

VLIVY PROSTŘEDÍ NA KOROZI BETONU Z POHLEDU CHEMICKÝCH REAKCÍ ■ ENVIRONMENTAL EFFECT ON CONCRETE CORROSION IN TERMS OF CHEMICAL REACTIONS

Pavla Rovnaníková

V článku je uvedena klasifikace korozního působení fyzikálních, chemických a biologických vlivů na beton. Je popsána koroze cementového tmelu a některých druhů kameniva. Korozní procesy jsou uvedeny ve vztahu k stupňům vlivu prostředí podle normy ČSN EN 206. ■ Classification of the physical, chemical and biological corrosion of concrete is presented in the paper. Corrosion of cement stone and some types of aggregates is described. Corrosion processes are specified in relation to the levels of environmental influence according to ČSN EN 206 standard.

Koroze (degradace) je definována jako nezáměrné rozrušování materiálů. Beton je kompozitní materiál, v kterém může korozi podlehnout cementový tmel, ale také některé druhy kameniva. Cementový tmel v betonu je tvořen produkty hydratace cementu, tj. hydroxidem vápenatým a hydratovanými slínkovými minerály. Kamenivo v betonu, které obsahuje některé reaktivní složky, jako je amorfní oxid křemičitý (opály, chalcedony, silicity), vápenec, dolomit a také zrna pyritu, rovněž podléhá degradaci.

Korozi cementového tmelu v betonu lze podle druhu působení rozdělit do tří skupin na:

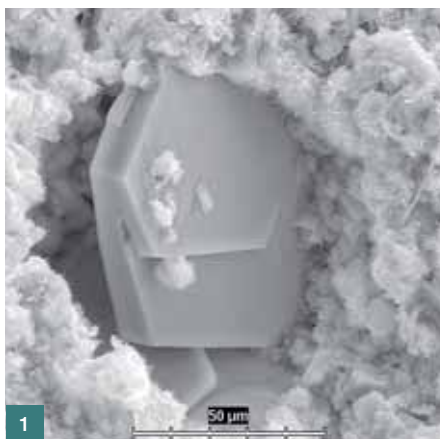
- korozi fyzikální – mechanické vlivy, krystalizační tlaky solí, teplota,
- korozi chemickou – plynné agresivní látky z ovzduší, roztoky kyselin, zásad a solí, organické látky,
- korozi biologickou – mechanické působení kořenů rostlin, chemické působení produktů životních pochodů živočichů, působení mikroorganismů.

Nutno zdůraznit, že tyto procesy jsou časově závislé a ve většině případů jsou vzájemně propojeny.

Základní složky směsi pro výrobu betonu představuje portlandský cement (s označením CEM I) nebo směsné cementy (s označením CEM II až VI), kamenivo, jež lze použít hutné, pórovité nebo recyklát, a voda, která musí vyhovovat ČSN EN 1008. Kromě základních složek může beton obsahovat přísady (plastifikační, provzdušňovací, těsnící, urychlující nebo zpomalující tuhnutí aj.) a reaktivní či nereaktivní příměsi, které částečně nahrazují cement, zejména portlandský (popílky, vysokopepční struska, zeolity, cihelný prach, přírodní pucolány apod.). Vliv příměsí na chemické vlastnosti cementového tmelu, zejména na obsah hydroxidu vápenatého, je diskutován v [1]. Beton bývá ve většině případů vyztužený, a to ocelovou výztuží ve formě prutů nebo rozptýlenou výztuží ve formě krátkých vláken (ocelové drátky, PP vlákna, skleněná alkalivzdorná vlákna, vlákna z různých přírodních materiálů).

Produktem hydratace cementu jsou hydratované slínkové minerály, tj. křemičitany a hlinitany vápenaté s vysokým obsahem vápníku (CSH, CAH), významnou složkou je hydroxid vápenatý, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, který cementovému tmelu udílí zásaditou reakci ($\text{pH} \sim 12$).

Velmi důležitým faktorem v odolnosti betonu proti korozním vlivům je jeho pórová struktura. Z mineralogického složení lze přibližně spočítat teoretickou spotřebu vody pro daný typ cementu, obvyklá teoretická hodnota vodního součinitele se pohybuje v rozmezí $w/c = 0,2$ až $0,25$. Pro praktické účely se pak používá hodnota od $0,35$ do $0,65$ podle toho, pro jaký účel je



Obr. 1 Krystaly portlanditu (hydroxidu vápenatého) v hydratačních produktech cementu, foto: P. Bayer ■
Fig. 1 Crystals of portlandite (calcium hydroxide) in the cement hydration products, photo: P. Bayer

směs připravena a zda byly, nebo nebyly použity přísady snižující spotřebu záměsové vody.

Ztvrdlý beton obsahuje:

- pevnou fázi – hydratované slínkové minerály, krystaly hydroxidu vápenatého (portlanditu) (obr. 1), zbytky nehydratovaných zrn cementu a kamenivo,
- kapalnou fázi – nasycený roztok hydroxidu vápenatého,
- plynnou fázi – vzduch.

NORMATIVNÍ DOKUMENTY

Vlivem prostředí na poškození betonu se zabývá norma ČSN EN 206 [2] a doplňuje ji norma ČSN P 73 2404 [3]. V normách je uvedena definice korozního prostředí, jeho označení a stupeň a informativní příklady výskytu stupně vlivu prostředí.

Fyzikální působení je hodnoceno z hlediska mrazu a použití rozmrazovacích prostředků, mechanické namáhání je omezeno na obrus a otluk, další fyzikální degradační procesy zahrnuté nejsou.

Norma popisuje chemické poškození betonu, a to jak plyným, tak kapalným agresivním prostředím. Z chemického působení norma zahrnuje karbonataci a působení kapalného prostředí podzemní vody a rostlé zeminy, pro něž definuje mezní hodnoty obsahu agresivních látek pro jednotlivé kategorie.

Biologické působení na beton není v normě zahrnuto ani z hlediska chemického působení produktů životních pochodů živých organismů.

FYZIKÁLNÍ KOROZE

Mezi fyzikální faktory porušující strukturu betonu patří mechanické namáhání související s nárazy, třením, proudící vodou a abrazí jemnými částicemi. Tyto děje mají za následek postupné porušování cementového tmelu a jeho odstraňování, což dále vede k obnažení kameniva a jeho uvolnění. Do této kategorie lze zařadit také biologickou korozi působením kořenů rostlin.

Dalším významným fyzikálním faktorem jsou vysoké, nebo naopak nízké teploty. Od teploty $100\text{ }^\circ\text{C}$ se rozkládají hydratované sloučeniny za uvolnění vody, po zahřátí betonu na $1\,000\text{ }^\circ\text{C}$ je zbytková pevnost asi 10% , vztaženo k 28dennímu pevnostem. Od $600\text{ }^\circ\text{C}$ se rozkládá uhličitán vápenatý, ať je přítomen ve formě kameniva nebo příměsí. Tento rozklad může vést až k úplnému rozpadu betonu.

Naopak nízké teploty pod 0 °C způsobují přechod kapalné vody v led, což je spojeno s nárůstem objemu o cca 9 %. Krystalizační tlak, který se vyvine při vzniku ledu a působí na stěny pórů, dosahuje hodnoty až 200 MPa.

S působením krystalizačního tlaku je spojeno také používání rozmrazovacích prostředků (NaCl), kdy roztok NaCl, vzniklý při aplikaci soli na ledovou vrstvu, penetruje do pórů cementového tmelu a následně při vhodných teplotně vlhkostních podmínkách NaCl vykristalizuje a na stěny pórů vyvine tlak 55 MPa. Uvedené děje fyzikálního působení na beton vedou často až k jeho rozpadu.

CHEMICKÁ KOROZE

Chemická koroze betonu zahrnuje:

- působení plynů z atmosféry (atmosférická koroze),
- působení látek v kapalném prostředí (podzemní vody, náporové vody vodních staveb, vlhkost zeminy).

Agresivní látky z atmosféry nebo z kapalného prostředí jsou příčinou změn v cementovém tmelu. Jedná se zejména o látky kyselého charakteru a některé druhy anorganických solí. Rychlost korozních reakcí je ovlivněna pórozitou cementového tmelu v betonu a koncentrací korozních látek u povrchu betonu. Vznikající nerozpustné a málo rozpustné látky v první fázi zaplňují ústí pórů, zpevňují tak povrchovou vrstvu betonu a částečně brání vnikání dalších podílů korozních látek do hmoty betonu. V druhé fázi je korozní rychlost určována difúzí agresivních látek touto vrstvou do betonu.

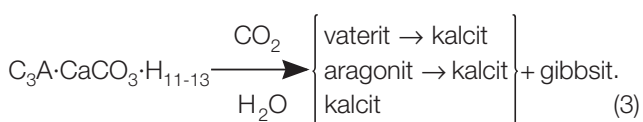
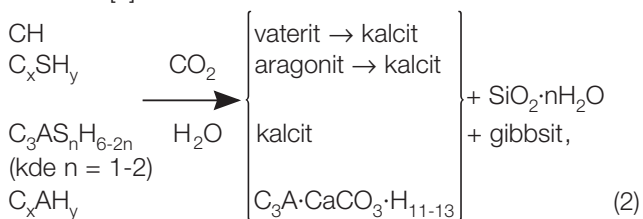
Všechny druhy chemické koroze souvisejí se snížením obsahu hydroxidu vápenatého v betonu, a mají proto zásadní vliv i na průběh koroze ocelové výztuže v betonu.

Atmosférická koroze

Atmosférická koroze je způsobena plynnými látkami obsaženými v okolní atmosféře. Jedná se o kyselé plyny, které s vodou tvoří kyseliny. Zatímco CO₂ je součástí atmosféry (průměrná koncentrace je 0,038 % obj.), koncentrace ostatních kyselých plynů (SO₂, NO_x) je výrazně omezena zákonem o ochraně ovzduší [4]. Kyselé plyny v přítomnosti vody nebo vlhkosti reagují přednostně s hydroxidem vápenatým, vzniklým při hydrataci silikátových slínekových minerálů, dochází k snížení koncentrace OH⁻ iontů, a tedy k snížení zásaditosti prostředí v okolí ocelové výztuže. Největší pozornost je věnována reakci s CO₂, tzv. karbonataci. Nejprve je neutralizován hydroxid vápenatý podle rovnice:



Po spotřebování Ca(OH)₂ reaguje CO₂ s hydratovanými slínekovými minerály. Schéma karbonatace betonu vytvořil Matoušek [5]:



Podle [5] a [6] probíhá karbonatace ve čtyřech stádiích.

V prvním stadiu karbonatuje hydroxid vápenatý a vzniklý jemnozrný CaCO₃ částečně zaplňuje póry; to vede k vyšší hutnosti tmelu, vyšší odolnosti proti působení agresivních látek a k výhodnějším mechanickým vlastnostem. V druhém stadiu reagují s CO₂ hydratované slínekové minerály podle výše uvedených rovnic. Vznikají modifikace CaCO₃ (kalcit, vaterit, aragonit) krystalizující ve velmi jemné formě a zůstávají v pseudomorfózách po hydratačních produktech cementu. Hrubostranné krystaly CaCO₃ se vyskytují jen ojediněle, mechanické vlastnosti betonu se nemění. V třetím stadiu se přítomný CO₂ spolu s vlhkostí prostředí podílí na rekrystalizaci CaCO₃, vznikají velké krystaly kalcitu a aragonitu a následkem toho se zhoršují mechanické vlastnosti betonu. V čtvrtém stadiu prostupují krystaly kalcitu a aragonitu cementový tmel, výrazně se zhoršují mechanické vlastnosti a může dojít až k ztrátě soudržnosti betonu. V průběhu karbonatace postupně klesá koncentrace OH⁻ iontů v betonu a snižuje se hodnota pH. V čtvrtém stadiu může nastat úplná absence Ca(OH)₂, pH výluhu se sníží až na hodnotu 8,3, čímž je ocelová výztuž výrazně ohrožena korozi.

Průběh karbonatace ovlivňuje propustnost betonu závislejší na poměru použitých složek při jeho výrobě: druhu a množství cementu, typu a granulometrii kameniva a zejména na vodním součiniteli. Důležitou roli hraje rovněž zpracování a ošetřování čerstvého betonu při jeho ukládání. Průběh karbonatace je ovlivněn také okolními podmínkami, tj. teplotou, vlhkostí vzduchu a obsahem CO₂.

Atmosférickou korozi betonu oxidem siřičitým studoval Drochytka [6], který zjistil, že konečným produktem působení oxidu siřičitého na beton je CaSO₄·2H₂O.

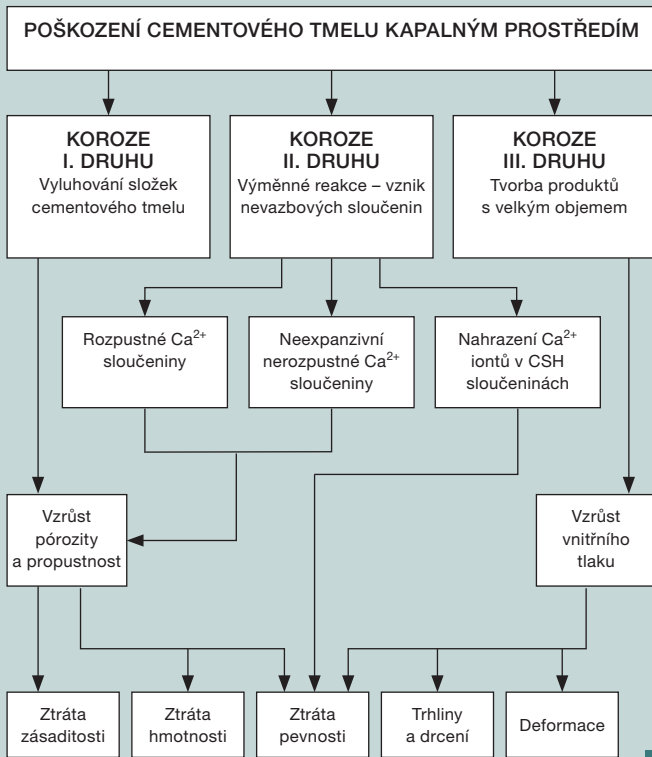
Atmosférická koroze betonu je dlouhodobě studována mnoha badateli, byla vytvořena řada matematických modelů pro průběh karbonatace, a to jak deterministických, tak pravděpodobnostních, např. v [7] až [12].

Koroze kapalným agresivním prostředím

Voda dobře smáčí hydrofilní povrch betonu i povrch kapilárních pórů, a tím může vnést na povrch a do pórové struktury agresivní látky reagující se složkami cementového tmelu. Tyto reakce vedou k ztrátě zásaditosti, poškození betonu a v některých případech až k jeho rozpadu, zejména povrchové vrstvy. V závislosti na podmínkách prostředí (množství vody, pohyb podzemní vody, změny teploty a vlhkosti) a kvalitě betonu (předně jeho pórové struktury a přítomnosti trhlin) může být poškození betonu kapalným prostředím významné.

Podle povahy vzniklých produktů při styku betonu s kapalným agresivním prostředím se koroze třídí do tří druhů, původně podle Moskvina [13], toto rozdělení přijali i další autoři, např. v [14]. Schéma poškození betonu kapalným agresivním prostředím je uvedeno na obr. 2.

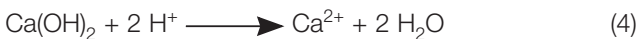
Koroze I. druhu představuje vyluhování hydroxidu vápenatého, který je v cementovém tmelu obsažen jak ve formě nasyceného roztoku, tak ve formě krystalů portlanditu. Vyluhováním se snižuje koncentrace hydroxidových iontů, tedy hodnota pH pórového roztoku. Při vyluhování se uplatňují vody s nízkou přechodnou tvrdostí (nízký obsah vápenatých a hořčnatých iontů). Jedná se o vody srážkové, říční a rybníční. Rychlost vyluhování hydroxidu vápenatého (rozpuštěnost Ca(OH)₂ je 160 mg/100 g vody při 20 °C) závisí na propustnosti betonu pro vodu, u náporové vody na jejím hydrostatickém tlaku. Vyloužený hydroxid vápenatý ve styku se vzduchem karbonatuje podle rovnice (1) a může vytvářet na podhledu betonové konstrukce krápníky nebo na povrchu betonu pevně lpící vrstvu kalcitu (obr. 3).



2

Koroze II. druhu je způsobena výměnnými reakcemi mezi složkami cementového tmelu, zejména $\text{Ca}(\text{OH})_2$, a agresivními látkami působícími na beton. Zahrnuje reakce agresivního $\text{CO}_{2\text{agr}}$, hydroxidů, kyselin, hořečnatých a amonných solí (mimo sírany). Výsledkem jsou buď rozpustné, nebo nerozpustné sloučeniny, které nemají vazebné vlastnosti a nejsou expanzivní.

Kyseliny reagují s hydroxidem vápenatým a dalšími produkty hydratace slínekových minerálů za vzniku příslušných vápenatých solí. Obecně lze reakci $\text{Ca}(\text{OH})_2$ s kyselinou zapsat rovnicí:



a např. reakci s kyselinou chlorovodíkovou rovnicí:



Při $\text{pH} < 4$ dochází již k reakci s hydratovanými slínekovými minerály za vzniku gelu $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ a hlinité a železité soli dané kyseliny. Agresivita kyselin se posuzuje nejen podle jejich disociace a koncentrace, ale také podle druhu reakčních produktů. Rozpustné produkty jsou odplavovány a jsou napadány další podíly cementového tmelu, nerozpustné sloučeniny ulpívají na povrchu hydratačních produktů cementu a částečně brání styku s agresivním prostředím.

Podobně reagují organické kyseliny: v praxi je možno se setkat s kyselinou octovou, mléčnou, máselnou a dalšími zejména v zemědělství, v potravinářském a v chemickém průmyslu.

Ve vodách může být obsažen také oxid uhličitý, který se vyskytuje ve třech formách:

- $\text{CO}_2(\text{aq})$ a H_2CO_3 (asi 1%) při $\text{pH} < 4,5$,
- HCO_3^- při $\text{pH} 4,5$ až $8,3$,
- CO_3^{2-} při $\text{pH} > 8,3$.

Mezi jednotlivými formami CO_2 existuje rovnováha v závislosti na pH a koncentraci přítomných kationů. Agresivní oxid uhličitý $\text{CO}_{2\text{agr}}$ se vyskytuje v prostředí, kde je tato rovnováha porušena jeho nadbytkem. Reaguje pak s hydroxidem vápenatým z cementového tmelu za vzniku nejprve CaCO_3 podle

rovnice (1) a následně se začne CaCO_3 rozpouštět na hydrogenuhličitan podle rovnice:

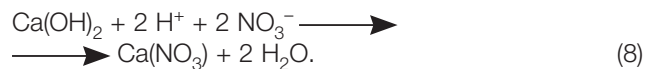


Hydrogenuhličitan vápenatý se vyskytuje pouze v roztoku, za vhodných vlhkostně teplotních podmínek se přemění zpět na CaCO_3 .

Do koroze II. druhu patří také působení hořečnatých a amonných solí a alkalických hydroxidů. Hořečnaté soli silných kyselin ve vodném roztoku hydrolyzují, vzniká nerozpustný $\text{Mg}(\text{OH})_2$ podle rovnice:



a uvolněné H^+ ionty neutralizují $\text{Ca}(\text{OH})_2$ podle rovnice (8), vzniká dobře rozpustný dusičnan vápenatý:

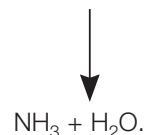


Obr. 2 Klasifikace koroze betonu | Fig. 2 Classification of corrosion types

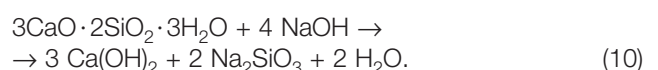
Obr. 3 Výluz z betonu po karbonataci | Fig. 3 Leach from the concrete after carbonation



Amonné soli ve styku s OH^- ionty, přítomnými v cementovém tmelu, uvolňují plynný amoniak NH_3 a současně vzniká rozpustný dusičnan vápenatý podle rovnice:



Koncentrované roztoky alkalických hydroxidů (KOH , NaOH) reagují s hydratovanými slínekovými minerály za vzniku rozpustných křemičitanů a hlinitanů, a tím dochází k úplnému rozpadu pojivové složky betonu. Hydratované silikáty vápenaté se rozpouštějí podle rovnice:



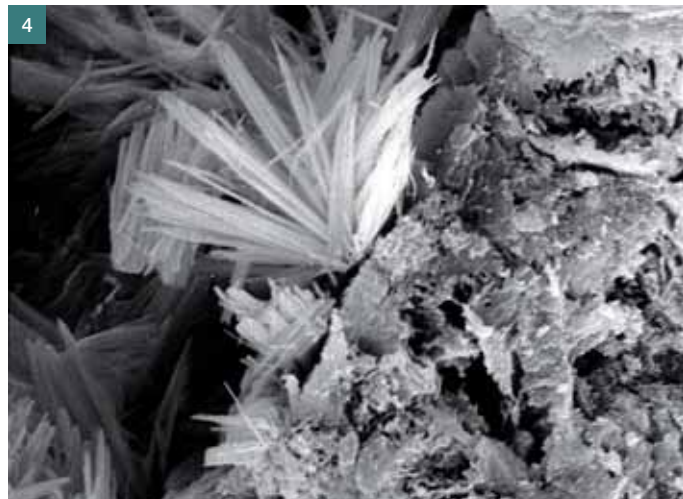
Koroze III. druhu představuje porušování betonu vlivem tvorby objemných sloučenin. Tento typ koroze je způsobován zejména sírany, které mohou být vnitřní nebo vnější. Vnitřní sírany pocházejí z cementu, obsahuje-li síranů více, než je obvyklé, nebo z kameniva. Vnější síranová koroze je důsledkem styku betonu s vodou nebo rostlou zemínou s vysokou koncentrací síranů. Obvyklé formy síranů v přírodním prostředí jsou vápenatý, hořečnatý a sodný.

Působení síranů na beton má za následek chemické a mikrostrukturní změny v cementovém tmelu, které mohou vést k zhoršení vlastností fyzikálních, včetně mechanických. Zvýší se propustnost, sníží se vodonepropustnost a pevnosti, zejména pevnost v tahu za ohybu.

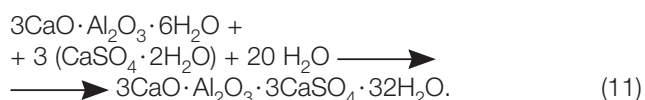
Při působení síranů na beton se tvoří produkty s vyšším molárním objemem v porovnání s objemem reaktantů. Jsou to zejména sekundární ettringit $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ (obr. 4), sádrovec $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Obr. 4 Ettringit v betonu z konstrukce objektu chemického provozu, foto: P. Bayer ■ Fig. 4 Ettringite in structural concrete from a chemical plant, photo: P. Bayer

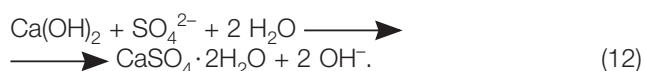
Obr. 5 Projev alkáliového rozpínání kameniva v povrchové vrstvě ■ Fig. 5 Effect of alkali silica reaction on the surface layer of concrete



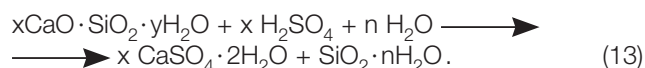
a thaumazit $\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$. Tvorba ettringitu (nazývaný též Candlotova sůl nebo cementový bacil) a velikost vzniklých krystalů spojených s krystalizačním tlakem závisí na mnoha faktorech [15], zejména koncentraci $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a působících síranů. Obecně lze reakci popsat rovnicí:



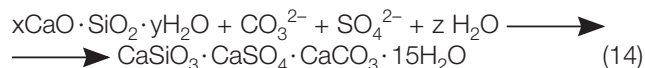
Sádrovec vzniká reakcí mezi hydroxidem vápenatým a rozpustnými sírany, které penetrují do pórů betonu. Reakci lze popsat rovnicí:



Sádrovec se tvoří také při působení kyseliny sírové na cementový tmel [16] podle rovnice:



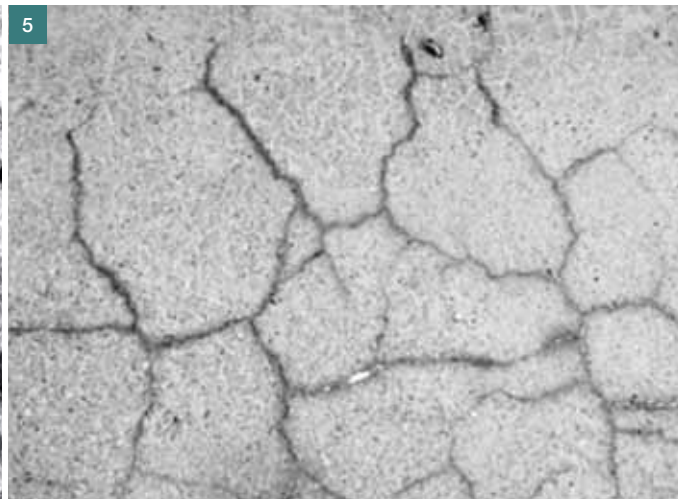
Kombinovaným působením síranů a uhlíčanů při $\text{pH} > 10,5$ při nízkých teplotách, nejlépe okolo 5°C , vzniká thaumazit. Rychlost tvorby thaumazitu výrazně klesá při teplotách 15 až 20°C a při teplotách nad 25°C jeho tvorba již není možná [16]. Poškození betonu vlivem thaumazitu je značné, protože je spojeno s rozkladem CSH fází. Vznik thaumazitu lze popsat rovnicí:



Všechny tři výše jmenované produkty jsou spojeny s nárůstem objemu, jež vyvolává krystalizační tlaky, které mohou vést až k rozpadu betonu.

BIOLOGICKÁ KOROZE

Biologická koroze je spojena buď s fyzikálním působením vzniku napětí v důsledku růstu kořenů rostlin nebo jako důsledek působení produktů metabolických procesů rostlin a živočichů. Do procesů jmenovaných na druhém místě lze zahrnout činnost sulfurikačních bakterií a produkci karboxylových kyselin lišejníky, řasami, houbami a mechy. Významným příkladem poškození betonu v důsledku biologické čin-



nosti bakterií je koroze betonu v stokách, kde sulfurikační bakterie transformují síru vázanou v biologickém materiálu na sulfan a následně oxidují na kyselinu sírovou. Ta působí korozně na beton jednak H^+ ionty a také SO_4^{2-} anionty, jak je popsáno výše. Proces vzniku kyseliny sírové lze schematicky znázornit [17], [18]:



Hlavními zástupci sulfurikačních bakterií jsou: Thiobacillus thioparus, T. thiooxidans, T. concretivorus, T. thermophilus, T. novellus.

DEGRADACE KAMENIVA V BETONU

Chemická degradace kameniva probíhá v závislosti na jeho složení. Alkálie v přítomnosti hydroxidových iontů a vody reagují s amorfním SiO_2 z kameniva (opály, chalcedony, silicity apod.) a následným vznikem objemného alkalicko-silikátového gelu poškozuje okolní cementový tmel. Navenek se projeví vznikem pavoučkovitých trhlin (obr. 5).

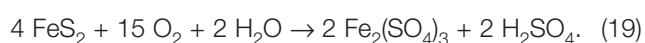
Alkáliemi může být poškozeno také dolomitické kamenivo, protože jejich působením dochází k rozkladu dolomitu na $Mg(OH)_2$ (brucit), $CaCO_3$ a rozpustný Na_2CO_3 . Uhlíkaté kamenivo (vápenec, dolomit) může být poškozeno také agresivním CO_2 rozpuštěným ve vodě s nízkou přechodnou tvrdostí podle rovnice:



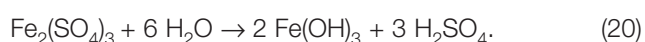
Dedolomitizaci kameniva i alkaliové rozpínání mohou způsobit i alkalické soli, protože při jejich reakci s $Ca(OH)_2$ alkalické hydroxidy vznikají:



V kamenivu mohou být obsažena zrna pyritu, který se v zásaditém prostředí oxiduje vzdušným kyslíkem podle rovnice:



Kyselina sírová reaguje se složkami cementového tmelu, např. podle rovnice (13), a síran železitý hydrolyzuje za vzniku $Fe(OH)_3$ a H_2SO_4 . Hydroxid železitý pak vytváří v místě zrn rezavé skvrny



STUPNĚ VLIVU PROSTŘEDÍ PODLE ČSN EN 206 A ČSN P 73 2404

Popisy prostředí a jejich označení podle ČSN EN 206 [2] a doplňující ČSN P 73 2404 [3] jsou uvedeny v tab. 1. Prostředí je v ČSN EN 206 specifikováno ve vztahu k vlhkosti a kapalné vodě pro kategorie XC, XD, XS a XF a chemickému působení, XA, které je rozděleno podle koncentrací agresivních látek.

V normě ČSN P 73 2404 je kategorie Chemické působení doplněna poznámkou o dělení prostředí podle průměrné dlouhodobé relativní vlhkosti vzduchu, která se dělí na:

- velmi nízkou, < 30 %,
- nízkou, 30 až 60 %,
- střední, 60 až 85 %,
- vysokou, > 85 %.

Norma také doplňuje tabulku Stupně vlivu prostředí o kategorii 7, týkající se koroze vlivem mechanického působení, XM, podle namáhání obrusem a otlučením.

Tab. 1 Popis a označení prostředí ■ Tab. 1 Description and specification of environment

Označení stupně	Popis prostředí
X0	Bez nebezpečí koroze nebo narušení
XC 1 až 4	Koroze vlivem karbonátace
XD 1 až 3	Koroze vlivem chloridů, ne však z mořské vody
XS 1 až 3	Koroze vlivem chloridů z mořské vody
XF 1 až 4	Působení mrazu a rozmrazování (mrazové cykly) s rozmrazovacími prostředky nebo bez nich
XA 1 až 3	Chemické působení
XM 1 až 3	Koroze vlivem mechanického působení (obrus)

Chemické působení je definováno pro kapalné korozní prostředí, které představuje podzemní voda a vlhkost v rostlé zemině. Pro tyto případy jsou v tab. 2 specifikovány hodnoty koncentrací škodlivých iontů a hodnota pH. Klasifikace

kapalného korozního prostředí platí pro rostlé zeminy a podzemní vodu při teplotě vody/zeminy v rozmezí +5 až +25 °C a pro velmi mírnou rychlost vody blízkou se nehybnému stavu.

Tab. 2 Mezní hodnoty pro stupně chemického působení zeminy a podzemní vody ■ Tab. 2 Limiting values for degree of chemical attack of soil and groundwater

Chemická charakteristika	XA1	XA2	XA3
Podzemní voda			
SO_4^{2-} [mg·l ⁻¹]	200 ≤ c ≤ 600	600 < c ≤ 3 000	3 000 < c ≤ 6 000
pH	5,5 ≤ pH ≤ 6,5	4,5 ≤ pH < 5,5	4,0 ≤ pH < 4,5
CO_{2agr} [mg·l ⁻¹]	15 ≤ c ≤ 40	40 < c ≤ 100	c > 100 – do nasycení
NH_4^+ [mg·l ⁻¹]	15 ≤ c ≤ 30	30 < c ≤ 60	60 < c ≤ 100
Mg^{2+} [mg·l ⁻¹]	300 ≤ c ≤ 1 000	1 000 < c ≤ 3 000	c > 3 000 – do nasycení
Rostlá zemina			
SO_4^{2-} [mg·kg ⁻¹]	2 000 ≤ c ≤ 3 000	3 000 < c ≤ 12 000	12 000 < c ≤ 24 000
Kyselost [mg·l ⁻¹]	c > 200	v praxi se nepoužívá	

V normě ČSN EN 206 jsou uvedeny referenční zkušební metody pro stanovení korozních složek v podzemní vodě, dvě z nich, ISO 7980 a prEN 16502, nejsou v našich normových předpisech zavedeny.

Látky uvedené v tab. 2 (CO_{2agr} , NH_4^+ , Mg^{2+} , H^+) poškozují beton mechanismem koroze II. druhu, kdy jsou složky hydratovaného cementu převáděny na nerozpustné nebo rozpustné sloučeniny, které nemají vazebné vlastnosti. Síranové ionty reagují za vzniku objemných sloučenin (koroze III. druhu), které porušují beton krystalizačními tlaky, někdy až do jeho rozpadu.

V normě není specifikováno korozní působení srážkových a povrchových vod s nízkou přechodnou tvrdostí, které mohou způsobovat zejména korozi I. druhu, tj. vyluhování hydroxidu vápenatého z cementového tmelu. Výsledek poškození tímto působením může být v závislosti na složení betonu významný, zvláště u tekoucích vod (snížení koncentrace OH^- iontů).

Je nutno si uvědomit, že i působení mechanického zatížení u konstrukcí vede k strukturálním změnám betonu (trhliny), tento proces je rovněž degradační a může ovlivňovat odolnost betonu proti korozi.

VÝPOČETNÍ MODELOVÁNÍ

V předchozím textu je poukázáno na možnosti modelování degradačních procesů betonu, a to v deterministické či pravděpodobnostní variantě. Vhodnější pro popis těchto procesů je pravděpodobnostní přístup, který zohledňuje reálné existující rozptyl většiny veličin vstupujících do modelů. Za tímto účelem byly vytvořeny softwarové nástroje, např. FReET-D, který je věnovaný modelům degradace betonu a zahrnuje mj. také několik modelů karbonátace betonu, působení chloridů, koroze výztuže a další, včetně několika mezinárodně uznávaných modelů převzatých z *fib* Model Code 2010 – podrobněji [19].

Uživatelsky nenáročná možnost modelovat postup karbonátace je na interaktivní webové stránce volně dostupné na <http://www.freet.cz/rc-lifetime/index.php>. O modelování vzájemného vlivu účinků mechanického zatížení a vlivu prostředí informuje [20] a příspěvek na str. 9 v tomto čísle Beton TKS, zaměřený na působení chloridů na beton. Je zřejmé, že každý model musí být opřen o reálné pozorování korozních procesů v laboratoři a praxi.

Literatura:

- [1] ROVNANÍKOVÁ, P., TEPLÝ, B. Obsah hydroxidu vápenatého v betonech se silikátovými příměsmi – důležitý faktor při posuzování životnosti betonových konstrukcí. *Beton TKS*. 2009, roč. 9, č. 2, s. 38–41.
- [2] ČSN EN 206. *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: ÚNMZ, platnost – červen 2014.
- [3] ČSN P 73 2404. *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda – Doplnující informace*. Praha: ÚNMZ, platnost – leden 2016.
- [4] ČESKÁ REPUBLIKA. *Zákon 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší a související předpisy*. Platnost od 2. 5. 2012.
- [5] MATOUŠEK, M. *Působení vybraných atmosférických činitelů na stavební konstrukce*. Brno, 1977. Disertační práce. VUT v Brně, Fakulta stavební.
- [6] MATOUŠEK, M., DROCHYTKA, R. *Atmosférická korozí betonu*. Praha: IKAS, 1998. 171 s. ISBN 80-902558-0-9.
- [7] JIANG, L., LIN, B., CAI, Y. A model for predicting carbonation of high-volume fly ash concrete. *Cement and Concrete Research*. 2000, Vol. 30, No. 5, p. 699–702.
- [8] PAPADAKIS, V. G., VAYENAS, C. G., FARDIS, M. N. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. *ACI Materials Journal*. 1991, Vol. 88, No. 4, p. 363–373.
- [9] VAN-LOC TAA, BONNETB, S., KIESSEA, T. S., VENTURAA, A. A new meta-model to calculate carbonation front depth within concrete structures. *Construction and Building Materials*. 2016, 129, p. 172–181.
- [10] MARQUES, P. F., CHASTREB, C., NUNESC, Â. Carbonation service life modelling of RC structures for concrete with Portland and blended cements. *Cement and Concrete Composites*. 2013, Vol. 37, p. 171–184.
- [11] CHROMÁ, M., TEPLÝ, B., VESELÝ, V. Softwarový nástroj pro sledování průběhu karbonatace. In: *Sborník konference CONSTRUMAT 2006, Rájecké Teplice*. TU Žilina, 2006. s. 34–38.
- [12] TEPLÝ, B., CHROMÁ, M., ROVNANÍK, P. Durability assessment of concrete structures: reinforcement depassivation due to carbonation. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2010, Vol. 6, No. 3, p. 317–327.
- [13] MOSKVIN, V. M. *Korozí betonu*. Moskva: Gosudarstvennoje izdatel'stvo literatury po strojitel'stvu i architekture, 1952. 342 s.
- [14] PALEK, L., DOBRÝ, O. *Korozí betonu ve stavební praxi*. Praha: SNTL, 1988. 185 s.
- [15] SKALNY, J., BOYD, A. Environmental deterioration of concrete. In: *Environmental deterioration of materials*. Moncmannová, A. (ed.), 1st ed., Series: Advances in Architecture, Vol 21, Southampton UK: WIT Press, 2007. 336 p. ISBN 978-1-84564-032-3.
- [16] SKALNY, J., MARCHAND, J., ODLER, I. *Sulfate attack on concrete*. London and New York: Spon Press, 2002, 217 p. ISBN 0-419-24550-2.
- [17] WASSERBAUER, R. *Biologické znehodnocení staveb*. Praha: Nakladatelství ARCH, 2000. 280 s. ISBN 80-86165-30-2.
- [18] TEPLÝ, B., SCHEJBAL, R., ŘOUTIL, L., PARKAN, T., ROVNANÍKOVÁ, M. Spolehlivost a životnost betonového kanalizačního potrubí – možnosti výpočetního modelování. *Beton TKS*. 2015, roč. 15, č. 5, s. 18–24.
- [19] TEPLÝ, B., NOVÁK, D. Predikce degradace betonových konstrukcí výpočetním modelováním. *Beton TKS*. 2014, roč. 14, č. 2, s. 56–57.
- [20] TEPLÝ, B., VOŘECHOVSKÁ, D., ŠOMODÍKOVÁ, M., LEHKÝ, D. Modelování životnosti a spolehlivosti betonových konstrukcí při kombinaci mechanického a environmentálního zatížení. *Beton TKS*. 2016, roč. 16, č. 2, s. 26–28.

ZÁVĚR

V článku je uveden stručný přehled koroze betonu v světle chemických procesů, které probíhají při reakcích agresivních látek se složkami hydratovaného cementového tmelu a kameniva. Uvedené informace vysvětlují třídění korozního působení agresivních látek a měly by sloužit k lepšímu pochopení nutnosti zohlednit složení směsí pro výrobu betonu ukládaného do popisovaných korozních prostředí. V článku je uvedena též možnost využití korozních modelů při navrhování betonu.

Článek byl vytvořen v rámci řešení projektu č. LO1408 „AdMaS UP – Pokročilé stavební materiály, konstrukce a technologie“ podporovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu Národní program udržitelnosti I.

prof. RNDr. Pavla Rovnaníková, CSc.
Fakulta stavební VUT v Brně
Ústav chemie
e-mail: rovnanikova.p@fce.vutbr.cz



Text byl posouzen odborným lektorem. The text was reviewed.



ČVUT
FSV



FIBRE CONCRETE 2017

FRC, TRC, UHPC

13.–16. září 2017 v Praze

concrete.fsv.cvut.cz/fc2017 | fc2017@fsv.cvut.cz

9. mezinárodní konference zaměřená na vláknobetony (FRC), textilní betony (TRC) a ultravysokohodnotné betony (UHPC)

- materiálové charakteristiky
- dlouhodobé chování a trvanlivost
- aspekty udržitelného stavebnictví
- odpadní materiály pro výrobu betonu
- aplikace
- pokročilé návrhové metody

Stejně jako v minulém ročníku budou příspěvky zařazeny v databázi SCOPUS.

