

dr hab. inż. Paweł Łukowski, prof. PW*
dr inż. Grzegorz Adamczewski*

Możliwości samonaprawy betonu

Possibilities of self-repair of concrete

Naprawy konstrukcji betonowych są technicznie trudne, kosztowne i odpowiedzialne. Jednym z podstawowych problemów jest dostarczenie materiału naprawczego do miejsca uszkodzenia, trudne w przypadku degradacji betonu następującej wewnątrz elementu. Alternatywnym rozwiązaniem może być nadanie materiałowi zdolności do regeneracji uszkodzeń bez interwencji z zewnątrz. W sprzyjających warunkach, na skutek samoistnych procesów zachodzących wewnątrz betonu, może zachodzić zjawisko *samozaleczania*. Proces ten jest niezależny od intencji użytkownika i następuje bez udziału dodatkowych środków.

Do **samozaleczania autogenicznego** uszkodzeń mikrostruktury betonu można zaliczyć przede wszystkim:

- karbonatację, czyli reakcję wodorotlenku wapnia z atmosferycznym dwutlenkiem węgla, w wyniku której powstający węglan wapnia wypełnia rysy betonu;

- postępującą („resztkową”) hydratację cementu, pozostałego w stanie niezwiązany po stwardnieniu betonu;

- zjawiska zachodzące podczas przepływu przez beton wody zawierającej obce substancje, np. kolmatacja, czyli uszczelnianie rys przez osadzanie się cząstek stałych.

Samonaprawa natomiast polega na działaniu – w przewidziany sposób i w założonych okolicznościach – materiału naprawczego, który intencjonalnie wprowadzono do betonu w trakcie wytwarzania mieszanki betonowej.

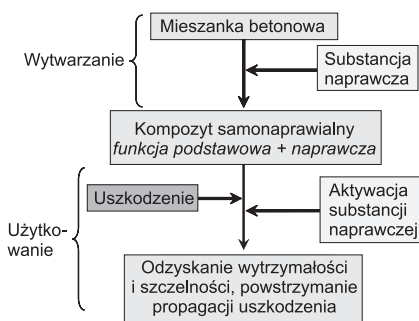
Koncepcja samonaprawialności

W tradycyjnym podejściu do kształtowania trwałości kładzie się nacisk na zapobieganie uszkodzeniom, natomiast koncepcja samonaprawy opiera się na spostrzeżeniu, że uszkodzenia są naturalną i dopuszczalną cechą materiału,

* Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej

dopóki jest im przeciwstawiony proces samoistnej regeneracji struktury.

Samonaprawialność może polegać na umieszczeniu materiału naprawczego wewnątrz betonu już na etapie jego wytwarzania, czyli zanim doszło do uszkodzenia (rysunek 1). Po prze-



Rys. 1. Strategia uzyskania materiału samonaprawialnego

kroczeniu przez naprężenia wewnętrzne w betonie założonego poziomu następuje aktywacja materiału naprawczego. Pozwala to wyeliminować podstawowy problem, jaki należy rozwiązać podczas naprawy elementu betonowego, to znaczy wprowadzanie materiału naprawczego do wnętrza elementu, a także dokonać naprawy struktury na wczesnym etapie degradacji, zanim doszło do jej nieodwracalnego uszkodzenia.

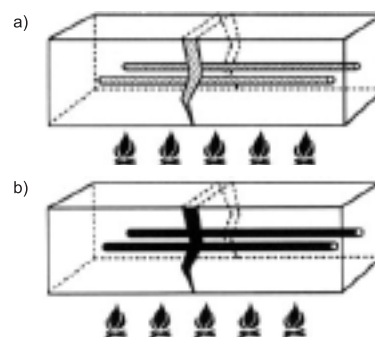
Wymagania stawiane idealnemu materiałowi samonaprawialnemu:

- możliwie szybki proces odtworzenia struktury;
- zdolność do wielokrotnej samonaprawy w okresie użytkowania;
- całkowita regeneracja uszkodzonego elementu;
- możliwość likwidacji uszkodzeń różnej wielkości;
- zdolność samonaprawy pod stałym obciążeniem użytkowym;
- cechy techniczne nie gorsze niż materiałów tradycyjnych;
- racjonalność ekonomiczna rozwiązania materiałowo-technologicznego.

Przy obecnym stanie wiedzy i techniki, jednoczesne spełnienie wszyst-

kich wymienionych postulatów nie jest możliwe, wytyczają one jednak jeden z kierunków rozwoju inteligentnych materiałów budowlanych.

Kompozyty samonaprawialne mogą być aktywne lub pasywne. **Samonaprawa pasywna** oznacza zdolność kompozytu do samoczynnej naprawczej reakcji na czynnik zewnętrzny (uszkodzenie), bez jakiegokolwiek interwencji ze strony człowieka. W przypadku **samonaprawy aktywnej** (rysunek 2) konieczne jest zewnętrzne aktywowanie (np. przez ogrzewanie) procesu naprawczego; o samonaprawie w pełnym tego słowa znaczeniu można zatem mówić jedynie w przypadku samonaprawy pasywnej.



Rys. 2. Samonaprawa aktywna wg C. M. Dry: materiał naprawczy zostaje uwolniony wskutek ogrzewania (a), a następnie utwardza się (b), zasklepiając rysę

Sposoby nadawania betonowi zdolności do samonaprawy

Samonaprawa betonu to procesy zaplanowane podczas wytwarzania betonu. Jedną z możliwości jest działanie bakterii. W celu zapewnienia **samonaprawialności tą metodą konieczne jest umieszczenie mikroorganizmów w mieszance betonowej podczas jej wytwarzania**. Po stwardnieniu betonu bakterie pozostają uwięzione wewnątrz jego struktury w formie uśpionej, aż do czasu wystąpienia uszkodzenia, przez które wnika woda, powodując przejście bakterii ze stanu przetrwalnikowego

ARBOCEL® + ALNASIL

= NOWY KIERUNEK

Multifunkcjonalne włókno celulozowe

ARBOCEL®
Naturalne włókno celulozowe



- Redukcja kosztów produkcji
- Silne mikrozbrojenie redukcja rys i mikropęknięć
- Poprawa właściwości aplikacyjnych
- Poprawa wyglądu powierzchni dzięki efektowi matującemu
- Znaczna poprawa odporności na szorowanie



Biały pigment i funkcjonalny wypełniacz

- Mniejsza podatność na zabrudzenia gotowej powłoki
- Obniżenie kosztów przez podstawienie nawet 30% TiO₂
- Lepsze krycie, wzrost stopnia białości

ALNASIL

Syntetyczny substytut bieli tytanowej

RETENMAIER Polska
Sp. z o.o.



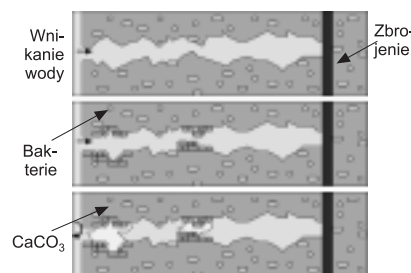
Fibres designed
by Nature

Al. Jerozolimskie 181
02-222 Warszawa
Telefon: +48 22 608 51 00
Fax-Nr: +48 22 608 51 51
E-mail: arbocel@jrs.pl

www.jrs.pl

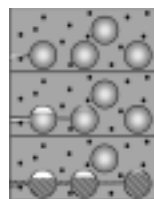
do aktywnego. Uaktywnione bakterie namnażają się, wytwarzając kalcyt (węglan wapnia), będący produktem ich metabolizmu, który uszczelnia rysę (rysunek 3). Problemem jest zapewnienie bakteriom w betonie odpowiedniej ilości pożywienia, które musi być wprowadzone do mieszanki betonowej wraz z nimi na etapie wytwarzania oraz zagwarantowanie kompatybilności tych składników z betonem.

Najbardziej obiecującym sposobem nadawania betonowi zdolności do samonaprawy jest koncepcja roz-



Rys. 3. Mechanizm samonaprawy wskutek działalności bakterii: woda wnika przez powstałą rysę aktywuje bakterie, które się namnażają, następnie rysa jest zamykana produktami metabolizmu (wg H.M. Jonkersa)

proszonych nośników substancji naprawczej. Pierwsze prace badawcze w tym zakresie prowadziła w latach osiemdziesiątych XX w. Carolyn M. Dry z University of Illinois. Innowacyjność tej metody polega na rozdzieleniu w zamierzony sposób funkcji materiału na funkcję konstrukcyjną oraz naprawczą. Oznacza to, że na etapie wytwarzania zostaje wprowadzony środek naprawczy, który nie przenosi oddziaływań mechanicznych, ale wykazuje zdolność do przemieszczania się i naprawy uszkodzeń struktury materiału bez konieczności ingerencji z zewnątrz. Tę koncepcję wykorzystano, wprowadzając do mieszanki betonowej włókna naprawcze z kruchego materiału, jako składnik zbrojenia rozproszonego. W miarę pojawiania się odkształceń w strukturze kompozytu włókna pękają, uwalniając substancję naprawczą w miejscu powstałego uszkodzenia, a substancja naprawcza ulega utwardzeniu, naprawiając w ten sposób element. Istotnym rozwinięciem metody było zastosowanie sferycznych mikrokapsułek jako nośników substancji naprawczej (rysunek 4).



Rys. 4. Mikrokapsułki wypełnione substancją naprawczą: pojawienie się rysy – uwolnienie substancji naprawczej – utwardzenie substancji naprawczej

Specyficznym przykładem realizacji koncepcji rozproszonych nośników jest wykorzystanie drewnianych włókien, zaproponowane przez badaczy z Delft University of Technology w Holandii. Ze względu na porowatą strukturę, naturalne drewniane włókna mają znaczny potencjał retencyjny. Kształtowanie mechanizmu samonaprawy jest możliwe przez odpowiednią modyfikację włókien. Przykładem takiego działania jest impregnacja mająca na celu nadanie włóknom kruchości niezbędnej do uwolnienia substancji naprawczej.

D. Lee zaproponował zastosowanie SAP (superabsorbent polymers – polimery o bardzo dużej nasiąkliwości) w celu samoczynnego zasklepienia rysy w betonie. Cząstki SAP zostają wprowadzone do mieszanki betonowej. Podczas hydratacji cementu polimer ulega skurczowi, natomiast po zaryso-

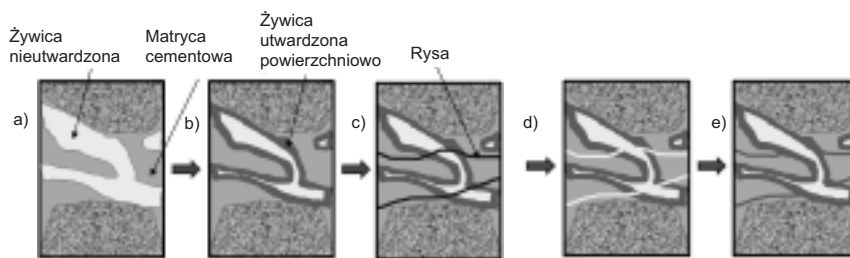
waniu materiału absorbuje wnikającą wodę, zwiększa objętość i uszczelnia rysę. Metoda ta umożliwia jedynie uszczelnienie rysy; odtworzeniu nie ulega mikrostruktura ani właściwości mechaniczne materiału. Ze względu na powstawanie porów wskutek początkowego skurczu polimeru, pogarszają się właściwości mechaniczne kompozytu.

Metoda rozproszonych nośników substancji naprawczej była modyfikowana pod względem kształtu samych nośników, materiału, z którego zostały one wykonane oraz sposobu utwardzania substancji naprawczej. Podstawową trudnością pozostaje jednak wytworzenie nośników substancji naprawczej oraz pogorszenie właściwości mechanicznych materiału wskutek obecności nośników środka naprawczego.

Zastosowanie żywicy epoksydowej bez utwardzacza

Obecność reaktywnych grup epoksydowych w łańcuchach żywicy epoksydowej powoduje, że jej utwardzanie w pewnych warunkach i w pewnym zakresie może zachodzić bez utwardzacza, jedynie pod wpływem czynnika katalitycznego; tę rolę może pełnić obecny w zaczynie cementowym wodorotlenek wapnia. Y. Ohama zwrócił uwagę, że zjawisko to można wykorzystać do uzyskania w betonie efektu samonaprawy. Przeprowadził też pierwsze prace badawcze potwierdzające taką możliwość, wykorzystując m.in. podwyższoną temperaturę podczas pielęgnacji betonów zawierających nieutwardzoną żywicę epoksydową.

Wprowadzenie żywicy epoksydowej bez utwardzacza powoduje, że jej utwardzenie nie następuje w całej objętości, a jedynie powierzchniowo, w strefie kontaktu z zaczynem cementowym. W ten sposób powstają struktury zawierające wewnątrz nieutwardzony polimer, co stanowi analogię do metody wykorzystującej mikrokapsułki naprawcze. Wyeliminowanie konieczności wprowadzania specjalnie wytworzonych mikrokapsulek z substancją naprawczą oraz samego utwardzacza znacząco obniża stopień skomplikowania technologii wytwarzania kompozytu. W miarę występowania uszkodzeń struktury kompozytu, żywica zostaje uwolniona i przemieszczając się, wypełnia powstałe mikrorysy, gdzie wchodząc w kontakt z wodorotlenkiem wapnia ulega samoczynnemu sieciowaniu i utwardzeniu (rysunek 5).

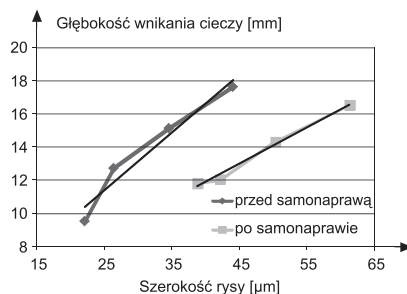


Rys. 5. Koncepcja samonaprawialności kompozytu epoksydowo-cementowego: (a) matryca epoksydowo-cementowa, (b) powierzchniowe utwardzenie żywicy pod wpływem zaczynu cementowego, (c) inicjacja rysy w matrycy polimerowo-cementowej, (d) wypełnienie rysy przez ciekłą żywicę, (e) utwardzenie

Badania prowadzone przez nas w Katedrze Inżynierii Materiałów Budowlanych Politechniki Warszawskiej potwierdzają możliwość uzyskania samonaprawialności betonu modyfikowanego żywicą epoksydową bez utwardzacza (EBU). Zdefiniowaliśmy stopień samonaprawy, STS, jako miarę zdolności kompozytu do regeneracji uszkodzonej struktury – jest to stosunek wartości danej cechy po samonaprawie do wartości tej cechy sprzed uszkodzenia materiału. Wykazano zależność stopnia samonaprawy EBU od składu kompozytu, w tym zwłaszcza od zawartości żywicy, co umożliwiła optymalizację materiałową. Stopień samonaprawy zoptymalizowanego kompozytu wyniósł 43%, co jest wartością obiecującą.

Efekt samonaprawy wykazano także, mierząc głębokość wnikania cieczy w rysy betonu (o podobnej szerokości na powierzchni). Jest ona wyraźnie mniejsza w przypadku betonu po samonaprawie, co oznacza, że w materiale zachodzi wypełnianie rys postępujące od wewnątrz (rysunek 6).

Niektóre właściwości mechaniczne betonu modyfikowanego żywicą epoksydową bez utwardzacza są jednak gorsze w stosunku do kompozytu niemodyfikowanego (np. wytrzymałość na ściskanie i zginanie). Jest to spowo-



Rys. 6. Głębokość wnikania cieczy w rysy betonu o podobnej szerokości na powierzchni jest wyraźnie mniejsza po samonaprawie

dowane obecnością w tworzywie nieutwardzonej żywicy, a także środków emulgujących, zawartych w wodnej emulsji żywicy, które utrudniają wykorzystanie wody z emulsji w procesie hydratacji cementu. Można także przypuszczać, że emulgatory zakłócają katalityczny mechanizm sieciowania żywicy epoksydowej bez utwardzacza. W przedstawionych badaniach nie stosowano również podwyższonej temperatury podczas dojrzewania.

Wiele problemów wymaga więc jeszcze rozwiązania, jednak dotychczasowe wyniki można uznać za obiecujące.

Streszczenie

W artykule przedstawiono koncepcję samozaleczania i samonaprawy betonu. Omówiono mechanizmy samozaleczania autogenicznego oraz sposoby sterowania tym zjawiskiem, tzn. nadawania betonowi zdolności do samonaprawy. Szczególną uwagę poświęcono zastosowaniu rozproszonych nośników substancji naprawczej, w tym zwłaszcza możliwości wykorzystania żywicy epoksydowej bez utwardzacza jako modyfikatora kompozytu cementowego. Wskazano dotychczasowe osiągnięcia oraz problemy do rozwiązania, wytyczające niezbędne kierunki dalszych badań w tym zakresie.

Abstract

The paper deals with the idea of self-healing and self-repair of cement concrete. The mechanisms of autogenous self-healing have been described together with the methods of controlling this phenomenon, i. e. granting to the concrete the ability to self-repair. The particular attention has been paid to the use of dispersed carriers of the repair mean, including the possibility of application of epoxy resin without a hardener as the modifier for the cement composite. The present achievements have been pointed out as well as the problems to resolve, showing the necessary directions of the further researches in this area.