

Zdzisław Piątek\*

Irena Staszak\*\*

Jacek Domski\*\*

## WSKAŹNIK KRUCHOŚCI FIBROPIASKOBETONU Z WŁÓKNAMI STALOWYMI A SPOSÓB UFORMOWANIA PRÓBEK

W artykule przedstawiono wpływ geometrii próbek oraz włókien Dramix (dł. 30 mm) i Ekomet (dł. 50 mm) na wskaźnik kruchości fibropiaskobetonu. Badania przeprowadzono na próbkach sześciennych o boku 150 mm (normowych) i wyciętych z elementów belkowych i płytowych.

Praca realizowana jako projekt badawczy KBW nr S T07E 021 24.

### 1. Wprowadzenie

Dotychczasowe badania prowadzone nad fibropiaskobetonami pozwalają stwierdzić, że zastosowanie włókien stalowych oraz superplastyfikatora jako modyfikatorów piaskobetonu wpływa korzystnie na jego cechy fizykomechaniczne [1], [2]. Wytrzymałość fibropiaskobetonu jest związana z ilością i efektywnością włókien stalowych, efektywnością upłynniacza oraz wielkością próbki i zastosowaną metodą badania.

Beton zbrojony włóknami stalowymi jest na tyle odmienny w swej strukturze i właściwościach od betonu zwykłego, że niektóre jego cechy powinny być badane w inny sposób lub na innej wielkości elementach, odpowiadających „reprezentatywnemu elementowi objętości” – REO [3], [4]. Jednak z powodu braku wytycznych krajowych badania cech mechanicznych fibrobetonów przeprowadzane są najczęściej na próbkach stosowanych w badaniach betonu zwykłego. Z uwagi na długość stosowanych włókien stalowych (do kilkudziesięciu milimetrów) istnieją wątpliwości, czy włókna te stanowią zbrojenie rozproszone w przypadku próbek sześciennych o boku 150 mm. Rozkład włókien w takich elementach prowadzi do zaburzeń w postaci koncentracji włókien przy ściankach formy (tzw. „efekt ścianki”), co niewątpliwie oddziałuje na cechy wytrzymałościowe fibrobetonu [3]. Ponieważ włókna stalowe powodują niewielki wzrost wytrzymałości na ściskanie (około 10%), efekty brzegowe nie mają znaczącego wpływu na otrzy-

---

\* prof. dr hab. inż. – Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Koszalińskiej

\*\* mgr inż. – jw.

mywane wyniki badań. W publikacji [1] przedstawiono analizę statystyczną wyników badań wytrzymałości na ściskanie, która wykazała, że nie ma istotnych różnic w wytrzymałościach określonych na próbkach kostkowych i próbkach wyciętych z większych elementów. W przypadku rozciągania, gdy zastosowane włókna stalowe wywołują wzrost wytrzymałości od 20% do 30%, efekty brzegowe w postaci koncentracji włókien przy ściankach formy mogą w znaczący sposób wpływać na wartości uzyskiwanych wyników badań.

W niniejszym artykule przedstawiono wpływ włókien stalowych, superplastyfikatora oraz wielkości formowanych elementów próbnych na wskaźnik kruchości fibropiaskobetonu, wyrażający stosunek wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu do wytrzymałości na ściskanie.

## 2. Program i opis badań

Badaniom poddano trzy rodzaje materiałów: matrycę piaskobetonową (M), matrycę piaskobetonową z dodatkiem superplastyfikatora (S) oraz fibropiaskobeton z włóknami stalowymi Dramix (D) i Ekomet (E). Do wykonania wszystkich mieszanek użyto piasku odpadowego (po hydroklasyfikacji) frakcji od 0 mm do 4 mm z hałd kopalni kruszyw w Sępólnie Wielkim (województwo zachodniopomorskie). Składy poszczególnych mieszanek betonowych przedstawiono w tabelicy 1.

Tablica 1. Składy mieszanek betonowych  
Table 1. Compositions of concrete mixes

Beton	Składniki						w/c
	kruszywo naturalne suche (0–4 mm) kg/m <sup>3</sup>	cement CEM II/B-V 32,5 R kg/m <sup>3</sup>	woda l/m <sup>3</sup>	superplastyfikator Addiment FM 34 l/m <sup>3</sup>	włókna stalowe, kg/m <sup>3</sup>		
					Dramix 30/0,45 mm klejone w pasma	Ekomet 50/0,8 mm luzem	
Piaskobeton (M)	1655	337	245	–	–	–	0,73
Piaskobeton z superplastyfikatorem (S)	1864	380	140	3,52	–	–	0,42
Fibrobeton (D)	1855	378	140	3,51	34	–	0,42
Fibrobeton (E)	1835	374	150	3,47	–	33	0,45

Wszystkie mieszanki miały konsystencję plastyczną.

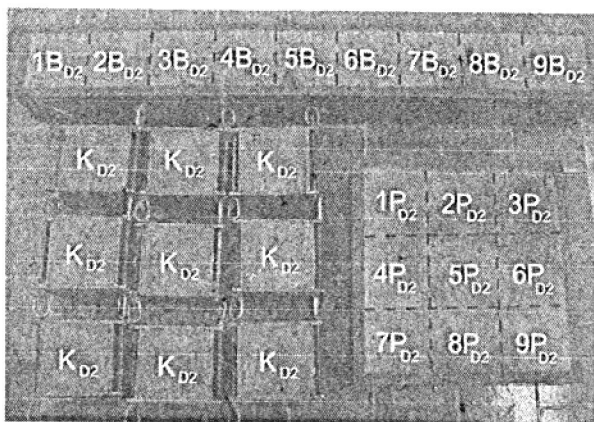
Z jednego zarobu wykonywano następujące elementy próbne: belkę (B) o wymiarach (150 × 150 × 1390) mm, płytę (P) o wymiarach (150 × 460 × 460) mm i 9 kostek (K) o boku 150 mm. Wymiary belek i płyt były dobrane tak, aby po ich pocięciu (po 7 dniach dojrzewania w warunkach podwyższonej wilgotności) uzyskać po 9 próbek sześciennych

typu B. W celu uzyskania zbliżonego stopnia zagęszczenia elementów próbnych, podczas wibrowania na stole wibracyjnym znajdowała się taka sama ilość mieszanki betonowej, czyli belka, płyta lub 9 kostek.

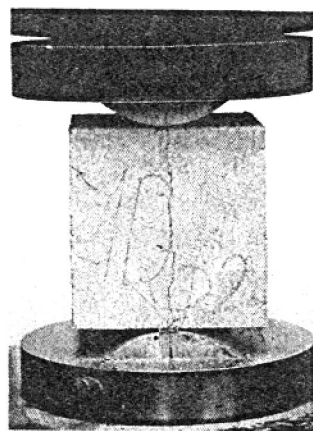
Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie przyjęto z wcześniejszej publikacji autorów [1]. Do badań wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu przygotowano – podobnie jak w przypadku ściskania – 2 belki (B), 2 płyty (P) i 18 kostek (K). Badania wytrzymałości na rozciąganie (po 28 dniach dojrzewania) przeprowadzono zgodnie z zaleceniami Instrukcji nr 194/98 Instytutu Techniki Budowlanej [5].

Fibrobeton jest materiałem niejednorodnym, a efekty tego są odczuwalne w różnym stopniu, w zależności od badanej cechy wytrzymałościowej. Istotne znaczenie ma tu kierunek obciążania względem położenia próbki, w jakim była ona betonowana. Na przykład różnica pomiędzy wytrzymałością zginanych beleczek formowanych pionowo i poziomo na stole wibracyjnym może być aż dwukrotna [6]. Potwierdzają to badania stereologiczne, które wykazują powstawanie anizotropii rozkładu i orientacji mikrouzbrojenia pod wpływem wibrowania. W przeprowadzonych badaniach kierunek obciążania próbek poddawanych rozciąganiu przy rozłupywaniu był zawsze prostopadły do kierunku wibrowania elementów (rys. 1).

a)



b)



Rys. 1. Seria próbek wykonanych z fibropiaskobetonu z włóknami Dramix (D) – a) i badanie wytrzymałości na rozciąganie próbki wyciętej z belki – b)

Fig. 1. Series of specimens of fine aggregate concrete with steel fibres Dramix (D) and testing of tensile strength of specimen cut out of beam

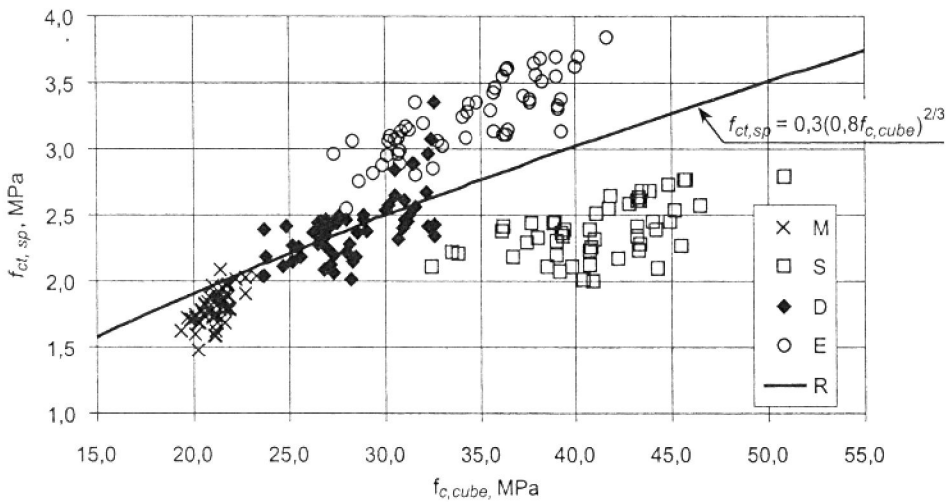
### 3. Analiza wyników badań

Wytrzymałości próbek ściskanych i rozciąganych są ściśle ze sobą powiązane, jednak zależność ta nie jest proporcjonalna. Wraz ze wzrostem wytrzymałości na ściskanie wzrasta również wytrzymałość na rozciąganie, lecz szybkość tego przyrostu jest malejąca (rys. 2). Stosunek obu wytrzymałości zależy od wielu czynników: od składu

mieszanki betonowej, wieku betonu, kształtu próbki, sposobu wykonania i pielęgnacji oraz metody badania wytrzymałości na rozciąganie [7]. Na rysunku 2 przedstawiono porównanie wyników badań wytrzymałości na ściskanie ( $f_{c,cube}$ ) i rozciąganie przy rozłupywaniu ( $f_{ct,sp}$ ) z zależnością proponowaną przez J.M. Raphaela [7]:

$$f_{ct,sp} = 0,3 \left( f_c \right)^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

w której  $f_c$  – walcowa wytrzymałość na ściskanie.



Rys. 2. Zależność między wytrzymałością na rozciąganie przy rozłupywaniu a wytrzymałością na ściskanie

Fig. 2. The relation between the tensile strength by splitting the specimens and compressive strength

Do obliczeń przyjęto  $f_c = 0,8 f_{c,cube}$ . Zależność (1) – w przypadku betonu zwykłego – jest zbliżona do wyników uzyskanych w badaniach piaskobetonu (M) i fibropiaskobetonu z włóknami Dramix (D). Jeśli chodzi o dwa pozostałe materiały, opis zależności między wytrzymałością na rozciąganie i ściskanie według Raphaela odbiega od wyników badań eksperymentalnych. Jest to związane z wysoką wytrzymałością na ściskanie w betonie z superplastyfikatorem (S) i podwyższoną wytrzymałością na rozciąganie w fibropiaskobetonie z włóknami stalowymi Ekomet (E) [8].

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie kostek (K) oraz próbek wyciętych z belek (B) i płyt (P) uporządkowano w sposób rosnący, z tym, że w przypadku dwóch ostatnich rodzajów elementów dokonano dodatkowej selekcji, uwzględniającej umiejscowienie próbek w elemencie przed jego pocięciem. Utworzone ciągi wyników wytrzymałości sprawdzono z uwagi na możliwość wystąpienia błędów przypadkowych (test Dixona). Na podstawie uporządkowanych w ten sposób wyników obliczono stosunki

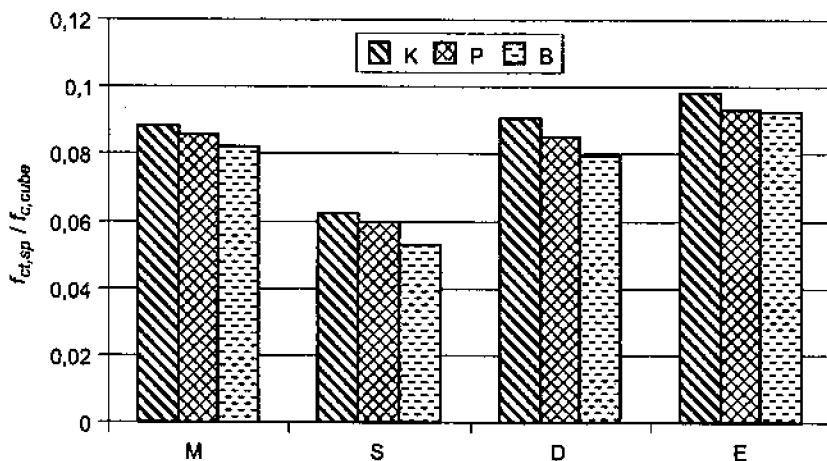
$\frac{f_{ct,sp}}{f_{c,cube}}$ , tworząc zbiory wskaźników kruchości, dla których wyznaczono wartości średnie, odchylenia standardowe i wskaźniki zmienności. Wyniki tej analizy zestawiono w tabelicy 2.

Tablica 2. Średnie wartości wskaźników kruchości, odchylenia standardowego i wskaźników zmienności

Table 2. Mean values of coefficients of brittleness of standard deviation and variation coefficients

Beton	Kostka				Belka				Płyta			
	n szt.	$\frac{f_{ct,sp}}{f_{c,cube}}$	s	v %	n szt.	$\frac{f_{ct,sp}}{f_{c,cube}}$	s	v %	n szt.	$\frac{f_{ct,sp}}{f_{c,cube}}$	s	v %
M	18	0,0881	0,0020	2	18	0,0819	0,0052	6	17	0,0856	0,0042	5
S	17	0,0619	0,0028	5	17	0,0530	0,0031	6	18	0,0596	0,0038	6
D	18	0,0905	0,0043	5	18	0,0795	0,0077	10	18	0,0852	0,0033	4
E	18	0,0980	0,0038	4	18	0,0927	0,0076	8	18	0,0931	0,0050	5

Liczba prób (n) była reprezentatywna przy tolerancji 10% i poziomie istotności 5% (wg t-Studenta).



Rys. 3. Wskaźniki kruchości uzyskane dla kostek (K) oraz próbek wyciętych z belek (B) i płyt (P)  
Fig. 3. Indicators of brittleness obtained on cubic (K) and specimens cut out of beams (B) and plates (P)

Wskaźnik zmienności stosunku wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu do wytrzymałości na ściskanie był bardzo mały i wynosił od 2% do 10%. Wskaźnik kruchości

badanych elementów zawierał się w przedziale od 0,053 do 0,098 (tablica 2), przy czym największe wartości uzyskano w przypadku fibropiaskobetonu z włóknami Ekomet (0,0927 + 0,0980), a najmniejsze w przypadku piaskobetonu z dodatkiem superplastyfikatora (0,0530 + 0,0619). Tak wysoki stopień kruchości matrycy z superplastyfikatorem jest uwarunkowany bardzo dużym wpływem zastosowanego upłynniacza (FM 34) na wytrzymałość na ściskanie [1].

Na rysunku 3 przedstawiono porównanie wskaźników kruchości elementów kostkowych (K) oraz próbek wyciętych z belek (B) i płyt (P), które dotyczą wszystkich rodzajów wykonanych betonów (M, S, D, E).

Do oceny rozbieżności średnich wartości wskaźników kruchości uzyskanych w przypadku poszczególnych prób zastosowano rozkład t-Studenta [9]. Porównywano średnie wartości wskaźników kruchości kostek (K) oraz próbek wyciętych z elementów belkowych (B) i płytowych (P). Analizowano elementy wykonane z każdego rodzaju betonu. Do obliczeń przyjęto poziom istotności  $\alpha = 0,05$ , sprawdzając, czy spełniona jest nierówność

$$t_0 \leq t_\alpha \quad (2)$$

w której:

$t_\alpha$  – wartość rozkładu t-Studenta, zależna od stopni swobody  $k$  ( $k = n_K + n_{B(P)} - 2$ ) i poziomu istotności  $\alpha$ ,

$t_0$  – parametr obliczany ze wzoru

$$t_0 = \frac{|\kappa_{m,K} - \kappa_{m,B(P)}|}{s_0 \sqrt{\frac{1}{n_K} + \frac{1}{n_{B(P)}}}} \quad (3)$$

gdzie:

$\kappa_{m,K}$  – wartość średnia wskaźnika kruchości próbek kostkowych (K), wyznaczana według zależności

$$\kappa_{m,K} = \frac{1}{n_K} \sum_{i=1}^{n_K} \left( \frac{f_{ct,spi,K}}{f_{c,cubei,K}} \right) \quad (4)$$

$\kappa_{m,B(P)}$  – wartość średnia wskaźnika kruchości próbek wyciętych z belki (B) lub płyty (P), obliczana ze wzoru

$$\kappa_{m,B(P)} = \frac{1}{n_{B(P)}} \sum_{i=1}^{n_{B(P)}} \frac{f_{ct,spi,B(P)}}{f_{c,cubei,B(P)}} \quad (5)$$

$n_K$  – liczba wskaźników kruchości próbek kostkowych (K),

$n_{B(P)}$  – liczba wskaźników kruchości próbek kostkowych wyciętych z belki (B) lub płyty (P),

$s_0$  – wartość określana ze wzoru

$$s_0 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_K} \kappa_{i,K}^2 - \kappa_{m,K} \sum_{i=1}^{n_K} \kappa_{i,K} + \sum_{i=1}^{n_{B(P)}} \kappa_{i,B(P)}^2 - \kappa_{m,B(P)} \sum_{i=1}^{n_{B(P)}} \kappa_{i,B(P)}}{n_K + n_{B(P)} - 2}} \quad (6)$$

gdzie:  $\kappa_{i,K}$  –  $i$ -ta wartość wskaźnika kruchości próbki kostkowej (K),

$\kappa_{i,B(P)}$  –  $i$ -ta wartość wskaźnika kruchości próbki wyciętej z belki (B) lub płyty (P).

Wartości wyznaczonych parametrów ( $t_0$  i  $s_0$ ) oraz wartości ( $t_\alpha$ ) rozkładu t-Studenta zestawiono w tablicy 3.

Tablica 3. Ocena rozbieżności średnich wartości wskaźników kruchości

Table 3. Assessment of discrepancy of means values of coefficients of brittleness

Rodzaj betonu	Porównywane próby	$s_0$	$t_0$	$t_\alpha$	Ocena różnic między wartościami średnimi
M	K – B	0,004	4,651	2,034	różnice istotne
	K – F	0,003	2,249	2,032	
S	K – B	0,003	8,782	2,037	różnice nieistotne
	K – P	0,003	1,997	2,034	
D	K – B	0,006	5,281	2,032	różnice istotne
	K – P	0,004	4,224	2,032	
E	K – B	0,006	2,623	2,032	różnice istotne
	K – P	0,004	3,318	2,032	

Na podstawie uzyskanych wyników (tablica 3) można stwierdzić, że różnice pomiędzy wartościami średnimi wskaźnika kruchości próbek kostkowych oraz próbek wyciętych z belek lub płyt – poza jednym wyjątkiem – są statystycznie istotne. W przypadku elementów fibropiaskobetonowych (D) i (E) stwierdzone różnice są spowodowane przede wszystkim wielkością betonowanych elementów próbnych. Efekty brzegowe w postaci koncentracji włókien przy ściankach i dnie formy powodują, iż uzyskanie kompozytu o jednorodnej strukturze uzbrojenia jest praktycznie niemożliwe. Dodatkowo ujawnia się tu wpływ wibrowania mieszanki fibrobetonowej, pod wpływem którego następuje przemieszczanie się włókien w kierunku dna formy oraz obrót do pozycji prostopadłej do kierunku wibrowania, co niewątpliwie należy uwzględnić przy doborze kierunku obciążania elementów próbnych [3].

## 4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

- Względne odchylenie standardowe wskaźnika kruchości wahało się w przedziale od 2% do 10%, co odpowiada bardzo dobrej i dobrej jakości wykonanych elementów próbnych.
- We wszystkich betonach największe wartości wskaźnika uzyskano w przypadku próbek kostkowych (K), a najmniejsze w przypadku próbek sześciennych wyciętych z elementów belkowych (B) – rysunek 3. Wskaźnik kruchości matrycy piaskobetonowej wyniósł średnio około 0,0852. Dodatek superplastyfikatora spowodował – z uwagi na znaczne zwiększenie wytrzymałości na ściskanie – spadek wskaźnika o około 32%, czyli do wartości około 0,0582. Średnia wartość wskaźnika kruchości fibropiaskobetonu z włóknami Dramix wyniosła około 0,0851 i była zbliżona do wskaźnika kruchości matrycy piaskobetonowej. Najwyższą jakość ze względu na kruchość uzyskano w przypadku fibropiaskobetonu z włóknami stalowymi Ekomet (około 0,0946), co zostało spowodowane między innymi długością (50 mm) zastosowanych włókien.
- Analiza wskaźników kruchości elementów kostkowych (K) oraz próbek wyciętych z belek (B) i płyt (P) wykazała, że różnice między nimi są statystycznie istotne. Badając zatem wytrzymałość na rozciąganie fibropiaskobetonu, należy mieć na uwadze zarówno kształt próbki, długość włókien stalowych, jak i kierunek obciążania elementu.

## Bibliografia

- [1] Piątek Z., Staszak I., Domski J.: Ocena wytrzymałości na ściskanie fibropiaskobetonu z włóknami stalowymi. *Przegląd Budowlany*, 9, 2003
- [2] Katzer J., Piątek Z.: Niektóre właściwości fibropiaskobetonów. XLV Konferencja Naukowa KILiW PAN i Komitetu Nauki PZITB, Wrocław – Krynica 1999
- [3] Brandt A. M., Babut R., Kasperkiewicz J., Marks M.: Wybrane zagadnienia mechaniki kompozytów. Politechnika Białostocka 1982
- [4] Jamroży Z.: Drutobeton. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1985
- [5] Instrukcja ITB 194/98 Badania cech mechanicznych betonu na próbkach wykonanych w formach. Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 1998
- [6] Edgington J., Hannant D. J.: Steel fibre reinforced concrete. The effects on fibre orientation of compaction by vibration. *Materiaux et Constructions*, vol. 5/1972
- [7] Neville A. M.: Właściwości betonu. Polski Cement, Kraków 2000
- [8] Bogucka J., Kampioni J., Ścigałło J., Frąszczak P.: Opracowanie naukowo-techniczne dotyczące badania właściwości mechanicznych fibrobetonu z włóknami stalowymi Ekomet, Politechnika Poznańska 1998
- [9] Krywicki W., Bartos J., Dyczka W., Królikowska K., Wasilewski M.: Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna w zadaniach. Część II: Statystyka matematyczna. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999



## INDICATOR OF BRITTLINESS OF FINE AGGREGATE CONCRETE WITH STEEL FIBRES AND THE WAY OF SPECIMENS FORMING

### Summary

This paper presents the influence of specimen geometry and fibre types Dramix (length: 30 mm) and Ekomet (length: 50 mm) influence on fine aggregate concrete indicator of brittleness. Experimental tests were carried out on cubic specimens with dimension of 150 mm side length (Polish Norm) as well as specimens cut out of beam and plate elements.

*Praca wpłynęła do Redakcji 5 VIII 2003*

### **Od Redakcji**

*Na Politechnice Koszalińskiej są prowadzone systematyczne badania cech wytrzymałościowych piaskobetonu zbrojonego włóknami stalowymi. Wyniki badania wytrzymałości takiego tworzywa na próbkach formowanych i wycinanych są zawarte w cytowanej publikacji [1]. Z uwagi na planowane opracowanie nowej, rozszerzonej wersji Instrukcji ITB 194 „Badania cech mechanicznych betonu na próbkach wykonanych w formach” (autor: Lesław Brunarski), w której znalazłyby się procedury oznaczania wskaźników kruchości betonu, Redakcja zwróciła się do Autorów z prośbą o przygotowanie niniejszego artykułu na temat doświadczeń z badań wpływu włókien stalowych oraz wielkości formowanych próbek na wskaźnik kruchości fibropiaskobetonu.*