

# Samonaprawa kompozytu epoksydowo-cementowego; ocena możliwości

Dr hab. inż. Paweł Łukowski, mgr inż. Grzegorz Adamczewski

Modyfikacja materiału w celu nadania mu zdolności do samonaprawy stanowi jedną z obiecujących koncepcji współczesnej inżynierii materiałów budowlanych. W artykule przedstawiono dotychczas proponowane rozwiązania w tym zakresie, szczególną uwagę poświęcając możliwości samonaprawy kompozytu cementowego modyfikowanego żywicą epoksydową bez utwardzacza. Przedstawiono wyniki wstępnych badań laboratoryjnych potwierdzających taką możliwość. Koncepcja ta jest wciąż na etapie badań rozpoznawczych; szereg problemów technologicznych i materiałowych wymaga rozwiązania.

**Słowa kluczowe:** beton, cement, samonaprawa, trwałość, żywica epoksydowa.

## Self-repairing of epoxy-cement composite; evaluation of possibility

Modification of the material towards self-repairing ability is one of the promising ideas of the modern building materials engineering. The proposed solutions in that area are described in the paper. The particular attention has been paid to the possibility of self-repairing of the cement composite modified using epoxy resin without a hardener. The results of the introductory laboratory tests have been presented, which have confirmed such possibility. The idea is still on the stage of the introductory testing; a number of technological and material problems need to be resolved.

**Key words:** cement, concrete, durability, epoxy resin, self-repairing.

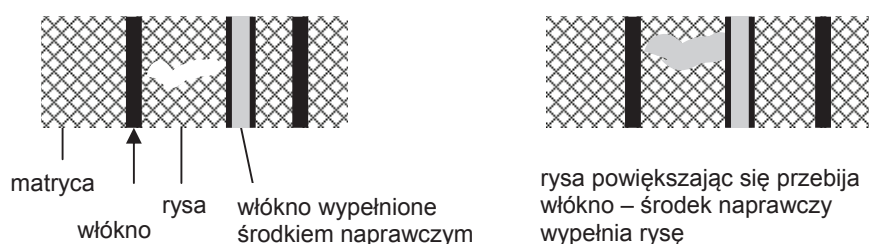
### 1. Wprowadzenie: metody technicznej realizacji samonaprawialności

Naprawa konstrukcji jest często procesem trudnym technicznie, a zarazem kosztownym. Jednym z zadań współczesnej inżynierii materiałów budowlanych jest opracowanie materiałów budowlanych o zwiększonej trwałości, co pozwoliłoby na zmniejszenie częstotliwości napraw [1, 2]. Z drugiej strony, poszukiwane są takie rozwiązania materiałowo-technologiczne, które stanowiłyby ułatwienie samego procesu naprawczego. Perspektywę

połączenia obu tych kierunków badawczych stwarza koncepcja betonów i zapraw samonaprawialnych [3]. Samonaprawa polega na działaniu materiału naprawczego specjalnie wprowadzonego w trakcie wytwarzania mieszanki betonowej, które to działanie następuje w przewidziany sposób i w założonych okolicznościach.

Jednym ze sposobów nadania betonowi zdolności do samonaprawy jest umieszczenie materiału naprawczego, zwykle żywicy i osobno utwardzacza, w mieszance betonowej w specjalnych minikapsułkach. Po przekroczeniu

założonego krytycznego poziomu naprężeń kapsułki pękają, uwalniając żywicę i utwardzacz, które powinny się wymieszać, wnikać do powstałej mikrorysy i utwardzając się powstrzymać jej propagację. Można również dodawać do mieszanki betonowej ciekłą żywicę zawierającą utwardzacz w rozproszonych w niej kapsułkach. Po uwolnieniu środka utwardzającego miesza się on z żywicą. Duże osiągnięcia w tej dziedzinie – a także rozpropagowanie idei samonaprawialności betonu – wiążą się z pracami Carolyn M. Dry z University of Illinois, Urbana, USA. Zaproponowała ona umieszczenie środka naprawczego w kruchych włóknach, które następnie dodaje się do mieszanki betonowej jako składnik zbrojenia rozproszonego [4]. Przekroczenie odpowiedniego naprężenia powoduje pęknięcie włókna, czego efektem jest uwolnienie środka naprawczego do powstałej mikrorysy i jej scalenie (rys. 1).

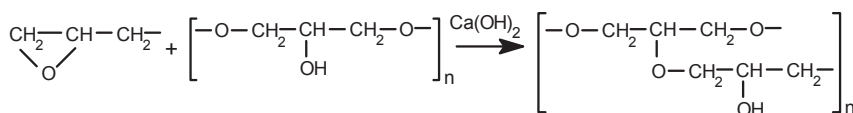


**Rys. 1.** Mechanizm samonaprawiania rysy wewnątrz betonu wg metody C. M. Dry  
**Fig. 1.** Mechanism of self-repairing acc. to C. M. Dry

Jednym z obiecujących sposobów nadawania betonowi zdolności do samonaprawy jest zastosowanie modyfikacji żywicą epoksydową bez utwardzacza.

## 2. Spoiwa epoksydowo-cementowe stosowane bez utwardzacza

Duża reaktywność grup epoksydowych w łańcuchach nieutwardzonej żywicy epoksydowej powoduje, że w pewnych warunkach i w pewnym zakresie możliwe jest sieciowanie polimeru bez udziału utwardzacza pod wpływem czynnika katalitycznego (rys. 2); rolę tę może spełniać obecny w zaczynie cementowym wodorotlenek wapnia [5].



**Rys. 2.** Sieciowanie żywicy epoksydowej pod wpływem wodorotlenku wapnia  
**Fig. 2.** Cross-linking of an epoxy resin under the action of calcium hydroxide

tlenek wapnia [5]. Wstępne badania, prowadzone przede wszystkim w Japonii przez Y. Ohame, potwierdziły taką możliwość [6]. Badania prowadzone w Katedrze Inżynierii Materiałów Budowlanych Politechniki Warszawskiej wykazały jednak, że nadmiar żywicy może przy większych zawartościach (powyżej 20% masy cementu) powodować pogorszenie niektórych właściwości w porównaniu z tworzywem zawierającym utwardzacz.

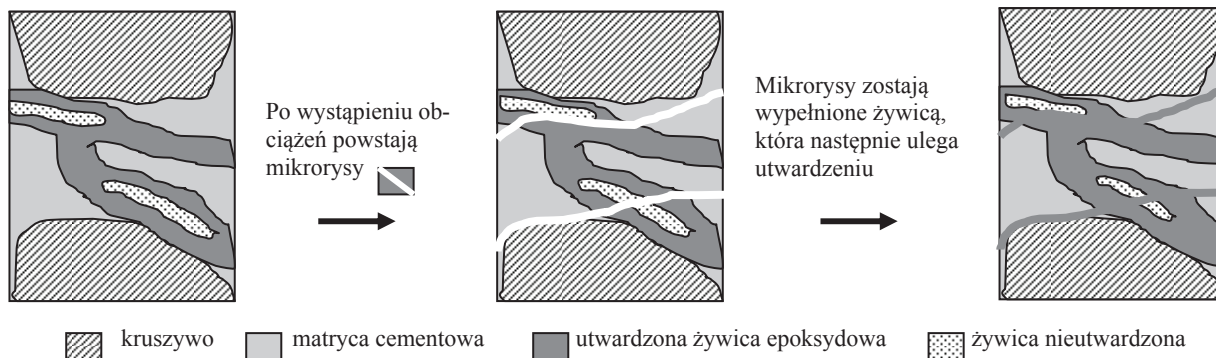
Modyfikacja spoiw cementowych żywicą epoksydową bez utwardzacza stanowi jeden z nowych, a przy tym najbardziej obiecujących ze względów praktycznych, kierunków rozwoju technologii kompozytów polimerowo-cementowych. Oprócz względów technologicznych, szczególnie atrakcyjna jest tu możliwość wykorzystania tego rodzaju materiałów jako samonaprawialnych. Przy zawartości polimeru w spoiwie wynoszącej 20% i więcej stopień usieciowania żywicy epoksydowej stosowanej bez utwardzacza szacuje się na około 50% [7]; nadmiar nieutwardzonej żywicy pozostaje początkowo zamknięty w porach stwardniałego zaczynu. W miarę występowania

obciążeń żywica zostaje uwolniona i wypełnia powstające mikrorysy w strukturze tworzywa, gdzie wchodząc w kontakt z wodorotlenkiem wapnia ulega usieciowaniu i utwardzeniu. Mikrorysy zostają uszczelnione i scalone (rys. 3).

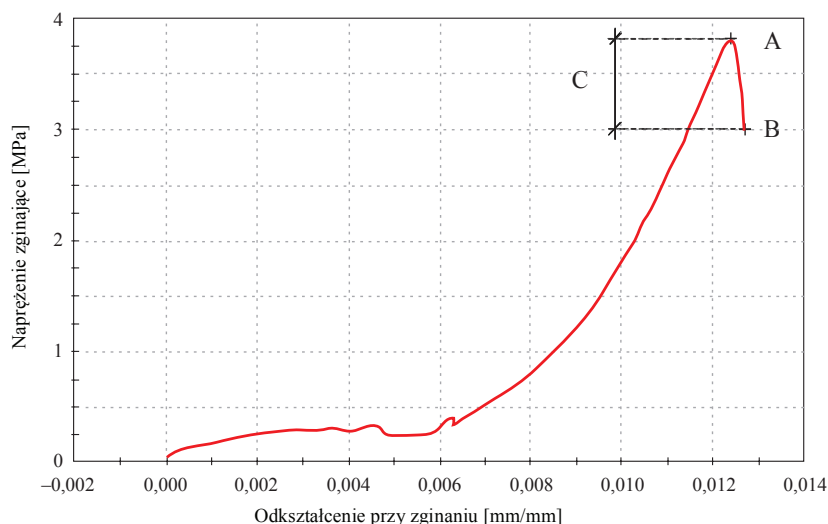
## 3. Metodyka badań

Celem badań było wykazanie możliwości samonaprawy kompozytu cementowego modyfikowanego żywicą epoksydową bez

utwardzacza. Przez samonaprawę rozumie się zdolność materiału do odtworzenia ciągłości struktury co skutkuje częściowym przywróceniem właściwości mechanicznych uszkodzonego elementu. Realizacja tego celu wymaga nie tylko optymalizacji składu kompozytu, ale także opracowania metodyki badań, która pozwoliłaby na wiarygodną ocenę efektu samonaprawy. Należało przede wszystkim rozwiązać problemy dotyczące kontrolowanego obniżania wytrzymałości próbek. Inny problem wynika z niejednorodności badanego materiału powodującej często duży rozrzut wyników i w konsekwencji trudności w ich interpretacji (wnioskowanie statystyczne). Autorzy rozważali i przeprowadzili badania rozpoznawcze z uwzględnieniem różnych możliwości obciążania próbek: ze względu na rodzaj obciążenia (zginanie, ściskanie, rozciąganie), jego charakter (statyczne, dynamiczne) oraz powtarzalność (jednorazowe, cykliczne). Na obecnym etapie badań wstępnych przyjęto jednorazowe obciążenia zginające o charakterze statycznym. Kontrolowany proces osłabiania próbek był możliwy do zrealizowania dzięki precyzyjnemu określeniu chwili, w której siła zginająca wywołuje zarysowanie próbki (wykorzystano sterowaną komputerowo maszynę wytrzymałościową). Rozwarcie rysy jest związane ze spadkiem wartości siły zginającej, co wynika z osłabienia zaryso-



**Rys. 3.** Koncepcja samonaprawialności kompozytu epoksydowo-cementowego [8]  
**Fig. 3.** Idea of self-repairing of an epoxy-cement composite [8]



**Rys. 4.** Zależność napężenie – odkształcenie uzyskana w trakcie próby zginania  
**Fig. 4.** Stress-strain curve obtained by bending test

wanej struktury materiału (rys. 4). Punkt A odpowiada wytrzymałości próbki na zginanie, a zatem wartości naprężenia, przy którym dochodzi do zarysowania. Odległość C pomiędzy punktami A i B odpowiada spadkowi naprężenia spowodowanemu propagacją rysy w próbce. Dobierając odpowiednio wartość C można kontrolować rozwartość rysy.

W ten sposób uzyskano oczekiwane osłabienie próbek, jak również określono wytrzymałość na zginanie każdej z nich, co pozwoliło na ograniczenie niezbędnej liczby próbek (dużej z uwagi na niejednorodność struktury materiału skutkującą zwiększoną niepewnością wnioskowania statystycznego). Otrzymane w ten sposób osłabione próbki podzielono na dwie grupy, z których dla jednej określono wartość wytrzymałości na zginanie natychmiast po osłabieniu, a drugą pozostawiono na pewien czas w celu umożliwienia samonaprawy, po czym również określono wytrzymałość na zginanie.

#### 4. Wyniki wstępnych badań laboratoryjnych

Badano kompozyt epoksydowo-cementowy (ECC), w którym jako współspoiwo zastosowano

żywicę epoksydową bez utwardzacza. Badano zaprawy ECC o zawartości żywicy epoksydowej 30% w stosunku do masy cementu. Współczynnik woda/cement wynosił 0,50, a stosunek zawartości spoiwa do kruszywa 1:3. Zastosowano cement portlandzki CEM I 32,5R wg PN 197-1:2002, piasek normowy jako wypełniacz oraz dostępną na rynku żywicę epoksydową. Wykonane zgodnie z przedstawioną recepturą próbki poddano badaniom wytrzymałości na zginanie metodą trójpunktową, zgodnie z procedurą opisaną

w rozdziale 3. Przebieg badań był następujący:

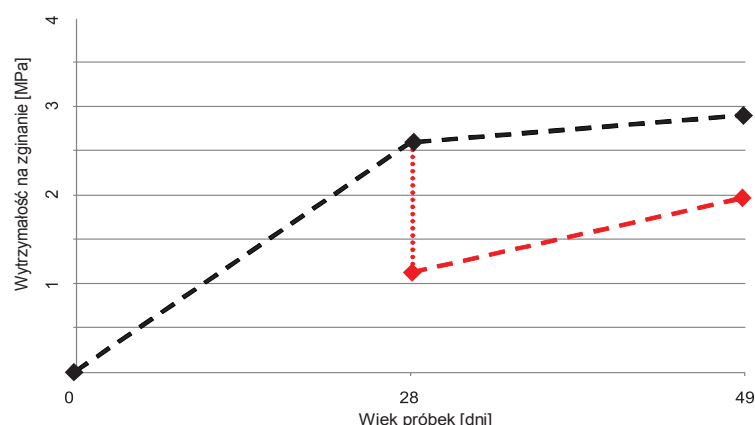
- badanie próbek po 28 dniach dojrzewania,
- kontrolowane obciążenie próbek z prędkością 250N/min do poziomu spadku siły zginającej o 0,3%,
- badanie części próbek po obciążeniu,
- pozostawienie pozostałych próbek po obciążeniu w warunkach powietrzno-suchych,
- badanie próbek po 21 dniach od obciążenia.

Ocenie podlegał stopień powrotu wytrzymałości po samonaprawie, zdefiniowany jako  $SP = f_{b \text{ posamonaprawie}} / f_{b \text{ 28 przed obciążeniem}}$  (rys. 5).

Zdefiniowany powyżej stopień powrotu w prezentowanym badaniu wynosił 0,72. Potwierdza to możliwość zachodzenia zjawiska samonaprawy w kompozycie ECC bez utwardzacza.

#### 6. Podsumowanie

Typowe metody napraw konstrukcyjnych betonu, np. iniekcja polimerami, wymagają dostarczania materiału naprawczego do betonu z zewnątrz. Koncepcja samonaprawialności zakłada, że wytworzony beton zawiera w sobie środek naprawczy, który zostanie samoistnie wykorzystany



**Rys. 5.** Wytrzymałość na zginanie kompozytu epoksydowo-cementowego o zawartości żywicy epoksydowej 30% masy cementu; na czerwono zaznaczono wytrzymałość po kontrolowanym osłabieniu próbek i samonaprawie

**Fig. 5.** Flexural strength of the epoxy-cement composite with the content of the epoxy resin 30% of the cement mass; red line marks the strength after controlled weakening of the samples and self-repair

w miejscu i czasie, w którym jest potrzebny. Naprawa została podjęta w chwili wystąpienia uszkodzenia bez konieczności interwencji człowieka. Koncepcja ta jest wciąż na etapie wstępnych badań; do rozwiązania pozostaje nadal szereg problemów technologicznych i materiałowych. Nie ulega jednak wątpliwości, że beton samonaprawialny stanowi krok w kierunku „inteligentnych” materiałów budowlanych XXI wieku. Jednym z obiecujących kierunków rozwoju materiałów budowlanych o zdolności do samonaprawy są kompozyty epoksydowo-cementowe stosowane bez utwardzacza.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Czarniecki L., XLVII Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica, 2001, 213–231
- [2] Czarniecki L., Kurdowski W., Mindess S., in: Developments in the formulation and reinforcement of concrete, Woodhead Publishers Ltd. Abington, Cambridge, England 2008, 270–284
- [3] Czarniecki L., Łukowski P., Materiały Budowlane, 2 (2008), 2–4
- [4] Dry C. M., US Patent No. 19900540191 – Self-Repairing, Reinforced Matrix Materials
- [5] Kakiuchi H., New epoxy resins. Shokodo, Tokio, 1985
- [6] Ohama Y., Demura K., 3rd Southern African Conference on Polymers in Concrete, Johannesburg, 1997, 240–249
- [7] Katsuhata T., Ohama Y., Demura K., 10th Int. Congress on Polymers in Concrete, 2001, Hawaii (CD)
- [8] Łukowski P., Rola polimerów w kształtowaniu właściwości spoiw i kompozytów polimerowo-cementowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2008

#### INFORMACJE O AUTORACH

**Dr hab. inż. Paweł Łukowski**, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, inżynieria materiałów budowlanych, budowlane kompozyty polimerowo-cementowe, optymalizacja i projektowanie materiałowe, e-mail: P.Lukowski@il.pw.edu.pl  
**Mgr inż. Grzegorz Adamczewski**, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, inżynieria materiałów budowlanych, e-mail: G.Adamczewski@il.pw.edu.pl

**Adres do korespondencji:** dr hab. inż. Paweł Łukowski, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Al. Armii Ludowej 16, 00–637 Warszawa

Niniejszy artykuł opracowano w ramach realizacji projektu badawczego MNiSW nr N506 257637.

## Badania i ocena powłok ochronnych na aluminium architektonicznym

**Dr inż. Teresa Możaryn, inż. Wojciech Piwowarczyk**

W artykule omówiono procesy wytwarzania powłok zabezpieczających powierzchnie profili aluminiowych przeznaczonych do budownictwa. Przedstawiono metody badań i oceny tych zabezpieczeń.

**Słowa kluczowe:** aluminium, powłoki proszkowe, powłoki anodowe tlenkowe.

### Testing and assessment of protective coatings on aluminium for architectural applications

This paper discusses the producing processes of anticorrosion protection on aluminium profiles for architectural applications. The testing methods and assessment of these anticorrosion protection were presented”.

**Key words:** aluminium, powder coatings, anodic coatings.

#### 1. Wprowadzenie

Aluminium jest jednym z niewielu metali wykorzystywanych jako tworzywo konstrukcyjne. Metal i jego stopy wykazują lekkość, dostateczną wytrzymałość mechaniczną, dużą odporność na korozję w wielu środowiskach, dobre przewodnictwo elektryczne i ciepłone. W wyniku obróbki plastycznej na zimno następuje utwardzenie metalu i zwiększenie własności

wytrzymałościowych. Poprawę własności wytrzymałościowych i odlewniczych uzyskuje się wprowadzając do aluminium składniki stopowe: miedź, krzem, magnez, cynk i mangan. Składniki stopowe oraz odpowiednia obróbka cieplna mają wpływ nie tylko na własności mechaniczne i technologiczne stopów aluminium, ale także na odporność korozyjną. Jednak wzrost zawartości domieszek obniża odporność korozyjną stopu.

Korzystne właściwości mechaniczne, przy wysokiej odporności stopów aluminium na korozję, spowodowały bardzo szerokie wykorzystanie profili aluminiowych w budownictwie. Odporność na działanie agresywnych substancji chemicznych obecnych w środowisku użytkowania zapewnia odpowiednia obróbka powierzchni profili aluminiowych. Skuteczną i trwałą ochronę przed agresywnym działaniem środowiska atmosfery