

Grzegorz L. Golewski

Politechnika Lubelska, Wydział Inżynierii Budowlanej i Sanitarnej, ul. Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin, Poland  
Corresponding author. E-mail: glgol@wp.pl

Otrzymano (Received) 31.01.2008

## MIKROSTRUKTURA USZKODZEŃ W KOMPOZYTACH BETONOWYCH Z OSNOWAMI CEMENTOWYMI

Scharakteryzowano budowę kompozytów betonowych z osnowami cementowymi w kontekście ich podatności na kruche uszkodzenia. Opisano budowę warstwy stykowej pomiędzy osnową a inkluzjami, która, będąc najsłabszym miejscem w betonie, inicjuje uszkodzenia w jego strukturze. Przedstawiono podstawowe przyczyny rozwoju pęknięć w betonie oraz opisano miejsca ich występowania. Analiza wykonanych zdjęć skaningowych (kompozytów po zniszczeniu) dowodzi, iż o destrukcji materiału decyduje postępujący wraz z narastającym obciążeniem zewnętrznym rozwój szczelin prostych i skrzydłowych. Etapy ich progresji powiązane z poziomami naprężeń krytycznych  $\sigma_I$  i  $\sigma_{II}$ . Szczeliny proste pojawiają się w kompozycie przy przekroczeniu pierwszego poziomu naprężeń, natomiast wzrost szczelin skrzydłowych następuje, gdy naprężenia krytyczne osiągną poziom  $\sigma_{II}$ . Dalszy rozwój uszkodzeń w materiale przebiega w sposób niekontrolowany, prowadząc w konsekwencji do szybkiej jego destrukcji przy nawet niewielkim wzroście obciążenia. Rozwój mikroszczelin ma decydujący wpływ na końcowe makroskopowe odkształcenia betonu. W celu zapobiegania pojawianiu się defektów w strukturze kompozytu możliwe jest wykorzystanie nanotechnologii w technologii betonu. Wówczas wprowadza się do mikrostruktury betonu niereaktywne bądź reaktywne nanocząstki w postaci np. popiołów lotnych, pyłów krzemionkowych i mikrowłókien, krzemionki strąceniowej lub nanokrzemionki. Stosować można również koncepcję betonów samonaprawialnych poprzez wprowadzenie do początkowej struktury kompozytu mikrokapsulek wypełnionych żywicą epoksydową. Innym rodzajem aktywnego nanomodifikatora mogą być laseczkowe bakterie glebowe *Bacillus Pasteurii*.

Słowa kluczowe: kompozyt betonowy, kruchość betonu, szczelina prosta, szczelina skrzydłowa, naprężenie krytyczne, nanomodifikacja

## MICROSTRUCTURE OF DAMAGES IN THE CONCRETE COMPOSITES WITH CEMENT MATRIXES

The structure of the concrete composites with cement matrixes has been characterized in the article in the context of their susceptibility to brittle damages. The structure of the interfacial transition zone between the matrix and inclusions has been described. As the weakest place in the concrete, the interfacial transition zone is of decisive importance for the process of defect initiation in the concrete structure. Basic causes of defect development in concrete have been presented as well as the places of defect occurrence have been described. The analysis concerning scan images (images of destructed composites) proves that the development of straight and wing-type cracks (progressing in accordance with the increase of external load) is the decisive factor for destruction of material. The stages of cracks progression have been combined with the levels of critical stresses  $\sigma_I$  and  $\sigma_{II}$ . Straight cracks occur in the composite when the first stress level is exceeded while the increase of wing-type cracks takes place when critical stresses reach the level of  $\sigma_{II}$ . Further development of material defects progresses in an uncontrolled manner and consequently leads to rapid destruction of material even in case of a small load increase. Development of microcracks has a decisive influence on final macroscopic deformations of concrete. In order to prevent occurrence of defects in the composite structure, it is possible to employ nanotechnology in the concrete production technology. For this purpose, non-reactive or reactive nanomolecules (e.g. in the form of fly ash, silica fume and microfibres, precipitated silica or nanosilica) are introduced to the concrete microstructure. The concept of self-repairing concrete can be also applied that consists in introducing microcapsules filled with epoxide resin into the initial structure of the composite. *Bacillus Pasteurii* soil bacteria can be used as another type of active nanomodifier.

Keywords: concrete composite, brittleness of concrete, straight crack, wing crack, critical stress, nanomodification

## WPROWADZENIE

Jednym z głównych zadań nowoczesnej inżynierii materiałowej w zakresie budownictwa jest projektowanie i realizacja obiektów budowlanych w taki sposób, aby osiągnąć możliwie największe bezpieczeństwo konstrukcji przy jak najmniejszych nakładach finansowych.

Stąd też dla inżyniera istotna jest wiedza o procesach rozwoju uszkodzenia i pęknięcia w materiałach konstrukcyjnych. Pozwala ona wpływać na podnoszenie jakości betonu, z którego wykonywane są konstrukcje, szacować występujące w nich wady oraz określać przyczyny

ich powstawania. Prowadzi to do uzyskiwania kompozytów o jak najwyższej jakości, trwałości i niezawodności pracy.

Beton jest obecnie najczęściej stosowanym (około 6 mld m<sup>3</sup> rocznie) materiałem spośród wszystkich wytwarzanych przez człowieka, a drugim po wodzie w całym zbiorze stosowanych materiałów. Jest on również najstarszym sztucznym komponentem spośród obecnie stosowanych w technice, gdyż jego historia liczy sobie około 8000 lat (z tego 200 lat w czasach nowożytnych) [1]. Z uwagi na swoją budowę beton jest kompozytem o skomplikowanej strukturze wewnętrznej. Mimo to w literaturze prezentującej zagadnienia związane ze: składem, budową, technologią wykonania, badaniami czy w końcu terminologią kompozytów, np. [2, 3], materiał ten w analizach jest zupełnie pomijany.

Celem niniejszej pracy jest zatem przedstawienie podstawowych zagadnień związanych z klasyfikacją betonu jako kompozytu oraz omówienie jednego z istotnych problemów, jaki wynika z jego anizotropii i heterogenicznej budowy. W artykule przedstawiony zostanie problem kruchości betonu oraz wynikające z tego konsekwencje podczas pracy konstrukcji betonowych, z osnowami cementowymi, poddawanych obciążeniom mechanicznym.

## ZJAWISKO KRUCHEGO PĘKANIA W BETONIE

Wśród komponentów pierwotnych tworzących strukturę betonów konstrukcyjnych, których zasadnicze podziały przedstawił np. Jamrózy w pracy [4], znajdują się cement portlandzki, piasek, kruszywo grube, dodatki mineralne, domieszki chemiczne i woda. Te składniki kompozytów betonowych można podzielić wg dwóch klasyfikacji: na spoiwa i wypełniacze lub osnowę (matrycę) i inkluzje. Osnowa, czyli w przypadku kompozytów betonowych zhydratyzowane ziarna cementu, określane jako zaczyn cementowy, poprzez swoje właściwości wiążące i przyczepność, łączy ze sobą wypełniacze (inkluzje), którymi są kruszywo i pozostałe składniki kompozytu.

W niejednorodnej strukturze betonu poza występowaniem osnowy cementowej oraz wypełniaczy wyróżnia się również warstwę stykową - *WS* (interfacial transition zone - *ITZ*) między tymi dwoma składnikami, której grubość w przypadku betonów zwykłych waha się w przedziale od 9 do 51 μm [5]. Większe zwrócenie uwagi na ten obszar w betonie wiąże się z zaobserwowaniem udziału *WS* w przenoszeniu naprężeń z kruszywa na stwardniały zaczyn cementowy i faktu wiązania z nim pierwszych uszkodzeń pojawiających się w kompozycie [6]. Ten obszar betonu uznaje się bowiem za najsłabszy składnik jego struktury. Warstwę tę cechuje niższa twardość w porównaniu do kruszywa i zaczynu cementowego, o wiele większa od nich porowatość,

bardzo niejednorodna budowa oraz niska wytrzymałość [7]. Rola *WS* w betonie jest na tyle istotna, że można ją traktować jako trzeci składnik kompozytu po cemencie i kruszywie, którego nie jesteśmy w stanie uwzględnić w projektowaniu mieszanki betonowej ani kontrolować w procesie twardnienia betonu.

W kontekście procesu zarysowania i zniszczenia kompozytów betonowych ważną rolę odgrywa adhezja występująca pomiędzy poszczególnymi składnikami betonu. Zjawisko adhezji określa bowiem powierzchnią współpracę osnowy cementowej z inkluzjami w postaci ziarn kruszywa oraz zjawiska fizykochemiczne, które zachodzą w obrębie kontaktu obu tych materiałów. Związane jest to z występowaniem na połączeniu wspomnianych dwóch faz kompozytu zarówno oddziaływań chemicznych, jak i mechanicznych. Pierwsze z nich związane są z aktywnością chemiczną zaczynu i kruszywa, drugie natomiast z nierównościami występującymi na powierzchni ich kontaktu.

O trwałości i bezpieczeństwie konstrukcji betonowych i żelbetowych decyduje m.in. kruchość betonu. Wyróżnia się betony:

- idealnie kruche (completely brittle), gdy podczas obciążania występuje zjawisko kruchego pękania,
- półkruche (semi-brittle), gdy zniszczenie materiału poprzedzone jest powstawaniem małych odkształceń sprężystych i plastycznych określanymi jako deformacje quasi-plastyczne.

Obniżenie wytrzymałości materiałów kruchych, takich jak beton, związane jest z występowaniem w nich defektów mikrostruktury, które ogólnie można podzielić na:

- wewnątrzmaterialowe typu szczeliny Griffitha (Griffith flaw) w przypadku betonów kruchych,
- tzw. pęknięcia krawędziowe na powierzchniach betonu.

Według Kucharskiej [8], mechanizm zniszczenia betonu wynika przede wszystkim z niejednorodnej jego budowy i to głównie na poziomie mikrostruktury. Budowa betonu jako materiału wieloskładnikowego i wielofazowego sprawia, że w procesie zarysowania podstawowe znaczenie mają nieciągłości związane z: porowatością i strukturą porów, niejednorodnym rozmieszczeniem składników w objętości betonu, w tym głównie produktów hydratacji, występowaniem międzyfazowych granic i warstw przejściowych, oraz pojawianiem się poza wiązaniami chemicznymi innych wiązań, np. wodorowych bądź Van der Waalsa, takich jak: dipolowe, indukcyjne, dyspersyjne, konformacyjne [9]. W pobliżu defektów betonu występują pod działaniem obciążenia zewnętrznego lokalne spiętrzenia naprężeń. Mogą one powodować gwałtowną propagację uszkodzenia, a w efekcie zniszczenie całego elementu. Najbardziej niebezpiecznymi miejscami koncentracji naprężeń są najmniejsze szczeliny o ostrych końcach. Proces kruchego pękania, tzn. wzrost długości szczeliny, jest za-

zwyczaj zjawiskiem o charakterze dynamicznym, nieodwracalnym i skutkach katastrofalnych.

Początkowo uszkodzenia w betonie są tak małe, że ich wykrycie bądź analiza możliwa jest tylko przy zastosowaniu nowoczesnych technik akustycznych (acoustic emission) [10, 11]. W procesie narastania obciążeń zewnętrznych defekty takie ulegają wewnętrznej kumulacji, łącząc się w coraz większe łańcuchy rys, prowadząc w konsekwencji do całkowitej destrukcji struktury betonu. Zagadnienie powstawania i propagacji uszkodzeń w kompozytach betonowych jest zjawiskiem bardzo istotnym ze względu zarówno na nośność elementów i konstrukcji, jak też ich trwałość (odporność na korozję, karbonatyzację) [12-14].

## MIEJSCA WYSTĘPOWANIA DEFEKTÓW W STRUKTURZE BETONU

Beton jest materiałem wielofazowym i niejednorodnym, zatem przyczyn i miejsc rozwoju defektów może być wiele. Pierwsze uszkodzenia zazwyczaj pojawiają się w osnowie cementowej lub w WS kruszywo-zaprawa. Wpływ na ich powstawanie mogą mieć np. niezhydratyzowane ziarna cementu, pory występujące we wszystkich fazach kompozytu, wielkość i rodzaj zastosowanego wypełniacza czy też nieodpowiednio przeprowadzony proces technologiczny wytwarzania mieszanki betonowej.

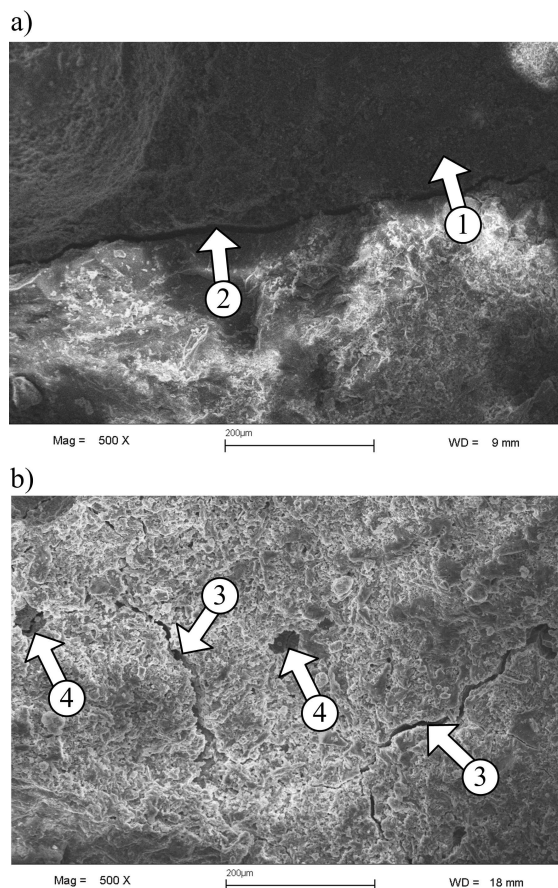
W pracy [15] zilustrowano miejsca inicjacji mikropełnięć występujące w zdeformowanym betonie pod obciążeniem zewnętrznym. W przypadku analizy dwuwymiarowej są to:

- szczeliny powstałe w strefie stykowej kruszywo-zaprawa:
  - niepropagujące się w głąb osnowy cementowej,
  - z tendencją do rozwoju w głąb osnowy cementowej,
  - z możliwością rozwoju w głąb kruszywa,
- szczeliny powstałe w samej osnowie cementowej.

Na rysunku 1 przedstawiono zdjęcia skaningowe wykonane przez autora, prezentujące podstawowe rodzaje uszkodzeń, jakie mogą się pojawić w kompozytach betonowych. Rysunek 1a pokazuje uszkodzenia w WS kruszywo-zaprawa, natomiast rysunek 1b defekty występujące w matrycy cementowej (pory i rysy). Szczegółowy opis struktury zaczynu wraz z przyczynami występowania w nim najczęstszych uszkodzeń opisał autor w pracy [16]. W wyniku analiz stwierdził, iż podstawowy wpływ na rozwój defektów w osnowie cementowej mogą mieć pustki, pory, szczeliny i rysy występujące w budowie zaczynu oraz przemiany strukturalne występujące w procesie mieszania, zagęszczania ukladania i dojrzewania mieszanki betonowej.

Przy opisie struktury mikrospękań zdeformowanego betonu ważne jest określenie: położenia defektów, rodzaju pęknięcia, kierunków szczelin oraz liczby uszkodzeń.

Według autorów prac [17-19] (w przypadku analizy dwu wymiarowej), można wyodrębnić pęknięcia typu prostoliniowego lub skrzydłowego, gdy zmienia się kierunek rozwoju pęknięcia prostoliniowego. Natomiast wg autorów pracy [20], analizujących zdjęcia skaningowe uszkodzonego betonu, propagacja szczeliny może występować w dwóch, trzech lub czterech kierunkach od „centrum” uszkodzenia (analiza rzeczywistego pęknięcia trójwymiarowego).



Rys. 1. Przykładowe obrazy uszkodzeń w mikrostrukturze betonów: a) w warstwie stykowej, b) w osnowie cementowej; 1 - ziarno kruszywa, 2 - uszkodzenie w WS, 3 - rysy w osnowie, 4 - pory w osnowie

Fig. 1. Example of damage pictures in concrete microstructures: a) in interfacial transition zone, b) in cement matrix; 1 - coarse aggregate grain, 2 - damages in ITZ, 3 - matrix damages, 4 - pores in the matrix

Poza miejscami występowania szczelin istotny jest również ich kształt i budowa. Autor w pracy [21] scharakteryzował podstawowe modele szczelin, do których zaliczyć można:

- dylatacyjne, tzn. otwierające się na skutek działania obciążeń zewnętrznych, chropowatości powierzchni kruszywa lub ciśnienia wewnętrznego wody,
- z tarcieniem kontaktowym, gdy brzegi szczeliny doznają poślizgu,
- z warstwą kohezyjną pomiędzy brzegami szczeliny,
- z tzw. „strefą procesową” (plastyczną lub materiału uszkodzonego) w wierzchołku makroszczeliny.

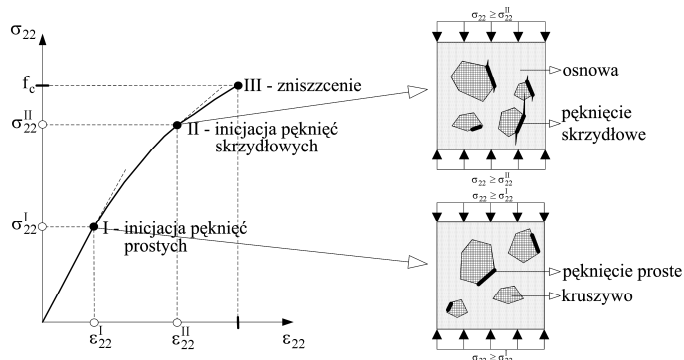
Fakt pojawiania się w materiale określonego typu uszkodzenia związany jest przede wszystkim ze sposobem obciążania materiału. Możemy wyróżnić szczeliny:

- otwarte, gdy lokalne składowe naprężenia w miejscu szczeliny wywołują stan rozciągania,
- zamknięte, gdy lokalne składowe stanu naprężenia w miejscu szczeliny powodują docisk jej powierzchni.

## ETAPY ROZWOJU MIKROPEKNIĘĆ WEWNĄTRZMATERIAŁOWYCH

Proces inicjacji i wzrostu pęknięć wewnątrz struktury betonu można zobrazować, korelując poziomy naprężenia krytycznych, występujące w obciążonym betonie, z procesem destrukcji materiału. Znajomość wartości tych naprężeń, określanymi w literaturze jako  $\sigma_I$  i  $\sigma_{II}$ , może być przydatna zarówno do ustalenia podatności danego kompozytu na proces rozwoju zarysowania w elementach betonowych, jak też prognozowania trwałości i bezpieczeństwa analizowanych obiektów.

Szczegółowo mechanizm niszczenia betonu w aspekcie teorii naprężeń krytycznych przedstawiono np. w pracy [22], natomiast rysunek 2 obrazuje etapy rozwoju pęknięć od momentu pojawienia się pierwszych mikroszczelin prostych w obszarach WS kruszywo-zaprawa (poziom naprężenie  $\sigma_I$ , punkt I na wykresie) do punktu, w którym następuje lawinowy wzrost uszkodzeń, powodujący zniszczenie elementu (punkt III na wykresie).



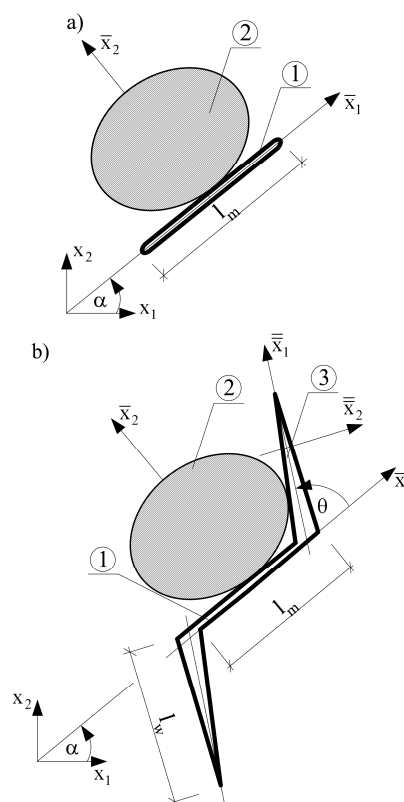
Rys. 2. Związek poziomów naprężeń krytycznych z procesem rozwoju szczeliny

Fig. 2. Relation between critical stress levels and cracks development process

W obliczeniach odkształceń kompozytu z uwzględnieniem występowania pierwszego rodzaju szczeliny najistotniejsza jest znajomość długości szczeliny ( $l_m$ ) oraz kąta jej nachylenia ( $\alpha$ ) w globalnym układzie współrzędnych  $x_1, x_2$ , który zawiera się zazwyczaj w przedziale od 40 do 50°. Dane te są niezbędne do późniejszego określenia wartości odkształceń w obszarze lokalnego układu współrzędnych szczeliny  $\bar{x}_1, \bar{x}_2$ .

Graficznie szczelinę prostą rozwijającą się w obszarze ziarna kruszywa przedstawiono na rysunku 3a.

W zaawansowanym stanie uszkodzenia, po przekroczeniu naprężeń krytycznych  $\sigma_{II}$ , wewnątrz kompozytu następuje wzrost szczelin prostych oraz inicjacja pęknięć skrzydełkowych. Związane jest to z napotkaniem przez rozwijającą się szczelinę prostą bariery energetycznej (np. drugie ziarno) lub tendencją rozwoju szczeliny w kierunku pionowym w fazie niestabilnej jej wzrostu. Do wyznaczenia makroskopowych odkształceń betonu z uwzględnieniem szczelin skrzydłowych istotnymi charakterystykami tych defektów są: długości skrzydełek ( $l_w$ ) oraz ich kąt nachylenia ( $\theta$ ), który wynosi zazwyczaj około 60°. Schemat szczeliny skrzydłowej z oznaczeniem wszystkich układów współrzędnych ( $\bar{x}_1, \bar{x}_2$  - lokalny układ współrzędnych szczeliny skrzydłowej) przedstawiono na rysunku 3b.



Rys. 3. Schemat lokalnych szczelin z zaznaczonymi układami odniesienia: a) szczelina prostej, b) szczeliny skrzydłowej; 1 - szczelina prosta, 2 - ziarno kruszywa, 3 - skrzydełko

Fig. 3. Diagram of local cracks with reference systems marked: a) straight crack, b) wing crack; 1 - straight crack, 2 - coarse aggregate grain, 3 - wing

Końcowe zniszczenie materiału ma miejsce, gdy naprężenia w elemencie przekraczają już znacznie wartości  $\sigma_{II}$ , a część szczelin skrzydłowych rozwija się w sposób niekontrolowany, prowadząc do makroskopowej fragmentacji materiału.

Przedstawione w pracy [23] wyniki badań dowodzą o istotnym związku pomiędzy występującymi pozio-

mami naprężeń krytycznych a zjawiskiem wzrostu odkształceń analizowanych elementów betonowych wskutek rozwoju układów rys i pęknięć. Stwierdzono, iż proces destrukcji betonu jest zjawiskiem wieloetapowym, a całkowite makroskopowe odkształcenia  $\varepsilon_{ij}$ , powstające w betonie pod wpływem obciążeń mechanicznych  $\sigma_{kl}$ , stanowią superpozycję następujących składowych odkształceń: czysto sprężystych, wywołanych porowatością początkową, powodowanych występowaniem szczelin.

Na podstawie oceny zdjęć mikroskopowych zniszczonego betonu [24] oraz analiz teoretycznych stwierdzono, iż najistotniejszymi odkształceniami z punktu widzenia procesu destrukcji materiału są deformacje kompozytu, będące wynikiem rozwoju defektów w jego strukturze. Znając wartości poziomów naprężeń krytycznych oraz podstawowe dane dotyczące szczelin, możliwe jest określenie w sposób analityczny makroskopowych odkształceń kompozytu. Wykonane przez autorów pracy [23] analizy wykazały, iż błąd w uzyskiwanych wartościach odkształceń w porównaniu do wyników doświadczalnych waha się na poziomie około kilkunastu procent.

## SPOSOBY ZAPOBIEGANIA POJAWIANIU SIĘ DEFECTÓW W STRUKTURZE BETONU

Decydujący wpływ na powstawanie i propagację uszkodzeń w betonie ma budowa jego struktury początkowej. Aby ograniczyć możliwość wczesnej inicjacji początkowych defektów w mikrostrukturze kompozytu, należy przede wszystkim odpowiednio dobierać jego skład. Odnosnie do spoiwa zabiegi, dzięki którym możliwa jest modyfikacja składu matrycy cementowej w celu zminimalizowania możliwości pojawienia się w niej dekohezji i uszkodzeń, omówiono m.in. w pracy [16].

W kontekście drugiego z miejsc, gdzie mogą występować początki destrukcji betonu, a więc WS pomiędzy ziarnami kruszywa i zaprawą wyczerpujące informacje można uzyskać, sięgając np. do pracy [25]. W przytoczonym artykule omówiono charakter powstawania i propagacji uszkodzeń w obszarze WS kruszywo-zaprawa. Scharakteryzowano strukturę modelu sferycznego w obszarze styku kruszywa z matrycą. Przedstawiono główne czynniki decydujące o budowie WS i omówiono sposoby pomiaru jej parametrów. Przeanalizowano oddziaływania mechaniczne i chemiczne na styku dwóch faz i schematycznie zilustrowano sposób destrukcji betonów zwykłych wskutek nukleacji i propagacji defektów w WS.

Poza precyzyjną modyfikacją struktury kompozytów z osnowami cementowymi, z uwzględnieniem zabiegów znanych z tradycyjnej technologii betonu, ich odporność na kruche uszkodzenia może być poprawiona z wykorzystaniem nowoczesnych technik inżynierii

materiałowej. W tym kontekście szczególne zastosowanie znajduje nanotechnologia materiałów budowlanych [26]. Podstawowe koncepcje dotyczące nanomodyfikacji betonu (nanomodyfikacja prosta i złożona) przedstawił Czarnecki w pracy [27]. Według zawartych tam informacji, osiąganie kompozytów o coraz większej wytrzymałości, trwałości i odporności na kruche uszkodzenia możliwe jest dzięki wprowadzeniu do mikrostruktury betonu niereaktywnych bądź reaktywnych nanocząstek w postaci np. popiołów lotnych, pyłów krzemionkowych i mikrowłókien, krzemionki strąceniowej lub nanokrzemionki. W pracy tej przedstawiono również koncepcję betonów samonaprawialnych poprzez umieszczenie w początkowej strukturze kompozytu mikrokapsulek wypełnionych żywicą epoksydową. W momencie gdy w materiale zaczęłoby pojawiać się uszkodzenie, żywica z kapsuły byłaby uwalniana, powodując pod wpływem alkalicznego środowiska renowację defektu. Innym rodzajem aktywnego nanomodyfikatora (o którym wspomniano również w pracach [1, 26]) mogą być laseczkowe bakterie glebowe *Bacillus Pasteurii* [28]. Zaletą tych mikroorganizmów jest możliwość ich wykorzystania przy zespolaniu ze sobą uszkodzonej struktury kompozytu. Zawiesina bakterii wraz z substancjami odżywczymi umieszczana jest w obrębie uszkodzonego miejsca, co powoduje, że odkładają one kryształy węgla wapnia, tym samym zasklepiając powstały defekt. Obecnie bakterie te są już szeroko wykorzystywane do stabilizacji podsypek piaskowych pod budynkami narażonymi na oddziaływania sejsmiczne, gdzie dzięki swoim specyficznym właściwościom potrafią zmienić w krótkim czasie pryzmę piasku w twardą bryłę.

## PODSUMOWANIE

Na wzrost uszkodzeń w kompozytach betonowych wpływają przede wszystkim właściwości WS pomiędzy ziarnami kruszywa i zaprawy oraz początkowa struktura osnowy cementowej. Rozwój szczelin przebiega etapowo i rozdzielony jest poziomami naprężeń krytycznych  $\sigma_I$  i  $\sigma_{II}$ . Podstawowymi rodzajami szczelin, mającymi wpływ na końcowe makroskopowe odkształcenia betonu, są szczeliny proste i skrzydłowe. W celu zapobiegania rozwojowi mikrodefektów należy zwrócić szczególną uwagę na odpowiedni dobór składników betonu. Aby wzmocnić początkową kruchą strukturę materiału, można stosować jej nanomodyfikację, która, wg pracy [27], uzasadnia nie tylko szansę na uzyskiwanie trwałych i niezawodnych kompozytów, ale również dalszy rozwój technologii betonu.

## LITERATURA

- [1] Czarnecki L., Kurdowski W., Tendencje kształtujące przyszłość betonu, Konferencja Naukowo-Techniczna „Dni Betonu”, Polski Cement Sp. z o.o., Wisła 2006, 47-64.

- [2] Braszczyńska-Malik K.N., Pędzich Z., Pietrzak K., Poślaniec Z., Sterzyński T., Szweycer M., Problemy terminologii w kompozytach i wyrobach kompozytowych, *Kompozyty (Composites)* 2005, 5, 1, 19-24.
- [3] Ochelski S., Metody doświadczalne mechaniki kompozytów konstrukcyjnych, WNT, Warszawa 2004.
- [4] Jamróży Z., O systematyce nazewnictwa związanego z betonem, *Inżynieria i Budownictwo* 2002, 11, 616-619.
- [5] Elsharief A., Cohen M.D., Olek J., Influence of aggregate size, water cement ratio and age on the microstructure of the interfacial transition zone, *Cement and Concrete Research* 2003, 33, 11, 1837-1849.
- [6] Kucharska L., W/C - wskaźnik wpływu warstwy przejściowej na właściwości mechaniczne betonów zwykłych i BWW i ich podział, *Cement Wapno Beton* 1999, 2, 39-45.
- [7] Brandt A.M., Wpływ warstwy przejściowej na właściwości mechaniczne betonów wysokowartościowych (BBW), II Konferencja Naukowo-Techniczna Zagadnienia materiałowe w inżynierii lądowej MATBUD 98, Kraków 1998, 21-30.
- [8] Kucharska L., Kształtowanie struktury wysokosprawnych betonów, Rola dodatków i domieszek, *Przegląd Budowlany* 1992, 8-9, 351-354.
- [9] Monteiro P.J.M., Mehta P.K., Ettringite formation on aggregate - cement paste interface, *Cement and Concrete Research* 1985, 15, 2, 378-380.
- [10] Moczko A., Emisja akustyczna w badaniach betonu, *Inżynieria i Budownictwo* 1996, 1, 42-46.
- [11] Hoła J., Moczko A., Pysznik J., Możliwości wykorzystania metody emisji akustycznej w badaniach betonu, *Przegląd Budowlany* 1998, 11, 477-479.
- [12] Piasta W.G., Sawicz Z., Piasta J., Sulfate durability of concretes under constant sustained load, *Cement and Concrete Research* 1989, 19, 216-220.
- [13] Piasta W.G., Concrete durability as the function of stress level in sulphate attack, *Archives of Civil Engineering* 1996, 1, 29-45.
- [14] Piasta W.G., Sawicz Z., Goprowski G., Trwałość obciążonego betonu w warunkach agresywności chemicznej, *Inżynieria i Budownictwo* 1996, 6, 368-369.
- [15] Golewski G., Sadowski T., Odporność na pękanie betonów z kruszywami naturalnymi i łamanymi, *Przegląd Budowlany* 2005, 10, 31-37.
- [16] Golewski G.L., Wpływ matrycy cementowej na kruche uszkodzenia betonu, *Drogownictwo* 2007, 12, 355-358.
- [17] Basista M., Gross D., The sliding crack model of brittle deformation: An internal variable approach, *International Journal of Solids and Structures* 1998, 35, 487-509.
- [18] Hori H., Nemat-Nasser S., Compression - induced microcrack growth in brittle solids: axial splitting and shear failure, *Journal Geophysics Research* 1985, 90, 3105-3125.
- [19] Yu S., Feng X., A micromechanics - based damage model for microcracks - weakened brittle solids, *Mechanics of Materials* 1995, 20, 59-76.
- [20] Nemat K.M., Monteiro P.J.M., Scrivener K.L., Analysis of compressive stress - induced cracks in concrete, *ACI Materials Journal* 1988, 95, 617-630.
- [21] Golewski G.L., Wykorzystanie programu T-FLEX do analizy rozwoju pęknięć w kompozytach betonowych, *Materiały Budowlane* 2007, 12, 14-16.
- [22] Golewski G., Sadowski T., Mechanizm zniszczenia kompozytów betonowych przy ściskaniu w aspekcie teorii naprężeń krytycznych, *Przegląd Budowlany* 2006, 5, 26-33.
- [23] Sadowski T., Golewski G., Effect of aggregate kind and grading on modelling of plain concrete under compression, *Computational Materials Science*, (2008) in press; doi: 10.1016/j.commatsci.2007.07.037
- [24] Golewski G., Sadowski T., Analiza uszkodzeń betonów na mineralnych kruszywach naturalnych i łamanych z wykorzystaniem metod mikroskopii skaningowej, *Inżynieria Materiałowa* 2007, 1, 33-38.
- [25] Golewski G.L., Analiza uszkodzeń w warstwie stykowej kruszywo - zaczyn kompozytów betonowych, *Przegląd Budowlany* 2008, 3 (w druku).
- [26] Czarnecki L., Nanotechnologia - wyzwaniem inżynierii materiałów budowlanych, *Inżynieria i Budownictwo* 2006, 9, 465-469.
- [27] Czarnecki L., Czy nanotechnologia to przyszłość betonu? *Materiały Budowlane* 2007, 11, 4-5.
- [28] Rodriguez-Navarro C., Rodriguez-Gallego M., Ben Cherkoun K., Gonzales-Munoz M.T., Conservation of ornamental stone by myxococcus xanthus - induced carbonate biomineralization, *Applied and Environmental Microbiology* 2003, 69, 4, 2182-2193.