

Vatrootpornost polimernih kompozita

Musa, Marija

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:873260>

Rights / Prava: [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-11**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Marija Musa

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

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

Student:

Marija Musa

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Zdravku Schauperlu i asistentu dr. sc. Daliboru Viderščaku na pruženoj pomoći i savjetima tijekom izrade ovog završnog rada.

Također se zahvaljujem prof. dr. sc. Zoranu Domitranu i tvrtki Domitran Novitas d.o.o. na pomoći u postupku ispitivanja uzoraka.

Marija Musa



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
 Povjerenstvo za završne i diplomske 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: 602 - 04 / 24 - 06 / 1 | |
| Ur.broj: 15 - 24 - | |

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Marija Musa**

JMBAG: **35234126**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Vatrootpornost polimernih kompozita**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Fire resistance of polymer composites**

Opis zadatka:

Polimerni kompoziti predstavljaju sve značajniji tehnički materijal s potencijalom primjene i na najzahtjevnijim mjestima. Međutim, jedna od glavnih prepreka za primjenu na takvim mjestima predstavlja slaba vatrootpornost i otpornost na povišene temperature,

U teoretskom dijelu rada potrebno je proučiti i istražiti postupke ispitivanja vatrootpornosti polimernih kompozita te eventualno pronaći norme koje opisuju ta ispitivanja.

U eksperimentalnom dijelu rada treba definirati optimalni postupak ispitivanja vatrootpornosti polimernih kompozita ojačanih bazaltnim i staklenim vlaknima za primjenu u građevinarstvu. Potrebno je provesti ta ispitivanja tijekom kojih će se te ploče izlagati djelovanju plamena. Nakon provedenog izlaganja plamenu treba analizirati strukturu materijala na mjestu koje je bilo ispitivano te provesti ispitivanja osnovnih mehaničkih svojstava ispitivanih ploča. Na temelju dobivenih rezultata potrebno je donijeti određene zaključke o vatrootpornosti ispitivanih ploča.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2023.

Datum predaje rada:

1. rok: 22. i 23. 2. 2024.
 2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.
 3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26. 2. - 1. 3. 2024.
 2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.
 3. rok: 23. 9. - 27. 9. 2024.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Zdravko Schauerl

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Damir Godec

SADRŽAJ

| | |
|---|------|
| SADRŽAJ | II |
| POPIS SLIKA | IV |
| POPIS TABLICA..... | V |
| POPIS OZNAKA | VI |
| SAŽETAK..... | VII |
| SUMMARY | VIII |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. KOMPOZITNI MATERIJALI..... | 2 |
| 2.1. Osnovno o kompozitnim materijalima..... | 2 |
| 2.2. Kompoziti ojačani česticama | 3 |
| 2.3. Kompoziti ojačani vlaknima | 4 |
| 2.3.1. Vrste vlakana | 5 |
| 2.3.2. Vrste matrice | 5 |
| 2.3.2.1. Kompoziti s metalnom matricom (MMC)..... | 5 |
| 2.3.2.2. Kompoziti s keramičkom matricom (CMC)..... | 6 |
| 2.3.2.3. Kompoziti s polimernom matricom (PMC)..... | 6 |
| 3. POLIMERNI KOMPOZITI SA BAZALTNIM VLAKNIMA | 8 |
| 3.1. Proizvodnja bazaltnih vlakana | 8 |
| 3.2. Mehanička svojstva bazaltnih vlakana..... | 9 |
| 3.3. Primjena bazaltnih vlakana | 10 |
| 4. VATROOTPORNOST POLIMERNIH KOMPOZITA..... | 11 |
| 4.1. Karakteristike za definiranje vatrootpornosti kompozita..... | 11 |
| 4.1.1. Reakcija na vatru i vatrootpornost | 12 |
| 4.1.2. Nezapaljivost..... | 12 |
| 4.1.3. Zapaljivost..... | 12 |
| 4.1.4. Stopa otpuštanja topline | 13 |
| 4.1.5. Širenje plamena, površinska zapaljivost, širenje vatre | 13 |
| 4.1.6. Taljenje | 13 |
| 4.1.7. Dim i toksičnost | 13 |
| 4.1.8. Toplinska izolacija | 14 |
| 4.2. Propisi za vatrootpornost po sektorima primjene | 14 |
| 4.2.1. Željeznice | 14 |
| 4.2.2. Automobilska industrija..... | 15 |
| 4.2.3. Pomorstvo | 15 |
| 4.2.4. Građevina | 16 |
| 4.3. Postupak ispitivanja vatrootpornosti polimernih kompozita | 17 |
| 4.3.1. Konusni kalorimetar za mjerenje stope otpuštanja topline | 18 |
| 4.3.2. Širenje plamena, površinska zapaljivost i širenje vatre | 20 |
| 4.3.3. Dim i otrovnost | 21 |
| 4.3.4. Ispitivanje u peći | 21 |
| 5. EKSPERIMENTALNI DIO | 23 |
| 5.1. Priprema uzoraka za ispitivanje | 23 |

| | |
|---|----|
| 5.2. Ispitivanje vatrootpornosti | 25 |
| 5.3. Usporedba vatrootpornosti pojedinih uzoraka | 34 |
| 5.4. Analiza mikrostrukture kompozitnih uzoraka nakon izlaganja vatri | 35 |
| 6. ZAKLJUČAK..... | 43 |
| LITERATURA..... | 44 |

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 1. Raspored vlaknastih ojačala [2] | 4 |
| Slika 2. Usporedba vlačne čvrstoće bazaltnih i ostalih vlakana [7] | 8 |
| Slika 3. Proizvodnja bazaltnih vlakana Junkers postupkom[8]..... | 9 |
| Slika 4. Standardi za ispitivanje vatrootpornosti [12] | 16 |
| Slika 5. Raspon veličina uzoraka različitih metoda ispitivanja požara [10] | 18 |
| Slika 6. Konusni kalorimetar [11] | 19 |
| Slika 7. Izvedbe konusnog kalorimetra [10] | 20 |
| Slika 8. Ispitivanje širenja plamena [10] | 21 |
| Slika 9. Krivulja T-t za određivanje vatrootpornosti [10]..... | 22 |
| Slika 10. Ploča prije rezanja..... | 23 |
| Slika 11. Izrezani i premazani uzorci | 25 |
| Slika 12. Plamenik korišten za ispitivanje | 26 |
| Slika 13. Ispitni uzorak U1 nakon 5 minuta izlaganja | 27 |
| Slika 14. Izdvajanje plinova pri gorenju U1 | 27 |
| Slika 15. Uzorak U1 nakon sklanjanja sa plamena | 28 |
| Slika 16. Zapaljenje uzorka U2 | 28 |
| Slika 17. Uzorak U2 nakon 7 min izlaganja..... | 29 |
| Slika 18. Uzorak U2 nakon uklanjanja sa plamena..... | 29 |
| Slika 19. Bubrenje premaza na uzorku U4..... | 30 |
| Slika 20. Specifična površina uzorka U4 | 31 |
| Slika 21. Zapaljenje uzorka U4 | 31 |
| Slika 22. Uzorak U4 nakon skidanja sa izvora plamena | 32 |
| Slika 23. Zapaljenje uzorka U7 | 33 |
| Slika 24. Uzorka U7 nakon uklanjanja sa izvora plamena..... | 33 |
| Slika 25. Zapaljenje bočnih stranica uzorka U7 | 34 |
| Slika 26. Tijek zapaljenja uzoraka | 35 |
| Slika 27. MECATOME T 260 | 36 |
| Slika 28. Izrezani uzorci..... | 36 |
| Slika 29. Brušenje površine uzoraka | 37 |
| Slika 30. Svjetlosni mikroskop OLYMPUS GX51 | 38 |
| Slika 31. Uzorak U1 pri povećanju 50x | 39 |
| Slika 32. Uzorak U2 pri povećanju 100x | 39 |
| Slika 33. Uzorak U2 pri povećanju 50x | 40 |
| Slika 34. Uzorak U2 pri povećanju 100x | 40 |
| Slika 35. Uzorak U4 pri povećanju 50x | 41 |
| Slika 36. Uzorak U4 pri povećanju 100x | 41 |
| Slika 37. Uzorak U7 pri povećanju 50x | 42 |
| Slika 38. Uzorak U7 pri povećanju 100x | 42 |

POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba mehaničkih svojstava bazaltnih, ugljičnih i staklenih vlakana[7] 10
Tablica 2. Oznake ispitnih uzoraka s navedenim zaštitnim premazima 24
Tablica 3. Vrijeme zapaljenja uzoraka 34

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|---------------|-----------------|----------------------|
| R_m | MPa | vlačna čvrstoća |
| ρ | g/cm^3 | gustoća |
| λ | W/mK | toplinska vodljivost |

SAŽETAK

U ovom završnom radu provedeno je ispitivanje vatrootpornosti kompozita s polimernom matricom i vlaknastim ojačalima od stakla i bazalta za primjenu u građevinskoj industriji.

U teorijskom dijelu rada napravljen je uvod u kompozite, njihova svojstva i primjenu. Detaljnije su opisana bazalna vlakna s kojima se nismo susretali toliko često prilikom dosadašnjih učenja o kompozitima. Opisani su uvjeti koje materijal treba ispunjavati kako bi se klasificirao kao vatrootporni materijal te su navedene norme i zahtjevi koji se stavljaju pred vatrootporne polimerne kompozite ovisno o sektoru primjene.

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je ispitivanje vatrootpornosti na devet uzoraka kompozitnih pločica. Uzorci su naknadno obrađeni nanošenjem različitih premaza za poboljšanje otpornosti na vatru. Svaki uzorak izlagan je istom izvoru plamena i vremenu trajanja. Provedena je detaljna analiza oštećenja i strukture kompozita upotrebom svjetlosnog mikroskopa.

Ključne riječi: polimerni kompoziti, građevinska industrija, vatrootpornost

SUMMARY

This final paper investigates the fire resistance of polymer composite materials with glass and basalt fiber reinforcements for use in the construction industry.

The theoretical part of the paper provides an introduction to composites, their properties, and applications. Basalt fibers, which haven't been encountered as frequently in previous studies on composites, are described in more detail. The conditions that a material must meet to be classified as fire-resistant are described, along with the standards and requirements placed on fire-resistant polymer composites depending on the sector of application.

In the experimental part of the paper, fire resistance testing was conducted on nine samples of composite tiles. The samples were subsequently treated with various coatings to improve fire resistance. Each sample was exposed to the same flame source for the same duration. A detailed analysis of damage and composite structure was performed using a light microscope.

Key words: polymer composites, construction industry, fire resistance

1. UVOD

Polimerni kompoziti svoju široku primjenu temelje na mogućnosti kombiniranja velikog broja dobrih svojstava, od kojih je najznačajnija njihova visoka čvrstoća uz relativno nisku gustoću. Polimerna matrica kao osnova materijala kombinira se s različitim vrstama ojačala u svrhu dobivanja poboljšanih svojstava. Kao jedan od ključnih izazova u primjeni polimernih kompozita, a posebno u građevinskoj industriji, ističe se vatrootpornost i otpornost na povišene temperature. Kako bi se poboljšala svojstva vatrootpornosti, polimerna matrica najčešće se kombinira sa staklenim vlaknima, a kao relativno novo ojačanje koriste se i bazaltna vlakna. Bazaltna vlakna pokazala su se kao jedina anorganska vlakna koja se ne tale na vrlo visokoj temperaturi, a kao pogodan građevinski materijal ističu se svojim visokim modulom elastičnosti, otpornosti na koroziju, otpornosti na visoke temperature i lakim rukovanjem. Obzirom da požarne nesreće predstavljaju velik rizik kako za ljudske živote, tako i za infrastrukturu, što bolja vatrootpornost jedan je od glavnih kriterija pri odabiru materijala za primjenu. Različite su mogućnosti ispitivanja vatrootpornosti kompozita ovisno o njihovoj primjeni. U svrhu ispitivanja vatrootpornosti elemenata građevinskih konstrukcija, koristi se norma ISO 834-1. Taj dio norme utvrđuje ispitivanja za određivanje otpornosti na vatru različitih elemenata konstrukcija kada su izloženi standardnim uvjetima izloženosti vatri. Tako dobiveni ispitni podaci omogućit će naknadnu klasifikaciju na temelju trajanja tijekom kojega izvedba zadovoljava specificirane kriterije.

2. KOMPOZITNI MATERIJALI

2.1. Osnovno o kompozitnim materijalima

Kompozitni materijali definirani su kao kombinacija dvaju ili više materijala koji rezultiraju boljim svojstvima nego te komponente pojedinačno. Za razliku od metalnih legura, svaki materijal zadržava svoja kemijska, fizikalna i mehanička svojstva. Kompozitni materijali ili kompoziti sastoje se od dva konstituenta, matrice i ojačala. Glavne prednosti kompozitnih materijala su visoka čvrstoća i krutost, zajedno sa niskom gustoćom [1].

Prednosti kompozita:

- mala gustoća
- veća izdržljivost na umor
- veća žilavost od keramike i stakla
- jednostavni za obradu

Nedostaci kompozita:

- često nisu ekološki prihvatljivi jer sadrže polimere i druge materijale koji su derivati nafte ili drugih neobnovljivih resursa
- niska mogućnost recikliranja zbog složene strukture i kombinacije materijala
- anizotropna svojstva
- mala mogućnost ponovne upotrebe zbog složene strukture i otpornosti na razgradnju [1]

Matrica je osnova kompozita, kontinuirana faza, kojoj se dodaju različiti dodaci sa svrhom postizanja boljih svojstava. Uloga matrice je u tome da ona povezuje vlakna, prenosi opterećenje na vlakna te služi za zaštitu vlakna od okolnih utjecaja i oštećenja. Obzirom na te uloge matrice, ona mora zadovoljiti određene zahtjeve; mora biti otporna na koroziju, prijanjati uz vlakna, ne smije kemijski reagirati s vlaknom te mora poboljšavati svojstva u poprečnom smjeru i žilavost cijele konstrukcije. Ojačalo je nosivi element kompozita, koji mora ispuniti ulogu osiguravanja visoke čvrstoće, krutosti, otpornosti na trošenje i ostalih zahtijevanih svojstava [2].

Obzirom da se kompozit sastoji od matrice i ojačala, ukupno ponašanje kompozita bit će određeno:

- svojstvima matrice i ojačala
- veličinom i rasporedom konstituenata
- volumnim udjelom konstituenata
- oblikom konstituenata
- prirodom i jakosti veza između konstituenata[2]

Kompozite dijelimo obzirom na materijal matrice (metalna, keramička, polimerna) i oblik ojačala (čestice, vlakna, strukturni kompoziti) [3].

2.2. Kompoziti ojačani česticama

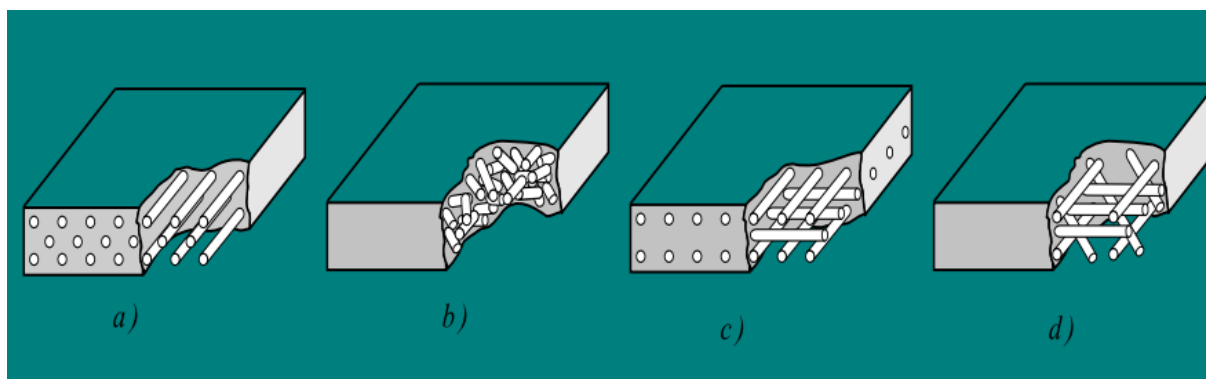
Među kompozitima ojačanima česticama razlikujemo dvije podskupine, a to su disperzije i velike čestice. Bitna razlika između njih je mehanizam ojačanja. Velike čestice imaju promjer veći od 0,1 μm dok disperzije imaju promjer manji od 0,1 μm [2].

Kod kompozita ojačanih velikim česticama, iz naziva je vidljivo da interakcija između čestica i matrice nije na atomskoj ili molekularnoj razini. Za većinu ovih kompozita, čestična je faza tvrđa i čvršća od matrice te ograničava kretanje matrice. Kod ove podskupine, matrica prenosi primijenjena naprezanja na čestice, koje nose određeni udio opterećenja. Stupanj ojačanja ovisi o jakosti povezivanja na sučelju matrica-čestica.

Kod kompozita ojačanih disperzijom interakcije između čestica i matrice događaju se na atomskoj ili molekularnoj razini. Matrica nosi glavni dio primijenjenog opterećenja, a disperzije ometaju gibanje dislokacija. Na taj način plastična deformacija je ograničena, što rezultira poboljšanjem čvrstoće [4].

2.3. Kompoziti ojačani vlaknima

Vlaknima ojačani kompoziti odlikuju se poboljšanom čvrstoćom, žilavošću i krutošću, što je rezultat ugradnje čvrstih vlakana u mekaniju matricu. Različiti su načini rasporeda vlaknastih ojačala, kako je prikazano na slici 1.



Slika 1. Raspored vlaknastih ojačala [2]

Raspored vlaknastih ojačala:

- a) Kontinuirana jednosmjerna vlakna
- b) Diskontinuirana slučajno usmjerena vlakna
- c) Ortogonalni raspored vlakana
- d) Višesmjerno usmjerenje vlakana

Kao što se može i vidjeti iz priložene slike 1, različiti su načini orijentiranja, ali i duljine vlakana. Pa tako prema duljini razlikujemo kontinuirana i diskontinuirana vlakna. Kontinuirana vlakna daju najbolja svojstva, ali ih je jako teško proizvesti i ugraditi u matricu. S druge strane, diskontinuirana vlakna otežavaju predviđanje svojstava kompozita. Kod diskontinuiranih vlakana, krajevi vlakna nose manje opterećenje nego njegov srednji dio pa će čvrstoća biti manja nego što je predviđena zakonom miješanja. Međutim, diskontinuirana vlakna koja imaju velik omjer duljine i promjera lakše se ugrađuju u matricu i tako poboljšavaju krutost i čvrstoću materijala [3].

2.3.1. Vrste vlakana

Na temelju promjera i svojstava, vlakna se grupiraju u tri različite kategorije, a to su: viskeri, vlakna i žice. Viskeri su vrlo tanki pojedinačni kristali koji imaju izuzetno velike omjere duljine i promjera. Kao posljedica njihove male veličine, imaju visok stupanj kristalne savršenosti i gotovo su bespriječni, što objašnjava njihovu visoku čvrstoću; nalaze se među najjačim poznatim materijalima. Bez obzira na visoku čvrstoću, viskeri se ne koriste tako često zbog visoke cijene i nepraktičnosti ugrađivanja u matricu. Materijali koji se klasificiraju kao vlakna mogu biti polikristalični ili amorfni, a odlikuju se malim promjerima. Tanke žice imaju relativno velike promjere; tipični materijali uključuju čelik, molibden i volfram [4].

2.3.2. Vrste matrice

Faza matrice može biti metalna, polimerna ili keramička, a najčešće se rabe metalna i polimerna matrica zbog svoje duktilnosti. Neke od funkcija matrice su: povezivanje vlakana, ona prenosi narinuto naprezanje na vlakna, štiti vlakna od vanjskih utjecaja uslijed kojih može doći do njihova oštećenja [3].

2.3.2.1. Kompoziti s metalnom matricom (MMC)

Metalna matrica kompozita najčešće je izrađena od slitine aluminija, titana ili magnezija. Prednost metalne matrice je visoka žilavost i čvrstoća te provođenje struje i topline. Poboljšanje mehaničkih svojstava pri povišenim temperaturama, jedan je od glavnih razloga ojačavanja metalne matrice. Unatoč mogućnosti uporabe pri višim radnim temperaturama, uporaba ove vrste kompozita ograničena je visokom cijenom i kompliciranim postupcima izrade [5].

Prednosti MMC kompozita:

-visoka krutost i čvrstoća

-niska gustoća

-dobra otpornost na trošenje

-dobra svojstva na visokim temperaturama

Nedostaci MMC kompozita:

-komplicirana proizvodnja

-visoka cijena

-loša recikličnost [2]

2.3.2.2. *Kompoziti s keramičkom matricom (CMC)*

Kompoziti s keramičkom matricom podrazumijevaju matricu od aluminijevog oksida, silicijevog oksida ili cirkonijevog dioksida ojačanu ugljičnim vlaknima. Prednosti CMC kompozita su visoka čvrstoća, tvrdoća, otpornost na koroziju i niska gustoća. Međutim, keramika sama po sebi ima nisku lomnu čvrstoću pa će pod utjecajem udarne sile doći do loma. Zbog toga se ojačava vlaknima od silicijeva karbida ili ugljika kako bi se povisila lomna žilavost. Kompoziti s keramičkom matricom koriste se za umetke reznih alata, a proizvode se postupcima vrućeg prešanja ili vrućeg izostatskog prešanja [6].

2.3.2.3. *Kompoziti s polimernom matricom (PMC)*

Najčešće korištene i najjeftinije polimerne smole koje se koriste su poliesteri i vinil-esteri; ovi materijali matrice koriste se najčešće kod kompozita ojačanim staklenim vlaknima. Obzirom na vrstu ojačala koja se koristi kod polimernih kompozita, možemo ih podijeliti na staklenim vlaknima ojačane polimerne kompozite, ugljičnim vlaknima ojačane i aramidnim vlaknima ojačane [1].

Polimerni kompoziti ojačani staklenim vlaknima proizvode se u najvećoj količini. Oni predstavljaju dobru kombinaciju izdržljivosti, male mase i otpornosti na koroziju. Staklo koje se može izvlačiti u vlakna naziva se E-staklo i ima promjer od 3 μm do 20 μm . Oznaka E u

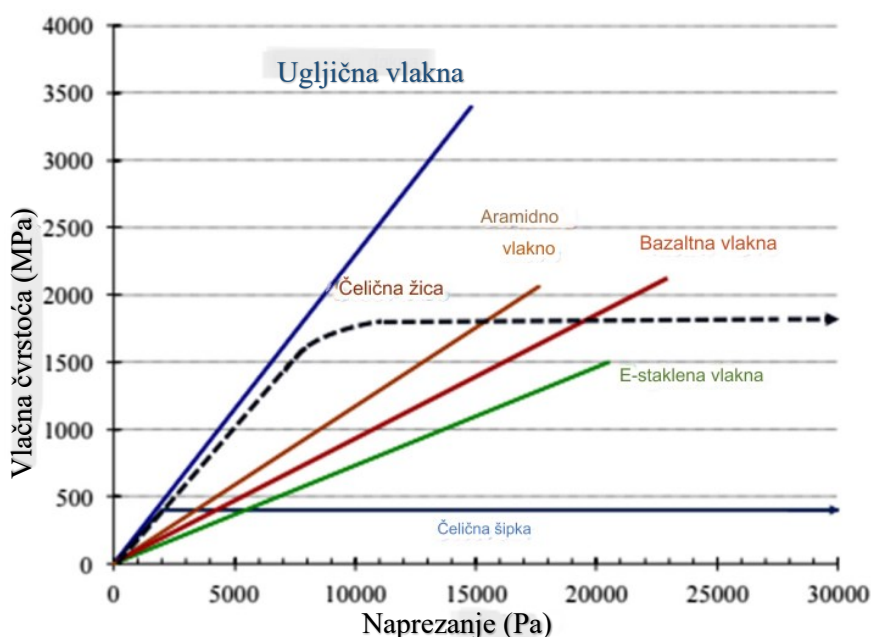
imenu predstavlja svojstvo električnosti, što znači da su takva staklena vlakna dobar električni izolator, imaju dobru čvrstoću i otpornost na utjecaj morske vode pa se koriste u brodogradnji. Staklena vlakna pronašla su svoju primjenu u industriji transporta gdje se teži postići manja težina vozila uz povećanje djelotvornosti transporta kapljevina [5].

Kod polimernih kompozita ojačanih ugljičnim vlaknima uobičajeni je promjer vlakana između 4 μm i 10 μm , a ona mogu biti rezana i kontinuirana. Od svih vlaknastih materijala za ojačavanje, ugljična imaju najvišu specifičnu čvrstoću i specifični modul te ih tako visokim zadržavaju i na povišenim temperaturama. Žilavost ovih vlakana slabija je nego kod staklenih ili aramidnih vlakana, ali zato imaju najbolju korozivsku postojanost. Polimerni kompoziti sa ugljičnim vlaknima koriste se za sportsku i rekreacijsku opremu, za spremnike pod tlakom te konstrukcijske dijelove vojnih i komercijalnih letjelica [3].

Polimerni kompoziti ojačani aramidnim vlaknima vrlo su poželjni jer su aramidna vlakna visokočvrsti i visokomodulni materijali kod kojih je omjer čvrstoća-gustoća iznad onog kod metala. Aramidna vlakna imaju dobru žilavost, krutost, visoku otpornost na udar i na puzanje, a uz to su otporni zapaljenju pa njihova mehanička svojstva zadržavaju svoje vrijednosti u temperaturnom rasponu od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ova vrsta polimernih kompozita nalazi primjenu u balistici, za izradu kablova od optičkih vlakana, u zrakoplovstvu te zamjenjuju azbest kod automobilskih kočnica i spojki [3].

3. POLIMERNI KOMPOZITI SA BAZALTNIM VLAKNIMA

Bazalt je jedan od materijala koji nalazi primjenu u različitim industrijama. Od 1995. godine nadalje, bazalt se koristi u širem spektru civilnih primjena. Općenito govoreći, kompozitni materijali koji se koriste u građevinskoj industriji sastoje se od ojačavajućih elementa uklopljenih u matricu. Funkcija ojačavajućeg elementa je pružanje visoke čvrstoće, dok mu matrica osigurava stabilnost. Sve se više istražuje primjena bazalta kao ojačanja u različitim civilnim i građevinskim primjenama. Trenutno je bazalt jedino anorgansko vlakno koje se tali tek na jako visokoj temperaturi od 1040 °C. Na slici 2 prikazana je usporedba vlačne čvrstoće bazalnog vlakna s ostalim komercijalno dostupnim vlaknima. Iz slike 2. jasno se vidi da bazaltno vlakno posjeduje bolju krutost i čvrstoću u usporedbi s E-staklenim vlaknom, te ima veću duktilnost u usporedbi s ugljičnim vlaknom, što ga čini pogodnim ojačavajućim materijalom na razini s ugljičnim i staklenim vlaknima [7].

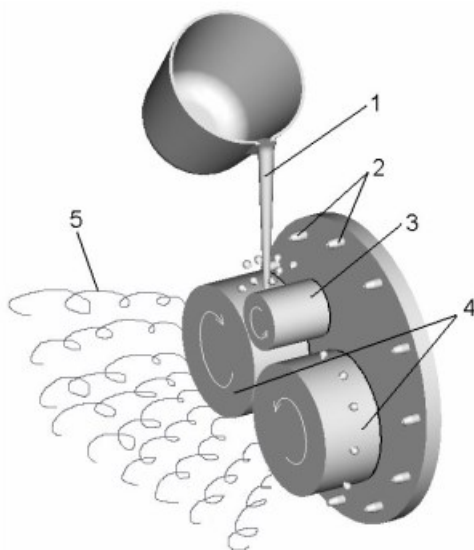


Slika 2. Usporedba vlačne čvrstoće bazaltnih i ostalih vlakana [7]

3.1. Proizvodnja bazaltnih vlakana

Osnova bazaltnih vlakana je bazaltna stijena, koja je nadzemna vulkanska stijena zasićena sa SiO₂. Obzirom na okolnosti nastanka, bazalt posjeduje neka izvrsna svojstva. Osim visokog modula elastičnosti i izvrsne otpornosti na toplinu, vlakna napravljena od bazalta imaju

značajnu sposobnost otpornosti na toplinu i zvuk te su izvanredni izolatori vibracija. Bazaltne vlakna proizvode se tehnologijom poznatom pod nazivom Junkers tehnologija, koja se temelji na topljenju bazaltnih stijena, a zatim oblikovanjem vlakana iz njih, kao što je prikazano na slici 3. [8].



Slika 3. Proizvodnja bazaltnih vlakana Junkers postupkom[8]

Metoda se temelji na tome da se taljevina temperature $1580\text{ }^{\circ}\text{C}$ koja dolazi iz plinske peći prenosi na horizontalnu osnovu stroja sa tri centrifugalne glave. Prolaskom kroz centrifugalne glave stvaraju se vlakna duljine od 60 mm do 100 mm i promjera od $6\text{ }\mu\text{m}$ do $10\text{ }\mu\text{m}$ [8].

U pogledu proizvodnje, proizvodnja bazaltnih vlakana ekološki je prihvatljivija jer njegova proizvodnja ne stvara štetne plinove i manje je skupa u usporedbi s proizvodnjom vlakana poput stakla i ugljika.

3.2. Mehanička svojstva bazaltnih vlakana

Zbog dobre otpornosti na koroziju u kiselom i lužnatom okolišu, bazalt ima bolja svojstva za primjenu u građevinskoj industriji nego što imaju staklena vlakna. Također, njegove termičke i zvučno izolacijske osobine, otpornost na vibracije i kemijska otpornost, čine bazalt obećavajućim za primjenu u građevinskoj industriji. U tablici 1. prikazana je usporedba bazaltnih, staklenih i ugljičnih vlakana [7].

Tablica 1. Usporedba mehaničkih svojstava bazaltnih, ugljičnih i staklenih vlakana[7]

| Svojstvo | Staklena vlakna | Ugljična vlakna | Bazaltna vlakna |
|--|--|---------------------------------------|--|
| Gustoća, ρ [gcm^{-3}] | 2,6 | 1,4-1,6 | 2,5 - 2,9 |
| Vlačna čvrstoća, R_m [MPa] | 1798,3 | 3528,1 | 992,4 |
| Termička stabilnost na 600 °C | 45 % gubitka čvrstoće | 40 % gubitka čvrstoće | 5 % gubitka čvrstoće |
| Toplinska provodnost, λ [W/mK] | 0,031 – 0,038 | 80 - 270 | 0,034 - 0,04 |
| Krhkost | Manje su krhka u usporedbi sa bazaltnim vlaknima | Više su krhka nego bazaltna vlakna | Značajnije je povećanje čvrstoće i tvrdoće |

Kako bi se poboljšala mehanička svojstva bazaltnih vlakana, nije potrebno dodavati nikakve dodatke, za razliku od staklenih i ugljičnih vlakana. Kapacitet apsorpcije energije bazaltnih vlakana veći je od kapaciteta ugljika i stakla, stoga je za duktilnost bazaltno vlakno poželjnije od ugljika i stakla. Također, u pogledu kemijske postojanosti, bazaltna vlakna mnogo su otpornija na kiselinsku koroziju u usporedbi sa staklenim vlaknima [7].

3.3. Primjena bazaltnih vlakana

Obzirom da bazaltno vlakno ima izvrsne sposobnosti vezivanja, može se koristiti za ojačavanje anorganskih materijala, a istaknuta je uporaba bazaltnih vlakana za ojačavanje betonskih konstrukcija. Također je moguća primjena bazaltnih vlakana za ojačanje metala, kao što je izrada kompozita bazaltnih vlakana/aluminija. Međutim, najvažnija je primjena bazaltnih vlakana u kompozitnim materijalima za zaštitu od topline. Zbog dobre toplinske stabilnosti, toplinske izolacije i zaštite od topline, materijali od bazaltnih vlakana koriste se kao protupožarne barijere [9].

4. VATROOTPORNOST POLIMERNIH KOMPOZITA

Ponašanje materijala pri izloženosti vatri jedan je od važnijih faktora koji ograničava širu primjenu kompozitnih materijala u mnogim područjima. Glavna mana kompozitnih materijala je njihova slaba otpornost na požar. Kada su kompoziti izloženi visokim temperaturama (obično iznad 300 °C do 400 °C), matrica se razgrađuje uz oslobađanje topline, dima i toksičnih tvari. Opasnost od požara kod kompozita definira se njihovim reakcijskim i otpornim svojstvima na požar. Reakcijska svojstva koriste se za opisivanje zapaljivosti i svojstava izgaranja materijala koji utječu na rane faze požara. Tu spadaju stopa otpuštanja topline, vrijeme do zapaljenja, brzina širenja plamena i indeks kisika. Kada je požar već razvijen, tada su ključna svojstva otpornosti na požar. Otpornost na požar je sposobnost konstrukcije da spriječi širenje požara i zadrži svoja mehanička svojstva dok je izložena požaru. Glavna svojstva otpornosti na požar su toplinska izolacija, otpornost na progorijevanje i zadržavanje strukture [10].

4.1. Karakteristike za definiranje vatrootpornosti kompozita

Brojni faktori se uzimaju u obzir prilikom definiranja vatrootpornosti kompozita:

- Reakcija na vatru i vatrootpornost
- Nezapaljivost
- Zapaljivost
- Stopa otpuštanja topline
- Širenje plamena, površinska zapaljivost, širenje vatre
- Taljenje
- Dim i toksičnost
- Toplinska izolacija

4.1.1. Reakcija na vatru i vatrootpornost

Ponašanje materijala i konstrukcija kada su izloženi vatri razlaže se na dva mjerenja:

1.Reakcija na vatru: mjerenje kako će materijali pridonijeti razvoju i širenju požara izlažući ih standardiziranim testnim postupcima kojima se obično određuje zapaljivost, kalorijski potencijal i druge karakteristike gorenja.

2.Vatrootpornost: mjerenje sposobnosti materijala da izdrže standardni požar, plamenik ili test peći u određenom vremenskom razdoblju. Testovi vatrootpornosti također se mogu koristiti za procjenu nosivosti dijela (čvrstoća, otpornost na puzanje i krutost) tijekom požara, kao i mehaničkih svojstava [10].

4.1.2. Nezapaljivost

Materijal se smatra nezapaljivim ako:

- Ne gori kada je izložen vatri
- Nije sposoban zapaliti se ili gorjeti kada je izložen vatri
- Ne sadrži nikakav organski materijal [11]

4.1.3. Zapaljivost

Zapaljivost je mjera sposobnosti materijala da izgara ili podržava izgaranje svojim fizikalnim svojstvima. Svaki materijal koji je lako zapaljiv može predstavljati značajan rizik od požara, ovisno o tome gdje se primjenjuju. Iako je zapaljivost samo jedna od mjera vatrootpornosti, ona je prvenstveno ona koju treba poboljšati kod materijala koji su izloženi visokim temperaturama ili otvorenom plamenu.

4.1.4. Stopa otpuštanja topline

Stopa otpuštanja topline je količina toplinske energije koju proizvodi požar i obično se mjeri u W/m^2 . Prvi put je mjerena u ranim sedamdesetima u komercijalnom zrakoplovstvu, a 1982.godine razvijen je kalorimetar za mjerenje stope otpuštanja topline. Stopa otpuštanja topline jedna je od najznačajnijih pokretačkih snaga koja određuje požarnu opasnost. Što je veća stopa otpuštanja topline, to je veći rizik stvaranja toksičnih plinova, dima i drugih neželjenih pojava požara.

4.1.5. Širenje plamena, površinska zapaljivost, širenje vatre

Najčešći zahtjev koji se postavlja kod vatrootpornih materijala je da površine imaju niske karakteristike širenja plamena, odnosno površinske zapaljivosti. Tijekom testiranja, uzorci materijala se izlažu kombinaciji topline i izravne vatre, te se mjeri brzina širenja plamena preko uzorka, kao i prijeđena udaljenost nakon određenih vremenskih intervala.

4.1.6. Taljenje

Taljenje materijala/plamene kapljice poznat je kao vrlo značajan uzrok širenja požara, i mnogi standardi sada postavljaju ograničenja na količinu plamenih kapljica proizvedenih tijekom testa. Njihov doprinos požaru toliko je značajan da mnogi propisi zahtijevaju nultu razinu proizvodnje plamenih kapljica.

4.1.7. Dim i toksičnost

Obzirom na rastuću raznolikost primjena kompozita, mnogi proizvodi se koriste u područjima kao što je masovni prijevoz, gdje se rizici za putnike moraju smanjiti na minimum. Većina matrica sastoji se od organskih polimera, čije izgaranje proizvodi toksične dimove. Zbog toga se razvijaju dodaci koji su otporni požaru i sadrže neorganske tvari.

4.1.8. Toplinska izolacija

Toplinska izolacija uključuje smanjenje prijenosa toplinske energije između objekata različitih temperatura koji su u termičkom kontaktu ili u dometu radijalnog utjecaja. Protok topline je neizbježna posljedica kontakta između objekata različitih temperatura. Mjerenje vrijednosti izolacije obično je jednostavno i uključuje pričvršćivanje termoparova na prednje i stražnje površine materijala koji se ispituje. Kompozitni materijali ovdje pružaju značajnu prednost nad metalima jer su bolji izolatori [11].

4.2. Propisi za vatrootpornost po sektorima primjene

Propisi o zaštiti od požara često se razlikuju među državama te su u mnogim slučajevima te razlike znatne. Kao rezultat toga, određene vrste kompozita mogu ispuniti zahtjeve za sigurnost od požara u jednoj zemlji, a u drugoj ne. Te razlike nastaju jer međunarodne organizacije potrebne za koordinaciju standarda zaštite od požara ne postoje za mnoge primjene. Nedostatak jedinstvenih sigurnosnih standarda smatra se jednom od glavnih prepreka za veću uporabu kompozita u mnogim primjenama [10].

4.2.1. Željeznice

Zbog strogih zahtjeva za sigurnost od požara za putničke željezničke vagone, polimerni kompozitni materijali koriste se većinom kao kompoziti za sjedala, obloge i krovne materijale u vagonima kao sredstvo za smanjenje težine. Svaka europska država ima svoje vlastite propise koji se odnose na zapaljivost i dim, i kao rezultat toga trenutno postoji 35 različitih standarda koji se primjenjuju diljem Europe za procjenu sigurnosti od požara nemetalnih materijala za željeznice. Kako bi se prevladala takva situacija, EU trenutno razvija jedinstveni standard protiv požara poznatiji kao EN 45545 "Zaštita od požara na željezničkim vozilima" [11].

4.2.2. *Automobilska industrija*

Protupožarne standarde za automobile lakše je postići nego za većinu drugih sektora, jer je vrijeme evakuacije minimalno. Polimerni kompoziti ojačani vlaknima imaju široku primjenu u interijerima, ali također sve više zamjenjuju tradicionalne plastične ili metalne primjene u komponentama pogonskog sklopa u vrućim područjima kao što su ispušni sustavi, kanali ispod poklopca motora itd. U tom slučaju moraju zadovoljiti posebne standarde uključujući i višu temperaturu.

4.2.3. *Pomorstvo*

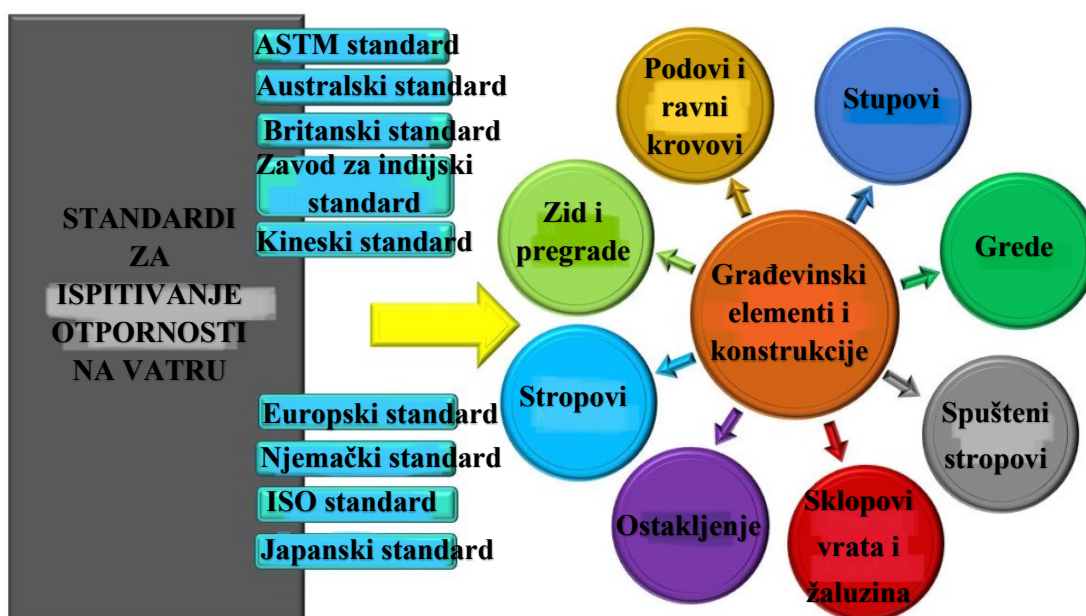
Zahtjevi protiv požara za pomorska plovila jako se razlikuju ovisno o vrsti plovila. Mali čamci i plovila imaju relativno manje zahtjeve za požar jer je rizik manji ako su bliže obali i imaju manje putnika. Dok su zahtjevi za velike brodove vrlo strogi te prema testu gorenja ISO 9705 trebaju ispuniti sljedeće zahtjeve:

- prosječna stopa oslobađanja topline ne prelazi 10 kW/m^2
- prosječna količina dima ne prelazi $1,4 \text{ m}^2/\text{s}$
- brzina širenja plamena niz zid ne prelazi $0,5 \text{ m}$ od poda

Nadalje, materijal mora proći test otpornosti na plamen (ASTM E119). Ovo ispitivanje uključuje izlaganje ploče ispitnog materijala temperaturno-vremenskim uvjetima tijekom određenog vremenskog razdoblja. U ispitivanju otpornosti na plamen, neizložena strana ploče ne smije preći 139° iznad izvorne temperature, a temperatura u bilo kojoj točki ne smije porasti više od 180° iznad izvorne temperature. Ovi uvjeti su strogi i nijedan konvencionalni kompozitni materijal ne može ispuniti sve kriterije. Stoga je kompozite potrebno zaštititi toplinskom barijerom, premazom ili nekim drugim oblikom toplinske zaštite.

4.2.4. Građevina

Polimerni kompoziti nalaze sve širu primjenu u građevinskoj industriji, koriste se u infrastrukturi kao što su fasadne ploče, šetnice i mostovi. Vatrootporni kompoziti se često koriste za ojačavanje struktura, čime se povećava njihova čvrstoća i otpornost na požar. Ne postoji međunarodni standard za sigurnost od požara za infrastrukturu, a većina zemalja ima vlastite zahtjeve za učinkovitost u slučaju požara, kako je i prikazano na slici 4 [12].



Slika 4. Standardi za ispitivanje vatrootpornosti [12]

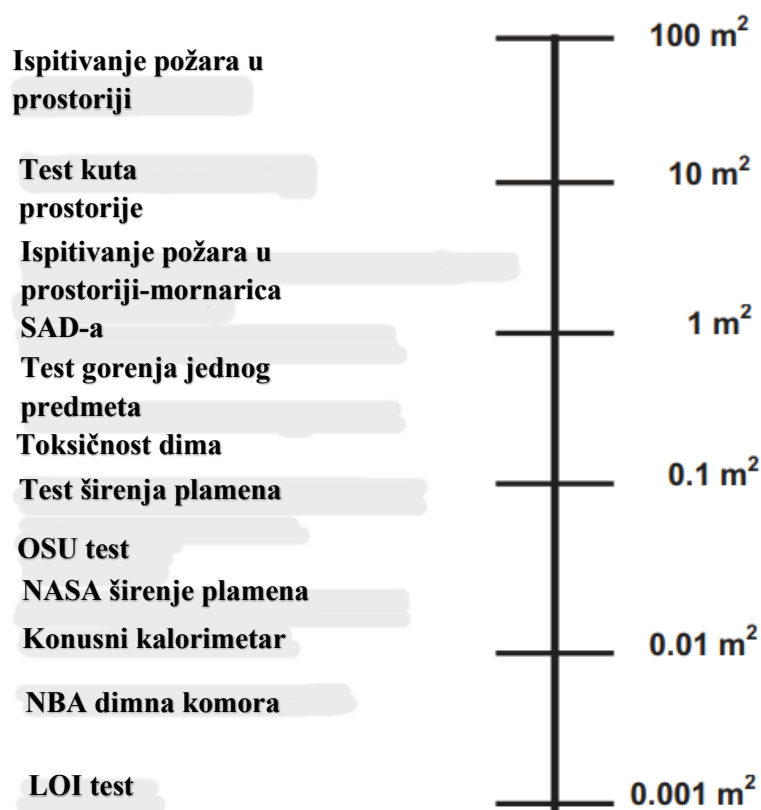
ASTM E119 standard opisuje i mjeri odgovor građevinskih elemenata na toplinu i plamen pod reguliranim uvjetima te utvrđuje trajanje tijekom kojeg razmatrani građevinski materijal može izdržati požar. Slično tome, australski standard AS 1530 detaljno opisuje zahtjeve za grijanje, metode ispitivanja i principe za određivanje otpornosti na požar zidova, stropova, stupova, greda, vrata i drugih elemenata. Isto tako, britanski standard BS 476 koristi se kako bi se utvrdila sposobnost elementa da se odupre standardnom požaru s određenim tlakom, ne gubeći pritom svoju funkciju vatrosigurnosti, nosivosti ili oboje. Ti standardi opisuju opći postupak, temperature i uvjete tlaka kako bi se mjerila otpornost na požar građevinskih elemenata, nosivih elemenata, nenosivih elemenata i cjelokupnih konstrukcija. Osim toga, "Bureau of Indian Standard" IS 3809 istražuje stupanj otpornosti građevinskih elemenata kada su izloženi požaru.

Revidirana verzija ovog standarda temelji se na standardu ISO 834. Slično tome, kineski standardi procjenjuju ponašanje gorenja, pružaju smjernice za sigurnost od požara konstrukcije te primjenjuju zaštitu od požara sljedeći također ISO 834 standard. Njemački Institut za Standardizaciju, DIN 4102 za testiranje otpornosti na požar, specificira metode primjene zaštite od požara na građevinske elemente kako bi izdržali određene vrste grijanja i tlaka. Europa je razvila standard za testiranje otpornosti na požar EN 1363, koji pruža smjernice za građevinske i materijale za izgradnju pod uvjetima požara. EN 1363 obuhvaća informacije o metodologiji testiranja otpornosti na požar građevinskih ili materijala za izgradnju. ISO standard za testiranje otpornosti na požar specificira postupak primjene zaštite od požara na građevinske materijale i materijale za izgradnju. Opisuje metodu koja se treba provesti kako bi se mjerila sposobnost sustava zaštite od požara za dobro definirani raspon deformacija, temperatura, peći, toplinskih karakteristika, itd. [11,12].

4.3. Postupak ispitivanja vatrootpornosti polimernih kompozita

Određivanje svojstava reakcije na požar važno je zbog njihovog snažnog utjecaja na rane faze razvoja požara. Sposobnost konstrukcije da služi kao toplinska barijera protiv širenja vatre u susjedne prostorije važan je aspekt otpornosti na vatru, koja je određena svojstvima kao što su toplinska izolacija, brzina sagorijevanja i otpornost na vatru konstrukcijskog materijala.

Eksperimentalne tehnike koje se koriste za mjerenje protupožarnih svojstava kompozita kreću se u rasponu veličina od uređaja za ispitivanje malih uzoraka koji teže samo nekoliko grama do testova u punom mjerilu za velike strukture. Na slici 5. prikazana ljestvica variranja veličine uzorka ovisno o određenom ispitivanju. Toplinski tok ovih požara varira od požara niskog intenziteta kod kojih je toplinski tok zračenja ispod 20 kW/m^2 do intenzivnih požara kod kojih toplinski tok može premašiti 150 kW/m^2 . Osim toga, materijal treba ispitati u konačnom stanju u kojem će biti primjenjivan, na primjer prekriven gel coatom, bojom ili nekim drugim zaštitnim ili dekorativnim premazom [10].

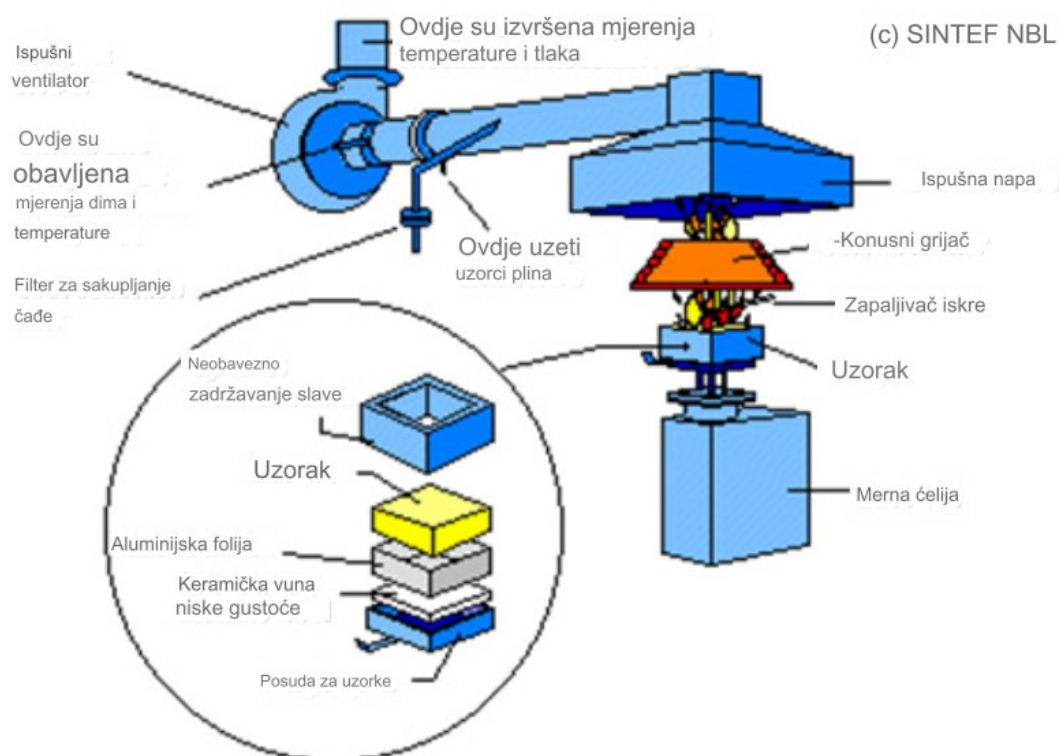


Slika 5. Raspon veličina uzorka različitih metoda ispitivanja požara [10]

4.3.1. Konusni kalorimetar za mjerenje stope otpuštanja topline

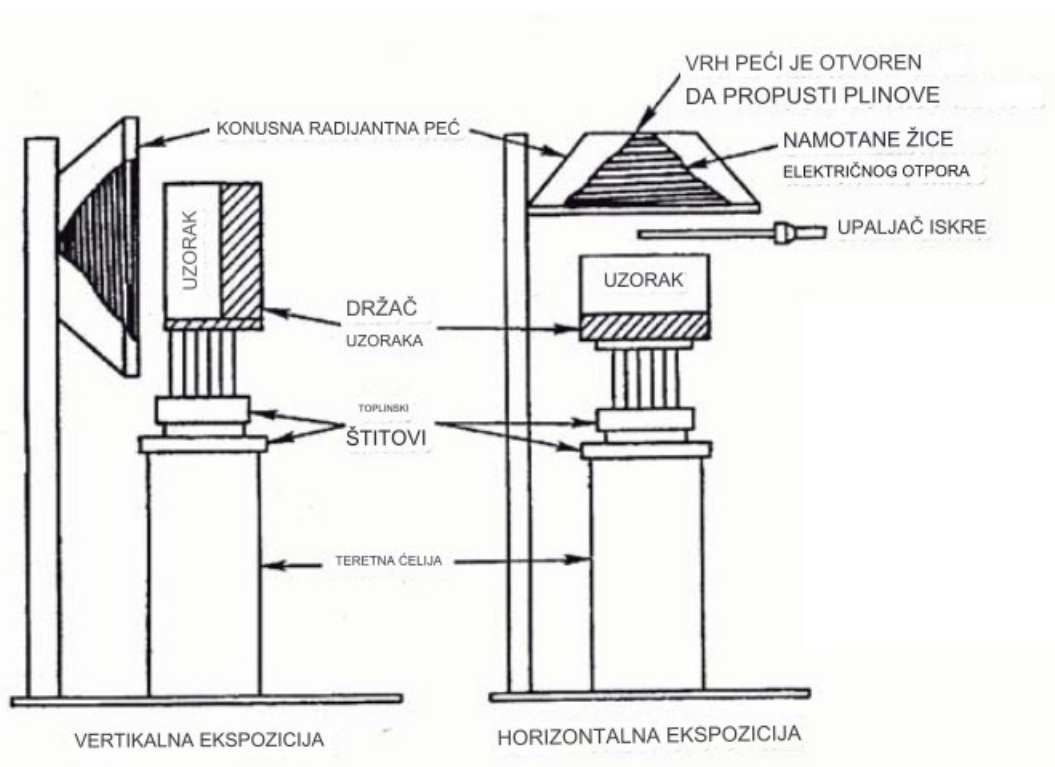
Najsvestraniji instrument za mjerenje svojstava reakcije na požar zapaljivih materijala je konusni kalorimetar. Popularnost konusnog kalorimetra uvelike je posljedica njegove sposobnosti određivanja velikog broja svojstava reakcije na požar u jednom testu pomoću malog uzorka. Glavna sposobnost instrumenta je da se reakcija otpuštanja topline može kontinuirano mjeriti do visokog stupnja točnosti i mogu se odrediti vrijednosti za prosječnu brzinu otpuštanja topline. Konusni kalorimetar se također može koristiti za mjerenje vremena paljenja, vremena kontinuiranog plamena, efektivne topline izgaranja, gustoće dima, stope gubitka mase, itd. Jedino svojstvo reakcije na požar koje se ne može izravno odrediti je brzina širenja plamena. Testovi koji koriste konusni kalorimetar uključuju zagrijavanje površine uzorka preko konusnog grijača. Površina uzorka se zagrijava i počinje ispuštati plinove koji se pale uz pomoć iskre. Emitirani plinovi se skupljaju u poklopcu i odvođe kroz ventilacijski

sustav. Stopa oslobađanja topline (kW/m^2) određuje se mjerenjem koncentracije kisika u dimu i iz tih podataka se izračunava ukupno oslobađanje topline (MJ/m^2). Također se mjeri gubitak mase (g/s) i efektivna neto toplota izgaranja (MJ/kg), kao i proizvodnja dima i razina otpuštenih toksičnih plinova. Konusni kalorimetar koji se koristi za opisano ispitivanje prikazan je na slici 6. [11].



Slika 6. Konusni kalorimetar [11]

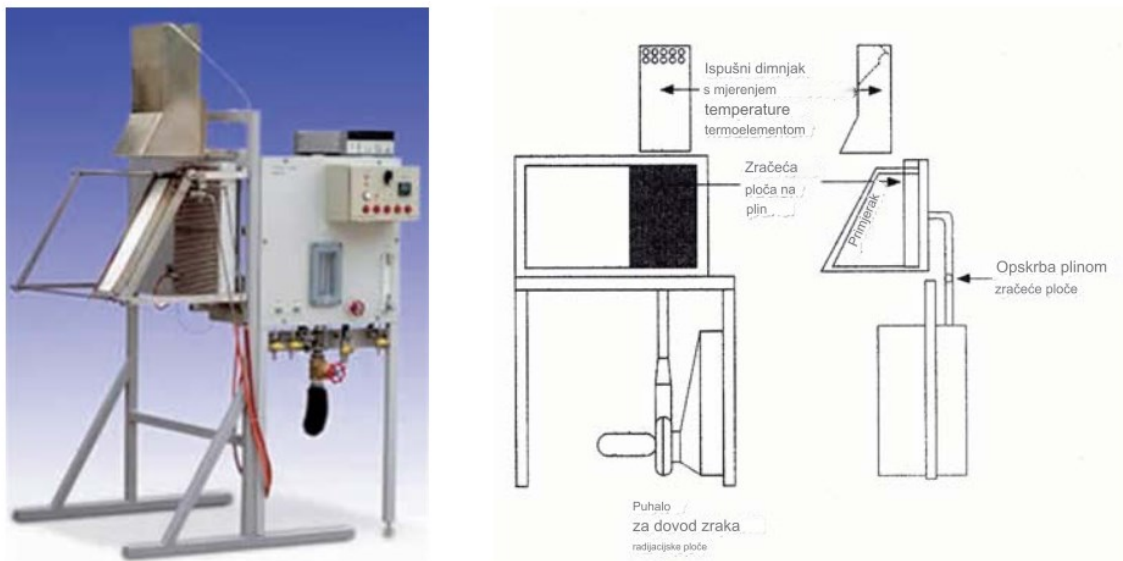
Ispitivanja reakcije na požar mogu se izvoditi u vodoravnom ili okomitom smjeru npr. slika 7. Ispitivanja se obično provode u horizontalnoj orijentaciji jer u tom načinu rada konvekcijska komponenta prijenosa topline gotovo je zanemariva [10].



Slika 7. Izvedbe konusnog kalorimetra [10]

4.3.2. Širenje plamena, površinska zapaljivost i širenje vatre

Važna mjera sigurnosti od požara pri korištenju polimernih kompozita je brzina kojom se plamen može proširiti po površini. Aparatura potrebna za ispitivanje širenja plamena prikazana je na slici 8. Ispitna ploča nagnuta je pod kutom od 45° prema grijaču, plinski grijač je postavljen tako da se paljenje dogodi na gornjem rubu uzorka, a tijekom ispitivanja mjeri se brzina kojom plamen putuje niz ploču.



Slika 8. Ispitivanje širenja plamena [10]

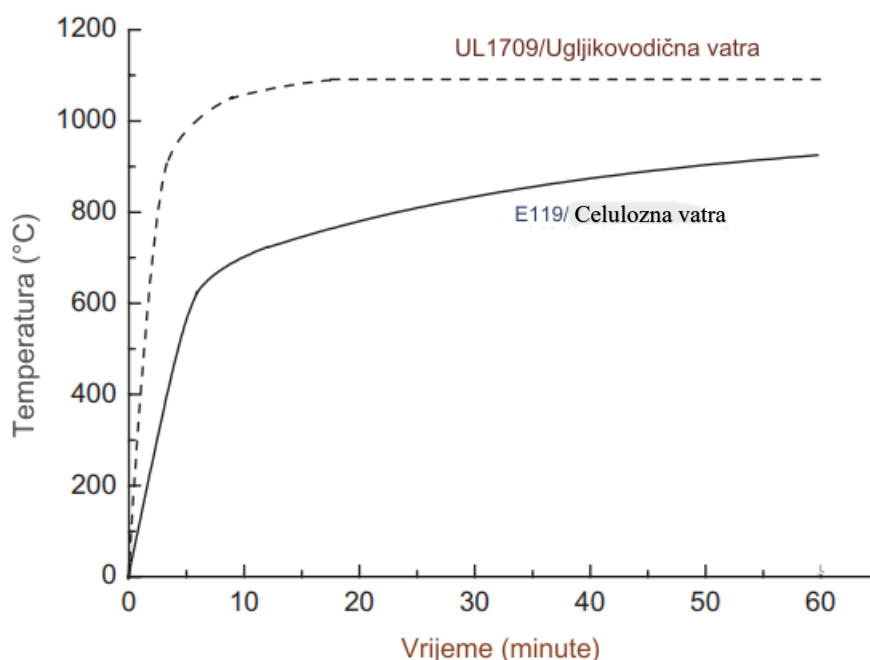
4.3.3. Dim i otrovnost

Dim je vidljiva suspenzija krutih i tekućih čestica u zraku koja se razvija kada materijal prolazi kroz pirolizu i izgaranje. Prema normi BS EN ISP 5659-2:2017, određuje se optička gustoća stvaranja dima s tehnikama analize plina Fourieove transformacije infracrvene spektroskopije (FTIR) za otkrivanje specifičnih otrovnih plinova. Ispitni uzorak postavlja se vodoravno u zatvorenu komoru i izlaže izvoru topline zračenja. Dim se skuplja u komori i optička gustoća se mjeri pomoću izvora svjetlosti i fotoćelije. Uzorak dima se uzima iz komore i analizira FTIR analizom koja može detektirati ugljikov monoksid, klorovodičnu kiselinu, bromovodik, cijanovodik, dušikove okside i sumporov dioksid [11].

4.3.4. Ispitivanje u peći

Sposobnost kompozita da osigura toplinsku izolaciju, nepropusnost za dim i otpornost na gorenje ključna je za usporevanje širenja požara. Za utvrđivanje ovih svojstava koristi se nekoliko različitih testova, od kojih su najznačajniji testovi u peći i testovi progaranja. Ova vrsta testova koristi se za procjenu vatrootpornosti kompozita koji će se koristiti u građevini.

Metoda ispitivanja u peći uključuje zagrijavanje velike kompozitne ploče pričvršćene na otvorenu stranu peći. Ovisno o veličini peći, mogu se testirati kompozitne ploče između 1m^2 i 10m^2 . Ploča se testira u stanju krajnje uporabe s odgovarajućim površinskim premazima i spojevima kako bi se osiguralo realistično ispitivanje ponašanja kompozitne strukture kod požara. Ploča koja se ispituje opremljena je termoparovima i zagrijava se prema krivulji temperatura-vrijeme sa slike 8. Krivulja niže temperature je celulozna vatra, a ona se koristi za stvaranje toplinskog okruženja sličnog onome koje se događa kada su izvor požara materijali poput drveta i tkanine. Krivulja više temperature, ugljikovodična, namijenjena je simulaciji požara s naftom ili uljem kao izvorom goriva.



Slika 9. Krivulja T-t za određivanje vatrootpornosti [10]

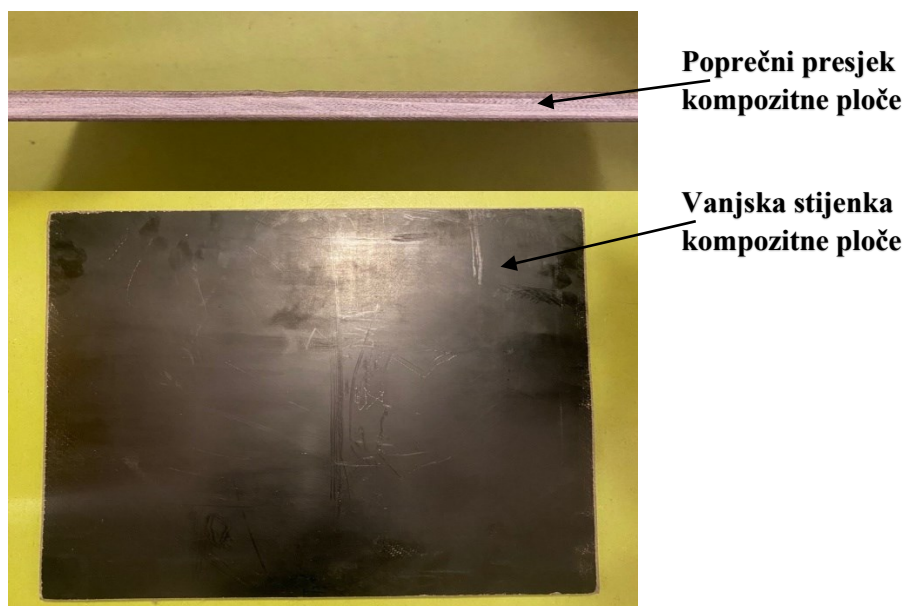
Tijekom ispitivanja u peći, toplinski odgovor kompozita prati se pomoću termoparova. Otpornost na vatru obično se definira vremenom potrebnim da neizložena površina panela poraste do 160°C ili da kritična točka dosegne 180°C iznad temperature okoline [10].

5. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu ovoga rada provedeno je ispitivanje vatrootpornosti polimernog kompozita ojačanog bazaltnim i staklenim vlaknima za primjenu u građevinarstvu. Definiran je optimalni postupak ispitivanja vatrootpornosti poštujući sve zahtjeve koje propisuje norma ISO 834-1:1999 "Test vatrootpornosti za Građevinske elemente". Gotove kompozitne ploče izrezane su na dimenzije potrebne za ispitivanje prema navedenoj normi te su bile izložene djelovanju plamena. Tijekom postupka ispitivanja praćeno je vrijeme početka gorenja pojedinog uzorka nakon izlaganja plamenu. Nakon provedenih ispitivanja izlaganja uzoraka plamenu provedena je detaljna analiza oštećenja i strukture kompozita. Mikrostruktura u poprečnom presjeku analizirana je pomoću svjetlosnog mikroskopa OLYMPUS GX51F-5 s integriranom Olympus DP-25-CCD kamerom (Olympus Corporation, Shinjuku City, Tokio, Japan).

5.1. Priprema uzoraka za ispitivanje

Polimerna kompozitna ploča sa matricom od epoksidne smole ojačana bazaltnim i staklenim vlaknima prikazana je u stanju prije rezanja na slici 10.



Slika 10. Ploča prije rezanja

Ploča je zatim izrezana prema normi ISO 834-1, na devet uzoraka dimenzija 165 mm x165 mm.

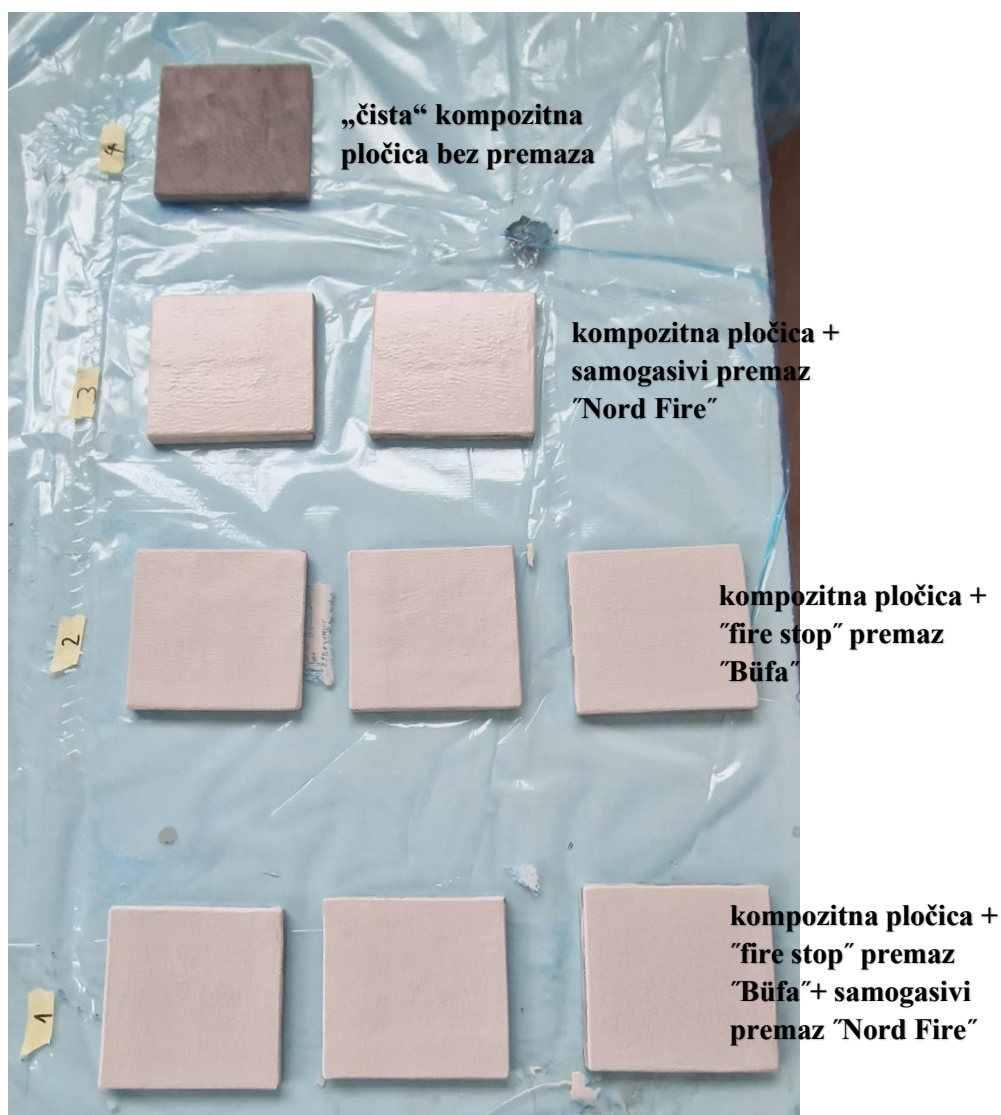
Jedan uzorak je upotrjebljivan kao „čista“ kompozitna pločica koja će služiti kao kontrolni uzorak, dok su na ostale pločice nanosena dva sloja zaštitnih premaza s obje strane ispitnih uzoraka.

Pregled ispitnih uzoraka opisan je u tablici 2.

Tablica 2. Oznake ispitnih uzoraka s navedenim zaštitnim premazima

| | |
|-------------|---|
| UZORAK 1 U1 | Čista kompozitna pločica bez premaza |
| UZORAK 2 U2 | Kompozitna pločica + samogasivi premaz "Nord Fire" |
| UZORAK 3 U3 | Kompozitna pločica + samogasivi premaz "Nord Fire" |
| UZORAK 4 U4 | Kompozitna pločica + "fire stop" premaz "Büfa" |
| UZORAK 5 U5 | Kompozitna pločica + "fire stop" premaz "Büfa" |
| UZORAK 6 U6 | Kompozitna pločica + "fire stop" premaz "Büfa" |
| UZORAK 7 U7 | Kompozitna pločica + "fire stop" premaz "Büfa"+ samogasivi premaz "Nord Fire" |
| UZORAK 8 U8 | Kompozitna pločica + "fire stop" premaz "Büfa"+ samogasivi premaz "Nord Fire" |
| UZORAK 9 U9 | Kompozitna pločica + "fire stop" premaz "Büfa"+ samogasivi premaz "Nord Fire" |

Pločice sa premazima prikazane su u stanju sušenja na slici 11.

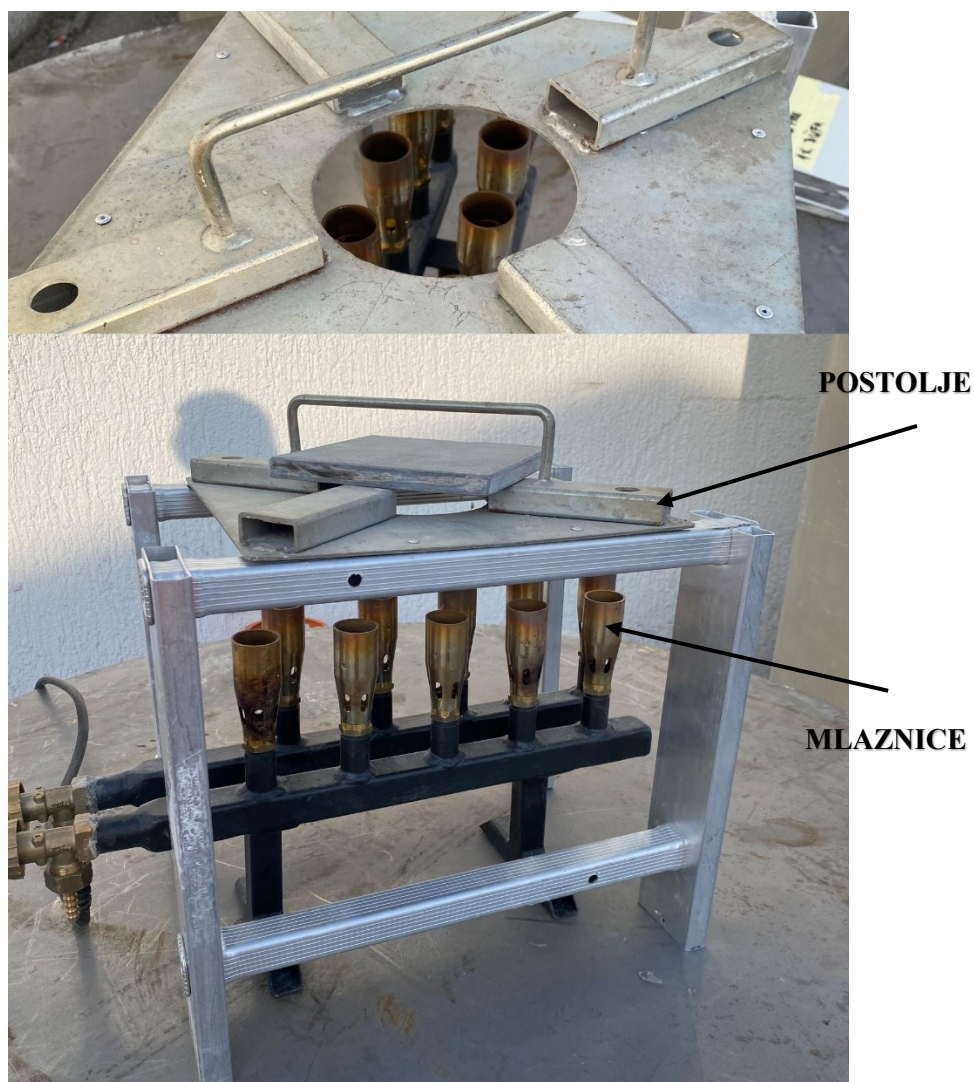


Slika 11. Izrezani i premazani uzorci

5.2. Ispitivanje vatrootpornosti

Ispitivanje otpornosti na požar (vatrootpornosti) provedeno je uz pomoć plinskog plamenika prikazanog na slici 12, a upotrijebljeno je 5 plinskih mlaznica. Ispitni uzorak postavljen je horizontalno iznad plinskih mlaznica na otvor promjera 100 mm. Tijekom ispitivanja svaki ispitni uzorak izložen je istom plamenu u referentnom vremenskom trajanju od 8 min i 30 s, a toplinski tok iznosio je 120 kW/min. Praćene su promjene ponašanja pojedinog ispitnog uzorka,

a kao kritična točka, završetak ispitivanja, korišteno je vrijeme zapaljenja pločice, odnosno vrijeme proboja vatre.



Slika 12. Plamenik korišten za ispitivanje

Najprije je provedeno ispitivanje uzorka 1 (U1), a to je kompozit bez ikakvih premaza. Obzirom da je matrica epoksidna, ona može gorjeti i podržava gorenje jer nema retardanta u sebi. Međutim, kada izgori prvi sloj stižemo do vlakana, koji su visokootporni i služe kao barijera koja onemogućuje proboj plamena kroz kompozitnu pločicu. Nakon jedne minute dostignuta je kritična točka tj. zapaljenje pločice. Na slici 13. prikazan je uzorak U1 nakon što je 5 minuta bio izložen vatri.



Slika 13. Ispitni uzorak U1 nakon 5 minuta izlaganja

Na slici 14. vidljivo je izdvajanje plinova pri gorenju uzorka.



Slika 14. Izdvajanje plinova pri gorenju U1

Uzorak je nakon isteka referentnog vremena od 8 min i 30 s uklonjen sa izvora plamena, ali nastavlja gorjeti jer na sebi ne sadrži nikakvu zaštitu. Uzorak sklonjen sa plamena prikazan je na slici 14.



Slika 15. Uzorak U1 nakon sklanjanja sa plamena

Sljedeći je testiran uzorak U2 na koji je bio nanesen Nordfire premaz. Kod ovog uzorka se upotrebom zaštitnog premaza očekuje da bude otporan na zapaljenje te da nakon prestanka izlaganja plamenu uzorak prestane gorjeti. Međutim ispitivanjem je ustanovljeno kako nakon izlaganja uzorka izvoru plamena i uklanjanja uzorka s postolja, uzorak i dalje nastavlja gorjeti. Uzorak se nakon 1 min zapalio tj. dosegao je kritičnu točku što se može vidjeti na slici 16.



Slika 16. Zapaljenje uzorka U2

Na slici 17. prikazan je uzorak U2 nakon 7 min izlaganja, te je vidljivo manje zapaljenje površine, koje je bilo koncentrirano po rubovima, nego kod uzorka U1 bez premaza.



Slika 17. Uzorak U2 nakon 7 min izlaganja

Jedno od najbitnijih svojstava upotrijebljenog premaza je da se ne topi niti kaplje kada je izravno izložen ekstremnoj toplini. Nakon 8 min i 30 s, uklanjanjem s izvora plamena uzorak je i dalje gorio sa bočnih strana koje nisu bile zaštićene, ali također i sa donje strane koja je bila izložena plamenu. Na slici 18. prikazano je gorenje uzorka U2 i nakon što je uklonjen sa izvora plamena.



Slika 18. Uzorak U2 nakon uklanjanja sa plamena

Ispitivanjem uzorka U4, koji je na sebi imao nanesen fire stop premaz "Büfa", koji je predstavnik ekspandirajućeg premaza, koji reagira na primijenjenu temperaturu iz plamenika tako što bubri, tj. stvara mjehuriće koji su puni aluminij oksida, je primijećeno bubrenje premaza koje je prikazano na slici 19.



Slika 19. Bubrenje premaza na uzorku U4

Aluminijev oksid može biti izložen visokim temperaturama i izgara jako sporo na čemu se dobiva dosta vremena da požar prodre do površine ispitivanog materijala. Pred završetak reakcije izgaranja aluminij oksida, taljevina se pretvara u gel, a zatim skrutne u obliku višestanične pjene pa se dobije specifična površina uzorka na strani koja je bila izložena plamenu, što je vidljivo na slici 20.



Slika 20. Specifična površina uzorka U4

Nakon 3 min i 30 s dolazi do zapaljenja, ali samo s bočne strane uzorka koja nije bila zaštićena kao što se vidi na slici 21.



Slika 21. Zapaljenje uzorka U4

Upotrijebljeni "fire stop" premaz kemijski je tretiran na način da se samogasi, zbog toga skidanjem sa izvora plamena, ispitni uzorak više ne gori. Na slici 22. prikazan je uzorak U4 nakon skidanja sa izvora plamena.



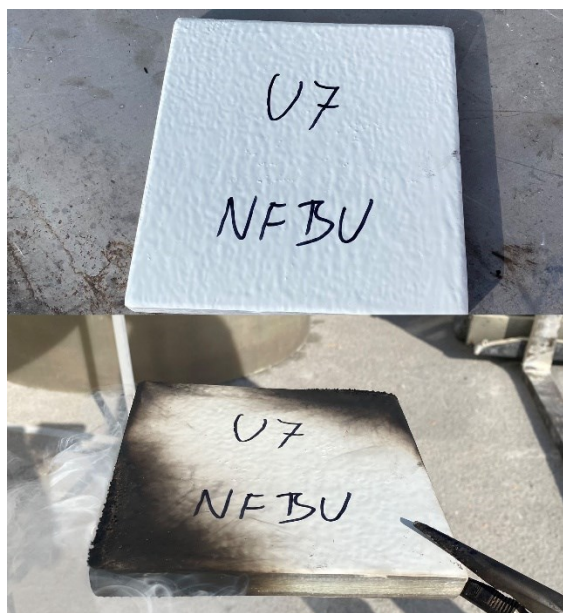
Slika 22. Uzorak U4 nakon skidanja sa izvora plamena

Uzorak U7 je imao nanese "Nord Fire" i "Büfa" premaze, s tim da je s vanjske strane "Büfa" premaz. Slika 23. prikazuje prvo zapaljenje uzorka nakon 6 min izloženosti vatri. Vidljivo je da se zapaljenje pojavilo samo na bočnim stranicama uzorka koje na sebi nisu imale premaz.



Slika 23. Zapaljenje uzorka U7

Kombinacija ova dva premaza znatno je produljila vrijeme do zapaljenja te su promjene na površini koja nije bila izložena minimalne. Na slici 24. prikazan je uzorak prije i nakon izlaganja.



Slika 24. Uzorka U7 nakon uklanjanja sa izvora plamena

Na slici 25. jasno je vidljivo zapaljenje koje je nastupilo samo na bočnim stranicama uzorka koje na sebi nisu imale zaštitni premaz.



Slika 25. Zapaljenje bočnih stranica uzorka U7

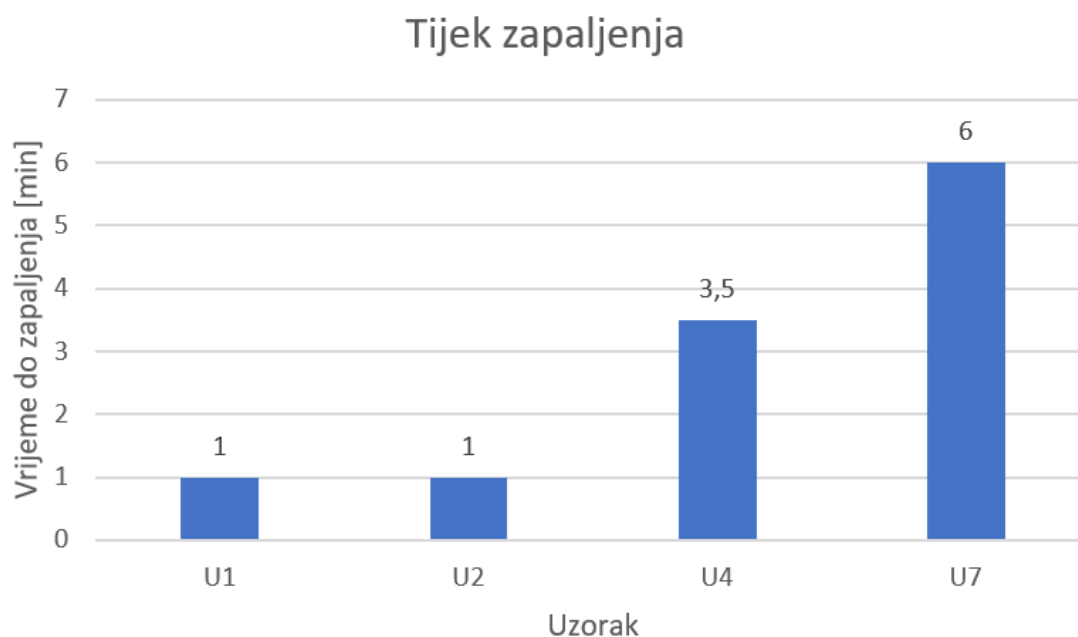
5.3. Usporedba vatrootpornosti pojedinih uzoraka

U tablici 3. prikazano je vrijeme zapaljenje pojedinog uzorka na osnovu kojega je konstruiran graf na slici 26.

Tablica 3. Vrijeme zapaljenja uzoraka

| Uzorak | Vrijeme do zapaljenja |
|---|-----------------------|
| U1 kompozitna pločica bez premaza | 1 min |
| U2 kompozitna pločica + samogasivi premaz "Nord Fire" | 1 min |

| | |
|--|--------------|
| U4 kompozitna pločica + "fire stop" premaz "Büfa" | 3 min i 30 s |
| U7 kompozitna pločica + "fire stop" premaz "Büfa" + samogasivi premaz "Nord Fire" | 6 min |



Slika 26. Tijek zapaljenja uzoraka

Prema grafu na slici 26. vidljiva je veća otpornost na gorenje kod uzoraka koji su bili tretirani zaštitnim premazima. Kombinacija fire stop i samogasivog premaza produljila je vrijeme do zapaljenja kod uzorka U7 na čak 6 min, u odnosu na uzorke U4 i U2 koji su bili tretirani samo jednom vrstom premaza.

5.4. Analiza mikrostrukture kompozitnih uzoraka nakon izlaganja vatri

Nakon izlaganja uzoraka vatri, provedena je analiza mikrostrukture. Ispitni uzorci prerezani su na manje dijelove pomoću uređaja MECATOME T 260, koji je prikazan na slici 27.



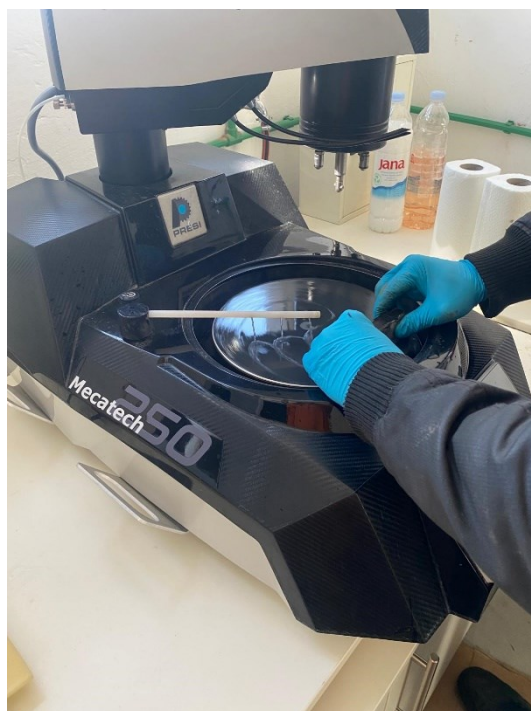
Slika 27. MECATOME T 260

Uzorci nakon rezanja, prije pripreme površine, prikazani su na slici 28.



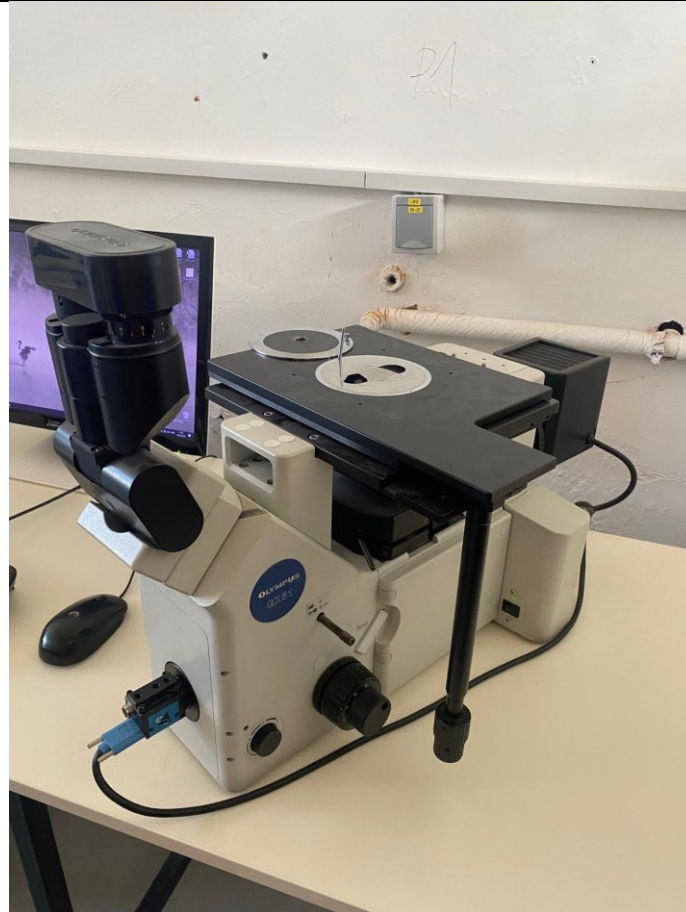
Slika 28. Izrezani uzorci

Nakon rezanja proveden je postupak brušenja kako bi se dobila glatka, ravna površina uzorka bez nečistoća. Postupak brušenja proveden je na uređaju za brušenje i poliranje Mecatech 250 SPI, prikazanom na slici 29. Korišteni su brusni papiri od grubljeg prema finijem zrnju. Brzina okretanja brusne ploče je 300 okretaja u minuti. Tijekom brušenja kontinuirano teče voda koja hladi i podmazuje površinu, a ujedno služi kao medij za uklanjanje nečistoća nastalih brušenjem.



Slika 29. Brušenje površine uzoraka

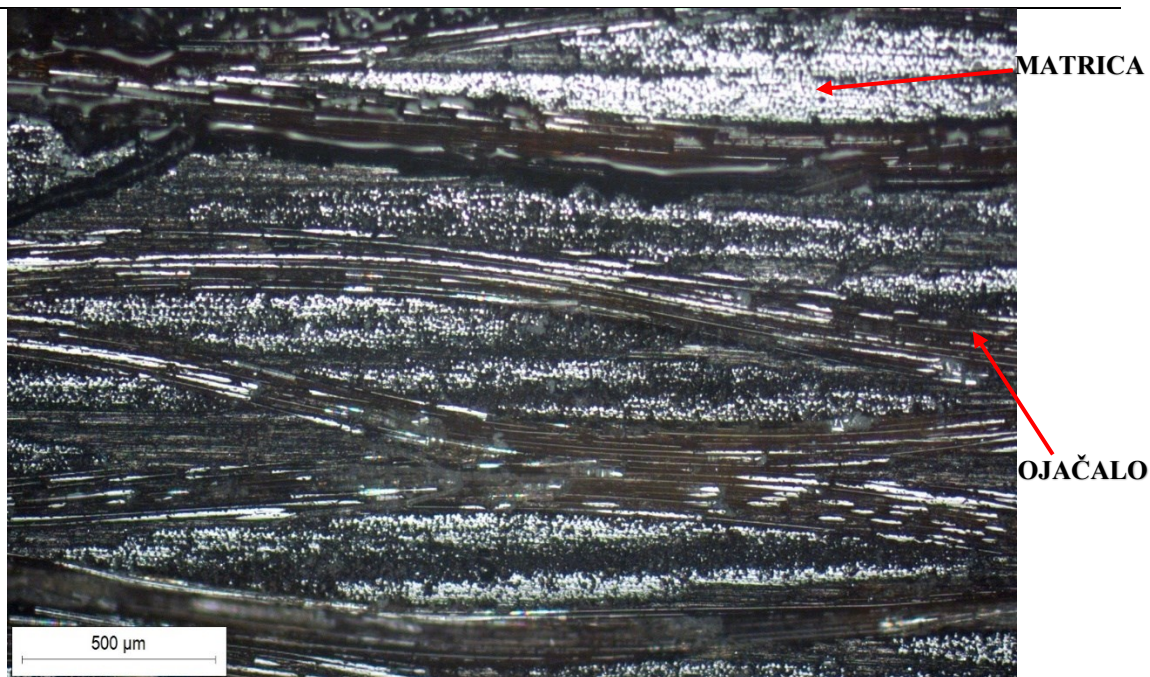
Nakon što su uzorci pripremljeni, provedena je analiza mikrostrukture na svjetlosnom mikroskopu OLYMPUS GX51 sa slike 30.



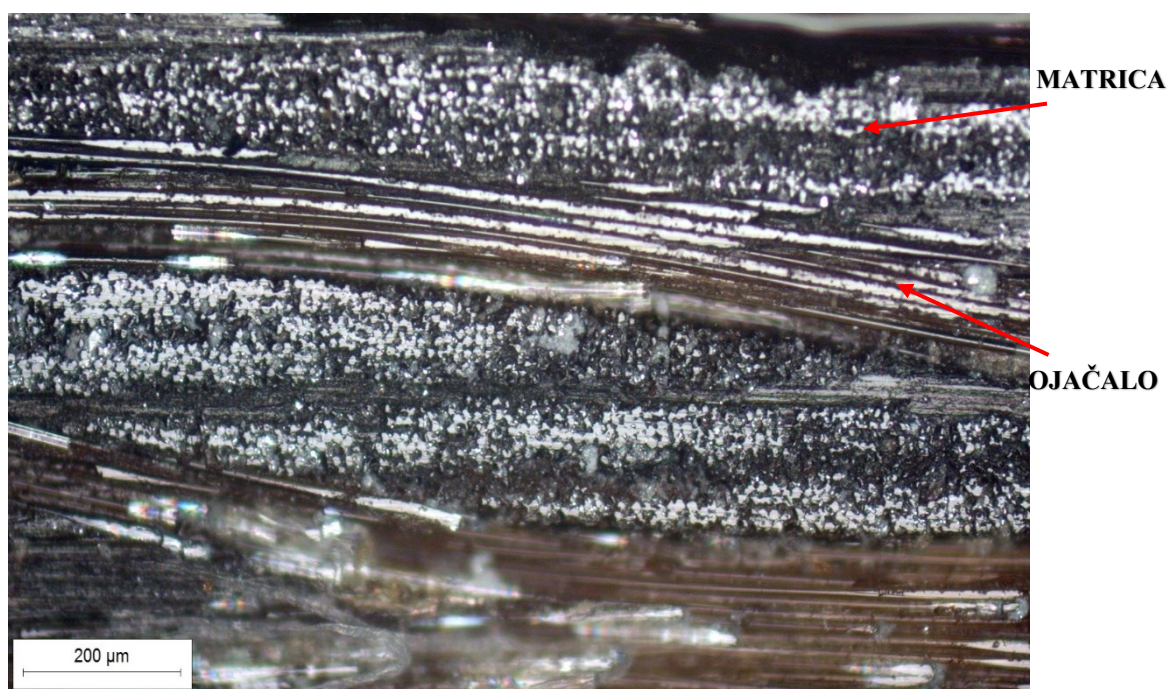
Slika 30. Svjetlosni mikroskop OLYMPUS GX51

Površina uzoraka analizirana je pri različitim povećanjima od 50x, 100x i 200x.

Kod uzorka U1, koji je bio nezaštićen, vidljivo je najveće oštećenje površine nakon gorenja. Uslijed velikog progorijevanja, nisu jasno vidljive granice matrice i ojačala, a cijela struktura nakon gorenja podložna je raslojavanju zbog čega su se uzorci teže rezali i pripremali za analizu. Na slici 31. prikazana je mikrostruktura pri povećanju 50x, a na slici 32. pri povećanju 100x.

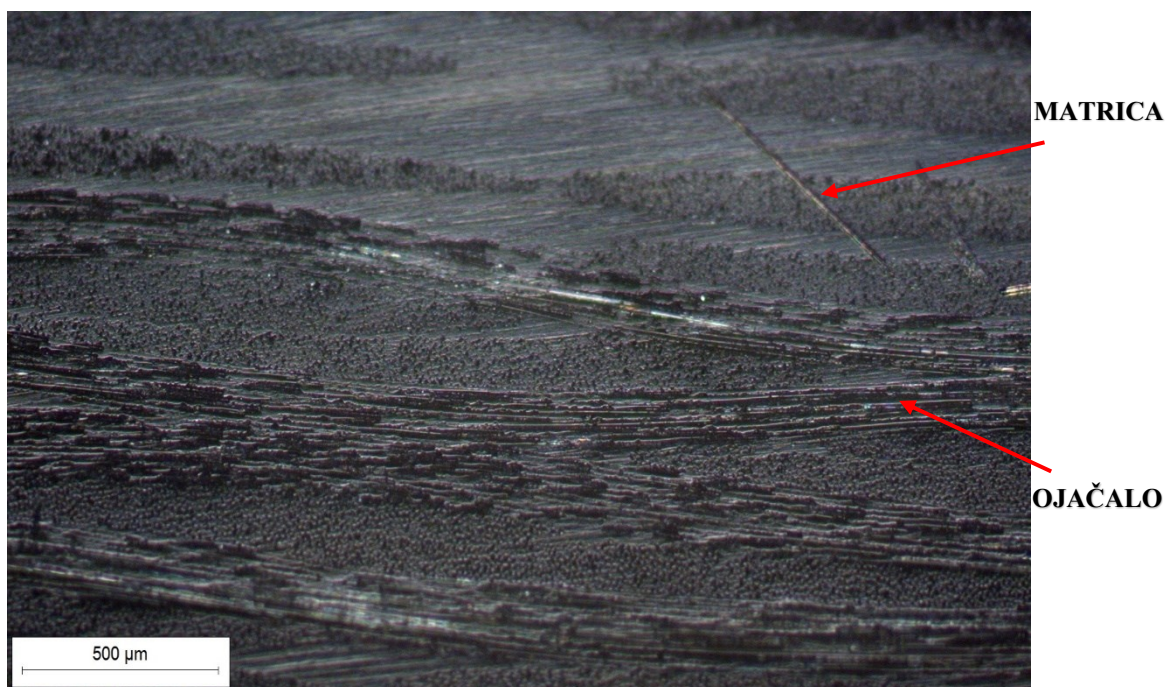


Slika 31. Uzorak U1 pri povećanju 50x



Slika 32. Uzorak U2 pri povećanju 100x

Površina uzorka U2 posjeduje manje oštećenja i jasnije su vidljivi slojevi matrice i ojačala. Veća je homogenost mikrostrukture u odnosu na uzorak U1. Slika 33. i slika 34. prikazuju mikrostrukturu uzorka U2 pri različitim povećanjima.



Slika 33. Uzorak U2 pri povećanju 50x



Slika 34. Uzorak U2 pri povećanju 100x

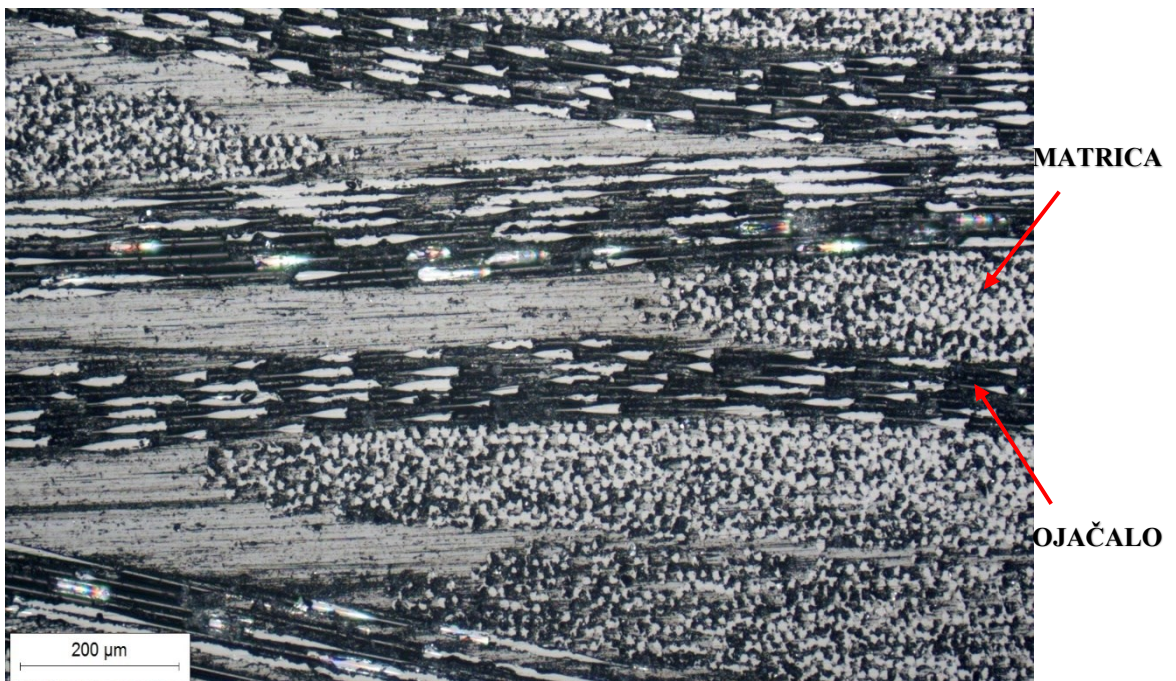
Uzorak U4, koji je na sebi imao nanesen "Büfa" zaštitni premaz, zadržao je homogenost mikrostrukture i manja su površinska oštećenja jer je zaštitni premaz svojim ekspanzijom

omogućio stvaranje barijere između osnovnog materijala kompozita i plamena kako bi plamen manje prodirao do materijala uzorka. Na slici 35. pri povećanju 50x vidljiva su odvojena područja vlakna i matrice.



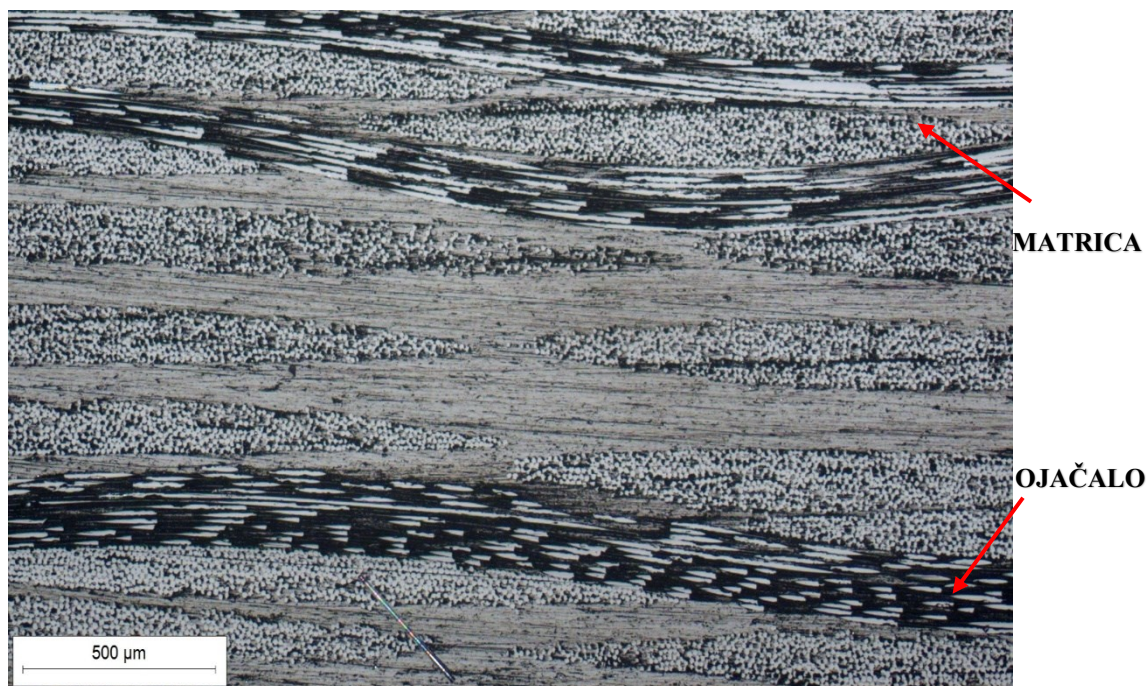
Slika 35. Uzorak U4 pri povećanju 50x

Na slici 36. prikazana je mikrostruktura uzorka U4 pri povećanju 100x.



Slika 36. Uzorak U4 pri povećanju 100x

Uzorak U7 bio je zaštićen kombinacijom dva premaza što je omogućilo najmanji prodor plamena u površinu uzorka. Mikrostruktura je homogena i zbog male oštećenosti površine, lako su uočljiva vlakna u odnosu na matricu. Slika 37. prikazuje uzorak U7 pri povećanju 50x, a slika 38. pri povećanju 100x.



Slika 37. Uzorak U7 pri povećanju 50x



Slika 38. Uzorak U7 pri povećanju 100x

6. ZAKLJUČAK

Ispitivanjem kompozita od polimerne matrice ojačanom staklenim i bazaltnim vlaknima koji su bili izloženi vatri u svrhu određivanja vatrootpornosti prema normi ISO 834-1:1999 "Test vatrootpornosti za Građevinske elemente", utvrđeno je kako uzorci U2 i U4 premazani jednom vrstom zaštitnog premaza, ili fire stop ili samogasivim premazom, produljuju vrijeme do zapaljenja na 1 min i 3 min u odnosu na nezaštićeni kompozit, dok najveću otpornost vatri i produljenje vremena do zapaljenja na 6 min u odnosu na nezaštićeni kompozit pokazuje uzorak U7 koji je bio zaštićen kombinacijom fire stop i samogasivog premaza .

Analizom mikrostrukture kod nezaštićenog uzorka U1 zapaljenje cijele površine uzrokovalo je veliku nehomogenost strukture i raslojavanje. Uzorci U2 i U4 koji su bili premazani jednom vrstom premaza, ili fire stop ili samogasivim premazom, zadržali su homogenost strukture i lakše su uočljive granice matrice i ojačala. Uzorak U7, koji bio premazan sa obje vrste premaza, fire stop i samogasivim premazom, zadržao je najveću homogenost mikrostrukture i najmanja su oštećenja te se jasno vide vlakna prisutna u matrici u odnosu na ostale uzorke.

Uzorak U1 bez ikakvog premaza i uzorak U2 sa samogasivim "Nord Fire" premazom pokazali su zapaljenje nakon 1 min izloženosti plamenu, uzorak U4 sa "fire stop" "Büfa" premazom izdržao je 3 min i 30 s prije zapaljenja, dok je najveću otpornost i učinkovitost u očuvanju površine pokazala kombinacija samogasivog i "fire stop" premaza na uzorku U7.

Temeljem analize mikrostrukture i testa vatrootpornosti može se zaključiti kako kombinacija dvaju premaza, od kojih je jedan samogasivi, a drugi "fire stop" premaz, dovodi do najvećeg odgađanja zapaljenja površine uzorka i time omogućuje očuvanje homogenosti strukture.

LITERATURA

- [1] Suhair L, Hussein G. Engineering Materials. n.d.
- [2] Materijali K. Zdravko Schauerl Školska god. 2009.
- [3] Filetin T., Kovačiček F., Indof J. Svojstva i primjena materijala. 2.izdanje. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2002.
- [4] Rethwisch G.David, Callister D.William. Materials Science and Engineering. Hachette Livre - Département Pratique; 2018.
- [5] Chawla KK. Composite Materials. New York, NY: Springer New York; 2012.
<https://doi.org/10.1007/978-0-387-74365-3>.
- [6] Kaw AK. Mechanics of composite materials. Taylor & Francis; 2006.
- [7] Raj S, Kumar VR, Kumar BHB, Iyer NR. Basalt: structural insight as a construction material. *Sādhanā* 2017;42:75–84. <https://doi.org/10.1007/s12046-016-0573-9>.
- [8] Czigány T. Basalt Fiber Reinforced Hybrid Polymer Composites. *Materials Science Forum* 2005;473–474:59–66. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.473-474.59>.
- [9] Mahltig B. Basalt Fibers. *Inorganic and Composite Fibers*, Elsevier; 2018, p. 195–217.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102228-3.00009-8>.
- [10] Gibson A.G., Mouritz A.P. Fire Properties of Polymer Composite Materials. n.d.
- [11] Royle Tom, Keen Nigel, Job Stella. FIRE PERFORMANCE OF FIBRE-REINFORCED POLYMER COMPOSITES A Good Practice Guide. n.d.
- [12] Chaturvedi S, Vedrtam A, Youssef MA, Palou MT, Barluenga G, Kalauni K. Fire-Resistance Testing Procedures for Construction Elements—A Review. *Fire* 2023;6.
<https://doi.org/10.3390/fire6010005>.