

# Wykwity na betonie

Powstawanie wykwitów na betonie jest zjawiskiem niemającym praktycznie znaczenia dla jego trwałości, jednak powoduje przeważnie znaczne pogorszenie wyglądu, przede wszystkim elewacji budynków. Szczególnie w przypadku kolorowych tynków cementowych stanowi poważny problem. Ze względów estetycznych poszukuje się metod zmniejszających występowanie tego zjawiska. Także kostka brukowa, bardzo często kolorowa, stanowi ten rodzaj wyrobu, w przypadku którego występowanie wykwitów jest szczególnie niepożądane.

Wytwórcy kostki brukowej bardzo często spotykają się z tym problemem i poszukują różnych metod w celu wyeliminowania tego negatywnego zjawiska. W niniejszym artykule podano kilka przyczyn występowania wykwitów i na tej podstawie dokonano przeglądu metod, które mogą zapobiegać ich powstawaniu.

Wykwity nie stanowią zjawiska, którego występowanie ogranicza się jedynie do betonu lub zaprawy, a więc do zaczynu cementowego. Jest ono także spotykane w przypadku ceramicznych materiałów ściennych oraz dachówki. Ceramiczne materiały ścienne obejmują także przypadki, w których te elementy ceramiczne nie są łączone zaprawą cementową. Zjawisko to dotyczy ogólnie wszystkich materiałów porowatych, a więc takich, w których mogą zachodzić procesy transportu masy, a przede wszystkim cieczy. Jeżeli taki materiał porowaty zawiera związki stosunkowo dobrze rozpuszczalne w wodzie, to jest to przypadek, w którym możemy mieć do czynienia z powstawaniem wykwitów. Mechanizm ich powstawania polega na transporcie roztworów wspomnianych związków do powierzchni materiału, na której zachodzi odparowanie wody i krystalizacja substancji rozpuszczonej. Proces taki dotyczy na przykład gipsu, który krystalizuje się na powierzchni elementów ceramicznych. Można w tym miejscu przypomnieć o powstających na pustyniach „kwiatkach” gipsowych lub białych osadach halitu.

Na powierzchni betonu, tynku i innych materiałów budowlanych zachodzą procesy wywołane oddziaływaniem składników gazowych zawartych w powietrzu oraz w deszczu. Jeżeli pominiemy procesy korozyjne wywołane na przykład kwaśnymi deszczami, to największe znaczenie ma działanie CO<sub>2</sub> wywołujące karbonatyzację wodo-

rotlenku wapnia. Wynika stąd jednoznacznie, że będzie to w pierwszym rzędzie dotyczyło betonów, zapraw i tynków cementowych.

## Czynniki wpływające na powstawanie wykwitów

Powstawanie wykwitów wymaga transportu cieczy z wnętrza betonu do powierzchni, w którym decydującą rolę odgrywają zjawiska kapilarne. Możemy mieć także do czynienia z dyfuzją rozpuszczonych związków w formie jonowej w przypadku wnikania do powierzchni betonu wody związanej na przykład z opadami deszczu. W betonie stykającym się ze źródłem wody zachodzi tak zwane „podciąganie kapilarne”, to znaczy wnikanie wody do mezoporów pod wpływem napięcia powierzchniowego wody. Powstające ciśnienie kapilarne, które wywołuje ruch cieczy, jest dane wzorem Laplace'a:

$$P_k = 2\gamma r_m$$

gdzie :

$\gamma$  – napięcie powierzchniowe cieczy (wody)

$r_m$  – promień menisku cieczy w kapilarze.

Promień menisku cieczy zależy od średnicy kapilary i kąta zwilżania  $\Theta$  i można go wyznaczyć ze wzoru:

$$r_m = d_k / 2 \cos \Theta = r_k / \cos \Theta$$

W przypadku dobrej zwilżalności można w przybliżeniu przyjąć, że promień menisku jest równy promieniowi kapilary  $r_m = r_k$ .

Jest oczywiste, że maksymalna wysokość wzniesienia cieczy w kapilarze będzie równoważna jej ciśnieniu hydrostatycznemu, które wynosi:

$$\rho g l \sin \alpha$$

gdzie:

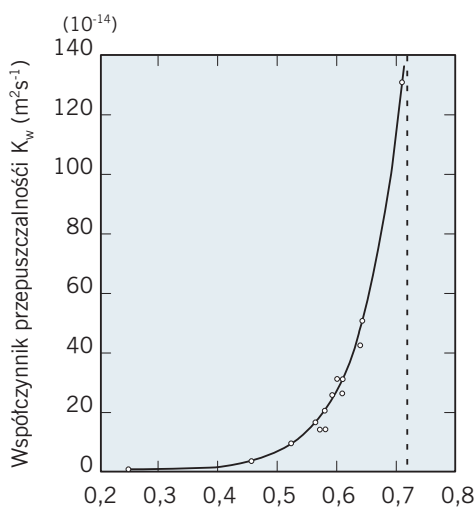
$\rho$  – gęstość cieczy

$g$  – przyspieszenie ziemskie

$l$  – wysokość słupa cieczy w kapilarze

$\alpha$  – kąt nachylenia kapilary w stosunku do poziomu.

Zasadnicze znaczenie dla transportu cieczy w betonie



Rys. 1. Zależność współczynnika przepuszczalności zaczynu od stopnia hydratacji cementu i współczynnika w/c

będzie miała porowatość i struktura porów. Obie te właściwości betonu są bezpośrednio związane ze stosunkiem w/c oraz ze stopniem hydratacji cementu. Ogólnie bowiem na porowatość betonu największy wpływ ma zaczyn cementowy; porowatość kruszywa jest z reguły bardzo mała. Zawartość porów ciągłych rośnie ze współczynnikiem w/c, a maleje ze wzrostem stopnia hydratacji cementu. Pory ciągłe decydują o przepuszczalności betonu, a więc o przepływie cieczy przez ten kompozyt (rys. 1). Na strukturę porów wpływają także dodatki mineralne i to w dwojaki sposób. Po pierwsze, ziarenka dodatku zmniejszają porowatość stosu okruszowego, a po drugie dzięki właściwościom pucolanowym zwiększają zawartość fazy C-S-H w zaczynie. Dzięki temu spada zawartość mezoporów – porów kapilarnych, a rośnie zawartość porów żelowych – mikroporów. Udział porów żelowych w przepływie cieczy jest minimalny, natomiast wpływają one na dyfuzję. Dyfuzja dotyczy transportu na poziomie cząsteczek i jonów. Ten proces zależy od współczynnika dyfuzji  $D$  i jest określony pierwszym prawem Ficka:

$$J = -D \frac{dc}{dx}$$

gdzie:

$J$  – strumień jonów (masa/czas)

$dc/dx$  – gradient stężenia na odcinku  $dx$ , w kierunku dyfuzji

W przypadku porów żelowych powierzchnia porów będzie wpływała na proces dyfuzji. Najważniejszym czynnikiem będzie adsorpcja, jednak również krętość drogi w bardzo małych porach o wymiarach mniejszych od 2 nm będzie utrudniała dyfuzję, podobnie jak częste zmiany średnicy porów. Z tego względu wpro-

wadzamy tak zwany efektywny współczynnik dyfuzji:

$$D_{ef} = D \tau \rho / T$$

gdzie:

$\tau$  – wielokrotna zmiana średnicy kapilary

$\rho$  – porowatość zaczynu

$T$  – krętość drogi równa stosunkowi rzeczywistej drogi dyfuzji do najkrótszej odległości pomiędzy punktami początku i końca drogi

Dyfuzję utrudnia także bardzo mała ruchliwość wody w porach o średnicy mniejszej od 2 nm. Z tych wszystkich względów wzrost zawartości porów żelowych zmniejsza znacznie dyfuzyjny transport jonów. W transporcie wody w betonie ważną rolę odgrywa także warstwa kontaktowa kruszywa z zaczynem, która ma znaczną porowatość. Na budowę warstwy kontaktowej duży wpływ ma dodatek pyłu krzemionkowego, który radykalnie zmniejsza porowatość tej warstwy. Wpływ dodatku pyłu zmniejszającego znacznie przepuszczalność betonu jest dobrze znany. W rozważaniach na temat transportu cieczy w betonie pominięto całkowicie zagadnienie przepływu wody przez beton pod wpływem ciśnienia hydrostatycznego słupa wody. Takie przypadki są spotykane, na przykład są one typowe dla zapór i tam, a mogą także zdarzyć się w przypadku fundamentów. Prowadzić one mogą w przypadku występowania rys w betonie do wycieków, które mogą się uwidocznić w formie osadów o dużej grubości. Zjawiska tego nie można jednak zaliczyć do typowych wykwitów.

Obok przepuszczalności betonu decydującym czynnikiem w powstawaniu wykwitów jest zawartość łatwo rozpuszczalnych w wodzie składników betonu. Czynnikiem ten wiąże się z reguły z zaczynem cementowym, który dostarcza do fazy ciekłej wypełniającej pory w betonie jony sodu, potasu i wapnia.

O powstawaniu wykwitów decyduje stężenie tych jonów w roztworze w porach betonu. Roztwór ten, w przypadku cementów powszechnie stosowanych, jest zawsze nasycony w stosunku do wodorotlenku wapniowego, który stanowi podstawowe źródło wykwitów. Równie ważna jest także zawartość sodu i potasu, przy czym zawartość potasu jest zawsze kilkakrotnie większa niż sodu. Oba te składniki występują w roztworze w formie wodorotlenków w wyniku reakcji z jonami wapniowymi. Na przykład w przypadku występowania w cemencie siarczanów potasu schematycznie reakcja będzie następująca:

$$K_2SO_4 + Ca(OH)_2 + 2H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O + 2KOH$$

Źródłem wodorotlenku wapnia w zaczynie będzie przede wszystkim alit, którego zawartość w cemencie portlandzkim jest trzykrotnie większa niż belitu. Ponadto w wyniku hydrolizy alitu odszczepia ponaddwukrotnie więcej wodorotlenku wapniowego na 100 g bezwodnej fazy niż belitu (odpowiednio 48,7 g oraz 21,5 g). Także sól i potas, poza wyjątkowymi przypadkami, pochodzą z klinkierowej części cementu.

Zaczyny cementowe, a więc zaprawy i betony, nie są z reguły narażone na wykwyty siarczanowe. Siarczany przechodzące w zaczynie w siarczan wapniowy reagują bardzo szybko z glinianami wapniowymi z utworzeniem ettryngitu. Przy małym stężeniu siarczanów będzie powstawał monosiarczan.

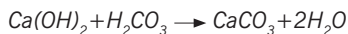
Bensted podaje, że czasem gips oraz syngenit  $K_2Ca(SO_4)_2 \cdot H_2O$  mogą krystalizować z roztworu po jego odparowaniu z dużych powierzchni betonu. Wykwyty może czasem tworzyć mirabilit, któ-



foto: Archiwum

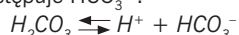


ry jest dziesięciowodnym siarczanem sodu. Wykwity te powstają jednak na ogół w wyniku doptywu do betonu wody morskiej na falochronach. Poza terenami przybrzeżnymi mirabilit może się tworzyć także na obszarach pustynnych i został znaleziony w południowej Australii. Mirabilit może także tworzyć cienkie warstewki pod powierzchnią betonu, wywołując drobne pęknięcia na jego powierzchni. Związane one są z przejściem bezwodnego siarczanu sodu w mirabilit pod wpływem dostępu wilgoci do betonu, bowiem ma on większą objętość właściwą. Znane są rzadkie przypadki zniszczenia konstrukcji betonowej wywołanej tym procesem. Wodorotlenek wapniowy jest stosunkowo dobrze rozpuszczalny w wodzie i w przypadku parowania wody na powierzchni betonu może tworzyć warstewkę portlandytu. Pod wpływem  $\text{CO}_2$  z powietrza ulega on karbonatyzacji, w związku z czym głównym składnikiem wykwitów jest węglan wapnia. Jony wapniowe mogą także reagować z  $\text{CO}_2$  w fazie ciekłej zaczynu, w wyniku czego strąca się węglan wapnia ze względu na jego małą rozpuszczalność w wodzie:

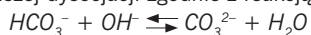


Jak już wspomniano, powstawaniu wykwitów sprzyja także duża zawartość wodorotlenków sodu i potasu w fazie ciekłej betonu. Znalazło to wyraz w stosowanym współczynniku K, który jest sumą wapnia, sodu i potasu występujących w fazie ciekłej. O ile jednak zawartość wapnia jest oczywista, o tyle wpływ sodu i potasu nie jest tak oczywisty. Jak wiadomo, składniki te zwiększają rozpuszczalność wodorotlenku wapniowego i muszą być inne przyczyny powodujące ich korzystny wpływ w powstawaniu wykwitów.

Zagadnienie wpływu wodorotlenku sodu i potasu na powstawanie wykwitów wyjaśnili Dow i Glasser. Rozpuszczalność  $\text{CO}_2$  w wodzie rośnie ze wzrostem pH, a inaczej mówiąc ze wzrostem stężenia jonów sodu i potasu. Głównym składnikiem, w którym występuje  $\text{CO}_2$  w roztworze o pH nieco wyższym od 10 jest  $\text{CO}_3^{2-}$ . W kwaśnych roztworach kwasu węglowego w wyniku jego dysocjacji jako główny składnik występuje  $\text{HCO}_3^-$ :



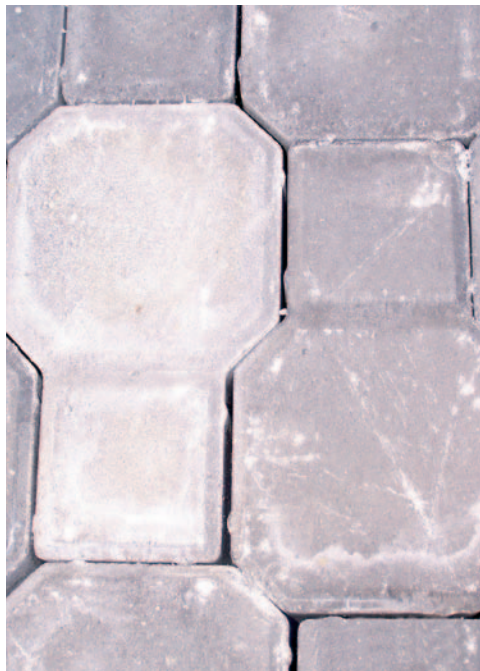
Natomiast w roztworach zasadowych bikarbonat ulega dalszej dysocjacji zgodnie z reakcją:



Na rysunku 2. pokazano rozpuszczalność różnych jonów kwasu węglowego w zależności od stężenia NaOH. Jony powstałe w dysocjacji kwasu węglowego będą stosunkowo szybko reagowały z jonami wapniowymi, prowadząc do wytrącenia węglanu wapniowego z roztworu.

W czystej wodzie proces sorpcji  $\text{CO}_2$  z fazy gazowej jest powolny ze względu na to, że reakcja powstawania kwasu węglowego jest także powolna. Obecność jonów  $\text{OH}^-$  w fazie ciekłej działa podwójnie: nie tylko zwiększa rozpuszczalność jonów węglanowych, ale przyspiesza także hydrolizę cząsteczek  $\text{CO}_2$ , co przyspiesza rozpuszczanie  $\text{CO}_2$ . Payne i Dodge podają, że w temperaturze  $30^\circ$  sorpcja  $\text{CO}_2$  w 0,2 M KOH jest dziesięciokrotnie szybsza niż w czystej wodzie. Trzeba zaznaczyć, że działanie KOH jest znacznie silniejsze niż NaOH. Równocześnie lepkość roztworu KOH jest mniejsza niż NaOH, co przyspiesza dyfuzję.

Rozpuszczalność  $\text{CO}_2$  zależy także od temperatu-



fol. Archiwum

ry i od ciśnienia parcjnego tego gazu w atmosferze otaczającej beton. Zależności te, jak wiadomo, będą posiadały odwrotny wpływ, to znaczy rozpuszczalność  $\text{CO}_2$  będzie malała ze wzrostem temperatury, a rosła z ciśnieniem parcjnym tego gazu.

Dow i Glasser wysuwają hipotezę, że do powstawania wykwitów węglanowych niezbędna jest warstewka wody na powierzchni betonu. W związku z tym wysuwają oni następujący model powstawania wykwitów węglanowych. Proces rozpoczyna się od pojawienia się wilgoci na powierzchni betonu, w której rozpuszczają się alkalia. Przyspiesza to sorpcję  $\text{CO}_2$  i zwiększa znacznie jego rozpuszczalność. Tak więc usuwany jon  $\text{CO}_3^{2-}$  z roztworu w wyniku strącenia  $\text{CaCO}_3$  jest szybko uzupełniany.

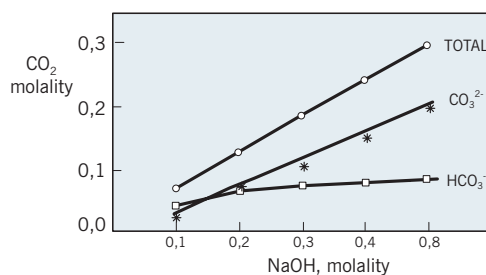
### Podsumowanie

Jak wspomniano we wstępie, zjawisko powstawania wykwitów nie stanowi zagrożenia dla trwałości betonu. Znając mechanizm ich powstawania, wiemy także, jak skutecznie im zapobiegać – np. stosując w produkcji wyrobów betonowych dodatki mineralne. Znane są również skuteczne metody usuwania wykwitów, np. przez zmywanie wodą lub usuwanie piaskiem – co często czyni za nas natura.

prof. Wiesław Kurdowski

dr inż. Albin Garbaciak

Instytut Mineralnych Materiałów Budowlanych



Rys. 2. Rozpuszczalność różnych jonów kwasu węglowego w zależności od stężenia NaOH