

Vodorazrjedivi protupožarni premazi

Šincek, Zlatko

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:824347>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Zlatko Šincek

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Ivan Stojanović, dipl. ing.

Student:

Zlatko Šincek

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem mentoru doc.dr.sc. Ivanu Stojanoviću na strpljenju, savjetima i pomoći pri izradi ovog završnog rada.

Veliko hvala mojim roditeljima i obitelji te djevojci i prijateljima koji su uvijek vjerovali u mene i koji su mi uvijek bili podrška tijekom studiranja.

Zlatko Šincek



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	602-04/21-6/1
Ur. broj:	15-1703-21

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **ZLATKO ŠINCEK** Mat. br.: 0035209357

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Vodorazrjedivi protupožarni premazi**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Fire retardant water based coatings**

Opis zadatka:

Konstruktivski čelik je u modernom graditeljstvu vrlo zastupljen materijal zbog svojih dobrih mehaničkih svojstava i ekonomičnosti, ali pri izlaganju visokim temperaturama drastično gubi čvrstoću i nosivost što može dovesti do urušavanja građevina prilikom požara. Primjena protupožarnih sustava zaštite nudi očuvanje svojstva materijala te omogućava stabilnost konstrukcija izloženih požaru i povišenim temperaturama.

U radu je potrebno opisati ekspandirajuće protupožarne premaze, njihove značajke i mehanizam zaštite. Obraditi način projektiranja protupožarne zaštite premazima. Prikazati primjere primjene protupožarnih premaza na čeličnim konstrukcijama.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je nanijeti protupožarni premaz na uzorke od nelegiranog čelika, ispitati protupožarna svojstva i otpornost pri izlaganju različitim vremenskim uvjetima.

U radu navesti korištenu literaturu te eventualnu dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
30. rujna 2021.

Rok predaje rada:
2. prosinca 2021.

Predvideni datum obrane:
13. prosinca do 17. prosinca 2021.

Zadatak zadao:
prof. dr. sc. Ivan Stojanović

Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. UZROCI I RIZIK OD NASTANKA POŽARA.....	2
2.1. Nedostatak protupožarne zaštite	3
3. PROTUPOŽARNA ZAŠTITA.....	6
3.1. Zahtjevi za zaštitu građevina od požara	6
3.2. Čelik.....	7
3.2.1. Vrste čelika.....	7
3.2.2. Nelegirani čelik.....	9
3.3. Tehnike zaštite od požara	10
4. PREMAZI.....	11
4.1. Osnovne komponente premaza.....	12
4.2. Vrste premaza	13
4.2.1. Podjela premaza prema vrsti veziva.....	13
4.2.1.1. Sušiva ulja.....	13
4.2.1.2. Alkidne smole	13
4.2.1.3. Poliesterske smole	14
4.2.1.4. Akrilne smole.....	14
4.2.1.5. Amino veziva	14
4.2.1.6. Epoksidne smole	14
4.2.1.7. Uretanske smole	15
4.2.2. Podjela prema vrsti otpala	15
4.2.2.1. Premazi na bazi organskog otapala	15
4.2.2.2. Vodorazrjedivi premazi	16
4.3. Primjena premaza u protupožarnoj zaštiti	17
4.3.1. Pasivna protupožarna zaštita	17
4.3.1.1. Protupožarni premazi	19
4.3.1.2. Vatrootporni premazi	20
4.3.1.2.1. Ekspandirajući (intumescent) protupožarni premazi.....	20
4.3.1.3. Karakteristike ekspandirajućeg (intumescent) premaza	21
4.3.1.4. Princip djelovanja ekspandirajućeg premaza.....	23
4.3.1.5. Prednosti i nedostaci ekspandirajućeg premaza.....	23
4.3.1.6. Projektiranje protupožarne zaštite ekspandirajućim premazom	24
5. PRIMJERI DOBRE PRAKSE.....	31
6. EKSPERIMENTALNI DIO	32
6.1. Premazivanje uzoraka vodorazrjedivim ekspandirajućim premazom	35
6.2. Premazivanje uzoraka poliuretanskim završnim premazom	39
6.3. Ispitivanje u vlažnoj komori.....	40
6.4. Ispitivanje u slanoj komori	41
6.5. Ispitivanje prionjivosti premaza	42
6.6. Ispitivanje protupožarnih svojstva premaza	46
6.7. Analiza eksperimentalnog rada	61
7. ZAKLJUČAK.....	63
LITERATURA.....	65

POPIS SLIKA

Slika 1. Trokut izgaranja [1]	2
Slika 2. Prikaz posljedica požara na građevinsku strukturu, (a) sjeverna strana; (b) južna [2] ..	3
Slika 3. Svjetski trgovački centar zahvaćen plamenom [4]	4
Slika 4. Požar u studentskom domu [5]	5
Slika 5. Podjela ferolegura [7]	8
Slika 6. Osnovne komponentne premaza.....	12
Slika 7. Shematski prikaz pasivne protupožarne zaštite [18].....	17
Slika 8. Protupožarna zaštita oplatom [18].....	18
Slika 9. Protupožarna zaštita cementnim sustavom [19].....	18
Slika 10. Čelična struktura zaštićena protupožarnim premazom [20].....	19
Slika 11. Shematski prikaz djelovanja ekspanirajućeg premaza [23]	21
Slika 12. Ekspanirajući premaz prije i nakon ekspanzije [18]	22
Slika 13. Shematski prikaz protupožarnog sustava premaza [18].....	22
Slika 14. Tablično prikazan parametar U za različite čelične profile [25]	27
Slika 15. Usporedba čimbenika nosača [25].....	27
Slika 16. Ovisnost temperature i vremena požara za dvije vrste požara [18].....	28
Slika 17. Razlika u zagrijavanju nezaštićenog čelika i čelika zaštićenog protupožarnim premazom [28]	29
Slika 18. Promatov primjer problema [25]	30
Slika 19. Rješenje primjera sa slike 18 [25]	30
Slika 20. Protupožarna zaštita građevina; (a) Zračna luka Franjo Tuđman; (b) knjižnica Filozofskog fakulteta u Zagrebu; (c) Žičara Sljeme [19]	31
Slika 21. Uzorci s nanesenim epoksi temeljnim premazom i izmjerene početne vrijednosti prionjivosti	33
Slika 22. Uređaj za mjerenje debljine premaza „Elcometer 456“	34
Slika 23. Prikaz tehnike mjerenja debljine premaza	34
Slika 24. Razrjeđivanje i miješanje PROMAPAIN-T-SC 4 vodorazrjeđivog premaza prije aplikacije.....	35
Slika 25. Brušenje ispitnih uzoraka prije nanosa prvog sloja ekspanirajućeg premaza	36
Slika 26. Nanošenje prvog sloja ekspanirajućeg premaza pomoću spiralnog aplikatora	36
Slika 27. Uzorci s nanesenim prvim slojem ekspanirajućeg premaza.....	37
Slika 28. Tehnika nanošenja premaza kistom.....	37
Slika 29. Prikaz svih deset ispitnih uzorka nakon nanosenog drugog sloja premaza.....	38
Slika 30. Nanošenje poliuretanskog završnog premaza pomoću aplikatora.....	39
Slika 31. Uzorci premazani poliuretanskim premazom.....	39
Slika 32. Uzorci 4 i 6 u vlažnoj komori.....	40
Slika 33. Uzorci 4 i 6 nakon izloženosti vlažnim uvjetima 96 sati	40
Slika 34. Slana komora u kojoj su se nalazili uzorci 5 i 8.	41
Slika 35. Uzorci 5 i 8 nakon izloženosti u slanoj komori 96 sati	41
Slika 36. Ispitivanje prionjivosti na ispitnim uzorcima	42
Slika 37. Strugač za pripremu uzorka prije ispitivanje prionjivosti	42
Slika 38. Tehnika i uređaj za ispitivanje prionjivosti pomoću „Pull off“ metode	43
Slika 39. Ispitni uzorci 2 i 9 nakon provedenog ispitivanja prionjivosti „Pull off“ metodom .	43
Slika 40. Ispitni uzorci 4 i 6 nakon provedenog ispitivanja prionjivosti „Pull off“ metodom .	44
Slika 41. Ispitni uzorci 5 i 8 nakon provedenog ispitivanja prionjivosti „Pull off“ metodom .	45
Slika 42. Provođenje eksperimenta paljenja uzoraka	46

Slika 43. Mjerenje temperature stražnje strane ispitnog uzorka tijekom provođenja eksperimenta	47
Slika 44. Prikaz uzoraka nakon provedenog eksperimenta	52
Slika 45. Graf s izmjerenim temperaturama nakon prvog eksperimenta.....	53
Slika 46. Graf s temperaturama nakon prvog i drugog eksperimenta	57
Slika 47. Graf s temperaturama nakon cijelog eksperimenta.....	60
Slika 48. Grafički prikaz izmjerenih debljina premaza prije i nakon paljenja.....	61

POPIS TABLICA

Tablica 1. I i H profil s različitim čimbenikom oblika [16]	25
Tablica 2. Osnovni opis svih ispitnih uzoraka	33
Tablica 3. Debljine temeljenog premaza na uzorcima za ispitivanje	35
Tablica 4. Debljine premaza nakon osušenog drugog sloja ekspandirajućeg sloja premaza na uzorcima za ispitivanje	38
Tablica 5. Prikaz uzorka broj 1 nakon eksperimenta sa osnovnim informacijama	48
Tablica 6. Prikaz uzorka broj 2 nakon eksperimenta sa osnovnim informacijama	49
Tablica 7. Prikaz uzorka broj 7 nakon eksperimenta sa osnovnim informacijama	50
Tablica 8. Prikaz uzorka broj 9 nakon eksperimenta sa osnovnim informacijama	51
Tablica 9. Prikaz uzorka broj 10 nakon eksperimenta sa osnovnim informacijama	52
Tablica 10. Prikaz uzorka broj 3 nakon eksperimenta sa osnovnim informacijama	54
Tablica 11. Prikaz uzorka broj 4 nakon eksperimenta sa osnovnim informacijama	55
Tablica 12. Prikaz uzorka broj 6 nakon eksperimenta sa osnovnim informacijama	56
Tablica 13. Prikaz uzorka broj 5 nakon eksperimenta sa osnovnim informacijama	58
Tablica 14. Prikaz uzorka broj 8 nakon eksperimenta sa osnovnim informacijama	59

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis oznake
<i>R</i>	-	sposobnost dijela građevine da kroz određeno vrijeme ispunjava zahtijevanu nosivost
<i>E</i>	-	sposobnost dijela građevine da kroz određeno vrijeme ispunjava zahtijevanu cjelovitost
<i>I</i>	-	sposobnost dijela građevine da kroz određeno vrijeme ispunjava zahtijevanu toplinsku izolaciju
<i>Hp</i>	mm	opseg zagrijanog djela konstrukcije
<i>A</i>	mm ²	poprečni presjek

SAŽETAK

Razvojem tehnologije i povećanjem zahtjeva za sigurnošću u današnje doba graditeljstva potrebno je adekvatno zaštititi građevine od požara i vatre. U modernoj gradnji prisutni su novi materijali organskog i anorganskog podrijetla, stoga je potrebno posvetiti posebnu pažnju protupožarnoj zaštiti u cilju očuvanja materijalne imovine i ljudskih života. Primjena protupožarnih sustava zaštite nudi očuvanje svojstava materijala te omogućava stabilnost konstrukcija izloženih požaru i povišenim temperaturama. Time se dobiva dragocjeno vrijeme za evakuaciju i spašavanje ljudskih života i produžuje se kratki period za djelovanje vatrogasnih službi. Protupožarni sustavi zaštite od požara dijele se na aktivne i pasivne sustave zaštite. Za najbolje rezultate preporučuje se neka od kombinacija i aktivnih i pasivnih sustava protupožarne zaštite. U ovom radu detaljnije je proučavana pasivna zaštita od požara, posebice protupožarna zaštita čelika ekspandirajućim premazima. Opći konstrukcijski čelik najzastupljeniji je materijal u graditeljstvu zbog dobrih mehaničkih svojstava i ekonomičnosti, ali pri izloženosti visokim temperaturama drastično gubi svoja mehanička svojstva što može dovesti do urušavanja građevina prilikom požara. Cilj rada bio je ispitati svojstva vatrootpornosti ekspandirajućeg protupožarnog premaza na nelegiranom čeliku pri izloženosti različitim vremenskim uvjetima.

Ključne riječi: *nelegirani čelik, požar, protupožarna zaštita, ekspandirajući premazi*

SUMMARY

With the development of technology and the increase of safety requirements in the modern construction era, it is necessary to adequately protect buildings from fire. In modern construction, new materials of organic and inorganic origin are present, so it is necessary to pay special attention to fire protection to protect property and human life. The application of fire protection systems provides the preservation of material properties and enables the stability of structures exposed to fire and elevated temperatures. This buys valuable time for evacuation and saving lives and extends the short period of time for firefighters to respond. Fire protection systems are divided into active and passive protection systems. To achieve the best results, a combination of active and passive fire protection systems is recommended. In this paper, passive fire protection (especially fire protection of steel with intumescent coatings) is studied in detail. Steel is the most used material in construction due to its good mechanical properties and economy. However, when exposed to high temperatures, it drastically loses its desirable mechanical properties, which can lead to the collapse of buildings during a fire. The aim of this study was to investigate the fire-protective properties of the intumescent fireproof coating on mild steel when exposed to different weather conditions.

Keywords: mild steel, fire, fire protection, intumescent coatings

1. UVOD

Razvojem tehnologije i povećanjem zahtjeva za sigurnošću potrebno je adekvatno zaštititi građevine od požara i vatre. U modernoj gradnji sve su više prisutni pametni građevinski objekti (privatni i poslovni) koji imaju povećan broj zapaljivih komponenti u odnosu na konvencionalnu gradnju, stoga je potrebno posvetiti posebnu pažnju zaštiti od posljedica izgaranja u cilju zaštite materijalne imovine i ljudskih života.

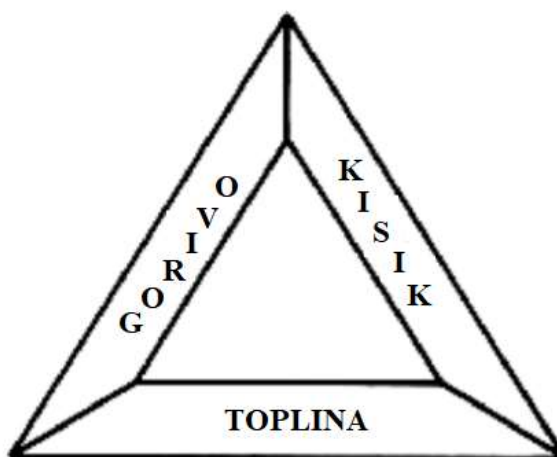
Primjena protupožarnih sustava zaštite nudi očuvanje svojstava materijala te omogućava stabilnost konstrukcija izloženih požaru i povišenim temperaturama, čime se dobiva dragocjeno vrijeme za evakuaciju i spašavanje ljudskih života. Također, produžuje se kratki period u kojem je od iznimne važnosti da vatrogasne službe pristupe gašenju požara.

Protupožarni sustavi zaštite dijele se u dvije osnovne skupine, a to su aktivna zaštita od požara i pasivna zaštita od požara. Aktivna zaštita od požara podrazumijeva određeni oblik akcije kao što je primjerice upotreba detektora dima ili vatre koji aktiviraju sustave prskalice koji su napunjeni sredstvom za gašenje vatre. Uz to, aktivni sustavi zaštite zahtijevaju određenu vrstu redovitog održavanja kako ne bi došlo do neaktivacije sustava u slučaju potrebe. Kako bi razina zaštite bila što veća često se kombiniraju aktivna i pasivna zaštita od požara. Pasivni sustavi zaštite od požara podrazumijevaju upotrebu vatrootpornih materijala pri samoj gradnji i uklapaju se već u idejni projekt građevine. Pasivna zaštita temelji se na upotrebi materijala koji sadrže protupožarna svojstva, a dijeli se na: strukturnu požarnu zaštitu i vatrootporna vrata te vatrootporne barijere. Strukturna protupožarna zaštita se zatim dijeli na: oplatne oblike zaštite, cementne protupožarne sustave i protupožarne premaze. Metoda protupožarne zaštite premazima ima brojne prednosti u odnosu na ostale metode protupožarnih zaštita. Prvenstveno su to jednostavnost nanošenja i poželjna svojstva i djelotvornost u zaštiti čelika, a to su razlozi zbog kojih se zaštitni premazi sve češće koriste. Zbog nekoliko nedostataka koji se odnose na nanošenje premaza potrebno je dobro proučiti načine na koje se vatrootporni premazi mogu unaprijediti kako bi dosegli svoj maksimum.

U ovom radu dan je pregled metoda protupožarne zaštite za unapređenje sigurnosti građevinskih objekata, a posebno je proučena upotreba modernih ekspandirajućih (intumescentnih) premaza u cilju produženja životnog vijeka građevinskih struktura i poboljšanja njihove rezistencije na oštećenja uzrokovana vatrom.

2. UZROCI I RIZIK OD NASTANKA POŽARA

Požari svake godine generiraju mnogo gubitaka koji mogu biti materijalne prirode ili, u najgorim slučajevima, uzrokuju gubitak ljudskih života. Postoji mnogo različitih načina kako može doći do požara, no najčešće se radi o prirodnoj nepogodi poput udara munje ili o ljudskoj pogrešci poput neopreznog odlaganja cigareta ili šibica te neopreznog baratanja zapaljivim tekućinama. Nerijetko su uzroci požara neočekivani kvarovi na električnim ili mehaničkim komponentama građevine, kao i reakcije između određenih kemikalija. Požar nastaje kada se ostvari prisutnost triju glavnih elemenata svakog požara, a to su gorivo, kisik i toplina. Oni tvore, kolokvijalno nazvano, trokut izgaranja. Trokut izgaranja prikazan je na Slici 1. [1].



Slika 1. Trokut izgaranja [1]

Nedostatkom bilo kojeg od ovih triju elemenata vatra neće moći opstati te će se ugasi. Smanjenjem opskrbe kisikom brzina izgaranja bit će niska, a samo će izgaranje biti nepotpuno. Gorivo i toplina neophodni su za održavanje plamena, a smanjenjem količine goriva ili količine topline požar (vatra) će se ugasi [1].

U cilju sprječavanja gubitaka uzrokovanih požarom, tijekom povijesti u najvećoj su se mjeri koristile metode koje se baziraju na uklanjanju nekog od elemenata iz trokuta izgaranja kada je požar već nastao. Napretkom tehnologije shvatilo se da je prilikom izgradnje potrebno uzeti u obzir rizike nastanka požara te slijediti zahtjeve za izgradnjom u skladu s propisima što podrazumijeva korištenje materijala koji će usporiti napredovanje požara [1].

2.1. Nedostatak protupožarne zaštite

Primjena neadekvatnih sustava protupožarne zaštite može dovesti do katastrofalnih ishoda, odnosno do prijevremenog urušavanja strukture građevina. Primjer je takve katastrofe događaj u Kini 2003. godine kada je u gradu Hengyangu zbog posljedica požara došlo do urušavanja zgrade izgrađene od armiranog betona. Preliminarna istraživanja pokazala su da je polovica nosive konstrukcije u prizemlju zgrade bila izložena temperaturama iznad 800 °C što je dovelo do gubitka mehaničkih svojstava građevine i do njezina urušavanja. Na Slici 2. vidljivi su utjecaji požara na zgradu koja nije bila adekvatno zaštićena od požara [2].



(a) Sjeverno pročelje



(b) Južno pročelje

Slika 2. Prikaz posljedica požara na građevinsku strukturu, (a) sjeverna strana; (b) južna [2]

Jedan je od najpoznatijih primjera urušavanja zgrade zbog posljedica požara primjer iz Sjedinjenih Američkih Država iz 2001. godine kada je došlo do terorističkog napada na Svjetski trgovački centar (engl. *World Trade Center*, WTC) gdje je život izgubilo mnoštvo ljudi. Nakon udara zrakoplova u toranj, toranj je gorio jedan sat, a padajuće su krhotine s tornjeva, u kombinaciji s požarima koje su krhotine pokrenule u nekoliko okolnih građevina, dovele do djelomičnog ili potpunog urušavanja svih ostalih građevina u kompleksu te su prouzročile katastrofalnu štetu na deset ostalih velikih građevina u blizini [3].

Tri su se građevine u kompleksu Svjetskog trgovačkog centra urušile zbog štete koju je požar prouzročio. Čimbenici koji su doprinijeli katastrofi povezani su s vatrogasnim okolišem, količinom ventilacije, oštećenjem konstrukcije i sa stanjem vatrootporne zaštite u Centru. Urušavanje Svjetskog trgovačkog centra ekstremni je slučaj, ali taj nemili događaj doprinio je boljem razumijevanju složenih kvarova izazvanih vatrom i mehanizama kolapsa visokih zgrada, a takva istraživanja smanjuju rizike od katastrofe s kojima se svijet još uvijek suočava neovisno o uzroku [3].

Na Slici 3. dan je prikaz Svjetskog trgovačkog centra zahvaćenog plamenom.



Slika 3. Svjetski trgovački centar zahvaćen plamenom [4]

U Hrvatskoj je 2017. požar zahvatio krov zgrade studentskog doma te se vertikalno proširio po pročelju spojene zgrade na sljedeća tri kata. Točan uzrok požara nije poznat, no poznato je da je brzom širenju plamena i dima po pročelju pogodovala izrada toplinske izolacije sustava pročelja od gorivog materijala [5].

Na Slici 4. prikazana je slika požara koji je zahvatio studentski dom u Zagrebu te posljedice na zgradu koje je požar uzrokovao.



Slika 4. Požar u studentskom domu [5]

Prema Pravilniku o otpornosti na požar i drugim zahtjevima koje građevine moraju zadovoljiti u slučaju požara (NN 87/15) iz 2015. godine, zgrade moraju imati toplinsku izolaciju usklađenu sa zahtjevima citiranog Pravilnika. Ako se koriste gorive toplinske izolacije (Pravilnik to dopušta), moraju se izvoditi pojasevi od negorivog materijala kojima se sprječava brzo širenje požara po pročelju [5].

3. PROTUPOŽARNA ZAŠTITA

S obzirom na razvoj tehnologije i povećane standarde sigurnosti, u današnje doba gradnje javlja se i veća potreba za zaštitom građevina od požara.

3.1. Zahtjevi za zaštitu građevina od požara

Republika Hrvatska ima propisan pravilnik o otpornosti na požar i drugim zahtjevima koje građevina mora zadovoljiti u slučaju požara u svrhu sprječavanja širenja vatre i dima unutar građevine, sprječavanja širenja požara na susjedne građevine i omogućavanja osobama da neozlijeđene napuste građevinu. Kod projektiranja građevina mogu se primijeniti proračunske metode i/ili modeli koji se temelje na provjerenim tehničkim rješenjima i/ili novijim dostignućima na tom području. Potrebno je da zadovoljavaju kriterije koji se odnose na [6]:

- *Otpornost na požar* – sposobnost dijela građevine da kroz određeno vrijeme ispunjava zahtijevanu nosivost (R) i/ili cjelovitost (E) i/ili toplinsku izolaciju (I) i/ili drugo očekivano svojstvo u slučaju požara.
- *Požarno opterećenje* – količina toplinske energije koja se može razviti u nekom prostoru, nastaje sagorijevanjem sadržaja građevine (pokretno opterećenje) i dijelova konstrukcije i elemenata građevine (stalno opterećenje), a razlikuje se ukupno požarno opterećenje (MJ) i specifično požarno opterećenje (MJ/m²).
- *Požarni zid* – posebna vrsta pregradnih konstrukcija otpornosti na požar najmanje REI-M 90 i izveden je od negorivih građevnih proizvoda (reakcije na požar najmanje A2 po HRN EN 13501-1) koji presijeca konstrukciju građevine od temelja do krova s posebno izvedenim krovnim završetkom koji onemogućuje prijenos požara. Požarni zid mora tražena svojstva REI osigurati i u slučaju mehaničkih udara (M) zbog eventualnog padanja okolnih konstrukcija pa se minimalna otpornost na požar označava kombinacijom oznaka i vremena: REI-M 90. Požarni zid priječi prijenos vatre i dima na druge građevine i/ili požarne odjeljke u istoj građevini.

Za učinkoviti slijed zahtjeva i standarda za gradnju prema propisima potreban je interdisciplinarni pristup i suradnja različitih inženjera koji doprinose razvojjima novih materijala i metoda koje se koriste u protupožarnoj zaštiti.

3.2. Čelik

S obzirom na široku upotrebu čelika i na velik i različit broj njegovih vrsta, teško je jednoznačno definirati pojam čelika. U kemijskoj osnovi, čelik je legura koja najvećim dijelom sadrži željezo te ugljik s udjelom manjim od 2 %. Čelik može sadržavati i male količine drugih elemenata kao što su mangan, silicij, fosfor, sumpor i kisik koji mogu biti prisutni kao nečistoće ili legirni elementi [7].

S obzirom na poželjna mehanička svojstva, čelik je jedan od najvažnijih strojarskih i građevinskih konstrukcijskih materijala na svijetu. Koristi se u gotovo svim industrijama kao što su industrija automobila, građevina, proizvodnja bijele tehnike, pribora za jelo. Primjena čelika prigodna je i u medicini u proizvodnji medicinske opreme i pomagala kao što je kirurški pribor koji zahtjeva sterilno održavanje [8].

Danas je 90 % rafiniranog metala željezo, a ukupna svjetska proizvodnja u 2017. bila je 1689 milijuna tona. Čelik je najjeftiniji metal zbog široke proizvodnje. Kina je najveći proizvođač čelika na svijetu, a proizvodnja čelika u porastu je od 2010. godine [7].

3.2.1. Vrste čelika

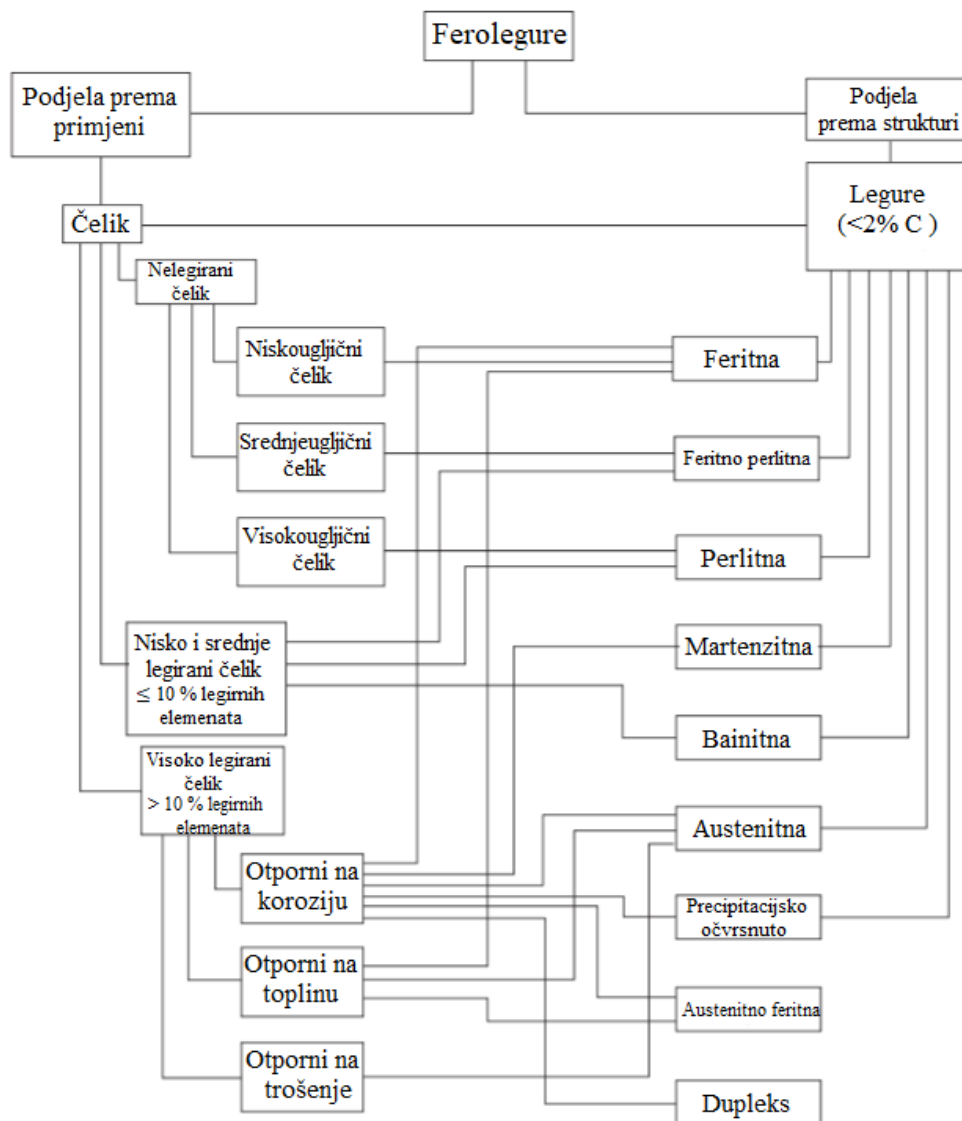
Čelik se može klasificirati u različite skupine s obzirom na sljedeće parametre [7]:

- sastav
- metode proizvodnje (otvoreno ognjište, električne peći)
- način završne obrade (vruće valjanje ili hladno valjanje)
- oblik proizvoda (šipka, lim, traka, cijevi)
- način deoksidacije
- mikrostruktura
- toplinska obrada
- deskriptori kvalitete, kvalitete kovanja i komercijalne kvalitete
- jedinstveni sustav numeriranja (UNS).

Jedna je od najčešćih klasifikacija ona prema sastavu, a čelik je prema tome klasificiran u dvije glavne skupine [7]:

- nelegirani čelik
- legirani čelik.

Klasifikacija legiranog čelika vrlo je razgranata i ovisi o legirajućim elementima i drugim čimbenicima. Slika 5. prikazuje podjelu ferolegura (legura željeza i jednog ili više drugih elemenata) prema primjeni i prema strukturi [7].



Slika 5. Podjela ferolegura [7]

3.2.2. Nelegirani čelik

Nisko ugljični nelegirani čelik najzastupljeniji je oblik nelegiranog čelika u primjeni. Koristi se za izradu karoserije automobila, konstrukcijske profile (I profile, C profile i L profile), cijevi, komponente konstrukcija ili mostova, a primjenjuje se u proizvodnji konzervi za čuvanje hrane. Udio ugljika u nisko ugljičnom nelegiranom čeliku iznosi $< 0,25$ %. Martenzitna struktura ne može se postići toplinskom obradom te se za očvršćivanje provodi metoda hladnog oblikovanja (oblikovanjem pri sobnoj temperaturi pomoću tehnologija provlačenja, savijanja te štanjanja). Svojstva nisko ugljičnog čelika niska su čvrstoća i relativna mekoća, ali taj čelik pokazuje odlična svojstva duktilnosti što ga čini odličnim materijalom za strojnu obradu i zavarivanje. Dodatna prednost nelegiranog čelika kao industrijskog materijala je visoko prihvatljiva tržišna vrijednost [9].

Srednje ugljični nelegirani čelik sadrži ugljik u udjelu od 0,25 do 0,60 % i udio mangana od 0,60 do 1,65 %. Ima odlična mehanička svojstva kao što su visoka čvrstoća i otpornost na trošenje te se zbog toga koristi za izradu tračnica, kotača vlakova, radilica, zupčanika i raznih dijelova strojeva. Mehanička svojstva postižu se pomoću toplinske obrade procesima kaljenja i popuštanja čelika kako bi se postigla martenzitna mikrostruktura [9].

Visoko ugljični nelegirani čelik je čelik s udjelom ugljika od 0,6 do 1,25 % te udjelom mangana od 0,30 do 0,90 %. Od svih vrsta nelegiranih čelika, on ima najviše vrijednosti čvrstoće i tvrdoće i najniže vrijednosti duktilnosti. Visoko ugljični nelegirani čelik izrazito je otporan na trošenje. Koristi se za izradu reznih alata, opruga, kablova visoke čvrstoće te metalnih jezgrena [9].

3.3. Tehnike zaštite od požara

Protupožarna zaštita zahtijeva pristup koji kombinira primjenu aktivnih i pasivnih metoda zaštite od požara, kao i sustava upravljanja (poput postupaka evakuacije, komunikacijskih postupaka, pregradnih zidova, sustava odvođenja dima itd.).

Aktivna zaštita od požara aktivira se samo u slučaju požara. Prema definiciji, aktivni sustavi moraju se uključiti, bilo ručno ili automatski, da bi bili učinkoviti. Najčešći oblici aktivne zaštite od požara koji se koriste u građevinama su: sustavi za gašenje požara (aparati za gašenje požara i prskalice za vodu), sustavi za otkrivanje požara (detektori dima/vatre) i ventilacijski sustavi. Aktivni oblik zaštite od požara zahtijeva redovito održavanje sustava kako ne bi zakazao (nizak tlak vode u cijevima i smrznute cijevi) [10].

Pasivna zaštita od požara podrazumijeva korištenje zaštitnih mjera koje se odnose na značajke same konstrukcije. Elementi pasivne zaštite od požara sastavni su dio konstrukcije građevine i tamo su prisutni tijekom cijelog životnog vijeka građevine, a prvenstveno služe kao prepreka za širenje požara i kao toplinska energetska barijera koja sprječava propadanje građevina. Pasivni sustavi zaštite od požara uključuju primjenu posebnih prigušivača dima i vatre te korištenje različitih barijera za zaštitu od zračenja. Tako se, npr. cementni mortovi, koji se koriste u pasivnoj zaštiti, raspršuju na površinu građevinskog elementa te sprječavaju mehaničko propadanje betonskih konstrukcija izloženih požarima iznad 300 °C. Ploče koje se koriste za pasivnu zaštitu od požara negorive su, izrađene su od endotermnih materijala poput gipsa ili kalcijevog silikata ojačanih inertnim vlaknima kako bi se izbjeglo njihovo raspadanje, no nažalost takvi materijali nisu učinkoviti za požare visoke temperature i dugotrajne požare. Cilj je zaštite od zračenja ograničiti količinu zračenja proizvedenu požarom i ne može se primijeniti na zaštitu cijelog strukturnog sustava, već samo na zaštitu određenog strukturnog elementa od lokalnog izlaganja toplinskom zračenju. Pasivna zaštita uključuje upotrebu građevinskih materijala čija se djelotvornost ispituje prema visokim standardima nekoliko svjetskih tijela kako bi se utvrdilo njihovo djelovanje [10].

4. PREMAZI

Premazi su tekućine, paste ili praškasti proizvodi koji se nanose u cilju zaštite površina ili poboljšanja estetskog izgleda površina. Premazi se nanose pomoću različitih tehnika i opreme koje omogućavaju postizanje različite debljine premaza. Sušenje premaza može se odvijati fizikalno ili kemijski. Fizikalno sušenje tekućih premaza naziva se sušenje, a kod praškastih se premaza naziva proces taljenja. Sušenje tekućih premaza je povezano s isparavanjem organskog otapala ili vode [11].

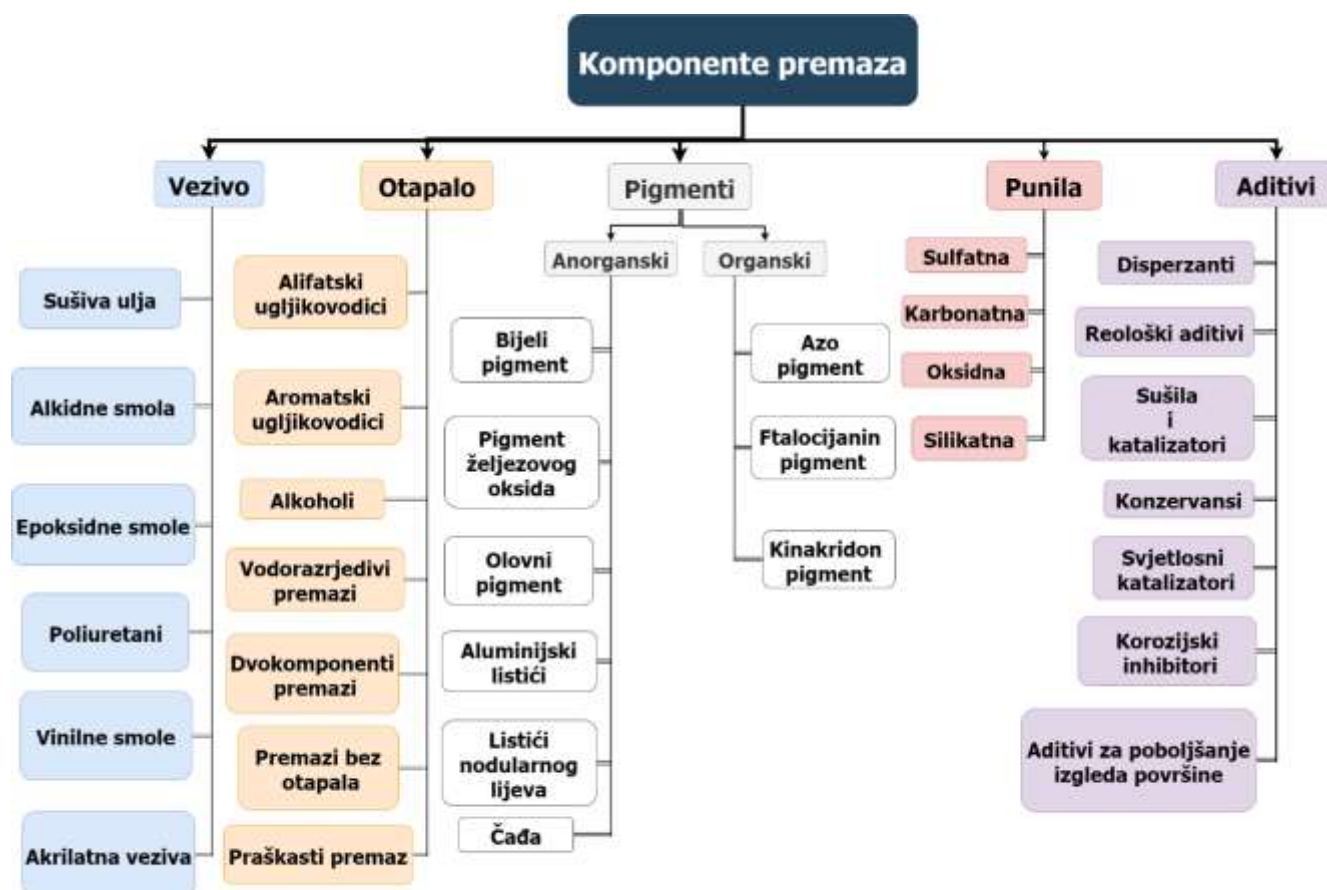
Formiranje fizičkog filma moguće je samo ako komponente premaza koje ostaju budu čvrste i neljepljive. Formiranje kemijskog filma potrebno je ako su komponente premaza tekuće, ljepljive ili imaju svojstva paste. Čvrst neljepljiv film nastaje kemijskom reakcijom između različitih komponenti premaza. Kemijska reakcija može biti pokrenuta energijom (toplina ili zračenje) nakon nanošenja premaza, ali moguće je reakcijsku komponentu unijeti i tijekom pripreme premaza (više komponentne boje). Fizikalno i kemijsko sušenje često se kombiniraju, npr. u premazima koji sadrže otapala gdje je prva faza sušenja isparavanje otapala, nakon čega slijedi kemijska reakcija polimerizacije pri povišenim temperaturama. Svojstva premaza određena su kvalitetom i kvantitetom komponenti. Prikladnim izborom komponenti određuju se viskoznost, električna vodljivost i ponašanje premaza tijekom sušenja [11].

Različite komponente premaza također određuju i svojstva premazanog filma kao što su sjaj, elastičnost, otpornost na ogrebotine, tvrdoća i adhezija s površinom, ali priprema površine također je jedan od važnih čimbenika koji utječe na kvalitetu premaza [11].

Premazi se koriste u mnoge različite svrhe kao što su zaštita od korozije i vremenskih prilika te zaštita od mehaničkih oštećenja. Česta je i primjena premaza u dekorativne funkcije jer se premazivanjem površina može postići njihov bolji izgled. Premazi mogu imati specifična svojstva kao što su vatrootpornost ili zaštita od požara [11].

4.1. Osnovne komponente premaza

Na Slici 6. prikazane su osnovne komponente premaza te su nabrojani primjeri svake od komponenti koji su u najširoj upotrebi.



Slika 6. Osnovne komponente premaza

Svi premazi sastoje se od sljedećih osnovnih komponenti [12]:

- Veziva koje je nehlapljiva kruta tvar koja u osušenom premazu veže funkcionalne komponente (pigmente, punila i druge aditive) u kompaktni sloj filma. Obično se vezivo sastoji od jednog polimera ili više njih.
- Otapala koje služi za otapanje veziva i drugih komponenti te pomaže lakšem raspršivanju svih netopljivih sastojaka.
- Pigmenata koji dodaju svojstvo boje i neprozirnosti, utječu na mehanička svojstva premaza i povećavaju svojstva zaštite od korozije.

- Punila koja se koriste zajedno s pigmentom kako bi se dobila dodatna svojstva. Bolja mehanička svojstva, bolja sposobnost nanošenja premaza i povećanje sjaja samo su neka od dodatnih svojstava premaza koja se postižu pomoću punila.
- Aditiva koji se dodaju u premaz kako bi se postigla neka dodatna svojstva premaza kao što su biocidnost za sprečavanje rasta bakterija.

4.2. Vrste premaza

S obzirom na velik broj primjera svake osnovne komponente premaza, postoji i širok spektar različitih vrsta premaza koji mogu imati različita svojstva i koji se mogu primjenjivati u različite svrhe.

4.2.1. Podjela premaza prema vrsti veziva

Premazi se mogu podijeliti na nekoliko načina, a jedan je od njih prema vrsti veziva koja se koristi u pripremi premaza.

4.2.1.1. Sušiva ulja

Sušiva ulja veziva su koja se upotrebljavaju od samih početaka korištenja premaza, ali razvojem novih tehnologija i polimera njihova se uporaba smanjila. Najčešće je korišteno vezivo laneno ulje koje se može koristiti kao vezivo u temeljnim premazima za zaštitu drva i čelika. U današnjoj tehnologiji premaza sušiva ulja imaju ulogu u modifikaciji raznih premaza [13].

4.2.1.2. Alkidne smole

Alkidne smole jedno su od najkorištenijih veziva na bazi sušivog ulja u industrijskim premazima zbog svojih svojstva i cjenovne prihvatljivosti. Mogu se modificirati različitim sušivim uljima (sojino ulje, laneno ulje, ricinusovo ulje i kokosovo ulje), ali se mogu i kombinirati s drugim različitim smolama kao što su: akrilne smole, vinilne smole, silikon i amino smole [13].

Alkidne smole mogu se proizvesti na nekoliko načina koji uključuju upotrebu [13]:

- ulja (trigliceridi) – postotak ulja određuje krajnju svrhu i mogućnost upotrebe alkidne smole te se alkidne smole dijele na kratkouljne, srednjeuljne i dugouljne
- poliola
- kiselina – postotak masnih kiselina utječe na svojstva premaza kao što su: brzina sušenja, fleksibilnost i dugotrajnost premaza.

4.2.1.3. Poliesterske smole

Poliesterske smole najčešće se koriste u premazima koji se suše pomoću topline i imaju veliki udio suhe tvari u premazu (malu količinu otapala). Poliesterske smole imaju odlična svojstva postojanosti boje i odličnu otpornost na ultraljubičasto zračenje. Poliesteri su prema svojim kemijskim svojstvima tvari s vrlo sličnom strukturom kao alkidne smole bez modifikacija uljima. Najčešća je upotreba poliesterskih smola u dvokomponentnim premazima za zaštitu plastike [13].

4.2.1.4. Akrilne smole

U akrilne smole koje se koriste kao premazi ubrajaju se polimeri i kopolimeri estera metakrilne i akrilne kiseline. U akrilne smole ubrajaju se stiren, butadien i vinilni acetat [13].

Akrilne smole imaju odlična svojstva kao što su: otpornost na različite atmosferske uvjete, otpornost na abraziju, kemijska inertnost te tvrdoća. Uz to, akrilne smole odlikuje postojanost boje [13].

4.2.1.5. Amino veziva

Amino veziva najčešće se koriste u premazima u kojima dolazi do kemijske reakcije polimerizacije pri povišenim temperaturama. Upotrebljavaju se u sustavima veziva u maksimalnom postotku od 50 % te se mogu kombinirati s alkidima, poliesterima, epoksidima i drugim smolama koje toplinski reagiraju. Najpoznatiji su primjeri ovakvih smola melamin i urea-formaldehid [13].

4.2.1.6. Epoksidne smole

Epoksidne smole vrsta su poznata po odličnoj otpornosti na koroziju i na kemikalije, ali zbog svoje tendencije gubitka boje i promjene teksture nakon izloženosti suncu ne koriste se kao završni premaz u sustavu premaza. Takvi premazi koriste se za zaštitu unutrašnjosti ili kao temeljni premaz u sustavu premaza za zaštitu vanjskih dijelova [13].

Osim toga, epoksidne smole imaju odlična svojstva adhezije, visoki stupanj otpora na abraziju te otpornost na kiseline i lužine zbog čega se koriste za zaštitu opreme kemijskih laboratorija. Zbog izolacijskih svojstava također se koriste u industriji proizvodnje električne energije [13].

4.2.1.7. Uretanske smole

Uretanske su smole polimeri koji nastaju kao produkti reakcije izocijanata sa spojevima koji sadrže hidroksilne skupine. Kombinacija poželjnih svojstava poput kemijske otpornosti, žilavosti i otpornosti na trošenje pridonijela je povećanoj upotrebi uretanskih smola u tehnologiji plastike. U proizvodnji uretanskih smola najviše se koristi toluen diizocijanat koji zahtijeva posebno rukovanje zbog toga što hlapljenjem tog izocijanata nastaju pare koje nadražuju sluznicu [13].

4.2.2. Podjela prema vrsti otapala

Otapalo je tvar koja otapa krutinu u tekuće stanje, a u premazima otapa vezivo kako bi se omogućilo postizanje određenog svojstva premaza i njegovo lakše nanošenje. S obzirom na navedeno, premazi se mogu podijeliti i prema vrsti otapala. Ta podjela premaze dijeli na one na bazi organskog otapala i na premaze na bazi vode / vodorazrjeđive premaze. Nakon nanošenja premaza na podlogu otapalo isparava i stvara se suhi sloj premaza [14].

4.2.2.1. Premazi na bazi organskog otapala

Postoji više vrsta organskih otapala [15]:

- organska otapala koja se miješaju s vodom – pri temperaturi reakcije
- organska otapala koja se ne miješaju s vodom – imaju primjetnu, ali ograničenu topljivost u vodi, a ona se povećava povećanjem temperature
- organska otapala netopiva u vodi – vrlo niska topljivost u vodi, stoga većina alifatskih i aromatskih ugljikovodika pripada ovoj kategoriji.

Organska otapala mogu se i jednostavno podijeliti u dvije skupine, a to su: ugljikovodici (alifatski spojevi i aromatski spojevi) i druga kemijska otapala (alkoholi, eteri, ketoni i esteri) [14].

4.2.2.2. *Vodorazrjedivi premazi*

U današnje vrijeme sve je zastupljenija primjena ekološki prihvatljivih otapala kako bi se zadovoljili sve stroži ekološki zahtjevi. Veliki je problem u upotrebi organskih otapala ispuštanje hlapljivih organskih spojeva u okoliš (engl. VOC – *Volatile Organic Compounds*), a korištenjem vodorazrjedivih premaza taj bi se učinak mogao smanjiti. Smanjenje upotrebe organskih otapala u premazima također utječe na smanjenje cijene premaza jer su organska otapala teže dostupna i skuplja u odnosu na otapala u vodorazrjedivim premazima. Ekološki prihvatljiva rješenja su vodorazrjedivi premazi, dvokomponentni premazi, premazi bez otapala i praškasti premazi [16].

Vodorazrjedive premaze odlikuje niska toksičnost, niže razine ispuštanja hlapljivih spojeva i nezapaljivosti u odnosu na premaze na bazi organskog otapala, ali vodorazrjedivi premazi imaju povišenu viskoznost i zahtijevaju duže vrijeme sušenja te se najčešće suše uz pomoć topline. Kvaliteta je ovih premaza usporediva s kvalitetom postignutom premazima s klasičnim otapalima, a u nekim je primjenama čak i bolja. Vodeno je otapalo zbog svojih pogodnih ekoloških svojstva u stalnom istraživanju i razvoju [16].

4.3. Primjena premaza u protupožarnoj zaštiti

Premazi se koriste kao oblik pasivne zaštite u slučaju požara. U nastavku je rada dan detaljniji opis primjena premaza u protupožarnoj zaštiti.

4.3.1. Pasivna protupožarna zaštita

Uobičajeno se preferira korištenje pasivne zaštite od požara nad aktivnim sustavima zbog sigurnosti koju pruža bez dodatnih intervencija ručnim sredstvima ili kontrolnih sustava u kojima može doći do kvara ili oštećenja [17].

Na Slici 7. prikazan je shematski prikaz pasivne protupožarne zaštite.

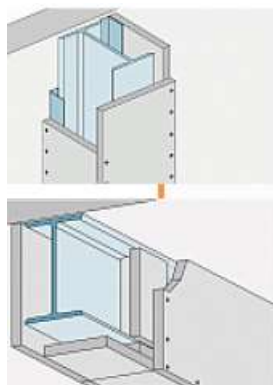


Slika 7. Shematski prikaz pasivne protupožarne zaštite [18]

Strukturalna protupožarna zaštita može se podijeliti na zaštitu protupožarnim oplatama, cementnim sustavima te protupožarnim premazima [18].

Zaštita oplatama ima nekoliko prednosti, a to su: laka i suha instalacija, davanje gotovog izgleda površini (uz zaštitu od požara) te mogućnost trpljenja do 240 minuta prilikom izloženosti vatri. Nedostaci zaštite protupožarnim oplatama su: pokrivanje čeličnih dijelova, nemogućnost zaštite složenih oblika, dugo vrijeme instalacije te debljina i težina samih oplatama koje mogu biti otežavajući čimbenik [18].

Na Slici 8. prikazana je primjena protupožarne zaštite oplatama.



Slika 8. Protupožarna zaštita oplatama [18]

Protupožarna zaštita cementnim sustavima koristi se jer nudi toplinsku i zvučnu izolaciju i jer je cijena cementnog sustava niža od ostalih metoda strukturnih protupožarnih metoda zaštite. Nudi zaštitu od vatre u trajanju od 240 minuta, kao i metoda oplatama. Nedostaci cementne zaštite od požara su: neuredna aplikacija, vrlo lako se može oštetiti, potrebno je primijeniti neki oblik potpornja za žice koje prolaze te je teško nanijeti jedan ravnomjeran sloj zaštite [18].

Na Slici 9. dan je prikaz zaštite cementnim sustavom.



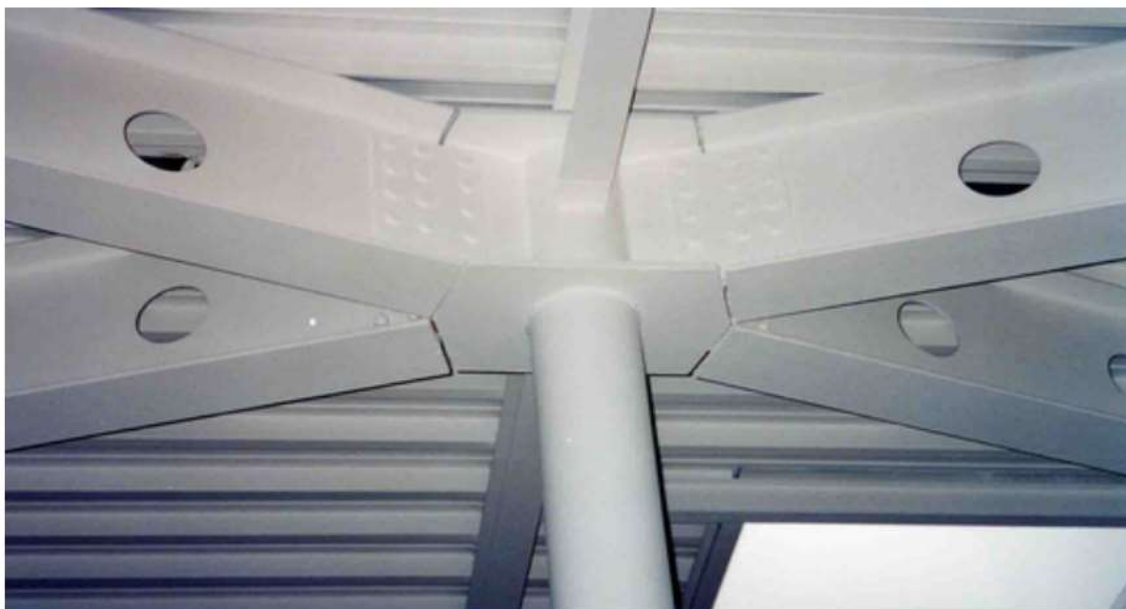
Slika 9. Protupožarna zaštita cementnim sustavom [19]

4.3.1.1. Protupožarni premazi

Metoda protupožarne zaštite premazima ima nekoliko prednosti, a to su: najlakša je od svih triju navedenih metoda strukturne protupožarne zaštite, idealna je za zaštitu čelika gdje se on koristi u svrhu dizajna same građevine, premaz se nanosi u tankom sloju, na protupožarni se premaz mogu nanijeti dekorativni završni premazi, lagan je za čišćenje i održavanje [18].

Nedostaci su: potreba za kontrolom kvalitete premaza, mora postojati kompatibilnost s temeljnim premazom, duže vrijeme sušenja samog premaza, potreba za zaštitom okolnog prostora te potreba da protupožarni premaz nanosi obučeni radnik kako bi se postigli najbolji mogući rezultati [18].

Na Slici 10. prikazana je čelična struktura zaštićena protupožarnim sustavom premaza.



Slika 10. Čelična struktura zaštićena protupožarnim premazom [20]

Protupožarni premazi odlični su za zaštitu kompleksnih i jednostavnih čeličnih konstrukcija od požara. Djeluju tako da reagiraju na toplinu i tvore temperaturno izolacijski sloj te štite čelične konstrukcije od postizanja kritičnih temperatura čime se dobiva dodatno vrijeme za evakuaciju i za gašenje požara [18].

4.3.1.2. Vatrootporni premazi

Vatrootporni premazi su koji štite od vatre, ali se ne ekspaniraju i ne povećavaju svoj volumen. Zapravo su to dekorativni premazi koji sadrže aditive napravljene za smanjenje brzine širenja vatre i razvoja dima. Dije se u tri klase (A, B ili C) na temelju svoje učinkovitosti prilikom utjecaja na brzinu širenja požara ili razvoja dima. Brzina širenja požara ovisi i od debljini nanesenog premaza, ali i o vrsti same podloge koja je zahvaćena vatrom [21].

Svrha je vatrootpornog premaza zaštita podloge, a način na koji se to postiže varira o sastavu samog premaza. Premazi napravljeni halogenim komponentama sprječavaju širenje požara u plinskoj fazi, odnosno tvore sloj halogene pare koja ometa nesmetano širenje požara i tako pomaže gašenju požara. Primjena halogenih elemenata ima i negativnu stranu, a to je oslobađanje otrovnih i korozivnih halogenih spojeva tijekom sagorijevanja čime je njihova primjena uvelike smanjena i ekoloških neprihvatljiva [21].

4.3.1.2.1. Ekspanirajući (*intumescent*) protupožarni premazi

Metoda korištenja ekspanirajućih (lat. *intumescent* – pjeniti se) premaza, koja spada u metodu pasivne zaštite od požara, smatra se jednom od najpraktičnijih metoda zaštite čeličnih konstrukcija [22].

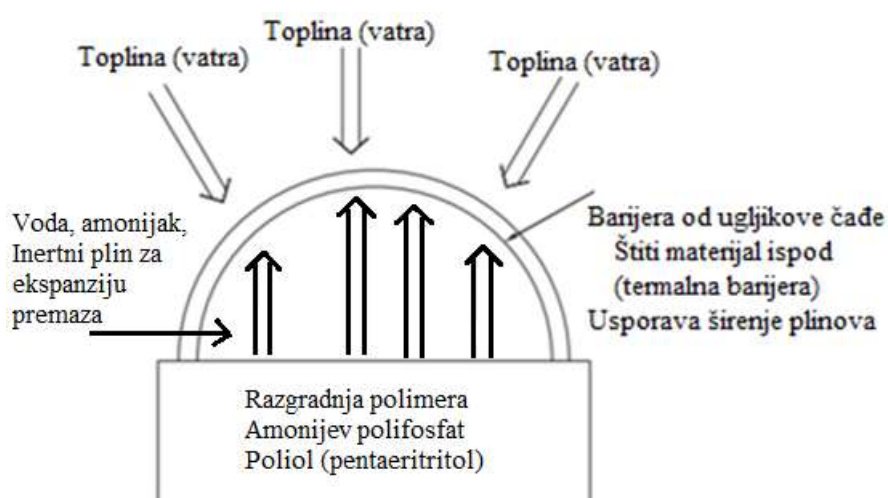
Jedan je od najvažnijih građevinskih materijala čelik zbog toga što posjeduje visoku čvrstoću u odnosu na masu, masovno se proizvodi te je lako dostupan. Osim navedenoga, odlikuje ga i poželjno svojstvo dobre plastične žilavosti. Nelegirani čelik smatra se nezapaljivim materijalom, ali svojstva čelika kao što su čvrstoća i koeficijent elastičnosti gube se pri temperaturama višim od 600 °C. Gubitak navedenih svojstava može dovesti do urušavanja građevina izrađenih od čeličnih struktura. Kako bi se katastrofa urušavanja građevina izbjegla, potrebno je osigurati adekvatnu protupožarnu zaštitu čeličnih struktura [22].

4.3.1.3. Karakteristike ekspandirajućeg (intumescent) premaza

Ekspandirajući (*lat. intumescent*) su premazi u sve široj upotrebi zbog zaštite materijala od oštećenja vatrom. Ekspandirajući premazi uobičajeno se sastoje od polimernih veziva, ekspandirajućeg dijela (*engl. IFR – intumescent flame retardant*) i drugih aditiva. Klasični ekspandirajući dio sastoji se od triju dijelova [22]:

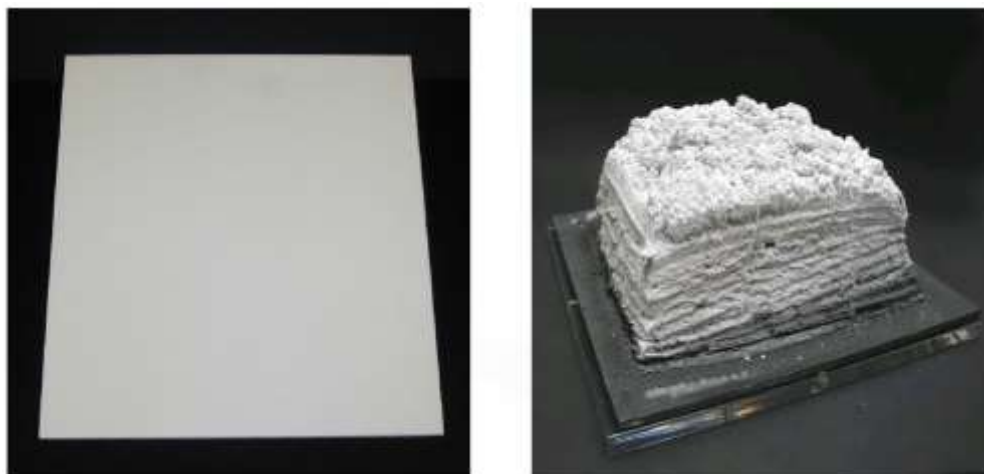
- izvora ugljika (npr. pentaeritritol)
- donora kiseline - katalizator (npr. amonijev polifosfat)
- izvora inertnog plina koji služi za širenje/ekspandiranje premaza (npr. melamin).

Prilikom izloženosti visokoj temperaturi, ekspandirajući (intumescent) premaz dehidrira te karbonizira i stvara ekspandirajući sloj čađe koji djeluje kao „štit“ od vatre. To omogućava izolaciju protoka zraka i topline što pak omogućava stvaranje zaštite čeličnih struktura. Na Slici 11. dan je shematski prikaz djelovanja ekspandirajućeg premaza [22].



Slika 11. Shematski prikaz djelovanja ekspandirajućeg premaza [23]

Na Slici 12. prikazan je uzorak premazan ekspanzirajućim (intumescent) premazom prije ekspanzije i nakon nje.

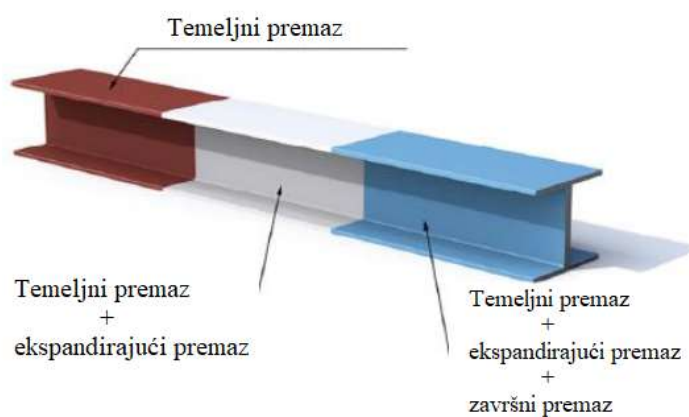


Slika 12. Ekspanzirajući premaz prije i nakon ekspanzije [18]

Protupožarni sustav premaza se sastoji od triju slojeva [18]:

- temeljnog premaza – zaštita od korozije
- intumescent/ekspanzirajućeg premaza – zaštita od požara
- završnog premaza – zaštita od atmosferskih uvjeta.

Na Slici 13. prikazan je shematski prikaz protupožarnog sustava premaza.

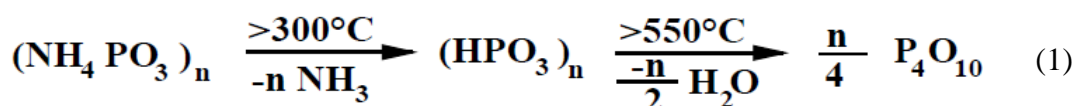


Slika 13. Shematski prikaz protupožarnog sustava premaza [18]

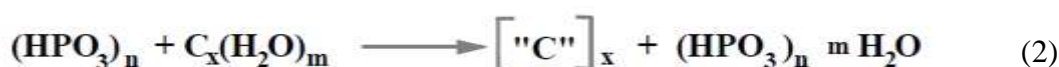
4.3.1.4. Princip djelovanja ekspandirajućeg premaza

Princip na kojem djeluje protupožarni ekspandirajući premaz obuhvaća nekoliko koraka [18]:

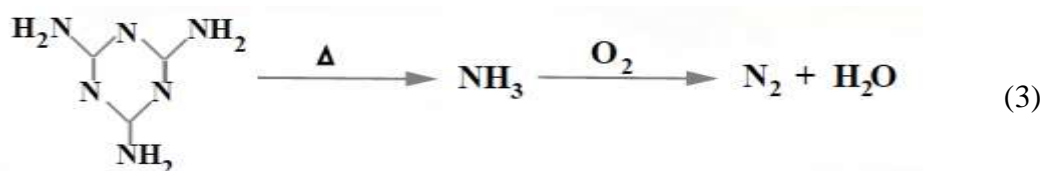
1. otapanje veziva
2. termoliza kiselog donora



3. reakcija kiseline s polialkoholom



4. termoliza sredstva za ekspandiranje



5. razvoj kompaktne strukture anorganske pjene.



4.3.1.5. Prednosti i nedostaci ekspandirajućeg premaza

Brojne su prednosti ekspandirajućih premaza u protupožarnoj zaštiti i upravo je zbog toga sve veća i njihova upotreba u tu svrhu. Ekspandirajući premazi imaju široku upotrebu u zaštiti požarnih zidova, raznih čeličnih konstrukcija i drugih konstrukcija koje zahtijevaju visoku razinu zaštite od požara. Vrlo se često ekspandirajući premazi integriraju u boju koja se nanosi na podlogu i tako ju zaštićuje od toplinskih oštećenja neko vrijeme. Svestranost primjene i način na koji djeluju na usporavanje širenja i napredovanja plamena ukazuju na sposobnost pružanja visoke sigurnosti od požara. Upravo zbog toga, sve se više koriste radi mogućnosti smanjenja količine dima i niske razine toksičnosti koja je u skladu s ekološkim zahtjevima [24].

Međutim, ekspandirajući premazi imaju i neke nedostatke, uključujući probleme s upijanjem vode (važno ako temeljnu strukturu treba zaštititi od korozije ili kratkog spoja) i nisku toplinsku stabilnost.

Ekspandirajući premaz aktivira se i prije nego što polimer dobije šansu za toplinsku razgradnju, pa se tako većina zapaljivih materijala aktivira na oko 180 – 200 °C, dok neki prije aktivacije dosegnu i do 240 °C.

To nažalost eliminira njihovu upotrebu u termoplastima s višom temperaturom jer bi se aktivirali tijekom smjese taline u termoplastiku. Stoga su ekspandirajući premazi, iako pružaju izvrsnu zaštitu od požara, uglavnom ograničeni na materijale niže temperature i protupožarne barijere [21].

Prilikom izloženosti visokoj temperaturi, ekspandirajući (intumescent) premaz dehidrira te karbonizira i stvara ekspandirajući sloj čađe koji djeluje kao „štit“ od vatre. Sloj čađe koji je nastao ekspanzijom odvajanja se od osnovnog dijela premaza te se postepeno uništava kako požar napreduje. Trošenje zaštitnog sloja čađe glavni je razlog smanjene primjene ekspandirajućih premaza u industriji. Kako bi se unaprijedila razina učinkovitosti zaštitnog premaza, potrebno je istražiti načine na koje će se različiti dijelovi ekspandirajućeg premaza bolje povezati kako bi nastao premaz s odličnom otpornošću na požare. Kao jedno od mogućih rješenja, proučava se spoj cink borat kao anorgansko punilo zbog njegovih sposobnosti prigušenja dima. Pri izloženosti visokim temperaturama, cink borat raspada se i nastaje veća količina vode i toplinski stabilnih komponenti koje sadrže bor. Toplinski stabilne komponente koje sadrže bor pomoći će boljem vezivanju ekspandirajućeg sloja čađe za ostatak ekspandirajućeg premaza [22].

4.3.1.6. Projektiranje protupožarne zaštite ekspandirajućim premazom

Kako je ranije navedeno, nelegirani čelik smatra se nezapaljivim materijalom, ali na temperaturama iznad 600 °C gubi poželjna mehanička svojstva. Tijekom požara temperature u iznosu od 550 °C postižu se unutar pet minuta te je zbog toga potrebno zaštititi čelične strukture protupožarnim sustavima zaštite. Prema zakonu, građevine se projektiraju i izgrađuju tako da pri pojavi požara nosivost građevine mora biti očuvana određeno propisano vrijeme. Sustavi protupožarne zaštite čeličnih konstrukcija projektiraju se prema normi HRN EN 13501-2, a sustavi vatrootpornosti nosive čelične konstrukcije također se definiraju prema normi HRN EN 13501-2 [25].

U RH upotreba se građevinskih materijala regulira na temelju sljedećih dokumenata: Pravilnika o tehničkim dopuštenjima za građevne proizvode (»Narodne novine«, br. 103/08.), Pravilnika o ocjenjivanju sukladnosti, ispravama o sukladnosti i označavanju građevnih proizvoda (»Narodne novine«, br. 103/08., 147/09., 87/10. i 129/11.) i Pravilnika o nadzoru građevnih proizvoda (»Narodne novine«, br. 113/08.).

Pravilnici su doneseni na temelju Zakona o građevnim materijalima proizvodima (»Narodne novine«, br. 86/08. i 25/13.) [25].

Debljina protupožarnog premaza koji ekspandira ovisi o nekoliko čimbenika. Prvi je čimbenik oblik konstrukcije koju je potrebno štiti od požara, odnosno važno je znati je li je ta konstrukcija zatvorenog oblika, otvorenog oblika ili se sastoji od nekoliko ćelija. Drugi je čimbenik oblik oblika [Hp/A]. Čimbenik oblika odnos je između opsega zagrijanog djela konstrukcije [Hp] te njezinog poprečnog presjeka [A], a mjerna jedinica čimbenika oblika je m^{-1} . Sljedeći čimbenik koji utječe na debljinu premaza je podatak s koliko je strana konstrukcija izložena vatri i toplini. Može biti izložena s triju ili s četiriju strana. Ovisno o namjeni konstrukcije mora se uzeti u obzir i čimbenik koji se odnosi na podatak koliko je dugo potrebno da premaz štiti stabilnost konstrukcije [26].

U tablici 1. prikazane su razlike između istih I ili H profila s različitim čimbenikom oblika.

Tablica 1. I i H profil s različitim čimbenikom oblika [16]

I profil	H profil
Visoki čimbenik oblika	Niski čimbenik oblika
Niža masa čelika	Viša masa čelika
Brzo zagrijavanje	Sporo zagrijavanje
Veća debljina suhe tvari ekspandirajućeg premaza	Manja debljina suhe tvari ekspandirajućeg premaza
	

Geometrija presjeka čelične konstrukcije uvelike utječe na ponašanje čelika pri izloženosti požaru. Presjeci čeličnih oblika mogu se podijeliti u dvije skupine, a to su otvoreni čelični presjeci u koje se ubrajaju profili I, H, L, T, U, C te zatvoreni čelični presjeci u koje se ubrajaju pravokutni šuplji presjeci (RHS), kvadratni šuplji presjeci (SHS) i okrugli šuplji presjeci (CHS) [25].

Ovisno o geometrijskom obliku presjeka čeličnih profila koriste se različite metode koje se primjenjuju u protupožarnoj zaštiti. Primjenom sustava protupožarne zaštite oplatama, debljina zaštitnog sloja istoga je iznosa i za otvoreni i za zatvoreni oblik geometrijskog presjeka čelika. Zaštita protupožarnim premazima nije ista za reaktivne premaze i za nereaktivne, a za svaki postoje posebne norme i tablice. Kod nereaktivnih premaza debljina materijala iščitava se iz tablica ako se radi o otvorenim geometrijskim presjecima, a ako se radi o zatvorenim geometrijskim presjecima, debljina se izračunava prema pravilima navedenima u normi EN 13381-4. Reaktivni premazi, odnosno ekspandirajući premazi debljinu nanošenja prikazuju odvojeno za otvorene i zatvorene geometrijske presjeke. Odnosno, proizvođač premaza trebao bi dati dvije odvojene tabele ako se premaz koristi i na zatvorenim presjecima [25].

Zavisno o gradnji, čelične konstrukcije mogu biti izložene vatri s više strana, odnosno maksimalno s četiriju strana, a u rijetkim slučajevima čak i s jedne, npr. ako se iznad čeličnog profila nalazi betonski strop, čelični profil izložen je vatri s triju strana. Ovisno o stranama izloženosti raste i površina čeličnog presjeka koja je izložena vatri čime se sam profil jače zagrijava. Važno je ovo uzeti u obzir prilikom projektiranja i izračuna čimbenika konstrukcije A_p / V [25].

A_p je područje izloženo vatri, a ono je višekratnik unutarnjeg opsega mjera zaštite od požara (U) i duljine jedinice (L). Volumen V višekratnik je površine poprečnog presjeka (A_{cs}) i duljine jedinice L . Važno je napomenuti da je prilikom izračuna površine izložene vatri (A_p) potrebno voditi brigu o broju strana profila koje su izložene požaru, odnosno vatri. Izračuni se rade na temelju parametra U , a parametar U različito se izračunava za kutijaste i profilne zaštite kao i za različit broj strana izloženosti požaru [25].

Na Slici 14. prikazana je tablična podjela parametra U prema različitim čeličnim profilima i razini izloženosti pojedinog profila prema požaru, odnosno vatri u slučaju profilne zaštite materijala.

Čelični profil	Profilirana zaštita				
	Četverstrana	Trostrana	Trostrana (ajkonično izložena)	Dvostrana	Jednostrana (ajkonično izložena)
I i H profil	 $2b + 2h + 2b - t = 4b + 2h - 2t$	 $b + 2h + 2b - t = 3b + 2h - 2t$	 $b + 2b + 2h - t = 3b + 2h - t$	 $b + h + 2b - t/2 = 2b + h - t$	 b
T profil	 $2b + 2h$	 $b + 2h$	 $b + 2b + 2h - t = 3b + 2h - t$		
L profil	 $2b + 2h$	 $b + 2h$	 $b + 2b + 2h - t = 3b + 2h - t$		
U profil	 $2b + 2h + 2b - t = 4b + 2h - 2t$	 $2b + h + 2b - t = 4b + h - 2t$	 $b + 2b + 2h - t = 3b + 2h - t$		
Kvadratni ili pravokutni ispravljeni presjeci	 $2b + 2h$	 $b + 2h$			
Ovalni ispravljeni presjeci	 $\pi \cdot d$				

Slika 14. Tablično prikazan parametar U za različite čelične profile [25]

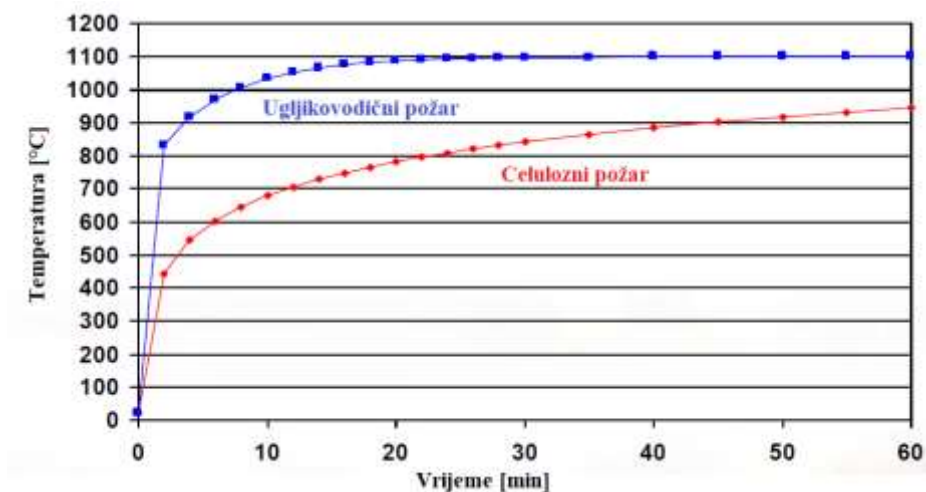
Na Slici 15. dana je usporedba izračuna čimbenika nosača prema vrsti zaštite (profilna ili kutijasta) i izloženosti profila prema vatri, odnosno plamenu.

					Faktor nosača A_p/V [m^{-1}]			
					Profilirana zaštita		Kutijasta zaštita	
					 $(U - b) / A_{cs}$	 U / A_{cs}	 $(b + 2h) / A_{cs}$	 $(2b + 2h) / A_{cs}$
HEA	h m	b m	U $m^2 \cdot m^{-1}$	A_{cs} mm^2	3-strana m^{-1}	4-strana m^{-1}	3-strana m^{-1}	4-strana m^{-1}
160	0,152	0,160	0,906	3880	192	234	120	161
180	0,171	0,180	1,020	4530	185	225	115	155
200	0,190	0,200	1,140	5380	175	212	108	145

Slika 15. Usporedba čimbenika nosača [25]

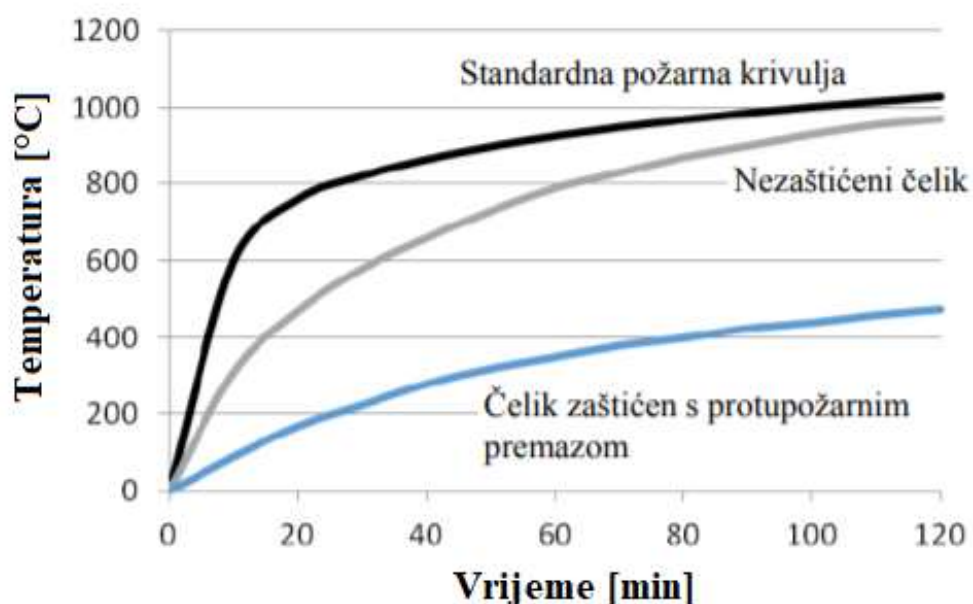
Razlikuju se dvije osnovne vrste požara, a to su celulozni i ugljikovodični požar. Ugljikovodični požari opasniji su od celuloznih jer se postiže veća temperatura sagorijevanja, stoga je za projektiranje protupožarnog sustava premaza potrebno uzeti u obzir kakav bi požar mogao zahvatiti zaštićenu konstrukciju. Ekspandirajući premaz počinje reagirati na temperaturama od 200 do 250 °C tako da bubri, a pritom se formira sloj koji je nekoliko puta veći od početne debljine premaza. Formira se sloj pjene koji stvara izolacijsku barijeru između vatre i čelika te štiti čeličnu konstrukciju od vatre i topline. Ekspandirajući protupožarni sustav premaza usporava zagrijavanje metala do kritičnih temperatura te se tako održava stabilnost konstrukcije na duži period. Održavanjem stabilnosti konstrukcije osigurava se dodatno vrijeme za evakuaciju i gašenje vatre. Kritična temperatura pri kojoj nelegirani čelik gubi svoja mehanička svojstva iznosi oko 600 °C, dok je kritična temperatura za aluminij nešto niža i iznosi 200 do 250 °C [27].

Slika 16. prikazuje ovisnost vremena požara o temperaturi.



Slika 16. Ovisnost temperature i vremena požara za dvije vrste požara [18]

Na Slici 17. vidljiva je krivulja zagrijavanja za nezaštićeni čelik i čelik zaštićen protupožarnim premazom.



Slika 17. Razlika u zagrijavanju nezaštićenog čelika i čelika zaštićenog protupožarnim premazom [28]



Promat kao jedan od najvećih proizvođača sustava premaza za zaštitu od požara u svojim priručnicima nudi primjer određivanja debljine suhog filma ekspandirajućeg premaza pri izloženosti požaru. Priručnik nudi rješenja za konstrukcije izložene vatri s triju ili četiriju strana kao i različite stupnjeve otpornosti R koji se odnose na čimbenik kojim se označava sposobnost građevine da tijekom određenog vremena ispunjava zahtijevanu nosivost (npr. R30 podrazumijeva da zahtijevana nosivost iznosi 30 minuta).

Slika 18. prikazuje primjer problema s osnovnim informacijama za projektiranje.

Primjer 2
Ulaz: Čelična nosiva greda HEA 200 ispod armirano-betonske ploče, izloženost požaru s 3 strane prema ISO 834 krivulji, kritična temperatura 515 °C, zahtijevana klasa otpornosti na požar R 90, unutarnja upotreba.
Zadatak: Usporediti različite načine protupožarne zaštite, konfiguracije i debljine
Riješenje: Noslač HEA 200 h = 190 mm b = 200 mm U _{profilan} = 1,14 m A _{ca} = 5383 mm ²

Slika 18. Promatov primjer problema [25]

Na Slici 19. prikazano je rješenje primjera sa slike 18. za nereaktivni premaz i reaktivni, odnosno ekspanidirajući premaz.

<p>3. Nereaktivni premaz $A_p/V = 175 \text{ m}^{-1}$ (profilirana konfiguracija) Projektirana temperatura 500 °C (manja od 515 °C) Projektirani čelični profil $A_p/V = 180 \text{ m}^{-1}$ (veći od 175 m^{-1}) Preporučeni proizvod: PROMASPRAY®-P300 / 29 mm</p>	
<p>4. Reaktivna boja $A_p/V = 175 \text{ m}^{-1}$ (profilirana konfiguracija) Projektirana temperatura 500 °C (manja od 515 °C) Projektirani čelični profil $A_p/V = 175 \text{ m}^{-1}$ Preporučeni proizvod 1: PROMAPAINTE®-SC3 / 2,873 mm Preporučeni proizvod 2: PROMAPAINTE®-SC4 / 1,671 mm</p>	

Slika 19. Rješenje primjera sa slike 18 [25]

Za zaštitu od požara primjenom reaktivnog premaza (boje) projektom potrebna debljina iznosi 4,5 mm, dok kod nereaktivnog premaza debljina iznosi 29 mm. To govori u prilog tome da je zbog sve veće potražnje za estetskim izgledom čeličnih struktura i želje današnjeg graditeljstva da grede budu vidljive puno bolje koristiti reaktivni ekspanidirajući premaz jer su debljine nanošenja znatno manje i izgled konstrukcija ostaje nepromijenjen.

5. PRIMJERI DOBRE PRAKSE

Primjer dobre prakse primjene pasivne protupožarne zaštite u Republici Hrvatskoj provodi hrvatska tvrtka FSB d.o.o. Kako bi se umanjile posljedice požara, ta tvrtka koristi odabrane proizvode i sustave za pasivnu protupožarnu zaštitu u graditeljstvu, elektroenergetskim postrojenjima (hidroelektranama, termoelektranama – energanama, trafostanicama), rafinerijama i slično. Neki su od primjera takve prakse: protupožarna zaštita Zračne luke Franjo Tuđman gdje je osigurano protupožarno brtvljenje svih instalacija (Slika 20.a), zaštita knjižnice Filozofskog fakulteta u Zagrebu (slika 20.b) gdje je osigurana protupožarna staklena stijena te zaštita Žičare Sljeme gdje su osigurane protupožarna staklena stijena i protupožarna vrata (Slika 20.c) [19].



(a) Zračna luka Franjo Tuđman



(b) knjižnica Filozofskog fakulteta u Zagrebu



(c) žičara Sljeme

Slika 20. Protupožarna zaštita građevina; (a) Zračna luka Franjo Tuđman; (b) knjižnica Filozofskog fakulteta u Zagrebu; (c) Žičara Sljeme [19]

6. EKSPERIMENTALNI DIO

Ekperimentalni dio diplomskog rada proveden je u Laboratoriju za zaštitu materijala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Ispitan je ekspandirajući (inutumescent) premaz PROMAPAIN-SC 4 Pail, a provedena su sljedeća ispitivanja:

1. mjerenje debljine premaza
2. ispitivanje prionjivosti premaza
3. ispitivanje premaza u slanoj i vlažnoj komori
4. ispitivanje vatrootpornosti premaza.

Cilj eksperimentalnog dijela rada bio je ispitati svojstva ekspandirajućeg premaza pri izloženosti različitim atmosferskim uvjetima te istražiti utjecaj temeljnog epoksi premaza i završnog poliuretanskog premaza na svojstva otpornosti na atmosferske utjecaje i vatrootpornost.

Ispitivanje se provodilo na pločama debljine osam milimetara koje su izrađene od nelegiranog čelika. Korišteno je jedanaest ispitnih uzoraka od kojih je osam bilo zaštićeno temeljnim premazom prije nanosa ekspandirajućeg vatrootpornog premaza. Vatrootporni premaz nanesen je na dva ispitna uzorka bez temeljnog premaza (nezaštićeni nelegirani čelik). Jedan nezaštićeni ispitni uzorak bio korišten kao etalon (kontrolni uzorak) te na njega nisu naneseni ni vatrootporni ni temeljni premaz. Na kontrolnom uzorku mjerila se brzina zagrijavanja nelegiranog čelika bez protupožarne zaštite. Mjereno je zagrijavanje stražnje strane pločica nelegiranog čelika prilikom izloženosti otvorenom plamenu i pratilo se vrijeme do početka ekspanzije protupožarnog premaza.

Tablica 2. prikazuje osnovni opis svih ispitnih uzoraka.

Tablica 2. Osnovni opis svih ispitnih uzoraka

UZORAK 1	Pločica nelegiranog čelika + temeljni premaz + ekspandirajući premaz
UZORAK 2	Pločica nelegiranog čelika + temeljni premaz + ekspandirajući premaz
UZORAK 3	Pločica nelegiranog čelika + temeljni premaz + ekspandirajući premaz
UZORAK 4	Pločica nelegiranog čelika + temeljni premaz + ekspandirajući premaz + poliuretanski završni premaz
UZORAK 5	Pločica nelegiranog čelika + temeljni premaz + ekspandirajući premaz + poliuretanski završni premaz
UZORAK 6	Pločica nelegiranog čelika + temeljni premaz + ekspandirajući premaz + poliuretanski završni premaz
UZORAK 7	Pločica nelegiranog čelika + temeljni premaz + ekspandirajući premaz
UZORAK 8	Pločica nelegiranog čelika + temeljni premaz + ekspandirajući premaz
UZORAK 9	Pločica nelegiranog čelika + ekspandirajući premaz
UZORAK 10	Pločica nelegiranog čelika + ekspandirajući premaz
UZORAK 11	Pločica nelegiranog čelika

Slika 21. prikazuje osam ispitnih uzoraka s nanesenim epoksi temeljnim premazom.



Slika 21. Uzorci s nanesenim epoksi temeljnim premazom i izmjerene početne vrijednosti prionjivosti

Na ispitnim uzorcima premazanima temeljnim premazom provedeno je mjerenje debljine sloja temeljnog premaza pomoću uređaja za mjerenje debljine „Elcometer 456“ (Slika 22.) prema normi HRN EN ISO 2808.



Slika 22. Uređaj za mjerenje debljine premaza „Elcometer 456“

Na svakom uzorku provedeno je deset mjerenja na način koji je prikazan na Slici 23.



Slika 23. Prikaz tehnike mjerenja debljine premaza

Izmjerena je početna prionjivost temeljnog epoksi premaza vlačnom metodom („Pull off“) prema normi HRN EN ISO 4624.

U tablici 3. prikazani su rezultati mjerenja debljina temeljenog premaza prije nanošenja ekspandirajućeg protupožarnog premaza.

Tablica 3. Debljine temeljenog premaza na uzorcima za ispitivanje

Uzorak	1	2	3	4	5	6	7	8
Broj mjerenja	10	10	10	10	10	10	10	10
Minimalna debljina premaza (μm)	292	331	316	275	301	277	311	322
Maksimalna debljina premaza (μm)	344	373	414	337	347	332	351	395
Srednja vrijednost (μm)	326,1	351,3	378,4	304,6	324,2	313,1	329,6	357,1

6.1. Premazivanje uzoraka vodorazrjedivim ekspandirajućim premazom

PROMAPAIN-T-SC 4 Pail premaz je koji je bilo potrebno razrijediti vodom kako bi se lakše mogao nanositi te se zbog toga premaz razrijedio sa 20 % vode. Za nanošenje prvog sloja na osam ispitnih uzoraka uzeto je 150 mL premaza koji je razrijeđen s 30 mL vode. Nakon razrjeđivanja premaz je bio izmiješan pomoću metalne žlice (Slika 24.) kako bi se postigla željena viskoznost premaza, tj. kako bi se premaz mogao lakše aplicirati na ispitne uzorke.



Slika 24. Razrjeđivanje i miješanje PROMAPAIN-T-SC 4 vodorazrjedivog premaza prije aplikacije

Prije nanošenja prvog sloja ekspandirajućeg premaza provedeno je lagano ručno brušenje temeljenog sloja kako bi došlo do što bolje adhezije ekspandirajućeg premaza na temeljni premaz. Brušenje je bilo provedeno ručno, brusnim papirom P240 (Slika 25.).



Slika 25. Brušenje ispitnih uzoraka prije nanosa prvog sloja ekspandirajućeg premaza

Nanesena su dva sloja ekspandirajućeg premaza. Prvi sloj bio je nanesen pomoću aplikatora za nanošenje premaza u debljini od 400 μm (Slika 26.), a drugi je sloj nanesen par dana kasnije kako bi se ostavilo dovoljno vremena za sušenje između dvaju slojeva prema uputi proizvođača premaza.



Slika 26. Nanošenje prvog sloja ekspandirajućeg premaza pomoću spiralnog aplikatora

Slika 27. prikazuje uzorke nakon prvog nanosenog sloja ekspandirajućeg premaza koji je bio nanesen pomoću aplikatora (400 μm).



Slika 27. Uzorci s nanesenim prvim slojem ekspandirajućeg premaza

Drugi sloj ekspandirajućeg premaza bio je nanesen pomoću kista kako bi se nanijela što veća debljina premaza. Priprema premaza bila je identična pripremi koja se provodila tijekom prvog nanosa. Tehnika nanošenja premaza pomoću kista prikazana je na Slici 28.



Slika 28. Tehnika nanošenja premaza kistom

Slika 29. prikazuje svih deset ispitnih uzoraka premazanih drugim slojem ekspandirajućeg premaza.



Slika 29. Prikaz svih deset ispitnih uzorka nakon nanesenog drugog sloja premaza

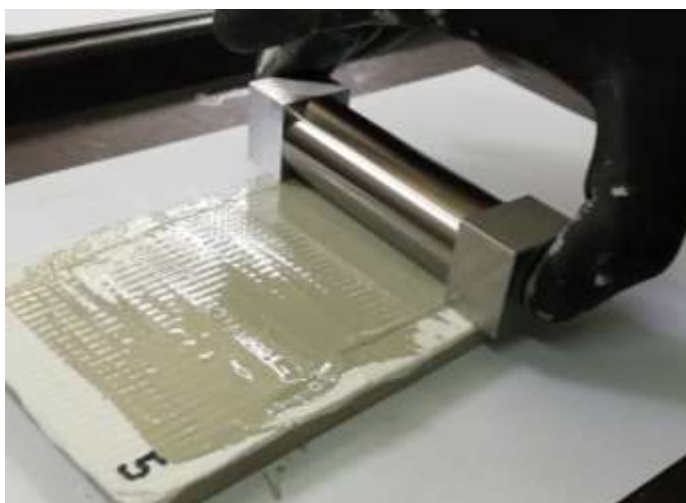
Nakon što se drugi sloj ekspandirajućeg vatrootpornog premaza osušio, ponovno je provedeno mjerenje debljine premaza. Rezultati mjerenja debljine ekspandirajućeg premaza nakon dvaju slojeva dani su u tablici 4.

Tablica 4. Debljine premaza nakon osušenog drugog sloja ekspandirajućeg sloja premaza na uzorcima za ispitivanje

Uzorak	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Broj mjerenja	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Minimalna debljina premaza (μm)	803	890	911	821	841	842	805	943	757	830
Maksimalna debljina premaza (μm)	964	1072	1155	1131	986	1075	1234	1096	1106	1025
Srednja vrijednost (μm)	887,2	991,6	1057,8	945,9	917,8	965,0	1061,3	1011,9	938,8	933,8

6.2. Premazivanje uzoraka poliuretanskim završnim premazom

Na tri ispitna uzorka (uzorci 3, 4 i 5) bio je nanesen poliuretanski završni premaz proizvođača HEMPEL naziva Hemplathane Fast Dry 55750. Premaz se koristi tako da se dobro pomiješaju dvije komponente premaza (baza pod kodom 55759 i otvrdnjivač pod kodom 97050) u omjeru 9,1 naprema 0,9. Premaz se zatim nanio pomoću aplikatora kao što je to prikazano na Slici 30.



Slika 30. Nanošenje poliuretanskog završnog premaza pomoću aplikatora

Na Slici 31. prikazani su ispitni uzorci nakon što se poliuretanski završni premaz osušio na trima ispitnim uzorcima (uzorci 3, 4 i 5).



Slika 31. Uzorci premazani poliuretanskim premazom

6.3. Ispitivanje u vlažnoj komori

Ispitivanje u vlažnoj komori bilo je provedeno u Laboratoriju za zaštitu materijala prema normi HRN EN ISO 6270-2. Uzorci su bili izloženi vlažnim uvjetima četiri dana (96 sati). Vlažna je komora proizvođača C&W Specialist Equipment Ltd., model AB6. Ispitivala su se dva uzorka, a to su uzorci 4 i 6. Ispitni uzorak 4 uzorak je koji je bio premazan sa završnim poliuretanskim premazom, a ispitni uzorak 6 uzorak je koji je završno premazan ekspanzirajućim protupožarnim premazom. Slika 32. prikazuje uzorke 4 i 6 u korozivnim uvjetima vlažne komore.



Slika 32. Uzorci 4 i 6 u vlažnoj komori

Na Slici 33. prikazani su uzorci 4 i 6 nakon izloženosti vlažnim i toplim uvjetima u trajanju od 96 sati.



Slika 33. Uzorci 4 i 6 nakon izloženosti vlažnim uvjetima 96 sati

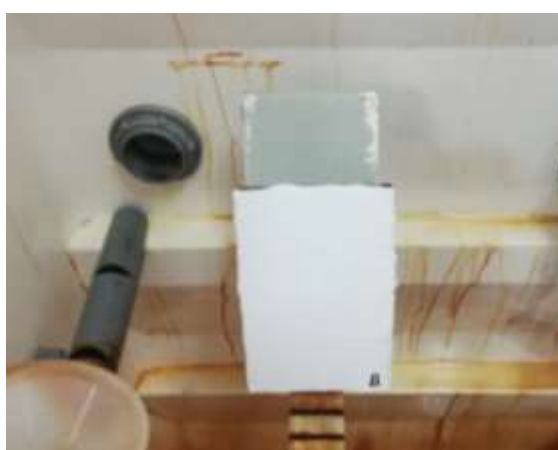
6.4. Ispitivanje u slanoj komori

Ispitivanje u slanoj komori je provedeno prema normi HRN EN ISO 9227. Uzorci su bili izloženi slanim atmosferskim uvjetima četiri dana (96 sati). Slana je komora proizvođača Ascott, model S450. Ispitivala su se dva uzorka, a to su uzorci 5 i 8. Ispitni uzorak 5 uzorak je koji je bio premazan sa završnim poliuretanskim premazom, a ispitni uzorak 8 uzorak je koji je završno premazan ekspanzirajućim protupožarnim premazom. Slika 34. prikazuje slanu komoru u Laboratoriju za zaštitu materijala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.



Slika 34. Slana komora u kojoj su se nalazili uzorci 5 i 8.

Na Slici 35. prikazani su uzorci 5 i 8 nakon izloženosti u slanoj komori u trajanju od 96 sati.



Slika 35. Uzorci 5 i 8 nakon izloženosti u slanoj komori 96 sati

6.5. Ispitivanje prionjivosti premaza

Nakon sušenja ekspandirajućeg premaza bilo je provedeno ispitivanje prionjivosti „Pull off“ metodom. Ispitivanje se provodilo sukladno normi ISO 4624, na način da se čunjić za ispitivanje ljepljivo zaljepio na premazanu podlogu (Slika 36.). Nakon lijepljenja čunjića potrebno je pričekati minimalno pola sata prije provođenja ispitivanja. Ispitivanje je provedeno na uzrocima 2 i 9. Ispitni uzorak 2 uzorak je na koji je prije nanosa ekspandirajućeg premaza bio nanesen temeljni premaz, a na ispitni uzorak 9 ekspandirajući je premaz nanesen na nezaštićeni nelegirani čelik.



Slika 36. Ispitivanje prionjivosti na ispitnim uzrocima

Nakon sušenja ljepljiva pomoću posebnog strugača (Slika 37.) odvojeno je ispitno područje te je uklonjen višak ljepljiva i premaza kako bi se lakše pričvrstio uređaj za ispitivanje.



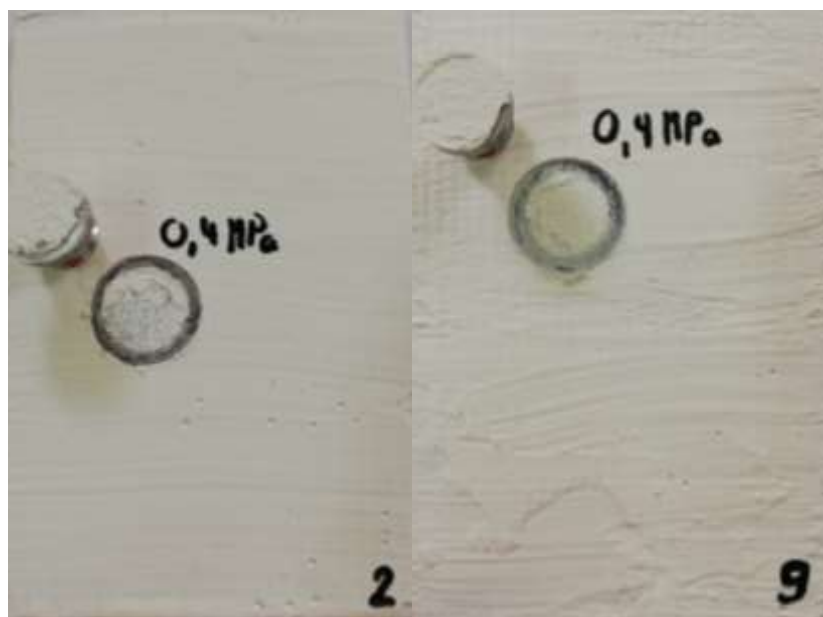
Slika 37. Strugač za pripremu uzorka prije ispitivanje prionjivosti

Ispitivanje se dalje provodi na način da se postepeno povećava vlačna sila mjernog uređaja dok ne dođe do odvajanja čunjića od ispitnog uzorka, a sila koju uređaj prikazuje odgovara vrijednosti prionjivosti premaza. Slika 38. prikazuje tehniku i uređaj provođenja ispitivanja prionjivosti pomoću „Pull off“ metode.



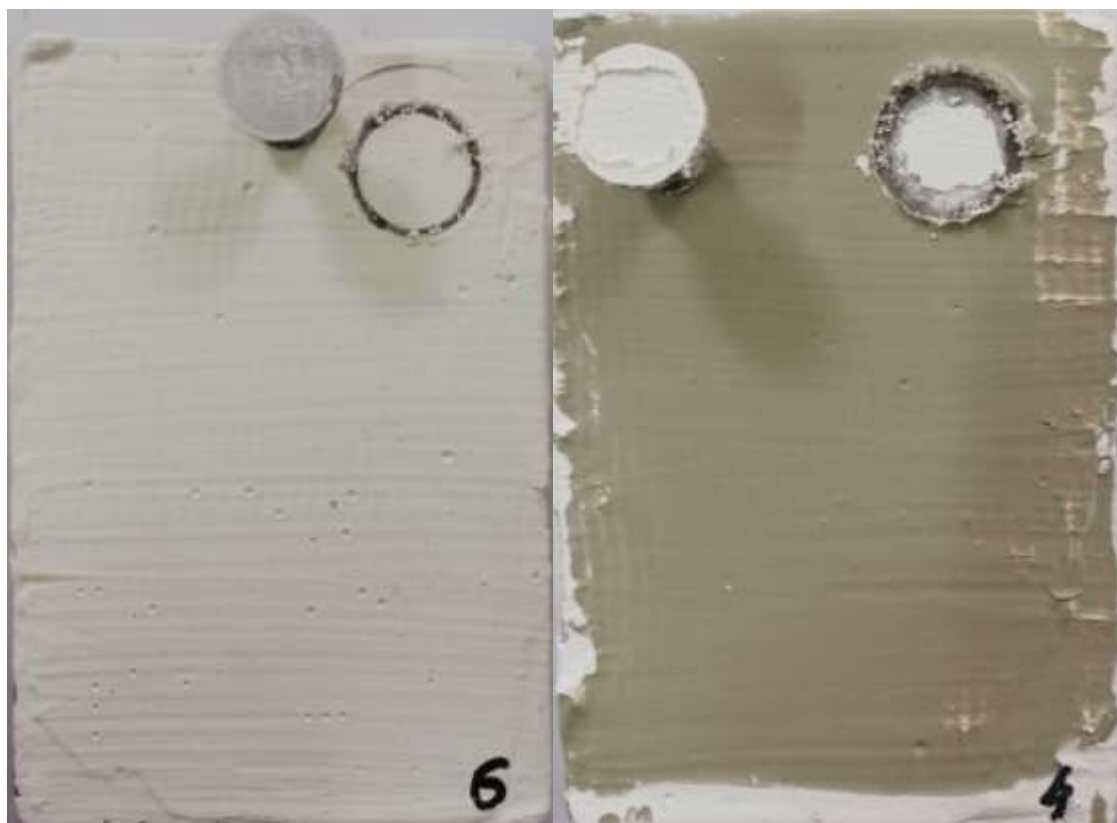
Slika 38. Tehnika i uređaj za ispitivanje prionjivosti pomoću „Pull off“ metode

Rezultati ispitivanja za oba su uzorka jednaki, a iznose 0,4 MPa. Slika 39. prikazuje ispitane uzorke 2 i 9 s pripadajućom vrijednosti prionjivosti.



Slika 39. Ispitni uzorci 2 i 9 nakon provedenog ispitivanja prionjivosti „Pull off“ metodom

Ispitivanje je bilo ponovljeno na uzorcima koji su bili izloženi korozivnim uvjetima vlažne komore. Tehnika ispitivanja bila je jednaka navedenoj metodi opisanoj ranije u tekstu. Ispitivanjem je utvrđeno da je prionjivost nakon izlaganja vlažnoj komori nepostojana, odnosno došlo je do potpunog gubitka prionjivosti. Na ispitnoj površini je ostao dio protupožarnog premaza što ukazuje na odvajanje u sloju tj. gubitak kohezije. Slika 40. prikazuje izgled uzoraka izloženih vlažnoj komori nakon ispitivanja prionjivosti.



Slika 40. Ispitni uzorci 4 i 6 nakon provedenog ispitivanja prionjivosti „Pull off“ metodom

Ispitivanje je također bilo provedeno na uzorcima koji su bili izloženi korozivnim uvjetima slane komore. Tehnika ispitivanja bila je jednaka navedenoj metodi opisanoj ranije u tekstu. Ispitivanjem je utvrđeno da je prionjivost nakon izlaganja slanoj komori kao i kod vlažne komore nepostojana, odnosno došlo je do potpunog gubitka prionjivosti. Na ispitnoj površini je ostao dio protupožarnog premaza što ukazuje na odvajanje u sloju tj. gubitak kohezije. Slika 41. prikazuje izgled uzoraka izloženih atmosferi slane komore nakon ispitivanja prionjivosti.



Slika 41. Ispitni uzorci 5 i 8 nakon provedenog ispitivanja prionjivosti „Pull off“ metodom

6.6. Ispitivanje protupožarnih svojstva premaza

Ispitivanje otpornosti na požar ispitivalo se pomoću plinskog rezača. Mjerila se temperatura stražnje strane nelegiranog čelika koja nije bila direktno izložena plamenu. Mjerenje temperature bilo je provedeno pomoću digitalnog IC termometra.

Ispitni uzorci 1, 2, i 7, koji su osim ekspandirajućim premazom bili premazani i temeljnim premazom, te ispitni uzorci 9, 10, koji su bili premazani samo ekspandirajućim premazom, spaljeni su odmah nakon sušenja drugog sloja ekspandirajućeg premaza. Prvi uzorak koji je bio spaljen uzorak je broj 2 te je on ispitan s udaljenosti od 20 cm mjerene od vrha plamena do uzorka. Eksperimentom je utvrđeno da je ta udaljenost prevelika i za sve je ostale ispitane uzorke smanjena na 15 cm. Slika 42. prikazuje provođenje eksperimenta mjerenja vatrootpornosti.



Slika 42. Provođenje eksperimenta paljenja uzoraka



Slika 43. prikazuje način na koji se provodilo mjerenje temperature stražnje strane ispitnog uzorka koji nije bio direktno izložen vatri. Ispitivanje otpornosti na požar provedeno je u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.



Slika 43. Mjerenje temperature stražnje strane ispitnog uzorka tijekom provođenja eksperimenta



U tablici 5. prikazan je uzorak broj 1 nakon spaljivanja te su navedene temperatura pri kojoj je došlo do reakcije na prednjoj površini uzorka i maksimalna temperatura koja je bila postignuta nakon izloženosti plamenu u trajanju od 10 minuta.

Tablica 5. Prikaz uzorka broj 1 nakon eksperimenta sa osnovnim informacijama

<p>Uzorak broj 1 - uzorak nije ispitan u komori</p>	<p>Uzorak zaštićen temeljenim premazom i ekspandirajućim premazom.</p>
	<p>Udaljenost od vrha plamena do uzorka iznosi 15 cm.</p> <p>Reakcija se dogodila nakon 30 sekundi pri temperaturi sa stražnje strane od 110 °C.</p> <p>Nakon izloženosti plamenu u trajanju od 10 minuta postignuta temperatura sa stražnje strane iznosila je 270 °C.</p>
	<p>Početna debljina protupožarnog premaza iznosila je 0,89 mm.</p> <p>Debljina ekspandiranog sloja iznosila je 18,8 mm.</p>



U tablici 6. prikazan je uzorak broj 2 nakon spaljivanja te su navedene temperature pri kojoj je došlo do reakcije na prednjoj površini uzorka i maksimalna temperatura koja je bila postignuta nakon izloženosti plamenu u trajanju od 10 minuta.

Tablica 6. Prikaz uzorka broj 2 nakon eksperimenta sa osnovnim informacijama

<p>Uzorak broj 2 - uzorak nije ispitan u komori</p>	<p>Uzorak zaštićen temeljenim premazom i ekspandirajućim premazom.</p>
	<p>Udaljenost od vrha plamena do uzorka iznosi 20 cm.</p>
	<p>Reakcija se dogodila nakon 6 minuta pri temperaturi sa stražnje strane od 160 °C.</p>
	<p>Nakon izloženosti plamenu u trajanju od 10 minuta postignuta temperatura sa stražnje strane je iznosila 210 °C.</p>
	<p>Prvi ispitani uzorak koji je služio za određivanje udaljenosti plamena od ispitnih uzoraka.</p> <p>Početna debljina protupožarnog premaza iznosila je 0,99 mm.</p> <p>Debljina ekspandiranog sloja iznosila je 13,4 mm.</p> <p>Ekspandirajući sloj nije bio povezan te se zbog toga u daljnjim ispitivanjima udaljenost plamena smanjila s 20 cm na 15 cm.</p>



U tablici 7. prikazan je uzorak broj 7 nakon spaljivanja te su navedene temperatura pri kojoj je došlo do reakcije na prednjoj površini uzorka i maksimalna temperatura koja je bila postignuta nakon izloženosti plamenu u trajanju od 10 minuta.

Tablica 7. Prikaz uzorka broj 7 nakon eksperimenta sa osnovnim informacijama

<p>Uzorak broj 7 - uzorak nije ispitan u komori</p>	<p>Uzorak zaštićen temeljenim premazom i ekspandirajućim premazom.</p>
	<p>Udaljenost od vrha plamena do uzorka iznosi 15 cm.</p>
	<p>Reakcija se dogodila nakon 30 sekundi pri iznosu temperature sa stražnje strane od 110 °C. Nakon izloženosti plamenu u trajanju od 10 minuta postignuta temperatura sa stražnje strane iznosila je 260 °C.</p>
	<p>Početna debljina protupožarnog premaza iznosila je 1,06 mm. Debljina ekspandiranog sloja iznosila je 33,7 mm.</p>

U tablici 8. prikazan je uzorak broj 9 nakon spaljivanja te su navedene temperatura pri kojoj je došlo do reakcije na prednjoj površini uzorka i maksimalna temperatura koja je bila postignuta nakon izloženosti plamenu u trajanju od 10 minuta.

Tablica 8. Prikaz uzorka broj 9 nakon eksperimenta sa osnovnim informacijama

<p>Uzorak broj 9 - uzorak nije ispitan u komori</p>	<p>Uzorak zaštićen samo ekspanirajućim premazom.</p>
	<p>Udaljenost od vrha plamena do uzorka iznosi 15 cm.</p> <p>Reakcija se dogodila nakon 40 sekundi pri iznosu temperature sa stražnje strane od 125 °C.</p> <p>Nakon izloženosti plamenu u trajanju od 10 minuta postignuta temperatura sa stražnje strane iznosila je 280 °C.</p>
	<p>Početna debljina protupožarnog premaza iznosila je 0,94 mm.</p> <p>Debljina ekspaniranog sloja iznosila je 21,3 mm.</p>

U tablici 9. prikazan je uzorak broj 10 nakon spaljivanja te su navedene temperatura pri kojoj je došlo do reakcije na prednjoj površini uzorka i maksimalna temperatura koja je bila postignuta nakon izloženosti plamenu u trajanju od 10 minuta.

Tablica 9. Prikaz uzorka broj 10 nakon eksperimenta sa osnovnim informacijama

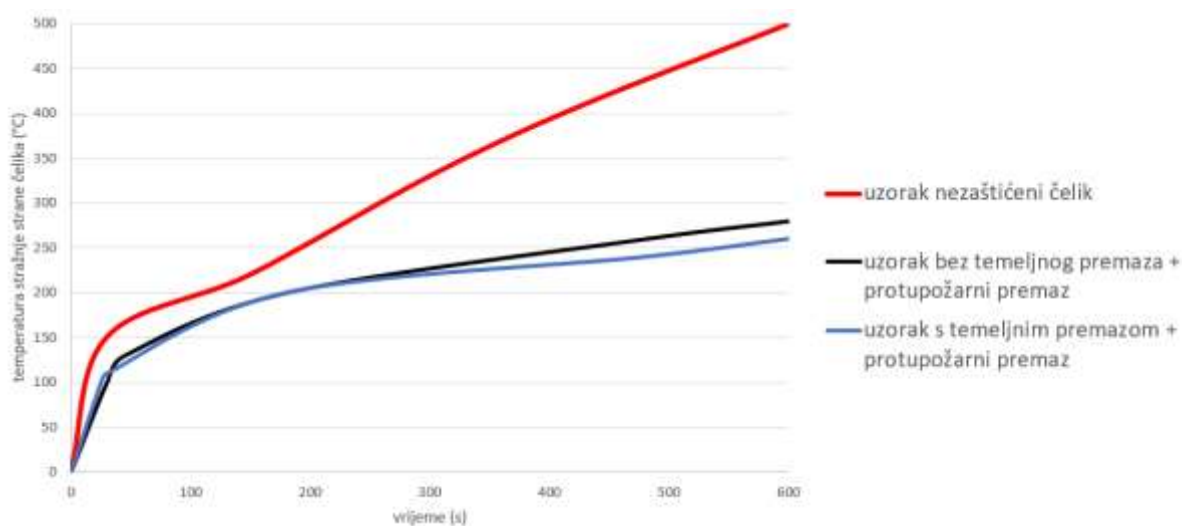
<p>Uzorak broj 10 - uzorak nije ispitan u komori</p>	<p>Uzorak zaštićen samo ekspandirajućim premazom.</p>
	<p>Udaljenost od vrha plamena do uzorka iznosi 15 cm.</p>
	<p>Reakcija se dogodila nakon 45 sekundi pri iznosu temperature sa stražnje strane od 130 °C.</p>
	<p>Nakon izloženosti plamenu u trajanju od 10 minuta postignuta temperatura sa stražnje strane iznosila je 280 °C.</p>
	<p>Početna debljina protupožarnog premaza iznosila je 0,93 mm. Debljina ekspandiranog sloja iznosila je 25,2 mm.</p>

Slika 44. prikazuje svih pet uzoraka na kojima je bio proveden prvi dio eksperimenta. Uzorci nisu izlagani ubrzanim ispitivanjima u vlažnoj i slanoj komori.



Slika 44. Prikaz uzoraka nakon provedenog eksperimenta

Na Slici 45. prikazan je graf na kojem su uspoređene temperature izmjerene nakon prvog dijela provedenog eksperimenta koji se odnosi na paljenje uzoraka koji nisu bili izloženi korozivnim uvjetima vlažne i slane komore.





Slika 45. Graf s izmjerenim temperaturama nakon prvog eksperimenta

Iz dijagrama je vidljivo da se nezaštićeni uzorak puno brže zagrijava u odnosu na uzorke koji su zaštićeni protupožarnim premazima.

Drugi dio eksperimenta bio je proveden nakon sušenja poliuretanskog završnog premaza te izloženosti različitim korozivnim uvjetima u vlažnoj komori.

U tablici 10. prikazan je uzorak broj 3 nakon spaljivanja te su navedene temperatura pri kojoj je došlo do reakcije na prednjoj površini uzorka i maksimalna temperatura koja je bila postignuta nakon izloženosti plamenu u trajanju od 10 minuta.

Tablica 10. Prikaz uzorka broj 3 nakon eksperimenta sa osnovnim informacijama

<p>Uzorak broj 3 - uzorak nije ispitan u komori</p>	<p>Uzorak zaštićen temeljenim premazom, ekspandirajućim premazom i završno poliuretanskim premazom.</p>
	<p>Udaljenost od vrha plamena do uzorka iznosi 15 cm.</p> <p>Reakcija se dogodila nakon 30 sekundi pri iznosu temperature sa stražnje strane od 105 °C.</p> <p>Nakon izloženosti plamenu u trajanju od 10 minuta postignuta temperatura sa stražnje strane iznosila je 305 °C.</p> <p>Poliuretanski premaz odmah se zapalio te je ispuštao vrlo neugodan miris.</p>
	<p>Početna debljina protupožarnog premaza iznosila je 1,06 mm.</p> <p>Debljina ekspandiranog sloja iznosila je 32,0 mm.</p>



U tablici 11. prikazan je uzorak broj 4 nakon spaljivanja te su navedene temperatura pri kojoj je došlo do reakcije na prednjoj površini uzorka i maksimalna temperatura koja je bila postignuta nakon izloženosti plamenu u trajanju od 10 minuta.

Tablica 11. Prikaz uzorka broj 4 nakon eksperimenta sa osnovnim informacijama

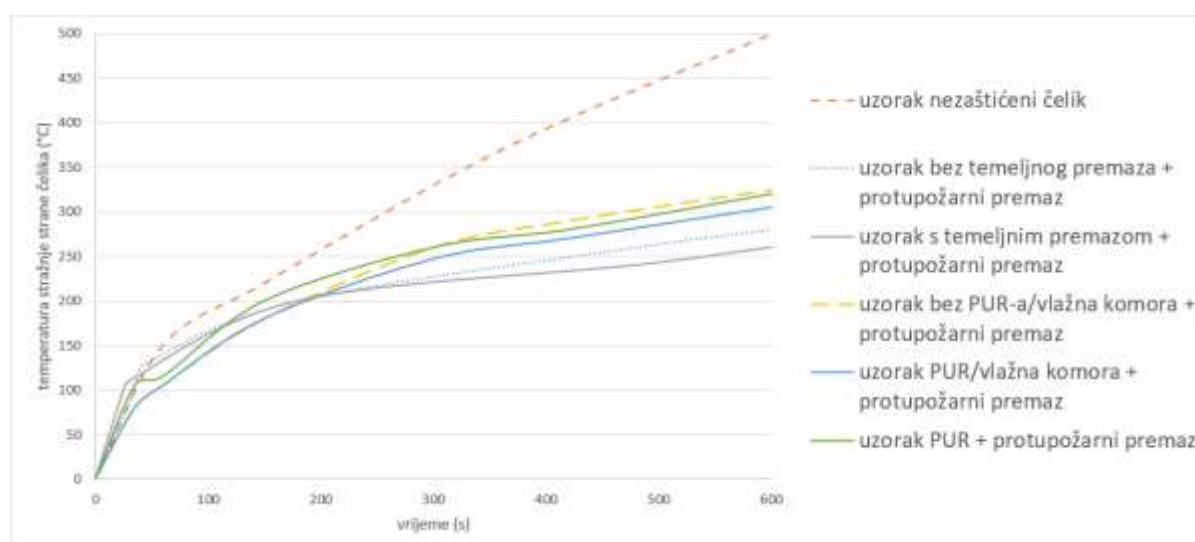
<p>Uzorak broj 4 - uzorak ispitan u vlažnoj komori 96 h</p>	<p>Uzorak zaštićen temeljenim premazom, ekspandirajućim premazom i završno poliuretanskim premazom.</p>
	<p>Udaljenost od vrha plamena do uzorka iznosi 15 cm.</p> <p>Reakcija se dogodila nakon 30 sekundi pri iznosu temperature sa stražnje strane od 100 °C.</p> <p>Nakon izloženosti plamenu u trajanju od 10 minuta postignuta temperatura sa stražnje strane iznosila je 305 °C.</p> <p>Poliuretanski premaz odmah se zapalio te je ispuštao vrlo neugodan miris.</p>
	<p>Početna debljina protupožarnog premaza iznosila je 0,95 mm.</p> <p>Debljina ekspandiranog sloja iznosila je 31,0 mm.</p>

U tablici 12. prikazan je uzorak broj 6 nakon spaljivanja te su navedene temperatura pri kojoj je došlo do reakcije na prednjoj površini uzorka i maksimalna temperatura koja je bila postignuta nakon izloženosti plamenu u trajanju od 10 minuta.

Tablica 12. Prikaz uzorka broj 6 nakon eksperimenta sa osnovnim informacijama

<p>Uzorak broj 6 - uzorak ispitan u vlažnoj komori 96 h</p>	<p>Uzorak zaštićen temeljenim premazom i ekspandirajućim premazom.</p>
	<p>Udaljenost od vrha plamena do uzorka iznosi 15 cm.</p>
	<p>Reakcija se dogodila nakon 30 sekundi pri iznosu temperature sa stražnje strane od 100 °C.</p>
	<p>Nakon izloženosti plamenu u trajanju od 10 minuta postignuta temperatura sa stražnje strane iznosila je 325 °C.</p>
	<p>Početna debljina protupožarnog premaza iznosila je 0,97 mm. Debljina ekspandiranog sloja iznosila je 22,3 mm.</p>

Na Slici 46. prikazan je graf na kojem su uspoređene izmjerene temperature sa stražnje strane ispitnog uzorka nakon provedenog prvog i drugog dijela eksperimenta. Drugi dio eksperimenta odnosi se na uzorke koji su bili premazani poliuretanskim završnim premazom te izloženi vlažnoj komori.




Slika 46. Graf s temperaturama nakon prvog i drugog eksperimenta

Iz dijagrama je vidljivo da izloženost ispitnih uzoraka atmosferskim uvjetima vlažne komore u trajanju od četiriju dana (96 h) nije utjecala na protupožarna svojstva premaza. Nanošenjem završnog poliuretanskog premaza nije se utjecalo na ekspanzirajuća svojstva premaza, ali prilikom spaljivanja uzorka dolazi do zapaljenja završnog poliuretanskog sloja te se razvija vrlo neugodan miris.

U završnom dijelu eksperimenta ispitivala su se dva ispitna uzorka koja su bila izložena slanoj atmosferi u slanoj komori. Jedan od ispitnih uzoraka izložen slanoj komori bio je zaštićen temeljnim epoksi premazom, vodorazrjeđivim ekspanzirajućim premazom i završnim poliuretanskim premazom, a drugi je uzorak završno bio zaštićen ekspanzirajućim vodorazrjeđivim protupožarnim premazom.



U tablici 13. prikazan je uzorak broj 5 nakon spaljivanja te su navedene temperatura pri kojoj je došlo do reakcije na prednjoj površini uzorka i maksimalna temperatura koja je bila postignuta nakon izloženosti plamenu u trajanju od 10 minuta.

Tablica 13. Prikaz uzorka broj 5 nakon eksperimenta sa osnovnim informacijama

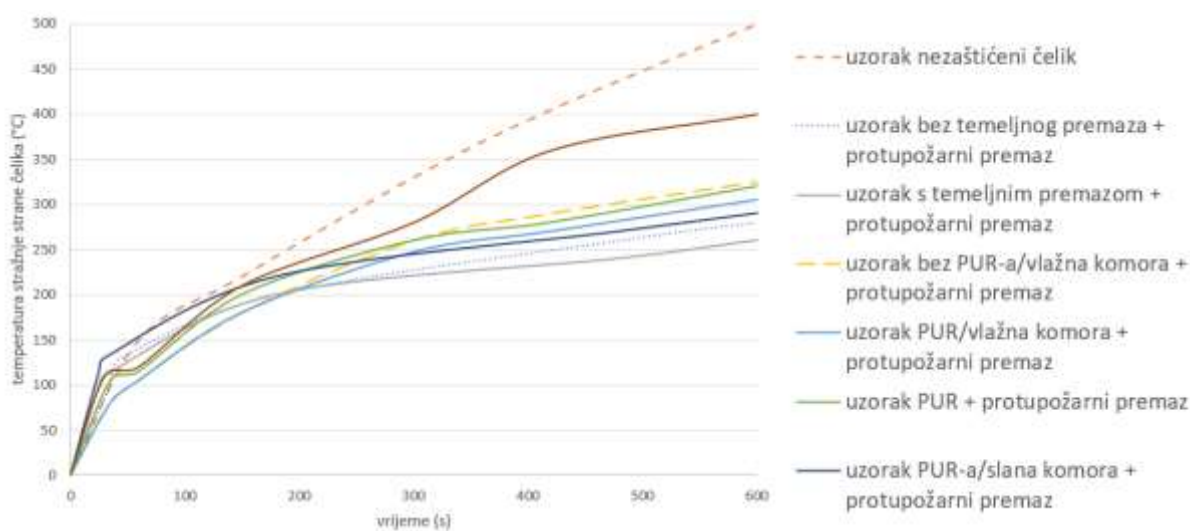
<p>Uzorak broj 5 - uzorci ispitani u slanoj komori 96 h</p>	<p>Uzorak zaštićen temeljenim premazom, ekspandirajućim premazom i završno poliuretanskim premazom.</p>
	<p>Udaljenost od vrha plamena do uzorka iznosi 15 cm.</p> <p>Reakcija se dogodila nakon 30 sekundi pri iznosu temperature sa stražnje strane od 115 °C.</p> <p>Nakon izloženosti plamenu u trajanju od 10 minuta postignuta temperatura sa stražnje strane iznosila je 340 °C.</p> <p>Poliuretanski premaz odmah se zapalio te je ispuštao vrlo neugodan miris.</p>
	<p>Početna debljina protupožarnog premaza iznosila je 0,92 mm.</p> <p>Debljina ekspandiranog sloja iznosila je 10,6 mm.</p>

U tablici 14. prikazan je uzorak broj 8 nakon spaljivanja te su navedene temperatura pri kojoj je došlo do reakcije na prednjoj površini uzorka i maksimalna temperatura koja je bila postignuta nakon izloženosti plamenu u trajanju od 10 minuta.

Tablica 14. Prikaz uzorka broj 8 nakon eksperimenta sa osnovnim informacijama

<p>Uzorak broj 8 - uzorak ispitan u slanoj komori 96 h</p>	<p>Uzorak zaštićen temeljenim premazom i ekspandirajućim premazom.</p>
	<p>Udaljenost od vrha plamena do uzorka iznosi 15 cm.</p> <p>Nije došlo do kemijske reakcije, odnosno formiranja zaštitnog protupožarnog sloja.</p> <p>Nakon izloženosti plamenu u trajanju od 10 minuta postignuta temperatura sa stražnje strane iznosila je 400 °C.</p> <p>Došlo je do pucanja premaza te se premaz pri kraju eksperimenta počeo zapaljavati i počeo je gorjeti.</p>
	<p>Početna debljina protupožarnog premaza iznosila je 1,01 mm.</p> <p>Nije došlo do ekspanzije protupožarnog premaza.</p>

Na Slici 47. prikazan je graf na kojem su uspoređene izmjerene temperature sa stražnje strane ispitnog uzorka nakon provedenog prvog, drugog i trećeg dijela eksperimenta. Treći dio eksperimenta odnosi se na uzorke koji su bili premazani poliuretanskim završnim premazom te izloženi slanoj komori.

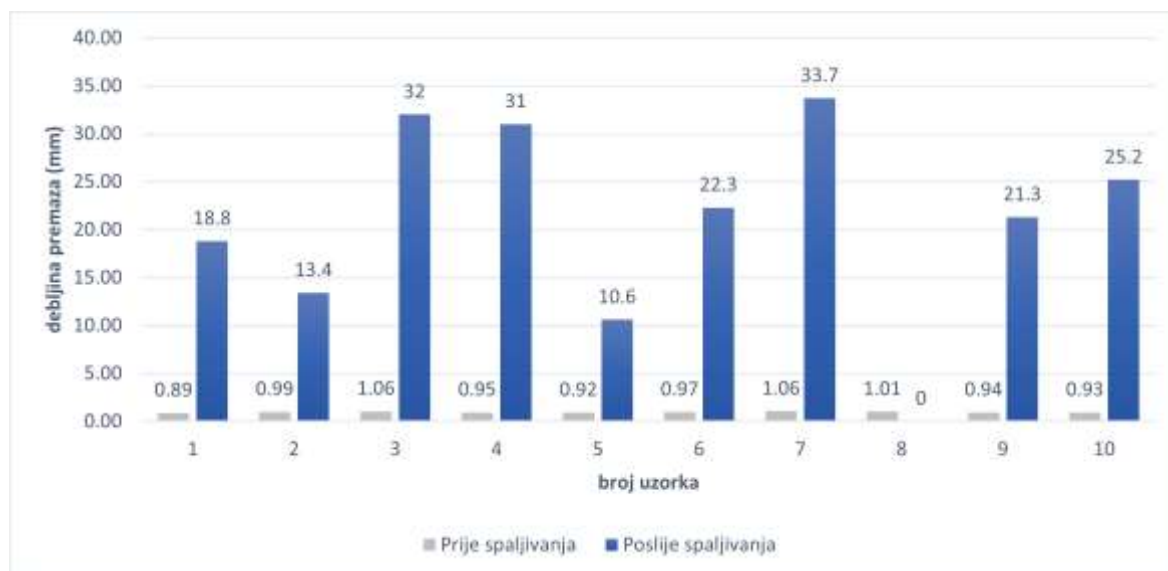


Slika 47. Graf s temperaturama nakon cijelog eksperimenta

Iz dijagrama je vidljivo da je izloženost ispitnih uzoraka atmosferskim uvjetima slane komore u trajanju od četiriju dana (96 h) utjecalo na protupožarna svojstva premaza. Ispitni uzorak koji dodatno nije bio zaštićen poliuretanskim završnim premazom u potpunosti je izgubio svojstva vatrootpornosti, dok je uzorak zaštićen poliuretanskim završnim premazom zadržao svoja svojstva vatrootpornosti.

6.7. Analiza eksperimentalnog rada

Prije ekspanzije i nakon nje bilo je provedeno mjerenje debljine premaza. Na Slici 48. prikazane su debljine sustava premaza prije i nakon paljenja.



Slika 48. Grafički prikaz izmjerenih debljina premaza prije i nakon paljenja

Iz grafa na Slici 48. vidljivo je kako početna debljina premaza, različiti atmosferski uvjeti prije spaljivanja uzoraka i primjena različitih sustava premaza imaju utjecaj na završnu debljinu premaza poslije spaljivanja.

Uzorci 1, 2 i 7 uzorci su koji su bili zaštićeni epoksi temeljnim premazom i završno vodorazrjedivim ekspanzirajućim premazom te nisu bili izloženi utjecajima vlažne i slane komore. Uzorak broj 2 bio je prvi paljeni uzorak i udaljenost plamena iznosila je 20 cm, što je utjecalo na izostanak uniformnog ekspanzirajućeg sloja i na samu debljinu ekspanzirajućeg sloja koja je bila smanjena. Uzorci 1 i 7 bili su izloženi istim uvjetima, ali je uzorak 7 imao deblji sloj ekspanzirajućeg premaza i iz grafa je vidljivo da je debljina ekspanzirajućeg premaza veća pri uzorku 7.

Uzorci 9 i 10 uzorci su koji su bili zaštićeni samo vodorazrjedivim ekspanzirajućim premazom i kod njih je debljina ekspanzirajućeg sloja relativno slična. Kod uzorka 9 debljina premaza povećala se više od 23 puta, a kod uzorka 10 više od 27 puta.

Uzorak 3 bio je zaštićen temeljnim epoksi premazom, vodorazrjeđivim ekspandirajućim premazom i završno poliuretanskim premazom te nije bio izložen nikakvim korozivnim uvjetima. Iz grafa je vidljivo da poliuretanski završni premaz ne utječe na debljinu ekspandirajućeg sloja te je premaz ekspandirao više od 30 puta.

Uzorci 4 i 6 bili su izloženi korozivnim uvjetima u vlažnoj komori. Uzorak 4 bio je zaštićen temeljnim epoksi premazom, vodorazrjeđivim ekspandirajućim premazom i završno poliuretanskim premazom, a uzorak 6 temeljnim epoksi premazom i završno vodorazrjeđivim ekspandirajućim premazom. Vidljivo je da poliuretanski završni sloj održava svojstvo vatrootpornosti ekspandirajućeg premaza kod izlaganja vlažnim uvjetima jer je ekspanzija kod uzorka 4 iznosila 32,5 puta, a na uzorku 6 bez završnog poliuretanskog sloja 23 puta.

Uzorci 5 i 8 bili su izloženi korozivnim uvjetima u slanoj komori. Uzorak 5 bio je zaštićen temeljnim epoksi premazom, vodorazrjeđivim ekspandirajućim premazom i završno poliuretanskim premazom, a uzorak 8 temeljnim epoksi premazom i završno vodorazrjeđivim ekspandirajućim premazom. Vidljivo je da poliuretanski završni sloj održava svojstvo vatrootpornosti ekspandirajućeg premaza kod izlaganja slanim uvjetima jer je ekspanzija kod uzorka 5 iznosila 11,5 puta, a na uzorku 6 bez završnog poliuretanskog sloja uopće nije došlo do ekspanzije, nego do zapaljenja samog ekspandirajućeg sloja, odnosno do potpunog gubitka svojstva vatrootpornosti.

7. ZAKLJUČAK

U današnjoj gradnji sve je više zastupljena pojava pametnih građevinskih objekata kojima su ciljevi očuvanje okoliša, ušteda energije i olakšanje svakodnevnog života. Takva gradnja povećava broj električnih komponenata te se samim time povećava rizik od pojave požara uzrokovanih električnim kvarom.

Napredak tehnologije i proširenje znanja o uzrocima i rizicima požara slijede i stroži propisi i standardi koji se zahtijevaju pri gradnji. Vatra i požari odnose mnoge živote i generiraju velike materijalne gubitke, a kako bi se povećala sigurnost i kako bi se smanjili gubici, razvijaju se nove metode protupožarne zaštite.

Naglasak ovog rada bio je na pasivnoj zaštiti koja se bazira na primjeni materijala koji imaju protupožarna svojstva. Kao jedna od metoda pasivne zaštite u fokusu je istraživanja primjena obećavajućih ekspandirajućih premaza. Zbog poželjnih svojstava, jednostavnosti primjene i učinkovitog djelovanja ti su premazi predmet mnogih studija u kojima se proučava na koje se načine mogu unaprijediti njihova primjena i način djelovanja.

Ekspandirajući premazi rade na principu povećavanja svog volumena pri izloženosti povišenim temperaturama. Početna debljina premaza, različiti atmosferski uvjeti pri kojima konstrukcije rade i primjena različitih vrsta premaza imaju utjecaj na završnu debljinu izolacije nakon izlaganja premaza povišenim temperaturama.

Eksperimentom je utvrđeno da se nelegirani čelik zaštićen protupožarnim ekspandirajućim premazom sporije zagrijava od nezaštićenog nelegiranog čelika. Utvrđeno je da debljina premaza ima utjecaj na debljinu stvorene izolacijske pjene. Što je veća debljina nanesenog sloja bit će i veća ekspanzija.

Ispitivanjem prionjivosti utvrđeno je da prilikom izloženosti atmosferskim uvjetima vlažne i slane komore premaz potpuno gubi svojstva prionjivosti bez obzira na to što su neki uzorci bili zaštićeni poliuretanskim završnim premazom.

Spaljivanjem uzoraka utvrđeno je da poliuretanski završni premaz ne utječe negativno na protupožarna svojstva ekspandirajućeg premaza.

Prilikom izloženosti uzoraka vlažnoj komori nije došlo do značajnog gubitka svojstava protupožarnosti premaza, ali uzorak koji je bio zaštićen poliuretanskim premazom pokazuje bolja svojstva protupožarnosti od uzorka koji je završno bio zaštićen vodorazrjedivim ekspandirajućim premazom.

Prilikom izloženosti uzoraka slanoj komori na uzorku koji je završno bio zaštićen vodorazrjedivim ekspandirajućim premazom došlo je do potpunog gubitka protupožarnih svojstva premaza. Uzorak koji je bio zaštićen poliuretanskim završnim premazom zadržao je svojstva protupožarnosti, ali debljina izolacijske pjene bila je manja nego kod uzoraka koji nisu bili izloženi slanoj komori.

Razvoj tehnologije i istraživanje upotrebe ekspandirajućih premaza omogućit će unapređenje sastava ekspandirajućih premaza čime će se proširiti primjena ekspandirajućih premaza u protupožarnoj zaštiti.

LITERATURA

1. Gillman TH, le May I. Mechanical and electrical failures leading to major fires. *Engineering Failure Analysis*. 2007;14(6 SPEC. ISS.):995–1018.
2. Li Y, Lu X, Guan H, Ying M, Yan W. A Case Study on a Fire-Induced Collapse Accident of a Reinforced Concrete Frame-Supported Masonry Structure. *Fire Technology* 2015; Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10694-015-0491-0>
3. Torero JL, Chen S, Cheng D. Fire-induced structural failure: The World Trade Center, New York. Vol. 165, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Forensic Engineering*. 2012. p. 105–7.
4. <https://nationalinterest.org/feature/what-if-the-9-11-attacks-never-happened-17644>, pristupljeno 20.11.2021.
5. Rukavina MJ, Carević M, Pečur IB. Zaštita pročelja zgrada od požara / priručnik za projektiranje i izvođenje zaštita pročelja zgrada od požara. Priručnik za projektiranje i izvođenje. 2017. pristupljeno 9.10.2021.
6. Zakon o zaštiti od požara - Zakon.hr [Internet]. Available from: <https://www.zakon.hr/z/349/Zakon-o-za%C5%A1titi-od-po%C5%BEara>, pristupljeno 27.10.2021.
7. Islam T, & Rashed H M. M. A. Classification and Application of Plain Carbon Steels. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. 2019 doi:10.1016/b978-0-12-803581-8.10268-1
8. Worldsteel Association (2021) <https://www.worldsteel.org/about-steel/about-steel.html>, pristupljeno 4.11.2021.
9. Carbon Steel: Properties, Examples and Applications - Matmatch. Available from: <https://matmatch.com/learn/material/carbon-steel> pristupljeno 8.11.2021.
10. Pnias D, Balomenos E, Sakkas K. The fire resistance of alkali-activated cement-based concrete binders. In: *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*. Elsevier Inc.; 2015. p. 423–61.
11. Paints, Coatings and Solvents - Google Knjige [Internet]. Available from: https://books.google.hr/books?hl=hr&lr=&id=ISp86z1hndQC&oi=fnd&pg=PP2&dq=coating+solvents+pdf&ots=jWFlm39Ktc&sig=M8w6ZIE5zA68_eZ2pvH8XSQkohg&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false, pristupljeno 3.11.2021.
12. Gutoff EB, Cohen ED. 14. Water- and Solvent-Based Coating Technology. 2016; Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-323-37100-1.00014-4> pristupljeno 31.10.2021.
13. Talbert R. *Paint Technology Handbook*. Grand Rapids. Michigan. 2007
14. Rao G. *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*. 2006. Available from: www.icheme.org.
15. Solvents use in various industries. In: *Handbook of Solvents*. Elsevier; 2019. p. 901–1124.
16. Simion AI, Ionita I, Grigoras CG, Favier-Teodorescu LG, Gavrilă L. Development and optimization of water based paint formula in order to reduce VOCs emissions. *Environmental Engineering and Management Journal*. 2015;14(2):277–88.
17. Nolan DP. Fire pump arrangements at industrial facilities. *Fire Pump Arrangements at Industrial Facilities*. 2017 May 24;1–256.
18. Hensel priručnik; ; <https://www.scribd.com/document/399656022/1409-Presentation-Rudolf-Hensel-GmbH-and-Audax-Keck-GmbH-Gunther-Kech-AUDAX> pristupljeno 10.10.2021.

19. Schuch BS. priručnik; <https://docplayer.org/75648682-Brandschutz-spritzputzsysteme-fuer-tragende-bauteile.html>, pristupljeno 2.11.2021.
20. Fireproofing - The Use of Intumescent Paints For Fireproofing A Building! Available from: <https://fireproofing.page.tl/The-Use-of-Intumescent-Paints-For-Fireproofing-A-Building-ar-.htm> pristupljeno 27.10.2021.
21. Clark ES. Fire retardant coatings. Construction Specifier. 1975;28(5).
22. Huo S, Wang C, Hu Q, Liu S, Zhang Q, Liu Z. A facile strategy to fabricate an intumescent fire-retardant coating with improved fire resistance and water tolerance for steel structure. Journal of Coatings Technology and Research. 2020 Sep 1;17(5):1401–11.
23. Morgan AB, Gilman JW. An overview of flame retardancy of polymeric materials: Application, technology, and future directions. Vol. 37, Fire and Materials. 2013. p. 259–79.
24. Mngomezulu ME, John MJ, Jacobs V, Luyt AS. Review on flammability of biofibres and biocomposites. Vol. 111, Carbohydrate Polymers. Elsevier Ltd; 2014. p. 149–82.
25. Promat. Protupožarna zaštita nosivih čeličnih konstrukcija, priručnik; <https://www.promat.com/-/dam/pi12395/pi12395/original/protupožarna-zastita-nosivih-celicnih-konstrukcija-promat-prirucnik-hr-2020-04.pdf>, pristupljeno 3.11.2021.
26. Intumescent Coatings for advanced Passive Fire Protection, Hempel priručnik; http://www.nace-jubail.org/Meetings/HEMPACORE%20ONE_SSPC_April2014.pdf, pristupljeno 4.11.2021.
27. Hrvatsko društvo za zaštitu materijala. Available from: <http://www.hdzama.hr> pristupljeno 20.10.2021.
28. Skejić D, Odabir premaza sa aspekta proračuna čeličnih konstrukcija kod djelovanja požara. HUZOP seminar. Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2019. https://www.huzop.hr/wp-content/uploads/2019/06/HUZOP_Zg_2019_Skejic.pdf pristupljeno 20.10.2021.