

# Zastosowanie mikroskopu skaningowego do analizy uszkodzeń wewnątrzmaterialowych w betonach konstrukcyjnych

Dr inż. Grzegorz Ludwik Golewski, Politechnika Lubelska

## 1. Wprowadzenie

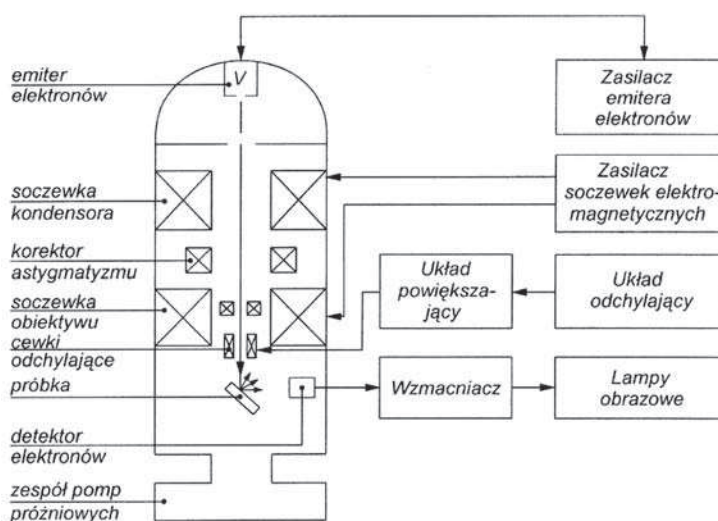
Koncentracje naprężeń w betonach występują na granicach faz oraz powierzchniach brzegowych defektów (pory, wierzchołki mikroszczelin), tj. w miejscach lokalnych skokowych różnic właściwości mechanicznych i odkształceniowych poszczególnych faz kompozytu betonowego. Lokalne spiętrzenia naprężeń mogą prowadzić do zarodkowania się nowych mikro-uszkodzeń oraz rozwoju istniejących mikrodefektów. Obserwacje mikroskopowe struktury wewnętrznej kompozytów betonowych, oraz powierzchni przełomów próbek zdeformowanego materiału pozwalają ustalić: sposób rozwoju pęknięć, miejsca ich występowania (matryca cementowa, warstwy stykowe faz) oraz kierunki ich propagacji. Cennym narzędziem w tych badaniach jest wykorzystanie elektronowych mikroskopów skaningowych (scanning electron microscopy – SEM). Mikroskop skaningowy przeznaczony jest bowiem przede wszystkim do badań powierzchni elementów i mikroorganizmów oraz ich struktury, a w szczególności do analiz preparatów o nierównej powierzchni takich jak np. przełomy materiałów konstrukcyjnych. Szerokie możliwości zastosowań SEM sprawiają, że stają się one bardzo pomocne szczególnie w takich dziedzinach nauki jak: inżynieria materiałowa, mechanika pęknięcia i mechanika zniszczenia materiałów czy fraktografia ilościowa.

Początek rozwoju mikroskopii skaningowej datuje się na rok 1935 kiedy to niemiecki fizyk Knoll przedstawił ideę konstrukcji mikroskopu, w którym obraz powierzchni próbki uzyskuje się przez jej skanowanie wiązką elektronów. Knoll wykonał pionierski eksperyment w tej dziedzinie nauki uzyskując pierwszy skaningowy obraz topografii próbki. Niestety dopiero od roku 1965 badania tego typu weszły do szerszego stosowania, głównie dzięki zdecydowanemu rozwojowi elektroniki w tamtym czasie. Obecnie analiza z wykorzystaniem SEM jest najpopularniejszą metodą mikroskopii elektronowej dzięki bezkonkurencyjnej głębi ostrości, prostocie przygotowania preparatów, łatwości interpretacji obrazów oraz możliwości licznych zastosowań [1].

## 2. Budowa mikroskopu skaningowego i zasada jego działania

Mikroskopia skaningowa jest cenną metodą badawczą, która pozwala na obserwację powierzchni różnych materiałów przy powiększeniach od 50 do nawet 1000000 razy przy bardzo dużej głębi ostrości. Wykorzystywany do tego celu elektronowy mikroskop skaningowy jest urządzeniem, którego najważniejszymi podzespołami są:

- działo elektronowe wytwarzające wiązkę elektronów,
- kolumna, w której elektrony są przyspieszane i ogniskowane,
- komora, w której umieszczana jest próbka i następuje kontakt elektronów z jej powierzchnią,
- detektory elektronowe odbierające i analizujące sygnały emitowane przez próbkę,



Rys. 1. Schemat blokowy elektronowego mikroskopu skaningowego [2]

- system zamieniający odbierane sygnały na rzeczywisty obraz powierzchni próbki.

Schemat blokowy mikroskopu skaningowego na podstawie pracy E. Osieckiej [2] przedstawiono na rysunku 1.

W mikroskopach skaningowych wiązka elektronów analizuje próbkę skanując wybrany obszar jej powierzchni, linia po linii. Strumień elektronów przyspieszany jest w polu elektrycznym o potencjale od 0,1 do 30 kV (najczęściej około 20 kV) i skupia się na powierzchni badanego materiału w niewielki punkt o średnicy około 0,1 nm. Wybór miejsca skanowania próbki zależy od tego, który jej obszar umieszczony zostanie w strefie oddziaływania wiązki elektronów. Jej ustawieniem można sterować za pomocą specjalnego pulpitu, wchodzącego w skład oprzyrządowania mikroskopu, posiłkując się obrazem, który widać na ekranie monitora. Mając wybrany obszar, który chcemy przeanalizować, ustawiamy odpowiedni rodzaj detektora i dokonujemy zeskanowania materiału. Otrzymany w ten sposób obraz możemy zapisać w dowolnym formacie plików graficznych np. gif lub jpg.

Główną zaletą mikroskopu skaningowego jest duża głębia ostrości, znacznie większa niż w mikroskopach optycznych oraz duży kontrast napięciowy umożliwiający analizy sąsiednich obszarów próbki [3]. Obserwując zdjęcia uzyskane w SEM odnosi się wrażenie, że są one trójwymiarowe na miarę obrazów postrzeganych przez nieuzbrojone oko człowieka. Głębnię ostrości  $G$  po uwzględnieniu istnienia aberracji soczewek elektronowych i określonej średnicy wiązki elektronów, oraz apertury soczewki (efektywna średnica otworu soczewki mierzona jako rozwartość układu, czyli jako kąt pomiędzy promieniami świetlnymi wpadającymi do układu z najbardziej odmiennych kierunków) wyznaczyć można z następującego wzoru (1):

$$G = \frac{\left( \frac{d_0}{M - d_e} \right)}{\alpha} \quad (1)$$

gdzie:  $d_0$  – rozdzielczość oka ludzkiego;  $d_0=0,2$  nm,  $M$  – powiększenie obrazu SEM,  $d_e$  – średnica wiązki elektronów np.  $d_e=10$  nm,  $\alpha$  – wartość apertury soczewki obiektywnej;  $\alpha=0,003$  rad.

### 3. Specyfika identyfikacji obrazów za pomocą detektorów elektronowych

Podczas kontaktu elektronów z powierzchnią próbki część z nich wnika w strukturę materiału na niewielką głębokość częściowo z powrotem z niej wychodząc, natomiast większość pozostaje w próbce tracąc energię w różnego rodzaju oddziaływaniach i reakcjach. W związku z tym analiza skanowanego obszaru próbki może być realizowana przy zastosowaniu jednego z dwóch detektorów elektronowych, do których należą:

- elektrony wtórne (secondary electrons – SE),
  - elektrony wstecznie rozproszone (backscattered electrons – BSE).
- Elektrony wtórne** mają niską energię około 5 eV i mogą penetrować tylko cienką powierzchniową warstwę próbki o grubości około 10 nm. Mimo to, obrazy uzyskiwane z ich wykorzystaniem odznaczają się wysoką rozdzielczością. Na zdjęciach wykonywanych z zastosowaniem SE możemy z dużą dokładnością obserwować topografię próbki. Ponieważ większość elektronów jest w stanie szybciej wydostać się z powierzchni wypukłych badanego materiału niż z zagłębień i powierzchni wklęsłych, przeto obszary próbki wypukłe są jaśniejsze (na analizowanych zdjęciach) natomiast partie wklęsłe ciemne.

**Elektrony wstecznie rozproszone** powstają na skutek zderzeń sprężystych z jądrami atomów próbki. Mają one wysoką energię, która wynosi około 50 eV, ale analizują

próbkę w znacznie większym obszarze skanowania niż SE. Rezultatem tego jest obniżenie rozdzielczości w uzyskiwanych obrazach. Zdjęcia zrobione w wyniku analizy struktury próbki przy pomocy BSE są ściśle związane z wewnętrzną budową materiału. Obszary próbki zawierające jądra pierwiastków o wysokich liczbach atomowych rozpraszają więcej elektronów dzięki czemu są odczytywane na obrazach jako miejsca jaśniejsze. Zaletą analizy obrazów w mikroskopie przy zastosowaniu BSE jest zatem możliwość uzyskiwania informacji o składzie chemicznym próbki np. [4, 5, 6].

### 4. Wymagania stawiane próbkom do badań

Mimo niewątpliwych zalet jakie niosą ze sobą badania powierzchni materiałów z wykorzystaniem SEM istnieją pewne ograniczenia co do możliwości ich stosowania. Są to głównie wskazania dotyczące próbek umieszczanych w komorze mikroskopu. Poniżej przedstawiono główne problemy związane z prawidłowym przygotowaniem elementów badawczych. Zalicza się do nich:

- **odporność badanego materiału na warunki próżniowe** (umieszczenie próbki w warunkach próżni około  $1,2 \cdot 10^{-2}$  Pa nie powinno spowodować zmian w strukturze i składzie próbki),
- **odpowiednie przygotowanie powierzchni próbki** (próbka nie może zawierać wilgoci ani innych zanieczyszczeń, których wydzielenie się w wysokiej próżni mogłoby spowodować podwyższenie ciśnienia w komorze, uszkodzenie detektora lub zanieczyszczenie mikroskopu),
- **zapewnienie próbce odpowiedniego przewodnictwa elektrycznego** (wiązka elektronów przekazuje próbce duży ładunek elektryczny, dlatego próbki, które nie wykazują przewodnictwa powinny być pokryte warstwą substancji przewodzącej tj. węgla, srebra lub złota w celu uniknięcia gromadze-

nia się na ich powierzchni ładunku, który może powodować lokalne zakłócenia emisji elektronów wtórnych, a nawet odbicie wiązki elektronów).

## 5. Obrazy wewnątrzmaterialowych uszkodzeń betonu

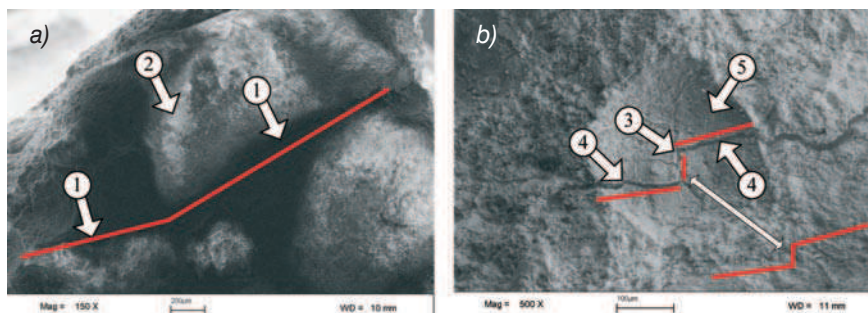
### 5.1. Mikroskop wykorzystany w badaniach własnych

Przedstawione na rysunku 2 przykładowe zdjęcia skaningowe uzyskano pod SEM typu LEO 1430 VP (firmy Carl Zeiss SMT). Główną zaletą tego urządzenia w porównaniu do innych typów SEM jest możliwość obrazowania próbek w regulowanej próżni (od 1 do 270 Pa). Pozwala to na analizę materiałów słabo przewodzących i uwodnionych (np. struktury kompozytów betonowych) bez konieczności ich preparatyki. Najistotniejszymi parametrami technicznymi tego mikroskopu są:

- rozdzielczość maks. względem osi x i y – 2 nm (dla detektora SE) i 50 nm (dla detektora BSE),
- powiększenie maksymalne – 1000000 razy,
- środowisko prowadzonych badań – wysoka próżnia (< 0, 01 Pa) i zmienna próżnia (30–400 Pa),
- sposób przygotowania próbek – prosty dla próbek przewodzących i nieprzewodzących,
- rejestracja uzyskanych wyników – w postaci zdjęć cyfrowych formatu TIFF o rozdzielczości 1024 x 768 pikseli zapisywanych w pamięci komputera,
- maksymalna masa badanej próbki – 0,5 kg.

### 5.2. Przykłady rzeczywistych obrazów, podstawowych typów szczelin

Proces inicjacji i wzrostu pęknięć wewnątrz struktury betonu można zobrazować korelując poziomy naprężenia krytycznych występujące w obciążonym betonie, z procesem destrukcji materiału. Szczegółowo to zjawisko opisuje tzw. teoria naprężeń krytycznych, którą przedstawiono w pracy [7].



**Rys. 2.** Widok defektów wewnątrzmaterialowych w betonie: a) mezoszczelina prosta, b) szczelina skrzydłowa; 1 – kształt mezoszczeliny, 2 – ziarno kruszywa, 3 – część prosta szczeliny skrzydłowej, 4 – skrzydełka, 5 – miejsce separacji ziarna z matrycy; czerwone linie opisują kształty szczelin

Według tego działu mechaniki betonu, o końcowym zniszczeniu materiału decydują wartości naprężeń  $\sigma_x$  i  $\sigma_{II}$ , na które z kolei główny wpływ mają pojawiające i rozwijające się w strukturze kompozytu uszkodzenia. W pracy [8] opisano podstawowe modele szczelin, które mogą się pojawić w zdeformowanym betonie. W grupie uszkodzeń wewnątrzmaterialowych wyróżnić można przede wszystkim dwa główne typy szczelin: proste oraz skrzydłowe.

Na rysunku 2 pokazano oba typy defektów uzyskane w badaniach próbek zdeformowanego betonu pod mikroskopem skaningowym. W treści rysunków zaznaczono również charakterystyczne kształty obu szczelin, które później zastępując modelami można szczegółowo analizować.

**Tabela 1.** Parametry analizowanych betonów

Istotne parametry badanych betonów	Analizowany beton pokazany na rysunkach	
	2a	2b
Rodzaj matrycy	cementowa	cementowa
Rodzaj inkluzji	piasek + bazalt	piasek + żwir
Maksymalny wymiar ziarna kruszywa – $D_{max}$	8 mm	8 mm
Punkt piaskowy – $Pp$	39,8%	40,7%
Wskaźnik w/c	0,4	0,4
Konsystencja mieszanki – wg <i>Vebe</i>	V2	V2
Wiek betonu w chwili badania	około 35 dni	około 35 dni
Średnia wytrzymałość na ściskanie – $f_{cm 15}$	48,9 MPa	35,2 MPa
Średnia wytrzymałość na rozciąganie – $f_{ctm}^{spl}$	3,47 MPa	2,44 MPa
Średni moduł sprężystości przy ściskaniu – $E_{cms}$	33350 MPa	30161 MPa
Krytyczny współczynnik intensywności naprężeń – $K_{Ic}$	1,24 MN/m <sup>3/2</sup>	0,66 MN/m <sup>3/2</sup>
Krytyczny współczynnik intensywności naprężeń – $K_{IIc}$	5,73 MN/m <sup>3/2</sup>	3,71 MN/m <sup>3/2</sup>
Poziom naprężeń krytycznych – $s_I$	49,50%	44,67%
Poziom naprężeń krytycznych – $s_{II}$	85,33%	74,83%

Rysunek 2a przedstawia typową mezoszczelinę prostą tzn. szczelinę, która występuje zazwyczaj w warstwach stykowych kruszywa z matrycą [9], a jej długość osiąga w swoim stadium końcowym długość ziarna. Kształt takich szczelin dopasowuje się zazwyczaj do powierzchni zewnętrznej największych wypełniaczy kompozytu, a ich niestabilny wzrost może prowadzić do inicjacji pęknięć skrzydłowych świadczących zazwyczaj o występowaniu w konstrukcji obciążenia powodujących przekroczenie naprężeń krytycznych  $\sigma_{II}$ . Na rysunku 2b zaobserwować można szczelinę skrzydłową, w której wyróżnia się: część prostą (rys. 2b–3) oraz charakterystyczne skrzydełka (rys. 2b–4), które powstają na końcach części prostej i propagują się w głąb matrycy. Zazwyczaj



skrzydełka w fazie destrukcji materiału mają długość o wiele większą od długości mezoszczeliny prostej i są odchylone od niej pod pewnymi kątami.

Analizowane zdjęcia skaningowe wykonane zostały na próbkach, pozyskanych ze stref zniszczenia, w trakcie badań odporności na pękanie przeprowadzonych wg II modelu pękania [8]. W tabeli 1 zestawiono podstawowe informacje dotyczące analizowanych kompozytów betonowych.

### 6. Podstawowe parametry szczelin i ich wpływ na końcowe odkształcenia betonu

Szereg dotychczasowych obserwacji doświadczalnych wykazało, że całkowite makroskopowe odkształcenia  $\varepsilon_{ij}$  powstające w betonie pod wpływem obciążeń mechanicznych stanowią superpozycję następujących składowych:

- odkształceń czysto sprężystych  $\varepsilon_{ij}^0$ ,
- odkształceń wywołanych porowatością początkową  $\varepsilon_{ij}^P$ ,
- odkształceń powodowanych występowaniem szczelin  $\varepsilon_{ij}^D$ .

Odształcenia całkowite są sumą wymienionych składowych częściowych:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ij}(\sigma_{kl}) &= \varepsilon_{ij}^0(\sigma_{kl}) + \varepsilon_{ij}^P(\sigma_{kl}) + \\ &+ \varepsilon_{ij}^D(\sigma_{kl}) = S_{ijkl}\sigma_{kl} = \\ &= (S_{ijkl}^0 + S_{ijkl}^P + S_{ijkl}^D)\sigma_{kl} \end{aligned} \quad (2)$$

Powyższa zależność jest równaniem konstytutywnym rozpatrywanych kompozytów betonowych, na które działają obciążenia zewnętrzne  $\sigma_{kl}$ . We wzorze (2)  $S_{ijkl}$  jest tensorem podatności materiału ze zmieniającą się strukturą wewnętrzną w wyniku rozwoju mikrodefektów. Składowa  $S_{ijkl}^0$  opisuje czysto sprężyste zachowanie się materiału, składowa  $S_{ijkl}^P$  uwzględnia w opisie występowanie porów w materiale, natomiast  $S_{ijkl}^D$  odzwierciedla występowanie układów pęknięć.

Dotychczasowe analizy świadczą, że decydujący wpływ na wartości

odkształceń w betonie oraz proces jego destrukcji mają pojedyncze szczeliny (proste i skrzydłowe) łączące się pod wpływem wzrostu naprężeń w materiale w fałdki, powodujące w konsekwencji jego zniszczenie. Szczeliny proste i skrzydłowe są zatem ściśle skorelowane z poziomami naprężeń krytycznych i w głównej mierze decydują o końcowej wartości makroskopowych odkształceń betonu  $\varepsilon_{ij}$  [10]. Algorytm prowadzący do ich wyznaczenia jest dość obszerny, a jego szczegółowe założenia omówiono w pracy [11]. Poniżej natomiast zostaną przedstawione główne parametry szczelin, które należy uwzględnić w obliczeniach chcąc ustalić wartości odkształceń będące wynikiem ich oddziaływania.

Odnosnie pierwszego rodzaju defektów najistotniejsza jest znajomość długości szczeliny prostej  $l_m$  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 niezbędne są do późniejszego określenia wartości odkształceń w obszarze lokalnego układu współrzędnych szczeliny  $\bar{x}_1, \bar{x}_2$  [11, 12]. Graficznie szczelinę prostą rozwijającą się w obszarze ziarna kruszywa przedstawiono na rysunku 3a.

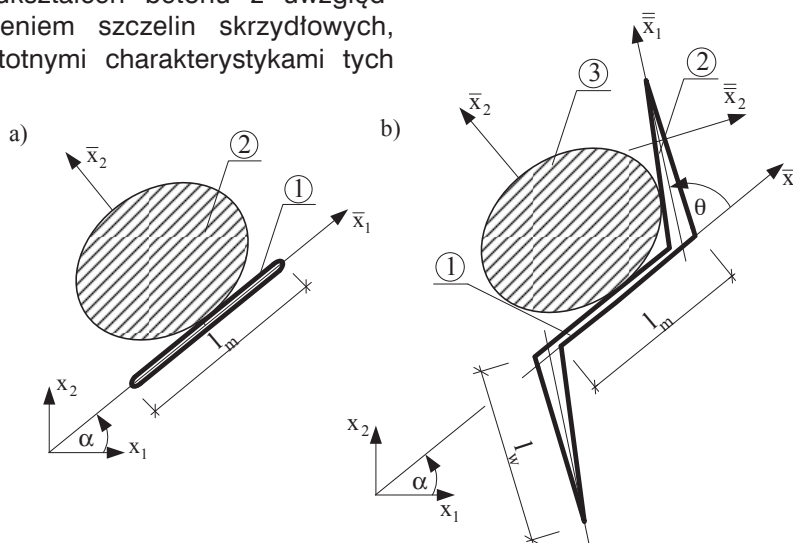
Do wyznaczenia makroskopowych odkształceń betonu z uwzględnieniem szczelin skrzydłowych, istotnymi charakterystykami tych

defektów są: długości skrzydełek  $l_w$  oraz ich kąt nachylenia  $\theta$ , który wynosi zazwyczaj około 60° [12, 13]. Schemat szczeliny skrzydłowej z oznaczeniem wszystkich układów współrzędnych ( $\bar{x}_1, \bar{x}_2$ ) (lokalny układ współrzędnych szczeliny skrzydłowej) przedstawiono na rysunek 3b.

Porównując rysunek 3 obrazujący modele szczelin, z rzeczywistym ich widokiem w materiale uszkodzonym (rys. 2), widać duże podobieństwo pomiędzy nimi. Można zatem wnioskować, iż założone w analizie modele uszkodzeń wewnątrzmaterialowych, odpowiadają z dużą aproksymacją warunkom rzeczywistym występującym w konstrukcji podczas jej obciążania.

### 7. Koncepcje modyfikacji struktury betonu mające na celu minimalizowanie powstawania w nich defektów

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. Zabiegi, dzięki którym można zminimalizować ilość



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

defektów w materiale, takie jak np.: odpowiedni dobór komponentów do betonu, obniżenie wskaźnika w/c, poprawne zagęszczenie mieszanki betonowej, odpowiednia pielęgnacja młodego betonu znane są od dawna i powinno się zawsze mieć je na uwadze.

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 [14]. Podstawowe koncepcje dotyczące nanomodyfikacji betonu (nanomodyfikacja prosta i złożona) przedstawił L. Czarnecki w pracy [15]. Wg zawartych tam informacji osiągnięcie 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 koncepcje 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 [14, 16]) mogą być laseczkowe bakterie glebowe *Bacillus Pasteurii* [17]. Zaletą tych mikroorganizmów jest możliwość ich wykorzystania przy zespalaniu ze sobą uszkodzonej struktury kompozytu. Zawiesina bakterii wraz z substancjami odżywczymi umieszczana jest w obrębie uszko-

dzzonego miejsca co powoduje, że odkładają one kryształy węgla wapnia tym samym zasklepiając powstały defekt. Obecnie bakterie te są już szeroko wykorzystywane do stabilizacji podsypiek piaskowych pod budynkami narażonymi na oddziaływanie sejsmiczne, gdzie dzięki swoim specyficznym właściwościom potrafią zmienić w krótkim czasie pryzmę piasku w twardą bryłę.

## 8. Podsumowanie

Obserwacje mikroskopowe powierzchni próbek betonowych po zniszczeniu pozwalają ustalić rodzaj występujących w nich defektów. Znajomość budowy szczelin, ich rozmieszczenia i wielkości, pozwala zarówno wnioskować o zachowaniu się danego typu kompozytu podczas obciążeń zewnętrznych, jak również w sposób analityczny wyznaczać wartości odkształceń przez nie generowanych.

Zaprezentowane w pracy przykłady zdjęć przełomów próbek badanych kompozytów betonowych wskazują na podstawową rolę, jaką pełnią duże ziarna kruszywa i warstwy stykowe w procesie rozwoju pęknięć kompozytów betonowych. Pod działaniem obciążeń mechanicznych szczeliny rozwijają się głównie wzdłuż warstw stykowych (rys. 2a) lub odchylają się do pionu, gdy orientacja przestrzenna warstwy stykowej uniemożliwia dalszy wzrost pęknięcia wokół ziarna. Następuje wówczas zmiana kierunku propagacji pęknięcia i tworzą się skrzydła na końcach pęknięcia prostego (rys. 2b).

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 [14], uzasadnia nie tylko szansę na uzyskiwanie trwałych i niezawodnych kompozytów, ale również dalszy rozwój technologii betonu.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Barbacki A. (red.), *Mikroskopia elektronowa*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Poznań 2007
- [2] Osiecka E., *Wybrane zagadnienia z technologii mineralnych kompozytów budowlanych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2000
- [3] Bolewski A., Żabiński W., *Metody badań minerałów i skał*. Wydawnictwo Geologiczne. Warszawa 1988
- [4] Karczmarek D., *Rekonstrukcja obrazu powierzchni próbki w elektronowym mikroskopie skaningowym za pomocą elektronów wstecznie rozproszonych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 1999
- [5] Scrivener K. L., *Backscattered electron imaging of cementitious microstructures: understanding and quantification*. *Cement and Concrete Composites*, vol. 26, 2004, 935–945
- [6] Swamy C., Scrivener K. L., Crumie A. K., *What causes differences of C-S-H gel grey levels in backscattered electron images?* *Cement and Concrete Research*, vol. 32, 2002, 1465–1471
- [7] Golewski G., Sadowski T., *Mechanizm zniszczenia kompozytów betonowych przy ścisnieniu w aspekcie teorii naprężeń krytycznych*. *Przegląd Budowlany*, nr 5, 2006, 26–33
- [8] Golewski G., Sadowski T., *Ocena uszkodzeń betonu przy ścinaniu na podstawie badań kompozytów z kruszywami granitowymi*. *Przegląd Budowlany*, nr 3, 2007, 20–25
- [9] Golewski G. L., *Analiza uszkodzeń w warstwie stykowej kruszywo-zaczyn kompozytów betonowych*. *Przegląd Budowlany*, nr 3, 2008, 35–40
- [10] Sadowski T., Golewski G., *Effect of aggregate kind and grading on modelling of plain concrete under compression*. *Computational Materials Science*, vol. 43, 2008, 119–126
- [11] Golewski G. L., Sadowski T., *Rola kruszywa grubego w procesie destrukcji kompozytów betonowych poddanych obciążeniu doraźnym*. Wydawnictwo IZT Sp. z o.o. Lublin 2008
- [12] Sadowski T., *Modelling of semi-brittle MgO ceramic behaviour under compression*, *Mechanics of Materials*, vol. 18, 1994, 1–16
- [13] Nemat – Nasser S., Obata M., *A microcrack model of dilatancy in brittle material*. *Journal of Applied Mechanics*, vol. 55, 1988, 24–35
- [14] Czarnecki L., *Nanotechnologia – wyzwaniem inżynierii materiałów budowlanych*. *Inżynieria i Budownictwo*, nr 9, 2006, 465–469
- [15] Czarnecki L., *Czy nanotechnologia to przyszłość betonu?* *Materiały Budowlane*, nr 11, 2007, 4–5
- [16] Czarnecki L., Kurdowski W., *Tendencje kształtujące przyszłość betonu*. Konferencja Naukowo – Techniczna „Dni Betonu”, Polski Cement Sp. z o.o., Wista 2006, 47–64
- [17] Rodriguez-Navarro C., Rodriguez-Gallego M., Ben Cherkroun K. Gonzales-Munoz M. T., *Conservation of ornamental stone by myxococcus xanthus – induced carbonate biomineralization*. *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 69, 2003, 2182–2193