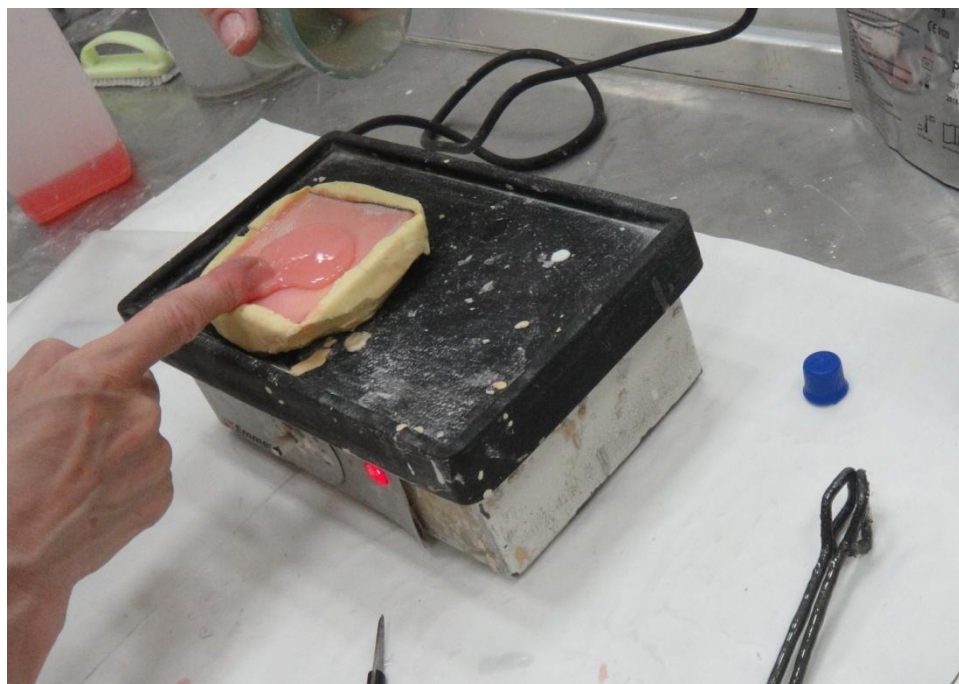
Slika 13: Ulijevanje prvog sloja akrilata za izradu AO₁

Nakon prvog sloja smjese, stavlja se ojačanje u obliku guste tkanine načinjene od staklenih vlakana koja je prethodno bila izrezana točno na potrebne dimenzije pločica – 80 mm x 80 mm. Slika 14 prikazuje stavljanje ojačanja između dva sloja smjese. Prilikom stavljanja tkanine staklenih vlakana, trebalo se paziti da se tkanina namoči kako ne bi ostalo zraka između prvog sloja i tkanine. Upravo iz tog razloga je potrebno koristiti vibrator prilikom izrade uzoraka.



Slika 14: Stavljanje ojačanja prilikom izrade AO₁

Kada se je ojačanje pravilno namjestilo, potrebno je bilo uliti još jedan sloj smjese na njega, koja je također morala stajati na vibratoru kako ne bi počela faza skrućivanja. Prilikom stavljanja drugog sloja, također je bitno da se smjesa što ravnomjernije rasporedi kao na Slici 15, kako ne bi u nekom dijelu uzorka izvirilo ojačanje.



Slika 15: Ulijevanje drugog sloja akrilata za izradu AO₁

Nakon što se kalup napunio, opet se stavlja pomoću stezaljke u Ivomat koji se potom napuni vodom, kao što je i prikazano na Slici 16. Uvjeti polimerizacije su jednaki kao i kod akrilata – A. Nakon 15 minuta se izvadi polimerizirana tvrda pločica i izbrusi joj se površina i rubovi ukoliko su nepravilni.

Postupak se ponavlja još dva puta za pločicu debljine 4 mm i jednom za pločicu debljine 2 mm.



Slika 16: Ulijevanje vode u Ivomat za polimerizaciju AO₁

3.1.4. Izrada kompozitnih pločica AO₂

Kod izrade kompozitnih pločica AO₂ također se primjenjuje isti postupak kao i kod čistog akrilata – A i kod AO₁ vezano uz način miješanja i dobivanja smjese. Kao i kod izrade AO₁, prvo se u kalup ulijeva jedan sloj smjese. Nakon što se sloj ravnomjerno rasporedio na vibratoru, stavlja se ojačanje u obliku tkanine od staklenih vlakana koja su rjeđa od ojačanja koja se stavljaju u AO₁. Tkanina je i u ovom slučaju prethodno izrezana na potrebne dimenzije pločica. Slika 17 prikazuje namještanje ojačanja na prvi sloj smjese.



Slika 17: Stavljanje ojačanja prilikom izrade AO₂

Nakon što se ojačanje namjestilo, stavlja se drugi sloj smjese i kada se sloj ravnomjerno rasporedio, kalup se sa stezaljkom prenosi u Ivomat te se uređaj napuni vodom kako bi se napravila vodena kupelj, što je i prikazano na Slici 18. Polimerizacija se odvijala pri jednakim uvjetima kao i u prethodna dva slučaja, a rezultat je tvrdi uzorak koji se dodatno još obradi brušenjem.

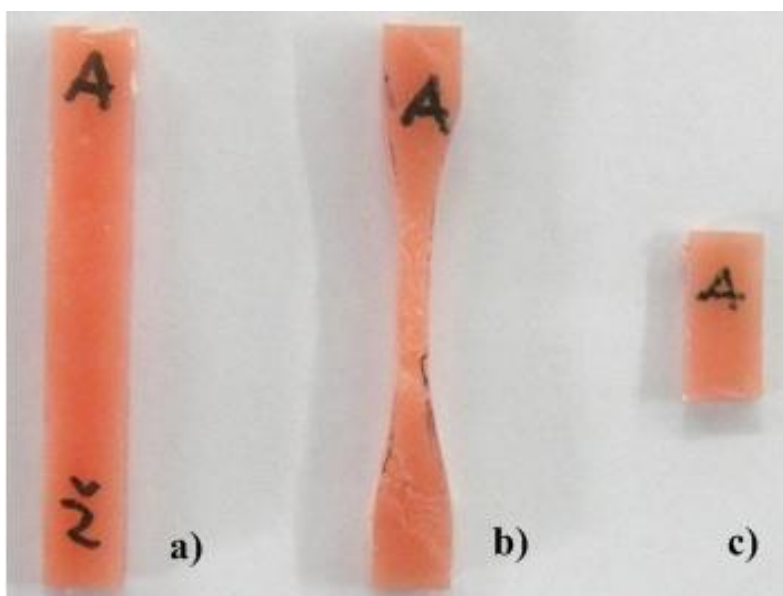


Slika 18: Ulijevanje vode u Ivomat za polimerizaciju AO_2

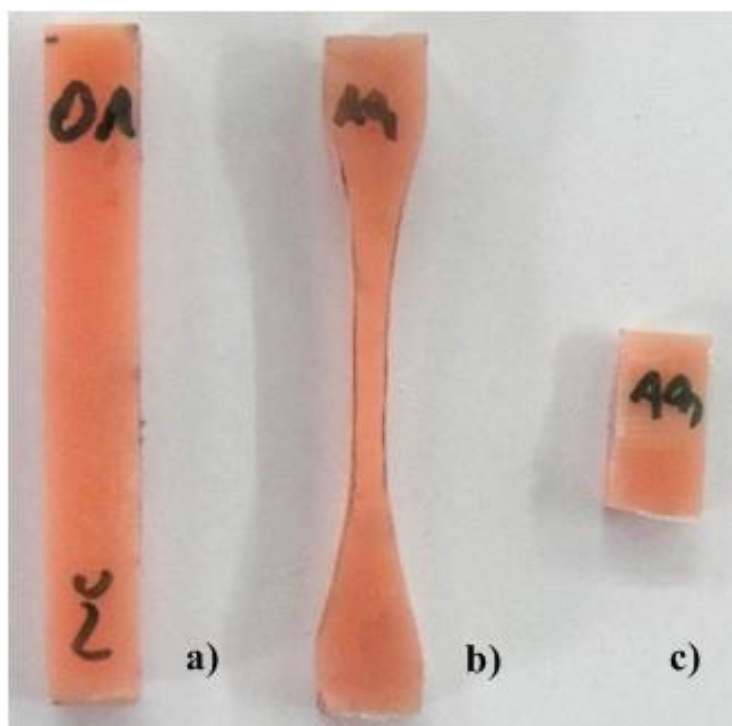
Postupak se također ponovi još dva puta za pločice debljine 4 mm i jednom za pločicu debljine 2 mm.

Međutim, konačna dimenzija pločica, zbog objektivnih uvjeta izrade, je bila 75,5 mm x 75,5 mm.

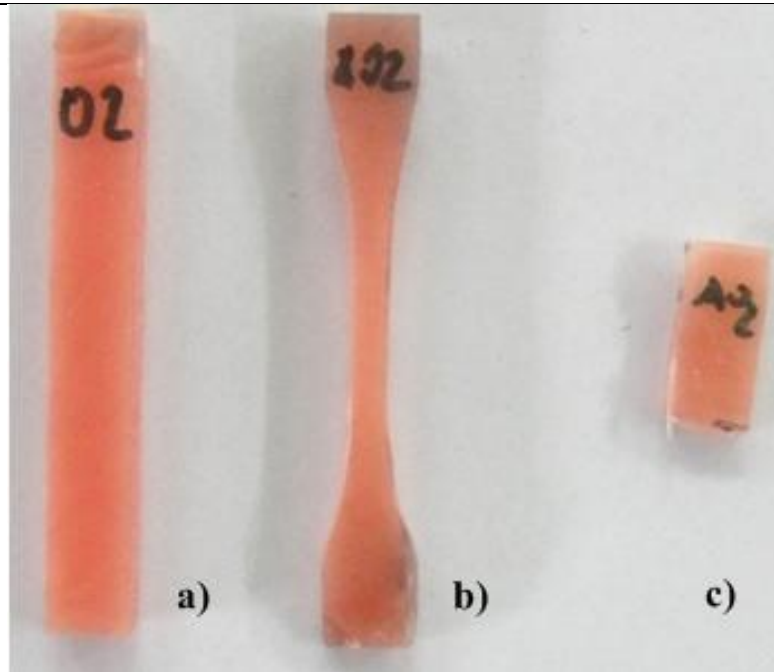
Nakon što su se izradile sve pločice, sveukupno devet pločica debljine 4 mm i tri pločice debljine 2 mm, iz njih su se trebale izrezati epruvete sukladno dimenzijama koje su prikazane na početku poglavlja. Slike 19, 20 i 21 prikazuju konačan izgled epruveta za svaki pojedini materijal.



Slika 19: Konačan izgled epruveta od materijala A



Slika 20: Konačan izgled epruveta od materijala AO₁



Slika 21: Konačan izgled epruveta od materijala AO₂

Slike 19, 20 i 21 prikazuju:

- a) epruvetu za ispitivanje udarnog rada loma
- b) epruvetu za statičko vlačno ispitivanje
- c) epruvetu za ispitivanje savijanja u tri točke

Prilikom izrade epruvete za statičko vlačno ispitivanje bilo je potrebno izraditi struk – suženje.

3.2. Ispitivanje mehaničkih svojstava

3.2.1. Ispitivanje udarnog rada loma

Iznos udarnog rada loma je pokazatelj žilavosti ili krhkosti materijala udarno opterećenih epruveta. Ispitivanje udarnog rada loma se provodilo na Charpy-evom batu koji je prikazan na Slici 22.

Bat određene težine se podiže na visinu te s obzirom na ravninu u kojoj se nalazi ispitni uzorak, posjeduje potencijalnu energiju. Puštanjem bata iz početnog položaja njegova potencijalna energija prelazi kinetičku [8].



Slika 22: Charpy-ev bat

Prvi korak kod ispitivanja uzoraka je provjeriti njihove dimenzije pomičnim mjerilom. Dimenzije epruveta koje su se mjerile su širina (B) i debljina (H). Mjerile su se u sredini epruvete, a svako mjerenje se ponavljalo tri puta kako bi se dobila srednja vrijednost koja osigurava preciznije rezultate mjerenja. Prilikom mjerenja svaka epruveta se označila rednim brojem. Tablica 5 prikazuje srednje vrijednosti svih mjerenja traženih dimenzija epruveta za ispitivanje udarnog rada loma.

Tablica 5: Dimenzije epruveta za ispitivanje udarnog rada loma

	OZNAKA MATERIJALA					
	A		AO ₁		AO ₂	
	dimenzije epruvete (mm)		dimenzije epruvete (mm)		dimenzije epruvete (mm)	
broj epruvete (n)	širina (B)	debljina (H)	širina (B)	debljina (H)	širina (B)	debljina (H)
1	10,50	7,36	10,38	5,14	10,30	5,90
2	10,43	7,12	10,49	5,96	10,48	5,72
3	10,08	6,00	10,41	5,62	10,34	5,80
4	10,78	7,96	10,28	5,02	10,22	5,78
5	10,90	7,72	10,53	6,52	10,30	5,42
6	11,12	7,94	10,45	6,18	10,40	5,72

Nakon što su se izmjerile dimenzije, mjerno područje ispitivanja se namjestilo na 5 „kpcm“ što je ekvivalentno 0,49 J. Epruveta se namjestila u čeljusti bata kao na Slici 23 te se bat pustio, a epruveta pokidala.

**Slika 23: Epruveta u čeljusti Charpy-evog bata**

Ispitivanje se ponavljalo na isti način za preostale epruvete od materijala A i za epruvete od materijala AO₁ i AO₂. Za pojedine epruvete je bilo potrebno povećati mjerno područje na 40 „kpcm“, odnosno 3,92 J jer nisu pucale. Promjenom mjernog područja se omogućuje preciznija skala i bolja podjela.

3.2.2. Statičko vlačno ispitivanje

Statičko vlačno ispitivanje se provodi na uređajima na kojima se ispitni uzorak kontinuirano vlačno opterećuje do pojave loma. Pri ispitivanju se kontinuirano mjere sila i produljenje ispitnog uzorka. Kao i kod ispitivanja udarnog rada loma, prvi korak je bio izmjeriti dimenzije svih šest epruveta za sve tri vrste materijala – A, AO₁ i AO₂ pomičnim mjerilom. Mjerila se širina (B) i debljina (H) epruvete. Kako prilikom izrade epruveta nije bilo moguće proizvesti jednoličnu debljinu epruvete, mjerenje se provodilo na sredini epruvete tri puta kako bi se na kraju mogla izračunati srednja vrijednost i kako bi rezultat mjerenja bio što točniji. Rezultate mjerenja prikazuje Tablica 6. Posebno je bilo važno mjeriti dimenzije na sredini epruvete jer prilikom ispitivanja na vlak, epruvete uglavnom pucaju na tom dijelu. Prilikom mjerenja, svaka epruveta se označila rednim brojem.

Tablica 6: Dimenzije epruveta za statičko vlačno ispitivanje

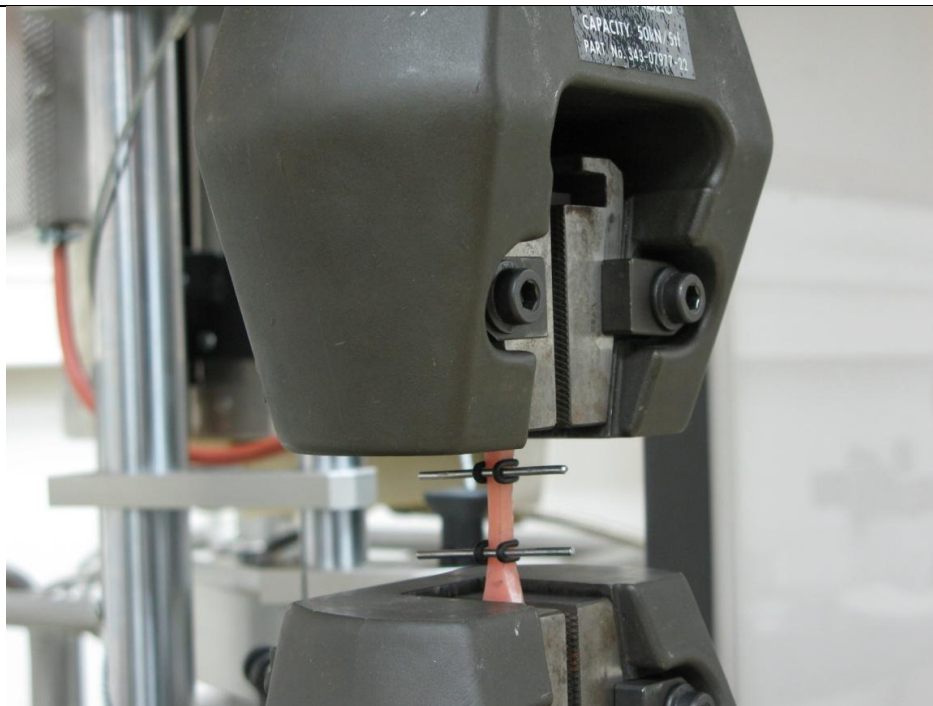
	OZNAKA MATERIJALA					
	A		AO ₁		AO ₂	
	dimenzije epruvete (mm)		dimenzije epruvete (mm)		dimenzije epruvete (mm)	
broj epruvete (n)	širina (B)	debljina (H)	širina (B)	debljina (H)	širina (B)	debljina (H)
1	4,03	6,95	4,2	4,64	4,31	4,74
2	3,77	5,74	4,15	5,89	4,28	4,63
3	4,4	6,72	4,28	5,8	4,55	5,42
4	4,39	5,45	4,17	6,23	4,13	5,21
5	4,36	5,64	3,98	5,61	4,59	4,79
6	4,17	5,79	3,43	6,02	4,4	4,63

Nakon mjerenja, dimenzije je bilo potrebno upisati za svaku pojedinu epruvetu u računalni softver kojim se prati tijek ispitivanja i koji prikazuje rezultate i dijagrame. Uređaj kojim se obavljalo statičko vlačno ispitivanje je univerzalni stroj za ispitivanje BETA 50-5 tvrtke Messphysik, prikazan na Slici 24. Prednost korištenja takvog uređaja je upravo u korištenju računalnog softvera koji omogućava korisniku lakše praćenje i manipuliranje rezultatima. Korisnik je u mogućnosti točno odrediti koji rezultati ga zanimaju i sukladno tome postaviti granice ovisno o dijelu uzorka čiju promjenu želi promatrati prilikom ispitivanja.



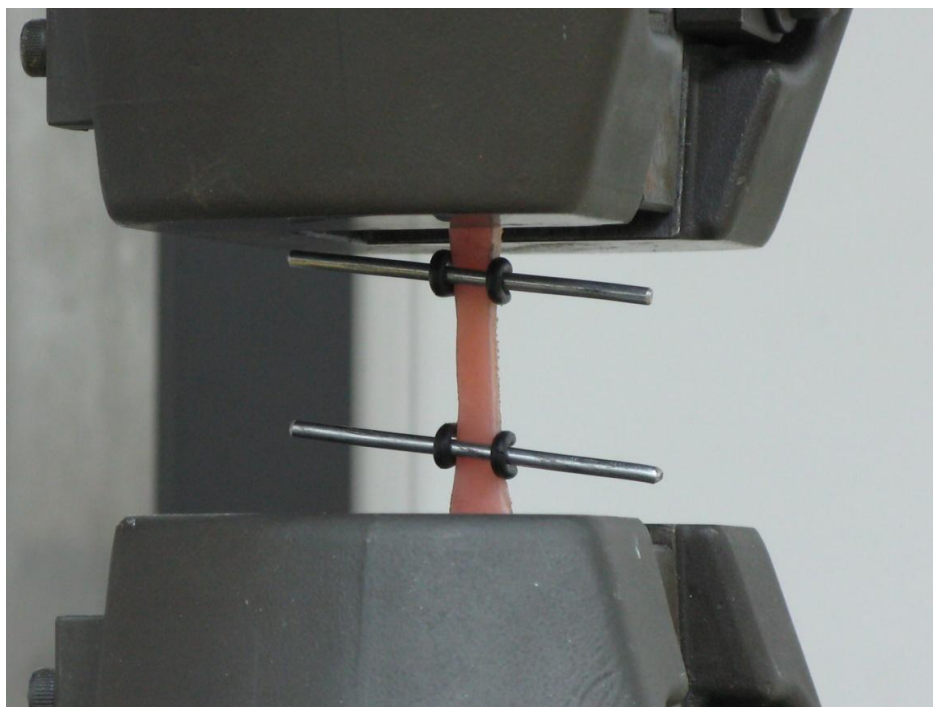
Slika 24: Univerzalni stroj za ispitivanje Messphysik BETA 50-5

Ispitivanje je teklo na način da se epruveta uložila u čeljusti kao na Slici 25. Prilikom umetanja u čeljusti, epruveta se ne smije prejako zategnuti jer u protivnom rezultati ne bi bili mjerodavni.



Slika 25: Postavljanje epruvete za statičko vlačno ispitivanje

Nakon pažljivog namještanja i postavljanja graničnika na točno određeno mjesto kod kojeg je bitno pratiti promjenu prilikom ispitivanja, što prikazuje Slika 26, u softveru se provjerava je li sve točno namješteno i može li se provesti ispitivanje. Ukoliko je nešto krivo namješteno, softver javlja pogrešku te ispitivanje ne može početi.



Slika 26: Položaj graničnika na epruveti

Međutim, ako nema nikakve pogreške, u softver se upisuju srednje vrijednosti dimenzija širine (B) i visine (H) epruvete te se započne ispitivanje. Rezultati ispitivanja se prikazuju pomoću dijagrama sila – produljenje. Kada je epruveta preopterećena, dolazi do njenog loma i tu završava ispitivanje pojedine epruvete. Ispitivanje se provodilo sveukupno osamnaest puta, šest puta za svaki materijal.

3.2.3. Ispitivanje savijanja u tri točke

Ispitivanje savijanja u tri točke se također obavljalo na istom stroju kao i statičko vlačno ispitivanje. Prvo je bilo potrebno izmjeriti dimenzije svih šest epruveta za sve tri vrste materijala – A, AO₁ i AO₂ pomičnim mjerilom. Mjerile su se dimenzije širine (B) i debljine (H) na sredini epruvete, tri puta kako bi rezultat mjerenja bio što precizniji, što prikazuje Tablica 7. Tijekom mjerenja, svaka epruveta se označila rednim brojem.

Tablica 7: Dimenzije epruveta za ispitivanje savijanja u tri točke

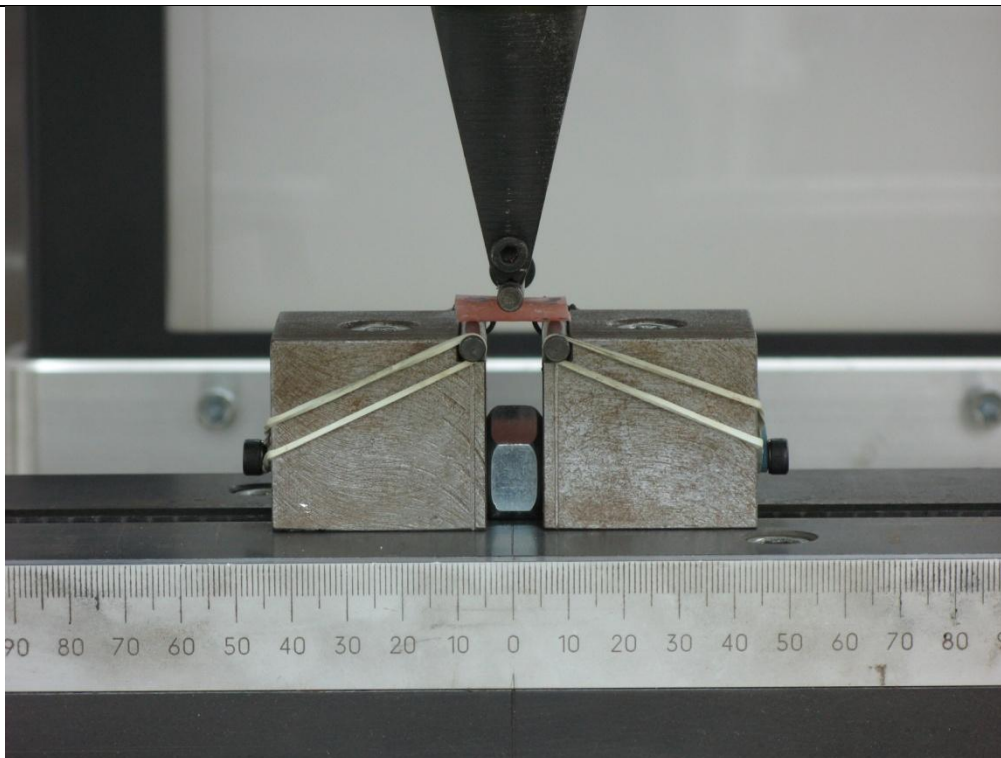
	OZNAKA MATERIJALA					
	A		AO ₁		AO ₂	
	dimenzije epruvete (mm)		dimenzije epruvete (mm)		dimenzije epruvete (mm)	
broj epruvete (n)	širina (B)	debljina (H)	širina (B)	debljina (H)	širina (B)	debljina (H)
1	10,34	4,22	10,41	5,33	10,31	3,74
2	9,95	2,78	10,47	4,34	10,24	3,62
3	10,23	2,48	9,97	4,29	10,11	3,11
4	10,25	2,99	10,29	4,53	10,23	3,60
5	10,25	3,38	10,21	2,81	9,75	3,10
6	9,94	2,61	10,43	3,53	10,36	3,90

Ispitivanje savijanja u tri točke se provodilo pomoću stroja Messphysik BETA 50-5 kao što se i vidi na Slici 27. Ispitivanje je također bilo lakše pratiti zahvaljujući računalnom softveru koji pojednostavljuje konačan prikaz rezultata i prikazuje dijagrame te omogućuje kombiniranje različitih prikaza rezultata ovisno o potrebi.



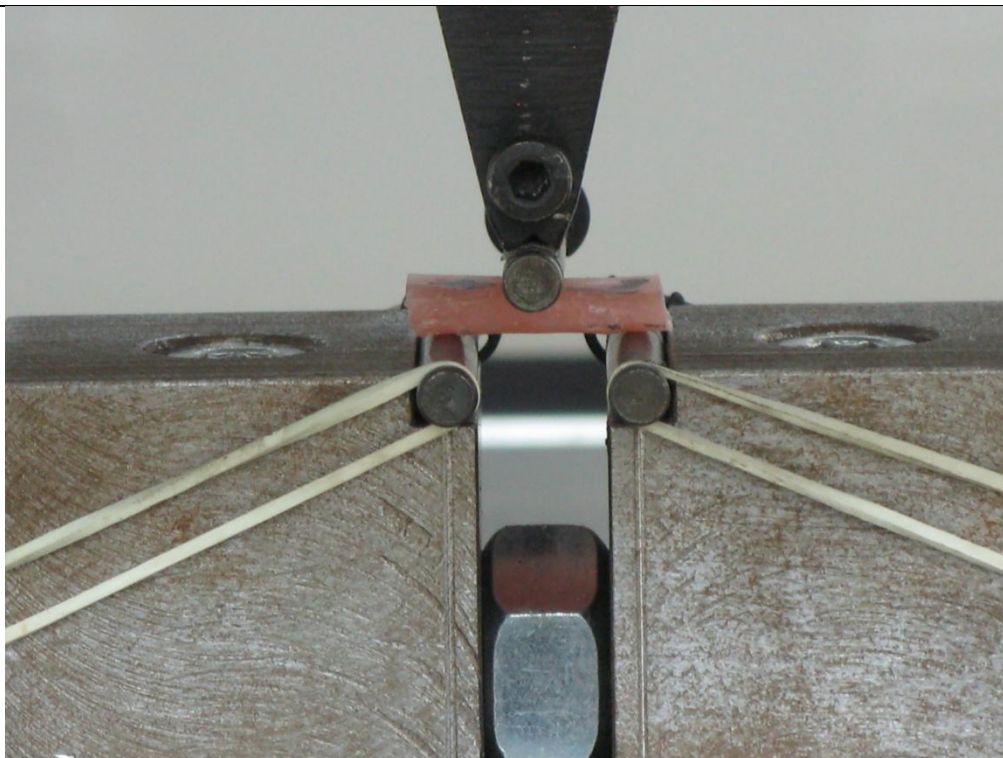
Slika 27: Stroj za ispitivanje savijanja u tri točke

Kao i kod statičkog vlačnog ispitivanja, tako i kod ispitivanja savijanja se prvo namještao uzorak. Epruveta se položila na dva valjčića između kojih je bio razmak od 15,5 mm. Promjer samih valjčića je iznosio 5 mm. Slika 28 prikazuje položaj epruvete prilikom namještanja i način na koji se ispituje savijanje u tri točke.



Slika 28: Ispitivanje savijanja u tri točke

Nakon što se epruveta postavila na valjčiće, bilo je potrebno spustiti gornji valjčić koji u trećoj točki djeluje silom na ispitni uzorak. Pritom, treba paziti na spuštanje valjčića. Epruveta mora biti stisnuta, a opet se valjčić ne smije previše spustiti kako ne bi došlo do promjene mikrostrukture unutar epruvete jer rezultati u tom slučaju ne bi bili mjerodavni. Ukoliko se ne može odokativno odrediti pritišće li gornji valjčić prejako uzorak, potrebno je pratiti iznos sile u prozoru softvera na računalu. Na Slici 29 je prikaz konačnog položaja epruvete prije početka ispitivanja.



Slika 29: Položaj epruvete prilikom ispitivanja savijanja u tri točke

Nakon što se epruveta namjestila, potrebno je bilo upisati njezine srednje vrijednosti dimenzija širine (B) i debljine (H) u softver. Rezultati ispitivanja su se također pratili pomoću dijagrama koji formira svoj konačni oblik kada epruveta pukne i kada je ispitivanje gotovo. Ispitivanje se provodilo sveukupno osamnaest puta, šest puta za svaki materijal. Prilikom prevelikog opterećenja, epruvete su pucale na svojem dnu. Bitna činjenica je ta da su se epruvete od akrilata – A prilikom pucanja rastavljale na dva dijela, dok su kod epruveta od AO₁ i AO₂ nakon pucanja, prilikom preopterećenja, njihova ojačanja držala dva dijela spojenima usprkos lomu akrilatnog sloja.

4. REZULTATI

4.1. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma

Kako bi se dobili što precizniji rezultati, bilo je potrebno izraziti srednju vrijednost (\bar{x}) i standardnu devijaciju (σ_x) svih šest očitanih vrijednosti udarnog rada loma – URL (J) za svaki materijal posebno. Tablica 8 prikazuje standardnu devijaciju koja predstavlja točnost s kojom je izvršeno pojedino mjerenje i srednju vrijednost rezultata ispitivanja udarnog rada loma pomoću šest epruveta izrađenih od materijala A, šest epruveta od materijala AO₁ i šest epruveta od AO₂. Prilikom ispitivanja epruveta od materijala A, mjerno područje je iznosilo 0,49 J, dok se povećalo na 3,92 J ispitivanjem epruveta od druga dva materijala.

Rezultati – vrijednosti udarnog rada loma (URL) su se iščitavali na Charpy-evom batu i bilo ih je potrebno pretvoriti iz stare mjerne jedinice „kpcm“ (kilopond x cm) u mjernu jedinicu J (džul) koja se koristi kao mjerna jedinica za energiju ili rad što predstavlja djelovanje sile (F) na nekom putu (s), odnosno N x m.

Tablica 8: Rezultati ispitivanja udarnog rada loma

oznaka materijala	URL (J)		
	A	AO ₁	AO ₂
srednja vrijednost \bar{x}	0,293	0,912	0,679
standardna devijacija σ_x	0,061	0,060	0,202

Promatrajući rezultate zajedno, može se zaključiti kako je bila najveća vrijednost udarnog rada loma, što predstavlja mjeru za žilavost, prilikom ispitivanja epruveta od materijala AO₁ (0,912 J), a najmanja vrijednost je bila kod ispitivanja epruveta od materijala A (0,293 J), materijala koji se svakodnevno koristi pri izradi dentalnih proteza. Vrijednost udarnog rada loma kod ispitivanja uzoraka od materijala AO₂ iznosi 0,679 J i veća je od vrijednosti dobivene ispitivanjem uzoraka od akrilata, a manja od vrijednosti udarnog rada loma od materijala AO₁. Materijali s većom vrijednosti udarnog rada loma su žilaviji, dok su materijali s puno manjom vrijednosti krhki.

4.2. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja

Kao i kod ispitivanja udarnog rada loma, svi rezultati ispitivanja uzoraka su se izrazili pomoću njihove srednje vrijednosti i standardne devijacije za svaki materijal posebno. Mjerne veličine izražene u Tablicama 9, 10 i 11, koje je bitno pratiti prilikom statičkog vlačnog ispitivanja su:

1. S_0 (mm²) – poprečni presjek
2. F_m (N) – maksimalna sila
3. R_m (MPa) – vlačna ili rastezna čvrstoća
4. A_{gt} (%) – ukupno istezanje
5. E (GPa) – modul elastičnosti (Youngov modul)

Tablica 9: Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja za A

A	S_0 (mm ²)	F_m (N)	R_m (MPa)	A_{gt} (%)	E (Gpa)
Srednja vrijednost \bar{x}	24,888	811,875	32,69	1,345	2,537
Standardna devijacija σ_x	2,179	60,396	2,026	0,231	0,312

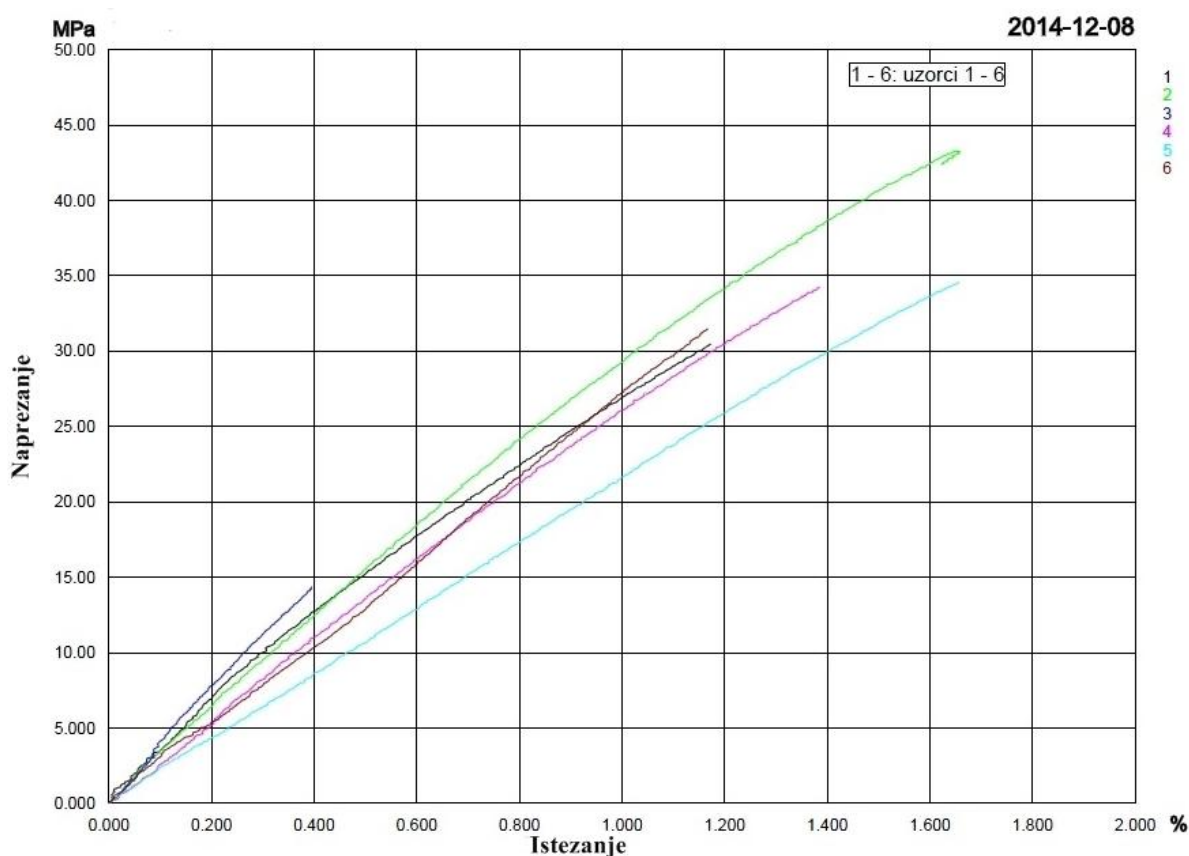
Tablica 10: Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja za AO₁

AO ₁	S_0 (mm ²)	F_m (N)	R_m (MPa)	A_{gt} (%)	E (Gpa)
Srednja vrijednost \bar{x}	22,77	1151,75	50,57	2,839	2,130
Standardna devijacija σ_x	2,446	135,753	1,75	1,242	0,730

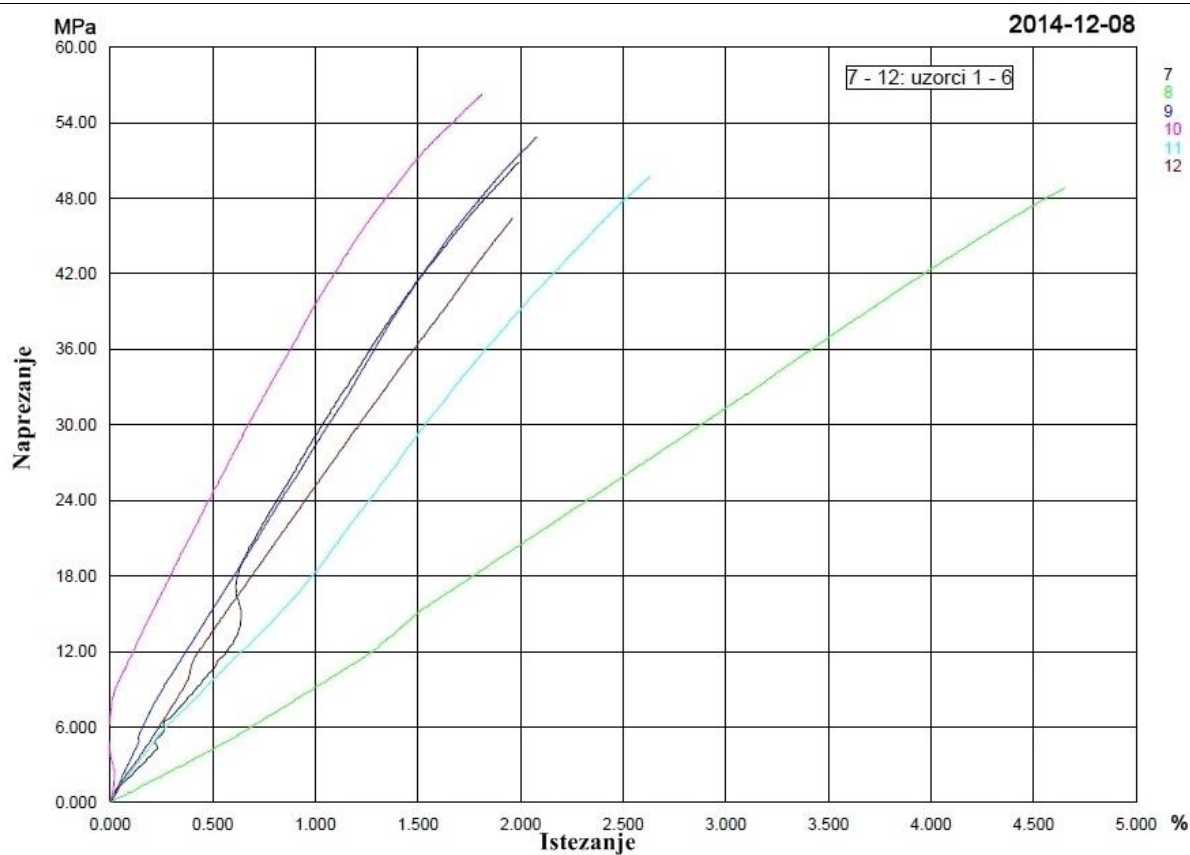
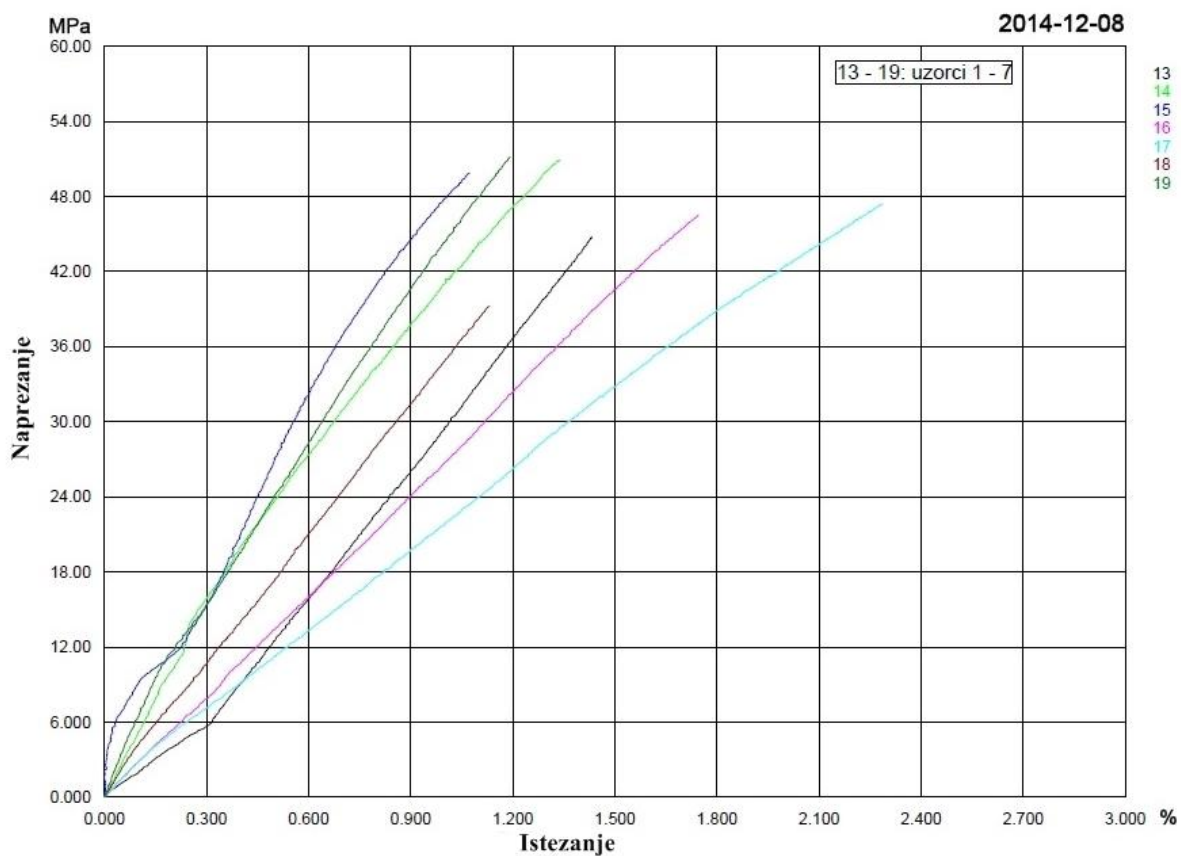
Tablica 11: Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja za AO₂

AO ₂	S_0 (mm ²)	F_m (N)	R_m (MPa)	A_{gt} (%)	E (Gpa)
Srednja vrijednost \bar{x}	20,966	1008,9	48,15	1,598	3,124
Standardna devijacija σ_x	0,861	60,918	2,798	0,433	0,679

Promatrajući sve tri tablice, može se zaključiti kako najveću silu (F_m) mogu podnijeti epruvete načinjene od AO_1 (1151,75 N), zatim slijede epruvete od materijala AO_2 (1008,9 N), dok epruvete od akrilata podnose najmanju silu (811,875 N). Najveću vlačnu čvrstoću (R_m) postiže isto materijal AO_1 (50,57 MPa), a najmanju materijal A (32,69 MPa). Epruvete od materijala AO_2 imaju najveći modul elastičnosti, dok epruvete od AO_1 imaju najmanji. Najveće ukupno istezanje (A_{gt}) postiže materijal AO_1 , a najmanje materijal A. Prema slikama 30, 31 i 32 primjećuje se da akrilat ima položenije krivulje, dok AO_1 ima najstrmije.



Slika 30: Dijagram statičkog vlačnog ispitivanja za A

Slika 31: Dijagram statičkog vlačnog ispitivanja za AO₁Slika 32: Dijagram statičkog vlačnog ispitivanja za AO₂

Promatrajući sve tri tablice, može se zaključiti kako najveću silu (F_m) mogu podnijeti epruvete načinjene od AO_1 (1151,75 N), zatim slijede epruvete od materijala AO_2 (1008,9 N), dok epruvete od akrilata podnose najmanju silu (811,875 N). Najveću vlačnu čvrstoću (R_m) postiže isto materijal AO_1 (50,57 MPa), a najmanju materijal A (32,69 MPa). Epruvete od materijala AO_2 imaju najveći modul elastičnosti, dok epruvete od AO_1 imaju najmanji. Najveće ukupno istežanje (A_{gt}) postiže materijal AO_1 , a najmanje materijal A. Prema slikama 30, 31 i 32 vidi se da akrilat ima položenije krivulje, dok AO_1 ima najstrijmije.

4.3. Rezultati ispitivanja savijanja u tri točke

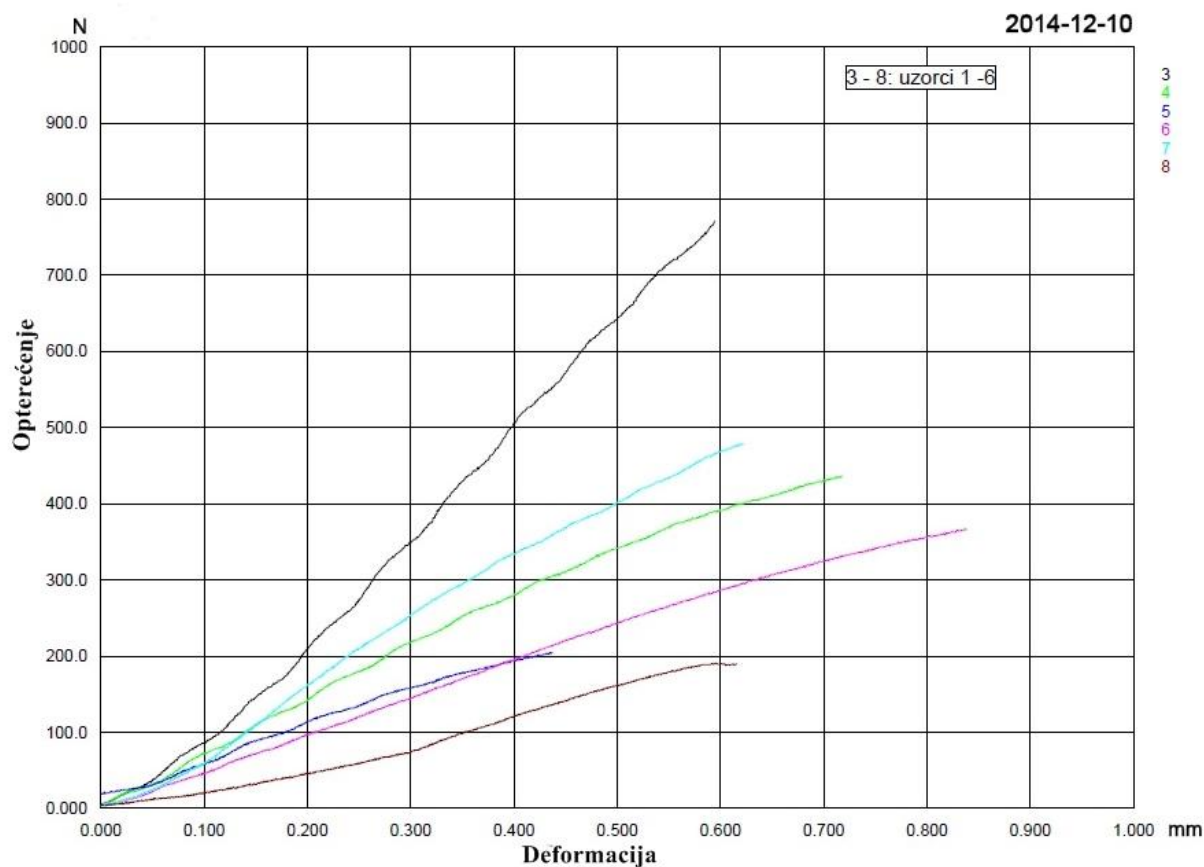
Prilikom ispitivanja savijanja u tri točke su se pomoću računalnog softvera pratile sljedeće mjerne veličine:

1. F_{max} (N) – maksimalna sila
2. s_{max} (mm) – maksimalni pomak
3. E_f (GPa) – modul elastičnosti
4. σ_{fM} (MPa) – savijanje (naprežanje)
5. ϵ_{fM} (%) – deformacija prilikom savijanja
6. dfM (mm) – defleksija prilikom savijanja

Tablice 12, 13 i 14 prikazuju rezultate ispitivanja savijanja u tri točke za svaki materijal posebno. Rezultati su također obrađeni na način da su se izračunale srednje vrijednosti i standardne devijacije rezultata svih šest epruveta za svaki materijal posebno.

Tablica 12: Rezultati ispitivanja savijanja u tri točke za A

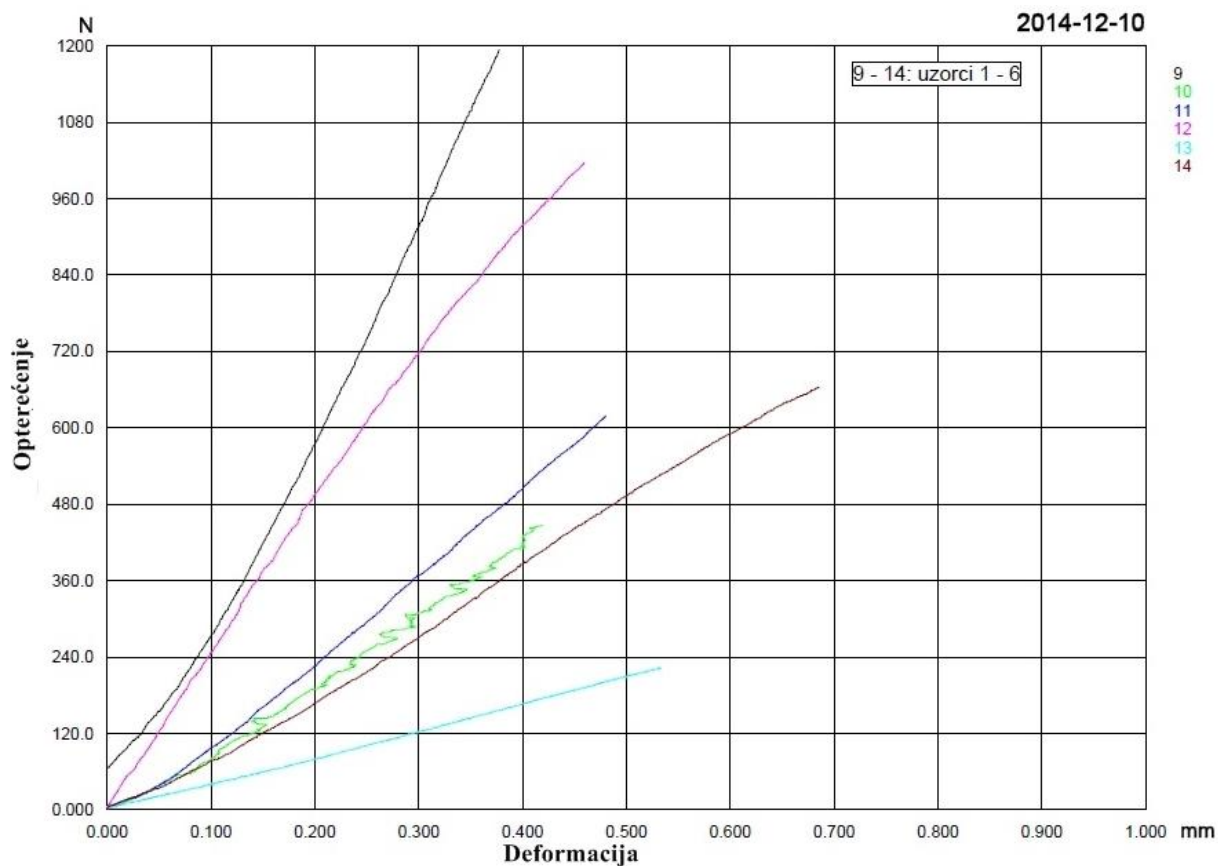
A	F_{max} (N)	s_{max} (mm)	E_f (GPa)	σ_{fM} (MPa)	ϵ_{fM} (%)	dfM (mm)
Srednja vrijednost \bar{x}	371,5	1,002	2,412	90,228	5,08	0,631
Standardna devijacija σ_x	120,324	0,063	0,576	9,88	0,971	0,058



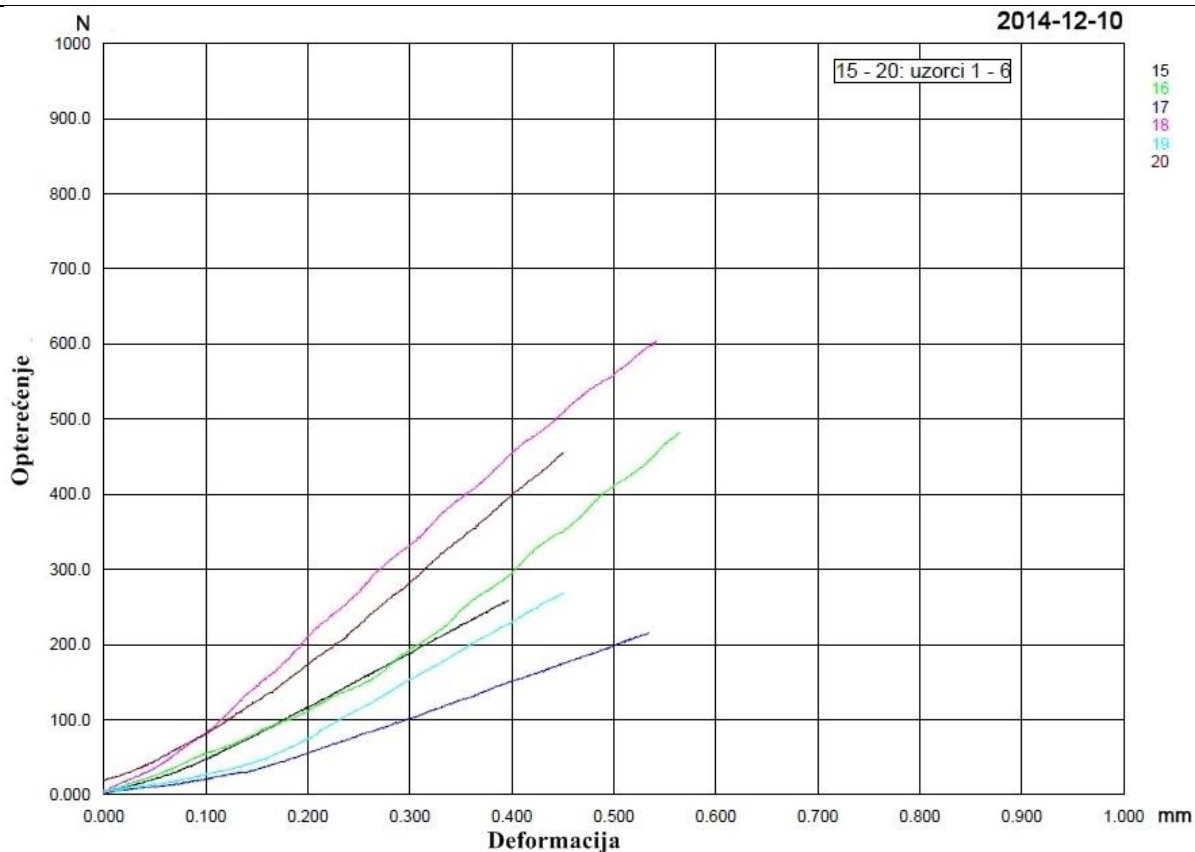
Slika 33: Dijagram ispitivanja savijanja u tri točke za A

Tablica 13: Rezultati ispitivanja savijanja u tri točke za AO₁

AO ₁	F _{max} (N)	s _{max} (mm)	E _f (GPa)	σ _{fM} (MPa)	ε _{fM} (%)	df _M (mm)
Srednja vrijednost \bar{x}	630,875	0,819	1,936	87,2	4,978	0,473
Standardna devijacija σ_x	324,526	0,029	0,277	20,405	0,298	0,047

Slika 34: Dijagram ispitivanja savijanja u tri točke za AO₁Tablica 14: Rezultati ispitivanja savijanja u tri točke za AO₂

AO ₂	F _{max} (N)	s _{max} (mm)	E _f (GPa)	σ _{fM} (MPa)	ε _{fM} (%)	df _M (mm)
Srednja vrijednost \bar{x}	366,45	0,729	1,952	67,225	4,276	0,494
Standardna devijacija σ_x	119,114	0,058	0,432	13,179	0,485	0,051



Slika 35: Dijagram ispitivanja savijanja u tri točke za AO₂

Iz rezultata prikazanih u prethodnim tablicama može se zaključiti kako maksimalnu silu (F_{max}) ostvaruje materijal AO₁ (630,875 N), dok najmanju materijal AO₂ (366,45 N). Najveći modul elastičnosti prilikom savijanja ima materijal A, a najmanji AO₁. Akrilat ima najveće savijanje (σ_M) i deformaciju prilikom savijanja (df_M), pri čemu AO₂ ima najmanje. Najveću defleksiju (df_M) ima A, a najmanju AO₁. Dijagrami na slikama 33, 34 i 35 prikazuju da su krivulje najstrmije kod AO₁, dok su najpoložitije kod A.

5. ZAKLJUČAK

Ispitivanju se pristupilo na način da se postavila pretpostavka kako će ojačani materijali imati bolja mehanička svojstva od materijala koji nemaju nikakvo ojačanje i koji se koriste svakodnevno prilikom izrade dentalnih proteza. Smisao ojačavanja je bilo izraditi materijal koji će imati puno bolja svojstva od konvencionalnog, koji će imati potrebnu čvrstoću i tvrdoću, a s druge strane biti dovoljno žilav kako bi se spriječili lomovi koji su najveći problem proteza od akrilata. Također, bilo je potrebno usporediti dvije različite vrste ojačanja koja se razlikuju po gustoći tkanja staklenih vlakana.

Uzimajući u obzir rezultate iz prethodnog poglavlja, najbolje su vrijednosti postignute prilikom ispitivanja mehaničkih svojstava imali uzorci izrađeni od materijala AO₁, odnosno od materijala koji čini akrilat ojačan staklenim vlaknima u obliku guste tkanine. Takvi uzorci su trpili veća opterećenja prilikom statičkog vlačnog ispitivanja i ispitivanja savijanja u tri točke. Također su imali i puno veći iznos udarnog rada loma, što znači da je bila potrebna veća energija kako bi se epruveta slomila. Kod ispitivanja žilavosti, tj. udarnog rada loma i kod statičkog vlačnog ispitivanja, uzorci od materijala AO₂ su imali bolje vrijednosti od uzoraka izrađenih od akrilata, čime je početna pretpostavka opravdana. Međutim, prilikom pregleda vrijednosti rezultata ispitivanja savijanja u tri točke, uzorci ojačani rjeđim tkanjem staklenih vlakana (AO₂) imaju najslabije rezultate, tj. mogu podnijeti najmanje opterećenje. Iako se za svako ispitivanje izradilo šest epruveta kako bi se dobili što bolji i što točniji rezultati, moguća su dva razloga zašto je došlo do takvog rezultata:

- a) nejednolika i različita debljina epruveta
- b) uvjeti izrade uzoraka

Prilikom mjerenja dimenzija potrebnih za ispitivanje, dimenzije debljine epruveta su podosta varirale i razlikovale su se od epruvete do epruvete kod svakog ispitivanja posebno te je mjerenje bilo potrebno obaviti tri puta i izraziti srednju vrijednost. Razlog nejednolike debljine epruveta je sama struktura materijala jer ga je prilično teško oblikovati nakon što polimerizira zbog krutosti, što se i vidjelo kada je jedna od pločica prilikom brušenja puknula. Također, nejednolikost debljine epruveta može biti posljedica uvjeta izrade pločica jer je tim postupkom teško ostvariti veliku preciznost. Različitost u dimenzijama epruveta se može vidjeti promatrajući dijagrame u prethodnom poglavlju. U dijagramima se krivulje epruveta za pojedini materijal ne poklapaju, što je posljedica različitih i nejednolikih debljina. Osim

toga, samonamještanje epruvete u početku ispitivanja može uzrokovati nepoklapanje krivulja. Bilo kakvo odstupanje od dimenzija koje su normirane može imati za posljedicu neprecizne i nemjerodavne rezultate. Prilikom izrade epruveta za statičko vlačnog ispitivanje se moralo prilično odstupati od norme, ali pošto su se epruvete od sva tri materijala tako izrađivale jedino što je bilo bitno je međusobni odnos rezultata.

Sve u svemu, može se zaključiti kako ojačanje akrilata gušćim tkanjem staklenih vlakana bitno doprinosi poboljšanju svih mehaničkih svojstava koja su se ispitivala i da bi se moglo razmisliti o primjeni takve vrste ojačanja u svakodnevnoj praksi. Nadalje, nakon provedenog ispitivanja bi se trebala provesti analiza o tome u kojoj mjeri bi upotreba ojačanja utjecala na povećanje cijene dentalne proteze, bi li ojačanje bilo vidljivo unutar akrilata jer je estetika jedna od najbitnijih stavki izrade proteza za zube i na koji način bi se prilikom loma spriječilo da staklena vlakna dođu u direktni kontakt sa okolnim tkivom i ozljede ga.

LITERATURA

- [1] Jerolimov, V. i suradnici: Osnove stomatoloških materijala, Zagreb, 2005.
- [2] Filetin, T., Marić, G.: Postupci proizvodnje kompozita, http://www.fsb.unizg.hr/zavod_za_materijale/download/8f5b1e68977077c0bc5053548b75628c.pdf, Zagreb, 2013.
- [3] Raos, P., Šercer, M.: Teorijske osnove proizvodnje polimernih tvorevina, Slavonski Brod/Zagreb, 2010.
- [4] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, Zagreb, 2009.
- [5] Marić, G.: Materijali II, http://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1369657197-0-materijaliiikompoziti2013.pdf, Zagreb, 2012./2013.
- [6] Krunic, N., Kostic, M., Anđelković, M.: <http://www.medfak.ni.ac.rs/asn/2007/2--decembar%202007/AKRILATI%20-%20JOS%20UVEK%20NEZAMENLJIVI%20MATERIJALI.pdf>, Niš, 2007.
- [7] Ivoclar vivadent: ProBase Cold, upute za upotrebu
- [8] Landek, D.: http://www.fsb.unizg.hr/zavod_za_materijale/download/03a15d28597942dabf88238526b11c7b.pdf, 2012./2013.
- [9] <http://www.kelteks.hr/kompoziti.php>

PRILOZI

I. CD-R disc