Vliv koroze zinkované oceli na soudržnost s betonem

The influence of galvanized steel on bond strength with concrete

Pokorný P.
Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství, VŠCHT Praha
E-mail: Pokornyt@vscht.cz

Přehledový článek postihuje vztah mezi korozním chováním žárově zinkované oceli v betonu a její soudržností. Korozní chování povlakované oceli vychází z předešlých výzkumných článků hodnotících její odolnost v modelových pórových roztocích v rozsahu pH 11-13,5. Podle platných norem je popsána soudržnost výztužné oceli s betonem, metodika jejího zkoušení a jsou rovněž uvedeny faktory, které ji ovlivňují, konkrétně změna pórovitosti cementového tmelu způsobená vyloučeným vodíkem na fázovém rozhraní a vliv vzniklých zinečnatanů na zpomalení tvrdnutí betonu. Na základě publikovaných výsledků je zhodnocena soudržnost žebírkované a hladké zinkované výztuže ve srovnání s běžnou výztužnou ocelí se stejnou geometrií povrchu. Závěrem je krátce zhodnoceno současné nahlížení na použitelnost zinkované výztuže.

This review article describes the relation between corrosion behaviour of hot-dip galvanized steel in concrete and its bond-strength. Corrosion behaviour of coated steel is specified on the grounds of previous research studies assessing its resistance in model pore solutions with pH ranging from 11 to 13.5. The reinforcing steel bond strength with concrete and testing methodology have been described according to the applicable standards as well as the factors affecting the bond strength, namely the change of the cement binder porosity caused by evolved hydrogen on the phase interface and the impact of formed zincates on concrete hardening deceleration. Based on the published results, the bond-strength of both ribbed and plain galvanized rebar was assessed compared to common reinforcing steel with uniform superficial geometry. Current opinions on galvanized reinforcement utilisation are briefly summarized at the end of the paper.

ÚVOD

Beton je nejrozšířenějším kompozitním stavebním materiálem na světě. Globální rozšíření betonu podmiňuje především jeho stálost v běžných atmosférických podmínkách, vysoká pevnost v tlaku, relativně nízká cena a jednoduchost výroby [1]. Nedostatkem prostých betonů je nízká pevnost v tahu, která dosahuje 8-10 % pevnosti v tlaku. Tento problém je nejčastěji řešen vnitřním vyztužováním ocelovými sítěmi, pruty, tyčemi, případně vlákny [2,3]. Ocelová výztuž nejlépe z ostatních nekovových výztužných materiálů přebírá většinu tahového napětí kompozitní konstrukce. Tato skutečnost umožňuje využití betonu při stavbě architektonických děl s vysokými nároky na pevnost a dlouhodobou životnost, především pak mostů a nosníků [4].

Životnost železobetonových staveb je limitována nepřijatelnou korozí běžně užívané nelegované výztužné oceli. Ocel koroduje v čerstvém betonu v pasivním stavu zanedbatelnou korozní rychlostí, kvůli vysoké hodnotě pH pórového roztoku (tj. 12,6-13,5, podle obsahu oxidů alkalických kovů v cementu). Ovšem působením oxidu uhličitého z atmosféry dochází k neutralizaci alkalických složek pórového roztoku a k aktivaci výztužné oceli spojenou s její nepřijatelnou korozní rychlostí. Zvýšení korozní rychlosti přechodem oceli do aktivního stavu bez poklesu pH je častěji spojeno s překročením kritické koncentrace chloridů z rozmrazovacích solí či mořské vody, které se k oceli dostávají krycí vrstvou betonu [5,6]. Korozí oceli v aktivitě se nejen snižuje účinný průměr výztuže, čímž klesá pevnost konstrukce, ale na povrchu oceli se vytvářejí charakteristické objemné korozní produkty (nárůst objemu korozních produktů výztužné oceli v betonu je 2-6× větší než objem vlastní ocelové výztuže [7]), které vyvolávají tahová pnutí uvnitř betonu s následným vznikem trhlin a odpadáváním krycí vrstvy betonu (Obr. 1 a 2) [8,9]. Prodloužení životnosti betonu lze dosáhnout přípravou kvalitní krycí vrstvy, katodickou ochranou vloženým proudem, využitím inhibitorů koroze, povlaků na výztuž i beton a případně použitím alternativních výztužných materiálů [9,10]. Z technologických, ekologických a nejčastěji ekonomických důvodů je nejpřijatelnějším řešením s potenciálem masivního rozšíření využití alternativních výztužných materiálů [9].

Obr. 1. Koroze uhlíkové oceli v betonu v prostředí s vysokou koncentrací chloridových aniontů [10]
Fig. 1. Corrosion of carbon steel reinforcement in environment with high chloride content

Obr. 2. Odpadávání krycí vrstvy betonu vyvolané vznikem objemných korozních produktů ocelové konstrukce [10]
Fig. 2. Exfoliation of concrete caused by voluminous corrosion products

Alternativní materiály pro výztuže do betonu

Z alternativních materiálů je v současnosti nejčastěji diskutována korozivzdorná ocel, která je jedinou ekonomickou variantou schopnou zajistit životnost výztužné konstrukce dosahující sta let. Ovšem jejímu masivnímu rozšíření brání vysoké pořizovací náklady materiálu, nedostatečné mechanické vlastnosti, špatná zpracovatelnost a svařitelnost.

Významnou výhodou korozivzdorných ocelí oproti uhlíkové oceli je jejich vysoká odolnost vůči poklesu pH působením oxidu uhličitého. Proto mohou významně prodlužovat životnost staveb v prostředích bez rizika spolupůsobení chloridových aniontů. V přítomnosti chloridů je jejich životnost závislá již na konkrétním složení, protože u nich může docházet k lokalizovaným formám koroze. Přesto může být kritická koncentrace chloridů nutná pro jejich aktivaci i 15 krát větší v porovnání s uhlíkovou ocelí [9,11]. Podobně jako je tomu u výztuží z uhlíkové oceli, rovněž u výztuží z korozivzdorných ocelí je jejich korozní odolnost limitována stavem povrchu. Okuje, vzniklé při jejich tváření za tepla nebo při svařování negativně ovlivňují jejich korozní odolnost. V práci [9] autoři sledovali korozní odolnost v pórových roztocích o pH 13,5, 12,6 a 8,1 vždy s přídavkem 15 nebo 100 g/l. Do experimentu byly zařazeny chromové feritické, chromové martenzitické, chromniklové austenitické, chromniklové dvoufázové korozivzdorné oceli. Ověřován byl také vliv stavu povrchu, od každé oceli byly připraveny dva paralelní vzorky s mořeným a zokujeným povrchem. Porovnání korozní odolnosti bylo provedeno na základě analýzy anodických částí polarizačních křivek. Z výsledků vyplývá, že nejodolnější je chromniklová dvoufázová ocel (FeCr22Ni6Mo3), u které nedochází ke korozi v aktivním stavu ani v případě zokujeného povrchu v prostředí zkarbonatovaného betonu (pH 8,1) za přítomnosti chloridů v koncentraci 100 g/l. Naopak u zokujené martenzitické (FeCr13) a feritické (FeCr17) oceli dochází k průrazu při koncentraci chloridů 100 g/l už v modelovém roztoku o pH 13,5. Autoři také dokazují, že všechny testované korozivzdorné oceli svými mechanickými vlastnostmi plně vyhovují požadavkům na mechanické vlastnosti výztuží. Uhlíková a chromová martenzitická ocel dosahují mechanických vlastností řízeným ochlazováním, u chromniklových austenitických korozivzdorných ocelí a chromniklových dvoufázových ocelí je požadovaných vlastností dosahováno tvářením. Pro výztuže do betonu se obvykle doporučuje používat chromniklové austenitické korozivzdorné oceli, samozřejmě pro nejnáročnější aplikace je doporučována chromniklová dvoufázová ocel například 1.4462 [9].

S výhodou lze využít i korozivzdornou ocel naplátovanou na povrch běžné uhlíkové oceli, čímž dojde k snížení pořizovacích nákladů alternativního materiálu. Nevýhodou může být snížení korozní odolnosti nauhličením případně difúzí chromu do základního kovu. Spojování korozivzdorných ocelí lze řešit svařováním, ovšem s ohledem na všechna pravidla pro svařování korozivzdorných ocelí. Důvodem je snížení korozní odolnosti v místě svarů. Výhodnější alternativou může být spojování korozivzdorných ocelí prostřednictvím objímek, a to jak u plnoprůřezové korozivzdorné oceli, tak i v případě korozivzdornou oceli povlakované uhlíkové oceli. Povlakovanou výztuž lze použít bez obav, vodivým spojením uhlíkové a korozivzdorné oceli nedochází k urychlení koroze uhlíkové oceli. K významnému urychlení koroze původní výztuže z uhlíkové oceli vodivě spojené s korozivzdornou ocelí dochází až v prostředí s nízkým pH, případně vysokou koncentrací chloridů. Tedy v podmínkách, kdy uhlíková ocel koroduje nepřijatelnou korozní rychlostí v případě dostatečného přísunu kyslíku. Korozivzdorné oceli jsou podle druhu čtyřikrát až desetkrát dražší než běžná uhlíková ocel, ale

při kalkulací celkových nákladů (kromě těch na nezbytné sanace zkorodovaných výztuží z uhlíkové oceli) lze dojít k navýšení pouze o 5-15 % [9,11].

Ekonomičtější a také často diskutovanou variantou je využití povlaků při ochraně obyčejné uhlíkové oceli. Povlak má za úkol bariérovým mechanizmem prodlužovat dobu přechodu podkladové uhlíkové oceli do aktivního stavu [7]. Výhodou oproti korozivzdorným ocelím může být zachování mechanických vlastností vlastní výztuže [9].

Používají se epoxidové povlaky, případně povlaky vzniklé procesem žárového zinkování. Přestože je technologie nanášení epoxidových povlaků jednoduchá a poměrně levná, rozšíření použití takto chráněné uhlíkové oceli je kvůli rozporuplným výsledkům z dřívější praxe omezené [11]. Hlavním problémem výztuží chráněných povlakem epoxidu je především manipulace, protože povlak je velice citlivý na mechanické poškození. Defekty v povlaku vznikají při ohýbání a ukládání výztuže do betonu a často i v procesu vlastní výroby [12]. Bylo rovněž prokázáno nebezpečné praskání epoxidového povlaku při dlouhodobém skladování povlakovaných výztuží při teplotách nižších než 10 °C [12]. Další nevýhodou je nutnost provádění veškerého svařování výztuží před nanášením povlaku, dodatečné spojování lze realizovat pouze pomocí objímek [9]. Zaznamenáno bylo také snadné poškozování epoxidového povlaku v místě jeho defektu korozními produkty uhlíkové oceli již zakotvené v betonu [13]. Velice diskutabilní je i soudržnost takto povlakované výztuže s betonem. Gustafson zjistil [14], že v atmosférických podmínkách bez přítomnosti chloridových aniontů je soudržnost epoxidem povlakované výztuže s betonem srovnatelná se soudržností běžné uhlíkové oceli. Vytahovací zkouškou potvrdil rovněž El-Hawary [15], že nejsou žádné rozdíly mezi soudržností povlakované výztuže s betonem a výztuže nepovlakované po 18 měsících zrání betonu v laboratorních podmínkách. Ovšem v počátečních fázích tvrdnutí betonu je soudržnost povlakované výztuže nižší. Srovnatelných hodnot soudržnosti povlakované výztuže s betonem ve srovnání se soudržností běžné armovací výztuže je dosaženo až po 12 měsících zrání betonu. El-Hawary dále uvádí, že po expozicích v prostředí se zvýšenou koncentrací chloridových aniontů je soudržnost povlakované výztuže s betonem o 6,5 % nižší než soudržnost nepovlakované oceli. Někteří autoři sledují prostřednictvím podobně definovaných vytahovacích zkoušek snížení soudržnosti u povlakované žebírkové výztuže o 20-25 % ve srovnání s nepovlakovanou ocelí a připisují to slabším nevazebným interakcím mezi epoxidovým povlakem a betonem [16], jiní si podobné snížení soudržnosti vysvětlují pouze výrazným vyhlazením povrchu při povlakování zkušební žebříkové výztuže [17]. V dalších pracích bylo také sledováno snížení soudržnosti mezi epoxidem povlakovanou výztuží a betonem vytahovacími zkouškami, a to jak v prostředích se zvýšenou koncentrací chloridů, tak v prostředích definovaných pouze zvýšenou relativní vlhkostí [18,19]. Liliana De Anda a spol. doporučují v případě užití epoxidem povlakované výztuže tloušťky povlaků alespoň 200 μm. Nižší tloušťky podle nich nedisponují prakticky žádnými ochrannými vlastnostmi na vlastní výztužnou ocel [19]. Je to dáno pravděpodobně tím, že nižší tloušťky povlaků mají více trhlin již vytvořených při procesu povlakování. Ideální jsou povlaky tloušťky až 300 μm [20]. Podle Swamy [20] takto tlusté povlaky vykazují větší korozní odolnost v betonu kontaminovaného chloridy, než žárově zinkovaná výztuž chráněná chromátovým povlakem. V současnosti se epoxidem chráněná výztuž používá ve stavebnictví pouze omezeně, s ohledem na prokázanou zhoršenou soudržnost s betonem je nezbytné prodlužovat její kotevní délku v betonu [21].

Žárově zinkovaná výztuž

Dalším ekonomickým způsobem ochrany běžné uhlíkové oceli je její žárové zinkování. Vhodnost povlaků žárového zinku do prostředí čerstvého a tvrdnoucího betonu je velice diskutabilní. Někteří odborníci tvrdí, že povlaky žárového zinku jsou díky svým výhodám oproti uhlíkové oceli v užití do betonu opodstatněné [7]. Jiní naopak tvrdí, že odolnost žárového povlaku v alkalickém prostředí pórového roztoku betonu je omezená a navíc s jeho užitím hrozí reálné riziko ztráty soudržnosti mezi výztuží a betonem [22,23].

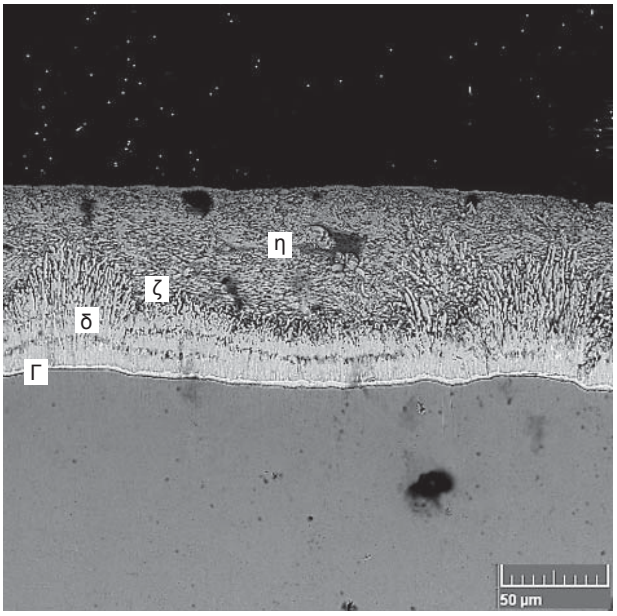
Mezi výhody zinku (oproti uhlíkové oceli) ospravedlňující jeho využití v betonu patří především jeho vyšší odolnost vůči působení chloridů (2-4×), galvanický účinek v případě porušení celistvosti povlaku a vznik méně objemných korozních produktů, neomezujících svým růstem integritu krycí vrstvy betonu, významnou výhodou je odolnost zinkované výztuže vůči karbonataci betonu (přibližně do pH 7) [13,24]. Mezi diskutabilní výhody povlaku patří schopnost jeho korozních produktů snadno difundovat od výztuže do cementového tmelu a v rozsahu pH 12,6-13,3 se pasivovat odolnou a kompaktní vrstvou snižující korozní rychlost, která se v tomto rozsahu pH významně nezvyšuje ani působením chloridů [13,25,26]. Na korozní chování zinkované výztuže v alkalickém prostředí má významný vliv struktura povlaku žárového zinku.

Žárové zinkování patří mezi ponorové povlakovací techniky, kdy se na povrchu nelegované oceli ponořením do lázně roztaveného zinku (teplota přibližně 460 °C) vylučuje slitinový difúzní povlak Fe-Zn [27]. Obsah železa ve slitinovém povlaku klesá směrem k vnějšímu povrchu. Nejsvrchnější vrstva, tzv. η-fáze, je tvořena prakticky čistým zinkem (někdy se uvádí, že ještě obsahuje menší množství železa do 0,03 hm. %), tato vrstva vzniká ztuhnutím taveniny zinku. Typický hrubý

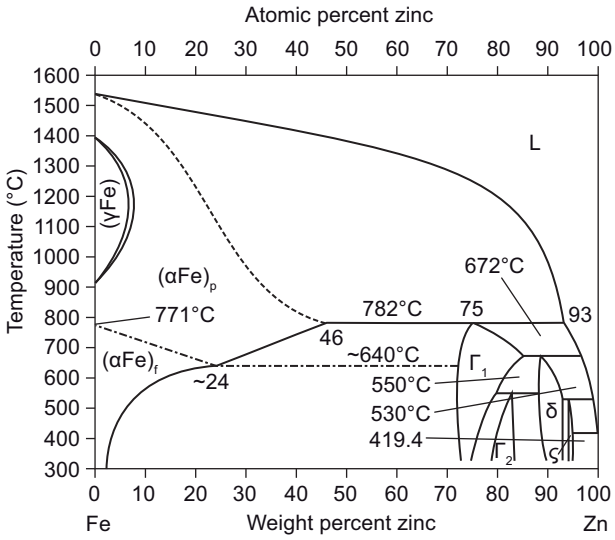
reliéf povlaku je tvořen zatuhlými podélnými stékanci zinku, které se vytvoří ve směru rovnoběžném se směrem vytahování vzorků z lázně [24,28]. Pod vrstvou prakticky čistého zinku se nachází tzv. ζ-fáze ($FeZn_{13}$ – krystaluje v krystalové soustavě monoklinické), která obsahuje 5,8-6,7 hm. % železa. Tato fáze je charakteristická vysokou tvrdostí a dlouhými na povrch kolmými krystaly. Kratší krystaly s obsahem železa mezi 7-11 hm. % patří tzv. δ-fázi ($FeZn_7$ – krystaluje v hexagonální krystalové struktuře), jejíž tvrdost je ještě přibližně dvojnásobně větší než tvrdost ζ-fáze. Nejspodnější velice tenkou vrstvou je tzv. Γ-fáze (Fe_5Zn_{21} – krystaluje v soustavě krychlové) s nejvyšším obsahem železa 21-28 hm. % [24,29,30]. Tloušťka povlaků žárového zinku je v rozmezí 35-120 μm, přičemž tloušťka slitinových fází není závislá na době ponoru. S rostoucí dobou ponoru roste pouze tloušťka vrstvy η-fáze [31].

Tloušťka této fáze je dále ovlivněna složením podkladové oceli, teplotou lázně, dobou ponoru, přítomností jiných kovových prvků v lázni. Největší vliv na tloušťku povlaku čistého zinku respektive i na tloušťku a mikrostrukturu slitinových fází má obsah křemíku v podkladové oceli. Při obsahu křemíku do 0,03 hm. % (tzv. „nízkokřemíkové oceli“) vznikají slitinové fáze s velice semknutými zrny. Roztavenému zinku je bráněno dostat se k povrchu oceli a důsledkem je, že k reakci dochází pouze difúzí železa a zinku do slitinové vrstvy. Reakce se časem zpomaluje a vznikají tenké povlaky s velkým podílem fáze η. Obsah křemíku mezi 0,06 a 0,12 hm. % definuje tzv. Sandelinovu oblast, kdy difúze probíhá velice rychle. V mikrostruktuře povlaku se to projeví nárůstem fáze ζ na úkor právě fáze čistého zinku, která při povlakování ocelí s tímto obsahem křemíku nevzniká. Při obsahu křemíku 0,15-0,25 hm. % (tzv. Sebistyho oblast) je opět růst fáze η potlačen s ohledem na nárůst tloušťky slitinových fází. S rostoucím obsahem křemíku nad 0,25 hm. % roste strmě tloušťka povlaku, která je zapříčiněná růstem pouze η-fáze [29]. Při nižších přípustných teplotách zinkování vznikají povlaky s větší tloušťkou fáze čistého zinku. Zvýšení tloušťky η fáze lze dosáhnout i přídavkem hliníku a niklu do lázně. Žíhání vzniklého povlaku vede k rozrušování vrstvy čistého zinku [7].

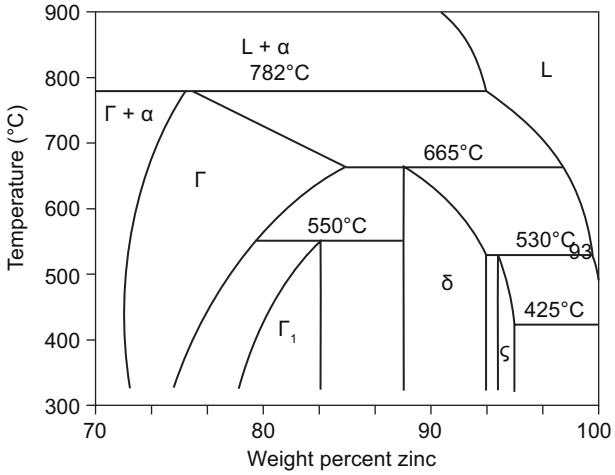
Vzhled jednotlivých intermetalických fází difúzního povlaku žárového zinku je zobrazen na Obr. 3. Složení jednotlivých fází lze odečíst z binárního fázového diagramu Fe-Zn (Obr. 4, 5)



Obr. 3. Snímek z rastrovacího elektronového mikroskopu příčného řezu žárově zinkované oceli [31]
Fig. 3. SEM image of galvanized rebar cross cut



Obr. 4. Fázový diagram Fe–Zn [28]
Fig. 4. Fe-Zn phase diagramm



Obr. 5. Úsek fázového diagramu Fe-Zn slitin s vysokým podílem zinku [28]
Fig. 5. Part of the Fe-Zn diagramm for alloys with high Zn content

Korozní chování žárově zinkované výztuže v betonu

Zinek je přechodný kov, reaguje velice ochotně s kyselinami a hydroxidy za vzniku dvojmocných solí. Koroze zinku je závislá především na pH prostředí (Obr. 6). Jak již bylo naznačeno, v silně kyselých nebo naopak v silně alkalických prostředích zinek koroduje nepřijatelnou korozní rychlostí. V kyselých prostředích jsou produktem anodické reakce zinečnaté kationy (Zn^{2+}), korozním produktem zinku v neutrálním a mírně alkalickém prostředí je hydroxid zinečnatý, případně se zvyšujícím se pH komplexní zinečnatany, kde zinek je centrálním atomem s koordinačními čísly nejčastěji 3, 4 a 6 (Obr. 7). Koroze zinku v alkalickém prostředí je doprovázena vznikem vodíku, protože samovolný korozní potenciál zinku je podle diagramu potenciál vs. pH v oblasti stability vodíku [32,33].

Jak bylo prokázáno [34], korozní rychlost povlaku žárového zinku v alkalických prostředích modelového pórového roztoku s pH (11-13,8) nabývá podobných hodnot, jakých je dosaženo v pórových roztocích betonu bez přítomnosti vápenatých kationtů. Mezi pH 11-12 je povlak lokálně napaden, protože na jeho povrchu vzniká porézní a velice špatně přilnavá vrstva ZnO, která není schopná povrch účinně zapasivovat. Při pH v rozmezí 12-12,8 dochází k snížení korozní rychlosti povlaku žárového zinku spojenou s tvorbou dobře přilnavé a neporézní vrstva ZnO s ojedinělými krystaly $Zn(OH)_2$. Při tomto pH se ještě nevylučuje vodík. Následně při rozsahu pH 12,8-13,4 dochází k dalšímu zvýšení korozní rychlosti a koroze je doprovázena vylučováním vodíku. Po přibližně 10 dnech dojde k zapasivování povrchu tvorbou velice kompaktního povlaku tvořeného krystaly ε-$Zn(OH)_2$. Konečně při pH větším než je 13,4 se již dále netvoří souvislý ochranný povlak z ε-$Zn(OH)_2$ a korozní rychlost povlaku žárového zinku rychle vzrůstá s rostoucím pH, až je žárový povlak kompletně rozpuštěn za několik málo měsíců. Účinná pasivní vrstva složená z ε-$Zn(OH)_2$, vznikající na povrchu žárového zinku do 10 dní expozice v alkalickém prostředí o pH v úseku 12,8-13,4, tedy úzce připodobňující pH pórového roztoku betonu, se podle autorů tvoří pomocí následující rovnice [34]:

$$Zn + 4OH^- \rightarrow [ZnOH_4]^{2-} + 2e^-$$

$$Zn + 2OH^- \rightarrow ZnO + H_2O + 2e^-$$

$$ZnO + H_2O + 2OH^- \rightarrow [Zn(OH)_4]^{2-}$$

$$[Zn(OH)_4]^{2-} \rightarrow \varepsilon\text{-}Zn(OH)_2 + 2OH^-$$

Při posuzování korozního chování žárově zinkované výztuže v prostředí betonu je nutno zajistit reálné podmínky a složení pórového roztoku betonu, který je nasycen $Ca(OH)_2$. Hydroxid vápenatý vzniká hydratací slínkových minerálů při tvrdnutí a tuhnutí betonu. Celkové pH nasyceného roztoku hydroxidu vápenatého je 12,6, ovšem pojivový cement obsahuje ještě oxidy alkalických kovů (Na_2O, K_2O), proto reálné pH simulující podmínky v betonu je vyšší než 12,5.

Macias a Andrade zkoumali chování žárově zinkované výztuže v prostředí modelového pórového roztoku nasyceného $Ca(OH)_2$ s přídavkem/ bez přídavku KOH (případně NaOH) měřením časového průběhu samovolného korozního potenciálu a časového průběhu korozního proudu [34,35]. Dále analyzují korozní produkty na povrchu povlaku v různých intervalech pH prostřednictvím rastrovací elektronové mikroskopie, rentgenové difrakční analýzy a infračervené absorpční spektroskopie [36,37]. Autoři dokazují, že korozní rychlost povlaku žárového zinku v prostředí modelového pórového betonu v rozsahu pH 11-13,8 a v přítomnosti Ca^{2+} je opět nelineární, ale odlišné od chování při podobném pH bez přítomnosti vápenatých kationtů. Při pH nižším než 11,5 se povlak žárového zinku v přítomnosti vápenatých kationtů chová podobně jako bez nich. Povrch vzorků se pokrývá nesouvislým a tenkým povlakem ZnO s izolovanými krystaly $Zn(OH)_2$, tento povlak není schopen ochránit povrch žárového zinku a objevuje se zjevné lokalizované napadení. V rozmezí pH 11,5-12,2 se korozní rychlost jen mírně snižuje a na povrchu žárového zinku ubývá krystalů ZnO a roste množství krystalů $Zn(OH)_2$. Zásadní rozdíl v chování žárově zinkované výztuže v modelovém pórovém roztoku za přítomnosti vápenatých kationtů je sledován při pH 12,6-13,3. Za těchto podmínek byl po dvou dnech expozice sledován posun samovolného korozního potenciálu ke kladným hodnotám s korespondujícím poklesem korozního proudu. Na povrchu vzorků se po dvou dnech vytvořila velice kompaktní tenká vrstva dihydrátu tetrahydroxozinečnatanu vápenatého $Ca[Zn(OH)_4].2H_2O$, který podle autorů povrch účinně zapasivuje. Transformace $Zn(OH)_2$ na tetrahydroxozinečnatan probíhá pozvolně. Autoři rovněž nevylučují, že pasivní povlak obsahuje amorfní formu $Zn(OH)_2$ a menší množství krystalů ZnO. Dále bylo zjištěno, že morfologie krystalů, jejich množství, obsazení povrchu a velikost závisí na pH. S rostoucím pH povlak hrubne a stává se poréznějším. Rovněž bylo zjištěno, že s rostoucím pH se povlak tetrahydroxozinečnatanu vytváří pomaleji. Yeomans [7] uvádí, že při pH 12,6 je povrch žárového zinku kompletně pokryt tetrahydroxozinečnatanem do 2-3 dnů po zahájení expozice. Macias a Andrade dále uvádějí, že při pH větším než 13,3 se povrch vzorku nezapasivuje, což bylo sledováno na časovém průběhu samovolného korozního potenciálu, kde nebyl zaznamenán přechod do pozitivnějších potenciálů a rovněž nebyl sledován pokles korozního proudu, a to ani po 4 týdnech. Při těchto vysokých hodnotách pH povlak nekontrolovatelně koroduje a produktem katodické reakce je vodík. Vylučování vodíku ustává po 15 dnech expozice, ale celý povlak žárového zinku je rozpuštěn do 33 dnů od počátku expozice. Po překročení mezní

hranice pH 13,3 je povrch již pokryt pouze izolovanými krystaly $Ca[Zn(OH)_4].2H_2O$ a přibývá krystalů oxidu zinečnatého a dříve uvedeného ε-$Zn(OH)_2$, které nejsou schopny účinně zapasivovat povrch. S rostoucí hodnotou pH přibývá množství porézního ZnO a korozní rychlost exponovaných vzorků strmě roste. Autoři popisují vznik nerozpustného dihydrátu tetrahydroxozinečnatanu podle rovnic [34]:

$$Zn + 4OH^- \rightarrow [Zn(OH)_4]^{2-} + 2e^-$$

$$Zn + 2OH^- \rightarrow ZnO + H_2O + 2e^-$$

$$ZnO + H_2O + 2OH^- \rightarrow [Zn(OH)_4]^{2-}$$

$$[Zn(OH)_4]^{2-} + Ca^{2+} + 2H_2O \rightarrow Ca[Zn(OH)_4]^{2-} \cdot 2H_2O$$

Macias a Andrade dále uvádějí, že jestliže je modelový pórový roztok obohacen síranovými aniony SO_4^{2-} (modelující reálný beton se zvýšeným obsahem sádrovce ve slínku), dosahuje jeho pH limitní hodnoty 13,2. Což může být výhodné, protože při tomto pH je podle autorů vytvořena ještě souvislá pasivní vrstva tetrahydroxozinečnatanu na povrchu žárového zinku a povlak koroduje přijatelnou korozní rychlostí zinku v pasivitě. Toto bylo opět ověřeno měřením časového průběhu samovolného korozního potenciálu korespondujícího s naměřenými výsledky poklesů korozních proudů [38,39]. Autoři dále ověřili, že pokles síranových aniontů v reálném betonu zapříčiněný jejich postupným reagováním s hlinitokřemičitany probíhá již po několika dnech a pH pórového roztoku betonu vzrůstá. Po 28 dnech volný obsah síranů v betonu je již zanedbatelně malý [39]. Tito autoři v jiném článku potvrzují, že následný vzrůst pH nad 13,3 nemá vliv na stabilitu již vytvořené pasivní vrstvy, protože nebylo sledováno výrazné navýšení korozního proudu a ke koroznímu napadení dochází pouze v malých plochách na hranicích mezi krystaly tetrahydroxozinečnatanu [40].

Pasivaci povlaku žárového zinku v modelovém pórovém roztoku o pH 12,8 s přídavkem 1 hm. % NaCl sledovali i Ghosh a Singh [41]. Měřením časového průběhu samovolného korozního potenciálu, sledovali přechod povlaku žárového zinku do pasivního stavu (změna samovolného korozního potenciálu z -1400 mV na -600 mV, měřeno proti standardní kalomelové elektrodě). K pasivaci došlo po 120 hodinách, do této doby bylo také sledováno intenzivní vylučování vodíku. Autoři studovali mechanizmus vylučování pasivní vrstvy metodou elektrochemické impedanční spektroskopie a zkoumali korozní produkty technikami rentgenové difrakční analýzy, Ramanovy spektroskopie a energiově disperzní spektrometrií. Pasivní povlak byl tvořen směsným hydroxouhličitanem zinečnatým $Zn_5(CO_3)_2(OH)_6$. Tento korozní produkt se na povrchu oceli podle autorů vytváří transformací z ZnO a $Zn(OH)_2$ za spolupůsobení dostatečného množství oxidu uhličitého z atmosféry podle rovnice:

$$5[Zn(OH)_4]^{2-} + 2CO_2 \rightarrow Zn_5(CO_3)_2(OH)_6 + 10OH^- + 2H_2O$$

Na rozdíl od Ghosha a Singha, Kowafuku [42] zjistil, že v prostředích s chloridy se na povrchu zinku může vytvářet kompaktní pasivní povlak s obsahem chloridů: $ZnCl_2.4Zn(OH)_2$. Podle jiných zdrojů je inhibiční působení $ZnCl_2.4Zn(OH)_2$ dáno poklesem rychlosti redukce kyslíku na povrchu pokrytém touto sloučeninou [43]. Jiní autoři jsou přesvědčeni, že na povrchu povlaku žárového zinku vznikají v prostředí betonu exponovaných pod mořskou hladinou korozní produkty o složení $Zn_5(OH)_8Cl_2.H_2O$, které mají až 2,6 krát větší objem a mohou poškozovat beton na fázovém rozhraní [44].

K odlišným výsledkům došli Macias a Andrade [45], kteří dokazují, že se pasivní vrstva složená z $Ca[Zn(OH)_4].2H_2O$ opět tvoří v oblasti pH 12,5-13,3, a to i v přítomnosti chloridů. Ovšem přítomnost chloridů narušuje její kompaktnost. Autoři neprokazují tvorbu korozních produktů s chloridy. Dále ukazují, že přítomnost $CaCl_2$ jako zdroje chloridových aniontů (chlorid vápenatý je využíván např. v severní Evropě v posypových solích místo v ČR obvyklého chloridu sodného) v modelovém pórovém roztoku ovlivňuje chování povlaku žárového zinku odlišně, než s přídavkem NaCl. Vápenaté kationty se spolupodílejí na udržování pH v rozmezí hodnot potřebných pro tvorbu pasivní vrstvy. Yeomans uvádí [7], že lokalizovaná koroze zinku se objevuje až při kritické koncentraci 0,45 mol/dm^3 Cl^-, ale u oceli je kritická koncentrace chloridů pouze 0,08 mol/dm^3. Chování povlaku žárového zinku v prostředí modelového pórového roztoku za přítomnosti

Tab. 1. Souhrnné zhodnocení chování povlaku žárového zinku v prostředí modelového pórového roztoku betonu bez přítomnosti chloridů sestaveného na základě prací Macias A. Andrade C. [35,36,37,38] / *The weight losses of samples after corrosion test in artificial atmosphere*

pH	(11-12,5)	(12,5-13,3)	>13,3
korozní stav	lokální napadení	koroze v pasivitě	koroze v aktivitě
korozní produkty	ZnO	$Ca[Zn(OH)_4].2H_2O$	ZnO + $Zn(OH)_2$
vylučování vodíku	<12,3 bez vylučování vodíku	>12,3 vylučování vodíku	

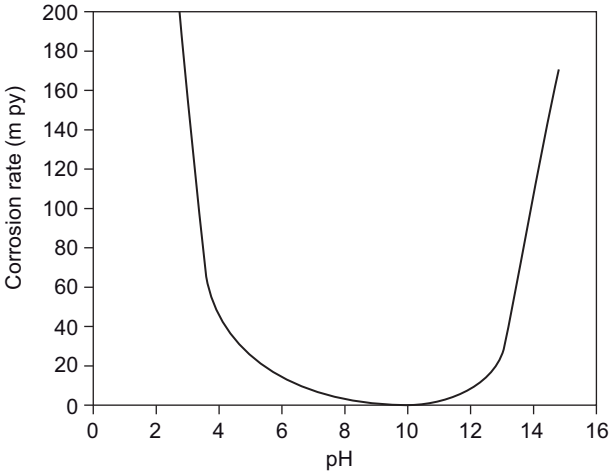
chloridů závisí na původu těchto aniontů, tedy zda jsou již kontaminovány původní komponenty (záměsová voda, kamenivo, cement, apod.) betonu, nebo chloridy difundují k výztuži až po tuhnutí případně tvrdnutí betonu. Významnější roli ovšem hraje složení povlaku žárového zinku, především tloušťka vyloučené η-fáze. V případě kontaminace komponent betonu chloridy, dochází v případě užití $CaCl_2$ k poklesu pH až na hranici 12,6, což usnadňuje tvorbu pasivní vrstvy, naopak NaCl pH modelového pórového roztoku neovlivňuje. Dokonce se ukazuje, že malá množství $CaCl_2$ (2 hm. %) mírně snižují korozní rychlost povlaku žárového zinku po jeho ponoření do zkušebního roztoku. Kdežto obdobná koncentrace NaCl naopak korozní rychlost navyšuje. Odolnost povlaku žárového zinku podle Yeomanse při postupné difúzi chloridů již ztvrdlým betonem je závislá na kompaktnosti vytvořené pasivní vrstvy z Ca $[Zn(OH)_3]_2.2H_2O$ a tloušťky zbylé η-fáze. V případě kompaktní pasivní vrstvy a dostatečné tloušťky vnější vrstvy čistého zinku, odolává žárově zinkovaná výztuž velice dobře. Na odolnost má vliv spíše tloušťka zbylé η-fáze čistého zinku, než kompaktnost a složení pasivní vrstvy [7]. Obecně bývá přijímán názor, že žárově zinkovaná ocel pouze prodlužuje dobu do aktivace podkladové uhlíkové oceli. Obvykle je přiznáváno, že odolnost vůči působení chloridů je zinkovým povlakem navýšena. Ovšem bylo i uveřejněno, že působením chloridů může u zinkované oceli docházet k intenzivní důlkové korozi a celková korozní rychlost v prostředí o vysoké koncentrace chloridů (mořská voda) může být vyšší, než u běžné výztužné oceli vystavené tomuto prostředí [46].

Velice bývá diskutována problematika korozní odolnosti jednotlivých slitinových vrstev v modelových pórových roztocích, a to i v přítomnosti chloridů. Yeomans [7] ukazuje, že odolnost povlaku žárového zinku v prostředí modelového pórového roztoku je silně ovlivněna tloušťkou η-fáze čistého zinku. Na dvou povlacích žárového zinku s odlišnou tloušťkou fáze čistého zinku ukazuje, že nižších korozních rychlostí bylo naměřeno u povlaků s vyšší tloušťkou η-fáze. Autor tedy předpokládá, že vrstva čistého zinku se významně podílí na pasivaci povlaku žárového zinku. Tedy s rostoucí tloušťkou η-fáze roste tloušťka a kompaktnost pasivní vrstvy z dihydrátu tetrahydroxozinečnatanu vápenatého. Naopak při zkoušení povlaků žíhaných (povlaky bez přítomnosti fáze čistého zinku) v modelových pórových roztocích byly selektivně napadeny. Yeomans předpokládá, že korozní odolnost slitinových vrstev v alkalickém prostředí je velice nízká, a je tedy nezbytné pro případné užití žárově zinkované výztuže do prostředí betonu, aby byly vytvářeny povlaky s velkou tloušťkou η-fáze a naopak potlačovat tloušťku slitinových vrstev. Lískovec a spol. [31] detailně studují přechod povlaku žárového zinku do pasivního stavu po šestidenní expozici v modelovém pórovém roztoku metodou následné GDS analýzy exponovaného povrchu. Pro žárově zinkovanou ocel v exponovanou v prostředí o pH 13 autoři naopak prokazují, že vrstva čistého zinku byla nahrazena jeho korozními produkty, ale k přechodu do pasivního stavu došlo až po jejím odkorodování. Příčinou přechodu povlaku žárového zinku do pasivity při pH 13 tedy není tvorba souvislé vrstvy korozních produktů zinku a vápníku, ale zapasivování povlaku odhalením již prvotní slitinové fáze ζ s jistým podílem železa. Při pH 13,5 autoři výše zmiňovanou technikou dokazují, že k pasivaci nedochází ani při odhalení prvotní slitinové vrstvy a ačkoli převážná část slitinového Fe-Zn povlaku zůstává zachována, koroze probíhá i po šestidenní expozici v aktivním stavu. Významný jev přechodu povlaku do pasivního stavu při expozici v prostředí o pH 13 sledují autoři i u povlaku galvanicky vyloučeného zinku opět až po odkorodování fáze čistého zinku. Autoři tedy nedoporučují využívat nechráněnou žárově zinkovanou ocel v prostředí reálného betonu (pH 13,5) a na rozdíl od autorů Yeomanse [7] a Macias Andrade [35,36,37,38] předpokládají, že pro schopnost povlaku žárového zinku přejít do pasivity při pH do 13 je vhodné vytvořit povlak prostý η-fáze, protože k pasivaci dochází po odkorodování vrstvy čistého zinku. Nebo chránit povrch čistého zinku dalším povlakem. Wienerová [47] ve své práci prokazuje, že chování povlaku žárového zinku úzce závisí jak na pH, tak i na přítomnosti vápenatých kationů. Povlak žárového zinku pouze v alkalickém prostředí se pasivuje do pH 13. Nicméně v přítomnosti vápenatých kationů koroduje v aktivitě a autorka předpokládá, že k následné pasivaci musí nutně dojít na některé ze slitinových vrstev. Autorka tedy vyvrací možný pozitivní efekt vápenatých kationů při pH do 13,3 na pasivaci povlaku žárového zinku. Dále potvrzuje, že při pH 13,5 koroduje povlak žárového zinku trvale v aktivitě. Sergi a Short [48] poukazují na velice podobné chování vzorků žárově zinkované oceli s klasickým povlakem s η-fází a vzorků bez ní (s odhalenou ζ-fází). Bylo prokázáno, že schopnost přechodu obou fází do pasivního stavu se ztěžuje s pH větším než 13. Navíc elektrochemickými zkouškami ukazují, že ζ- fáze se pasivuje pomaleji. Proto autoři označují korozní chování této fáze za velice nevhodné do prostředí betonu a tedy odstraňování η-fáze před ukládáním do betonu považují za zbytečné.

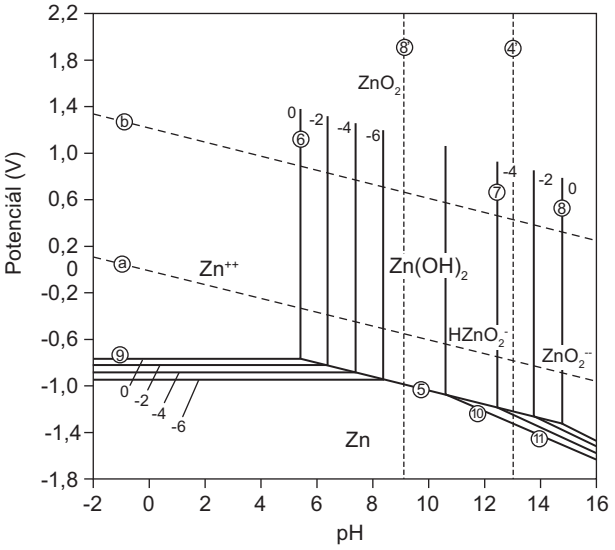
Ochrana zinkované oceli konverzním povlakem

Pro zvýšení korozní odolnosti povlaku žárového zinku v prostředí betonu je často jeho povrch chráněn právě konverzním povlakem, protože tento způsob ochrany je velice jednoduchý a ekonomický, tedy významně neprodražuje celkové náklady na výrobu zinkované výztuže. Nejčastěji bývá povrch zinku chráněn různými druhy chromátových povlaků. Kouřil a spol. dokazují [43], že ochranná účinnost chromátových

povlaků na bázi Cr^{III} a Cr^{VI} závisí na pH. Při pH 12,5 modelového pórového roztoku představují oba druhy chromátových povlaků zvýšení korozní odolnosti žárově zinkovaných vzorků. Avšak při pH 13,5 byly zjištěny vysoké korozní rychlosti u vzorků chráněných povlakem Cr^{III}, zatímco v případě chromátu na bázi Cr^{VI} je korozní rychlost v tomto prostředí bez chloridů řádově desetiny μm za rok, což, jak uvádějí autoři, je o řád méně, než u vzorků komerční žárově zinkované oceli bez povrchové úpravy [43]. Chromátování povlaky na bázi Cr^{VI} představuje v současnosti již dostatečně odůvodněnou ochranu zinkované výztuže v betonu, ovšem jejich využití k tomuto účelu není s ohledem na negativní působení Cr^{VI} na životní prostředí a lidské zdraví možné. Používání Cr^{VI} bylo v určitých druzích výrobků v roce 2005 v ČR na základě novely zákona o odpadech omezeno případně úplně zakázáno [49]. Z těchto důvodů jsou hledány alternativní konverzní povlaky dosahující korozní odolnosti povlaků na bázi Cr^{VI}. Z mnoha literární zdrojů vyplývá, že vhodnou alternativou nezatěžující životní prostředí mohou být konverzní povlaky na bázi ceru. Tyto povlaky dosahují tloušťky 0,8-5 μm a vytvářejí se v roztocích ceritých iontů spolupůsobením s anorganickými oxidačními látkami [50]. Povlak vyloučených hydratovaných oxidů/hydroxidů ceru (Ce^{III} a Ce^{IV}) a ZnO zvyšuje odolnost povlaku žárového zinku v alkalickém prostředí i za přítomnosti chloridů do 5 dnů po začátku expozice a značně omezuje vylučování vodíku. Povlak ze sloučenin ceru zůstává stabilní a neomezuje tvorbu již dříve předpokládaného $Ca[Zn(OH)_4]\cdot 2H_2O$ [51].



Obr. 6. Závislost korozní rychlosti čistého zinku na pH prostředí [7]
Fig. 6. Corrosion rate of Zn dependence on pH



Obr. 7. Diagram potenciál vs. pH pro čistý zinek [52]
Fig. 7. Pourbaix diagramm of Zn

Soudržnost žárově zinkované výztuže s betonem

V kapitole korozní chování žárově zinkované výztuže v betonu bylo ukázáno, že povlak koroduje v tomto prostředí v aktivním stavu za vývoje plynného vodíku, který je produktem redukce vody. Transport vodíku od výztuže je komplikován tuhnoucím cementovým tmelem. Bubliny vodíky jsou v něm zadržovány, což vede k nárůstu pórovitosti cementového tmelu na fázovém rozhraní výztuž/beton. Bylo prokázáno, že později dochází k přechodu zinku do pasivního stavu. Tato skutečnost již ale nemá na pórovitost ztuhlého cementového tmelu vliv [53]. Protože se předpokládá, že soudržnost obou materiálů je dána adhezními vlastnostmi cementového kamene, které jsou na bázi Van der Waalsových sil [1], lze očekávat, že zvýšení pórovitosti cementového kamene povede ke snížení styčné plochy mezi cementovým kamenem a výztuží. Existuje tedy obava, že snížení styčné plochy mezi oběma materiály povede ke ztrátě jejich soudržnosti. Přitom dobrá soudržnost oceli s betonem je nezbytnou podmínkou statické funkce železobetonu i betonu předpjatého [53]. Již v roce 1971 bylo na možnost ztráty soudržnosti mezi žárově zinkovanou výztuží a betonem upozorněno například v patentové literatuře [54]. Autor zde nedoporučuje využívat zinkovanou výztuž do betonu bez povrchové úpravy konvenčním chromátováním na bázi Cr^{VI}, případně povlakem asfaltu, nebo dokonce navrhuje přidávat dichromany alkalických kovů přímo do nezpracovaného betonu. Cílem je omezit vylučování plynného vodíku na fázovém rozhraní, a tedy zaručit dostatečnou soudržnost mezi oběma materiály po úplném ztvrdnutí betonu. V patentu z roku 2010 [55] je také připuštěno, že vylučovaný vodík může negativně ovlivnit soudržnost mezi zinkovanou výztuží a betonem, případně vstupem a rekombinací ve výztuži snížit její mechanické vlastnosti. Autoři doporučují

chránit zinkovanou výztuž předúpravou v roztoku benzimidazolu, případně tento inhibitor dávkovat v malých koncentracích do rozpracovávaného betonu.

Normované zkoušení soudržnosti betonářské oceli

Soudržnost oceli s betonem bývá stanovována vytahováním zabetonovaného ocelového prutu. Postup je předepsán normou ASTM C234 případně ČSN 73 1328 [56], přesným terminologickým názvem se jedná o zkoušku „Stanovení soudržnosti výztuže s betonem na hranolech“ (v textu bude tento typ zkoušky označován jako vytahovací). Druhým způsobem vyhodnocení soudržnosti je zkouška v ohybu respektive „zkouška soudržnosti výztuže s betonem na trámcích namáhaných ohybem„ [57] (v textu bude tento typ zkoušky označován jako zkouška ohybová). Vytahovací zkouška je založena na měření smykového napětí na obvodu zabetonovaného ocelového prutu o průměru 14 mm při jeho vytahování z přesně dimenzovaných kvádrových vzorků betonu. Za mez soudržnosti oceli s betonem se považuje ve smyslu citované normy soudržnost, při níž posun ocelového prutu činí 0,001 až 0,002 mm. Betonová tělesa zrají ve vlhké normou definované atmosféře po dobu 28 dnů. Uspořádání před vytahovací zkouškou je ukázáno na Obr. 8. Deformace betonu při vytahování žebříkové výztuže je ukázán na Obr. 9. Zkouška soudržnosti na trámcích namáhaných ohybem posuzuje míru soudržnosti oceli s betonem z odolnosti zabetonovaného ocelového prutu proti vytahování z koncových částí trámce namáhaných posouvající silou a ohybovým momentem. Opět se testují ocelové pruty o průměru 14 mm a kotevní délce definované na základě třídy použitého betonu. Zrání betonových vzorků normovaných rozměrů je stejné jako u vytahovací zkoušky. Uspořádání při zkoušce v ohybu je ukázáno na Obr. 10 [56]. Novější norma ČSN EN 10080 [57] povoluje zkoušení vlastností spojení v případě žebírkových tyčí, tyčí s vtisky a drátů používaných jako betonářskou ocel v betonových konstrukcích. Soudržnost deformovaných výztuží s betonem je zde nazvána Zkouška na vytažení výztuže z betonu. Podstata zkoušky je velice podobná vytahovací zkoušce z normy ČSN 73 1328 a spočívá v zatížení tyče nebo drátu spojeného s betonovou krychlí tahovou silou po vymezené délce. Vztah mezi tahovou silou a smykem se měří až do momentu selhání. Působící síla se zvyšuje, až k porušení spojení nebo do té doby, než dojde k lomu samotné výztuže. Systém nanášení sil musí zajistit, aby byly naneseny kolmo k čelu betonového povrchu. Vzorky betonu mají opět krychlový tvar, definovanou krychlovou pevnost a musí se vhodnou formou zajistit, aby při betonování byla výztuž uchycena ve vodorovné poloze v ose formy. Vzorek betonu je opatřen plastovou trubicí usnadňující držení výztuže v ose vzorku a vymezující přesně tzv. délku spojení (kotvící délku) s volným povrchem betonu nad touto trubicí. Účinná délka spojení tyče nebo drátu je definována na 5 d (d-průměr testované výztuže). Norma povoluje zkoušení deformovaných výztuží a drátů do průměru 32 mm. Norma ČSN EN 10080 [57] povoluje ekvivalentně zkoušení soudržnosti žebírkových tyčí, tyčí s vtisky a drátů používaných jako výztuže do betonu Zkouškou pevnosti v ohybu. Podstata zkoušení je opět v zatěžování zkušebního nosníku jednoduchým ohybem až do té doby, než dojde na jedné polovině nosníku k úplnému selhání spojení výztužné oceli, nebo než dojde k porušení samotné oceli. Během zatěžování se měří smyk na obou koncích betonářské oceli. Nosník používaný při zkouškách se sestává ze dvou hranolovitých výztužných betonových bloků spojených na jedné straně betonářskou ocelí, jejíchž spojení se má zkoušet, a na vrchní straně ocelovým závěsem. Norma definuje testované výztuže a krychlovou pevnost betonu stejně, jako u je tomu u zkoušky na vytažení výztuže z betonu.

Výsledky předešlých zkoušek soudržnosti zinkované výztuže s betonem

Oba zmiňované způsoby testování vedou k velice odlišným výsledkům. Neobjektivnost výsledků vytahovací zkoušky je způsobena především testováním žebírkové výztuže. Při vytahování tohoto typu výztuže dochází k destrukci betonu (Obr. 8), a tedy výsledky jsou nutně zkresleny pevností betonu v tlaku. Nerealisticky vysokých hodnost soudržnosti je dosahováno hlavně u vzorků zrajících delší časová období (v řádu měsíců), což je jasným obrazem zkreslení výsledků zkoušky soudržnosti mechanickými vlastnostmi betonu. Problémy s objektivností má tento typ zkoušky i při využití dokonale hladké výztuže. Muselo by být zajištěno, že v žádném styčném bodě nebude zkoušená ocel působit na beton tlakem. Pro relevantní posouzení soudržnosti je nutné zajistit uspořádání experimentu tak, aby se při vytahování výztuže s betonu uplatňoval pouze smykový mechanizmus namáhání. Rovněž při zkouškách v ohybu se do výsledků promítají mechanické vlastnosti betonu, protože na jedné straně oceli je beton prutem stlačován a na druhé straně tažen [53].

Z hlediska soudržnosti zinkované oceli s betonem je odborná veřejnost rozdělena na dva tábory. Obhájci dobré soudržnosti zinkované oceli s betonem deklarují, že mezi oběma materiály nedochází ke ztrátě soudržnosti. Autoři nevyvracejí negativní působení plynného vodíku na vývoj sekundární pórovitosti betonu, naopak přiznávají, že po prvních stádiích zrání betonu (6 případně 7 dnů) je soudržnost zinkované výztuže s betonem mírně snížena s ohledem na soudržnost nepovlakované oceli. Ovšem ukazují, že po 20 dnech zrání betonu již není mezi soudržností obou výztuží s betonem výraznějších

rozdílů a konečně po delších časových úsecích dosahuje soudržnost zinkované oceli výrazně vyšších hodnot, než je tomu u běžné betonářské oceli. Navýšení soudržnosti vysvětlují tvorbou vláknitých korozních produktů zinku (komplexních zinečnatanů vápníku). Tyto jehlicovité produkty zaplňují přirozené i druhotné póry (vytvořené působením vodíku) cementového tmelu na fázovém rozhraní a zvyšují styčnou plochu mezi oběma materiály [7,12,13,60]. Předpokládá se, že komplexní zinečnatany vytvářejí dobře přilnavý povlak, jak k zinkované oceli, tak k betonu a tím přispívají k nárůstu soudržnosti [26]. Tento názor je však velice diskutabilní, protože za předpokladu tvorby souvislého povlaku křehké fáze by byla soudržnost ovlivněna spíše negativně [61]. Jiní autoři dokonce tvrdí, že korozní produkty zinku jsou schopny difundovat od výztuže (až do vzdálenosti 1 mm) a vyplňovat přirozené póry cementového tmelu. Tím tedy zvyšovat kompaktnost betonu v blízkosti fázového rozhraní a nepřímo tedy pozitivně ovlivňovat soudržnost. Navíc chování korozních produktů zinku může mít za následek zhoršení propustnosti betonu pro korozní stimulanty [62,63]. Ovšem experimentem podložené důkazy o tomto chování nebyly nalezeny. Na druhé straně stojí odborníci, kteří na základě svých experimentálních zkušeností [22], případně zkušeností s přímým použitím žárově zinkovaných výztuží při výstavbě architektonických děl [23], jejich použití bez další ochrany nedoporučují. Domnívají se, že vylučovaný vodík, způsobuje výrazné navýšení pórovitosti cementového tmelu na fázovém rozhraní a fatální zhoršení soudržnosti [22]. Jiní odborníci spíše tvrdí, že za selhání soudržnosti mezi zinkovanou výztuží a betonem může prokázané negativní působení zinečnatanů na počátek tvrdnutí betonu. Bylo totiž spolehlivě prokázáno, že přídavkem zinečnatanů lze zpomalit tvrdnutí betonu a významně zhoršit jeho mechanické vlastnosti [64]. V Tab. 2 jsou uvedeny výsledky různých druhů měření soudržnosti žárově zinkovaných výztuží, z výsledků je patrné, že soudržnost nutně závisí na uspořádání experimentu.

Ačkoli bylo poukázáno, že ověřování soudržnosti s použitím žebírkované výztuže je zavádějící, lze v literatuře najít články, které porovnávají soudržnost obou druhů žebírkových výztuží s betonem. Cílem je ověřit, zda žárové zinkování významně snižuje soudržnost žebírkové výztuže s betonem. Často bývá rovněž diskutováno, zda zinkování může vyhlazovat povrch žebírkových výztuží, a tedy i tímto způsobem negativně ovlivňovat soudržnost. Autoři Kayali a Yeomans [65] ověřují, zda deformací (tj. žebírkováním) zinkované výztuže lze kompenzovat předpokládanou drobnou ztrátu její soudržnosti s betonem působením vodíku. Rovněž ověřit zda chromátování této výztuže je z těchto důvodů nezbytné. Autoři testují výztuž opatřenou i epoxidovým povlakem. Při testování využívají výztuží o dvou různých kotvících délkách (150 a 120 mm) a soudržnost ověřují vytahovací zkouškou. Z výsledků je zřejmé, že soudržnost mezi zinkovanou výztuží a betonem je srovnatelná se soudržností výztuže z uhlíkové oceli. Naopak je pozorováno snížení soudržnosti u výztuže s epoxidovým povlakem (redukce o 20 %), kde žebírkování výztuže nezaručuje dostatečně vylepšení soudržnosti s betonem. Naopak chromátování žebírkované zinkované výztuže z důvodu vylepšení soudržnosti s betonem je zde uvedeno jako bezpředmětné. Oba autoři docházejí ke stejným výsledkům při testování všech tří typů žebříkových výztuží také zkouškou v ohybu [66]. Rovněž tato zkouška nepotvrdila rozdíly mezi soudržností zinkované výztuže s betonem a výztuže bez povlaku. Ale potvrdila zhoršenou soudržnost výztuže opatřené epoxidovým povlakem (redukce o 15-20 %). Sistonen a Huovinen prokázali [67], že zinkováním žebříkové výztuže dochází k vyhlazení jejího povrchu, navíc tloušťka povlaku se podél výztuže mění (nejvyšší je mezi žebírky, nejnižší je na vrcholcích žebírek). Autoři vytahovací zkouškou prokazují mírné snížení soudržnosti mezi zinkovanou výztuží a betonem, které je podle nich dáno na jedné straně vyhlazením povrchu žebříkové výztuže zinkováním a na druhé straně nejednotnou tloušťkou zinkového povlaku podél výztuže. Jiní autoři neprokazují vytahovací zkouškou žádné snížení soudržnosti mezi žebírkovanou zinkovanou výztuží a betonem [68]. Naopak Gukild a Hofsøy [69] dokazují vytahovací zkouškou po 28 dnech zrání betonu výrazně sníženou soudržnost mezi žebírkovanou zinkovanou výztuží a betonem. Příčinou je podle autorů změna pórovitosti cementového tmelu na fázovém rozhraní obou materiálů způsobená vylučovaným vodíkem, jehož intenzita vylučování pozvolna klesá s časem expozice.

Hamad a Mike [70] posuzují soudržnost mezi zinkovanými výztužemi o různém průměru a betonem na základě zkoušky v ohybu po 28 dnech zrání betonu s krychlovou pevností v tlaku 28 MPa. Pro tento druh betonu bylo ověřeno, že ztráta soudržnosti v porovnání se soudržností nepovlakované oceli je v rozsahu 4-6 %. Stejným uspořádáním experimentu oba autoři ovšem poukazují na ztrátu soudržnosti zinkované výztuže v průměru o 20 % v případě použití betonu o krychlové pevnosti 60 MPa [71]. Srovnáním výsledků pro dvě pevnostní třídy betonu docházejí autoři k závěru, že soudržnost zinkované výztuže s betonem pozitivně ovlivňuje tvorba trihydroxozinečnatanu vápenatého a negativně vylučování vodíku měnící pórovitost na fázovém rozhraní. Zvýšená pórovitost vyvolaná vyšším vodním součinitelem u betonu s nižší krychlovou pevností podporuje pronikání vody (vlhká atmosféra) k zinkované výztuži, a tedy tvorbu trihydroxozinečnatanu. Tvorba tohoto často zmiňovaného korozního produktu zinku v betonu je podle autorů zodpovědná za navýšení soudržnosti. U betonu s nižší pórovitostí je zpřístupnění vody (vlhká atmosféra) k výztuži komplikováno a nevytvoří se dostatečné množství zmiňovaného vláknitého

korozního produktu, který je schopen kompenzovat negativní vliv vodíku na pórovitost cementového tmelu na fázovém rozhraní. V následných pracích Hamada [72,73] jsou zkoušeny obě pevnostní třídy betonu vyztužené zinkovanou a nepovlakovanou výztuží prostřednictvím modifikované zkoušky v ohybu. Je voleno uspořádání, kdy je působeno silou na protistojné výztužné nosníky, spojené vyztuženým trámem. Hodnotí se výchylka vertikálních nosníků od svislé polohy s ohledem na působící tahovou sílu a zároveň vizualizace prasklin betonu u pat nosníků a na trámci mezi nimi. U betonu s nízkou krychlovou pevností (25 MPa) sledují autoři pouze nevýznamné snížení soudržnosti zinkované výztuže s betonem (v průměru o 4 %), ale u betonu o vysoké krychlové pevnosti (60 MPa) snížení soudržnosti zinkované výztuže o 13 %. Autoři tuto skutečnost potvrzují výsledky získané v pracích [70,71].

Jiní autoři [74] se také zaměřili na vliv vodního součinitele betonu s přídavku uhličitanu vápenatého na soudržnost žebírkované zinkované výztuže po 28 dnech zrání betonu. Soudržnost ověřovali vytahovací zkouškou. Pro beton s vodním součinitelem 0,5 vychází soudržnost zinkované výztuže o 12-20 % větší ve srovnání s běžnou nelegovanou ocelí, ale pro beton nižší přirozené pórovitosti s vodním součinitelem 0,4 je naopak soudržnost zinkované výztuže zhoršená o 5-10 %. Autoři vysvětlují odlišné chování zinkované výztuže v obou druzích betonu opět odlišnou pórovitostí obou vzorků betonu a předpokládají, že přídavkem vápníku do cementu, lze podpořit tvorbu trihydroxozinečnatanu vápenatého na povrchu korodujícího povlaku a vylepšit tak soudržnost zinkované oceli s betonem. V pracích [75,76] je ověřována soudržnost hladkých drátů z mědi, žárově zinkované oceli a běžné nelegované oceli. Autoři zkoušejí soudržnost vytahovací zkouškou po 3, 7 a 28 dnech zrání betonu ve vlhké atmosféře. V práci [75] ověřují soudržnost ve „stavebním pojivu“ simulující trikalcium aluminát (tedy jednu ze dvou hlavních složek slínkového minerálu), směs připravují kalcinací $CaCO_3$ a Al_2O_3. Vytahovací zkouškou soudržnosti je ukázáno, že nejlépe s touto směsí soudrží zinkovaná ocel, zlepšená soudržnost oproti uhlíkové oceli je o přibližně 60 %. Autoři zlepšenou soudržnost připisují velkému množství přilnavých hexagonálních hydrátů (C_4AH_{13}, C_2AH_8) a samotného hydratovaného trikalcium aluminohydrátu C_3AH_6. (Při hydrataci cementu v betonu dochází ke komplikovaným reakcím anorganických látek a i výsledné produkty těchto reakcí jsou velice složité. Pro zjednodušení názvosloví a usnadnění zápisu chemických reakcí probíhajících při hydrataci, bylo zavedeno ve stavební chemii zjednodušené názvosloví takto: písmeno C označuje CaO, A - Al_2O_3, S - SiO_2, F - Fe_2O_3, H - H_2O. Mezi nejdůležitější slínkové minerály (reaktanty v hydratačních reakcích portlandského cementu) patří C_3S – trikalcium silikát (tzv. alit), C_3A – trikalcium aluminát (celit), C_2S – dikalcium silikát (belit), tetrakalcium aluminát ferit C_4AF. Při hydrataci C_3S a C_2S vznikají tzv. C–S–H gely respektive hydrosilikáty složitých strukturních vzorců. Při hydrataci C_3A vznikají hexagonální kalcium aluminát hydráty, zjednodušeně zapsané C_4AH_{13}, C_3AH_6, C_2AH_8 [1,2]). V práci [76] ověřují soudržnost stejně definovaných drátů opět vytahovací zkouškou, ovšem již s běžným betonem připraveným z portlandského cementu s hlavním podílem křemičitanů, tedy trikalcium silikátu (jedna z hlavních složek slínkového minerálu, podíl složky C_3A je minimální). Za těchto podmínek zkouškou ověřují naopak sníženou soudržnost zinkového drátu s betonem po 28 dnech zrání betonu o přibližně 30 %. Významně nízkou soudržnost mezi zinkovanou ocelí a betonem je sledováno po 3 dnech zrání betonu. Snížená soudržnost je připisována právě tvorbě křehké fáze $Ca[Zn(OH)_3]_2 \cdot 2H_2O$ (byl na výztuži a v betonu z fázového rozhraní prokázán XRD analýzou), která navíc způsobuje zpomalení tuhnutí betonu. Rovněž v práci [77] posuzuje autor vliv složení betonu na soudržnost žebírkované i hladké zinkované výztuže po 28 dnech zrání betonu, 4 měsících a jednom roce. Autor posuzuje soudržnost vytahovací zkouškou a dochází k závěru, že soudržnost zinkované výztuže je velice podobná soudržnosti běžné výztužné oceli. S větším vodním

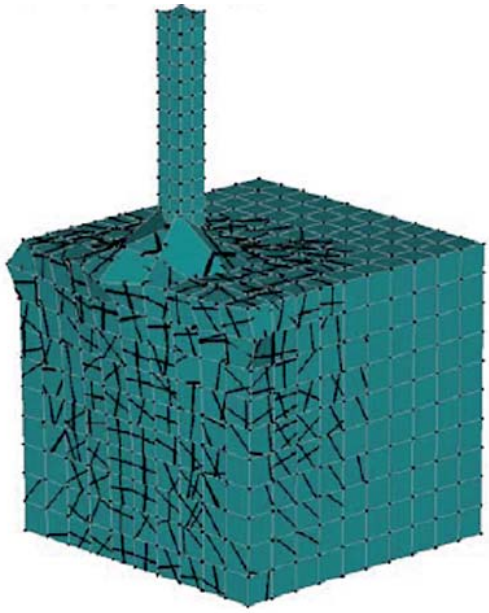
Tab. 2. Souhrnné porovnání soudržnosti žárově zinkované oceli s betonem se soudržností běžné uhlíkové oceli [70] / *Summary of bond strength of concrete and galvanized/carbon steel rebars*

Autoři	rok publikace	typ výztuže	testovací metoda	počet vzorků	doba testování	srovnání soudržnosti s běžnou uhlíkovou ocelí
Slater	1920	hladká a žebírkovaná	vytahovací	28	28 dní, 6 měsíců	snížená
Schmeer	1920	hladká	vytahovací	50	28 dní, 3 a 12 měsíců	zvýšená
Brodbeck	1954	hladká a žebírkovaná	vytahovací	24	1, 3 a 12 měsíců	zvýšená
Bird	1962	vysokotažný drát	ohybová	–	–	snížená
Bresler	1962	vysokotažný drát	ohybová	40	20 nebo 28 dní	srovnatelná nebo zvýšená
Hofsoy	1965	žebírkovaná	vytahovací	60	28 dní	snížená
Yeomans	1994	hladká a žebírkovaná	ohybová	12	35 dní	mírně snížená

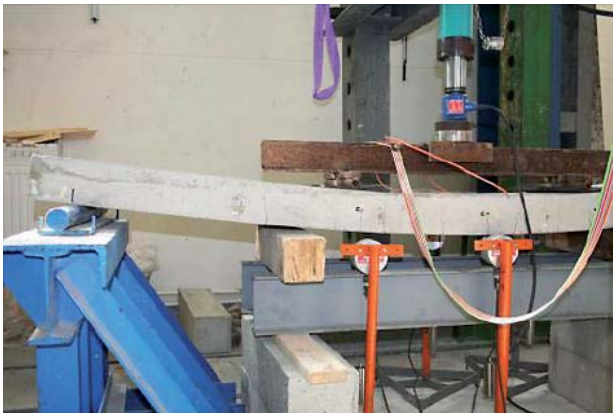
součinitelem a větším podílem C_3A/C_3S roste soudržnost zinkované výztuže s časem strměji. Tyto výsledky jsou v dobrém souladu s výsledky z prací [75,76].

Pro objektivní posouzení soudržnosti zinkované oceli s betonem, jak již bylo uvedeno výše, je důležité při experimentech používat hladkou výztuž. V práci [78] bylo ověřeno vytahovací zkouškou, že soudržnost hladké zinkované výztuže oproti hladké nepovlakované výztuži je jen nevýznamně snížena. V práci však není uspořádání zkoušky detailně rozepsáno a nedozvídáme se také nic o relativní drsnosti povrchů obou výztuží, složení použitého cementu a kameniva, rovněž není specifikována doba zrání betonu. Z hlediska objektivního posouzení soudržnosti hladkých zinkovaných výztuží s betonem je důležité zmínit především práce [79,80]. V práci [79] bylo provedeno ověřování soudržnosti žárově zinkované drátu s betonem vytahovací zkouškou po 28 dnech zrání betonu. Byly testovány tři různé kotvící délky 50 mm, 100 mm a 150 mm zinkovaných drátů. Kotvení povlakovaných a nepovlakovaných drátů do osy krychlových vzorků betonu bylo zajištěno víčky forem pro jeho přípravu a zhutnění. Výsledky jednoznačně mluví v neprospěch zinkovaných vzorků. Soudržnost modelů zinkované výztuže je snížena až o 30 %, navíc průběh tahové zatěžovací křivky vyjadřující závislost tahového zatížení na jeho prodloužení v případě modelů zinkované výztuže je fluktuační s prudkými poklesy v zatěžovací síle. Tyto výsledky jednoznačně ukazují na zhoršenou soudržnost povlakované výztuže s betonem oproti hladkému průběhu křivky pro běžnou ocel s vysokými maximy soudržnosti. Autoři nedoporučují používat zinkovanou výztuž do betonu a snížení soudržnosti objasňují změnou pórovitosti na fázovém rozhraní výztuž/beton způsobenou vodíkem. V práci [80] byla navíc ověřována soudržnost hladkého zinkovaného prutu s betonem vytahovací zkouškou dle normy ČSN 73 1333 – zkoušení soudržnosti předpínací výztuže s betonem po 28 dnech zrání betonu. Byly srovnávány vždy 3 paralelní vzorky povlakované a nepovlakované výztuže pro jednu záměs. Byly zkoušeny celkem 2 záměsy. Zhoršení soudržnosti zinkované výztuže s betonem bylo vyčísleno přibližně na 20 %.

Obr. 8. Vytahovací zkouška [58]
Fig. 8. Pull-out test



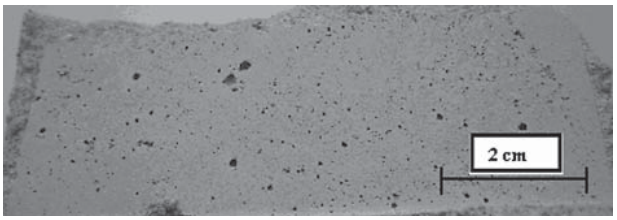
Obr. 9. Model průběhu vytahovací zkoušky [59]
Fig. 9. Model of stress during pull-out test



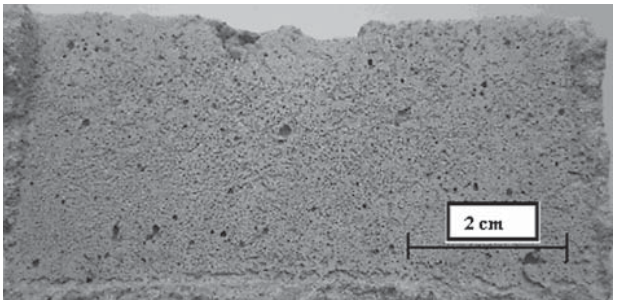
Obr. 10. Trámcová zkouška [59]
Fig. 10. Girder load test

Bohužel ani u jedné z prací [79,80] nelze spolehlivě tvrdit, že se podařilo ukotvit vzorky drátů do osy krychlí betonu. Rovněž Bird [81] prokazuje zkouškou v ohybu u hladkých pozinkovaných i běžných drátů sníženou soudržnost těch pozinkovaných s betonem. Popisuje také výraznou pórovou mikrostrukturu cementového tmelu na fázovém rozhraní zinkovaná výztuž beton.

V některých literárních zdrojích lze najít testování a srovnávání soudržnosti zinkované výztuže s betonem oproti běžné výztužné oceli v prostředích obsahujícím chloridy. V práci [82] kolektiv autorů provedl zkoušení žebírkované výztuže s betonem obsahujícím 3 hm. % NaCl, při testování využili vytahovací zkoušku a vzorky betonů zrály 25 a 100 dní a vodní součinitel betonu byl 0,4. Výsledky zkoušky potvrdily, že snížení soudržnosti mezi výztužemi a betonem je o 1,5 % menší v případě zinkované výztuže po 25 dnech zrání betonu a o přibližně 3 % po 100 dnech zrání betonu. Ovšem naopak srovnávací zkoušky soudržnosti po 28 dnech zrání betonu bez přítomnosti chloridů ukazují redukci soudržnosti v případě nepovlakované výztuže, což je v rozporu s výsledky autorů uvedených výše. Při expozici vzorků s žebírkovanými výztužemi v prostředí betonu tvrdnoucího v roztoku s 3,5 hm. % chloridů, sledují autoři práce [83] snížení soudržnosti na straně nepovlakované oceli přibližně o 10 % v porovnání se soudržností zinkované oceli. Autoři deklarují, že soudržnost zinkované výztuže s betonem nezávisí na tloušťce vyloučeného povlaku žárového zinku. V práci [84] je posuzována soudržnost zinkované žebírkové výztuže s přídavkem $CaCl_2$ i bez chloridů. Byla provedena i expozice v mořské vodě. Sledován je i vliv přídavku CrO_3. Zkoušení bylo provedeno jak vytahovací zkouškou, tak zkouškou v ohybu, doba zrání betonu byla měsíc, rok, 2 roky, 2,5 roku, 5 let a dokonce 10 let. Autoři poukazují, že soudržnost zinkované výztuže je i po 10 letech zrání betonu zaručena nad rámec požadovaných norem, významný vliv oxidu chromového na zlepšení soudržnosti zinkované výztuže s betonem je nevýznamný. Naopak v práci [85] je doporučováno přidávat oxid chromový, případně chromany do betonu, aby byla zajištěna dobrá soudržnost zinkované výztuže s betonem především v prvních stádiích zrání betonu (do 20. dne, potom se uplatňuje podle autorů pozitivní vliv korozních produktů zinku na zaplňování pórů), neboť byla detekována vytlačovací zkouškou žebírkové výztuže snížená soudržnost způsobená vylučováním vodíku a tedy změnou mikrostruktury betonu z fázového rozhraní výztuž/beton.



Obr. 11. Makroskopický snímek cementového tmelu z fázového rozhraní nelegovaná ocel/beton [90]
Fig. 11. Image of concrete/carbon steel interface

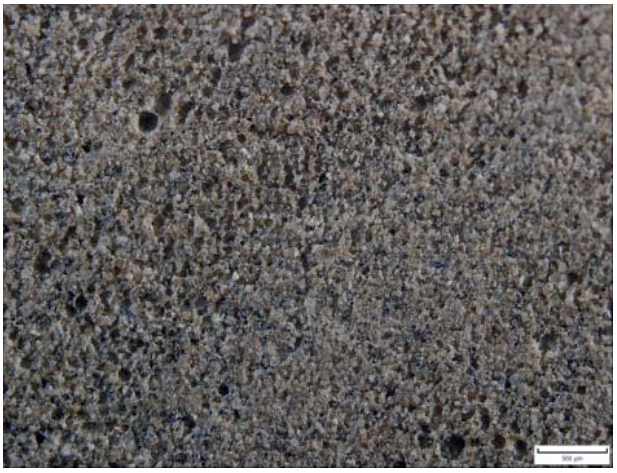


Obr. 12. Makroskopický snímek cementového tmelu z fázového rozhraní zinkovaná ocel/beton [90]
Fig. 12. Image of concrete/galvanized rebar interface

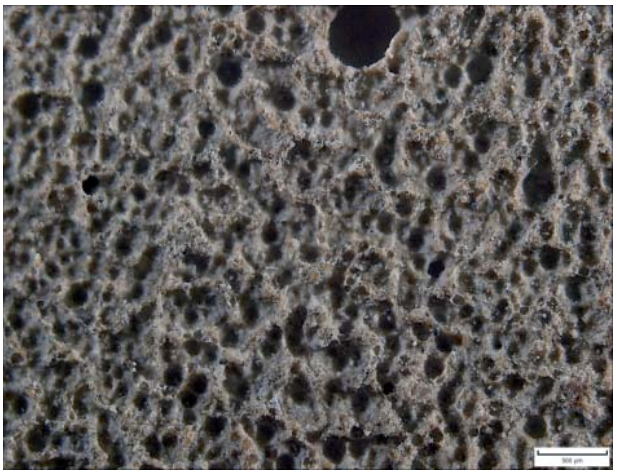
Vliv uvolněného vodíku na pórovitost cementového tmelu z fázového rozhraní zinkovaná výztuž/beton

Pro posouzení soudržnosti zinkované výztuže s betonem bude mít významnou úlohu kvantifikovat změnu pórovitosti cementového tmelu z fázového rozhraní zinkovaná výztuž/beton způsobený vylučovaným vodíkem v prvních stádiích tuhnutí betonu. O první kvantifikaci se pokusil Belaïd a spol. [86], který separoval vzorky betonového kamene z fázových rozhraní zinkované výztuže i výztuže bez povlaku po 19 hodinách a 28 dnech tvrdnutí betonu metodou rtuťové porozimetrie. Podle výsledků vylučovaný vodík nepříznivě ovlivňuje pórovitost cementového tmelu po 19 hodinách, ale po 28 dnech zrání betonu už není žádný rozdíl v distribuci pórů z fázového rozhraní zinkovaná výztuž/beton a nelegovaná ocel/beton. Autoři vysvětlují zaplnění sekundárně vzniklých kapilárních pórů případně pórů vzniklých vodíkem tvorbou korozních produktů zinku. Autor ovšem vytváří tyto závěry při zkoušení statisticky nevýznamného množství vzorků. Opačných výsledků je dosaženo v pracích [87-90]. V práci [87,88] autorka rtuťovou porozimetrií dokazuje nárůst objemu pórů cementového tmelu v oblasti 10 μm jejich průměru na fázovém rozhraní zinkovaná výztuž/beton po 180 dnech zrání betonu, než je tomu u cementového tmelu z neovlivněné zóny. Rovněž autoři prací [89,90] dokazují také rtuťovou porozimetrií nárůst objemu pórů na fázovém rozhraní zinkovaná výztuž beton po 4 měsících zrání betonu a vyvracejí schopnost korozních produktů zinku sekundární póry vyplňovat. Navrhují ovšem pro ověření celkového snížení styčné plochy fázového rozhraní výztuž/beton provést obrazovou analýzu, neboť některé póry jsou příliš mělké na zachycení rtuťovou porozimetrií. Analýzou obrazu

vzorků cementového tmelu po 4 měsících zrání betonu docházejí k závěru, že celková plocha pórů na fázovém rozhraní zinkovaná výztuž/beton je 48 %, kdežto na fázovém rozhraní uhlíková ocel/beton pouze 3 %. Snímky cementových tmelů po 4 měsících zrání betonu z obou fázových rozhraní jsou na Obr. 11-14.



Obr. 13. Mikroskopický snímek cementového tmelu z fázového rozhraní nelegovaná ocel/beton [90]
Fig. 13. Microscopic image of concrete/carbon steel interface



Obr. 14. Mikroskopický snímek cementového tmelu z fázového rozhraní zinkovaná ocel/beton [90]
Fig. 14. Microscopic image of concrete/galvanized rebar interface

Vliv zinečnatanů na oddálení počátku tuhnutí cementového tmelu a na snížení jeho mechanické pevnosti

Již dříve bylo mimo souvislost s pozinkovanou výztuží prokázáno, že příměsi zinku a oxidu zinečnatého v portlandském cementu významně prodlužují dobu jeho tuhnutí. I v tomto případě existuje obava, že negativní působení oxidačních produktů zinku, především pak $[Zn(OH)_4]^{2-}$ (vznikají při reakci zinku se silně alkalickými hydroxidy) může ovlivnit soudržnost zinkované oceli s betonem. V pracích [91,92] je prokázáno, že přítomnost ZnO v cementové pastě prodlužuje ve srovnání s referenčním vzorkem bez ZnO počátek doby tuhnutí portlandského cementu z 3 h na 94 h a konec doby tuhnutí z 8 h na 133 hodin. V práci [90] autoři sledovali vývoj hydratačního tepla a pevnosti v tlaku vzorků cementu s přídavky čistého zinku a oxidu zinečnatého. Již přídavkem 0,1 hm. % ZnO dochází k silnému snížení vývoje hydratačního tepla, což indikuje zpomalení tuhnutí cementové pasty. Rovněž přídavek zinku snižuje v konečné fázi vývin hydratačního tepla. Zpomalení hydratačních reakcí se projevuje na pevnosti v tlaku kontaminovaných vzorků. U vzorků kontaminovaných 5 hm. % čistého zinku je pevnost v tlaku po 28 dnech zrání betonu pouze 1,5 MPa, u nekontaminovaného referenčního vzorku dosahuje pevnost 27,6 MPa. Výrazné negativní účinky přídavku 5 hm. % Zn na zpomalení tuhnutí betonu byly jednoznačně prokázány i v práci [93]. V pracích [94,95] bylo zjištěno, že korozí zinku v prostředí portlandského cementu vzniká nerozpustný $CaZn_2(OH)_6.H_2O$, který pokrývá zrna cementu a brání tak dlouhodobě hydratační reakci a rovněž zamezuje rozpouštění sádrovce, který je rovněž přítomen v cementu a účastní se hydratačních reakcí v průběhu tvrdnutí betonu. Arliguie [95] ověřuje retardační účinky zinku analýzou vzniklého portlanditu (krystalický $Ca(OH)_2$) a dochází k závěru, že zinek zpomaluje hydratace především trikalciumsilikátu (C_3S), vliv zinku na hydrataci trikalcium aluminátu je minimální. Autoři deklarují, že nositelem negativních vlastností na hydrataci C_3S je spíše vznikající $Zn(OH)_2$, který vytvoří homogenní málo reaktivní obal kolem jeho zrn.

Současný názor na využití žárově zinkované výztuže do betonu

Do roku 2004 platila česká norma ČSN 73 1214, která doporučovala ochranu výztuže do betonu zinkovým povlakem tloušťky 0,05 až 0,2 mm, později byla norma [96] doplněna větou: „Použití kovových povlaků ve styku s betonem nesmí snížit spolehlivost konstrukce.“ Tato norma byla nahrazena souhrnnou normou ČSN EN 206-1 (73 2403) z roku 2008, která ovšem o způsobech ochrany výztuží proti korozi povlaky nemluví. V normě jsou úzce specifikovány mechanické vlastnosti betonu, jeho složení a vliv prostředí na jeho korozní odolnost, případně na korozní odolnost zabudovaných kovových prvků (bez bližší specifikace) [97]. Bližší doporučení využití žárově zinkované výztuže nabízí norma ASTM A767/A767M-09 [98]. Norma specifikuje vylučování a

jakost povlaků žárového zinku, manipulaci a skladování povlakovaných výztuží, jejich opravování a kontrolu. Je důležité, že norma povoluje použít zinkovanou výztuž do betonu pouze s ochranným chromátovým povlakem získaným z lázně o minimálním obsahu 0,2 hm. % dichromanu sodného případně z lázně s obsahem kyseliny chromové. Dle normy je cílem povlakování doslova „omezit reaktivnost zinku s čerstvou cementovou pastou". Norma dále varuje před kombinací povlakované výztuže s běžnou nelegovanou ocelí, protože v případě spojení dochází k urychlení koroze.

Ačkoli normativy není kvůli nejasným výsledkům efektivnosti této alternativy použití zinkované zakázáno, podle odborné literatury je její užití značně omezené [99]. Za omezením se skrývá stále jednoznačná nedůvěra investorů, vyplývající z nejasných výsledků vývoje soudržnosti mezi povlakovanou výztuží a betonem. Tuto nejistotu nelze kompenzovat prokázanou schopností zinkového povlaku oddálit aktivaci podkladové oceli a prodloužení životnost stavby o přibližně 5 let bez nutnosti nezbytné sanace. Například v technickém předpise [100] je doslova napsáno, že pozinkovaná výztuž smí být použita pouze s cementem, u kterého bylo jednoznačně prokázáno, že nemá nepříznivý účinek na soudržnost s touto výztuží. Tento jednoznačný závěr je formulován i v publikaci [101]. V práci [102] autoři uvádějí, že při návrhu konstrukcí z korozivzdorných či žárově zinkovaných výztuží musí být vydána zvláštní doporučení včetně sledovaných charakteristických vlastností a způsobů jejich ověření.

Poděkování

Tato práce byla financována z účelové podpory na specifický vysokoškolský výzkum MŠMT (Rozhodnutí č. 21/ 2011).

LITERATURA

1. Pytlík, P. *Technologie betonu*, 1st ed.; Vysoké učení technické v Brně: Brno, 2000.
2. Collepardi, M. *Moderní beton*, 1st ed.; ČKAIT v edici betonové stavitelství: Pelhřimov, 2009.
3. Aitcin, P. *Vysokohodnotný beton*, 2st ed.; ČKAIT v edici betonové stavitelství: Pelhřimov, 2005.
4. Škvára, F. *Technologie anorganických pojiv II*, 1st ed.; VŠCHT Praha: Praha, 1995.
5. Bertolini, L.; et al. *Corrosion of Steel in Concrete (Prevention, Diagnosis, Repair)*, WILEY-VCH Verlag GmBH and Co. KGaA: Weinheim, 2004.
6. Böhni, H.; et al. *Corrosion in reinforced concrete structures*, 1st ed.; Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC: Woodhead Publishing Ltd, 2005.
7. Yeomans, S. R. *Galvanized steel reinforcement in concrete*, 2nd ed.; Elsevier: Canberra, 2004.
8. Novák, P.; et al. Koroze ocelové výztuže v betonu, *Koroze a ochrana materiálu*, **1996**, *40* (1), 2–7.
9. Kouřil, M.; et al. Korozivzdorné oceli pro výztuže betonu, *Koroze a ochrana materiálu* **2002**, *46* (3), 62–67.
10. Leonard, H. Kovy verze 06b (pro 1. ročník). Prezentace Kovy, http://147.229.27.214/vyuka/BI01/KOVY-06b.pdf (accessed Oct 05, 2012).
11. Bojko, M. Alternativní kovové materiály pro výztuže do betonu. Disertační práce, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2007.
12. American Galvanizers Association. Hot-Dip Galvanized Rebar vs Epoxy-Coated Rebar. /uploads/publicationPDFs/Galvanized_Rebar_vs_Epoxy_Rebar (accessed Oct 05, 2012).
13. Hot Dip Galvanized Reinforcing Steel A Concrete Investment. http://www.scribd.com/doc/49339066/Hot-Dip-Galvanized-Reinforcing-Steel-A-Concrete-Investment-2006 (accessed Oct 06, 2012).
14. Gustafson, D. P. Epoxy-Coated Reinforcing bars-an effective corrosion -protection system for reinforced concrete structures, http://www.arema.org/files/library/1999_Conference_Proceedings/00021.pdf (accessed Oct 06, 2012).
15. 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.
16. 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.
17. Assaad, J. J.; et al. Bond stregth of epoxy-coated bars in underwater concrete, *Construction and Building Materials* **2011**, *30*, 667–674.
18. Cusens, A.; et al. Pullout Tests of Epoxy-Coated Reinforcement in Concrete, *Cement & Concrete Composites,* **1992**, *14*, 269–276.
19. De Anda, L. Bond strength of prefabricated epoxy-coated reinforcement, 2004. http://www.caltrans.ca.gov/hq/research/researchreports/reports/2004/bond_strength_prefaricated_epoxycoated_reinforcement.pdf (accessed Oct 07, 2012).
20. Swamy, R. Epoxy coated rebars-The panacea for steel corrosion in concrete. *Construction & Building Materials* **1989**, *3* (2), 86–91.
21. H. Hanzlová, osobní sdělení.
22. J. Vorel, osobní sdělení.
23. J. Vanbrabant, osobní sdělení.
24. Eriksson, H., Hirnová A. *Příručka žárového zinkování*, 3rd ed.; AČSZ: Ostrava, 2009.
25. Ainsley, M. Hot-dip galvanized reinforcing steel for concrete structures. Asia Pacific Edition - Hot dip galvanized steel. http://www.gaa.com.au/uploads/galvanize70.pdf (accessed Oct 14, 2012).
26. Hot dip galvanized steel reinforcement in concrete. Hot dip galvanizers association Southern Africa (case history). http://www.hdgasa.org.za/Journals/indSearchs/R/Reinforcement1.pdf (accessed Oct 14, 2012).
27. Krejčík, V. *Povrchová úprava kovů I.*; SNTL: Praha, 1987.
28. Marder, A. The metallurgy of zinc-coated steel. *Progress in Materials Science* **2000**, *45*, 191–271.

29. Černý, L. Strzyž, P. Mikoláš J. Vliv chemického složení oceli na vlastnosti žárově zinkovaného povlaku (Prezentace Asociace českých a slovenských zinkoven na konferenci AKI 2012).
30. Kubiš, A. Využití žárového zinkování proti atmosferické korozi. Bakalářská práce, VUT v Brně, 2006.
31. Lískovec, T. Koroze zinkované oceli v prostředí betonu. Bakalářská práce, VŠCHT-Praha, 2011.
32. Greenwood, N. *Chemie prvků I*; Informatorium: Praha, 1993.
33. Černý, M.; et al. *Korozní vlastnosti kovových konstrukčních materiálů*; SNTL: Praha, 1984.
34. Macías, A.; Andrade, C. Corrosion of galvanized steel in dilute $Ca(OH)_2$ solutions (pH 11,1 - 12,6). *Br. Corros. J.* **1987**, *22* (3), 162–171.
35. Macias, A., Andrade C. Corrosion of galvanized steel reinforcements in alkaline solutions. (Part 1: Electrochemical results) *Corrosion Journal* **1987**, *22* (2).
36. Macias, A., Andrade C. Corrosion of galvanized steel reinforcements in alkaline solutions.(Part 2: SEM study and identification of corrosion products) *Corrosion Journal* **1987**, *22* (2).
37. 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 *Corrosion Journal* **1984**, *19* (1).
38. Macias, A. Andrade C. Galvanized steel behaviour in $Ca(OH)_2$ saturated solution containing SO_4 ions. *Cement and Concrete Reaserch* **1987**, *17*, 307–316.
39. 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.
40. Macias, A. Andrade C. Stability of the calcium hydroxyzincate protective layer developed on galvanized reinforcements after a further increase of the pH value. **1986**, *36* (204), 19–28.
41. Ghost, R. Sing D.D.N. Kinetics, mechanism and characterisation of passive film formed on hot dip galvanized coating exposed in simulated concrete pore solution. **2007**, *201*, 7346–7359.
42. Zhang, X. *Corrosion and electrochemistry of zinc*; Plenum Press: New York, 1996.
43. Kouřil, M. Konference žárového zinkování. In *Koroze pozinkované oceli v modelovém prostředí betonu*, 9. Konference žárového zinkování; Ed.; 2003; pp 23–30.
44. Bautista, A., Gonzales, J.A. Analysis of the protective efficiency of galvanizing agains corrosion of reinforcements embedded in chloride contaminated concrete. *Cement and Concrete Reaserch* **1996**, *26* (2), 215–223.
45. Macias, A. The behaviour of galvanized steel in chloride-containing alkaline solutions-I. The influence of the cation. **1990**, *30* (4/5), 393–407.
46. Rostam, S. Trvanlivost a provozní životnost betonových mostů-inteligentní návrh, reálná výstavba a předpokládáná údržba. Beton-Technologie, Konstrukce, Sanace **2004**, *5*, 28–34.
47. Wienerová, K. Nové způsoby ochrany zinkované oceli v prostředí čerstvého betonu. Bakalářská práce, VŠCHT-Praha, 2010.
48. Sergi, G.; et al. Corrosion of galvanized and galvannealed steel in solutions of pH 9,0-14,0. National Association of Corrosion Engineers (Presented during Corrosion/85) **1985**, 618–624.
49. Problematika šestimocného chromu. MŠMT-Investice do rozvoje vzdělávání. http://www.ucitsnadno.cz/index.php?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=161&category_id=15&option=com_virtuemart&Itemid=67 (accessed Oct 25, 2012).
50. Ostrá, V. *Žárově zinkovaná výztuž do betonu*, 15th Hot Dip Galvanizing Conference; Ed.; 2009; pp 173–179.
51. Arenas, M., Cascado C. Influence of the conversion coating on the corrosion of galvanized reinforcing steel. Cement & Concrete Composites. **2006**, *28*, 267–275.
52. Pourbaix, M. *Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions*, 2.nd ed.; National Association of Corrosion Engineers-Cebelcor: Houston, Texas, 1974.
53. Kouřil, M. Soudržnost zinkované oceli s betonem. *Koroze a ochrana materiálu* **2007**, *51* (4), 80–83.
54. Burchett, K. United States Patent 3619441, Nov 09, 1971.
55. Lambrechts, A. United States Patent US 2010/0021759 A1, Jan 28, 2010.
56. ČSN 73 1328. *Stanovení soudržnosti oceli s betonem*. Praha: Český normalizační institut, 1971. 11 p.
57. ČSN EN 10080. *Ocel pro výztuž do betonu- Svařitelná betonářská ocel- Všeobecně*. Praha: Český normalizační institut, 2005. 63 p. (příloha C, D)
58. Pokorný P. et al. Zkoušení soudržnosti žárově zinkované výztuže s betonem (Prezentace Ústavu kovových materiálů a korozního inženýrství VŠCHT Praha na konferenci AKI 2011).
59. Peslar, P. Matematické modelování betonových konstrukcí vyztužených FRP výztuží, 2008. http://www.fce.vutbr.cz/veda/juniorstav2008_sekce/pdf/2_1/Peslar_Pavel_CL.pdf (accessed Nov 05, 2012).
60. P. Strzyž, osobní sdělení.
61. J. Tydlitát, osobní sdělení.
62. Concrete Corossion. American galvanizers associacion. http://www.galvanizeit.org/about-hot-dip-galvanizing/how-long-does-hdg-last/in-concrete (accessed Nov 23, 2012).
63. Hot Dip Galvanizing data Sheet. Zinkpower Kopf Gruppe. http://www.zinkpower.com/media/files/arbeitsblaetter_englisch/5_1.pdf (accessed Nov 23, 2012).
64. F. Škvára, osobní sdělení.
65. Kayali, O., Yeomans S.R. Bond of ribbed galvanized reinforcing steel in concrete. *Cement & Concrete Composites* **2000**, *22*, 459–467.
66. Kayali, O., Yeomans S.R. Bond and slip of coated reinforcement in concrete. *Construction and Building Materials* **1995**, *9* (4), 219–226.
67. Sistonen, E.; et al. Bonding of hot dip galvanized reinforcement in concrete. 2005, http://www.betong.net/ikbViewer/Content/225411/F40%20-%20Sistonen%20-%202005-09-02%20FINAL.pdf (accessed Nov 19, 2012).
68. Abdulkareem Mohammad, A.; et al. The effect of Zinc, Tin, and Lead coating on corrosion protective effectivness of steel reinforcement in concrete. American Journal of Science and Industrial Reaserch, **2011**, *2* (1), 89–98.
69. Gukild I., Hofsøy A.: Hot-dip galvanized steel reinforcement (Varmforsinket armeringsstål) Teknisk ukeblad, Oslo 1965, p. 37-43.

70. Hamad, B.; et al. Bond strength of hot dip galvanized reinforcement in normal strength concrete structures. *Construction and Building Materials*, **2005**, *19*, 275–283.
71. Mike, J. Bond of hot dip galvanized reinforcement in concrete. Master of engineering thesis, The American university of Beirut-Department of civil and environmental engineering of the faculty of engineering and architecture, 2001.
72. Hamad, B.; et al. Bond strength of hot dip galvanized hooked bars in normal strength concrete structures. *Construction and Building Materials*, **2008**, *22*, 1166–1177.
73. Hamad, B. Bond strength of hot dip galvanized hooked bars in high strength concrete structures. *Construction and Building Materials,* **2008**, *22*, 2042–2052.
74. Maldonado, A.; et al. Bond between galvanized steel and concrete prepared with limestone aggregates. *Anti-Corrosion Methods and Materials* **2010**, *57* (6), 305–313.
75. Tashiro, Ch., Ueoka K.; Bond strength between C_3A paste and iron, cooper or zinc wire and microstructure of interface. *Cem. Concr. Res.* **1981**, *11*, 619–624.
76. Tashiro, Ch., Tatibana S.; Bond strength between C_3S paste and iron, cooper or zinc wire and microsstructure of interface. *Cem. Concr. Res.* **1983**, *13*, 377–382.
77. Fratesi, R. Galvanized reinforcing steel bars in oncrete. In *COST 521 Workshop, Luxembourg, 18-19 February 2002*; , Ed.; 2002; pp 33–44.
78. Galvanizing Asia. http://www.galvanizingasia.com/pdfs/page27-32.pdf (accessed Nov 21, 2012).
79. Ryant L., Vorel J. Kotvení pozinkované výztuže, laboratorní práce, SPŠS-Josefa Gočára, Praha, 2008.
80. Huňka, P., Sutner O., Srovnávací zkoušky vytahování nepozinkované a pozinkované výztuže z betonu. Protokol o zkoušce, České vysoké učení technické-Kloknerův ústav, 2011.
81. Bird, C. E.: Bond of galvanized steel reinforcement in concrete. *Nature* **1962**, *194*, 798.
82. Hegyi, A.; et al. The increased durability of reinforced concrete with hot dip galvanized rebars. *Int. Rev.Appl.Sci. Eng.* **2010**, *1*, 45–50.
83. Cheng, A.; et al. Effect of rebar coating on corrosion resistance and bond strength of reinforced concrete. *Construction and Building Materials* **2005**, *19*, 404–412.
84. Andrade, C.; et al. Tests on bond of galvanized rebar nad concrete cured in seawater. *Journal of Materials in Civil Engineering* **2001**, 319–324.
85. COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON *Coating protection for reinforcement*; Thomas Telford Ltd., 1995.
86. Belaid, F.; et al. Porous structure of the ITZ around galvanized and ordinary steel reinforcements. *Cem. Concr. Res.* **2001**, *31*, 1561–1566.
87. Rovnaníková P., Bayer P.; *Mikrostruktura cementového tmelu v okolí pozinkované výztuže*, 9. konference žárového zinkování; Ed.; 2003; pp 57–62.
88. Rovnaníková P.,et al.; *Impact of galvanized steel corrosion on cement paste microstructure*, EUROCCOR 2004-Nice; Ed.; 2004; p. 9.
89. Pokorný P., *An objective assessment of change in porosity of the concrete stone from the phase interface hot-dip galvanized steel/concrete and carbon steel/concrete,* METAL 2012 (poster); Ed.; 2012.
90. Pokorný P. et al. Vliv pórovitosti fázového rozhraní na soudržnost modelu žárově zinkované výztuže s betonem (Prezentace Ústavu kovových materiálů a korozního inženýrství VŠCHT Praha na konferenci AKI 2012).
91. Rovnaníková, P. Problémy spojené s použitím pozinkované výztuže do betonu. *Koroze a ochrana materiálu* **2002**, *46* (5), 104–107.
92. Olmo, I.; et al. Influence of lead, zinc iron (III) and chromium (III) oxides on the setting time and strength development of Portland cement. *Cem. Concr. Res.* **2001**, *31*, 1213–1219.
93. Takahashi, H.; et al. Hardening property of cement mortar adding heavy metal compound and solubility of heavy metal from hardened mortar. *Cem. Concr. Res.* **1977**, *7*, 283–290.
94. Asavapisit, S.; et al. Solution chemistry during cement hydratation in the presence of metal hydroxides wastes. *Cem. Concr. Res.* **1997**, *27* (8), 1249–1260.
95. Arliguie, G.; et al. Etude de l´effet retardateur du zinc sur l´hydratation de la paste de ciment portland. *Cem. Concr. Res.* **1982**, *12*, 79–86.
96. ČSN 73 1214. *BETONOVÉ KONSTRUKCE, Základní ustanovení pro navrhování ochrany proti korozi*. Praha: Federální úřad pro normalizaci a měření, 1983. 8 p.
97. ČSN EN 206-1 (73 2403) Část 1: *Beton-Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda,* Praha: Český normalizační institut, 2008. 70 p.
98. ASTM A767/A767M-09. *Standard Specification for Zinc-Coated (Galvanized) Steel Bars for Concrete Reinforcement*, ASTM International, West Conshohocken 2009. 5p.
99. SVÚOM s.r.o. TP 136 (zpráva): Povlakovaná výztuž do betonu-Technické podmínky, SVÚOM 2000.
100. Technologický předpis: *Provádění monolitických železobetonových konstrukcí*, http://www.bba-monolit.cz/Technolog_predpis_BBA-MONOLIT.pdf, (accessed Dec. 03, 2012) Praha 2007.
101. Marek J.: Kontrola jakosti betonových konstrukcí (prezentace), HOCHTIEF VSB a.s., Praha 2006.
102. Šmejkal J., Procházka P.: Betonářská výztuž-evropské trendy, http://www.betontks.cz/casopis/2008-5/70.pdf, (accessed Dec. 03, 2012)