

Jan MIKOŚ

KSZTAŁTOWANIE STRUKTURY BETONÓW WYSOKIEJ WYTRZYMAŁOŚCI I TRWAŁOŚCI

Streszczenie. W artykule przedstawiono problem przewidywania wytrzymałości i trwałości betonów nowej generacji w funkcji struktury. Określono kinetykę przyrostu wytrzymałości i związku pomiędzy wytrzymałością oraz trwałością betonów wysokiej wytrzymałości BWW a współczynnikiem struktury porowatości ϵ_p .

DESIGN OF THE STRUCTURE OF THE HIGH STRENGTH AND HIGH DURABILITY CONCRETES

Summary. In the paper the problem of prediction of the strength and durability of the new generation of concrete, as a function of its structure, is presented. The kinetics of the strength increase, relations between the strength and durability of high strength concrete BWW and the coefficient of porosity structure are determined.

FORMGEBUNG DER STRUKTUR DER HOCHFESTEN BETONE

Zusammenfassung. Im Artikel wurde das Problem der Festigkeits - Dauerhaftigkeitsprognose dre Betone neuer Generation in einer Strukturfunktion dargestellt. Es wurden Zusammenhänge zwischen der Festigkeit und Dauerhaftigkeit der hochfesten Betone (HSC) und dem Porositätstrukturkoeffizienten ϵ_p bestimmt.

1. WPROWADZENIE

Zainteresowanie betonami o wysokiej wytrzymałości i trwałości na świecie, a ostatnio i w kraju: stale wzrasta. Z inicjatywy Prof. dr hab. inż. Kazimierza Flagi Przewodniczącego Sekcji Konstrukcji Betonowych KILiW PAN ukazało się wiele artykułów w krajowej fachowej prasie budowlanej. Najpierw w Przeglądzie Budowlanym 8-9/92. Nowa generacja betonów wysokowytrzymałościowych (BWW) klas B60-B150 została dobrze zaprezentowana przez wielu profesorów zajmujących się betonami w różnych aspektach. Zawarto w tych artykułach duży ładunek wiedzy o tych betonach, o projektowaniu z nich konstrukcji żelbetowych i wstępnie sprężonych, a nawet o aspektach ekonomicznych.

Znane są zagraniczne i krajowe „epidemie niszczenia nawierzchni drogowych i innych konstrukcji inżynierskich pracujących w trudnych warunkach klimatycznych”.

Stąd potrzebne są duże nakłady na naprawy. Na przykład koszt doprowadzenia do stanu wymaganej trwałości konstrukcji z betonu w Stanach Zjednoczonych szacuje się na kwotę około 200 mld dolarów [1].

Problem przewidywania wytrzymałości i trwałości betonów nowej generacji jest jednak jeszcze otwarty. Celem przedmiotowego artykułu jest określenie związków pomiędzy strukturą a wytrzymałością i trwałością BWW.

Dla betonów zwykłych zależności te ustalił autor jeszcze w latach 70 w pracy „Związki fizyczne struktury porowatości z cechami betonu” [4], o technologii wytwarzania betonów BWW autor wypowiadał się w Przeglądzie Budowlanym 8-9/92 [7].

W niniejszym artykule autor pragnie korzystając z dotychczasowych własnych i obcych prac ukazać związki pomiędzy strukturą a kształtowaniem wysokiej wytrzymałości i trwałości betonów.

2. STRUKTURA MATERIAŁU I JEJ KSZTAŁTOWANIE W UJĘCIU INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ

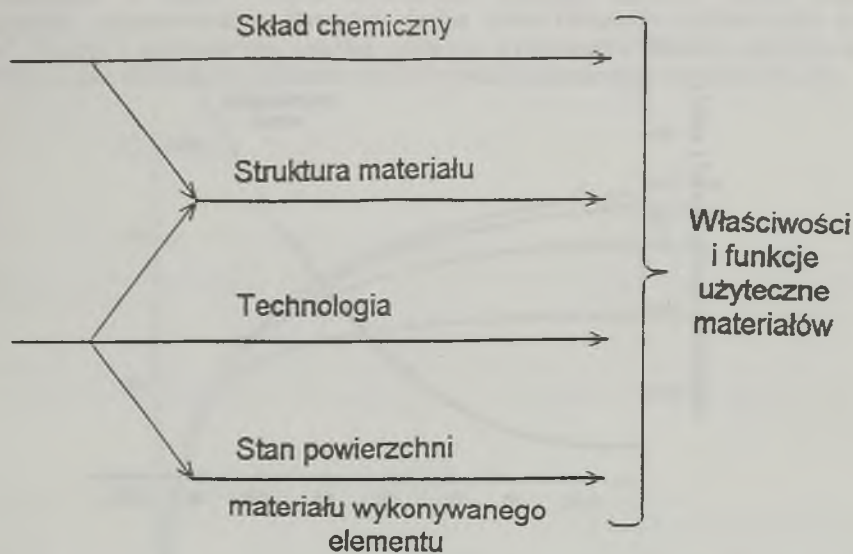
Głównymi czynnikami determinującymi właściwości materiałów są skład chemiczny (cząsteczkowy) i technologia oddziałująca bezpośrednio i pośrednio poprzez strukturę, a w określonych przypadkach również przez fizykochemiczny stan powierzchni.

Analiza i określenie związków i zależności w ciągu przyczynowo-skutkowym: skład chemiczny - technologia - struktura i stan powierzchni - funkcje i ich cechy użyteczne materiału stanowią istotę dyscypliny naukowej określanej dzisiaj jako „nauka o materiałach i inżynieria materiałowa”. Szczególnie ważnym ogniwem jest tutaj szeroko pojęta struktura materiału jako czynnik o bardzo szerokim zakresie możliwych zmian i modyfikacji. Istotne znaczenie ma fakt, że sterowanie właściwościami materiału poprzez strukturę jest na ogół bardziej ekonomiczne aniżeli na drodze zmiany składu chemicznego [3].

Kształtowanie struktury materiału poprzez dobór jego składu chemicznego i technologii może odbywać się na 4 poziomach, biorąc pod uwagę wielkość elementu wewnętrznej budowy. Są to:

- makrostruktura,
- mikrostruktura opisująca morfologię - kształt, wielkość i rozmieszczenie ziarn faz i składników strukturalnych,
- substruktura, tj. wewnętrzna budowa, w tym przede wszystkim zdefektowanie ziarn poszczególnych faz składających się na mikrostrukturę,
- struktura krystaliczna lub molekularna.

Poznanie współzależności i wzajemnego oddziaływania na siebie składu chemicznego, technologii i struktury materiału oraz ich wpływ na właściwości stwarza podstawy do projektowania materiałów o z góry założonych, pożądanych właściwościach i cechach użytkowych. Daje to konstruktorowi nowe nieosiągalne dotąd możliwości twórcze w zakresie realizacji określonych koncepcji (rys.1). Ta możliwość będąca dorobkiem 2 ostatnich dekad nie jest jeszcze w pełni wykorzystana.



Rys. 1. Czynniki wpływające na właściwości materiałów [3]

Fig. 1. Factors having influence on the properties of materials [3]

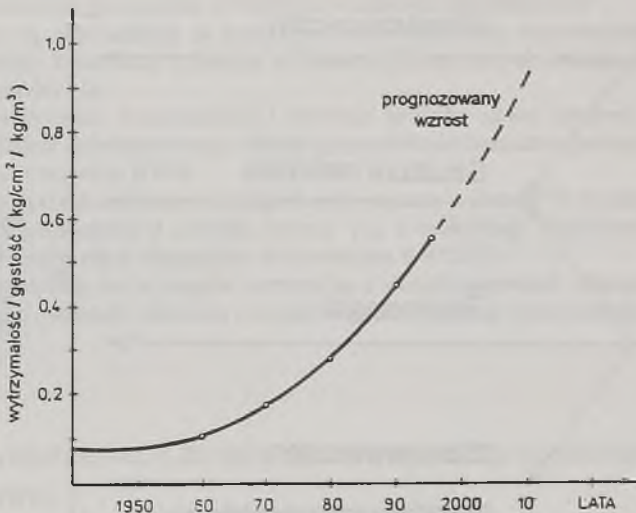
Wśród materiałów, które bez wątpienia można zaliczyć do nowej generacji, szczególnie intensywnie w ostatnich dekadach rozwijają się dwie ich grupy:

- tworzywa na elementy i urządzenia pracujące w warunkach ekstremalnych i złożonych obciążeń mechanicznych, chemicznych, cieplnych i radiacyjnych,
- tworzywa o szczególnych właściwościach fizycznych i fizykochemicznych określone ogólnie jako materiały funkcjonalne.

W pierwszej grupie osiągnięto ponad dziesięciokrotny wzrost stosunku wytrzymałości do gęstości oraz znaczący wzrost odporności chemicznej, cieplnej i radiacyjnej.

Osiągnięcia w tworzywach cementowych, choć ostatnio też duże, są znacznie mniejsze niż w metalach, ceramice czy polimerach. Największe osiągnięcia w nowoczesnych tworzywach uzyskano przez łączenie wymienionych grup jako kompozyty. Ich właściwości są funkcją procentowego udziału materiałów wyjściowych oraz geometrycznych cech wewnętrznej budowy.

Na rys. 2 pokazano rozwój tworzyw cementowych mierzony stosunkiem ich wytrzymałości do gęstości. Stosunek ten dla tworzyw cementowych prasowanych pod wysokim ciśnieniem i w wysokich temperaturach dla uzyskanych wytrzymałości od 300 do 500 MPa [5] wynosi od 10 do 20 razy. Problem jednak w tym, aby uzyskać wzrost wytrzymałości do gęstości w warunkach budowy i kosztem mniejszym niż jego wzrost.



Rys. 2. Rozwój tworzyw cementowych mierzony stosunkiem ich wytrzymałości do gęstości
Fig. 2. Progress in cement-based materials presented as a ratio of their strength to the bulk density

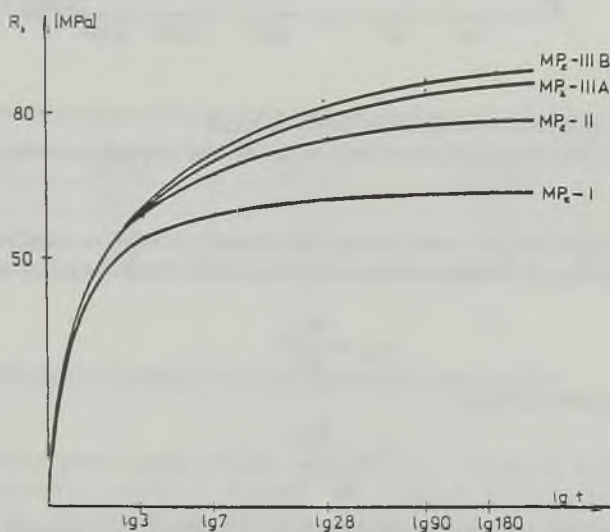
3. KINETYKA PRZYROSTU WYSOKIEJ WYTRZYMAŁOŚCI TWORZYW CEMENTOWYCH W CZASIE

Przyrost wytrzymałości w czasie zależy od stopnia hydratacji cementu w czasie, czyli stopnia jego twardnienia. Ten zaś zależy od szeregu czynników, tj. :

- składu fazowego C_3S/C_2S i budowy sieci przestrzennej klinkieru,

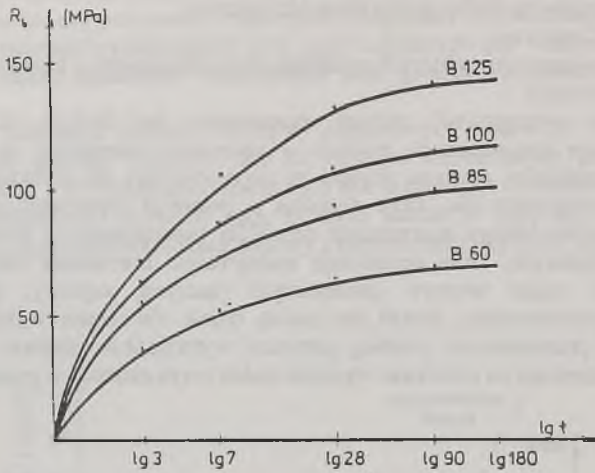
- stopnia rozdrobnienia cementu,
- obecności dodatków przyśpieszających twardnienie,
- obecności dodatków modyfikujących własności zaczynu,
- wskaźnika W/C zaczynu,
- temperatury i wilgotności, w których przebiega proces uwodnienia i twardnienia,
- sposobu zagęszczania.

Przyjmując, że wytrzymałość zaczynu cementowego jest funkcją składu, struktury, wytrzymałości jego krystalicznego szkieletu i szczelności mieszanki, to optymalizacja wymienionych czynników powinna polegać na doprowadzeniu do szybkiego zwiększenia udziału tych uwodnionych faz, które decydują o poziomie wytrzymałości, a także do stworzenia warunków takiego zagęszczania żelu CSH powstającego w procesie hydrolizy krzemianów wapniowych, które ograniczają maksymalnie porowatość zaczynu. Przyrost wytrzymałości w czasie tworzyw cementowych (zaczynu, zaprawy, betonu) można wyznaczyć eksperymentalnie. Proces ten można opisać równaniem wykładniczym typu $y=e^{-k}$. Na rys. 3 przedstawiono przebieg przyrostu wytrzymałości zaprawy cementowej i BWW w czasie określony na podstawie wyników badań przytoczonych w pracach [4], [5].



Rys. 3. Kinetyka przyrostu wytrzymałości w czasie zapraw wykonanych na cementach specjalnych

Fig. 3. Kinetics of the strength increase for mortars with special cement



Rys. 4. Kinetyka przyrostu wytrzymałości BWW w czasie

Fig. 4. Kinetics of the strength increase for increase for high strength concretes

Przyrost wytrzymałości w czasie zależy od stopnia hydratacji α określany stosunkiem wody związanej $W_{z(t)}$ w badanym czasie do pełnej ilości wody związanej przy całkowitej hydratacji W_{zc} .

$$\alpha_{Wz} = \frac{W_{z(t)}}{W_{zc}} \quad (1)$$

lub stosunkiem ciepła hydratacji

$$\alpha_{ch} = \frac{Q_{w(t)}}{Q_{wc}} \quad (2)$$

α można też opisać równaniem wykładniczym eksperymentalnym dla cementu marki „45”

$$\alpha_{(t)} = e^{-k} \quad (3)$$

gdzie k - wartość doświadczalna

$$k = \frac{-at - b}{t \cdot (1 + c)} \quad (4)$$

gdzie t - czas, a , b i c - wartości doświadczalne zawarte w tabl. 1

Wartości doświadczalne a , b i c

Tablica 1

	Cement „45”					
	Zaczyn			Zaprawa		
	a	b	c	a	b	c
Wartości doświadczalne	-22,1	53,0	3,63	-24,4	62,1	4,25

Dla cementów specjalnych α ma postać określoną równaniem wykładniczym typu

$$\alpha_{(t)} = e^{\frac{-a}{t+b}} e^{-c} \quad (5)$$

Wartości parametrów a , b i c dla kilku przykładowych takich cementów specjalnych przedstawiono w tabl. 2.

Wartości parametrów a , b i c dla wybranych cementów specjalnych.

Tablica 2

Wartości param.	MPz-I	MPz-II	MPz-III A	MPz-III B
a	0,81	1,13	1,85	1,95
b	1,78	0,86	1,83	1,62
c	14,6	14,6	14,6	14,6

4. PROGNOZOWANIE WYSOKIEJ WYTRZYMAŁOŚCI BETONÓW

Zaproponowany przez autora artykułu w pracy [4,5] uogólniony sposób określania właściwości zaczynów, zapraw i betonów dla średnich wytrzymałości może być wykorzystany do prognozowania wysokiej wytrzymałości i trwałości w funkcji współczynnika porowatości ε_p i wytrzymałości więzi międzycząsteczkowej wraz z jej defektami R_0 , tj. wytrzymałości maksymalnej, którą uzyskujemy przy $\varepsilon_p = 1$.

Wytrzymałość tworzywa cementowego w dowolnym czasie określamy ze wzoru (6).

$$R_{\mu(t)} = R_0 \cdot \varepsilon_{\mu(t)} \quad (6)$$

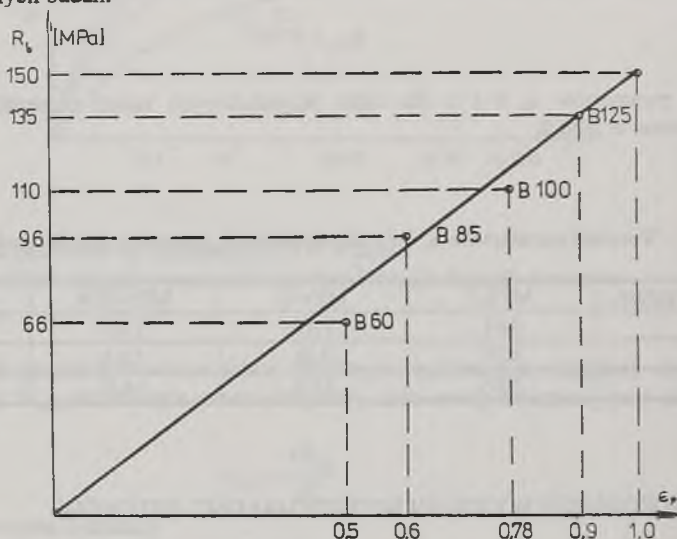
Jeżeli dla $\varepsilon_{p(t)}$ wstawimy wartości określone na podstawie stosunku objętości porowatości molekularnej V_{p2} do całkowitej porowatości V_c jako sumy porowatości w mieszance betonowej V_{p0} , porowatości kapilarnej V_{p1} i porowatości molekularnej (żelowej) V_{p2} (7).

$$\varepsilon_{pt} = \frac{V_{p2}}{V_{p0} + V_{p1} + V_{p2}} \quad (7)$$

W przypadku średnich obliczeniowych wartości ε_{pt}^0 [4,5] otrzymamy wzór na przewidywanie wytrzymałości betonu, w tym też dla BWW.

$$R_n = \frac{0,28 \cdot \alpha}{\frac{V_{pw}}{C} + \frac{W}{C} - 0,22 \cdot \alpha} \quad (8)$$

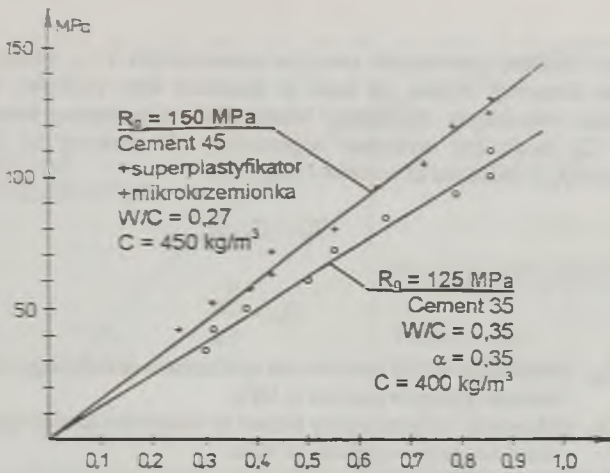
Na rys.5 przedstawiono zależność wytrzymałości betonów w funkcji ε_p opracowaną na podstawie własnych badań.



Rys. 5. Zależność wytrzymałości betonu w funkcji ε_p

Fig. 5. Concrete strength as a function of the ε_p

Podane w pracy [11] w tabl. 3-11 dane dotyczące mieszanek i betonów wysokiej wytrzymałości posłużyły do obliczenia ε_p . Rezultaty obliczeń przedstawiono na rys. 6.

Rys. 6. Zależność wysokiej wytrzymałości betonów od ϵ_p Fig. 6. Dependence of high strength concretes on the ϵ_p

Na podstawie własnych prac i badań oraz przytoczonych wyników obliczeń innych osób zajmujących się tymi zjawiskami [11] stwierdzam, że proponowane przez autora około 50 lat temu wzory do określania właściwości tworzyw betonowych w funkcji ϵ_p mogą być stosowane do przewidywania właściwości betonów wysokiej wytrzymałości.

5. ZWIĄZKI TRWAŁOŚCI TWORZYW CEMENTOWYCH Z ϵ_p

Związki trwałości tworzyw cementowych ze współczynnikiem struktury porowatości ϵ_p zarysował autor tego artykułu w pracy [4] jeszcze w latach 70. Wówczas zwrócono uwagę tylko na trwałość mrozową. Wskaźnik mrozoodporności betonu a_m określono jako stosunek liczby cykli zamrażania M_z do współczynnika porowatości ϵ_p [4] i wyrażono wzorem (9):

$$a_m = \frac{M_z}{\epsilon_p} \quad (9)$$

Wskaźnik mrozoodporności betonu a_m wyraża liczbowo wytrzymałość betonu w MPa przy $\epsilon_p=1$ po określonej liczbie cykli zamrażania np. 250. Stwierdzono wówczas, że betony zwykłe charakteryzujące się współczynnikiem ϵ_p powyżej 0,4 są mrozoodporne, tzn. nie stwierdza się większego niż 30% spadku wytrzymałości po 250 cyklach zamrażania.

Obecnie po kilkunastu latach powrócono do tej ważnej problematyki i spróbowano ją poszerzyć, uogólnić i polepszyć badaniami na zbudowanym specjalnie do tego celu stanowisku badawczym.

Odporność struktury porowatych tworzyw cementowych z ϵ_p można wyrazić w różny sposób. Efekt destrukcji wyraża się bądź to spadkiem wytrzymałości, bądź też spadkiem masy w czasie wyrażanym najczęściej liczbą cykli. Uogólniona trwałość tworzyw np. betonowych T_{Bi} może być wyrażona odpornością ich struktury na działanie czynnika destrukcyjnego O_{Bi} i obliczona ze wzorów (10) i (11):

$$T_{Bi} = O_{Bi} \cdot \epsilon_{pi} \quad (10)$$

stąd

$$O_{Bi} = \frac{T_{Bi}}{\epsilon_{pi}} \quad (11)$$

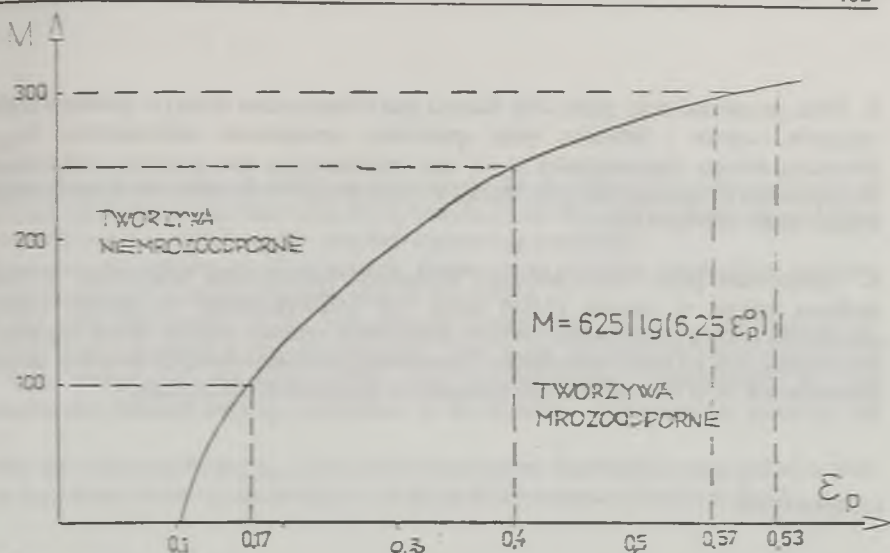
gdzie: T_{Bi} - trwałość tworzyw betonowych na działanie określonego czynnika destrukcyjnego wyrażona w MPa,
 O_{Bi} - odporność mikrostruktury betonu na działanie określonego czynnika destrukcyjnego wyrażona w MPa,
 T_{B1} - mrozoodporność,
 T_{B2} - odporność na naprzemienne działanie deszczu, mrozu i słońca,
 T_{B3} - kwasoodporność,
 T_{B4} - odporność na działanie wody morskiej,
 T_{B5} - odporność na działanie soli,
 T_{bn} - odporność na działanie n-tego czynnika destrukcyjnego,
 ϵ_p - współczynnik struktury porowatości betonu (może być obliczeniowy ϵ_{p0} lub określony na drodze badań ϵ_{pb}).

Próbki poddane badaniom przyspieszonego starzenia uległy częściowemu lub nawet w kilku przypadkach pełnemu zniszczeniu, po określonej liczbie cykli.

Na wykresie (rys.7) przedstawiono zależność pomiędzy liczbą cykli a obliczeniowymi współczynnikami struktury porowatości ϵ_p^0 . Jej przebieg został opracowany na podstawie pomierzonej liczby cykli wywołujących destrukcję oraz odpowiadających im stopni przebudowy struktury wyrażonych współczynnikiem ϵ_p^0 . Funkcję określono matematycznie jako krzywą logarymiczną typu:

$$M = 625 \left[\lg(6,25 \cdot \epsilon_p^0) \right] \quad (12)$$

Krzywą odporności na naprzemienne działanie czynników (deszczu, mrozu i słońca) obrazuje rys.7. Krzywa logarymiczna jest określona dla składów z mikrokrzemionką I i bez niej 2 dla współczynnika obliczeniowego ϵ_p^0 .



Rys. 7. Krzywa mrozoodporności tworzyw cementowych dla obliczeniowego współczynnika porowatości

Fig. 7. Frost resistance curve of cement based materials for the computational coefficient of porosity

5. WNIOSKI

1. Wytrzymałość i trwałość betonów wysokiej wytrzymałości zależy od ukształtowania ich mikro- i makrostruktury.
2. Prognozowanie wysokiej wytrzymałości i trwałości betonów można oprzeć na opracowanych przez autora w latach 70 związkach fizycznych pomiędzy właściwościami a czynnikami mikrostruktury R_0 i makrostruktury ε_p .
3. Najskuteczniejszym działaniem technologicznym jest stałe i równoczesne zmniejszanie defektów mikrostruktury (R_0) i mikrostruktury (ε_p). Zwiększenie wytrzymałości i trwałości, choć ostatnio jest istotne, to potencjalne możliwości są jeszcze bardzo duże. Należy tylko stale zmniejszać W/C, porowatość kapilarną, porowatość świeżej mieszanki, oraz zwiększać stopień hydratacji. W Danii znany jest produkt pod nazwą Densit [2,10] będący zaczynem z cementu DSP zagęszczonym przez równomiernie rozmieszczone drobnitkie cząstki. Materiały z DSP mają wytrzymałość na ściskanie 350–400 MPa, a moduł sprężystości 80 GPa. Prasowane zaś na gorąco zaprawy cementowe uzyskują pod wysokim ciśnieniem wytrzymałość nawet do 510 MPa [4,5].

4. Dużą przyszłość mają przed sobą badania nad kompozytami tworzyw produkowanych z zaczynów, zapraw i betonów, które spowodują wzmocnienie mikrostruktury R_{0max} i zlikwidują defekty makrostruktury ($\epsilon_p=1$) oraz zminimalizują czas przemian strukturalnych. Wytrzymałość na zginanie zaczynów modyfikowanych MDF i wyciskanych lub prasowanych wynosi około 100-1500 MPa.

5. Opracowane przez autora podstawy teoretyczne kształtowania właściwości w funkcji struktury betonu w pracach [4,5,6] mogą być wykorzystywane w procesie dalszych poszukiwań poprawy właściwości tworzyw betonowych zarówno z braku innych uogólnień w tym zakresie, jak też dużej użyteczności opracowanej teorii kształtowania struktury tworzyw cementowych, co w pewnym zakresie pokazano w przedmiotowym artykule.

LITERATURA

- [1] Flaga K, Mierzwa J: Betony o dużej trwałości i wysokiej wytrzymałości (HSC) jako realizacja nowej materiałowo-technologicznej koncepcji kompozytu konstrukcyjnego. Przegląd Budowlany -9/92.
- [2] Kurdowski W: Chemia cementu. PWN, Warszawa 1991.
- [3] Maciejny A: Materiały nowej generacji-kierunki rozwoju i zastosowanie. Politechnika Śląska w Gliwicach 1994 r.
- [4] Mikoś J: Związki fizyczne struktury porowatości z cechami betonu cementowego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Nr 618. Gliwice 1979.
- [5] Mikoś J: Wytrzymałość betonu w funkcji współczynnika struktury porowatości. Archiwum Inżynierii Lądowej. Tom XXXI. Z. 1-2/85.
- [6] Mikoś J: Wybrane zagadnienia technologii prefabrykacji. PWN, Warszawa 1987.
- [7] Mikoś j: Technologia betonów wysokiej wytrzymałości. Przegląd Budowlany 8-9/1992.
- [8] Neville A M: Właściwości betonu. Arkady, Warszawa 1977.
- [9] Neville A M, Brooks J J: Concrete Technology, Logman Scientific , England 1987.
- [10] Peukert S: Teoretyczne i praktyczne podstawy kształtowania wysokich wytrzymałości cementów. Cement Wapno Gips 1/95.
- [11] Piasta J, Piasta W. G: Beton zwykły. Arkady, Warszawa 1994.

Recenzent: Prof. zw. dr hab. inż. Jerzy Piasta

Wpłynęło do Redakcji 20.05.1995r.

Abstract

In the paper the problem of predicting the strength and durability of the new generation of concrete is presented. At the beginning the influences of the material structure and modelling its properties are discussed from the materials engineering standpoint.

Properties and performance of the material depend on its chemical composition, structure, technology of creation of this structure, state of the surface.

In the paper the kinetics of the high strength cementbased materials, described by the equations of the exponential type, is presented. Then, some formulas for the prognostics of the high strength of concretes which have microstructure characteristics R_0 and macrostructure characteristics ϵ_{pt} (coefficient of the structure of the concrete porosity), are given.

With use of the coefficient ϵ_{pt} a formula for the concrete durability is proposed in in form of the logarithmic curve. As an example a curve for first resistance is shown in fig. 7.