www.ptcer.pl/mccm

MATERIAŁY CERAMICZNE /CERAMIC MATERIALS/, 67, 4, (2015), 413-417

Wpływ zaokrąglenia karbu w elemencie próbnym na parametry mechaniki pękania kompozytu cementowego

Marta Kosior-Kazberuk[1]*, Andrzej Kazberuk[2]

[1]Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, ul. Wiejska 45E, 15-351 Białystok
[2]Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok
*e-mail: m.kosior@pb.edu.pl

Streszczenie

Do badań nad wpływem zaokrąglenia karbu na parametry mechaniki pękania, takie jak krytyczny współczynnik intensywności naprężeń i energia pękania, wykorzystano zaprawę cementową jako typowy materiał quasi-kruchy. W trakcie formowania próbek wytworzono karby typu U o głębokości 30 mm. Zastosowano szeroki zakres zmiany promienia zaokrąglenia wierzchołka karbu od 0,15 mm do 30,0 mm. Otrzymane wyniki badań wykazały, że promień zaokrąglenia karbu ma znaczący wpływ na poziom naprężeń niszczących i parametry opisujące odporność kompozytu cementowego na pękanie. Zatem, doświadczalne wyznaczenie charakterystyk pękania wymaga ścisłego określenia warunków badania.
Słowa kluczowe: kompozyt cementowy, mechanika pękania, karb typu U, krytyczny współczynnik intensywności naprężeń, energia pękania

EFFECT OF BLUNT NOTCH IN SPECIMEN ON FRACTURE PARAMETERS OF CEMENT COMPOSITE

The study for assessing the influence of notch curvature in a specimen on fracture mechanics parameters, e.g. critical stress intensity factor and fracture energy, was performed on cement mortar as a typical quasi-brittle material. The U-shaped notches with a depth of 30 mm were formed during molding the specimens. The radius of the notch curvature was changed in the range from 0.15 mm to 30.0 mm. The obtained results demonstrated that the notch curvature radius had a significant effect on the level of maximum stress and the parameters describing resistance to cracking of the cement composite. Therefore, the experimental determination of the fracture characteristics requires a strict definition of the test conditions.
Keywords: Cement composite, Fracture mechanics, U-shaped notch, Critical stress intensity factor, Fracture energy

1. Wprowadzenie

Proces pękania elementu z materiału quasi-kruchego o heterogenicznej mikrostrukturze (np. kompozytu cementowego) wiąże się z formowaniem i rozprzestrzenianiem głównej rysy określanej jako defekt krytyczny. W pobliżu defektów, takich jak szczelina, pustka powietrzna, mikrorysa, itp., występują lokalne spiętrzenia naprężeń wywołanych obciążeniami zewnętrznymi, które w określonych warunkach mogą powodować gwałtowną propagację uszkodzenia i zniszczenie elementu konstrukcyjnego. Metody mechaniki pękania umożliwiają opisanie procesu zniszczenia tego rodzaju materiałów [1, 2], a także degradacji będącej efektem oddziaływania czynników eksploatacyjnych [3, 4].

Powszechność występowania zjawiska pękania w materiałach konstrukcyjnych powoduje potrzebę prowadzenia badań w celu ustalenia łatwej w realizacji metody określania jednoznacznych wartości parametrów opisujących ich odporność na pękanie.

Podstawowym parametrem materiałowym w mechanice pękania jest krytyczny współczynnik intensywności naprężeń wyznaczany doświadczalnie przy wykorzystaniu próbek ze szczelinami [5]. W przypadku metali procedura określania tego parametru jest znormalizowana i powszechnie stosowana. Proces pękania zaczyna się od szczeliny inicjowanej zmęczeniowo w wierzchołku karbu.

W przypadku kompozytów cementowych i innych materiałów kruchych identyfikacja parametrów mechaniki pękania wymaga przeprowadzenia badań z wykorzystaniem elementów próbnych ze wstępnie wytworzoną szczeliną pierwotną lub karbem. Uzyskanie szczeliny początkowej o ściśle określonych parametrach jest trudne. W standardowych badaniach materiałów quasi-kruchych stosuje się wydłużony karb typu U o szerokości od 1 mm do 10 mm, pomijając wpływ zaokrąglenia jego wierzchołka. Zazwyczaj karb wytwarza się podczas formowania próbki albo poprzez wycięcie piłą diamentową [6]. Jest to podejście łatwe w realizacji, ale obejmuje wąskie spektrum geometrii karbów (szczelin) i nie wyjaśnia w jakim zakresie geometrii defektów pierwotnych proces propagacji rysy należy analizować w oparciu o kryteria wytrzymałości materiałów, a w jakim na podstawie kryteriów mechaniki pękania [7, 8].

Większość dotychczasowych badań nad wpływem karbu typu U na parametry mechaniki pękania, ukierunkowanych na rozważania teoretyczne a nie metody badań, była prowadzona przy wykorzystaniu takich materiałów jak polimetakrylan metylu [7], stopy metali [8, 9], grafit [10]. Rezultaty badań wskazują na znaczący wpływ promienia zaokrąglenia wierzchołka karbu na wartość siły niszczącej i przebieg procesu pękania materiałów. Badania prowadzone przy wykorzystaniu próbek betonów dotyczyły głównie wpływu głębokości karbu na charakterystyki pękania [3]. W przypadku karbów o zaokrąglonym wierzchołku, to znaczy takich, dla których wartość promienia zaokrąglenia w stosunku do głębokości karbu jest istotna, osobliwość naprężeń zanika, a co za tym idzie, kryteria pękania oparte na liniowo-sprężystej mechanice pękania nie mogą być stosowane, nawet w przypadku materiałów kruchych [9].

Do oceny zmian odporności na pękanie próbek kompozytu cementowego w zależności od promienia zaokrąglenia karbu inicjującego proces pękania, wykorzystano procedurę, w której próbki w formie belek z uformowanym karbem obciąża się pojedynczą siłą skupioną zgodnie z I modelem pękania (rozrywanie przy zginaniu).

2. Metodyka badań

Do badań eksperymentalnych służących ocenie wpływu zaokrąglenia karbu na parametry mechaniki pękania wykorzystano zaprawę na bazie cementu portlandzkiego jako dający się łatwo formować materiał quasi-kruchy. Zastosowano mieszaninę kruszywa naturalnego o uziarnieniu nie przekraczającym 2 mm. Ograniczenie wielkości ziaren miało na celu wyeliminowanie ewentualnego wpływu kruszywa grubego na wartości charakterystyk pękania. Wskaźnik wodno-cementowy (*w/c*) zaprawy wynosił 0,35. Wymaganą urabialność uzyskano poprzez zastosowanie superplastyfikatora na bazie modyfikowanych polikarboksylatów (0,8% masy cementu). Wybrany materiał umożliwił wykonanie niestandardowych elementów próbnych o zróżnicowanej geometrii karbów. Średnia wytrzymałość betonu na ściskanie po 90 dniach dojrzewania wynosiła 51,7 MPa, średnia wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu 4,0 MPa, styczny moduł sprężystości podłużnej, wyznaczony w trakcie pomiarów parametrów mechaniki pękania, osiągnął wartość 22,3 GPa.

Przygotowano próbki o wymiarach 100 mm × 100 mm × 400 mm, w których, w trakcie formowania, wytworzono karby o głębokości 30 mm (stosunek a_0/d = 0,30). Zaprojektowano specjalne jednorazowe wkładki do form. Zastosowano szeroki zakres zmiany promienia zaokrąglenia karbu ρ = 0,15 mm, 0,35 mm, 0,65 mm, 1,35 mm, 3,15 mm, 8,0 mm, 15,0 mm i 30,0 mm. Dodatkowo wykonano próbki bez karbu do wyznaczenia wytrzymałości materiału na rozciąganie przy zginaniu. Każda seria pomiarowa liczyła cztery elementy próbne. Po rozformowaniu próbki przechowywano w wodzie w temperaturze 20 ± 2°C przez 90 dni.

Analizowano wpływ zaokrąglenia karbu w elemencie próbnym na krytyczną wartość współczynnika intensywności naprężeń i energię pękania kompozytu cementowego. Do wyznaczenia krytycznego współczynnika intensywności naprężeń K_{Ic}^{S} wykorzystano procedurę zaproponowaną przez RILEM [11], opracowaną na podstawie modelu pękania opisanego w pracy [2]. Parametr K_{Ic}^{S} jest związany z naprężeniem krytycznym σ_c inicjującym rozprzestrzenianie się pęknięcia i krytyczną długością efektywnej rysy a_c następującą zależnością:

$$K_{Ic}^{s} = \sigma_c \sqrt{\pi a_c}\, g_1\left(\frac{a_c}{b}\right), \tag{1}$$

gdzie g_1 jest funkcją związaną z geometrią elementów próbnych.

Elementy belkowe z karbem typu U obciążano siłą *P* w warunkach trójpunktowego zginania, które odpowiadają I modelowi zniszczenia (rozrywanie przy zginaniu). Wymiary i sposób obciążenia elementu próbnego pokazano na Rys. 1.

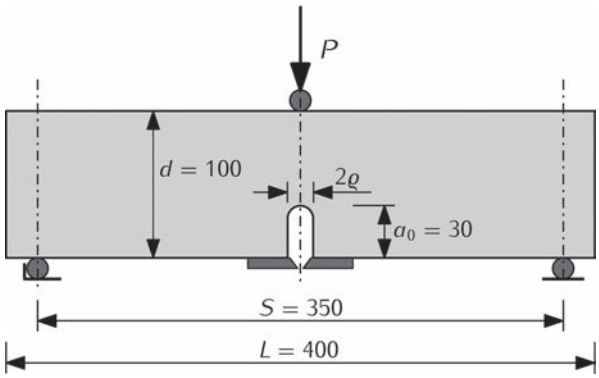
W trakcie badań rejestrowano wykres siły obciążającej *P* w funkcji przyrostu rozwarcia wylotu karbu (ang. *notch mouth opening displacement*) ΔNMOD. Konstrukcja stanowiska badawczego zapewniała warunki ustabilizowanego niszczenia próbek. Do pomiarów wykorzystano uniwersalną hydrauliczną maszynę wytrzymałościową ze sprzężeniem zwrotnym MTS 322, umożliwiającą szybką kontrolę odkształceń i regulację obciążenia. Wyniki były rejestrowane automatycznie. Widok stanowiska badawczego z elementem próbnym przedstawiono na Rys. 2.

Podstawą do wyznaczenia wielkości niezbędnych do obliczenia krytycznego współczynnika intensywności naprężeń jest wykres obciążenia *P* w funkcji przyrostu rozwarcia wylotu karbu ΔNMOD, uzyskany w rezultacie cyklicznego obciążania i odciążania belki z karbem. Przyrost szerokości rozwarcia wylotu karbu mierzono za pomocą ekstensometru blaszkowego o długości bazy pomiarowej równej 5 mm. Przed przystąpieniem do pomiaru określano ciężar próbki i kontrolowano jej wymiary.

Pęknięcie, zainicjowane na dnie karbu pod wpływem naprężeń rozciągających, rozwijało się aż do osiągnięcia krytycznej długości efektywnej rysy a_c, przy której następował niestabilny rozwój rysy prowadzący do zniszczenia elementu próbnego.

Szybkość obciążania dobrano tak, aby wartość maksymalna została osiągnięta w ciągu około 5 min. Po spadku siły do 95% wartości maksymalnej następowało odciążenie. Wartość siły redukowano do poziomu około 100 N (faza odciążenia). Odciążenie było realizowane automatycznie. Następna faza to dociążanie próbki aż do osiągnięcia kolejnej maksymalnej wartości obciążenia (mniejszej od początkowej), po osiągnięciu której następowało odciążenie, jak w cyklu poprzednim. Łącznie powtarzano cykle obciążenie-odciążenie czterokrotnie, a następnie obciążano próbkę aż do zniszczenia, przy czym każdy kolejny cykl, po początkowym, trwał nie dłużej niż 1 min. Parametrem sterującym w procesie obciążania było rozwarcie wylotu karbu.

Do określenia parametrów mechaniki pękania niezbędne jest ustalenie, na podstawie wykresu zależności *P*–ΔNMOD, podatności początkowej C_i oraz podatności C_u określonej przy spadku siły maksymalnej o 5% [11]. Podatność została zdefiniowana jako przyrost rozwarcia wylotu szczeliny pierwotnej na jednostkę obciążenia, określany z wykresu *P*–ΔNMOD dla każdego cyklu obciążenie-odciążenie. Wyznaczany, na postawie wartości C_i, początkowy współczynnik sprężystości *E* zdefiniowano jako moduł styczny. Równo-



Rys. 1. Sposób obciążenia i wymiary próbki z karbem typu U.
Fig. 1. Fracture testing configuration and geometry of specimen.

cześnie ze zmianami szerokości wylotu karbu rejestrowano ugięcie próbki δ w środku rozpiętości.

Energię pękania G_F obliczano na podstawie pola powierzchni pod wykresem zależności obciążenia P w funkcji ugięcia δ elementu próbnego z karbem, zgodnie z zależnością [12]:

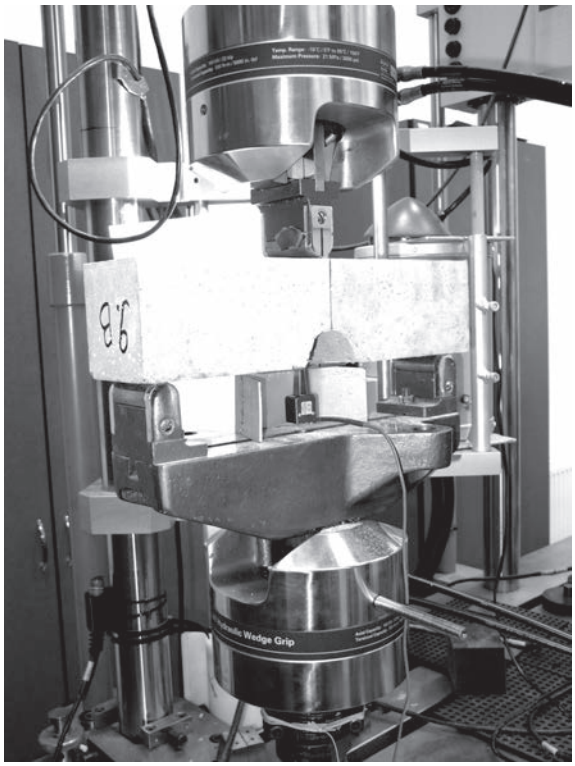
$$G_F = \frac{1}{b(d-a_0)}\left[mg\delta_{max} + \int_0^{\delta_{max}} P(\delta)d\delta\right], \qquad (2)$$

gdzie: m – masa próbki, g – przyspieszenie ziemskie, δ_{max} – ugięcie elementu próbnego w chwili pękania; pozostałe oznaczenia jak na Rys. 1. Rozrzut obliczonych wartości G_F wynika z nieuniknionej losowości długości końcowego odcinka (ang. *tail region*) krzywej P-δ, a także z niepewności przy ekstrapolacji opadania końcowego odcinka krzywej do zera. Aby ograniczyć wpływ wymienionych czynników na rozrzut wartości G_F wykres ucinano przy wartości obciążenia w przybliżeniu równej 0,05 P_{max} (100-200 N). Na tej podstawie ustalano wartość δ_{max}. Pole powierzchni przełomu próbki, do którego odnoszono całkowitą wartość energii, ustalano na podstawie szerokości elementu próbnego b i wysokości po uwzględnieniu głębokości karbu (a_0 = 30 mm).

3. Analiza wyników

Przykładowe wykresy zależności obciążenie P-ΔNMOD, uzyskane w trakcie badań prowadzących do określenia parametrów mechaniki pękania dla wybranych względnych promieni zaokrąglenia karbu ($\varepsilon = \rho/a_0$), przedstawiono na Rys. 3. Rys. 4 przedstawia początkowy fragment zależności P-ΔNMOD aż do osiągnięcia maksymalnej wartości obciążenia dla wszystkich badanych promieni zaokrąglenia karbu. Na podstawie tej części wykresu określano podatność początkową C_i oraz ustalono wartość stycznego modułu sprężystości podłużnej.

Liniowy odcinek pierwszej fazy wykresu P-ΔNMOD miał identyczny przebieg niezależnie od promienia zaokrąglenia karbu w elemencie próbnym, stąd wartość modułu sprężystości podłużnej, określana w trakcie pomiarów, była niezależna od ε. Analizując wykresy P-ΔNMOD w zależności od wartości względnego promienia zaokrąglenia karbu stwierdzono, że wraz ze wzrostem ε wydłużał się liniowy zakres zależności i zwiększała się maksymalna wartość siły niszczącej. Jednocześnie, wartość ΔNMOD, odpowiadająca sile maksymalnej, zwiększała się nieznacznie.

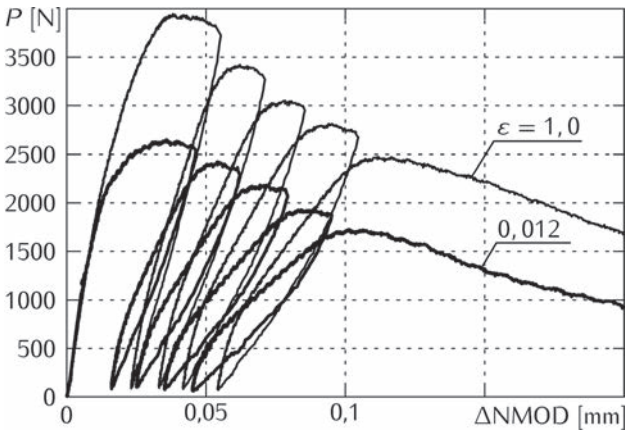


Rys. 2. Widok stanowiska badawczego.
Fig. 2. Notched beam specimen during testing.

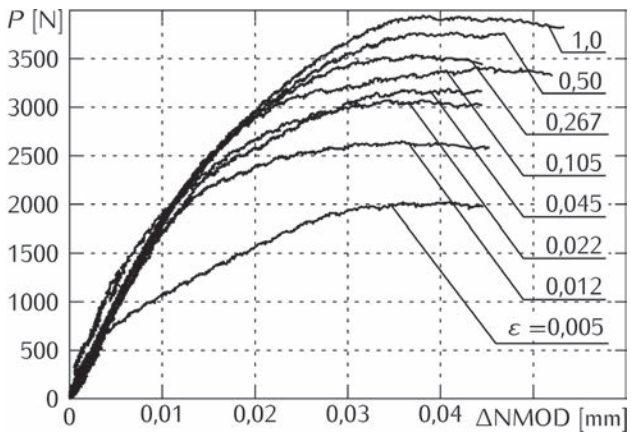
Przebieg wykresu zależności P-ΔNMOD w zakresie pokrytycznym dla kolejnych faz odciążenie-obciążenie, można opisać następująco: przy obciążeniu równym 95% wartości maksymalnej rozpoczyna się odciążanie (początek cyklu). W pierwszej fazie odciążania można wyróżnić krótki odcinek, kiedy obciążenie maleje przy nieznacznie zmniejszającym się rozwarciu wylotu karbu U. Następnie, drogę odciążania określa odcinek prostoliniowy, pokazujący zmniejszanie się rozwarcia wylotu karbu aż do osiągnięcia minimum obciążenia w danym cyklu. Wtedy rozpoczyna się kolejny cykl obciążania. W początkowej fazie obciążenie rośnie bez zmiany NMOD. Dalej krzywa, opisująca drogę dociążania, staje się mniej stroma, a rozwarcie karbu zwiększa się. Następny odcinek charakteryzuje się znaczącym przyrostem NMOD przy niewielkich zmianach obciążenia aż do przecięcia z krzywą fazy odciążania. Pierwszy cykl obciążenia nie powoduje całkowitego zniszczenia elementu próbnego. Przy każdym kolejnym cyklu odciążenie-obciążenie elementu próbnego rejestrowano znaczące obniżenie maksymalnego obciążenia (siły) i przyrost rozwarcia karbu, związany z osłabieniem w zakresie pokrytycznym.

Otrzymane wyniki badań przedstawiono w postaci bezwymiarowych naprężeń σ/σ_t, określających stosunek naprężeń niszczących w wierzchołku karbu do doraźnej wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu, w funkcji względnego promienia zaokrąglenia wierzchołka karbu $\varepsilon = \rho/a_0$, sporządzając wykres w skali logarytmicznej (Rys. 5).

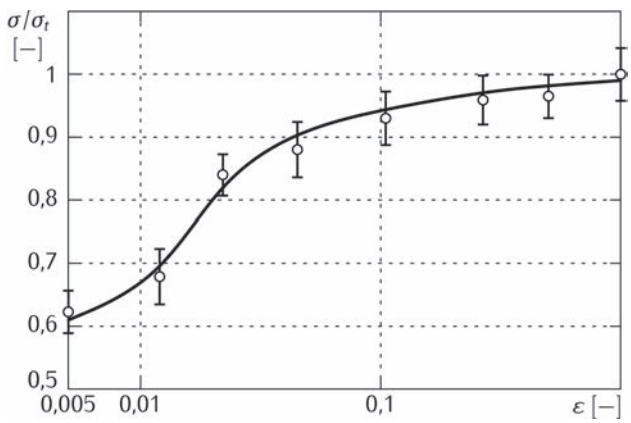
Wraz ze wzrostem promienia zaokrąglenia karbu zwiększał się poziom naprężeń niszczących. Przy małych wartościach ε różnice naprężeń były największe; dalej narastanie naprężeń przebiegało łagodnie. Dla dużych promieni krzywizny, tj. $\varepsilon \geq 0{,}267$ (ρ = 8,0, 15,0 i 30,0), naprężenie niszczące dążyło do wytrzymałości zaprawy na rozciąganie przy zginaniu.



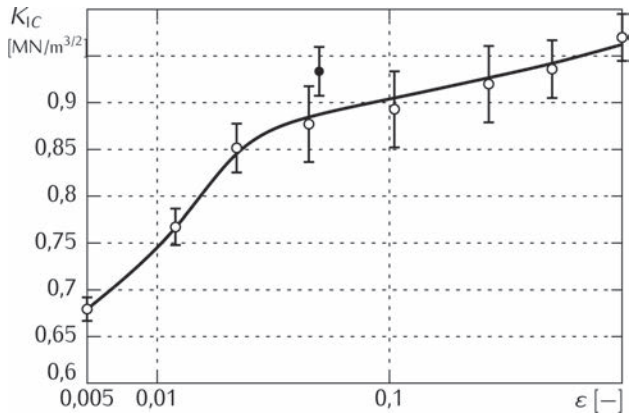
Rys. 3. Wykresy zależności obciążenie P-ΔNMOD w próbie obciążenia cyklicznego dla względnych promieni zaokrąglenia ε = 0,012 (ρ = 0,35 mm) i ε =1,0 (ρ = 30 mm).
Fig. 3. Load P-ΔNMOD curves obtained in cycling loading for relative radii of notch curvature ε = 0.012 (ρ = 0.35 mm) and ε =1,0 (ρ = 30 mm).



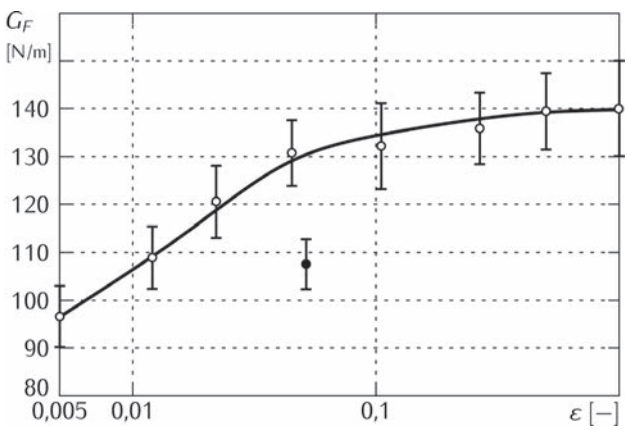
Rys. 4. Początkowa faza wykresu P-ΔNMOD w zależności od względnego promienia zaokrąglenia karbu ε = ρ/a$_0$.
Fig. 4. Initial part of P-ΔNMOD curves vs. relative radius of notch curvature ε = ρ/a$_0$.



Rys. 5. Zależność bezwymiarowego naprężenia niszczącego σ/σ$_t$ w funkcji względnego promienia zaokrąglenia wierzchołka karbu ε = ρ/a$_0$.
Fig. 5. Dimensionless traction stress σ/σ$_t$ as a function of relative radius of notch curvature ε = ρ/a$_0$.



Rys. 6. Zależność wartości krytycznego współczynnika intensywności naprężeń K$_{Ic}$ od względnego promienia zaokrąglenia karbu ε = ρ/a$_0$.
Fig. 6. Critical stress intensity factor K$_{Ic}$ vs. relative radius of notch curvature ε = ρ/a$_0$.



Rys. 7. Zależność energii pękania G$_F$ od względnego promienia zaokrąglenia karbu ε = ρ/a$_0$.
Fig. 7. Fracture energy G$_F$ vs. relative radius of notch curvature ε = ρ/a$_0$.

Na podstawie wykresów zależności *P*-ΔNMOD wyznaczono krytyczne wartości współczynnika intensywności naprężeń. Wykres zależności K_{Ic} w funkcji względnego promienia zaokrąglenia wierzchołka karbu *ε* przedstawia Rys. 6. Krytyczna wartość współczynnika intensywności naprężeń wzrastała wraz ze zwiększaniem się wartości *ε*. Na Rys. 6 czarnym punktem zaznaczono wartość K_{Ic} wyznaczoną przy wykorzystaniu elementu próbnego z typowym karbem o głębokości 30,0 mm i szerokości 3,0 mm, wyciętym za pomocą piły diamentowej. W przypadku próbek z uformowanym karbem typu U, porównywalne wartości krytycznego współczynnika intensywności naprężeń uzyskiwano dla względnych promieni zaokrąglenia *ε* ≥ 0,267.

Istotnym parametrem w nieliniowej mechanice pękania jest energia pękania G_F, definiowana jako ilość energii absorbowana w obrębie strefy zniszczenia, przypadająca na jednostkę powierzchni [1]. Energia pękania charakteryzuje proces pękania i osłabienie odkształceniowe materiału po

osiągnięciu naprężeń maksymalnych. Rys. 7 przedstawia zależność energii pękania G_F od względnego promienia zaokrąglenia karbu ε. Dodatkowo, czarnym punktem zaznaczono wartość energii niezbędnej do zniszczenia próbki z karbem wyciętym za pomocą piły.

Zwiększanie się energii pękania wraz ze wzrostem wartości ε, było efektem wzrostu wartości siły niszczącej, a także wzrostu K_{Ic}, zgodnie z zależnością, obowiązującą dla płaskiego stanu odkształcenia:

$$G_{Ic} = \frac{K_{Ic}^2\left(1-\gamma^2\right)}{2E}, \qquad (3)$$

gdzie: G_{Ic} – krytyczna prędkość uwalniania energii potencjalnej odkształcenia; γ, E – stałe materiałowe, odpowiednio współczynnik Poissona i moduł sprężystości podłużnej. Według Shaha i in. [2] wielkość G_{Ic} jest związana z inicjacją procesu pękania. Wraz ze zwiększeniem promienia zaokrąglenia karbu wzrastała wartość energii niezbędnej do zapoczątkowania pęknięcia.

4. Podsumowanie

Uzyskane wyniki potwierdzają zależność mierzonych parametrów mechaniki pękania od promienia zaokrąglenia wierzchołka karbu w elemencie próbnym. Wraz ze zwiększeniem promienia obserwowano wydłużenie liniowego odcinka pierwszej fazy wykresu obciążenie–rozwarcie wylotu karbu i wzrost wartości siły niszczącej próbkę. Wartości analizowanych parametrów – krytycznego współczynnika intensywności naprężeń i energii pękania – także wzrastały. Przyczyną tych zmian było głównie zwiększenie energii niezbędnej do zainicjowania procesu pękania w wierzchołku karbu zaokrąglonego. Wartości parametrów określone w tych samych warunkach obciążenia i przy tej samej geometrii próbek z karbem wyciętym za pomocą piły diamentowej istotnie różniły się od wyników uzyskanych dla próbek z karbem o zaokrąglonym wierzchołku.

Wyznaczając doświadczalnie parametry mechaniki pękania kompozytów cementowych należy ściśle określić warunki badania. Przedstawione wyniki badań stanowią podstawę do identyfikacji parametrów teoretycznych modeli pękania.

Podziękowanie

Badania wykonano w ramach projektu finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki na podstawie decyzji DEC--2011/03/B/ST8/06456.

Literatura

[1] Bažant, Z. P.: Concrete fracture models: testing and practice, *Engineering Fracture Mechanics*, 69, (2002), 165-205.
[2] Shah, S. P., Swartz, S. E., Ouyang, Ch.: *Fracture mechanics of concrete: Applications of fracture mechanics to concrete, rock and other quasi-brittle materials*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1995.
[3] Wardeh, G., Ghorbel, E.: Prediction of fracture parameters and strain-softening behavior of concrete: effect of frost action, *Materials and Structures*, 48, (2015), 123-138.
[4] Kosior-Kazberuk, M.: Variations in fracture energy of concrete subjected to cyclic freezing and thawing, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 13, (2013), 254-259.
[5] Jenq, Y. S., Shah, S. P.: Features of mechanics of quasi-brittle crack propagation in concrete, *International Journal of Fracture,* 51, (1991), 103-120.
[6] Kosior-Kazberuk, M., Kazberuk, A.: Determination of the fracture toughness parameters of quasi-brittle materials using cylindrical samples, *Materiały Ceramiczne /Ceramic Materials/*, 62, (2010), 244-248.
[7] Berto, F., Campagnolo, A., Elices, M., Lazzarin, P.: A synthesis of Polymethylmethacrylate data from U-notched specimens and V-notches with end holes by means of local energy, *Materials and Design,* 49, (2013), 826-833.
[8] Berto, F., Barati, E.: Fracture assessment of U-notches under three point bending by means of local energy density, *Materials and Design,* 32, (2011), 822-830.
[9] Gomez, F. J., Elices, M., Berto, F., Lazzarin, P.: A generalised notch stress intensity factor for U-notched components loaded under mixed mode, *Engineering Fracture Mechanics*, 75, (2008), 4819-4833.
[10] Torabi, A. R.: Sudden fracture from U-notches in fine-grained isostatic graphite under mixed mode I/II loading, *International Journal of Fracture*, 181, (2013), 309-316.
[11] Recommendation TC 89-FMT RILEM. Determination of fracture parameters (K_{Ic} and $CTOD_c$) of plain concrete using three-point bend test, *Materials and Structures,* 23, (1990), 457-460.
[12] Recommendation TC 50-FMT RILEM. Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams, *Materials and Structures*, 18, (1985), 287-290.

♦

Otrzymano 17 września 2015, zaakceptowano 20 listopada 2015.