Otpornost građevnog drva na djelovanje požara

Zanić, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Forestry / Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:108:193265

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

University of Zagreb Faculty of Forestry and Wood Technology

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

ŠUMARSKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U ZAGREBU

DRVNA TEHNOLOGIJA

SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

DRVNOTEHNOLOŠKI PROCESI

LUKA ZANIĆ

OTPORNOST GRAĐEVNOG DRVA NA DJELOVANJE POŽARA

DIPLOMSKI RAD

ZAGREB , 2018.

ŠUMARSKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U ZAGREBU

DRVNOTEHNOLOŠKI ODSJEK

OTPORNOST GRAĐEVNOG DRVA NA DJELOVANJE POŽARA

DIPLOMSKI RAD

Diplomski studij:Drvnotehnološki procesi

JMBAG: 0068218423

Broj indeksa:611/2015

Datum odobrenja teme: 29.3.2017.

Datum predaje rada: 16.7.2018.

Datum obrane rada: 14.9.2018.

Zagreb, rujan, 2018.

Dokumentacijska kartica

Naslov	Otpornost građevnog drva na djelovanje požara
Title	Fire resistance of building wood
Autor	Luka Zanić
Adresa autora	Zagrad 96A, Benkovac
Mjesto izrade	Zagreb
Vrsta objave	Diplomski rad
Mentor	Doc. dr. sc. Vjekoslav Živković
Izradu rada pomogao	Doc. dr. sc. Vjekoslav Živković
Godina objave	2018.
Obujam	VI+54 stranica, 10 tablica, 19 slika, 38 navoda literature
Ključne riječi	drvo, otpornost ka gorenju, zapaljivost, vatrozaštitna sredstva
Keywords	wood, fire resistance, flammability,fire retardants
Sažetak	Jedan od nedostataka s kojim se drvo i drvni materijali suočavaju je podložnost gorenju. Uvriježeno je mišljenje da u uvjetima požara drvo brže otkazuje u usporedbi s drugim građevnim materijalima. Istina je međutim da drvo i materijali od drva gore postepeno uslijed čega dolazi do smanjenja poprečnog presjeka pa je potrebno izvjesno vrijeme dok (primjerice lamelirani nosači) ne pokleknu pred vatrenom stihijom. Može li se kontrolirati brzina širenja vatre korištenjem zaštitnih sredstava kako bi se drvu povećala otpornost na djelovanje požara te tako smanjila razina nastale štete ali i zaštitio ljudski život? Je li drvo uistinu nekonkurentno za primjenu u uvjetima mogućeg požara? Ovaj diplomski rad donosi pregled činjenica o ponašanju drva u uvjetima požara: mehanizam sagorjevanja drva, kemijske i fizičke procese, utjecaj svojstava drva, mogućnost zaštite drva i povećanja požarne otpornosti, usporedba s drugim građevnim materijalima u svrhu stjecanja dodatnih znanja o ovoj temi i razbijanju predrasuda o drvu kao materijalu koji samo gori.

SADRŽAJ

1. POJAM POŽARA I GORENJA 1

2. O PRIMJENI DRVA PRI IZLOŽENOSTI POŽARU 3

3. MEHANIZAM SAGORIJEVANJA DRVA 3

4. KEMIJSKI I FIZIČKI PROCESI PRI SAGORIJEVANJU DRVA 7

5. PONAŠANJE DRVA U POŽARU 11

6.UTJECAJ SVOJSTAVA DRVA NA PONAŠANJE U POŽARU 15

7. PRORAČUN POŽARNE OTPORNOSTI DRVENE KONSTRUKCIJE 16

7.1. METODA SMANJENOG POPREČNOG PRESJEKA 22

7.2.METODA REDUCIRANIH SVOJSTAVA MATERIJALA 23

8. USPORAVANJE GORENJA DRVA 24

8.1. PREKRIVNI MATERIJALI ZA USPORAVANJE GORENJADRVA 26

8.2. ZAŠTITA DRVA IMPREGNACIJSKIM MATERIJALIMA 29

8.3. METODE ISPITIVANJA GORIVOSTI 33

8.4. SVOJSTVA I PRIMJENA ZAŠTIĆENOG DRVA 37

9. USPOREDBA POŽARNE OTPORNOSTI DRVA I DRUGIH GRAĐEVNIH MATERIJALA 39

9.1. BETON 44

9.2. ČELIK 48

ZAKLJUČAK 50

PREDGOVOR

Ovom prilikom bi se htio zahvaliti mentoru *doc. dr. sc.*Vjekoslavu Živkoviću koji je svojim savjetima i znanjem potpomogao izradu ovog diplomskog rada. Također se zahvaljujem i svim profesorima na Šumarskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, koji su mi tijekom školovanja stajali na raspolaganju te strpljivo prenosili znanje. Želim spomenuti i nesebičnost kolega koji su mi pomagali da prevladam probleme tokom školovanja, kao i kolegama sa drugih fakulteta koji su mi ustupili dio literature potrebnu za izradu samog rada. Najveću zahvalnost dugujem obitelji i prijateljima koji su tokom obrazovanja bili od velike pomoći bez čije bi podrške studiranje bilo gotovo nemoguće. Hvala svima.

UVOD

Drvo je prirodni materijal te kao takav ima određene prednosti ali i nedostatke koje nastojimo umanjiti ovisno o uvjetima primjene. Dobra mehanička svojstva (čvrstoća na savijanje, otpornost na tlačna i vlačna naprezanja, čvrstoća na smik...), u kombinaciji s izuzetno povoljnim omjerom mase i volumena (gustoća drva), čine drvo nezamjenjivim u uvjetima povećanih opterećenja u graditeljstvu. Graditeljski sektor je iznimno široko područje u kojem se koristi velikbroj različitih materijala, što prirodnih što industrijski proizvedenih, na način da se iz svakog izvučeno najbolje.

Jedan od nedostataka s kojim se drvo i drvni materijali suočavaju je podložnost gorenju. Uvriježeno je mišljenje da u uvjetima požara drvo brže otkazuje u usporedbi s drugim građevnim materijalima. Istina je međutim da drvo i materijali od drva gore postepeno uslijed čega dolazi do smanjenja poprečnog presjeka pa je potrebno izvjesno vrijeme dok (primjerice lamelirani nosači) ne pokleknu pred vatrenom stihijom. Može li se kontrolirati brzina širenja vatre korištenjem zaštitnih sredstava kako bi se drvu povećala otpornost na djelovanje požara te tako smanjila razina nastale štete ali i zaštitio ljudski život? Je li drvo uistinu nekonkurentno za primjenu u uvjetima mogućeg požara?

Promatrajući druge građevne materijale, vidljivo je da i oni imaju određene prednosti i nedostatke koje se nastoji prekriti prekomjernim naglašavanjem njihovih prednosti. Objektivnom usporedbom raznih građevnih materijala dolazi do razbijanja mnogih predrasuda o drvu kao materijalu koji gori. Cilj ovoga rada i jest sistematizirati znanja o ponašanju drva u uvjetima požara kako bi ukazali da, iako gori, drvo ima višestruke prednosti u usporedbi s drugim građevnim materijalima.

1. POJAM POŽARA I GORENJA

Pod pojmom požara podrazumijevamo svako nekontrolirano gorenje uslijed kojeg dolazi ili može doći do ozlijede ljudi i štete na materijalnim dobrima. Da bi započeo proces gorenja potrebna je temperatura paljenja koja se najčešće postiže iskrom, plamenom, trenjem, prenošenjem topline (kondukcijom, konvekcijom, radijacijom) i kemijskom reakcijom (samozapaljenjem). Prijenos požara se prvenstveno odvija zračenjem, užarenim česticama, tlom, te eventualnim zajedničkim instalacijama.

Općenito se može reći da se požar razvija kroz određen broj faza koje su svedene na (Bjelanović, 2011):

1. *Požar u nastanku* –u ovoj fazi temperatura raste polako i gotovo linearno napreduje, zapaljive tvari su prisutne u malim i ograničenim udjelima, usporeno je zagrijavanje okoline (zidovi i stropovi još su hladni i pojačano upijaju toplinu), a vlaga isparava iz svih materijala.
2. "*Flash-over*" (tzv. rasplamsavanje ili vatreni skok)-prijelaz je iz faze nastanka u fazu punog požara. Nastali plinovi u reakciji sa zrakom stvaraju zapaljivu smjesu, a stvorena količina topline velikom brzinom eliminira zaostalu vlagu. Trenutak rasplamsavanja nije jednoznačno određen, ali se procjenjuje da nastaje kod temperature od 500 do 600°C.
3. *Puni ili totalni požar*–vatra zahvaća sve zapaljive materijale, razvijene su temperature iznad 900°C. Najopasnija faza u kojoj nastaju oštećenja, dolazi do otkazivanja ili čak rušenja cijele konstrukcije uz mogućnost širenja na susjedna područja.
4. *Hlađenje iligašenje*–faza konačnog hlađenja u rasponu od 300°C do temperature okoline, temperatura plinova opada na 20% T_{max}. Ova faza je spora i opasna zbog mogućih novih zapaljenja koje hladni materijal na površini skriva u obliku tinjanja vatre.

Gorenje je složeni fizikalno–kemijski proces u kojem dolazi do reakcije kisika s gorivom tvari uz postignutu temperaturu paljenja, pri čemu se 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, odnosno za izbijanje i nastanak požara su (Drakulić, 2015):

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

S obzirom na gorivost, tvari se mogu podijeliti na negorive i gorive (Tablica 1).

Tablica 1.Podjela materijala s obzirom na gorivost (Pavelić, 2015)

Razred"A" negorivi materijali	
A1 – bez organskih sastojaka	**Normirani materijali:** Gips, vapno, cement, beton, kamen, staklo, metal, keramika, pijesak **Nenormirani materijali:** Kalcij-silikat ploče, određene mineralne protupožarne ploče i silikat ploče (ovu skupinu treba dokazivati)
A2 – s organskim sastojcima	Gips-kartonske ploče, određeni mineralno-vlaknasti materijali
Razred"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: (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 veće od 2 mm, normirani pokrovi i normirane podne PVC-obloge
B3 – lako zapaljivi	**Svi oni koji nisu B2 kao:** Papir, drvena vuna, drvo debljine do 2 mm, slama

2. O PRIMJENI DRVA PRI IZLOŽENOSTI POŽARU

Današnja uporaba drva i drvnih materijala u uvjetima prekomjernog izlaganja toplini te mogućnosti nastanka i širenja požara se nalazi u nezavidnoj poziciji. Razlog tome ne treba tražiti u eventualno lošim svojstvima ponašanja drva u požaru, već u neinformiranosti krajnjih korisnika. Činjenica je da je nezaštićeno drvo goriv materijal, pa se stoga smatra nepovoljnim pri gradnji jer je podložno gorenju. No, činjenica je i da, ukoliko ne postoje uvjeti koji podržavaju gorenje, veliki drveni presjeci neće goriti.

3. MEHANIZAM SAGORIJEVANJA DRVA

Tri su osnovna parametra mehanizma sagorijevanja drva (Bjelanović, 2011) :

1. *Toplinski (energetski) potencijal*–količina termičke energije koja se razvija iz potpunog sagorijevanja materijala i ovisi o kalorijskoj vrijednosti materijala. Kalorijska vrijednost drva približno je stalna za istu botaničku vrstu.
2. *Gornji specifični toplinski kapacitet*–energija proizvedena sagorijevanjem jedinice mase potpuno suhe tvari (tvar čije sagorijevanje ne stvara vodu).
3. *Donji specifični toplinski kapacitet*–energija proizvedena upijanjem vode sadržane u drvu koje nije potpuno suho ili je proizvedena tijekom reakcije i u stanju je vodene pare.

Tablica 2.Kalorijska vrijednost botaničkih vrsta drva ovisno o sadržaju vode (Bjelanović i Rajčić, 2005)

1 kcal = 0,0042 MJ; 4419 kcal/kg = 18,5 MJ/kg				
Vrsta drva	Volumna masa (g/cm^3)	Kalorijska vrijednost (kcal/kg) pri sadržaju vlage od		
		u=0%	17,6 – 20,5%	33,3 – 38,9
Brijest	0,65	4419	-	-
Javor	0,63	4306	-	2988
Joha	0,51 – 0,53	4294	3462	2973
Topola	0,45	4281	-	3012
Trešnja	0,61	4264	-	2973
Bagrem	0,75	4258	3481	3043
Jasen	0,71	4255	3617	-
Hrast	0,69 – 0,74	4244	3418	2988
Hrast cer	0,75 – 0,81	4216	3445	3012
Grab	0,77	4209	-	3043
Bukva	0,66 – 0,72	4189	3421	2988
Smreka	0,38	4578	-	-
Bor	0,46	4438	3582	3028
Ariš	0,60	4420	-	-

**iz podataka danih u gore priloženoj tablici, može se zaključiti kako interval promjene kalorijske vrijednosti drva za suho drvo bjelogorice iznosi cca 232 kcal/kg, odnosno cca 158 kcal/kg za suho drvo crnogorice.*

**u proračunu stvarnog energetskog potencijala treba uzeti u obzir sadržaj nezapaljivih tvari (masa im se oduzima od mase drva), toplinski kapacitet prisutne*

vode zagrijane do 100°C, toplinu isparavanja vode i specifičnu toplinu vodene pare zagrijane do temperature plinova ispuštenih u atmosferu.

Specifični toplinski kapacitet *(c),* ovisi o temperaturi i sadržaju vodedrva a gotovo da ne ovisi o gustoći vrsti drva (Tablica 3).

Tablica 3.Ovisnost specifičnog toplinskog kapaciteta o temperaturi i sadržaju vode (Bjelanović i Rajčić, 2005)

Temperatura (°C)	Specifični toplinski kapacitet (kJ/kgK)			
	Potpuno suho	5% sadržaja vode	12%sadržaja vode	20% sadržaja vode
7	1,2	1,3	1,5	1,7
17	1,2	1,4	1,6	1,8
27	1,3	1,4	1,7	1,9
47	1,3	1,5	1,8	2,0
67	1,4	1,6	1,9	2,2
87	1,5	1,7	2,0	2,3

Budući da drvo u prvom redu čine kemijski elementi vodika, ugljika i kisika, lako je objašnjiv fenomen njegove zapaljivosti te ga je gotovo nemoguće učiniti nezapaljivim (premda se potpuna nezapaljivost rijetko zahtjeva).

Tablica 4.Veći dio sastavnih tvari koje sačinjavaju drvo (Bjelanović,2011)

Komponente drva (%suhe težine)			
	Celuloza	Hemiceluloza	Lignin
Crnogorica	40-44	15-35	18-25
Bjelogorica	40-44	20-32	25-35

U mehanizmu sagorijevanja drva prevladava pirolizahemiceluloze (šećeri velike molekularne mase). Piroliza, ili suha destilacija, u konačnici stvara (LeVan i Winandy, 1990):

- tvari topive u vodi (kiseline),
- drveni katran (mješavina tvari neotopivih u vodi koje se talože ispod kiseline, plinovi koji se ne kondenziraju nego su zapaljivi),
- čvrsti ostatak, drveni ugljen.

Pri izlaganju drva izvoru topline, dolazi do toplinskog odaziva, ovisno o prisutnosti zraka (prisutnost ili odsutnost uvjeta gorenja). Prisutnost kisika dovodi dooksidacije plinova i ugljena što rezultira dovoljnom energijom za uništavanje ostalih tvari u zapaljivim spojevima.

Napretkom sagorijevanja nastaje već spominjani pougljenjeni sloj (brzina njegova stvaranja je 0,5–1mm/min), a onima ulogu zaštite unutarnjeg sloja drva od intenzivnog razvoja topline, premda, zbog svoje morfologije dozvoljava izmjenu plinova okoline i površine plamtećeg materijala. Morfološke promjene koje nastaju objašnjene su kemijskim fenomenom toplinske razgradnje komponente drva. Nastajanje brazdi reflektirane su bržom toplinskom razgradnjom celuloze u odnosu na lignin. Sukladno tome, pougljenjeni sloj se vizualno uspoređuje sa drvom napadnutog gljivama prave truleži koje prvenstveno uništavaju celulozu (Slika1).



Slika 1.

U slučaju elemenata s visokim omjerom volumena i površine može se reći da, iako na površini postoji izvor zapaljenja i ostali uvjeti gorenja gdje sukladno tome nastupa živo gorenje, na jedan dio materijala piroliza utječe čak i u fazama požara nakon početne. To je dio koji nije izložen plamenu te pridonosi širenju požara samo ako plinoviti proizvodi pirolize uspiju stići na vanjsku površinu.

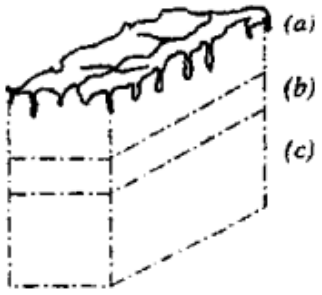
S povećanjem temperature iznad 170°C, javljaju se nepovratni fenomeni u vidu izmjene strukture celuloze te proizvodnjom zapaljivih plinova pirolize, koji su glavni uzrok širenja požara. Leteće čestice proizvedene sagorijevanjem kreću se prema vanjskoj površini hladeći pougljenjeni sloj. Zbog učinka refleksije nastaje nazovi-stalna situacija u kojoj se uspostavlja ravnoteža između gubitka materijala na površini i povlačenja nepromijenjenog drva, a sve se odvija brzinom oko 0,6 – 0,7 mm/min (Bjelanović,2011).

4. KEMIJSKI I FIZIČKI PROCESI PRI SAGORIJEVANJU DRVA

Sagorijevanjem drva i drvnih materijala dolazi do procesa kemijske razgradnje, stvaranja pougljenjenog sloja i pojave zapaljivih plinova. Proces gorenja drva je podijeljen kroz par faza, u prvoj fazi (tzv. fazi sušenja) dolazi do zagrijavanja i isparavanja vode. Toplina se dovodi u kontakt sa drvom uz prisutnost zraka, uz čije se djelovanje temperatura drva povećava do 100°C te kao produkt toga voda isparava pri navedenoj temperaturi. Dokle god se voda nalazi unutar drva, njezino ključanje i isparavanje uzimaju dio toplinske energije (donji specifični toplinski kapacitet) sa izvora topline, te se na taj način stanice drva sprječava da upijaju toplinu i podižu temperaturu. Upravo zbog ove činjenice je drvo sa visokim sadržajem vode teško zapaljivo. Temperatura je stalna sve dok voda potpuno ne ispari nakon čega ubrzano raste.

Između 150°C i 200°C nastaju plinovi u kojima sa 70% prevladava nezapaljivi ugljični dioksid ($C0_2$), a 30% čini zapaljivi ugljični monoksid (CO). Pri temperaturama iznad 200°C nastaje različita količina zapaljivih plinova, a smanjuje se udio ugljičnog dioksida (CO_2). U tom trenutku zapaljenjaplinova naglo raste površinska temperatura

pa do pougljenjenja dolazi i u sloju pirolize (oko 5mm debeli sloj). Kako je vidljivo na slici 2, između pougljenog sloja i neoštećenog sloja drva, nalazi se sloj pirolize. Piroliza je produkt koji je nastao pod utjecajem povišene temperature nakon kojeg dolazi do pucanja kemijskih veza (drvo se termički razgrađuje bez prisutnosti kisika),(LeVan i Winandy, 1990).



Slika 2.(a)pougljeni sloj, (b)sloj pirolize, (c)nepromijenjeno drvo (Bjelanović, 2011)

Tijekom pirolize nastaju pougljeni sloj (kruti ostatak), katran (tekući ostatak) i hlapljivi plinovi. Nastali hlapljivi plinovi se miješaju s okolnim zrakom i ako je toplina dovoljno visoka da se postigne temperatura paljenja, počinje egzotermna reakcija gorenja (reakcija u čijem se tijeku oslobađa toplina).

Ovisno o uvjetima okoliša, razgradnja lignoceluloznih materijala ide u dva smjera. Prvi se zbiva na temperaturama nižim od 300°C, gdje nastaju već spomenuti ugljikov monoksid i ugljikov dioksid. Oksidacija tog sloja izaziva tinjajuće ili žareće gorenje, a daljnja oksidacija zapaljivih hlapivih plinova uzrokuje plamteće gorenje (RowelliLeVan, 2005). Drugi smjer termičke razgradnje se ostvaruje na temperaturama višim od 300°C gdje se povećava udio reakcija koje stvaraju tekući ostatak (katran), a stvaranje pougljenog sloja se smanjuje.

Svaki se polimerni sastojak drva različito razgrađuje. Celuloza se razgrađuje pri temperaturama između 260°C i 350°C te se pri tom stvara najviše zapaljivih plinova (LeVan i Winandy, 1990). Hemiceluloza je toplinski nestabilnija od celuloze i razgrađuje se na temperaturama između 200°C i 260°C razvijajući više nezapaljivih plinova i manje katrana nego celuloza. Lignin je sastojak drva koji je toplinski najstabilniji i razgrađuje se sporije nego celuloza i hemiceluloza, premda njegova

razgradnja počinje ranije (između 150°C i 300°C). Na kraju pucaju veze ugljik-ugljik između strukturnih jedinica lignina, i to na temperaturama između 370°C i 400°C (LeVan i Winandy, 1990). Lignin više pridonosi stvaranju pougljenjenog sloja nego celuloza i hemiceluloza (Marney i dr., 2005).

Nakon isparavanja vode i porasta temperature na oko otprilike 300°C, nastupa druga faza. U drugoj fazi se proizvodi toplina koja može nastati primarnim i sekundarnim sagorijevanjem. Primarno sagorijevanje započinje na oko 280°C i nastavlja se dalje prema 480°C gdje se bilježe velike količine oslobođene energije. Fizikalna struktura drva strmoglavo se počinje raspadati iznad 300°C, a kao rezultat toga nastaje niz malih pukotina na površini, okomitih na smjer vlakanaca tzv.Alligatoring (Slika 3) s kojima je omogućeno da plinovi lakše napuštaju drvo te one s vremenom postaju sve veće (LeVan i Winandy, 1990).



Slika 3.Alligatoring

Sekundarni plinovi sadrže i do 60% potencijalne toplinske energije drva. Njihovo sagorijevanje bitno je zbog postizanja visokog ukupnog postotka sagorijevanja. Sekundarni plinovi ne izgaraju blizu drva zbog nedostatka kisika ili nedovoljno visoke temperature. Uvjeti potrebni za gorenje sekundarnih plinova su dovoljna količina kisika i temperatura od barem 590°C. Količina dostupnog zraka je kritična, premalo

zraka neće podržati gorenje dok će previše zraka sniziti temperaturu do točke kada se izgaranje zaustavlja. To se događa zbog velikog postotka dušika u zraku, koji ako ga je previše te se miješa sa sekundarnim plinovima, apsorbira postignutu toplinu (LeVan i Winandy, 1990).

Na temperaturama iznad 500°C stvaranje plinova znatno je manje, ali se zato povećava stvaranje ugljena što dovodi do tipične slike drva nakon požara. U trećoj fazi ugljen gori dugo vremena sa niskom razinom stvaranja topline. Gorenje ugljena je bitno jer oslobađa dodatan udio topline, bitne za ukupni postotak otpuštene topline.

5. PONAŠANJE DRVA U POŽARU

Građevno drvo je svakodnevno izloženo mogućnosti zapaljenja pa je njegovo ponašanje u slučaju požara važan kriterij za pojedino mjesto primjene. Statistički podaci govore kako svake godine vatrene stihije oduzmu na desetke tisuća ljudskih života te prouzroče štete od preko pola milijarde dolara. Budući da se izvori zapaljenja ne mogu sa sigurnošću odrediti, od iznimne je važnosti adekvatna zaštita konstrukcije načinjene od drva u kombinaciji sa smanjenjem udjela lakozapaljivih materijala u objektu.

Na zapaljivost drva u prvom redu utječu (Bjelanović, 2011):

- vrijeme izlaganja djelovanju visokih temperatura,
- sadržaj vode u drvo (sa sadržajem vode iznad 30% neće doći do zapaljenja),
- anatomska građa drva,
- veličina površine koja je izložena djelovanju plamena,
- način obrade drva.

Kod visoke temperature drvo se termički razgrađuje u produkte suhe destilacije. Plinovite komponente suhe destilacije izlaze iz drva i sagorijevaju na zraku otvorenim plamenom. Plamen povećava temperaturu drva i ubrzava daljnju toplinsku razgradnju drva. Toplinska razgradnja drva u dodiru sa zrakom odvija se po sljedećoj shemi (Špoljarić, 1964):

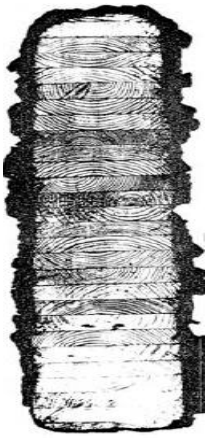
- do 100°C: isparavanje vode,
- od 94 do 150°C i više: ishlapljivanje hlapivih i ekstraktivnih tvari,
- od 150 do 220°C: smeđenje (pripaljivanje) površine i sporo razvijanje gorivih plinova,
- od 220 do 360°C: pougljenjavanje površine i brzo razvijanje gorivih plinova – površina drva se užari, a plinovi se eventualno i upale,
- od 360 do 510°C: brzo zapaljenje gorivih plinova i žarenje drvnog ugljena.

Drvo se smatra zapaljivim materijalom premda je količina energije potrebna za njegovo zapaljenje velika, a i to se može dodatno ublažiti impregnacijom ili površinskom zaštitom. Bitno je znati da bilo kakav sustav zaštite neće učiniti drvo potpuno nezapaljivim.

Vatra se površinom širi tako da svako zapaljenje izaziva novu točku paljenja. Brzina širenja plamena je relativno niska stoga se drvo karakterizira kao teško zapaljivo. Upravo zbog niskog rizika zapaljivosti, uporaba neobrađenog drva je dozvoljena u brojnim zemljama. Mjera u kojoj drvo provodi toplinu ovisi o vrsti i načinu procesa zagrijavanja, postojanju kisika, gustoći, obujmu i veličini promatranog drvenog elementa no o tome će riječ nešto više biti u nekom od narednih poglavlja.

Masivno drvo samo po sebi je teško zapaljivo čemu svjedoči i mali broj slučajeva u kojima ono biva zapaljeno prije nekih drugih konstrukcijskih materijala. Do izravnog samozapaljenja potrebno je u vrlo kratkom vremenu na površinu djelovati temperaturom od 600°C. Za usporedbu, ako postoji izvor topline drvni materijal će se s vremenskim odmakom zapaliti i pri temperaturi od malo preko 300°C.

U slučaju neizbježnog zapaljenja drva ili drvnog materijala, do izražaja dolazi čitav niz vrlo povoljnih svojstava ovih materijala. Na površini će doći do zapaljenja pri dovoljnom tijeku topline; u početku će se vatra širiti no pougljenjeni sloj služi kao svojevrstan štit koji priječi razvoj topline prema unutrašnjosti, pa se kod velikih i debelih presjeka drvenih nosača požar može i spontano ugasiti.



Slika 4.Prikaz drvenog presjeka izloženog požaru s naznakom pougljenog sloja (Rukavina- Jelčić, 2015/2016)

Volumna masa ugljena drva crnogorice i nekih vrsta bjelogorice (npr.lipa) može varirati između 0,2 g/cm³ i 0,3 g/cm³. Samo neke vrste (hrast, breza, jasen) mogu stvoriti ugljen volumne mase veće od 0,4 g/cm³. Vrijednost temperature ispod površine pougljenog sloja slična je temperaturi okoline zapaljenja, a drvo se u tom sloju smatra nepromijenjenim (Bjelanović, 2011).

Provodljivost topline pougljenog sloja iznosi svega 1/6 u odnosu na masivno drvo. Uzevši u obzir i činjenicu niske provodljivosti topline drva, otpornost drva na požar je zapravo bolja nego se to obično misli. Naime, treba imati na umu da je temperatura u srednjem dijelu velikog poprečnog presjeka znatno niža od one na površini.

Toplinska provodljivost ugljena prosječno iznosi 60 % toplinske provodljivosti drva okomito na vlakanca, odnosno manje od 50 % u smjeru paralelnom s vlakancima što je vidljivo u tablici 5.

Tablica 5.Prikaz toplinske provodljivosti i srednjeg specifičnog toplinskog kapaciteta i drvnog ugljena (Bjelanović,2011).

	Toplinski tok	Gustoća g/cm^3	Toplinska provodljivost W/m °C	Srednji specifični toplinski kapacitet kcal/kg °C
Ugljen	Paralelno sa vlakancima	0,28	0,15	0,23
	Okomito na vlakanca		0,10	
Drvo (normalni uvjeti)	Paralelno sa vlakancima	0,45	0,38	0,32-0,48
	Okomito na vlakanca		0,15	

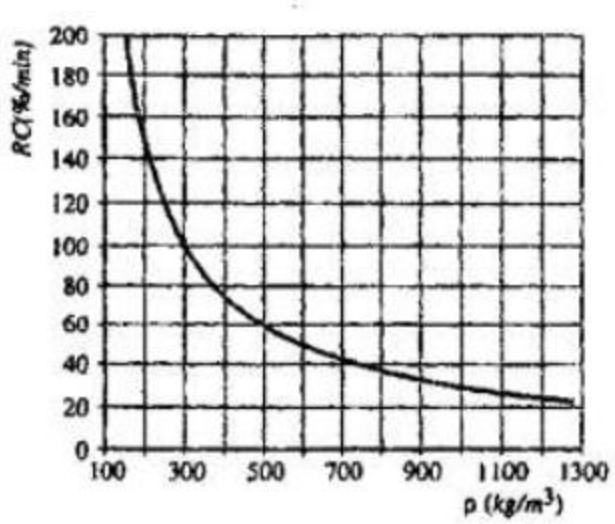
"Postepeno povlačenje" je izraz kojim bi se moglo opisati ponašanje drva u požaru. Naime drvo i drveni materijali se u uvjetima požara ne lome nepredvidivo te ne nestaju brzo u vidu nastajanju pukotina, nego stvaraju zatvorenu površinu sve dok se presjek drva ne stanji i na kraju progori. U situacijama prekomjernog stvaranja pougljenog sloja često dolazi i do potpunog smanjenja plamena i posljedično

gašenja. Ovaj fenomen se opisuje usred nedovoljnog razvijanja gorivih plinova te niže temperature potrebne za daljnje razvijanje procesa gorenja. Stoga, ponašanje drva u uvjetima potpuno razvijenog požara se može sa velikom vjerojatnošću predvidjeti te okarakterizirati kao pouzdan materijal po pitanju prekomjernog izlaganje temperaturama koje prevladavaju u požaru.

6.UTJECAJ SVOJSTAVA DRVA NA PONAŠANJE U POŽARU

Oblik površine, opseg i veličina elementa, te presjek, imaju presudan utjecaj na ponašanje drva u požaru. Zapaljivost (gorenje) ovisi o odnosu površine i volumena. Što je taj odnos veći, požar se brže širi. Oštri rubovi i hrapavost površine povećavaju ovaj odnos, pa time nepovoljno djeluju na ponašanje upožaru. Raspucalost drva također povećava agresivnost požara pa selijepljeno lamelirano drvo, koje nema pukotina, smatra manje zapaljivim nego masivno drvo (Bjelanović, 2011).

Gustoća drva ima velik utjecaj na vrijeme potrebno za gorenje i širenje požara, te sukladno tome različite vrste drva ne reagiraju jednako na požar. Drvo veće gustoće će se kasnije zapaliti (Slika 5).



Slika 5.Odnos između gustoće (ρ) i stupnja sagorijevanja (RC) (Kollmann i Cote, 1968.)

Jedan od iznimno važnih parametara koji utječu na ponašanje drva u požaru je i sadržaj vode u drvu. Sadržaj vode u drvenim konstrukcijama iznosi od 8% do 15% što znači da prilikom sagorijevanja iz svake tone drva mora ispariti 80-150 kg vode da bi ono izgorjelo. Usprkos tome, smatra se da je utjecaj udjela sadržaja vode u drvu na gorenje zanemariv budući da je područje u kojem prevladava relativno uska vlaga ravnoteže (8%-15%).

7. PRORAČUN POŽARNE OTPORNOSTI DRVENE KONSTRUKCIJE

Za proračun drvenih konstrukcija na djelovanje požara važanje samo dio presjeka ispod sloja pougljenja u kojem su temperatura i mehanička svojstva ostala nepromijenjena (Slika 6). Prema tome, može se reći da je drvo najpovoljniji građevni materijal u požaru. Zašto? Zato jer poznavanjem brzine gorenja drva možemo proračunati mehanička svojstva dijela presjeka preostalog nakon određenog vremena gorenja – drugim riječima, opožarena drvena konstrukcija se neće nepredviđeno urušiti i predstavljati opasnost pri evakuaciji i daljnjem gašenju požara.

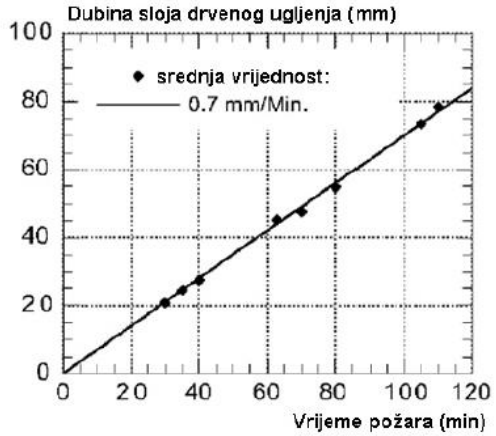


Slika 6.Primjer poprečnog presjeka iz kojeg se mogu izračunati nosiva svojstva drva.

Sloj drvnog ugljena(β), možemo okarakterizirati kao omjer između debljine ugljenog slojai vremena izloženosti požaru, t(izraženo u mm/min):

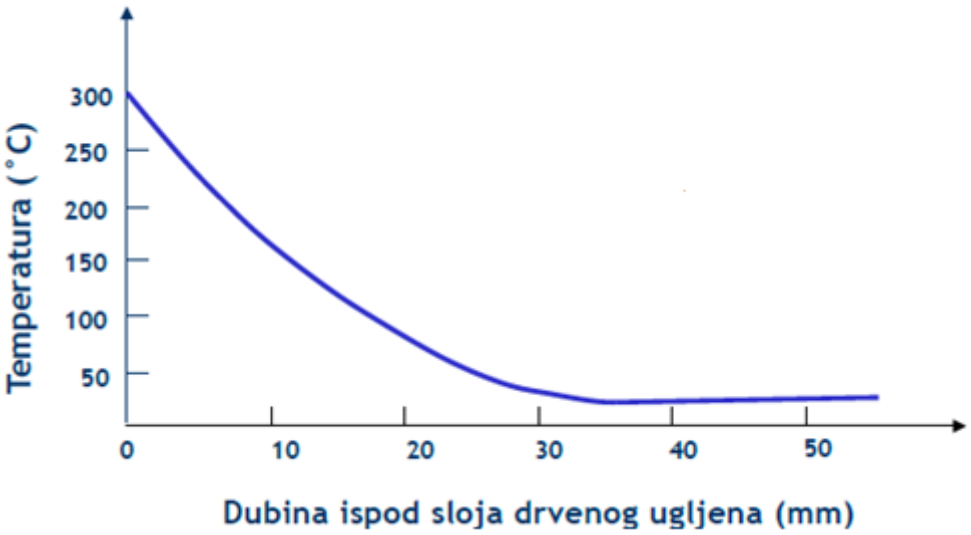
$$\beta = \frac{d}{t}$$

Većina nacionalnih propisa navodi da je brzina stvaranja ugljenog sloja kod mekih vrsta drva 0,60-0,75 mm/min (smreka, jela, ariš), dok kod tvrdih vrsta drva te lameliranog drva iznosi 0,5 mm/min. Donja slika prikazuje odnos debljine ugljenog sloj i vremena izloženosti požaru.



Slika 7.Odnos debljine drvenog ugljena i vremena trajanja požara (Magerle, 1996).

Utjecaj temperature na sloj ispod drvnog ugljena je prikazan na sljedećoj slici.



Slika 8.Odnos temperature u drvu i debljine sloja drvenog ugljena (Magerle, 1996)

Navedena temperature se računa po sljedećoj formuli:

$$T = Ti + (Tp - Ti) * (1 - \frac{x}{a})^2$$

gdje je: Ti = početna temperatura drva (°C)

Tp = temperatura na kojoj počinje pougljenje (250 – 300°C)

x = udaljenost od sloja drvnog ugljena (mm)

a = debljina sloj oštećenog uslijed visoke temperature (40mm)

Toplinska provodljivost (λ) se kreće od 0,4 do 1,2 W/mK, kod 12% sadržaja vode. Ona ovisi o sadržaju vode, masi, smjeru protezanja vlakanaca, temperaturi te nepravilnostima u građi. Povećanjem mase, temperature i sadržaja vode, toplinska provodljivost se povećava te ona iznosi 1,5-2,8 puta više paralelno sa vlakancima u odnosu na provodljivost okomito na vlakanca. Budući da kod drvenih elemenata nije potrebno računati raspodjelu temperature kroz poprečni presjek, koriste se pojednostavljeni postupci proračuna (Rukavina, 2015):.

Dokaz otpornosti na požar za drvene konstrukcije se provodi u odnosu na:

- vrijeme do kolapsa konstrukcije koje se uspoređuje s vremenom otpornosti na požar,
- preostalu čvrstoću koja se uspoređuje s opterećenjem konstrukcije nakon određenog vremena izloženosti požaru.

Proračun za čvrstoću se provodi na poprečnom presjeku umanjenom za odstranjeni sloj drvenog ugljena.

Debljina pougljenjenog sloja uslijed izloženosti jedne strane drvenog predmeta u određenom vremenskom intervalu se računa po sljedećoj formuli (The American Wood Council,2003):

$d_{char,0} = \beta_0 \times t$

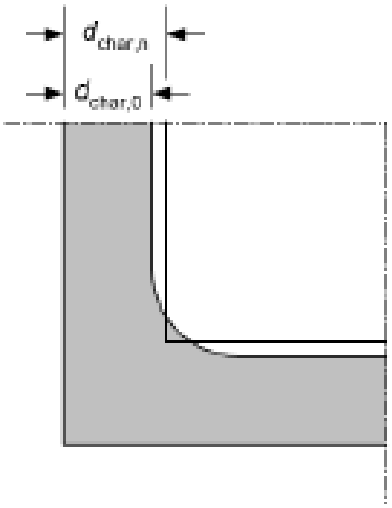
gdje je: β_0=brzina sagorijevanja za izloženost požaru s jedne strane kod djelovanja standardnog požara (mm/min),

t=vrijeme izloženosti požaru.



Slika 9.Debljina pougljenjenog sloja za izloženost požaru s jedne strane(Barić i dr., 2011)

Proračun debljine pougljenjenog sloja za izloženost požaru s dvije strane u nekom vremenskom periodu uključuje i efekt ruba presjeka ili pukotine stoga se u obzir uzima zamišljena debljina (The American Wood Council,2003).



Slika 10.Debljina pougljenjenog slojaza izloženost požaru s dvije strane (Barić i dr., 2011)

$d_{char,n} = ß_n{}^x\, t$

$ß_n$= brzina sagorijevanja za izloženost požara s dvije strane kod djelovanja standardnog požara (mm/min),

t=vrijeme izloženosti požaru.

Tablica 6.Proračunske brzine nastajanja pougljenjenog sloja (Barić dr., 2011)

	β_0 mm/min	β_n mm/min
a)Meko drvo i bukva		
Lijepljeno lamelirano drvo s karakterističnom gustoćom$\rho_k \geq 290$ kg/m^3	0.65	0.70
Puno drvo s karakterističnom gustoćom $\rho_k \geq 290$kg/m^3	0.65	0.80
b)Tvrdo drvo		
Puno ili lijepljeno lamelirano drvo s karakterističnom gustoćom $\rho_k \geq 290$kg/m^3	0.65	0.70
Puno ili lijepljeno lamelirano drvo s karakterističnom gustoćom $\rho_k \geq 450$kg/m^3	0.50	0.55
c)Lamelirano furnirsko drvo (LVL)	0.65	0.70
s karakterističnom gustoćom $\rho_k \geq 480$kg/m^3		
d)Pločasti materijali		
Šperploče	1.00	-
Drvni materijal s karakterističnom gustoćom $\rho_k \geq 450$kg/m^3 i t_p=20mm	0.90	-

Za proračun čvrstoće preostalog poprečnog presjeka se mogu koristiti dva postupka:

1. metoda smanjenog poprečnog presjeka
2. metoda reduciranih svojstava materijala

Norme koje obuhvaćaju područje zaštite od požara te projektiranja i proračuna su sljedeće (Ministarstvo unutarnjih poslova, 2013):

HRNEN 13501-1:2010

Razredba građevnih proizvoda i građevnih elemenata prema ponašanju u požaru – 1.dio: Razredba prema rezultatima ispitivanja reakcije na požar (EN 13501-1:2007+A1:2009).

HRNEN 1995-1-2:2008

Eurokod 5 - Projektiranje drvenih konstrukcija - Dio 1-2: Općenito – Projektiranje konstrukcija na djelovanje požara (EN 1995-1-2:2004+AC:2006).

HRNEN 1991-1-2:2008

Eurokod 1 - Djelovanja na konstrukcije – Dio 1-2: Opća djelovanja – Djelovanja na konstrukcije izložene požaru (EN 1991-1-2:2002).

HRNEN 1991-1-5:2008

Eurokod 1 – Djelovanje na konstrukcije – Dio 1-5: Opća djelovanja – Toplinska djelovanja (EN 1991-1-5:2003).

Norma HRN DIN 4102-1:2000 je norma ponašanja građevnih materijala i elemenata u požaru - 1.dio: Građevni materijali – Pojmovi, zahtjevi i ispitivanja (DIN 4102-1:1998 + Ispravak 1:1998), te je u tablici navedena njena klasifikacija.

Tablica 7.Klasifikacija vatrootpornosti prema HRN DIN 4102.

KLASA OTPORNOSTI NA POŽAR	***TRAJANJE OTPORNOSTI NA POŽAR U MINUTAMA***
F 30	≥30
F60	≥60
F90	≥90
F120	≥120
F180	≥180

7.1. METODA SMANJENOG POPREČNOG PRESJEKA

Drvni materijal neposredno uz granicu sa pougljenim slojem određene debljine $k_0 d_o$, nema potrebnu čvrstoću i krutost stoga je za proračun važniji preostali dio poprečnog presjeka. Proračunavanje poprečnog presjeka se vrši umanjivanjem početnog presjeka za proračunsku debljinu pougljenog sloja d_{ef} (Barić i dr., 2011).

$$d_{ef}=d_{char,n}+ k_0 x\ d_0$$

gdje je:

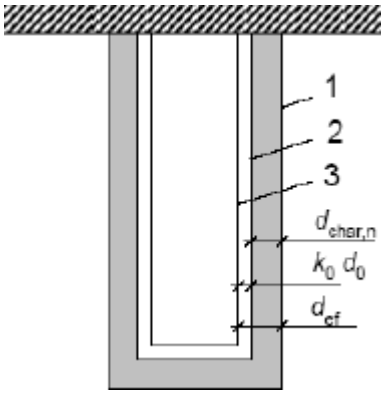
$d_{char,n}$=zamišljena proračunska dubina pougljenja određena izrazom ili pravilima koja vrijede za površine početno zaštićene od izloženosti požaru.

k_0= koeficijent nezaštićene površine (tablica 8)

d_0= 7mm

Tablica 8. Koeficijent $k_0$za nezaštićene površine:

	k_0
t<20 minuta	t/20
t≥20 minuta	1,0



Slika 11.Definicija preostalog i efektivnog poprečnog presjeka drvenog elementa (Barić i dr., 2011)

1. početna površina elementa
2. granica preostalog poprečnog presjeka
3. granica proračunskog poprečnog presjeka

7.2.METODA REDUCIRANIH SVOJSTAVA MATERIJALA

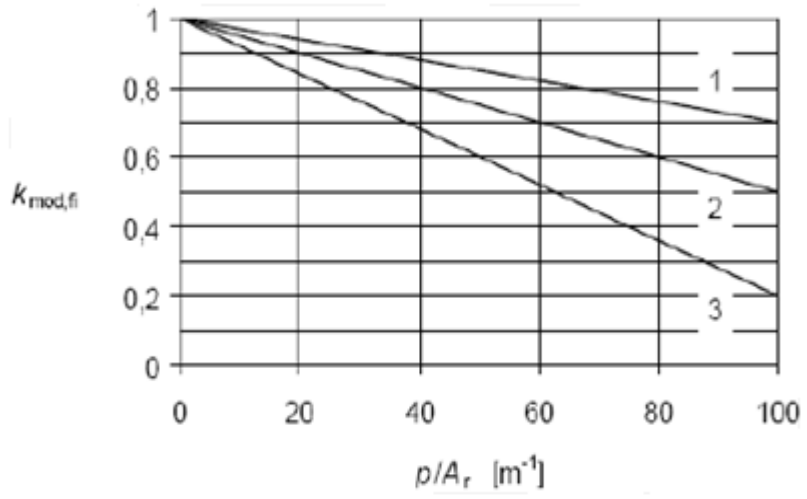
Metoda smanjenih svojstava materijala u obzir uzima umanjeni poprečni presjek sa umanjenim svojstvima materijala. Ova metoda se prvenstveno primjenjuje na meko drvo četvrtastog presjeka izloženo sa tri ili četiri strane te okrugle poprečne presjeke izložene oko cijelog opsega. Nakon izračunatog pougljenjenog sloja, potrebno je odrediti faktor izmjene za požar $k_{mod,fi}$ (uz uvjet da je $t \geq 20$minuta) (Purkiss, 2007).

- za čvrstoću na savijanje:
  $k_{mod,fi}=1,0-\frac{1}{200}\frac{p}{Ar}$
- za tlačnu čvrstoću:
  $k_{mod,fi}=1,0-\frac{1}{125}\frac{p}{Ar}$
- za vlačnu čvrstoću i modul elastičnosti:
  $k_{mod,fi}=1,0-\frac{1}{330}\frac{p}{Ar}$

gdje je: p=opseg preostalog poprečnog presjeka izloženog požaru (m),

A_r=površina preostalog poprečnog presjeka (m^2).

U predmetnom slučaju zaštićenih i nezaštićenih elemenata u vremenu t = 0, faktor izmjene za požar se uzima $k_{mod,fi}=1,0$. U slučaju vremenskog intervala 0 ≤ t ≤ 20 minuta, također za nezaštićeni drvni element, faktor izmjene se određuje linearnom interpolacijom.



Slika 12.Smanjenjevlačne čvrstoće (1), modula elastičnosti (2) i savojne čvrstoće (3)(Rukavina-Jelčić, 2015)

8. USPORAVANJE GORENJA DRVA

Iako je potrebna velika količina energije da bi se drvo i materijali na osnovi drva zapalili, oni jesu zapaljivi. Premda im se zapaljivost može ublažiti impregnacijom i nanošenjem sloja zaštitnom sredstva, materijale od drva se ne može učiniti nezapaljivima. Stvarne vrijednosti svojstava zapaljivosti ovise o gustoći i botaničkoj vrsti drva, sadržaju vode te o odnosu obujma i presjeka elemenata. Površinom zapaljenog drva vatra se širi tako da svako zapaljenje izaziva novu točku paljenja, ali je brzina širenja plamena relativno mala za materijal koji se smatra zapaljivim pa je upravo zbog niskog rizika zapaljivosti primjena neobrađenog drva dopuštena u gotovo svim zemljama.
Ukupne štete od požara u Europi iznose godišnje otprilike 1% BDP-a, a od požara svake godine smrtno strada između 10 i 20 ljudi na milijun stanovnika.
Pri ispitivanju drvnih proizvoda punim testom u prirodnoj veličini (ISO 9705), požar na neobrađenom drvu za otprilike tri minute prijeđe iz faze razvoja požara u fazu potpuno razvijenog požara (engl.flashover), ali na drvu obrađenom usporivačima gorenja ono se može odgoditi za čak 20 minuta pa i više.

Prva nastojanja da se smanji zapaljivost drva i drugih organskih materijala sežu još iz rimskog carstva. U starom vijeku je za poboljšanje vatrootpornosti korištena octena kiselina i otopina alauna. Prvi patent iz protupožarne zaštite drva, tkanine i užeta registriran je sredinom 17. stoljeća, točnije 1625. godine u Velikoj Britaniji. Iako je do sada patentiran znatan broj postupaka, mali je broj onih koji odgovaraju potrebama građevnog sektora.

Svi pokušaji impregnacije drva u svrhu smanjenja zapaljivosti i opasnosti od širenja požara padaju pod kraj prošlog stoljeća. Ratna mornarica SAD tražila je efikasne metode da smanji zapaljivost drvenih paluba na ratnim brodicama. Građevinarstvo, obzirom na sve više gradnje u gusto naseljenim mjestima, tražilo je negorive materijale za unutarnje konstrukcije, odnosno materijale koji gore tako teško i sporo tako da ne mogu biti potencijalni uzročnici brzog širenja požara. Impregnacija paluba u brodogradnji se nije održala, jer su kemijska sredstva korodirala metalne konstrukcije broda, a drvo je postalo veoma propusno za uljane boje i lakove. Bolji rezultati postignuti su u građevinarstvu. U građevnim konstrukcijama drvo nije

izvrgnuto neprekidnom navlaživanju, a korozija metala od zaštitnog sredstva je minimalna (Špoljarić, 1964).

Usporivači gorenja djeluju tako da uspore ili čak potpuno uguše proces gorenja. Drugim riječima, ta sredstva usporavaju ili odgađaju zapaljenje, razvijanje plinova, širenje vatre, otpuštanje otrovnih plinova, otpuštanje nagrizajućih spojeva i prijenos topline.

Fizikalni procesi u kojima djeluju usporivači gorenja obuhvaćaju (Marney, 2005):

- *hlađenje*; aditivi aktiviraju endotermni proces koji hladi podlogu na temperaturu nižu od one koja je potrebna za proces gorenja,
- *stvaranje zaštitnog sloja*; podloga može biti zaštićena krutim ili plinovitim slojem. Stvaranjem zaštitnog sloja smanjuje se količina plinova nastalih pirolizom, isključuje se kisik potreban za proces gorenja i smanjuje se prijenos topline,
- *razrjeđivanje smjese plinova*; razgradnjom aditiva nastaju inertni plinovi koji oslabljuju gorivo u krutoj i plinovitoj fazi procesa gorenja, zbog čega se smanjuje i koncentracija gorivih plinova u smjesi plinova.

Kemijske reakcije u kojima djeluju usporivači gorenja mogu se zbivati u dvije faze gorenja: u plinovitoj i krutoj.
U plinovitoj fazi gorenja usporivači prekidaju nastajanje slobodnih radikala. Time se zaustavlja egzotermna reakcija, zbog čega se hladi i djelomično ili potpuno smanjuje količina gorivih plinova. Na taj način djeluju, primjerice, halogeni usporivači gorenja.
U krutoj fazi gorenja usporivači stvaraju sloj ugljika na površini i tako je izoliraju. Na taj način djeluju, na primjer fosforni spojevi.
Usporivači gorenja mogu se podijeliti na tri osnovne grupe: anorganski usporivači gorenja (čine oko 50% svjetske proizvodnje usporivača gorenja), halogenirani proizvodi (čine oko 25% proizvodnje), i organofosforni proizvodi koji čine oko 20% svjetske proizvodnje usporivači gorenja (Van Esch,1997). Također se usporivači gorenja drva mogu podijeliti na reaktivne (kemijski se vežu na materijal preko kovalentnih veza što im osigurava otpornost ka ispiranju), i aditivne, a često se upotrebljavaju i u kombinaciji, te djeluju sinergički.

Aditivni usporivači gorenja ugrađuju se u proizvod adicijom i nisu kovalentno vezani za podlogu. Većina materijala za usporavanje gorenja drva izrađena je na osnovi fosfora, dušika, bora, aluminijeva hidroksida i nekoliko drugih spojeva (LeVan, 1984).
Oni odgađaju zapaljenje drva i smanjuju oslobođenu toplinu za vrijeme gorenja na sljedeće načine (Hakkarinen i sur.,2005):

- mijenjanjem tijeka priolize (smanjenje temperature na kojoj se događa piroliza, nastaje više pougljenog sloja, manje hlapljivih produkata i gorivih plinova),
- zaštitom površine izolacijskim slojem (pjenasti karbonizirani sloj tvori fizičku zapreku),
- mijenjanjem toplinskih svojstava materijala (primjena svojstava koji posjeduju visoku toplinsku inerciju i sposobnost difundiranja u materijala),
- razrjeđivanjem plinova nastalih pirolizom (princip otpuštanja negorivih plinova),
- prekidanjem lančane reakcije gorenja (halogenirani spojevi se temelje na mehanizmu stvaranja slobodnih radikala).

8.1. PREKRIVNI MATERIJALI ZA USPORAVANJE GORENJADRVA

Jirouš-Rajković i Miklečić (2009) su sistematizirali podjelu prekrivnih materijala za usporavanje gorenja drva. Svrha ovih materijala je ometanje procesa gorenja u stadijima od zagrijavanja do zapaljenja i širenja plamena. Gruba podjela ovih materijala se vrši na izolacijske i ablacijske.

Daljnja podjela izolacijskih materijala se grana na pasivne i kemijski reaktivne (upjenjujuće sustave) od kojih pasivni sadržavaju negorive mineralne aditive kao što su liskun ili perlit. Kemijski reaktivni upjenjujući sustavi funkcioniraju na principu stvaranja pjenastog izolirajućeg karboniziranog sustava pri visokim temperaturama čija je svrha štititi podlogu. Pod utjecajem topline upjenjujući se premazi (engl. Intumescent coatings) šire (bubre) i volumen im se povećava i do 200 puta, čime stvaraju debeli karbonizirani sloj koji štiti površinu od naglog povećanja temperature i doticaja s kisikom (Russell i dr., 2004). Upjenjujući premazi stvaraju pjenu zavidnih izolirajućih svojstava čiji uzrok leži u činjenici da ovi premazi sadržavaju sastojke koji tvore velike količine negorivih ostataka. Da bi djelovao kao toplinska pregrada pri požaru, pjenasti sloj treba biti dovoljno otporan te imati dobru adheziju prema površini drva. Upjenjujući sustavi mogu biti na bazi vode ili na bazi organskih otapala i obično se

sastoje od temeljnog (engl. primer), osnovnog i završnog sloja premaza (Schwartz, 2003). Svaki upjenjujući premaz koji usporava gorenje sastoji se od veziva, spoja bogatog ugljikom, spoja koji stvara pjenu, dehidratacijskog sredstva i katalizatora esterifikacije (Wladyka-Przybylak i Kozlowski, 1999). Kao vezivo najčešće se upotrebljavaju amino-formaldehidne, polivinilne i akrilne smole (Russel i sur., 2004). Pravilan izbor komponenata pjenastog karbonizirajućeg sustava je od iznimne važnosti s obzirom na toplinska svojstva istih budući da bi sredstvo za impregniranje trebalo razgrađivati pri temperaturama većim od onih na kojima počinje pougljenjavanje. Ujedno, to treba biti prije nego li počne skrućivanje tekuće pougljenjavanje taljevine. Upjenjujući premazi se obično nanose u količini od oko 500 g/m^2, što otprilike odgovara debljini nanosa od nekoliko stotina mikrometara. Odlika ovih premaza je mala masa te lagan nanos. Neki od nedostataka su podložnost abraziji i trošenju, stvaranje pukotina, i velika higroskopnost te sukladno tome ne nalaze ozbiljniju primjenu pri upotrebi u vanjskim uvjetima. Najviše se primjenjuju za obradu stropnih i zidnih oblogana kojima nema mehaničkih opterećenja (Roßkopf, 2003.).

Ablacijski premazi (engl. ablative coatings) sadržavaju sastojke koji se pod utjecajem topline mijenjaju endotermnim kemijskim reakciijama i na taj način hlade površinu materijala koji zaštićuju (Roggon, 2008). Za razliku od izolacijskih impregnirajućih premaza, ovi su premazi svoju upotrebu našli u nepovoljnim vanjskim vremenskim utjecajima te ne sadržavaju vodotopljive sastojke koji bi se mogli promijeniti pod utjecajem vode. Ablacijske materijale možemo definirati kao polimerne ili smole male toplinske vodljivosti koji se pri zagrijavanju površine pirolitičkirazgrađuju sloj po sloj ostavljajući na površini toplinski otporan sloj materijala koji će se na kraju razgraditi i izložiti površinu podloge djelovanju topline. U vidu pigmenta za ablacijske negorive premaze najčešće se koriste metalni oksidi. Na visokim temperaturama stvaraju se antimonovi halidi koji djeluju u kondenzatnoj i plinovitoj fazi (Wade i dr.,2001.). Pougljeni sloj, čija je primarna uloga štititi površinu drva od direktne izloženosti vatre, se stvara u gore navedenoj kondenzatnoj fazi. Plinovita faza donosi prekidanje nastajanja slobodnih radikala stvaranjem halogenih radikala. Nedostatak ablacijskih premaza jest to što moraju imati visoku koncentraciju aditiva kako bi se osigurao odgovarajući stupanj zaštite od vatre, zbog čega su ti premazi viskozni, podložni kredanju i ograničeno trajni (Wade i dr., 2001). Najbolju su djelotvornost pokazali premazi s velikimu djelom pigmenta.

Ti su premazi najčešće na osnovi epoksidinh, kloniriniranihalkidnih, poliuretanskih ili vinilnih smola. Područje upotrebe može biti unutarnje i vanjsko i to u različitim tonovima boja. Ablacijski se premazi mogu i kombinirati s premazima koji stvaraju pjenasti karbonizirani sustav (engl. ablativeintumescent system) i na taj se način može znatno poboljšati požarna otpornost drva kao konstrukcijskog materijala (Raevski i Vitaly, 1993).

8.2. ZAŠTITA DRVA IMPREGNACIJSKIM MATERIJALIMA

U vidu impregnacijskezaštite drva obrada se vrši tlačnom impregnacijom otopinama kemikalija uz primjenu tlačnih procesa sličnih onima za kemijsku zaštitu. Osnovna razlika između tlačne impregnacije i površinskih tretmana jest dubina penetracije usporivača gorenja koja za obradu površinskim tretmanima iznosi manje od 1 mm. Penetracija kemikalija pri tlačnoj impregnaciji ovisi o vrsti drva, strukturi drva i sadržaju vode. Drvo natopljeno dobrim zaštitnim sredstvom ne gori otvorenim plamenom, a brzina širenja i prenošenja požara znatno je umanjena (Jirouš-Rajković i Miklečić, 2009).

Prosušeno drvo, dobro impregnirano s efikasnim protupožarnim zaštitnim sredstvom, izgara po slijedećoj shemi: površina drva posmeđi i pougljeni ali se teško upali; eventualni plamen je slab i ograničen samo na zone koje su izravno izvrgnute temperaturi gorenja: plamen se razvija samo dotle dok je drvo izvrgnuto temperaturi gorenja i ne širi se na hladnija okolna područja; gorenje ne povisuje temperaturu drva u znatnoj mjeri, niti ne uzrokuje termičku razgradnju drva; nakon uklanjanja plamena drvo odmah prestaje goriti, a žarenje površine drva brzo prestaje (Špoljarić, 1964).

Danas su istražena protupožarna svojstva većine poznatih kemikalija. Gotovo svaka sol, ukoliko ne djeluje oksidativno, ili ne razvija gorive, otrovne ili štetne plinove, u dovoljnoj retenciji smanjuje zapaljivost i gorivost drva. Do sada nije uspjelo u potpunosti razjasniti djelovanje protupožarnih kemijskih zaštitnih sredstava. Poznate su četiri visokotemperaturne pojave, koje bi mogle djelovati u smislu smanjenja ili sprječavanja procesa oksidacije i toplinske razgradnje drva. To su povišenje temperature zapaljivosti, smanjenje intenziteta gorenja otvorenim plamenom, usporavanje širenja plamenom i smanjenje penetracije plamena kroz drvo. Visokotemperaturne reakcije protupožarnih kemikalija mogu teći po slijedećim shemama: oslobađa se voda kristalizacije; razvijaju

se negorivi plinovi; krutina se stali u viskoznu masu; smanji se količina gorivih plinova, koji se razvijaju zagrijavanjem drva (Špoljarić,1964).

Brojna novija istraživanja ukazuju na specifičnost drva kao materijala uzevši u obzir njegovu kompleksnu građu. Imajući na umu da je ono anizotropno, fascinira podatak da će dubina penetracije zaštitnog sredstva ovisiti o dijelu stabla iz kojeg je uzorak izrađen pa će tako ujedno postojati razlika između uzorka izrađenog od bjeljike te srži kao i u razlici visine kojoj uzorak pripada u samom stablu.

Vatrozaštitna svojstva koja mogu ispunjavati adekvatne zahtjeve ovog, za građevinski sektor najbitnijeg pitanja, danas sačinjavaju brojna kemijska sredstava sa velikom bazom kemijskih elemenata kemijskih spojeva od kojih definitivno neke vrijedi izdvojiti. Polimer amonijevog fosfata, gvanilurea fosfat, fosfatna kiselina, cinkov klorid, boraks i borna kiselina te razni aditivi, su najučestalije kemikalije na koje se vatrootporna sredstva oslanjaju premda treba izdvojiti fosfor kao polazišnu točku mnogih sredstava. Nabrojene anorganske soli suvodotopive i pri višestrukom pranju, ili ako je drvo izloženo vanjskoj klimi, mogu se isprati iz drva. Ususret velikim atmosferskim izlaganjima, besprijekorna vatrootporna sredstva se ipak s vremenom mogu narušiti, pa će se tako s prevelikom pojavom vlažnosti doći do migracije sredstva ka površini što će naposljetku rezultirati njegovim ispiranjem. Preostali udio koji će ostati u drvu nije značajan, stoga dolazi do bržeg zapaljenja. Jednako tako, uslijed male penetracije vatrozaštitnog sredstva u drvo, ne nastaje adekvatan sustav zaštite od zapaljivosti. Položaj drva u primjeni, kao i određena orijentiranost ka stranama svijeta, također ima ulogu, stoga se uzorci koji su postavljeni pod kutom od 90° našli u nezavidnoj poziciji.

Budući da se stvorio jal za sustavima otpornim na ispiranje, razvijeni su u vodi netopljivi organski usporivači gorenja. Ti sustavi obuhvaćaju smole koje polimeriziraju nakon impregnacije u drvo (najčešće su to mješavine uree, melamina, dicijandiamida, fosforne kiseline i formaldehida) te cijepljenje polimere (grafit polimere), koji se kao usporivači gorenja izravno vežu na celulozu (White i Dietenberger,1999).

Kod temperature izgaranja drva neke se kemikalije termički raspadaju i proizvode negorive plinove. Negorivi plinovi razrijeđuju gorive plinovite proizvode suhe destilacije drva u tolikoj mjeri, da oni ne mogu planuti, ili se intenzitet plamena i gorenja značajno

umanji. Ni to svojstvo protupožarnih kemikalija nije od većeg značenja za smanjenje zapaljivosti drva, iako umanjuje intenzitet gorenja drva.

Taljenje protupožarnih kemikalija u viskoznu masu izgleda da je od najveće važnosti za smanjenje gorivih svojstava drva. Kod temperature požara takve kemikalije se rastale u viskoznu masu. Gusta tekućina izbija iz zapaljenog drva i prekrije manje ili više čitavu površinu. Na taj način spriječi se pristup kisika zraka površini drva, a prema tome, i gorenje drva. U tu skupinu lakozapaljivih kemikalija spadaju i neka dobra zaštitna sredstva (amonijev sulfat, borna kiselina i boraks). Da se ne bi stekao pogrešan dojam, da je laka taljivost kemikalija njihovo osnovno protiv požarno svojstvo, treba napomenuti, da ima i veoma dobrih zaštitnih sredstava, koji se uopće ne tale i ne slijevaju kod temperature požara (amonijev sulfat, amonijev klorid, amonijev bromid i monomagnezijski fosfat) (Špoljarić, 1964).

Sam proces impregniranja drva vatrozaštitnim sredstvom vrši se po principu tlačenja u komori. Vakuum od početnih -0.098 Mpa, u vremenskom intervalu od 5 do 10 minuta uklanja suvišan zrak u drvu. Refluksiranjem vatrozaštitnog sredstva u komoru započinje impregniranje tlakom od cca. 0,98-1.96 MPa u trajanju od 20 minuta. Nakon otpuštanja tlaka, uzorci se kontrolno važu te se zatim ponovno tlačno obrađuju u zadanim vremenskim intervalima koji uglavnom iznose 30 minuta sa pauzama od 3 minute. Ukupno vrijeme tlačenja iznosi 180 minuta, što je vidljivo kratkotrajnije od prvih početaka zaštite impregniranjem gdje je ono trajalo od 2-20 sati. Sušenje nakon impregnacije iznosi 2 tjedna na sobnoj temperaturi te zatim slijedi završno sušenje temperaturom 60°C do konačnog sadržaja vode od 12%. (Wen i dr., 2017; Wen i suradnici 2014).

Negativni aspekti ovog vida zaštite dolaze u obliku visoke cijene, gubitka čvrstoće drva (cca. 20%) te korozije spojeva drvenih elemenata. Osim ovih primarnih promjena, također dolazi i do promjene boje na drvu(Špoljarić, 1964).

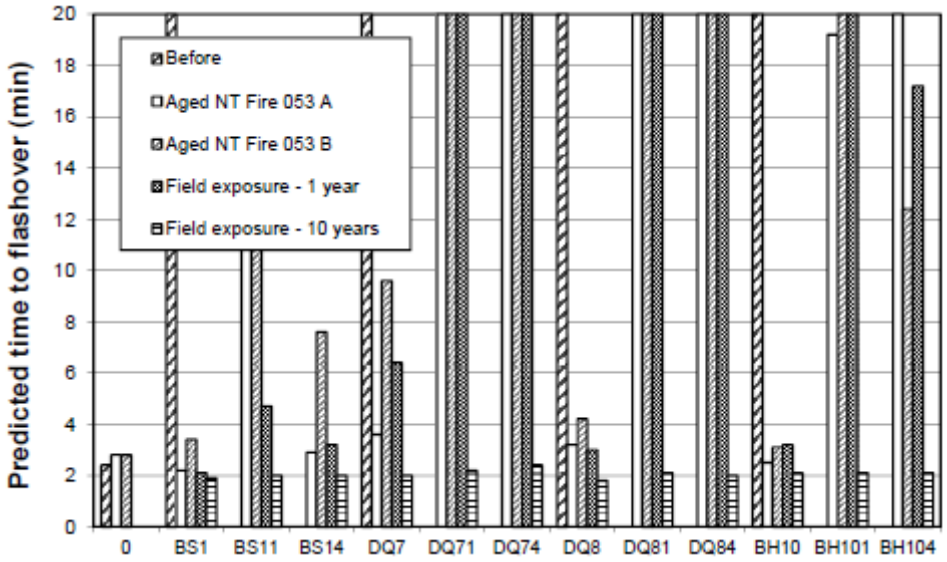
Osnovu velikog broja vatrozaštitnih sredstava čini kemijski element bora. Iako pokazuje elemente toksičnosti, valja naglasiti njegovo manje djelovanje na mehanička svojstva. Soli na bazi bora, i borna kiselina tvore zavidnu otpornost na požar. Borna kiselina smanjuje udio užarene mase ali nema prekomjernog utjecaja na samo širenje plamena, dok soli na bazi bora stvaraju staklastu barijeru te na taj način sprječavaju oslobađanje

zapaljivih plinova, reguliraju udio pougljenog sloja te smanjuju udio gubitka mase. Brojna istraživanja pokazala su i dokazala slične efekte borne kiseline i gvanilurea fosfata. Drvni uzorci tretirani ovim sredstvima rezultiraju gubitkom mase pri nižim temperaturama te manjim gubitkom mase pri višim temperaturama. Navedene kemikalije tvore više pougljenjenog sloja, stoga se može zaključiti da borna kiselina katalizira dehidrataciju u drvu(Wang i suradnici, 2004).

Vatrozaštitna sredstva koja sadrže određen udio poliuretana se sve više preferiraju budući da iste ne otpuštaju veliku količinu dima pri sagorijevanju. Poliuretanska pjena ima širok spektar primjene te se najčešće se koristi u vidu izolacije, pri pakiranju ambalaže, za razna ublaživanja udaraca i sl. Mana ovog predstavnika je njegova laka zapaljivost i mogućnost širenja plamena (Thirumal i suradnici, 2010).

Široko gledajući, dodatkom aditiva baziranih na halogenim elementima, fosfora idušika, dolazi do smanjenja širenja plamena. Upravo potonja dva u posljednje vrijeme sve više privlače pažnju budući da brzo stvaraju pougljenjeni sloj i reduciraju otpuštanje toksičnih plinova. Njihove vrline su mala toksičnost kao i mali udio dima. Prednosti vatrozaštitnih sredstava koja sadrže dušik su sprečavanje nastanka zapaljivih plinova, razrjeđivanje zapaljivih plinova proizvedenih usred djelovanja dušičnih komponenti, te dodatno stvaranje pougljenjenog sloja (fizička barijera daljnjem raspadu uslijed rasta temperature) (Thirumal i suradnici, 2010).

Fosfor i dušik su komponente koje se nalaze često same u primjeni, ali kao "duo" čine zavidnu kombinaciju. Primjer takve kombinacije je amonijev fosfat. Teško zapaljiva komponenta, razrjeđivanje topline i potencijalno odgađanje zapaljenja čine glavnu prednost ovog vida zaštite. Topljivost u vodi iznosi <0,1g u 100ml, stoga su dobri za primjenu u eksterijeru. Komponente na bazi fosfora tvore jedan od najbolje poznatih vatrozaštitnih sredstava te se njihovo djelovanje očituje prvenstveno u formiranju pougljenog sloja. Neke organofosforne komponente su se pokazale dovoljno stabilnima do mjere da mogu djelovati kao fizička barijera opskrbi kisikom (Schartel, 2010). Također valja spomenuti kako komponente na bazi fosfora u nekim državama, primjerice u SAD-u, imaju problem u primjeni zbog utjecaja na mehanička svojstva drva uslijed čega dolazi do smanjenja istih, stoga će se za krovišta koristiti sredstva na bazi bora.



Slika 13.Prikaz utjecaja vremenske izloženosti i nagnutosti ka otporu zapaljenja (Östmman i Tsantaridis, 2016).

8.3. METODE ISPITIVANJA GORIVOSTI

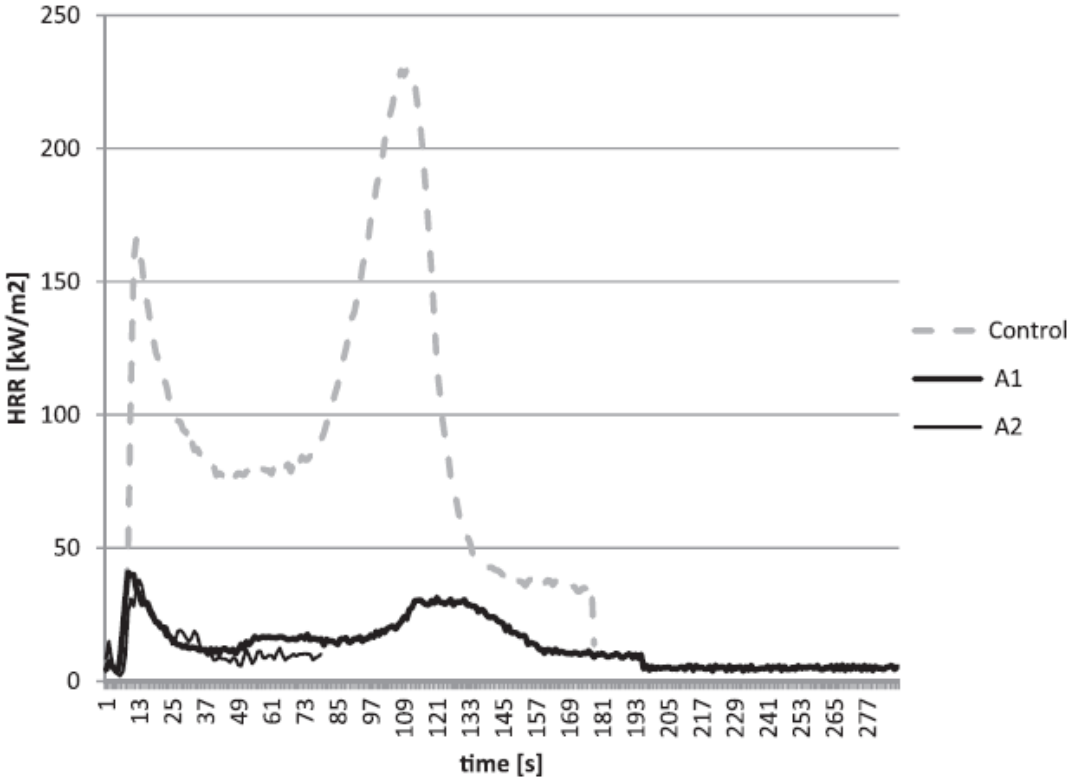
Najznačajnija ispitivanja i pokušaji ispitivanja gorivosti drvenih uzoraka obrađenih vatrozaštitnim sredstvom provedena su metodom konusnog kalorimetra (ISO 5660),(Slika 16). Ova metoda pruža najbolji uvid u ponašanje drva za vrijeme gorenja, udio otpuštanja topline kao i udio gubitka mase, proizvedenog dima te količine plamena. Uzorci drva budu izloženi toplinskom toku od 50 kWm^{-2}. Uslijed dovoljne opskrbe komponenata zapaljivih plinova prilikom prvog plamena javljaju se i prve promjene na krivulji ponašanja drva u požaru. Prije nego što dođe do daljnjeg otpuštanja zapaljivih plinova, dolazi do stvaranja pougljenjenog sloja te kratkoročnog usporavanja termičke razgradnje drva (Lowdenidr., 2013).

Za potrebe ispitivanja izrađena su tri uzorka drva borovine (Pinus sylvestris). Prvi je bio impregnacijski neobrađen te je služio kao kontrolni uzorak, drugi je impregniran 15%-tnom otopinom guanidin karbonatakao aditiva**,** te treći koji je sadržavao 15% otopine uree kao aditiva. Kalorimetar sačinjavaju konusni radijator s regulacijskim sustavom, paramagnetni analizator kisika, kontinuirani mjerni sustav uzorka te sustav za automatsko paljenje uzorka. Horizontalno postavljeni uzorcibivaju izloženi toplinskom zračenju od 35kW/m², što odgovara temperaturi radijatora od 650°C. Najčešći iznosi

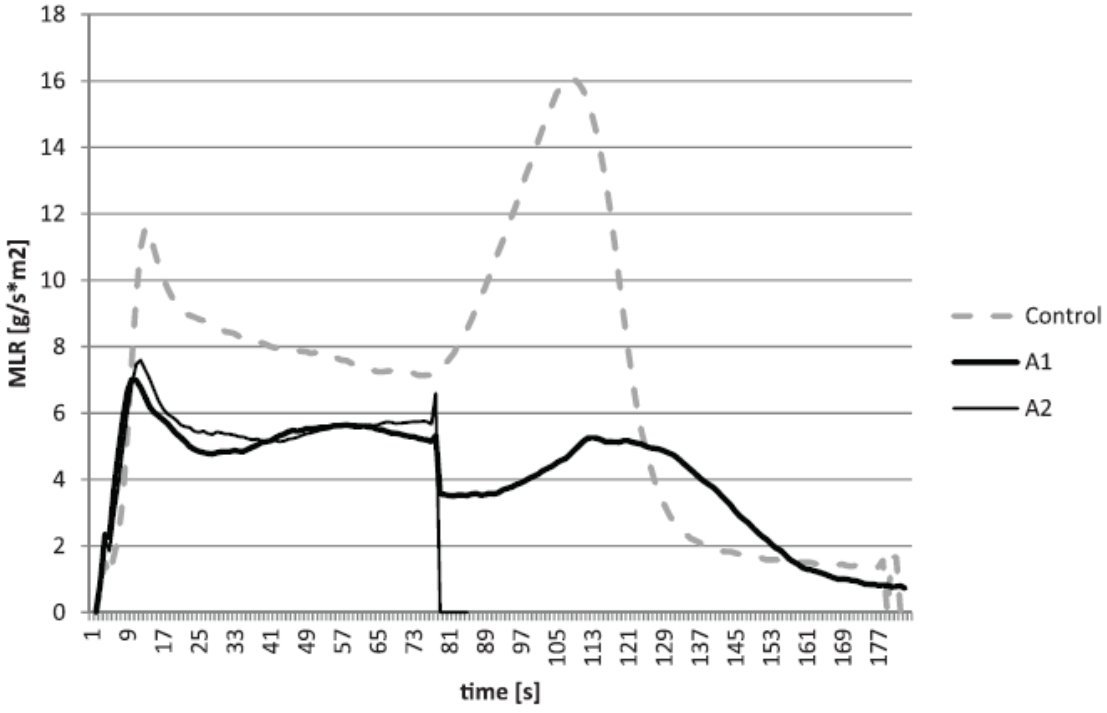
zračenja koji se koriste prilikom ovakvih ispitivanja su 35 i 50 kW/m^2, što odgovara temperaturnim uvjetima razvoja požara. Uzorci bivaju omotani u aluminijsku foliju ostavljajući jednu površinu uzorka otvorenom. Kompjuterski potpomognuto praćenja procesa rješavaju se sljedeća pitanja (Grześkowiak, 2017):

- udio oslobađanja topline,
- udio gubitka mase,
- udio pougljene mase,
- konačne preostale mase,
- vrijeme zapaljenja.

Analizom krivulje, uočljiva je razlika udjela oslobađanja topline nezaštićenog uzorka te zaštićenih uzoraka. Faza zagrijavanja kontrolnog uzorka i uzorka s udjelom otopine guanidin karbonata iznosi 12 sekundi. Uzorak koji sadrži 15% otopine uree kao dodatka, pokazuje povećano otpuštanje topline nakon svega 2 sekunde. Nakon početnog zagrijavanja i isparavanja vode iz drva, brzina oslobađanja topline iz nezaštićenog drvenog uzorka je gotovo četiri puta veća u odnosu na zaštićene drvene uzorke, te se slijedom toga također javlja i značajan gubitak mase. Nastali pougljeni sloj stvara svojevrsni štit i tako usporava brzo sagorijevanje premda će ipak pokleknuti pred toplinskom vodljivosti i toplinskim zračenjem. Uzorak s dodatkom uree pokazuje veću toplinu otpuštanja kao i veći gubitak mase. Ubrzo nakon velikog prodiranja topline u unutrašnjost drva pougljeni sloj gubi svoju funkciju i slijedi potpuni slom, što se ne vidi kod uzorka sa 15% udjelom uree kao aditiva. Dolazi se do zaključka kako nezaštićeni uzorak i uzorak sa otopinom guanidin karbonata kao aditivom ne pružaju otpor vatri. Sukladno tome dolazi do bržeg zapaljenja i to za 24 sekunde u usporedbi s trećim uzorkom. Vrijeme zapaljenja uzorka sa ureom kao dodatkom iznosi približno 40 sekundi. Prvo mjesto u iznosima ukupne topline sagorijevanja također pripada nezaštićenom uzorku (Grześkowiak, 2017).

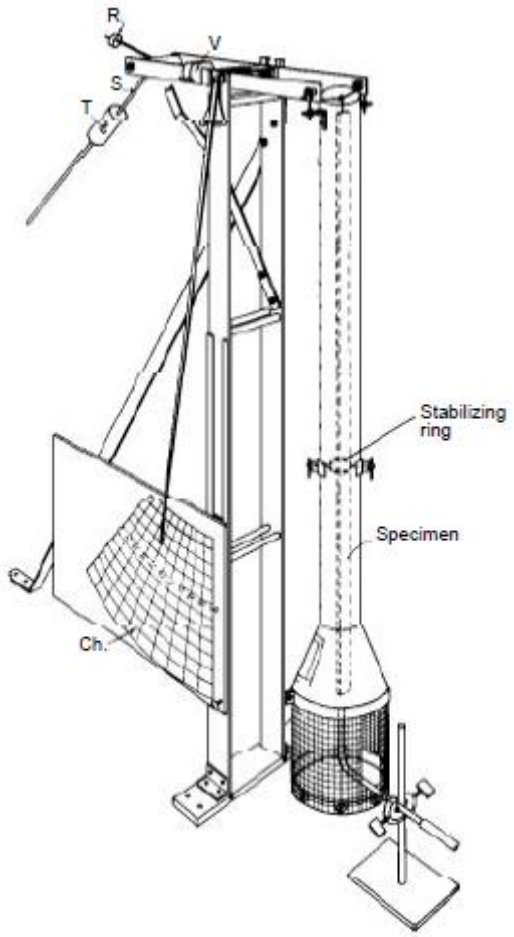


Slika 14.Oslobađanje topline nezaštićenog i zaštićenih uzoraka (Grześkowiak, 2017).



Slika 15.Udio gubitka mase nezaštićenog i zaštićenih uzoraka (Grześkowiak, 2017)

U drugom primjeru koji je bio proveden na uzorku drva korejske borovine još jednom se uočava važnost penetracije zaštitnog sredstva u drvo, koja opet ovisi o vrsti drva. Svaka akcija ima reakciju pa će tako dobra odnosno loša penetracija u drvu, biti reflektirana kroz udio otpuštanja topline, udio gubitka mase, vrijeme oslobađanja hlapivih komponenata, stvaranje pougljenog sloja te mnoge druge uzročno-posljedične veze što će na kraju rezultirati bržom unutrašnjom destrukcijom te konačno potpunim slomom (Wen i dr., 2017).



Slika 16.Karakteristično ispitivanje gorivosti drvnog uzorka(Sweet, LeVan,White, Tran, DeGroot, 1996).

Pri istraživanju ponašanja polimernih materijala pri gorenju prvenstveno se koristi kalorimetar s praćenjem izgaranja na mikrorazini (engl. micro scale combustion calorimeter). Slično kao i metoda konusnog kalorimetra, ona pruža uvid u udijele otpuštanja topline, pougljenog sloja, ali za razliku od gore prikazane metode, ovdje je provedbu ispitivanja potrebno svega cca. 5 mg uzorka. Dodatna vrlina leži u činjenici da

je prikazivanje rezultate moguće i u mikro ljestvici budući da se može pratiti potrošnja kisika.

Predodžbu o potrebnom vremenu za postizanje prvotnog zapaljenja i daljnjeg širenja plamena donosi norma ISO 5658. Uzorci drva budu izloženi pod kutem od 30° vertikalnou smjereni ka izvoru zračenja topline. Dobiveni rezultati se reflektiraju u informacijama o vremenu širenja plamena, brzini otpuštanja topline te prosječne topline koju ispitivani materijal otpušta.

EN 13823 koja objedinjuje karakteristike ponašanja u požaru svih građevnih proizvoda osim podnih obloga. Karakterizira je pojedinačno ispitivanje uzoraka koje se vrši plamenikom te trokutu kao nosaču konstrukcijskog materijala. Maksimalna izložena toplina odgovara iznosu od 40 kW m^{-2}na površini iznosa 300 cm^{-2} (Lowdenidr., 2013).

Norma koja se bavi isključivo ispitivanjem ponašanja podnih oblog za vrijeme požara je EN ISO 9239-1:2010. Horizontalno postavljeni uzorci budu nakošeni pod kutem od 30° te izloženi izvoru topline približno 11 kW m^{-2} na jednom kraju te 1 kW m^{-2} na drugom. Ako nakon 30 minuta izlaganja uzorak i dalje gori, trenutna količina topline se bilježi kao kritična (Lowden i dr., 2013).

8.4. SVOJSTVA I PRIMJENA ZAŠTIĆENOG DRVA

Protupožarna zaštita drva bi trebala biti jeftina i efikasna te ujedno ne bi smjela u značajnijoj mjeri umanjivati niti fizička niti mehanička svojstva drva. Poveća retencija nekih soli može uzrokovati krhkost drva a koncentrirane otopine nekih kemikalija razgrađuju drvo. Sredstva za zaštitu od požara koja se nalaze u komercijalnim postupcima ne oštećuju drvo i ne umanjuju čvrstoću materijala. Oštećenja nastala za vrijeme impregniranja su posljedica velikog tlaka, temperature i dugotrajnih velikih pritisaka koji se ne mogu izbjeći uzevši u obzir zadane iznose retencije zaštitnog sredstva.

Korozivna zaštitna sredstva uvelike oštećuju uređaje za impregnaciju i metalne građevinske elemente koji dolaze u kontakt s impregniranim drvom. Ovaj nedostatak se djelomično umanjuje dodatkom antikorozivnih sredstava. Higroskopnost drva povećava se higroskopnim solima. Prilikom nepovoljnih vremenskih uvjeta (poveći sadržaj vlage u

interijeru i eksterijeru), na površini drva se skuplja voda što rezultira razaranjem čavala, vijaka i ostalih metalnih dijelova. Također, vlažni vremenski uvjeti imaju negativan utjecaj i na boje i lakove(Špoljarić, 1964).

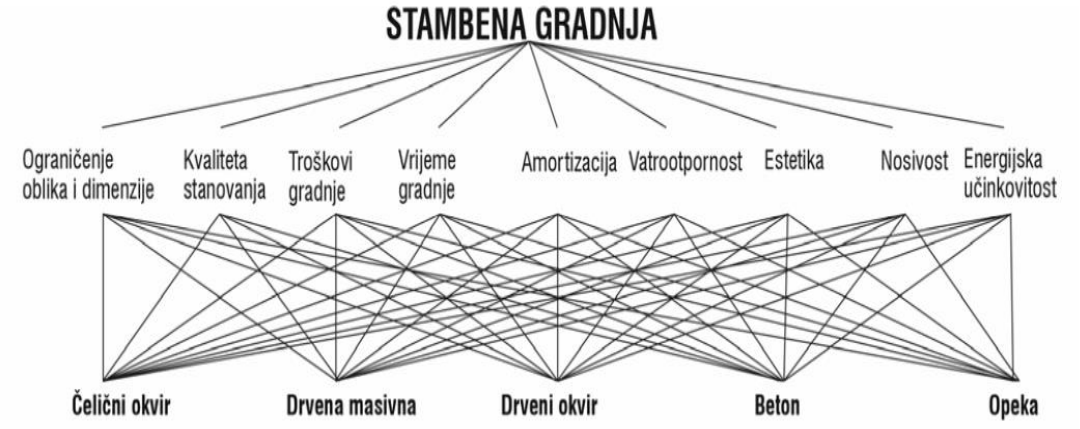
Velika koncentracija zaštitnih soli ima negativan odraz na mehaničku obradu drva. Naime, impregnirano drvo teško se pili i blanja s obzirom da se alati brže troše na tvrdim česticama izlučene soli u drvu. Ukoliko drvo nije dovoljno dobro obrađeno prije impregnacije, ono će se po završetku impregniranja morati obrađivati s alatima iz specijalnih čelika. Osim velikih koncentracija soli u drvu, kemijski sastav zaštitnog sredstva (kemijska korozija čelika) je glavni uzročnik kvarenja alata i strojeva.

"Dvije muhe jednim udarcem" je izraz kojim se može opisati upotreba boraksa, borne kiseline i cinčanog klorida budući da isti imaju funkciju biološke i protupožarne zaštite drva.

9. USPOREDBA POŽARNE OTPORNOSTI DRVA I DRUGIH GRAĐEVNIH MATERIJALA

U suvremenom građevinarstvu se uz drvo primjenjuju i drugi građevnimaterijali, najčešće beton, čelik, opeka i aluminij koji pomalo istiskuju drvo. No jesu li ti materijali uistinu kompatibilna zamjena za drvo, imaju li oni određene nedostatke koje drvo može iskoristiti? Postoje li razlike u ponašanju pri velikim temperaturama između prirodnih i umjetnih materijala? Može li se sa sigurnošću okarakterizirati pojedini materijal kao savršen za primjenu pri gradnji? Pri izboru građevnog materijala za stambenu gradnju imamo više kriterija koji utječu na krajnji odabir, a najbitniji su nosivost, požarna sigurnost, energetska učinkovitost, kvaliteta stanovanja i estetika.

Općenito, može se reći da postoji devet temeljnih kriterija koji imaju utjecaj na izbor konstrukcije (Slika 17).



Slika 17.Stablo odlučivanja za izbor najprikladnije konstrukcije za stambenu gradnju (Kuzman i dr., 2010).

Navedeni kriteriji se dalje mogu podijeliti u tri skupine:

1. mehanički i tehnički kriterij (energetska učinkovitost, nosivost, ograničenja oblika i dimenzija, požarna otpornost),
2. ekonomski kriterij (troškovi amortizacije, troškovi gradnje i vrijeme gradnje),
3. stambeni kriterij (estetika i kvaliteta stanovanja).

Građevine moraju biti projektirane i izvedene tako da u slučaju izbijanja požara:

- nosivost građevine ostane očuvana tijekom određenog vremena,
- nastanak i širenje požara i dima unutar građevine budu ograničeni,
- širenje požara na susjedne građevine bude ograničeno,
- korisnici mogu napustitizgradu ili da je na drugi način moguće njihovo spašavanje,
- je sigurnost spasilačkih ekipa uzeta u obzir.

Građevni se elementi s obzirom na utjecaj na zapaljenje, širenje vatre i razvoj dima razvrstavaju u razrede te su definirane metode ispitivanja prema kojima se provodi razredba istih. Navedena razredba (tzv. Euroclass sustav), građevne proizvode dijele na sedam grupa sukladno njihovim reakcijama na požar (Commission Decision 2000/147/EC).

Tablica 9.Opis djelovanja i scenarija požara za grupe (razrede) proizvoda prema Euroclass sustavu (Hakkarinen i dr., 2005)

Razred	**Opis djelovanja**	**Scenarij požara i razvoj topline**	**Primjeri proizvoda**	
A1	Ne pridonosi požaru	Potpuno razvijen požar u prostoriji	Najmanje 60 kW/m^2	Proizvodi od prirodnog kamena, betona, cigle, keramike, stakla, čelika i mnogi metalni proizvodi
A2	Ne pridonosi požaru	Potpuno razvijen požar u prostoriji	Najmanje 60 kW/m^2	Proizvodi slični onima iz razreda A1, uključujući male količine organskih spojeva
B	Vrlo ograničen doprinos požaru	Pojedinačni gorući elementi u prostoru	40kW/m^2	Gipsane ploče s različitim (tankim) površinskim oblogama Drvni proizvodi obrađeni usporivačima gorenja
C	Ograničen doprinos požaru	Pojedinačni gorući elementi u prostoru	40kW/m^2	Fenolne pjene, gipsane ploče s različitim površinskim oblogama (deblje nego u B razredu)
D	Prihvatljiv doprinos požaru	Pojedinačni gorući elementi u prostoru	40kW/m^2	Drvni proizvodi debljine ≥10 mm i gustoće ≥400 kg/m^3(ovisno o krajnjoj upotrebi
E	Prihvatljiv doprinos požaru	Mali plamen	Palmen visine 20 mm	Vlaknatice make gustoće, izolacijski proizvodi na osnovi plastike
F	Nema zahtjeva	-	-	Proizvodi koji se ne ispituju (nema zahtjeva)

Nova europska razredba građevnih proizvoda prema ponašanju u požaru ima dva podsustava: jedan obuhvaća građevne proizvode poput stropnih i zidnih obloga, bez podnih obloga, a drugi, sličan podsustav, odnosi se na podove. Oba sustava imaju razrede A do F od kojih su razredi A1 i A2 negorivi građevni proizvodi (Östman i Mikkola, 2006).

Tablica 10.Razredba građevnih proizvoda (bezpodnih obloga) prema ponašanju u požaru (Östman i Mikkola, 2006)

Razred	**Razred dima**	**Razred gorućih kapljica**				FIGRA ** (W/s)	**Tipični proizvodi**
			Negorivi	SBI*	Mali plamen		
A1	-	-	x	-	-	-	Kamen, beton
A2	s1, s2 ili s3	d0, d1 ili d2	x	x	-	≤120	Gipsane ploče (tanki papiri), mineralna vuna
B	s1, s2 ili s3	d0, d1 ili d2	-	x	x	≤120	Gipsane ploče (debeli papir), drvo obrađeno usporivačima gorenja
C	s1, s2 ili s3	d0, d1 ili d2	-	x	x	≤250	Obloga na gipsanim pločama
D	s1, s2 ili s3	d0, d1 ili d2	-	x	x	≤750	Drvo, drvne ploče
E	-	- ili d2	-	x	x	-	Neki sintetički polimeri
F	-	-	-	-	-	-	Nisu određena svojstva

**SBI=Single BurningItem test (ispitivanje pojedinačnim gorućim elementom), osnovno ispitivanje reakcije na požar građevnih proizvoda osim podnih obloga (EN 13832).*

**FIGRA=FireGrowth Rate, glavni parametar za određivanje razredazapaljivosti prema SBI testu.*

Globalni koncept pouzdanosti konstrukcija u požaru (Boko i dr., 2010):

- polazi se od toga da su karakteristike građevine relevantne za razvoj požara (scenarij razvoja požara, požarno opterećenje, brzina razvoja požara, predviđeni požarni odjeljci i uvjeti ventilacije),
- rizik nastajanja požara povećava se s veličinom požarnog odjeljka, ali i smanjenjem razine mjera i smjernica za zaštitu ljudi i imovine u slučaju požara,
- analiza rizika temelji se na statističkim podacima parametara nastanka požara te na pretpostavkama i simulacijama realnog požarnog procesa,
- određivanjem parametarske temperature krivulje kao funkcije realnog požarnog opterećenja gdje se uzima izravno i rizik pojave požara,
- analiziranjem globalnog ponašanja konstrukcije pod utjecajem parametarske temperature krivulje u konstrukciji s ostalim statičkim djelovanjima na konstrukcije u slučaju požara,
- određivanjem vremena proračunske otpornosti konstrukcije na realni požar,
- određivanjem zahtijevanog vremena (aspekt pouzdanosti konstrukcija) potrebnog za evakuiranje ljudi i zaštitu imovine (rad vatrogasnih i specijalnih jedinica za intervencije u slučaju požara),
- zahtijevano vrijeme određuje se nacionalnim dokumentom za djelovanje požara.

9.1. BETON

Beton je građevinski materijal izrađen miješanjem veziva (cement), vode i agregata (pijesak, šljunak drobljenac). Osim tih obaveznih komponenti u sastav betona mogu ulaziti i dodaci (aditivi) koji mu daju posebna svojstva (plastifikatori, regulatori vezivanja, sredstva protiv mraza...).

Preteča današnjih betona javlja se već u antici gdje su ga stari Rimljani ispočetka koristili isključivo kao gašeno vapno nakon čega se postepeno krenulo sa dodavanjem mljevene opeke koja je kasnije zamijenjena vulkanskim pepelom te se na taj način dobilo kvalitetno i trajno hidraulično vezivo. Betona ima više vrsta, a najčešće se klasificira prema gustoći gotove smjese (uglavnom od 0,3 do 2,5 t/m^3) ili prema vrsti veziva. Beton koji je danas najčešće u upotrebi je onaj sa cementnim vezivom. Laki betoni su betoni veće poroznosti a samim time i povećane zvučne te toplinske izolacije koji su dobiveni upotrebom lakih agregata (npr. drobljene opeke, troske, plovućca, ekspandirane gline), dodavanjem različitih kemikalija koje razvijaju plinove i tako u betonu stvaraju zračne mjehuriće ili dodavanjem smole koja je prethodno intenzivnim miješanjem pretvorena u pjenastu masu. Armirani beton kompozitni je materijal dobiven sprezanjem betona i armature. Budući da beton može preuzeti samo malena vlačna naprezanja, u većini konstruktivnih elemenata, u kojima se obično javljaju takva naprezanja, umeće se čelična armatura koja ih u potpunosti preuzima, a beton ostaje opterećen samo tlačnim naprezanjima, koja izvrsno podnosi. Armaturu danas uglavnom čine čelične žice, glatke ili rebraste šipke te mreže s kvadratičnim ili pravokutnim otvorima. Zahvaljujući gotovo jednakom koeficijentu toplinskog rastezanja betona i čelika, veza između betona i armature ne slabi ni pri većim promjenama temperature (Brozović i dr., 1999-2009).

Prednosti betona (Gukov, 2010):

- nezapaljivost–armirani beton po otpornosti prema požaru pripada povoljnijim građevinskim materijalima. Beton je materijal otporan na djelovanje požara, na što osobito utječe vrsta upotrebljenog agregata. Najbolje vrste agregata prema požaru su bazalt, diabaza, vapnenaci dolomit a posebno od šamot i troskaiz visokih peći. Za vrijeme požara voda ispari iz betona, što znatno povećava njegovu termičku otpornost,

- trajnost–trajnost armiranobetonskih konstrukcija osigurana je velikim dijelom time što beton štiti armaturu od korozije i što mu se čvrstoća u tijeku vremena povećava. To sve vrijedi uz uvjet da je konstrukcija načinjena od kompaktnog betona,
- relativno mali troškovi održavanja–troškovi održavanja armiranobetonskih konstrukcija vrlo su mali, kao u ostalom i za građevine od kamena. U pogledu higijene, armiranobetonske su konstrukcije u prednosti pred drvenim i čeličnim zbog svoje monolitnosti, u kojoj nema šupljinaza zavlačenjeparazita ili skupljanje prašine,
- mogućnost izrade najraznovrsnijih oblika–prilagodljivost armiranog betona svim potrebnim oblicima dopušta projektantu da zadovolji najrazličitije zahtjeve konstrukcijske, izvođačke ili arhitektonske prirode,
- relativno visoka tlačna čvrstoća,
- beton dobiva na kvaliteti što je stariji.

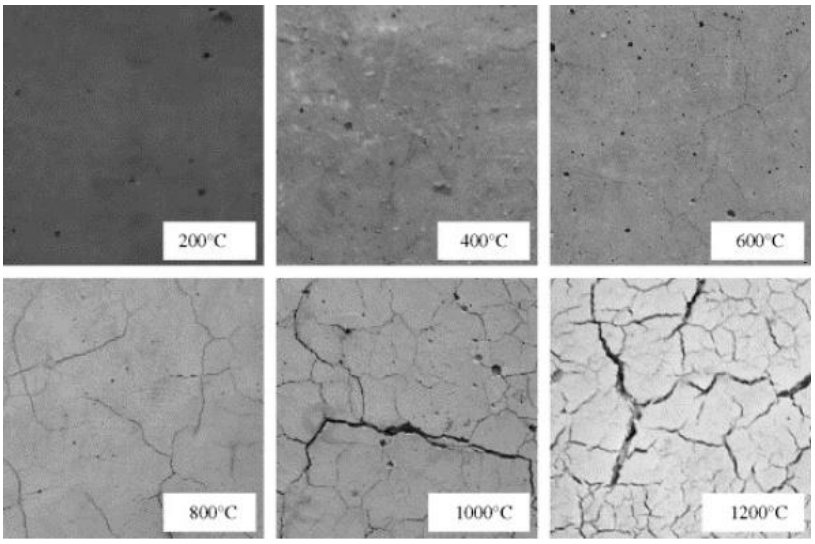
Kao i svaki materijal pa tako i beton ima svojih nedostataka:

- velika vlastita težina,
- velika provodljivost topline i zvuka,
- niska vlačna čvrstoća,
- teško naknadno provjeravanje armature,
- otežani radovi kod niskih i visokih temperatura. Ne bi trebalo betonirati kada je temperatura niža od +5°C. Kod visokih temperatura (>30°C) voda naglo hlapi iz betona,
- otežana naknadna adaptacija ili pojačanje gotove konstrukcije,
- korozija armature u betonu,
- dimenzionalna nestabilnost izazvana puzanjem i skupljanjem betona,
- poroznost,
- osjetljivost na mraz,
- mogućnost pojave pukotina koje ne narušavaju sigurnost i trajnost kada su ograničene širine, ali ipak kvare vanjski izgled,
- beton izložen duže vrijeme visokim temperaturama (>250°C) naglo gubi čvrstoću i prionjivost s čelikom, a osobito ako se prilikom gašenja požara polijeva vodom, kad zbog naglog hlađenja još više raspuca.

Iako beton kao građevni materijal pokriva gotovo 70% potreba u građenju, te o njemu postoje mnogobrojne studije, ovdje se bavimo samo njegovim ponašanjem u požaru. Beton na visokim temperaturama ima malu vrijednost toplinske provodljivosti (50 puta manju od čelika) i veliki specifični toplinski kapacitet te se zbog toga sporo zagrijava u požaru. Prilikom izloženosti požaru beton ne gori, ne proizvodi dim i ne proizvodi otrovne plinove.

Isto kao drvo, beton također prolazi kroz određeni broj faza prilikom požara (Slika 18) a one su sljedeće (Rukavina-Jelčić, 2015):

- 20– 80°C–polagani gubitak kapilarne vode i slabljenje kohezivnih sila,
- 100°C –gubitak slobodne vode,
- 80– 200°C–ubrzan gubitak kapilarne vode, a zatim i fizičkivezane vode,
- 80– 850°C–gubitak kemijski vezane vode,
- >300°C-značajan porast poroznosti betona i pojava mikro pukotina,
- 350°C–raspadanje nekih vrsta riječnog agregata,
- 374°C–kritična točka vode (ne postojislobodnavoda),
- 400-600°C–raspadanje $Ca(OH)_2$ na CaO i vodu,
- 573°C–α-ß transformacija kvarca u agregatu i pijesku,
- 550-600°C-značajan porast utjecaja topline na materijal,
- >700°C-dekarbonatizacija $CaCO_3$ u CaO i CO_2 (i u cementnoj pasti i u agregatu),
- 800°C–početak stvaranja keramičkih veza koje zamjenjuju hidrauličke veze,
- >1200°C–taljenje betona.



Slika 18.Izgled površine uzorka običnog betona nakon izlaganja visokim temperaturama

Pri djelovanju požara na betonske konstrukcije, mogu se pojaviti tri osnovne skupine oštećenja a ona su: odlamanje/pucanje dijelova betonskih elemenata koje može dovesti do ubrzanog gubitka njegova poprečnog presjeka i tako uzrokovati npr. izvijanje, lom uslijed savijanja i sl.; velike toplinske deformacije betonskih elemenata; smanjenje mehaničkih svojstava betona.

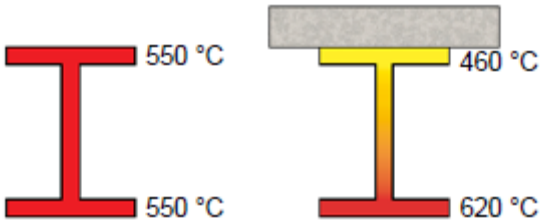
Slom betonske konstrukcije u požaru je rijedak slučaj međutim, ako i dođe do njega najčešći uzrok je nemogućnost susjednih elemenata konstrukcije da apsorbiraju velike toplinske deformacije u horizontalnom smjeru što uzrokuje slom uslijed smicanja ili izvijanja stupova i zidova. Za adekvatnu zaštitu betonskih konstrukcija u slučaju požara potrebno je kvalitativno projektirati sastav betona.

Budući da je beton negorivi materijal koji ima malu brzinu prijenosa topline, smatra se da nije potrebna dodatna zaštita betonskih konstrukcija. Eventualno, kao mjera dodatne zaštite koriste se zaštitnislojevi od gipsanih ploča. Jeftinija varijanta je povećanje dimenzija elementa i zaštitnoga sloja betona, tzv. "preskriptivni" pristup (ovaj pristup se temelji na uporabi tabličnih podataka za preporučene vrijednosti minimalnih dimenzija elemenata i minimalne osne udaljenosti glavne armature za različite tipove betonskih elemenata za određeni period požarne otpornosti)(Rukavina-Jelčić, 2015).

Promatrajući razna svojstva betona kao konstrukcijskog materijala, prema reakciji na požar po normi HRNEN 13501–1: 2010, on spada u razred A1 i A2, odnosno u razrede negorivih materijala (svrstani su zajedno sa proizvodima od kamena, keramike, opeke, stakla i velikim brojem metalnih proizvoda; te sa proizvodima koji sadržavaju malu količinu organskog materijala).

9.2. ČELIK

Čelik je anorganski materijal i kategorizira se kao nezapaljiv. Ipak, pri povišenim temperaturama gubi nosivost. Za očuvanje sigurnosti i nosivih svojstava potrebna je stoga protupožarna zaštita. Protupožarna zaštita je skup mjera i postupaka koji se poduzimaju radi sprječavanja nastanka i širenja požara, utvrđivanja i uklanjanja uzroka požara, otkrivanja i gašenja požara, te pružanja pomoći pri uklanjanju posljedica uzrokovanih požarom. Tako je potrebno osigurati da temperatura čelika ne prijeđe 550 °C kod elemenata izloženih požaru sa sve četiri strane (primjerice stupova), odnosno 620 °C za elemente zaštićene betonskom pločom s gornje strane (Milanović i dr., 2015).



Slika 19.Opterećenje čelika pod temperaturom(Milanović i dr., 2015).

S obzirom da se u zatvorenim prostorima pri požaru brzo razvijaju temperature preko 750°C, očitoje da ga se ne može smatrati neosjetljivim na djelovanje požara.

Posebna vrsta konstrukcijskih čelika koja se razvila iz potrebe za povećanjem otpornosti čelika na požar jesu vatrootporni čelici. Ti su čelici termomehanički obrađeni kako bi pokazali bolje performanse pri požarnom djelovanju. Njihova mikrostruktura sačinjena je od ferita i perlita kao i kod običnih konstrukcijskih čelika, no dodatak molibdena i kroma čini je stabilnom čak i na 600°C. Ovi čelici pri navedenoj temperaturi moraju zadržavati otprilike dvije trećine granice popuštanja koju imaju pri ambijentalnoj temperaturi (Milanović i dr., 2015).

Zahtjevi pri eksploataciji vatrootpornih čelika vrlo su veliki. Visoka temperatura, te niz agresivnih spojeva prisutnih u struji plina uzrokovat će oštećenja na površini čelika. Nastala oštećenja isključivo su kemijskog karaktera stvarajući kemijske spojeve, okside i nitride, koji po svojoj strukturi i mehaničkim svojstvima odskaču od osnovnog materijala od kojeg je načinjena konstrukcija, što uzrokuje lom takvih elemenata, te smanjenje ukupne mase osnovnog materijala s obzirom na vrijeme.

Čak i ako ne otpadne oksidni sloj koji nastaje pri kemijskoj reakciji, postoji mogućnost da nastali sloj posjeduje sam po sebi pukotine, te na taj način omogućava daljnje napredovanje oksidacije i propadanje konstrukcije. Zbog svega toga u praksi se ne može koristiti nelegirane ili pak nisko legirane čelike, jer je njihov gubitak mase u ovakvim uvjetima eksploatacije vrlo visok. Zato se jedino rješenje primjene čelične konstrukcije vidi kod visoko legiranih čelika na bazi kroma i nikla, gdje je u nekim slučajevima poželjno prisustvo silicija i aluminija zbog poboljšanja mehaničkih i vatrootpornih svojstava, tj. otpornosti na izgaranje.

Kod čeličnih konstrukcija djelovanje požara – visoke temperature mogu imati za posljedicu povećanje sile (naprezanja) u konstrukciji zbog spriječenosti deformacija konstrukcije ili smanjenje nosivosti zbog degradacije presjeka i smanjenja otpornosti (velike deformacije). Zbog visokih temperatura slično ponašanje događa se i kod armiranobetonskih konstrukcija, dok kod drvenih konstrukcija povećanje sile nije značajno (Boko i drugi; 2010).

ZAKLJUČAK

Predrasude prema drvu kao nepouzdanom materijalu su i danas prisutne. Usporedivši drvo te istražujući njegova kako pozitivna tako i negativna svojstva sa nekim drugim konstrukcijskim materijalima, stječese dojam pouzdanja i sigurnosti kojeg ono može pružiti. Sagledavši cjelokupno ponašanje drva u uvjetima požara, uočavaju se određeni nedostaci ali brojne prednosti koje ovaj materijal posjeduje. Stvaranje nove točke zapaljenja, toplinska vodljivost, otpuštanje topline, kao i volumna masa konstrukcijskog materijala, ekonomska isplativost provedbe projekta konstruiranja i same zaštite otpornosti na požar te eko utjecaj, samo su neke od prednosti drva za gradnju. Drvo i drvni materijali itekako su poželjni pri korištenju kako u interijeru tako i u eksterijeru čak i u uvjetima izlaganja visokim temperaturama. Unikatna sposobnost da brani samo sebe, odnosno da stvara pougljenjeni sloj, odaje dojam fascinantnosti budući da je ujedno i estetski oku ugodan ali i spreman oduprijeti se ka najvećim izazovima. Odgovarajućim dimenzioniranjem i adekvatnom vatrootpornom zaštitom ono spada u sam vrh po pitanju otpornosti na djelovanje požara, budući da gorenjem kontrolirano gubi svoja mehanička svojstva, što omogućuje pouzdane proračune požarne otpornosti i otvara nova polja primjene. Poistovjećivanjem ogrjevnog i građevnog drva stvaraju se nepotrebne zablude, stoga je potrebno kontinuirano raditi na edukaciji potencijalnih korisnika drvenih građevina.

LITERATURA

1. Barić, I.; Štefić, T.; Takač, S. (2011), Proračun protupožarne otpornosti drvenih konstrukcija prema euronormi, Građevinski fakultet Sveučilišta u Osijeku, Pregledni rad, 14-19.
2. Bjelanović, A., (2011), Ponašanje drva i drvenih konstrukcija u požaru i otpornost na djelovanje požara, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Hrvatska sveučilišna naklada, Zagreb.
3. Bjelanović, A., Rajčić, V., (2005), Drvene konstrukcije prema europskim normama, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Hrvatska sveučilišna naklada, Zagreb.
4. Boko, I.,Peroš B., Torić, N., (2010), Čelične konstrukcije u požaru, Građevinar 62(5), 393-394-395.
5. Brozović,D.,Kovačec, A.,Ravlić, S., (1999- 2009), Hrvatska enciklopedija.
6. Drakulić, M., (2015/2016),Osnove nastanka i širenja požara u građevini, Predavanja, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
7. Van Esch, G.J.,(1997), Flame retardants. A general introduction, World Health Organization Geneva.
8. Gukov I.,(2010), Betonske konstrukcije 1, Predavanja, Zagreb.
9. Hakkarainen, T.,Mikkola, E.,Östman, B.,Tsantaridis, L.,Brumer, H.Piispanen,P.,(2005), Innovative eco-efficient high fire performance wood products for demanding applications [Internet], <raspoloživo na: http://virtual.vtt.fi/virtual/innofirewood/stateoftheart/database/database.html>(5.12. 2008.)
10. Jirouš-Rajković,V., Miklečić, J., (2009), Usporivači gorenja drva, Drvna industrija 60 (2) 111-121.
11. Kuzman,M.K.,Hrovatin, J.,Grošelj, P., (2010), Usporedba različitih tipova konstrukcija stambenih zgrada, Građevinar 63(9/10), 870-871.
12. LeVan, S., (1984),Chemistry of fire retardancy. In: Rowell, R.M. (Ed) The chemistry of solid wood. Advances in chemistry series, number 207. Washington, DC: American chemical society. Chapter 14: 538-541, [Internet],<raspoloživo na: http://fpl.fs.fed.us/documents/pdf1984/levan84a.pdf>(10.12.2008.)

13. LeVan, S.,Winandy, J.E.,(1990),Effects of fire retardant treatments on woods trength: a review. Wood and fiber science, 22(1) : 113-117
14. Lowden, Laura andHull, Richard, T., Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction. Fire Science Reviews, 2 (1). p. 4. ISSN 21930414, [Internet], <raspoloživo na: http://clok.uclan.ac.uk/9641/>
15. Magerle, M., (1996), Drvene konstrukcije – svojstva drva, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, IGH Zavod za betonske i zidane konstrukcije.
16. Marney, D.C.O., Russell, L.J.,Humphrey, D.G.,(2005), Fire retardants for outdoor timber applications – A literature review.
17. Milanović, M.,Rogić, I.,Šitum, A., (2015), Procjena metode za proračun požarne otpornosti čeličnog nosača, Rad za rektorovu nagradu,Građevinski fakultet Sveučilište u Zagrebu.
18. Narodne novine (2013), Pravilnik o otpornosti na požar i drugim zahtjevima koje građevine moraju zadovoljiti u slučaju požara. Zagreb: NN/29/2013, Broj dokumenta u izdanju 505, [Internet], <raspoloživo na: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2013_03_29_505.html>(8.3.2013.)
19. Östman, B.A.-L.,Mikkola, E.,(2006), European classes for the reaction to fire performance of wood products. HolzalsRoh-undWerkstoff, 64: 327-333
20. Pavelić, Đ., (2015), Ponašanje građevnog materijala u požaru, Sigurnost 57 (3) 263-266.
21. Purkiss, J. A., (2007), Fire safety engineering – Design of structures, Seconde dition. Oxford: ElsevierLtd.
22. Roggon, B.,(2008),Wennn´s brennt Farbe schűtzt.Applica 4: 10-11
23. Roßkopf, W.,(2003),Die durchs Feuer gehen. Der Maler und Lackierermeister 9: 13-14
24. Rowell, R.,LeVan-Green, S.,(2005),Thermal Properties. In: Handbook of wood chemistry and wood composites, [Internet], <raspoloživo na: http://www.fpl.fs.fed.us/documents/pdf2005/fpl_2005_rowell003.pdf(10.12.2008.)
25. Rukavina- Jelčić, M., (2015/2016), Djelovanje požara na armiranobetonske elemente i njihova zaštita, Predavanja, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.

26. Russell, L.J.,Marney, D.C.O.,Humphrey, D.G., Hunt, A.C.,Dowling, V.P,Cookson, L.J., (2004), Combining fire retardant and preservative systems for timber products in exposed applications-state of the art review. Forest and wood products research and development corporation, Victoria 8005, [Internet], <raspoloživo na http://www.fwprdc.org.au/content/pdfs/new%20pdfs/PN04.2007_fire_ret_literature_review_Final.pdf> (10.12.2008.)
27. Schwartz, R.,(2003), Coathings that can save lives: Intumescent coatings technology can be the next line of defense against ono of Mother Nature´s most lethal weapons. Coating World, [Internet], <raspoloživo na: http://findarticles.com/p/articles/mi_hb053/is_11_8/ai_n29044423> (8.12.2008.)
28. Špoljarić Z., (1964), Zaštita drva, Kućna tiskara Sveučilišta u Zagrebu – Trg M. Tita 14, 145-155.
29. The American Wood Council, (2003), <http://www.awc.org/codes-standards/publications/library>
30. Thirumal, M.,Khastgir, D.,Nando, G.B.,Nik, Y.P.,Singha, N.K.,(2010), Halogen-free flame retardant PUF: Effec of melamine compounds on mechanical, thermal and flame retardant properties. Polymer Degradation and Stability 95, 1138-1145.
31. Wade, C.A.,Callanghan, S.J.,Strickland, G.S.,Bennett, A.F.,(2001), Investigation of methods and protocols for regulation the fire performance of materials with applied fire retardant surface coatings. Fire Code Research Reform, FCRC Project 2 B-3.
32. WangQ.,Jian Li,Winandy J., (2004),Chemical mechanism of fire retardance of boric acid on wood. Wood SciTechnol 38, 375-379.
33. Wen, M., Sun, Y.,Shi, J., Park, H., (2017), Changes in physical properties of Sugi, Hinoki, and Korean Pine Wood after Fire- retardant Tretment, Bio Resources 13(1), 765-767.
34. White, R.H.,Dietenberg, M.A.,(1999), Wood Handbook Wood as an engineering material. General TehnicalReport 113. Chapter 17, [Internet], <raspoloživo na:http://www.fpl.fs.fed.us/documents/pdf2001/white01a.pdf>(10.12.2008.)

35. Wladyka-Przybylak, M.,Kozlowski, R.,(1999), The thermal characteristics of different intumescent coatings. Fire and materials 23, 33-43.
36. Slika 1.
https://www.google.hr/search?biw=1366&bih=662&tbm=isch&sa=1&ei=2uvJWpCTFMy2kwWR9riQCA&q=drvo+napadnuto+gljivicama&oq=drvo+napadnuto+gljivicama&gs_l=psy-ab.3...12469.20921.0.21294.16.15.1.0.0.0.84.1141.15.15.0....0...1c.1.64.psy-ab..0.0.0....0.5MssreCFtKM#imgrc=zqtfAlsCFXne0M
37. Slika 3.
https://www.google.hr/search?q=alligatoring&espv=2&biw=1366&bih=667&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwj9hbCL1qrMAhUqJJoKHUBlB2IQ_AUIBigB#tbm=isch&q=drvo+u+po%C5%BEaru&imgrc=93xkIqBMPVUPRM%3A
38. Slika 6.
https://www.google.hr/search?rlz=1C1CHBF_hrHR728HR729&biw=1366&bih=662&tbm=isch&sa=1&ei=wvt2Wtf1Moj5wALo94HgAg&q=alligatoring+drvo&oq=alligatoring+drvo&gs_l=psy-ab.3...4490.7508.0.7674.10.8.2.0.0.0.95.598.8.8.0....0...1c.1.64.psy-ab..0.0.0....0.aBzfVEOUkTQ#imgrc=ohWftH-dOLh7hM: