

# PONAŠANJE GRAĐEVINSKIH I KONSTRUKCIJSKIH MATERIJALA U UVJETIMA POŽARA

---

**Dvoržak, Oto**

**Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Karlovac  
University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:998615>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-31**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied  
Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Veleučilište u Karlovcu  
Odjel sigurnosti i zaštite  
Specijalistički studij sigurnosti i zaštite

Oto Dvoržak

**PONAŠANJE GRAĐEVINSKIH I  
KONSTRUKCIJSKIH MATERIJALA U  
UVJETIMA POŽARA**

DIPLOMSKI RAD

Karlovac, 2021.

Karlovac University of Applied Sciences

Safety and Protection Department

Professional graduate study of Safety and Protection

Oto Dvoržak

**BEHAVIOUR OF BUILDING AND  
CONSTRUCTION MATERIALS IN FIRE  
CONDITIONS**

FINAL PAPER

Karlovac, 2021.

Veleučilište u Karlovcu  
Odjel sigurnosti i zaštite  
Stručni studij sigurnosti i zaštite

Oto Dvoržak

**PONAŠANJE GRAĐEVINSKIH I  
KONSTRUKCIJSKIH MATERIJALA U  
UVJETIMA POŽARA**

DIPLOMSKI RAD

Mentor:  
dr.sc. Zvonimir Matusinović

Karlovac, 2021.

# ZAVRŠNI ZADATAK



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES  
Trg J.J.Strossmayera 9  
HR-47000, Karlovac, Croatia  
Tel. +385 - (0)47 - 843 - 510  
Fax. +385 - (0)47 - 843 - 579



## VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Specijalistički studij: Specijalistički studij sigurnosti i zaštite

Usmjerenje: Zaštita od požara

Karlovac, 2021.

## ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: Oto Dvoržak

Matični broj: 0415616044

Naslov: Ponašanje građevinskih i konstrukcijskih materijala u uvjetima požara

Opis zadatka:

- opisati fizikalno-kemijski proces gorenja te uvjete gorenja
- analizirati razvoj i stadije požara
- prikazati načine izmjene topline
- predočiti vatrootpornost i toplinska obilježja građevinskih i konstrukcijskih materijala
- analizirati ponašanje najčešćih građevinskih i konstrukcijskih materijala
- usporediti specifičnost ponašanja materijala po obilježjima
- izdvojiti neke od načina poboljšanja svojstva vatrootpornosti materijala

Zadatak zadan:

03/2021

Rok predaje rada:

6/2021

Predviđeni datum obrane:

7/2021

Mentor:

dr.sc. Zvonimir Matusinović, pred.

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

/// /// /// ///

## **PREDGOVOR**

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći se navedenom literaturom i znanjem koje sam stekao tijekom studiranja.

Posebno se zahvaljujem svojim roditeljima i obitelji na moralnoj podršci, financiranju i razumijevanju tijekom studija.

Isto tako zahvalio bih se svim profesorima i predavačima na ukazanom povjerenju i prenošenju svojeg opširnog znanja te svim zaposlenicima Veleučilišta u Karlovcu koji su mi na bilo koji način pomogli.

Zahvaljujem mentoru dr.sc. Zvonimiru Matusinoviću na stručnim savjetima, strpljenju i usmjeravanju u pravilnu izradu ovog rada.

Konačno, zahvaljujem se i kolegama sa Veleučilišta koji su mi pružali potporu i učinili život u Karlovcu ljepšim.

Radujem se završetku Specijalističkog diplomskog stručnog studija Sigurnosti i zaštite te daljnjem stručnom i životnom usavršavanju.

## SAŽETAK

Ovaj rad razrađuje ponašanje građevinskih i konstrukcijskih materijala u uvjetima požara, prikazuje razvoj i stadije požara te opisuje čimbenike koji utječu na brzinu širenja požara unutar građevina kroz analizu toplinskih svojstava materijala. Obradeno je i svojstvo vatrootpornosti materijala te metode poboljšanja svojstva vatrootpornosti. Navedena je i klasifikacija građevinskih materijala i konstrukcija u požaru, a opisane su i specifičnosti ponašanja najčešće korištenih materijala u uvjetima požara. Komparativnom analizom ponašanja materijala u uvjetima požara izdvojene su značajke ponašanja koje su kod nekih materijala slične. Opisano je i područje požarnog inženjerstva. Na samom kraju rada navedena je važnost pasivne, ali i aktivne protupožarne zaštite.

**Ključne riječi:** građevinski i konstrukcijski materijali, požar, gorenje, vatrootpornost, toplina, klasifikacija

## **SUMMARY**

This paper elaborates the behaviour of building and construction materials in fire conditions. It shows development and stages of fire and describes factors that affects the rate of spread of fire inside buildings through the analysis of thermal properties of materials. The fire resistance property of material and methods of improving fire resistance property are also discussed. Building and construction materials classification is stated too, together with described specifics of behaviour of the most commonly used materials in fire conditions. The comparative analysis was performed on the behaviour of materials in fire conditions, highlighting significant behaviours that are similar at some materials. Fire engineering scientific field is also described. At the very end, the importance of passive and active fire protection is pointed out.

**Key words:** building and construction materials, fire, burning, fire resistance, heat, classification



# SADRŽAJ

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA	I
PREDGOVOR	II
SAŽETAK	III
SUMMARY	IV
SADRŽAJ	V
1. UVOD	1
1.1. Predmet i cilj rada	1
1.2. Izvori podataka i metode prikupljanja	1
2. UVJETI GORENJA	2
3. RAZVOJ I FAZE POŽARA	5
3.1. Stadij inicijacije požara	5
3.2. Stadij razvitka požara	5
3.2.1. Čimbenici koji utječu na brzinu širenja požara unutar građevina/zatvorenih konstrukcija	6
3.2.1.1. Međuprostorne interakcije	6
3.2.1.2. Požarno opterećenje	8
3.2.1.3. Načini izmjene topline požara	9
3.3. Stadij pune razvijenosti požara	11
3.3.1. Vatrootpornost	12
3.3.1.1. Toplinsko izolacijsko djelovanje (I)	14
3.3.1.2. Integritet (E)	14
3.3.1.3. Kapacitet konstrukcijske nosivosti (R)	14
3.3.2. Toplinska obilježja građevinskih konstrukcijskih materijala	15
3.3.2.1. Toplinska vodljivost materijala ( $\lambda$ )	15
3.3.2.2. Toplinski kapacitet materijala (C18	
3.3.2.3. Toplinska difuzivnost materijala ( $\alpha$ )	20
3.3.2.4. Toplinska inercija materijala ( $e_{21}$ )	
3.3.2.5. Toplinsko rastezanje materijala ( $\Delta l_{22}$ )	
3.4. Stadij spontanog gašenja požara	24
4. GRAĐEVINE I KONSTRUKCIJE	25
4.1. Konstrukcijski elementi	25
4.1.1. Poboljšanje vatrootpornosti konstrukcijskih elemenata	25
4.2. Građevinski materijali	30
4.3. Klasifikacija građevinskih materijala i konstrukcija u požaru	30
4.3.1. Razredba građevinskih materijala prema ponašanju u uvjetima požara	31
5. SPECIFIČNOST PONAŠANJA MATERIJALA U UVJETIMA POŽARA	36
5.1. Kamen	36
5.2. Drvo	39
5.3. Opeka	42
5.4. Beton	43

5.5. Aluminij	45
5.6. Čelik	46
5.7. Polimerni materijali	48
5.8. Staklo	50
5.9. Gips ploče	52
6. EKSPERIMENTALNI DIO	54
6.1. Komparativna analiza ponašanja materijala u uvjetima požara	54
7. POŽARNO INŽENJERSTVO	61
8. ZAKLJUČAK	62
9. LITERATURA	64
10. PRILOZI	68
10.1. Popis simbola (korištenih kratica)	68
10.2. Popis slika	69
10.3. Popis tablica	70

# **1. UVOD**

Od samih početaka gradnje, čovjek je birao materijale koje je mogao pronaći u prirodnom okolišu. Razvojem zanata i različitih načina dobivanja građevinskih i konstrukcijskih materijala kroz povijest možemo vidjeti kako su se sam način gradnje i materijali u znatnoj mjeri promijenili do danas. Prvotno se koristeći kamenom i vapnencom kao osnovnim materijalom te drvom i glinom pomiješanih s ostalim biljnim materijalima ljudi su gradili svoje kuće. Formiranjem ciglana, u graditeljstvu se počela koristiti puna opeka što bi se moglo smatrati kao ulazak u novu eru graditeljstva. Takvim razvojem počelo se više razmišljati o što boljem očuvanju svoje imovine te protupožarnim mjerama, a uz to i o ponašanju građevinskih i konstrukcijskih materijala u uvjetima požara.

## **1.1. Predmet i cilj rada**

Ponašanje građevinskih i konstrukcijskih materijala u uvjetima požara je iznimno opsežno područje koje obuhvaća različite znanosti i struke poput građevine, kemije i fizike. Upravo zbog toga je to područje nemoguće svesti u jednu knjigu ili diplomski rad. Predmet ovoga rada je koliko je to moguće sažetije objasniti kako se građevinski i konstrukcijski elementi ponašaju u uvjetima požara kroz različite analize i usporedbe. Cilj rada je kategorizirati građevinske i konstrukcijske materijale, opisati njihovo ponašanje u uvjetima požara i njihove specifične karakteristike te komparativnom analizom predočiti njihova svojstva.

## **1.2. Izvori podataka i metode prikupljanja**

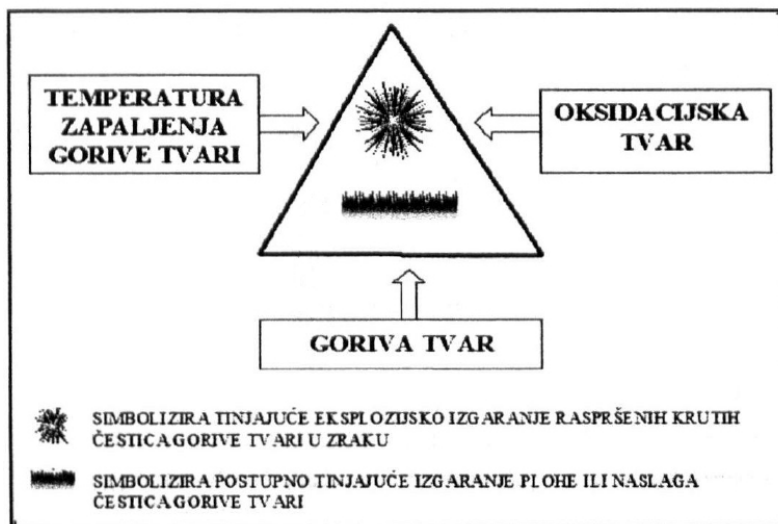
Izvori podataka za ostvarenje ovog rada su iz domaćih i stranih internetskih stranica koje posjeduju veliku količinu podataka i slika te tabličnih prikaza karakteristika vezanih za ponašanje materijala u uvjetima požara. Uz to, korištena je domaća i strana stručna literatura protupožarne tehnološke preventive te niz pravilnika, normi i standarda koji se odnose na vatrootpornost građevinskih i konstrukcijskih materijala.

## 2. UVJETI GORENJA

Gorenje definiramo kao složeni fizikalno-kemijski proces u kojem dolazi do reakcije kisika s gorivom tvari uz postignutu temperaturu paljenja, pri čemu dolazi do oslobađanja velike količine topline te produkata potpunog i nepotpunog sagorijevanja uz pojavu plamena, žara i vidljive svjetlosti. Osnovni uvjeti za nastanak gorenja i nesmetano izgaranje, tojest za izbijanje i nastanak požara su:[1]

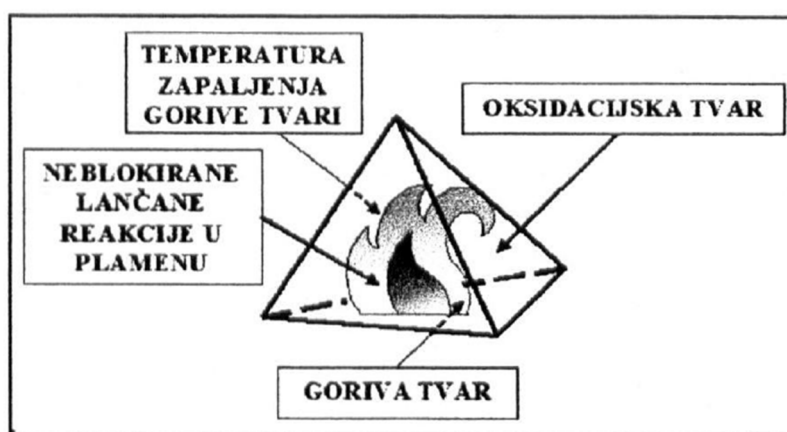
- prisutnost dovoljne količine gorive tvari
- prisutnost dovoljne količine kisika
- dovoljno jak izvor energije i temperature paljenja te
- odvijanje lančanih reakcija u plamenu.

Goriva tvar može izgarati plamteći, tinjajući ili kombinirano. Za zapaljenje i nesmetano dalje izgaranje gorivih tvari koje se zapaljuju i izgaraju isključivo žarenjem ili tinjanjem dovoljno je da su istodobno ispunjena sva tri nužna uvjeta prikazana shematskim prikazom na slici 1.[2]



Slika 1. - Shematski prikaz nužnih uvjeta za zapaljenje i održavanje nesmetanog/neprekinutog izgaranja čvrstih gorivih tvari koje izgaraju isključivo žarom (tinjanjem)[2]

Napretkom i otkrićima u područjima fizike, kemije, termodinamike i ostalim znanstvenim područjima, prvom polovicom 20. stoljeća pouzdano uvrstavamo i četvrti, istodobno nužan, uvjet za nastanak vatre. On se odnosi na uvjet za nesmetano iniciranje, razvijanje, odvijanje i obnavljanje niza kemijskih reakcija lančanog tipa u plamenu i vrijedi za vrste gorivih tvari koje izgaraju isključivo plamenom ili kombinacijom plamćenja i žarenja. Shematski prikaz četiri nužna uvjeta gorenja prikazan je na slici 2.[2]



Slika 2. - Shematski prikaz nužnih uvjeta za zapaljenje i održavanje nesmetanog/neprekinutog izgaranja gorivih tvari koje izgaraju isključivo plamenom ili kombinacijom plamćenja i žarenja[2]

Gorive ili zapaljive tvari su tvari koje se pri normalnim uvjetima pripaljivanja mogu lakše ili teže zapaliti i dovesti do pojave požara ili u uvjetima već nastalog požara potpomognuti njegov nesmetan razvoj i širenje.

Razne organske tekućine kao što su nafta, benzini, alkoholi, eteri, esteri, aldehidi (organska otapala, sirovine, tekuća goriva); plinoviti ugljikovodici kao što su metan, etan, propan, butan, acetilen i drugi; krute tvari kao što su drvo, papir, ugljen, sijeno, tekstil i dr. predstavljaju gorive tvari.[3]

Za ovaj rad važno je istaknuti tvari koje nisu gorive kao npr. staklo, kamen, žbuka, metal, opeka i koje se ne mogu zapaliti u normalnim uvjetima, a često ni kod ekstremno povišenih temperatura.[3]

Građevne konstrukcije izrađene od organskih materijala (drvo, plastika, trska i sl.) predstavljaju jednu od komponenata gorućeg sustava, pa samim tim mogu biti uzrok ili sredstvo širenja požara.[4] Budući da se širenje požara i njegov razvoj može podijeliti po fazama, važno je opisati što se događa u svakom pojedinom stadiju razvitka požara.

### **3. RAZVOJ I FAZE POŽARA**

Iskustvenim praćnjem veličine i brzine porasta temperature, protoka vremena, količine i vrste dima, razvoj požara dijeli se na četiri faze.

#### **3.1. Stadij inicijacije požara**

U ovom stadiju požar je malog razmjera. Za gašenje početne faze požara potrebne su manje količine sredstva za gašenje. Požar može trajati nekoliko minuta do više sati; a to ovisi o brzini porasta temperature, količini kisika, sposobnosti odvođenja topline te količini i vrsti gorivog materijala. Pogodni uvjeti za stvaranje uvjeta za nastanak eksplozije produkata izgaranja mogu se stvoriti ako količina zraka koji ulazi u prostor izgara sa manjkom kisika. Zadimljenost je u pravilu puno veća od zone gorenja, a količina dima se smanjuje proporcionalno s povećavanjem intenziteta požara.[5]

U stadiju inicijacije požara važno je uzeti u obzir vrijeme iznimno važnog utjecaja stupnja površinske zaštite materijala elemenata sadržaja prostorije od zapaljivosti. Materijali površinskog oblaganja podova, zidova i stropova su posebno značajni glede mogućnosti izbijanja požara (osobito na putovima za evakuaciju). Ukoliko se požar ne ugasi u ovoj fazi, nastupa stadij razvitka požara.

#### **3.2. Stadij razvitka požara**

Stadij razvitka požara karakterizira povećavanje intenziteta požara. Temperatura raste, količina toplinske energije u prostoru je sve veća te požar zahvaća sve više gorivih tvari te uslijed djelovanja nadtlaka pucaju staklene površine. Postoji značajna opasnost od naglog razbuktavanja produkata izgaranja zbog toga što požar ne dobiva dovoljne količine kisika za gorenje. Takve pojave nazivamo plamenim udarima koji će detaljnije biti opisani u nastavku teksta. Ovaj stadij požara u pravilu traje od nekoliko minuta do par desetaka minuta. Tijekom ove faze temperatura raste

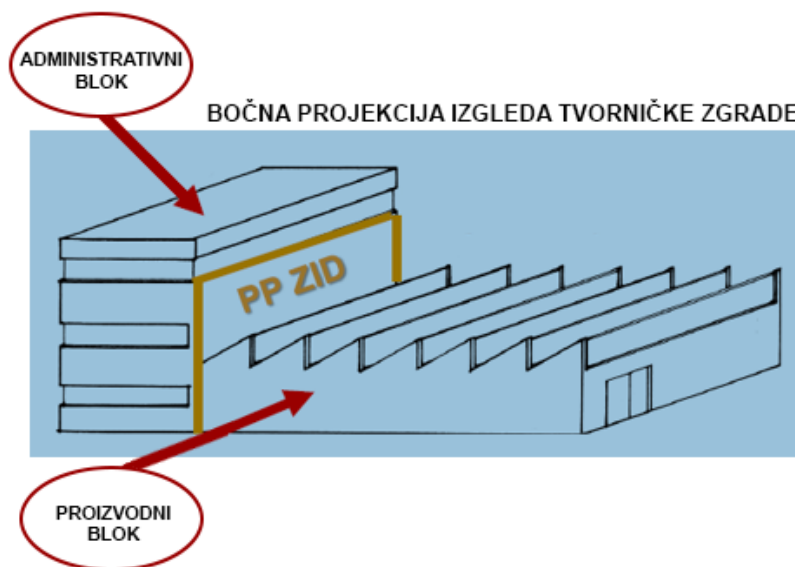
sve dok ne postigne maksimalnu vrijednost kada požar prelazi u idući stadij, stadij pune razvijenosti požara.[5]

### 3.2.1. Čimbenici koji utječu na brzinu širenja požara unutar građevina/zatvorenih konstrukcija

U razvoju požara od njegovog zapaljenja postoji nekoliko čimbenika koji utječu na njegovo ponašanje i širenje unutar građevina ili zatvorenih konstrukcija.

#### 3.2.1.1. Međuprostorne interakcije

Jedan od temeljnih čimbenika koji utječu na brzinu širenja požara unutar građevina/zatvorenih konstrukcija su međuprostorne interakcije. Opisujemo ih kao međusobni utjecaj dijelova zgrade, tj. vrste, geometrije, dimenzija, rasporeda i obilježja izvedbe njenih prostorija, konstrukcijskih rješenja, načina njihova odvajanja ili pregrađivanja i povezivanja što je shematski prikazano na slici 3.[6]

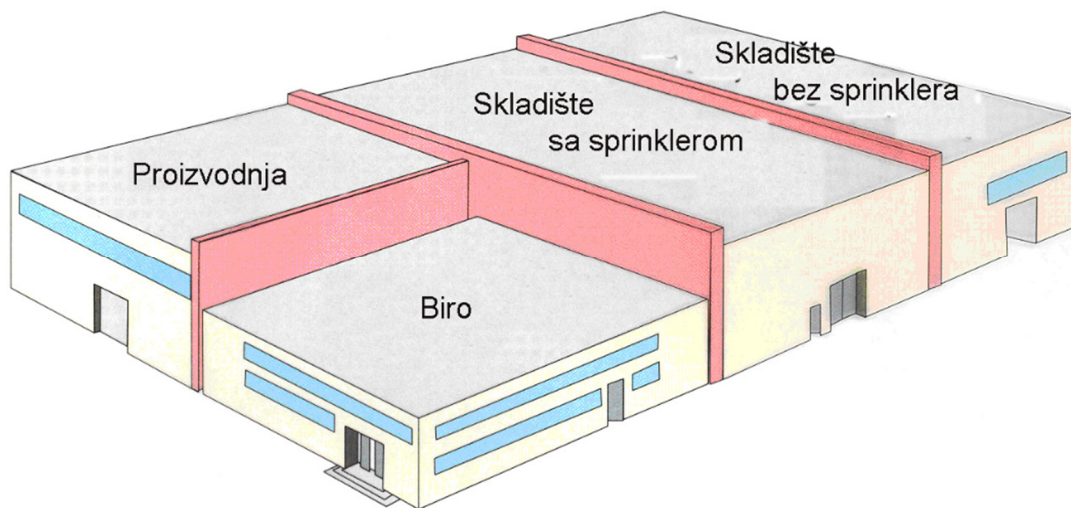


Slika 3. - Prikaz međuprostorne interakcije na primjeru tvorničke zgrade[6]



Kod projektiranja tvorničkih zgrada posebna se pozornost pridaje mjerama pasivne građevinske protupožarne i protueksplozijske zaštite:

- Izoliranje – premještanje, dislociranje na drugi položaj u prostoru raspoloživom za gradnju (izvodi se kada je rizik po osoblje i zgrade neprihvatljivo visok – industrijski procesi i tehnološke operacije s mogućnošću eksplozije)
- Protupožarno pregrađivanje dijelova prostora zgrade po površini u požarne sektore/sekcije odgovarajuće veličine (obavlja se vatrootpornim konstrukcijskim elementima radi smanjivanja vjerojatnosti širenja požara izvan tako zatvorenog prostora) što je prikazano na slici 4.
- Izdvajanje i grupiranje u posebne namjenske prostore (po sličnoj prirodi, vrsti, obilježju i razini opasnosti)[6]



Slika 4. - Formiranje požarnih sektora[7]

### 3.2.1.2. Požarno opterećenje

Čimbenik koji utječe na veličinu požarnih sektora građevine te širenje požara unutar građevina ili zatvorenih konstrukcija je i požarno opterećenje.

Požarno opterećenje je količina topline koju gorenjem oslobode gorive tvari. Mjerna jedinica je džul (J).

Dijelimo ga na:

- Imobilno požarno opterećenje – to su ugrađeni gorivi materijali: vrata, prozori, podne i stropne obloge, drvene krovne konstrukcije i sl.
- Mobilno požarno opterećenje – to su pokretni dijelovi: namještaj, uskladištena roba, oprema...[8]

Ukupno požarno opterećenje za pojedinu prostoriju, grupu ili cijelu građevinu, dobiva se zbrajanjem imobilnog i mobilnog požarnog opterećenja. Važno je spomenuti i specifično požarno opterećenje, a ono predstavlja prosječnu količinu topline koja se oslobađa iz zapaljenog materijala požarnog sektora/sekcije po jedinici površine tog požarnog sektora (jedinica je GJ/m<sup>2</sup>).

Formula za izračunavanje specifičnog požarnog opterećenja prikazana je u nastavku teksta;

$$GPO = \frac{\sum m \cdot \Delta H_c}{S}$$

gdje je

- $\sum m$  – ukupna masa, tj. suma masa svih nepokretnih (konstrukcijskih i ugrađenih) i svih pokretnih (unosivih i iznosivih, premjestic) gorivih tvari
- $\Delta H_c$  – ogrijevna moć u promatranom prostoru (požarnom sektoru)
- $S$  – ukupna površina[6]

Na osnovi specifičnog požarnog opterećenja razlikujemo:

- nisko požarno opterećenje (obiteljske kuće, škole, radionice, hoteli...) do 1 GJ/m<sup>2</sup>

- srednje požarno opterećenje (prodavaonice, tvornice) do 2 GJ/m<sup>2</sup>
- visoko požarno opterećenje (skladišta gorivog materijala, drvna industrija, biblioteka) preko 2 GJ/m<sup>2</sup>[8]

Takvim razvrstavanjem građevina i velikih konstrukcija utvrđuju se razine vatrootpornosti koje bi trebale imati ključne konstrukcije i odgovarajući konstrukcijski elementi te građevinski materijali i različite vrste ukrasnih i zaštitnih obloga. Ne smije se zanemariti činjenica da postoji opasnost ukoliko mase gorivih tvari nisu jednoliko raspoređene po cijeloj zgradi nego su nepromišljeno nagomilane uz nosive stupove ili ispod nosivih greda ili dijela stropne/krovne konstrukcije. Također, svi prisutni materijali ne moraju nužno biti zahvaćeni požarom te ne moraju posve izgorjeti u požaru.

Specifično požarno opterećenje (GPO) bilo koje građevine ne može se dovesti u izravnu vezu s nužnom vatrootpornošću baš svakog od njenih konstrukcijskih elemenata ili neke njene konstrukcije – potrebnu vatrootpornost svakog od elemenata trebalo bi zasebno stručno razmotriti u skladu s mogućim scenarijima (žestinama) požara i tehničkim normama ispitivanja. Dakle, požarno opterećenje je nedvojbeno važan segment za prosudbu opasnosti od požara, ali ujedno nije i jedini. Priroda, raspored i visina paketa predmeta od gorivih materijala bitno utječu na brzinu razvitka požara te se zbog toga za određivanje nužne vatrootpornosti konstrukcija isti moraju stručno razmotriti za svaku konkretnu građevinu.

Shodno tome, požarno opterećenje će biti to veće što je veća količina gorivih materijala u nekom prostoru, a njegovom povećanju će pridonjeti i materijali s visokim toplinskim vrijednostima.[8]

### 3.2.1.3. Načini izmjene topline požara

Kao što je već spomenuto, gorenjem dolazi do oslobađanja velike količine topline. Način izmjene topline s jednog na drugo tijelo može se vršiti na tri načina: vođenjem (kondukcijom), prijenosom (konvekcijom) te zračenjem (radijacijom). U realnim

uvjetima požara nekog objekta i prostiranja stvorene topline prisutna su sva tri načina.

Provođenje topline ili kondukcija je prijenos topline koji se odvija mehanizmom prijelaza topline s jedne čestice materijala na drugu. Kod ovog načina potrebno je da tijela koja razmjenjuju toplinu budu neposredno u kontaktu. Kondukcija je svojstvena krutim tijelima i ovisi o vrsti materijala, debljini, površini i vremenu provođenja. Jedan od praktičnih primjera kondukcije može se opisati kao stavljanje u vatru jedan kraj željezne šipke, dok drugi držimo u ruci. Željezna šipka će se nakon određenog vremena toliko ugrijati da je moramo ispustiti iz ruku. Dakle, toplina prelazi s jednog tijela na drugo (i to s toplijeg na hladnije tijelo). Prijelaz je brži što je veća razlika temperature između ta dva tijela. Također, uzmemo li umjesto željezne šipke drveni štap, moći ćemo ga držati u ruci i onda kad gori. To znači da sva tijela ne vode toplinu jednako. Tijela koja dobro vode toplinu nazivamo toplinskim vodičima, a ona koja slabo vode toplinu toplinskim izolatorima.

Prema tome, ako materijal od kojeg su izrađeni zidovi nekog objekta (pod uvjetom da nije samozapaljiv) ima nizak koeficijent vodljivosti topline, on predstavlja barijeru širenju topline, odnosno vatre. To znači da se požar neće ili će se u manjoj mjeri proširiti na ostali dio prostora. U protivnom, ako se radi o materijalu koji dobro provodi toplinsku energiju (npr. metalni konstrukcijski elementi), tada se požar brzo širi na ostali dio prostora, pogotovo ako se na jednom od od krajeva konstrukcijskih elemenata nalazi gorivi materijal.[3]

Način prijenosa topline u kojem dolazi do gibanja toplijeg fluida prema hladnijem naziva se konvekcija ili strujanje. Praktičan primjer u ovom slučaju je otvaranje vrata između zagrijane i hladne sobe gdje dolazi do prijelaza topline tako da će se toplija soba ohladiti, a hladna ugrijati. Prijenos topline uzrokovan je gibanjem čestica i moguć je samo kod čestica koje mogu mijenjati svoje mjesto, tj. gibati se (tekućine i plinovi). Princip centralnog grijanja zasniva se na pojavi strujanja (konvekcije) medija. Strujanjem zagrijane vode ili nekog drugog medija kroz članke radijatora

prenosi se toplina na okolni zrak, koji se (budući da je kao topliji lakši od hladnog zraka) diže u zrak, a na njegovo mjesto dolazi hladniji.

U slučaju požara u zatvorenim objektima, struja toplog zraka kreće se od žarišta naviše, što dovodi do prenošenja požara u vertikalnom pravcu. Količina topline koja se na ovaj način odvodi od zagrijanog tijela ovisi o površini tijela, razlici temperatura između zagrijanog tijela i okoline (medija koji struji), kao i koeficijentu toplinske vodljivosti koji će se dodatno spominjati u nastavku teksta.[3]

Radijacija ili zračenje je prijenos topline koji se, za razliku od navedenih načina ne prenosi materijalnim česticama, već elektromagnetskim zračenjem. Radijaciju opisujemo na način da ako na primjer stojimo blizu ugrijane peći, osjetit ćemo toplinu na dijelu tijela koji je neposredno okrenut peći, iako je okolni zrak još hladan. Iz ugrijanog tijela prostire se toplina na sve strane toplinskim zračenjem.

Prijenos raste s porastom temperature, što znači da, ako se prilikom požara postignu visoke temperature, to će i prijenos stvorene topline radijacijom biti intenzivniji. Način izmjene topline zračenjem od iznimne je važnosti za širenje požara. Zbog radijacije dolazi do zagrijavanja okolnih površina i brzog širenja požara (koje je i brže ako je veća temperatura i površina zapaljenog materijala). Uz to, treba spomenuti činjenicu da širenje požara zračenjem uopće ne ovisi o eventualnim strujanjima zraka unutar ili oko opožarenog objekta.[3]

### **3.3. Stadij pune razvijenosti požara**

Stadij pune razvijenosti požara karakterizira širenje požara i zahvaćanje preostalog gorivog materijala. Tamo gdje je požar započeo goriva je tvar izgorjela. U ovoj fazi temperatura postiže svoju maksimalnu vrijednost i prema iskustvenim podacima u stambenim prostorima iznosi od 650 do 1000°C. S obzirom na stupanj vatrootpornosti postoji značajna opasnost od popuštanja manje otpornih građevinskih konstrukcija. Ova faza može trajati dulje vrijeme, tojest sve dok ima odgovarajućeg gorivog materijala. Stadij pune razvijenosti požara je intenzivniji

ukoliko u zonu gorenja pritječe dovoljna količina zraka. Gorenje u razbuktaloj fazi prati i nastanak veće količine produkata izgaranja koji su usko povezani s nastankom plamenih udara. Ukoliko su unutar prostora zadovoljeni uvjeti ventilacije, tj. ako u prostor pritječu dovoljne količine zraka, može doći do pojave *flashovera*<sup>1</sup>. U slučaju da je prostor u deficitu sa svježim zrakom, požar u tom prostoru može kulminirati *backdraftom*<sup>2</sup>. [5]

### 3.3.1. Vatrootpornost

Vatrootpornost je sposobnost promatranog građevinskog ili konstrukcijskog elementa da u predviđenom tj. propisanom vremenu ispuni propisima zahtijevane uvjete stabilnosti i cjelovitosti i ostale očekivane zadaće posebno navedene normiranim pokusom za određivanje „vatrootpornosti“.

Kada ispitani konstrukcijski element ispuni normiranim pokusom propisana, provjerena i potvrđena svojstva, dodjeljuje mu se naziv „vatrootporan“. [6]

Sukladno tome, u Hrvatskoj je propisana otpornost na požar te drugi zahtjevi koje građevina mora zadovoljiti u svrhu sprječavanja širenja požara Pravilnikom o otpornosti na požar i drugim zahtjevima koje građevine moraju zadovoljiti u slučaju požara (NN 29/13).

Pravilnik definira otpornost na požar nosivih i/ili nenosivih konstrukcija (zid, strop, stup, greda i drugo) kao sposobnost konstrukcije ili njenog dijela da kroz određeno vrijeme ispunjava zahtijevanu nosivost (R) i/ili toplinsku izolaciju (I) i/ili cjelovitost (E), i/ili mehaničko djelovanje (M), u uvjetima djelovanja predviđenog požara (standardnog ili projektiranog). [9]

Probni uzorak konstrukcije koja se ispituje, mora po sastavu, dimenzijama i slojevima presjeka, načinu izvedbe i ugradnje u svemu odgovarati konstrukciji koja se predviđa ugrađivati.

---

<sup>1</sup> Flashover je pojava naglog razvitka požara pri optimalnim klimatskim uvjetima (ventilirani prostor).

<sup>2</sup> Backdraft je pojava naglog razvitka požara u neventiliranom zatvorenom prostoru pri ulasku svježeg zraka u prostor.

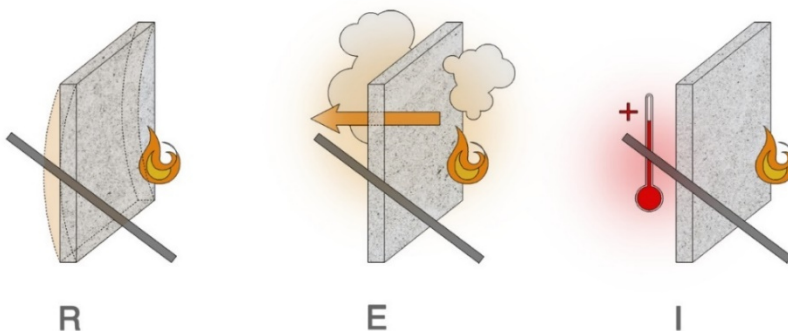
Nosivi konstrukcijski elementi/nosive konstrukcije se ispituje pod proračunatim opterećenjem (iz statičkog proračuna) koje bi trebale izdržati u ugrađenom stanju, a nenosivi pod vlastitom težinom.

Ponašanje građevinskih konstrukcijskih elemenata ili konstrukcija u požaru glede njihove vatrootpornosti određuje se prema ispitnom protokolu koji je propisan normom HRN DIN 4102 – dio 2.

Kako bi se dobili konkretni rezultati ispitivanja i specificirana karakteristika konstrukcije, vatrootpornost se klasificira na F30, F60, F90, F120, F180 gdje broj označava vrijeme u minutama. Tijekom tog vremena konstrukcija je podvrgnuta ispitnom protokolu gdje treba ispuniti postavljene zahtjeve. Kao primjer, REI 90 predstavlja konstruktivni element koji održava toplinsku izolaciju (I), stabilnost (R) i cjelovitost (E) tijekom 90 minuta. Vizualno predočenje navedenog prikazano je na slici 5.

Uz slovne oznake R, E i I, odnosno njihove međusobne kombinacije i brojčane oznake vremena otpornosti, dodaju se još i slovne oznake nekih posebno važnih značajki vatrootpornih konstrukcijskih elemenata:

- W – Warm radiation – zračenje topline
- M – Mechanical – posebni mehanički zahtjevi
- S – Smoke – dimonepropusnost
- C – Closing – automatsko zatvaranje



Slika 5. - Shematski prikaz svakog pojedinog REI faktora vatrootpornosti[10]

### **3.3.1.1. Toplinsko izolacijsko djelovanje (I)**

Toplinsko izolacijsko djelovanje (fr. *isolation*) svojstvo je razdvajajućeg (pregradnog) građevinskog ili konstrukcijskog elementa (zida, stropa, poda) kada je izložen požaru s jedne strane da spriječi prodor topline, tj. spriječi pojavu zagrijavanja požaru neizložene strane površine za prosječno 140 °C te ni na kojem mjestu za 180 °C iznad početne temperature u zadanom (propisom traženom vremenskom razdoblju pri njegovu ispitivanju prema propisom zadanoj ili normiranoj metodi za određivanje vatrootpornosti).[6]

### **3.3.1.2. Integritet (E)**

Integritet (fr. *étanchéité*) tj. prostorna cjelovitost, požarna neprodornost svojstvo je razdvajajućeg (pregradnog) građevinskog ili konstrukcijskog elementa (zida, stropa, poda) kada je izložen požaru s jedne strane da spriječi prodor plamena i vrelih požarnih plinova (kroz nastale pukotine, naprsline i druge otvore) tj. da spriječi pojavu plamena na požaru neizloženoj strani površine u zadanom (propisom traženom vremenskom razdoblju pri njegovu ispitivanju prema propisom zadanoj ili normiranoj metodi za određivanje vatrootpornosti).[6]

### **3.3.1.3. Kapacitet konstrukcijske nosivosti (R)**

Kapacitet konstrukcijske nosivosti (fr. *résistance*) svojstvo je nosivog ili razdvajajućeg (pregradnog) građevinskog ili konstrukcijskog elementa (stupa ili grede, zida, stropa, poda) kada je izložen požaru s jedne strane (ili sa svih strana – npr. stup ili greda) da se ne uruši pod računski dopuštenim opterećenjem (ako su nosivi) ili pod opterećenjem vlastite težine (ako su nenosivi) u zadanom (propisom traženom vremenskom razdoblju pri njegovu ispitivanju prema propisom zadanoj ili normiranoj metodi za određivanje vatrootpornosti).[6]



### 3.3.2. Toplinska obilježja građevinskih konstrukcijskih materijala

Ključan utjecaj na vrste i razine vatrootpornog ponašanja materijala konstrukcijskih elemenata i cijelih konstrukcija u uvjetima požara imaju svojstva:

- njihove toplinske vodljivosti
- njihova specifičnog toplinskog kapaciteta
- njihove toplinske difuzivnosti
- njihove toplinske inercije
- toplinskog rastezanja (širenje, dilatacija) materijala pod utjecajem topline požara[6]

#### 3.3.2.1. Toplinska vodljivost materijala ( $\lambda$ )

Toplinska vodljivost ili toplinska provodnost (oznaka:  $\lambda$ ) je fizikalna veličina koja opisuje kako toplina prolazi kroz tvari. Dakle, to je količina topline koja se prenese u jedinici vremena, pri standardnim uvjetima u smjeru okomitom na površinu, pri razlici temperatura od 1 K (jedinica za toplinsku vodljivost je W/mK – vat po kelvinu i metru).[11]

Formula za izračunavanje toplinske vodljivosti materijala je:

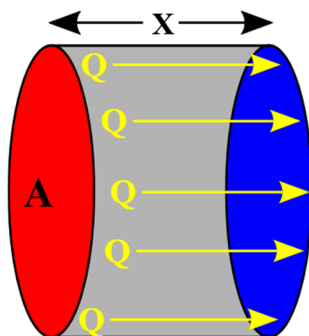
$$\lambda = \frac{Q \cdot l}{S \cdot t \cdot \Delta T}$$

gdje je:

- $Q$  – toplina
- $l$  – duljina vodiča
- $S$  – ploština presjeka toplinskoga vodiča okomita na smjer širenja topline
- $t$  – vrijeme vođenja topline
- $\Delta T$  – razlika temperature na krajevima toplinskog vodiča[11]

Unutar građevinskih materijala moguće je odvijanje do tri različita mehanizma izmjene energije (topline) koji su već prethodno spomenuti. Budući da je toplinska vodljivost materijala usko povezana s mehanizmima izmjene energije, u nastavku teksta bit će opisano na koji se način to odvija.

Mehanizam provođenja topline vibracijama atoma i molekula čvrste tvari (kondukcija) možemo opisati kao sposobnost izmjene topline provođenjem kroz čvrsti materijal što ovisi o vrsti veza između atoma i molekula takve tvari, što je shematski prikazano na slici 6.



Slika 6. - Linearni tok topline kod provođenja ili kondukcije topline[11]

$Q$  – količina topline,  $A$  – površina presjeka,  $x$  – udaljenost među krajevima

Prolaz topline kroz strukture materijala kojima su spomenute čestice povezane čvršćim vezama je bolji nego li u onih sa slabije povezanim česticama – zato što je frekvencija titranja atoma ili molekula s čvršćim međusobnim vezama veće, pa je i brzina međusobne izmjene energije također veća. Ta se energija izmjenjuje kroz masu materijala pomoću elastičnih valova vrlo visoke frekvencije (mogu se usporediti sa zvučnim valovima kroz tvar, ali i im je frekvencija vala mnogo veća).

Kvant energije mehaničkih vibracija koji se prenosi s jedne na drugu česticu pri takvom valnom gibanju kroz materijal naziva se fonon. Takav proces izmjene energije je kod izolacijskih materijala dominantan, dok je kod dobrih vodiča topline

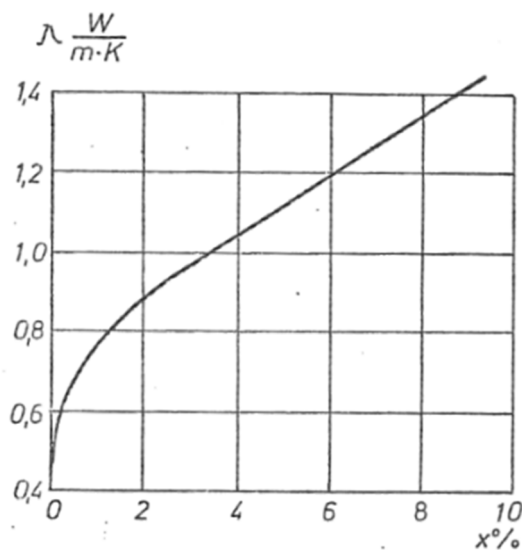
(npr. kovina) on određen izbacivanjem i gibanjem dijela elektrona iz elektronskog omotača atoma iz onih dijelova tvari s višom temperaturom u smjeru onih dijelova tvari s nižom temperaturom. Iz tog razloga termoizolacijska svojstva pojedinih vrsta materijala upravo proizlaze iz međufononskih sudara (fonon-fonon) ili iz rezultata sudara fonon-kristalna rešetkasta struktura tvari.

Ako dođe do rasta temperature raste i broj interrekcija između fotona, što uzrokuje rast toplinskog otpora, pa toplinska vodljivost (prohodnost) materijala opada ili njen početni brži rast sve brže ili postupno stagnira. Kako je većina materijala građevnih opeka polikristalične prirode (sadrže više od jedne vrste kristalnih struktura molekula tvari) i kako se fononi rasipaju na granicama kristala i rubovima nazočnih šupljina u materijalu opeke takvi materijali pokazuju slabiju vodljivost fonona od onih napravljenih od jedne vrste kristala. Kod stakla (amorfna građa) proces rasipanja fonona dominira – toplinska vodljivost je neovisna o temperaturi.[6]

Kod mehanizma provođenja topline zahvaljujući odvijanju prijenosa mase tvari strujanjem (konvekcija) topline putem plinova, para i kapljevina nazočnih u materijalu važan je prinos izmjeni topline putem toplinskog gradijenta ili učinka strujanja. Mehanizam ima nazočnost pora u građi čvrstih struktura materijala - ispunjavaju se zarobljeni plinovi (npr. zrak) ili kapljevine (npr. voda). Prinos takve vrste vodljivosti fluida ukupnoj toplinskoj vodljivosti je kod poroznih ili kod vlaknastih izolacijskog materijala umjeren u usporebi s radijacijskom komponentom.

Mehanizam provođenja topline emisijom toplinskog zračenja (radijacija) odvija se i unutar struktura čvrstih tvari pri čemu se to zračenje raspršuje na svim postojećim nesavršenostima u građi takvih tvari (npr. na granicama kristala i pora u strukturi čvrste tvari). Unutar vrlo poroznih struktura materijala takav mehanizam vrlo je utjecajan pri temperaturama višim od 500 °C. Unutar neporoznih vrsta čvrstih tvari takav način izmjene topline postaje utjecajan pri temperaturama od 1000°C ili više.[6]

Važno je istaknuti i čimbenike koji utječu na vodljivost materijala – temperatura, gustoća i sadržaj vlage. Na primjer, utjecaj sadržaja vlage moguće je opisati tako što voda (vlaga) istiskuje zrak iz pora građevinskog materijala te tako utječe na povećanje njegove toplinske vodljivosti jer je voda bolji vodič topline od zraka. Što je više zračnih šupljina unutar mase materijala ispunjeno vodom (vlagom) to je veća vrijednost veličine ukupne toplinske vodljivosti materijala, a to je prikazano na slici 7. Dakle, građevinskom materijalu ukupna vrijednost veličine koeficijenta toplinske vodljivosti bitno se mijenja s njegovim vlaženjem ili zagrijavanjem i isušivanjem.[12]



Slika 7. - Ovisnost toplinske provodljivosti zida od opeke o vlažnosti opeke[12]

### 3.3.2.2. Toplinski kapacitet materijala ( $C_p$ )

Toplinski kapacitet materijala opisuje se kao količina toplinske energije koja je potrebna da se 1 kilogram neke tvari zagrije za 1 stupanj Kelvina (K). Mjerna jedinica je džul po kelvinu (J/K).[13]

Formula za izračunavanje toplinskog kapaciteta materijala je:

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

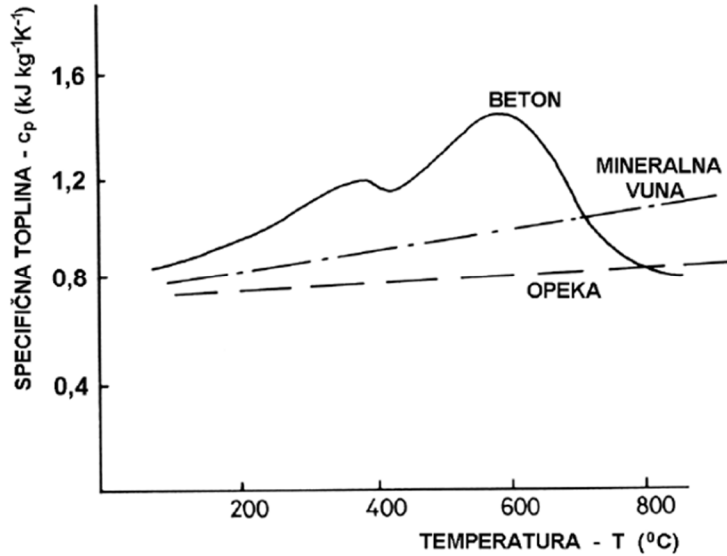
gdje je:

- $Q$  – količina topline dovedene nekom tijelu
- $\Delta T$  – promjena temperature

Vrijednost veličine  $C$  se mijenja od tvari do tvari, a ovisna je o temperaturi pri kojoj je izmjerena. Sav građevinski materijal (osim onog od kovina) pri standardnim klimatskim uvjetima sadrži određenu količinu vlage (u obliku kemijski nevezane vode i vodene pare) – pri zagrijavanju iznad standardnih temperatura (npr. požar) vlaga počinje izlaziti iz materijala. Najintenzivniji gubitak vlage je u početnom stadiju požara.

Pri 100 °C sva kemijski nevezana voda prijeći će u vodenu paru i posve ispariti iz materijala. U tom trenutku će toplina potrebna za zagrijavanje 1 kg materijala za 1 Kelvin naglo porasti zbog entalpije isparavanja vode. To se događa zbog utroška topline na prijelaz kapljevite vode u vodenu paru (proces isparavanja) – nagli skok vrijednosti toplinskog kapaciteta materijala. Pri mnogo višim temperaturama ostale vrste kemijskih reakcija kompleksnih kemijskih promjena (uglavnom razgradnje molekula) i taljenja pojedinih taljivih vrsta čestica materijala imaju ključni utjecaj na daljnje kretanje vrijednosti toplinskog kapaciteta materijala – slika 8.[6]

Utjecaj takvih promjena na vrijednost toplinskog kapaciteta je daleko manji kod temperaturno kemijski stabilnijih materijala kao što su primjerice opeka, beton i mineralna vuna.



Slika 8. - Dijagram vrijednosti toplinskog kapaciteta za opeku, beton i mineralnu vunu[6]

### 3.3.2.3. Toplinska difuzivnost materijala ( $\alpha$ )

Toplinska difuzivnost materijala je mjera prijenosa topline s jedne strane materijala na drugu. Pokazuje kolika je sposobnost pojedinog materijala da provodi toplinu ovisno o njegovom kapacitetu spremanja topline i indicira brzinu kojom toplinska energija može putovati kroz materijal što utječe na brzinu rasta temperature unutar materijala. Oznaka za toplinsku difuzivnost je  $\alpha$ , a mjerna jedinica [m<sup>2</sup>/s]. Određuje se prema matematičkoj formuli:

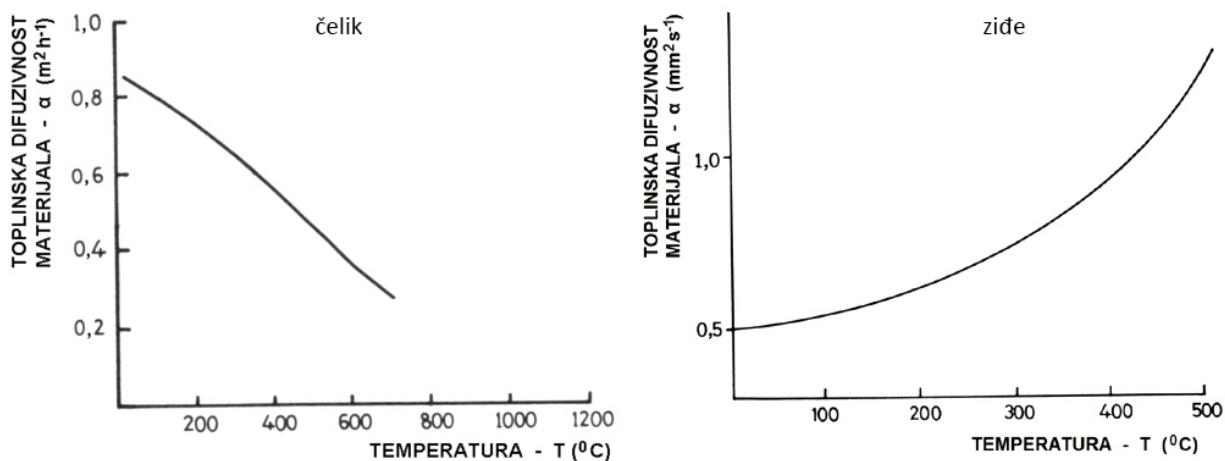
$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p}$$

gdje je:

- $\lambda$  – toplinska vodljivost (W/mK)
- $\rho$  – gustoća tvari (kg/m<sup>3</sup>)
- $C_p$  – specifični toplinski kapacitet (J/kgK)[14]

U ovom slučaju spominje se specifični toplinski kapacitet, koji za razliku od spomenutog toplinskog kapaciteta u matematičkoj formuli za izračunavanje sadrži i fizikalnu veličinu za masu (kg).

Kod manjih vrijednosti  $\alpha$  odvija se sporije širenje topline u nekom materijalu. Dakle, svi materijali s visokom vrijednosti toplinske difuzivnosti reagiraju brzo na upadni tok topline. Vrijednosti toplinske difuzivnosti materijala različito se mijenjaju s promjenom njihove temperature. Općenito se može reći da fluidi imaju malu, a metali veliku toplinsku difuzivnost. Iz toga slijedi kako je građevno gradivo koje ima najmanju toplinsku difuzivnost najbolje upotrijebiti za izolaciju od učinaka vala visokih temperatura – slika 9.



Slika 9. - Dijagrami promjene vrijednosti veličine toplinske difuzivnosti čelika i ziđa s promjenama njihovih temperatura[6]

#### 3.3.2.4. Toplinska inercija materijala ( $e$ )

Toplinska inercija materijala ili toplinska efuzivnost predstavlja sposobnost akumuliranja topline u vremenu  $t$  kod materijala neovisno o tome u kojem se

agregatnom stanju nalazi. Kada se dva elementa različitih temperatura dodiruju, brzina prijelaza topline definirana je toplinskom inercijom materijala. Oznaka za toplinsku inerciju je  $e$ , a mjerna jedinica  $[W\sqrt{s}/m^2K]$ . [15]

Formula za izračunavanje toplinske inercije materijala je:

$$e = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot C_p}$$

gdje je:

- $\lambda$  – toplinska vodljivost materijala
- $\rho$  – gustoća materijala
- $C_p$  – specifični toplinski kapacitet

Promjene svojstava materijala zaštitnih površinskih obloga građevinskih konstrukcija ovisne su o njenim toplinskim obilježjima, odnosno o toplinskoj inerciji onog dijela obloge koji je izložen najvećoj gustoći upadnog toplinskog toka požara. Vrijeme do nastupanja pojave rasplamsavanja (flashover) ili vrijeme razvitka požara unutar stavnovitog zatvorenog prostora ovisi o toplinskoj inerciji materijala kojima su obložene površine njegovih zidova, poda i stropa. [6]

Materijali s velikom efuzivnosti su hladni pri dodiru, dok se oni s malom efuzivnosti mogu (i pri materijalno tehničkim prednostima) koristiti kao dobar podni površinski materijal pri čemu se površina zbog slabog toplinskog provođenja brzo zagrije. [15]

### **3.3.2.5. Toplinsko rastezanje materijala ( $\Delta l$ )**

Toplinsko rastezanje materijala (toplinska ekspanzija) je promjena dimenzija nekog materijala uzrokovana promjenom temperatura. Sva tijela mijenjaju dimenzije s promjenom temperature. [16]



Toplinsko rastezanje materijala može se odvijati na tri načina: linearno, volumno i plošno.

Promjena bilo koje linearne dimenzije tijela ( $\Delta l$ ) dana je izrazom:

$$\Delta l = l_0 \cdot a_r \cdot \Delta T$$

gdje je:

- $a_r$  – koeficijent linearnog toplinskog rastezanja
- $l_0$  – početna ili referentna dimenzija referentnoj temperaturi  $T_0$
- $\Delta T$  – promjena temperature koja uzrokuje promjenu dimenzije

Sklonost materijala rastezanju pri zagrijavanju je posljedica povećanja unutarnje kinetičke energije njegovih atoma ili molekula. Tijela se osim pod djelovanjem sila, deformiraju osim pri promjeni temperature i pri vlažnosti, pri rekristalizaciji i drugim kemijskim promjenama. Pri tom mogu nastati samo uravnotežena naprezanja koja nisu posljedica vanjskog opterećenja i koja se teško mogu ustanoviti.

Pri opterećenju konstrukcija zbrajaju se početna naprezanja s naprezanjima koja uzrokuju opterećenje. Zbog tih naprezanja može nastati lom konstrukcija, iako je naprezanje koje potječe od vanjskog opterećenja manje od dopuštenog. Pri jako povišenim temperaturama (kakve vladaju u požaru) koeficijent linearnog toplinskog rastezanja materijala ( $a_r$ ) ne može se više smatrati konstantnim već postupno raste s temperaturom.[6]

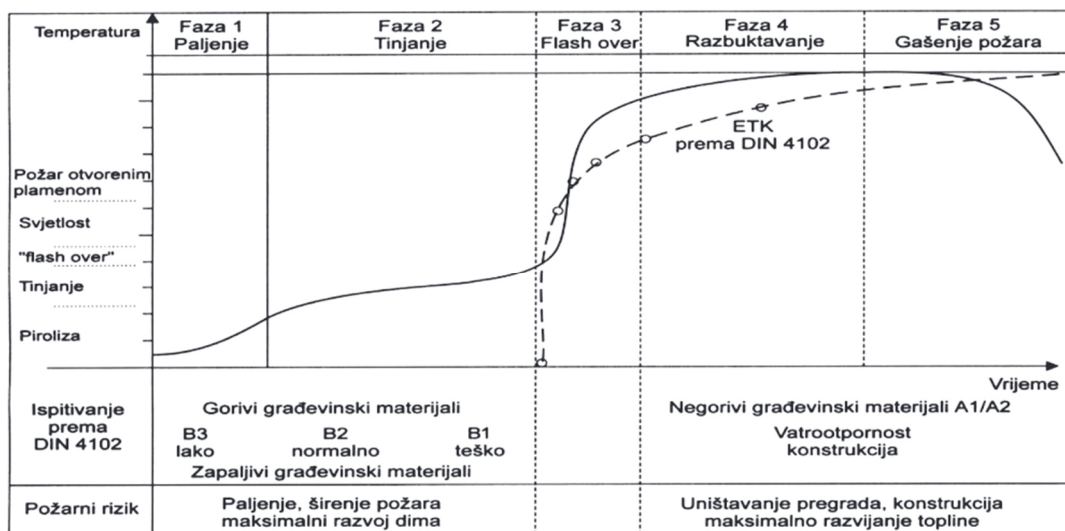
Toplinsko rastezanje materijala svoju korisnu primjenu nalazi kod termomaksimalnih javljača požara gdje je osjetilni element najčešće bimetal. Pod bimetalom se misli na traku koja se sastoji od dviju jednako dugih i širokih metalnih vrpca, međusobno spojenih (obično zavarom). Takve se trake savijaju kod promjene temperature na jednu ili drugu stranu, prema tome koji metal ima veći koeficijent rastezanja.[17]

Termomaksimalni javljači požara funkcioniraju tako da bilježe prekoračenje određene temperature. Oni javljaju požar kada temperatura poraste između 15 °C do 35 °C više od temperature okoline. Rade na načelu bimetala koji zatvara ili otvara strujni krug (ovisno o proizvođaču) nakon što temperatura prijeđe namještenu temperaturu dojave i šalje obavijest vatrodonoj centrali.[18]

### 3.4. Stadij spontanog gašenja požara

U ovoj fazi s vremenom ponestaje gorivi materijal te požar gubi svoju snagu. Atmosfera unutar prostorije je dovoljno zagrijana te se energija i dalje otpušta, no zbog nedostatka gorivog materijala dolazi do usporavanja sagorijevanja. Intenzitet požara se smanjuje do točke tinjanja. Na koncu će sav gorivi materijal biti iskorišten i vatra se gasi.[5]

Na slici 10. u nastavku teksta prikazan je dijagram shematskih stadija razvoja požara krutina prema DIN 4102 standardu.



Slika 10. - Dijagram shematskih stadija/faza razvoja požara krutina[19]

## 4. GRAĐEVINE I KONSTRUKCIJE

Građevina je objekt na zemlji određene lokacije koji se sastoji od građevinskog dijela i ugrađene opreme, a zajedno čine tehničko tehnološku cjelinu. Neki dio građevine je njezin segment koji može zasebno funkcionirati i kao segment predstavlja zasebnu tehničko tehnološku cjelinu.[20]

Osnovna načela zaštite od požara građevina usmjerena su na:

- pravilan odabir građevinskih materijala glede njihova ponašanja u požaru
- pravilan odabir građevinskih elemenata i konstrukcija glede njihove otpornosti na požar
- pravilno projektiranje građevine glede njezine podjele u manje cjeline (požarne sektore) otporne na požar[21]

### 4.1. Konstrukcijski elementi

Pod pojmom konstrukcijski element podrazumijevamo dio konstrukcije koji prenosi sile. Skup takvih elemenata sastavljenih u jednu cjelinu koja preuzima i prenosi sile nazivamo konstrukcijski sustav. Konstrukcijski element fizički je prepoznatljiv dio konstrukcije, primjerice greda, stup, zid, strop, balkon, ploča itd.[22]

#### 4.1.1. Poboljšanje vatrootpornosti konstrukcijskih elemenata

Vatrootporni materijali koji se mogu koristiti kao toplinske obloge u zaštiti od jakih izvora topline ili od požara mogu biti:

- inertni - oni koji su dovoljno neosjetljivi na toplinu (to su slabi vodiči topline koji se pod utjecajem visokih temperatura požara kemijski zanemarivo ili vrlo sporo mijenjaju, tj. ne razgrađuju se velikom brzinom – primjerice vatrostalne opeke)

- ablativni – oni koji se pod utjecajem visokih temperatura u djelovanju požara postupno kemijski razgrađuju, isparavaju ili osipaju (primjerice beton ili gipsane ploče proizvedene za tu namjenu)
- vlaženi, pjeneći i bubreći premazi – pod utjecajem topline požara kemijski se razgrađuju, pjene, bubre i vlaže te na taj način tvore sloj koji privremeno pruža povećani otpor prolazu topline
- materijali kombiniranih svojstava – kombinacija prethodno navedenih svojstava[6]

Da bi se poboljšala vatrootpornost nosivih konstrukcijskih elemenata kao što su stupovi i grede (iznimna važnost za statiku građevine) koristi se nekoliko metoda za poboljšanje značajki vatrootpornosti:

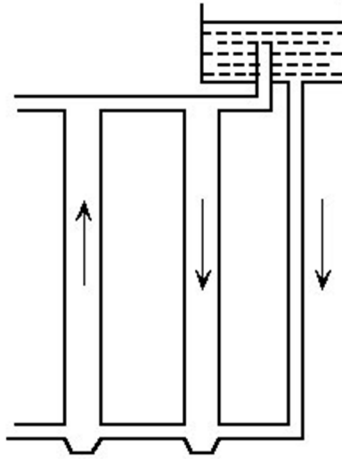
1) ispunjavanje šupljina u sklopu šupljih stupova s materijalima visoke vrijednosti veličine toplinskog kapaciteta (tj. unosom tvari ili ugradnjom materijala koji dobro apsorbiraju toplinu):

A. ispunjavanje cijele šupljine čeličnog stupa (kružnog, kvadratastog ili drugog presjeka) s vodom:

a) primjenom neprotočnog sustava opskrbe rashladnom vodom (voda nalivena u šupljinu čeličnog stupa ne protječe već je samo ispunjava te djeluje kao stacionarni sustav za apsorpciju topline) – pri izboru takvog rješenja mora se uzeti u obzir nekoliko faktora; voda vrije pri temperaturi od 100 °C, na stijenke takvih „posuda“ treba ugraditi sigurnosne ventile, pretvorba kapljevite vode u vodenu paru dovodi do smanjenja količine kapljevite vode u šupljini stupa što može rezultirati mjestimičnim pojavama pregrijavanja stupa te gubitkom svojstava nosivosti (rušenje konstrukcije)

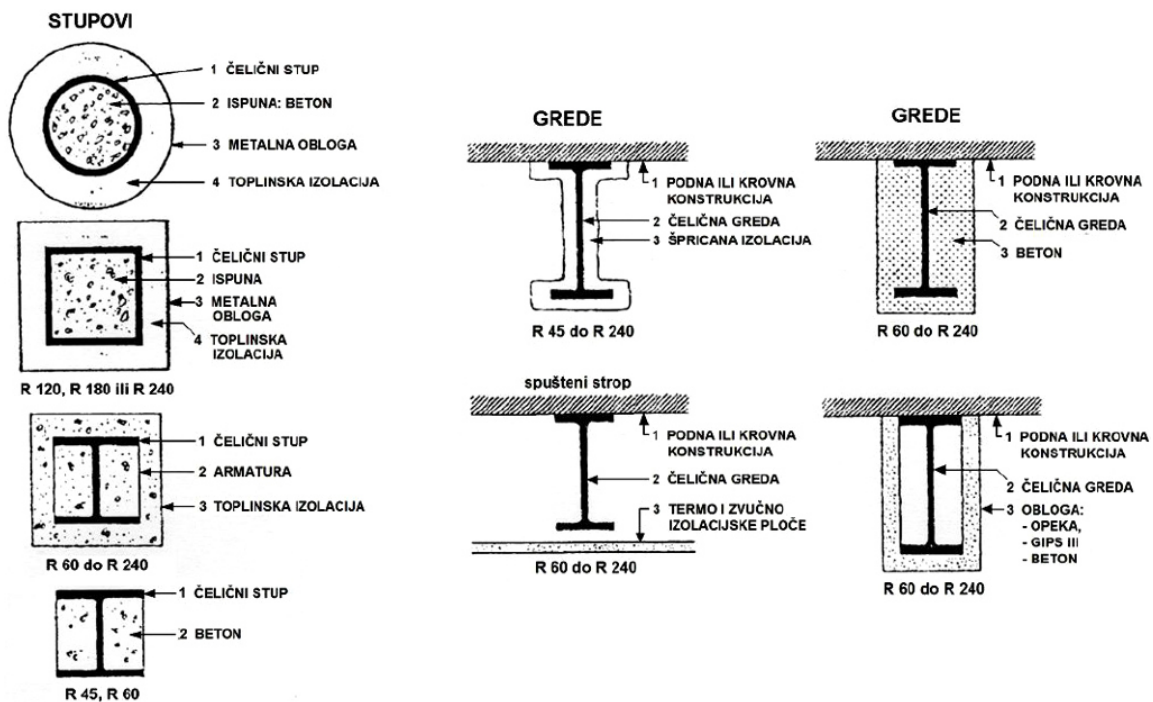
b) primjenom protočnog sustava opskrbe rashladnom vodom (shematski prikaz metode prikazan je na slici 11.) – voda se crpkom ubacuje i potiskuje kroz sustav cjevastih šupljina stupova (i greda) dovoljnom brziom kako bi se onemogućilo da u slučaju djelovanja topline požara na konstrukciju temperatura vode nikako ne prijeđe temperaturu vrenja

(voda se koristi kao izmjenjivač topline) - dizajn ovakve metode je složen, a metoda skupa (obično je ograničen na prestižne građevine koje zahtijevaju ekstremnu razinu vatrootpornosti)[22]



Slika 11. - Shematski prikaz primjene protičnog sustava opskrbe rashladnom vodom na presjeku čelične konstrukcije[23]

- 2) oblaganjem profila čeličnih ili drvenih stupova/greda s betonom, gipsanim pločama ili ostalim dovoljno vatrootpornim termoizolacijskim građevnim gradivom – primjer zaštite konstrukcija od požara (slika 12.):
  - A. stupovi ispunjeni betonom i obloženi toplinskom izolacijom i metalnom oblogom visokog sjaja s mogućom otpornošću na požar od jednog do četiri sata
  - B. grede obložene betonom, različitim pločama i špricanom izolacijom s mogućom otpornošću na požar od četrdeset pet minuta do četiri sata



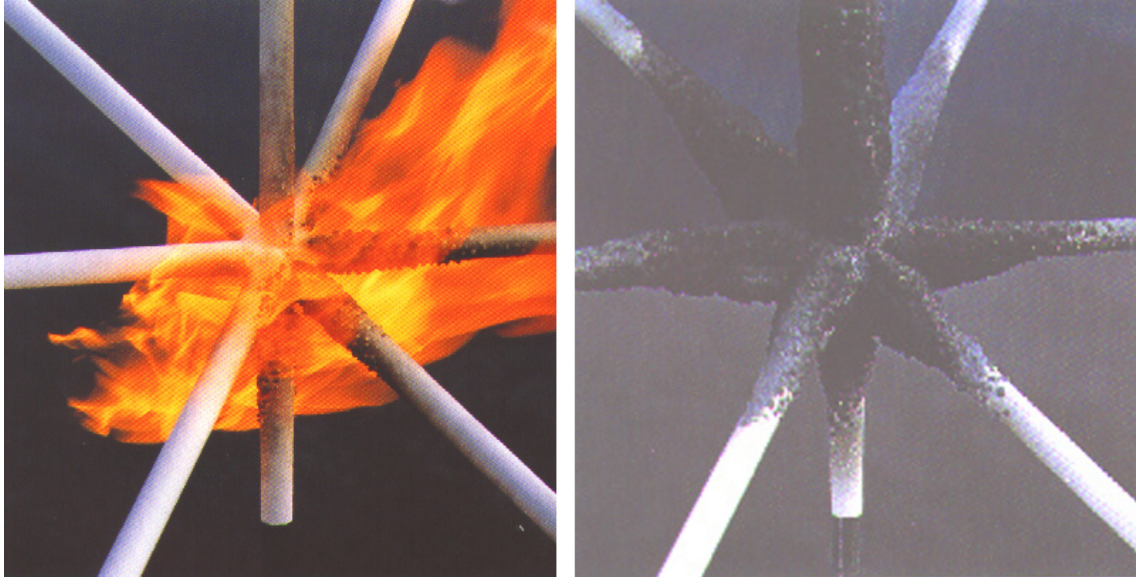
Slika 12. - Primjeri zaštite konstrukcije od požara oblaganjem (stupovi i grede)[6]

3) oblagajem profila čeličnih ili drvenih stupova/greda s vlažećim, pjenećim i bubrećim protupožarnim premazima – koji se pod utjecajem topline požara kemijski razlažu, pjene, bubre i vlaže tvoreći sloj koji privremeno pruža povećani otpor prolazu topline (prikazano na slici 13.)

A. negorivi premazi u tekućem (za nanošenje četkom ili špricanjem) ili gušćem obliku (za nanošenje brizganjem ili lopaticom) rade se miješanjem:

- u požaru pjenećeg sredstva
- u požaru bubrećeg sredstva (debljina premaza nabubri deset do trideset puta)
- u požaru karbonizirajućeg sredstva (smanjivanje toplinske vodljivosti sloja)
- vezivnog sredstva (vezivanje premaza na površinu konstrukcijskog profila)
- otapala (vode ili organskog otapala)

- f) mineralnog punila – vatrostalnih vlakana, različitih veličina u obliku disperzije i suspenzije



Slika 13. - Usporedni prikaz izgaranja spoja čeličnih cijevi zaštićenih slojem premaznog sredstva[24]

Za kakvoću protupožarnog premaza ključno je:

- obujam stvaranja pjene
- mehanička čvrstoća pjene
- sposobnost prijanjanja boje i pjene na temeljne premaze[6]

4) kemijska obrada drveta impregniranjem (pod tlakom i povišenom temperaturom) ili površinskim premazivanjem protupožarnim retardantima<sup>3</sup>

A. protupožarni retardanti vrlo malo utječu na brzinu karbonizacije drveta ali zato mogu bitno utjecati na povećanje dubine zaostalog karboniziranog sloja na drvenoj konstrukciji (takav sloj ima bolja termoizolacijska svojstva od običnog drveta)

---

<sup>3</sup>Retardanti (usporivači) otežavaju ili odgađaju zapaljenje te usporavaju izgaranje u slučaju izbijanja požara.[6]

- 5) zaštita drvenih greda žbukanjem
- 6) oblaganjem drvenih površina gips-kartonskim pločama

Obrada konstrukcijskih materijala i proizvoda od drveta protupožarnim retardantima može se obaviti već tijekom njihove proizvodnje, imregniranjem pod nadtlakom prije montaže te premazivanjem ličilačkim četkama ili raspršivačima za boje nakon montaže.[6]

#### **4.2. Građevinski materijali**

Građevinski materijal označava sve one materijale koji se koriste u građevinarstvu. Prema porijeklu oni mogu biti prirodni i umjetni, prema sastavu jednostavni i složeni (primjerice beton) te prema konstruktivnim svojstvima noseći, vezivni i izolacijski.[6]

Neke vrste građevinskih materijala su: kamen, opeka, beton, cement, vapno, pijesak, gips ploče, šljunak, drvo, žbuka, crijep, armaturno željezo, keramičke pločice itd. Konstrukcijski materijal su najčešće kamen, drvo, opeka, beton, armirani beton i čelik. Hijerarhijski poredano počevši od najnižeg slijedi: konstrukcijski materijal -> konstrukcijski element -> konstrukcija -> građevina.

#### **4.3. Klasifikacija građevinskih materijala i konstrukcija u požaru**

Svaki se građevinski materijal i konstrukcija ponašaju drugačije u uvjetima požara. Primjerice, zapaljivi građevinski materijal će se pod utjecajem požara zapaliti i podržavati proces gorenja. Za razliku od zapaljivih građevinskih materijala, nezapaljivi građevinski materijali će pak pod utjecajem požara odolijevati gorenju, no zbog utjecaja visoke temperature doći će do njihove razgradnje te promjene svojstava.[19]

Ponašanje građevinskih materijala u požaru uvjetovano je:



- vrstom materijala
- oblikom materijala
- presjekom materijala
- dimenzijama materijala
- specifičnom površinom materijala
- načinom obradivosti materijala
- spojevima s drugim elementima[6]

Poznavanje ponašanja građevinskih materijala je bitno jer su oni u požaru izloženi fizikalnim i kemijskim promjenama koje utječu na njihova osnovna svojstva, a shodno tome i na stabilnost objekta.

#### **4.3.1. Razredba građevinskih materijala prema ponašanju u uvjetima požara**

Ovisno o ponašanju u uvjetima požara i njihove reakcije, građevinski materijali se kategoriziraju sukladno hrvatskoj normi HRN DIN 4102 i HRN EN 13501-1.[25]

Sukladno njemačkoj normi DIN 4102 (ili HR DIN 4102) na temelju provedenog ispitivanja dobivena je klasifikacija materijala prema gorivosti. Građevinski materijali razvrstani su u dvije klase koje se dijele u 5 grupa (Tablica 1.):

- materijali klase „A“ (A1, A2) – negorivi
- materijali klase „B“ (B1, B2, B3) – gorivi

Tablica 1. - Klasifikacija materijala prema gorivosti (HR DIN 4102)[19]

KLASA „A“ – NEGORIVI MATERIJALI	
A1 – bez organskih sastojaka	normirani materijali: gips, vapno, cement, beton, kamen, staklo, metal, glina, keramika, pijesak  nenormirani materijali: kalcij-silikat ploče, određene mineralne protupožarne ploče i silikatne ploče (ovu skupinu treba dokazivati)
A2 – s organskim sastojcima	gips-kartonske ploče, određeni mineralno-vlaknasti materijali
KLASA „B“ – GORIVI MATERIJALI	
B1 – teško zapaljivi plastični materijali u kombinaciji s materijalima klase A1 i A2	normirani materijali: gips-kartonske ploče, lake građevinske ploče od drvene vune  ostali materijali (treba ih dokazivati): teško zapaljive šperploče, ploče od određene vrste tvrde pjenaste plastike, određeni PVC materijali s isključivo mineralnim dodacima, gus-asfalt bez obloge
B2 – normalno zapaljivi	normirani materijali: drvo i drvni proizvodi debljine > 2 mm, normirani pokrovi i normirane podne PVC-obloge
B3 – lako zapaljivi	svi oni koji nisu B2 kao: papir, drvena vuna, drvo do debljine 2 mm, slama

Kako bi se materijali skupine B1 zapalili, potrebna je temperatura od preko 100 kJ, pa će se takav materijal zapaliti samo iz jakih i dugotrajnih izvora paljenja. U slučaju uklanjanja izvora paljenja ovi materijali se ubrzo gase. Materijali skupine B1 gorenjem se rastežu, ali pri tome ne šire plamen dalje. Dakle, to znači da će u najvećem broju slučajeva goriti kao krutina uz otpuštanje različitih plinova. U

materijale ove skupine svrstavaju se tzv. Duroplasti kao što su kod električnih instalacija vodiči s izolacijom bez halogena.[19]

Materijali skupine B2 za zapaljenje trebaju nižu temperaturu paljenja i samu energiju paljenja od oko 10 kJ, a nakon uklanjanja izvora paljenja (uzročnika) oni nastavljaju gorjeti. Gorenjem se gorući komadi „otkidaju“ i kapaju užarenom tekućinom kojom se požar prenosi dalje – ova pojava kod ove skupine materijala nije baš naročito izražena. U B2 skupinu materijala ubrajaju se PVC obloge debljine veće od 3 mm i odgovarajuće izolacije na elektrovodičima.[19]

Materijali skupine B3 pale se već s energijom paljenja manjom od 10 kJ, a u roku od 10 sekundi gorenja razvijaju veliki plamen koji se širi velikom brzinom i dovodi do stadija pune razvijenosti požara. U ovu skupinu svrstavaju se svi ostali umjetni materijali koji su sastavni dio izolacije za elektrovodiče.[19]

Kategorizacija spomenute norme HRN EN 13501-1 temelji se na osnovnim parametrima koji se mjere kod materijala, a to su:

- gorivost
- odavanje topline
- bočno širenje plamena
- stvaranje gorivih kapi
- stvaranje dima i dr.

Tablica 2. opisuje razredbu građevinskih materijala s obzirom na reakciju u požaru prema navedenoj normi.

Tablica 2. - Klase građevinskih materijala s obzirom na reakciju na požar u skladu s HRN EN 13501-1[25,6]

KLASA	PONAŠANJE U POŽARU	MATERIJALI
A1	materijal koji ne doprinosi požaru	izolacijski proizvodi od prirodnog kamena, opeke, keramike, stakla
A2	materijal koji zanemarivo malo doprinosi požaru	proizvodi iz klase A1, ali koji sadržavaju malu količinu organskog materijala
B	materijal koji u fazi razvoja požara vrlo malo doprinosi razvoju požara	gipsane ploče s različitim oblogama, požarni usporivači na bazi drva
C	materijali koji imaju mogućnost zapaljenja te kod požara vrlo ograničeno širenje i oslobađanje energije	fenolna pjena, gipsane ploče s različitim oblogama tanjim od one u klasi B
D	materijali koji imaju mogućnost zapaljenja te kod požara ograničeno širenje i prihvatljivo oslobađanje energije	drveni proizvodi debljine veće od 10 mm i gustoće veće od 400 kg/m <sup>3</sup>
E	materijali koji su kod izuzetno malog požara (plamen šibice) zapaljivi i šire plamen	vlaknaste ploče, proizvodi od plastike
F	lakozapaljivi materijali (bez zahtjeva glede ponašanja u požaru)	proizvodi koji nisu ispitani na požar

Materijali su kategorizirani u sedam klasa, dok kombinacijom parametara ispitivanja reakcija na požar, stvaranje dima (s) te stvaranje gorivih kapi (d) dobivamo ukupno četrdeset klasa po kojima se razvrstavaju materijali.[25]

Slijedom toga, u nastavku je prikazana usporedba klasa reakcije na požar (HRN EN) s klasama gorivosti (HRN DIN) - Tablica 3.[26]

Tablica 3. - Usporedba klasa reakcije na požar (HRN EN) s klasama gorivosti (HRN DIN)

	DODATNI ZAHTJEV		HRN EN 13501-1	HR DIN 4102-1
	Nema razvoja dima	Ne gori plamenom		
NEGORIV MATERIJAL	x	x	A1	A1
NEGORIV S GORIVIM MATERIJALOM	x	x	A2-s1 d0	A2
TEŠKO GORIV	x	x	B, C-s1 d0	B1
		x	A2, B, C-s2 d0	
		x	A2, B, C-s3 d0	
	x		A2, B, C-s1 d1	
	x		A2, B, C-s1 d2	
			A2, B, C-s3 d2	
NORMALNO GORIV	x	x	D-s1 d0	B2
		x	D-d2 d0	
		x	D-s3 d0	
	x		D-s1 d2	
			D-s2 d2	
			D-s3 d2	
			E	
			E-d2	
LAKO ZAPALJIV			F	B3

s – dim (s1 = malo ili bez dima; s2 = srednji dim; s3 = gusti dim)

d – kapljichnost (d0 = nema kapljica unutar 600 sekundi; d1 = kapa unutar 600 sekundi, ali ne gori duže od 10 sekundi; d2 = ne kao d0 ili d1, jako kapa i gori)[26]

## **5. SPECIFIČNOST PONAŠANJA MATERIJALA U UVJETIMA POŽARA**

Svaki materijal karakterizira specifična struktura i kemijska građa. Samim time, ponašanje svakog pojedinog materijala i proizvoda izrađenih od tih materijala odvija se drugačije tijekom uvjeta požara. Najčešći materijali u građevini su drvo, beton, opeka, čelik, staklo, aluminij, plastika i gips ploče. Navedeni materijali građeni su od stotina varijacija gorivih i negorivih materijala. Bilo da je riječ o gorivim ili negorivim materijalima, djelovanjem požara na materijale dolazi do vidljivih oštećenja, pogoršanja mehaničkih i toplinskih svojstava materijala te deformacije.

Različiti proizvodi građeni su od prirodnih i sintetičkih materijala te sadrže kisik, ugljik, vodik, dušik, sumpor i ostale halogene elemente vezane u kemijske strukture. Pamuk i drvo, primjerice, spadaju u prirodne materijale, dok najlon, polivinil klorid i polietilen pak spadaju u sintetičke materijale. Razni sintetički materijali (elastomeri i plastomeri) se pod utjecajem požara obično tope i omekšaju te izgaraju uz kapanje gorive materije. Prirodni materijali obično ne omekšaju i ne tope se, ali se kemijski razlažu.[27]

### **5.1. Kamen**

Kamen nastaje drobljenjem, klanjem i rezanjem stijena. Do njegovoga nastanka može doći djelovanjem erozije, prirodnim putem uslijed utjecaja kiše, vjetra, mraza, plime, oseke, potresa, poplava i/ili drugih meteoroloških pojava. Danas se kamen može dobiti i umjetnim putem: rezanjem pilama, sitnjenjem pomoću eksploziva te drobljenjem i slično. Arhitektonski i građevinski kamen se od davnina koristi kao materijal za izradu kuća, pomoćnih zgrada, mostova i puteva. U građevinarstvu razlikujemo:

- lomljeni kamen,
- pločasti kamen čije su dvije strane približno paralelne
- kamen u obliku kvadra (obrađuje se u pravilne oblike)

- kamen za podove koji je sječen u tanje podne obloge[28]

Otpornost kamena u požaru ovisi o vrsti i podrijetlu kamena. Proces raspadanja kamena kod povišenih temperatura (900 °C) zahvaća samo površinski sloj koji djeluje kao toplinski izolator. Na taj način sprječava prodiranje topline dublje u kamen te njegovo razaranje. Što je konstrukcija masivnija, to je otpornija na požar.[29]

Utvrđeno je kako je jednostrano i brzo zagrijavanje puno nepovoljnije od višestranog, polakog i umjerenog zagrijavanja. Tanji kameni elementi poput pločastog kamena postaju više zagrijaniji pod utjecajem topline nego primjerice kameni blokovi. Iz tog razloga je otpornost na djelovanje topline pločastog kamena manja od kamenih blokova. Kod manjih i lokaliziranih požara gdje nije nastalo puno toplinske energije učinak požara ograničen je na oštećenja i zadimljenje površine. Nadalje, kod požara većih razmjera gdje je učinak topline puno jači, događaju se značajne promjene u fizikalno-kemijskim svojstvima strukture kamena. Toplinski učinak mijenja unutarnju strukturu kamena i sastavnica kamena (minerala) uzrokujući pojavu makroskopskog propadanja. Tipični tragovi propadanja kamena utjecajem požara su: promjene boje na kamenju, zaobljavanje uglova, isparavanje vlage iz kamena te pucanje.[30]

Promjena boje kamena najuočljiviji je trag djelovanja požara na kamen prirodnog porijekla - ponekad i utjecaj vremenskih pojava može uzrokovati takvu promjenu te zbog toga analiziranje tragova učinka požara treba obavljati vrlo oprezno). Toplina uzrokuje razvoj ružičaste ili crvenkasto-smeđe boje u smeđu ili tamnocrvenu boju, što odgovara dehidraciji spojeva željeza. Crvenkasto obojenje nije uočljivo na bijelom ili sivom kamenju jer relativno ne sadrže željezov oksid. Na većini kamena promjene boje započinju pri izloženosti temperature od oko 200 °C do 300 °C. Testiranjem djelovanja požara na velike kamene blokove uočava se oštra granica između zagrijane, crvene boje površine kamena te dijela kamenog bloka koji je ostao nepromijenjen. Debljina zone crvene izgorjele kore površine oko 2-3 cm, no ta debljina ovisi o okolnostima djelovanja požara – stadij, udaljenost te trajanje požara. Također, kamenje koje sadrži vrlo malu količinu organskih tvari na temperaturi od

otprilike 500 °C pretvara organsku tvar u ugljen što rezultira efektom prekrivanja crvene boje sivom. Na povišenoj temperaturi od navedene ugljen počinje izgarati te se ponovno pojavljuje izvorna boja.[30]

U tragove propadanja kamena pod djelovanjem požara svrstavaju se i pucanje, drobljenje i ljuštenje. Takav način propadanja može značajno i u potpunosti uništiti isklesane kamene oblike arhitekture te oštetiti glatkoću kamenog materijala. Oblik pucanja kamena ovisi o načinu i vrsti klesanja. Čest je slučaj da je kamen uništen u tolikoj mjeri da ga je potrebno zamijeniti novim – slika 14.[30]



Slika 14. - Vidljiva požarna oštećenja arhitektonskog kamena na crkvi Sv. Mihovila u Budimpešti[30]

Propadanje kamena pod utjecajem požara karakterizira i zaobljavanje uglova kamena. Zaobljavanje je vidljivo ako postoji rub te ukoliko toplina djeluje s dvije strane. Način propadanja zaobljavanjem rubova najčešće se uočava na stepenicama, rubovima prozora i nadvratnicima.[30]



## 5.2. Drvo

Drvo kao kruta tvar jedan je od najvažnijih elemenata u građevinarstvu. Osnovna su tri parametra mehanizma izgaranja drva:

- toplinski (energetski) potencijal – količina toplinske energije koja se razvija iz potpunog izgaranja materijala i ovisi o kalorijskoj vrijednosti materijala. Kalorijska vrijednost drva približno je stalna za istu botaničku vrstu (interval promjene za suho drvo listara je 232 kcal/kg, a 158 kcal/kg za četinare)
- gornji specifični toplinski kapacitet ( $C_{pg}$ ) – energija proizvedena izgaranjem jedinice mase potpuno suhe tvari (tvar čije izgaranje ne stvara vodu)
- donji specifični toplinski kapacitet ( $C_{pd}$ ) – energija proizvedena upijanjem vode sadržane u drvu koje nije potpuno suho ili je proizvedena tijekom reakcije i u stanju je vodene pare[19]

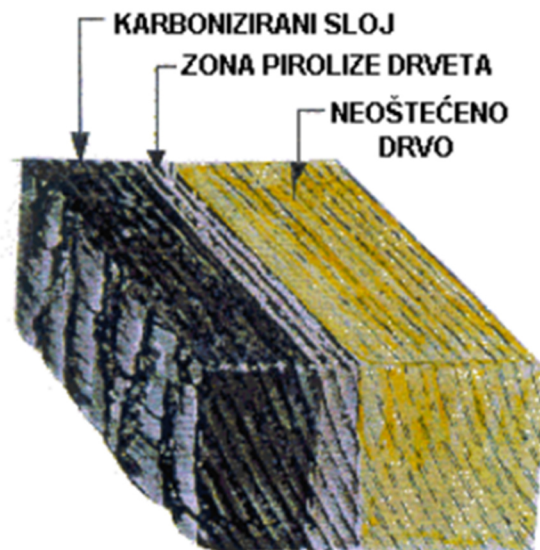
Na zapaljivost drveta utječu:

- vrijeme izlaganja djelovanju visokih temperatura
- sadržaj vlage u drvetu (drvo sa sadržajem vlage većim od 30 % neće se zapaliti)
- zapremninska masa
- anatomske sastav drveta
- veličina površine koja je izložena djelovanju plamena
- način obrade drveta (rezana građa lakše se pali od tesane)[19]

Građevno drvo je gorivi nehomogeni i promjenljivi materijal. Pri početnom zagrijavanju počinje se širiti sve do postizanja temperature od oko 80 °C, kada se proces širenja zaustavlja i nastupa skupljanje drveta. Pri visokim temperaturama ne gubi mehanička svojstva jer modul elastičnosti drveta neznatno ovisi o visini temperature. Kako bi se odredila vatrootpornosti konstrukcijskih elemenata i konstrukcija od građevnog drveta treba poznavati:

- brzinu karbonizacije
- temperaturni gradijent u karbonizacijom još nezahvaćenom sloju drveta
- čvrstoću te obilježja deformacija materijala ovisno o temperaturi[6]

Karboniziranje drveta i proizvoda od drveta je od ključne važnosti za vatrootpornost drvenih konstrukcijskih elemenata (stupova, greda, pregradnih ploča i sl.) te svih vrsta građevnog drveta u požaru. Brzina karbonizacije je uglavnom konstantna i ovisi o vrsti i svojstvima drva (gustoći, vlažnosti i propusnosti).[6] Pod utjecajem požara drvo oblikuje tri zone – slika 15.



Slika 15. - Vrste zona drveta koje nastaju djelovanjem požara[6]

Bitno brži prijelaz topline pod utjecajem požara obično se odvija na samim rubovima kvadratnog ili pravokutnog presjeka geometrijskih oblika požaru izloženih dijelova konstrukcijskih elemenata od građevnog drveta. To rezultira bitno većim stupnjem karbonizacije i izgaranja na takvim mjestima te pojavu postupnog karbonizacijskog zaobljavanja uglova u takvih geometrijskih oblika drvenih konstrukcijskih elemenata tijekom požara - slučaj kao i kod kamena. Također, specifičnost ponašanja drveta u uvjetima požara karakterizira i pojava tzv. „krokodilske kože“ (eng. *Alligatoring* – slika

16.) gdje se na uzorcima drvene građe ili stolarije sa znakovitim karboniziranim naprslinama može odrediti intenzitet i vrijeme djelovanja požara na drvo. Kod postupnog toplinskog degradiranja zona pirolize drveta biti će veća nego kod oštrog razdvajanja karboniziranog od neoštećenog drvenog materijala.[6]



Slika 16. - Karbonizirane naprsline u obliku tzv. „krokodilske kože“ (eng. Alligatoring)[31]

Karbonizirani sloj drveta djeluje na dva načina:

1. toplinski izolira preostali dio drvene mase zbog slabe toplinske vodljivosti karboniziranog sloja
2. usporava (otežava) oslobađanje zapaljivih plinovitih i parnih produkata toplinske razgradnje drveta iz graničnog sloja postupno degradirajućeg drveta s već karboniziranim slojem te vodene pare od vlage iz malo dubljeg, toplinskom degradacijom još nezahvaćenog, sloja drveta.[6]

Upravo djelovanje karboniziranog sloja drveta objašnjava tvrdnju kako drvo pokazuje relativno dobra svojstva ponašanja u uvjetima požara u pogledu

vatrootpornosti. Nadalje, djelovanje spomenutih retardanata koji otežavaju ili odgađaju zapaljenje te usporavaju izgaranje samo pridonosi poboljšanju svojstava drveta kao konstrukcijskog materijala.

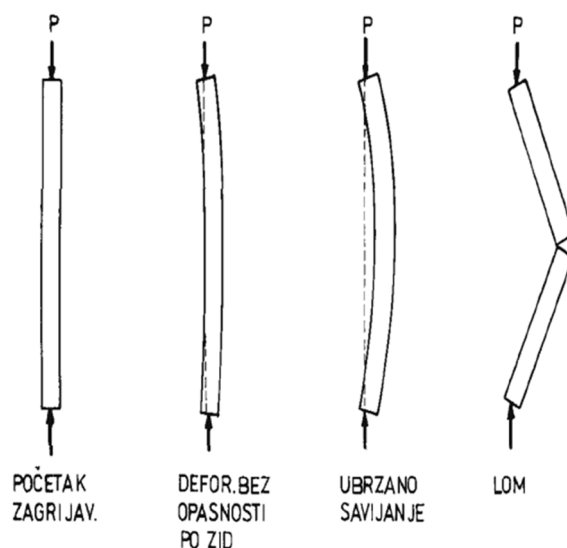
### **5.3. Opeka**

Uz kamen i drvo, opeka je najstariji građevni materijal. Ona je pečeni građevinski proizvod koji se dobiva pečenjem gline na temperaturi od 900 °C do 1100 °C. U normalnom formatu proizvodi se: puna opeka, porozna, šuplja s vertikalnim i horizontalnim šupljinama, obložna, opeka s posebnim zahtjevima kao što su klinker koji ima veću čvrstoću, zatim šamotna opeka za vatrostalne konstrukcije, radijalna za kružne zidove te silikatna opeka. U normalnom formatu danas se upotrebljava opeka za zidanje pregradnih zidova i kao obloga vanjskih zidova ili razne zaštitne obloge, npr. toplinske izolacije.[32]

U uvjetima požara opeka pokazuje brojna pozitivna svojstva pa su se oduvijek opekama gradile zgrade za koje se tražila sigurnost u slučaju požara. Najbolje se ponašaju pune opeke srednje kvalitete. Šamotna opeka, koja se proizvodi od prerađene gline s dodatkom šamotnog brašna, u požaru može izdržati temperature od 1600 °C do 1800 °C. Šuplje opeke se zagrijavaju brže i jače od pune opeke te su s gledišta vatrootpornosti nepovoljnije. Kada požari dostignu visoku temperaturu dolazi do oštećenja zidova od opeke gdje prvo stradavaju površinski slojevi. Ova oštećenja se javljaju kao raspucavanje opeke što dovodi do ljuštenja površinskog sloja. Pri temperaturi od 1100 °C dolazi do omekšavanja opeke po površini, a zatim i do razaranja konstrukcija – ova pojava događa se tek kod dugotrajnih i potpuno razvijenih požara.[32]

Obično posebna protupožarna zaštita zidova od opeke nije nužna, osim ako se ne traži produženo vatrootporno djelovanje. Poboljšanje vatrootpornosti može se postići dodatnim slojem negorivog termoizolacijskog materijala ili izvedbom mogućnosti prisilnog prozračivanja kanala šupljih građevinskih blokova ili šupljih pregradnih opeka.[6]

Kod gašenja požara trebamo voditi računa o temperaturnom šoku - zid se savija na onu stranu koja je izložena vatri. Temperaturni šok se događa zbog velike razlike između temperature vode i temperature zida te može prouzrokovati dodatna naprezanja i pukotine. Ispitivanje ponašanja zidova od opeke podrazumijeva zagrijavanje s jedne strane te postupan prijenos topline u unutrašnjost presjeka zida. Nejednaki temperaturni uvjeti dviju strana zida uzrokuju spomenuto savijanje prema izvoru topline - slika 17.[29,32]



Slika 17. - Različita stanja zida od opeke izloženog požaru[32]

#### 5.4. Beton

Beton je smjesa agregata, hidrauličnog veziva (cementa) i vode, koja tijekom vremena očvrstne. Negorivi je materijal te se često koristi kao izolator drugih građevinskih materijala od požara. Porastom temperature tlačna čvrstoća betona pada, a naglo opadanje čvrstoće počinje kod temperature između 300 °C i 360 °C.[29,32]

Razaranje strukture klasičnog betona na visokim temperaturama je posljedica različitih mehanizama razaranja, koji su međusobno zavisni, kao što su stvaranje

tlaka vode te kemijske promjene. Voda različito djeluje na očvršli beton, uglavnom negativno. Razarajući utjecaji vode pritom su vrlo dominantni. Porastom temperature do 100 °C postupno se gubi slobodna voda iz pora, a pod utjecajem temperature od 100 °C do 200 °C iz betona se oslobađa fizički apsorbirana voda. Iznad 400 °C počinje se gubiti i kemijski vezana voda. Vlaga (na 100 °C) prolazi prema vanjskoj površini kroz kapilare da bi na požarom izloženoj strani prešla u vodenu paru. Istodobno na hladnijoj, neizloženoj strani može doći do pojave kondenzata.[32]

Posljedica povišenja temperature je veliko povećanje volumena koje uzrokuje ljuskanje i otpadanje komponenata betona te stvaranje tlaka vode. Razaranje nastaje u trenutku kada je stvoreno više vodene pare od one količine koja može „pobjeći“ u strukturu pora u betonu. Također, veličina poprečnog presjeka utječe na otpornost betona u požaru – što je on masivniji to je otporniji u požaru. Betonske konstrukcije zahvaćene požarom i nakon prestanka zagrijavanja gube čvrstoću do 20 % što uzrokuje opasnost od urušavanja. Također, pojava pukotina i izbočina uslijed djelovanja požara ovisi o svojstvu betona, njegovoj gustoći, sadržaju vode (omjer cementa i vode) te vrsti upotrebljenog agregata (slika 18.).[29,32,33]



Slika 18. - Pucanje betona uslijed djelovanja požara (dehidracija betona)[33]

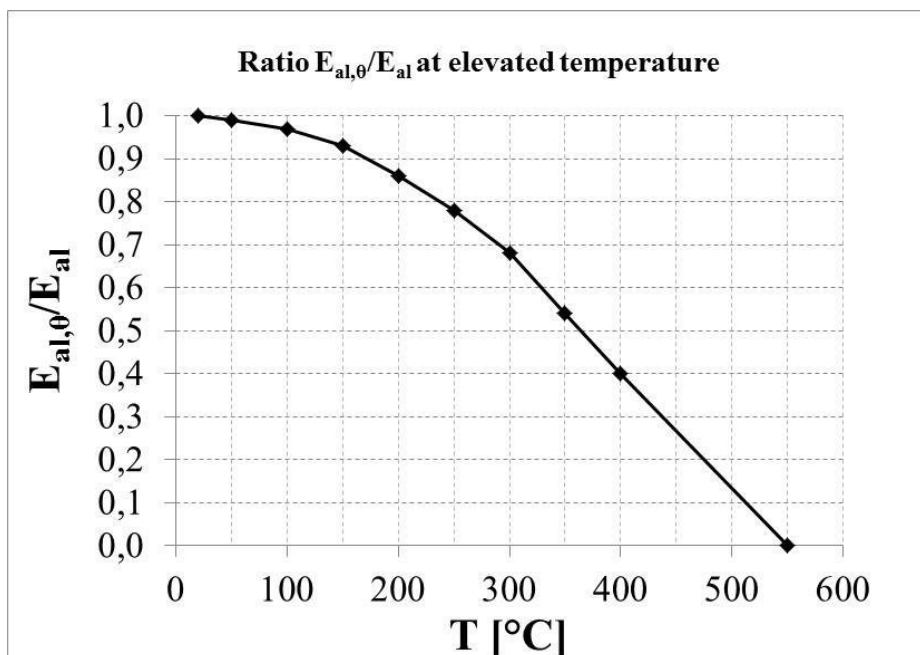
## 5.5. Aluminij

Aluminij je materijal koji se sve više susreće u graditeljstvu, no sve više s dodatcima budući da je vrlo mekan i lagan (nezaštićen ne može izdržati ni početne požare). Kao takav koristi se za izolacijska oblaganja uz uvjet da sredina nije agresivna. Dodatnim obradama mogu se poboljšati mehanička svojstva tako obogaćenog aluminija koje se nazivaju aluminijским legurama. Aluminij je, kao i svi ostali metali, negoriv materijal, ali mu je točka taljenja 660 °C što objašnjava potrebu zaštite. Najčešće se koristi kao sekundarni za građevne elemente (prozori, vrata, ukrasni profili).[29,32]

Uz relativno veliku osjetljivost na djelovanje požara bez dodatne obrade aluminija i visoku cijenu proizvodnje, postoji još niz svojstava koja negativno utječu na odabir aluminija za primjenu u konstrukcijama. Riječ je o velikoj deformabilnosti, osjetljivosti na problem stabilnosti te velikom smanjenju nosivosti u zoni utjecaja topline prilikom zavarivanja. Shodno tome, mehanička svojstva aluminija koji nije bio izložen procesu očvršćivanja pri povišenim temperaturama opadaju, što je i grafički prikazano na slici 19. gdje krivulja predstavlja međuovisnost temperature i modula elastičnosti<sup>4</sup> (E) na primjeru aluminija.[34,35]

---

<sup>4</sup> Youngov modul elastičnosti predstavlja mjeru krutosti materijala.

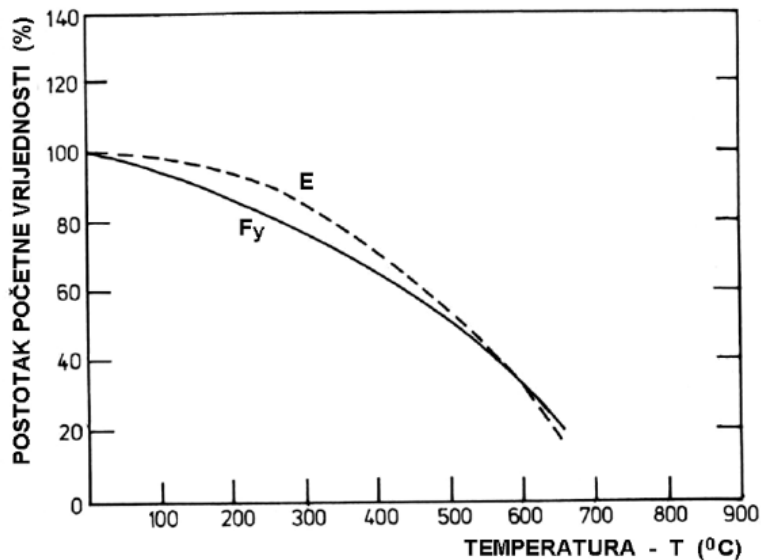


Slika 19. - Grafički prikaz međuovisnosti modula elastičnosti i temperature za aluminij[35]

## 5.6. Čelik

Čelik je građevinski materijal koji ima široku primjenu u graditeljstvu, kao materijal za čelične konstrukcije ili kao armaturni čelik u armirano betonskim konstrukcijama. Materijal je s visokom toplinskom vodljivošću, otporan je na starenje i truljenje (ali ne i na hrđanje ako nije zaštićen od utjecaja zraka i vlage), a točka taljenja je oko 1450 °C. Izrađen je od legura željeza i ugljika, a postoje i varijacije čelika s posebnim svojstvima poznatih kao pocinčani ili nehrđajući čelik. Čvrstoća i krutost čelika opadaju zagrijavanjem na visoke temperature (slika 20.). Ako požar dovoljno dugo potraje, može doći do postizanja kritične temperature čelika pri kojoj on više neće moći vršiti funkciju nosivosti pod opterećenjem (teretom).[6,29]





Slika 20. - Utjecaj rasta temperature na granicu čvrstoće ( $F_y$ ) i modul elastičnosti ( $E$ ) kod ugljičnog čelika[6]

Kritičnom temperaturom nazivamo onu znakovitu prosječnu temperaturu presjeka profila nekog čeličnog konstrukcijskog elementa pri kojoj prestaju njegova najmanja nosiva svojstva pod predviđenom razinom mehaničkog opterećenja. Kod izlaganja čelika temperaturnim uvjetima višim od 600 °C dulje od 15 minuta, nezaštićeni se čelik deformira što narušava stabilnost konstrukcije. Nekoliko je čimbenika koji utječu na kritičnu temperaturu konstrukcijskih elemenata od čelika u uvjetima požara.

Za čelične grede najvažniji čimbenici jesu:

- opterećenje konstrukcijskog elementa
- značajke upotrebljenog čelika
- uvjeti u kojima se nalaze ležajevi konstrukcijskog elementa
- stupanj izloženosti konstrukcijskog elementa u požaru[32,6]

Najvažniji čimbenici za čelične stupove su:

- opterećenje konstrukcijskog elementa
- značajke upotrebljenog čelika
- uvjeti u kojima se nalaze ležajevi konstrukcijskog elementa
- stupanj izloženosti konstrukcijskog elementa u požaru

- vitkost (odnos visine i promjera ili debljine) stupa[6]

Uobičajenom ugljičnom čeliku pri 350 °C čvrstoća iznosi svega 2/3 čvrstoće koju ima pri sobnoj temperaturi. Zbog toga se čelik zaštićuje prethodno spomenutim zaštitnim oblogama (betonom, gipsanim pločama) ili premazima. Također, u novije vrijeme se upotrebljava i čelik otporan na visoke temperature koje se javljaju u požaru (eng. *Fire Resistant Steel*) koji ima višu granicu popuštanja pri povišenim temperaturama od ugljičnog čelika. Navedeni čelik se može upotrebljavati bez zaštitnih obloga ili premaza što značajno smanjuje cijenu te skraćuje vrijeme izvođenja konstrukcije.[32]

## 5.7. Polimerni materijali

Polimerni materijali su tehnički upotrebljive tvari kojima osnovu čine polimeri. Uglavnom služe kao konstrukcijski materijali i upotrebljavaju se svuda gdje i uobičajeni materijali – metali, drvo, staklo, keramika, guma i slično. Mogu služiti i kao izolatori na raznim instalacijama i materijalima te se pojavljuju kao razni predmeti. Sintetski polimerni materijali proizvode se kemijskim reakcijama od monomera dobivenih uglavnom od nafte, zemnog plina ili ugljena. Polimerni materijali dijele se na:

- prirodne (celuloza, svila, vuna, prirodni kaučuk, prirodne smole, masna ulja itd.)
- umjetne (sintetski materijali ili plastika)[29,36]

Gorenje polimernih materijala skup je fizičko-kemijskih procesa, kao što su: fazni prijelazi, termička i termooksidativna destrukcija, nastanak nove faze, što rezultira pretvaranje početne tvari u produkte sagorijevanja. To je ujedno i višestupni proces kontroliran prijenosom mase i topline. Uslijed visokotemperaturnog razlaganja polimera pri gorenju se odvijaju homogeni i heterogeni procesi, koji često dovode do nastanka karbonizirajućeg sloja (nove faze). Dodatkom aditiva i punila u polimere

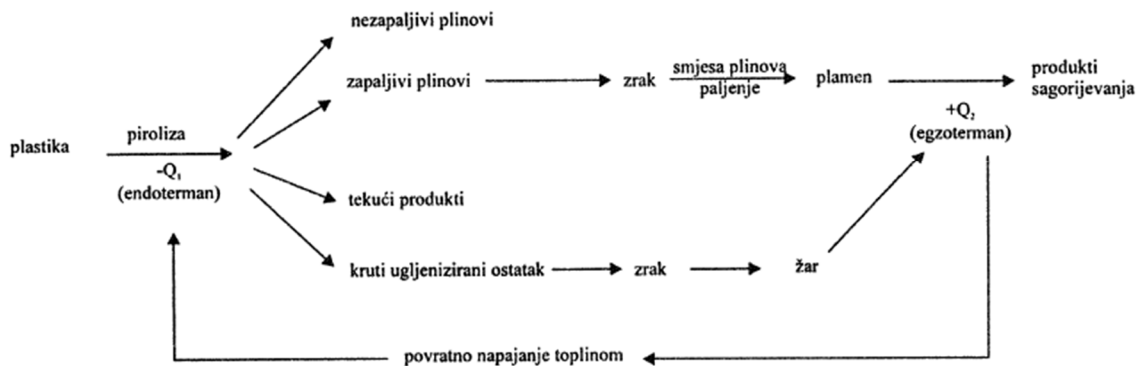
dobivaju se željena svojstva (primjerice krutost, žilavost ili poboljšana otpornost na požar) te na taj način i komercijalni proizvodi poput plastike.[4,27]

Glavne vrste umjetnih polimernih materijala su poliplasti, elastomeri i kemijska vlakna.

Poliplasti (trgovački naziv plastika ili plastične mase) dijele se na:

- plastomere – omekšaju i tale se pri povišenim temperaturama (njihovim gorenjem nastaje dim i kruti ostaci – igračke, kućanski pribor, materijali za izolaciju)
- elastomere – omekšaju kod povišenih temperatura (primjerice sintetska i prirodna guma)
- duroplaste – površinski sloj pougljeni te otežava gorenje (primjerice podne obloge, utičnice i prekidači)[29]

U procesu gorenja polimera mogu se izdvojiti četiri osnovna stupnja: zagrijavanje polimera, razlaganje na plinovite produkte i ugljenizirani ostatak, paljenje plinovitih produkata gorenja (slika 21.). Polimerni materijal se zagrijava vanjskim izvorom topline ili "povratnim napajanjem", uslijed čega dolazi do omekšavanja i topljenja. Proces gorenja praćen je izdvajanjem topline nastale kao posljedica oksidacijsko-redukcijskih reakcija. Toplina, koja se ne uspije odvesti u okolinu, podgrijava reagirajući sustav i povećava brzinu reakcije.[4]



Slika 21. - Shematski prikaz procesa gorenja plastike[4]

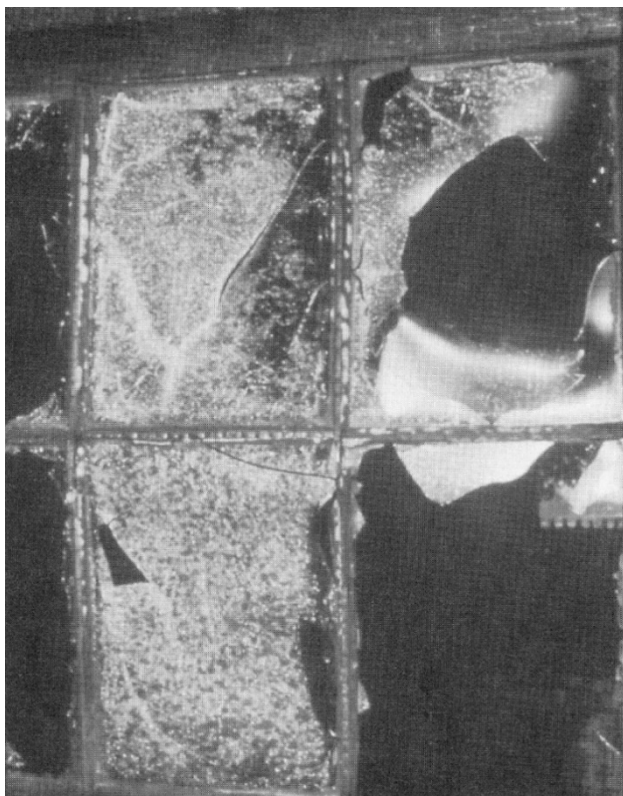
Polimerni građevinski materijali su zapaljivi, no kao i kod ostalih prethodno navedenih materijala, moguće je primijeniti način poboljšanja vatrootpornosti. U ovom slučaju radi se o dodavanju protupožarnih retardanata kako bi se usporilo njihovo zapaljenje i gorivost. Moguće je zajedničko djelovanje s kemikalijama, tvarima koje bubre (tvore pjenasti sloj na površini materijala) te tvarima koje se miješaju s polimerima (smanjuju zapaljivost).

## 5.8. Staklo

Staklo je tvrda i lomljiva tvar te je uglavnom najslabija točka građevine zahvaćene požarom. Staklo se dobiva topljenjem kvarcnog pijeska, sode, vapnenca ili dolomita kod temperature od 1500 °C, a raznom tehnologijom obrade dobivaju se razne vrste stakla. Lomljive je prirode te ne podnosi udarce, no sadrži visok stupanj vlačne čvrstoće. Zbog toga se koristi u izgradnji modernih zgrada u kombinaciji sa čeličnim okvirima gdje zamjenjuje konvencionalne zidove.[29,32]

Budući da oduvijek postoji želja ili nužnost da se u zidove kojima se omeđuju prostori postave otvori koji propuštaju svjetlost, prozori i vrata koji sadrže staklo slučaj su

svakodnevice. Kod povišenih temperatura jednostruko prozorsko staklo omekša i gubi svoju čvrstoću te vrlo brzo puca (temperatura oko 150 °C), a k tome pridonose i temperaturne promjene (naglo zagrijavanje ili hlađenje) – slika 22.



Slika 22. - Izgled popucalog stakla – posljedica djelovanja raspršenog mlaza hladne vode na pregrijano staklo[37]

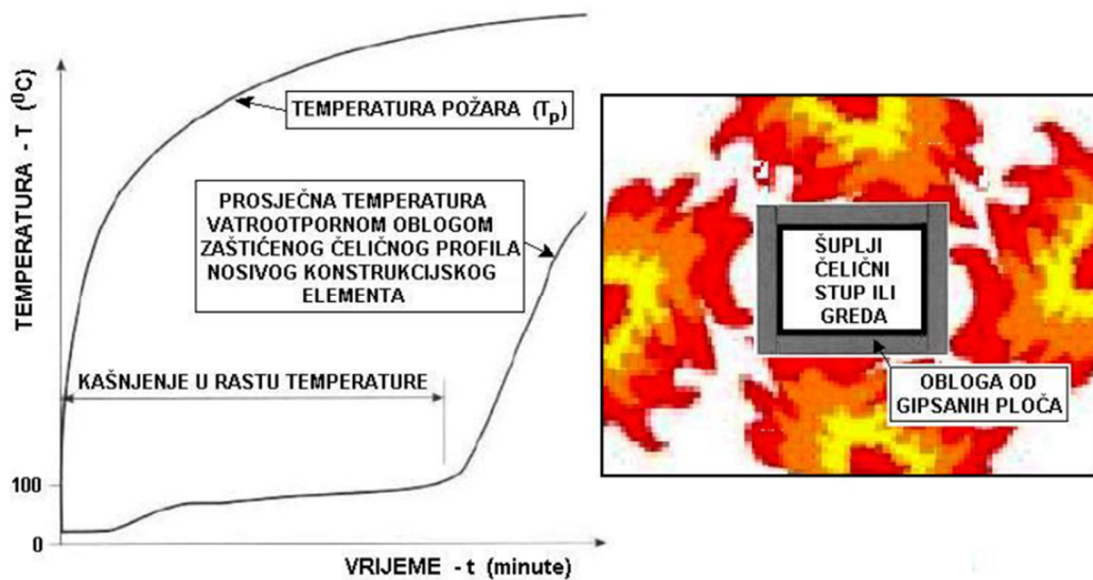
Na taj način dolazi do dovoda svježeg zraka koji pospješuje gorenje te izlaz dima i vatre iz prostorije. Korištenjem višeslojnih površina IZO stakla između kojih se nalazi zračni sloj postiže se ušteda energije, no ponašanje u požaru slično je kao i kod jednostrukog stakla.[21,29,32]

Iz tog razloga razvilo se nekoliko vrsta stakla. Vatrootporno staklo koje se može sastojati od nekoliko slojeva. Kod visoke temperature i u vremenu od 30, 60, 90 ili 120 minuta slojevi se šire i pretvaraju u črsti kompaktni materijal koji za vrijeme požara ne propušta požar, dim ili vruće pare. Nadalje, armirano staklo u sebi sadrži

metalnu mrežu koja onemogućuje ravnomjernu raspodjelu topline po masi stakla pri zagrijavanju, a daje i bolju mehaničku čvrstoću. Poslije 30-40 minuta na temperaturi od 800 °C staklo omekšava, deformira se i pomalo ispada. Važno je spomenuti i kaljeno staklo koje se proizvodi kaljenjem na određenoj temperaturi, a prilikom visokih temperatura mijenja strukturu te se kod razbijanja mrvi u manje komadiće a ne krhotine (smanjuje mogućnost ozljeda). U graditeljstvu se sve više koristi i staklena opeka kao dekorativni materijal.[21,29]

### **5.9. Gips ploče**

Gips je prirodni mineral koji u novijem građevinarstvu ima vrlo široku primjenu. Lagana konstrukcija temeljena na gipsanim pločama stječe sve veći tržišni udio zbog svoje fleksibilnosti, kraćeg vremena gradnje i manjih troškova. Nadalje, ploče od gipsa estetski su povoljan, lako primjenjiv i mehanički izdržljiv materijal za oblaganje zidova, podova i stropova, pokazujući dobre toplinske i izolacijske karakteristike. Zbog takvih svojstava gipsane ploče mogu se koristiti i kao zaštitni materijal drugih građevinskih i konstrukcijskih materijala – slika 23.[38]



Slika 23. - Dijagram i shematski prikaz ponašanja čelika iza gipsane obloge pod utjecajem požara[6]

Djelovanjem požara na gips molekule vode vezane u njegovoj kristalnoj rešetki oslobađaju se i prenose kroz njegovu masu (dehidracija gipsa). Na taj način se povećava vatrootpornost cjelokupne strukture. Tipična gipsana ploča sastoji se od sloja gipsa smještenog između dva lista pokrovnog papira. Kristalna rešetka sirovog gipsa sadrži približno 21 % mase kemijski vezane vode. Također, zbog vanjskog pokrovnog papira kojim je gips obložen, ploče će sporo gorjeti te neće pridonositi širenju požara svojim gorenjem. Izložena požaru, gipsana ploča prolazi kroz dvije endotermne reakcije razgradnje tijekom kojih se kemijski vezana voda disocira od kristalne rešetke te isparava što rezultira usporavanjem prijenosa topline od izvora do šticeenog građevinskog elementa. Shodno tome, toplinskim djelovanjem gdje dolazi do termodinamičke reakcije otpuštanja vode u obliku pare ploča počinje gubiti svoja prvobitna svojstva što uzrokuje trajno oštećenje ploče.[38]

## 6. EKSPERIMENTALNI DIO

Ponašanje prethodno navedenih građevinskih i konstrukcijskih materijala u uvjetima požara je većinom različito, no za neke od materijala postoje i zajedničke značajke ponašanja. Zbog toga će navedeni materijali biti izloženi teorijskoj komparativnoj analizi gdje će se razraditi njihova svojstva.

### 6.1. Komparativna analiza ponašanja materijala u uvjetima požara

Prvotna usporedba građevinskih i konstrukcijskih materijala temelji se na tabličnom prikazu (Tablica 4.) osnovnih vrijednosti za toplinsku difuzivnost ( $\lambda$ ) i toplinsku inerciju materijala ( $e$ ) budući da su to svojstva koja utječu na vrste i razine vatrootpornog ponašanja materijala konstrukcijskih elemenata i cijelih konstrukcija u uvjetima požara.

Tablica 4. - Osnovne vrijednosti za efuzivnost (toplinsku inerciju) i toplinsku difuzivnost nekih građevinskih materijala[39]

GRAĐEVNI MATERIJAL	TOPLINSKA DIFUZIVNOST $\alpha$ [ $10^6$ m <sup>2</sup> /s]	EFUZIVNOST (TOPLINSKA INERCIJA) $e$ [W√s/m <sup>2</sup> K]
Beton	1	2300
Staklo	0,9	1500
Drvo	0,15	300
Opeka	0,6	1100
Čelik	14	13000



Uz to, važno je spomenuti i karakteristične vrijednosti toplinske provodljivosti materijala (Tablica 5.).

Tablica 5. - Karakteristične vrijednosti toplinske provodljivosti[39]

MATERIJAL	VOLUMENSKA MASA [kg/m <sup>3</sup> ]	TOPLINSKA PROVODLJIVOST $\lambda$ [W/mK]
Čelik	7860	58
Beton	2400 - 1000	2 – 0,35
Opeka	1800 – 1300	0,8 – 0,55
Drvo	800 - 500	0,2 – 0,14

Iz tablice je vidljivo kako čelik ima visoke vrijednosti toplinskih obilježja, a u današnje je vrijeme odabir materijala između čelika i aluminija (te aluminijских legura) čest slučaj dvojbe. Zbog toga uspoređujemo njihove osnovne fizikalne karakteristike (Tablica 6.).

Tablica 6. - Usporedba osnovnih fizikalnih svojstava čistog aluminija i aluminijских legura u odnosu na čelik[34]

FIZIKALNA SVOJSTVA / METAL	ALUMINIJ / AL. LEGURE	ČELIK
TALIŠTE	660 °C	1425 - 1540 °C
GUSTOĆA PRI 20 °C	2700 kg/m <sup>3</sup>	7850 kg/m <sup>3</sup>
TOPLINSKO RASTEZANJE	23·10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>	12·10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>
SPECIFIČNI TOPLINSKI KAPACITET	~ 920 J/kg°C	~ 440 J/kg°C
TOPLINSKA VODLJIVOST	~ 240 W/m°C	~ 54 W/m°C
MODUL ELASTIČNOSTI	70 000 N/mm <sup>2</sup>	210 000 N/mm <sup>2</sup>

Iz navedenog tabličnog prikaza evidentno je sljedeće:

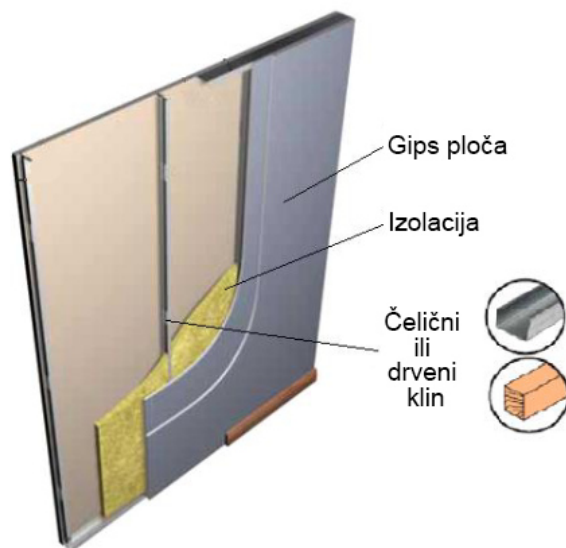
- toplinsko rastezanje aluminija je oko dva puta veće od toplinskog rastezanja čelika

- specifični toplinski kapacitet aluminijske legure je također oko dva puta veći od čelika
- za razliku od čelika, toplinska vodljivost aluminijske legure raste zajedno s temperaturom i znatno je veća od toplinske vodljivosti čelika (više od 3 puta)
- velika deformabilnost aluminijske legure (modul elastičnosti je 3 puta manji od čelika)[35]

Posebno niska gustoća, nisko talište i visoka toplinska vodljivost karakteriziraju aluminijske konstrukcije osjetljivijima na požar. Ipak, uvođenje racionalnih metoda procjene rizika, analiza požarnog scenarija može u nekim slučajevima dovesti do povoljnijeg odnosa temperature i vremena. Na taj način aluminijske konstrukcije mogu biti konkurentniji i toplinska svojstva aluminijskih legura mogu imati povoljan učinak na razvoj temperature u konstrukcijskoj komponenti.[34]

Zaključno, pitanja stabilnosti aluminijskih konstrukcijskih elemenata te ponašanje u uvjetima požara još su uvijek nedovoljno istražena, a različito ponašanje velikog broja aluminijskih legura u primjeni onemogućuje jednostavnu komparaciju s čelikom. U toj problematici sudjeluje i Europska normizacija kod proračuna konstrukcija na djelovanje požara (aluminij - EN 1999-1-2, čelik - EN 1993-1-2).[34,35]

Uzevši u obzir da se čelik i aluminij ne ponašaju povoljno u uvjetima požara, potrebno je povećati vatrootpornost tih elemenata materijalom s dobrim toplinskim i izolacijskim svojstvima. Upravo takva svojstva opisuju gipsane ploče koje su daljnji predmet analize – slika 24.



Slika 24. - Presjek tipičnog sklopa zida od gipsanih ploča[40]

Moderna rješenja vatrootpornosti nude sustavi od gips ploča. Takvi elementi suhe gradnje testirani su i certificirani, a ovisno o debljini i vrsti omogućavaju vatrootpornost do 180 minuta. Karakterizira ih uspješnost u širenju požara te usporavanju porasta temperature i zadržavanju integriteta konstrukcije.[41]

Posljedica djelovanja požara kod gipsanih ploča uzrokuje već spomenutu dehidraciju gipsa, a upravo to je slučaj i kod betona koji se počinje ljuštiti i pucati uslijed procesa dehidracije.

Nadalje, drvo i kamen pod utjecajem požara imaju zajedničko svojstvo propadanja, tj. zaobljavanja uglova gdje se takva pojava uočava na pravokutnim rubovima požaru izloženih dijelova konstrukcijskih elemenata od građevnog kamena ili drveta – slika 25.



Slika 25. - Usporedni prikaz zaobljavanja uglova pravokutnih rubova kamena i drveta[42,43]

Ono što je također važno napomenuti, povezujući tako građevinske i konstrukcijske materijale staklo i opeku, jest staklena opeka. Staklena opeka je gotovo zaboravljeni građevni materijal iz prošlosti, no u posljednje vrijeme ovaj materijal ponovno zauzima svoje mjesto u području gradnje, poglavito kad je riječ o definiciji arhitekture dnevnog svjetla u stambenim i poslovnim prostorima. Većina staklenih opeka danas ispunjava Europske norme protupožarne zaštite G30<sup>5</sup> i G60, a specijalne staklene opeke podižu ove standarde na još veću razinu i to do klase zaštite G90 i G120 – slika 26.[32]

---

<sup>5</sup> Protupožarna ostakljenja G klase vatrootpornosti te njihovi okviri i okovi moraju izdržati utjecaj plamena i dima tijekom određenog vremena prilikom ispitivanja vatrootpornosti prema DIN standardu 4102.



Slika 26. - Prozor ostakljen staklenim opekama nakon požara[32]

Nadalje, sintetski polimerni materijali su organske tvari pa su na povišenim temperaturama, posebno na višim od 400 °C, podložni nagloj razgradnji. Takvo ponašanje većine polimera svrstava ih u zapaljive materijale i ograničava im primjenu u mnogim područjima, a u prvom redu u građevinarstvu. Iz tog se razloga djeluje na smanjenju gorivosti polimernih materijala dodatkom posebnih spojeva. Oni se ugrađuju u polimerni materijal miješanjem u talini, kopolimerizacijom<sup>6</sup> ili naknadno obradom površine.[4]

No, polimerni materijali nisu jedinstven slučaj povećanja vatrootpornosti dodatkom posebnih spojeva u prvobitni materijal.

Kako bi se povećala vatrootpornost materijala, kemijski se elementi/spojevi dodaju i:

- Drvetu – dodatkom vode (vlaženjem) što uzrokuje usporavanje procesa gorenja. Voda ima veći specifični toplinski kapacitet od suhog drveta, a zagrijavanjem i isparavanjem vode se troši toplina. Također, voda koja isparava s površine smanjuje zapaljivost smjese zraka i piroliznih plinova.[44]

---

<sup>6</sup> Kopolimerizacija je proces polimerizacije kojom nastaje kopolimer.

- Betonu – dodatkom polipropilenskih vlakana suzbija se eksplozivno ljuštenje betona te se povećavaju vatrootporna svojstva konstrukcije.[45]
- Aluminiju – dodatkom magnezija, silicija, mangana, bakra i cinka tvoreći aluminijsku leguru kojom se postiže veća razina vatrootpornosti.[34]
- Čeliku – dodatkom kroma ili silicija tvoreći čeličnu leguru povišuje se toplinska čvrstoća i vatrootpornost (takav se čelik često koristi za izradu ventila motora s unutarnjim izgaranjem budući da je izložen temperaturama do 900 °C)[46]
- Staklu – ugrađivanjem žičane mreže u materijal tijekom proizvodnje ili dodatkom keramičkih spojeva suzbija se širenje toplinskog zračenja.[32,47]
- Gipsanim pločama – dodatkom armaturnih vlakana iz staklene svile u jezgru materijala. Staklenim vlaknima postiže se ojačavanje upuštenih rubova, a time i jednaka čvrstoća ploče na svim dijelovima (ukoliko je gipsana ploča lakša, lakše će i popucati, a što je više pukotina to je intenzivnije raspadanje u uvjetima požara).[48]

Različitim građevinskim i konstrukcijskim materijalima se svojstva vatrootpornosti mogu dodatno poboljšati, no važno je uzeti u obzir u koju svrhu se materijal koristi te čimbenike ekonomičnosti i dugotrajnosti.

## 7. POŽARNO INŽENJERSTVO

Područje požarnog inženjerstva dodatno razrađuje djelovanje požara na građevinske objekte, a bavi se i ispitivanjem požarnih svojstava materijala i konstrukcija. Kako bi se svojstva proučavanih materijala pravilno analizirala, sagledavaju se: negorivost, zapaljivost, širenje plamena, otpuštanje topline, pojava gorućih kapljica, proizvodnja dima; promjena tehničkih svojstava građevnih materijala pri visokim požarnim temperaturama; načela ispitivanja, priprema ispitnih uzoraka i metode ispitivanja negorivosti, zapaljivosti, kalorijskog potencijala, gorenjem pojedinačnog predmeta, gorenja podova uporabom zračećeg izvora topline; kriteriji razredbe i razredba građevnih materijala/elemenata; područje primjene razredbe i sadržaj izvještaja o razredbi te sustav ocjenjivanja sukladnosti građevnih proizvoda ovisno o razredu reakcije na požar.[49]

Općenito, požarno inženjerstvo je razvoj znanstvenih metoda kojim bi se došlo do objektivnije ocjene djelovanja požara na ljude i građevine u konkretnoj situaciji, a time i povećanja sigurnosti osoba i objekata. Pri tome je od bitnog značaja utvrđivanje granice tzv. prihvatljivog i realnog rizika i s tim u vezi ekonomičnost primijenjenih mjera. Ovo je posebno vidljivo kad se mjere zaštite od požara, propisane postojećom regulativom usporede s mjerama zaštite od požara koje su određene metodama požarnog inženjerstva. U pravilu je evidentna neselektivnost regulative u kojoj su određene mjere propisane "po osjećaju" zakonodavca što nerijetko dovodi do pretjerivanja (posebno u dijelu vatrootpornosti konstrukcije) ili do međusobne neusklađenosti zahtjeva unutar istog propisa, a često i između propisa iz područja zaštite od požara u cjelini.[50]

Budući da je ponašanje građevinskih i konstrukcijskih materijala u uvjetima požara zajednički sklop različitih znanosti, proučavanje materijala je izuzetno složen proces koji zahtijeva znanja iz različitih područja te balansirane uvjete ispitivanja što se na koncu povezuje s različitim normama.

## 8. ZAKLJUČAK

Građevinski i konstrukcijski materijali koji su opisani u radu nalaze se u našoj okolini svakodnevno. Analizom svakog pojedinog materijala, vodeći se njihovim toplinskim obilježjima i specifičnim fizikalno-kemijskim svojstvima, važno je istaknuti kako se svaki materijal u uvjetima požara ponaša drugačije. Dakako, neki se materijali slično ponašaju, ali to se događa samo u određenim uvjetima (stadij požara, temperatura, okolni materijali, vrsta konstrukcije i sl.).

U novije vrijeme sve se više pridaje važnost vatrootpornim svojstvima materijala koji se koriste, a svojstvo vatrootpornosti građevinskih i konstrukcijskih materijala propisano je različitim aktima i normama. Napretkom tehnologije i znanstvenih područja, poboljšanje svojstva vatrootpornosti materijala izvodi se na niz različitih načina. Prvenstveno, materijalima se dodaju različiti spojevi (leguriranje, korištenje armaturnih/polipropilenskih vlakana), a uz takve postupke izvode se i dodatne zaštite materijala metodama ispunjavanja, oblaganja te impregniranja konstrukcijskih i građevinskih elemenata. Također se može izvoditi i kombinirana zaštita navedenih metoda.

Kao dio pasivne protupožarne zaštite građevine, od iznimne je važnosti nužna razina vatrootpornosti konstrukcija, konstrukcijskih elemenata i ugradbenih elemenata građevina. Kako bi se nužna razina vatrootpornosti postigla, treba uzeti u obzir kako se na ponašanje u požaru ispituju/provjeravaju samo konstrukcijski elementi i ugradbeni elementi građevina. Takva ispitivanja provode se samo zbog usporedbe ponašanja pojedinih međusobno usporedivih vrsta elemenata jednake namjene, a koja nisu prava slika njihova mogućeg ponašanja u uvjetima mogućeg realnog požara. Od proizvođača deklarirani rezultati ispitivanja pojedinih konstrukcijskih sastavnica građevine ne mogu se upotrijebiti kao pouzdan pokazatelj/mjerilo vatrootpornosti cijelih konstrukcija ili građevina.



Vodeći se time, najbitnije je djelovati na prevenciji samog nastanka požara te uz pasivnu zaštitu od požara, provoditi i kombinaciju aktivnih mjera gdje se postiže najbolja zaštita od požara. Takvim interdisciplinarnim pristupom rizik od nastanka i širenja požara svodi se na minimum.

## 9. LITERATURA

- [1] Drakulić, M., (2015/2016), Osnove nastanka i širenja požara u građevini, Predavanja, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
- [2] Metode istraživanja PE (D. Kulišić, MUP RH 2004) - Izvod skripte za Spec.studij. ZOP u VuKa
- [3] Pačelat, R. i Zorić, Z. (2003). Istraživanje uzroka požara. ZIRS. Zagreb.
- [4] Protupožarna tehnološka preventiva, I. Gulan (Biblioteka Nading, 1997.)
- [5] Grupa autora.: „Priručnik za osposobljavanje vatrogasnih dočasnika i časnika“, Hrvatska vatrogasna zajednica, Zagreb, 2006., ISBN 953-6385-16-3.
- [6] Matusinović, Z.: „Ponašanje građevinskih i konstrukcijskih materijala u uvjetima požara“, Powerpoint prezentacija, kolegij Konstrukcijska protupožarna i protueksplozijska preventiva, Veleučilište u Karlovcu, (2019.)
- [7] Kopričanec-Matijevac, Lj. (2018). Oblikovanje požarnih sektora, DUZS – Učilište vatrogastva i zaštite i spašavanja, Vatrogasna škola Zagreb, dostupno: <https://docplayer.org/76472265-Oblikovanje-pozarnih-sektora.html>, pristupljeno: 05.05.2021.
- [8] Pavelić, Đ. (2016). Temeljni zahtjevi zaštite od požara građevina (II. dio). Sigurnost, 58 (4), 355-359. dostupno: <https://hrcak.srce.hr/179731>, pristupljeno: 06.05.2021.
- [9] Pravilnik o otpornosti na požar i drugim zahtjevima koje građevine moraju zadovoljiti u slučaju požara (NN 29/13)
- [10] Franco, J.T., (2019), ArchDaily, Reaction And Fire Resistance: How Are Materials Classified In The Event Of A Fire?, dostupno: <https://www.archdaily.com/916062/reaction-and-fire-resistance-how-are-materials-classified-in-the-event-of-a-fire>, pristupljeno: 07.05.2021.
- [11] Toplinska vodljivost, Wikipedia, dostupno: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Toplinska\\_vodljivost](https://hr.wikipedia.org/wiki/Toplinska_vodljivost), pristupljeno: 07.05.2021.
- [12] Šimetin, V.: Građevinska fizika, Fakultet građevinski znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1983.
- [13] Toplinski kapacitet, Wikipedia, dostupno: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Toplinski\\_kapacitet](https://hr.wikipedia.org/wiki/Toplinski_kapacitet), pristupljeno 09.05.2021.
- [14] Byfors, J.: Plain concrete at early age, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Sweden, 1980.
- [15] Jaković, M., Slaviček I.: „Analiza toplinskih svojstava građevnih materijala primjenom metode vrućeg diska“, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu Zagreb, 2010.
- [16] Generalić, Eni. "Toplinsko rastezanje." *Englesko-hrvatski kemijski rječnik & glosar*. 20 lis. 2018. KTF-Split., dostupno: <https://glossary.periodni.com>, pristupljeno: 10.05.2021.
- [17] Toplinsko istezanje, Wikipedia, dostupno: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Toplinsko\\_istezanje](https://hr.wikipedia.org/wiki/Toplinsko_istezanje), pristupljeno 10.05.2021.

- [18] Benković, D., Todorovski, Đ. i Peretin, S. (2019). Sprečavanje pojave i širenja požara na informatičkoj opremi. *Sigurnost*, 61 (2), 133-144., dostupno: <https://doi.org/10.31306/s.61.2.2>, pristupljeno: 10.05.2021.
- [19] Pavelić, Đ. (2015). PONAŠANJE GRAĐEVINSKOG MATERIJALA U POŽARU. *Sigurnost*, 57 (3), 0-0. dostupno: <https://hrcak.srce.hr/153094>, pristupljeno 11.05.2021.
- [20] Građevine, Wikipedia, dostupno: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Gra%C4%91evine>, pristupljeno 11.05.2021.
- [21] Pavelić, Đ. (2016). Temeljni zahtjevi zaštite od požara građevina (I. dio). *Sigurnost*, 58 (3), 257-260., dostupno: <https://hrcak.srce.hr/167719>, pristupljeno 11.05.2021.
- [22] Konstrukcijski element, Wikipedia, dostupno: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Konstrukcijski\\_element](https://hr.wikipedia.org/wiki/Konstrukcijski_element), pristupljeno: 11.05.2021.
- [23] European Steel Design Education Programme, Protection: Fire, *Lecture 4B.4: Practical Ways of Achieving - Fire Resistance of Steel Structures* (2016.)
- [24] Intumescent, Wikipedia, dostupno: <https://en.wikipedia.org/wiki/Intumescent>, pristupljeno 14.05.2021.
- [25] Carević, M.: „Novi sustav EU klasifikacije građevinskih konstrukcija; elemenata i materijala“, Powerpoint prezentacija, HUZOP, 2011., dostupno: [http://www.huzop.hr/wp-content/uploads/2014/12/EN\\_NORME\\_SEMINAR\\_30112011.pdf](http://www.huzop.hr/wp-content/uploads/2014/12/EN_NORME_SEMINAR_30112011.pdf), pristupljeno: 12.05.2021.
- [26] Pravilnik o izmjenama i dopunama pravilnika o otpornosti na požar i drugim zahtjevima koje građevine moraju zadovoljiti u slučaju požara (NN 87/15)
- [27] Harper C., „Handbook of bulding materials for fire protection“, The McGraw-Hill Companies (2004.), ISBN 0-07-143330-9
- [28] Kamen, Wikipedia, dostupno: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Kamen>, pristupljeno: 18.05.2021.
- [29] „Zaštita od požara u graditeljstvu“, dostupno: <http://pubweb.carnet.hr/vzgnm/wp-content/uploads/sites/157/2014/09/GRAD-casnik.pdf>, pristupljeno: 18.05.2021.
- [30] Hajpál, M.: *Fire Damaged Stone Structures in Historical Monuments - Laboratory Analyses of Changes in Natural Stones by Heat Effect*, Non-profit Company for Quality Control and Innovation in Building (EMI), 2010., dostupno: <https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB18738.pdf>, pristupljeno: 18.05.2021.
- [31] Cook, D.: *Have we learned the lessons of the Willingham case?*, A National Survey of Fire Investigators, 2015., dostupno: [http://www.forensicrosearchdigest.com/yahoo\\_site\\_admin/assets/docs/Cook\\_-\\_Thesis\\_FINAL\\_DRAFT\\_-\\_AS\\_BOUND.259175111.pdf](http://www.forensicrosearchdigest.com/yahoo_site_admin/assets/docs/Cook_-_Thesis_FINAL_DRAFT_-_AS_BOUND.259175111.pdf), pristupljeno: 18.05.2021.
- [32] Kopričanec - Matijevac Lj., „Građevinski materijali u požaru - reakcija na požar“, dostupno: [https://www.academia.edu/30541028/Građevinski\\_materijali\\_u\\_požaru\\_reakcija\\_na\\_požar](https://www.academia.edu/30541028/Građevinski_materijali_u_požaru_reakcija_na_požar), pristupljeno: 18.05.2021.

- [33] Whitley, C.E.: *The effects of Fire on Concrete*, EDT Engineers (2019.), dostupno: <https://www.edtengineers.com/blog-post/fire-effects-concrete>, pristupljeno: 19.05.2021.
- [34] Skejić D., Boko I., Torić N.: *Aluminij kao materijal za suvremene konstrukcije*, Građevinar 67 (2015.), dostupno: <http://www.casopis-gradjevinar.hr/assets/Uploads/JCE-67-2015-11-3-1395.pdf>, pristupljeno 19.05.2021.
- [35] Skejić D., Ćurković I., Jelčić M.: *Behaviour of aluminium structures in fire*, Sveučilište u Zagrebu, (2015.), dostupno: [https://www.researchgate.net/publication/283010292\\_Behaviour\\_of\\_aluminium\\_structures\\_in\\_fire](https://www.researchgate.net/publication/283010292_Behaviour_of_aluminium_structures_in_fire), pristupljeno: 19.05.2021.
- [36] Polimerni materijali, Wikipedia, dostupno: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Polimerni\\_materijali](https://hr.wikipedia.org/wiki/Polimerni_materijali), pristupljeno: 20.05.2021.
- [37] Jakšić, L.: „Metode istraživanja požara“, Powerpoint prezentacija, kolegij Metode istraživanja požara, Veleučilište u Karlovcu, (2019./2020.)
- [38] Kolaitis D., Asimakopoulou E., Founti M.: *Fire behaviour of gypsum plasterboard wall assemblies: CFD simulation of a full-scale residential building*, National Technical University of Athens (2017.), dostupno: <https://doi.org/10.1016/j.csfs.2016.11.001>, pristupljeno: 22.05.2021.
- [39] Willems, W.M.; Schild, K.; Dinter S.: *Vieweg Građevinska fizika - priručnik*, Građevinska knjiga, Beograd, 2008.
- [40] Rahmanian, I.: *Thermal and mechanical properties of gypsum boards and their influences on fire resistance of gypsumboard based systems*, School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, University of Manchester, (2011.)
- [41] Knauf, Fire safety precautions, *Fire Protection*, dostupno: <http://www.knauf.com.lb/en/performances/fire-protection/>, pristupljeno: 24.05.2021.
- [42] Delegou E., Apostolopoulou M., Ntoutsis I.: *The Effect of Fire on Building Materials: The Case-Study of the Varnakova Monastery Cells in Central Greece*, National Technical University of Athens (2019.), dostupno: [https://www.researchgate.net/publication/332781782\\_The\\_Effect\\_of\\_Fire\\_on\\_Building\\_Materials\\_The\\_Case-Study\\_of\\_the\\_Varnakova\\_Monastery\\_Cells\\_in\\_Central\\_Greece](https://www.researchgate.net/publication/332781782_The_Effect_of_Fire_on_Building_Materials_The_Case-Study_of_the_Varnakova_Monastery_Cells_in_Central_Greece), pristupljeno: 25.05.2021.
- [43] Mercadal, T., Menorca Aldia, (Galería de fotos) Así ha quedado la vivienda incendiada en Maó, *Imagen de la cocina, completamente calcinada* (2017.), dostupno: <https://menorcaaldia.com/2017/02/14/galeria-de-fotos-asi-ha-queda-la-vivienda-incendiada-en-mao/>, pristupljeno: 25.05.2021.
- [44] VTT Technical Research Centre of Finland, InnoFireWood, *Improving fire performance of wood* (2006.), dostupno: <http://virtual.vtt.fi/virtual/innofirewood/stateoftheart/database/improving/improving.html>, pristupljeno: 25.05.2021.
- [45] Gravit M., Golub E.: *Increase of fire resistance of reinforced concrete structures with polypropylene microfiber*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (2018.), dostupno: <https://www.matec->

[conferences.org/articles/mateconf/pdf/2018/104/mateconf\\_eece2018\\_03005.pdf](https://conferences.org/articles/mateconf/pdf/2018/104/mateconf_eece2018_03005.pdf), pristupljeno: 25.05.2021.

[46] Legirani čelik, Wikipedia, dostupno:

[https://hr.wikipedia.org/wiki/Legirani\\_%C4%8Delik](https://hr.wikipedia.org/wiki/Legirani_%C4%8Delik), pristupljeno: 25.05.2021.

[47] M3 Glass Technologies, *A Guide to Fire-Rated Glass Products* (2018.), dostupno: <https://www.m3glass.com/blog/fire-rated-glass-guide/>, pristupljeno: 25.05.2021.

[48] Sultan M.A., Loughheed G.D.: *Fire Resistance of Gypsum Board Wall Assemblies*, National Research Council of Canada (2010.), dostupno:

[https://www.researchgate.net/publication/44055016\\_Effect\\_of\\_insulation\\_on\\_the\\_fire\\_resistance\\_of\\_small-scale\\_gypsum\\_board\\_wall\\_assemblies](https://www.researchgate.net/publication/44055016_Effect_of_insulation_on_the_fire_resistance_of_small-scale_gypsum_board_wall_assemblies), pristupljeno: 25.05.2021.

[49] Institut Ruđer Bošković, Požarno inženjerstvo, *Ponašanje građevinskih materijala i elemenata u požaru*, dostupno:

<https://www2.irb.hr/korisnici/mpavicic/pi/fire2aa-kolegiji.html>, pristupljeno: 31.05.2021.

[50] Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, *Požarno inženjerstvo*, dostupno:

[https://www.grad.unizg.hr/zavod\\_za\\_materijale/pozarno\\_inzenjerstvo](https://www.grad.unizg.hr/zavod_za_materijale/pozarno_inzenjerstvo), pristupljeno: 31.05.2021.

## 10. PRILOZI

### 10.1. Popis simbola (korištenih kratica)

J	džul
GJ	gigadžul
m <sup>2</sup>	kvadratni metar
GPO	specifično požarno opterećenje
°C	Celzijev stupanj
NN	Narodne novine
fr.	francuski jezik
K	kelvin
W	vat
kg	kilogram
m <sup>3</sup>	kubični metar
s	sekunda
kJ	kilodžul
mm	milimetar
cm	centimetar
kcal	kilokalorija
%	postotak
eng.	engleski jezik
N	njutn

## 10.2. Popis slika

Slika 1. - Shematski prikaz nužnih uvjeta za zapaljenje i održavanje nesmetanog/neprekinutog izgaranja čvrstih gorivih tvari koje izgaraju isključivo žarom (tinjanjem)	2
Slika 2. - Shematski prikaz nužnih uvjeta za zapaljenje i održavanje nesmetanog/neprekinutog izgaranja gorivih tvari koje izgaraju isključivo plamenom ili kombinacijom plamćenja i žarenja	3
Slika 3. - Prikaz međuprostorne interreakcije na primjeru tvorničke zgrade	6
Slika 4. - Formiranje požarnih sektora	7
Slika 5. - Shematski prikaz svakog pojedinog REI faktora vatrootpornosti	13
Slika 6. - Linearni tok topline kod provođenja ili kondukcije topline	16
Slika 7. - Ovisnost toplinske provodljivosti zida od opeke o vlažnosti opeke	18
Slika 8. - Dijagram vrijednosti toplinskog kapaciteta za opeku, beton i mineralnu vunu	20
Slika 9. - Dijagrami promjene vrijednosti veličine toplinske difuzivnosti čelika i zida s promjenama njihovih temperatura	21
Slika 10. - Dijagram shematskih stadija/faza razvoja požara krutina	24
Slika 11. - Shematski prikaz primjene protočnog sustava opskrbe rashladnom vodom na presjeku čelične konstrukcije	27
Slika 12. - Primjeri zaštite konstrukcije od požara oblaganjem (stupovi i grede)	28
Slika 13. - Usporedni prikaz izgaranja spoja čeličnih cijevi zaštićenih slojem premaznog sredstva	29
Slika 14. - Vidljiva požarna oštećenja arhitektonskog kamena na crkvi Sv. Mihovila u Budimpešti	38
Slika 15. - Vrste zona drveta koje nastaju djelovanjem požara	40
Slika 16. - Karbonizirane naprsline u obliku tzv. „krokodilske kože“ (eng. Alligatoring)	41
Slika 17. - Različita stanja zida od opeke izloženog požaru	43
Slika 18. - Pucanje betona uslijed djelovanja požara (dehidracija betona)	44
Slika 19. - Grafički prikaz međuovisnosti modula elastičnosti i temperature za aluminij	46
Slika 20. - Utjecaj rasta temperature na granicu čvrstoće ( $F_y$ ) i modul elastičnosti ( $E$ ) kod ugljičnog čelika	47
Slika 21. - Shematski prikaz procesa gorenja plastike	50
Slika 22. - Izgled popucalog stakla – posljedica djelovanja raspršenog mlaza hladne vode na pregrijano staklo	51
Slika 23. - Dijagram i shematski prikaz ponašanja čelika iza gipsane obloge pod utjecajem požara	53
Slika 24. - Presjek tipičnog sklopa zida od gipsanih ploča	57
Slika 25. - Usporedni prikaz zaobljavanja uglova pravokutnih rubova kamena i drveta	58
Slika 26. - Prozor ostakljen staklenim opekama nakon požara	59

### 10.3. Popis tablica

Tablica 1. - Klasifikacija materijala prema gorivosti (HR DIN 4102)	32
Tablica 2. - Klase građevinskih materijala s obzirom na reakciju na požar u skladu s HRN EN 13501-1	34
Tablica 3. - Usporedba klasa reakcije na požar (HRN EN) s klasama gorivosti (HRN DIN)	35
Tablica 4. - Osnovne vrijednosti za efuzivnost (toplinsku inerciju) i toplinsku difuzivnost nekih građevinskih materijala	54
Tablica 5. - Karakteristične vrijednosti toplinske provodljivosti	55
Tablica 6. - Usporedba osnovnih fizikalnih svojstava čistog aluminija i aluminijskih legura u odnosu na čelik	55