



Armătură zincată termic în structuri de beton

O introducere pentru arhitecți, proiectanți și constructori

Cuprins

Introducere	1
Costul coroziunii	2
Procesul de zincare termică	2
Coroziunea armăturilor din oțel neprotejate	3
Carbonatarea	3
Atacul clorurilor	4
Prelungirea duratei de viață a betonului armat	4
De ce oțelul zincat termic pentru armături este atât de eficient?	5
Formarea peliculei pasive	5
Rezistența la carbonatare	5
Rezistența la atacul clorurilor	6
Protecție de tip barieră	6
Perturbare minimă a masei betonului	6
Protecție prin sacrificiu	6
Rezistența aderenței	7
Comportamentul la coroziune al oțelului neprotejat pentru armături comparativ cu oțelul zincat termic	7
Avantaje de proiectare	8
Prescrierea zincării termice pentru armăturile din oțel	8
Costul cu armăturile de oțel zincat termic	9
Îndoirea, Sudarea, Repararea, Manipularea, Transportul și Depozitarea	9
Montajul și acoperirea	10
Combinarea armăturii din oțel zincat termic cu armătura din oțel neprotejat	10
Motive pentru a folosi armătură din oțel zincat termic	11
Bibliografie	12
Mulțumiri	12

Introducere

Zincarea termică a fost aleasă ca soluție optimă pentru prelungirea duratei de viață a oțelului de armare în beton de peste 100 de ani. Una dintre cele mai timpurii utilizări ale oțelului zincat a fost în construcția rezervoarelor de apă din beton, unde sârma zincată era folosită pentru pretensionarea pereților rezervoarelor.

Începând cu anii 1950, utilizarea oțelului de armare zincat a devenit tot mai comună în multe țări, iar în anii 1960 și începutul anilor 1970 o cantitate considerabilă de oțel de armare era zincat, în special pentru utilizare în construcția de poduri și autostrăzi în SUA. În Australia, cel mai notabil exemplu de utilizare a oțelului de armare cu zincare termică este în panourile decorative în zig-zag ale Operei din Sydney, instalate în 1963 și care sunt încă intacte, curate și fără semne de coroziune.

În ultimii 25–30 de ani, s-a înregistrat o creștere constantă a utilizării la nivel mondial a oțelului de armare zincat într-o varietate mare de lucrări de construcție din beton și condiții de expunere. De exemplu, din 1995 tot oțelul de armare utilizat în proiectele de poduri ale Autorității Autostrăzilor din New York a fost zincat. Multe poduri din SUA sunt supuse periodic testelor privind starea oțelului de armare zincat folosit la construcția inițială, iar toate acestea au demonstrat că se află în stare excelentă și astăzi.

În Europa, armătura zincată a fost utilizată în principal în medii deosebit de agresive, cum ar fi aplicațiile costiere, sistemele de canalizare, tunelurile rutiere etc., precum și pentru a construi produse adaptate cerințelor specifice ale anumitor proiecte.

Dincolo de aceste aplicații, utilizarea armăturii zincate poate rezolva probleme tehnice, permite proiectarea unor elemente ușoare, cu diametre reduse și poate îmbunătăți designul arhitectural. Totuși, armătura zincată nu este încă utilizată pe scară largă, în ciuda beneficiilor sale. Cauza este lipsa conștientizării beneficiilor: oțelul de armare zincat termic nu este doar o soluție eficientă pentru beneficiari, ci și un avantaj pentru constructori și producătorii de prefabricate, aducând beneficii economice, tehnice și ecologice.

Astăzi, oțelul de armare zincat termic este recunoscut ca o soluție eficientă în diminuarea efectelor amprente de carbon și întârzierea semnificativă a debutului coroziunii provocate de cloruri, în comparație cu oțelul de armare neprotejat. Aceste diferențe sunt cel mai vizibile în mediile industriale și marine. Oțelul zincat este de asemenea ideal pentru fațade exterioare, îmbinări ale panourilor prefabricate și pentru suprafețe unde este esențială evitarea apariției petelor de rugină și a exfolierii.

Comportamentul stabil al structurilor construite cu armătură zincată este, în mare parte, responsabil pentru interesul în creștere și utilizarea din ce în ce mai frecventă a armăturilor zincate termic.



Podul Mario M. Cuomo, recent finalizat, a fost cel mai mare proiect de poduri din istoria statului New York. Noul pod a înlocuit fostul pod Tappan Zee peste râul Hudson, la nord de orașul New York.



Tablierul podului Mario M. Cuomo este alcătuit din aproape 6000 de panouri prefabricate, fiecare cu o lungime de 3,66 m și o lățime de 6,7–13,7 m, pentru deschiderile de acces și 963 de panouri ale tablierului cu deschidere principală. Panourile sunt unite prin turnarea betonului în jurul armăturii proeminente din oțel zincat termic. (Imagine preluată de la Autoritatea Autostrăzilor Statului New York)



Podul Saint-Nazaire a fost construit în anii 1970 și este încă și astăzi cel mai lung pod din Franța. Cea mai mare parte a armăturii din beton nu a fost protejată împotriva coroziunii. Este unul dintre factorii care au condus la un program extins de întreținere și reparații. Aproximativ 63 de tone de armătură din oțel zincat au fost utilizate în locații foarte specifice - flanșele capetelor grinzilor în T și plăcile de conectare turnate la fața locului la înălțimea flanșelor (în imaginea de mai sus). Nu au fost necesare reparații în locațiile specifice unde a fost utilizată armătura zincată termic.

Costul coroziunii

Un studiu publicat în 2016 a arătat că, în 2013, costul global al coroziunii se ridică la 2,5 trilioane de Dolari (2,16 trilioane de Euro), ceea ce corespunde la aproximativ 3,4% din produsul intern brut (PIB) global. Studiul, care a examinat impactul coroziunii și al gestionării acesteia asupra economiei reale, a arătat că aplicarea „celor mai bune practici” pentru prevenirea daunelor provocate de coroziune ar putea duce la economii anuale de 15-35% (324-755 de miliarde de euro).



Podul Mario M. Cuomo este un pod hobanat cu două deschideri, cu 8 benzi, lung de 5 km, proiectat pentru o durată de viață minimă de 100 de ani, folosind armătură zincată termic.



Înainte de selectarea oțelului zincat termic pentru betonul podului Mario M. Cuomo, Autoritatea Autostrăzilor din New York a elaborat un Plan de Protecție Împotriva Coroziunii pentru a identifica expunerea, mecanismele de degradare, strategiile de proiectare și construcție și costurile pe durata ciclului de viață

Procesul de zincare termică

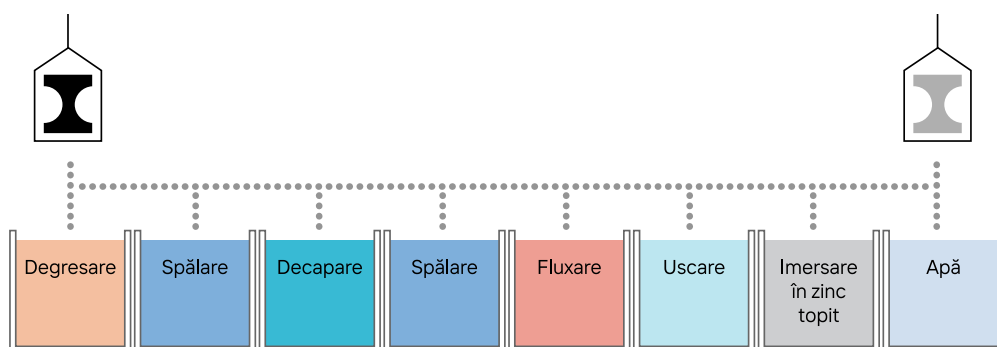
Procesul de zincare termică începe cu curățarea superficială a elementelor din oțel care urmează să fie zincate termic prin imersarea lor într-o serie de băi de pretratare. După curățare, oțelul este introdus într-o baie de zinc topit. Zincul topit reacționează cu oțelul pentru a forma un strat de zinc depus prin zincare termică (o reacție metalurgică). Barele de oțel pot fi zincate termic în loturi (de exemplu, prin utilizarea unor dispozitive speciale construite). În plus, plasa de armare utilizată pentru realizarea armăturilor armate este de obicei agățată de un dispozitiv de fixare și introdusă în baie de zinc topit.



Peste 27.000 de tone de armătură din oțel zincate termic asigură durabilitatea pe termen lung a turnurilor principale, a piloților de acces, a culeelor și a panourilor tablărilor rutier al podului Mario M. Cuomo.

Coroziunea provoacă costuri semnificative pentru societate

Prin aplicarea celor mai bune practici pentru prevenirea coroziunii, economiile anuale globale ar putea fi între 324 și 755 de miliarde de euro.



Procesul tehnologic de zincare termică

Zincarea termică reprezintă imersarea oțelului curățat într-o baie de zinc topit pentru a aplica un strat de zinc, legat metalurgic de oțelul de bază, care oferă un nivel ridicat de durabilitate.

Coroziunea armăturilor din oțel neprotejate

Mediul extrem de alcalin al betonului permite oțelului de armare convențional neprotejat să dezvolte o peliculă stabilă și pasivă de oxid de fier la suprafața sa, care protejează oțelul de coroziune. Cu toate acestea, betonul este un material eterogen, compus în principal din produșii de hidratare ai cimentului (pastei de ciment), nisipului și agregatelor. Porozitatea inerentă a betonului întărit oferă o cale de difuzie a gazelor și soluțiilor apoase care, în timp, pot schimba starea pasivă a oțelului și pot iniția coroziunea. Coroziunea oțelului de armare din beton este inițiată atunci când stratul protector de oxid de la suprafața sa este depasivat. Depasivarea poate avea loc prin oricare dintre aceste două mecanisme:

1. Carbonatarea betonului
2. Coroziune indusă de clorură.

Odată ce coroziunea oțelului de armătură este inițiată, produse de coroziune încep să se formeze pe suprafața acestuia. Aceste produse sunt substanțial mai voluminoase decât oțelul (rugina, care este un produs al oxidării fierului în oțelul de armătură, are volum de 7 ori mai mare decât volumul fierului). Creșterea volumului cauzată de coroziunea oțelului, aplică solicitări de tracțiune semnificative betonului și, în cele din urmă, provoacă formarea și propagarea fisurilor. Aceste fisuri, la rândul lor, oferă o cale pentru pătrunderea rapidă a agenților agresivi în oțelul de armătură, ceea ce va accelera procesul de coroziune a oțelului, provocând astfel daune precum delaminarea sau exfolierea acoperirii cu beton.

Procesul de coroziune pentru armăturile din oțel neprotejat este prezentat grafic mai jos, în modelul Tuutti adaptat, unde:

A. Etapa de inițiere – armătura din oțel rămâne pasivată (până în punctul x).

B. Etapa de propagare – are loc distrugerea stratului pasiv de pe armătura din oțel, iar oțelul se corodează activ. La sfârșitul acestui timp, au loc fisurarea și exfolierea betonului.

Procesul de coroziune este inițiat cel mai frecvent fie prin neutralizarea zonei din jurul armăturii din oțel, de exemplu, prin carbonatare, fie prin activarea suprafeței de către anioni puternic corozivi, de exemplu, cloruri. Timpul până la inițierea coroziunii este determinat de concentrația și debitul substanțelor care pătrund în stratul de beton și de concentrația limită necesară inițierii coroziunii.

Când armăturile sunt neprotejate, volumul de rugină poate crește de până la 7 ori comparativ cu volumul de fier consumat prin coroziune, ducând la formarea și propagarea fisurilor în beton.



Fisurarea și exfolierea betonului din cauza coroziunii armăturilor din oțel



Carbonatarea

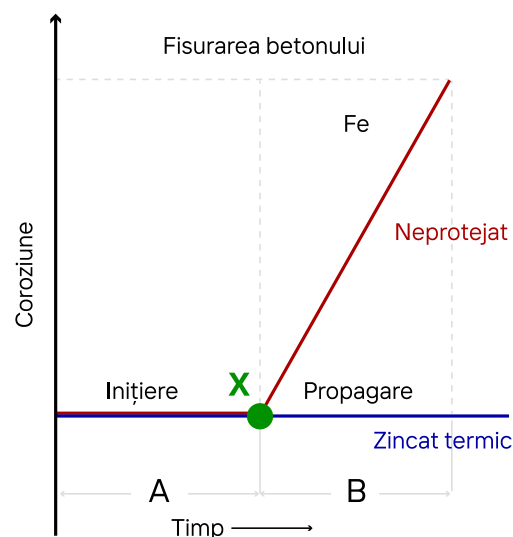
Carbonatarea este un proces natural care are loc atunci când alcalinitatea ridicată a betonului de acoperire este neutralizată datorită unei reacții cu dioxidul de carbon atmosferic.

În timp, frontul de carbonatare migrează prin masa betonului, reducând în cele din urmă pH-ul la niveluri aproape neutre (pH 7). Pe măsură ce pH-ul betonului scade, oțelul de armare din interiorul betonului devine mai susceptibil la coroziune.

Caracteristicile tipice ale carbonatării betonului sunt:

- Carbonatarea are loc mai lent la adâncimi mai mari ale betonului
- Adâncimea de carbonatare depinde de permeabilitatea betonului și de fisuri, goluri și pori
- Odată ce pH-ul betonului scade sub 11,5, oțelul de armătură va începe să se corodeze
- Efectul și rata de neutralizare sunt mai puternice atunci când dioxidul de sulf (SO_2) și dioxidul de azot (NO_2) reacționează cu apa pentru a forma soluții foarte acide. Aceste substanțe chimice au o concentrație mai mare în mediul din zonele industriale.

Model schematic pentru coroziunea oțelului de armare în beton, după Tuutti 1982



Pe baza măsurărilor efectuate pe teren, calitatea betonului este esențială în reducerea efectelor carbonatării. Testele au arătat că:

- În betonul structural de bună calitate, carbonatarea poate fi observată până la 5-10 mm adâncime după 20 de ani de expunere atmosferică (de exemplu, elemente structurale ale clădirilor dintr-un mediu urban)
- În betonul de calitate slabă, carbonatarea completă (pe ambele părți) a panourilor de perete cu grosimea de 200 mm are loc în 5-8 ani (de exemplu, locuințe sociale cu costuri reduse).

Atacul clorurilor

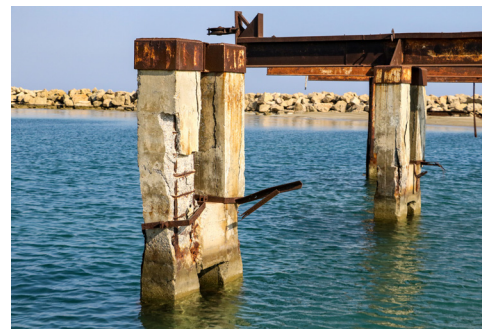
Coroziunea indusă de cloruri este principala cauză a coroziunii oțelului de armare și a deteriorării structurilor din beton armat la nivel mondial ca și consecință. Ionii de clorură pot migra prin beton și se pot acumula până la nivelurile necesare pentru a provoca depasivizarea peliculei protectoare de pe suprafața oțelului de armare, inițiind astfel coroziunea. Ionii de clorură activează suprafața oțelului pentru a forma un anod, suprafața pasivată rămasă fiind catodul.

Ionii de clorură atacă apoi oxidul feros, formând complexe care se îndepărtează de oțel și devin rugină. Atomii de fier nou expuși formează mai mulți oxizi feroși, continuând astfel procesul de coroziune.

Clorurile pătrund în beton prin:

- Agregate contaminate, nisipuri marine și aditivi
- Apă sărată sau salmastră utilizată pentru amestecare și/sau întărire
- Expunerea la medii marine și costiere
- Utilizarea sărurilor de deszăpezire

Clorurile migrează prin beton în timp prin difuzie, crescând astfel concentrația de clorură la suprafața oțelului de armare. Un prag de clorură de 0,2 - 0,4% din conținutul de ciment (sau 0,6 kg/m³ de beton) a fost identificat ca fiind intervalul în care oțelul armat neprotejat poate începe să corodeze.



Degradarea armăturii și a betonului într-un mediu cu conținut ridicat de clorură (costier)

Coroziunea indusă de cloruri este principala cauză a coroziunii armăturilor din oțel

Prelungirea duratei de viață a betonului armat

Necesitatea de a încorpora durabilitatea în proiectare, construcție și întreținere pentru a preveni deteriorarea prematură a structurilor din beton este bine cunoscută.

Planificarea durabilității constă în selectarea și utilizarea materialelor, a proceselor de proiectare și a metodelor de construcție care vizează garantarea atingerii duratei de viață preconizate de beneficiarul structurii și excluderea intervențiilor de întreținere premature și neașteptate.

O analiză tehnică poate fi utilizată pentru a determina natura și rata de deteriorare a materialelor în anumite condiții de mediu și pentru a planifica proiectarea, construcția și întreținerea corectă pentru tot ciclul de viață al structurilor din beton armat.

Există de obicei trei modalități de a preveni coroziunea oțelului în beton:

1. Modificarea betonului

- Adaosuri suplimentare de ciment (de exemplu, cenușă, zgură și silica)
- Impregnare (de exemplu, polimeri)
- Inhibitori (de exemplu, nitrați)
- Straturi de barieră (de exemplu, membrane și vopsele)

2. Modificarea oțelului de armare

- Oțel de armare protejat (de exemplu, oțel zincat)
- Metale rezistente la coroziune (de exemplu, oțel inoxidabil)
- Materiale nemetalice (de exemplu, polimer armat cu fibre și fibre polimerice armate cu sticlă)
- Protecție catodică (de exemplu, curent indus și anodi de sacrificiu)

3. Creșterea acoperirii cu beton

Mărirea acoperirii cu beton duce la o creștere a timpului necesar frontului de carbonatare pentru a ajunge la armătura din oțel și a timpului necesar concentrației de clorură de la suprafața armăturii pentru a atinge un nivel critic.

Cu toate acestea, există un paradox de luat în considerare în această abordare, deoarece cu cât este mai groasă acoperirea cu beton, cu atât este mai mare valoarea maximă a presiunii expansive provenite din coroziunea armăturii și cu atât este mai mare dimensiunea ulterioară a oricăror fisuri.

Aceste trei metode pot fi utilizate individual sau împreună cu alte metode. Fiecare metodă are propriile avantaje și dezavantaje. Abordarea utilizată trebuie dezvoltată în funcție de situația individuală, de mediu și de durata de viață necesară a activului.



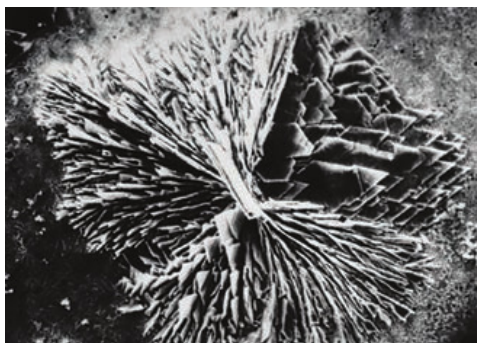
Pontoanele plutitoare de la marina din Sandringham, Victoria (Australia) au folosit armătură zincată termic.

Zincarea termică oferă protecție pe termen lung împotriva coroziunii și permite un strat de beton mai subțire – astfel se economisesc resurse și costuri

De ce oțelul zincat termic pentru armături este atât de eficient?

Formarea peliculei pasive

La fel ca în cazul oțelului de armare neprotejat, armătura de oțel zincată termic, formează un strat protector de pasivare în beton. Zincul în soluții puternic alcaline (pH 12,5 – 13,2) este pasivat prin formarea unui strat de cristale aderente de hidroxizincat de calciu – $\text{Ca}(\text{Zn}(\text{OH})_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Această reacție începe imediat la contactul cu soluția umedă de ciment, formând o peliculă superficială care stabilizează zincul și îl izolează de mediul înconjurător. Producții finali ai pasivării sunt cristale de CaHZn pe suprafața oțelului de armare zincat termic.

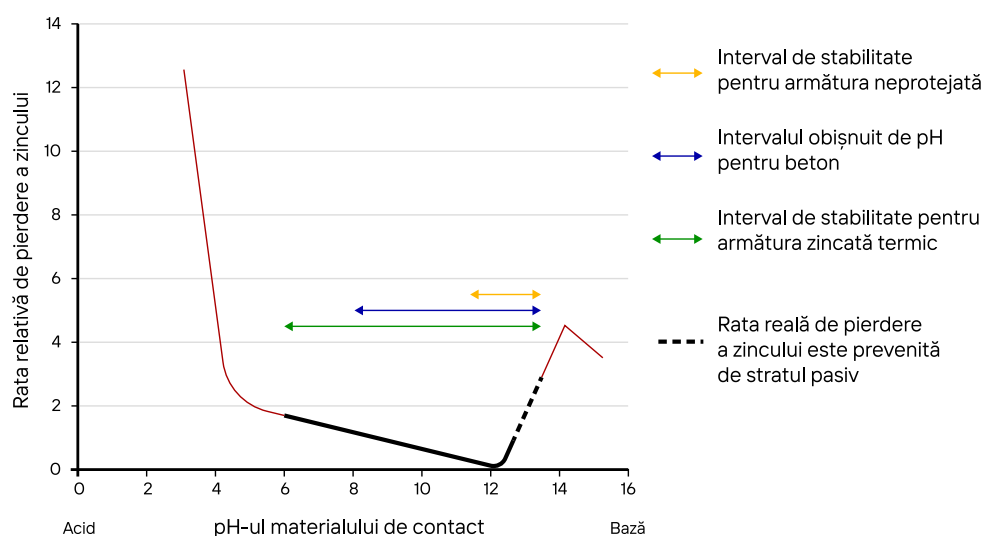


Cristale de CaHZn după 24 de ore în soluție de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ cu pH 12,6

La formarea stratului pasiv, se consumă aproximativ 10 μm din stratul exterior original de zinc pur al acoperirii prin zincare termică. Aceasta reprezintă o mică proporție din grosimea totală a acoperirii. Reacția cu zincul încetează odată ce betonul se întărește, iar după 28 de zile, când betonul și-a dezvoltat aderența normală și rezistența la compresiune, formarea stratului de hidroxizincat de calciu are ca rezultat o armătură zincată termic care dezvoltă de obicei o legătură mai bună și un factor de alunecare mai redus comparativ cu armătura echivalentă din oțel neprotejat.

Proprietățile acestui strat de pasivare sunt esențiale pentru comportamentul eficace al armăturii de oțel zincat termic în beton, în special prin stabilitatea sa chimică la pH neutru și la concentrații ridicate de cloruri.

Oțelul zincat termic pentru armături poate dezvolta o legătură cu betonul sporită în comparație cu oțelul pentru armare neprotejat.



Interval de stabilitate a pH-ului armăturii în beton

Rezistența la carbonatare

O acoperire obținută prin zincare termică are o rată de coroziune foarte scăzută pe o gamă largă de valori ale pH-ului (pH 6 – 12,5). Din această cauză, armătura din oțel zincat rămâne stabilă pe măsură ce nivelul pH-ului betonului scade din cauza carbonatării pe toată durata sa de viață. În schimb, armătura din oțel neprotejat este stabilă doar într-un interval mic (pH 11,5 – 13,2) și va începe să se corodeze odată ce nivelul pH-ului betonului scade sub 11,5. În betonul cu un pH între 12,5 și 13,2, armătura din oțel zincat termic este protejată prin formarea stratului pasiv de hidroxizincat de calciu, ceea ce împiedică zincul să experimenteze rate mari de pierdere în mediul extrem de alcalin.

În timp, frontul de carbonatare migrează prin masa betonului, reducând în cele din urmă pH-ul la niveluri aproape neutre (pH 7). După cum ilustrează figura alăturată, oțelul beton zincat este, prin urmare, complet neafectat de carbonatarea betonului.

Rezistența la atacul clorurilor

Oțelul pentru armături zincat termic are o rezistență mai bună la contactul cu clorurile decât oțelul neprotejat anticoroziv.

Cercetări recente pe această temă (Jaśniok, Sozańska, Kołodziej și Chmiela, 2020) au constatat că: „Rezultatele obținute din testele de coroziune (LPR, EIS) și structurale (SEM, EDS) pe epruvete de beton armat cu oțel B500SP au demonstrat un impact foarte favorabil al acoperirii cu zinc asupra armăturilor, oferind o protecție eficientă împotriva coroziunii în mediu cu cloruri”.

Un prag limită de cloruri propus de industrie pentru armătura neprotejată este de 0,06% din greutatea betonului, în baza a 20% șansă de de inițiere a coroziunii. Oțelul de armare zincat termic poate tolera concentrații de cloruri mult deasupra pragului la care coroziunea armăturii neprotejate este inițiată, datorită stabilității

peliculei de hidroxizincat de calciu și, deși nu există un consens universal, o analiză a literaturii de specialitate pe această temă arată că pragul limită de rezistență a oțelului de armare zincat termic la cloruri este de 2-6 ori mai mare, în comparație cu oțelul neprotejat. În general, o valoare conservativă pentru pragul limită critic al clorurilor în cazul armăturilor realizate din oțel zincat, este considerată a fi de 2 până la 2,5 ori mai mare decât pentru oțelul de armare neprotejat.

În plus, rata de difuzie a clorurii prin beton nu este consistentă, aceasta încetinind în timp, astfel că, în termeni practici, pragul critic de cloruri mai ridicat al armăturii din oțel zincat termic înseamnă că timpul până la inițierea coroziunii este mult mai mare decât pentru oțelul de armare neprotejat - de cel puțin 2 ori și, în unele rapoarte, de până la 10 ori mai lung.

Deoarece atacul clorurilor este cea mai importantă cauză de deteriorare a structurilor din beton armat din infrastructura mondială, acesta trebuie luat în considerare cu atenție în orice investiție care are un plan de durabilitate. Zincarea la cald este o metodă simplă și rentabilă de a îmbunătăți rezistența la cloruri și, prin urmare, durabilitatea structurilor din beton, iar performanța sa în raport cu oțelul de armare neprotejat poate fi modelată folosind modele convenționale de difuzie a clorurilor.

Un fapt important de reținut este că în modelarea deterministică a difuziei clorurilor, se prezintă doar timpul până la inițierea coroziunii, care este independent de grosimea stratului de zinc. Atunci când se ia în considerare faza de propagare a coroziunii, în timpul căreia stratul de zinc depus prin zincare termică se corodează într-un ritm mai lent decât oțelul, durabilitatea crește și mai mult.

Protecție de tip barieră

Un alt avantaj oferit de acoperirea cu zinc a armaturii din oțel zincat termic este faptul că procesul de zincare la cald oferă o acoperire completă a tuturor suprafețelor. Această barieră de protecție realizată metalurgic acționează ca un al doilea mecanism de apărare și se interpune între oțel și atmosferă. Acest lucru, împreună cu rezistența excelentă la abraziune și tenacitatea acoperirii, fac zincarea termică ideală pentru protejarea oțelului pentru armare în timpul transportului la șantier și în etapa de construcție a unui proiect.

Perturbare minimă a masei betonului

În cazul inițierii coroziunii stratului zincat termic, procesul de coroziune intră în faza de propagare. Producții de coroziune ai zincului rezultați sunt fini și asemănători pulberilor, expandându-se în volum doar până la 1,3 ori volumul inițial de zinc (comparativ cu oțelul neprotejat, care se expandează din cauza coroziunii de până la 7 ori volumul inițial al oțelului).

Producții de coroziune ai zincului sunt de asemenea mai solubili în apa alcalină din porii betonului și difuzează din oțelul din armături în matricea betonului, spre deosebire de producții de coroziune ai fierului, care nu vor migra de la armatura din oțel decât după fisurarea

betonului. Astfel se evită acumularea presiunilor interne care conduc la fisurarea și exfolierea betonului.

În plus, producții microscopici de coroziune care se adaugă la matricea betonului (așa cum se întâmplă în cazul oțelului zincat termic) scad permeabilitatea acestuia prin umplerea porilor și golurilor, încetinind astfel alimentarea cu elemente chimice agresive de la suprafața betonului către oțelul din armătură. Rezultatul acestui proces este o creștere semnificativă a timpului pentru faza de propagare a coroziunii și o întârziere corespunzătoare a timpului până la inițierea fisurării betonului.

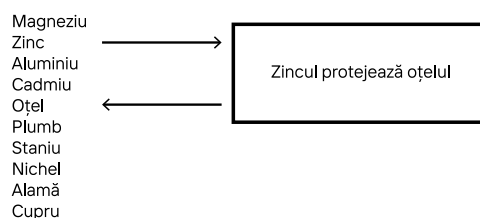
Protecție prin sacrificiu

Seria galvanică a metalelor este o listă de metale și aliaje aranjate în funcție de potențialele lor electrice în fiecare mediu. Imaginea din dreapta prezintă o serie de metale aranjate în ordinea activității electrochimice în apă de mare (electrolitul). Metalele sunt aranjate de sus în jos în funcție de capacitatea lor sacrificială; metalele din vârful scalei oferă protecție catodică sau sacrificială metalelor de mai jos.

Zincul este anodic față de oțel. Prin urmare, acoperirea prin zincare termică va oferi protecție catodică oțelului expus. Când zincul și oțelul sunt conectate în prezența unui electrolit, zincul este consumat lent, în timp ce oțelul este protejat. Acțiunea sacrificială a zincului oferă protecție oțelului în cazul deteriorării în timpul manipulării sau al montajului pe șantier.

Zincul protejează oțelul

Capăt electronegativ – metale mai active



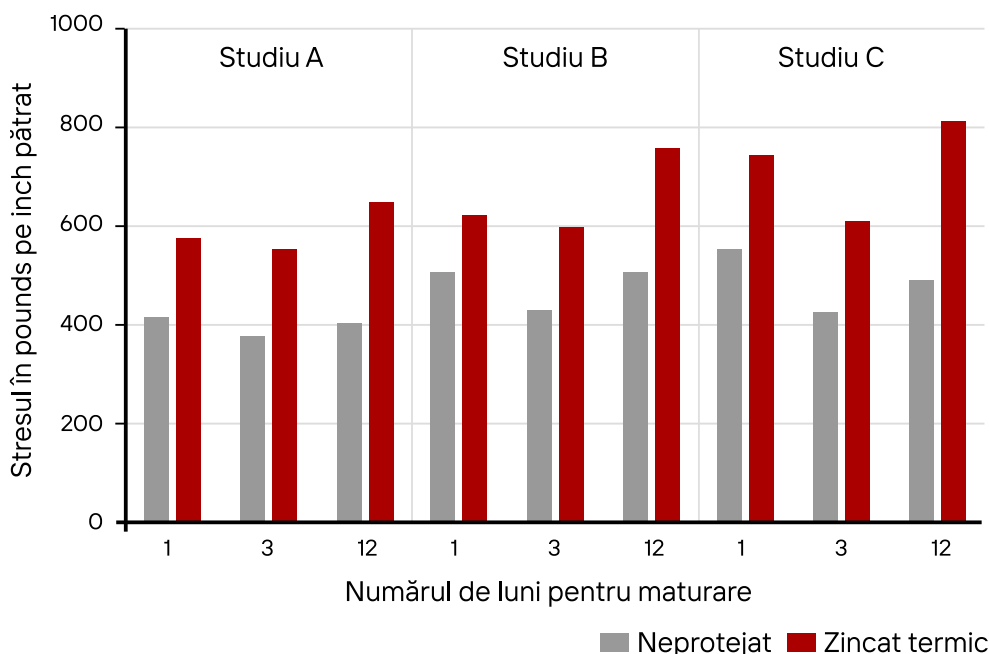
Capăt electropozitiv – metale mai puțin active

Zincul în seria galvanică

Rezistența aderenței

Există dovezi ample care susțin caracteristicile superioare de aderență ale armăturilor din oțel zincat termic în comparație cu armăturile din oțel neprotejat.

Rezistența aderenței formate este strâns legată de formarea peliculei pasive de hidroxizincat de calciu și, deși s-a raportat în teste accelerate că aderența armăturilor din oțel zincat termic rămâne în urma celei a armăturilor din oțel neprotejat, acest efect durează doar primele 1-2 săptămâni și este legat de reacția inițială a zincului la condițiile extrem de alcaline. După 28 de zile, când betonul și-a dezvoltat legătura normală cu armătura și rezistența la compresiune, oțelul zincat termic va dezvolta o capacitate de aderență mai mare în comparație cu oțelul neprotejat. Acest lucru se datorează precipitării peliculei de hidroxizincat de calciu la interfața oțel de armare/beton.



Compararea aderenței barelor neprotejate și zincate termic
(Sursa: Universitatea din California)

Comportamentul la coroziune al oțelului neprotejat pentru armături comparativ cu oțelul zincat termic

Schema adaptată de mai jos prezintă performanța armăturii din oțel zincat termic în comparație cu armătura din oțel neprotejat în beton.

Pragul limită de cloruri mai ridicat al armăturii din oțel zincat termic și imunitatea sa la efectele carbonatării întârzie debutul inițierii coroziunii (deplasează punctul x în punctul y) ca parte din procesul de coroziune. Protecția de barieră oferită de zinc, combinată cu perturbarea minimă generată de producția de coroziune ai zincului, servește la extinderea fazei de propagare a procesului.

Fiecare etapă a coroziunii este descrisă mai jos:

A. Etapa de inițiere – perioada în care betonul este expus progresiv la produse corozive (cloruri / carbonatate), iar armătura din oțel neprotejat rămâne pasivă (până la punctul x). Timpul până la inițierea coroziunii poate fi cuantificat prin modele deterministice de difuzie și carbonatate a clorurilor (necesare doar pentru oțelul beton neprotejat) care se bazează pe a doua lege a lui Fick.

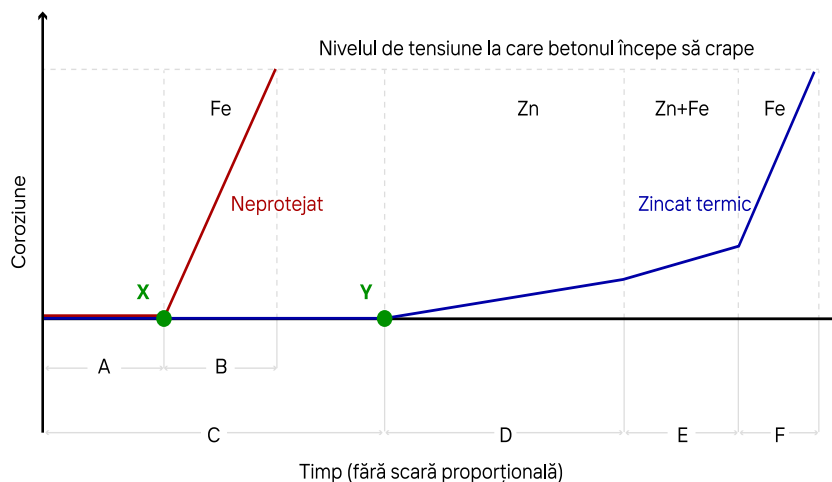
B. Etapa de propagare – Distrugerea stratului de pasivare de pe armătura din oțel neprotejat și coroziunea oțelului din armătură până la limita acceptabilă de deteriorare a betonului. La sfârșitul acestui timp, are loc fisurarea și exfolierea betonului.

C. Durata de viață a stratului de pasivare de pe oțelul zincat termic. Etapa de inițiere a coroziunii este extinsă datorită toleranței crescute la atacul clorurilor și evitării complete a depasivării din cauza carbonatării betonului.

D. Perioada de protecție a oțelului zincat termic împotriva ruginii, deoarece clorurile atacă o mică porțiune din stratul de zinc pur de pe suprafața oțelului, iar producția de coroziune difuzează din armătura zincată.

E. Perioada de protecție suplimentară în care coroziunea provoacă dizolvarea straturilor de aliaj FeZn.

F. În această etapă, tot stratul de zinc este consumat, iar rata de coroziune a oțelului de armare devine identică cu cea a armăturii din oțel neprotejat prezentată în etapa B – cu toate acestea, în această etapă, stratul de zinc și-a îndeplinit rolul, iar timpul până la inițierea fisurării betonului a crescut semnificativ.



Model schematic pentru coroziunea armăturii din oțel zincat termic în beton, după Tuutti 1982

Avantaje de proiectare

O acoperire zincată la cald a oțelului de armare oferă o creștere semnificativă a durabilității structurilor din beton armat cu oțel. Formarea unei pelicule pasive de hidroxizincat de calciu pe suprafața armăturii din oțel zincate termic crește semnificativ pragul critic de rezistență la cloruri a oțelului de armare, întârziind astfel semnificativ timpul până la inițierea coroziunii. Această întârziere în inițierea coroziunii poate fi cuantificată folosind modele deterministice convenționale de difuzie a clorurii bazate pe a doua lege a lui Fick.

Timpul până la inițierea coroziunii este crescut și mai mult, deoarece armătura zincată termic este imună la efectele carbonatării. În cazul în care armătura din oțel zincat termic este depasivată, produsele de coroziune a zincului rezultate sunt mult mai puțin voluminoase decât produsele de coroziune a fierului formate pe oțelul de armare neprotejat și, prin urmare, provoacă o perturbare minimă a masei betonului. Acest lucru evită acumularea de presiuni interne care duc la fisurarea și exfolierea betonului.

Incorporarea produselor microscopice de coroziune a zincului în matricea betonului scade permeabilitatea acestuia prin umplerea porilor și golurilor, încetinind astfel alimentarea cu agenți agresivi de la suprafața betonului către oțelul de armare. Rezultatul acestui proces este o creștere semnificativă a timpului pentru faza de propagare a coroziunii și o întârziere corespunzătoare a timpului până la inițierea fisurării betonului.



Grinzi de susținere din beton armat cu oțel zincat termic pentru balcoanele unui apartament elegant din Genova. Armătura din oțel zincat termic a fost aleasă pentru a conserva cât mai bine grinziile de susținere ale balcoanelor în timp, în special pentru a le proteja de smog, ploaie, îngheț și umiditate. (Imagini oferite de Prefabbricati Torti di Pietro e Lino Torti snc)

O acoperire zincată termic oferă o creștere semnificativă a durabilității structurilor din beton armat

Prescrierea zincării termice pentru armăturile din oțel

Armătura din oțel zincat termic este prescrisă conform SR EN 10348:2024 (Oțel pentru armarea betonului - Produse din oțel pentru armare zincat termic). SR EN 10348 stabilește cerințe pentru produsele din oțel pentru armare zincat termic care au fost fabricate din bare care au îndeplinit cerințele EN 10080.

Cerințele pentru zincarea termică a barelor de oțel sunt conforme cu standardul internațional de zincare termică - SR EN ISO 1461, cu excepția faptului că cerințele privind grosimea stratului de acoperire pentru armăturile din oțel sunt definite în mod specific după cum urmează în tabelul din dreapta.

SR EN 10348 asigură, de asemenea, că geometria nervurilor (înălțimea nervurilor sau adâncimea nervurilor) este menținută în mod satisfăcător după zincare. Pentru a evita posibilele efecte asupra proprietăților mecanice, standardul stabilește diametre și raze minime de îndoire pentru barele care sunt prelucrate înainte de procesul de zincare termică.

Cerințe privind grosimea stratului de acoperire conform EN 10348:2024

Diametrul oțelului (mm)	Masa stratului de acoperire (g/m ²)	Grosimea stratului de acoperire (μm)
> 6	610	85
≤ 6	505	70

Costul cu armăturile de oțel zincat termic



Armătura zincată a fost utilizată pentru balcoanele prefabricate din beton alb, în stil jardinieră, din cadrul proiectului rezidențial Zac Seguin din vestul Parisului. Această soluție a fost aleasă pentru a se asigura că aspectul elementelor prefabricate din beton alb nu va suferi pe termen lung de rugină în timp. Utilizarea armăturii zincate termic a permis, de asemenea, reducerea acoperirii cu beton pentru a facilita un design subțire îmbunătățit. (Imagini oferite de Aldric Beckmann Architectes/ Françoise N'Thépe Architecture & Design.Paris)



Costul total al utilizării armăturilor din oțel zincat termic în construcțiile din beton depinde foarte mult de măsura în care este utilizat în întreaga structură. De exemplu, rareori este necesar ca miezul structural sau elementele interne ale unei clădiri înalte sau componentele adânc încorporate ale culeelor și fundațiilor mari să fie zincate la cald.

În aceste situații, poate fi necesară utilizarea armăturii din oțel zincat termic doar în elementele expuse la suprafață sau acolo unde fundațiile pot fi afectate de apele subterane agresive sau fluctuante.

În construcțiile de clădiri, se constată, în general, că prețul zincării crește costul total al betonului cu aproximativ 6-10%, în funcție de dimensiunea și tipul de oțel de armătură utilizat, prețul zincării termice și cantitatea de oțel/m³ de beton.

În medie, costul armăturii metalice nu ar depăși aproximativ 25% din costul total al betonului. Având în vedere că, în mod normal, costul structurii și al învelișului unei clădiri reprezintă doar aproximativ 25-30% din costurile totale de construcție, costul suplimentar al zincării termice se reduce la 1,5 - 3,0% din costurile totale de construcție.

Acest cost se reduce la doar 0,5 - 1,0% dacă zincarea termică este restrânsă doar la panourile de suprafață. Atunci când este raportat la costul total al proiectului sau la prețul final de vânzare, costul suplimentar al zincării termice devine foarte mic, adesea nu mai mare de 0,1 - 0,2%.

O analiză din 2017 realizată de profesorul Richard Weyers de la Universitatea Virginia Tech a examinat difuzia clorurii în tablurile de beton și efectele acestora asupra duratei de viață în Virginia, SUA, pentru armătura din oțel acoperit cu rășină epoxidică, armătura din oțel zincat termic și armătura din oțel inoxidabil pentru beton 316LN. Cifrele privind costurile totale actuale și costurile pe ciclu de viață, arată că armătura din oțel zincat termic oferă cea mai rentabilă protecție pentru tablurile de poduri armate cu o durată de viață de 100 de ani.

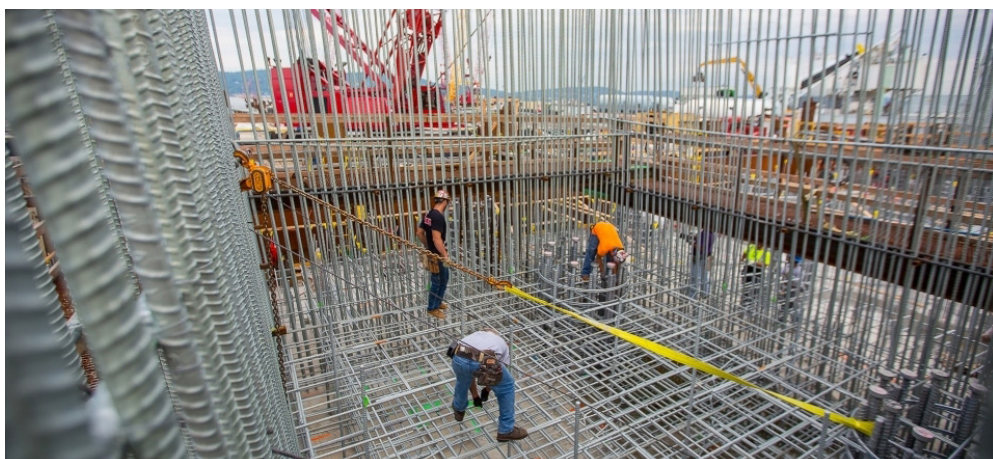
Atunci când se analizează costurile și consecințele deteriorării prin coroziune a unei clădiri din beton armat, acest cost suplimentar cu zincarea reprezintă o investiție foarte mică pentru o protecție superioară împotriva coroziunii pe termen lung.

Îndoirea, Sudarea, Repararea, Manipularea, Transportul și Depozitarea

Îndrumări și cerințe privind îndoirea, sudarea, repararea și alte aspecte de prelucrare sunt prezentate în SR EN 10348:2024.

Datorită durabilității îmbunătățite a stratului de acoperire prin zincare, nu este necesară nicio manipulare sau grijă specială la transportul armăturilor pentru beton zincate termic, însă câteva recomandări pentru transport includ:

- Utilizarea lanțurilor, cablurilor metalice sau a cablurilor pentru ridicare este acceptabilă;
- Legăturile trebuie ridicate din mai multe puncte de legare;
- Se recomandă utilizarea elementelor despărțitoare pentru a preveni abraziunea inutilă dintre bare în cazul unor legăturilor lungi de bare;
- Nu este necesară o amplasare specială, deși armătura din oțel și plasa trebuie stivuite pentru a permite drenajul și circulația aerului, pentru a evita formarea timpurie de rugină albă;
- Deoarece stratul de acoperire nu este sensibil la lumina UV, poate fi depozitat oriunde pe șantier.



Montajul și acoperirea

Datorită rezistenței excelente la abraziune a oțelului zincat, nu sunt necesare cerințe speciale la instalarea acestuia pe șantier. Acest fapt, coroborat cu rezistența îmbunătățită a aderenței betonului armat cu armături zincate termic, înseamnă de fapt, că nu este necesară instalarea de oțel suplimentar (unele acoperiri de protecție necesită lungimi de suprapunere cu 20% - 50% mai mari în comparație cu oțelul neprotejat).

La fel ca oțelul pentru armare neprotejat, nu sunt necesare condiții meteorologice specifice pentru instalare și, datorită stratului de acoperire al suprafeței, oțelul zincat termic oferă un mediu de lucru mult mai curat. De asemenea, deoarece stratul de acoperire este legat metalurgic cu oțelul, se produc daune minime în timpul instalării.

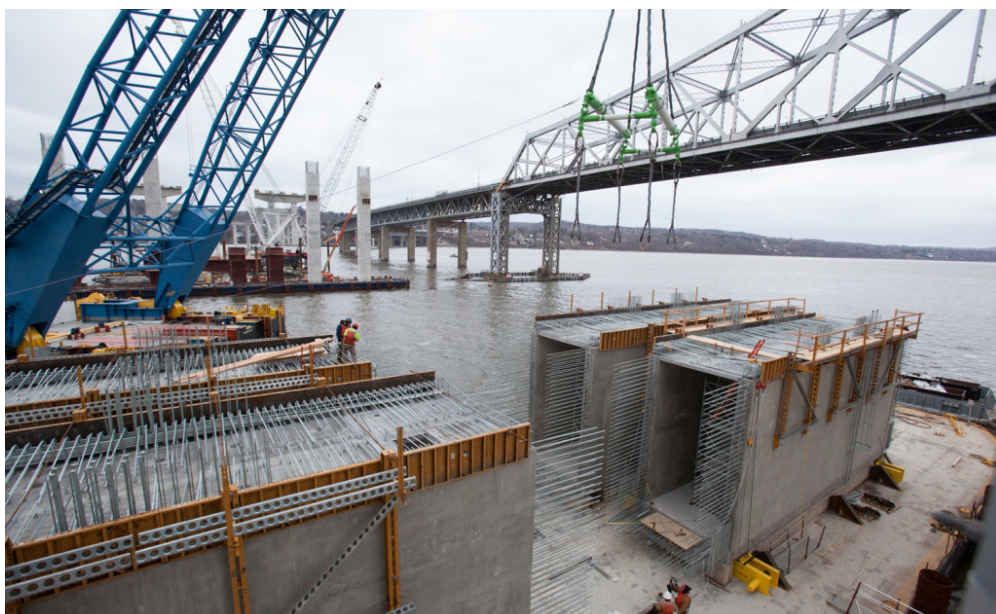


Combinarea armăturii din oțel zincat termic cu armătura din oțel neprotejat.

În beton, nu este de așteptat să apară reacții corozive între oțelurile beton neprotejate și cele zincate, atâta timp cât cele două metale rămân pasive. Pentru a asigura acest lucru, acoperirea cu beton peste oțelul neprotejat și conexiuni nu trebuie să fie mai mică decât acoperirea necesară pentru a proteja oțelul beton neprotejat în condiții similare.

În cazul în care se utilizează oțel zincat la cald, este recomandat ca tot oțelul cu care intră în contact să fie zincat termic, inclusiv sârma de legătură, inserțiile și suportii pentru armătură sau să se utilizeze traverse și suportii de armătură nemetalici sau realizați din materiale acoperite cu plastic. Dacă oțelul beton zincat la cald este plasat în contact cu oțel neprotejat în zone predispușe la coroziune, oțelul zincat termic va proteja în mod sacrificial oțelul neprotejat, rezultând o reducere a duratei de viață a acoperirii în apropierea zonei de contact.

În cazul în care contactul cu oțelul neprotejat este inevitabil și reprezintă o preocupare, se poate utiliza bandă de polietilenă și dielectrică pentru a asigura izolație electrică între cele două metale. La asamblarea sau instalarea armăturii din oțel zincat termic trebuie utilizată sârmă de legătură zincată sau cleme din plastic, iar suporturile barelor trebuie să fie, de asemenea, din oțel zincat, plastic sau alt material inert, cum ar fi zidăria. Dacă se utilizează cuplaje mecanice, acestea trebuie, de asemenea, zincate termic.



Cele 43 de perechi de piloni de beton ai podului Mario M. Cuomo sunt armate cu colivii din oțel zincat termic.

Motive pentru a folosi armătură din oțel zincat termic

1 Armătura din oțel zincată termic este pasivată în beton umed prin formarea unei pelicule aderente de hidroxizincat de calciu. Prin formarea acestei pelicule, **rezistența aderenței dintre armătura din oțel zincat termic și beton este crescută.**

2 Armătura din oțel zincat termic este stabilă pe o gamă largă de pH și este **complet neafectată de carbonatarea betonului.**

6 În aplicațiile afectate de expuneri la carbonatare, **oțelul zincat termic permite opțiunea de a utiliza un strat de acoperire mai subțire** în comparație cu oțelul de armătură neprotejat, asigurând în același timp aceeași durabilitate. Nu există cerințe speciale pentru proiectarea betonului folosind armătură din oțel zincat termic și nu este necesar oțel suplimentar sau strat suplimentar de acoperire.

7 Dacă armătura din oțel zincată termic se depasivează, zincul se va coroda mai lent decât fierul, iar stratul de zinc oferă o barieră împotriva coroziunii fierului. Spre deosebire de fier, produsele de coroziune ale zincului vor migra de pe stratul de zinc și, prin reducerea porozității, vor încetini rata de pătrundere a clorurilor. Volumul relativ mai mic al produșilor de coroziune ai zincului, comparativ cu cei ai fierului, reduce presiunea expansivă generată de procesul de coroziune, **reducând astfel dimensiunea oricăror fisuri care se pot forma.**

8 Armătura din oțel zincat termic este o modalitate eficientă de a asigura durabilitatea unei structuri de beton **la un cost de capital mult mai mic decât utilizarea armăturii din oțel inoxidabil.**

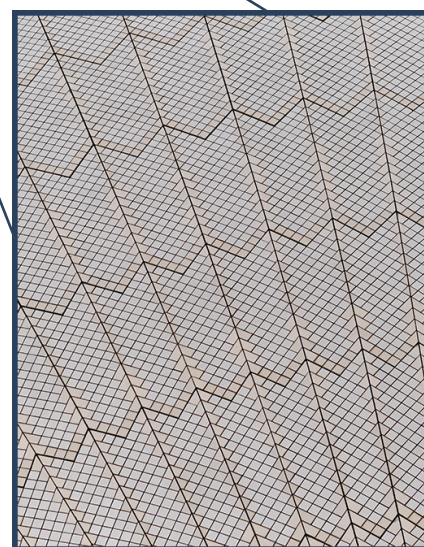
10 Spre deosebire de acoperirile epoxidice, o acoperire prin zincare termică pe armătura de oțel oferă o **barieră de protecție, o rezistență a aderenței îmbunătățită, un strat de pasivare superior și acționează ca un anod de sacrificiu în cazul în care oțelul de armare de sub acoperire este expus. Are o rezistență excelentă la abraziune, nu este afectată de lumina UV și nu are cerințe speciale pentru depozitare, transport, manipulare și fixare.**

12 Zincarea termică este o opțiune sustenabilă. O Declarație de Mediu a Produsului (EPD) este disponibilă pentru oțelul zincat, iar la sfârșitul duratei de viață a structurii, orice strat de zinc rămas poate fi reciclat simultan cu oțelul. Impactul mic asupra mediului al procesului de zincare este compensat de economiile uriașe de CO₂ asociate cu durabilitatea crescută a structurilor din beton armat cu oțel zincat termic.

3 Oțelul zincat termic are un prag limită de rezistență la atacul clorurilor de 2 până la 2,5 ori mai mare în comparație cu oțelul neprotejat – acest lucru dublează timpul de depasivare a oțelului zincat termic și de inițiere a coroziunii. De obicei, armătura din oțel zincat termic **crește durata de viață a structurii de 4 până la 5 ori** în comparație cu armătura din oțel neprotejat.

4 Timpul până la inițierea coroziunii oțelului zincat termic în beton poate fi modelat folosind modele convenționale din industrie de difuzie a clorurilor, bazate pe a doua lege a lui Fick.

5 Comportamentul pasiv al oțelului zincat termic în beton îl face potrivit pentru utilizarea în medii agresive și este ideal pentru fațade exterioare, îmbinări ale panourilor prefabricate și elemente de suprafață, într-adevăr **pentru orice aplicație în care carbonatarea sau pătrunderea clorurilor reprezintă o problemă.**



Ansamblurile de țigle chevron ale Operei din Sydney au fost construite din beton cu armătură din oțel zincat termic.

Bibliografie

- American Galvanizers Association, Hot-Dip Galvanized Reinforcing Steel: A Specifiers Guide, AGA, Centennial, CO, USA, 2012.
- Concrete Institute of Australia, The Use of Galvanized Reinforcement in Concrete, Current Practice Note 17, 2008, Concrete Institute of Australia, Sydney.
- Concrete Institute of Australia (2014), "Concrete Durability Series: Z7/05 Durability Modelling", Sydney.
- Concrete Institute of Australia (2018), "Concrete Durability Series: Z7/02 Durability Exposure Classifications", Sydney.
- ILZRO, Galvanized Reinforcement for Concrete – II, 1981, International Lead Zinc Research Organization, NC, USA
- Mariusz Jaśniok, Maria Sozańska, Jacek Kołodziej and Bartosz Chmiela, "A Two-Year Evaluation of Corrosion-Induced Damage to Hot Galvanized Reinforcing Steel B500SP in Chloride Contaminated Concrete", 2020
- NACE International, "International Measures of Prevention, Application and Economics of Corrosion Technology (IMPACT)", CORROSION CONFERENCE 2016, Vancouver, Canada
- Tuutti, K. (1982) "Corrosion of steel in concrete". Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm
- Yeomans S R (Editor), Galvanized Reinforcing Steel in Concrete, Elsevier UK, December 2004, ISBN 008044511
- Yeomans, S R (2004), "Chapter 1 – Galvanized Steel in Concrete: An Overview", in Yeomans, S R (ed.) Galvanized Steel Reinforcement in Concrete, Elsevier Science, pp. 1–7.
- Zhao Y, Jin W, Damage Analysis and Cracking Model of Reinforced Concrete Structures with Reinforcing steel Corrosion in Steel Corrosion-Induced Concrete Cracking, 2016

Mulțumiri

Credite foto

Coperta, paginile 1, 2, 9, 10:	New York Thruway Authority
Paginile 3, 4, 5, 7:	Galvanizers Association of Australia
Paginile 3, 4:	Shutterstock.com
Paginile 11:	stock.adobe.com

Mulțumirile noastre Galvanizers Association of Australia pentru suportul lor în pregătirea acestui document.

Mai multe informații despre oțelul beton zincat termic:

Asociația Națională a Zincatorilor

B-dul Muncii 103-105 Sala E01/A,
Cluj-Napoca cod 400641
România

www.anaz.ro

E-mail: contact@anaz.ro



European General Galvanizers Association

14-16 Reddicroft Bureau 6.18
B73 6AZ The Nestwork
United Kingdom Avenue de Broqueville, 12 (6th Floor)
1150 Brussels

www.egga.com

Email: mail@egga.com

