

## **Odporność na erozję betonów wysokowartościowych w konstrukcjach hydrotechnicznych**

### **Erosion resistance of high performance concrete in hydraulic engineering structures**

#### **1. Wprowadzenie**

W konstrukcjach betonowych zużycie ściernie z udziałem cząstek stałych spotykane jest w wielu przypadkach. W elementach konstrukcji hydrotechnicznych, filarach mostów, nawierzchniach drogowych mamy do czynienia ze zjawiskiem zużycia abrazyjnego. Jest to zużycie ściernie materiału wywołane przez luźne, suche lub zwilżone cząstki, o znacznie większej twardości od ścieranego elementu. Cząstki te są transportowane przez wodę lub powietrze. Zużycie betonu na skutek działania takich zjawisk jak erozja czy kawitacja, w połączeniu z korozyjnym oddziaływaniem środowiska, powoduje ogromne zniszczenia w wyżej wymienionych konstrukcjach.

Proces zużycia ściernego betonu wywołany zjawiskiem erozji jest stosunkowo mało poznany. Mikrostruktura betonu wykazuje specyficzne właściwości, nie mające odpowiednika w innych materiałach, a na przykład w metalach, stąd stworzenie modelu zużycia betonu na skutek abrazyj, nawet z pominięciem wpływu oddziaływania środowiska, jest zagadnieniem bardzo skomplikowanym. Próby modelowania zużycia erozyjnego betonu zwykłego w zależności od jego właściwości mechanicznych przedstawiono w pracach (1-3).

Coraz częściej w naprawianych jak i w nowych konstrukcjach stosowane są betony wysokowartościowe (BWW), które cechuje nie tylko wysoka wytrzymałość na ściskanie (powyżej 60 MPa), ale także zwiększona odporność na destrukcyjne oddziaływanie środowiska (4, 5). Należy tu podkreślić, że obydwie podstawowe cechy BWW (wytrzymałość i trwałość) są zazwyczaj zbieżne, bowiem czynniki, dzięki którym możliwe jest uzyskanie dużych wytrzymałości sprzyjają równocześnie wysokiej trwałości. Jednak nie zawsze zastosowanie pewnego dodatku czy domieszki przy projektowaniu BWW daje nam zwiększoną odporność na środowisko zewnętrzne (6).

W pracy przedstawiono wyniki badań zużycia ściernego sześciu betonów wysokowartościowych wykonane za pomocą tak zwanej metody podwodnej opisanej w ASTM C 1138 (7). Metodę podwod-

#### **1. Introduction**

The abrasive wear by solid particles takes place frequently in concrete constructions. In hydraulic engineering constructions, for example in bridge piers and road pavements the abrasive wear is caused by dry or wet particles of higher hardness than the abraded material. They usually are transported by water or air. The concrete wear caused by the erosion and cavitation with simultaneous corrosive influence of the environment creates very big damages in all above-mentioned constructions.

The abrasive wear of concrete caused by the abrasive erosion is not well understood. The microstructure of the concrete has a special properties which differ significantly for example from metals therefore elaboration of concrete wear model caused by abrasion (even omitting the corrosive influence of the environment) is very complicated. Attempts of modeling the abrasive wear of the ordinary concrete as a function of its mechanical properties were presented in papers (1-3).

In new constructions the high performance concrete (HPC) is frequently used. It has higher compressive strength (over 60 MPa) and higher resistance to the corrosive influence of the environment (4, 5). Both basic properties of HPC (strength and resistance) are usually convergent because low porosity assures high strength of concrete and simultaneously favours high durability. However, not always use of specific agent or admixture in HPC assures its higher resistance to the external medium (6).

This paper presents the results of examinations of abrasive wear of the six types of HPC and a developed mathematical model of abrasion process of these concretes. For the examinations of abrasion of concretes the underwater method ASTM C 1138 was applied (7). The developed mathematical model was compared with experimental results.

ną stosuje się w przypadku badań zużycia betonów narażonych na oddziaływanie erozji lub kawitacji (konstrukcje hydrotechniczne). Przedstawiono matematyczny model zużycia betonu, który zapewnia dobre dopasowanie do danych uzyskanych w przeprowadzonych badaniach.

## 2. Badania zużycia betonów BWW

### 2.1. Materiały

Do badań zużycia zastosowano siedem różnych betonów. Betony wysokowartościowe (HPC 1 – HPC6) wykonano z cementu CEM I 52,5R i kruszywa bazaltowego, o masie właściwej 3050 kg/m<sup>3</sup> i maksymalnym uziarnieniu do 16 mm, z dodatkiem płukanego piasku rzecznoego o maksymalnym uziarnieniu do 2 mm i masie objętościowej 2640 kg/m<sup>3</sup>. We wszystkich mieszankach BWW zastosowano dodatek pyłów krzemionkowych w stałej ilości wynoszącej 10% masy cementu oraz superplastyfikator, którego udział wynosił od 2,0 do 2,2% masy cementu, w celu uzyskania konsystencji plastycznej lub półciekłej. W przypadku dwóch mieszanek (HPC 4 i HPC 5) dodano włókna stalowe ME Fasersysteme dwóch rodzajów: ME 30/50

i ME50/1.00. Natomiast do mieszanki HPC 6 dodano włókna polipropylenowe, fibrylowane, długości 19 mm (Fibermesh Inforce e3). W celu uzyskania możliwości porównania wyników z betonem zwykłym OC, ostatnią mieszankę wykonano z cementu portlandzkiego CEM I 32,5R o wskaźniku w/c=0,5, bez dodatku pyłów krzemionkowych. Skład mieszanek betonowych oraz wybrane właściwości mechaniczne badanych betonów przedstawiono w tabelicy 1.

Tablica 1/ Table 1

SKŁAD MIESZANEK I WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI BETONÓW  
MIXTURES COMPOSITION AND PROPERTIES OF CONCRETE

Rodzaj mieszanki Type of mix	HPC 1	HPC 2	HPC 3	HPC 4	HPC 5	HPC 6	OC
Rodzaj cementu Type of cement	CEM I 52.5R	CEM I 52,5R	CEM I 52.5R	CEM I 52,5R	CEM I 52,5R	CEM I 52,5R	CEM I 32.5R
Cement, kg/m <sup>3</sup> Cement, kg/m <sup>3</sup>	520	450	430	450	450	450	376
Woda, l/m <sup>3</sup> Water, l/m <sup>3</sup>	120	135	150	135	135	135	188
Wskaźnik w/c w/c ratio	0,23	0,30	0,35	0,30	0,30	0,30	0,50
Pyły krzemionkowe, kg/m <sup>3</sup> Silica fume, kg/m <sup>3</sup>	52	45	43	45	45	45	—
Piasek, kg/m <sup>3</sup> Sand, kg/m <sup>3</sup>	650	630	650	630	630	630	680
Bazalt, kg/m <sup>3</sup> Basalt, kg/m <sup>3</sup>	1205	1279	1205	1279	1279	1279	1153
Superplastyfikator, % masy cementu Superplasticizer, % mass of cement	2,2	2,0	2,2	2,0	2,0	2,0	—
Włókna stalowe, kg/m <sup>3</sup> Steel fibers, kg/m <sup>3</sup>	—	—	—	70*	70**	—	—
Włókna PP, kg/m <sup>3</sup> PP fibers, kg/m <sup>3</sup>	—	—	—	—	—	1,8	—
Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength, MPa	120,7	114,3	88,2	91,81	99,34	98,23	51,8
Głębokość ubytku, mm Depth of wear, mm, time of test 120 h	1,69	3,24	5,02	2,89	3,27	4,64	10,62
Ubytek masy, g, czas badania 120 h Mass loss, g, time of test 120 h	316	566	1053	469	574	463	2257
Ubytek masy, %, czas badania 120 h Mass loss, %, time of test 120 h	1,39	2,84	5,02	2,11	2,52	2,10	10,51
* – włókna stalowe ME 30/50 / steel fibers ME30/50, ** – włókna stalowe ME 50/1.00 / steel fibers ME50/1.00							

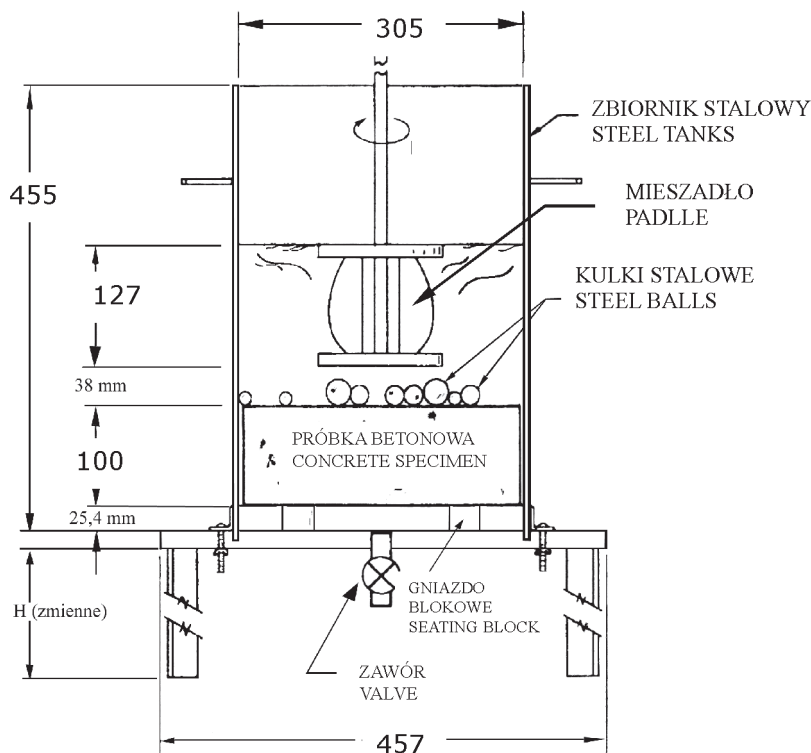
## 2. Examinations of HPC wear

### 2.1. Materials

Seven different mixes were designed. For HPC mixes preparation Portland cement CEM I 52.5R was used and basalt gravel aggregate of 16 mm maximum size and 3050 kg/m<sup>3</sup> specific density and with rinsed river sand of maximum size up to 2 mm and bulk density of 2640 kg/m<sup>3</sup>. To all HPC mixes superplasticizer was added in quantity 2.0÷2.2 % of cement mass. The addition of silica fume was constant, equal 10% of cement mass. Two mixes (HPC 4 and HPC 5) were made using steel fibre ME Fasersysteme type ME 30/50 and ME 50/1.00. The HPC 6 mix was made using the 19 mm polypropylene fibre (Fibermesh Inforce e3). Last mix was an ordinary concrete (OC) prepared with Portland cement CEM I 32.5R without silica fume. The composition of concrete mixes and their selected mechanical properties are shown in Table 1.

### 2.2. Test methods

The abrasive wear examinations of HPC exposed to erosion were conducted according to the ASTM C 1138 method (7). Cylindrical



Rys. 1. Schemat urządzenia badawczego wg ASTM C 1138

Fig. 1. Experimental device according to ASTM C 1138

## 2.2. Metody badań

Badania zużycia ściernego betonów BWW przeprowadzono metodą opisaną w normie ASTM C 1138 (7). W pojemniku badawczym w postaci stalowej rury o średnicy wewnętrznej  $305 \pm 6$  mm i wysokości  $450 \pm 25$  mm ze szczelnie dopasowaną podstawą umieszczano walcowe próbki zwrócone badaną powierzchnią ku górze, o wysokości  $100 \pm 13$  mm i średnicy 300 mm (rysunek 1). Ruch wirowo – obrotowy materiału ściernego na dnie pojemnika zapewnia mieszadło, które wykonuje  $1200 \pm 100$  obr./min. Jako materiał ścierny zastosowano 70 kulek ze stali chromowej o nominalnych średnicach: 0,5", 1" i 1", które po zważeniu umieszczano na powierzchni próbki, po czym pojemnik zalewano wodą do poziomu  $165 \pm 5$  mm. Następnie uruchamiano mieszadło. Całkowity czas doświadczenia wynosił 120 godzin. W stosunku do minimalnego czasu określonego normą ASTM C 1138 czas badania jednej próbki został wydłużony z 48 do 120 godzin. Po każdym cyklu ścierania następowało ważenie próbki, po uprzednim jej oplukaniu i osuszeniu powierzchni.

Straty ścierania odpowiadały stratom masy próbki zmierzonym na końcu każdego przedziału czasowego. Określano również wartość średnią zmniejszenia długości próbki spowodowanej ścieraniem. To zmniejszenie długości wyznaczono na podstawie spadku objętości próbek wyznaczonych za pomocą wagi hydrostatycznej. Pomiary te wykonywano na trzech próbkach z każdej serii. Dojrzewanie próbek betonowych przed rozpoczęciem testu ścierania trwało 28 dni. Do czasu badania wszystkie próbki po rozformowaniu były przechowywane w wodzie. Równocześnie zmierzono wytrzymałość na ściskanie badanych betonów na prób-

specimens of 300mm diameter and  $100 \pm 13$  mm height were placed (examined surface on the top) into a steel tube container of a  $305 \pm 6$  mm diameter and  $450 \pm 25$  mm height (Fig. 1). The chrome steel balls with diameter 0.5", ¾" and 1" were put into rotation with the use of a mixer with  $1200 \pm 1300$  rpm. The balls were weighted and placed on the upper surface of the specimen, then the tube was filled with water to a  $165 \pm 5$  mm level and then after the mixer started to rotate. The whole test duration was 120 hours (the recommended ASTM C 1138 minimal time of the test was 48 hours). After every wear cycle the specimen was taken out, rinsed, its surface was dried and the whole sample was weighted.

The abrasion wear was determined as the weight loss after every test period. The mean thickness of wear layer of the specimen was determined also basing on the loss of the specimen's volume measured with the hydrostatic balance. Three samples of each concrete after 28 days curing in water were used for all measurements. For compressive strength 150 mm cubes of concrete after 28 days curing in water were used.

## 3. Mathematical model

Because of the heterogeneity of concrete microstructure, no parameters of microstructure were introduced to the mathematical model of the wear process. The abrasive wear process can be described by concrete mass loss under the load causing this decrement. To determine the mass decrement of concrete until time  $t$  the mean mass of the particle and the number of concrete particles extracted until the time  $t$  have to be determined first. Sitnik (8) has derived his general model of concrete wear using the experimental tests of the cavitation wear of three materials, namely steel, cast iron and aluminum.

The mass decrement caused by wear was described with the following equation:

$$M(t) = a[\ln(t+1)]^b \quad [1]$$

where:  $a$  and  $b$  are constants,  $t$  - time of load causing wear.

Assuming that the mass loss of concrete after the time  $t$  can be described with the Eq. 1 the velocity of mass decrement of concrete  $V(t)$  can be calculated from the following formula:

$$V(t) = \dot{M}(t) = \frac{d}{dt} M(t) = M'(t) = \{a[\ln(t+1)]^b\}' = \frac{ab}{t+1} [\ln(t+1)]^{b-1} \quad [2]$$

Function [2] reaches its maximum ( $V_{max}$ ) at  $t_e \leftrightarrow \max \dot{M}(t)$ .

At the function's extremum the following condition must be met:

$$\ddot{M}(t) = \frac{ab}{(t+1)^2} \{(b-1)[\ln(t+1)]^{b-2} - [\ln(t+1)]^{b-1}\} = 0,$$

therefore:

kach sześciennych o boku 150 mm. Próbkę po rozformowaniu były przechowywane w tych samych warunkach, to jest w wodzie.

### 3. Model matematyczny

Z uwagi na niejednorodność mikrostruktury materiału jakim jest beton do modelu matematycznego procesu jego zużycia wywołanego ścieraniem nie wprowadzono parametrów związanych z tą mikrostrukturą. Proces zużycia erozyjnego betonu można opisać ubytkiem masy betonu wywołanym działaniem obciążenia powodującego ten ubytek. W celu określenia ubytku masy betonu do chwili  $t$ , należy wyznaczyć średnią masę cząstki oraz liczbę cząstek betonu odspojonych do czasu  $t$ . *Sitnik* (8) wyprowadził ogólny model zużycia betonu w oparciu o badania doświadczalne zużycia kawitacyjnego trzech materiałów, a mianowicie stali, żeliwa i aluminium.

Ubytek masy materiału określił wzorem:

$$M(t) = a[\ln(t+1)]^b \quad [1]$$

gdzie:  $a$  i  $b$  – stałe,  $t$  – czas oddziaływania obciążenia powodującego zużycie materiału.

Przyjmując zatem założenie, że ubytek masy betonu po czasie  $t$  określa wzór [1], prędkość ubytku  $V(t)$  można z kolei wyliczyć ze wzoru:

$$V(t) = \dot{M}(t) = \frac{d}{dt} M(t) = M'(t) = \{a[\ln(t+1)]^b\}' = \frac{ab}{t+1} [\ln(t+1)]^{b-1} \quad [2]$$

Funkcja [2] przyjmuje wartość maksymalną ( $V_{max}$ ) w punkcie  $t_e \leftrightarrow \max \dot{M}(t)$ .

Ekstremum funkcji musi spełniać warunek:

$$\ddot{M}(t) = \frac{ab}{(t+1)^2} \{(b-1)[\ln(t+1)]^{b-2} - [\ln(t+1)]^{b-1}\} = 0,$$

stąd otrzymujemy:

$$t_e = \exp(b-1) - 1, \quad [3]$$

gdzie:  $t_e$  jest czasem potrzebnym do uzyskania maksymalnej prędkości zużycia betonu  $V_{max}$ .

Maksymalna prędkość ubytku masy betonu wynosi zatem:

$$V_{max} = \max \dot{M}(t) = \frac{ab}{t_e + 1} [\ln(t_e + 1)]^{b-1} = ab \left[ \left( \frac{b-1}{e} \right) \right]^{b-1} \quad [4]$$

gdzie  $e = 2,7182\dots$

Model matematyczny procesu abrazyjnego zużycia betonu, w postaci równania [1], można prowadzi do ilościowego rozwiązania wówczas, gdy znane są stałe  $a$  i  $b$ , zwane dalej współczynnikami zużycia. Stałe parametryczne modelu –  $a$  i  $b$  – zwane współczynnikami zużycia, wyznaczono na podstawie wyników doświadczalnych zużycia betonu z całego zbioru danych, które obejmują trzy pomiary dla każdego betonu. Obliczenia wykonano za pomocą programu STATISTICA (9) wykorzystując metodę estymacji Gaussa-Newtona oraz algorytm Levenberga-Marquardta.

$$t_e = \exp(b-1) - 1, \quad [3]$$

where:  $t_e$  is the time needed to reach the maximum velocity of wear  $V_{max}$ .

Thus the maximal velocity of concrete mass decrement is:

$$V_{max} = \max \dot{M}(t) = \frac{ab}{t_e + 1} [\ln(t_e + 1)]^{b-1} = ab \left[ \left( \frac{b-1}{e} \right) \right]^{b-1} \quad [4]$$

where  $e = 2,7182\dots$

As the mathematical model of the abrasive wear the Eq. 1 can be applied when the constants  $a$  and  $b$  (called coefficients of wear) are known. Their value can be determined experimentally from the wear tests of concrete.

The constants  $a$  and  $b$  of the model (coefficients of wear) were determined from the data set that contains three measurements for each concrete. The calculations were made with computer software program STATISTICA (9) using the Gauss-Newton estimation method and Levenberg-Marquardt algorithm.

### 4. The influence of w/c ratio

The influence of w/c ratio on the abrasive wear was evaluated on the basis of the results of tests for three HPC concretes and OC. The coefficients of wear  $a$  and  $b$  were calculated for the mean values of the specimens mass loss in each test period with constant load (constant velocity of the abrasive mixture). Using the Equations 3 and 4 the values of  $t_e$  i  $V_{max}$  were calculated (Table 2). The results of the abrasive wear tests and the model assumptions are presented in Figure 2.

The values of factors  $q$  in function of w/c ratio were described using parameters  $a$  and  $b$  and values of  $t_e$  and  $V_{max}$ :

$$a, b, t_e, V_{max} = q_i \left( \frac{w}{c} \right)^{q_{i+1}} \quad [5]$$

The results are shown in Table 3 and presented on Figure 2.

Taking into consideration the model assumptions (Eq. 1 and Eq. 2) and using the relations shown in Table 3 the wear of concrete  $M(t)$  and the velocity of wear  $V(t)$  can be presented as the function of w/c ratio:

$$M(t) = a[\ln(t+1)]^b = q_1 \left( \frac{w}{c} \right)^{q_2} [\ln(t+1)]^{q_3 \left( \frac{w}{c} \right)^{q_4}}, \quad [6]$$

$$V(t) = \frac{ab}{t+1} [\ln(t+1)]^{b-1} = \frac{q_1 q_3 \left( \frac{w}{c} \right)^{q_2 + q_4}}{t+1} \ln(t+1)^{q_3 \left( \frac{w}{c} \right)^{q_4} - 1}. \quad [7]$$

The characteristic of the abrasive wear of HPC in function of w/c ratio can be presented using the calculated values of factors  $q_i \div q_4$  with Eq. 6 (Fig. 4) and Eq. 7 (Fig.5).

## 4. Wpływ wskaźnika w/c

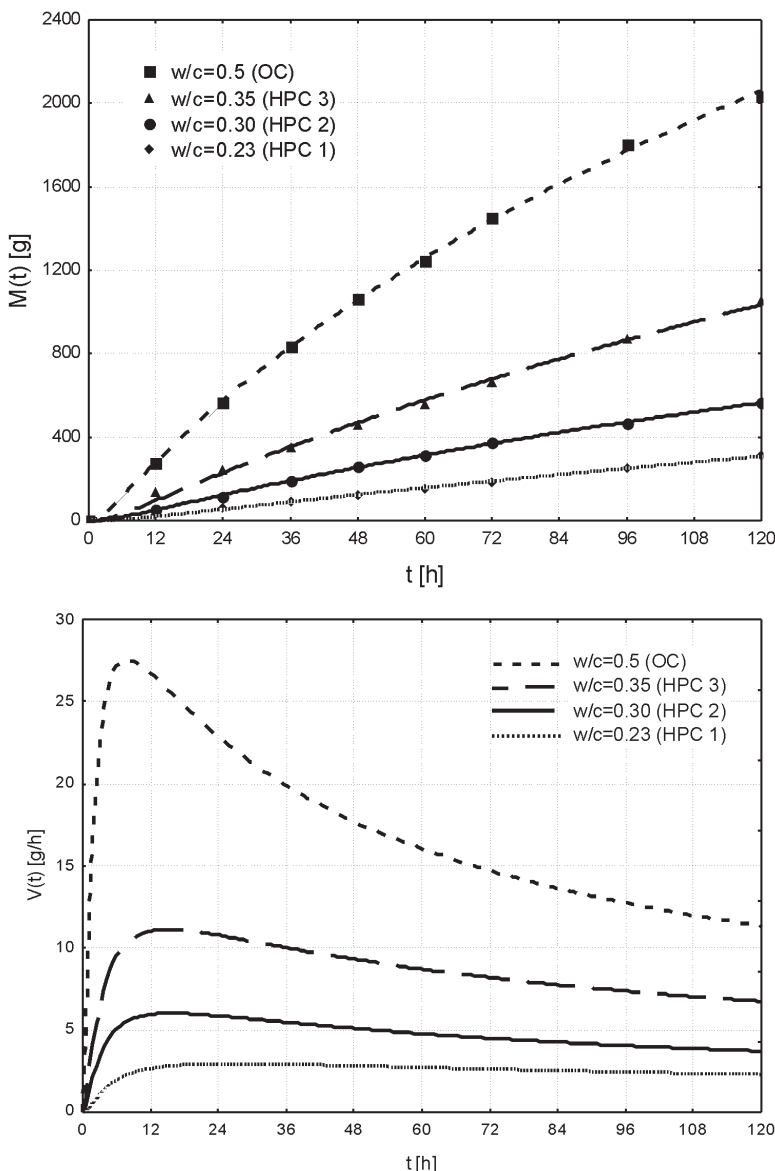
Wpływ wskaźnika w/c na zużycie abrazyjne określono na podstawie doświadczalnych wyników zużycia betonów wysokowartościowych: HPC1-HPC3 i betonu zwykłego (OC). Współczynniki zużycia:  $a$  i  $b$ , obliczono z wartości średnich ubytków masy próbek w poszczególnych przedziałach czasowych, przy stałej wartości obciążenia (stała prędkość mieszanki ściernej). Na podstawie zależności [3] i [4] obliczono wartości  $t_e$  i  $V_{max}$ , dla analizowanych betonów

Tablica 2 / Table 2

WARTOŚCI PARAMETRÓW DO OPISU ŻUŻYCIA BADANYCH BETONÓW BWW PRZY ZMIENNEJ WARTOŚCI WSKAŹNIKA w/c

PARAMETER VALUES FOR HPC WEAR DESCRIPTION WITH VARIABLE w/c RATIO

Parametr Parameter	Wskaźnik w/c w/c ratio			
	w/c=0,23 (HPC 1)	w/c=0,30 (HPC 2)	w/c=0,35 (HPC 3)	w/c=0,5 (OC)
a	0,3553	1,4332	2,7685	13,8264
b	4,3149	3,8138	3,7788	3,1918
$t_e$ , h	26,52	15,57	15,09	7,95
$V_{max}$ , g/h	2,96	6,02	11,12	27,51



Rys. 2. Punkty pomiarowe i krzywe funkcyjne zużycia ściernego betonów BWW o zróżnicowanych wskaźnikach w/c:  $M(t)$  – ubytek masy próbek w czasie,  $V(t)$  – prędkość zużycia próbek

Fig. 2. Experimental points and functions curves of abrasive wear of HPC with various w/c ratio:  $M(t)$  – specimen's mass loss with time,  $V(t)$  – velocity of wear

## 5. The influence of fibres additive

The results of testing of abrasion  $M(t)$  and model calculations of the abrasion rate  $V(t)$  for the HPC fibres modified concretes have been presented on Figure 6. The lowest abrasion resistance has been observed for the concrete HPC 5, modified with fibres of the type ME 50/1.00. The phenomenon of drawing out the fibres from the cement matrix has been clearly visible by macroscopic observations of the surface of the specimens taken out periodically each 12 hours during abrasion cycle. The better abrasion resistance has been found for the concrete HPC 5 with steel fibres of the type ME 30/50. The used steel fibres have been worn together with the cement matrix and have been not drawn out during abrasion.

Abrasion  $M(t)$  and abrasion rate  $V(t)$  was different for the concrete HPC 6 to which polypropylene fibres were added. This concrete has shown the uniform, compact structure, manifested by the quasi-linear progress of abrasion of tested specimens and stabilisation of the abrasion rate  $V(t)$  after reaching the maximum wear velocity at the time equal to  $t_e = 40,2$  h (table 4). The concrete specimens with addition of the polypropylene fibres have demonstrated the highest abrasion resistance already in the initial hours of testing. This is important in the case of the reinforced structures, because provides the better protection against the corrosive environments, particularly in the initial period of the concrete abrasion, when the corrosive action of the environment is the highest.

The observations of the macrostructure of the surface of the tested specimens have also been confirmed in the microstructural investigations of the author, results of which have been presented in earlier paper (10).

From the analysis of model parameters (Table 4 and Figure 4) it is seen that with the decrease of wear resistance of concretes the coefficient  $a$  and maximum of wear velocity  $V_{max}$  are increasing. The model parameters of concrete

WARTOŚCI WSPÓŁCZYNNIKÓW RÓWNAŃ REGRESJI W FUNKCJI WSKAŹNIKA w/c  
 VALUES OF REGRESSION EQUATION FACTORS IN FUNCTION OF W/C RATIO

Współczynnik Coefficient	$a = q_1 \left(\frac{w}{c}\right)^{q_2}$	$b = q_3 \left(\frac{w}{c}\right)^{q_4}$	Współczynnik Coefficient	$t_e = q_5 \left(\frac{w}{c}\right)^{q_6}$	$V_{max} = q_7 \left(\frac{w}{c}\right)^{q_8}$
q <sub>1</sub>	312,59	—	q <sub>5</sub>	2,7353	—
q <sub>2</sub>	4,4987	—	q <sub>6</sub>	-1,5342	—
q <sub>3</sub>	—	2,4836	q <sub>7</sub>	—	188,09
q <sub>4</sub>	—	-0,3418	q <sub>8</sub>	—	2,7677
R	0,9999	0,9858	R	0,9848	0,9983

(tablica 2). Wyniki badań zużycia abrazyjnego betonów oraz założenia modelowe przedstawiono na rysunku 2.

Na podstawie obliczonych wartości parametrów zużycia: *a* i *b*, oraz wielkości *t<sub>e</sub>* i *V<sub>max</sub>*, opisano powyższe wielkości w funkcji wskaźnika w/c:

$$a, b, t_e, V_{max} = q_i \left(\frac{w}{c}\right)^{q_{i+1}} \quad [5]$$

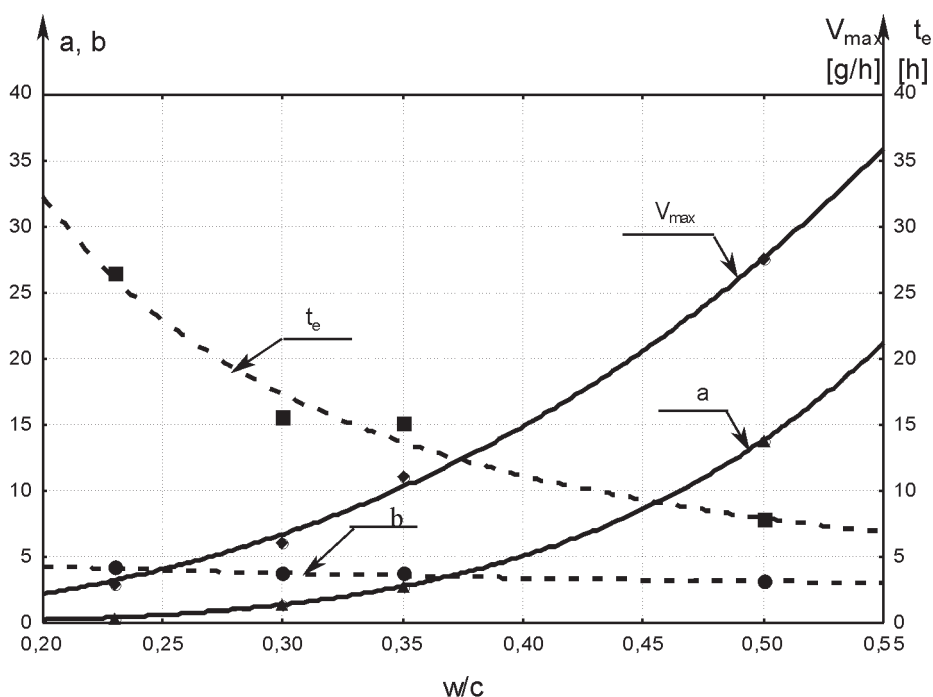
Wyniki obliczeń zamieszczono w tablicy 3 i przedstawiono na rys. 3.

Biorąc pod uwagę założenia modelu (wzory 2 i 3) w oparciu o zależności przedstawione w tablicy 3 zużycie betonu *M(t)* oraz prędkość zużycia *V(t)* można przedstawić w funkcji wskaźnika w/c:

$$M(t) = a[\ln(t+1)]^b = q_1 \left(\frac{w}{c}\right)^{q_2} [\ln(t+1)]^{q_3 \left(\frac{w}{c}\right)^{q_4}}, \quad [6]$$

$$V(t) = \frac{ab}{t+1} [\ln(t+1)]^{b-1} = \frac{q_1 q_3 \left(\frac{w}{c}\right)^{q_2+q_4}}{t+1} \ln(t+1)^{q_3 \left(\frac{w}{c}\right)^{q_4}-1}. \quad [7]$$

Podstawiając do wzorów [6] i [7] obliczone wartości parametrów q<sub>1÷q<sub>4</sub></sub>, można przedstawić charakterystykę zużycia abrazyjnego betonów wysokowartościowych w funkcji wskaźnika w/c (rysunki 4 i 5).



Rys. 3. Parametry modelu matematycznego w funkcji wskaźnika w/c: *a*, *b* – współczynniki modelu, *V<sub>max</sub>* – maksymalna prędkość zużycia, *t<sub>e</sub>* – czas potrzebny do uzyskania maksymalnej prędkości zużycia  
 Fig. 3. Parameters of the mathematical model in function of w/c ratio; *a*, *b* – model's parameters, *V<sub>max</sub>* – maximal velocity of wear, *t<sub>e</sub>* – time needed to reach the maximal velocity of wear

HPC 6 as well as wear velocity *V(t)* have different character than in case of remaining concretes. The progress of wear velocity of concrete HPC 6 reinforced with polypropylene fibres is close to the velocity of concrete HPC 1 wear with w/c = 0.23 (Figure 2).

## 6. Conclusions

The analysis of experimental results shown in Figures 3 + 5 shows that with increase of w/c ratio the abrasive resistance of HPC decreases and this is a non-linear dependence. The progress of wear *V(t)* velocity indicates that increased w/c ratio caused the increase of maximum velocity of wear *V<sub>max</sub>* and the decrease of time of this maximum. Also when the w/c ratio increases - the parameter *a* increases as well and the parameter *b* decreases. The

## 5. Wpływ dodatku włókien

Na rysunku 6 przedstawiono wyniki pomiarów zużycia  $M(t)$  oraz obliczenia modelowe prędkości zużycia  $V(t)$  betonów HPC z dodatkiem włókien. Najmniejszą odporność na zużycie wykazał beton HPC5 zbrojony włóknami ME 50/1.00. Obserwacje makroskopowe powierzchni próbek wyjmowanych cyklicznie co 12 godzin ścierania wykazały ślady wyrywania włókien z matrycy cementowej. Większą odporność na zużycie abrazyjne wykazał beton HPC 5 z dodatkiem włókien stalowych ME 30/50. Zastosowane włókna stalowe ulegały ścieraniu równocześnie z matrycą cementową i nie były z niej wyrywane w trakcie ścierania.

Przebieg zużycia  $M(t)$  i prędkość zużycia  $V(t)$  uzyskane w przypadku betonu HPC 6, który zawierał dodatek włókien polipropylenowych jest odmienny od wyników dotyczących pozostałych betonów. Beton ten cechuje się jednorodną, zwartą strukturą, co przejawia się w quasi-liniowym przebiegu zużycia abrazyjnego badanych próbek oraz stałą prędkością zużycia  $V(t)$ , po osiągnięciu maksymalnej prędkości zużycia, w czasie  $t_e = 40,2$  h. Próbki betonowe z dodatkiem włókien polipropylenowych już w początkowym okresie wykazały najwyższą odporność na ścieranie, co jest ważne w przypadku konstrukcji z betonu zbrojonego, stanowi bowiem lepsze zabezpieczenie przed oddziaływaniem środowiska korozyjnego, szczególnie w początkowym okresie ścierania betonu, w którym jest ono największe.

Obserwacje powierzchni ścieranych próbek znalazły również potwierdzenie w badaniach mikrostukturalnych przeprowadzonych przez autorkę, których wyniki przedstawiono we wcześniejszej pracy (10).

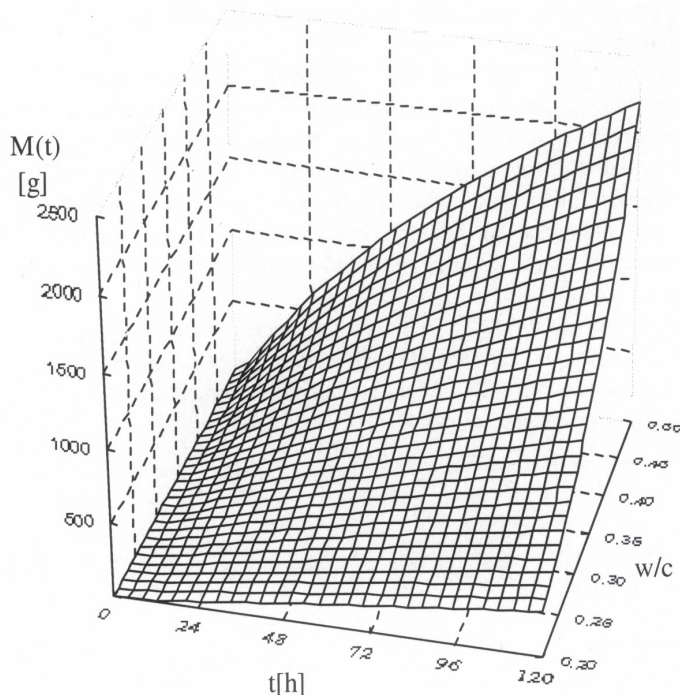
Z analizy wartości parametrów modelu (tablica 4 oraz rysunek 6) wynika, że wraz ze spadkiem odporności badanych betonów na ścieranie rośnie wartość współczynnika  $a$  i wartość maksymalnej prędkości ścierania  $V_{max}$ . Wartości parametrów modelu betonu HPC 6 jak i krzywa prędkości ścierania  $V(t)$ , mają odmienny charakter niż w przypadku pozostałych betonów. Przebieg prędkości ścierania betonu HPC 6 zbrojonego włóknami polipropylenowymi jest zbliżony do prędkości zużycia betonu HPC 1 o wskaźniku  $w/c=0,23$  (rysunek 2).

Tablica 4 / Table 4

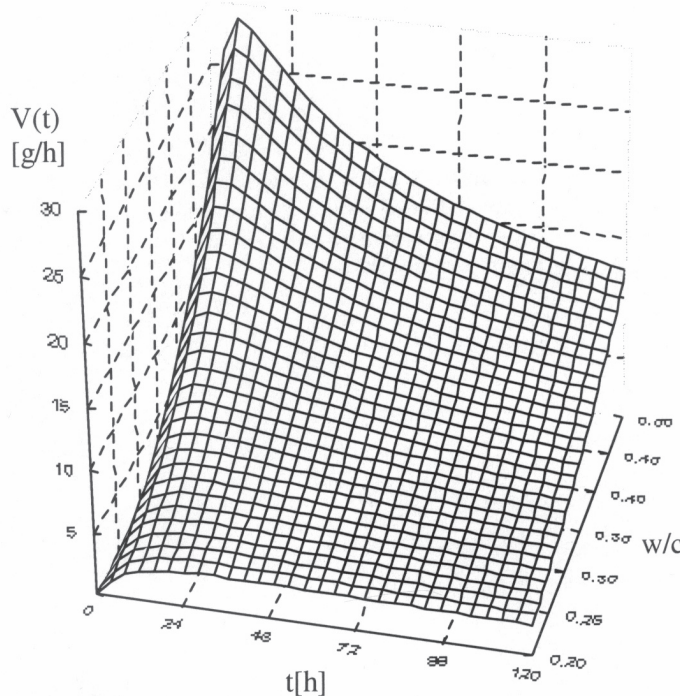
WARTOŚCI PARAMETRÓW DO OPISU ZUŻYCIA BADANYCH BETONÓW BWW MODYFIKOWANYCH DODATKIEM WŁÓKNIEN

PARAMETER VALUES FOR HPC WEAR DESCRIPTION

Parametr Parameter	HPC 2	HPC 4	HPC 5	HPC 6
$a$	1,4332	1,2951	1,4347	0,2821
$b$	3,8138	3,7511	3,8233	4,7195
$t_e$ , h	15,57	14,66	15,83	40,24
$V_{max}$ , g/h	6,02	5,02	6,10	4,27



Rys. 4. Stopień zużycia betonów BWW w funkcji wskaźnika w/c  
Fig. 4. Degree of wear of HPC as the function of w/c ratio



Rys. 5. Prędkość zużycia betonów BWW w funkcji wskaźnika w/c  
Fig. 5. Velocity of wear of HPC in function of w/c ratio

abrasive resistance of HPC depends on the w/c ratio and – thus of the compressive strength.

It has been found out that the level of abrasion resistance of tested HPC concretes was not affected by the addition of steel fibres. This has also been confirmed by other authors (6). The addition of polypropylene fibres influences in positive way the abrasion resistance of tested concretes.

The research has been supported by Grant No. 5 T07E 019 24.

## 6. Podsumowanie

Z analizy wyników doświadczalnych pokazanych na rysunkach 3 ÷ 5 można wyciągnąć wniosek, że w miarę wzrostu wskaźnika w/c odporność betonu BWW na zużycie abrazyjne maleje, jednakże zależność ta nie jest liniowa. Przebieg prędkości ścierania  $V(t)$  wykazuje, że w miarę wzrostu wskaźnika w/c wzrasta maksymalna prędkość zużycia  $V_{max}$ , a czas potrzebny do osiągnięcia maksimum prędkości maleje. Wraz ze wzrostem wskaźnika w/c wzrasta wartość współczynnika  $a$  i maleje wartość współczynnika  $b$ . Odporność na ścieranie betonów BWW zależy od wielkości wskaźnika w/c, a tym samym od wytrzymałości betonu na ściskanie.

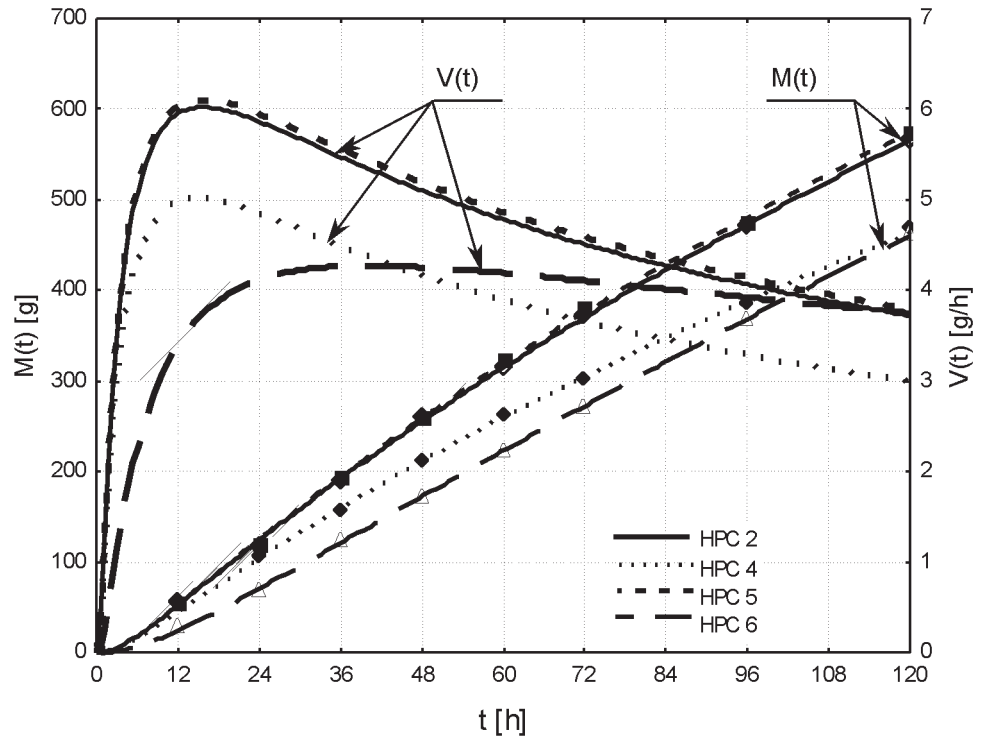
Stwierdzono, że dodatek włókien stalowych nie wpływa na zwiększenie odporności na ścieranie badanych betonów BWW. Potwierdziły to również badania Sonebi i Khayata (6). Dodatek włókien polipropylenowych korzystnie wpływa na zwiększenie odporności na ścieranie badanych betonów

Artykuł opracowano na podstawie badań przeprowadzonych w ramach Projektu Badawczego Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, Nr 5 T07E 019 24

## Literatura / References

1. T. L. Liu, Abrasion resistance of concrete. ACI Mater. Journal, 78. p. 341-350 (1981).
2. A. Bania, Bestimmung des Abriebs und der Erosion von Betonem mittels eines Gesteinsstoff-Wassergemisches. Ph. D. Thesis, TH Wismar (1989).
3. E. Horszczaruk, The model of abrasive wear of concrete in hydraulic structures, Wear, 256, p. 787-796. (2004).
4. J. E. McDonald, Evaluation of materials for repair of erosion damage in hydraulic structures. Proceedings Fifth International Conference CAN-MET/ACI on Durability of Concrete. Spain: Barcelona, SP-192, vol.2, p. 887-898 (2000).

5. T. R. Naik, S. Singh, M. Hossain, Abrasion resistance of high-strength concrete made with class C fly ash, ACI Mater. Journal, 92, p. 649-659 (1995).
6. M. Sonebi, K. H. Khayat, Testing abrasion resistance of high-strength concrete, Cem. Concr. Aggreg., 23, p. 34-43 (2001).
7. ASTM C 1138-97, Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete (Underwater Method). Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, ASTM, West Conshohocken (2002).
8. L. Sitnik, Kinetyka zużycia, PWN, Warszawa (1998).
9. STATISTICA – system reference. StatSoft, Tulsa (2002).
10. E. Horszczaruk, J. Kasperkiewicz, Surface microstructure of high performance concrete submit to abrasive wear, Tribologia, 209, p. 43-55 (2006).



Rys. 6. Wpływ dodatku włókien na przebieg zużycia badanych betonów BWW

Fig. 6. Influence of fibers additive in wear progress of HPC