

ZHDNOCENÍ RIZIK SPOJENÝCH S VYUŽITÍM ŽÁROVĚ ZINKOVANÉ VÝZTUŽE BETONU ■ EVALUATION OF RISKS CONNECTED WITH UTILIZATION OF HOT-DIP GALVANIZED STEEL REINFORCEMENT

Petr Pokorný, Daniel Dobiáš,
Radka Pernicová,
Veronika Mušutová, Vítězslav Vacek,
Jiří Kolísko, Milan Kouřil

Cílem uvedeného článku je způsobem srozumitelným nejen pro úzce specializovanou, ale i širší odbornou veřejnost dostatečně přesně objasnit problematiku koroze žárově zinkované výztuže v betonu. Je zde poměrně detailně zhodnocen dřívější pozitivní náhled na využitelnost žárově zinkované výztuže se zohledněním koroze a především soudržnosti s betonem. Na základě závěrů plynoucích z naší nedávné experimentální činnosti je zásadně zpochybněna vhodnost použití žárově zinkované výztuže betonu. Z důvodu počátečního korozního poškození povlaku v prostředí čerstvého betonu lze oprávněně pochybovat o zachování bariérové protikorozi ochrany výztužné oceli v plném rozsahu. Vývoj vodíku v průběhu úvodní korozní reakce mezi čerstvou cementovou pastou a zinkovanou ocelí zvyšuje pórovitost cementového tmelu na fázovém rozhraní. Na rozdíl od některých dřívějších názorů se ukazuje, že zvýšení pórovitosti cementového tmelu může negativně ovlivnit soudržnost výztuže s betonem. ■ The aim of this article is to clarify the corrosion of hot-dip galvanized reinforcement not only to the experts, but also to wider public. In detail we assess the former positive prospective of utilization of hot-dip galvanized reinforcement together with evaluation of corrosion and primarily its bond with concrete. Based on our conclusions resulting from our recent experimental activities, we question appropriateness of using the hot-dip galvanized reinforcement. It is questionable, whether the barrier corrosion protection of the reinforcing steel could remain in full extent while considering the initial corrosion damage of the coating in the fresh concrete. The development of hydrogen during the initial corrosive reaction between the fresh cement paste and hot-dip galvanized steel increases the porosity of cement stone at the phase interface (ITZ). Contrary to some former opinions it appears that increasing porosity of the cement stone can influence negatively the reinforcement – concrete bond.

Nepřijatelná korozní rychlost běžné nelegované oceli, vyvolaná působením karbonátace nebo častěji kontaminací betonu chloridy, výrazně omezuje funkční životnost železobetonových

staveb. Jsou to právě objemné korozní produkty oceli, které záhy narušují integritu krycí vrstvy betonu a vyžadují rychlá a nákladná sanační protipatření [1], [2].

Přestože výzkum v oblasti alternativních výztužných materiálů (např. tkané textilie, korozivzdorné oceli, alkalirezistentní sklo, polymerní a uhlíková vlákna) již značně pokročil, jejich využití v běžném stavitelství je i v současnosti spíše okrajové (nejčastěji doplňkově využitá výztuž – např. zesilování k běžné žebírkové výztuži z uhlíkové oceli). Některé alternativní materiály totiž při spolupůsobení neposkytují vyztužovanému betonu dostatečné mechanické vlastnosti, resp. jejich přínos je ve srovnání s běžnou ocelí méně efektivní. Masové nasazení jiných materiálů by zase významně prodražilo realizaci stavby [1], [3].

Z tohoto důvodu se obecně stále využívá prutová výztuž z běžné nelegované (uhlíkové) oceli s geometrií povrchu upravenou do podoby normativně předepsaných žebírek nebo vtisků. Protikorozi ochrana této výztuže v betonu je téměř výhradně řešena zabezpečením dostatečné tloušťky krycí vrstvy betonu a zvyšováním kvality použitého betonu proti průniku chloridů nebo propustnosti vůči CO₂ (např. snižováním použitého vodního součinitele – w/c, zkvalitněním a prodlužováním doby ošetřování betonu, využitím vhodnějších typů cementu).

Využití jiných protikorozi ochranných výztuže v betonu je spíše raritní. Nasazení vhodných inhibitorů koroze uhlíkové oceli se jeví jen málo účinné (neschopnost dlouhodobě udržovat kritickou koncentraci inhibitoru na fázovém rozhraní ocel/beton), využití katodické ochrany (obětovanou anodou nebo zapojením zdroje SS proudu) nelze často aplikovat všude a navíc patří mezi jednoznačně nákladnější protikorozi opatření [2], [3].

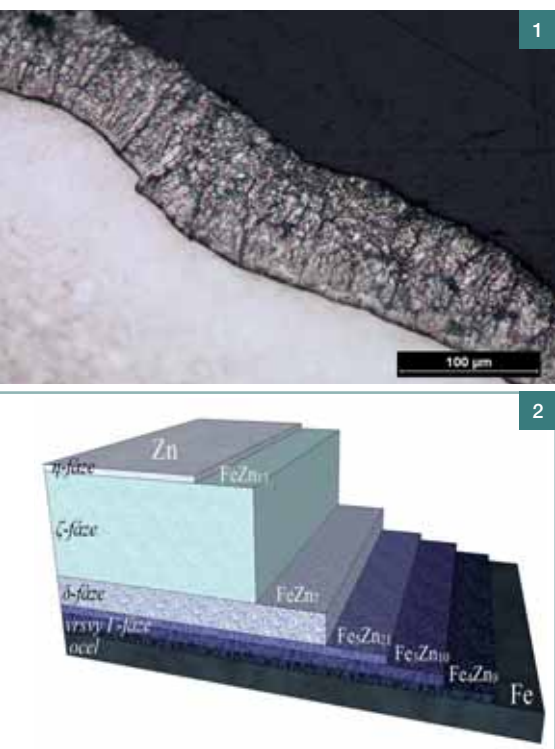
Hodnocením protikorozi účinnosti ochranných povlaků běžné ocelové výztuže se odborná veřejnost zabývá již od počátku minulého století. Důvody jsou zcela logické – možnost snadné a rychlé aplikace protikorozi ochrany (nanesení povlaku), bez nut-

nosti udržovacích opatření a výhodné zachování mechanických vlastností výztužné oceli. Nejčastěji jsou z tohoto pohledu diskutovány epoxidové povlaky a povlaky vzniklé technologií žárového zinkování, protože z ekonomických studií jednoznačně vyplývá, že jejich využití na ochranu ocelové výztuže významně nenavýší náklady spojené s realizací stavby. Úvahy o jejich nasazení navíc podporují statisticky dobře podložené výsledky jejich účinnosti v rámci ochrany oceli proti atmosférické korozi. Využití dostatečné normou předepsané tloušťky povlaku (často i kombinace: povlak žárového zinku a povlak organického původu) může zaručit požadovanou životnost konstrukce [3], [4].

Ochranné povlaky jsou z pohledu korozního inženýrství nositeli pouze bariérového protikorozi efektu (pokud nepůsobí jiným mechanismem protikorozi ochrany, tj. destimulačním, inhibičním nebo elektrochemickým účinkem), tzn. zjednodušeně fungují jako „izolace“ vůči agresivnímu prostředí. Zajišťují pouze prodloužení doby do aktivace podkladové oceli, zjednodušeně doby, kdy dojde k celkovému rozvoji korozního poškození podkladové oceli, a to již v podstatě nijak nezmenšovanou korozní rychlostí. Ve skutečné situaci má samozřejmě vliv i transport kyslíku a vlhkosti k povrchu, resp. možnosti jejich regulace. V tomto článku se úzce zaměříme na povlaky vzniklé technologií žárového zinkování ponorem [1], [4].

POVRCHOVÁ ÚPRAVA OCELI ŽÁROVÝM ZINKOVÁNÍM

Při žárovém povlakování ponorem do taveniny zinku (450 až 470 °C) narůstá na zinkovaných součástech slitinový železo-zinkový povlak, který je výsledkem poměrně složitého procesu vzájemné difuze atomů obou kovů za vzniku elementárních intermetalických vazeb a následných fázových přeměn. Tyto děje probíhají jednak v povrchové vrstvě zinkovaného kovu, dále na rozhraní mezi povrchem kovu a taveninou zinku a konečně i v samotné tavenině v blízkosti zinkované součásti. V závislosti na složení oceli, tep-



Obr. 1 Typický vzhled a tloušťka povlaku žárového zinku vyloučeného na oceli (snímek z optického mikroskopu) ■ Fig. 1 Typical look and thickness of the hot-dip galvanized coating on steel (picture from an optical microscope)

Obr. 2 Modelové schéma rozvrstvení jednotlivých intermetalických fází v povlaku žárového zinku ■ Fig. 2 Model of scheme of layers of individual intermetallic phases in the hot-dip galvanized coating

lotě a složení lázně, tloušťky stěny zinkované součásti, době prodlení v lázni, stavu povrchu a způsobu a rychlosti chlazení vzniká povlak složený z různých intermetalických sloučenin Fe-Zn. Vzhled typického povlaku žárového zinku vyloučeného na oceli zobrazuje obr. 1 [5], [6].

Vrstvy složené z těchto sloučenin mají rozdílné složení a tloušťku. Obsah železa v nich obsaženého roste směrem k ocelovému podkladu. Značí se obvykle písmeny řecké abecedy, tj. gamma (Γ), gamma₁ (Γ_1), delta (δ), zeta (ζ), příp. eta (η). Jednotlivé fáze se významně liší nejen složením a morfologií zrna, ale i mechanickými vlastnostmi [6].

Nejsvrchnější vrstva tzv. η -fáze je složena z prakticky čistého zinku a vzniká prostým ztuhnutím taveniny zinku. Z metalurgického hlediska je ovšem tato fáze definována jako tuhý substituční roztok železa v zinku (obsah železa je přibližně 0,03 hm. %). Přestože povlak žárového zinku do jisté míry kopíruje lokální nerovnosti povlako-

vané oceli, na jeho celkovou drsnost nemají vliv především nerovnosti vzniklé ztuhnutím η -fáze. Zinek krystaluje v soustavě šesterečné (hcp). Vyznačuje se relativně vysokou houževnatostí za běžných teplot a nízkou tvrdostí.

Intermetalickou fází zeta (ζ) lze stechiometricky sumárně definovat jako FeZn_{13} . Obsah železa v této fázi je přibližně 5 až 6,2 hm. %. V povlaku žárového zinku krystaluje v bazálně centrováné jednoklonné soustavě.

V případě delta (δ) fáze je diskutována existence dvou odlišných krystalových struktur označených jako δ_{1k} (příp. δ) a δ_{1p} (příp. δ_1), kterým odpovídají krystalové struktury FeZn_7 (δ_{1k}), resp. FeZn_{10} (δ_{1p}) (nebo také $\text{Fe}_{13}\text{Zn}_{126}$). Novější práce podporují existenci obou odlišných fází delta. Obě výše zmíněné intermetalické sloučeniny tvoří hexagonální krystalovou strukturu. Obsah železa v těchto fázích je přibližně 7 až 11,5 hm. %.

Nejspodnější vrstvu tvoří seskupení fází gamma ($\Gamma_1 + \Gamma$), obsah železa v těchto fázích je přibližně 23,5 až 28 hm. %. Fáze Γ_1 (např. $\text{Fe}_5\text{Zn}_{21}$) krystalizuje v soustavě kubické plošně centrováné (fcc) a fáze Γ ($\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$) krystalizuje v soustavě kubické prostorově centrováné (bcc).

Výskyt jednotlivých fází v povlaku je zobrazen na obr. 2 [5], [6], [7].

DOSUD NEVYJASNĚNÉ KLÍČOVÉ OTÁZKY SPOJENÉ S POUŽITÍM ŽÁROVĚ ZINKOVANÉ VÝZTUŽE DO BETONU

Hromadné využití epoxidových povlaků k ochraně ocelové výztuže je omezeno vyvoláním snížené soudržnosti s betonem. Tento fakt byl jednoznačně v průběhu řady let potvrzen zkouškami vytahováním výztuže a namáháním vyztužených prvků v ohybu. Používané predikce prodloužení životnosti konstrukce s ohledem na tloušťku jakostního (bez defektů) ochranného povlaku však odpovídají ověřovacím korozním testům. Takto chráněná výztuž se lokálně využívá např. při vyztužování přímořských konstrukcí – mostů a mol v USA – se zohledněním snížené soudržnosti při statickém návrhu [3], [4].

Dlouholeté výzkumy zkoumající účinnost protikorozní ochrany ocelové výztuže žárovým zinkováním přinášejí ve srovnání s účinností uvedených epoxidových povlaků často diametrálně odlišné závěry. Široká odborná veřejnost studující tuto problematiku se shoduje pouze na několika závěrech:

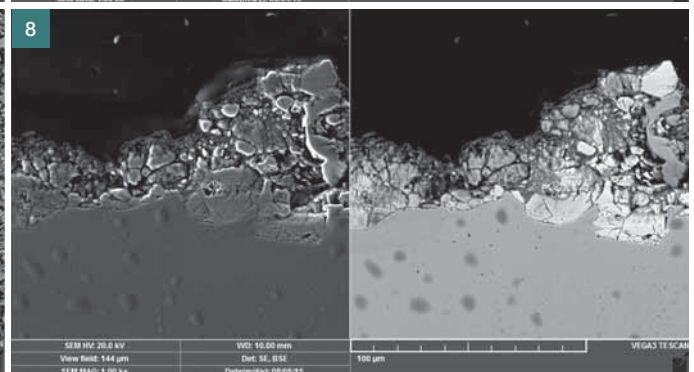
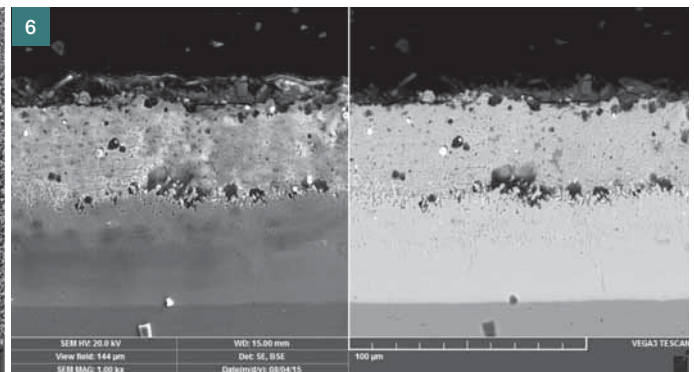
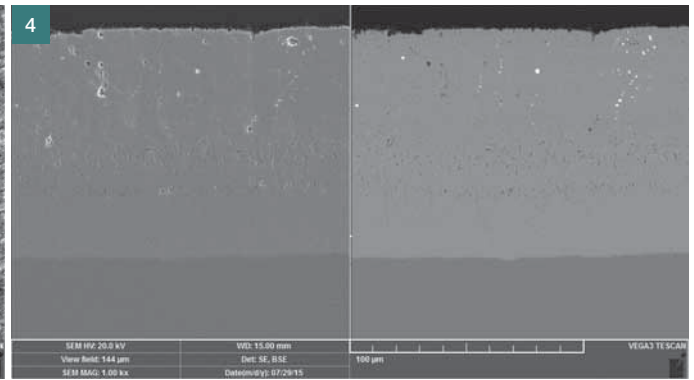
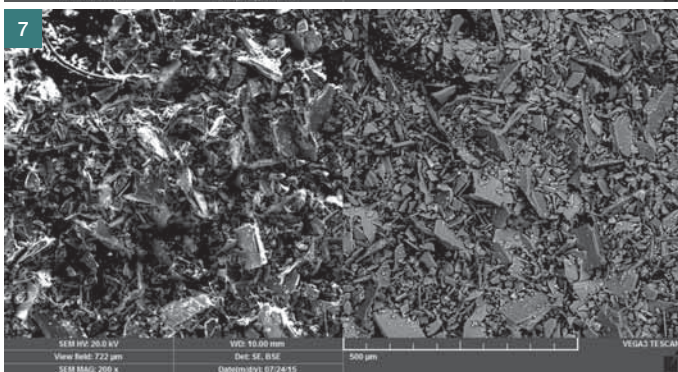
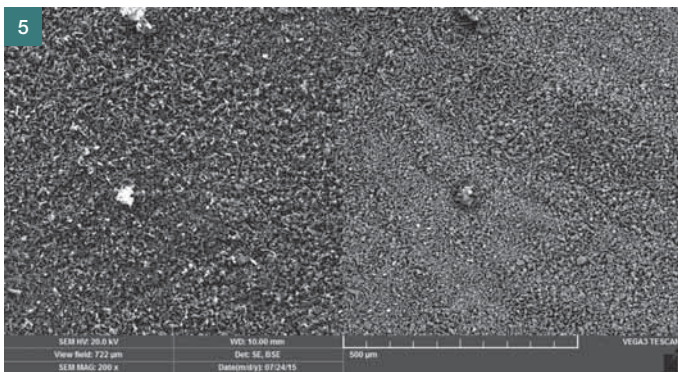
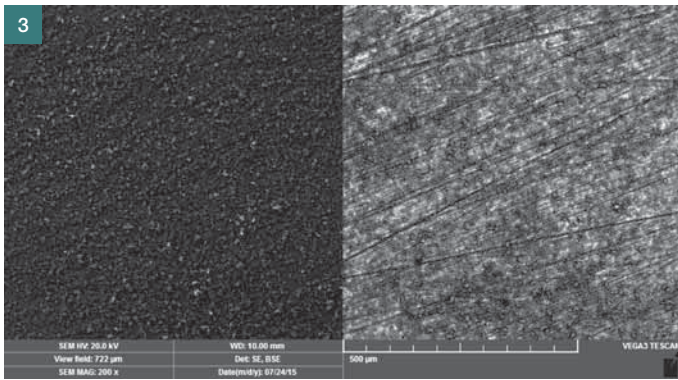
- v průběhu žárového zinkování nejsou negativně ovlivněny mechanické vlastnosti oceli výztuže,
- v čerstvém cementovém tmelu koroduje povlak žárového zinku po určité době v aktivním stavu za vývoje vodíku. Povrch výztuže se rychle pokrývá korozním produktem na bázi $\text{Ca}[\text{Zn}(\text{OH})_3]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (odborně: dihydrát soli bis(trihydroxidozinečnanu) vápenatého) [3], [8], [9].

Vliv úvodního korozního poškození žárově zinkované výztuže na budoucí celkovou bariérovou účinnost povlaku, především proti působení chloridových iontů, je záležitostí, která rozděluje názory odborné veřejnosti. Současně nebyla nikdy plně zodpovězena otázka, zda úvodní korozní poškození ochranného povlaku za vývoje vodíku a růstu zmíněných korozních produktů negativně ovlivňuje soudržnost výztuže s betonem. Dále pak také zda mohou mít korozní produkty zinku vzniklé úvodní korozní reakcí negativní vliv na mechanické vlastnosti betonu na fázovém rozhraní výztuž/beton.

HODNOCENÍ MÍRY ÚVODNÍHO KORÓZNÍHO POŠKOZENÍ ZINKOVÉHO POVLAKU V ČERSTVÉM BETONU

Stěžejní literaturou zabývající se problematikou využití žárově zinkované výztuže do betonu je monografie Galvanized steel reinforcement in concrete [10] profesora Stephena R. Yeomanse. Toto kompendium shrnuje veškeré výsledky týkající se koroze pozinkované výztuže v betonu, soudržnosti a životnosti ochranného povlaku vůči působení karbonátů a chloridových aniontů. Jednotlivé kapitoly tvoří výběry odborných článků z oborů chemie, metalurgie, korozního inženýrství, statiky a dynamiky staveb. Závěry této knihy jsou obecně přijímány jako dostatečně ověřené a rozhodné a v podstatě uzavírají výzkumy v této oblasti. Zjednodušeně se dá říci, že kniha vyzdvihuje výhody použití žárově zinkované výztuže do betonu a na souhrnu publikovaných údajů dokládá, že úvodní koroze zinkového povlaku neomezuje životnost protikorozní ochrany a rovněž významně nesnižuje soudržnost s betonem.

Zcela stranou této práce lze dohledat i články staršího data, které na základě realizovaných experimentů poukazují buď na sníženou soudržnost pozinkované výztuže, nebo neočekávaně krátkodobou efektivnost povlaku vůči působení obvyklého množství chlo-



Obr. 3 Povrch žárově zinkované oceli po expozici v prostředí o pH 12,6, snímek z elektronového mikroskopu v režimu: a) SE – zobrazuje viditelnou strukturu, b) BSE – zobrazuje chemický kontrast

Fig. 3 Surface of hot-dip galvanized steel after exposition in environment with pH 12,6, picture from electronic microscope in the following regimes: a) SE – shows visible structure, b) BSE – shows chemical contrast

Obr. 4 Příčný řez povlakem žárového zinku po expozici v prostředí o pH 12,6, snímek z elektronového mikroskopu v režimu: a) SE – zobrazuje viditelnou strukturu, b) BSE – zobrazuje chemický kontrast

Fig. 4 Cross section of the hot-dip galvanized steel coating after exposition in environment with pH 12,6, picture from electronic microscope in the following regimes: a) SE – shows visible structure, b) BSE – shows chemical contrast

Obr. 5 Povrch žárově zinkované oceli po expozici v prostředí o pH 13, snímek z elektronového mikroskopu v režimu: a) SE, b) BSE

Fig. 5 Surface of hot-dip galvanized steel after exposition in environment with pH 13, picture from electronic microscope in the following regimes: a) SE, b) BSE

Obr. 6 Příčný řez povlakem žárového zinku po expozici v prostředí o pH 13, snímek z elektronového mikroskopu v režimu: a) SE, b) BSE

Fig. 6 Cross section of the hot-dip galvanized steel coating after exposition in environment with pH 13, picture from electronic microscope in the following regimes: a) SE, b) BSE

Obr. 7 Povrch žárově zinkované oceli po expozici v prostředí o pH 13,5, snímek z elektronového mikroskopu v režimu: a) SE, b) BSE

Fig. 7 Surface of hot-dip galvanized steel after exposition in environment with pH 13,5, picture from electronic microscope in the following regimes: a) SE, b) BSE

Obr. 8 Příčný řez povlakem žárového zinku po expozici v prostředí o pH 13,5, snímek z elektronového mikroskopu v režimu: a) SE, b) BSE

Fig. 8 Cross section of the hot-dip galvanized steel coating after exposition in environment with pH 13,5, picture from electronic microscope in the following regimes: a) SE, b) BSE

ridových aniontů [11], [12], [13]. Lze dokonce dohledat záznamy o realizaci menších stavebních děl vyztužovaných pozinkovanou výztuží s havarijními následky při odbedňování konstrukce (snížení únosnosti konstrukce vyvolané redukcí očekávané soudržnosti vlivem koroze zinku v čerstvém betonu). [9], [14], [15]. Pochybnosti o vhodnosti

užití žárově zinkované výztuže betonu oprávněně přetrvávají dodnes.

Základem k objektivnímu posouzení vhodnosti použití žárově zinkované oceli do betonu musí být zhodnocení termodynamické a kinetické podstaty korozního poškození zinkového povlaku nejen v čerstvém betonu, ale i v betonu tvrdnoucím. Autoritou ve výzku-

mu v této záležitosti byl tým kolem profesorky Carmen Andrade, který prováděl v této věci rozsáhlé výzkumy v 80. letech minulého století. Výsledky byly publikovány v mnoha odborných časopisech, na konferencích a vytyčují základní kapitulu k této problematice i ve zmiňované monografii profesora Stephena R. Yeomane.

Nejzásadnější závěr, ke kterému pracovní skupina za přibližně deset let výzkumu dospěla, lze shrnout následovně: korozí zinku v čerstvém cementovém tmelu je úzce ovlivněna hodnotou pH pórového roztoku, ovšem do pH přibližně 13,3 koroduje pozinkovaná ocel v pasivním stavu.

Důvodem je podle autorů tvorba velice kompaktního a souvislého povlaku z $\text{Ca}[\text{Zn}(\text{OH})_3]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Nad pH 13,3 koroduje povlak v aktivním stavu, protože se na jeho povrchu již netvoří souvislá vrstva zmíněného komplexního zinečnanu (korozní produkty se skládají z ZnO a $\varepsilon\text{-Zn}(\text{OH})_2$). Pokud je vytvořený povlak prostý η -fáze (tedy nejsvrchnější vrstvu tvoří fáze $\zeta - \text{FeZn}_{13}$), je jeho schopnost přejít do korozí v pasivním stavu značně redukována, neboť sníženým obsahem zinku ve skladbě intermetalika se znesnadňuje tvorba kompaktní pasivní vrstvy z komplexního zinečnanu [10], [16 až 20].

Naše vlastní zkušenosti a experimentální zjištění, a tedy i závěry hodnotící korozní chování zinkované oceli v čerstvém a tvrdnoucím betonu, se poměrně značně odlišují od výše zmíněných a dodnes uznávaných publikací. Cílem tohoto článku je snaha o objektivní technické zhodnocení funkčnosti ochrany výztuže pozinkováním, a to na základě studia korozního chování, soudržnosti a struktury materiálových rozhraní.

Laboratorně jsme sledovali vliv pH a vápenatých kationtů (ve formě $\text{Ca}(\text{OH})_2$) na korozní chování žárově zinkované oceli v modelovém prostředí simulujícím pórový roztok o pH 12,6; 13 a 13,5. Prostředí o pH 12,6 (nasyčený roztok $\text{Ca}(\text{OH})_2$) simuluje betonový pórový roztok bez přídavku KOH. Protože cement obsahuje určité množství oxidů alkalických kovů (K_2O nebo Na_2O), jejichž hydratací vznikají příslušné hydroxidy (tedy KOH nebo NaOH), reálné pH čerstvého pórového roztoku je spíše 13 (pro čistě portlandské cementy může být až 13,5).

Při expozici žárově zinkované oceli (rovnoměrná tloušťka povlaku žárového zinku byla určena na $90 \pm 10 \mu\text{m}$) v modelovém pórovém roztoku o pH 12,6 (všechny expozice trvaly po dobu šesti dní v uzavřených nádobách) se povrch pokrývá jemnými krystalky $\text{Ca}[\text{Zn}(\text{OH})_3]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (obr. 3). Vzhled exponovaného povlaku z pohledu příčného řezu prozrazuje (obr. 4), že je povrch pokryt pouze tenkou vrstvou korozního produktu, jinak se zdá

být integrita povlaku nenarušena.

Evidentní narušení integrity povlaku je sledováno až při expozici zinkované oceli v modelovém pórovém roztoku o pH 13. Povrch vzorku už je jasně pokryt krystaly zinečnanu, které jsou evidentně objemnější než v předešlém případě (obr. 5). Vzhled povlaku v příčném řezu je zobrazen na obr. 6. Je zřejmé, že je korozní napadení rozsáhlejší. Pohled na příčný řez v režimu BSE prozrazuje, že tloušťka korozních produktů ze zinečnanu je již okolo 10 μm . Korozní poškození vykazuje nejsvrchnější fáze η . Tato fáze se v exponovaném prostředí rozpouští a pokrývá souvislou vrstvu korozních produktů, které se od povrchu snadno odlamují (obr. 6). Mírná dezintegrace ve skladbě této vrstvy je rovněž patrná. Jinak skladba vrstvy ζ , seskupení fází δ a rovněž seskupení fází Γ se jeví bez poškození.

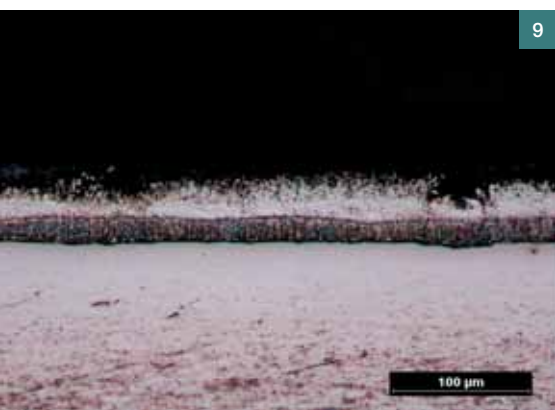
Pokud jsou vzorky exponovány v prostředí o pH 13,5, potom je jejich povrch silně reliéfní, pokrytý velkými deskovitými krystaly zinečnanu (obr. 7). Vzhled povlaku v příčném řezu (obr. 8) zobrazuje, že je jeho integrita po šestidenní expozici značně narušena, a to v celé jeho tloušťce. Zdá se, že došlo k úplnému rozpadu fáze η , tedy část této fáze byla rozpuštěna a zcela nepřilnavá zbytková část se rozpadla při manipulaci se vzorkem, nebo při jeho zpracování pro metalografickou analýzu.

Výsledky souběžně provedených elektrochemických korozních experimentů dobře dokumentují zjištěné skutečnosti. Při expozici v prostředí o pH 12,6 dochází na počátku expozice ke korozi vzorku v aktivním stavu za vývoje vodíku a po přibližně třech dnech dochází k přechodu vzorku do korozí v pasivním stavu. Ovšem u většiny vzorků exponovaných při pH 13 nedochází k přechodu do pasivního stavu ani po šestidenní expozici. Obdobně je tomu u vzorků exponovaných při pH 13,5. Přesto je evidentní, že povrch všech zkoušených vzorků je kompletně pokryt korozními produkty na bázi $\text{Ca}[\text{Zn}(\text{OH})_3]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, což dokazují výsledky XRD fázové analýzy korozních produktů. Velikost vyloučených zinečnanových krystalů se zvyšující se hodnotou pH rychle roste. Přesto kompaktní vrstva korozního produktu není schopna zabránit korozi zinkované oceli v aktivním stavu. Zdá se tedy, že naopak přítomnost vápenatých kationtů destabilizuje sloučeniny

ZnO a $\varepsilon\text{-Zn}(\text{OH})_2$, které zajišťují přechod vzorků pozinkované oceli do pasivního stavu v alkalickém prostředí bez vápenatých kationtů (pH 12,6 a pH 13 v prostředí KOH).

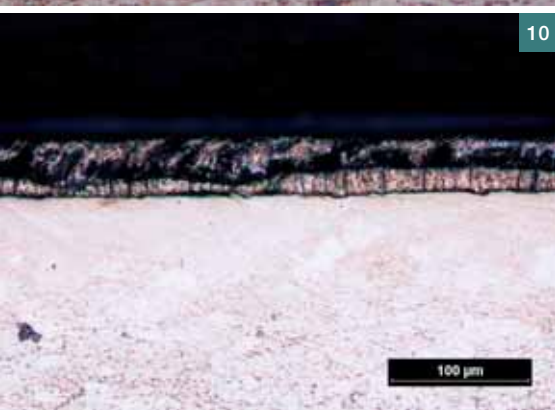
Velmi důležité je zhodnocení korozního chování zinku a žárově zinkované oceli v čerstvém betonu. Z našich záznamů z rezistometrických čidel vytvořených z fólie čistého zinku a uložených do betonu rovněž vyplývá, že zinek není schopen přejít v tomto prostředí do pasivního stavu. Zdálnivá pasivita zinku, tj. detekované snížení korozní rychlosti, vychází z nedostatku vody na povrchu vzorku (při vyschnutí zkušebního vzorku betonu), resp. korozní rychlost zinku je limitně řízena transportem vody k jeho povrchu. Protože jak již bylo řečeno, η -fáze povlaku žárového zinku je v podstatě čistý zinek, lze potvrdit obávané závěry konstatované již při expozicích zinkované oceli v modelových pórových roztocích betonu. Korozní produkty z $\text{Ca}[\text{Zn}(\text{OH})_3]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ precipitované na povrchu zinkované oceli uložené v betonu tedy skutečně nezaručují přechod povlaku do pasivního stavu [21].

Tuto skutečnost částečně demonstruje metalografické zhodnocení příčného řezu povlakem žárového zinku na oceli uloženého pouze v cementové pastě (in situ test – využití čistého portlandského cementu CEM I) po dobu 28 dní. Ke zhodnocení byly nádoby se zalitými vzorky umístěny do van, a to buď na rošt s dostatečným množstvím vody (ustálená vlhkost nad otevřeným povrchem cementové pasty 95 % R.H.) a nebo přímo pod vodní hladinu. Následně byly vzorky segmentovány a provedeny metalografické výbrusy jejich příčných řezů. Příčný řez vzorku uloženého ve vlhké atmosféře zobrazuje obr. 9, příčný řez vzorkem uloženým pod vodní hladinou je na obr. 10, konečně vzhled referenčního povlaku vyloučeného na vzorku oceli, jenž nebyl uložen do cementové pasty, zobrazuje obr. 11. Ze vzhledu povlaků je zřejmé, že zatímco v případě vzorku uloženého jen ve vlhké atmosféře (zřejmé napadení η fáze a jen okrajové napadení fáze ζ) může být povlak uložený v cementové pastě pod vodní hladinou narušen významněji. Fáze η je v tomto případě jednoznačně rozpuštěna a významně je narušena i fáze ζ . Dále se v povlaku šíří silné trhliny (umocněné separací a broušením vzorku), trhliny rozrušují i kompaktnost seskupení δ fází.



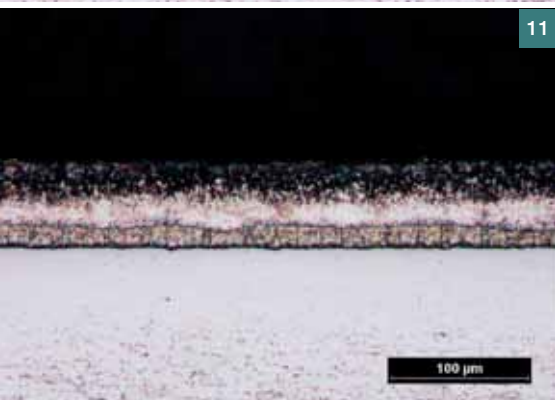
9

Obr. 9 Příčný řez povlakem žárově zinkované oceli uložené v betonu a exponované ve vlhké atmosféře (95 % RH) po dobu 28 dní (snímek z optického mikroskopu) ■ Fig. 9 Cross section of the hot-dip galvanized steel coating laid in concrete and exposed to humid environment (95 % RH) for 28 days (picture from optical microscope)



10

Obr. 10 Příčný řez povlakem žárově zinkované oceli uložené v betonu a exponované pod vodní hladinou po dobu 28 dní (snímek z optického mikroskopu) ■ Fig. 10 Cross section of the hot-dip galvanized steel coating laid in concrete and exposed underwater for 28 days (picture from optical microscope)



11

Obr. 11 Příčný řez povlakem žárově zinkované oceli – referenční vzorek ■ Fig. 11 Cross section of the hot-dip galvanized steel coating – representative specimen

na bázi zinečnanů ovlivňuje soudržnost výztuže s betonem. Autoři prokazují na normově definovaných zkouškách (jednak „vytahovací“ zkouškou = pull-out test, jednak zkouškou na trámčích („ohybovou“) = beam test), že ke snížení soudržnosti nedochází, popisují negativní vliv na vývoj pórovitosti cementového tmelu na fázovém rozhraní (zvýšení pórovitosti) a uznávají, že na celkovou soudržnost má vývoj vodíku zanedbatelný vliv. O vlivu korozních produktů na bázi $\text{Ca}[\text{Zn}(\text{OH})_3]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ autoři detailně nemluví [10].

Důležité je připomenout i výsledky potvrzující závěry získané i pomocí rezistometrické metody [21].

MÍRA VLIVU ÚVODNÍHO KOROZNÍHO POŠKOZENÍ ZINKOVÉHO POVLAKE NA SOUDRŽNOST POVLAKOVANÉ VÝZTUŽE S BETONEM

Ve zmiňovaném díle profesora Yeomanse je široce diskutován vliv úvodní koroze žárově zinkované oceli na soudržnost s betonem. Na této problematice pracuje přímo autor s odborníkem na soudržnost panem O. Kayalim. Autoři ověřují soudržnost hladké i běžné žebírkové výztuže opatřené povlakem žárového zinku a srovnávají ji se soudržností nepovlakované výztuže se srovnatelnou geometrií. Cílem rozsáhlých experimentů je ověřit, zda úvodní koroze zinkového povlaku za vývoje vodíku a růstu korozních produktů

Jak bylo naznačeno v úvodní části, v průběhu přibližně sta let výzkumu došlo k zaznamenání i zcela opačných výsledků, kdy autoři experimentů sledovali mírné snížení soudržnosti žárově zinkované výztuže s betonem, ovšem zaznamenány byly i případy, kdy snížení soudržnosti výztuže s betonem výrazně ohrozilo únosnost celé konstrukce. Důvodem k těmto jevům je podle odborníků zvýšení pórovitosti cementového tmelu, nárůst expanzivních korozních produktů $\text{Ca}[\text{Zn}(\text{OH})_3]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ nebo prostě jen snížení průměru výztuže vlivem koroze povlaku pravděpodobně i v tvrdnoucím betonu [14], [15].

Akreditované zkušební pracoviště, Kloknerův ústav ČVUT, porovnávalo soudržnost hladkých pozinkovaných prutů s betonem třídy „NSC“ (tj. „normal strength concrete“) se soudržností ocelových prutů bez povlaku (metoda

FINEC

Statika a dimenzace stavebních konstrukcí



Novinky verze 5

- Fin 2D a Fin 3D - vkládání obrázků do textových výstupů
- Ocelové spoje - detail uložení nosníku na nosník či sloup pomocí bříty
- Beton - 3D interakční diagram
- Protlak - posouzení protlačení sloupů s hlavicemi
- Betonový výsek - jednostránkový grafický výstup

Nové cenově výhodné balíčky

Parametrická teplotní křivka a Přestup tepla zdarma!

GE05

Geotechnické programy



Edice 2016 od listopadu 2015

- Nový program Stabilizační pilota - návrh pilotových stěn zpevňujících svah a zabraňujících sesuvu
- Vylepšený vzhled a ovládání, možnost zobrazení konstrukce ve 2D nebo 3D
- Posouzení obecného ocelového průřezu
- Čtvercové piloty v programu Pažení posudek
- Automatický výpočet koeficientu redukce tlaků pro záporová pažení
- Podpora polních zkoušek (PMT, DMT, CPT)

... a mnoho dalších vylepšení

fine

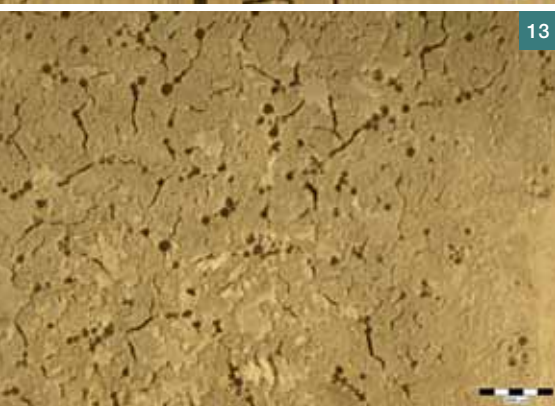
tel.: +420 233 324 889
fax: +420 233 321 754
E-mail: hotline@fine.cz

www.fine.cz



12

Obr. 12 Povrch cementového tmelu odebraného z fázového rozhraní od povrchu žárově zinkované oceli po 28 dnech zrání vzorku v atmosféře o relativní vlhkosti 95 % (snímky pořízeny na optickém konfokálním mikroskopu) ■ Fig. 12 Surface of cement stone form the phase interface (ITZ) from the surface of a hot-dip galvanized steel after 28 days of maturing of the specimen in the atmosphere of 95 % (pictures taken by optical confocal microscope)



13

Obr. 13 Povrch cementového tmelu odebraného z fázového rozhraní od povrchu žárově zinkované oceli po 28 dnech zrání vzorku pod vodní hladinou (snímky pořízeny na optickém konfokálním mikroskopu) ■ Fig. 13 Surface of cement stone form the phase interface (ITZ) from the surface of a hot-dip galvanized steel after 28 days of maturing of the specimen in underwater (pictures taken by optical confocal microscope)



14

Obr. 14 Povrch cementového tmelu odebraného z fázového rozhraní od povrchu nepovlakované oceli po 28 dnech zrání vzorku v atmosféře o relativní vlhkosti 95 % R.H. (snímky pořízeny na optickém konfokálním mikroskopu) ■ Fig. 14 Surface of cement stone form the phase interface (ITZ) from the surface of non-coated steel after 28 days of maturing of the specimen in the atmosphere of 95% R.H. (pictures taken by optical confocal microscope)



15

Obr. 15 Povrch hladkého pozinkovaného prutu a betonu po zkoušce soudržnosti (pull-out test), vzorek betonu rozdělen v podélném směru příčným tahem ■ Fig. 15 Surface of hot-dip galvanized smooth steel bare after pull - out test, concrete specimens cutted by cross-section force test

vázející korozi zinku negativně ovlivňuje pórovitost cementového tmelu. Toto lze dosvědčit na snímcích cementového tmelu odebraného z fázového rozhraní žárově zinkovaná ocel/cementový tmel (z portlandského cementu: CEM I) po 28 dnech zrání. Na obr. 12 jsou snímky cementového tmelu odebraného z fázového rozhraní, konkrétně v případě cementového tmelu zrajícího ve vlhkém prostředí o relativní vlhkosti 95 % a na obr. 13 z cementového tmelu zrajícího ve vodě. Pro srovnání je na obr. 14 uveden vzhled cementového tmelu z fázového rozhraní nepovlakovaná ocel/tmel. Z výsledků je zřejmé, že ani po 28 dnech zrání betonu nedochází k zaplnění pórů korozními produkty zinku, tj. porézní struktura je zachována. Porézní strukturu vzniklou v reálném betonu můžeme sledovat i po výše uvedené zkoušce soudržnosti žárově zinkovaných hladkých prutů s betonem (obr. 15). Tyto vý-

sledky se shodují ze závěry uvedenými i v další literatuře, kde pórovitost cementového tmelu byla hodnocena rtuťovou porozimetrií [23], [24].

Na úvodní korozní reakci může mít vliv obsah chromanových aniontů v použitém cementu, který se v poslední době u cementů vyráběných v ČR nesleduje. Obvykle se v literatuře uvádí, že obsah rozpustných chromanů v koncentraci 200 ppm (v cementu) postačí k omezení vývoje vodíku v čerstvé betonové směsi [25], [26]. Dodávání chromanů do cementu je hygienicky nepřijatelné kvůli karcinogenním účinkům šestimocného chromu, jehož přirozený obsah je pod uvedenou koncentrací [27].

ZÁVĚR

Žárově zinkování běžných uhlíkových ocelových výztuží do betonu může skýtat určité výhody. Teoreticky může i významně prodloužit životnost konstrukce za podmínek karbonatce betonu. Důležité je ovšem říci, že povlak žárového zinku pouze prodlužuje dobu do celkové aktivace podkladové oceli, tzn. než je jeho vrstva v reakci spotřebována.

Předpovězené problémy spojené s užitím pozinkované výztuže betonu jsou ovšem také opodstatněné a rozhodně je nelze přehlížet. Problém jednoznačně tvoří úvodní koroze povrchu zinkované oceli čerstvě uložené do betonu. Důsledkem významného úvodního korozního poškození (vývoj vodíku zvyšuje pórovitost cementového tmelu na fázovém rozhraní, expanze hutných korozních produktů na bázi $\text{Ca}[\text{Zn}(\text{OH})_3]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ zase narušuje kompaktnost cementového tmelu) je snížení soudržnosti výztuže s betonem.

Diametrální odlišení našich zjištění oproti jiným literárním zdrojům, z hlediska hodnocení korozního chování zinkované oceli v čerstvém a tvrdnoucím betonu a poklesu soudržnosti, lze vysvětlit odlišnou hodnotou pH porových roztoků zkoušených čerstvých betonových směsí. Nelze vyloučit, že na korozní chování zinkované oceli mohou mít vliv i různé chemické přísady užívané v moderních betonových směsích (např. plastifikátory, ztekuovací a provzdušňovací látky). Při hodnocení publikovaných výsledků laboratorních zkoušek může být problémem nejasné definování podmínek výroby vzorků, jejich ošetřování, vlastnosti a složení použitého cementu. V některých případech není dokonce uveden

pull-out test). Z výsledků jednoznačně vyplývá, že nelze zanedbat úvodní korozní poškození zinkového povlaku v čerstvém cementovém tmelu a pravděpodobně ani předpokládaný nárůst korozní rychlosti zinkového povlaku v případě uložení zkušebních krychlí pod vodní hladinu [22].

Je zřejmé, že vývoj vodíku vzniklého katodickou korozní reakcí dopro-

Literatura:

- [1] COLLEPARDI, M. *Moderní beton*. Pelhřimov: ČKAIT, 2009. Edice betonové stavitelství, 1. ed.
- [2] AITCIN, P. *Vysokohodnotný beton*. Pelhřimov: ČKAIT, 2005. Edice betonové stavitelství, 2. ed.
- [3] POKORNÝ, P. Vliv koroze zinkované oceli na soudržnost s betonem. *Koroze a ochrana materiálu*. 2012, č. 56 (4), s. 119–135.
- [4] TONINI, D. E. a kol. *Chloride corrosion of steel in concrete*. Baltimore: American Society for Testing and Materials, 1977.
- [5] MARDER, A. R. The metallurgy of zinc – coated steel. *Progress in Materials Science*. 2000, č. 45, s. 191–271.
- [6] KUKLÍK, V., KUDLÁČEK, J. *Žárově zinkování*. Praha: AČSZ, 2014. 1. ed.
- [7] POKORNÝ, P. a kol. Description of structure of Fe-Zn intermetallic compounds present in hot-dip galvanized coatings on steel. *Metalurgija*. č. 54 (4), s. 707–710.
- [8] POKORNÝ, P. Kritická diskuze k vlivu přídavku chemických látek do cementu na korozní chování zinkované oceli. *Koroze a ochrana materiálu*. 2014, č. 58 (1), s. 31–35.
- [9] REHM, G., LÄMMKE, A. Untersuchungen über Reaktionen des Zinks unter Einwirkung von Alkalien im Hinblick auf das Verhalten verzinkter Stähle im Beton. *Betonstein-Zeitung*. 1970, 6, s. 360–365.
- [10] YEOMANS, S. R. *Galvanized steel reinforcement in concrete*. Canberra: Elsevier, 2004. 2. ed.
- [11] ARUP, H. Galvanized steel in concrete. *Materials Performance*. 1979, 18 (4), s. 41–44.
- [12] MENZEL, K. *Zur Korrosion von verzinktem Stahl in kontakt mit Beton*. IWB(Mittelungen), Universität Stuttgart, 1992.
- [13] HIME, W., MACHIN, M. Performance variances of galvanized steel in mortar and Concrete. *Corrosion*. 1993, 49 (10), s. 858–860.
- [14] BURGGRABE, A. H. Einflussfaktoren für das Verbundverhalten glatter verzinkter Bewehrungsstäbe aus Stahl im Beton. *Der Bauingenieur*. 1971, 46, s. 366–369.
- [15] ROBINSON, K. E. The bond strength of galvanized reinforcement. *Technical report: TRA/220/1956*. Cement and Concrete Association, 52 Grosvenor Gardens London SW1. 1956, s. 7.
- [16] MACIAS, A., ANDRADE, C. Corrosion of galvanized steel in dilute $\text{Ca}(\text{OH})_2$ solutions (pH 11,1 – 12,6). *British Corrosion Journal*. 1987, 22 (3), s. 162–171.
- [17] MACIAS, A., ANDRADE, C. Corrosion of galvanized steel reinforcements in alkaline Solutions, (Part 1: Electrochemical results), *British Corrosion Journal*. 1987, 22 (2), s. 113–118.
- [18] MACIAS, A., ANDRADE, C. Corrosion of galvanized steel reinforcements in alkaline solutions, (Part 2: SEM study and identification of corrosion products). *British Corrosion Journal*. 1987, 22 (2), s. 119–130.
- [19] BLANCO, M. T., MACIAS, A., ANDRADE, C. SEM study of the corrosion products of galvanized reinforcements immersed in solutions in the pH range 12,6–13,6. *British Corrosion Journal*. 1984, 19 (1), s. 41–48.
- [20] MACIAS, A., ANDRADE, C. Stability of the calcium hydroxide protective layer developed on galvanized reinforcements after a further increase of the pH value. *British Corrosion Journal*. 1986, 36 (204), s. 19–28.
- [21] KUČERA, V., POKORNÝ, P., KOUŘIL, M. *Kinetika dějů řídicích korozi zinkované oceli v betonu* (Laboratorní projekt I), VŠCHT, 2015, s. 26.
- [22] POKORNÝ, P. a kol. Zhodnocení vlivu koroze žárově zinkované oceli na soudržnost hladkých prutů s betonem třídy „NSC“. *Koroze a ochrana materiálu*. 2015, 59 (2), s. 53–65.
- [23] ROVNANÍKOVÁ, P., BAYER, P. Mikrostruktura cementového tmele v okolí pozinkované výztuže, 9. konference žárově zinkování, 2003, s. 57–62.
- [24] ROVNANÍKOVÁ, P. a kol. Impact of galvanized steel corrosion on cement paste microstructure. EUROCCOR 2004, Nice, 2004, s. 9.
- [25] LEA, F. M. *Chemistry of cement and concrete*. Glasgow: Edward Arnold Publishers, Ltd., 1970. 3. th.
- [26] BIRG, C. E. The influence of minor constituents in Portland cement on the behavior of galvanized steel in concrete. *Corrosion Prevention & Control*. 1964, s. 17–21.
- [27] POKORNÝ, P., TEJ, P., SZELAG, P. Chromate conversion coatings and their current application. *Metalurgija*. 2016, č. 55(2), s. 253–256.

ky povrchové vrstvy zinku. Zásadní vliv faktoru transportu vody/vlhkosti k povrchu zinkované oceli na korozní chování tedy může objasnit v literatuře uváděné předčasné selhání poskytované ochrany i v prostředí s obvyklým obsahem chloridových aniontů.

Závěrem lze jednoduše konstatovat, že navzdory některým opodstatněným výhodám ochranného povlaku žárového zinku je vhodnost použití zinkované výztuže poměrně sporná, neboť podmínky v prostředí čerstvé betonové směsi vedou k narušení zinkového povlaku a především jeho soudržnosti s cementovým tmelem.

Při navrhování betonových konstrukcí s pozinkovanou výztuží by se měly dodržovat konstrukční zásady vyztužování, které zohledňují nebezpečí snížení soudržnosti této výztuže s betonem, tj. rizika z hlediska zajištění podmínek prvního a druhého mezního stavu.

Realizováno za finanční podpory Grantové agentury České republiky, reg. číslo 15-10591S a zároveň další podpory Grantové agentury České republiky, reg. číslo 13-15175S.

Ing. Petr Pokorný
Kloknerův ústav ČVUT v Praze
e-mail: petr.pokorny@cvut.cz



Ing. Daniel Dobiáš, Ph.D.
Kloknerův ústav ČVUT v Praze
e-mail: petr.dobias@cvut.cz



Ing. Radka Pernicová, Ph.D.
Kloknerův ústav ČVUT v Praze
e-mail: radka.pernicova@cvut.cz



Ing. Veronika Mušutová
Kloknerův ústav ČVUT v Praze
e-mail: veronika.musutova@cvut.cz



Ing. Vítězslav Vacek, CSc.
Kloknerův ústav ČVUT v Praze
e-mail: vitezslav.vacek@cvut.cz



doc. Ing. Jiří Kolísko, Ph.D.
Kloknerův ústav ČVUT v Praze
e-mail: kolisko@cvut.cz



Ing. Milan Kouřil, Ph.D.
Ústav kovových materiálů
a korozního inženýrství
VŠCHT v Praze
e-mail: milan.kouril@vscht.cz



Text článku byl posouzen odborným lektorem.
The text was reviewed.

způsob zkoušení soudržnosti, resp. skutečné uspořádání. Z těchto důvodů nelze publikované informace jednoduše porovnávat.

Novým experimentálním zjištěním je potvrzení skutečnosti, že na korozní chování zinkované oceli v betonu má vliv dostatečný přísun vody, resp. změny vlhkosti pórového prostředí. Bylo dokumentováno, že při zvýšení vhl-

kosti dochází k obnovení koroze zinku v betonu. Z výsledků je zřejmé, že povrch zinku není schopen se zapasivovat korozními produkty na bázi $\text{Ca}[\text{Zn}(\text{OH})_3]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Dostatečný přísun vody/vlhkosti tedy podporuje další korozní poškození zinkované oceli. Soudržnost zinkované výztuže s betonem může být dále snižována zmenšováním jejího průměru z titulu úbytku tloušť-