

# VYUŽITÍ FYZIKÁLNĚ CHEMICKÝCH METOD PŘI HODNOCENÍ STAVU ŽELEZOBETONOVÝCH KONSTRUKCÍ A NÁVRHU JEJICH SANACE

## APPLICATION OF PHYSICO-CHEMICAL METHODS FOR EVALUATION OF THE REINFORCED CONCRETE STRUCTURES AND DESIGN OF THEIR RECONSTRUCTION

AMOS DUŠKA

*Zkušenosti ze stavební praxe dokazují, že při posuzování a hodnocení stavu železobetonových konstrukcí je i odbornými firmami jednoznačně kladen důraz především na stanovení pevnostních charakteristik betonu, posouzení míry koroze a rozmístění výztuže v hodnocených prvcích. Zjištění těchto údajů je nezbytné pro statické posouzení konstrukce. Z hlediska komplexního posouzení stavu konstrukce jsou ovšem tyto poznatky zcela nedostatečné, a to například proto, že je zcela opomenuto posouzení stavu resp. míry degradace betonu působením chemicky agresivních látek z vnějšího prostředí. Na základě skutečnosti zjištěných pouze zkouškami pevnostních charakteristik betonu není např. možno relevantním způsobem predikovat další životnost konstrukce.*

*The experience from practice shows that evaluation of reinforced concrete structures is based on detection of strength characteristics of concrete, evaluation of corrosion of steel members etc. Notwithstanding some their aspects are marginalized in many cases even by specialized companies. This approach can lead to misleading or to entirely wrong conclusions in some situations because the influence of aggressive matters from environs is ignored. It is impossible to predict lifetime of the structure without knowledge of the results of physicochemical analyses.*

Velmi častým požadavkem stavební praxe je zhodnocení reálného stavu železobetonové konstrukce a prognóza její další životnosti. V tomto kontextu má zásadní význam posouzení betonu nejen z hlediska mechanických vlastností, ale též stanovení míry jeho degradace působením agresivních látek z vnějšího prostředí.

Z hlediska stavu konstrukce, a především její další životnosti, je jednou z podstatných vlastností betonu schopnost

pasivovat výztuž vůči korozi. Tato schopnost je dána zejména alkalitou cementové matrice (tj. veličinou, jejíž hodnota může v důsledku působení agresivních látek výrazně klesat), případně pronikáním agresivních látek do struktury betonu. Korektní posouzení uvedených jevů je možné pouze na základě souboru fyzikálně-chemických analýz.

Využití fyzikálně-chemických metod má nezastupitelnou roli nejen v obdobných případech, ale např. také při zhodnocení dávky pojiva v betonu a míry jeho hydratace. Významnou roli sehrávají fyzikálně-chemické analýzy rovněž v oblasti sanace železobetonových konstrukcí.

Z uvedeného tedy jednoznačně vyplývá význam fyzikálně-chemických analýz. Mezi typické příklady, se kterými se v praxi velmi často setkáváme a které bez využití fyzikálně-chemických metod nelze relevantním způsobem řešit, patří zejména:

- posouzení míry degradace betonu působením agresivních látek (např. oxidem uhličitým – karbonatace, oxidem siřičitým – sulfatace),
- posouzení, zda je beton kontaminován cizorodými látkami (např. chloridy – riziko enormní koroze výztuže, oleji – riziko nízké adheze správkových hmot k podkladu),
- stanovení, zda se jedná o beton na bázi portlandského či hlinitanového cementu,
- stanovení dávky cementu a míry jeho hydratace.

Koncepční přístup k řešení některých z uvedených problémů je uveden v kapitole Využití fyzikálně-chemických analýz ve stavební praxi.

### METODICKÉ POSTUPY

#### FYZIKÁLNĚ-CHEMICKÝCH ANALÝZ

Cementová matrice betonu je složitým komplexem jak z hlediska chemického, tak mineralogického. Rovněž tak procesy, ke kterým dochází, je-li tato matrice vystavena působení chemicky agresivních látek, mohou být poměrně složité.

Pro korektní stanovení míry degradace

betonu, posouzení jeho kontaminace cizorodými látkami či stanovení dalších specifik je nezbytné realizovat komplex fyzikálně-chemických stanovení. Výsledky jednotlivých analýz se vzájemně doplňují a rozšiřují. Volbu, které z uvedených analýz budou při posuzování hodnocené konstrukce použity, je nutno provést s ohledem na charakter prostředí, v němž se daná konstrukce nachází (zejména s ohledem na koncentraci a druh agresivních látek v prostředí atd.) a specifika konstrukce (tzn. konstrukční uspořádání, materiálovou skladbu apod.).

### Příprava vzorků

Mají-li být fyzikálně-chemickými analýzami získávány relevantní údaje skutečně vypovídající o reálném stavu hodnoceného materiálu či konstrukce, jednou ze základních podmínek je volba vhodné metodiky odběru a přípravy vzorků. Vzhledem ke specifikům a šíři problematiky hodnocení stavu stavebních konstrukcí nelze stanovit obecně platný předpis pro odběr vzorků z dané konstrukce.

V případě hodnocení železobetonových konstrukcí lze s výhodou aplikovat postupy deklarované v odborné literatuře, např. v TP SSBK II [1], případně v [4]. V každém případě je nutno metodiku volby míst odběru vzorků z jednotlivých konstrukčních prvků a jejich četnost citlivě modifikovat s ohledem na charakter hodnocené konstrukce.

V naprosté většině případů je logickým požadavkem stanovit nejen stav povrchových vrstev konstrukce, ale též hloubku narušení betonu, a to zejména stav betonu v bezprostředním okolí výztuže apod. V těchto případech lze vzorky pro fyzikálně-chemické analýzy velmi výhodně připravovat z jádrových vývrtů rozdělených na dílčí vzorky reprezentující beton z předem zvolených „hloubek“ od povrchu hodnocené konstrukce. Analogickým způsobem lze připravovat vzorky pro stanovení míry kontaminace materiálu cizorodými látkami. Metoda, kdy jsou vzor-

ky z hodnocené konstrukce odebírány ve formě prášku vrtáním pomocí vidiového vrtáku z definovaných hloubek, je výhodná svou operativností a nízkými nároky na vybavení. Tato metoda je však limitována faktem, že tímto způsobem odebraný vzorek nemusí zcela reprezentovat hodnocený materiál (např. neadekvátní obsah kameniva ve vzorku).

#### FYZIKÁLNĚ-CHEMICKÉ ANALÝZY

Vzhledem ke složitosti problematiky hodnocení stavu resp. míry degradace železobetonu je velmi obtížné striktně formulovat rozsah a druhy fyzikálně-chemických analýz, které by byly obecně platné pro všechny typy stavebních konstrukcí.

Metodiku a rozsah zkoušek je třeba vždy vhodným způsobem modifikovat s ohledem na charakter hodnocené konstrukce. Mezi základní fyzikálně-chemické analýzy, na základě kterých lze posoudit stav hodnoceného betonu, patří především:

- **chemický rozbor** – skupina metod sloužících pro stanovení obsahu jednotlivých prvků či sloučenin v hodnoceném betonu,
- **rentgenová difrakční analýza** (RTG analýza) – lze jí stanovit přítomnost krystalických fází (minerálů), případně krystalických korozních novotvarů vznikajících v mikrostruktuře hodnoceného betonu,
- **diferenční termická analýza** (DTA analýza) – slouží především pro kvantifikaci obsahu jednotlivých fází v hodnoceném betonu,
- **stanovení pH betonu ve výluhu** – hodnota pH je jednou z veličin, dle níž lze posoudit míru degradace betonu. Má význam především z hlediska schopnosti betonu pasivovat výztuž vůči korozi.

Uvedené metody patří mezi základní analýzy při hodnocení stavu a míry korozního narušení betonu.

Při predikci životnosti železobetonových konstrukcí v daných podmínkách sehrává rovněž významnou roli kapilárně pórovitá struktura betonu, jejímž charakterem je determinováno pronikání agresivních látek do struktury betonu, resp. jejich účinek na beton. Pro hodnocení kapilárně pórové struktury lze využít např. metody vysokotlaké rtuťové porozitmetrie.

Praktické zkušenosti ovšem ukazují, že v oblasti hodnocení cementových kompozitů lze výhodněji využít metod optické příp. konfokální mikroskopie. Význam-

nou roli při hodnocení stavebních materiálů rovněž v mnoha případech sehrává rasťovací elektronová (metoda REM), případně transmisní elektronová (metoda TEM) mikroskopie. Předností této metody je schopnost analyzovat materiál s extrémním zvětšením a současně získávat údaje o prvkovém složení daného vzorku. Prakticky nezastupitelnou roli tato metoda sehrává např. při identifikaci drobných cizorodých částic znehodnocujících povrchy stavebních výrobků. V případě hodnocení míry degradace cementových kompozitů má význam spíše doplňkového stanovení.

#### VYUŽITÍ FYZIKÁLNĚ-CHEMICKÝCH ANALÝZ VE STAVEBNÍ PRAXI

Význam fyzikálně-chemických analýz v oblasti posuzování stavu, resp. životnosti, případně zpracování návrhu jejich sanace lze ilustrovat na následujících příkladech.

#### Posouzení míry degradace betonu a predikace jeho další životnosti

Vody s vysokým obsahem síranů způsobují u železobetonových konstrukcí tzv. korozi II., příp. korozi III. typu.

Z hlediska životnosti železobetonových konstrukcí v mnoha případech mívá razantnější důsledky koroze III. typu. Tento typ koroze je charakterizován vznikem korozních novotvarů (především ettringit, příp. monosulfát, v extrémních případech sádrovec) v mikrostruktuře betonu. V počátečních fázích jsou korozními novotvary postupně vyplňovány dutiny a póry, čímž se zvyšuje hutnost betonu, a tím vzrůstají jeho pevnostní charakteristiky (zejména pevnost betonu v tlaku). Nárůst pevnosti je ovšem limitován okamžikem, kdy jsou póry zcela vyplněny a vznikající novotvary počnou ve struktuře betonu generovat expanzní tlaky, které jsou následně příčinou vzniku mikrotrhlin v materiálu a v extrémních případech pak mohou být příčinou jeho destrukce.

Pokud by byla takto zasažená konstrukce posuzována pouze na základě stanovení pevnostních charakteristik, reálně může nastat tato situace: zkoušky budou realizovány v okamžiku, kdy korozními novotvary bude právě zaplněna pórová struktura, tj. beton bude dosahovat de facto svých maximálních pevností. Konstrukce tedy bude hodnocena jako vyhovující. Zcela opominuto zůstane riziko, že další působení síranů z vnějšího prostředí se již pro-

jeví poklesem pevnosti, v extrémních případech dokonce destrukcí betonu. Tento případ tedy jednoznačně dokumentuje situaci, kdy posouzení konstrukce pouze na základě stanovení pevnostních charakteristik může vést ke zcela nepřesným závěrům. Rovněž je zřejmé, že predikce další životnosti konstrukce je bez realizace fyzikálně-chemických analýz prakticky nemožná [2].

#### Posouzení, zda je beton na bázi hlinitanového, či portlandského cementu

V období třicátých až šedesátých letech 20. století byl v Československé republice při výstavbě železobetonových konstrukcí používán hlinitanový cement. Zcela zásadní nevýhodou tohoto cementu je ovšem skutečnost, že vznikající hydratační produkty jsou za běžných atmosférických podmínek nestabilní a dochází k jejich tzv. „konverzi“ (této problematice je v řadě publikací věnována značná pozornost, proto zde není detailně popisována). Důsledkem konverze je pak pokles pevnostních charakteristik betonu, který může vést až ke kolapsu celé konstrukce. Matrice vznikající hydratací hlinitanového a portlandského cementu se vzájemně liší jak chemickým, tak mineralogickým složením. Z hlediska chemického složení je v hodnocených betonech významný zejména obsah resp. poměr oxidu vápenatého (CaO) a oxidu hlinitého (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Obsah těchto oxidů je stanovován chemickým rozбором.

Dominuje-li v hodnoceném betonu oxid vápenatý, byl pravděpodobně použit portlandský cement. V případě, že je obsah oxidu vápenatého přibližně srovnatelný s obsahem oxidu hlinitého, lze předpokládat, že byl použit hlinitanový cement.

Toto zjištění formulované na základě chemického rozboru se jeví korektní pouze zdánlivě, a to např. vzhledem k následujícím okolnostem: v betonu mohlo být použito kamenivo s vysokým obsahem uhličitánu vápenatého (např. dolomitické kamenivo). Obsah CaO v tomto případě nesouvisí pouze s druhem a dávkou cementu, ale především s typem použitého kameniva. Eventuálně mohlo být použito kamenivo s vysokým obsahem jílových minerálů (tj. minerálů s relativně vysokým obsahem Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Analogicky jako v předchozím případě i zde obsah Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nesouvisí pouze

s druhem a dávkou cementu, ale především s typem použitého kameniva.

Z uvedeného je zřejmé, že při hodnocení, zda je beton na bázi portlandského, či hlinitanového cementu, je chemický rozbor v mnoha případech nedostačující a musí být doplňován analýzami umožňujícími posoudit též mineralogické složení matrice betonu. K tomuto účelu se využívá rentgenová difrakční analýza. V případě, že je nutno u hlinitanového cementu kvantifikovat obsah fází, vznikajících konverzí matrice (tzv. stupeň konverze), je nutno též stanovit obsah jednotlivých minerálů ve vzorku např. pomocí diferenční termické analýzy [2].

### Posouzení dávky a míry hydratace cementu

V některých případech nastává problém, kdy po provedené betonáži beton neodpovídá požadované pevnostní třídě. Jednou z možných příčin této skutečnosti je podkročení deklarované dávky cementu, případně v důsledku působení nepříznivých vlivů (příliš rychlé „vyschnutí“ betonu, mráz apod.) nedošlo k jeho řádné hydrataci.

Základní charakteristikou pro stanovení velikosti dávky cementu je chemický rozbor, především stanovení obsahu oxidu vápenatého v betonu. Pouze na základě chemického rozboru ovšem nelze množství použitého cementu jednoznačně určit, neboť analogicky jako v předchozím případě by obsah CaO mohl být zkreslen použitím kameniva s vysokým obsahem oxidu vápenatého.

Pro stanovení míry hydratace cementu je nezbytné určit přítomnost slínekových minerálů, resp. kvantifikovat jejich obsah. K tomuto účelu je využívána rentgenová difrakční analýza (kvalitativní stanovení) doplněná diferenční termickou analýzou (kvantitativní stanovení) [2].

### Posouzení míry kontaminace betonu ropnými látkami (oleji)

Některé železobetonové konstrukce jsou vystaveny působení ropných látek (olejů). Typickým příkladem tohoto typu konstrukcí jsou podlahy v průmyslových halách.

Při provozu haly dochází k únikům olejů z nainstalovaných technologií. Beton je tedy vystaven dlouhodobému působení olejů, které pronikají do jeho struktury. V extrémních případech je beton (zejména beton tvořící povrchové vrstvy podlah) těmito oleji zcela saturován. Oleje

pronikající do betonu (resp. některé látky v nich obsažené) mohou způsobovat postupnou degradaci cementové matrice spojenou s destrukcí povrchových vrstev betonu. Sanace takto zasažených konstrukcí je významným problémem. Je nezbytné stanovit obsah ropných látek v betonech, a to jednak z důvodu zařazení odstraňovaných vrstev betonu do příslušné kategorie odpadu, ale především s ohledem na fakt, že beton kontaminovaný oleji musí být před aplikací správkových materiálů adekvátním způsobem ošetřen v závislosti na míře zasažení oleji, eventuálně musí být použity materiály vhodné na takto zasažený podklad.

Posouzení přítomnosti resp. míry kontaminace betonu oleji je možno provést buď chemickým rozbohem, případně pomocí diferenční termické analýzy. Stanovení obsahu olejů v betonu chemickým rozbohem má vysokou míru citlivosti, nevýhodou této metody je relativně vyšší časová náročnost. Naopak stanovení obsahu olejů v betonech diferenční termickou analýzou je vysoce operativní. Toto stanovení je založeno na detekci typické exotermní prodlevy související s oxidací („vyhoříváním“) olejů přítomných v analyzovaném betonu. Velmi výhodné je používat obě uvedené metody, přičemž jejich výsledky se vzájemně kombinují a doplňují.

### Stanovení původu cizorodých částic v betonu

Jedním z defektů, jehož příčinu nelze bez využití fyzikálně-chemických metod spolehlivě a korektně stanovit, jsou závady, kdy povrch konstrukce příp. výrobku je znehodnocen výskytem cizorodých částic. V některých případech (např. jsou-li tyto částice malých rozměrů) je zásadním problémem z hodnocení povrchu cizorodý materiál odebrat a získat tak dostatečně reprezentativní („čistý“) vzorek. Při odběru vzorku dochází ke kontaminaci okolním materiálem a tato okolnost ztěžuje identifikaci cizorodých částic a určení jejich původu. Metodou, která tyto negativa eliminuje, je elektronová rastrovací mikroskopie. Její extrémní rozlišovací schopnost umožňuje identifikovat i velmi drobné cizorodé částice a současně stanovit jejich prvkové složení bez toho, aby tyto částice bylo nutno separovat z okolního materiálu. Z povrchu znehodnoceného výskytem cizorodých částic postačí tedy vyjmout (např. vyříznout)

#### Literatura:

- [1] Drochytka R., Dohnálek J., Bydžovský J., Pumpl V.: Technické podmínky pro sanace betonových konstrukcí TP SSBK II, Sdružení pro sanace betonových konstrukcí, Brno 2002
- [2] Bydžovský J., Dufka A.: Využití fyzikálně-chemických diagnostických postupů při hodnocení stavu železobetonových konstrukcí, Sanace a rekonstrukce staveb 2007, konference WTA, p. 178-185, Ostrava 2007
- [3] Dobrý O., Palek L.: Korozie betonu ve stavební praxi, Praha 1998
- [4] Matoušek M., Drochytka R.: Atmosférická korozie betonů, IKAS Praha 1998

vzorek materiálu vhodné velikosti včetně cizorodé částice a přímo jej podrobit elektronové mikroskopii.

#### ZÁVĚR

Tématem předkládaného článku je využití fyzikálně-chemických metod v oblasti diagnostiky stavebních materiálů. Na praktických příkladech je dokumentován význam a nezastupitelná role těchto analýz při hodnocení stavu a míry degradace stavebních materiálů. Fyzikálně-chemické analýzy mají význam nejen při posuzování reálného stavu konstrukcí, ale též při predikci jejich životnosti, a to zejména u konstrukcí, které jsou vystaveny chemicky agresivním prostředím. Podstatnou roli sehrávají výsledky těchto analýz také při optimalizační technologii sanace s ohledem na reálné podmínky využití konstrukce.

Práce byla řešena s podporou VVZ MSM 0021630511 „Progresivní stavební materiály s využitím druhotných surovin a jejich vliv na životnost konstrukcí“, GAČR 103/08/0145 „Vývoj stříkaných betonů určených pro expozici v extrémních podmínkách“.

Text článku byl posouzen odborným lektorem.

Ing. Amos Dufka, Ph.D.  
Vysoké učení technické v Brně  
Fakulta stavební  
Ústav technologie hmot a dílců  
tel.: 541 147 514, fax: 541 147 502  
e-mail: dufka.a@fce.vutbr.cz