

Barbara ZAJĄC, Irena GOŁĘBIOWSKA

e-mail: zajacbar@poczta.onet.pl

Katedra Konstrukcji Budowlanych, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz

## Samoleczenie betonu. Cz. 1. Metody naturalne i chemiczne

### Wstęp

Beton jest najczęściej stosowanym materiałem konstrukcyjnym z powodu jego dużej wytrzymałości na ściskanie i między innymi względnie niskiego kosztu produkcji. Ujemną cechą betonu jest jego duża wrażliwość na tworzenie się rys, ze względu na jego niską wytrzymałość na rozciąganie. Wytrzymałość betonu na rozciąganie stanowi tylko 10% wytrzymałości na ściskanie. Rysy obniżają trwałość betonu i często wiąże się to z koniecznością cyklicznych napraw konstrukcji, które znacznie zwiększają koszt cyklu jej życia. Z powodu niskiej wytrzymałości betonu na rozciąganie, jest on zbrojony stalowymi prętami, których zadaniem jest przenoszenie naprężeń rozciągających. Zbrojenie ogranicza szerokość rys, lecz nie zabezpiecza całkowicie konstrukcji przed ich powstawaniem. W wyniku powstałych rys konstrukcja narażona jest na penetrację agresywnych cieczy i gazów, które mogą przyczynić się do korozji zbrojenia, a w konsekwencji do zniszczenia konstrukcji. Aby taka sytuacja nie miała miejsca, konieczne jest przeprowadzanie regularnych, okresowych badań konstrukcji, konserwacji oraz potrzebnych napraw. Działania te są kosztowne, a w pewnych przypadkach nie są nawet możliwe (np. w obiektach podziemnych, w zasobnikach żelbetonowych przeznaczonych na odpady toksyczne lub w konstrukcjach podwodnych). Wprowadzenie do projektowania i produkcji betonu nowej metody odtwórczej (zarządzanie uszkodzeniami) dotyczącej samoleczenia uszkodzonych materiałów cementowych byłoby bardzo korzystne, ponieważ mogłoby zredukować koszty związane z przeglądami, konserwacją i naprawą oraz w konsekwencji zwiększyć trwałość konstrukcji betonowej [Zajac i Gołębiowska, 2016].

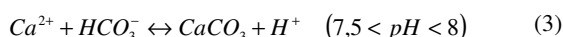
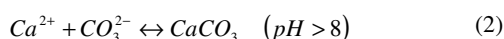
Istnieje wiele różnych metod dotyczących samoleczenia betonu. Metody te w publikacji autorek zostały sklasyfikowane następująco: metody naturalne, chemiczne, biologiczne i metody specjalne (kryterium stanowił rodzaj czynnika leczącego) [Zajac i Gołębiowska, 2016].

W pracy opisano podstawowe metody samoleczenia betonu, które w sposób skrótowy zostały już przedstawione w artykule [Zajac i Gołębiowska, 2016]. Pracę podzielono na dwie części. W części pierwszej opisano metody naturalne i chemiczne. W części drugiej przedstawiono metody biologiczne i specjalne. Przeprowadzono również analizę efektywności wybranych metod samoleczenia.

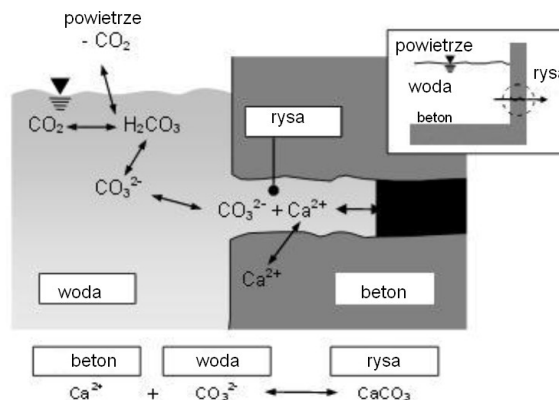
### Metody naturalne

Beton jest materiałem cementowym bardzo podatnym na tworzenie się rys, ale też posiada zdolność wewnętrznego samoleczenia. W tym naturalnym, powolnym procesie wyróżnia się trzy podstawowe przyczyny zamykania rys: chemiczne, fizyczne i mechaniczne [Wu i in., 2012; de Rooij i in., 2013].

Jedną z przyczyn chemicznych jest dalsza hydratacja, związana głównie z młodym wiekiem betonu. Po powstaniu rys w betonie, nieprzereagowane cząstki cementu mogą być wystawione na oddziaływanie wody, która wnika do rysy. W tym przypadku może wystąpić ponowna hydratacja i produkty rehydratacji wypełnią rysę. W późnym wieku betonu główną przyczyną zamykania rys jest wytrącanie się węglanu wapnia  $\text{CaCO}_3$ . Tworzenie się węglanu wapnia (Rys. 1) w obecności dwutlenku węgla i wody zachodzi w systemie:  $\text{CaCO}_3\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ , zgodnie z następującymi reakcjami:



Wodorotlenek wapnia  $\text{Ca(OH)}_2$  jest produktem reakcji hydratacji



Rys. 1. Środowisko, oddziaływania i reakcje w systemie  $\text{CaCO}_3\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  [Edwardsen, 1999]

w betonie.  $\text{Ca(OH)}_2$  rozkłada się na jony wapnia i jony wodorotlenkowe. Jony wapnia reagują z jonami węglanowymi i powstaje węglan wapnia  $\text{CaCO}_3$ , który wytrąca się w rysie [Edwardsen, 1999].

Edwardsen [1999] wykonała serię badań dotyczących przepuszczalności wody w betonie zwykłym i zbadała zjawisko samoleczenia pod kątem przenikania wody przez rysy. Ustaliła, że największa efektywność samoleczenia występowała w ciągu pierwszych 3 do 5 dni ekspozycji na wodę, i że osadzanie kryształów  $\text{CaCO}_3$  w rysach było praktycznie główną przyczyną samoleczenia rys. Wskaźnik wzrostu kryształów  $\text{CaCO}_3$  zależał od szerokości rys i ciśnienia wody, a rodzaj składników betonu i wody (np. twardość) nie miały wpływu na samoleczenie betonu. Edwardsen ustaliła, że za tworzenie się  $\text{CaCO}_3$  odpowiadają dwa różne procesy wzrostu kryształów; w początkowej fazie ekspozycji na wodę kinetyka wzrostu kryształów jest procesem kontrolowanym powierzchniowo, lecz później zmienia się w kontrolowaną dyfuzję wzrostu kryształów. Z analizy wskaźnika wzrostu kryształów  $\text{CaCO}_3$  wynika, że wzrost temperatury wody, wzrost wartości  $\text{pH}$  roztworu i częściowy spadek ciśnienia  $\text{CO}_2$  w wodzie sprzyjają wytrącaniu się  $\text{CaCO}_3$  w rysach [Shim i in., 2015].

**Przyczyna fizyczna** związana jest z rozszerzaniem się i pęcznieniem matrycy cementowej. Woda przemieszczając się w rysie nasyca ją, powierzchnie rysy pęcznieją i rysa zmniejsza się. Jednakże, gdy rysa ponownie ulegnie wysuszeniu powraca do swojego pierwotnego kształtu [de Rooij i in., 2013].

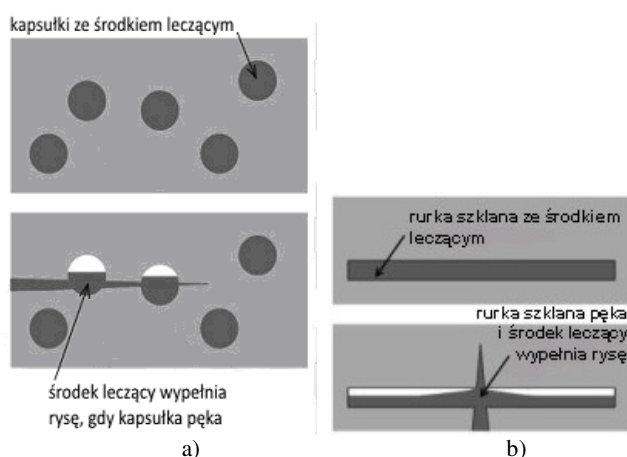
**Przyczyny mechaniczne** - różne zanieczyszczenia zawarte w wodzie, takie jak cząstki cementu, pokruszone cząstki betonu (pochodzące ze ścianek rysy) blokują ścieżkę przepływu wody i w ten sposób zamykają rysę [Wu i in., 2012; de Rooij i in., 2013]. Wg Michashi i in. [2012] przyczyny mechaniczne mają mały wpływ na proces samoleczenia.

Leczenie naturalne może być skuteczne dla rys o szerokości do 0,1 mm [Li i in., 2012].

### Metody chemiczne

Leczący czynnik chemiczny jest wprowadzany do mieszanki betonowej za pośrednictwem: kapsulek, rurek lub sieci naczyń. Czynnik leczący w celu izolowania go od wpływów zewnętrznych jest umieszczany w kapsułkach sferycznych (Rys. 2a), kapsułkach cylindrycznych, rurkach (Rys. 2b) lub w sieciach naczyń rurkowych. Ważnymi parametrami czynnika leczącego są: lepkość (niezbyt wysoka, aby czynnik mógł wypływać i wypełniać rysę oraz niezbyt niska, aby czynnik nie wyciekał przez rysę i/lub nie był absorbowany przez otaczającą matrycę), warunki i czas twardnienia (np. cyja-

noakrylan leczy tylko w warunkach wilgotnych i w krótkim czasie), zdolność do uszczelniania (po powstaniu rysy i uwolnieniu czynnika leczącego z przeciętej rysy kapsułki, w kapsułce powstanie wolna przestrzeń; czynnik leczący powinien mieć zdolność rozszerzania się pod wpływem polimeryzacji w taki sposób, aby mógł wypełnić szczelnie całą rysę i pozostałą wolną przestrzeń w kapsułce; naprężenia ekspansywne nie mogą jednak przekroczyć wytrzymałości betonu na rozciąganie), właściwości mechaniczne (aby uniknąć ponownego powstania rysy w naprawionym miejscu, wytrzymałość czynnika leczącego oraz wytrzymałość przyłączeniowa między tym czynnikiem i matrycą betonową powinny być wyższe niż wytrzymałość betonu; kleje o wysokim module sprężystości, np. cyjanoakrylan, zapobiegają ponownemu otwarciu rysy i przeniesieniu naprężeń do słabszych części elementu); stabilność w czasie (czynnik leczący powinien zostać aktywny nawet po latach) [Tittelboom i in., 2013].



Rys. 2. Schematyczna ilustracja koncepcji samoleczenia środkami chemicznymi umieszczonymi: a) w kapsułkach; b) w rurkach [Li i in., 2012]

Aby wystarczająca ilość czynnika leczącego mogła być transportowana do rysy, w prowadzonych badaniach doświadczalnych, średnice kapsułek sferycznych wynosiły od 5  $\mu\text{m}$  (w przypadku kapsułek z żelę krzemionkowego) do 5 mm (w przypadku kapsułek z krzemionki) a kapsułek cylindrycznych szklanych od 0,1 mm (o długości 63 mm) do 5 mm (o długości 250 mm). W sieciach naczyń średnica rurek wynosiła od 2 mm w przypadku rurek szklanych a w przypadku rurek z betonu porowatego od 25 do 35 mm [Tittelboom i in., 2013].

Leczący czynnik chemiczny umieszczony w kapsułkach jest wprowadzany do mieszanki betonowej i mieszany z pozostałymi jej składnikami w taki sposób, aby podczas mieszania kapsułki zostały równomiernie rozproszone w mieszance i nie uległy uszkodzeniu podczas mieszania. Ważne jest też, aby kapsułki nie tylko przetrwały proces mieszania, ale również uwolniły czynnik leczący w momencie przecięcia kapsułek przez rysę. Z tego powodu kruche kapsułki powinny mieć optymalizowaną grubość ścianek. Rurki ze środkiem leczącym i układy sieci rurek nie mogą być wprowadzane do mieszanki betonowej, lecz należy je układać w formie przed wypełnieniem jej betonem (Rys. 2b) [Li i in., 2012]. Wynika stąd, że rurki są mało praktycznym sposobem rozprowadzania środka leczącego.

Dry w swoich badaniach stosowała betonowe próbki w postaci sztywnej ramy, w której został wbudowany układ kruchych rurek wypełnionych środkiem adhezyjnym. Dry badała możliwości leczące 3-ch różnych środków adhezyjnych: cyjanoakrylanu, 2-składnikowej żywicy epoksydowej, środka adhezyjnego, bazującego na krzemionce. Na podstawie badania zmian sztywności i częstotliwości powstawania rysy podczas obciążania próbek ustaliła, że cyjanoakrylan był najbardziej efektywnym środkiem leczącym, ze

względem na możliwość przywrócenia pierwotnej sztywności i całkowitego zamknięcia rys [Mihashi i in., 2012].

Badania w zakresie leczenia betonów za pomocą układu sieci naczyń są na etapie badań początkowych, natomiast są bardzo zaawansowane w przypadku leczenia kompozytów polimerowych [White i in., 2001; Wang i in., 2015].

Ciekawym sposobem leczenia przy użyciu środków chemicznych, zaproponowanym przez Ohamę, jest wprowadzanie do mieszanki betonowej jednoskładnikowych żywic epoksydowych. Żywica epoksydowa może twardnieć bez utwardzacza w obecności alkaaliów lub ujemnych jonów wodorotlenowych OH<sup>-</sup>, które są produktami hydratacji cementu w betonach modyfikowanych żywicą epoksydową [Butta i in., 2010].

## Wnioski

Efektywność metod naturalnych samoleczenia betonu będzie zależała od składu jego matrycy, który determinuje możliwości wystąpienia reakcji chemicznych w chwili tworzenia się rys oraz od obecności wody i dwutlenku węgla.

Efektywność metod chemicznych zależy przede wszystkim od rodzaju czynnika leczącego, liczby nośników (kapsułek, rurek, układu sieci naczyń), stopnia ich rozproszenia w betonie, ich średnicy (takiej, aby można było w nich zmieścić odpowiednią ilość czynnika leczącego).

Nośniki czynnika leczącego powinny być wykonane z materiałów niereaktywnych z betonem i czynnikiem leczącym i nie mogą ulec uszkodzeniu podczas mieszania. Stosowanie rurek i sieci naczyń możliwe jest tylko w przypadku elementów prefabrykowanych, ponieważ wymagane jest ręczne wprowadzenie ich do formy przed wypełnieniem jej betonem.

Najefektywniejszą metodą chemiczną samoleczenia betonu wydaje się być propozycja Ohamy polegająca na rozproszeniu w mieszance betonowej (bez użycia kapsułek, rurek, układu sieci naczyń) takiego środka leczącego, który po powstaniu rysy będzie reagował z produktami hydratacji cementu w betonie, tworząc związek wypełniający rysę.

## LITERATURA

- Butta M.A.R., Ohama Y., (2010). Recent status of research and development of concrete-polymer composites in Japan. *Concrete Res. Lett.*, 1 (4)
- Edvardsen C., (1999). Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. *ACI Materials J.*, 96(4), 448-454
- Li V.C., Herbert E., (2012). Robust the self-healing for sustainable infrastructure. *J. Adv. Concrete Technol.*, 10, 207-218
- Mihashi H., Nishiwaki T., (2012). Development of engineered self-healing and self-repairing concrete – state of the art report. *J. Adv. Concrete Technol.*, 10, 170-184
- de Rooij M., Tittelboom K., De Belie N., Schlangen E (Eds.), (2013). State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 221-SHC: *Self-healing phenomena in cement-based materials*. Springer
- Shim K.B., Kishu T., Choi S.Ch., Ahn T.H., (2015). Cementitious materials for crack self-healing concrete. *J. Ceramic Proc. Res.*, 16(S1), 1-13
- Tittelboom K.V., Nele de Belie, (2013). Self-healing in cementitious materials – a review. *Materials* 6, 2182- 2217; DOI: 10.3390/ma6062182
- Wang Y., Pham D.T. Ji Ch., (2015). Self-healing composites. A review. *Cogent Eng.*, 2:1075686, 1-28
- White S.R., Sottos N.R., Geubelle P.H., Moore J.S., Kessler M.R., Sriram S.R., Brown E.N., Viswanathan S., (2001). Automatic healing of polymer-composites. *Nature* 409, 794-797, DOI: 10.1038/35057232
- Wu M., Johansson B., Geiker M., (2012). A review: self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material. *Const. Build. Mat.*, 28, 571-583
- Zając B., Gołębiowska I., (2016). Procesy odtwórcze materiałów cementowych. *Inż. Ap. Chem.*, 55(3), 112-113