

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta  
za gradbeništvo  
in geodezijo



Jamova cesta 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

**DRUGG** – Digitalni repozitorij UL FGG  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Muminović, A., 2016. Požarna zaščita jeklenih konstrukcij. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Hozjan, T., somentor Hladnik, L.): 36 str.

Datum arhiviranja: 14-09-2016

University  
of Ljubljana

Faculty of  
Civil and Geodetic  
Engineering



Jamova cesta 2  
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

**DRUGG** – The Digital Repository  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Muminović, A., 2016. Požarna zaščita jeklenih konstrukcij. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Hozjan, L., co-supervisor Hladnik, L.): 36 pp.

Archiving Date: 14-09-2016

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



Jamova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si

**VISOKOŠOLSKI STROKOVNI  
ŠTUDIJSKI PROGRAM PRVE  
STOPNJE OPERATIVNO  
GRADBENIŠTVO**

Kandidat:

**ARMIN MUMINOVIĆ**

## **POŽARNA ZAŠČITA JEKLENIH KONSTRUKCIJ**

Diplomska naloga št.: 129/OG-MO

## **FIRE PROTECTION OF STEEL STRUCTURES**

Graduation thesis No.: 129/OG-MO

**Mentor:**

doc. dr. Tomaž Hozjan

**Somentor:**

viš. pred. dr. Leon Hladnik

Ljubljana, 08. 09. 2016

## **STRAN ZA POPRAVKE**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

Ta stran je namenoma prazna.

## IZJAVA O AVTORSTVU

Spodaj podpisani/-a študent/-ka Armin Muminović, vpisna številka 26110505, avtor/-ica pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Požarna zaščita jeklenih konstrukcij

### IZJAVLJAM

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

V/Na: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

Podpis študenta/-ke:

\_\_\_\_\_

Ta stran je namenoma prazna.

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>614.84:624.014.2(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Armi Muminović</b>
<b>Mentor:</b>	<b>doc. dr. Tomaž Hozjan</b>
<b>Somentor:</b>	<b>viš. pred. dr. Leon Hladnik</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Požarna zaščita jeklenih konstrukcij</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>diplomska naloga - VSŠ</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>36 str., 6 pregl., 23 sl.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>jeklene konstrukcije, požarna odpornost, pasivna zaščita, požar</b>

### **Izvleček**

V diplomski nalogi so prikazani možni načini požarne zaščite jeklenih konstrukcij, ki so aktualni na trgu, ter njihove prednosti in slabosti. Poleg sistemov požarne zaščite jeklenih elementov so prikazani še sistemi požarne zaščite inštalacijskih prebojev, ki tudi igrajo pomembno vlogo pri zagotavljanju ustrezne požarne odpornosti objekta. V drugem delu naloge sledi izračun požarne odpornosti in potrebne požarne zaščite stebra HEB 180 skladno s standardom SIST EN 1993-1-2. Prikazani so rezultati zaščite stebra z različnimi sistemi požarne zaščite, ter izbira najbolj ustreznega sistema. Na koncu je še prikazan pregled standardov s področja požarnoodpornega projektiranja konstrukcij.

Ta stran je namenoma prazna.



## **BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

**UDC:** 614.84:624.014.2(043.2)

**Author:** Armin Muminović

**Supervisor:** assist. prof. Tomaž Hozjan, Ph.D.

**Cosupervisor:** Sen. Lect. Leon Hladnik, Ph.D.

**Title:** Fire protection for steel structures

**Document type:** Graduation Thesis

**Scope and tools:** 36 p., 6 tab., 23 fig.

**Keywords:** steel structures, fire resistance, passive protection, fire

### **Abstract**

Graduation thesis presents behavior of steel structures and structural elements under the influence of fire. The main focus in this work was to present all the methods of fire protection for steel structures that are current in the market and to show all advantages and disadvantages for each fire protection system. In addition fire protection systems for plumbing penetrations are also presented, which have important role in providing sufficient fire resistance of the buildings. The thesis also present an example of designing fire protection for the steel column HEB 180 in accordance with European Standard Eurocod 3 – Part 1-2: General rules – Structural fire design [SIST EN 1993-1-2]. In the end of the thesis there is an overview of the standards for structural fire design.

Ta stran je namenoma prazna.

## **ZAHVALA**

Za nasvete in strokovno pomoč se iskreno zahvaljujem mentorju doc. dr. Tomažu Hozjanu in somentorju viš. pred. dr. Leonu Hladniku.

Posebna zahvala gre staršem, ki so mi omogočili študij in mi tekom študija stali ob strani, me spodbujali in podpirali.

Ta stran je namenoma prazna.

## KAZALO VSEBINE

<b>STRAN ZA POPRAVKE</b>	<b>I</b>
<b>IZJAVA O AVTORSTVU</b>	<b>III</b>
<b>BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK</b>	<b>V</b>
<b>BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION</b>	<b>VII</b>
<b>ZAHVALA</b>	<b>IX</b>
1 UVOD .....	1
2 POŽAR IN POŽARNA ODPORNOST .....	2
2.1 Požarno inženirstvo .....	2
2.2 Nastanek požara .....	2
2.3 Razvoj požara .....	3
2.4 Vpliv požara na lastnosti jeklenih elementov .....	5
2.4.1 Vpliv požara na mehanske lastnosti jekla .....	5
2.4.2 Toplotne lastnosti jeklenih elementov .....	6
2.5 Požarna odpornost .....	8
2.6 Požarna kasifikacija gradbenih proizvodov .....	8
3 Požarna zaščita jeklenih konstrukcij .....	10
3.1 Požarnozaščitni premazi .....	10
3.1.1 Splošno .....	10
3.1.2 Temeljni premazi .....	11
3.1.3 Intumescentni premazi .....	11
3.1.4 Zaključni premaz .....	12
3.2 Požarne plošče .....	12
3.2.1 Splošno .....	12
3.2.1 Požarne plošče iz mineralne volne .....	13
3.2.3 Požarne plošče na silikatni osnovi .....	13
3.2.4 Mavčno-kartonske plošče .....	14
3.3 Požarno zaščitni ometi .....	15
3.4 Posebni primeri požarne zaščite .....	16
3.4.1 Požarna zaščita s hlajenjem .....	16
3.4.2 Požarna zaščita strehe .....	16
3.4.3 Požarno odporne predelne stene .....	17
3.4.4 Požarna zaščita inštalacijskih prebojev .....	17
4 Primerjava sistemov zaščite .....	20
4.1 Izbira ustreznega sistema požarne zaščite .....	20

---

4.2 Določitev potrebne debeline zaščitne obloge .....	20
4.3 Kontrola nosilnosti po standardu SIST EN 1993-1-2.....	24
5 Primer požarne zaščite jeklenega stebra.....	26
5.1 Vhodni podatki .....	26
5.2 Izračun kritične temperature in požarna odpornost nezaščitenega stebra.....	26
5.2.1 Kritična temperatura .....	26
5.2.2 Požarna odpornost nezaščitenega stebra.....	28
5.3 Projektiranje požarne zaščite .....	28
5.3.1 Projektiranje požarne zaščite s ploščami Promatect 200 .....	28
5.3.2 Projektiranje požarne zaščite s požarnim ometom Promaspray – P300 .....	29
5.3.3 Projektiranje požarne zaščite z intumescentnim premazom Promapaint – SC4.....	30
5.3.4 Primerjava rezultatov.....	31
6 Evrokod standardi in določanje požarne odpornosti stavb .....	33
7 Zaključek .....	34
8 Viri.....	35

## KAZALO SLIK:

Slika 1 Požarni trikotnik.....	3
Slika 2 Razvoj tipičnega požara v objektu .....	4
Slika 3 Standardna in parametrična požarna krivulja.....	5
Slika 4 Vpliv požara na mehanske lastnosti jekla .....	6
Slika 5 Toplotna prevodnost jekla v odvisnosti od temperature .....	6
Slika 6 Specifična toplotna kapaciteta jekla v odvisnosti od temperaure .....	7
Slika 7 Relativni toplotni raztezek jekla v odvisnosti od temperature .....	7
Slika 8 Sistem požarne zaščite s temeljnim protikorozijskim premazom, intumescentnim premazom in zaključnim premazom .....	11
Slika 9 Ekspandirani premaz.....	12
Slika 10 Požarne plošče iz mineralne volne .....	13
Slika 11 Požarna plošča iz kalcijevega silikata Promatect 200 .....	14
Slika 12 Zaščita jeklenega nosilca z mavčno-kartonskimi ploščami .....	15
Slika 13 Zaščita stebra s požarnim ometom ((1) – jeklen profil, (2) – omet) .....	16
Slika 14 Zaščita s kovinsko manšeto.....	18
Slika 15 Zaščita kovinske cevi z intumescenčno požarno maso.....	18
Slika 16 Požarne blazinice .....	18
Slika 17 Zaščita gradbenih reg z intumescenčno požarno maso.....	19
Slika 18 Faktorji prereza izoliranih jeklenih elementov .....	21
Slika 19 Minimalna zahtevana požarna odpornost stavb .....	22
Slika 20 Nomogram za nezaščitene jeklene elemente.....	23
Slika 21 Nomogram za zaščitene jeklene elemente .....	23
Slika 22 Kontrola nosilnosti po enostavni računski metodi .....	25
Slika 23 Računska shema stebera HEB 180.....	26

Ta stran je namenoma prazna.



## **KAZALO PREGLEDNIC:**

Preglednica 1: Primeri gradbenih materialov glede na razred gorljivosti po SIST EN 13501-1 .....	9
Preglednica 2: Matrika izbire sistema požarne zaščite .....	20
Preglednica 3 Debelina obloge jeklenih elementov PROMATECT 200 glede na faktor profila [ $m^{-1}$ ].	24
Preglednica 4 Debelina premaza za odprte profile požarne odpornosti R30 .....	30
Preglednica 5 Debelina premaza za odprte profile požarne odpornosti R60 .....	31
Preglednica 6 Pregled rezultatov projektiranja požarne zaščite .....	32

Ta stran je namenoma prazna.

## 1 UVOD

Jeklene konstrukcije so dobile pomembnejšo vlogo z razmahom industrijske revolucije v 19. stoletju. Prednosti jeklenih konstrukcij so: hitra in enostavna gradnja, veliki razponi, dolga življenska doba, majhna teža, protipotresna gradnja, trdnost materiala, omogočajo veliko svobodo izražanja arhitektov in recikliranje. Lahko rečemo, da jeklene konstrukcije nimajo veliko slabih lastnosti, žal ena izmed ključnih slabosti je ustrezna požarna odpornost. Čeprav je jeklo negorljiv material, se njegova nosilnost drastično zmanjša, ko jeklo doseže temperaturo nad 550°C. Pri temperaturah nad 400 °C se v jeklu pojavijo t.i. viskozne deformacije, ki relativno hitro privedejo do porušitve jeklenih elementov. V naravnih požarih se temperatura že v nekaj minutah lahko dvigne nad 550°C, zato je zelo pomembno da jekleno konstrukcijo ustrezno zaščitimo.

Varnost pred požarom je ena izmed šestih bistvenih zahtev evropske direktive o gradbenih proizvodih, zato problem požarne odpornosti jeklenih konstrukcij rešujemo že v fazi projektiranja. Požarna zaščita jeklenih konstrukcij je zelo pomembna, saj tako zagotovimo dodaten čas za varno evakuacijo, kontroliramo širjenje požara po objektu in preprečimo širjenje požara na sosednje objekte. Ločimo aktivne in pasivne ukrepe omejevanja požara. Namen aktivnih ukrepov je preprečitev razvoja požara, medtem, ko je namen pasivnih ukrepov zagotovitev čim večje požarne odpornosti nosilnih elementov konstrukcije in razdelitev objekta na več požarnih sektorjev, ter s tem preprečiti nenadzorovano in hitro širjenje požara po objektu in izven njega. Za določitev odpornosti požarne zaščite jeklenih konstrukcij uporabljamo standarde, pravilnike in tehnične smernice.

Namen diplomske naloge je predstaviti različne možne načine zaščite jeklenih konstrukcij, ki so aktualne na trgu, ter jih primerjati med sabo. Način izračuna potrebne debeline zaščitne obloge, ter izbira ustreznega sistema požarne zaščite je prikazana na enostavnem primeru jeklenega stebra. Na koncu je še podan pregled standardov in postopkov za projektiranje požarne odpornosti jeklenih konstrukcij.

V prvem poglavju diplomske naloge so opisane splošne metode nastanka požara, podrobneje so opisane faze razvoja požara in vpliv požara na mehanske lastnosti jekla. V drugem poglavju so obravnavani pasivni protipožarni ukrepi, ki so skladni z normativi ter zakonodajo Republike Slovenije. Obravnavani so predvsem pasivni protipožarni načini zaščite jeklenih konstrukcij, ki so aktualni na domačem trgu, ter postopki protipožarne zaščite inštalacijskih prebojev. V nadaljevanju pa je prikazana primerjava sistemov požarne zaščite, načini izbire pravilnega sistema požarne zaščite in določevanje potrebne debeline zaščitne obloge. V naslednjem poglavju pa je prikazan primer določitve požarne zaščite jeklenega stebra na požarno odpornost R30 in R60. V zaključnem poglavju pa je podan pregled standardov s področja projektiranja požarne odpornosti jeklenih konstrukcij.

## 2 POŽAR IN POŽARNA ODPORNOST

### 2.1 Požarno inženirstvo

Požarno inženirstvo je veda, ki se ukvarja z zagotavljanjem varnosti ljudi, živali, premoženja in okolja pred požarom. Velik razvoj požarnega inženirstva se je začel v drugi polovici 20. stoletja z industrijsko revolucijo. Industrijski objekti predstavljajo potencialno veliko nevarnost za nastanek požara, zato je bilo potrebno take objekte ustrezno zaščititi, hkrati pa je razvoj znanosti v tem obdobju omogočil takratnim inženirjem bolj sodoben način določanja ustreznega nivoja požarne odpornosti [1].

Glavna cilja požarnega inženirstva sta [1]:

- odkrivanje požara, preprečitev in ublažitev posledic požara (fire protection engineering),
- varna evakuacija in omogočeno varno gašenje in reševanje pred požarom (fire safety engineering)

Področja požarnega inženirstva so [1]:

- Odkrivanje požara
- Aktivna požarna zaščita
- Pasivna požarna zaščita
- Nadzor dima
- Evakuacija
- Ustrezna zasnova zgradb
- Razvoj požara in modeliranje le tega
- Obnašanje ljudi med požarom
- Analize tveganj
- Požari v okolju

### 2.2 Nastanek požara

Gorenje je proces hitre oksidacije materiala s plamenom, v katerem se sprošča svetloba, toplota in različni proizvodi kemijskih reakcij. Ogenj v svoji najpogostejši obliki lahko povzroči požar in nastane, ko je vnetljiv material v kombinaciji z zadostno količino kisika izpostavljen viru toplote ali temperaturi višji od temperature vžiga določenega materiala. Za vžig in nastanek požara so potrebni vsi trije elementi požarnega trikotnika (slika 1) [4].



Slika 1 Požarni trikotnik

( vir: <http://www.szpy.si/assets/attachments/274/Smernica-CFPA-E-Pozarna-varnost-stavb-kulturne-dediscine-PREVOD-verzija-14-apr-2014.pdf?1447795698>)

Požarni trikotnik je sestavljen iz treh elementov: kisik, toplota in gorivo.

Kisik je plin brez barve, vonja in okusa. V požarnem trikotniku ima vlogo pospeševalca ognja.

Toplota ali toplotna energija je element, ki ga potrebujemo za vžig snovi oziroma goriva.

Gorivo pa predstavljajo materiali, ki so zaradi svoje kemijske sestave gorljivi oziroma lahko oksidirajo. To so predvsem razni vnetljivi plini (metan, butan, vodik, propan), vnetljive tekočine (bencin, alkohol, ketoni, etri, estri) in trdne snovi (les, plastične mase, tekstil, papir, gumene mase in nekatere lahke kovine) [6].

V kolikor odvezamo enega od treh elementov požarnega trikotnika pride do gašenja požara .

Požare razvrščamo glede na način gorjenja in na vrsto gorljivih snovi v pet razredov, in sicer [4]:

- Razred A, v katerega uvrščamo trdne snovi, ki gorijo s plamenom in/ali žerjavico;
- Razred B, v katerega uvrščamo vnetljive tekočine, ki gorijo brez žerjavice;
- Razred C, v katerega uvrščamo vnetljive pline, ki gorijo s plamenom;
- Razred D, v katerega uvrščamo lahke kovine kot so magnezij in aluminij v prahu;
- Razred E, v katerega uvrščamo požare električnih naprav pod napetostjo.

Požare delimo še po razsežnosti (mali, srednji, veliki, katastrofalni) in glede na prostor (notranji in zunanji požari).

### 2.3 Razvoj požara

Opis požara od vžiga do popolnoma razvitega požara se pri požarnem inženirstvu imenuje požarni scenarij. Požarni scenarij mora zajemati opis značilnosti požara, lastnosti objekta in njenih uporabnikov. Izkušnje iz opazovanja naravnih požarov in rezultati pri požarnih preiskusih kažejo, da je spreminjanje temperature po času in prostoru kompleksno, tako da ga lahko le približno računsko predvidimo. Razvoj naravnega požara je mogoče opisati s petimi značilnimi fazami (slika 2) [6]:

- **1. Faza – faza začetnega požara**

Začetna faza požara je običajno zelo kratka. V tej fazi pride do vžiga in pričetka gorenja gorljivega materiala.

- **2. Faza - rastoči požar (faza razvitega požara)**

Hitrost razvoja začetne faze je odvisen predvsem od lastnosti gorljivega materiala (enakomerno gorenje - gorenje lesa, zelo hitro gorenje - plinske eksplozije, počasno gorenje – tlenje) in manj od ostalih parametrov (kisik, geometrija prostora, obodni materiali,...). Goreči materiali postanejo novi izvor vžiga ostalih gorljivih materialov v okolici nastanka požara. Z razvojem in širjenjem požara običajno temperatura v prostorih raste.

- **3. Faza – Požarni preskok (flash-over)**

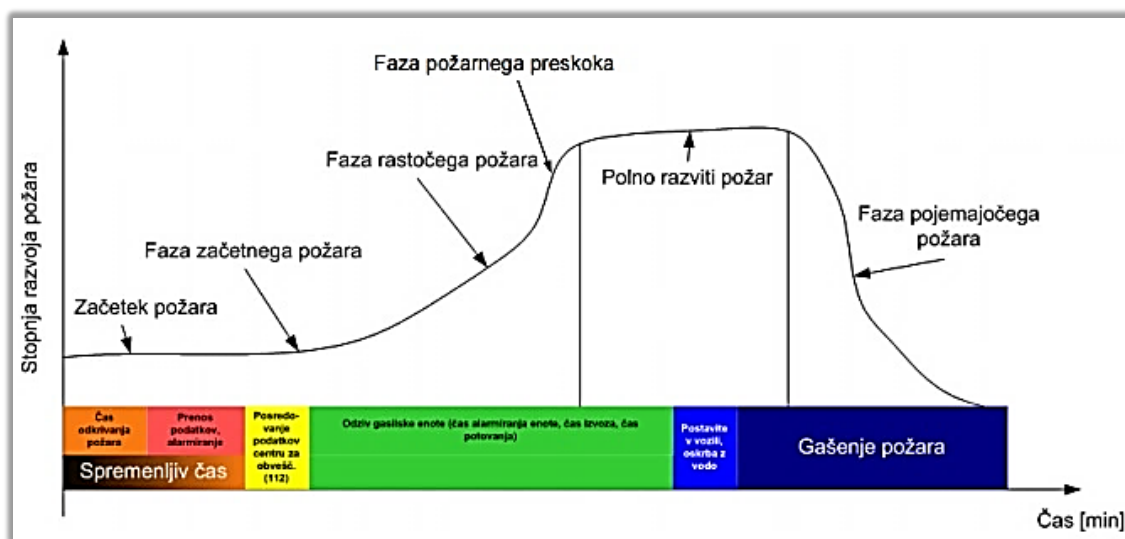
Prehod iz faze rastočega požara v fazo polno razvitega požara se imenuje požarni preskok ali flash-over. Pri tej fazi požara je značilno, da plameni zajamejo ves prostor in da se vžgejo vsi še ne goreči materiali v prostoru.

- **4. Faza – faza polno razvitega požara**

Za fazo polno razvitega požara je značilno, da gorijo vsi gorljivi materiali v prostoru, da je hitrost sproščanja toplote največja in da v tej fazi temperatura doseže svoj vrhunec (ne narašča več). Dolžina trajanja faze je odvisna od zaloge gorljivega materiala in pogojev prezračevanja in s tem povezane količine kisika, ter ostalih parametrov kot so, geometrija prostora, toplotne lastnosti obodnih materialov, ipd.

- **5. Faza – faza ohlajevanja ali faza pojemajočega požara**

Do te faze pride zaradi pomanjkanja gorljivega materiala ali pomanjkanja kisika, temperatura v tej fazi pada in požarni prostor se hladi.

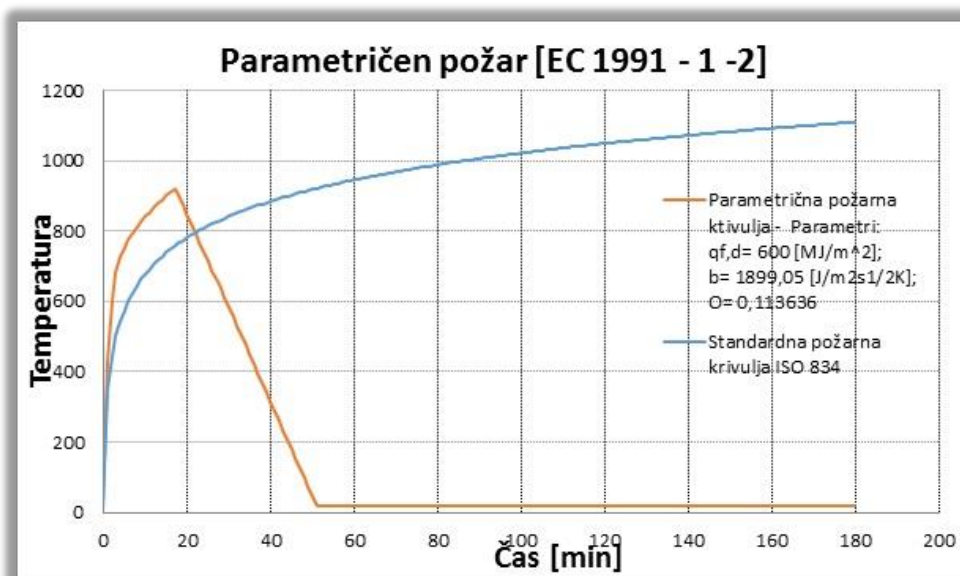


Slika 2 Razvoj tipičnega požara v objektu

(vir: [http://www.sos112.si/slo/tdocs/pozar\\_gradivo.pdf](http://www.sos112.si/slo/tdocs/pozar_gradivo.pdf))

Analitične analize razvoja temperatur med požarom so zelo zahtevne, zato uporabljamo razne poenostavitve. Najbolj preprost način opisa razvoja temperatur med požarom so t.i. nazivne krivulje temperatura-čas, katere ne upoštevajo faze ohlajevanja ter so med drugim navedene tudi v standardu SIST EN 1991-1-2 [5]. Najbolj znana in največkrat uporabljena je standardna požarna krivulja ISO 834 ( $T = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1)$  [°C]). Uporabljamo jo predvsem kot poenostavljen opis naraščanja temperatur v fazi polno razvitega požara. Slabosti standardne požarne krivulje so: da ne upošteva faze pred izbruhom požara, nikoli ne pada (ne opisuje ohlajevanje požarnega prostora), ne upošteva značilnosti

prostora in ni odvisna od požarne obtežbe in prezračevalnih pogojev [5]. Nekoliko bolj natančen opis razvoja temperatur med požarom v prostoru nam dajejo parametrične požarne krivulje. Te krivulje temeljijo na ključnih fizikalnih parametrih (velikost požarne obtežbe, velikost odprtin, hitrost razvoja požara, lastnosti obodnih materialov) in za razliko od standardnih krivulj zajamejo tudi fazo ohlajevanja. Med drugim tudi standard SIST EN 1991-1-2 podaja izraze za račun parametrične požarne krivulje. Na sliki 3 je prikazana standardna požarna krivulja ter parametrična požarna krivulja, določena po SIST EN 1991-1-2, za izbrane parametre (dimenzije prostora so 12 m x 8 m x 4 m, z eno odprtino velikosti 5 m x 4 m). Za namen diplomske naloge bomo uporabili standardno požarno krivuljo.



Slika 3 Standardna in parametrična požarna krivulja

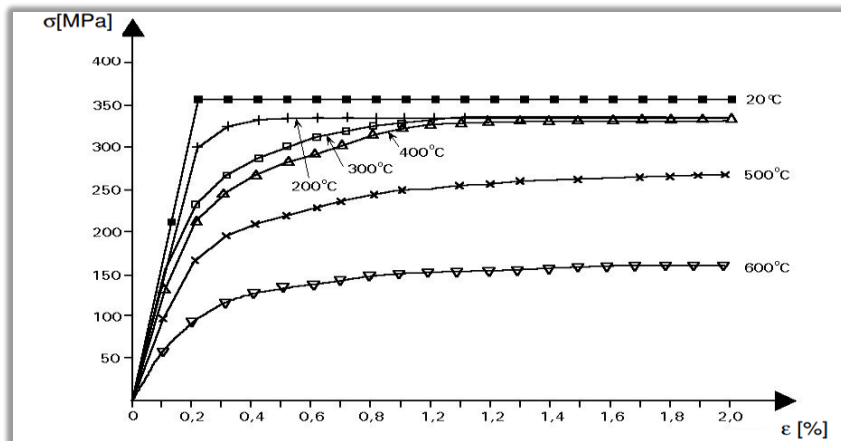
## 2.4 Vpliv požara na lastnosti jeklenih elementov

### 2.4.1 Vpliv požara na mehanske lastnosti jekla

V splošnem velja, da visoka temperatura negativno vpliva na mehanske lastnosti jekla. Z naraščanjem temperatur se zmanjšuje togost jeklenih elementov, povečuje se duktilnost, elastični modul in meja plastičnega tečenja pa se zmanjšujeta. Pri računskih analizah obnašanja jeklenih konstrukcij med požarom je zelo pomembno poznati spreminjanje mehanskih lastnosti jekla v odvisnosti od temperature. Potrebno je poznati temperaturno odvisno spreminjanje naslednjih lastnosti jekla [5]:

- Modul elastičnosti
- Parametri plastičnega tečenja in utrjevanja
- Parametri viskoznega tečenja
- Koeficient temperaturnega raztezanja in krčenja

Pri temperaturah nad 400 °C se v obremenjenih jeklenih elementih pojavijo viskozne deformacije, ki naraščajo tudi pri konstantni temperaturi in obtežbi. Z višanjem temperature in napetosti se povečuje hitrost viskoznih deformacij, ki povzročajo nepovratne geometrijske spremembe konstrukcije. Kot vidimo iz slike 4 se nosilnost jekla pri temperaturah okrog 600 °C zmanjša za 60% [5].



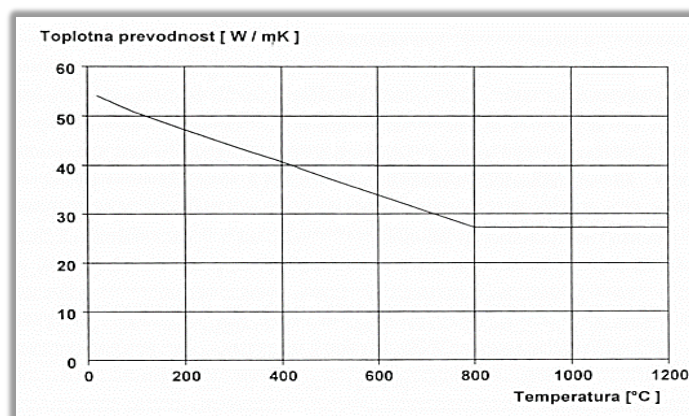
Slika 4 Vpliv požara na mehanske lastnosti jekla

(vir: predavanja, Darko Beg)

## 2.4.2 Toplotne lastnosti jeklenih elementov

Jekleni elementi, ki so izpostavljeni plamenu se segrejejo najprej po površini, nato pa se toplota prevaja v notranjost prereza. Način in hitrost prevajanja toplote po prerezu je odvisna od debeline prereza, mehanskih in predvsem toplotnih lastnosti jekla. Toplotne lastnosti jekla so [23]:

- **Gostota**  
Gostota jekla je  $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$ . V splošnem z naraščanjem temperature gostota jekla linearno pada. Skladno s SIST EN 1993-1-2 lahko privzamemo, da se gostota jekla s temperaturo ne spreminja.
- **Toplotna prevodnost**  
Toplotna prevodnost jekla je odvisna od teperature in vsebnosti zlitin. Za konstrukcijska jekla je značilno, da z višjo vsebnostjo zlitin in z višanjem temperature toplotna prevodnost pada kot je to razvidno iz slike 5.  
Evropski standard SIST EN 1993-1-2 pravi, da je koeficient toplotne prevodnosti, ki je neodvisen od temperature  $\lambda_a = 45 \text{ W/mK}$ .



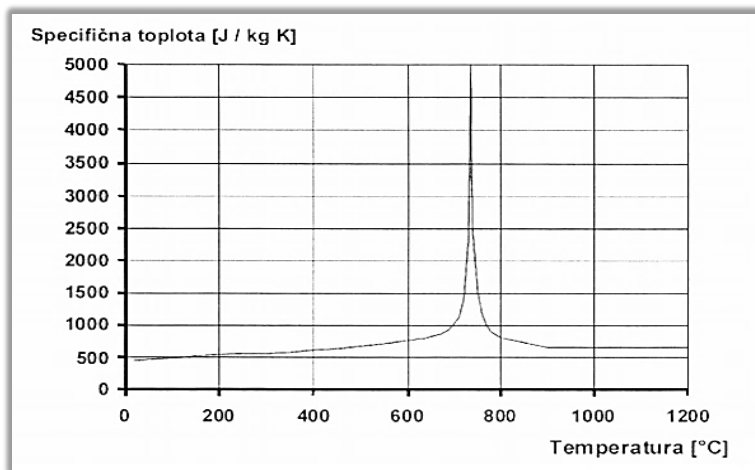
Slika 5 Toplotna prevodnost jekla v odvisnosti od temperature

(vir: SIST 1993-1-2, str. 26)



- **Specifična toplotna kapaciteta**

Specifična toplotna kapaciteta jekla predstavlja količino toplote, ki je potrebna, da se jekleno telo z maso 1 kg segreje za 1 °C. Z naraščanjem temperature se specifična toplotna kapaciteta jekla nelinearno spreminja. Spreminjanje specifične toplote s temperaturo skladno s SIST EN 1993-1-2 je podano na sliki 6.

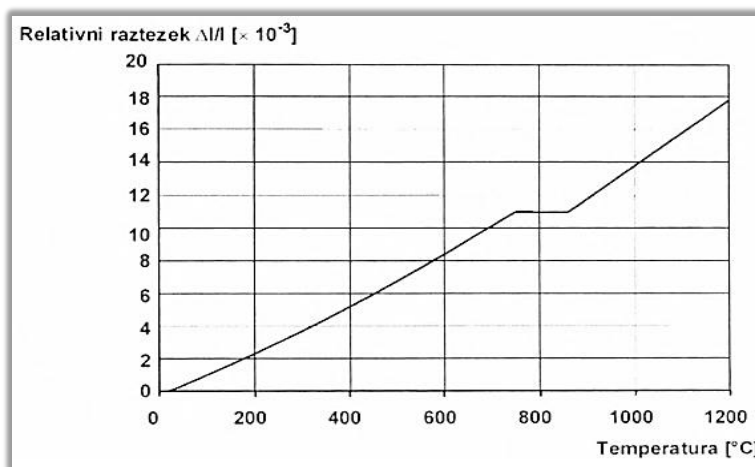


Slika 6 Specifična toplotna kapaciteta jekla v odvisnosti od temperature

(vir: SIST EN 1993-1-2, str 25)

- **Toplotno raztezanje**

Pri segrevanju večine materialov pride do povečanja njegove prostornine in posledično tudi do raztezanja vlaken. Pri jeklih je ta pojav v primerjavi z drugimi materiali relativno visok (slika 7), kar pomeni, da se vlakna jekel pri segrevanju znatno več raztegnejo, v primerjavi z vlakni drugih materialov. Toplotni raztezek jekla skladno s standardom SIST EN 1993-1-2 je prikazan na sliki 7:



Slika 7 Relativni toplotni raztezek jekla v odvisnosti od temperature

(vir: SIST EN 1993-1-2, str 24)

## 2.5 Požarna odpornost

Požarna odpornost konstrukcije predstavlja čas izpostavljenosti požaru, v katerem konstrukcija ohranja svojo funkcijo kljub vplivom požara. Kot je bilo že omenjeno v uvodu poznamo več različnih odpornosti na požar [2]:

- Nosilnost (R), ki v minutah označuje opornost nosilnega dela stavbe proti zrušitvi (npr. R60 pomeni, da konstrukcija ohrani svojo nosilnost najmanj eno uro)
- Celovitost (E), ki v minutah označuje odpornost dela stavbe s funkcijo požarnega ločevanja proti vdoru ognja, dima in plinov (npr. E60 pomeni enourno odpornost dela stavbe proti vdoru ognja, dima in vročih plinov)
- Izolativnost (I), ki v minutah označuje odpornost dela stavbe s funkcijo požarnega ločevanja proti prenosu toplote (npr. I60 pomeni enourno odpornost dela stavbe proti vdoru prekomerne količine toplote)

Omenimo še, da so odpornosti konstrukcije oz. konstrukcijskih elementov REI vezane na standardni ISO požar. Glede na namen uporabe lahko razrede požarne odpornosti uporabljamo posamezno ali v kombinaciji [2]:

- Za ločevanje se uporablja razred E in razred I (npr. vrata)
- Za nosilnost se uporablja razred R (nosilni konstrukcijski elementi)
- Za ločevanje in nosilnost pa se uporablja kombinacija vseh treh razredov požarne odpornosti R, E, I (npr. plošče in obodne stene)

Osnovna klasifikacija proizvodov za izboljšanje požarne odpornosti je narejena z uporabo naslednjih simbolov [14]:

- W – toplotna izolativnost  
Sposobnost elementa konstrukcije da preprečuje prenos požara na neizpostavljeno stran na osnovi oddajanja toplotnega sevanja ( $15 \text{ kW/m}^2$  na razdalji 1 meter)
- M – mehanska trdnost  
Sposobnost elementa, da prenese udarec.
- C – vrata s samozapiralom
- S – tesnost  
Elementi, ki imajo sposobnost preprečevanja uhajanja dima.
- P ali PH – funkcionalnost energetskega in/ali signalnega voda  
Sposobnost električnega kabla, da v primeru požara določen čas nemoteno dovaja električno energijo do požarno varnostne naprave.
- G – odpornost na požar saj  
Sposobnost dimnika, da je odporen na požar znotraj dimnika.
- K – sposobnost na požarno zaščito  
Sposobnost obloge, da zaščiti element za oblogo od produktov požara.
- H – odvod dima in toplote

## 2.6 Požarna kasifikacija gradbenih proizvodov

Gradbeni materiali se s pomočjo standardnih preizkusov klasificirajo v razrede gorljivosti od A do F skladno s standardom SIST EN 13501-1.

Preglednica 1: Primeri gradbenih materialov glede na razred gorljivosti po SIST EN 13501-1

Razred	Opis	Čas do požarnega preskoka (min)	Primer gradbenega materiala
<b>A1</b>	V nobeni fazi požara ne spodbuja širitev požara in ne povečuje požarne obtežbe	Ne	Beton opeka, steklo, kalcijev silikat, keramika, jeklo, baker, aluminij, mavec, nekatere mavčne plošče, anorganski materiali z manj kot 1% organskih snovi...
<b>A2</b>	V polno razvitem požaru ne poveča požarne obtežbe in ne spodbuja širitev požara	Ne	Mavčno kartonske plošče, cementno vlaknene plošče, nekateri proizvodi iz kamenih ali steklenih vlaken, sendvič plošče z mineralno volno
<b>B</b>	Materiali, ki zelo malo prispevajo k razvoju požara	Ne	Barvne mavčno kartonske plošče, lesocementne plošče EN 634-2 z več kot 1000 kg/m <sup>3</sup> , nekatere lesene plošče obdelane z zaviralci gorenja
<b>C</b>	Materiali, ki malo prispevajo k razvoju požara	med 10. in 20. minuto	Fenolna pena z Al folijo, poliiizocianuratnapena z Al folijo, večina lesenih plošč obdelanih z zaviralci gorenja, sendvič plošče s PUR
<b>D</b>	Materiali, ki se daljši čas upirajo vžigu z majhnim plamenom in pri njih ne pride do večje razširitve plamena	med 2. in 10. minuto	Ekstrudiran polistiren, večina lesa in lesenih proizvodov, sendvič plošče z EPS
<b>E</b>	Materiali, ki se krajši čas vpirajo vžigu z majhnim plamenom	prej kot v 2. minuti	Mehka lesno vlaknena plošča, poliuretanska pena z laminatom, poliiizocianuratna pena
<b>F</b>	Materiali brez določenih požarnih lastnosti	zelo hitro	Ekspandiran polistiren, material ki ne dosega razreda E, ali material, ki ni bil preskušen

### 3 Požarna zaščita jeklenih konstrukcij

Za požarno zaščito jeklenih konstrukcij oziroma za povečanje požarne odpornosti jeklenih elementov uporabljamo [6]:

- požarnozaščitne premaze,
- požarne plošče in
- požarne omete

Vrednosti, ki jih moramo poznati pri določitvi pasivne požarne zaščite jeklenih konstrukcij sta kritična temperatura  $T_{cr}$  [°C] in faktor profila  $A_p/V$  [m<sup>-1</sup>]. Kritična temperatura je tista temperatura pri kateri se jeklena konstrukcija poruši (običajno okoli 550°C). Faktor profila pa je razmerje med požarom izpostavljeno površino in volumnom jekla in nam pove kako hitro se bo jeklen element segrel. S pomočjo teh dveh parametrov lahko na poenostavljen način določimo potrebno debelino intumescentnega premaza, požarnega ometa ali požarnih plošč za določeno standardno požarno odpornost. Masivni jekleni profili (nižji faktor  $A_p/V$ ) potrebujejo več časa, da se segrejejo do kritične temperature in posledično potrebujejo tanjšo zaščitno oblogo kot profili s tankimi stenami (višji faktor  $A_p/V$ ). Iz te fizikalne zakonitosti se je razvilo dimenzioniranje debeline zaščitne obloge na osnovi velikosti faktorja profila oziroma razmerja med požaru izpostavljene površine jekla in volumna jekla [8].

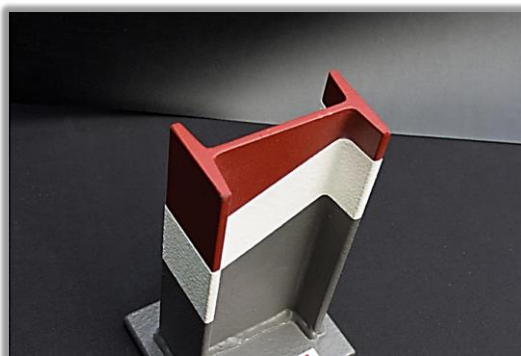
#### 3.1 Požarnozaščitni premazi

##### 3.1.1 Splošno

Reaktivni požarnozaščitni premazi delujejo po principu ekspandiranja, pri visokih temperaturah močno povečajo svoj volumen in tako ustvarijo toplotnoizolacijski sloj, ki preprečuje prehod toplote do jeklenega elementa in s tem posledično prepreči vpliv visokih temperatur na mehanske lastnosti jekla. Celoten sistem zaščite z reaktivnimi požarnozaščitnimi premazi je sestavljen iz protikorozijskega temeljnega premaza, reaktivnega požarnozaščitnega premaza in zaključnega zaščitnega sloja (slika 8). Vsi premazi pa morajo biti medseboj kompatibilni, da bi sistem pravilno deloval. Reaktivni požarnozaščitni premazi so lahko [8]:

- Intumescentni – ta pri temperaturi nad 200° C nabrekne, nastane mikroporozna pena, ki tvori toplotnoizolacijski sloj.
- Ablacijski – ta pri reakciji porablja toploto, ki bi se v nasprotnem primeru porabila za segrevanje jekla.
- Kombinacija intumescentnega in ablacijskega premaza.

Najpogosteje se uporabljajo intumescentni premazi, ki so lahko narejeni na vodni osnovi ali pa na osnovi topil. Nanašajo se v večjih slojih in to predvsem z brizganjem, na zahtevnejših in manj dostopnih mestih pa se lahko nanašajo tudi z valjčkom ali čopičem. Debelina slojev je odvisna od zahtevane požarne odpornosti, faktorja profila in kritične temperature jeklenih elementov.



Slika 8 Sistem požarne zaščite s temeljnim protikorozijskim premazom, intumescentnim premazom in zaključnim premazom

(vir: <http://www.firesystems.com/prestations.php?cat=11>)

### 3.1.2 Temeljni premazi

Temeljni premaz ima dvojno vlogo v sistemu protipožarne zaščite z reaktivnimi premazi:

1. Zagotoviti korozijsko zaščito jeklenih elementov
2. Zagotoviti oprijemljivost ekspandiranega intumescentnega premaza

Pred nanašanjem temeljnega premaza je potrebno prvo zagotoviti zadostno čistost površin jeklenih elementov. Potrebno je očistiti maščobo, odstraniti rjo in luske in potem nanesti sloj temeljnega premaza. Na temeljni premaz je potrebno večkrat nanesti intumescentni premaz in posledično tudi preveriti kompatibilnost premazov. Če je dobavitelj premazov isti potem s kompatibilnostjo ni težav [8].

### 3.1.3 Intumescentni premazi

Intumescentni premazi so organski premazi, ki pri povišani temperaturi ekspandirajo in pooglenijo. Tako se ustvari sloj ogljikove pene, ki je zelo dober izolator (slika 9). Glavne sestavine intumescentnega premaza so: pentaeritritol, amonijev polifosfat, melanin in vezivo.

Premaz prične z reakcijo ozirom z ekspandiranjem že pri temperaturi okoli 200° C. Prvo se začne mehčanje polimerne vezi, iz amonijevega polifosfata se izloča kislina, nato pa se prične karbonizacija polioliolov in ob razpadanju melanina nastaja plin, ki povzroči, da iz zmečkanega sloja nastane porozna toplotnoizolacijska pena z gostoto le okoli 30 kg/m<sup>3</sup>. Pri kakovostnih premazih in ob idealnih razmerah lahko pride celo do 100-kratnega povečanja debeline premaza, v realnosti pa se ta faktor giblje med 30 in 60 [8].



Slika 9 Ekspandirani premaz

(vir: <http://www.building.hk/products/view.asp?id=1104>)

Intumescentni premazi niso primerni za konstrukcije objektov, ki imajo veliko požarno obtežbo oziroma tam kjer je zahtevana požarna odpornost R60 ali več. Problem intumescentnih premazov je, da zaradi produktov gorenja ali zaradi gašenja požara pride do odpadanja ekspandiranega premaza s površine jeklenih elementov. Že slaboten vodni curek bi lahko povzročil odpadanje ekspandiranega premaza s površine jeklenih elementov. V tem primeru bi se jekleni elementi zaradi gasilne vode hitro ohladili, kar bi povzročilo krčenje elementov in nastanek velikih notranjih napetosti, ki bi lahko povzročile razpoke na spojih konstrukcije. To bi lahko posledično vodilo do delne porušitve jeklene konstrukcije, kar je zelo nevarno za gasilce [8].

Intumescentni premazi so idealni za uporabo pri objektih kjer ni velika požarna obtežba in kjer je zaželena vidna jeklena konstrukcija. V takšnih objektih ne more priti do požarnega preskoka in posledično do pregrevanja jekla v lokaliziranem požaru, zato zadostuje intumescentni premaz za požarno odpornost R30 [8].

### 3.1.4 Zaključni premaz

Zaključni premaz se uporablja v odvisnosti od izbranega sistema požarne zaščite. V primeru uporabe intumescentnega premaza na vodni osnovi je zaključni zaščitni sloj obvezen. Njegova vloga je dekorativen videz jeklenih elementov in predvsem zaščita intumescentnega premaza pred vplivi okolja. Sloj zaključnega premaza ne sme biti debelejši od 50  $\mu\text{m}$ , da ne bi prišlo do zmanjšanja funkcije intumescentnega premaza. Za zagotovitev pravilnega delovanja sistema je potrebno konstrukcijo redno pregledovati in v primeru poškodbe premaza opraviti popravilo po določenem postopku. Proizvajalci premazov običajno predpisujejo kontrolni pregled 1-2 krat letno [8].

## 3.2 Požarne plošče

### 3.2.1 Splošno

Požarne plošče so primerne za zaščito jeklenih konstrukcij, ki imajo veliko požarno obtežbo. Plošče so lahko narejene iz različnih materialov, različnih debelin in se enostavno pritrjujejo na jekleno konstrukcijo, ki je lahko različne oblike. Zelo je pomembno, da je izvedba obloge iz požarnih plošč čim

bolj enostavna. Pri sami izvedbi obloge iz požarnih plošč je potrebno upoštevati osnovna pravila zamika stikov plošč ter na ta način zmanjšati vpliv raztezkov na celoten sistem. Pri izbiri požarnih plošč je poleg njihove debeline pomembna tudi njihova lastna teža, ki mora biti po možnosti čim nižja, da ne bi prišlo do preobremenitve nosilne konstrukcije. Poleg tega je potrebno pri izbiri požarnih plošč upoštevati še druge lastnosti kot so: obnašanje plošče v požaru (temperaturni razteznostni koeficient), odpornost na plamen, sposobnost navzemanja vode oz. poroznost, vrsta materiala iz katerega so plošče narejene (zaradi načina deponiranja plošč po uporabi). Za zaščito jeklenih konstrukcij pred požarom se najpogosteje uporabljajo:

- požarne plošče iz mineralne volne,
- požarne plošče na silikatni osnovi ali
- mavčno-kartonske plošče.

### 3.2.1 Požarne plošče iz mineralne volne

Najlažje protipožarne plošče so plošče iz mineralne volne (slika 10). Njihova volumska masa oziroma gostota se giblje okoli  $200 \text{ kg/m}^3$ . Plošče iz mineralne volne glede odziva na ogenj spadajo v razred A1 in imajo tališče nad  $1000 \text{ °C}$ . Gre za poltrde in trde požarne plošče, ki se uporabljajo predvsem tam kjer ni mogoč stik z ljudmi ali stroji. Njihova največja slabost je groba površina plošč, ki jo je potrebno dodatno zaščititi tudi pred zunanjimi vplivi (voda, mehanske poškodbe). Za pritrjevanje plošč iz mineralne volne se ponavadi uporabljajo jeklene sponke, vijaki in posebna lepila, navodila za montažo pa ponavadi podajo proizvajalci plošč. Debelina in format plošče je odvisen od proizvajalca. Ponavadi se debelina teh plošč giblje od 20 mm do 100 mm. Dejansko uporabljena debelina obloge za zaščito jeklene konstrukcije pa je odvisna od faktorja profila in predpisane požarne odpornosti, ki jo želimo doseči. Plošče iz mineralne volne lahko za stebre in nosilce zagotovijo požarno odpornost od 30 do 240 minut, odvisno od sistema uporabe [11].



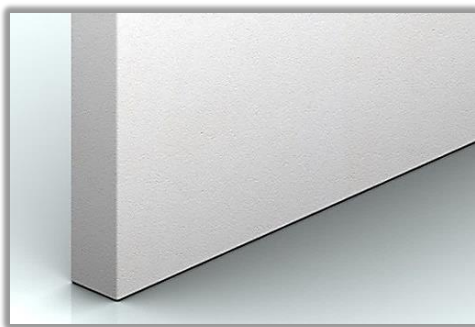
Slika 10 Požarne plošče iz mineralne volne

(vir: <https://www.promat.co.uk/en/products/td-board>)

### 3.2.3 Požarne plošče na silikatni osnovi

Fizično najobstojnejše požarne plošče so požarne plošče na silikatni osnovi. Narejene so iz kalcijevega silikata s cementnim vezivom. Njihova gostota se giblje okoli  $750 \text{ kg/m}^3$ . V primeru uporabe v vlažnih ali mokrih pogojih fizično ne propadejo, a njihova zmogljivost se ne slabša z leti. Požarne plošče iz

kalcijevega silikata spadajo v razred gorljivosti A1 in imajo tališče nad 1350°C. Debelina in format požarnih plošč iz kalcijevega silikata je odvisna od proizvajalca. Običajne dimenzije promatovih požarnih plošč na silikatni osnovi Promatect 200 (slika 11) so 2500 x 1200 mm, debeline pa: 12, 15, 18, 20, 25, 30 mm [10]. Dejansko potrebna debelina obloge pa je odvisna od faktorja profila in predpisane požarne odpornosti, ki jo želimo doseči. Plošče iz kalcijevega silikata lahko zagotovijo požarno odpornost jeklenih nosilcev in stebrov od 30 do 180 minut [10].



Slika 11 Požarna plošča iz kalcijevega silikata Promatect 200

(vir: <http://www.promat-see.com/sl-si/proizvodi/promatect-200>)

### 3.2.4 Mavčno-kartonske plošče

Mavčni gradbeni materiali so anorganska negorljiva gradiva, ki spadajo med klasične protipožarne materiale. Mavčno-kartonske plošče imajo odlične požarno zaščitne lastnosti in so zaradi tega primerne za zaščito jeklenih elementov z visokimi zahtevami glede požarne odpornosti (slika 12). Le te lahko zagotovijo požarno odpornost jeklenih nosilcev ali stebrov od 30 pa tudi do 180 minut, odvisno od sistema zaščite. Namreč, pri pravilni namestitvi oblog iz mavčno-kartonskih plošč se maksimalna temperatura v jeklu giblje od 200 °C do 210 °C, tudi v primeru močnejših požarov. Namestitev mavčno-kartonskih plošč na jeklene elemente se lahko izvede s podkonstrukcijo ali brez podkonstrukcije (neposredno na nosilne jeklene elemente) [12].

Prednost mavčno-kartonskih plošč je ta, da ima mavec v svoji kristalni strukturi dve molekuli vode, kar je približno 3 litre vode na 1 m<sup>2</sup> mavčno-kartonskih plošč debeline 15 mm. Pri požarni obremenitvi se kristalna voda spremeni v paro, kar pomeni, da mavec dehidrira, ne da bi pri tem temperatura na jekleni površini zrasla čez 110 °C [12].

Slabost mavčno-kartonskih plošč je ta, da se kmalu po začetku požara površinski kartonski sloj spremeni v pepel in s tem posledično dehidriran mavčni sloj plošče hitreje razpade. Ta hiter razpad mavčnega sloja je preprečen s posebnimi steklenimi vlakni, ki imajo vlogo vlaknene armature. Ta vlaknena armatura omogoča daljšo časovno obstojnost dehidriranega dela in s tem poveča njeno požarno odpornost [12].





Slika 12 Zaščita jeklenega nosilca z mavčno-kartonskimi ploščami

(vir: <http://www.encon.co.uk/sites/default/files/products/images/fireboard.jpg>)

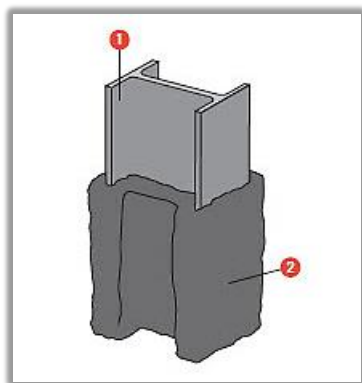
### 3.3 Požarno zaščitni ometi

Osnovni materiali, ki se uporabljajo v teh ometih so ekspanzirani agregati vermikulit ali perlit, lahko tudi v kombinaciji ekspanzirani agregati vermikulita in perlita, hidravlična veziva in drugi dodatki. Včasih se je kot osnovni material požarno zaščitnih ometov uporabljal azbest, ki se ga v gradbeništvo ne sme več uporabljati. Glavna naloga dodatkov je, da zagotovijo dober oprijem na jekleno konstrukcijo, tudi v času agresivnega požara. Kot mineralno vezivo se lahko uporablja mavec ali cement.

Vermikulit je sljuda, ki ima med plastmi kemično vezano vodo. Pri vplivu visokih temperatur se plasti razmaknejo in s tem se posledično poveča volumen in zniža specifična teža. Tako dobimo ekspanziran vermikulit, ki je negorljiv in obstojen v temperaturnem območju od 200 °C do 1200 °C. Poleg negorljivosti ima vermikulit še številne druge dobre lastnosti kot je odpornost proti staranju, netopnost v vodi, odpornost na večino kislin, neobčutljivost na plesen in pri požaru ne spušča strupenih plinov [16].

Perlit je v naravi prisoten v obliki vulkanske kamnine (bele barve). Surovi perlit vsebuje 2 % - 5 % kristalne vode. Po mletju rude, se perlit termično obdela pri temperaturi okoli 1000 °C in s tem se posledično poveča njegov volumen. Tako dobimo ekspanziran perlit, ki je negorljiv, kemično inerten in ima porozno strukturo ter majhno težo [15].

Nanašanje požarno zaščitnih ometov na jekleno konstrukcijo je zahtevno in zamudno delo (slika 13). Omete lahko nanašamo strojno ali ročno. S strojnim nanašanjem požarno zaščitnega ometa se pojavi problem prevelikih izgub, kar dodatno podraži zaščito ter predstavlja tudi velik problem pri čiščenju prostorov. Na vsakem delu konstrukcije mora biti enakomerno nanešena določena debelina sloja ometa. To je običajno težko doseči, zato je potrebno dodatno izravnavanje površine. Glede na to, da imamo običajno opravka z visokimi profili, moramo požarno odporni omet dodatno armirati s kovinsko mrežo, ki jo predhodno pritrdimo na jekleni element. Pri določanju debeline nanosa požarno odpornega ometa moramo upoštevati tudi njegovo lastno težo, da ne bi prišlo do preobremenitve nosilne konstrukcije. Požarno odporni ometi imajo prostorninsko težo približno od 300 kg/m<sup>3</sup> do 450 kg/m<sup>3</sup> [16].



Slika 13 Zaščita stebra s požarnim ometom ((1) – jeklen profil, (2) – omet)

(vir: <http://www.pozarno-tesnenje.si/index.php/izdelki-po-namenu-uporabe/zascita-konstrukcij/pozarna-zascita-jeklenih-konstrukcij?limitstart=0>)

### 3.4 Posebni primeri požarne zaščite

Kot posebni primeri požarne zaščite jeklenih konstrukcij so primeri hlajenja konstrukcije z vodo, požarne zaščite strehe, razdelitev objekta na več požarnih sektorjev in požarna zaščita inštalacijskih prebojev med sektorji.

#### 3.4.1 Požarna zaščita s hlajenjem

Eden izmed načinov povečanja požarne odpornosti jeklenih konstrukcij je hlajenje z vodo. Ta način požarne zaščite se pri nas zaradi visoke cene zaenkrat ne uporablja. Hlajenje konstrukcije z vodo je primereno, ko imamo opravka z zaprtimi profili in želimo imeti vidno konstrukcijo. Princip delovanja je takšen, da voda v primeru požara kroži po konstrukciji in na ta način absorbira toploto. Obstajata dva sistema hlajenja konstrukcije z vodo in sicer v enem je voda konstantno v profilih, pri drugem pa se voda napolni le v primeru požara. Slabosti takšnega načina zaščite jeklene konstrukcije je predvsem v tem, da voda znotraj profilov lahko povzroči nastanek korozije in v primeru nizkih temperatur lahko pride do zmrzovanja [16].

#### 3.4.2 Požarna zaščita strehe

Pri jeklenih konstrukcijah se običajno za strešno kritino uporabljajo trapezne pločevine, ki zaradi svoje mahjnhne debeline in hitrega segrevanja zelo hitro izgubijo svojo nosilnost. Če želimo preprečiti širjenje požara na sosednje objekte moramo ustrezno zaščititi streho objekta. To lahko dosežemo na dva načina in sicer s požarno odpornim spuščnim stropom ali z oblogo, ki se direkto pritrujuje na trapezno pločevino.

Najenostavnejši način zaščite je vsekakor tisti pri katerem požarno odporne plošče pritrdimo direkto na trapezno pločevino. Pri tem je potebno upoštevati zamike stikov plošč in ojačitve na stikih.

Sistem spuščениh stropov je zelo uporaben sistem požarne zaščite, zato ker z izvedbo spuščene stropa pridobimo tudi zaščito vseh inštalacij, ki jih skrijemo med trapezno pločevino in ploščami spuščene stropa.

Obstajajo tudi strešni sendvič paneli, ki so izdelani iz profilirane pločevine na obeh strani in kamene volne v sredini, tak sistem nam zagotavlja tudi do 90 minut standradne požarne odpornosti [16].

### 3.4.3 Požarno odporne predelne stene

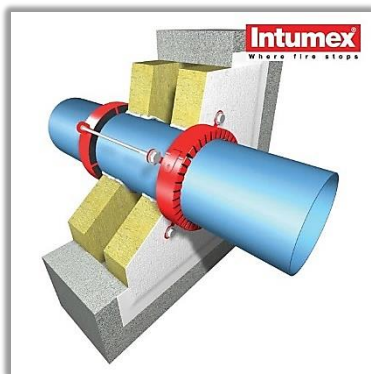
Za preprečitev prenosa požara po sami stavbi je smiselno stavbo razdeliti na požarne sektorje. Stavbo na požarne sektorje razdelimo s pomočjo požarno odpornih sten, ki so lahko izdelane iz različnih materialov:

- Klasične zidane stene  
Pri klasičnih zidanih stenah je jasno da so narejene iz materialov, ki so negorljivi in imajo relativno dobro požarno odpornost. Pozorni pa moramo biti na inštalacijske preboje in prehode med sektorji.
- Montažne stene  
Za izdelavo montažnih sten se uporabljajo ustrezni jekleni profili, ki imajo funkcijo nosilne konstrukcije in protipožarne plošče. Pri tem moramo biti pozorni na zamikanje stikov plošč [17].
- Steklene stene  
Steklene stene so izdelane tako, da so stekla vezana s posebnim gelom, ki se v primeru požara aktivira in se spremeni v belo negorljivo peno, ki je učinkovita izolacija. S tem je zaprt prehod za dim, ogenj in toplotno sevanje [18].

### 3.4.4 Požarna zaščita inštalacijskih prebojev

Šibke točke vseh požarno odpornih sten in stropov so preboji (gorljive cevi, inštalacijski kabli) in gradbene rege. Trenutno je na trgu mogoče dobiti kar široko paleto proizvodov, ki jih lahko uporabimo za požarno zaščito prebojev.

Za zaščito prebojev gorljivih cevi se uporabljajo požarne manšete (slika 14) in objemke, ki so neobčutljive na vodo, atmosferske vplive in na kemikalije. Pri zaščiti prebojev skozi steno se požarna manšeta ali objemka vgradi na obeh straneh zidu, medtem ko pri prehodu skozi strop zadostuje da požarno manšeto ali objemko vgradimo samo na spodnji strani stropa. Požarne objemke in manšete delujejo tako, da v primeru požara intumescenčna snov v jedru obroča stisne zmehčano gorljivo cev in na ta način prepreči prehod požara. V primeru kovinskih cevi se uporablja intumescenčna požarna masa v kombinaciji z mineralno volno (slika 15), ki ne samo da tvori požarno zaporo ampak razvije hladilni efekt, ki pozitivno vpliva na prehod toplote po kovinski cevi [20].



Slika 14 Zaščita s kovinsko manšeto

(vir: <http://www.intumex.info/?systemy/potrubu>)

Slika 15 Zaščita kovinske cevi z intumescenčno požarno maso

(vir: <http://www.intumex.info/?systemy/potrubu>)

Kabelske preboje lahko zaščitimo na več načinov, odvisno od velikosti odprtin. Pri odprtinah velikih dimenzij se najpogosteje uporabljajo požarne blazinice (slika 16), ki so idealne za uporabo v prostorih z veliko komunikacijskih in računalniških napeljav. Pri srednjih in manjših odprtinah pa se najpogosteje uporabljajo požarna malta in intumescenčna požarna masa [20].



Slika 16 Požarne blazinice

(vir: <http://www.royaltech.info/home/dettaglio.asp?id=156&logo=eraclit.jpg>)

Gradbene rege v požarnih stenah in stropovih so prav tako občutljiva mesta prek katerih je možen prehod ognja in dima. Zato je potrebno vse gradbene rege ustrezno požarno zatesniti. Za požarno tesnenje gradbenih reg uporabljamo požarne silikonske ali akrilne tesnilne mase ali intumescenčne požarne mase, ki zaradi svojih dobrih lastnosti ščitijo prehod požara že z nanosom samo na eni strani (slika 17). Zaradi velike elastičnosti so uporabna tudi za dilatacijske rege [20].



Slika 17 Zaščita gradbenih reg z intumescenčno požarno maso

(vir: <http://www.jud-baustoffe.ch/cms/produkte/brandabschottungen/brandschutzfugen.html?layout=table>)

## 4 Primerjava sistemov zaščite

### 4.1 Izbira ustreznega sistema požarne zaščite

Ko se odločamo za izbiro ustreznega sistema požarne zaščite jeklenih konstrukcij moramo poznati namembnost objekta. Za neko reprezentativno stavbo kot je trgovski center bodo požarni premazi najboljša izbira, za estetiko in visoko odpornost pa so bolj primerne požarne plošče, za neko grobo konstrukcijo, ki ni vidna ali izgled ni pomemben (npr. rafinerija) pa so požarni ometi optimalnejša izbira.

Osnovni podatek, ki ga potrebujemo za izbiro ustreznega sistema požarne zaščite pa je predvsem razred standardne požarne odpornosti, ki je lahko R30, R60, R90, R120, R180 itd. in je med drugim odvisen od velikosti in namebnosti objekta [13]. Poleg razreda požarne odpornosti je pomemben še podatek o okoljskih pogojih katerim bo konstrukcija izpostavljena. Pri tem moramo vedeti ali imamo opravka z notranjimi prostori, pol izpostavljenimi deli konstrukcije (npr. razni napušči), ali z zunanjo uporabo. Drugi pomembni parametri, ki vplivajo na izbiro ustreznega sistema zaščite pa so prikazani v preglednici 2 [24].

Preglednica 2: Matrika izbire sistema požarne zaščite (Revija Gradbenik 12/14, str. 30)

	R30	R60	R90	R120	R180
<b>Omejitve teže</b>	premazi	premazi	omet	omet	omet
<b>Estetika</b>	premazi	premazi/plošče	plošče	pošče	plošče
<b>Vlaga</b>	plošče	plošče/omet	plošče/omet	plošče/omet	plošče/omet
<b>Mehanska odpornost</b>	plošče/premazi	plošče/premazi	plošče	plošče	plošče
<b>Zahteva po negorljivosti A1</b>	plošče	plošče/omet	plošče/omet	plošče/omet	plošče/omet
<b>Suha vgradnja</b>	plošče	plošče	plošče	plošče	plošče
<b>Majhne dimenzije profilov</b>	plošče/premazi	plošče/premazi	plošče	plošče	plošče
<b>Nizke temperature</b>	plošče	plošče	plošče	plošče	plošče
<b>Hitrost montaže</b>	premazi	plošče/omet	plošče/omet	plošče/omet	plošče

### 4.2 Določitev potrebne debeline zaščitne obloge


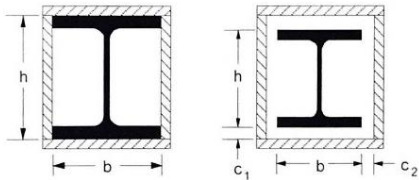
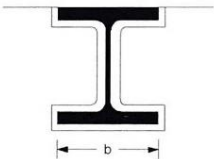
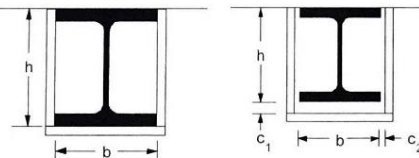
Kot smo že omenili sta za določitev debeline zaščitne obloge pomembna dva faktorja in sicer faktor profila  $A_m/V$  [ $m^{-1}$ ] in kritična temperatura  $T_{cr}$  [ $^{\circ}C$ ]. Faktor profila je, kot je že bilo omenjeno v tretjem poglavju, razmerje med požaru izpostavljeno površino jekla in volumnom jekla oz. razmerje med obsegom požaru izpostavljenega prereza in površino prereza jeklenega profila. Kot vidimo je odvisen od geometrije profila, debeline sten in tudi od vrste zaščite.

Za požarne plošče se faktor profila izračuna kot razmerje obsega profila izpostavljenega požaru proti preseku jekelnega profila. Oznaka  $A_m$  se uporablja za nezaščitene elemente,  $A_p$  pa za zaščitene elemente. V kolikor je ena stran profila zaščiten z osnovno konstrukcijo, kot je to naprimer pri sovprežnih stropih, ko je zgornja pasnica zaščiten z betonsko ploščo, to znatno vpliva na izračun faktorja profila. V tem primeru imamo opravka s tristransko zaščito namesto štiristranske. Kar pomeni, da je količina požarne zaščite manjša ter segrevanje jeklenega elementa počasnejše. Načini izračuna faktorja profila za zaščitene elemente so prikazani na sliki 18. Za višje faktorje profila potrebujemo večjo debelino zaščitne

obloge in obratno za nižje faktorje profila potrebujemo manjšo debelino zaščitne obloge za doseganje enakoredne požarne odpornosti R. Izraza za izračun faktorja profila sta [23]:

$$\frac{A_m}{V} = \frac{\text{obseg jeklenega prereza izpostavljen požaru}}{\text{površina jeklenega prereza}} \quad \text{nezaščiteni elementi} \quad (4.2.1)$$

$$\frac{A_p}{V} = \frac{\text{obseg zaščitne obloge izpostavljen požaru}}{\text{površina jeklenega prereza}} \quad \text{zaščiteni elementi} \quad (4.2.2)$$

Skica	Opis	Faktor prereza ( $A_p / V$ )
	Izolacija konstantne debeline po obodu jeklenega elementa	$\frac{\text{obseg jeklenega prereza}}{\text{površina jeklenega prereza}}$
	Škatlasta izolacija enakomerne debeline <sup>1</sup>	$\frac{2(b+h)}{\text{površina jeklenega prereza}}$
	Izolacija konstantne debeline po obodu jeklenega elementa, izpostavljenega požaru s treh strani	$\frac{\text{obseg jeklenega prereza} - b}{\text{površina jeklenega prereza}}$
	Škatlasta izolacija enakomerne debeline, izpostavljenega požaru s treh strani <sup>1</sup>	$\frac{2h+b}{\text{površina jeklenega prereza}}$

<sup>1</sup> Razmika  $c_1$  in  $c_2$  običajno ne smeta biti večja od  $h/4$ .

Slika 18 Faktorji prereza izoliranih jeklenih elementov

(vir: SIST EN 1993-1-2, str. 41)

Naslednji parameter, ki ga moramo poznati je kritična temperatura konstrukcije  $T_{cr}$  [°C] oziroma posameznega nosilnega elementa. To vrednost običajno izračuna projektant. V inženirski praksi je najbolj uporabljen poenostavljen postopek računa požarne odpornosti jeklenih elementov, ki je podan v SIST EN 1993-1-2. Višja kot je kritična temperatura manj požarne zaščite je potrebno in obratno.

Problematični so tenskostenski profili 4. razreda kompaktnosti, za katere je skladno s SIT EN 1993-1-2 kritična temperatura enaka 350°C, v kolikor je posebej ne izračunamo.

Debelino zaščitne obloge določimo tako, da iz nomograma (slika 21) odčitamo vrednost faktorja  $Q$  ( $Q = \frac{\lambda_p \cdot A_p}{V \cdot d_p}$ ), za določeno kritično temperaturo  $T_{cr}$  [°C] in potrebno požarno odpornost  $R$  [min] (slika 19), potem pa s pomočjo izraza (4.2.3) izračunamo minimalno potrebno debelino zaščitne obloge  $d_p$  [mm]. Debelina je seveda odvisna tudi od vrste zaščitne obloge, saj je eden izmed ključnih parametrov izračuna tudi toplotna prevodnost zaščitne obloge  $\lambda_p$  [W/mK]. Omenimo, da pri opisanem poenostavljenem postopku dočitve debeline protipožarne zaščite lahko skladno s standardom SIST EN 1993-1-2 za faktor toplotne prevodnosti privzamemo vrednost pri sobni temperaturi [23].

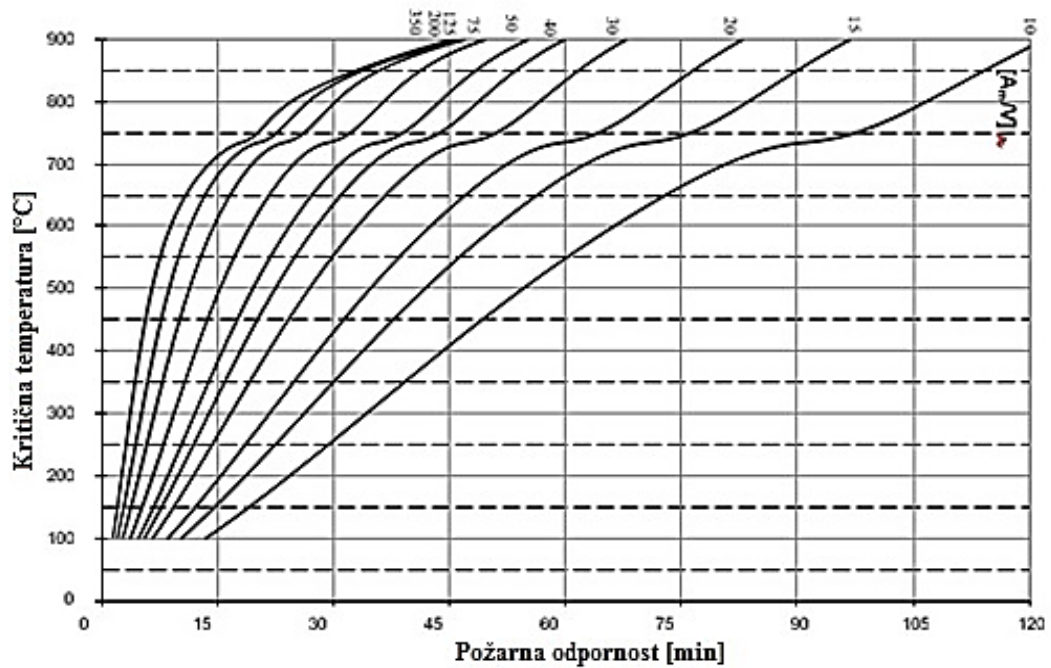
$$\frac{\lambda_p \cdot A_p}{Q \cdot V} = d_p \quad (4.2.3)$$

Število etaž [1] Vrsta stavbe ali dela stavbe (CC-SI)	[2]	(P) do	(P+1) do	(P in	(P+2)	(P+3)	(P+4)	(P+6)
		600 m <sup>2</sup> BET	600 m <sup>2</sup> BET	P+1) nad 600 m <sup>2</sup> BET	(P+5)	(P+7)		
112 - Večstanovanjske stavbe	A	nz	R 60 [3]	R 60 [3]	R 60 [4]	R 60 [4]	R 60	R 60
	B	nz	R 60 [3]	R 60 [3]	R 60 [3]	R 60 [4]	R 60 [4]	R 60
113 - Stanovanjske stavbe za posebne namene	A	R 30 [3]	R 60 [4]	R 60 [4]	R 60	R 90	R 90	R 90
	B	R 30 [3]	R 60 [3]	R 60 [4]	R 60 [4]	R 60 [4]	R 60	R 90
121 - Gostinske stavbe 1241 - Postaje, terminali, stavbe za elektronske komunikacije in z njimi povezane stavbe 1261 - Stavbe za kulturo in razvedrilo 1262 - Muzeji in knjižnice 1263 - Stavbe za izobraževanje in znanstveno-raziskovalno delo 1265 - Športne dvorane 123 - Trgovske in druge stavbe za storitvene dejavnosti 1272 - Stavbe za opravljanje verskih obredov, pokopališke stavbe	A	ng ali R 30 [3]	R 30 [3]	R 30 [3]	R 60 [4]	R 90	R 90	[5]
	B	nz	nz	R 30 [3]	R 60 [4]	R 60 [4]	R 60	R 90
122 - Upravne in pisarniške stavbe 1242 - Garažne stavbe 125 - Industrijske stavbe in skladišča do 1000 MJ/m <sup>2</sup> 1271 - Nestanovanjske kmetijske stavbe	A	nz	ng ali R 30 [3]	R 30 [3]	R 30 [4]	R 60 [4]	R 60	R 60
	B	nz	nz	ng ali R 30 [3]	R 30 [3]	R 60 [4]	R 60 [4]	R 60
125 - Industrijske stavbe in skladišča nad 1000 MJ/m <sup>2</sup>	A	ng	R 30	R 60	R 60	R 90	R 90	R 90
	B	ng	R 30	R 60	R 60	R 60	R 60	R 60
1264 - Stavbe za zdravstvo	A	R 30 [3]	R 60 [4]	R 60 [4]	R 60	R 90	R 90	[5]
	B	R 30 [3]	R 60 [3]	R 60 [4]	R 60 [4]	R 60 [4]	R 60	R 90
1274 - Nestanovanjske stavbe, ki niso uvrščene drugje	A	R 30	R 30	R 60	R 60	R 60	R 60	R 90
	B	R 30 [3]	R 30 [3]	R 30 [3]	R 30 [3]	R 30	R 30	R 60

Slika 19 Minimalna zahtevana požarna odpornost stavb

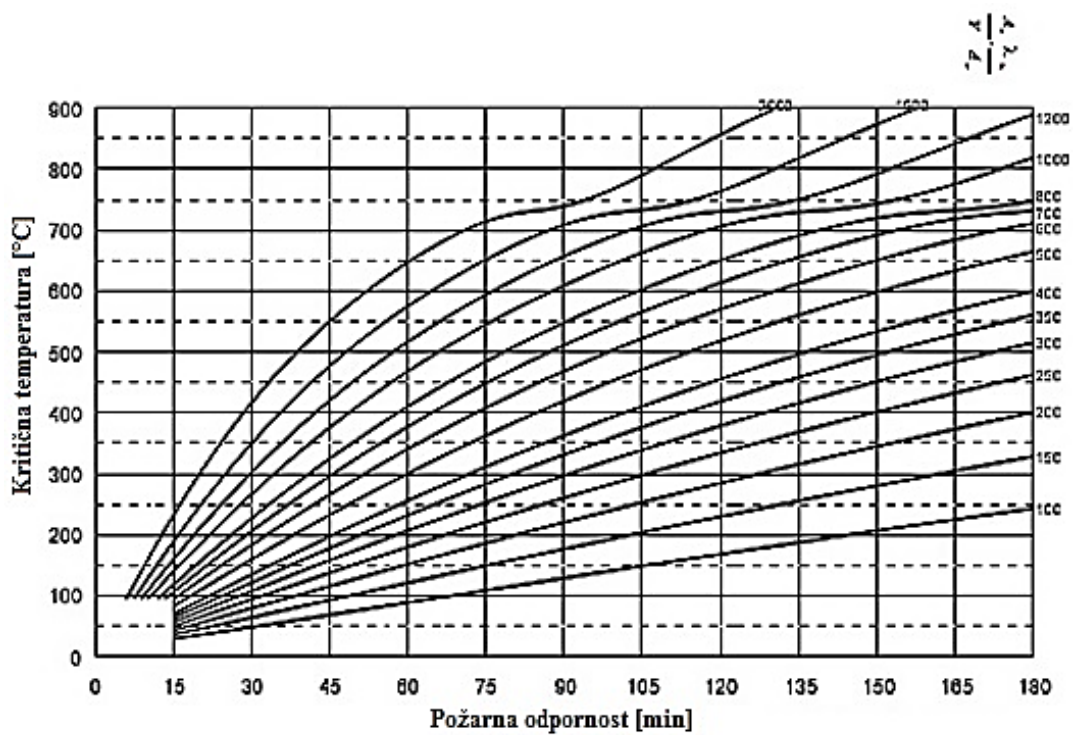
(vir: Tehnična smernica TSG 1-001-Požarna varnost v stavbah, 2010, str. 20)





Slika 20 Nomogram za nezaščitene jeklene elemente

(vir: Arcelor – Fire resistance of steel structures, 2006, str. 14)



Slika 21 Nomogram za zaščitene jeklene elemente

(vir: Arcelor – Fire resistance of steel structures, 2006, str. 20)

V primeru požarne zaščite s ploščami in intumescentnimi premazi je postopek določitve debeline požarne zaščite še nekoliko bolj poenostavljen. Namreč proizvajalci plošč ponavadi podajo tabelo debeline obloge v odvisnosti od faktorja profila in zahtevane standardne požarne odpornosti. Za primer plošč so debeline podane v preglednici 3. V primeru intumescentnih premazov pa proizvajalci podajo tabelo na podlagi faktorja profila, standardne požarne odpornosti in kritične temperature.

Preglednica 3 Debelina obloge jeklenih elementov PROMATECT 200 glede na faktor profila [ $m^{-1}$ ]

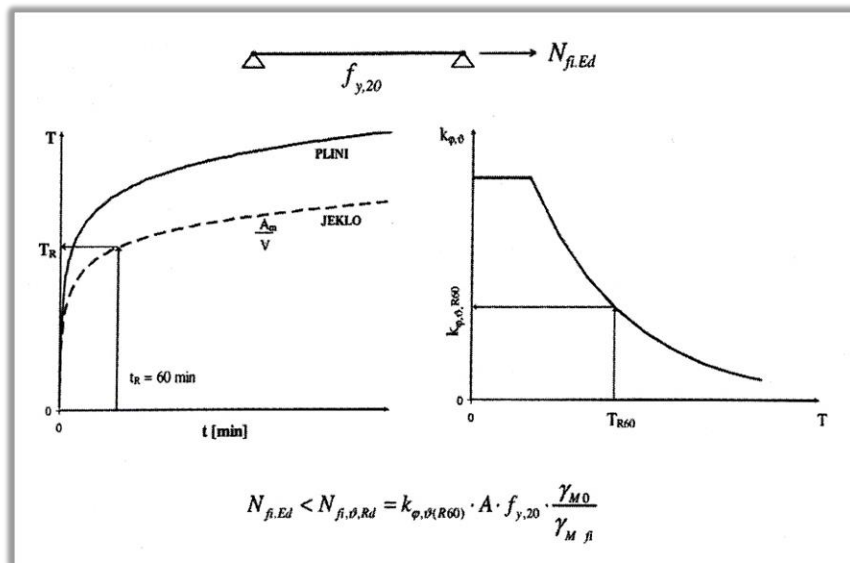
Debelina obloge (mm)	R30	R60	R90
12	$\leq 300$	$\leq 125$	$\leq 65$
15		$\leq 190$	$\leq 90$
18		$\leq 250$	$\leq 110$
20		$\leq 300$	$\leq 145$
25			$\leq 225$
30			$\leq 300$

#### 4.3 Kontrola nosilnosti po standardu SIST EN 1993-1-2

Tukaj na kratko opišemo postopek poenostavljene računske metode za jeklene elemente in nepomične okvirje v primeru nominalnega požara [25]. Računsko je potrebno dokazati, da je  $E_{fi,d} \leq R_{fi,d,t}$ , kontrola poteka po naslednjih korakih:

- izračun vplivov za požarno projektno stanje
- izračun notranjih sil in pomikov pri sobni temperaturi
- dimenzioniranje ob upoštevanju:
  - reduciranih vplivov  $E_{fi,d}$  (nezgodno projektno stanje)
  - reducirane nosilnosti jekla  $R_{fi,d,t}$  pri povišani temperaturi v požaru
$$E_{fi,d} \leq R_{fi,d,t}$$

za natezno palico je na primer  $R_{fi,d,t} = N_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} A f_{y,20} \gamma_{M0} / \gamma_{Mfi}$   
 $k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_{y,20}$  (redukcijski faktor)  
 $f_{y,\theta}$  – zvišana napetost tečenja pri temperaturi  $T$  [°C]  
 $f_{y,20}$  – napetost tečenja pri sobni temperaturi [20°C]  
 $A$  – prečni prerez natezne palice  
 $\gamma_{M0} = \gamma_{Mfi}$  (= 1.0) delna faktorja odpornosti za običajno in požarno projektno stanje



Slika 22 Kontrola nosilnosti po enostavni računski metodi

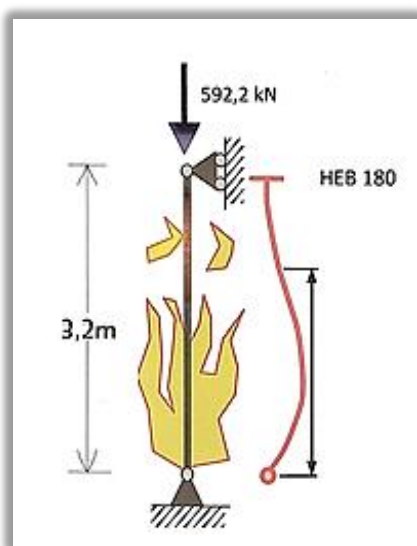
(vir: Zbornik mednarodnega seminarja – Teden požarne varnosti konstrukcij, 2006, str. 16)

Na podoben način se izračuna nosilnost za tlačene palice (uklon), upogibne palice (bočna zvrnitev) in tlačno-upogibno obremenjene palice. Pri analizi nepomičnih okvirjev s požarnimi sektorji v posameznih etažah je dovoljeno upoštevanje vpetosti stebrov v hladne etaže. V tem primeru so posebej podani podatki za račun temperatur zunanjih elementov, na katere vpliva požar iz notranjosti požarnega sektorja. Izračun je zelo zapleten in primeren le, če je podprt z računalniškimi programi [25].

## 5 Primer požarne zaščite jeklenega stebra

### 5.1 Vhodni podatki

Analizirali bomo steber HEB 180, ki je enak modelu stebra uporabljenem v tehnični smernici Fire Guideline – Design and examples [28]. Najprej bomo izračunali kritično temperaturo stebra in preverili požarno odpornost nezaščitenega stebra, potem pa ga bomo zaščitili s tremi različnimi oblogami in sicer s požarnimi ploščami Promatect 200, požarnim ometom Promaspray-P300 in intumescentnim premazom Promapaint-SC4. Namen je določiti potrebno debelino obloge s katero bi dosegli požarno odpornost stebra R30 in R60. Steber je visok 3,20 metra, kvaliteta jekla pa je S275. Steber je obremenjen s tlačno silo  $P_d = 592,2$  kN.



Slika 23 Računska shema stebra HEB 180

(vir: Fire Guideline – Design and examples, 2015, str. 49)

### 5.2 Izračun kritične temperature in požarna odpornost nezaščitenega stebra

#### 5.2.1 Kritična temperatura

Najprej določimo v kateri razred kompaktnosti spada prečni prerez:

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/275} = 0,92$$

pasnice:  $c/t = 70,75 / 14 = 5,05 \leq 9\varepsilon = 8,28 \rightarrow 1.$  razred

stojina:  $c/t = 122 / 8,5 = 14,35 \leq 33\varepsilon = 30,36 \rightarrow 1.$  razred

Prerez je v 1. razredu kompaktnosti. V nadaljevanju določimo faktor relativne vitkosti  $\bar{\lambda}$ .

Vitkost pri upogibnem uklonu:

Glede na to, da gre za primer stebra večetažne hale in da se steber nahaja v zadnjem nadstropju hale je njegova uklonska dolžina skladno s standardom SIST EN 1993-1-2 (str. 30, slika 4.1) enka  $l_{fi} = 0,7 \cdot L$  (predpostavljena vpetost v hladno cono) [23].

$$l_{fi} = 0,7 \cdot 3,20 = 2,24 \text{ m}$$

$$\lambda = l_{fi} / i_z = 224 / 4,57 = 49$$

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9 \text{ €} = 93,9 \cdot 0,92 = 86,39$$

Faktor relativne vitkosti  $\bar{\lambda}$  pri sobni temperaturi znaša:

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{49}{86,39} = 0,5672$$

Ker je relativna vitkost  $\bar{\lambda}_\theta$  funkcija temperature določimo kritično temperaturo z iterativnim postopkom, kjer v prvi iteraciji predpostavimo  $\bar{\lambda}_\theta = 1,2\bar{\lambda}$ .

Prva iteracija

$$\bar{\lambda}_\theta = 1,2\bar{\lambda} = 1,2 \cdot 0,5672 = 0,6806$$

Faktor nepopolnosti:

$$\alpha = 0,65\sqrt{235/f_y} = 0,65\sqrt{235/275} = 0,60$$

$$\varphi_\theta = 0,5(1 + \alpha\bar{\lambda}_\theta + \bar{\lambda}_\theta^2) = 0,5(1 + 0,60 \cdot 0,6806 + 0,6806^2) = 0,9358$$

Redukcijski faktor upogibnega uklona:

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_\theta + \sqrt{\varphi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}} = \frac{1}{0,9358 + \sqrt{0,9358^2 - 0,6806^2}} = 0,6337$$

Enačba nosilnosti:

$$N_{b, fi, t, Rd} = \chi_{fi} A k_{y,\theta} f_y / \gamma_{M, fi} = N_{fi, Ed} \rightarrow k_{y,\theta} = N_{fi, Ed} / (\chi_{fi} A f_y / \gamma_{M, fi})$$

$$k_{y,\theta} = 592,2 / (0,6337 \cdot 65,3 \cdot 27,5 / 1,0) = 0,520$$

Z interpolacijo iz preglednice (SIST EN 1993-1-2 poglavje 3.2.2 preglednica 3.1), za prej izračunani redukcijski faktor  $k_{y,\theta} = 0,520$ , določimo kritično temperaturo jekla  $T_{a,crit} = 584 \text{ °C}$  in vrednost redukcijskega faktorja za elastični modul  $k_{E,\theta} = 0,356$ .

Druga iteracija

V drugi iteraciji ponovimo celoten postopek s tem, da upoštevamo kritično temperaturo jekla, ki smo jo določili v prvi iteraciji.

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 0,5672 \sqrt{\frac{0,520}{0,356}} = 0,6855$$

$$\varphi_\theta = 0,5(1 + \alpha\bar{\lambda}_\theta + \bar{\lambda}_\theta^2) = 0,5(1 + 0,60 \cdot 0,6855 + 0,6855^2) = 0,9406$$

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_\theta + \sqrt{\varphi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}} = \frac{1}{0,9406 + \sqrt{0,9406^2 - 0,6855^2}} = 0,6310$$

$$k_{y,\theta} = N_{fi, Ed} / (\chi_{fi} A f_y / \gamma_{M, fi}) = 592,2 / (0,6310 \cdot 65,3 \cdot 27,5 / 1,0) = 0,523$$

Kritična temperatura jekla znaša  $T_{a, \text{crit}} = 583 \text{ °C}$ , redukcijski faktor za elastični modul pa  $k_{E, \theta} = 0,359$  (SIST EN 1993-1-2 poglavje 3.2.2 preglednica 3.1).

Tretja iteracija

Pri tretji iteraciji upoštevamo kritično temperaturo jekla, ki smo jo dobili v drugi iteraciji.

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} \sqrt{\frac{k_{y, \theta}}{k_{E, \theta}}} = 0,5672 \sqrt{\frac{0,523}{0,359}} = 0,6846$$

Ker smo pri tretji iteraciji dosegli praktično enako vrednost parametra  $\bar{\lambda}_{\theta}$  kot v drugi iteraciji, je s tem postopek iteriranja končan in dosežena kritična temperatura jekla znaša  $T_{a, \text{crit}} = 583 \text{ °C}$ .

## 5.2.2 Požarna odpornost nezaščenega stebra

Faktor profila za steber HEB 180, ki je z vseh štirih strani izpostavljen požaru je

$$A_m/V = 1015 / 6530 = 155,4 \text{ m}^{-1}$$

$$[A_m/V]_b = 720 / 6530 = 110,3 \text{ m}^{-1}$$

$$k_{sh} = 0,9 \frac{[A_m/V]_b}{A_m/V} = 0,9 \cdot (155,4 / 110,3) = 0,64$$

Modificiran faktor prereza je:  $k_{sh} A_m/V = 111,9 \text{ m}^{-1}$

Iz nomograma za nezaščitenne jeklene elemente (slika 20) je razvidno, da je kritična temperatura za analiziran steber ( $T_{cr} = 583 \text{ °C}$ ) dosežena že po 16 minutah, kar pomeni, da brez zaščitnih oblog ne dosežemo niti najnižje požarne odpornosti R30. V nadaljevanju bomo določili potrebno debelino požarne zaščite za različne sisteme požarne zaščite in požarno odpornost R30 ter R60.

## 5.3 Projektiranje požarne zaščite

### 5.3.1 Projektiranje požarne zaščite s ploščami Promatect 200

Za prvi način zaščite bomo uporabili požarne plošče narejene na silikatni osnovi Promatect 200. Toplotna prevodnost teh plošč pri sobni temperaturi je  $\lambda = 0,189 \text{ W/mK}$ . Standardne debeline plošč pa so: 12, 15, 18, 20, 25 in 30 mm.

#### 5.3.1.1 Požarna odpornost R30

Prvo kontrolo izvedemo za najtanjšo debelino požarnih plošč in sicer  $d_p = 12 \text{ mm}$ . Iz enačbe (4.2.3) izrazimo faktor  $Q$  in ga izračunamo:

$$Q = \frac{\lambda_p \cdot A_p}{V \cdot d_p} = \frac{0,189 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \cdot 720 \text{ mm}}{6530 \text{ mm} \cdot 12 \text{ mm}} = 1737 \text{ W/m}^3\text{K}$$

Iz nomograma za zaščitenne elemente (slika 21) odčitamo temperaturo  $T_a = 386 \text{ °C}$ , ki jo doseže steber po 30 minutah izpostavljenosti požaru. Vidimo, da je temperatura manjša od kritične temperature  $T_{cr} =$

583 °C kar pomeni, da minimalna debelina plošč 12 mm zadostuje za zagotovitev požarne odpornosti R30.

### 5.3.1.2 Požarna odpornost R60

V primeru da ponovno vzamemo minimalno debelino plošč za izračunan faktor 1737 W/m<sup>3</sup>K je temperatura, ki jo doseže steber po 60 minutah izpostavljenosti požaru enaka  $T_a = 612$  °C (odčitamo iz nomograma za zaščitene elemente). Vidimo, da je temperatura večja od kritične temperature kar pomeni, da moramo povečati debelino obloge na  $d_p = 15$  mm. Faktor  $Q$  znaša:

$$Q = \frac{\lambda_p \cdot A_p}{V \cdot d_p} = \frac{0,189 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \cdot 720 \text{ mm}}{6530 \text{ mm} \cdot 15 \text{ mm}} = 1390 \text{ W/m}^3\text{K}$$

Iz nomograma za zaščitene elemente (slika 21) odčitamo temperaturo  $T_a = 555$  °C, ki jo doseže steber po 60 minutah izpostavljenosti požaru. Vidimo, da je temperatura manjša od kritične temperature  $T_{cr} = 583$  °C, kar pomeni, da s 15 mm debelimi ploščami Promatect 200 lahko zagotovimo požarno odpornost R60.

### 5.3.2 Projektiranje požarne zaščite s požarnim ometom Promaspray – P300

Za drugi način požarne zaščite bomo uporabili požarni omet Promaspray – P300, ki ima toplotno prevodnost pri sobni temperaturi  $\lambda = 0,078$  W/mK in ima debeline sloja od 8 do 76 mm. Debelina posameznega nanosa je običajno 15-20 mm.

#### 5.3.2.1 Požarna odpornost R30

Najprej bomo za zaščito uporabili najmanjšo debelino sloja  $d_p = 8$  mm. Faktor  $Q$  izračunamo s pomočjo enačbe (4.2.3) in znaša:

$$Q = \frac{\lambda_p \cdot A_p}{V \cdot d_p} = \frac{0,078 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \cdot 1015 \text{ mm}}{6530 \text{ mm} \cdot 8 \text{ mm}} = 1515 \text{ W/m}^3\text{K}$$

Iz nomograma za zaščitene jeklene elemente (slika 21) odčitamo temperaturo  $T_a = 356$  °C, ki jo doseže steber po 30 minutah izpostavljenosti požaru. Vidimo, da je temperatura manjša od kritične temperature  $T_{cr} = 583$  °C, kar pomeni, da minimalna debelina sloja požarnega ometa zadostuje za zagotovitev požarne odpornosti R30.

#### 5.3.2.2 Požarna odpornost R60

V primeru 60 minutne izpostavljenosti požaru, in debelini ometa  $d_p = 8$  mm, bi temperatura stebra dosegla  $T_a = 580$  °C, kar je približno enako kritični temperaturi stebra  $T_{cr} = 583$  °C. Kar pomeni, da če želimo večji faktor varnosti moramo povečati debelino obloge za 1 mm ( $d_p = 9$  mm). Faktor  $Q$  v tem primeru znaša:

$$Q = \frac{\lambda_p \cdot A_p}{V \cdot d_p} = \frac{0,078 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \cdot 1015 \text{ mm}}{6530 \text{ mm} \cdot 9 \text{ mm}} = 1347 \text{ W/m}^3\text{K}$$

Iz nomograma za zaščitene elemente (slika 21) odčitamo temperaturo  $T_a = 546 \text{ °C}$ , ki jo doseže steber po 60 minutah izpostavljenosti požaru. Dosežena temperatura  $T_a = 546 \text{ °C}$  je manjša od kritične temperature  $T_{cr} = 583 \text{ °C}$ , kar pomeni, da 9 milimeterska zaščita s požarnim ometom zadostuje za doseganje požarne odpornosti R60.

### 5.3.3 Projektiranje požarne zaščite z intumescentnim premazom Promapaint – SC4

Kot tretji način zaščite bomo uporabili intumescentni premaz Promapaint – SC4, ki vsebuje sintetično smolo posebej formulirano za zanesljivo požarno zaščito jeklenih elementov. S premazom obdelani jekleni elementi dosegajo požarne razrede od R30 do R120, vendar se v praksi intumescenci premazi upirablajo za požarno zaščito do razreda R60. Pri uporabi intumescentnih premazov nimamo na voljo podatka o toplotni prevodnosti ker ta ni konstanten in je odvisen od temperature. Zato smo od Promata dobili tabele za določitev potrebne debeline obloge na podlagi faktorja profila, kritične temperature in razreda požarne odpornosti. Maksimalna debelina suhega sloja premaza je  $750 \text{ }\mu\text{m}$ , kar je približno  $1100 \text{ }\mu\text{m}$  debeline mokrega sloja.

#### 5.3.3.1 Požarna odpornost R30

Podatki, ki jih potrebujemo, da lahko odčitamo potrebno debelino obloge iz tabele (preglednica 4) za doseganje požarne odpornosti R30 so naslednji:

$$A_p/V = 1015 / 6530 = 155,4 \text{ m}^{-1}$$

$$T_{cr} = 583 \text{ °C}$$

Preglednica 4 Debelina premaza za odprte profile požarne odpornosti R30 (ETA 13/0198)

R30	Debelina premaza [ $\mu\text{m}$ ]								
	Kritična temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ]								
$A_p/V [\text{m}^{-1}]$	350	400	450	500	550	600	650	700	750
75	370	239	186	186	186	186	186	186	186
80	396	254	191	187	186	186	186	186	186
85	421	269	200	188	186	186	186	187	186
90	447	284	209	189	186	186	186	187	186
95	472	299	218	190	186	187	186	187	186
100	498	314	227	190	188	187	186	188	187
105	523	329	236	191	188	187	187	188	187
110	554	344	245	194	188	187	187	188	187
115	587	360	254	201	189	187	187	189	187
120	621	375	263	209	189	187	187	189	187
125	654	390	272	217	189	187	187	189	187
130	687	405	281	225	190	188	187	190	187
135	721	420	290	233	190	188	187	190	187
140	757	435	299	241	190	188	187	190	188
145	812	450	317	248	191	188	187	191	188
150	866	465	326	256	191	188	187	191	188
155	920	480	335	264	191	188	187	191	188
160	974	495	344	272	192	189	188	192	188
165	1.029	510	353	280	192	189	188	196	188



Potrebna minimalna debelina intumescentnega premaza za doseganje požarne odpornosti R30 je  $d_p = 190 \mu\text{m}$ .

### 5.3.3.2 Požarna odpornost R60

Podatki, ki jih potrebujemo, da odčitamo potrebno debelino premaza iz tabele (preglednica 5) za doseganje požarne odpornosti R60 so:

$$A_p/V = 1015 / 6530 = 155,4 \text{ m}^{-1}$$

$$T_{cr} = 583 \text{ }^\circ\text{C}$$

Preglednica 5 Debelina premaza za odprte profile požarne odpornosti R60 (ETA 13/0198)

R60	Debelina premaza [ $\mu\text{m}$ ]								
	Kritična temperatura [ $^\circ\text{C}$ ]								
$A_p/V[\text{m}^{-1}]$	350	400	450	500	550	600	650	700	750
75	1.076	853	662	450	363	289	231	186	186
80	1.172	917	705	480	387	308	246	193	193
85	1.268	981	748	510	411	327	261	204	204
90	1.364	1.044	807	545	435	346	275	215	215
95	1.460	1.095	866	589	459	365	290	226	226
100	1.556	1.122	924	634	484	384	305	236	236
105	1.842	1.149	983	678	508	403	320	247	247
110	2.099	1.176	1.0	723	532	422	335	258	258
115	2.256	1.203	1.0	776	591	442	350	269	269
120	2.414	1.230	1.1	843	650	461	365	279	279
125		1.257	1.1	909	708	480	380	290	290
130		1.284	1.1	976	763	499	395	301	301
135		1.311	1.1	1.043	812	518	410	312	312
140		1.338	1.1	1.094	861	545	425	322	322
145		1.365	1.2	1.117	910	589	440	333	333
150		1.392	1.2	1.141	959	633	454	344	344
155		1.419	1.2	1.164	1.008	677	469	355	355
160		1.446	1.2	1.187	1.057	720	484	365	365
165		1.473	1.3	1.211	1.097	764	499	376	376

Potrebna minimalna debelina intumescentnega premaza za požarno zaščito stebra HEB 180 in doseganje požarne odpornosti R60 je  $d_p = 790 \mu\text{m}$ .

### 5.3.4 Primerjava rezultatov

V matriki rezultatov želimo prikazati vse dobljene rezultate projektiranja požarne zaščite obravnavanega stebra HEB 180 in izbrati najbolj ustrezen sistem zaščite. Pri odločitvi izbire najbolj ustreznega sistema zaščite se bomo poslužili še matrike za izbiro sistema požarne zaščite, ki je prikazana v preglednici 2. Predpostavili bomo, da je naš steber del nosilne konstrukcije neke stanovanjske stavbe zato bomo pri izbiri ustreznega sistema zaščite poleg vseh ostalih parametrov posvetili pozornost še na estetiko. Poleg

vseh parametrov na izbiro sistem vpliva še cena, ki pa je nismo obravnavali v tej diplomski nalogi zato ker se cene teh izdelkov na trgu hitro spreminjajo.

Preglednica 6 Pregled rezultatov projektiranja požarne zaščite

<b>HEB 180</b> $T_{cr} = 583 \text{ }^{\circ}\text{C}$		
<b>Sistem zaščite</b>	<b>R30</b>	<b>R60</b>
<b>Brez zaščitnih oblog</b>	Kritična temperatura je dosežena že po 16 minutah <b>POŽARNA ODPORNOST NI ZAGOTOVLJENA</b>	Kritična temperatura je dosežena že po 16 minutah <b>POŽARNA ODPORNOST NI ZAGOTOVLJENA</b>
<b>Požarne plošče Pormatect 200</b>	Uporabljena je minimalna debelina plošč $d_p = 12 \text{ mm}$ $T_{30\text{min}} = 386 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Potrebna debelina plošč je $d_p = 15 \text{ mm}$ $T_{60\text{min}} = 555 \text{ }^{\circ}\text{C}$
<b>Požarni omet Promaspray-P300</b>	Uporabljena je minimalna debelina ometa $d_p = 8 \text{ mm}$ $T_{30\text{min}} = 356 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Potrebna debelina ometa je $d_p = 9 \text{ mm}$ $T_{60\text{min}} = 546 \text{ }^{\circ}\text{C}$
<b>Intumescentni premaz Promapaint – SC4</b>	Potrebna debelina premaza je $d_p = 190 \text{ } \mu\text{m}$	Potrebna debelina premaza je $d_p = 790 \text{ } \mu\text{m}$

V primeru zahtevane požarne odpornosti R30 je najbolj primeren način zaščite z intumescentnim premazom. Prednosti tega sistema zaščite so hitrost montaže oziroma nanosa premaza, majhna dodatna obremenitev elementa, estetika in pa mehanska odpornost.

V primeru zahtevane požarne odpornosti R60 pa je najbolj primeren način zaščite s požarnimi ploščami. Prednosti tega sistema zaščite so hitrost montaže, estetika, mehanska odpornost, suha vgradnja in pa odpornost na nizke temperature in vlago. Intumescentni premaz ni primeren predvsem zaradi svoje nezanesljivosti pri višjih razredih požarne odpornosti oziroma zaradi tega ker lahko produkti gorenja ali pa vodni curek, v primeru gašenja požara, povzročijo odpadanje ekspandiranega premaza z elementa. Požarni omet pa ni primeren predvsem zaradi estetskih razlogov.

## 6 Evrokod standardi in določanje požarne odpornosti stavb

Požarna odpornost konstrukcij je obravnavana v delih 1.2 evrokodov 1991 do 1996:

- EN 1991-1-2 Vpliv požara na konstrukcije
- EN 1992-1-2 Požarnoodporno projektiranje betonskih konstrukcij
- EN 1993-1-2 Požarnoodporno projektiranje jeklenih konstrukcij
- EN 1994-1-2 Požarnoodporno projektiranje sovprežnih konstrukcij
- EN 1995-1-2 Požarnoodporno projektiranje lesenih konstrukcij
- EN 1996-1-2 Požarnoodporno projektiranje zidanih konstrukcij

V teh standardih so podane različne metode, ki se razlikujejo glede načinov upoštevanja vplivov toplote in glede natančnosti izračuna mehanskega odziva konstrukcije ali konstrukcijskega elementa na požar. Glede načina upoštevanja toplotnih vplivov ločimo naslednja dva možna pristopa:

- upoštevanje nominalnih (standardnih) požarov, ali
- upoštevanje naravnih požarov, ki natančneje opišejo razvoj temperature po prostoru.

V inženirski praksi se večinoma uporabljajo nominalne krivulje, ki so zaradi svoje enostavnosti hitro uporabne. Medtem, ko za upoštevanje naravnih požarov potrebujemo ustrezna računska orodja, ki pa so zelo kompleksna in zahtevajo od uporabnika veliko znanja in časa. Glede določitve mehanskega odziva konstrukcije pa imamo na voljo tri pristope:

- izračun nosilnosti prereza ali elementa s pomočjo priročne tabele,
- poenostavljen izračun nosilnosti konstrukcije oziroma konstrukcijskih elementov in
- napredne metode obnašanja konstrukcij med požarom

Najbolj natančne so napredne metode, vendar podobno kot pri določitvi razvoja naravnega požara tudi tu potrebujemo ustrezna programska orodja, ki pa jih je malo oz. so v razvojnih fazah in se večinoma uporabljajo za različne natančnejše študije na univerzah. Standardi evrokodi v delih 1.2, med njimi tudi standard SIST EN 1993-1-2, podajajo poenostavljene računske metode za določanje požarne odpornosti nosilnih elementov. Te metode so večinoma uporabne in verificirane za račun standardne požarne odpornosti. Kar pomeni, da v primeru kadar želimo preveriti nosilnost konstrukcije na naravni požar potrebujemo napredna računska orodja za račun nosilnosti konstrukcij [25].

## 7 Zaključek

Požarna zaščita jeklenih konstrukcij je ključnega pomena pri zagotavljanju mehanske stabilnosti konstrukcije v požaru. Z zaščitnimi oblogami v primeru požara lahko zagotovimo mehansko stabilnost konstrukcije celo do 360 minut v primeru standardnega ISO 834 požara, kar je več kot dovolj za varno evakuacijo ljudi in ustrezno intervencijo gasilcev. Zahteve po požarni odpornosti so podrobneje opisane v tehnični smernici TSG–1–001:2010, kjer je glede na namembnost in velikost objekta predpisana zahtevana požarna odpornost objekta.

Izdelki za zaščito jeklenih konstrukcij, ki jih danes lahko najdemo na trgu so zelo različni in skladno s tem se uporabljajo za različne namene. Poleg izdelkov za zaščito jeklenih elementov konstrukcije najdemo še izdelke za zaščito raznih inštalacijskih odprtin kot so odprtine za cevi, kable itd. Edina slabost teh izdelkov je visoka tržna cena zato je še bolj pomembno, da natančno izračunamo potrebno debelino zaščitne obloge in da se odločimo za pravilen sistem zaščite, ki zagotavlja predpisano požarno odpornost R. Glavni faktorji, ki vplivajo na izbiro sistema zaščite so: zahtevana požarna odpornost, namembnost objekta, okoljski pogoji (mehanska odpornost obloge), notranja ali zunanja uporaba. Na osnovi teh faktorjev lahko opredelimo sisteme požarne zaščite glede uporabnosti. Intumescentni premazi so uporabni za zaščito jeklenih konstrukcij z majhno požarno obtežbo in za zagotavljanje požarne odpornosti do R30 redko R60. Uporabljajo se predvsem zaradi hitrosti nanosa premaza in zaradi tega ker omogočajo vidno konstrukcijo. Sistem zaščite s požarnimi ploščami je uporaben tudi v primerih, ko imamo opravka s konstrukcijami z veliko požarno obtežbo in zahtevano visoko požarno odpornostjo. Plošče so primerne tudi za zunanjo uporabo saj so zelo robustne, odporne na nizke temperature in vlago, hkrati pa zagotovijo estetiko in eleganten izgled konstrukcije. Slabost požarnih plošč je njihova lastna teža, ki dodatno obremenjuje nosilno konstrukcijo. Požarni ometi pa se uporabljajo v primerih ko je zahtevana visoka požarna odpornost, izgled konstrukcije pa ni toliko pomemben (npr. rafinerije, skladišča...).

Pri izbiri izdelkov moramo biti pozorni tudi na to, da izberemo certificiran izdelek. Vsi ti izdelki morajo biti označeni s CE znakom in morajo imeti izjavo o lastnostih proizvoda.

## 8 Viri

- [1] Hozjan, T. 2015. Požarna obtežba in razvoj požara v požarnem sektorju. Predavanja pri predmetu Požarna odpornost konstrukcij. <http://www.km.fgg.uni-lj.si/predmeti/POK/POK.html> (Pridobljeno 28.02.2016.)
- [2] Hozjan, T. 2015. Določitev požarne odpornosti konstrukcijskih elementov. Predavanja pri predmetu Požarna odpornost konstrukcij. <http://www.km.fgg.uni-lj.si/predmeti/POK/POK.html> (Pridobljeno 28. 02. 2016.)
- [3] Hozjan, T. 2015. Požarna odpornost jeklenih konstrukcij – določitev mehanske odpornosti. Predavanja pri predmetu Požarna odpornost konstrukcij. <http://www.km.fgg.uni-lj.si/predmeti/POK/POK.html> (Pridobljeno 28. 02. 2016.)
- [4] Krušec, I. 2001. Osnove varstva pred požarom, Tiskarna Ljubljana d.d., Ljubljana.
- [5] Slovenski dnevi jeklenih konstrukcij (1; 1994; Ljubljana). Projektiranje, gradnja in vzdrževanje jeklenih konstrukcij: zbornik / 1. slovenski dnevi jeklenih konstrukcij, Ljubljana 31. marec – 1. april 1994; urednik Miroslav Pregl. – Ljubljana: Inštitut za metalne konstrukcije: Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, 1994: str. 48-60
- [6] Gradivo (delno) za pripravo na strokovni izpit iz varstva pred požarom. [http://www.sos112.si/slo/tdocs/pozar\\_gradivo.pdf](http://www.sos112.si/slo/tdocs/pozar_gradivo.pdf) ( Pridobljeno 01. 03. 2016.)
- [7] European organisation for Technical Assessment. <http://www.eota.eu/en-GB/content/archive-of-etags-used-as-ead/26/> (Pridobljeno 10. 03. 2016.)
- [8] Hajdukovič M., 2013, Požarno zaščitni premaziza povečanje požarne odpornosti jeklenih konstrukcij. Osebna komunikacija. (15.03.2016)
- [9] Pasivna požarna zaščita. <http://www.timopara.si/dejavnosti/pasivna-pozarna-zascita/materiali> (Pridobljeno 15. 03. 2016.)
- [10] Proizvodi za požarno zaščito Promat. <http://www.promat-see.com/sl-si/proizvodi> (Pridobljeno 20. 03. 2016)
- [11] Toplotna, zvočna in protipožarna zaščita v energetiki in industriji. <http://www.knaufinsulation.si/sites/si.knaufinsulation.net/files/KI-PROSPEKT-tehnicne-izolacije-2015.pdf> (Pridobljeno 20. 03. 2016.)
- [12] Knauf FIREBOARD <http://www.mgt.si/sl/content/knauf-fireboard> (Pridobljeno 20. 03. 2016)
- [13] Tehnična smernica TSG–1–001:2010. <http://www.szpv.si/assets/attachments/18/TSG-2010.pdf?1350217754> (Pridobljeno 20. 03. 2016.)
- [14] Pravilnik o požarni klasifikaciji gradbenih proizvodov. [https://www.uradni-list.si/files/RS\\_-2003-077-03684-OB~P004-0000.PDF#!/pdf](https://www.uradni-list.si/files/RS_-2003-077-03684-OB~P004-0000.PDF#!/pdf) (Pridobljeno 01. 03. 2016.)
- [15] <http://www.vetisa.si/perlit> (Pridobljeno 02. 04. 2016.)
- [16] Ragolič, S. 2012. Protikorozijska in protipožarna zaščita jeklenih konstrukcij. Diplomska naloga. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo (samozaložba S. Ragolič).
- [17] <http://knauf.voipex.si/tehnici-listi/knauf-plosce/slike/K751%20slo%20WEB.pdf> (Pridobljeno 20. 03. 2016.)
- [18] <http://www.promat.at/de-de/products/systemglas-30> (Pridobljeno 05. 04. 2016.)
- [19] <http://www.promat.at/de-de/products/promastop-fc> (Pridobljeno 10. 04. 2016.)
- [20] [https://www.hilti.si/#/stage2/cls\\_firestop\\_and\\_fireprotections\\_systems\\_foldout/](https://www.hilti.si/#/stage2/cls_firestop_and_fireprotections_systems_foldout/) (Pridobljeno 10. 04. 2016.)
- [21] Gomboši J.2015. Požarna odpornost konstrukcijskih elementov iz nerjavečega jekla. Diplomska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba J. Gomboši)
- [22] Legen, M. 2013. Požarna odpornost jeklene poslovne stavbe. Diplomska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Legen)
- [23] SIST EN 1993-1-2: 2005. Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij - 1-3. del: Splošna pravila – Požarnoodporno projektiranje

- [24] Klemenčič S. 2014. Izbira primerne sistema požarne zaščite jeklene konstrukcije. *Gradbenik*, 12: str. 28–32.
- [25] Zbornik mednarodnega seminarja (23. -27. oktober 2006, Ljubljana). Teden požarne varnosti konstrukcij: zbornik mednarodnega seminarja; urednik: Črtomir Remec. – Ljubljana: Inženirska zbornica Slovenije – IZS, 2006: str. 9-21.
- [26] Fire Resistance of Steel Structures, by ArcelorMittal LCS Research Centre  
[http://www.constructalia.com/english/publications/fire/fire\\_resistance\\_of\\_steel\\_structures\\_by\\_arcelormittal\\_lcs\\_research\\_centre#.V3ZplriLTIU](http://www.constructalia.com/english/publications/fire/fire_resistance_of_steel_structures_by_arcelormittal_lcs_research_centre#.V3ZplriLTIU) (Pridobljeno 01. 07. 2016)
- [27] EN 13381-8:2010 Preskusne metode za ugotavljanje prispevka k požarni odpornosti konstrukcijskih elementov – 8. del: Zaščita jeklenih elementov (Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members – part 8: Applied reactive protection to steel members)
- [28] Albuquerque. J. (ur.) 2015. Fire guideline - design and examples. CMM: 83 str.
- [29] Evropsko tehnično soglasje (ocena) ETA 13/0198.  
[https://www.google.si/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjco4mQxcbOAhVBnxQKHclFDLEQFgg6MAQ&url=http%3A%2F%2Ffirestop.pl%2Fproduct%2Fattachment%2F1043%2Fb70a18e164223552a902cee2f53e8bb5&usg=AFQjCNEi4sv2GCksIE28rojXWMr4XHoMhA&sig2=Guui6pg0aHi3\\_9KxKSAo2A](https://www.google.si/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjco4mQxcbOAhVBnxQKHclFDLEQFgg6MAQ&url=http%3A%2F%2Ffirestop.pl%2Fproduct%2Fattachment%2F1043%2Fb70a18e164223552a902cee2f53e8bb5&usg=AFQjCNEi4sv2GCksIE28rojXWMr4XHoMhA&sig2=Guui6pg0aHi3_9KxKSAo2A) (Pridobljeno 24. 06. 2016)