Zhodnocení vlivu koroze žárově zinkované oceli na soudržnost hladkých prutů s betonem třídy „NSC“

The assessment of the impact of corrosion of galvanised steel on bond strength of plain bars with “NSC” concrete

Pokorný P.¹, Dobiáš D.¹, Vokáč M.¹, Kouřil M.², Kubásek J.²

¹ ČVUT Praha, Kloknerův ústav

² VŠCHT Praha, Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství

E-mail: Petr.Pokorny@cvut.cz

Článek shrnuje aspekty zkoušení a ovlivňování soudržnosti výztuže s betonem. Úzce se zaměřuje na hodnocení míry vlivu nevyhnutelné koroze povlaku žárového zinku v čerstvém betonu na samotnou soudržnost. Ovlivnění soudržnosti vlivem vývoje vodíku a expanzních korozních produktů zinku je ověřováno na hladkých ocelových prutech. Povlak žárového zinku byl vytvořen konvenční ponorovou technologií. Realizováno bylo normované zkoušení soudržnosti výztuže s betonem na krychlicích („vytahovací zkouška“) dle ČSN 73 1328. V závěrech jsou diskutovány i jiné vlivy, které mohou mít dopad na vývoj soudržnosti, především pak vliv obsahu chromanů v použitém cementu a samotná skladba vyloučeného povlaku.

The paper summarises the aspects of testing and influencing of reinforcement-concrete bond strength. It is focusing on the assessment of the extent of influence of the inevitable corrosion of the zinc coat in fresh concrete. The impact on concrete bond strength induced by evolving hydrogen and expanding zinc corrosion products is verified on plain steel bars. The zinc coat was produced by a conventional hot-dip galvanising technology. Standardised prism tests according to ČSN 73 1328 (“pull-out test”) were applied to test reinforcement-concrete bond strength. The conclusion discusses also other impacts that might affect the cohesion progress, namely the impact of the contents of chromium (VI) compounds in the used concrete and the composition of the deposited coat.

ÚVOD

Koroze výztuže z uhlíkové oceli v betonu kontaminovaného chloridy je i v současnosti velice zásadním problémem korozního inženýrství. Protože rychlost šíření chloridové fronty zvlhčenou pórovitou strukturou betonu je obvykle vyšší než průběh karbonatace, doplácí na tento korozní problém především vyztužené betonové konstrukce v blízkosti dálnic a silnic (vliv použití rozmrazovacích solí) nebo konstrukce poblíž mořských nebo brakických vod [1-3].

Lokalizované korozní poškození způsobené nadkritickým množstvím chloridových anionů v blízkosti nechráněné výztuže z uhlíkové oceli vyvolává růst objemných korozních produktů železa. Tyto objemové změny poškozují okolní beton lokálními trhlinami a způsobují jeho odpadávání. Tato skutečnost rozsáhlé korozní poškození ještě urychluje [4-6].

Protože tento problém vyžaduje vždy včasná a nákladná sanační opatření, jsou dodnes diskutovány různé možnosti ochrany výztuže, které by zajistily

požadovanou životnost staveb (někdy i na 100 let) bez nutnosti sanačních opatření. Nejčastěji se prodlužuje doba do aktivace uhlíkové oceli v kritických místech staveb zvyšováním krycí vrstvy betonu. Ovšem záměrné navyšování krycí vrstvy betonu má svoje technologické i ekonomické limity a nemůže zajistit vysokou životnost konstrukce [1, 3].

Obvyklé vysoké úspěšnosti dosahuje katodická ochrana, ovšem tuto techniku nelze často využít všude a patří mezi nákladnější ochranná opatření [1, 4]. Využití adsorbčních inhibitorů koroze uhlíkové oceli je velice diskutabilním řešením. Je totiž velice obtížné udržovat dostatečnou koncentraci inhibitorů na povrchu ocelové výztuže v průběhu návrhové doby životnosti konstrukce [5]. Úspěšné využití plnopřířezových korozivzdorných ocelí s podmínkou jejich nezokoujeného povrchu je také bohužel pro stavební průmysl z ekonomického důvodu problematické [7]. Experimentální testování odolnosti uhlíkových ocelí plátovaných vhodným typem korozivzdorné oceli s nezokoujeným povrchem prokázalo vysokou odolnost v modelových pórových roztocích si-

mulujících zkarbonatovaný beton kontaminovaný chlořidy [7]. Technologie výroby takových výztuží ovšem vyžaduje mimořádnou náročnost na kvalitu výroby.

Lze využít i jiné výztužné materiály (skleněná vlákna z alkalirezistentního skla, tkané textilie, drátky, polymerní vlákna apod.) ve formě soustředěné prutové i rozptýlené vláknové výztuže. Ovšem takto koncipovaný stavební beton často nemůže dosáhnout mechanických vlastností betonů vyztužených konvenční výztuží s uhlíkové oceli [2,3].

V současnosti je stále diskutována ochrana výztuže z běžné uhlíkové oceli povlaky. Vhodný neporézní povlak z teoretického hlediska může svým bariérovým mechanismem prodloužit dobu do aktivace povrchu oceli vlivem chloridových anionů. Povlakování oceli je navíc univerzálním a většinou ekonomickým způsobem ochrany oceli. Důležité ovšem je, na rozdíl od atmosfér, aby povlak vykazoval odolnost v alkalickém prostředí betonu (pH pórového roztoku může být i vyšší než 13) a nesnižoval soudržnost výztuže s betonem [8].

Z pohledu ekonomických a technologických podmínek, případně okrajových podmínek nejvyšší možné tloušťky a kvality povlaku lze výztuž opatřovat povlaky na organické bázi (nejčastěji epoxidy, méně pak PVC), nebo povlaky vzniklémi technologií žárového zinková-

ní ponorem [9-13]. V mnoha experimentálních studiích bylo jednoznačně ověřeno, že žebírková výztuž s epoxidovým povlakem vykazuje sníženou soudržnost s betonem [14-18]. Důvodem k tomuto jevu může být omezení vzniku slabých vazebných interakcí mezi povlakem a cementovým tmelem nebo pouze nízká materiálová tuhost epoxidového povlaku, kterým se musí vnitřní síly přenést z oceli do betonu [19].

Problematika výztuže žárově zinkované ponorem

V některých studiích vykazuje sníženou soudržnost s betonem i žárově zinkovaná výztuž. Autoři, kteří zaznamenali tuto skutečnost svými experimenty, vysvětlují nesoudržnost zinkované výztuže s betonem změnou pórovitosti cementového tmele na fázovém rozhraní povlaku žárového zinku a betonu [20, 21]. Zvýšení pórovitosti vyvolá vznikající vodík, který je produktem katodické korozní reakce rozpouštění zinku v alkalickém prostředí čerstvého cementového tmele (obvyklé pH ~ 13,0) viz (1) [22, 23]:

Obr. 1. Krystaly dihydrátu bis(trihydroxidozinečnanu) vápenatého na povrchu zinkované oceli po 6 dnech expozice v modelovém pórovém roztoku o pH 12,6 (nasycený roztok $\text{Ca}(\text{OH})_2$) [34]
Fig. 1. $\text{Ca}[\text{Zn}(\text{OH})_3]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ crystals on the galvanized steel surface after 6 days of exposure in model pore solution (pH 12.6)

Obr. 2. Krystaly dihydrátu bis(trihydroxidozinečnanu) vápenatého na povrchu zinkované oceli po 6 dnech expozice v modelovém pórovém roztoku o pH 13,0 (nasycený roztok $\text{Ca}(\text{OH})_2$ s přidavkem KOH) [34]
Fig. 2. $\text{Ca}[\text{Zn}(\text{OH})_3]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ crystals on the galvanized steel surface after 6 days of exposure in model pore solution (pH 13)

Anodický korozní děj, tj. anodické korozní rozpouštění zinku ve výše zmíněném alkalickém prostředí, tedy i za přítomnosti Ca^{2+} kationtů lze popsat následujícími dílčími reakcemi (2), přičemž první z uvedených dílčích reakcí se odehrává na povrchu kovu a druhá již v samotném elektrolytu [22-26]:

Komplexní forma zinečnatých anionů se hromadí u povrchu zinkované oceli, protože difúze těchto ionů od povrchu kovu je příliš pomalá. Po překročení kritické koncentrace těchto iontů v elektrolytu na fázovém rozhraní se zinkovnou ocelí dochází k precipitaci ZnO dle (3) [24-29]:

Na povrchu zinku se tvoří porézní vrstva složená ze směsných krystalů ZnO a $\varepsilon\text{-Zn(OH)}_2$. Pokud ovšem dochází ke korozi zinku za přítomnosti Ca^{2+} , konkuruje precipitaci ZnO (3) precipitace dihydrátu bis(trihydroxidozinečnanu) vápenatého podle (4) [26, 27, 30, 31, 32].

Podle některých autorů zaručuje tento hydrát tvorbu neporézního povlaku zajišťujícího přechod koroze zinkového povlaku do pasivního stavu [27, 31]. Jiní ovšem přisuzují dokonalejší ochranu povrchu zinkované oceli povlaku ZnO (s menším podílem $\varepsilon\text{-Zn(OH)}_2$) než často sledované porézní struktury $\text{Ca}[\text{Zn(OH)}_3]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [33]. Vzhled deskovitých krystalů $\text{Ca}[\text{Zn(OH)}_3]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ vyloučených na žárově pozinkované oceli po šestidenní expozici v modelových pórových roztocích betonu o pH 12,6 a 13,0 zobrazuje Obr. 1 a Obr. 2 [34].

Protože při expozicích pozinkované oceli v modelovém pórovém roztoku betonu o pH 12,6 (nasycený roztok Ca(OH)_2 – simulace idealizovaného betonu bez přítomnosti oxidů alkalických kovů ve slínku) lze na počátku expozice u zinkované oceli zaznamenat $E_{\text{kor}} \sim -1100$ až -1200 mV vs. SCE [33], což je nižší potenciál než teoreticky vypočtený rovnovážný potenciál pro redukci vodíku při pH 14 ($E_{\text{rov}} = -1070$ mV vs. SCE) [35]. Lze se tedy úspěšně domnívat, že koroze žárově zinkované oceli je v čerstvém betonu třídy “NSC” (“Normal Strength Concrete”) z čistého portlandského cementu (CEM I) doprovázena vždy vývojem vodíku.

Soudržnost žárově zinkované výztuže s betonem

Zvýšení pórovitosti cementového tmelu na fázovém rozhraní musí nutně vést k omezení působení slabých vazebných interakcí působících na krátkou vzdálenost

mezi oběma materiály [2]. Nejenom tato skutečnost ovšem může snížit soudržnost zinkované výztuže s betonem. Negativní vliv může mít i snížení tloušťky zinkového povlaku, expanzivní efekt růstu korozních produktů z $\text{Ca}[\text{Zn(OH)}_3]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [19-21] nebo vliv difúze zinečnanů do cementového tmelu (zinečnatany podobně jako oxid olovnatý zpomalují proces tuhnutí betonu a rovněž zhoršují mechanické vlastnosti betonu v kontaminované oblasti [36-40]).

Ovšem pohled na soudržnost zinkované výztuže s betonem není jednotný. Někteří odborníci naopak tvrdí, že korozní produkty zinku jsou schopny snadno difundovat od povrchu výztuže a vyplňovat porézní strukturu cementového tmelu. Tímto efektem vysvětlují naměřenou zvýšenou soudržnost zinkované výztuže s betonem po 28 dnech zrání betonu [41]. Jiní jsou opačného názoru a shledávají, že porézní struktura cementového tmelu na fázovém rozhraní je po celou dobu zrání betonu téměř nezměněna [42].

Dodnes není zcela jasné, zda koroze zinkované oceli doprovázená vývojem vodíku a růstem korozních produktů na majoritní bázi $\text{Ca}[\text{Zn(OH)}_3]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ má negativní vliv na vývoj soudržnosti s betonem.

Experimentálním ověřováním soudržnosti výztuže s betonem rozumíme vytváření smykových napětí na rozhraní výztuže s betonem (τ [MPa]), různými způsoby dle uspořádání experimentu, vyvolávajících posun výztuže o 0,001 mm (dle ČSN 73 1328 [43] nebo ČSN 73 1333 [44]). Tyto normy a jiné odborné standardy (AISI, RILEM apod.) doporučují ověřování soudržnosti buď zkouškou soudržnosti na trámci, nebo zkouškou soudržnosti na kvádrech či krychlích (tzv. „vytahovací zkouška“). Druhé zmíněné uspořádání je z technologického a ekonomického hlediska upřednostňováno. Je důležité si uvědomit, že zmiňované předpisy a doporučení ověřují vliv různé geometrie povrchu zkoušené výztuže na soudržnost s betonem (žebírka, vtisky apod.). Neexistuje předpis realizace experimentů pro stanovení soudržnosti povlakované výztuže s betonem [21, 34].

Je ale zřejmé, že na soudržnost výztuže s betonem mají vliv celkem tři faktory (5). První faktor (f_{ad}) zohledňuje vliv slabých vazebných interakcí mezi výztuží a betonem a právě on může být narušen zmiňovanými vlivy, tj. zvýšením pórovitosti cementového tmelu na fázovém rozhraní a tvorbou korozních produktů z $\text{Ca}[\text{Zn(OH)}_3]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [19, 21]. Protože povrch i žebírkových výztuží (mimo vlastní žebírka) nemůže být dokonale hladký, je důležité zavádět při zkoušení i třetí faktor f_r . Nejzásadnější vliv na soudržnost s betonem má ovšem žebírkování, tj. mechanického provázání geometrie výztuže s cementovým tmelem (f_{mech}).

$$B_S = f_{\text{ad}} + f_r + f_{\text{mech}} \quad (5)$$

Z výše uvedeného vyplývá, že při zkoušení soudržnosti povlakovaných výztuží s betonem při podezření, že vytvořený povlak může s betonem na základě různých

mechanizmů vytvářet nesoudržné spojení, je nutné testovat pouze hladkou výztuž. Navíc je důležité, aby hladká výztuž byla kotvena do osy zkušebních těles, tak aby v žádném stykovém místě nepůsobila na beton tlakem [19]. Dále je důležité, aby povrch pozinkované výztuže neobsahoval defekty, které by uměle navýšovaly drsnost povrchu hladké výztuže (hrudky a krupice [45, 46]), tj. aby pozinkování ponorem bylo provedeno řádně. Za těchto podmínek lze zkoušet dle uvedených předpisů vliv koroze žárově zinkované výztuže na soudržnost

s betonem, a to po době zrání 28 dní, což je standardní stáří betonu pro stanovení pevnosti, resp. pevnostní třídy betonu.

Literatura zabývající se soudržností hladké i žebírkové žárově pozinkované výztuže s betonem je poměrně hojná. Výsledky ryze odborné literatury chronologicky shrnuje Tab. 1. [19, 34]. Ani z těchto výsledků nelze vytvořit jednoznačné závěry. V některých případech vychází u výztuží soudržnost snižená, ale v jiných naopak obvykle srovnatelná nebo mírně zvýšená [21, 34].

Existuje ovšem i značné množství srovnávacích studií, možná účelově zanesených na různých webových stránkách, které zaznamenávají srovnávací zkoušky soudržnosti pozinkovaných a nepozinkovaných výztuží. Výsledky obvykle ukazují mimořádnou soudržnost pozinkované výztuže (1,5 až 2× větší než u výztuže bez povlaku) s betonem po 28 dnech zrání vzorků [47-49]. Ovšem takové výsledky nelze logicky vysvětlit a postrádají na objektivnosti. Důvodem je především neúplná specifikace experimentu a vnějších faktorů majících vliv na soudržnost výztuže s betonem. Často totiž chybí volba a bližší popis uspořádání zkoušky soudržnosti, specifikace normativu zkoušení, charakteristika případných vazacích prvků zkoušených výztuží, dokumentace stavu povrchu, metalografická analýza povlaku žárového zinku a složení podkladové oceli, stanovení složení použitého cementu. Často není definován ani vodní součinitel betonové směsi. Obvykle nebývají definovány ani mechanické vlastnosti ztvrdlého betonu, popis způsobu jeho uložení a ošetřování, teplota vzduchu v průběhu realizace zkoušek soudržnosti apod.

V některé literatuře se uvádí, že na vývoj soudržnosti zinkované výztuže s betonem může mít vliv i obsah CrO_4^{2-} v cementu. Obsah chromanů v rozsahu 100-200 ppm (přepočteno na suchý cement bez kameňiva) může zamezit korozi povlaku žárového zinku v aktivním stavu na počátku expozice v čerstvém betonu [50-52]. Z tohoto důvodu je nutné konzultovat i vliv CrO_4^{2-} v použitém cementu na vývoj soudržnosti zinkované výztuže s betonem. Přidávky chromanů do betonu jsou z ekonomických, ale především ekologických důvodů absolutně nepřijatelné. Vyluhovatelnost chromanů z betonu nesmí podle současných a platných evropských směrnic přesáhnout 2 ppm. Navíc přidávky chromanů mají podobně jako zinečnatany negativní vliv na vývoj mechanických vlastností betonu [51].

Předkládaný článek popisuje experimentální ověření vlivu koroze žárově zinkované oceli na soudržnost s betonem. Zkoušení bylo realizováno na hladkých prutech žárově zinkovaných běžným ponorem, kotvených do os zkušebních krychlí (zvolena "vytahovací zkouška"). Článek uveřejňuje detailně všechny výše uvedené okrajové podmínky zkoušení soudržnosti. Diskutuje nejen vliv koroze povlaku zinku, ale rovněž i vliv skladby a složení povlaku a dále složení cementu na soudržnost s betonem.

Obr. 3. Uspořádání zkoušky soudržnosti na kvádrech dle ČSN 73 1328 („vytahovací zkouška“) [43]

Fig. 3. Pull-out test adjustment

Obr. 4. Uspořádání zkoušky soudržnosti na trámčích dle ČSN 73 1328 („ohybová zkouška“) [43]

Fig. 4. Bend test adjustment

Tab. 1. Srovnání dosavadních zkoušek soudržnosti žárově zinkované oceli s betonem / Summary of previous works focused on galvanized steel/concrete bond strength

Autor	Rok publikace	Druh výztuže	Uspořádání zkoušky	Počet vzorků	Doba zrání betonu	Srovnání soudržnosti s nepovlakovanou výztuží
Slater	1920	žebírková i hladká	"vytahovací z."	28	28 dní; 6 měsíců	snížená
Schmeer	1920	hladká	"vytahovací z."	50	28 dní; 3 a 6 měsíců	zvýšená
Brodbeck	1954	žebírková i hladká	"vytahovací z."	24	1; 3 a 12 měsíců	zvýšená
Bird	1962	hladká	"ohybová z."	–	–	snížená
Bresler	1962	hladká	"ohybová z."	40	28 dní	srovnatelná
Hofsoy	1965	žebírková	"vytahovací z."	60	28 dní	snížená
Yeomans	1994	žebírková i hladká	"ohybová z."	12	35 dní	mírně snížená
Kayali	1995	žebírková	"ohybová z."	12	28 dní	srovnatelná
Kayali	2000	žebírková	"ohybová z."	30	28 dní	srovnatelná
Sistonen	2001	žebírková	"vytahovací z."	30	25-37 dní	mírně snížená
Hamad	2005	žebírková	"ohybová z."	12	28 dní	mírně snížená
Ryant	2008	hladká	"vytahovací z."	15	28 dní	snížená
Maldonado	2010	žebírková	"vytahovací z."	–	28 dní	snížená/zvýšená*
Abdulkareem	2011	žebírková	"vytahovací z."	35	28 dní	srovnatelná

* podle druhu použité betonové směsi

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Pro přípravu zkušebních těles byla použita receptura naznačená v Tab. 2. Přičemž uvedené navážky jsou pro přípravu 1 m³ betonu třídy NSC („Normal Strength Concrete“). Bylo použito směsného cementu (CEM II) a dvou druhů kameniva rozdělených podle hrubosti (DTK – drobné těžené kamenivo s průměrem

Tab. 2. Detailní rozpis receptury přípravy 1 m³ betonu pro zkoušky soudržnosti výztuže s betonem a pro kontrolní zkoušky pevnosti betonu v tlaku / Composition of the concrete

Složka betonu: specifické označení	Množství
cement: CEM II/B-S 32,5 R (Čížkovice)	360 kg
kamenivo 1: DTK 0/4 Kaznějov	669 kg
kamenivo 2: HTK 8/16 Dobříň	1241 kg
superplastifikátor: Optima 208	1,90 kg
záměsová voda	144 l

do 4 mm a HTK – hrubé těžené kamenivo s průměrem větším než 4 mm). Pro snazší zpracovatelnost betonů byl přidán superplastifikátor na bázi modifikovaných polykarboxylátů, které jsou inaktivní ke kovovým povrchům. Poměr vody k cementu byl zvolen tak, aby vodní součinitel (w/c) byl 0,4. Jednotlivá betonová tělesa pro oba druhy zkoušek zrála vždy 1 den bezprostředně po betonáži v suché atmosféře (~65 % RH.; 20,5 °C) a následně byla uložena pod vodní hladinu na dobu 28 dnů. Po uplynutí této doby byla tělesa vyndána z vodní lázně a ponechána v suché atmosféře 24 hodin. Po tomto čase byla podrobena zkouškám [53]. Zkoušení pevnosti v tlaku (krychelná pevnost) bylo realizováno na zkušebním zařízení INSTRON 3000 kN.

Chemické složení (zastoupení komponent v oxidické podobě) použitého cementu bylo analyzováno metodou XRF na přístroji Axios (PANalytical) s vyhodnocením v software Omnian (viz Tab. 3.). Obsah kritických látek, které dále mohou ovlivňovat korozi zinkového povlaku v betonu (Cl⁻ a CrO₄²⁻), byl analyzován metodou ICP-OES z výluhu cementu. K této analýze byl využit přístroj ICP-OES: Integra XL (druhá část Tab. 3.).

Před vlastním pozinkováním byly ocelové pruty odmaštěny v komerčním alkalickém přípravku (Pragolod

Tab. 3. Výsledky chemické analýzy složení použitého cementu metodou XRF, obsah anionů Cl⁻ a CrO₄²⁻ byl stanoven metodou ICP-OES z výluhu použitého cementu (všechny výsledky jsou uvedeny v hm. %) / Chemical analysis of the concrete

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl ⁻	CrO ₄ ²⁻
55,8	26,2	4,8	3,1	2,4	4,1	0,3	0,8	0,069	~1,1·10 ⁻³

57 N; doba expozice 15 min při teplotě 75 °C) a mořeny v zředěné kyselině chlorovodíkové (15 hm. %; doba expozice 2 minuty). V komerční zinkovně proběhlo opětovné odmaštění (roztok NaOH) a rovněž i moření v HCl (uvedeno na základě ústního sdělení zaměstnanců zinkovny).

Pro zhodnocení tloušťky a skladby povlaku žárového zinku na ocelovém prutu byl nejdříve analyzován obsah uhlíku a dalších nečistot v konstrukční oceli. K tomuto účelu byl segmentovaný vzorek poskytnut k bodové analýze složení na optické emisní spektroskopii buzené doutnavým výbojem (GDS-OES), realizované na přístroji Horiba JobinYvon GD Profiler II. Výsledky této analýzy zobrazuje Tab. 4.

Tab. 4. Výsledky obsahu uhlíku a ostatních prvků v konstrukční oceli použitých prutů (všechny výsledky jsou uvedeny v hm. %) / *Chemical composition of substrate steel*

C	Si	P	Mn	S	Cu	Cr	Ni
0,11	0,24	0,01	0,56	0,03	0,22	0,05	0,08

K zhodnocení vizuálního vzhledu a složení samotného povlaku žárového zinku byl snímán příčný řez povlaku pod optickým mikroskopem (Arsenal AM2-TDV 530) a elektronovým mikroskopem TESCAN Vega – 3LMU s EDS analyzátozem. K zhodnocení skladby jednotlivých intermetalických fází Fe - Zn v povlaku byla využita bodová EDS analýza. Metalografický výbrus příčného řezu byl realizován s využitím brusných papírů P60 - P2400 (bruska: LaboPol-25). Leštění probíhalo s využitím diamantových past a zviditelnění skladby povlaku bylo realizováno leptadlem nital (2 hm. %).

Vzorky betonu pro zkoušení pevnosti v tlaku (krychelná pevnost, dle norem ČSN EN 12390-3 [54] a ČSN EN 12390-7 [55]) a soudržnosti výztuže s betonem byly vyrobeny v laboratoři technologie betonu Kloknerova ústavu. Využita byla horizontální laboratorní míchačka a každá záměs měla objem 25 l. Celkem byly namíchány dvě záměsi, označené jako 1 a 2. Z každé záměsi byly vyrobeny 3 krychle o hraně 150 mm pro zkoušky pevnosti betonu v tlaku a 6 krychlí pro zkoušky soudržnosti výztuže s betonem. Přičemž bylo použito vždy tří vzorků žárově zinkovaných hladkých prutů a tří vzorků nepovlakovaných hladkých prutů.

Pro zkoušení soudržnosti hladkých prutů s betonem byl zvolen následující postup (dle ČSN 73 1328). Zkušební krychle se osadila na hobrovou desku uloženou na ocelové desce zkušební přípravku. Obě desky jsou opatřeny otvorem o průměru 25 mm. Tímto otvorem se provlékl delší konec výztuže vyčnívající z krychle a upnul se do čelistí zkušebního stroje MTS 500 kN (Obr. 5.). Na druhý konec výztuže se opřel snímač posunu LVDT B20, který spočíval svou základnou na krychli (Obr. 6.).

Síla vytahující výztuž z krychle se zvětšovala v deseti stupních (velikost stupně 2,5 kN) s vyčkáváním 30 sekund na každém stupni. Mezi jednotlivými stupni se zvyšovala plynule rychlostí 0,125 kN/s. Pokud nenastalo vytažení výztuže do 10 stupně zatěžování, na konci desátého stupně se síla dále plynule zvyšovala rychlostí 0,125 kN/s až do vytržení výztuže z krychle. Průběh časové závislosti vývoje zatěžovací síly je shrnut na Obr. 7.

Obr. 5. Uspořádání experimentu pro zkoušení soudržnosti hladkých prutů s betonem

Fig. 5. Pull out test

Obr. 6. Detailní snímek snímače posunu LVDT

Fig. 6. Detail image of the dilatometer

Obr. 7. Schéma průběhu zatěžování
Fig. 7. Example of the load record

VÝSLEDKY A DISKUZE

Vzhled povlaku z příčného řezu žárově zinkované oceli je zobrazen na Obr. 8 (optická mikroskopie) a Obr. 9. a Obr. 10 (elektronová mikroskopie). Ze snímků je zřejmé, že povlak žárově zinkované oceli má tloušťku $85 \pm 15 \mu\text{m}$. Což překračuje minimální tloušťku povlaku dle průměru ocelového prutu ($d = 12 \text{ mm}$) podle ČSN EN ISO 1461 [56]. V povlaku dominuje jednoznačně fáze zeta ($\zeta - \text{FeZn}_{13}$), která zabírá přibližně 80 % tloušťky celého povlaku. Tato fáze má palisádovitý charakter (FeZn_{13} – krystaluje pro kovy v atypické jednoklonné krystalové soustavě) a její zvýšená tloušťka v povlaku zvyšuje jeho tvrdost, ale zároveň navyšuje i jeho křehkost [57, 58]. Při mechanickém zatěžování se jednotlivé vnější krystalové útvary mohou oddělit od povlaku (Obr. 9).

Obr. 8. Optická mikroskopie příčného řezu povlakem žárově zinkované oceli s označením vytvořených intermetalických fází Fe-Zn
Fig. 8. Optical image of the cross cut of the galvanized sample

Skutečnost, že povlak je tvořen především fází ζ , dokládá i bodová EDS analýza (Obr. 11. a Tab. 5. a dále Obr. 12 a Obr. 13). Nejspodnější vrstva povlaku je tvořena náznakem fáze Γ ($\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$), s určitostí nelze vyloučit ani fázi Γ_1 ($\text{Fe}_5\text{Zn}_{21}$), a náznakem seskupení fází δ ($\delta_{1k} - \text{FeZn}_7$ a $\delta_{1p} - \text{Fe}_{13}\text{Zn}_{126}$) [57]. Vliv těchto fází na korozi povlaku v čerstvém alkalickém prostředí betonu není možný, rovněž svými mechanickými vlastnostmi nebudou mít rozhodující vliv na soudržnost hladkých prutů s betonem.

Je velice pravděpodobné, že nejsvrchnější část zinkového povlaku není tvořena fází η (tuhý roztok železa v zinku; obsah železa pouze 0,03 hm. % [45, 57]), nebo nepokrývá povrch vrstvy fáze ζ souvisle. Tuto skutečnost potvrzuje matný vzhled pozinkovaných prutů, bez náznaku kovového lesku vrstvy prakticky čistého zinku.

Povlak žárově zinkované oceli vyloučený na povrchu hladkých ocelových prutů nedosahuje nejvyšší možné jakosti. Důvodem je skutečnost, že nejsou jednoznačně patrné, tj. vykrytalizované, fáze Γ (přesněji $\Gamma + \Gamma_1$) a fáze δ (přesněji $\delta_{1k} + \delta_{1p}$), dále pak prakticky není přítomna fáze čistého zinku (přesněji fáze η) a dominantní tloušťku povlaku reprezentuje fáze ζ . Jakostnější povlaky s lepšími mechanickými vlastnostmi (především nižší křehkostí) mají větší podíl seskupení fází δ [45, 57, 58].

Obr. 9. Vzhled povlaku žárově zinkované oceli získaný metodou SEM v režimu SE a BSE (s vyznačením odloučených krystalických útvarů z vrchní části povlaku)
Fig. 9. SEM images of the zinc coating

Obr. 10. Další snímek vzhledu povlaku žárově zinkované oceli získaný metodou SEM v režimu SE a BSE
Fig. 10. SEM images of the zinc coating

Protože povlak obsahuje méně dobře vykrystalizované fáze Γ a fáze δ a naopak v povlaku dominuje fáze ζ , je možné, že jeho tvorbu podminil negativní jev vlivu obsahu křemíku a fosforu na jakost povlaku, tzv. Sandelinův efekt (prudký nárůst tloušťky povlaku a tvorby jednofázové struktury ze ζ fáze; nežádoucí obsah křemíku 0,03-0,12 hm. %). Podle obsahu křemíku v oceli (Tab. 4.) je použita ocel sice uklidněná křemíkem, ale v tzv. Sebistyho oblasti (obsah křemíku od 0,15-0,25 hm. %), takže by se u ní Sandelinův efekt neměl projevit. Rovněž obsah fosforu je spíše nižší, tj. rovněž on by neměl podněcovat k tvorbě jednofázové struktury. Nicméně je nutné poznamenat, že obsah

křemíku v použité oceli je již téměř na hranici Sebistyho oblasti. Na skladbu povlaku mohla mít negativní vliv i nedokonalá předúprava povrchu v zinkovně, především pak moření v kyselině chlorovodíkové.

Výsledky pevnosti v tlaku vytvořených betonů ze dvou zmíněných záměsí (krychelná pevnost) zobrazuje Tab. 6. Dle výše zmiňovaných normativů lze beton záměsí číslo 1 zařadit do pevnostní třídy C40/50. Beton záměsí 2 lze zařadit do pevnostní třídy C45/55. Rozdíl v dosažených pevnostech mezi záměsí číslo 1 a záměsí číslo 2 je pravděpodobně způsoben cementem. Přestože

Obr. 11. Lokalizace jednotlivých bodových analýz metodou EDS

Fig. 11. Spots of EDS analyses

Tab. 5. Vyhodnocení obsahu Fe a Zn v jednotlivých bodových spektrech (Obr. 11) / Results of EDS analyses in single spots

Lokalizace	Obsah Fe (hm. %)	Obsah Zn (hm. %)
Spektrum 1	99,1	0,4
Spektrum 2	58,7	41,0
Spektrum 3	11,8	88,2
Spektrum 4	13,0	87,0
Spektrum 5	12,8	87,2
Spektrum 6	8,8	91,2
Spektrum 7	8,6	91,4
Spektrum 8	7,9	92,1
Spektrum 9	7,7	92,3
Spektrum 10	7,5	92,5
Spektrum 11	8,6	91,4

Obr. 12. Zastoupení Fe v povlaku (zjištěno analýzou EDS)
Fig. 12. Fe - EDS map

Obr. 13. Zastoupení Zn v povlaku (zjištěno analýzou EDS)
Fig. 13. Zn - EDS map

byl pro obě záměsi použit shodný cement (CEM II/B-S 32,5 R (Čížkovice)), byl cement dávkován pro každou záměs z jiného pytle.

Při „vytahovací“ zkoušce soudržnosti byly měřeny křivky závislosti tahové síly v ocelovém prutu (která musí být v rovnováze se smykovým napětím mezi prutem

Tab. 6. Detailní zobrazení rozměrů zkušebních těles a výsledků pevnosti betonu v tlaku (krychelná pevnost) / *Detail dimensions of samples and results of the test*

Označení vzorku	Rozměry			Hmotnost (g)	Objemová hmotnost (kg m ⁻³)	Tlaková síla (kN)	Napětí v tlaku (MPa)
	b (mm)	h (mm)	l (mm)				
1-1	150,0	151,7	150,1	8132	2410	1415	62,2
1-2	149,9	151,7	150,0	8307	2440	1373	60,4
1-3	149,9	152,7	149,9	8303	2420	1426	62,3
Průměrná hodnota:					2420		61,5
2- 1	149,0	150,1	149,1	8065	2420	1266	56,6
2-2	150,6	150,6	150,3	8311	2440	1277	56,3
2-3	150,0	150,4	149,9	8166	2410	1264	56,0
Průměrná hodnota:					2420		56,5

Obr. 14. Zatěžovací tahové křivky ocelových prutů bez povlaku při měření napětí v soudržnosti s betonem (1. záměs)
Fig. 14. Stress/strain curves of steel rebars/concrete bond strength (1. mixture)

Obr. 16. Zatěžovací tahové křivky ocelových prutů bez povlaku při měření napětí v soudržnosti s betonem (2. záměs)
Fig. 16. Stress/strain curves of steel rebars/concrete bond strength (2. mixture)

Obr. 15. Zatěžovací tahové křivky ocelových prutů žárově zinkovaných při měření napětí v soudržnosti s betonem (1. záměs)
Fig. 15. Stress/strain curves of galvanized steel rebars/concrete bond strength (1. mixture)

Obr. 17. Zatěžovací tahové křivky ocelových prutů žárově zinkovaných při měření napětí v soudržnosti s betonem (2. záměs)
Fig. 17. Stress/strain curves of galvanized steel rebars/concrete bond strength (2. mixture)

a betonem v krychli) a posunem výztuže v betonu. Tyto křivky jsou na Obr. 14-17. Každá dvojice křivek je vždy pro jednu záměs. Tedy vzorky označené jako 1Fe-x nebo 1Zn-x jsou z 1. záměsi a analogicky vzorky značené jako 2Fe-x nebo 2Zn-x jsou z 2. záměsi.

Vzorek 1Fe-1 (fialová křivka Obr. 14) byl řízen deformací a nikoli dle zatěžovacího schématu. Tento vzorek byl právě prvním zkoušeným vzorkem a byl použit pro zjištění orientačního napětí v soudržnosti, která následně byla použita pro stanovení zatěžovacího schématu. Záznam posunu výztuže v tomto případě byl sledován snímačem posunu LVDT, který měří posun čelistí hydraulického válce na spodní straně zkušebního stroje MTS 500 kN. Ostatní měření posunu výztuže byla již měřena druhým snímačem posunu LVDT B20 (úchylkoměr) umístěným svou základnou na zkušební krychli (Obr. 6).

Z maximálního silového zatížení ocelového prutu v tahu F byla pro jednotlivé pruty dle ČSN 73 1328 [43] vypočteno napětí v soudržnosti τ [MPa] dle (6):

$$\tau = \frac{F}{d \cdot \pi \cdot l} \quad (6)$$

kde F je maximální naměřenou tahovou silou, d jmenovitý průměr výztuže ($d = 12$ mm) a l kotevní délku ($l \sim 140$ mm). Jednotlivá naměřená napětí v soudržnosti byla zprůměrována a zanesena do srovnávacích sloupcových diagramů pro každou záměs (Obr. 18. a Obr. 19.).

Z výsledků je zřejmé, že pro obě záměsi vycházejí nižší naměřená průměrná napětí v soudržnosti τ [MPa] pro ocel opatřenou povlakem žárového zinku. Přičemž vyšší naměřené soudržnosti jsou pro oba druhy prutů v 2. záměsi, což odpovídá vyšší hodnotě (C45/55) zjištěné pevnostní třídy betonu druhé záměsi (Tab. 6.). Hutnější beton poskytuje vyšší adhezivní faktor f_{ad} (rovnice (5)), což se projeví na vyšší průměrné naměřené hodnotě napětí v soudržnosti.

Z literatury je zřejmé, že fáze ζ (nejsvrchnější vrstva povlaku na zinkovaných prutech – Obr. 8.) koroduje velice intenzivně v modelových pórových roztocích betonu o pH 13,0. Tato fáze není schopna přechodu do koroze v pasivním stavu, tj. korozní produkty na bázi $\text{Ca}[\text{Zn}(\text{OH})_3]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ nejsou schopny její povrch účinně zapasivovat [9, 35]. Obvykle se tvrdí, že intermetalické fáze Fe–Zn jsou v modelových pórových roztocích méně odolné než fáze η nebo čistý zinek [60, 61].

Lze se tedy oprávněně domnívat, že v prvopočátku uložení pozinkovaných prutů do čerstvého betonu došlo k intenzivní korozi zinkového povlaku v aktivním stavu za vývoje vodíku (1). Vodík způsobuje naplynění cementového tmelu na fázovém rozhraní. To se projeví ve zvýšení pórovitosti cementového tmelu na fázovém rozhraní, což má za následek snížení adhezivního faktoru f_{ad} (rovnice 5) a tedy snížení soudržnosti výztuže s betonem.

Obr. 18. Srovnávací diagram průměrného naměřeného napětí v soudržnosti pro oba druhy hladkých prutů a pro 1. záměs

Fig. 18. Average bond strength of steel and galvanized steel (1. mixture)

Obr. 19. Srovnávací diagram průměrného naměřeného napětí v soudržnosti pro oba druhy hladkých prutů a pro 2. záměs

Fig. 19. Average bond strength of steel and galvanized steel (2. mixture)

Vliv chloridových (Cl^-) a chromanových (CrO_4^{2-}) anionů na korozní chování zinkového povlaku v čerstvém betonu je minimální. Obsah chromanů v použitém cementu je pod uváděnou spodní hranici jeho obsahu [51] zaručující přechod koroze zinku do pasivního stavu v čerstvém betonu.

Dále je nezbytné diskutovat vliv korozních produktů na bázi $\text{Ca}[\text{Zn}(\text{OH})_3]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Tyto korozní produkty vznikají na povrchu zinkového povlaku a svým růstem poškozují cementový tmel. Při zatěžování dojde k šíření distorzní trhliny nepojivou vrstvou těchto korozních produktů. Tato skutečnost je zjednodušeně zobrazena na Obr. 20.

Protože nejsvrchnější vrstva povlaku žárového zinku je tvořena fází zeta (ζ), která je velice křehká, může se při zatěžování distorzní trhlinka šířit podél hranic krystalů nejsvrchnější části této fáze (Obr. 21). Možná je samozřejmě kombinace obou mechanismů realizovaných samostatně v různých částech kotevní délky pozinkovaného prutu v betonu. Distorze podél myšlené čáry usnadňuje vytažení pozinkovaného prutu.

V nedávné době byl diskutován vliv trvalého přístupu vody na kinetiku koroze zinku v prostředí reálného betonu. Z výsledků stanovené korozní rychlosti rezistometrickou metodou vyplývá, že kinetika koroze zinku v tomto prostředí je ovlivněna transportem vody, tj. pokud vzorky ztvrdlého betonu se zinkovými čidly jsou zpětně uloženy pod vodní hladinu, korozní rychlost zinku opět vzrůstá [62].

Protože vzorky betonových těles byly uloženy pod vodní hladinou, lze předpokládat, že koroze zinkového povlaku probíhala intenzivně po dobu 28 dnů

Obr. 20. Statické schéma zobrazující distorzi v korozních produktech z $\text{Ca}[\text{Zn}(\text{OH})_3]_2$ mezi zinkovaným prutem a krycí vrstvou betonu při zatěžování v průběhu zkoušek soudržnosti

Fig. 20. Static scheme of the rupturing of corrosion products between galvanized rebar and concrete

Obr. 21. Statické schéma zobrazující distorzi v nejsvrchnější části fáze ζ mezi zinkovaným prutem a krycí vrstvou betonu při zatěžování v průběhu zkoušek soudržnosti

Fig. 21. Static scheme of the rupturing in ζ -phase between galvanized rebar and concrete

(fáze ζ je méně korozně odolná než čistý zinek). Po tuto dobu došlo k výraznému nárůstu tloušťky korozních produktů na bázi $\text{Ca}[\text{Zn}(\text{OH})_3]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ a snížení tloušťky povlaku na ocelovém prutu. Z tohoto důvodu mohlo spíše dojít k dřívějšímu posunutí povlakované výztuže vlivem koroze zinkového povlaku, tj. distorzí podél korozních produktů vytvořených mezi výztuží a betonem (Obr. 20).

Ze snímků zkušebních těles po zkoušce soudržnosti je zřejmé, že pruty nebyly zcela dokonale kotveny do osy těles (Obr. 22-24). Nasvědčuje tomu destrukce betonu v blízkosti zatěžovaného prutu (detail Obr. 24). Nebyla tedy jednoznačně splněna základní podmínka pro objektivní zkoušení soudržnosti výztuže s betonem, tj. dokonalé kotvení hladkých prutů do os zkušebních těles. Nicméně z Obr. 22 a Obr. 23. je zřejmé, že to byly především zinkované výztuže, které se ve své ploše kotevní délky opíraly o ztvrdlý styčný povrch betonu.

Obr. 22. Vzhled zkušebních těles po zkoušce soudržnosti – ocel bez povlaku (vyznačení viditelných míst destrukce betonu v blízkosti zatěžovaného prutu)

Fig. 22. Samples with steel rebars after the test (concrete rupture highlighted)

Obr. 23. Vzhled zkušebních těles po zkoušce soudržnosti – ocel žárově zinkovaná (vyznačení viditelných míst destrukce betonu v blízkosti zatěžovaného prutu)

Fig. 23. Samples with galvanized steel rebars after the test (concrete rupture highlighted)

Nicméně i vnesení této chyby měření do výsledků zkoušek soudržnosti naznačuje, že hladké pozinkované pruty soudrží s betonem hůře než pruty bez povlaku.

Obr. 24. Detail destrukce betonu v blízkosti zatěžovaného prutu vzniklé v průběhu zkoušky soudržnosti
Fig. 24. Detail of the concrete rupture after the test

ZÁVĚR

Žárové zinkování povrchu ocelových výztuží může prodloužit životnost betonových konstrukcí. Důvodem je vyšší odolnost povlaku žárového zinku vůči karbonataci betonu a působení chloridů. Je důležité připomenout, že povlak pouze prodlužuje dobu do aktivace podkladové oceli.

Ovšem obava, že využití pozinkované výztuže může vyvolat snížení soudržnosti s betonem, je také oprávněná. Toto snížení soudržnosti výztuže s betonem je vyvoláno korozí zinkového povlaku v čerstvém betonu, tj. vývojem plynného vodíku (zvýšení pórovitosti cementového tmelu) a expanzí korozních produktů na bázi nepojivé fáze $\text{Ca}[\text{Zn}(\text{OH})_3]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Je ovšem také evidentní, že koroze zinkového povlaku velice úzce souvisí s hodnotou pH alkalického pórového roztoku čerstvého betonu, a nelze vyloučit, že ji mohou ovlivňovat i některé specifické přísady (plastifikátory, prozdušňovací látky, ztekucovadla atd.).

Zcela kritické mohou být ty části konstrukce, kde dochází k trvalému smáčení betonového povrchu vodou. V těchto případech může koroze zinkového povlaku rychle ztenčovat průměr použité výztuže, což nutně povede k výraznému snižování soudržnosti povlakované výztuže s betonem.

Při navrhování betonových konstrukcí s pozinkovanou výztuží by se měly dodržovat konstrukční zásady vyztužování, které zohledňují nebezpečí snížení soudržnosti této výztuže s betonem.

Poděkování

Realizováno za finanční podpory Grantové agentury České republiky, reg. číslo 14-20856S.

LITERATURA

1. Tonini, D.E.; et al. Chloride corrosion of steel in concrete, American Society for Testing and Materials, Baltimore 1977, str. 17.
2. Pytlík, P.; Technologie betonu, 1st ed.; Vysoké učení technické v Brně, Brno 2000, str. 178.
3. Collepardi, M.; Moderní beton, 1st ed.; ČKAIT, Pelhřimov 2009, str. 117.
4. Bertolini, L.; et al. Corrosion of Steel in Concrete (Prevention, Diagnosis, Repair), WILEY-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, Weinheim 2004, str. 26.
5. Böhni, H.; et al. Corrosion in reinforced concrete structures, 1st ed.; Woodhead Publishing Ltd. and CRC Press LLC: Woodhead Publishing Ltd, 2005, str. 81.
6. Novák, P.; et al. Koroze ocelové výztuže v betonu, *Koroze a ochrana materiálu*, **1996**, 40 (1), 2–7.
7. Kouřil, M.; et al. Korozivzdorné oceli pro výztuže betonu, *Koroze a ochrana materiálu* **2002**, 46 (3), 62–67.
8. Pokorný, P.; Předpokládaná účinnost konverzních povlaků proti aktivaci zinkované oceli v modelových pórových roztocích betonu, *Koroze a ochrana materiálu* **2013**, 57 (4), 115–126.
9. Yeomans, S. R. Galvanized steel reinforcement in concrete, 2nd ed.; Elsevier, Canberra 2004, str. 72.
10. Eriksson, H., Hirnová A.; Příručka žárového zinkování, 3rd ed.; AČSZ, Ostrava 2009.
11. Fratesi, R.; Galvanized reinforcing steel bars in concrete, COST 521 Workshop, Luxembourg 2002.
12. Page, C.L.; et al. Corrosion behavior of zinc coated steel in silica fume concrete, Corrosion Conference Trondheim, 1989, 887–896.
13. Bautista, A., Gonzales, J.A. Analysis of the protective efficiency of galvanizing against corrosion of reinforcements embedded in chloride contaminated concrete. *Cement and Concrete Research* **1996**, 26 (2), 215–223.
14. El-Hawary, M. M.; et al. Evaluation of bond strength of epoxy-coated bars in concrete exposed to marine environment, *Construction and Building Materials*, **1999**, 13, 357–362.
15. Kobayashi, K.; et al. Experimental studies on epoxy coated reinforcing steel for corrosion protection, *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, **1984**, 6 (2), 99–116.
16. Assaad, J. J.; et al. Bond strength of epoxy-coated bars in underwater concrete, *Construction and Building Materials* **2011**, 30, 667–674.
17. Cusens, A.; et al. Pullout Tests of Epoxy-Coated Reinforcement in Concrete, *Cement & Concrete Composites*, **1992**, 14, 269–276.
18. Swamy, R.; Epoxy coated rebars-The panacea for steel corrosion in concrete. *Construction & Building Materials* **1989**, 3 (2), 86–91.
19. Pokorný, P.; et al. Faktory ovlivňující soudržnost povlakované výztuže s betonem, *TriboTechnika* **2014**, 2, 80–82.

20. Kouřil, M. Soudržnost zinkované oceli s betonem. *Koroze a ochrana materiálu* **2007**, 51 (4), 80–83.
21. Pokorný, P.; Vliv koroze zinkované oceli na soudržnost s betonem, *Koroze a ochrana materiálu* **2012**, 56 (4), 119–135.
22. Bartoníček, R.; Koroze a protikorozi ochrana kovů 1st ed.; Academia – nakladatelství Československé akademie věd, Praha 1966.
23. Zhang, X.; *Corrosion and electrochemistry of zinc*; Plenum Press: New York, **1996**.
24. Macias, A.; Andrade, C.; Corrosion of galvanized steel in dilute Ca(OH)₂ solutions (pH 11,1 - 12,6), *British Corrosion Journal* **1987**, 22 (3), 162–171.
25. Macias, A., Andrade C.; Corrosion of galvanized steel reinforcements in alkaline solutions.(Part 1: Electrochemical results) *British Corrosion Journal* **1987**, 22 (2).
26. 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).
27. 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).
28. Macias, A. Andrade C.; Galvanized steel behaviour in Ca(OH)₂ saturated solution containing SO₄ ions. *Cement and Concrete Research* **1987**, 17, 307–316.
29. Porter, F.C.; Corrosion resistance of zinc and zinc alloys, 1st ed., Marcel Dekker, USA – North Carolina 1994.
30. Macias, A.; Equilibria of the chemical composition of the concrete pore solutions. Part I. Comparative study of synthetic and extracted solutions. **1987**, 17 (2), 173–182.
31. Macias, A.; Andrade C. Stability of the calcium hydroxy-zincate protective layer developed on galvanized reinforcements after a further increase of the pH value. **1986**, 36 (204), 19–28.
32. Macias, A.; The behaviour of galvanized steel in chloride-containing alkaline solutions-I. The influence of the cation. **1990**, 30 (4/5), 393–407.
33. Wienerová, K.; et al. Koroze a ochrana zinkované oceli v prostředí betonu, *Koroze a ochrana materiálu* **2010**, 54 (4), 148–154.
34. Pokorný, P.; Použití žárově zinkované výztuže betonu, *Strojárstvo/Strojírenství* **2014**, 6, 100–101.
35. Short, N.R.; et al. Electrochemical studies on the corrosion of range of zinc alloy coated steel in alkaline solutions, *Surface & Coating Technology* **1996**, 79, 218–224.
36. Olmo, I.; et al. Influence of lead, zinc iron (III) and chromium (III) oxides on the setting time and strength development of Portland cement, *Cement and Concrete Research* **2001**, 31, 1213–1219.
37. Takahashi, H.; et al. Hardening property of cement mortar adding heavy metal compound and solubility of heavy metal from hardened mortar. *Cement and Concrete Research* **1977**, 7, 283–290.
38. Asavapisit, S.; et al. Solution chemistry during cement hydration in the presence of metal hydroxides wastes. *Cement and Concrete Research* **1997**, 27 (8), 1249–1260.
39. Arliguie, G.; et al. Etude de l'effet retardateur du zinc sur l'hydratation de la pâte de ciment portland. *Cement and Concrete Research* **1982**, 12, 79–86.
40. Rovnaníková, P. Problémy spojené s použitím pozinkované výztuže do betonu. *Koroze a ochrana materiálu* **2002**, 46 (5), 104–107.
41. Belaid, F.; et al. Porous structure of the ITZ around galvanized and ordinary steel reinforcements, *Cement and Concrete Research* **2001**, 31, 1561–1566.
42. Rovnaníková P., Bayer P.; Mikrostruktura cementového tmelu v okolí pozinkované výztuže, 9. konference žárového zinkování; Ed.; 2003; pp 57–62.
43. ČSN 73 1328. *Stanovení soudržnosti oceli s betonem*. Praha: Český normalizační institut, 1971. 11 p.
44. ČSN 73 1333. *Zkoušení soudržnosti předpínací výztuže s betonem*. Praha: Český normalizační institut, 1990. 15 p.
45. Kuklík, V., Kudláček, J.; Žárové zinkování, 1st ed., AČSZ, Praha 2014.
46. Kuklík, V.; Vybrané příklady vad povlaků žárového zinku, *TriboTechnika* **2013**, 6, 52–54.
47. <http://www.galvanizeit.org/hot-dip-galvanizing/how-long-does-hdg-last/in-concrete> (cit. 2. 7. 2015).
48. http://www.galvanizeit.org/uploads/publications/Performance_of_Galvanized_Steel_Products.pdf (cit. 2. 7. 2015)
49. <http://www.galvanizedrebar.com/Documents/Publication/Specifiers%20Guide%20To%20Rebar%200504.pdf> (cit. 2. 7. 2015).
50. Bowsher B.; et al. Corrosion protection of reinforcing steels – Technical report fib – Bulletin 49, IFSC, Lousanne 2009.
51. Pokorný, P.; Kritická diskuze k vlivu přídavku chemických látek do cementu na korozní chování zinkované oceli, *Koroze a ochrana materiálu* **2014**, 58 (1), 31–35.
52. Andrade C.; et al. Protection systems for reinforcement, Bulletin D'Information N° 211, Comité Euro-International du Beton, Lausanne 1992.
53. ČSN EN 12390-2. Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti.
54. ČSN EN 12390-3. Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles.
55. ČSN EN 12390-7. Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu
56. ČSN EN ISO 1461. Žárové povlaky zinku nanášené ponorem na železných a ocelových výrobcích – Specifikace a zkušební metody
57. Pokorný, P.; et al. Description of structure of Fe–Zn intermetallic compounds present in hot-dip galvanized coatings on steel, *Metalurgija* **2015**, 4, 707–710.
58. Brown, P. J.; The structure of the ζ - phase in the transition metal – zinc alloy systems, *Acta Crystallographica* **1962**, 15, 608.
59. Gellings, P.J., de Bree, E.W., Gierman, G.; Synthesis and Characterization of Homogeneous Intermetallic Fe-Zn Compounds, Part 2., *International Journal of Materials Research* **1979**, 70 (5), 315–317
60. Sergi, G.; et al. Corrosion of galvanized and galvanized steel in solutions of pH 9,0-14,0. National Association of Corrosion Engineers (Presented during Corrosion/85) **1985**, 618–624.
61. Swamy, R.N.; et al. Corrosion behaviour of zinc alloy coated steel in hardened cement pastes, Proceedings of international conference held at the University of Sheffield: Corrosion and Corrosion protection of steel in concrete, Sheffield Academic Press, 1994, 1287–1298.
62. Kučera, V.; et al. Kinetika dějů řídících korozi zinkované oceli v betonu (Laboratorní projekt I), VŠCHT 2015, 26 p.