

doi: 10.67563/ASESCONF2026079U

Nikola Uzunov¹, Ivan Ignjatović²

EFFECTS OF REPAIR AND PROTECTION PRODUCTS ON THE CARBONATION RESISTANCE OF CONCRETE

Summary: This study presents a comparative analysis of the effects of different types of protective coatings on the carbonation resistance of structural concrete. The results are based on a series of laboratory tests conducted on concrete specimens exposed to accelerated carbonation in accordance with SRPS EN 12390-12:2010, *Testing hardened concrete – Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete – Accelerated carbonation method*. The concrete specimens were treated with different types of protective coatings based on silane, acrylic resin and epoxy resin. The carbonation depths measured after exposure were compared with those of unprotected reference specimens, thereby allowing the effectiveness of each protective coating to be evaluated. In addition, different cement- and polymer-based repair mortars were tested to assess the carbonation resistance of repaired reinforced concrete structures. The laboratory tests were conducted at the Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade. All repair and protection products used in the study were manufactured by Ading.

Keywords: carbonation, durability of structures, concrete, protection coatings

EFEKTI PRIMENE PROIZVODA ZA SANACIJU I ZAŠTITU AB KONSTRUKCIJA NA KARBONATIZACIONU OTPORNOST BETONA

Rezime: U radu je prikazana uporedna analiza efikasnosti različitih vrsta premaza namenjenih zaštiti armiranobetonskih konstrukcija od karbonatizacije. Rezultati su zasnovani na seriji laboratorijskih ispitivanja uzoraka betona izloženih ubrzanoj karbonatizaciji, sprovedenih u skladu sa standardom SRPS EN 12390-12:2010, *Ispitivanje očvrslag betona – Deo 12: Određivanje otpornosti betona na karbonatizaciju – Metoda ubrzane karbonatizacije*. Ispitivani uzorci betona zaštićeni su različitim vrstama zaštitnih premaza na bazi silana, akrilne smole i epoksidne smole. Dubine karbonatizacije izmerene nakon izlaganja upoređene su sa dubinama karbonatizacije referentnih, nezaštićenih uzoraka istog betona, na osnovu čega je ocenjena efikasnost primenjenih zaštitnih premaza. Dodatno, ispitana je otpornost na karbonatizaciju različitih vrsta sanacionih maltera na bazi cementa i polimera. Laboratorijska ispitivanja sprovedena su na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu, a primenjeni zaštitni i sanacioni materijali proizvodi su kompanije Ading.

Ključne reči: karbonatizacija, trajnost konstrukcija, beton, zaštitni premazi

¹ ADING AD Skopje, Republic North Macedonia, uzunov@ading.com.mk

² Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, Serbia

1. UVOD

Svi građevinski objekti, u zavisnosti od njihove namene i mikrolokacije, tokom eksploatacije izloženi su različitim štetnim uticajima sredine u kojoj su izgrađeni. Jedan od najčešćih uticaja koji mogu ugroziti trajnost armiranobetonskih konstrukcija jeste karbonatizacija betona. Ovaj proces nastaje prodiranjem ugljen-dioksida (CO_2) iz okolne sredine u beton i njegovom reakcijom sa produktima hidratacije cementa, pri odgovarajućem nivou vlažnosti betona. Posledica karbonatizacije je smanjenje pH vrednosti betona, od 12,5 na približno 8,8. U sredini gde je pH vrednost manja od 11, dolazi do gubitka pasivne zaštite armature i stvaranja uslova korozioni proces.

Ukoliko armiranobetonska konstrukcija nije projektovana i izvedena tako da poseduje odgovarajuću otpornost na karbonatizaciju, svojstva betona i armature mogu se tokom vremena postepeno pogoršavati. Ako se ne preduzmu odgovarajuće mere zaštite i sanacije, dugotrajno odvijanje procesa karbonatizacije i posledična korozija armature mogu ugroziti trajnost i upotrebljivost objekta, a u podmakloj fazi i nosivost i sigurnost armiranobetonske konstrukcije, slika 1.



Slika 1: Efekti karbonatizacije betona na realnim konstrukcijama

Evropski standard za beton *SRPS EN 206-1 Beton: specifikacija, tehničke karakteristike, proizvodnja i usaglašavanje*, definiše 4 klase izloženosti betonskih konstrukcija na karbonatizaciju, u zavisnosti od stepena i tipa vlažnosti sredine, tabela 1:

Tabela 1: Klase izloženosti karbonatizaciji

Klasa izloženosti	Primeri konstrukcija
XC1 – Suva ili trajno vlažna sredina	Beton trajno potopljen, objekti u sredini sa niskom vlažnošću
XC2 – Vlažna sredina, retko suva	Temeljne konstrukcije
XC3 – Umereno vlažna sredina	Spoljne betonske površine, zaštićene od kiše
XC4 – Ciklično vlažna sredina	Horizontalne AB površine izložene atmosferskim uticajima, trotoari, parkirališta

U okviru istog standarda date su i preporuke za dizajn betona u zavisnosti od toga u kojoj je klasi izloženosti kategorizovan. Ove preporuke definišu minimalne uslove za projektovanje betona koje uključuju: minimalnu čvrstoću betona, minimalna količina cementa, maksimalni W/C-faktor, tabela 2.

Tabela 2: Preporuke EN 206-1 za projektovanje sastava betona

Klasa izloženosti betona na karbonatizaciju	XC1	XC2	XC3	XC4
Minimalna klasa čvrstoće betona	C20/25	C25/30	C30/37	C30/37
Minimalna količina cementa	260 kg/m ³	280 kg/m ³	280 kg/m ³	300 kg/m ³
Maksimalni W/C-faktor	0,66	0,6	0,55	0,5

2. ODREĐIVANJE DUBINE KARBONATIZACIJE

Dubina karbonitizacije očvrslog betona u ugrađenog u već postojeće konstrukcije najčešće se ispituje korišćenjem indikatora *Fenolftaleina*, koji u slučaju kada je pH vrednost betona iznad 9 daje ljubičastu boju. Ispitivanje se vrši prema standardu *SRPS EN 14630 Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method*, a globalni cilj ispitivanja je da se utvrdi da li postoji rizik pojavljivanja korozije armature. Metoda ispitivanja može da se primeni na laboratorijski pripremljenim uzorcima izloženim ubrzanom karbonatizaciji ili na terenu, gde se ispituju uzorci uzeti direktno iz konstrukcije. Tipično, ispitivanje se vrši na način što uzorak betona (kocka, cilindar ili kern) “cepi” po sredini, čisti se i prska rastvorom fenolftaleina. Uobičajeno, promena boje javlja se u roku od 30 sekundi. Dubina karbonitizacije je rastojanje od površine betona do purpurne zone (meri se u standardom definisanom broju tačaka po svakoj strani i računa srednja vrednost). Samo beton koji je izrazito purpurno obojen omogućava adekvatnu zaštitu armature. Terensko ispitivanje karbonatizacije betona može se izvesti i olamanjem ivice betona čekićem i potom nanošenjem rastvora, slika 2.



Slika 2: Terensko ispitivanje dubine karbonatizacije betona

3. ODREĐIVANJE OTPOROSTI BETONA NA KARBONATIZACIJU PREMA STANDARDU EN 12390-12:2010 – METODA UBRZANE KARBONATIZACIJE – OPIS STANDARDA I METODA

Karbonatizacija betona je dugotrajni proces i najčešće su potrebne godine (i decenije) da bi se karbonatizovao ceo zaštitni sloj i da počne korozija armature. Dodatno, na površini betona nema nikakvih vidljivih indikacija karbonizacije sve dok korozija armature ne postane toliko intenzivna da nastali produkti korozije (rđa) koja ekspandiraju ne probiju na površini (pritom formirajući prsline u zaštitnom sloju betona) – a tada je već kasno i potrebno je da se izvrši konstruktivna sanacija AB konstrukcije.

Da bi se odredila otpornost određenog tipa betona na karbonatizaciju nakon proizvodnje primenjuje se metoda SRPS EN 12390-12 – Metoda Ubrzane Karbonatizacije (*Testing hardened concrete - Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete - Accelerated carbonation method*).

Metoda Ubrzane Karbonizacije se bazira na izlaganju uzoraka očvrslog betona u kontrolisanim (laboratoriskim) uslovima konstantne temperature, vlage i povećane koncentracije CO₂ (T=20±2°C; RH=57±3%; CO₂=3%). Vreme trajanje izlaganja iznosi 70 dana, a dubina karbonizacije uzoraka se ispituje fenoftaleinom nakon 14, 28, 56, 70 dana.

Na bazi dobijenih rezultata može da se predvidi adekvatna debljina zaštitnog sloja betona ili primena zaštitnih premaza koje sprečavaju karbonatizaciju betona.

4. PRINCIPI-METODE ZA ZAŠTITU BETONA OD DEJSTVO KARBONATIZACIJE PREMA STANDARDU EN 1504-2

Osnovni principi i metode površinske zaštite betona definisani su evropskim standardom za zaštitu i sanaciju betona SRPS EN 1504 *Products and systems for the protection and repair of concrete structures*.

Uobičajeno, za zaštitu AB konstrukcija izloženih dejstvu karbonatizacije primenjuju se tri Metode:

- Hidrofobna Impregnacija – Tretman betona kojim se dobija vodo-odbojna i paropropusna površina; istovremeno, izgled površine se ne menja; često se koristi kao prajmer za druge zaštitne premaze ili za zaštitu kulturno-istorijskih spomenika. (Odgovara Principima zaštite 1,2,8)
- Impregnacija – Tretman za poboljšavanje fizičko-mehaničke i hemijske otpornosti betonske podloge; koristi se za obradu industriskih podova; površina impregniranog betona dobija sjajni izgled
- Premazivanje / Oblaganje – Formiranje kontinuiranog neprekidnog zaštitnog sloja na površini betona; štiti beton od prodora vlage i agresivnih materija; povećava fizičko-mehaničku otpornost podloge; štiti betonsku površinu od dejstva hemijske agresije

Navedene Metode odgovaraju na sledeće Principe zaštite betonskih konstrukcija (prema EN 1504): Princip 1: Zaštita od prodiranja, Princip 2: Zaštita od vlage, Princip 5: Poboljšanje – ojačanje površine, Princip 6: Zaštita od hemijske agresije, Princip 8: Povećanje električne otpornosti preko limitiranja vlažnosti.

Dodatno, posledica karbonatizacije – započeta korozija armature, može da se uspori ili blokira primenom Inhibitora Korozije - nisko-viskozni materijal koji se nanosi na površinu očvrslog novog ili starog betona, prodire u strukturu betona i dolazi u kontakt sa čeličnom armaturom na koju formira površinski zaštitni sloj koji sprečava proces korozije. Prema standardu SRPS EN 1504, ovi proizvodi odgovaraju Principu 11 *Kontrola anodnih površina*, Metoda 11.3 *Aplikacija inhibitora korozije na površini betona*. Inhibitori korozije obično se primenjuju za sanaciju i zaštitu već postojećih konstrukcija koje su afektirane karbonatizacijom. Inhibitori korozije se koriste u kombinaciji sa drugim premazima kao deo sistema za zaštitu betona od karbonizacije.

5. LABORATORISKA ISPITIVANJA PREMAZA ZA ZAŠTITU BETONA OD KARBONATIZACIJE

Sa ciljem da se utvrdi efikasnost različitih tipova premaza za zaštitu betona od karbonatizacije, na Građevinskom fakultetu u Beogradu izvršena je serija laboratoriskih ispitivanja betona izloženog Ubrzanoj Karbonatizaciji (prema standardu: SRPS EN 12390-12:2010 *Ispitivanje očvrslog betona, deo 12: Određivanje otpornosti betona na karbonatizaciju – Metoda ubrzane karbonatizacije*). Ispitivani uzorci betona su bili zaštićeni različitim tipovima zaštitnih premaza na bazi Silana, Akrilne i Epoksidne smole. Dobijeni rezultati izmerene dubine karbonatizacije

nakon izlaganja betona su upoređeni sa etalonom (uzorkom istog betona koji nije bio zaštićen) i tako je ocenjena efikasnost zaštitnog premaza.

5.1. PLAN I TOK ISPITIVANJA

Sa ciljem da efekti karbonatizacije (odnosno efikasnost zaštitnog premaza) budu što jasniji, primenjen je beton relativno niskih performansi (kakav se ponekad javja kod starijih infrastrukturnih i drugih objekata). Klasa čvrstoće betona je C25/30, a srednja utvrđena čvrstoća betona na 28 dana iznosi $(28,13 + 30,37)/2 = 29,25$ MPa.

Svi uzorci betona su uzeti iz istog mešunga, ugrađeni (slika 3) i čuvani u istim uslovima (prema standardu SRPS EN 12390-12). Beton je ugrađen u 14 prizmi dimenzija 100x100x400mm koje su nakon vađenja iz kalupa čuvane u vodi narednih 28 dana. Nakon 28 dana, po 3 uzorka betona su premazani različnim tipovima zaštitnih premaza:

Etalon – Beton bez zaštite

Fasil V – Hidrofobna Impregnacija (Hydrophobic Impregnation) na bazi Silana

Antikoroziin BB – Zaštitni premaz (*Coating*) na bazi akrilne smole (vodo-rastvorivi)

Adingpoks Akva 1B – Zaštitni premaz (*Coating*) na bazi epoksidne smole (vodo-rastvorivi)

Preostla 2 uzoraka betona su (nezaštićeni) bili izloženi ubrzanoj karbonatizaciji u periodu od 28 dana, nakon čega je izmerena dubina karbonatizacije i polovina svakog uzorka je premazana zaštitnim premazom Antikoroziin BB, odnosno Adingpoks Akva 1B, slika 3 desno. Ovakvi uzorci su ponovo vraćeni u komoru za karbonatizaciju i ispitani nakon ukupno 56 i 70 dana izloženosti, odnosno nakon dodatnih 28 i 42 dana od trenutka nanošenja premaza. Na ovaj način, laboratorijski je simulirana sanacija objekata, gde se AB konstrukcije saniraju i štite nakon više godina izloženosti. Cilj je da se utvrdi da li ovako nanescena zaštita konstrukcije, ima efekat usporavanja ili blokiranja daljeg procesa karbonatizacije.



Slika 3: Pripremanje betonskih uzoraka za ispitivanje (levo i u sredini) i Aplikacija zaštitnih premaza (desno)

5.2. REZULTATI ISPITIVANJA

Kod ovako pripremljenih uzoraka betona, progresija karbonatizacije je praćena u periodu od 70 dana izloženosti, pri čemu su merenja dubine prodora karbonatizacije vršena fenofaleinskim testom nakon 14, 28, 56, 70 dana. Merenja su vršena na uzorkom betona širine ~5cm, koji je odlomljen od pripremljenih betonskih prizmi. Rezultati ispitivanja ukazuju da:

Etalon – Očekivano je zabeležen kontinuirani prirast karbonatizacije koja nakon 70 dana izloženosti dostiže dubinu od 13,7 mm (srednja vrednost)

Fasil V – Prvih 28 dana nakon izlaganja ubrzanoj karbonatizaciji hidrofobni impregnatori štite beton, nakon čega se njihov efekat smanjuje. Dubina karbonatizacije nakon 70 dana izloženosti dostiže dubinu od 11,7 mm

Antikorozin BB – Daje skoro apsolutnu zaštitu od karbonatizacije, nakon 70 dana izloženosti dubina karbonatizacije betona je samo lokalna i relativno malog obima (nemerljiva, bez jasnog karbonizacionog fronta po obimu uzorka)

Adingpoks Akva 1B – Daje skoro apsolutnu zaštitu od karbonatizacije, nakon 70 dana izloženosti dubina karbonatizacije betona je samo lokalna i relativno malog obima

Kod uzoraka betona koji su zaštićeni premazom Antikorozin BB, odnosno Adingpoks Akva 1B tek nakon 28 dana izloženosti ubrzanoj karbonatizaciji, dobijeno je najpre usporavanje procesa (na 56 dana), a zatim i kompletno blokiranje daljeg razvoja karbonatizacije betona (nakon 70 dana).

Tabela 3: Rezultati ispitivanja dubine karbonatizacije

Uzorak	Opis	Srednja vrednost Dubina karbonatizacije (mm)			
		14 d	28 d	56 d	70 d
ETALON	Beton bez zaštite	5,19	8,25	12,69	13,69
FASIL V	Hidrofobna Impregnacija	3,20	6,43	9,93	11,69
ANTIKOROZIN BB	Zaštitni premaz na bazi akrilne smole	/	/	/	/
ADINGPOKS AKVA 1B	Zaštitni premaz na bazi epoksidne smole	/	/	/	/
ANTIKOROZIN BB (28 d)	Zaštitni premazi aplicirani na etalonski uzorak nakon 28 dana izloženosti	5,78	8,73	9,66	9,49
ADINGPOKS AKVA 1B (28 d)		6,33	9,2	11,4	10,17



*Slika 4: Step en karbonatizacije betona nakon 28 i 56 dana izloženosti
“E” – Etalon; “AA1B” – Adingpoks Akva 1B; “ABB” – Antikorozin BB; “FB” – Fasil V*

6. LABORATORISKA ISPITIVANJA SANACIONIH MALTERA NAMENJENIH ZA SANACIJU BETONA IZLOŽENOG KARBONATIZACIJI

Kod konstrukcija kod kojih je zaštitni sloj betona u potpunosti izgubio svoju funkciju u smislu zaštite armature od korozije, neophodno je da se izvrši sanacija zaštitnog sloja. U ekstremnijim slučajevima, kada su korozija armature i degradacija betona značajni (funkcionalnost i sigurnost konstrukcije su smanjeni), neophodno je da se preduzmu mere konstruktivne sanacije i ojačanja AB konstrukcije.

Pri tome, svi proizvodi (reparaturni malteri) koji se koriste za ovakve sanacije, potrebno je da budu otporni na dejstvo buduće karbonatizacije. Drugi deo ovog rada – i druga serija izvršenih laboratorijskih ispitivanja – ilustrira otpornost različitih tipova reparaturnih maltera na dejstvo ubrzane karbonatizacije.

6.1. PRINCIPI-METODE ZA SANACIJU AB KONSTRUKCIJA IZLOŽENIH DEJSTVU KARBONATIZACIJE PREMA STANDARDU EN 1504-3

Osnovni principi i metode sanacije betona definisani su evropskim standardom za zaštitu i sanaciju betona SRPS EN 1504 *Products and systems for the protection and repair of concrete structures*.

Uobičajeno, za sanaciju AB konstrukcija izloženih dejstvu karbonatizacije primenjuju se sledeće Metode:

- Ručno nanošenje maltera
- Reprofliranje sa betonom
- Prskanje maltera ili betona (*Shotcrete*)
- Dodavanje novih ili zamena armaturnih šipki
- Dodavanje betona ili maltera
- Povećanje zaštitnog sloja armature malterom ili betonom
- Zamena degradiranog betona

Navedene Metode odgovaraju na sledeće Principe zaštite betonskih konstrukcija (prema EN 1504): Princip3: Reparacija betona, Princip4: Konstruktivno ojačanje, Princip7: Očuvanje ili vraćanje pasivnosti.

6.2. PLAN I TOK ISPITIVANJA REPARATURNIH MALTERA

Cilj ovog dela ispitivanja je da se utvrdi otpornost na karbonatizaciju različitih tipova specijaliziranih materijala (maltera), namenjenih za sanaciju AB konstrukcija.

Uzorci sanacionih maltera su preuzeti od jednog specijalizovanog proizvođača, kompanije ADING. Sanacioni malteri su ugrađeni u prizme dimenzija 40x40x160mm, koje su nakon vađenja iz kalupa čuvane u vodi narednih 28 dana. Nakon 28 dana, po 6 uzorka maltera su dopremljeni u laboratoriju Građevinskog Fakulteta u Beogradu, gde su ispitani na dejstvo ubrzane karbonatizacije (prema standardu SRPS EN 13295).

Testirani su uzorci tri tipa sanacionih maltera:

Reparatur Malter F4 – Polimer-cementni reparaturni malter, 1-komponentni, namenjen za konstruktivne sanacije AB konstrukcija, koji omogućuje ručno ili mašinsko ugrađivanje (rasprskivanjem)

Eksmal 4 – Samorazlivajući malter na bazi cementa, 1-komponentni, visoke čvrstoće, namenjen za konstruktivne sanacije AB konstrukcija, reprofliranje i povećanje betonskih preseka, kao i za ankerisanje nove armature u beton.

Adingpoks Akva – Cementno-epoksidni reparaturni malter, 3-komponentni, namenjen za sanaciju i zaštitu AB konstrukcija izloženih na dejstvo intenzivnih mehaničkih i hemijskih uticaja i visoke karbonatizacije. Uobičajeno se koriste za zaštitu sekundarne obloge kod putnih tunela. Omogućuje mašinsko ugrađivanje (rasprskivanjem).

6.3. REZULTATI ISPITIVANJA

Ovako pripremljeni uzorci sanacionih maltera, nakon kondicioniranja, izloženi su ubrzanoj karbonatizaciji u periodu od 56 dana (prema standardu SRPS EN 12390-12).

Nakon izlaganja, izvršena su meranja dubine karbonatizacije pomoću Fenolftaleinskog indikatora. Pri tome, kod nijednog od ispitanih uzoraka nije došlo do pojave karbonatizacije.



Slika 5: Ispitivanje reparaturnih maltera nakon 56 dana izloženosti ubrzanoj karbonatizaciji

Adingpoks Akva; Eksmal 4; Reparatur Malter F4

7. ZAKLJUČAK

Karbonatizacija betona predstavlja jedan od najvećih uzroka degradacije i smanjenja trajnosti AB konstrukcija. Nove i već postojeće konstrukcije koje su izložene visokom riziku od karbonatizacije (npr. infrastrukturni objekti, mostovi, tuneli, industrijski objekti, fabrički dimnjaci itd.) potrebno je da se zaštite odgovarajućim premazima za zaštitu od karbonatizacije.

Izvršena ispitivanja nedvosmisleno ukazuju da primena zaštitnih premaza na bazi Akrilne smole – Antikoroziin BB i Epoksidne smole – Adingpoks Akva 1B, daju visok stepen zaštite betona od dejstva karbonatizacije.

Sredstva za hidrofobnu impregnaciju betona na bazi silana – Fasil V, daju zaštitu betona na kraći rok, tako da se isti preporučuju kao prajmer za primenu zaštitnih premaza, tj kao dodatna zaštita ukoliko dođe do fizičkog oštećenja premaza.

Svi ispitani uzorci sanacionih maltera proizvedenih na bazi cementa i polimera/epoksida, pokazuju ekstremno visoku otpornost na dejstvo karbonatizacije, što omogućuje da sanirane AB konstrukcije dobiju veću otpornost na dejstvo karbonatizacije tokom dalje eksploatacije konstrukcije.

Naravno, sanirane konstrukcije se po pravilu završno i štite zaštitnim premazima. Ispitivanja betona kod kojih već postoji karbonatizacija u trenutku kada se nanosi zaštitni premaz (Antikoroziin BB ili Adingpoks Akva 1B), pokazuju da ovi premazi blokiraju dalji razvoj karbonatizacije.

REFERENCE

- [1] GF Beograd, Izveštaj Br. 41-2026: "O ispitivanju betonskih uzoraka u pogledu otpornosti na karbonatizaciju"
- [2] GF Beograd, Izveštaj Br. 70-2026: "O ispitivanju malterskih uzoraka u pogledu otpornosti na karbonatizaciju"
- [3] Brošura: "Ading sistemi i tehnologije za sanaciju, reparaciju i zaštitu armirano - betonskih konstrukcija, u skladu sa EU standardom EN-1504"
- [4] Standard SRPS EN 12390-12:2010: Ispitivanje očvrsllog betona, deo 12: Određivanje otpornosti betona na karbonatizaciju – Metoda ubrzane karbonatizacije
- [5] Standard SRPS EN 14630:2010: Određivanje dubine karbonatizacije očvrsllog betona fenolftaleinskom metodom