

GRZEGORZ GOLEWSKI\*, TOMASZ SADOWSKI\*\*

## ANALIZA KRUCHYCH USZKODZEŃ W KOMPOZYTACH BETONOWYCH

### ANALYSIS BRITTLE DAMAGES IN CONCRETE COMPOSITES

#### Streszczenie

Pierwsze mikropęknięcia w zdeformowanym betonie pojawiają się w matrycy cementowej lub warstwie stykowej kruszywo–zaprawa. Analizę uszkodzeń kompozytów betonowych można przeprowadzać z zastosowaniem metod mechaniki pęknięcia lub destrukcji naprężeniowej. Wykorzystanie przedstawionych w pracy wyników może się przyczynić do projektowania betonów w taki sposób, aby uzyskiwać materiał o minimalnej liczbie defektów początkowych, wpływający korzystnie, poprzez zwiększoną odporność na pęknięcie, na niezawodność pracy konstrukcji.

Słowa kluczowe: *kruchość betonu, odporność na pęknięcie, szczelina, matryca cementowa, kruszywo*

#### Abstract

First micro-cracks occur in deformed concrete in the cement matrix or in the interfacial transition zone area. The analysis concerning the defects of concrete composites can be carried out using the fracture mechanics methods or the stress destruction methods. The results presented in the work can be used in designing concretes in order to obtain materials characterized by the minimum number of initial defects which, thanks to increased fracture toughness, can increase to the reliability of construction work.

*Keywords: brittleness of concrete, fracture toughness, crack, cement matrix, aggregate*

\* Mgr inż. Grzegorz Golewski, Katedra Konstrukcji Budowlanych, Wydział Inżynierii Budowlanej i Sanitarnej, Politechnika Lubelska.

\*\* Dr hab. inż. Tomasz Sadowski, prof. PL, Katedra Mechaniki Ciała Stałego, Wydział Inżynierii Budowlanej i Sanitarnej, Politechnika Lubelska.

## 1. Wstęp

W strukturze betonu zwykłego, który ze względu na swoją budowę jest kompozytem, mamy do czynienia z dwoma podstawowymi składnikami: kruchą matrycą cementową podatną na działanie wilgoci, temperatury i korozji oraz sztywnymi ziarnami kruszywa będącymi inkluzjami w strukturze zaczynu, które powinna charakteryzować odporność na wpływy środowiskowe oraz niezależność ich właściwości od czasu pracy.

Stos okruszowy betonu jest złożony z ziaren, które z kolei składają się z kryształów o zróżnicowanych siatkach krystalicznych. Kryształy w ziarnach są powiązane między sobą siłami adhezji. Im bardziej jest uporządkowana struktura kompozytu betonowego, a więc im bardziej jest on materiałem jednorodnym, tym większe są siły przyczepności pomiędzy poszczególnymi jego składnikami. Natomiast gdy struktura materiału jest bardziej heterogeniczna i chaotyczna, powoduje to spadek sił wiążących poszczególne składniki oraz powstawanie w miejscach pomiędzy ziarnami struktury pustek i porów. Stanowią one źródła inicjacji pierwszych uszkodzeń w materiale.

Początkowo uszkodzenia takie są tak małe, że ich wykrycie bądź analiza możliwe są tylko dzięki zastosowaniu nowoczesnych technik akustycznych (*acoustic emission*) [1–3]. 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 zarówno ze względu na nośność elementów i konstrukcji, jak i ich trwałość (odporność na korozję, karbonatyzację) [4–7].

## 2. Zjawisko kruchego pęknięcia w betonie

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

- idealnie kruche (*completely brittle*), w których podczas obciążania występuje zjawisko kruchego pęknięcia,
- półkruche (*semi-brittle*), w których 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 szczelina Griffith'a (*Griffith flaw*) w przypadku betonów kruchych,
- występujące na powierzchniach betonu – tzw. pęknięcia krawędziowe.

W pobliżu defektów betonu, takich jak: szczelina, pustka powietrzna, rysa, nieciągłość w sieci krystalicznej, korozja wewnątrzmaterialowa itp., 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. W ich wierzchołkach występują bowiem największe wartości naprężeń. Proces kruchego pęknięcia, tzn. wzrost długości szczeliny, jest zazwyczaj zjawiskiem o charakterze dynamicznym, nieodwracalnym i o katastrofalnych skutkach.

### 3. Charakter uszkodzeń kompozytów betonowych

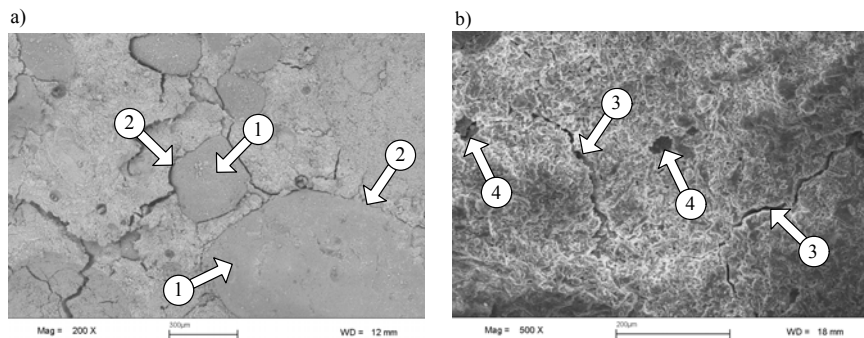
#### 3.1. Miejsca występowania uszkodzeń wynikające z kruchości betonu

Beton jest materiałem wielofazowym i niejednorodnym, zatem przyczyn i miejsc rozwoju defektów może być wiele. Pierwsze uszkodzenia pojawiają się zazwyczaj w matrycy cementowej lub w warstwie stykowej 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 [8] przedstawiono podstawowe rodzaje (typy) mikropęknięć, jakie występują w zdeformowanym betonie pod obciążeniem zewnętrznym. W przypadku analizy dwuwymiarowej są to:

- a) szczeliny powstałe w strefie stykowej kruszywo–zaprawa:
  - niepropagujące się w głąb matrycy cementowej,
  - z tendencją do rozwoju w głąb matrycy cementowej,
  - z możliwością rozwoju w głąb kruszywa,
- b) szczeliny powstałe w samej matrycy cementowej.

Na rycinie 1 przedstawiono zdjęcia skaningowe wykonane przez autorów, pokazujące uszkodzenia w zdeformowanym betonie. Rycina 1a) obrazuje uszkodzenia w warstwie stykowej kruszywo–zaprawa, natomiast ryc. 1b) defekty występujące w matrycy cementowej (pory i rysy). Szczegółowy opis struktury zaczynu wraz z przyczynami występowania w nim najczęstszych uszkodzeń opisali autorzy w pracy [9].



Ryc. 1. Przykładowe obrazy uszkodzeń w mikrostrukturze betonów: a) w warstwach stykowych, b) w matrycy cementowej; 1 – ziarna kruszywa, 2 – uszkodzenia w warstwach stykowych, 3 – uszkodzenia w matrycy, 4 – pory w matrycy

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

Przy opisie struktury mikrospektań zdeformowanego betonu ważne jest określenie: położenia defektów, rodzaju pęknięcia, kierunków szczelin oraz liczby uszkodzeń. Według autorów prac [10–14] (w przypadku analizy dwuwymiarowej) można wyodrębnić pęknięcia typu prostoliniowego lub skrzydłowego, gdy zmienia się kierunek rozwoju pęknięcia prostoliniowego.

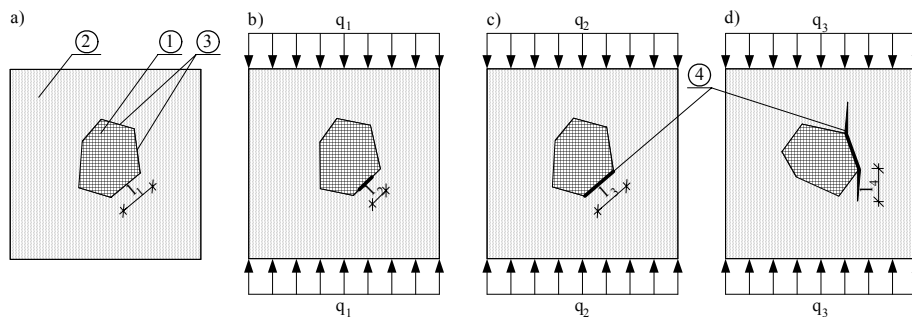
Natomiast wg autorów pracy [15], analizujących zdjęcia skaningowe uszkodzonego betonu, propagacja szczeliny może występować w dwóch, trzech lub czterech kierunkach od „centrum” uszkodzenia (analiza rzeczywistego pęknięcia trójwymiarowego).

### 3.2. Rodzaje szczelin

Wyniki obserwacji eksperymentalnych dowodzą, że w prawidłowo wykonanym kompozycie betonowym pierwsze uszkodzenia pod wpływem obciążeń inicjują się przede wszystkim w obszarze inkluzji kruszywa grubego.

Zjawisko postępującego wzrostu uszkodzeń w warstwie stykowej reprezentatywnego ziarna kruszywa z matrycą cementową, w warunkach wzrastającego obciążenia zewnętrznego zaprezentowano na ryc. 2. Na rycinie 2a) przedstawiono inkluzję o wymiarze  $l_1$  w stanie bezobciążeniowym ( $q = 0$  kN). Na rycinach 2b–2d pokazano, jak rozwija się uszkodzenie na granicy ziarna przy założeniu, że:  $q_1 < q_2 < q_3$ . W procesie tym można wyróżnić następujące etapy:

- inicjacja prostego mikropęknięcia (*straight crack*) o długości  $l_2$  na skutek nukleacji porów występujących na granicy kruszywa, długość mikropęknięcia jest znacznie mniejsza od wymiaru ziarna, charakter uszkodzenia jest tylko lokalny (ryc. 2b),
- rozwój mikropęknięcia w mezopęknięcie o długości  $l_3$  występujące na całej długości ziarna (ryc. 2c),
- wzrost mezopęknięcia pierwotnego prostego w pęknięcie wtórne o zmiennym kierunku propagacji wskutek napotkania bariery energetycznej – rozwój pęknięcia typu skrzydłowego (*wing crack*) o długości skrzydełka  $l_4$  (ryc. 2d).

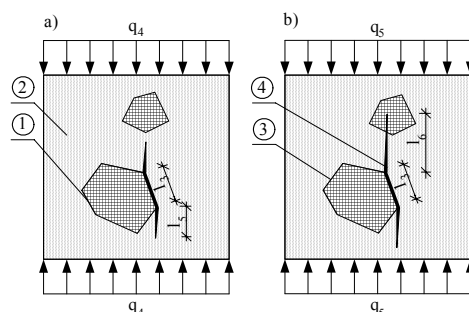


Ryc. 2. Proces rozwoju prostych uszkodzeń na granicy ziarna: 1 – kruszywo, 2 – matryca, 3 – warstwa stykowa, 4 – szczelina

Fig. 2. Growth process of simple damage on the grain boundary: 1 – aggregate, 2 – matrix, 3 – interfacial transition zone, 4 – damages

Można zauważyć, że dalszy proces rozwoju pęknięcia skrzydłowego zależy jest zarówno od działającego obciążenia ( $q_4 < q_5$ ), jak i parametrów mechaniczno-wytrzymałościowych poszczególnych składników kompozytu. Zaobserwować można zatem dwa przypadki:

- propagację skrzydełka poprzez matrycę o długości  $l_5$  (ryc. 3a),
- propagację skrzydełka poprzez matrycę oraz kruszywo grube o długości  $l_6$  (ryc. 3b).



Ryc. 3. Rozwój uszkodzeń skrzydłowych: 1, 2, 3, 4 – jak na ryc. 2

Fig. 3. Growth of wing-type damages: 1, 2, 3, 4 – as in Fig. 2

Opisany powyżej proces wzrostu szczeliny zależy w decydującym stopniu od zjawisk zachodzących na jej powierzchni, dlatego też można wprowadzić następujące modele szczelin [10–13, 16, 17]:

- dylatacyjne, tzn. otwierające się na skutek działania obciążeń zewnętrznych, chropowatości powierzchni kruszywa lub ciśnienia wewnętrznego wody,
- z tarcieniem kontaktowym, gdy brzości szczeliny doznają poślizgu,
- z warstwą kohezyjną pomiędzy brzościami 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.

#### 4. Metody analizy uszkodzeń w betonach w różnych stanach obciążenia

Rodzaj i charakter przykładanych obciążeń ma istotny wpływ na procesy destrukcyjne rozwijające się w betonie. Beton ma najmniejszą wytrzymałość w stanach rozciągania i ścinania. Ze szczególną precyzją należy więc projektować elementy konstrukcyjne, gdy stany rozciągania lub ścinania w decydujący sposób wpływają na nośność takich elementów.

Ważnym problemem badawczym w analizie zniszczenia betonów jest zagadnienie powstawania mikrodefektów, tzw. mechanika uszkodzeń (*damage mechanics*) oraz zagadnienie rozwoju (propagacji) lub inaczej wzrostu uszkodzeń, tzw. mechanika pękania (*fracture mechanics*) [18, 19]. Proces rozwoju uszkodzeń przy rozciąganiu i ścinaniu może być opisany z zastosowaniem liniowo-sprężystej lub nieliniowej mechaniki pękania. Analizowanie zachowania się betonów, z uwzględnieniem metod mechaniki pękania, umożliwia opis powstawania i rozwoju uszkodzeń, co niemożliwe jest w przypadku posługiwania się globalnymi charakterystykami wytrzymałościowymi kompozytu. Istotą problemu jest bowiem określenie poziomu obciążeń zewnętrznych, przy których nastąpi rozwój rys w elemencie. Parametry mechaniki pękania pozwalają na ocenę odporności betonów na pęknięcie, co w zasadniczy sposób decyduje

o trwałości i bezpieczeństwie konstrukcji. Proces opisu rozwoju pęknięć wiąże się bowiem z eksperymentalnym wyznaczeniem tzw. odporności materiału na pęknięcie, którą zalicza się do jego podstawowych charakterystyk. W przypadku analizy rozwoju pęknięć w stanie jednoosiowego rozciągania kontinuum sprężystego, parametr ten zwany jest krytyczną wartością współczynnika intensywności naprężeń  $K_{Ic}$  (*critical stress intensity factor*) i określa on stan fizyczny materiału w wierzchołku propagującej się szczeliny, gdzie wartość naprężeń dąży do nieskończoności.

Poza elementami rozciąganymi i ścinanymi rozwijające się procesy uszkodzenia mogą spowodować gwałtowne zniszczenie w konstrukcjach ściskanych. Proces rozwoju pęknięć w betonie przy ściskaniu można opisać za pomocą parametrów mechaniki pęknięcia  $K_{Ic}$  i  $K_{IIc}$ . Ponadto, bardzo pomocnym narzędziem w ocenie powstawania, rozwoju, kumulacji i propagacji uszkodzeń struktury pod wpływem obciążeń ściskających jest analiza za pomocą metod destrukcji naprężeniowej oraz ocena odkształcalności betonu. Z użyciem poziomów naprężeń krytycznych  $\sigma_I$  i  $\sigma_{II}$  [20, 21] można prześledzić proces destrukcji w całym zakresie panującego obciążenia i ocenić podatność materiału na rysowanie się i niszczenie.

Mechanika uszkodzeń, mechanika pęknięcia oraz destrukcja naprężeniowa stanowią pomocne narzędzie w zrozumieniu procesów degradacji elementów betonowych, a ich praktyczne wykorzystanie może przyczynić się do uzyskiwania kompozytów o jak najwyższej jakości, trwałości i niezawodności pracy. Chodzi o to, aby w efekcie końcowym uzyskać materiał o minimalnej liczbie defektów początkowych i zwiększonej odporności na pęknięcie. Wpływie to korzystnie na niezawodność pracy konstrukcji budowlanej.

## 5. Sposoby zapobiegania pojawianiu się defektów w strukturze betonów

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. Odnośnie 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 [9]. W kontekście drugiego z miejsc, gdzie mogą występować początki destrukcji betonu, a więc warstwy stykowej pomiędzy ziarnami kruszywa i zaprawą, należy zwrócić szczególną uwagę na odpowiedni dobór rodzaju i wielkości ziarn zastosowanego wypełniacza.

Precyzyjny dobór krzywej uziarnienia powinien zapewnić również, poza uzyskaniem wymaganej konsystencji, urabialności i szczelności mieszanki betonowej oraz żądanej wytrzymałości betonu, wytworzenie odpowiednich warstw stykowych kruszywo–zaprawa. W tym kontekście preferowane są uziarnienia o wyższym  $D_{max}$ , co najmniej do 16 mm, co potwierdziły badania prezentowane m.in. w pracy [22].

Skład mineralny oraz współpraca poszczególnych pierwiastków wchodzących w skład skały macierzystej kruszywa powinny powodować powstawanie na powierzchni ziarn wiązań chemicznych implikujących ich wysoką przyczepność do zaprawy. Pod tym względem szczególnie zadowalające rezultaty uzyskuje się, stosując kruszywa pozyskiwane z osadowych skał węglanowych pochodzenia organicznego (wapienie, dolomity) [9, 23, 24]. Co do rodzaju zastosowanego kruszywa, wszystkie przeprowadzone do tej pory badania pokazują jednoznacz-

nie, iż lepszą odpornością na kruche pękanie charakteryzują się betony, w których zastosowano kruszywa łamane, a więc np. wapienie, granity, bazalty. Wpływ na to mają zarówno wytrzymałości skał, z których pozyskiwane są kruszywa łamane, jak i ich chropowata powierzchnia [8, 21, 23].

Ponadto, w celu zminimalizowania powstawania i rozwoju uszkodzeń w warstwach stykowych kruszywa grubego, należałoby również przeprowadzać analizę tych stref betonu z zastosowaniem nowoczesnych modeli analitycznych, np. sferycznego modelu kompozytu (składającego się z czterech faz) zaprezentowanego m.in. w pracach [24, 25].

## 6. Podsumowanie

Analiza danych literaturowych oraz przeprowadzone badania własne wskazują, iż na sposób rozwoju uszkodzeń w kruchych kompozytach betonowych (pod obciążeniem zewnętrznym) wpływają przede wszystkim właściwości warstw stykowych pomiędzy ziarnami kruszywa grubego i zaprawy oraz częściowo początkowa struktura matrycy cementowej. Należy zatem zwrócić szczególną uwagę na odpowiedni dobór składników betonu, tak aby w konsekwencji uzyskiwać kompozyty o jak najmniejszej porowatości i minimalnej ilości defektów początkowych. W tym celu należy stosować odpowiednie kruszywa grube, biorąc pod uwagę zarówno ich wielkość, rodzaj, jak i reaktywność.

## Literatura

- [1] Ohtsu M., *The history and development of acoustic emission in concrete engineering*, Magazine of Concrete Research, Vol. 48/1996, 321-330.
- [2] Moczko A., *Emisja akustyczna w badaniach betonu*, Inżynieria i Budownictwo z. 1/1996, 42-46.
- [3] Hoła J., Moczko A., Pysznik J., *Możliwości wykorzystania metody emisji akustycznej w badaniach betonu*, Przegląd Budowlany z. 11/1988, 477-479.
- [4] Piasta W.G., Sawicz Z., Piasta J., *Sulfate durability of concretes under constant sustained load*, Cement and Concrete Research, Vol. 19/1989, 216-220.
- [5] Piasta W.G., *Concrete durability as the function of stress level in sulphate attack*, Archives of Civil Engineering, Vol. 1/1996, 29-45.
- [6] Piasta W.G., Sawicz Z., Goprowski G., *Trwałość obciążonego betonu w warunkach agresywności chemicznej*, Inżynieria i Budownictwo z. 6/1996, 368-369.
- [7] Piasta W.G., *Korozja siarczanowa betonu pod obciążeniem długotrwałym*, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2000.
- [8] Golewski G., Sadowski T., *Odporność na pękanie betonów z kruszywami naturalnymi i łamanymi*, Przegląd Budowlany z. 10/2005, 31-37.
- [9] Golewski G., Sadowski T., *Rola matrycy cementowej w procesie powstawania kruchych uszkodzeń w kompozytach betonowych*, Przegląd Budowlany z. 7-8/2006, 36-40.
- [10] Sadowski T., *Mechanical response of semi-brittle ceramics subjected to tension – compression state. Part I: Theoretical modeling*, International Journal of Damage Mechanics, Vol. 3/1994, 213-233.

- [11] Sadowski T., *Mechanical response of semi-brittle ceramics subjected to tension – compression state. Part II: Description of deformation process*, International Journal of Damage Mechanics, Vol. 4/1995, 293-317.
- [12] Basista M., Gross D., *The sliding crack model of brittle deformation: An internal variable approach*, International Journal of Solids and Structures, Vol. 35/1998, 487-509.
- [13] Hori H., Nemat-Nasser S., *Compression – induced microcrack growth in brittle solids: axial splitting and shear failure*, Journal Geophysics Research, Vol. 90/1985, 3105-3125.
- [14] Yu S., Feng X., *A micromechanics – based damage model for microcracks – weakened brittle solids*, Mechanics of Materials, Vol. 20/1995, 59-76.
- [15] Nemat K.M., Monteiro P.J.M., Scrivener K.L., *Analysis of compressive stress – induced cracks in concrete*, ACI Materials Journal, Vol. 95/1988, 617-630.
- [16] Nemat-Nasser S., Hori H., *Micromechanics; overall properties of heterogenous materials*, Elsevier, Amsterdam 1993.
- [17] Nemat-Nasser S., Obata M., *A microcrack model of dilatancy in brittle material*, Journal of Applied Mechanics, Vol. 55/1988, 24-35.
- [18] Van Mier J.G.M., *Fracture processes of concrete: assessment of material parameters for fracture models*, CRC Press Boca Raton, New York 2000.
- [19] Golewski G., *Mikromechanika uszkodzeń betonów w aspekcie badań odporności na pękanie*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej z. 104/2005, 107-114.
- [20] Hoła J., *Naprężenia inicjujące i krytyczne a destrukcja naprężeniowa w betonie ściskanym*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.
- [21] Golewski G., Sadowski T., *Mechanizm zniszczenia kompozytów betonowych przy ściskaniu w aspekcie teorii naprężeń krytycznych*, Przegląd Budowlany z. 5/2006, 26-33.
- [22] Golewski G., Sadowski T., *Odporność na pękanie betonów przy zginaniu*, Drogownictwo z. 9-10/2006, 307-311.
- [23] Golewski G., Sadowski T., *Fracture toughness at shear (mode II) of concretes made of natural and broken aggregates*, Eighth International Symposium on Brittle Matrix Composites, Warszawa 2006, 537-546.
- [24] Li G., Zhao Y., Pang S.S., *Four-phase sphere modeling of effective bulk modulus of concrete*, Cement and Concrete Research, Vol. 29/1999, 839-845.
- [25] Ramesh G., Sotellino E.D., Chen W.F., *Effect of transition zone on elastic moduli of concrete materials*, Cement and Concrete Research, Vol. 26/1996, 611-622.