



Varmförzinkad armering i betongkonstruktioner

En introduktion för ingenjörer och konstruktörer

Innehåll

Introduktion	1
Kostnaderna för korrosion	2
Varmförzinkningsprocessen	2
Korrosion hos obelagda armeringsjärn	3
Karbonatisering	3
Kloridattack	4
Öka livslängden för armerad betong	4
Varför är varmförzinkad armering så effektiv?	5
Formering av passivfilm	5
Beständighet mot karbonatisering	5
Beständighet mot kloridattacker	6
Barriärskydd	6
Minimal störning av betongmassan	6
Katodisk skydd	6
Bindningsstyrka	7
Korrosionsprofil hos obelagda armeringsjärn i jämförelse med varmförzinkad armering	7
Konstruktionsfördelar	8
Att specificera varmförzinkad beläggning för armeringsjärn	8
Kostnaderna för varmförzinkad armering	9
Böja, svetsa, reparera, hanterna, transportera och lagra	9
Installation	10
Att blanda varmförzinkad och obelagd armering	10
Många skäl att använda varmförzinkad armering	11
Referenser	12
Erkännanden	12

Introduktion

Varmförzinkning har använts som en optimal lösning för att förlänga livslängden på armeringsjärn i betong i över 100 år. Den vanligaste tidiga användningen av varmförzinkad armering var vid konstruktionen av vattentankar i betong där varmförzinkad vajer användes för att förspänna väggarna.

Från 1950-talet blev användningen av varmförzinkad armering vanligare i många länder och på 1960-talet och början av 1970-talet varmförzinkades ett stort tonnage av armeringsjärn speciellt för användning i bro- och motorvägsbyggen i USA. I Australien har den varmförzinkade armeringen i taket på Sydneys operahus givit produkten hög prestige. Takelementen installerades 1963 och är fortfarande intakta, ljusa och fria från tecken på korrosion från armeringen.

Under de senaste 25 till 30 åren har det skett en stadig ökning av den globala användningen av varmförzinkad armering i en mängd olika betongkonstruktioner och exponeringsförhållanden. Som exempel kan nämnas att sedan 1995 är all armering på New Yorks Genomfartsmyndighets broprojekt varmförzinkad. Många broar runt om i USA genomgår regelbundna kontroller av tillståndet för den förzinkade armeringen som användes vid den ursprungliga konstruktionen och dessa har alla visat sig vara i utmärkt skick idag. I Europa har varmförzinkad armering hittills främst använts i särskilt aggressiva miljöer, såsom kustnära applikationer, avloppssystem, vägtunnlar etc. och för att konstruera skräddarsydda produkter för specifika projekt.

Utöver dessa applikationer kan användningen av varmförzinkad armering lösa tekniska problem, skapa lätta och tunna konstruktioner och förbättra arkitektonisk design. Varmförzinkad armering används ännu inte i så stor utsträckning trots dess många fördelar. Detta beror på att det fortfarande är låg medvetenhet om dessa fördelar: armering av varmförzinkat stål representerar en mycket effektiv lösning för kunderna, och kan också vara en fördel för konstruktörer och tillverkare av prefabricerade betongelement i ekonomiska, tekniska och miljömässiga termer.

Idag är varmförzinkat armeringsstål erkänt som en kostnadseffektiv lösning för att eliminera effekterna av karbonatisering och avsevärt fördröja uppkomsten av kloridinitierad korrosion i jämförelse med obelagt armeringsstål, i kustnära och industriella miljöer. Varmförzinkad armering är också idealiskt lämpat för yttre fasader, prefabricerade paneler och ytelement där frånvaro av rostfläckar och spjälkning är avgörande.

Alla positiva erfarenheter av konstruktioner byggda med varmförzinkad armering är till stor del anledningen till det växande intresset för att designa med detta material.



Den nyligen färdigställda Mario M. Cuomo-bron var det största broprojektet i delstaten New Yorks historia. Den nya bron ersatte den tidigare Tappan Zee-bron över Hudsonfloden norr om New York City.



Brodäcket på Mario M. Cuomo-bron består av nästan 6000 prefabricerade segment, var och en 3,66 m långt och 6,7-13,7 m brett, för påfarten. Där utöver ingår 963 däckspaneler. Segmenten sammanfogas genom att betong gjuts runt den utstickande varmförzinkade armeringen. (Bild med tillstånd från New Yorks Genomfartsmyndighet)



Saint-Nazaire-bron byggdes på 1970-talet och är fortfarande den längsta bron i Frankrike. Mervärdet av armeringen var inte skyddad mot korrosion, och detta har lett till att ett omfattande program för underhåll och reparationer har behövt utarbetas. Bron innehåller dock ca 63 ton varmförzinkad armering, placerad inom vissa specifika områden. Dessa områden utgörs av flänsarna på T-balkarnas ändrar samt de på platsen gjutna anslutningsplattorna i höjd med flänsarna (bilden ovan). Inom dessa områden har inga reparationer behövt utföras.

Kostnaderna för korrosion

En studie publicerad 2016 visade att den globala kostnaden för korrosion 2013 ligger på 2,5 biljoner dollar (2,16 biljoner euro), vilket motsvarar cirka 3,4 procent av den globala bruttonationalprodukten (BNP). Studien, som undersökte effekten av korrosion och dess inverkan på ekonomin, visade att tillämpning av bästa praxis för att förhindra korrosionsskador kan resultera i årliga besparingar på 15-35 procent (324 till 755 miljarder EUR).



Mario M. Cuomo-bron är en 5 km lång, 8-filig dubbelspans kabelstagsbro, designad för en livslängd på minst 100 år med hjälp av varmförzinkad armering.



Innan man valde varmförzinkad armering för Mario M. Cuomo-bron, utvecklade New Yorks Genomfartsmyndighet en korrosionsskyddsplan för att identifiera exponering, nedbrytningsmekanismer, design- och konstruktionsstrategier samt livscykelkostnader.

Varmförzinkningsprocessen

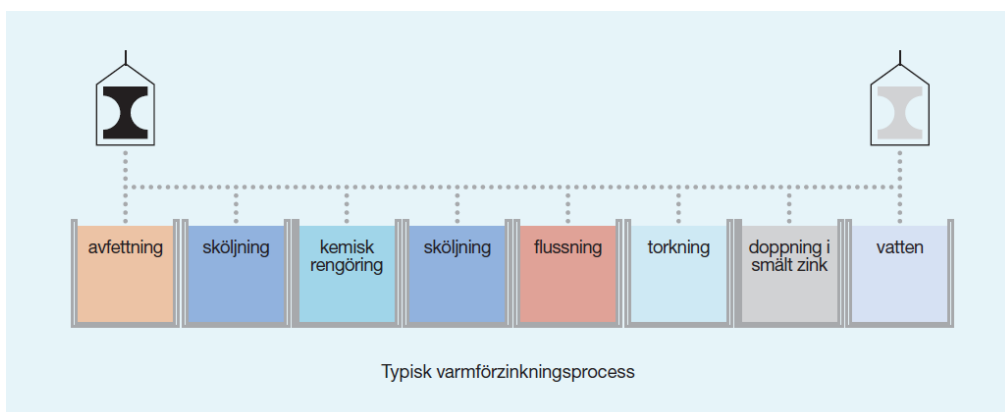
Varmförzinkningsprocessen börjar med rengöring av stålföremålen som ska varmförzinkas genom att sänka ned dem i en serie förbehandlingsbad. När stålet är rengjort doppas det ner i ett bad av smält zink. Den smälta zinken reagerar med stålet och bildar den varmförzinkade beläggningen genom en metallurgisk reaktion. Armeringsjärn kan varmförzinkas som styckegods med hjälp av speciella hänganordningar. Armeringsnät som används i armerade konstruktionselement, hänger vanligtvis på en jigg när doppas ned i badet av smält zink.



Över 27 000 ton varmförzinkad armering säkerställer långvarig hållbarhet hos pyloner, påfartsramper och farbanesegment på Mario M. Cuomo-bron.

Korrosion orsakar betydande kostnader för samhället

Genom att tillämpa bästa praxis för att förhindra korrosion kan de globala årliga besparingarna uppgå till hela 324 till 755 miljarder euro



Varmförzinkning innebär nedsänkning av rent stål i ett bad av smält zink för att applicera en metallurgiskt bunden beläggning som har hög beständighet.

Korrosion hos obelagd armering

Betongens mycket alkaliska miljö gör att vanligt obelagt armeringsstål kan utveckla en stabil, passiv järnoxidfilm på ytan, som skyddar stålet från korrosion. Betong är dock ett inhomogent material, huvudsakligen sammansatt av hydratiseringsprodukter av cement (cementpasta), sand och ballast. Den inneboende porositeten hos härdad betong möjliggör för diffusion av gasformiga och vattenhaltiga ämnen som med tiden kan bryta ner passiviteten hos stålet och initiera korrosion. Korrosion hos armeringsstål i betong initieras när det skyddande oxidskiktet på dess yta depassiveras. Depassivering kan ske genom någon av dessa två mekanismer:

1. Karbonatisering av betongen
2. Kloridinducerad korrosion

När korrosion av armeringsstålet väl har initierats börjar korrosionsprodukter bildas på armeringens yta. Dessa produkter är avsevärt mer voluminösa än stålet (rost, som bildas då järnet i armeringen oxideras, kännetecknas av en volym som är 7 gånger större än volymen det järn som förbrukas). Denna volymökning från korrosionen initierar betydande dragpåkänningar på betongen och orsakar så småningom bildning och utbredning av sprickor. Dessa sprickor öppnar i sin tur en väg för snabbt inträngade av aggressiva komponenter till armeringen, vilket kommer att påskynda korrosionsprocessen och därigenom orsaka skador såsom delaminering eller spjälkning av betongskiktet.

Korrosionsprocessen för obelagt armeringsstål visas grafiskt i den anpassade Tuutti-modellen nedan, där:

A. Initieringssteget – armeringsstålet förblir passiverat (till punkten x).

B. Utbredningsstadiet – passivskiktet på armeringen bryts ned och stålet korroderar aktivt. I slutet av denna period uppstår sprickbildning hos betongen.

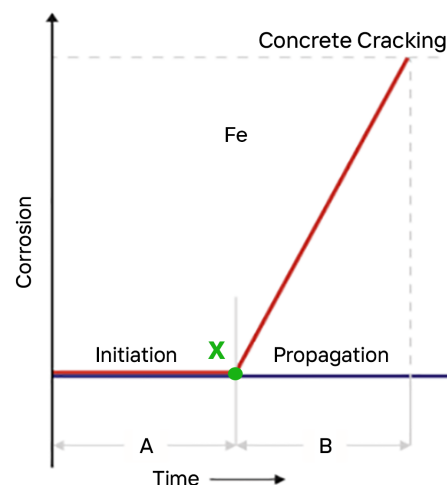
Korrosionsprocessen initieras oftast antingen genom neutralisering av området kring armeringen orsakat av karbonatisering, eller aktivering av ytan genom starkt frätande anjoner, t.ex. klorider. Tiden till dess att korrosionen initieras bestäms av koncentrationen och flöde hastigheten av de ämnen som tränger sig in i betongens täcksikt och av den tröskelkoncentration som krävs för att korrosion ska starta.

Hos oskyddad armering kan den bildade rostens volym bli upp till 7 gånger större än volymen av det järn som förbrukas av korrosionen - vilket leder till bildning och fortplantning av sprickor i betongen

Schematisk modell för korrosion av armeringsstål i betong, efter Tuutti 1982



Sprickbildning och avflagnig av betong på grund av korrosion hos armeringen



Karbonatisering

Karbonatisering är en naturlig process som uppstår när täcksiktets höga alkalinitet neutraliseras på grund av en reaktion med atmosfärisk koldioxid.

Med tiden rör sig karbonatiseringsfronten genom betongmassan, vilket så småningom sänker pH till nära neutrala nivåer (pH 7). När betongens pH sjunker blir armeringen inuti betongen mer känsligt för korrosion.

Karbonatisering av betong kännetecknas av följande förhållanden:

- Karbonatisering sker långsammare på större betongdjup
- Karbonatiseringens djup beror på betongens permeabilitet samt sprickor, hålrum och porer
- När betongens pH sjunker under 11,5 kommer armeringen att börja korrodera
- Effekten och hastigheten av neutraliseringen är starkare när svaveldioxid (SO₂) och kvävedioxid (NO₂) reagerar med vatten och bildar kraftigt sura lösningar. Dessa kemikalier förekommer i högre koncentration i miljön i industriområden.

Baserat på fältmätningar är betongens kvalitet avgörande för att minska effekterna av karbonatiseringen. Tester har visat att:

- I konstruktionsbetong av god kvalitet kan karbonatiseringen begränsas till så lite som 5–10 mm inträngning efter 20 års atmosfärisk exponering (till exempel i strukturella delar av byggnader i stadsmiljö)
- I betong av dålig kvalitet sker full karbonatisering av 200 mm tjocka väggelement (från båda sidor) på 5–8 år (till exempel i lågprisbostäder).

Kloridattack

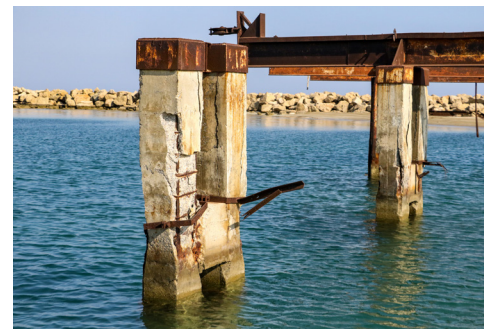
Kloridinducerad korrosion är den enskilt största orsaken till korrosion hos armering och följdskador på armerade betongkonstruktioner över hela världen. Kloridjoner kan migrera genom betongen och byggas upp till de nivåer som krävs för att orsaka depassivering av skyddsfilmerna på ytan av armeringen, och därigenom initiera korrosion. Kloridjonerna aktiverar stålets yta för att bilda en anod med den återstående passiverade ytan som katod.

Kloridjoner angriper sedan järnoxiden och bildar komplex som rör sig bort från armeringen och blir till rost. På den exponerade armeringsytan bildas nyjärnoxider och korrosionsprocessen fortsätter därmed.

Klorider kommer in i betongen via:

- Förorenade ballast, marin sand och tillsatser
- Bräckt eller salt vatten som används för blandning och/eller härdning
- Exponering för havs- och kustmiljöer
- Användning av avisingssalter

Klorider diffunderar med tiden genom betongen och ökar därigenom kloridkoncentrationen vid armeringens yta. En kloridtröskel på 0,2 – 0,4 % av cementhalten (eller 0,6 kg/m³ betong) har identifierats som intervallet inom vilket obelagt armeringsstål kan börja korrodera.



Nedbrytning av armering och betong i en miljö med hög kloridhalt (kustnära)

Korrosion inducerad av klorider är den främsta orsaken till att armering rostar.

Öka livslängden för armerad betong

Behovet av att inkludera hållbarhet i design, konstruktion och underhåll för att förhindra för tidig kassation av betongkonstruktioner är välkänt.

Planeringen för hållbarhet består i att välja rätt material, design och konstruktionsmetoder för att kunna garantera att den livslängd som kunden tänkt sig uppnås, och utesluta för tidiga och oönskade underhållsbehov.

En teknisk analys kan användas för att fastställa hur materialen påverkas av olika makro- och mikromiljöförhållanden. Med hjälp av denna analys kan design, konstruktion och underhåll av betongkonstruktionen under hela dess livslängd sedan planeras.

Det finns vanligtvis tre sätt att förhindra korrosion av stål i betong:

1. Modifiera betongen

- Kompletterande cementbaserade tillsatser (till exempel flygaska, slagg och kiselånga)
- Impregnering (till exempel polymerer)
- Inhibitorer (till exempel nitrater)
- Spärrskikt (till exempel membran och färger)

2. Modifiera armeringsstålet

- Belagt armeringsstål (till exempel varmförzinkat stål)
- Korrosionsbeständiga metaller (till exempel rostfritt stål)
- Icke-metalliska material (till exempel fiber- eller glasförstärkta polymerfibrer)
- Katodiskt skydd (till exempel påtryckt ström och offeranoder)

3. Öka täcksiktet

En ökning av täcksiktet ger en ökning av tiden som det tar för karbonatiseringsfronten att nå armeringen, och tiden det tar för kloridkoncentrationen vid armeringens yta att nå en kritisk nivå.

Det finns dock en paradox att överväga i detta tillvägagångssätt, eftersom ju tjockare täcksikt, desto högre tryck från armeringens korrosionsprodukter och desto större blir storleken hos eventuella sprickor.

De tre ovan nämnda metoderna kan användas individuellt eller i kombination med andra metoder. Varje metod har sina fördelar och nackdelar. Metoden som används bör utvecklas utifrån den individuella situationen, miljön och den förväntade livslängden för konstruktionen.



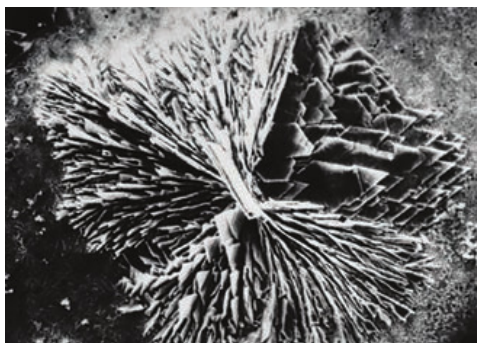
De flytande pontonerna vid marinan i Sandringham, Victoria (Australien) använder varmförzinkad armering

Varmförzinkning ger långvarigt korrosionsskydd och tillåter tunnare täcksikt – vilket sparar resurser och kostnader

Varför är varmförzinkad armering så effektiv?

Formering av passivfilmen

På samma sätt som för obelagd armering får även varmförzinkad armering ett skyddande, passiverande skikt i betong. Zink i starkt alkaliska lösningar (pH 12,5 – 13,2) passiveras genom bildande av ett lager av vidhäftande kristaller av kalciumhydroxizinkat – $\text{Ca}(\text{Zn}(\text{OH})_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Denna reaktion börjar omedelbart vid kontakt med den våta cementen och bildar en ytfilm som stabiliserar zinken och isolerar den från den omgivande miljön. Slutprodukterna av passiveringen är CaHZn -kristaller på ytan av den varmförzinkade armeringen.

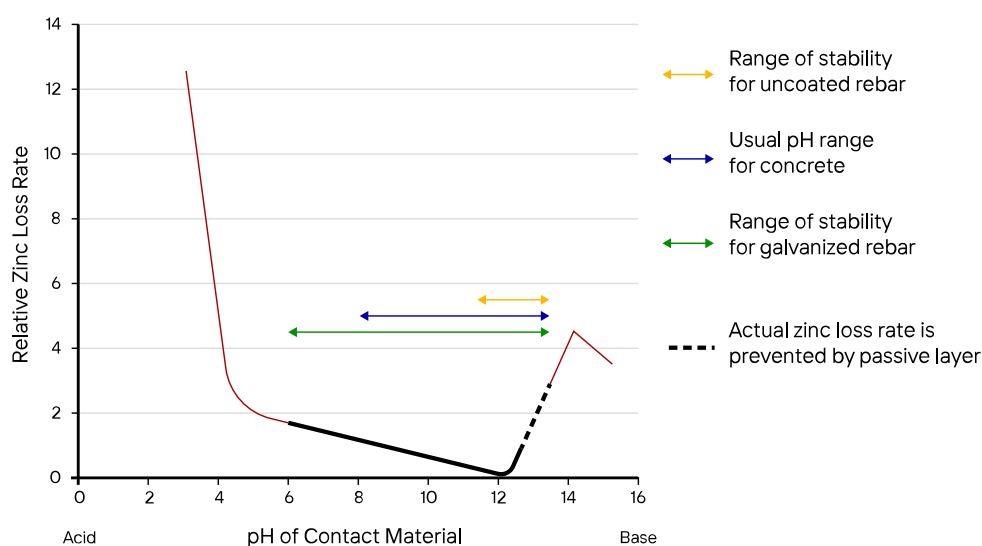


CaHZn-kristaller efter 24 timmar i $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -lösning med pH 12,6

Vid bildandet av passivskiktet förbrukas ungefär 10 μm av rezninkskiktet på den förzinkade armeringen, vilket endast är en liten andel av den totala beläggningstjockleken. Reaktionen med zink upphör när betongen härdar, och efter 28 dagar när betongen har utvecklat sin normala bindning och tryckhållfasthet, resulterar bildningen av kalciumhydroxizinkatskiktet i att den förzinkade armeringen vanligtvis utvecklar en högre bindningsstyrka och lägre belastningsinducerad glidning än motsvarande svart armering.

Egenskaperna hos det passiverande skiktet är nyckeln till den varmförzinkade armeringens beständighet i betong, särskilt dess kemiska stabilitet vid neutralt pH och vid höga kloridkoncentrationer.

Varmförzinkad armering kan utveckla en högre bindningsstyrka jämfört med obelagt armeringsstål



Området för pH-stabilitet för armering i betong

Karbonatiseringsresistans

En varmförzinkad beläggning har en mycket låg korrosionshastighet över ett brett område av pH-värden (pH 6 – 12,5). På grund av detta förblir varmförzinkad armering stabil när betongens pH-nivå sjunker på grund av karbonatisering. Omvänt är obelagd armering endast stabil i ett litet område (pH 11,5 – 13,2) och kommer att börja korrodera när betongens pH-nivå sjunker under 11,5. I betong med ett pH mellan 12,5 och 13,2 skyddas den varmförzinkade armeringen av passivskiktet av kalciumhydroxizinkat, och detta förhindrar att zinken utsätts för höga förluster i den mycket alkaliska miljön.

Med tiden vandrar karbonatiseringseffronten genom betongmassan, vilket så småningom sänker pH till nära neutrala nivåer (pH 7). Som bilden intill illustrerar är varmförzinkad armering därför helt opåverkad av att betongen karbonatiseras.

Motståndskraft mot kloridattack

Varmförzinkad armering har högre motståndskraft mot kloridangrepp än svart armering.

Ny forskning inom om detta område (Jaśniok, Sozańska, Kołodziej och Chmiela, 2020) har viasat att: *"Resultat erhållna från korrosion (LPR, EIS) och strukturella (SEM, EDS) tester på prover av betong armerad med stål B500SP visade en mycket gynnsam inverkan från zinkbeläggningen på armeringsjärnen genom att ge effektivt skydd mot korrosion i kloridmiljö"*.

Från industrin har ett tröskelvärde för kloridhalten för obelagt armeringsstål uppskattats till 0,06 viktprocent i betong, baserat på 20 % risk för korrosionsinitiering. Varmförzinkad armering klarar betydligt högre kloridkoncentrationer, långt över det som orsakar korrosion av obelagt

armeringsstål, på grund av stabiliteten hos kalciumhydroxizinkatfilmen. Även om det inte finns någon allmänt verdetagen gräns visar en litteraturgenomgång angående kloridtröskeln för varmförzinkat armeringsstål att den ligger 2 – 6 gånger högre än för obelagd armering. I allmänhet anses ett konservativt värde för den kritiska kloridtröskeln för varmförzinkad armering vara 2 till 2,5 gånger högre än för obelagt armeringsstål.

Då hastigheten för kloriddiffusion genom betongen inte är konstant utan minskar med tiden, innebär den högre kritiska kloridtröskeln för varmförzinkad armering att tiden till korrosionsinitiering är mycket längre än för obelagd armering – åtminstone två gånger och i vissa rapporter upp till 10 gånger längre.

Eftersom kloridangrepp är den enskilt största orsaken till skador på armerade betongkonstruktioner i världsomspännande infrastruktur, måste detta noga övervägas i varje hållbarhetsplan. Varmförzinkning är en enkel och kostnadseffektiv metod för att förbättra kloridbeständigheten och därmed hållbarheten hos betongkonstruktioner i förhållande till obelagt armeringsstål, och kan modelleras med hjälp av konventionella kloriddiffusionsmodeller.

Ett viktigt faktum att notera är att kloriddiffusionsmodellering endast modellerar tiden till korrosionsinitiering, vilket är oberoende av tjockleken på den varmförzinkade beläggningen. När man bedömer korrosionens utbredningsfas, under vilken den förzinkade beläggningen korroderar långsammare än stål, ökar hållbarheten ytterligare då zinkbeläggningen är tjock.

Barriärskydd

En annan fördel med zinkbeläggningen på armeringsstål är att varmförzinkningsprocessen ger fullständig täckning av alla ytor. Denna metallurgiskt bundna barriär fungerar som ytterligare ett skydd mellan stålet och atmosfären. Detta tillsammans med beläggningens utmärkta nötningsbeständighet och seghet gör den idealisk för att skydda armeringsstål under transport till installationsplatsen liksom under monteringen.

Minimal störning av betongmassan

Skulle korrosionsinitiering av zinkbeläggningen inträffa går korrosionsprocessen in i tillväxtfasen. De resulterande zinkkorrosionsprodukterna är finkorniga och pulverlika och expansionen i volym är endast upp till 1,3 gånger den ursprungliga zinkvolymen (jämfört med obelagt armeringsstål som expanderar upp till 7 gånger den ursprungliga stålvolymen på grund av korrosion).

Zinkens korrosionsprodukter är också mer lösliga i det alkaliska porvattnet och diffunderar bort från armeringsstålet och in i betongmatrisen, till skillnad från järnkorrosionsprodukter som inte vandrar bort från armeringsstålet förrän efter att

betongsprickor har uppstått. Detta undviker att ett inre tryck byggs upp och leder till sprickor och spjälkning av betongen.

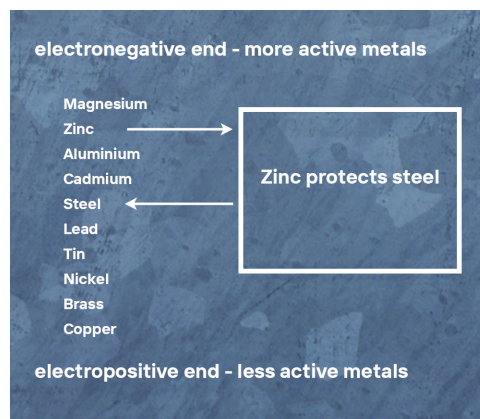
Dessutom minskar uppkomsten av de mikroskopiska korrosionsprodukterna i betongmatrisen betongens permeabilitet genom att fylla porer och hålrum, vilket bromsar tillförseln av aggressiva ämnen från betongytan till armeringsstålet. Resultatet av denna process är en betydande ökning av tiden för korrosionens utbredningsfas och en motsvarande fördröjning av tiden till sprickbildning initieras i betongen.

Offeranod

Den galvaniska spänningsserien är en lista över metaller och legeringar ordnade efter deras relativa potential i varje miljö. Bilden till höger visar en serie metaller ordnade efter elektrokemisk aktivitet i havsvatten (elektrolyt). Metallerna är ordnade uppifrån och ner efter deras offerkapacitet; metallerna överst på skalan ger katodiskt skydd, offer sig, åt metallerna under.

Zink är anodiskt mot stål. Därför kommer den varmförzinkade beläggningen att ge katodiskt skydd för utsatt stål. När zink och stål kopplas samman i närvaro av en elektrolyt förbrukas zinken långsamt samtidigt som stålet skyddas. Zinkens förmåga att offera sig skyddar stålet i händelse av skada i samband med hantering och montage.

Zink skyddar stål

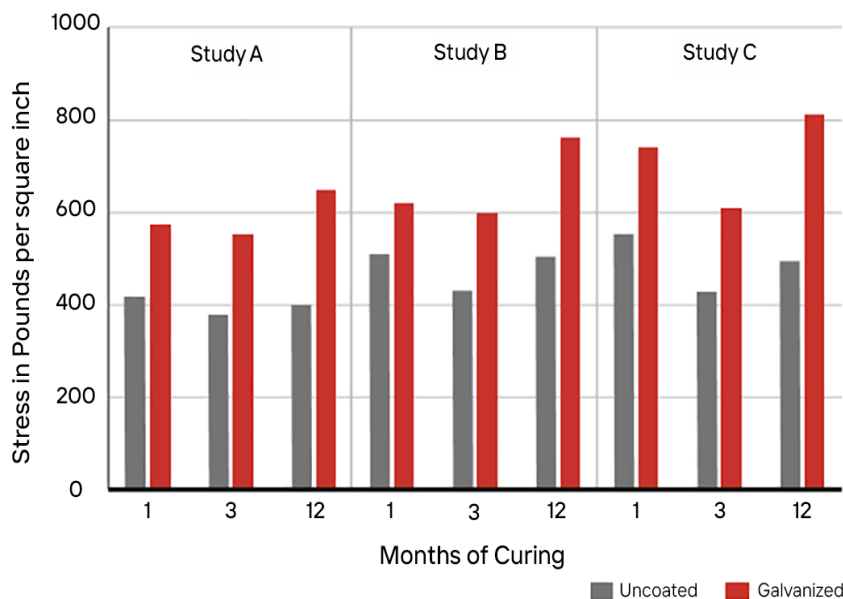


Zinkens position i den galvaniska serien

Bindningsstyrka

Det finns omfattande studier som stöder den varmförzinkade armeringens överlägsna bindningsstyrka i jämförelse med obelagt armeringsstål.

Den erhållna bindningsstyrkan är nära kopplad till bildningen av den passiva kalciumhydroxizinkatfilmen. Även om det har rapporterats i accelererade tester att bindningsstyrkan hos den varmförzinkade armeringen är lägre än för den obelagda, gäller detta endast under de första 1 – 2 veckorna och är relaterad till zinkens initiala reaktion på de mycket alkaliska förhållandena. Efter 28 dagar, när betongen har utvecklat sin normala bindning och tryckhållfasthet, kommer den varmförzinkade armeringen att ha en högre bindningskapacitet jämfört med obelagt armeringsstål. Detta beror på utfällningen av kalciumhydroxizinkatfilmen vid gränssytan mellan armeringen och betongen.



Jämförelse av bindningsstyrkan mellan obelagd och varmförzinkad armeringsstång. (Källa: University of California)

Korrosionsprofil hos obelagt armeringsstål i jämförelse med varmförzinkat armeringsstål

Det anpassade schemat nedan visar prestandan hos varmförzinkat armeringsstål jämfört med obelagt armeringsstål i betong.

Den högre kloridtröskeln för varmförzinkat armeringsstål och beständighet mot effekterna av karbonatisering fördröjer starten av korrosionsprocessen (skiftar från punkt x till punkt y). Det barriärskydd som zink erbjuder, kombinerat med den minimala inverkan på zinkkorrosionsprodukterna, innebär att processens utbredningsfas förlängs.

De olika stegen hos ett korrosionsförlopp anges nedan:

A. Initieringsstadiet – den period då betongen successivt exponeras för korrosiva produkter (klorider/karbonatisering) och det obelagda armeringsstålet förblir passiverat (till punkten x). Tiden till korrosionsinitiering kan beräknas med kloriddiffusions- och karbonatiseringsmodeller (krävs endast för obelagt armeringsstål) som är baserade på Ficks andra lag.

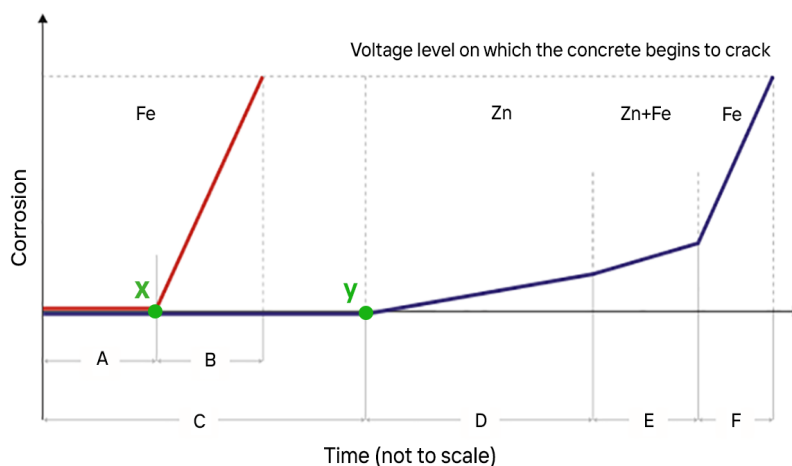
B. Utbredningsstadiet – Nedbrytning av passiveringsskiktet på det obelagda armeringsstålet och korrosion av armeringsstålet till den acceptabla gränsen för betongförsämring nås. I slutet av denna fas uppstår sprickbildning och flagning av betongen.

C. Livslängden för passiveringsskiktet på varmförzinkat armeringsstål. Korrosionsinitieringssteget förlängs på grund av den ökade toleransen mot kloridangrepp och att karbonatiseringen inte bryter ned passivskiktet.

D. Skyddsperioden från korrosion på det förzinkade armeringsstålet då klorider angriper en liten del av zinksiktet på stålytan och korrosionsprodukter diffunderar bort från armeringsstålet.

E. Perioden för ytterligare skydd där korrosion orsakar upplösning av FeZn-skikten.

F. I detta skede är hela zinksiktet förbrukat och korrosionshastigheten för armeringsstålet blir identisk med den för det exponerade obelagda armeringsstålet i steg B – men vid detta stadium har zinksiktet gjort sitt jobb och tiden till det att betongen spricker har ökat avsevärt.



Schematisk modell för korrosion hos varmförzinkat armeringsstål i betong, efter Tuutti 1982

Konstruktionsfördelar

En varmförzinkad beläggning på armeringsstål ger en betydande ökning av beständigheten hos armerade betongkonstruktioner. Bildandet av en passiv kalciumhydroxizinkatfilm på det varmförzinkade armeringsstålets yta ökar markant den kritiska kloridtröskeln för armeringsstålet och fördröjer därigenom avsevärt tiden dess att korrosion initieras. Denna fördröjning i initiering kan beräknas med hjälp av konventionella deterministiska kloriddiffusionsmodeller baserade på Ficks andra lag.

Tiden till dess att korrosion initieras ökar ytterligare eftersom varmförzinkat armeringsstål inte påverkas av om betongen karbonatiseras. Skulle det varmförzinkade armeringsstålet depassiveras är de bildade korrosionsprodukterna mycket mindre voluminösa än de korrosionsprodukter som bildas på obelagt armeringsstål, och orsakar således minimala störningar hos betongen. Detta undviker uppbyggnad av inre tryck som leder till sprickor och sönderfall hos betongkonstruktionen.

Tillsatsen av de mikroskopiska korrosionsprodukterna från zinksiktet till betongmatrisen minskar dess permeabilitet genom att fylla porer och hålrum, vilket bromsar tillförseln av aggressiva ämnen från betongytan till armeringsstålet. Resultatet av denna process är en betydande ökning av tiden för korrosionens utbredningsfas och en motsvarande fördröjning av tiden till initiering av sprickbildning i betongen.



Eleganta balkonger på lägenheter i Genua tillverkade av betong med varmförzinkad armering. Varmförzinkad armering valdes för att på bästa sätt bevara balkongerna över tid, i synnerhet för att skydda dem mot angrepp orsakade av smog, regn, frost och fukt. (Bilderna publicerade med tillstånd av Prefabbricati Torti di Pietro e Lino Torti snc)

En varmförzinkad beläggning ger en betydande ökning av hållbarheten hos armerade betongkonstruktioner

Att specificera varmförzinkning för armeringsstål

Varmförzinkat armeringsstål specificeras enligt EN 10348:2024 (Steel for the reinforcement of concrete - Galvanized reinforcing steel). EN 10348 anger kraven för varmförzinkade armeringsstålprodukter som har tillverkats av stänger som uppfyller kraven i EN 10080.

Kraven på varmförzinkningen av armeringsjärnen är i enlighet med den internationella standarden för styckeförzinkning – EN ISO 1461, med undantag att krav på beläggningstjocklek för armeringsstålprodukter är specifikt definierade enligt följande i tabellen till höger.

EN 10348 säkerställer också att ribbornas geometri (ribbens höjd eller inskärningsdjup) bibehålls på ett tillfredsställande sätt efter varmförzinkning. För att undvika eventuella effekter på de mekaniska egenskaperna anger standarden minsta böjdiamentrar för armering som böjs före varmförzinkning.

Krav på skiktjocklek enligt EN 10348:2024

Ståldiameter (mm)	Skiktets massa (g/m ²)	Skiktjocklek (µm)
> 6	610	85
≤ 6	505	70

Kostnader för varmförzinkad armering



Varmförzinkad armering har använts för de prefabricerade balkongerna i vit betong i Zac Seguin Housing Project i västra Paris. Denna lösning valdes för att säkerställa att de vita betongelementen inte skulle drabbas av rostfläckar över tid. Användningen av varmförzinkad armering möjliggjorde också en minskning av täcksjiktet för att underlätta en förbättrad nätt design. (Bilder med tillstånd av Aldric Beckmann Architectes/ Françoise N'Thépé Architecture & Design Paris)



Den totala kostnaden för att använda varmförzinkat armeringsstål i betongkonstruktioner beror till stor del på i vilken utsträckning det används i hela strukturen. Till exempel är det sällan nödvändigt att den strukturella kärnan eller de inre delarna av ett höghus eller de djupt inbäddade komponenterna i stora konstruktioner och fundament varmförzinkas. Det kan ofta räcka att använda varmförzinkat armeringsstål i ytexponerade element eller där fundament kan påverkas av aggressivt eller fluktuerande grundvatten.

Inom byggnadskonstruktion finner man generellt att kostnaden för varmförzinkad armering ökar den totala kostnaden för betongen med cirka 6–10 % beroende på storleken och typen av armeringsstål som används, kostnaden för varmförzinkningen, priset och mängden stål per kubikmeter. I genomsnitt motsvarar kostnaden för armeringsstålet inte mer än cirka 25 % av den totala kostnaden för betongen. Med tanke på att kostnaden för en byggnads stomme och skal normalt endast utgör cirka 25–30 % av de totala byggnadskostnaderna, minskar merkostnaden för varmförzinkning till mellan 1,5–3,0 % av de totala byggnadskostnaderna.

Denna kostnadsökning minskar till så lite som 0,5–1,0 % om varmförzinkningen är begränsad till konstruktionens yttre delar. I jämförelse med den totala projektkostnaden eller det slutliga försäljningspriset blir merkostnaden för varmförzinkningen mycket liten, ofta inte mer än 0,1–0,2 %.

I en studie 2017 utförd av professor Richard Weyers, Virginia Tech University, undersöktes diffusionen av klorid i betong och hur detta påverkade livslängden för epoxibelagt armeringsstål, styckeförzinkat armeringsstål och rostfritt armeringsstål (316LN) i Virginia, USA. De totala (initiala) kostnads- och livscykelkostnadssiffrorna visar att varmförzinkat armeringsstål ger det mest kostnadseffektiva skyddet för armerade broräcken med en livslängd på 100 år.

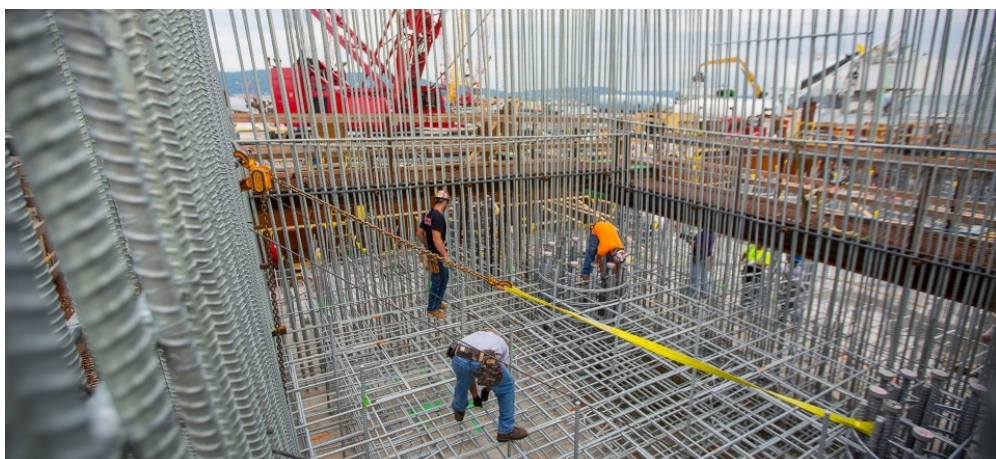
När kostnaderna och konsekvenserna av korrosionsskador på en armerad betongbyggnad analyseras är denna extra kostnad för varmförzinkning en mycket liten investering för ett överlägset långsiktigt korrosionsskydd.

Bockning, svetsning, reparation, hantering, transport och förvaring

Anvisningar och krav på bockning, svetsning, reparation och andra bearbetningsaspekter ges i EN 10348:2024.

På grund av den förbättrade beständigheten hos det varmförzinkade skiktet krävs ingen speciell hantering eller skötsel vid transport av varmförzinkat armeringsstål, men några rekommendationer för transport ges nedan:

- Kedjor, ställinor eller kablar kan användas för att lyfta godset;
- Buntar ska lyftas vid flera upphängningsställen;
- Användning av mellanlägg rekommenderas för att förhindra onödig nötning mellan stänger i längre buntar;
- Ingen speciell upplagring behövs, även om armeringsstålet och nätet bör staplas för att möjliggöra dränering och luftflöde så att vitrost undviks;
- Eftersom zinksiktet inte är känsligt för UV-ljus kan den förzinkade armeringen förvaras var som helst på monteringsplatsen.



Installation och skydd

På grund av den utmärkta nötningsbeständigheten hos varmförzinkat armeringsstål krävs ingen speciell hantering vid själva installationen. Detta, i kombination med det förzinkade armeringsstålets förbättrade bindningsstyrka, innebär att inget extra stål behöver installeras. (Vissa skyddsbeläggningar kräver överlappslängder på ytterligare 20 % – 50 % jämfört med obelagt armeringsstål).

Precis som för obelagt armeringsstål krävs inga specifika väderförhållanden för installationen och tack vare ytbeläggningen är varmförzinkat armeringsstål mycket renare att arbeta med. Eftersom beläggningen är metallurgiskt bunden till stålet uppstår sällan skador under installationen.



Blandning av varmförzinkat och obelagt armeringsstål

I betong förväntas inte korrosiva reaktioner uppstå mellan obelagt och varmförzinkat armeringsstål så länge som de två metallerna förblir passiva. För att säkerställa att så är fallet bör täcksiktet över obelagt armeringsstål och förbindningar inte vara mindre än det skydd som krävs för att skydda enbart obelagt armeringsstål under liknande förhållanden.

När varmförzinkat armeringsstål används är det praxis att allt stål som kommer i kontakt med armeringsstålet ska vara varmförzinkat, inklusive bindtråd och olika typer av fästelement, eller att icke-metalliska eller plastbelagda produkter används. Om varmförzinkat armeringsstål kommer i kontakt med obelagt armeringsstål i områden som är utsatta för korrosion, kommer det belagda stålet att offras för att skydda det obelagda stålet, vilket resulterar i en minskning av livslängden för beläggningen nära kontaktområdet.

Skulle kontakt med obelagt armeringsstål vara oundviklig och ett problem kan polyeten och dielektrisk tejp användas för att ge elektrisk isolering mellan de två metallerna. Varmförzinkad bindtråd eller plastklämmor bör användas vid montering eller installation av varmförzinkat armeringsstål och även stöd bör vara av varmförzinkat stål, plast eller något annat inert material, t ex murbruk. Om mekaniska kopplingar används bör de också vara varmförzinkade.



Mario M. Cuomo-brons 43 par betongpiper är förstärkta av varmförzinkat armeringsstål.

Skäl att använda varmförzinkat armeringsstål

1 Varmförzinkat armeringsstål passiveras i våt betong genom att det bildas en vidhäftande film av kalciumhydroxizinkat. Vid bildandet av denna film **ökar bindningsstyrkan mellan det varmförzinkade armeringsstålet och betongen.**

2 Varmförzinkat armeringsstål är stabilt över ett brett pH-område och är **helt opåverkat av om betongen karbonatiseras.**

6 I applikationer som är exponerade för karbonatisering **tillåter varmförzinkat stål möjligheten att använda ett tunnare täcksikt** jämfört med obelagt armeringsstål samtidigt som man uppnår samma hållbarhet. Det finns inga speciella konstruktionskrav för betong med varmförzinkat armeringsstål och inget extra stål eller täcksikt krävs.

7 Skulle varmförzinkat armeringsstål bli avpassiverat kommer zinken att korrodera långsammare än järnet, och zinkbeläggningen utgör en barriär mot järnkorrosion. Till skillnad från järn, kommer zinkens korrosionsprodukter att migrera från den varmförzinkade beläggningen, och genom att minska porositeten kommer de att minska ner hastigheten för kloridinträngning. Den relativt sett mindre volymen hos zinkens korrosionsprodukter jämfört med järnets minskar det expansiva trycket som genereras av korrosionsprocessen. **Detta minskar storleken på eventuella sprickor som kan bildas.**

8 Varmförzinkat armeringsstål är ett effektivt sätt att säkerställa beständigheten hos en betongkonstruktion **till en mycket lägre kapitalkostnad än med armering av rostfritt stål.**

9 Varmförzinkat armeringsstål **innebär inte de kontinuerliga testnings- och underhållskostnaderna** som är förknippade med katodiska skyddssystem.

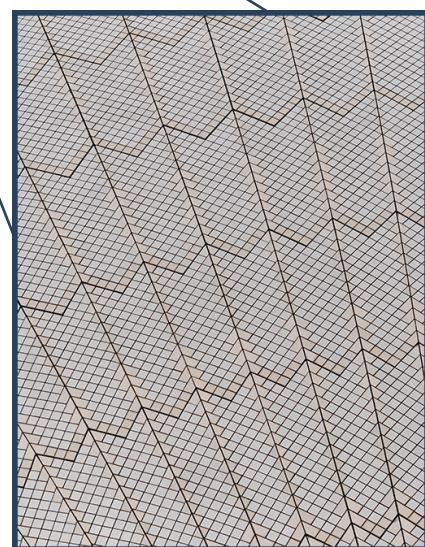
10 Till skillnad från epoxibeläggningar ger en varmförzinkad beläggning på armeringsstål **barriärskydd, förbättrad bindningsstyrka, ett överlägset passiveringsskikt och fungerar som en offeranod om armeringsstålet under beläggningen skulle exponeras.** Den har utmärkt nötningsbeständighet, är opåverkad av UV-ljus och har inga speciella krav på förvaring, transport, hantering och fixering.

12 Varmförzinkning är ett miljömässigt hållbart alternativ. En miljövarudeklaration (EPD) är tillgänglig för varmförzinkat stål, och vid slutet av konstruktionens livslängd kan eventuell kvarvarande zinkbeläggning återvinnas tillsammans med stålet. Den lilla miljöpåverkan från varmförzinkningsprocessen kompenseras av de enorma CO₂-besparingar som är förknippade med den ökade beständigheten hos den varmförzinkade, stålarmade betongkonstruktionen.

3 Konservativt sett har varmförzinkat armeringsstål en 2 till 2,5 gånger högre tröskel för kloridangrepp jämfört med obelagt armeringsstål – detta mer än fördubblar tiden till passivering av armeringsstålet upphör och korrosion initieras. **Vanligtvis ökar varmförzinkat armeringsstål konstruktionens livslängd med 4 till 5 gånger jämfört med obelagt armeringsstål.**

4 Tiden till korrosionsinitiering av varmförzinkat armeringsstål i betong kan modelleras med hjälp av konventionella kloriddiffusionsmodeller baserade på Ficks andra lag.

5 Det passiva beteendet hos varmförzinkat armeringsstål i betong gör det lämpligt för användning i aggressiva miljöer och är idealiskt för yttre fasader, prefabricerade panelfogar och ytelement, ja **alla applikationer där karbonatisering eller kloridinträngning är ett problem.**



Chevronplattorna i Sydney Opera House byggdes med varmförzinkat armeringsstål.

Referenser

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/O5 Durability Modelling", Sydney.

Concrete Institute of Australia (2018), "Concrete Durability Series: Z7/O2 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

Erkännanden

Fotoreferenser

Omslag. Sidorna 1, 2, 9, 10:

New Yorks Genomfartsmyndighet

Sidorna 3, 4, 5, 7:

Galvanizers Association of Australia

Sidorna 3, 4:

Shutterstock.com

Sidan 11:

stock.adobe.com

Stort tack till Galvanizers Association of Australia för deras hjälpsamhet hjvid utarbetandet av detta dokument.

Ytterligare information om varmförzinkad armering för betong:

Nordic Galvanizers

Zinc Info Norden AB
Danderydsvägen 146
SE-182 36 Danderyd
Sweden



www.nordicgalvanizers.com

Email: info@nordicgalvanizers.com

European General Galvanizers Association

14-16 Reddicroft
B73 6AZ
United Kingdom

Boulevard du Souverain 68
1170 Brussels
Belgium

www.egga.com

Email: mail@egga.com

