

# **ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta architektury – Ústav nosných konstrukcí**

## **SHORT PAPER**

**Oblast výzkumu a téma disertace:**

**Architektura a moderní konstrukční materiály a technologie**

**Užší téma:**

**Povlakovaná výztuž v železobetonových konstrukcích a její vliv na architektonickou tvorbu 2023**

**Doktorský studijní program: P0731D010005 A – Architektura a urbanismus**

**Školitel: prof. Dr. Ing. Martin Pospíšil, Ph.D., Fakulta architektury**

**Školitel specialista: Ing. Petr Pokorný, Ph.D., Kloknerův ústav**

**Ing. Veronika Steinerová**

**10/2023**

## Abstrakt

Téma disertační práce se soustředí na životnost železobetonových konstrukcí, která je často úzce limitována korozí konvenční ocelové výztuže. Objemové korozní produkty způsobují odprýskávání krycí vrstvy betonu, ocelová výztuž je následně vystavena atmosférické formě korozního poškození a také působení chloridových aniontů. Korozní prostředí pronikající betonem vyvolává velmi obtížně predikovatelné formy lokálního korozního napadení. Tato forma koroze způsobuje zásadní snížení únosnosti železobetonové konstrukce a může vést až k jejímu fatálnímu zhroucení. Z těchto důvodů je potřeba betonovou výztuž chránit.

Standardní obranou proti tomuto problému je ochrana ocelové výztuže poměrně silnou a kompaktní krycí vrstvou betonu. To však s sebou nese jak výrazné zvýšení hmotnosti konstrukce spojené i s výrazně vyšší celkovou ekologickou zátěží, tak vyšší omezení při jejím architektonickém ztvárnění. Práce se zaměřuje na ochranu betonářské oceli S235JR formou galvanického povlakování zinkovými, zinko-niklovými a niklovými povlaky, které porovnává s povlakem žárového zinku a ocelí bez povlaku. Vzhledem k rozmanitosti ocelové výztuže má smysl testovat i různé povlakovací systémy. Povlakování běžné ocelové výztuže je vhodným příslibem pro realizaci tenkostěnných subtilních (např. skořepinových nebo membránových) prvků, případně prefabrikovaných železobetonových dílců umožňující minimalizaci celkové hmotnosti a vytvoření většího prostoru pro tepelnou izolaci.

Příspěvek reaguje na poslední zjištěná fakta vztahující se hlavně k vydání normy ČSN EN 10348-2 (Ocel pro výztuž do betonu – Pozinkovaná betonářská ocel – Část 2: Pozinkované ocelové výrobky pro vyztužování betonu), která ustanovuje podmínky použití pozinkované ocelové výrobky pro vyztužování betonu), která ustanovuje podmínky použití pozinkované ocelové výrobky v betonu. V příspěvku jsou vysvětleny úskalí normy při jejím uplatnění v praxi. Do programu výzkumu byla přidána další povrchová úprava doplňující soubor, tou je povlak galvanického zinku. V závěru jsou představeny dosavadní výsledky zkoumání a navrženy následné výzkumné kroky.

Výsledky vznikly za podpory studentského grantu SGS ČVUT v Praze (SGS22/194/OHK1/3T/15).

## Úvod a současný stav řešeného problému

Korozi ocelové výztuže se zabývala řada studií [1, 2, 3]. Mezi základní ochrany výztuže proti korozi lze zařadit slab design, variabilní tloušťky betonu, elektrochemickou ochranu, korozní inhibitory, použití korozivzdorné oceli nebo povlakování výztuže kovovými (zinek) či nekovovými povlaky (epoxydy). Dosavadní výzkumy byly zaměřeny na čistě žárově zinkované povrchové úpravy [4, 5 a 6] a epoxydy [7]. Jedná se o ekonomicky dostupnou povrchovou úpravu s velmi dobrou korozní odolností a s poměrně jednoduchou technologií procesu povlakování. Výzkum zabývající se galvanickými povlaky v oblasti stavebnictví je značně omezený. Výhodou galvanického pokovení oproti pokovení žárovému je vytváření tenké vrstvy pokovovaného kovu, která má tloušťku v řádu jednotek mikrometrů a je tvořena čistým kovem. Kdež to žárové povlaky dosahují tlouštěk kolem sto mikrometrů a skladba povlaku je tvořena slitinovými fázemi obsahující železo. Kovové povlaky jsou v porovnání s nekovovými povlaky odolnější vůči otěru během manipulace. Z toho důvodu není potřeba nadstandardní kontroly kvality povlaku po procesu povlakování ani složité technologie a kontroly skladování, jako je to vyžadováno u nekovových povlaků na ocelové výztuži.

Zinek má nízký elektrický potenciál a ve spojení s železem se zinek chová jako obětovaná anoda, tzn. při drobném poškození povlaku si povlak zachovává své protikorozní vlastnosti. Další výhodou zinku je schopnost se pasivovat a vytvářet na svém povrchu vrstvu, která zpomaluje rychlost koroze povlakované ocelové výztuže. Takové chování zinku lze očekávat v prostředí atmosféry, ale v prostředí čerstvého betonu zinek koroduje za vývoje vodíku, což způsobuje zvýšení porozity na rozhraní ocelové výztuže a cementového tmelu. Důsledkem toho může docházet ke snížení soudržnosti ocelové výztuže s betonem. Výborné korozní vlastnosti ve velmi agresivním prostředí mají niklové povrchové úpravy, které se využívají např. v automobilovém průmyslu. Tyto povrchové úpravy na bázi niklu navíc vykazují významně větší odolnost vůči působení chloridových aniontů než konvenční zinkové povlaky, které do konstrukce pronikají například při zimní údržbě [8]. Použití čistého niklu by pro aplikaci ve stavebnictví ale bylo ekonomicky náročné.

Zjištěná fakta korozního a stavebně zkušebního testování povlakované ocelové výztuže poslouží k analýze v architektonické části práce. Ta bude založena na komparaci teoretických konstrukcí navržených s použitím klasické nepovlakované výztuže a s použitím povlakované výztuže. Komparace bude realizována na zjednodušeném posouzení únosnosti (případně deformace) tří základních druhů konstrukcí z hlediska mechanického namáhání: desek, membrán a skořepin, se zvláštním zřetelem na podíl vlastní tíhy na dosažení limitu únosnosti (limitní deformace) posuzovaného prvku. Tato fáze bude podkladem pro závěrečné vyhodnocení ekonomické náročnosti a ekologického dopadu použití povlakované a nepovlakované výztuže v posuzovaných konstrukcích.

## Metodologie

Řešení je rozvrženo do několika etap, ve kterých se budou zkoumat galvanické povlaky slitiny z čistého niklu a ze slitin na bázi zinku a niklu. Do programu jsou zahrnuty i dva referenční materiály, a to ocel bez povlaku (standardní výztuž do betonu) a žárově zinkovaná betonová výztuž. Je testováno celkem pět různých betonářských výztuží. Výzkum povlakované výztuže proběhne ve spolupráci s Kloknerovým ústavem ČVUT v Praze.

### Jednotlivé etapy výzkumu:

1. Etapa: Etapa zahrnuje přípravu betonářské výztuže s různými povlaky, viz výše. Další částí v této etapě bude popis povlaků, zjištění jejich drsnosti, mikroskopický popis krystalických fází povlaků, vyhotovení dostatečné obrazové dokumentace všech betonových výztuží. Výstupem této etapy bude podrobný popis materiálových vlastností použitých povrchových materiálů na betonové výztuži.
2. Etapa: Laboratorní korozní zkoušky. Všechny betonové výztuže v tomto projektu budou vystaveny modelovému roztoku betonu v pH 12.8, 13.0 a 13.5. Hlavním výsledkem bude stanovení korozní odolnosti ochranného povlaku v porovnání s ocelí bez povlaku a zjištění parametru korozní rychlosti povlaků.
3. Etapa: Korozní zkouška v neutrální solné mlze NSS ISO 9227. Výstupem bude zpracování zkoušky a porovnání všech druhů použitých povrchových úprav na betonové výztuži.
4. Etapa: Tato etapa bude zahrnovat experimenty typické pro aplikační stavební činnost: Zkoušky soudržnosti povlakované i nepovlakované výztuže do betonu dle normy RILEM RC 6. Zkouška ohybové únosnosti RILEM RC 5 (Bound Test for Reinforcement Steel 1. Beam Test 1982), zkoušky budou provedeny v Kloknerově ústavu ČVUT. Hlavními výstupy bude vyhodnocení a zpracování naměřených dat u obou druhů zkoušek.
5. Etapa: Sběr dat k vytvoření rešerše, která bude analyzovat limity protikorozní úpravy výztuže železobetonových konstrukcí vztažené k jejich trvanlivosti a odolnosti. Další část této etapy bude zaměřena na otázky údržby železobetonových konstrukcí, jejich životnost a orientačně též na ekologické aspekty realizace a života vybraných druhů staveb. Hlavním výstupem bude souhrnný popis současné ochrany železobetonových konstrukcí proti korozi betonové výztuže. Diskuze bude zaměřena na otázky, jak tyto ochrany ovlivňují konstrukční skladbu a na jejich ekonomicko-enviromentální dopad a celkovou životnost stavby.
6. Etapa: Komparace zjednodušeným statickým posouzením standardní železobetonové konstrukce a železobetonové konstrukce s povlakovanou výztuží, a to pro tři základní druhy konstrukcí z hlediska mechanického namáhání: desku, membránu a skořepinu.
7. Etapa: syntézy a závěry. V této fázi dojde k propojení celého experimentálního výzkumu z etap 1 až 4 s etapou 5, 6 a 7. Závěrečným výstupem bude hodnocení vlivu zkoumaných povrchových úprav betonové výztuže na tvar a skladbu konstrukce, životnost konstrukce a na její ekonomicko-enviromentální dopad.

### Časová etapizace projektu:

První rok: 1. a 2. etapa

Druhý rok: 3. a 4. etapa

Třetí rok: 4. B, 5., 6. a 7. etapa

## Cíle:

*Udržitelnost železobetonové konstrukce;* Jedná se především o prodloužení životnosti železobetonové konstrukce z hlediska vyšší odolnosti ocelové výztuže vůči korozi a s tím spojenou nižší zátěží životního cyklu konstrukce k životnímu prostředí.

*Větší variabilita architektonického návrhu;* Vyšší odolnost ocelové výztuže proti korozi může vést ke snížení krycí vrstvy betonu. Získá se tenká železobetonová konstrukce s nižší celkovou hmotností. Studie zkoumá míru předpokládané úspory na třech architektonicky výrazných prvcích s rozdílným způsobem namáhání: desce, membráně a skořepině.

*Ekonomika a ekologie;* Snížení nákladů a časové náročnosti na opravy a rekonstrukce staveb, s tím související zlepšení prostředí pro obyvatele. Jednodušší a energeticky méně náročná recyklace železobetonových konstrukcí.

## Stav řešení za druhý rok – Etapy 3 - 4

Během druhého roku řešení došlo k opětovné podpoře grantu SGS ČVUT. Proběhly zkoušky v neutrální solné mlze, které byly doplněny odtrhovými zkouškami. Dále byly provedeny zkoušky soudržnosti pull-out test na Kloknerově ústavu, a to v pěti souborech betonování, celkem na 60-ti zkušebních tělesech. Začátkem roku byla do programu disertační práce doplněna další povrchová úprava galvanickým zinkováním, která byla podrobena chemickým laboratorním zkouškám a mikroskopickému zkoumání (Etapa 1 a 2). Byly zahájeny přípravy na zkoušku beam test podle RILEM RC 5. Pro tuto zkoušku jsou kompletně připraveny formy, nyní se projednává vlastní betonová vsádka.

Vzhledem ke složitosti realizace a vyhodnocení elektrochemického korozního chování došlo k výraznému prodloužení pro dokončení článku do impaktovaného časopisu Surface and Coatings Technology (WoS – Q1). Z toho důvodu je připravován další článek do časopisu Construction and Building Materials (Elsevier Scopus – Q1), v němž bude popsáno reálné měření elektronového potenciálu ve skutečných podmínkách, tj. v čerstvém betonu a dále během jeho zrání po dobu 28 dní, které započne začátkem září.

Byly rozpracovány i pozdější etapy vztahující se k environmentálnímu dopadu používání povlakované ocelové výztuže do betonu. Hlavním zjištěním je vysoká míra recirkularity celého procesu povlakování. Povlakovaná ocel je zcela recyklovatelná a v provozech je snaha o dosažení recirkulární ekonomiky ve smyslu doporučení IPCC 0. Metalurgickými procesy se opět získá ocel a zinek/nikl v takové podobě, že je lze opakovaně použít. Odpady v provozech zabývajících se povlakováním oceli jsou na zanedbatelně nízké úrovni. Standardem současných moderních provozů je vysoká míra čištění a opětovného využití všech používaných roztoků a slitin. Nastupujícím trendem je recyklace betonu spočívající v adici předdrceného betonu jako složky částečně nahrazující kamenivo v novém betonu. Takto vytvořený beton má nižší krychelnou pevnost, proto se využívá na základy, podlahy či stěny. Úspora nákladů použitím recyklátu v betonu se pohybuje od 10 do 35 % 0. V případě železobetonové konstrukce tvořené povlakovanou ocelovou výztuží lze vzhledem k její možné subtilitě předpokládat snazší rozdrcení recyklátu a jeho nižší kontaminaci oxidy železa, což jsou z hlediska cirkulární ekonomiky vlastnosti spíše příznivé.

Odpověď na letitou otázku použitelnosti žárového zinkování jako protikorozní ochrany betonářské výztuže nastiňuje nedávno vydaná norma ČSN EN 10348-2 (duben 2022), která specifikuje druh ocelové výztuže vhodné k aplikaci žárově zinkovaného povlaku s odkazem na evropskou normu EN 10080. Tato norma se soustředí na různé typy ocelové výztuže vhodné do betonu, avšak neřeší problematiku chemického složení oceli, která je přitom pro výslednou

kvalitu a trvanlivost povlaku žárového zinku zásadní. Norma ČSN EN 10348-2 proto odkazuje na dílčí informace v normě EN ISO 14713-2:2009, kde je tabulce č. 1 uveden vliv chemického složení oceli na výslednou kvalitu povlaku žárového zinku s ohledem na celkový obsah křemíku a fosforu.

Dále norma ČSN EN 10348-2 stanovuje postup povlakování v souladu s normou EN ISO 1461 a možnost její aplikace jak na výrobky konečné, tak na výrobky před dalšími pracovními operacemi (např. dělením, svařováním, ohýbáním). Z pohledu mé práce považuji za významné ustanovení normy doporučující realizaci minimální tloušťky výsledného povlaku 85  $\mu\text{m}$  pro výztuže o průměru nad šest milimetrů. Bohužel se ale jedná o jediný parametr určující tloušťku výsledného povlaku. Norma rovněž odkazuje na zkušební metody pro stanovení výšky žebírka a hloubky vtisku podle mezinárodní normy EN ISO 15630-1.

Norma ČSN EN 10348-2 však neřeší spolehlivost nosné konstrukce, pro tu je příslušná norma ČSN EN 1992-1-1 (Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby), tj. Eurokód 2 (EC2). Ten ale v kapitole 3.2 o betonářské oceli explicitně vylučuje povlakované výztuže z platnosti EC2. Dále stanovuje obecné podmínky pro použití výztuží neodpovídajících normě EN 10080 (Ocel pro výztuž do betonu – Svařitelná betonářská ocel – Všeobecně), a to shodu s odstavci 3.2.2 až 3.2.6 a s přílohou C tohoto eurokódu. Odstavce 3.2.2 až 3.2.6 obecně stanovují základní požadavky na vlastnosti betonářských výztuží, příloha C pak požadované vlastnosti betonářských výztuží podrobně popisuje. Vzhledem k explicitnímu vyloučení povlakovaných výztuží z platnosti normy EC2 i z normy EN 10080 budou tyto normy zohledněny v plánovaných výpočtech jako referenční, tj. výpočet tří základních druhů konstrukcí z hlediska mechanického namáhání (desky, membrány a skořepiny) bude proveden pro standardní nepovlakovanou výztuž. Analogicky pak budou provedeny i výpočty s použitím povlakovaných výztuží, a to na základě výsledků experimentů získaných v etapách 1.-4.

## Reference:

- [1]: MAKHLOUF, S. H. Handbook of smart coatings for materials protection, Woodhead Publishing, London 2017.
- [2]: YEOMAN, S.R. Galvanized steel reinforcement in concrete, 2st ed; Elsevier: Canberra, 2004.
- [3]: MUNGER, Ch. G., VINCENT, L. D. Corrosion prevention by protective coatings, NACE, Washington 2014
- [4]: POKORNÝ, Petr. Vliv koroze zinkované oceli na soudržnost s betonem. Korozie a ochrana materiálu. 2012, 56(4), 119-135. Dostupné z: doi:10.2478/v10227-011-0020-9
- [5]: ČERNÝ, L., STRZYŽ, P., MIKOLÁŠ, J. Vliv chemického složení oceli na vlastnosti zároveň zinkovaného povlaku (Prezentace Asociace českých a slovenských zinkoven na konferenci AKI 2012).
- [6]: KUMAR, K. et al. Coatings, Springer, Bern 2020.
- [7]: Swamy, S.N., Koyama, S., Epoxy coated rebars the manacea for steel corrosion in concrete, Constr. Build. Mater., 1989, 3(2), 86-91
- [8]: JONES, Denny A. Principles and prevention of corrosion. 1. University of Nevada: Prentice-Hall, 1996. ISBN 0-13-359993-0.
- [9]: IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In. Global Warming of 1,5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1,5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. O. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lounnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield]
- [10]: SLÁNSKÝ, B., ZELINKA, P., ČERMÁK, J. Beton z recyklovaného kameniva. In: Beton. 2021/1. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/clanky/beton-z-recyklovaneho-kameniva/> [cit. 2023-08-08]