Vliv celkové zkušební kotevní délky výztuže v trámcích na zastření dopadu koroze žárově zinkované oceli na soudržnost s betonem

The influence of total reinforcement anchorage length on misinterpretation of the impact of hot-dip galvanised steel corrosion on its bond strength with concrete

Pokorný P., Čech J., Tej P., Vokáč M.
ČVUT Praha – Kloknerův ústav
E-mail: pokorny.vscht@gmail.com

V úvodní části předkládaného článku jsou shrnuty literární zdroje, které chybně interpretují výsledky soudržnosti žárově zinkovaných výztuží s betonem. Detailně je studován především vliv celkové zkušební kotevní délky na zhodnocení výsledků soudržnosti. Prostřednictvím numerické analýzy trámcových modelů s odlišnou zkušební kotevní délkou (vstupními daty pro analýzu byly výsledky předešlých zkoušek soudržnosti realizovaných v laboratoři) bylo jednoznačně potvrzeno, že při zkoušení soudržnosti žárově zinkované výztuže s betonem s dostatečně dlouhou zkušební kotevní délkou experimentem beam test („ohybová zkouška“), může dojít k zastření negativního vlivu koroze povlaku na soudržnost s betonem. Objektivní zkoušení soudržnosti výztuže s betonem je vhodnější prostřednictvím pull-out testu („vytahovací zkouška“), kde je normativně předepsána velmi krátká kotevní zkušební délka zkoušené výztuže.

ÚVOD

Protikorozi ochrana běžné výztuže betonu povlaky může prodloužit životnost železobetonových konstrukcí. Obecně lze říci, že povlak bariérovým mechanismem oddaluje dobu do aktivace podkladové oceli vyvolanou karbonatací krycí vrstvy betonu (tedy aktivace je vyvolaná poklesem pH pórového roztoku) a/nebo průnik chloridových aniontů (z mořské vody nebo rozmrazovacích solí) [1].

Celková pořizovací cena výztuží do betonu hraje klíčovou položku ve finanční bilanci zhotovitelů staveb. Proto jsou voleny takové druhy ochranných povlaků, které nepřesáhnou cenou jednotky procent z celkových pořizovacích nákladů ocelové výztuže (ideálně do 2 %). Ovšem výběr vhodných povlaků je také omezen technologickými aspekty, tj. dostatečnou provozní kapacitou, schopností povlakovat i velmi rozměrné profily a dostupnou rychlostí provádění. Tato finanční i technolo-

To begin with, the introduction of this paper summarises literature sources that wrongly interpret results of the bond strength between hot-dip galvanised reinforcements and concrete. The influence of the total reinforcement anchorage length on the bond strength results assessment was studied in detail. The numeric analysis of beam models with various testing anchorage lengths (the analysis input data comprised the results of previous bond strength tests carried out in a laboratory) unambiguously confirmed that when the bond strength between concrete and hot-dip galvanised reinforcement with a sufficient test anchorage length is tested in a beam test, the negative impact of the coating corrosion on bond strength with concrete may be biased. It is more objective to test bond strength with concrete in a pull-out test where a very short test reinforcement anchorage length is set out as a standard.

gická omezení v podstatě splňují některé technologie nanášení epoxidových povlaků (nebo povlaků na bázi PVC) a povlaků vzniklých procesem žárového zinkování [1,2].

Výztuž opatřená epoxidovými povlaky vykazuje sníženou soudržnost s betonem, kde důvodem je nedostatečná tuhost povlaku a tedy neschopnost dostatečné míře přenášet smykové zatížení na plášti výztužného prutu vyvolané vnějším zatížením. Významně diskutabilnější je ovšem vhodnost využití ochranných povlaků žárového zinku [3].

Oproti epoxidovým povlakům, koroduje v počáteční fázi zinkový povlak v čerstvém betonu vysokou korozi rychlostí a ze záznamů samovolných koročních potenciálů ($E_{kor} \sim -1200$ mV/SKE) zjištěných již v modelovém pórovém roztoku o pH 12,6 (jedná se o nasycený roztok $Ca(OH)_2$, ovšem pH reálných pórových roztoků jsou obvykle vyšší, kvůli přítomnosti oxidů alkalických kovů v cementech) je zřejmé, že produktem katodické

korozní reakce musí být vždy vodík [3,4]. Molekuly plynu jsou zachycovány v ještě plastickém cementovém tmelu a zvyšují jeho pórovitost, a tedy snižují soudržnost výztuže s betonem (snížení adhezivního faktoru f_{ad}) [3,6]. Ačkoli někteří autoři uvádějí, že póry vytvořené vznikajícím vodíkem jsou zaplňovány korozními produkty zinku, tj. ZnO [7], nebo $ZnO_2 \cdot 2H_2O$ [8,9], moderní práce to jednoznačně vyvracují a poukazují na skutečnost, že porézní struktura je zachována i v intervalech 28 dní zrání vzorků betonu, nebo dokonce delších [10-13].

Předpoklad spojující použití žárově zinkované výztuže s rizikem snížení soudržnosti s betonem ovšem není jediným nedostatkem v této problematice. Diskutabilní je i odolnost povlaku vůči působení chloridů. Zinek obecně vykazuje vyšší kritickou koncentraci chloridů u jeho povrchu vedoucí k jeho aktivaci než ocel (přibližně 2 až 4 krát). Ovšem o stabilitě intermetalických fází Fe-Zn, zcela běžně integrovaných do vrstevnaté skladby povlaku žárového zinku, v prostředí chloridů chybějí data. Proto do popředí vystupuje otázka, zda odkryté intermetalické fáze Fe-Zn vlivem odkorodování čisté vrstvy zinku (externí vrstva tzv. η fáze) nebo její absencí (vliv vnějších parametrů procesu žárového zinkování) zajišťují adekvátní ochranu podkladové oceli [3,5,13].

Navíc z výsledků některých prací vyplývá, že jedním z korozních produktů vzniklých na povrchu žárově zinkované oceli v prostředí betonu kontaminovaného chloridy je $Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot H_2O$. Tento korozní produkt má ještě větší expanzní objem než běžné korozní produkty uhlíkové oceli, vzniklé v obdobně kontaminovaném prostředí, a velice snadno rozrušuje integritu krycí vrstvy betonu kolem pozinkované výztuže [14,15].

Tento článek zhodnocuje výsledky naměřených dat z příspěvku uvedeného v předchozím čísle časopisu *Koroze a ochrana materiálu* [5] pomocí nelineárního modelování v programu Atena [16] a to i na stavebních prvcích reálných rozměrů.

Problematické zobecnění závěrů ze zkoušek soudržnosti žárově zinkované výztuže s betonem

Ani při detailním studiu předešlých výsledků srovnávacích zkoušek soudržnosti žárově zinkovaných výztuží a běžných výztuží bez povlaku s betonem nelze vytvořit jednoznačné závěry. Problémem je vzájemná neporovnatelnost výsledků jednotlivých zkoušek, protože velmi často v dostupných literárních zdrojích chybí dostatečně detailní výpis všech faktorů, které mají na soudržnost výztuže s betonem vliv. Často chybí volba a bližší popis uspořádání zkoušky soudržnosti, specifikace normativu zkoušení, charakteristika případných vazacích prvků zkoušených vložek a stav povrchu, metalografická analýza povlaku žárového zinku a složení podkladové oceli, stanovení složení použitého cementu, často není

ani definován vodní součinitel betonové směsi, obvykle nebývají definovány ani mechanické vlastnosti zatvrdlého betonu, popis způsobu jeho uložení a ošetřování, teplota vzduchu v průběhu realizace zkoušek soudržnosti apod. [17,18].

V literatuře lze najít i výsledky zkoušek soudržnosti (pull-out testy; „vytahovací zkoušky“), které svědčí o lepší soudržnosti pozinkovaných profilů s betonem, ovšem jsou špatně interpretovány. Vycházejí ze záznamů, které evidentně nemohly být naměřeny, neboť maxima napětí v soudržnosti (τ_m) byla naměřena až při posunech zkoušených výztuží větších než 1 mm [2,19]. Evidentní zkreslení výsledků je patrné i v další literatuře [9]. Rovněž zde je experimentálně ověřena zvýšená soudržnost hladkých žárově zinkovaných profilů i žárově zinkovaných žebříkových výztuží s betonem oproti nepovlakované oceli stejné geometrie povrchu. Záznamy růstu soudržnosti se nelogicky u obou druhů hladkých výztuží v průběhu zrání betonových vzorků projevují ovšem u žebříkových profilů nikoli. Navíc záznamy diagramů stanovujících soudržnost obou druhů žebříkových výztuží nejsou konzistentní s daty uvedenými v tabulce. Rovněž příspěvek [20] poukazuje na zvýšenou soudržnost žárově zinkované výztuže s betonem. Ovšem i zde se objevují evidentní nesrovnalosti. Zkoušené ocelové vzorky nebyly centrovány do středu krychlí a chybí údaje o lokalizaci měření posunu výztuže v průběhu zatěžování. Zásadnější je ovšem autorovo zjištění, že koroze výztuže stimulovaná expozicí vzorků betonu s ocelovou vložkou bez ochranného povlaku v mořské vodě může zvýšit soudržnost vzorku s betonem až 4krát!

Existují výsledky publikací, které poukazují na mimořádnou soudržnost hladkých žárově zinkovaných profilů s betonem oproti profilům bez povlaku. Navýšení je až o více než 30 % (Ultimate Bond Stress). Ovšem v případě použití zinkované žebříkové výztuže byla zaznamenána snížená soudržnost. Autor tyto skutečnosti v závěrech detailně nekomentuje [21].

I výsledky některých beam testů („zkouška v ohybu“) poukazují v podstatě na srovnatelnou soudržnost žárově zinkované výztuže s betonem jako u nepovlakovaných výztuží. Ovšem i zde dochází ke zkreslení výsledků experimentálními chybami, či nesprávnou interpretací výsledků. Například v práci z roku 1995 [22] je soudržnost zinkované výztuže s betonem porovnávána s nepovlakovanou výztuží modifikovanou formou beam testu. V zatěžovacích diagramech pro nepovlakovanou ocel chybí u dvou vzorků „plastická oblast deformace“ (vzorek „B1“ a „B2“) muselo tudíž dojít k rozdílnému způsobu porušení zkušebních těles, např. k náhlému porušení betonových těles (beton vykazoval nízké pevnosti v tlaku) a nikoli k porušení soudržnosti. Výsledná soudržnost nepovlakované výztuže s betonem může být tedy vyšší, protože při porušení zkušebního tělesa nerozhodovala soudržnost. Autoři absenci plastic-

ké oblasti v diagram nekomentují. U vzorku „B3” byla zjištěna obdobná soudržnost jako u pozinkovaných žebírkových výztuží a diagram plastickou oblast obsahuje. U tohoto vzorku „B3” byla vzhledem k variabilitě materiálových vlastností nižší soudržnost než u „B1” a „B2”, a tudíž byla u „B3” soudržnost rozhodující pro porušení zkušebního tělesa. Další práce stejného řešitelského kolektivu stejnou technikou opět potvrzuje obdobnou soudržnost zinkované výztuže s betonem [23], ovšem i tato práce vykazuje určité nesrovnalosti. Základem práce je předpoklad, že soudržnost lze s obdobnou přesností zkoušet na libovolně dlouhé kotevní délce. Výsledky předpokládající lineární rozložení smykového napětí v průběhu zatěžování a jednotlivé hodnoty mají evidentně až 20 % odchylky od průměru. Výsledky zkoušek soudržnosti jsou zde ale prezentovány zprůměrovanými křivkami, kde rozdíl mezi žárově zinkovanou výztuží a nepovlakovanou ocelí je řádově menší, a to ve prospěch žárově zinkování.

Jednoznačně nejmladší práce ověřující a srovnávající soudržnost pozinkovaných výztuží s betonem oproti soudržnosti nepovlakovaných výztuží uspořádáním beam test [24,25] a jeho modifikací v případě vázání výztuží do stavebního prvku – konzole [26,27], spadají do období 2005-2008. Výsledky těchto testů ověřují sníženou soudržnost pozinkované výztuže s betonem (běžných mechanických vlastností i high strength concrete) v rozsahu 4-15 % a to i v případě, že výztuže jsou kotveny s koncovou úpravou a často značnou tloušťkou krycí vrstvy betonu. Autoři zde poukazují, že redukce soudržnosti je zde v podstatě zanedbatelná a navíc beton v bloku zinkované výztuže je méně popraskan (menší počet trhlin), což ovšem svědčí spíše o snížené soudržnosti, protože v takovém případě vzniká méně trhlin s větší šířkou. Uvedené snížení soudržnosti ovšem v žádném případě nelze zanedbávat.

Vliv zkušební kotevní délky

Evidentní nesrovnalosti s dosaženými výsledky a uvedenými závěry v práci [23] z objektivního pohledu naznačují, že soudržnost výztuže s betonem je ovlivňována celkovou zkušební kotevní délkou zkoušených vložek. Autor uvedené publikace ospravedlňuje srovnávací zkoušení soudržnosti i na prvcích s velice dlouhou zkušební kotevní délkou. Ovšem při zatěžování výztuže s dlouhou kotevní délkou (uspořádání, které povolují normativní předpisy popisující beam test; „zkoušku v ohybu“) smykové napětí v soudržnosti (τ_m) se podstatně hůře rovnoměrně rozdělí po celé kotevní délce než je tomu u pull-out testu („vytahovací zkouška“), kde je povolená kotevní délka pouze pětinásobkem jmenovitého průměru zkušební výztuže. U dlouhé kotevní délky je skutečné rozdělení smykových napětí v soudržnosti nerovnoměrné. U zkušebních těles s dlouhou kotevní délkou také nemusí být soudržnost

rozhodující dominantní faktor pro porušení zkušebního tělesa, protože větší vliv může mít pevnost betonu nebo materiálové parametry výztuže.

Na základě tohoto předpokladu lze očekávat, že snížení soudržnosti zinkované výztuže s betonem (vlivem úvodní korozní reakce zinku v čerstvém betonu za vývoje vodíku) nemusí být při zkoušení profilů s dostatečně dlouhou kotevní délkou patrné.

Cílem předkládaného článku je porovnat soudržnost zinkovaných a nepovlakovaných hladkých výztuží s betonem v uspořádání beam test („ohybová zkouška“) v případě odlišných kotevních délek. Jako vstupní data jsou zde zhodnoceny výsledky z předešlých zkoušek soudržnosti provedenými na hladkých prutech v uspořádání pull-out („vytahovací zkouška“) [5]. Data z pull-out testů posloužila k odvození materiálových parametrů pro nelineární numerický model. Pro stejné materiály i parametry soudržnosti byly potom zpracovány numerické modely pro dvě skupiny paralelních zkušebních těles (trámečků) s odlišnou kotevní délkou výztuže. Zpracování a výpočet s veškerou vizualizací výsledků proběhlo v prostředí softwaru Atena 3D Engineering.

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Odvození parametrů soudržnosti pro numerický model

Pro nelineární numerické modelování zkoušek v uspořádání beam-test bylo využito materiálových parametrů, které byly stanoveny na základě reverzní analýzy v programu Atena s výsledky experimentů zkoušek soudržnosti u výztuží černých a pozinkovaných v uspořádání pull-out [5].

Zkušební těleso betonové krychle pull-out testu s výztužným prutem bylo modelováno jako dva standardní makroprvky – jeden šířky 60 mm (odpovídá pětinásobku jmenovitého průměru), v němž byla zakotvena výztuž, a druhý šířky 90 mm s otvorem pro výztuž pro simulaci separace ocelového prutu od betonu. Zabetonovaný ocelový prut byl pak modelován jako prvek „Prutová výztuž“ s parametry shodnými s již zmiňovanou zkouškou v akreditované laboratoři Kloknerova ústavu [5]. Mimo tyto prvky byly vymodelovány ještě pomocné makroprvky a to krychličky na volných koncích ocelového prutu. Na tyto pomocné makroprvky bylo aplikováno zatížení posunem a monitory ke sledování posunu a působící síly, poněvadž program Atena neumožňuje aplikovat monitory a zatížení do koncového bodu položky „Prutová výztuž“. Jako materiál zkušební betonové krychle byl vybrán (dle experimentu) z knihovny programu Atena beton C40/50 se středními hodnotami materiálových vlastností. Jako materiál výztužného prutu byla zvolena položka „Výztuž“ opět se středními hodnotami bilineár-

ního pracovního diagramu v tahu (ideální pružno-plastický pracovní diagram se zadanou limitní poměrnou deformací). Soudržnost výztužného ocelového prutu byla modelována materiálovou položkou „Soudržnost výztuže“, jejíž parametry byly vygenerovány programem na základě profilu prutu, krychelné charakteristické pevnosti betonu v tlaku a odborně odhadnuté kvality soudržnosti. Různé pohledy na numerický model sou-

a) plný model

b) drátový model

Obr. 1. Numerický model testu soudržnosti – a) plný model se sítí konečných prvků; b) drátový model

Fig. 1. Numeric model of bond strength - a) full del with net of mfinite elements; b) wire model

Obr. 2. Boční pohled na plný model s podporami
Fig. 2. Side view of the support model

držnosti zhodnocují Obr. 1. a Obr. 2. (boční pohled). Konstitutivní modely používané softwarem Atena jsou podrobně popsány v teoretické části manuálu [16].

Jako zatížení byl aplikován posun na volném konci výztužného prutu (na pomocný makroprvek), a to v hodnotě 0,1 mm v každém kroku. Současně byl osazeným monitorem na opačném konci měřen posun tohoto konce výztužného prutu (podobně jako v experimentu). Dalším osazeným monitorem byla dopočítávána síla, která působící posun způsobuje a tak byl vytvářen L-D (load-displacement) diagram pro srovnání s experimentálními výsledky. Jednotlivé L-D diagramy s výsledky předchozích laboratorních experimentů i numerického modelování (červená křivka) shrnují Obr. 3. a Obr. 4. Ukázka záznamů napětí v soudržnosti (τ_m) pro povlakovanou a nepovlakovanou hladkou výztuž v důležitých bodech L-D diagramu z numerické analýzy shrnuje Tab. 1.

Tab. 1. Shrnutí záznamů napětí v soudržnosti (τ_m) pro 3 vytyčené posuny povlakované a nepovlakované výztuže plynoucí z numerické analýzy / Numerical analysis of bond strength of coated and uncoated rebar at 3 different elongations

hladká ocel bez povlaku		hladká ocel žárově zinkovaná	
posun výztuže (mm)	τ_m (MPa)	posun výztuže (mm)	τ_m (MPa)
0	2,665	0	2,2
0,584	2,227	0,864	1,827
5,760	1,627	2,760	1,462

Jednotlivé makroprvky byly nasítovány lineárními tetrahedra konečnými prvky o velikosti hrany 20 mm.

Obr. 3. Výsledky zkoušek soudržnosti hladkých nepovlakovaných profilů s betonem z předešlého experimentu [5] s křivkou získanou pomocí numerického modelování (označená červenou barvou)

Fig. 3. Results of experiments of flat uncoated rebars and model curve (red)

Obr. 4. Výsledky zkoušek soudržnosti hladkých žárově zinkovaných profilů s betonem z předešlého experimentu [5] s křivkou získanou pomocí numerického modelování (označená červenou barvou)

Fig. 4. Results of experiments of flat galvanized rebars and model curve (red)

Maximální síla, resp. napětí, v soudržnosti u L-D diagramu z numerické analýzy je u pozinkované výztuže o cca 16 % nižší, než v případě černého nepozinkovaného prutu, viz Obr. 3 a 4.

Numerická analýza vlivu kotevní délky u zkoušek uspořádaných jako beam-test

Nejprve byla provedena analýza betonového trámku se čtyřmi pruty profilu 12 mm. Třída betonu a oceli byla volena shodná jako v reverzní analýze. Na ocelové pruty byl aplikován model soudržnosti získaný pro jednotlivé povrchové úpravy („Fe“, „Zn“) v předchozí reverzní analýze zkoušky soudržnosti pull-out testu.

Model trámku byl zatížen čtyřbodovým ohybem a nasíťován lineárními tetra prvky o velikosti hrany 40 mm. Vyobrazení modelů shrnuje Obr. 5. Osazenými monitory na průhyb (uprostřed trámku) a sílu (v místě zatěžovacích trámečků) byl během výpočtu vytvořen graf závislosti průhybu na působící síle. Následně byly tyto grafy porovnány pro jednotlivé výztuže („Fe“, „Zn“). Výsledky shrnuje graf na Obr. 6.

Z grafů na Obr. 6 je patrné, že maximální dosažená síla u výztuže pozinkované je o cca 8 % nižší, než v případě oceli černé bez pozinkování. Tuhost konstrukce (velikost síly pro dosažení jednotkové deformace) je na začátku L-D diagramu před dosažením maximálního zatížení srovnatelná.

Přestože byly zadány totožné materiálové parametry jako u modelu pull-out testu, rozdíl odolnosti se při modelování zkoušky beam test, kde je délka soudržnosti násobně větší, výrazně snížil.

Dále byla provedena také analýza betonového trámu průřezu 200/400 mm a rozpětí 4 m se čtyřmi pruty

a) drátový model

b) plný model

Obr. 5. Modely simulovaného trámku z numerické analýzy; a) drátový model s výztuží; b) plný model se sítí konečných prvků

Fig. 5. Simulated beam model for numeric analysis - a) wire model; b) full model with net of finite elements

Obr. 6. Porovnání L-D diagramů obou typů výztuže pro krátké trámy

Fig. 6. Comparison of L-D diagrams of both rebars for short beams

profilu 12 mm a třminky profilu 6 o vzájemné vzdálenosti 200 mm. Třída betonu a oceli byla volena shodná jako v numerické analýze soudržnosti. Na ocelové pruty byl aplikován model soudržnosti získaný pro jednotlivé povrchy (ocel bez povlaku – „Fe“, ocel žárově zinkovaná – „Zn“) v předchozí analýze.

Model trámu byl zatížen třibodovým ohybem a nasíťován lineárními tetra prvky o velikosti hrany 40 mm (viz Obr. 7.). Osazenými monitory na průhyb (uprostřed trámu) a sílu (v místě zatěžovacího trámečku) byl během výpočtu vytvořen graf závislosti průhybu na působící síle. Následně byly tyto grafy porovnány pro jednotlivé materiály povrchu výztuže („Fe“, „Zn“). Výsledky zatěžování shrnuje Obr. 8.

Obr. 7. Model trámu a) drátový model s výztuží; b) plný model se sítí konečných prvků

Fig. 7. Beam model - a) wire model; b) full model with net of finite elements

Obr. 8. Porovnání L-D diagramů obou typů výztuže pro dlouhé tránce

Fig. 8. Comparison of L-D diagrams of both rebars for long beams

Tento numerický model trámu reálných rozměrů konstrukčního prvku ukazuje, že průběh L-D diagramu při použití pozinkované výztuže je v podstatě identický s diagramem při použití černé nepozinkované výztuže, viz Obr. 8.

VÝSLEDKY A DISKUZE

Z numerické analýzy krátkých trámů vyplývá, že do vzniku makrotrhliny se oba modely chovají přibližně stejně. Rozdíl nastane při vzniku makrotrhliny, kdy makrotrhlina u trámu vyztuženého ocelovými pruty vznikne při větší síle než u trámu vyztuženého pozinkovanými ocelovými pruty. Chování po vzniku makrotrhliny je rovněž rozdílné a to především u trámu vyztuženého ocelovými pruty. Je také zřejmé, že únosnost trámu s ocelovými pruty je větší nejen při vzniku makrotrhliny, ale také při působení trámu po jejím vzniku.

Z numerické analýzy dlouhých trámů vyplývá, že v důsledku dostatečně dlouhé kotevní délky se prakticky v průběhu celého zatěžování oba modely chovají stejně. Rozdíl nenastane ani při kolapsu konstrukce, kdy u obou prvků nastane porušení ve výztuži, tj. dosažení meze kluzu a mezní deformace oceli zvoleného materiálového modelu (bilineární ideální pružno-plastický pracovní diagram).

Vliv uspořádání zkoušky soudržnosti výztuže, a to zejména délky kotevní oblasti prutu, je zřejmý z výsledků numerického modelu programu Atena se zadanými identickými materiálovými parametry, které ukazují snížení únosnosti vlivem pozinkování v případě pull-out testu o cca 16 % (fitováno dle experimentů), u beam testu ale pouze o 8 % a u reálného konstrukčního prvku trámu v podstatě o 0 %, viz Obr. 8. Důvodem

je rozdílný charakter průběhu tečných napětí na plášti výztužných prutů.

Na Obr. 9 jsou vykresleny izoplochy smykových napětí na výztuži při maximální působící síle v případě nepovlakované výztuže (Fe) a na Obr. 10 pro případ žárově zinkované výztuže (Zn). Levý konec zobrazené výztuže s izoplochami představuje levý konec nosníku a pravý konec zobrazené výztuže s izoplochami je střed 4 m dlouhého nosníku, tj. graf zobrazuje vždy výztuž v levé polovině nosníku.

Výsledky ukazují, že průběh smykových napětí u 4 m nosníků není rovnoměrný, ale koncentruje se v místech vzniku trhlin v betonu. V případě nepovlakované výztuže je četnost trhlin větší. U žárově zinkované výztuže má výskyt trhlin menší četnost, ale trhliny mají větší šířku. To je jeden z projevů snížení soudržnosti žárově zinkované výztuže s betonem.

Vliv snížení soudržnosti žárově zinkované výztuže s betonem se v těchto výsledcích numerické analýzy projevil také délkou oblastí s lokálním extrémem. Zatímco u nepovlakované výztuže jsou tyto oblasti velmi krátké a izoplochy (Obr. 9) připomínají čárový kód s tenkými čarami, tak u žárově zinkované výztuže

jsou tyto oblasti významně delší a izoplochy (Obr. 10) připomínají čárový kód s tlustými čarami. Při porušení v soudržnosti tedy proklouzne větší délka výztuže, které je žárově zinkovaná, což je právě způsobeno sníženou soudržností. Absolutní hodnoty tečného napětí také ukazují, že blíže má k porušení v soudržnosti žárově zinkovaná výztuž, protože zde jsou tyto hodnoty největší, viz zobrazené škály u Obr. 9 a 10.

ZÁVĚR

Srovnávací zkoušky soudržnosti nepovlakované a žárově zinkované hladké výztuže pro uspořádání beam test (zkouška v ohybu) pro dvě odlišné zkušební kotevní délky byly realizovány pomocí numerické analýzy v programu Atena 3D Engineering. Vstupní data použitá v numerickém modelu byla převzata z předešlého příspěvku, kde soudržnost hladkých profilů (prutů) bez povlaku a žárově zinkovaných bylo realizováno v experimentálním uspořádání pull-out test („vytahovací zkouška“). Výsledky numerické analýzy jednoznačně potvrzují, že v uspořádání zkušebního trémce se záměrně dlouhou kotevní délkou se vliv koroze zinkového povlaku na soudržnost neprojevuje. Nicméně v případě, že zkušební kotevní délka je kratší, snížená soudržnost mezi žárově zinkovaným hladkým prutem a betonem obvyklých mechanických vlastností se opět projevuje. Důvodem je rozdílný charakter průběhu tečných napětí na plášti výztuže. Zatímco u uspořádání pull-out test (krátká kotevní délka) se rozložení tečných napětí blíží co možná nejvíce rovnoměrnému průběhu, tak u zkoušky na 4 m dlouhého nosníku (dlouhá kotevní délka) se koncentrují extrémní napětí v malé oblasti v blízkosti trhliny v betonu.

Ačkoli se snížení soudržnosti u 4 m dlouhého nosníku významně neprojevilo v L-D diagramu, tak snížení soudržnosti nelze v žádném případě zanedbat u detailů vyztužení reálné konstrukce, kde kotevní délka je kritická pro statickou odolnost.

Je nezbytné poznamenat, že závěry článků srovnávacích soudržnost zinkovaných výztuží s nepovlakovanou obdobou v experimentálním uspořádání beam test (ohybová zkouška) s významně dlouhou kotevní délkou nelze považovat za objektivní. Objektivně by soudržnost měla být testována v experimentálním uspořádání pull-out test („vytahovací zkouška“), kde je normou předepsána pouze krátká zkušební kotevní délka (pouze pětinašobek jmenovitého průměru zkoušeného profilu). Zkušební postup beam test s dlouhou kotevní délkou může být účelově zneužit ke zkreslení vlivu koroze zinkového povlaku v čerstvém betonu na snížení soudržnosti.

Na závěr je třeba dodat, že jednotlivé zkušební postupy (pull-out test; beam test) v žádném případě nesmějí být modifikovány (přidání výztužných profilů,

Obr. 9. Izoplochy napětí v soudržnosti na podélném ocelovém výztužném prutu trému – Fe

Fig. 9. Bond stress in a beam with uncoted rebar

Obr. 10. Izoplochy napětí v soudržnosti na podélném ocelovém výztužném prutu trému – Zn

Fig. 10. Bond stress in a beam with galvanized rebar

přídavky nadbytku betonu do forem, koncové úpravy zkoušených profilů apod.). Je třeba dodržovat jednotných standardních zkušebních metod, jinak nelze zajistit objektivní posuzování a porovnávání těchto zkoušek soudržnosti zároveň zinkované výztuže s betonem.

Poděkování

Realizováno za finanční podpory Grantové agentury České republiky, reg. číslo 15-22670S.

LITERATURA

1. Bowsher B. et al., Corrosion protection of reinforcing steels – Technical report fib – Bulletin 49, IFSC, Lousanne 2009.
2. Andrade C. et al., Protection systems for reinforcement, Bulletin D'Information N°211, Comité Eurointernational du Beton, Lausanne 1992.
3. Pokorný P., Dobiáš D., Vokáč M., Kouřil M., Kubásek J., Vliv koroze zinkované oceli na soudržnost s betonem, *Koroze a ochrana materiálu* **2012**, 56 (4), 119-135.
4. Kouřil M., Koroze alternativních kovových materiálů v pórovém roztoku betonu, Dizertační práce, VŠCHT Praha, Praha 2004.
5. Pokorný P., Zhodnocení vlivu koroze zároveň zinkované oceli na soudržnost hladkých prutů s betonem třídy "NSC", *Koroze a ochrana materiálu* **2015**, 59 (2), 53-65.
6. Kouřil M., Krtička Š., Novák P., Soudržnost zinkované oceli s betonem, *Koroze a ochrana materiálu* **2007**, 51 (4), 80-83.
7. Yeomans S. R., Galvanized steel reinforcement – A prespect view. Real World Concrete – Symposium of R. N. Swamy, ACI International Conference, 1995, USA, 57-70.
8. Belaïd F., Arliguie G., François R., Porous structure of the ITZ around galvanized and ordinary steel reinforcements, *Cement and Concrete Research*, **2001**, 31, 1561-1566.
9. Belaïd F., Arliguie G., François R., Effect of bars properties on bond strength of galvanized reinforcement, *Journal of materials in civil engineering*, **2001**, 13 (6), 454-458.
10. Rovnaníková P., Bayer P., Změny v mikrostrukturu cementového tmelu na styku s pozinkovanou výztuží, Koroze a protikorozi ochrana kovů, VŠCHT Praha, AKI 2003, 19-20.
11. Rovnaníková P., Bayer P., Poznatky ze studia styčné vrstvy mezi cementovým tmelem a pozinkovanou výztuží, Koroze úložných zariadení 2003, TU Košice, 2003.
12. Rovnaníková P., Bayer P., Vlastnosti cementového tmelu v betonu na styku s pozinkovanou výztuží, 11. Betonářské dny, ČSSI 2004, 542.
13. Andrade C., Macias, A., Galvanized reinforcement in concrete, Surface Coatings – 2 (Edited: Wilson A. D., Nicholson J. W., Prosser H. J.), Elsevier Applied Science Publishers Ltd., 137-182.
14. 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.
15. Hime W. G., Machin M., Performance variances of galvanized steel in mortar and concrete, *Corrosion*, **1993**, 49 (10), 858-860.
16. Červenka V., Jendele L., Červenka J., ATENA Program Documentation, Part 1, Theory (online), Červenka Consulting, s. r. o., Prague, September 19, 2014. Dostupné z http://www.cervenka.cz/assets/files/aten-pdf/ATENA_Theory.pdf [cit. 2015-12-30].
17. Pokorný P., Kouřil M., Simon P., Použití zároveň zinkované výztuže betonu, *Strojárstvo/Strojrenství*, **2014**, 58 (6), 100-101.
18. Pokorný P., Kouřil M., Hrdlička L., Simon P., Faktory ovlivňující soudržnost povlakované výztuže s betonem, *Tribotechnika*, **2014**, 2, 80-82.
19. Sarja A., Jokela J., Metso J., Zinc-coated concrete reinforcement. Technical research reports - 306, Technical Research Centre of Finland, 1984.
20. Lewis D. A., Some aspects of the corrosion of steel in concrete, First International Congress on Metallic Corrosion – XIII.1, 1961, London, pp. 547-552.
21. Yeomans S. R., Comparative studies of galvanized and epoxy coated steel reinforcement in concrete, 1991, Research Report No. R103, The University of New South Wales-Canberra, 1-15.
22. Kayali O. A., Yeomans S. R., Bond and slip of coated reinforcement in concrete, *Construction and Building Materials*, **1995**, 9 (4), 219-226.
23. Kayali O. A., Yeomans S. R., Bond of ribbed galvanized reinforcing steel in concrete, *Cement and Concrete Composites*, **2000**, 22, 459-467.
24. Hamad B. S., Mike J. A., Bond strength of hot-dip galvanized reinforcement in normal strength concrete structures, *Construction and Building Materials*, **2005**, 19, 275-283.
25. Hamad S. B., Fakhran M. F., Effect of confinement on bond strength of hot-dip galvanized lap splices in high-strength concrete, *ACI Structural Journal*, **2006**, 103 (1), 48-56.
26. Hamad B. S., Jumaa G. K., Bond strength of hot-dip galvanized hooked bars in normal strength concrete structures, *Construction and Building Materials*, **2008**, 22, 1166-1177.
27. Hamad B. S., Jumaa G. K., Bond strength of hot-dip galvanized hooked bars in high strength concrete structures, *Construction and Building Materials*, **2008**, 22, 2042-2052.