POTREBA I RASPROSTRANJENOST CINKOVANJA ARMATURNOG ČELIKA U GRAĐEVINARSTVU

Izradila:
Dipl.hem Milica Jovanović,
rukovodilac tehnologije

U Inđiji:
Decembar 2013 god.

1. UVOD

Armiran beton je danas veoma važan materijal u savremenom građevinarstvu. Mostovi , tuneli i poslovne zgrade projektuju se tako da što bolje iskoriste prednosti armiranog betona. U većini slučajeva, čelik koji se koristi da ojača beton nema dodatnu zaštitu od korozije. Veoma bazni uticaj betona bi trebalo da osigura stvaranje tankog filma oksida na površini čelika koji ga štiti tj pasivira da ne dođe do korozije. Međutim, pod određenim okolnostima do pasivizacije ne dolazi ili ona nije odgovarajuća zbog:

- Nedostataka betona (naprsline, pukotine, džepovi šljunka, tanak ili neadekvatan sloj betona)
- Karbonacije betona (neutralizacija pod uticajem kiselih supstanci)
- Efekta hlorida (so za puteve, morska oblast)

Oštećenja na građevinama od armiranog betona rastu zbog visokog nivoa polutanata u vazduhu i upotrebe kamene soli za odleđivanje puteva i ona su mnogo rasprostranjenija nego što se ranije verovalo. Usled ovoga je nastao izraz „rak betona“ koji koriste i laici i stručnjaci.

Gubitak izdržljivosti i upotrebljivosti armiranog betona uzrokovanog korozijom armature je izuzetno skup i jedan je od glavnih razloga ranih popravki i sanacija, pa čak i rušenja betonskih konstrukcija pre nego što je dostignut njihov životni vek (30-50god). Brojeći štetne efekte korozije armature, koje uključuje pucanje izazvano korozijom , rđanje obojenih delova i druga oštećenja betonske mase, veliki je broj strategija koje se mogu koristiti za poboljšanje betona i zaštitu ugrađenog čelika. Jedna od strategija koja je u Americi u upotrebi još od 1930 god je cinkovanje armature betonskih konstrukcija izloženih različitim uslovima, koji variraju od vrlo blagih urbanih i seoskih područja do veoma agresivnih tropskih oblasti.

Tokom godina, sve je više dokaza iz laboratorjiskih ispitivanja i terenskih istraživanja koji pokazuju da cinkovanje čelične armature produžava radni vek mnogih vrsta armirano betonskih konstrukcija. Iako cena cinkovanja može udvostručiti cenu armature, stvarni troškovi zavise od osobine produkta koji se cinkuje, lokacije cinkare i dodatnog prevoza i manipulacije, tako da je ukupna cena za korišćenje cinkovane armature u betonu često manja od 10% ukupnih troškova betoniranja.

2. CINKOVANJE ČELIČNE ARMATURE

Jadna od najefikasnijih metoda zaštite armature od korozije je nanošenje prevlake na njenu površinu. Prevlake se dele u dve osnovne kategorije: metalne i nemetalne. Nemetalne prevlake kao što su epoksi premazi imaju sledeće nedostatke:

- Zaštitni film može se oštetiti veoma lako tokom transporta, savijanja i popravljanja čelika na skladištu ili tokom sipanja betona. U tom slučaju je čelik ispod ne zaštićen,
- Nestabilna veza između prevlake i betona.

Poređenje osobina između cinkovane armature i epoksi zaštićene armature dato je u tabeli 1.

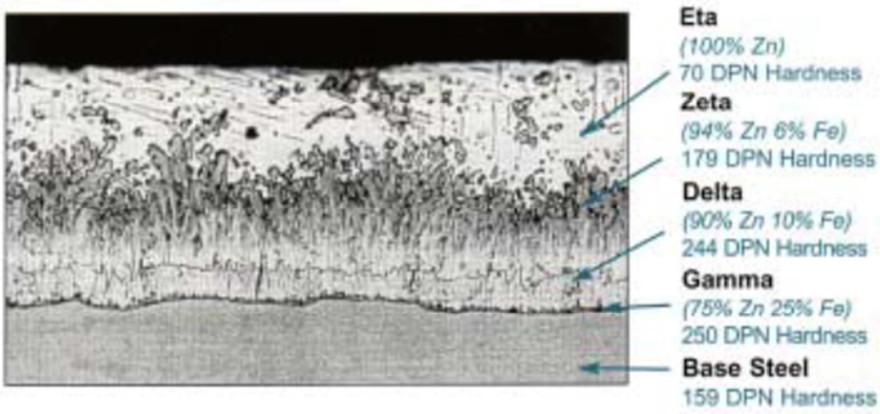
Cinkovana armatura	Osbine	Epoksi zaštićena armatura
Ne	Posebno rukovanje	Poželjno
Ne	Oštećenje od UV zraka	Da
Ne	Dorada nakon ugradnje	Da
Ne	Praznine / rupe	Da
Da	Izrada nakon zaštite	Da
Odlična	Veza sa betonom	Slaba
Ne	Korozija ispod nanosa	Da
Da	Katodna zaštita	Ne
Odlična	Otpornost prema abraziji	Slaba
Svi	Uslovi montaže	t>10 ^{0}C

Tabela 1.

Od metalnih prevlaka koje su dostupne, toplo cinkovanje se pokazalo kao najpovoljnije i tehnički najefikasnije.

Toplo cinkovanje potapanjem podrazumeva uranjanje čelične armature u rastopljeni cink na 450 ^{O}C i držanje dovoljno dugo da se razvije metalurška veza između čelika i prevlake koja predstavlja niz cink-gvožđe legura. Tipična mirkosturktura cinkovanog sloja data je na slici 1. Svaki sledeći sloj prevlake od čelika ka gore sadrži veći % Zn a Ɛ i δ sloj pevlake su nešto tvrđi od osnovnog čelika. Ova osobina u kombinaciji sa dobrim prianjanjem prevlake daje dobre abrazione osobine prevlake kao i dobru otpornost na udarce.

Čelična armatura treba da bude cinkovana u skladu sa standardom za toplo cinkovanje ISO 1461.



Slika 1. Prevlaka cinka

Toplo cinkovanje čelika koji se koristi kao aramtura betona je već godinama veoma zastupljeno u Velikoj Britaniji i na drugim mestima širom sveta. Čak u teškim uslovima (sa osetljivim konstrukicjama čelika i sa visokim nivoom korozije) toplo cinkovanje čelika za armirani beton pokazalo se kao veoma pouzdano. Proučavanje u Australiji i drugim zemljama dovele su do povećanja upuotrebe i popularnosti toplog cinkovanja čelika za armirani beton kao mere za zaštitu armature i armaturnih mreža. Prednosti koje slede su izuzetno značajne:

- Pruža zaštitu osnovnom čeliku i na taj način izbegava lokalnu koroziju kada prevlaka puca zbog sečenja krajeva ili mehaničkih oštećenja,
- Prevlaka na čeliku unutar betona ostaje pasivna pod dugoročnim uslovima skladištenja i transporta,
- Veza između armature i betona je stabilna,
- Mnogo je manja šansa da se dogodi cepanje betona u poređenju sa mogućim cepanjem betona od nezaštićene armature,
- Skoro je eliminisan rizik od pojave braon fleka koje potiču od nezaštićene aramture,
- Bolje podnosi greške koje utiču na kvalitet betona na pr loše mešanje ili neodgovarajući odnos vode i cementa,
- Debljina sloja betona (dubina na kojoj je armatura) mnogo manje utiče na cinkovanu armaturu nego na armaturu od necinkovanog čelika,
- Cinkovana armatura bolje podnosi neočekivane probleme prilikom izgradnje koji uzrokuju stalni kontakt između betona i zarobljene vode,
- Tolerancija cinkovanog čelika na napad jona hlorida je mnogo veća od necinkovanog čelika.

2.1. Manipulacija i naknadna obrada cinkovanih armatura

Toplo cinkovanje daje prevlaku na čeliku koja veoma dobro prijanja na njegovu površinu i koja je otporna na abraziju i mehanička oštećenja pa se rukovanje i transport ne razlikuju od onog sa crnim čelikom. Osim opštih smernica za savijanje i manipulaciju cinkovanog čelika nema posebnih zahteva za zaštitu od lakših mehaničkih oštećenja. Prilikom projektovanja i izgradnje armiranog betona u kojima je korišćena cinkovana armatura važe isti projektni parametri i građevinska praksa koji se koriste za ojačanje kada se koristi konvencionalni crni čelik u armaturi.

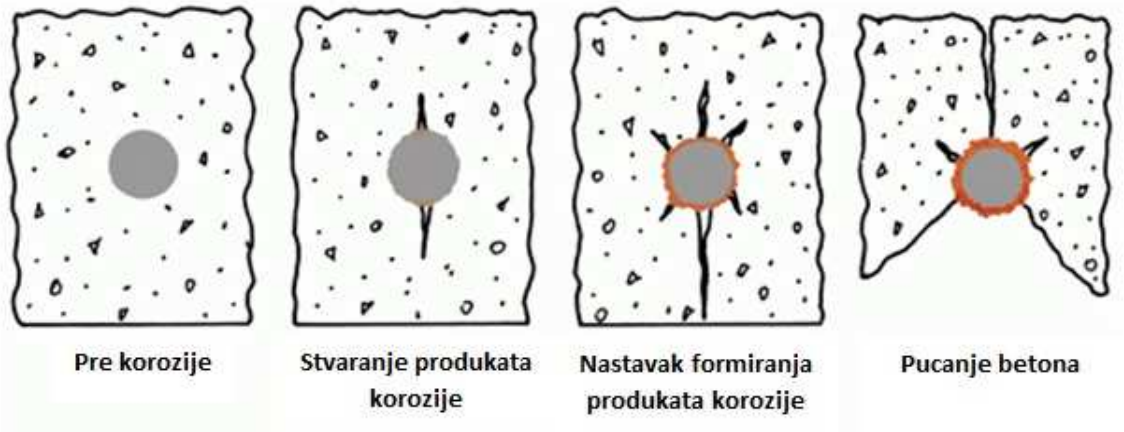
Generalno najekonomičnije je da se obrađivanje armature na pravu dužinu radi posle toplog cinkovanja. Tokom proizvodnje tendencija za pucanje i ljuštenje prevlake na području savijanja raste sa prečnikom i jačinom armaturnog gvožđa kao i sa uglom savijanja. Korišćenjem većih prečnika krivina, obično 5-8puta većiim od prečnika šipke, možemo minimalizovati oštećenja prevlake. Neka pucanja i ljuštenja prevlake prilikom savijanja nisu neuobičajena, i ne bi trebalo da budu razlog za odbijanje ako je oštećenje u skladu sa specifikacijom. U koliko je potrebna popravka koristi se organska boja bogata cinkom.

Kao alteranativa za naknadnu obradu posle cinkovanja, može biti cinkovanje sklopova (cevi savijene u posebne oblike, kavezi i slično). Ova alternativa nudi malu prednost nad mogućim oštećenjima prevlake koje su uzrokovane naknadnom obradom. Teškoće sa obeležavanjem, rukovanjem i transportom montažnih komada, kao i moguće kašnjenje isporuke, čine ovu opciju nešto skupljom.

3. CINK U BETONU

Beton je veoma kompleksan materijal i zbog upotrebe različitih vrsta betona u građevini hemijske, fizičke i mehaničke osobine betona i njihov odnos sa metalom je veoma bitan. Otpornost prema koroziji metala koji se ugrađuju u beton je veoma važna da bi se održala strukturalna celovitost betona.

Kako je beton porozan materijal, korozivni elementi kao što su voda, hloridni joni, kiseonik, ugljen dioksid i drugi mogu da prodiru u beton i samim tim dođu do čelika u koliko je nezaštićen. Kada je koncentracija jednog od ovih elementa dovoljno visoka da prelazi prag korozije, čelik u betonu počinje da korodira. Kako čelik korodira, njegovi voluminozni produkti korozije stvaraju pritisak i dolazi do pucanja ili drugih oštećenja betona.



Slika 2. Pucanje betona usled korozije nezaštićenog čelika

Zaštita armature od korozije dobijena cinkovanjem konbinovana je sa dva efekta: mnogo veći prag hlorida od cnog čelika u betonu i potpuna otpornost na efekat karbonacije betona. Prisustvo zaštitne cinkove prevlake odlaže početak procesa korozije, iako stepen korozije zavisi od kvaliteta betona i intenziteta izloženosti. Kada se vrlo visok nivo hlorida koncentriše u betonu, što se događa u betonu izloženom morskoj klimi, životni vek cinkove prevlake se može smanjiti. Važno je ipak napomenuti, da će životni vek cinkovane armature u ovakvim uslovima svakako biti i dalje duži nego kod crnog čelika u istim uslovima sredine u kojima se beton nalazi.

Slika 3. Korozija nezaštićenog čelika u betonu

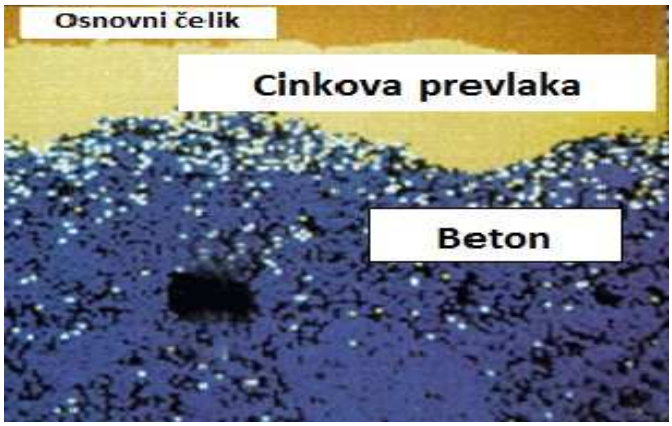
Značajni napori su uloženi da se identifikuje priroda korozije cinka i uticaj ovih proizvoda korozije na sastav betona. Brojni minerali su identifikovani kao proizvodi korozije cinka uključujući cink oksid ZnO_2 i cink hidroksid $Zn(OH)_2$. Jedinstvena odlika ovih proizvoda korozije je da su trošni (rastresiti) minerali i oni migriraju od armature unutrašnjosti betona gde popunjavaju praznine i mikro pukotine. Rezultat ove migracije je takav da ovi proizvodi korozije cinka izazivaju veoma male poremećaje u strukturi betona što pomaže održavanju integriteta betona. Ovakvo ponašanje je suprotno onom kada se nađe crni čelik u betonu tj njegovi produkti korozije. Produkti korozije čelika su veoma voluminozni i skupljaju se na dodirnoj površini čelik beton što povećava unutrašnji napon betona i dovodi do pucanja.

3.1. Uticaj hloridnih jona

Uticaj hloridnih jona na cinkovan čelik je široko razmatran. Nedavno su rađene studije poređenja brzine korozije u betonu kontaminiranom hloridima između cinkovanih armatura i armatura od osnovnog čelika. Pod identičnim uslovima izloženosti, cinkovana armatura je otpornija najmanje 2,5 puta na nivo hlorida i odlaže vreme pojave korozije čelika 4-5 puta. Ovakvi rezultati su se potvrdili i u drugim istraživanjima gde je pokazano da cinkovana armatura ima veći prag prema hloridima i odloženu pojavu korozije u odnosu na osnovni čelik.

3.2. Fizičko hemijske karakteristike produkata korozije

Pored visoke tolerancije na hloride, veoma je važno to što su produkti korozije cinka mnogo manje voluminozni od produkata korozije čelika. Ovi manje voluminozni produkti korozije migriraju od cinkovanog čelika ka unutrašnjosti betona pri čemu se raspoređuju u porama betona što dovodi do smanjenja pritiska u betonu za razliku od onog pritiska koji stvaraju produkti korozije čelika. Zbog toga je pucanje i raspadanje betona znatno smanjeno u koliko se koristi cinkovana armatura.



Slika 4. Izgled cinkovane armature u betonu

3.3. Uticaj pH

Cink je anfoteran materijal koji raguje i sa jako kiselim i sa jako baznim rastvorima, reakcija počinje na pH vrednostima ispod 6 i iznad 13. Na pH vrednostima koje su između ove dve, brzina reakcije cinka sa sredinom je jako spora zbog stvaranja zaštitnog površinskog sloja. Kada je cink ugrađen u beton, on je pasiviran u opsegu od 8 do 12,5 takođe zbog formiranja zaštitinog sloja koji je nerastvoran na pH vrednostima ispod 12,5. Cink reaguje sa vlažnim cementom i formira se zaštitini sloj hidroksicinkata. Reakcija prestaje kada se beton stvrdne ali ovaj sloj u buduće pruža značajnu zaštitu od baznog uticaja betona (zbog prisustva $Ca(OH)_2$ koji popunjava pore).

Korozija čelika u betonu je obično izazvana prirodnim smanjenjem pH vrednosti betona tako što kroz pore prolazi kiseo gas kao što je CO_2 (efekat karbonacije) i / ili prisustvom hloridnih jona iznad graničnih vrednosti u dubini betona gde se armatura nalazi. Hloridi se akomuliraju u betonu zbog soli koje ulaze u sastav betona, zbog izloženosti morskoj sredini ili podzemnim vodama, kao i korišćenjem soli naročito u snežnim područjima. Dok je crni čelik u betonu obično depasiviran ispod pH 11,5 (ili većoj u prisustvu horida) što dovodi do pojave korozije, cink ostaje pasiviran do pH 9,5 i time daje značajnu zaštitu protiv efekta karbonacije unutar betona.

3.4. Mehanizam reakcije

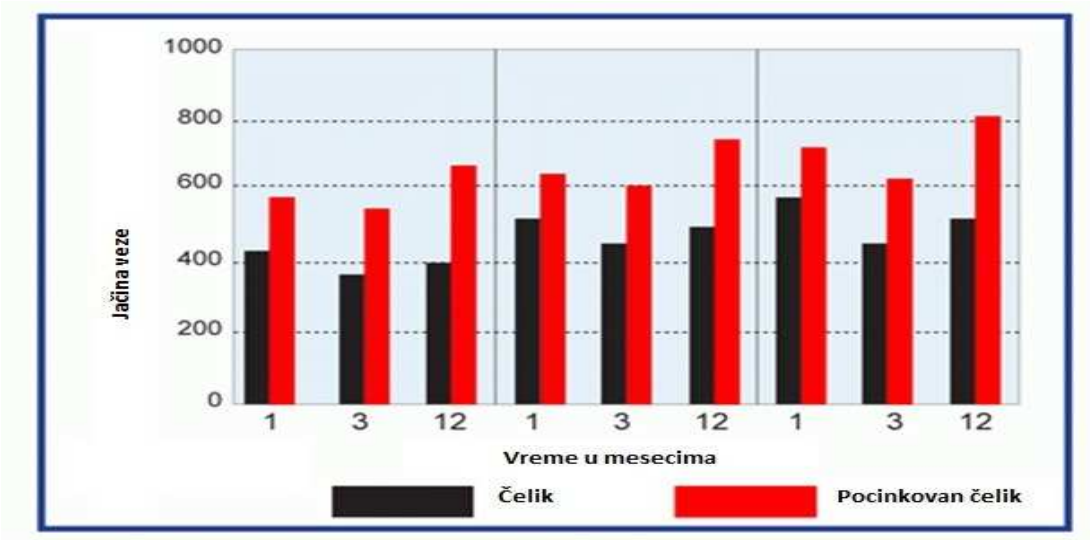
Tokom očvršavanja betona površina pocinkovanog čelika raguje sa baznim betonom formirajući stabilne cinkove soli koje su nerastvorne pri čemu se prilikom ove reakcije izdvaja vodonik. Teorijski gledano, postoji opasnost da se nakon rekcije poveća krtost čelika usled apsorpcije vodonika. Laboratorijska ispitivanja su pokazala da oslobođeni vodonik ne prolazi kroz cinkovu pravlaku do osnovnog čelika jer se reakcija završava čim se beton stvrdne (najviše 6 do 10 dana) tako da nema opasnosti po osnovni čelik jer se tokom ove rekcije potroši najviše 10µm cinkove prevlake na stvaranje kompleksa:

$$\mathbf{2\,Zn + Ca(OH)_2 + 6H_2O \rightarrow Ca[\,Zn\,(OH)_2]\ x\ 2H_2O + H_2}$$

Ova rekcija koja se odigrava na površini pocinkovane prevlake u svežem betonu može biti kontrolisana prisustvom hromatnog jona ($CrO_4^{\ 2-}$). Količina od 100-200ppm hromata u betonu ili 50-100ppm Cr^{6+} je dovoljna da inhibira ovu reakciju. Jedno od rešenja kojim bi se eliminisalo stvaranje vodonika tokom rekcije je korišćenje betona u čiju vodu se kao aditiv tokom mešanja stavlja kalijum dihromat a drugo rešenje može biti da se ovakva cinkovana površina pasivira u pasivatoru na bazi šestovalentnog hroma pre stavljanja u beton.

3.5. Jačina veze

Jačina veze između betona i cinkove prevlake je odlična. Međutim obično je potrebno više vremena da se ona razvije od veze između ne zaštićenog čelika i betona što zavisi od uticaja sredine odnosno sastava betona.



Slika 5.

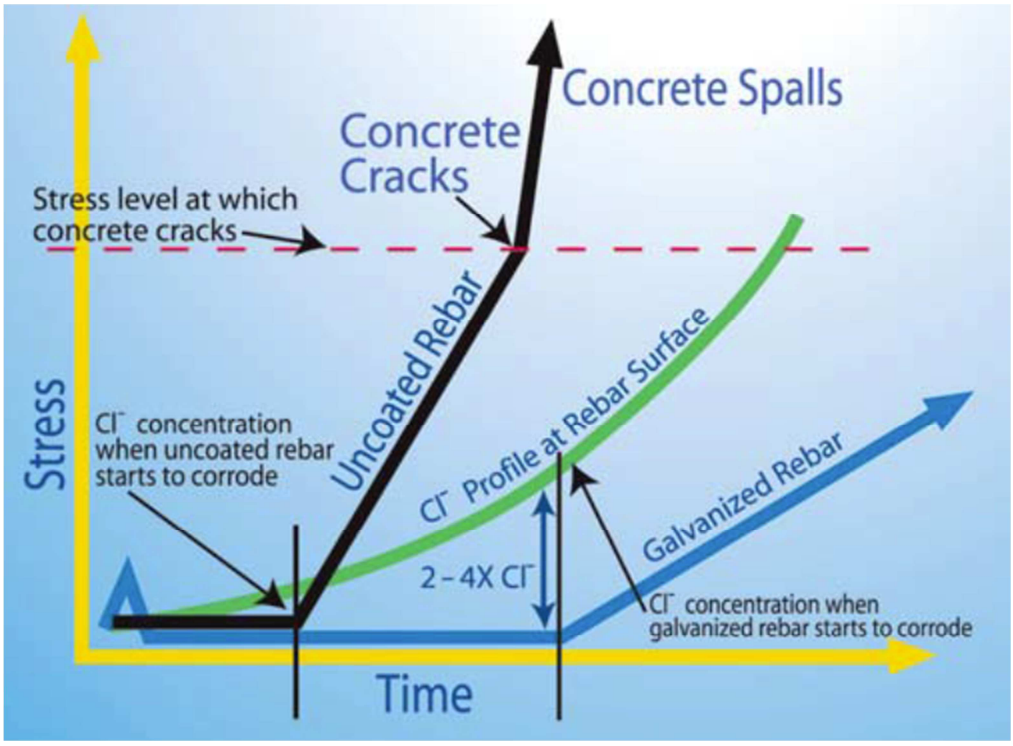
Sa slike 5 se vidi da kako vreme prolazi jačina veze između betona i cinkovanog čelika raste u odnosu na jačinu veze između betona i čelika. Data su poređenja između tri odvojena nezavisna istraživanja u kojima je sastav betona bio različit.

Veza između cinkovane armature i betona je u stvari jača od veze između nezaštićene armature i betona ili armature premazane epoksidom i betona.

4. ŽIVOTNI VEK CINKOVE PREVLAKE U BETONU

Životni vek cinkove prevlake u betonu jednak je vremenu koje je potrebno da se potroši zaštitna prevlaka na cinkovoj prevlaci (što je pet puta duže od osnovnog čelika zbog visoke tolerancije na hloride) a nakon toga i vremenu da se potroši cinkova prevlaka. Tek kada se potpuno potroši cinkova prevlaka počeće korozija. Gubitak cinkove prevlake u ovakvim uslovima je obično 2 µm/godišnje a može ići i do 5 µm/godišnje u jako baznim betonima. Generalno, korozija čelika u betonu je obično prouzrokovana prirodnim smanjenjem pH vrednosti betona zbog reakcije sa kiselim gasovima iz atmosfere i/ili prisustvom hloridnih jona iznad graničnih vrednosti.

Na grafiku 1. se može videti poređenje između životnog veka ne cinkovane i cinkovane armature.



Grafik 1.

Legenda:

Time – vreme; **Stress** – pritisak; **concrete craks** – pucanje betona; **stress level at which concrete craks** – pritisak na kom beton puca; **concrete spalls** – pukotine betona; **uncoated rebar** – necinkovana armatura; **galvanized rebar** – cinkovana armatura; **Cl concentration when uncoated rebar starts to corrode** – koncentracija hlorida na kojoj počinje korozije; **Cl concentration when galvanized rebar starts to corrode** – koncentracija hlorida na kojoj počinje da korodidra cinkovana armatura; **Cl profile at rabar surface** – koncentracija hlorida na površini armature.

Ovaj grafik pokazuje životni vek betona odnosno koroziju ugrađene armature u zavisnosti od koncentracije hloridnih jona. Korozija armature može biti opisana u tri nivoa: iniciranje, zaštita, širenje.

Iniciranje - Vreme koje je potrebno da hloridi prodru u beton i da se akomuliraju na površini armature do koncentracije koja će izazvati koroziju. Prag hlorida koja će izazvati koroziju je različit i zavisi od materijala od kog je aramturura napravljena. Kod pocinkvane aramture je ovaj prag veći 2 do 4 puta u poređenju sa nepocinkovanom armaturom.

Zaštita - Kada se prag hlorida dostigne, necinkovana armatura ulazi u fazu aktivne korozije, a kod cinkovane armature cink prevlaka obezbeđuje zaštitu osnovnog čelika.

Širenje - Pritisak raste u betonu kada se razviju proizvodi korozije na necinkovanoj aramturi. Kada ovaj pritisak pređe zateznu čvrstoću betona, beton će pući i dozvoliti dodatno prodiranje hlorida u beton. Produkti korozije cinkovane armature izazivaju bezopasan pritisak koji se širi od površine armature ka unutrašnjosti betona, raspoređujući se u šupljine i pukotine koje su već postojale u betonu. Manje voluminozni produkti korozije cinkovane armature omogućuju zaštitu od korozije i obezbeđuju celovitost betona.

5. PRIMENA CINKOVANIH ARMATURA

Obrazloženje za korišćenje cinkovanih armatura u betonu zasniva se na činjenici da cinkova prevlaka obezbeđuje zaštitu od prerane korozije armature. Sama prevlaka ne treba da bude jedino sredstvo za zaštitu od korozije, već je treba koristiti u kombinaciji sa adekvatnim gustim nepropusnim betonom čija sturktura odgovara uslovima sredine u kojima će se beton nalaziti. Sigurno je da se dodatno plaća za dodatnu zaštitu koja obezbeđuje betonsku masu, ali je prednost u tome da se izbegnu prerane popravke i sanacije značajna.

Širom sveta uspešno se koriste cinkovane armature za razne tipove građevina sa ojačanim betonom:

- Palube, stubovi mostova, trotoari, bankine
- Mostovi i autoputevi uz obalu
- Dimnjaci, tornjevi za hlađenje
- Tuneli, rezervoari za vodu, postrojenja za tretman vode
- Dokovi, platforme na otvorenom moru
- Postrojenja vodovoda i kanalizacije kao i postrojenja izložena podzemnim vodama i plimi i oseci
- Hemijska postrojenja

U Evropi i Americi postoje standardi koji se koriste za čelik za armiranje betona koji treba da bude toplo cinkovan (EN 10348 Steel for the reinforcement of concrete –Galvanized reinforcing steel; EN 10080 Steel for the reinforcement of concrete – Weldable reinforcing steel – General; ASTM A 767 Specification for Zinc-Coated (Galvanized) Steel Bars for Concrete Reinforcement).

U nastavku su primeri korišćenja cinkovane armature u betonu sirom Sveta.

Toplo cinkovane armature se intenzivno koriste od 1950 godine. Jedna od prvih primena cinkovane armature je na mostu na Bermudskim ostrvima 1953 god. Ova sredina je poznata kao izuzetno korozivna i prilikom uzimanja uzoraka nakon 42 godine nivo hlorida oko cinkovane armature je bio 4,3kg/m^2 (što je šest puta više od količine potrebne za koroziju crnog čelika) a stanje cinkovane armature je bilo takvo da se moglo reći da je novo cinkovana.

Tokom osamdesetih godina smatrano je da je problem korozije armature na mostovima u Američkoj državi Njujork rešen korišćenjem armature koja je imala epoksi zaštitu. Vrlo brzo pojavile su se sumnje jer su se nakon 4 godine od montaže počele pojavljivati pukotine na mostovima, posle čega je odlučeno da se koriste isključivo toplo cinkovane armature prilikom izgradnje mostova.
Toplo cinkovane armature koristile su se prilikom izgradnje mostova u Floridi, Pensilvaniji, Mičegenu, Vermontu.... Godinama kasanije mostovi su pregledani da bi se odredile krakteristike cinkovane armature i predvideo životni vek mostova. Ustanovljeno je na osnovu izmerenih debljina cinkove prevlake da je toplo cinkovana zaštita sposobna da obezbedni životni vek još najmanje 50 godina nakon provere.

Most	Godina montaže	Godina pregleda	Debljina cinkove prevlake
Boca Chica Bridge, FL	1972	1999	170µm
Tioga Bridge, PA	1974	2001	198µm
Curtis Road Bridge, MI	1976	2002	155µm
Spring Street Bridge, VT	1971	2002	190µm

Nova zgrada parlamenta – Canberra

Oblaganje panela – Sydney

Marina – Queensland

Postrojenje za tretman optada

6. EKONOMIČNOST CINKOVANJA ARMATURE

Kada se analiziraju posledice i troškovi oštećenja nastalih korozijom u odnosu na ranjivost armiranog betona, dodatni troškovi cinkovanja armature su mali. Cinkovanje armature se može posmatrati kao dodatni trošak ali trošak koji je nizak i koji se plaća samo jedanput.

Iako cena cinkovanja može udvostručiti cenu armature, stvarni troškovi zavise od osobine produkta koji se cinkuje, lokacije cinkare i dodatnog prevoza i manipulacije, tako da je ukupna cena za korišćenje cinkovane armature u betonu često manja od 10% ukupnih troškova betoniranja. Ovi troškovi se zančajno smanjuju na zgradama i velikim građevinama, gde su troškovi ostalih usluga (opštih usluga i alata) značajni u odnosu na ukupne troškove projekta.

Cinkovana armatura je pouzdana osnova za dobru tehnologiju betoniranja i čini jak i isplativ udeo u životnom veku betona.

Sposobnost cinkovanja da zastiti armaturu od korozije je potrvđeno iskustvom mnogih zemalja. Kada se analiziraju troškovi i posledice štete nastale usled korozije, trošovi cinkovanja armature su u potpunosti opravdani.