



Žárově zinkovaná výztuž v železobetonových konstrukcích



Představení pro techniky a projektanty



12 ARGUMENTŮ PRO ŽÁROVÉ ZINKOVÁNÍ



EN ISO 1461

- dlouhodobá životnost a bezúdržbovost povlaku
- výborná mechanická odolnost
- nízká pořizovací cena úpravy
- vysoká rychlost aplikace bez dodatečných úprav
- dokonalé pokovení dutin a hran
- katodická ochrana
- dobrý kovový vzhled povlaku
- po aplikaci okamžitá možnost montáže
- dobrá přilnavost povlaku
- snadná kontrola kvality pokovení
- šetrnost k životnímu prostředí
- zvýšení požární odolnosti ocelové konstrukce

V kombinaci s nátěrovým systémem životnost až 100 let (duplexní systém)



Úvod

Žárově zinkování se používá jako optimální řešení pro prodloužení životnosti betonářské oceli v železobetonu již více než 100 let. Z počátku byla žárově zinkovaná výztuž používána při stavbě železobetonových nádrží na vodu, kde byl k předpětí stěn nádrže použit žárově zinkovaný drát.

Od padesátých let se používání žárově zinkované výztuže rozšířilo v mnoha dalších zemích. V šedesátých letech a na začátku sedmdesátých let bylo vyrobeno značné množství betonářské oceli, zejména pro použití při stavbě mostů a dálnic v USA. V Austrálii je nejznámější aplikací žárově zinkované výztuže při použití konstrukčních prvků dlaždicové skořepiny budovy Opery v Sydney, instalovaných v roce 1963, které jsou stále v bezvadném stavu, čisté a bez známek koroze.

Za posledních 25 až 30 let dochází k neustálému nárůstu celosvětového používání žárově zinkované výztuže v celé řadě železobetonových konstrukcí a aplikací. Například od roku 1995 byla veškerá betonářská ocel na mostních projektech v New Yorku žárově zinkována. Mnoho mostů v USA prochází pravidelnou kontrolou stavu žárově zinkované výztuže, která byla použita při jejich výstavbě a tyto kontroly potvrdily, že veškerá výztuž je dodnes ve výborném stavu.

V Evropě se žárově zinkovaná výztuž dosud používala hlavně v obzvláště agresivních prostředích, jako jsou konstrukce na mořském pobřeží, kanalizační systémy, silniční tunely atd. a dále pro stavbu speciálních konstrukcí pro konkrétní projekty.

Kromě těchto aplikací může použití žárově zinkované výztuže řešit technické problémy, umožnit realizaci lehkých a subtilních konstrukcí a zajistit lepší architektonická řešení. Žárově zinkovaná výztuž není navzdory mnoha výhodám dosud častěji využívána. Je to dáno tím, že povědomí o těchto výhodách je stále na nízké úrovni: žárově zinkovaná výztuž může nejen představovat velmi efektivní řešení pro klienty, ale může být také výhodná pro konstruktéry a výrobce betonářských prefabrikátů z ekonomického, technického a ekologického hlediska.

Žárově zinkovaná výztuž je dnes uznávána jako ekonomicky efektivní řešení pro odstranění dopadů karbonatce a pro výrazné oddálení nástupu koroze iniciované chloridovými ionty ve srovnání s výztuží bez povrchové úpravy v pobřežních a průmyslových prostředích. Žárově zinkovaná výztuž je také ideální pro vnější fasády, prefabrikované panelové spoje a povrchové prvky, kde je zásadní ochrana před korozí a před odkrytím výztuže.

Setrvalý úspěch konstrukcí využívajících žárově zinkovanou výztuž významně přispívá k narůstajícímu zájmu o její aplikaci v návrhu nových staveb.



Nedávno dokončený most Mario M. Cuomo Bridge byl největším mostním projektem v historii státu New York. Nový most nahradil předchozí most Tappan Zee přes řeku Hudson severně od New Yorku.



Mostovka mostu Mario M. Cuomo Bridge je sestavena z téměř 6000 prefabrikovaných panelů o délce 3,66 m a šířce 6,7–13,7 m pro nájezdové panely a z 963 hlavních mostových panelů. Panely jsou spojeny zalitím betonu kolem vyčnívající žárově zinkované výztuže. (Obrázek s laskavým svolením ředitelství silnic státu New York)



Most Saint-Nazaire byl postaven v 70. letech 20. století a stále je nejdelším mostem ve Francii. Většina jeho betonové výztuže nebyla chráněna proti korozi, což vedlo k rozsáhlému programu údržby a oprav. Na velmi specifických místech – přírubách konců T-nosníků a spojovacích deskách odlitých na místě ve výšce přírub (na obrázku výše) – bylo použito přibližně 63 tun žárově zinkované ocelové výztuže. Na konkrétních místech, kde byla použita žárově zinkovaná výztuž, nebyly nutné žádné opravy.

Náklady spojené s korozí

Studie publikovaná v roce 2016 ukázala, že celkové náklady na korozi v roce 2013 dosahovaly 2,5 bilionu USD (2,16 bilionu EUR), což odpovídá přibližně 3,4 procentům globálního hrubého domácího produktu (HDP). Studie, která zkoumala dopad koroze a nákladů spojených s prevencí koroze na reálnou ekonomiku, odhalila, že použití „osvědčených postupů“ k prevenci škod způsobených korozí by mohlo vést k ročním úsporám 15–35 procent (324 až 755 miliard EUR).



Most Mario M. Cuomo Bridge je 5 km dlouhý, 8-proudový lanový most se dvěma oblouky, navržený s použitím žárově zinkované výztuže pro minimálně stoletou životnost.



Před návrhem žárově zinkované výztuže pro most Mario M. Cuomo Bridge ředitelství silnic státu New York vytvořilo plán ochrany proti korozi, který měl identifikovat expozici, mechanismy degradace, strategie konstrukčního řešení a výstavby a náklady na celý životní cyklus mostu.

Proces žárového zinkování

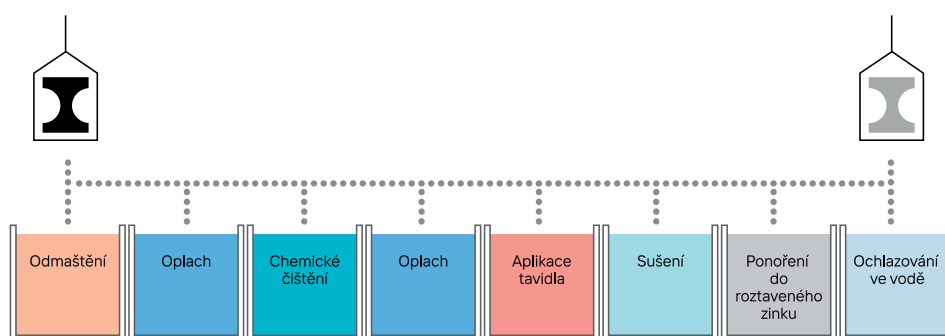
Proces žárového zinkování začíná očištěním povrchu ocelových předmětů ponorem do celé řady čistících nádrží. Poté se ocel ponoří do lázně roztaveného zinku. Roztavený zinek reaguje s ocelí a vytváří se povlak žárového zinku (metalurgický proces). Ocelové tyče mohou být žárově zinkovány v celých dávkách (například použitím speciálních gabionů). Kromě toho jsou výztužné sítě obvykle zavěšeny na rám a ponořeny do lázně roztaveného zinku.



Více než 27 000 tun žárově zinkované výztuže zajišťuje dlouhodobou odolnost hlavních mostových pilířů, pilířů nájezdových polí, opěr a silničních panelů mostu Mario M. Cuomo Bridge.

Koroze způsobuje společnosti značné náklady

Použitím osvědčených postupů k prevenci koroze by celkové roční úspory mohly činit 324 až 755 miliard EUR



Typický proces zinkování

Žárové zinkování je ponoření očištěné oceli do lázně roztaveného zinku k aplikaci metalurgicky navázaného povlaku, který má vysokou trvanlivost

Koroze betonářské oceli bez povrchové úpravy

Vysoce zásadité prostředí v betonu způsobuje na běžné betonářské oceli tvorbu stabilní pasivní vrstvy oxidu železa, který chrání ocel před korozi. Beton je však nehomogenní materiál, který je složen převážně z cementu (cementové pasty), písku a kameniva. Vlastní pórovitost vytvrzeného betonu poskytuje cestu pro difúzi plyných a vodných sloučenin, které v průběhu času mohou narušit pasivitu oceli a způsobit korozi. Koroze výztuže v betonu začne, když je ochranná vrstva oxidu na jejím povrchu depasivována. K depasivaci může dojít některým z těchto dvou mechanismů:

1. Karbonatace betonu
2. Koroze vyvolaná chloridovými ionty.

Jakmile dojde k iniciaci koroze výztuže, začnou se na povrchu výztuže vytvářet korozní produkty. Tyto korozní produkty jsou podstatně objemnější než ocel (rez, která je produktem oxidace železa ve výztuži, má 7krát větší objem, než je objem oceli). Toto zvýšení objemu způsobené korozi oceli působí na beton značným vnitřním pnutím a nakonec podmiňuje vznik tvorby trhlin a jejich šíření v betonu. Vzniklými trhlinami dochází k rychlému průniku agresivního prostředí k výztuži, což zrychluje proces koroze oceli. Následkem toho dochází k delaminaci nebo odlupování krycí vrstvy betonu.

Proces koroze betonářské oceli bez povrchové úpravy je graficky znázorněn na níže uvedeném upraveném Tuuttiho modelu, kde:

- A. Fáze iniciace** - výztuž zůstává pasivována (do bodu x).
- B. Fáze šíření** - porušení pasivní vrstvy na povrchu výztuže, kdy ocel aktivně koroduje. Na konci této doby dochází k praskání a odlupování betonu.

Korozní proces je nejčastěji zahájen buď neutralizací oblasti obklopující výztuž, např. karbonatací, nebo aktivací povrchu silně korozivními anionty, např. chloridovými ionty. Doba do zahájení koroze je dána koncentrací a rychlostí penetrace pronikajících látek do krycí vrstvy betonu a kritickou koncentrací potřebnou k zahájení koroze.

Korozní produkty na nechráněné oceli mohou dosahovat až sedminásobku svého objemu oproti oceli - což vede k tvorbě a šíření trhlin v betonu

Schematický model pro korozi výztuže v betonu, Tuutti 1982



Praskání a odlupování betonu v důsledku koroze výztuže



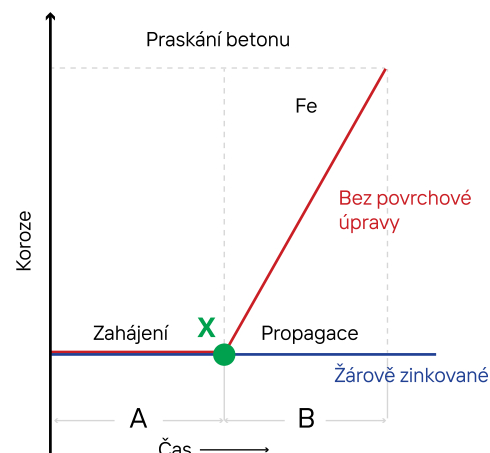
Karbonatace

Karbonatace je přirozený proces, ke kterému dochází, když je vysoká alkalita krycího betonu neutralizována v důsledku reakce s atmosférickým oxidem uhličitým.

Postupem času dochází vlivem karbonace ke snižování pH cementového tmelu, který postupuje až k výztuži. S klesající hodnotou pH betonu se výztuž uvnitř betonu stává náchylnější ke korozi.

Typické vlastnosti karbonatace betonu jsou:

- Karbonatace probíhá pomaleji ve větších hloubkách betonu.
- Hloubka karbonatace závisí na propustnosti betonu a trhlinách, na dutinách a pórech.
- Jakmile pH betonu klesne pod 11,5, začne výztuž korodovat.
- Účinek a rychlost neutralizace je silnější, když oxid siřičitý (SO_2) a oxid dusičitý (NO_2) reagují s vodou za vzniku vysoce kyselých roztoků. Tyto chemikálie mají v průmyslových oblastech vyšší koncentraci.



Na základě terénních měření bylo zjištěno, že pro snižování účinků karbonatace je rozhodující kvalita betonu. Testování odhalilo, že:

- U kvalitního konstrukčního betonu lze po 20 letech působení atmosférických vlivů pozorovat karbonataci pouhých 5–10 mm (například konstrukční prvky budov v městském prostředí).
- U nekvalitního betonu dochází k úplné karbonataci stěnových panelů o tloušťce 200 mm (z obou stran) za 5 - 8 let (například nízkonákladové budovy bytové výstavby).

Pronikání chloridových iontů

Koroze způsobená chloridovými ionty je celosvětově jednoznačně nejčastější příčinou degradace betonářské oceli a následného poškození železobetonových konstrukcí. Chloridové ionty mohou prostupovat betonem a dosáhnout koncentrací potřebné k tomu, aby došlo k depasivaci ochranného filmu na povrchu výztuže, čímž dojde ke korozi. Chloridové ionty aktivují povrch oceli, a tak vznikne anoda, přičemž zbývající pasivovaný povrch tvoří katodu.

Chloridové ionty pak napadají oxid železnatý a vytvářejí korozní produkty, které se odlučují od oceli a vytvářejí rez. Nově odkryté atomy železa vytvářejí další oxidy železa, čímž proces koroze pokračuje.

Zdroje pronikání chloridových iontů do betonu:

- Kontaminované kamenivo, mořské písky a příměsi.
- Brakická nebo slaná voda používaná pro míchání nebo zrání betonové směsi.
- Vystavení mořskému a pobřežnímu prostředí.
- Použití rozmrazovacích solí.

Chloridové ionty prostupují betonem v průběhu času difúzí, čímž se zvyšuje koncentrace chloridových iontů na povrchu betonářské oceli. Kritická koncentrace, stanovující možný počátek koroze oceli, je stanovena v rozmezí 0,2 – 0,4 % obsahu cementu (nebo 0,6 kg/m³ betonu).



Výztuž a degradace betonu v (přímořském) prostředí s vysokým obsahem chloridů

Koroze vyvolaná chloridy je hlavní příčinou koroze výztuže

Prodloužení životnosti železobetonu

Potřeba začlenit otázku trvanlivosti do návrhu konstrukcí, výstavby a údržby, aby se zabránilo předčasnému poškození betonových konstrukcí, je dobře známa.

Plánování trvanlivosti se skládá z výběru a použití materiálů, návrhových postupů a konstrukčních metod, jejichž cílem je zaručit dosažení životnosti konstrukce předpokládané zákazníkem a vyloučení nutných předčasných a neočekávaných zásahů údržby.

Ke stanovení povahy a rychlosti poškození materiálů za určitých makro a mikro environmentálních podmínek lze použít technickou analýzu a podle toho naplánovat konstrukční řešení, realizaci a údržbu betonové konstrukce během její životnosti.

Obvykle existují tři způsoby, jak zabránit korozi oceli v betonu:

1. Modifikace betonu

- Doplnkové cementové přísady (například popílek, struska a křemičité úlety).
- Impregnace (například polymery).
- Inhibitory (například dusičnany).
- Bariérové vrstvy (například membrány a barvy).

2. Úprava výztuže

- Výztuže s povrchovou úpravou (například žárově zinkovaná ocel).
- Kovy odolné proti korozi (například korozivzdorná ocel).
- Nekovové materiály (například polymer vyztužený vlákny a polymerová vlákna vyztužená sklem).
- Katodická ochrana (například vloženým proudem a obětovanou anodou).

3. Zvýšení tloušťky krycí vrstvy betonu

Zvýšení tloušťky krycí vrstvy betonu zajistí prodloužení doby potřebné k tomu, aby se vrstva karbonatace dostala k výztuži a doby potřebné k dosažení kritické úrovně koncentrace chloridových iontů na povrchu výztuže.

Nicméně v tomto přístupu se skrývá určitý paradox, který je potřeba vzít v úvahu, protože čím větší je tloušťka krycí vrstvy betonu, tím vyšší je maximální hodnota vnitřního pnutí způsobeného korozi výztuže, a tím větší je následná velikost trhlin.

Tyto tři metody mohou být použity jednotlivě nebo ve spojení s jinými metodami. Každá metoda má své výhody a nevýhody. Použitý přístup by měl být stanoven na základě posouzení individuální situace, prostředí a požadované délky životnosti majetku.



Plovoucí pontony v přístavu v Sandringhamu ve Victorii (Austrálie) s použitím žárově zinkované výztuže

Zinkování poskytuje dlouhodobou ochranu proti korozi a umožňuje použít nižší tloušťku krycí vrstvy betonu - šetří zdroje a náklady

Proč je žárově zinkovaná výztuž do betonu tak efektivní?

Tvorba pasivního filmu

Stejně jako výztuž bez povrchové úpravy tak i žárově zinkovaná výztuž tvoří v betonu ochrannou pasivační vrstvu. Zinek v silně alkalických roztocích (pH 12,5 - 13,2) je pasivován vytvořením přilnavé vrstvy krystalů dihydrátu bis(trihydroxidozinečnanu) vápenatého - $\text{Ca}(\text{Zn}(\text{OH})_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Tato reakce začíná bezprostředně po kontaktu s čerstvým betonem, přičemž se vytvoří povrchový film, který stabilizuje zinek a izoluje jej od okolního prostředí. Konečnými produkty pasivace jsou krystaly CaHZn na povrchu žárově zinkované výztuže.

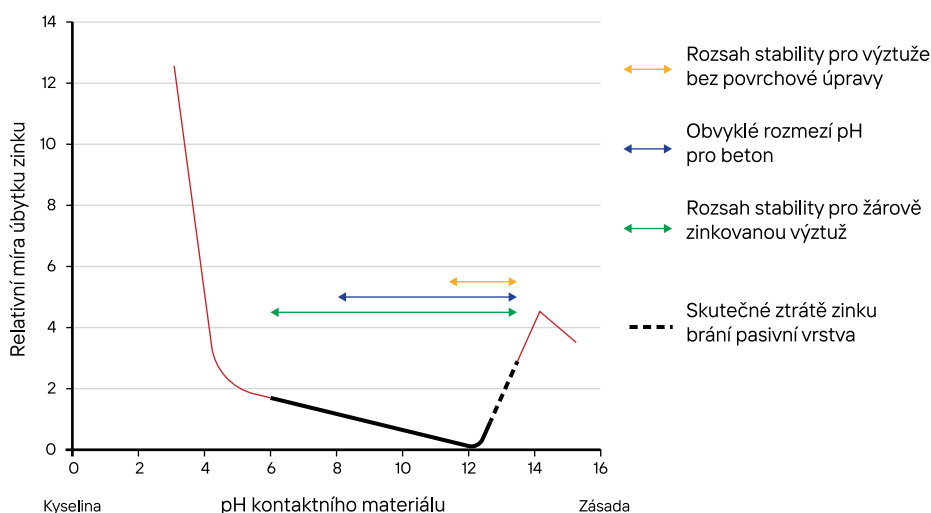


Krystaly CaHZn po 24 hodinách v $\text{Ca}(\text{OH})_2$ roztoku s pH 12,6

Při vytváření pasivní vrstvy se spotřebuje zhruba 10 μm původní čisté zinkové vnější vrstvy zinkového povlaku. To je malá část celkové tloušťky povlaku. Reakce se zinkem ustane, jakmile je beton vytvrzen a po 28 dnech, kdy beton dosáhne svou normální pevnost v tlaku, je vytvořena vrstva dihydrátu bis(trihydroxidozinečnanu) vápenatého, která zajistí, že žárově zinkovaná výztuž má obvykle vyšší soudržnost s betonem než ekvivalentní černá ocelová výztuž.

Vlastnosti této pasivační vrstvy jsou klíčové pro účinnost žárově zinkované výztuže v betonu, zejména pro její chemickou stabilitu při neutrálním pH a při vysokých koncentracích chloridových iontů.

Žárově zinkovaná výztuž může dosáhnout vyšší soudržnosti s betonem ve srovnání s běžnou betonářskou ocelí



Rozsah stability pH výztuže v betonu

Odolnost proti karbonataci

Žárově zinkovaný povlak má velmi malou rychlost koroze v širokém rozsahu hodnot pH (pH 6 - 12,5). Z tohoto důvodu zůstává žárově zinkovaná výztuž stabilní, protože hladina pH betonu klesá po dobu její životnosti v důsledku karbonatace. Naopak klasická výztuž je stabilní pouze v malém rozsahu pH (pH 11,5 - 13,2) a začne korodovat, jakmile hodnota pH betonu klesne pod 11,5. V betonu s hodnotou pH mezi 12,5 a 13,2 je žárově zinkovaná výztuž chráněna vytvořením pasivní vrstvy dihydrátu bis(trihydroxidozinečnanu) vápenatého, což brání vysokému úbytku zinku ve vysoce zásaditém prostředí.

Postupem času dochází vlivem karbonace ke snižování pH cementového tmelu, a ta postupuje až k výztuži.

Jak ukazuje vedlejší obrázek, žárově zinkovaná výztuž je tedy zcela nedotčená karbonatací betonu.

Odolnost proti průniku chloridových iontů

Žárově zinkovaná výztuž má vyšší odolnost proti průniku chloridových iontů než ocelová výztuž.

Nedávný výzkum na toto téma (Jaśniok, Sozańska, Kołodziej a Chmiela, 2020) zjistil, že: „Výsledky získané z korozních (LPR, EIS) a strukturálních (SEM, EDS) zkoušek na vzorcích betonu vyztuženého ocelí B500SP prokázaly velmi příznivý vliv zinkového povlaku na výztuž ve formě zajištění účinné ochrany proti korozi v chloridovém prostředí”.

Hodnota koncentrace 0,06 % chloridových iontů na hmotnost betonu znamená v průmyslových podmínkách 20% pravděpodobnost vzniku korozního napadení ocelové výztuže bez povrchové úpravy. Žárově zinkovaná výztuž může odolávat vyšší koncentraci chloridových iontů, nežli koncentrace způsobující korozi výztuže, díky stabilitě filmu hydroxidu zinečnatu-vápenatého.

Ačkoli neexistuje všeobecná shoda, literatura věnující se této problematice uvádí, že kritická koncentrace chloridových iontů může být v případě výztuže 2–6krát vyšší než pro výztuž ocel bez povlaku.

Rychlost difúze chloridových iontů betonem navíc není konzistentní, v průběhu času se zpomaluje, takže v praxi to znamená, že vyšší přípustná koncentrace chloridových iontů pro žárově zinkované výztuže se projeví tak, že doba do zahájení koroze je mnohem delší než u běžné výztuže – alespoň dvakrát a v některých studiích až 10krát déle.

Protože průnik chloridových iontů je největší příčinou poškození železobetonových konstrukcí v globální infrastruktuře, musí být pečlivě posouzen v každém plánu trvanlivosti. Žárově zinkování je jednoduchou a ekonomicky efektivní metodou pro zlepšení odolnosti

vůči chloridovým iontům, a tím i trvanlivosti betonových konstrukcí a její chování ve vztahu k výztuži bez povrchové úpravy lze modelovat pomocí konvenčních modelů chloridové difúze.

Důležitým faktem, který je třeba vzít v úvahu, je, že deterministické modelování difúze chloridových iontů pouze modeluje čas do zahájení koroze, který je nezávislý na tloušťce zinkového povlaku. Ve fázi šíření koroze, kdy žárově zinkovaný povlak degraduje pomalejším tempem než samotná ocel, hraje klíčovou roli jeho tloušťka, která významně zvyšuje celkovou trvanlivost konstrukce.

Bariérová ochrana

Další výhodou žárově zinkované výztuže je, že proces žárového zinkování zajistí úplné pokrytí všech povrchů. Tato metalurgicky navázaná bariérová ochrana funguje jako další obrana mezi ocelí a atmosférou. To spolu s vynikající odolností proti otěru a houževnatostí vytváří ideální ochranu výztuže během přepravy na staveniště i ve fázi výstavby daného projektu.

Minimální narušení betonové vrstvy

Pokud dojde ke vzniku koroze žárově zinkovaného povlaku, tak proces koroze vstoupí do fáze propagace. Výsledné korozní produkty zinku jsou jemné a práškovité a jejich objem se zvětšuje pouze na 1,3násobek původního objemu zinku (ve srovnání s výztuží bez povrchové úpravy, která díky korozi expanduje až 7krát oproti původnímu objemu oceli).

Korozní produkty zinku jsou rozpustné v alkalickém roztoku a difundují z výztuže do pórů cementového tmelu. V porovnání s korozními produkty oceli, které neprostupují do cementové matrice betonu, ale způsobují

svým objemem praskání a odlupování betonové vrstvy.

Důsledkem migrace korozních produktů zinku do pórů cementového tmelu je snížen prostup agresivních látek z povrchu betonu směrem k výztuži. Výsledkem tohoto jevu je výrazné prodloužení fáze propagace koroze a s tím související prodloužení doby do vzniku trhlin v betonu.

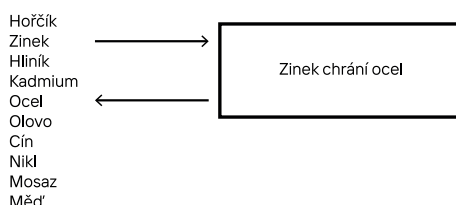
Obětovaná ochrana

Galvanická řada kovů je soubor kovů a slitin uspořádaných podle jejich elektrochemických potenciálů v různých prostředích. Na obrázku vpravo je zobrazen soubor kovů seřazen podle jejich elektrochemických potenciálů v mořské vodě (elektrolytu). Kovy jsou uspořádány shora dolů podle jejich potenciálů; kovy v horní části stupnice poskytují katodickou nebo obětovanou ochranu kovům v dolní části stupnice.

Zinek je anodický vůči oceli. Žárově zinkovaný povlak tedy bude poskytovat katodickou ochranu nepovlakované oceli. Při kontaktu zinku a oceli v přítomnosti elektrolytu, se zinek pomalu spotřebovává, zatímco ocel je chráněna. Katodická ochrana zinku poskytuje ochranu oceli v případě poškození při hrubé manipulaci nebo během realizace stavby.

Zinek chrání ocel

Elektronegativní strana - aktivnější kovy



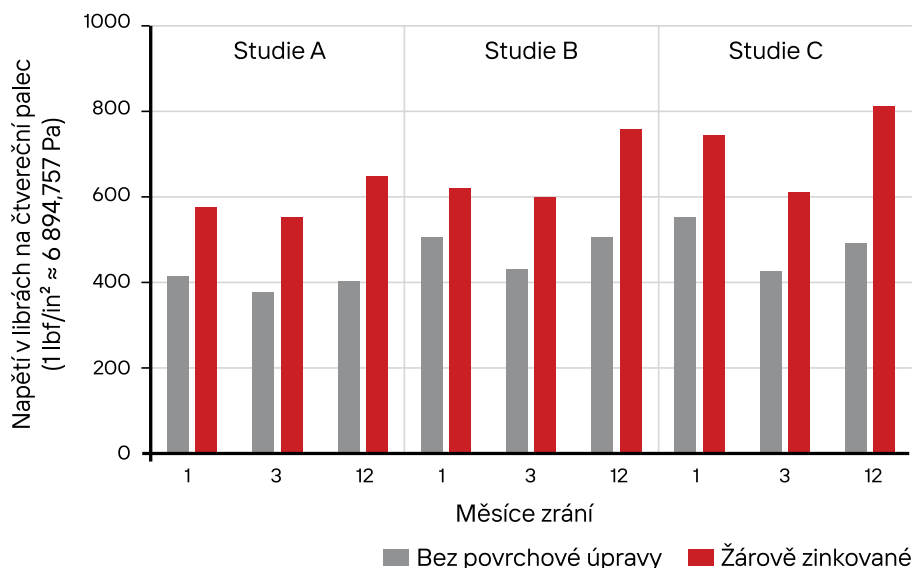
Elektropozitivní strana - méně aktivní kovy

Pozice zinku v galvanické řadě

Soudržnost výztuže s betonem

Existuje celá řada důkazů, které dokládají vynikající soudržnost žárově zinkované výztuže s betonem ve srovnání s běžnou výztuží.

Soudržnost je úzce spjata s tvorbou pasivního filmu dihydrátu bis(trihydroxidozinečnanu) vápenatého a přestože bylo v urychlených zkouškách pozorováno, že soudržnost žárově zinkované výztuže je nižší než u nepozinkované výztuže, tento účinek trvá pouze první 1 - 2 týdny a souvisí s počáteční reakcí zinku na vysoce zásadité podmínky. Jakmile beton po 28 dnech dosáhne své normové pevnosti v tlaku, vykazuje žárově zinkovaná výztuž lepší adhezní vlastnosti než výztuž bez povrchové úpravy. Důvodem je vysrážení filmu hydroxidu zinečnatého-vápenatého na rozhraní výztuže a betonu.



Porovnání soudržnosti nepovlakovaných a žárově zinkovaných výztuží (Zdroj: Kalifornská univerzita)

Korozní profil betonářské oceli bez povrchové úpravy v porovnání s žárově zinkovanou výztuží

Níže uvedené upravené schéma ukazuje účinnost žárově zinkované výztuže ve srovnání s nepozinkovanou výztuží v betonu.

Vyšší kritická koncentrace chloridových iontů pro žárově zinkovanou výztuž a její odolnost vůči účinkům karbonatů zpomaluje nástup korozního procesu (posune bod x do bodu y). Bariérová ochrana zajištěná zinkem v kombinaci s minimálním narušením korozních produktů zinku vede k prodloužení propagační fáze degradace.

Každá fáze koroze je popsána níže:

A. Počáteční fáze - období, ve kterém je beton postupně vystaven korozivnímu prostředí (chloridy / karbonatů) a zároveň je výztuž bez povrchové úpravy pasivována (až do bodu x). Čas do zahájení koroze lze kvantifikovat deterministickými modely difúze chloridových iontů a postupu karbonatů betonu (vyžadováno pouze pro výztuž bez povrchové úpravy), které jsou založeny na Druhém Fickově zákoně.

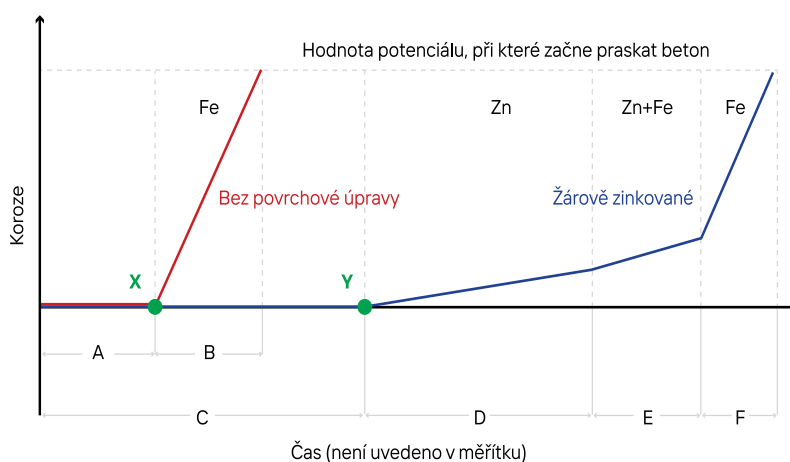
B. Fáze propagace - Destrukce pasivační vrstvy na výztuži bez povrchové úpravy a koroze výztuže na přijatelnou mez poškození betonu. Na konci této doby dochází k praskání a odlupování betonu.

C. Životnost pasivační vrstvy žárově zinkované výztuže. Fáze zahájení koroze se prodlužuje v důsledku zvýšené odolnosti vůči průniku chloridových iontů a úplného zamezení depasivace způsobené karbonatů betonu.

D. Období ochrany žárově zinkované výztuže před korozi, kdy chloridové ionty napadají malou část čisté zinkové vrstvy na povrchu oceli a korozní produkty difundují z výztuže.

E. Období dodatečné ochrany, kde koroze způsobuje rozpouštění vrstev slitiny FeZn.

F. V této fázi se spotřebuje veškerý zinkový povlak a rychlost koroze výztuže je stejná jako rychlost koroze obnažené výztuže bez povrchové úpravy ve stupni B - v této fázi však zinkový povlak odvedl svou práci a doba do zahájení praskání betonu se výrazně prodloužila.



Schematický model pro korozi žárově zinkované výztuže v betonu, Tuutti 1982

Projekční výhody

Žárově zinkovaný povlak na výztuži zajistí významné zvýšení trvanlivosti železobetonových konstrukcí.

Vytvoření pasivního filmu dihydrátu bis(trihydroxidoozinečnatanu) vápenatého na povrchu žárově zinkované výztuže výrazně zvyšuje kritickou koncentraci chloridových iontů pro výztuž, čímž se výrazně oddaluje doba zahájení koroze. Toto oddálení iniciace koroze lze kvantifikovat pomocí konvenčních deterministických modelů difúze chloridových iontů založených na Druhém Fickově zákoně.

Čas do zahájení koroze se dále prodlužuje, protože žárově zinkovaná výztuž je imunní vůči účinkům karbonatace. Pokud bude zinkovaná výztuž depasivována, výsledné korozní produkty zinku budou mnohem méně objemné než korozní produkty železa vytvořené na výztuži bez povrchové úpravy a způsobí tak minimální narušení betonového tmelu. Tím se zabrání vytváření vnitřního pnutí, které vede k praskání a odlupování betonu.

Důsledkem migrace korozních produktů zinku do pórů cementového tmelu je snížen prostup agresivních látek z povrchu betonu směrem k výztuži. Výsledkem tohoto procesu je výrazné prodloužení fáze propagace koroze a s tím spojené prodloužení doby do vzniku trhlin v betonu.



Železobetonové nosné trámy pro balkony elegantního bytového domu v Janově s použitím žárově zinkované výztuže. Byla vybrána žárově zinkovaná výztuž, aby se nosné trámy balkonů co nejdéle zachovaly v dokonalém stavu a zejména aby byly ochráněny před smogem, deštěm, mrazem a vlhkostí. (Obrázky s laskavým svolením Prefabbricati Torti di Pietro e Lino Torti snc)

**Žárově zinkovaný povlak na výztuži
zajistí významné zvýšení trvanlivosti
železobetonových konstrukcí.**

Specifikace žárově zinkovaného povlaku pro výztuž

Žárově zinkovaná betonářská ocel je specifikována dle EN 10348:2024 (Ocel pro výztuž do betonu – Výrobky z žárově zinkované betonářské oceli). Norma EN 10348 uvádí požadavky na výrobky z žárově zinkované betonářské oceli, které byly vyrobeny z tyčí splňující požadavky normy EN 10080.

Požadavky na zinkování výztuží jsou v souladu s mezinárodní normou pro žárově zinkování – EN ISO 1461, s tou výjimkou, že požadavky na tloušťku povlaku pro výrobky z betonářské oceli jsou konkrétně definovány následovně v tabulce vpravo.

Norma EN 10348 také zajišťuje, že geometrie žebírek (výška žebírek nebo hloubka indentace) je po zinkování uspokojivě zachována. Norma stanovuje minimální průměry ohýbání výztuží před zinkováním, tak aby se zabránilo možným mechanickým změnám vlastností výztuží.

Požadavky na tloušťku povlaku podle normy EN 10348:2024

Průměr oceli (mm)	Plošný nános povlaku (g/m ²)	Tloušťka povlaku (μm)
> 6	610	85
≤ 6	505	70

Náklady na žárově zinkovanou výztuž do betonu



Žárově zinkovaná výztuž byla použita na balkóny z prefabrikovaného bílého betonu v projektu bytové výstavby Zac Seguin na západě Paříže. Toto řešení bylo zvoleno s cílem zajistit, aby vzhled bílých prefabrikovaných betonových prvků v průběhu času netrpěl korozními skvrnami. Použití žárově zinkované výztuže také umožnilo snížení krycí vrstvy betonu, aby bylo možné použít subtilní konstrukční řešení. (Obrázky s laskavým svolením Aldric Beckmann Architectes/ Françoise N'Thépe Architecture & Design.Paris)



Celkové náklady při použití žárově zinkované výztuže v železobetonové konstrukci závisí do značné míry na rozsahu, v jakém rozsahu je v konstrukci tato výztuž použita. Velmi neobvyklé použití žárově zinkované výztuže by bylo v nosné konstrukci nebo u vnitřních prvků výškové budovy nebo v základové části rozměrných nosných konstrukcích a základů. Použití žárově zinkované výztuže je výhodné pouze v povrchové exponovaných prvcích nebo tam, kde mohou být základy ovlivněny agresivní nebo vztlínající podzemní vodou.

Při stavbě budov se obecně zjistilo, že náklady na zinkování zvyšují celkové náklady na železobeton přibližně o 6–10 % v závislosti na velikosti a typu použité výztuže, ceně zinkování a množství oceli na metr krychlový betonu.

Průměrné náklady na výztuž nejsou vyšší než cca 25 % celkových nákladů na použitý beton. Vzhledem k tomu, že náklady na skelet a plášť budovy běžně představují pouze asi 25–30 % celkových nákladů na celou stavbu se dodatečné náklady na zinkování sníží na 1,5–3,0 % celkových nákladů na celou stavbu. Tento příplatek se snižuje až na 0,5–1,0 %, pokud je žárově zinkování oceli omezeno pouze na

povrchové panely. Když se vezmou v úvahu celkové náklady projektu nebo konečná prodejní cena, pak jsou přidané náklady na zinkování velmi nízké, často ne více než 0,1–0,2 %.

Analýza provedená v roce 2017 profesorem Richardem Weyersem z Virginia Tech University zkoumala difúzi chloridových iontů do betonových mostovek a jeho účinky na životnost ve Virginii v USA pro výztuž s epoxidovou povrchovou úpravou, žárově zinkované výztuže a výztuže z korozivzdorné oceli 316LN. Údaje o celkových aktuálních nákladech a nákladech na celkový životní cyklus ukazují, že žárově zinkovaná výztuž poskytuje ekonomicky nejefektivnější ochranu pro vyztužené mostovky se stoletou životností.

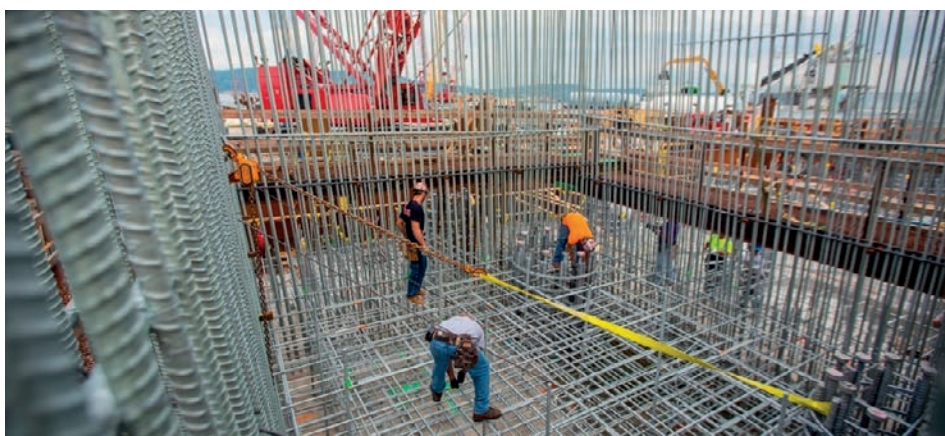
Když jsou analyzovány náklady a důsledky korozního poškození železobetonové budovy, jsou tyto dodatečné náklady na zinkování velmi malou cenou za vynikající dlouhodobou ochranu proti korozi.

Ohýbání, svařování, opravy, manipulace, doprava a skladování

Pokyny a požadavky na ohýbání, svařování, opravy a další aspekty zpracování jsou uvedeny v normě EN 10348:2024.

Vzhledem ke zlepšené trvanlivosti žárově zinkovaného povlaku není při přepravě takovéto výztuže nutné žádné zvláštní zacházení nebo péče, ale některá doporučení pro přepravu zahrnují:

- Použití řetězů, ocelových nebo jiných lan ke zvedání je povoleno;
- Svazky prutů by měly být zvedány na více zvedacích místech;
- Doporučuje se použití distančních podložek, aby se u delších svazků zabránilo zbytečnému oděru tyče o tyč;
- Není nutné žádné speciální uložení, přestože výztuž a sítě by měly být skladovány tak, aby umožňovaly odtok vody a proudění vzduchu, aby se zabránilo vzniku skvrn při skladování v podmínkách vysoké vlhkosti;
- Protože povlak není citlivý na ultrafialové světlo, může být uložen kdekoli na místě skladování.



Instalace a krycí vrstva

Vzhledem k vynikající odolnosti žárově zinkované výztuže proti oděru nejsou pro její instalaci na stavbě kladeny žádné zvláštní požadavky. To ve spojení se zlepšenou soudržností žárově zinkované výztuže s betonem znamená, že není třeba instalovat žádnou další ocel (některé ochranné nátěry vyžadují krycí vrstvu, která je ve srovnání s výztuží bez povrchové úpravy o dalších 20 - 50 % větší).

Stejně jako výztuž bez povrchové úpravy nejsou pro instalaci vyžadovány žádné specifické povětrnostní podmínky a díky povrchovému povlaku je práce s žárově zinkovanou výztuží mnohem čistější. Dále, protože je povlak metalurgicky spojen s ocelí, je riziko poškození povlaku při instalaci velmi malé.

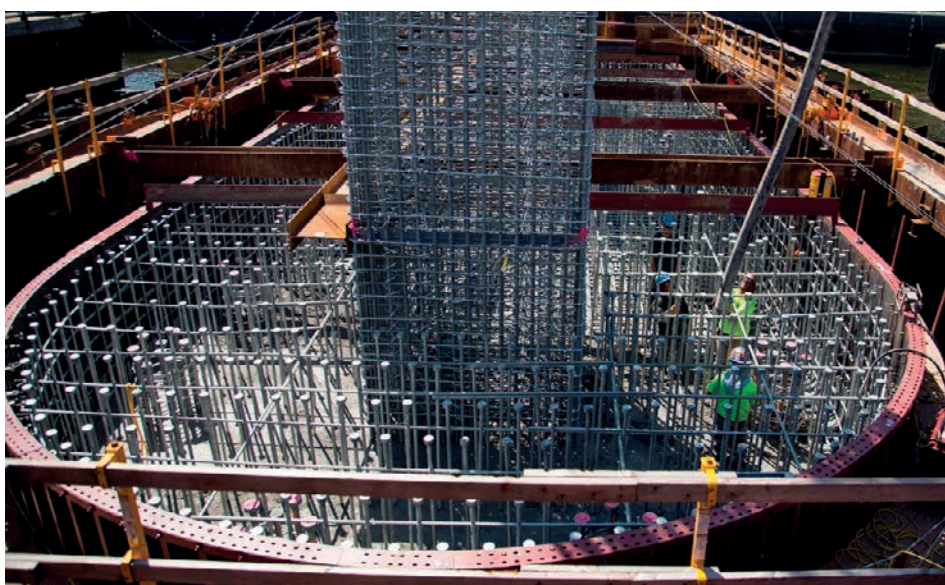


Kombinované použití žárově zinkované betonářské oceli s výztuží bez povrchové úpravy

V betonu se neočekává, že by mohlo dojít ke korozním reakcím mezi nepovlakovanými a žárově zinkovanými výztužemi, pokud oba kovy zůstanou pasivní. Aby koroze mezi žárově zinkovanou a nepovlakovanou výztuží skutečně nevznikala, je nutné zajistit, aby krycí betonu nad nepovlakovanou výztuží a spoji nebylo menší než krycí požadované pro samotnou nepovlakovanou výztuž za stejných podmínek.

V případě použití žárově zinkované výztuže se doporučuje, aby veškerá ocel, která je v kontaktu s výztuží, byla žárově zinkovaná, včetně vazacího drátu, vložek a podložek nebo aby byly použity nekovové nebo poplastované vazací prvky a podložky. Při kontaktu s neupravenou výztuží v korozním prostředí funguje zinkovaná výztuž jako obětovaný prvek, čímž se snižuje životnost jejího zinkového povlaku v okolí kontaktu.

Pokud by byl kontakt s výztuží bez povrchové úpravy nevyhnutelný a problematický, lze použít polyetylenovou a dielektrickou pásku k zajištění elektrické izolace mezi těmito dvěma kovy. Při montáži nebo instalaci žárově zinkované výztuže by měly být použity žárově zinkované vazací dráty, mechanické spojky a podložky tyčí. Nebo lze použít plastové spony nebo jiného inertního materiálu, jako je plast nebo dřevo.



43 párů betonových pilířů mostu Maria M. Cuomo Bridge je vyztuženo koší z žárově zinkované výztuže.

Důvody pro použití žárově zinkované výztuže do betonu

1 Žárově zinkovaná výztuž je pasivována ve vlhkém betonu vytvořením přilnavého filmu dihydrátu bis(trihydroxidooxinečnanu) vápenatého. **Při vytváření tohoto filmu se zvyšuje soudržnost mezi žárově zinkovanou výztuží a betonem.**

2 Žárově zinkovaná výztuž je stabilní v širokém rozsahu pH a je **zcela neovlivněna karbonatací betonu.**

6 V aplikacích, u kterých může docházet ke karbonataci, **umožňuje žárově zinkovaná ocel použití tenčí krycí vrstvy ve srovnání s výztuží bez povrchové úpravy a dosažení stejné trvanlivosti.** Neexistují žádné zvláštní požadavky na návrh betonových konstrukcí s použitím žárově zinkované výztuže a není potřeba žádná další ocel ani krycí vrstva.

7 V případě depasivace žárově zinkované výztuže, bude zinek korodovat pomaleji než ocel a zinkový povlak poskytne bariéru proti korozi oceli. Na rozdíl od oceli mohou korozní produkty zinku migrovat od povlaku a snížením pórovitosti cementového tmelu zpomalí rychlost prostupu chloridových iontů. Relativně menší objem korozních produktů zinku ve srovnání s ocelí snižuje vnitřní pnutí způsobené korozním procesem, **čímž se zmenšuje velikost případných trhlin, které se mohou vytvořit.**

8 Žárově zinkovaná výztuž představuje účinný způsob, jak zajistit trvanlivost železobetonové konstrukce **při mnohem nižších investičních nákladech než při použití výztuže z korozivodné oceli.**

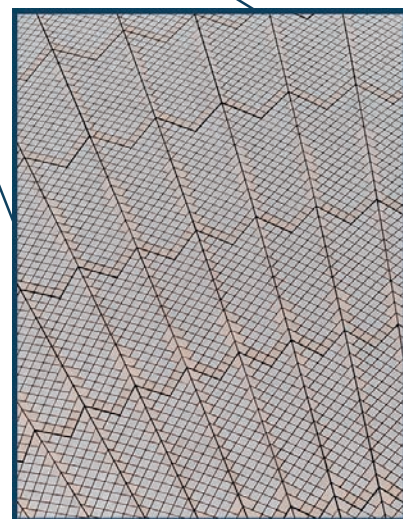
10 Na rozdíl od epoxidových povlaků povlak žárového zinku poskytuje na výztuži nejen **bariérovou ochranu, ale i lepší soudržnost s betonem, vynikající pasivační vrstvu a zinek působí jako obětovaná anoda k oceli. Tento povlak má vynikající odolnost proti oděru, není ovlivněn UV zářením a nemá žádné zvláštní požadavky na skladování, přepravu, manipulaci a montáž.**

12 Zinkování představuje **udržitelné řešení.** Pro žárově zinkovanou ocel je k dispozici prohlášení o životním prostředí (EPD) a na konci životnosti konstrukce lze spolu s ocelí recyklovat veškerý zbývající zinkový povlak. Malý dopad procesu žárového zinkování na životní prostředí je kompenzován značnými úsporami CO₂ spojenými se zvýšenou trvanlivostí železobetonové konstrukce s žárově zinkovanou výztuží.

3 Konzervativně má žárově zinkovaná výztuž 2 až 2,5krát vyšší limit pro průnik chloridových iontů ve srovnání s výztuží bez povrchové úpravy a to více než zdvojnásobuje čas na depasivaci výztuže a zahájení koroze. Ve srovnání s výztuží bez povrchové úpravy **žárově zinkovaná výztuž prodlužuje životnost konstrukce 4 až 5krát.**

4 Čas do zahájení koroze žárově zinkované výztuže v betonu lze modelovat pomocí konvenčních průmyslových modelů difúze chloridových iontů na základě Druhého Fickova zákona.

5 Pasivní chování žárově zinkované výztuže v betonu ji činí vhodnou pro použití v agresivním prostředí a je ideálně vhodná pro vnější fasády, prefabrikované panelové spoje a povrchové prvky, skutečně **pro jakékoli aplikace, kde hrozí karbonatace nebo průnik chloridových iontů.**



Konstrukční prvky opery v Sydney byly postaveny s použitím žárově zinkované výztuže.

Reference

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

Poděkování

Obrazový materiál

Obálka, strana 1, 2, 9, 10:

Strana 3, 4, 5, 7:

Strana 3, 4:

Strana 11:

Ředitelství silnic státu New York

Australská asociace zinkoven

Shutterstock.com

stock.adobe.com

Děkujeme Australské asociaci zinkoven za pomoc při přípravě tohoto dokumentu.



ASOCIACE ČESKÝCH A SLOVENSKÝCH ZINKOVEN



ZINKOVÁNÍ A UDRŽITELNÁ VÝSTAVBA

PŘÍRUČKA PRO UŽIVATELE

Maximum informací o žárovém zinkování najdete v nových nebo aktualizovaných publikacích, které si můžete objednat v kanceláři asociace.



PŘÍRUČKA
ŽÁROVÉHO
ZINKOVÁNÍ



POZINKOVANÁ OCEL A
UDRŽITELNÁ VÝSTAVBA

ŘEŠENÍ PRO CÍRKULÁRNÍ
EKONOMIKU



**Žárové zinkování
ocelových výrobků**

Vlastimil Kuklík
Jan Kudláček



ŽÁROVÉ ZINKOVÁNÍ

01 | 2018

Mezinárodní odborný časopis
46. ročník
www.acsz.cz

Bydlení v sílu – Orientační bod s žárově zinkovanou fasádou | 2
Dům uctívání – Chrám viny Bahá'í | 10
Ropnému mostu bude 40 – Sklářská restaurace po zinkování | 12
Náklady na ochranu proti korozi | 14

www.acsz.cz

Další informace o žárově zinkované výztuži do betonu:

Asociace českých a slovenských zinkoven

Na Burni 1497/39
710 00 Ostrava – Slezská Ostrava
Česká republika
www.acsz.cz
E-mail: info@acsz.cz



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
E-mail: mail@egga.com

