

prof. dr hab. inż. Grzegorz Ludwik Golewski¹⁾
ORCID: 0000-0001-9325-666X

Walidacja korzystnej ilości popiołu lotnego w betonie z uwagi na odporność na pękanie za pomocą metody cyfrowej korelacji obrazu

Validation of the favorable quantity of fly ash in concrete in the fracture toughness examinations through digital image correlation method

DOI: 10.15199/33.2020.10.02

Streszczenie. W artykule skoncentrowano się na analizie procesów pęknięcia w betonie z popiołem lotnym (fly ash – FA) z uwzględnieniem drugiego modelu pęknięcia i określono parametr K_{IIC} . Głównym celem badań było potwierdzenie zbieżności i określenie zakresu rozbieżności pomiędzy wynikami K_{IIC} uzyskanymi na prasie MTS 810 i z zastosowaniem cyfrowej korelacji obrazu (*Digital Image Correlation* – DIC). Analiza wyników badań wykazała wyraźną zbieżność między wartościami uzyskanymi z obu urządzeń pomiarowych. Ponadto wyniki badań potwierdzają zależności z wcześniejszych doświadczeń dotyczących odporności na pękanie betonu zawierającego FA, przeprowadzonych przy pierwszym modelu pęknięcia.

Słowa kluczowe: beton; popiół lotny; odporność na pękanie K_{IIC} ; walidacja; metoda cyfrowej korelacji obrazu; DIC.

Abstract. The article focuses on analyzing the fracture processes in fly ash (FA) concrete taking into account the second model of cracking and the K_{IIC} parameter was determined. Two measuring devices were used in the studies. The main goal of the studies was to confirm the convergence and determine the discrepancy ranges, between the K_{IIC} results obtained on the MTS 810 press and the use of the Digital Image Correlation (DIC). The analysis of the obtained test results showed clear convergences between the values obtained from both measuring devices. Furthermore, the presented test results also confirm the values of previous experiments on fracture toughness of concrete containing FA conducted at the first model of cracking.

Keywords: concrete; fly ash; fracture toughness K_{IIC} ; validation; digital image correlation method; DIC.

Głównym spoiwem betonu jest cement portlandzki (*ordinary Portland cement* – OPC), którego produkcja wynosi obecnie 4,1 mld ton rocznie [4]. Niestety wytwarzanie tego materiału [15] jest relatywnie drogie, powoduje zużycie dużej ilości energii cieplnej i elektrycznej, surowców naturalnych (np. margli i wapieni) oraz generuje szkodliwe gazy cieplarniane (m.in. CO_2 , N_2O). Sektor cementowy ma więc duży (głównie negatywny) wpływ na atmosferę i środowisko naturalne [24]. W związku z tym, do wytwarzania mieszanki betonowej coraz częściej są stosowane różnego rodzaju dodatki [11, 13], domieszki [6, 10] oraz cementy wieloskładnikowe [14]. Wykorzystanie dodatków w przemyśle betonowym pozwala uniknąć nadmiernego składowania odpadów na wysypiskach. Najczęściej stosowane w składzie cementu i betonu [10] są: po-

piół lotny o małej zawartości wapnia; popiół lotny o dużej zawartości wapnia oraz granulowany żużel wielkopiecowy.

Popiół lotny krzemionkowy (siliceous fly ash – FA), to produkt uboczny wytwarzania ciepła w elektrowniach węglowych. Jest jednym z najczęściej wykorzystywanych odpadów w przemyśle [9, 12, 26]. Zwiększenie udziału FA w składzie cementu oraz zmniejszenie udziału klinkieru pozwala ograniczyć zużycia energii i emisję CO_2 przez przemysł cementowy. Rozwiązania takie określa się jako zgodne z zasadami zrównoważonego budownictwa [7, 8], natomiast kompozyty wykonane na bazie tak zmodyfikowanego OPC jako **beton zielony** [1, 2].

Betony wytwarzane z cementu portlandzkiego są stosowane od prawie dwustu lat, natomiast kompozyty z dodatkiem FA od niemal dziewięćdziesięciu. Ustalono, że te drugie materiały mają m.in. większą wytrzymałość i odporność na pękanie po długim okresie dojrzewania [16], większą odporność na

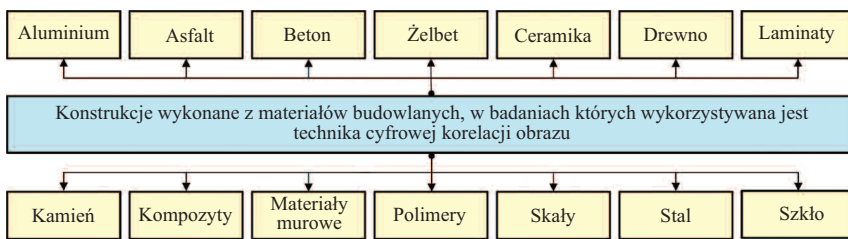
korozję [5] oraz większą szczelność i mniejszą przepuszczalność dzięki bardziej zhomogenizowanej strukturze [17] niż betony z cementu portlandzkiego.

Mimo dobrej znajomości wielu cech kompozytów, istnieją jeszcze nie w pełni rozpoznane obszary badawcze. W związku z tym wykorzystywane są nowoczesne techniki pomiarowe, które mogą zweryfikować wyniki badań parametrów mechanicznych betonów określone za pomocą tradycyjnych metod diagnostycznych. Ponadto mogą one dostarczyć wielu nowych i ważnych informacji dotyczących zachowania się elementów betonowych poddanych obciążeniom zewnętrznym, których nie można uzyskać w badaniach przeprowadzanych na typowych urządzeniach laboratoryjnych [18].

Dynamicznie rozwijającą się metodą diagnostyczną w przypadku badań niszczących betonu z FA jest **innowacyjna technika cyfrowej korelacji obrazu (DIC)**. Jej zaletą jest elastyczność,

¹⁾ Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury; g.golewski@pollub.pl

duża precyzja, skalowalność do szerokiego zakresu wymiarów, skuteczność i pozorna łatwość użytkowania [3]. Wymaga wykonania serii zdjęć analizowanego obszaru badanej konstrukcji przy różnych obciążeniach, a następnie ich analizy w celu obliczenia przemieszczeń wybranych punktów. Metoda DIC podobnie jak metoda emisji akustycznej (AE), polega na wykrywaniu wskaźników stanu przedawaryjnego jako potencjalnych stref inicjacji i propagacji pęknięć w materiałach kruchych. W efekcie może pomóc zrozumieć procesy ewolucji pęknięć zachodzące w różnych materiałach budowlanych [21 ÷ 23; 25], przedstawionych na rysunku 1.



Rys. 1. Zestawienie materiałów, w badaniach których wykorzystywana jest technika DIC
Fig. 1. A collection of materials where the DIC technique is used to their study

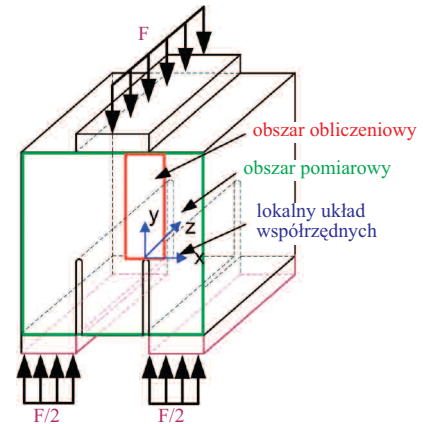
W artykule omówiono praktyczne zastosowanie techniki DIC w badaniu odporności na pęknięcie przy ścinaniu kompozytów betonowych modyfikowanych FA. Zaproponowano nową bardziej dokładną koncepcję określania odporności na pęknięcie betonu modyfikowanego przy II modelu pęknięcia. Innowacyjne zastosowanie tej metody bazowało na doświadczeniach uzyskanych w wyniku analizy zachowania się obciążonego elementu bezpośrednio w obszarze pęknięcia uszkodzonego materiału. Na podstawie wyników można wnioskować, w jakim stopniu wartości współczynnika intensywności naprężeń krytycznych K_{IIC} , obliczone na podstawie danych z prasy wytrzymałościowej, różnią się od wyników analizowanego parametru odporności na pęknięcie diagnozowanego w obszarze rozwijającego się uszkodzenia. Uzyskana w ten sposób wiedza będzie miała w przyszłości praktyczne zastosowanie w ocenie procesów niszczących rzeczywistych konstrukcji.

Badania

Zastosowanie metody DIC w badaniach własnych pozwoliło na:

- zweryfikowanie i zwalidowanie wartości krytycznego współczynnika intensywności naprężeń K_{IIC} obliczonego na podstawie badań w prasie wytrzymałościowej MTS 810;
- określenie optymalnej ilości dodatku FA, przy której beton osiąga maksymalną odporność na pęknięcie przy ścinaniu.

Standardowe badania parametrów mechaniki pęknięcia betonu określanych przy II modelu pęknięcia, na próbkach z dwoma rysami pierwotnymi, wymagają analizy krzywych zniszczenia i sił powodujących inicjację pęknięć z wyników uzyskanych w prasie wytrzymałościowej. Są to parametry otrzymywane na podstawie informacji o przemieszczeniu



Rys. 2. Lokalny układ współrzędnych pomiarowy oraz obszar pomiarowy i obliczeniowy przyjęty w badaniach

Fig. 2. Local measurement coordinates with measurement and calculation area adopted in the studies

wych siła – przemieszczenie dowolnego wybranego obszaru analizowanego elementu.

Do pomiaru procesów pęknięcia wykorzystano metodę DIC. Następnie porównano obliczone wyniki parametru K_{IIC} z obu systemów pomiarowych i określono poziom ich zbieżności. Wyniki badań odporności na pęknięcie betonów modyfikowanych FA, realizowanych wg II modelu pęknięcia metodą tradycyjną, tzn. na podstawie pomiarów przemieszczeń tłoka prasy wytrzymałościowej MTS 810 przedstawiono w [19]. W celu walidacji uzyskanych wartości wyniki oszacowano wg analizy rozwoju zamodelowanych rys pierwotnych bezpośrednio w strefie ich rozwoju. Na rysunku 2 zaznaczono powierzchnię próbki, która została poddana analizie (obszar pomiarowy) oraz strefę, w której dochodziło do propagacji rysy w trakcie przyrostu obciążenia. W zakresie tego pola (obszar obliczeniowy), dokonywano szacowania sił powodujących rozwój rys pierwotnych, a dzięki wykorzystaniu wzoru podanego w [15, 18] wyznaczano parametr K_{IIC} . Na rysunku 2 zaznaczono również lokalny układ współrzędnych, mający punkt zerowy w wierzchołku rysy pierwotnej, który posłużył do przeprowadzenia dokładnych szacunków K_{IIC} .

W celu określenia optymalnej ilości dodatku, przy której beton modyfikowany FA uzyskuje maksymalną odporność na pęknięcie, badania przeprowadzono na czterech rodzajach betonów róż-

niących się ilością zastosowanego modyfikatora, tzn. bez dodatku FA (FA-00) oraz z dodatkiem FA w ilości: 10% (FA-10), 20% (FA-20) i 30% (FA-30). W przypadku każdej serii betonu wykonano po sześć próbek o boku 150 mm z zamodelowanymi dwoma rysami pierwotnymi (rysunek 2). Próbki badano po 28 dniach dojrzewania.

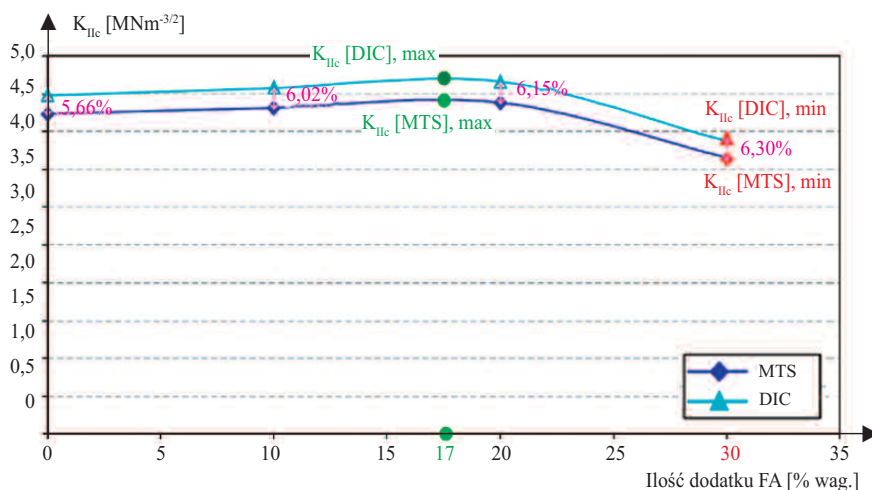
Analiza wyników badań

Ocenę propagacji pęknięć w próbkach prowadzono w całym procesie ich obciążenia, tj. od momentu powstania uszkodzenia widocznego w strukturze materiału, aż do całkowitego zniszczenia próbki (fotografia). Dzięki zastosowaniu techniki DIC udało się uchwycić zarodkowanie pierwszych pęknięć wewnątrz kostek, które nie były w pełni widoczne na powierzchni badanych elementów. Prześlizgano proces rozwoju makroskopowego uszkodzenia. Zgromadzone informacje pozwoliły na dokładne opisanie poszczególnych etapów propagacji pęknięć w elementach betonowych poddanych ścinaniu oraz precyzyjne wyznaczenie parametru K_{IIC} . Na

fotografii pokazano widok próbki kontrolnej po procesie zniszczenia zaobserwowany na tradycyjnym zdjęciu oraz wygenerowanym techniką DIC.

Średnie wartości odporności na pękanie przy II modelu pęknięcia analizowanych betonów uzyskane dwoma metodami zestawiono na rysunku 3. Pozwoliło to na określenie najkorzystniejszej ilości FA, przy której parameter K_{IIC} osiągnął maksymalną wartość. Stwierdzono, że wyniki odporności na pęka-

w prasie MTS 810, jak i techniką DIC optymalna ilość FA, przy której osiągnięto maksymalny wzrost K_{IIC} , a jednocześnie maksymalne wskaźniki odporności na pękanie również wg pierwszego modelu pęknięcia [15] wynosi 17%. W związku z tym można przyjąć, że wyniki uzyskane w tradycyjnych badaniach wytrzymałościowych zostały w pełni zweryfikowane w badaniach wykonanych precyzyjną techniką DIC.



Rys. 3. Zależność K_{IIC} od ilości dodatku FA
Fig. 3. Dependence of K_{IIC} from FA replacement

nie wykazują wyraźną zbieżność, gdyż różnica w przypadku wszystkich serii betonu wynosi tylko ok. 6%. Dodatek 10% i 20% FA spowodował stabilny wzrost K_{IIC} w zakresie $2 \div 4\%$. Natomiast zastąpienie części cementu dodatkiem 30% FA spowodowało ok. 14% redukcję odporności na pękanie w porównaniu z betonem niemodyfikowanym. Korzystne wyniki analizowanych parametrów kompozytów FA-10 i FA-20, w porównaniu z małymi wartościami K_{IIC} betonu FA-30, można wytłumaczyć powolnym postępem reakcji pucolanowej popiołów lotnych klasy F – dodawanych do betonu w większej ilości. Mimo że drobne ziarna FA tej klasy wykazują dużą aktywność [17], istnieje granica, przy której nie mają już pozytywnego wpływu na strukturę materiału. Maksymalna ilość FA w betonie, która może mieć umiarkowanie pozytywne efekty modyfikacji, wynosi prawdopodobnie ok. 30% masy cementu [12]. W przypadku wyników uzyskanych zarówno

Wnioski

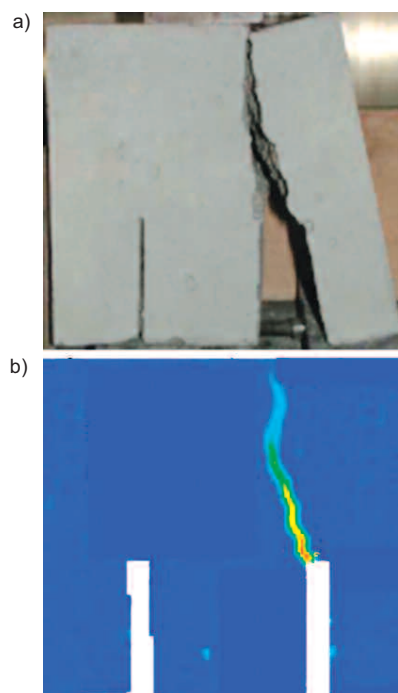
- Dodatek FA w ilości do 20% wpływa korzystnie na wartość parametru K_{IIC} , a jego większa zawartość powoduje spadek odporności kompozytu na pękanie (rysunek 3).

- Technika DIC pozwala na dokładne i precyzyjne wyznaczenie parametrów pęknięcia w kompozytach betonowych.

- Wartości K_{IIC} , obliczone na podstawie danych wygenerowanych techniką DIC, przedstawiają zachowanie się materiału konstrukcyjnego bezpośrednio w momencie inicjacji rysy pierwotnej w jej wierzchołku (fotografia).

- Optymalna ilość dodatku FA, przy której kompozyt osiąga maksymalną wartość K_{IIC} , wynosi 17% (rysunek 3).

- Istnieje wyraźna korelacja pomiędzy wartością odporności na pękanie przy ścinaniu, betonu modyfikowanego FA, uzyskaną podczas badań na prasie MTS 810 i z obliczeń metodą DIC (rysunek 3).



Widok propagacji pęknięć w próbce w momencie zniszczenia: a) obraz tradycyjny; b) obraz uzyskany techniką DIC

A view of the crack propagation in the specimen at the time of its fracture: a) image shown on the photo; b) image obtained from the DIC technique

Literatura

- [1] Ajdukiewicz Andrzej. 2012. „Zielony beton” w konstrukcjach – aspekty materiałowe i technologiczne”. *Materiały Budowlane* 484 (12): 2 – 6.
- [2] Ajdukiewicz Andrzej. 2013. „Zielony beton” w konstrukcjach – aspekty projektowe i przykłady”. *Materiały Budowlane* 485 (1): 76 – 79.
- [3] Ajdukiewicz Cezary, Marcin Gajewski, Przemysław Mossakowski. 2011. „Zastosowanie systemu optycznej korelacji obrazu „Aramis” do identyfikacji rys w elementach betonowych”. *Materiały konferencyjne Transcomp – XIV International Conference Computer Systems Aied Science, Industry and Transport*, 2011.
- [4] Andrew R. M. 2018. „Global CO₂ emissions from cement production”. *Earth System Science Data* 10, 195 – 217.
- [5] Błaszczyński Tomasz, Aldona Łowińska-Kluge, Błażej Zgoła. 2004. „Wpływ wykonawstwa na degradację betonu”. *Materiały Budowlane* 385 (9): 84 – 86.
- [6] Bołtryk Michał, Anna Krupa. 2015. „Kompozyty cementowe z wypełniaczem organicznym modyfikowane domieszkami”. *Materiały Budowlane* 518 (10): 46 – 48.
- [7] Czarnecki Lech. 2006. „Przyszłość betonu w warunkach zrównoważonego rozwoju”. *Materiały Budowlane* 411 (11): 22 – 24, 52.
- [8] Czarnecki Lech, Zbigniew Paszkowski. 2016. „Naprawa, utrzymanie i rewitalizacja jako czynniki kształtujące zrównoważone budownictwo”. *Materiały Budowlane* 525 (5): 126 – 129. DOI: 10.15199/33.2016.05.57.
- [9] Czarnecki Lech, Ryszard Więclawski. 2005. „Możliwości wykorzystania popiołów lotnych w budownictwie”. *Materiały Budowlane* 397 (9): 83 – 85.
- [10] Giergiczny Zbigniew. 2019. „Fly ash and slag”. *Cement and Concrete Research* 124: b 105826.
- [11] Giergiczny Zbigniew. 2009. „Dodatki mineralne – niezastąpione składniki współczesnego cementu i betonu”. *Materiały Budowlane* 439 (3): 46 – 50.
- [12] Giergiczny Zbigniew. 2013. *Popiół lotny w składzie cementu i betonu*. Gliwice. Politechnika Śląska.
- [13] Giergiczny Zbigniew, Jan Małolepszy, Janusz Szwabowski, Jacek Śliwiński. 2002. *Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji*. Górażdże Cement, Opole.
- [14] Giergiczny Zbigniew, Albin Garbacik. 2010. „Współdziałanie dodatków mineralnych w składzie cementów wieloskładnikowych”. *Materiały Budowlane* 458 (10): 27 – 0,59.
- [15] Golewski Grzegorz Ludwik. 2015. *Procesy pęknięcia w betonie z dodatkiem krzemionkowych popiołów lotnych*. Lublin, Politechnika Lubelska.
- [16] Golewski Grzegorz Ludwik. 2015. „Makroskopowa ocena procesów pęknięcia w betonach z popiołami lotnymi”. *Materiały Budowlane* 519 (11): 210 – 212. DOI: 10.15199/33.2015.11.66.
- [17] Golewski Grzegorz Ludwik. 2013. „Odporność na pęknięcie a mikrostruktura w betonach z dodatkiem popiołów lotnych”. *Materiały Budowlane* 494 (10): 28 – 30.
- [18] Golewski Grzegorz Ludwik, Tomasz Sadowski. 2008. *Rola kruszywa grubego w procesie destrukcji kompozytów betonowych poddanych obciążeniom doraźnym*. Lublin. IZT Sp. z o.o.
- [19] Golewski Grzegorz Ludwik. 2011. „Analiza procesów pęknięcia w kompozytach betonowych z dodatkiem popiołów lotnych”. *Materiały Budowlane* 470 (10): 39 – 42.
- [20] Gołaszewski Jacek. 2013. „Współpraca domieszek z cementami”. *Materiały Budowlane* 495 (11): 89 – 92.
- [21] Goszczyńska Barbara, Wiesław Trąmpczyński, Magdalena Bacharz, Justyna Tworzewska, Paweł Tworzewski. 2014. „Zastosowanie skanera optycznego 3D do analizy belek wzmocnionych taśmami FRP”. *Logistyka* 6: 4130 – 4137.
- [22] Goszczyńska Barbara, Wiesław Trąmpczyński, Justyna Tworzewska, Paweł Tworzewski. 2014. „Doświadczalna analiza odkształceń przestrzennych belek żelbetowych z zastosowaniem skanera optycznego 3D”. *Inżynieria i Budownictwo* 3: 156 – 159.
- [23] Goszczyńska Barbara, Justyna Tworzewska. 2014. „Określenie rysy na potrzeby analizy wyników badania procesu powstawania i rozwoju rys w belkach żelbetowych z zastosowaniem systemu Aramis”. *Przegląd Budowlany* 12: 24 – 29.
- [24] Haustein Elżbieta. 2016. „Wpływ popiołu lotnego na proces wymywania wybranych metali ciężkich z betonu”. *Materiały Budowlane* 527 (7): 88 – 90. DOI: 10.15199/33.2016.05.57.
- [25] Krawczyk Łukasz, Michał Gołdyn, Tadeusz Urban. 2017. „O niedokładności systemów cyfrowej korelacji obrazu”. *Czasopismo Inżynierii Łądowej, Środowiska i Architektury* 64 (3/1): 259 – 270. DOI: 10.7862/rb. 2017.120.
- [26] Wiśniewska Krystyna. 2015. „Popioły z energetyki pełnowartościowymi surowcami dla budownictwa”. *Materiały Budowlane* 520 (12): 41. DOI: 10.15199/33.2015.12.12.

Przyjęto do druku: 24.09.2020 r.



ARBOCEL P – The Power of Innovation

- nieograniczone możliwości regulacji konsystencji,
- łatwe i szybkie mieszanie,
- zagęszczanie i stabilizacja tynków i farb przy jednoczesnej poprawie aplikacji



Rettenmaier Polska

Sp. z o.o.

Bitwy Warszawskiej 1920 r. 7B

02-366 Warszawa

mobile +48 600 423 423

Tel + 48 22 608 51 00

e-mail: arbocel@jrs.pl

Zapraszamy na stronę internetową
www.materialybudowlane.info.pl/science