

# OPTIMALIZACE ÚDRŽBY OCHRANNÝCH NÁTĚRŮ PRŮMYSLOVÝCH KOMÍNŮ A CHLADÍCÍCH VĚŽÍ

## OPTIMIZING MAINTENANCE OF PROTECTIVE COATINGS OF INDUSTRIAL CHIMNEYS AND COOLING TOWERS

Jana Marková<sup>a)</sup>, Jan Mlčoch<sup>a)</sup>, Miroslav Sýkora<sup>a)</sup>, Kamil Prešl<sup>b)</sup> a Jan Molnár<sup>b)</sup>

<sup>a)</sup> ČVUT v Praze, Kloknerův ústav

<sup>b)</sup> ČEZ, a. s.

### Abstrakt

Příspěvek se zaměřuje na posouzení vlivu ochranného nátěru na životnost železobetonových komínů a chladících věží. S využitím pravděpodobnostních metod a dat o hloubce karbonatace sledovaných na referenčních plochách je možné predikovat karbonataci a rozvoj koroze výztuže a přizpůsobit plán údržby. Cílem je optimalizovat opravy ochranných nátěrů k zajištění požadavků uvedených v metodických postupech ČEZ, a. s.

### Abstract

The study investigates the effect of protective coatings on the service life of reinforced concrete chimneys and cooling towers. Probabilistic methods and carbonation depth measurements make it possible to predict carbonation ingress and development of corrosion, and adapt maintenance plans. The aim is optimised use of protective coatings to meet the requirements provided in the procedures of ČEZ, a. s.

### Úvod

Železobetonové konstrukce jako komíny a chladící věže (CHV) jsou vystaveny nepříznivým vlivům prostředí. Koroze vyvolaná karbonací betonu jedním z hlavních degradačních faktorů. Během karbonatace dochází vlivem chemických reakcí uhličitánů ze vzduchu a portlanditu obsaženého v betonu k postupnému klesání hodnoty pH betonu krycí vrstvy, což vede k depasivaci výztuže a její korozi. Průběh karbonatace je popsán například ve *fib* Model Code 2010, nebo zvláště pro konstrukce v energetice ve směrnici IAEA [1], kde je uvažován i vliv ochranného nátěru komínu na rychlost karbonatace. V tomto příspěvku jsou s využitím pravděpodobnostních metod optimalizovány náklady spojené s údržbou povrchových částí železobetonových komínů a CHV. V EN 1990 je pro běžné typy konstrukcí včetně průmyslových uvedena návrhová životnost 50 let, v mezinárodním dokumentu ISO se předpokládá životnost 40 let [2].

### Srovnání výsledků monitoringu a teoretických modelů pro rychlost karbonatace

Analýza vychází z dat ze čtyř komínů tepelných elektráren v ČR. Na obr. 1 jsou znázorněny průměrné hodnoty hloubky karbonatace měřené na vnějším povrchu komínů po dobu 50 let. Z naměřených dat je možné odhadnout pravděpodobnostní parametry pro popis rozvoje hloubky karbonatace  $D$ . Data pochází z referenčních ploch umístěných po celé výšce komínů.

Na obr. 1 je naznačen model rychlosti karbonatace pro komíny (každý bod ukazuje průměr  $\mu$  z pěti měření a šipky udávají interval  $\pm$  směrodatnou odchylku  $\sigma$ ) – vychází se ze vztahu:  $D(t) = a \sqrt{t}$ , kde  $t$  je stáří konstrukce v letech. Konstanta  $a = 4,5$  mm/ $\sqrt{\text{rok}}$  byla získána metodou nejmenších čtverců. Model popsáný na obr. 1 nezohledňuje vliv ochranných nátěrů na rychlost karbonatace. Model IAEA [1] zahrnuje vliv nátěru pomocí koeficientů  $\beta$  ( $\beta = 1$  pro konstrukci bez ochranného nátěru,  $\beta = 0,8$  pro konstrukci s funkčním ochranným nátěrem). Tento předpoklad přibližně odpovídá výsledkům uvedeným v [4], kde byly pro ochranné nátěry na akrylátové bázi (obvykle používané pro komíny a CHV) naměřeny přibližně o 20 % nižší hodnoty hloubky karbonatace.

Pro krycí vrstvu betonu a rychlost karbonatace je v tomto případě uvažováno normální rozdělení. Z měření byly získány variační koeficienty pro krycí vrstvu  $V_c = \sigma_c / \mu_c \approx 0,2$  a pro rychlost karbonatace  $V_D(t) = \sigma_D(t) / \mu_D(t) \approx 0,4$ ; časově nezávislý  $V_D$  dobře odpovídá dlouhodobým měřením [3].

### Optimalizace údržby

Studie vychází z předpokladu, že dřík komínu je chráněn vhodným ochranným nátěrem. Údržba železobetonových komínů závisí na životnosti ochranného nátěru. Podle studie [5] lze předpokládat, že nátěr ztratí ochranné vlastnosti po přibližně 15 letech. Obnova nátěru se běžně provádí po 10 letech. Následující scénáře údržby vycházejí z diskusí s provozovateli elektráren:

- Scénář S0 – bez aplikace ochranného nátěru během provozu komínu,
- Scénář S1 – nový nátěr po 10 letech od uvedení do provozu,
- Scénář S2 – nový nátěr po 10 a po 20 letech,
- Scénář S3 – nátěr obnovovaný každých 10 let.

Předpokládaný rozvoj karbonatace podle jednotlivých scénářů je znázorněn na obr. 2a. V souladu s metodikou uvedenou v [6] by měl být komín opraven (obnova krycí vrstvy v poškozených oblastech, očištění povrchu konstrukce pískováním a nanesení nového ochranného nátěru na celý povrch komínu), pokud plocha zasažená viditelnou korozi a trhlinami dosáhne 30 % povrchu. Průměrná doba mezi okamžikem, kdy zkarbonatuje krycí vrstva a začne koroze, a okamžikem prokreslení trhlin na povrchu se odhaduje na  $\Delta t \approx 5$  let [7].

Index spolehlivosti pro mezní stav  $c = D(t)$  lze získat z následujícího vztahu:

$$\beta(t) = [\mu_c - \mu_D(t)] / \sqrt{[\sigma_c^2 + (V_D \mu_D(t))^2]}, \quad (1)$$

kde  $\mu_c$  a  $\sigma_c$  značí střední hodnotu a směrodatnou odchylku krycí vrstvy [mm] a  $\mu_D(t)$  je průměrná hodnota hloubky karbonace [mm]. Plochu, která byla zasažena trhlinami způsobenými korozi výztuže, lze získat ze vztahu:

$$a_{kor}(t) = \text{Prob}[c < D(t-\Delta t)] = \Phi[-\beta(t-\Delta t)], \quad (2)$$

kde  $\Phi$  je kumulativní distribuční funkce normalizovaného normálního rozdělení. Na obr. 2b je znázorněna relativní plocha zasažená korozi v závislosti na čase  $t$ ; mezní hodnotou pro zahájení opravy se uvažuje  $a_{kor} = 0,3$ .

### Příklad optimalizace údržby

Optimalizace údržby je provedena podobně jako ve studii [8]. Optimalizace nezahrnuje první nátěr, jeho náklady jsou zahrnuty v nákladech na výstavbu. Uvažují se dva druhy nákladů:

- $C_{plášť}$  – náklady na  $m^2$  obnovení nátěru – odstranění původního a nanesení nového nátěru,
- $C_{koroze}$  – náklady na  $m^2$  odstranění krycí vrstvy v oblastech zasažených trhlinami v důsledku koroze výztuže, očištění výztuže a oprava krycí vrstvy.

Na základě diskusí s provozovateli nejsou uvažovány náklady spojené s neplánovanou odstávkou, neboť opravy komínů se provádějí v období pravidelných (plánovaných) odstávek. Na základě analýzy nákladů se odhaduje  $C_{koroze} / C_{plášť} \approx 10$ . Celkové relativní náklady vztažené k nákladům na jednu aplikaci ochranného nátěru pro scénáře S0-S3 jsou:

$$C_{tot}(t)/(A C_{plášť}) = [n + a_{kor} C_{koroze} / (A C_{plášť})] \approx (n + 7 a_{kor} / A) \quad (3)$$

kde  $A$  je plocha povrchu komína [ $m^2$ ] a  $n$  počet aplikací nátěru během sledovaného období. Nátěr se aplikuje, pokud relativní plocha zasažená viditelnými trhlinami způsobenými korozi výztuže přesáhne mezní hodnotu 0,3.

Obr. 3 znázorňuje relativní náklady na opravy povrchu železobetonového komína v čase  $t$ . Z analýzy vyplývá, že při požadované životnosti komína 40 let je vhodné zvolit scénář S3, pro životnost 50 let scénář S0 a pro životnost 60 let představuje optimální strategii údržby scénář S1.

## Závěr

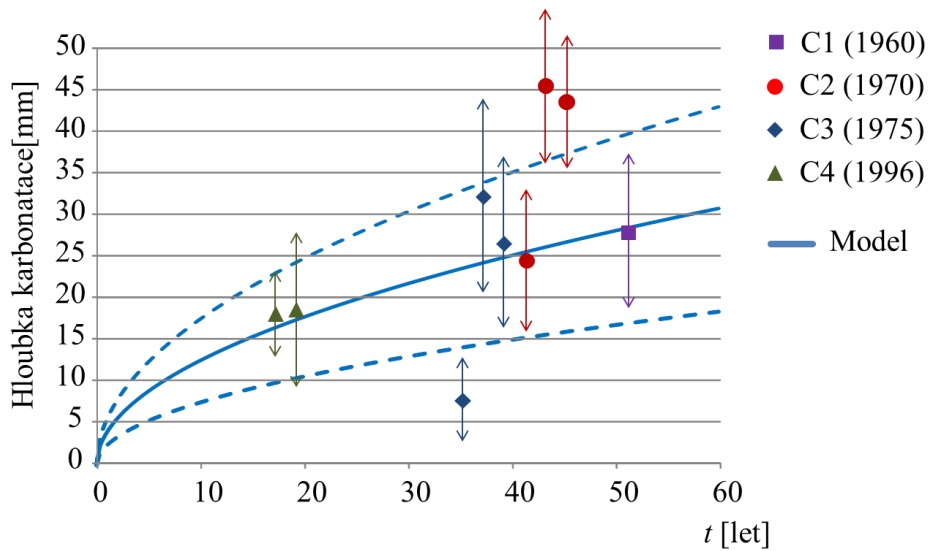
Výsledky studie poskytují podklady pro doporučení na plány údržby rozsáhlých železobetonových konstrukcí. Optimální scénář údržby závisí na požadované životnosti konstrukce (obr. 3). Například scénář, kdy se ochranná vrstva nátěru aplikuje po pravidelně každých 10 let, představuje optimální strategii pro životnost 40 let, která se běžně uvažuje při navrhování průmyslových komínů a CHV. Pro životnost konstrukce 50 let jsou minimální náklady na údržbu dosaženy, naopak k největším nákladům dochází při scénáři, kdy není na konstrukci nátěr obnoven a velká oprava je provedena, až když je 30 % povrchu zasaženo viditelnými projevy koroze.

## Poděkování

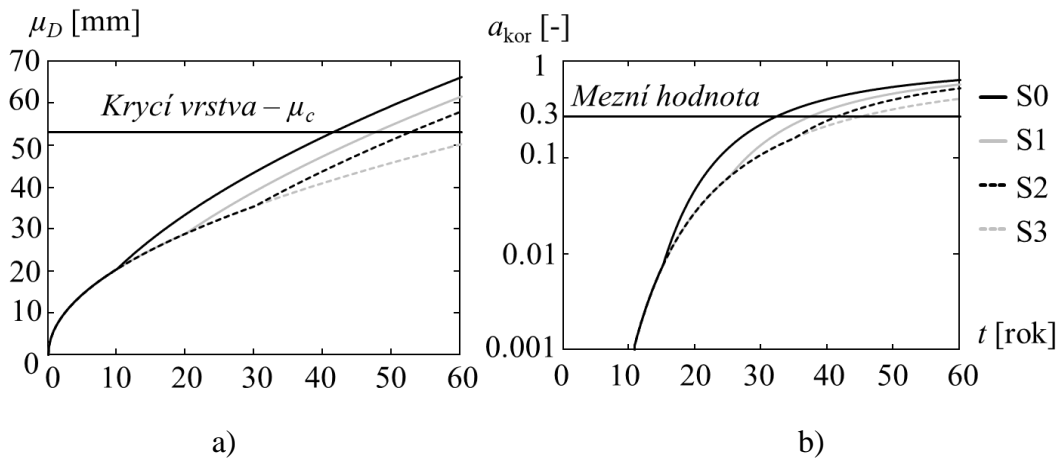
Příspěvek je součástí řešení centra kompetence TA ČR TE01020068 CESEN. Využily se také výsledky projektu SGS18/164/OHK1/2T/31 (Studentská grantová soutěž ČVUT v Praze).

## Literatura

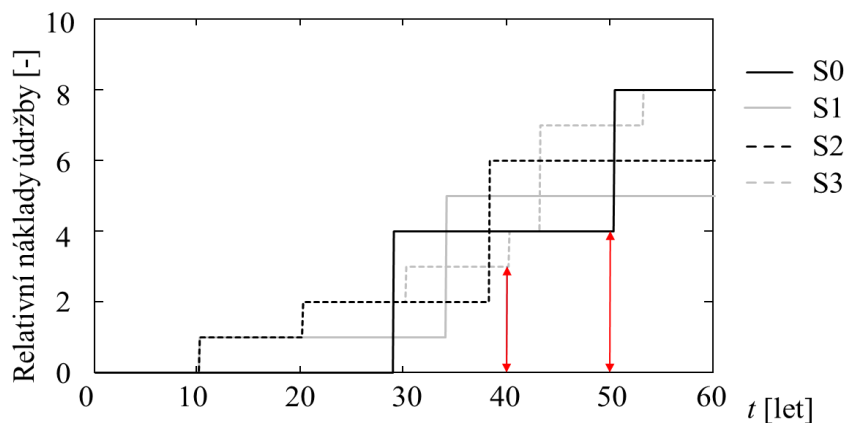
- [1] IAEA (2002): *Guidebook on non-destructive testing of concrete structures*. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- [2] ISO 16204:2012 *Durability — Service life design of concrete structures*.
- [3] Holický, M., Holická, N. (2006): *Probabilistic optimisation of concrete cover exposed to carbonation*. Proc. of the International RILEM-JCI Seminár, Ein-Bokek, Israel 2006, ISBN 2-912143-89-6, pp. 384-393.
- [4] Merah, A., Khenfer, M. M., Korichi, Y. (2015) *The effect of industrial coating type acrylic and epoxy resins on the durability of concrete subjected to accelerated carbonation*. Journal of Adhesion Science and Technology, Vol. 29, No. 22, pp. 2446-2460. doi:10.1080/01694243.2015.1067004
- [5] Mozaryn, T., Kokowska, J. (2009): *The service life of coating systems applied on cooling towers – laboratory study and in-situ investigations*. RILEM Workshop on Long-Term Performance of Cementitious Barriers and Reinforced Concrete in Nuclear Power Plants and Waste Management. ISBN 978-2-35158-072-1
- [6] Marková, J., Sýkora, M. (2014): *Metodické postupy pro odhad životnosti komínů a chladících věží*. Výzkumná zpráva č. 314120J000, Kloknerův ústav, ČVUT v Praze.
- [7] JCSS (2001): *JCSS Probabilistic Model Code*, chapter Environmental Attack (periodically updated, online publication). Joint Committee on Structural Safety. www.jcss.byg.dtu.dk
- [8] Donadio, M., Fiúza, C., Taylor, D. (2013): *Life Cycle Assessment of Repair and Maintenance Solutions for Cooling Towers*, International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2013, Wroclaw University of Technology, Poland.



Obr. 1: Hloubka karbonatice  $D$  v závislosti na stáří konstrukce  $t$  – měření a předpokládaný trend (průměr a směrodatná odchylka  $\pm$ )



Obr. 2: a) Předpokládaný vývoj karbonatice pro scénáře S0-S4, b) závislost relativní plochy povrchu konstrukce zasažené korozi  $a_{kor}$  na čase  $t$



Obr. 3: Relativní náklady na údržbu pro scénáře S0 až S3