

ANDRZEJ M. BRANDT¹⁾

STRUKTURY MATERIAŁÓW KOMPOZYTOWYCH O CEMENTOWEJ MATRYCY²⁾

STRESZCZENIE. Określenie "struktura materiału" obejmuje opis rozmieszczenia wyodrębnionych elementów składowych budowy wewnętrznej materiału oraz występujących między nimi wzajemnych relacji, które są istotne dla całej struktury. Opis struktury materiału jest uzupełniany danymi o własnościach jej składników.

Opis struktury może być oparty albo na założeniach teoretycznych albo na analizie rzeczywistej struktury. W wielu przypadkach trzeba stosować oba podejścia, uwzględniając różnice między idealnymi modelami, a lokalnymi rozrzutami i defektami. Jednorodność materiału jest często zakładana jako przybliżenie, ale przy rozpatrywaniu rozmiarów elementów strukturalnych na niższym poziomie wymiarowym niejednorodność staje się oczywista. Jeżeli modele materiału są budowane na różnych poziomach, to z reguły modele na danym poziomie są tworzone na podstawie wyników uzyskanych na niższym poziomie. Wszystkie kompozyty, także betony, są z definicji materiałami niejednorodnymi.

Nie ma jednej i powszechnie przyjętej klasyfikacji kompozytów według ich struktury. Kompozyty używane w konstrukcjach budowlanych można rozmaicie opisywać według rodzaju matrycy, to jest fazy ciągłej, i według rodzaju inkluzji, które są rozmieszczone w matrycy. Zwykle struktury inkluzji służą do wzmocnienia matrycy (wzmocnienia ziarnami lub włóknami), ale również inkluzje o niskiej wytrzymałości są używane, aby zmienić takie właściwości matrycy jak izolacyjność lub ciężar objętościowy.

¹⁾ prof. dr hab. inż. (em.) – Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa

²⁾ praca oparta na referacie przedstawionym podczas International Workshop on Structural Image Analysis in Investigation of Concrete w dniach 21-23 października 2002 r. w IPPT PAN w Warszawie i opublikowanym w języku angielskim w materiałach wydanych przez Centre of Excellence for Advanced Materials and Structures (AMAS) [1]

Głównym celem analizy struktury stwardniałego betonu różnymi metodami jest wykrycie i opisanie uszkodzeń. Taka analiza pozwala na ocenę jak poważne i niebezpieczne są uszkodzenia ze względu na wytrzymałość i użyteczność konstrukcji betonowej. Można również określić źródło i przyczyny powstania uszkodzeń struktury.

W artykule przedstawiono przegląd struktur, występujących w kompozytach o matrycach cementowych. Właściwości użytkowe tych materiałów są określone przez ich struktury. Analiza struktur na różnych poziomach rozmiarów jest podstawową metodą zapewnienia i kontroli jakości w konstrukcjach budowlanych, wykonanych z betonów i betonów wysokowartościowych.

1. WSTĘP

Określenie "struktura materiału" obejmuje opis rozmieszczenia wyodrębnionych elementów składowych budowy wewnętrznej materiału oraz występujących między nimi wzajemnych relacji, które są istotne dla całej struktury. Opis struktury materiału jest uzupełniany danymi o własnościach jej składników.

Opis struktury materiału może być oparty na założeniu struktury idealnej albo na analizie struktury rzeczywistej. W większości przypadków spotkać można oba ujęcia i uwzględniane są częściowo wynikające z nich rezultaty. Wyniki uzyskane z tych odmiennych ujęć są różne, i to w takiej mierze, w jakiej idealny model różni się od materiału rzeczywistego.

Jednorodność materiału jest często zakładana jako przybliżenie odpowiednie na określonym poziomie badanych rozmiarów, ale jeżeli materiał jest rozpatrywany na odpowiednio niższym poziomie, to niejednorodność staje się oczywista. Przy tworzeniu modeli materiału na różnych poziomach rozmiarów uwzględnianych elementów takie modele są wzajemnie zależne w sposób systematyczny; to znaczy, że modele na danym poziomie są tworzone na podstawie wyników uzyskanych na niższym poziomie. Warto zauważyć, że wszystkie materiały kompozytowe, także materiały betonopodobne, są z definicji materiałami niejednorodnymi.

Kompozyty można rozmaicie klasyfikować według ich struktury. Materiały kompozytowe używane w budownictwie można opisać według rodzaju matrycy, jako fazy ciągłej, i według własności inkluzji, które są rozmieszczone w matrycy. Zwykle inkluzje tworzą strukturę, która wzmacnia matrycę, ale stosowane są także inkluzje o niewielkiej wytrzymałości, mające na celu na przykład poprawienie izolacji termicznej, obniżenie ciężaru, czy zmniejszenie kosztu. Specjalne wypełniacze mogą poprawić odporność na ścieranie lub wytrzymałość w wysokiej temperaturze, wywołanej pożarem.

Kompozyty można klasyfikować według ich wewnętrznej struktury oraz rodzaju i sposobu rozmieszczenia inkluzji w matrycy, np.:

- kompozyty z fazą rozproszoną w postaci bardzo drobnych ziaren (10 nm – 100 μm),
- kompozyty ziarniste o dużych rozproszonych ziarnach (100 μm – 50 mm),

- kompozyty włókniste z włóknami z różnych materiałów i o rozmaitych kształtach,
- kompozyty warstwowe, zbudowane z warstw różnych materiałów, ułożonych w określony sposób.

Zależności między strukturą a własnościami materiału określają, w jaki sposób zmiana jakiegoś parametru struktury materiału wpływa na te własności. Okazuje się, że większość ważnych własności materiałów zależy od ich struktury, a ich wartości zmieniają się znacznie wraz ze zmiennością struktury. Są to tak zwane własności zależne od struktury, jak np. wytrzymałość, moduł Younga, przepuszczalność, itd. Wśród własności niezależnych od struktury można wymienić gęstość; tylko w przypadku takich własności tak zwane prawo mieszanin jest słuszne. W zastosowaniu do innych własności, prawo mieszanin jest tylko przybliżeniem, które jest jednak często używane przy zastosowaniu odpowiednich współczynników poprawkowych.

Zrozumienie zależności między strukturą a własnościami materiału jest podstawowym zagadnieniem inżynierii materiałowej. Innym ważnym zadaniem jest projektowanie materiałów, tzn. dobranie składników o odpowiednich własnościach, określenie właściwych ich proporcji objętościowych lub masowych, racjonalne rozmieszczenie w przestrzeni i zapewnienie odpowiednich wzajemnych relacji, np. oddziaływania chemicznego lub mechanicznej przyczepności.

W przedstawionym tu przeglądzie opisano podstawowe struktury materiałów kompozytowych o matrycach cementowych. Analiza struktury dojrzałego betonu jest podstawowym elementem sprawdzenia czy wymagania zapewnienia jakości i kontroli jakości są spełnione w odniesieniu do konstrukcji wykonanych ze zwykłego betonu, fibrobetonu lub betonu wysokowartościowego. Całościowe ujęcie tego zadania odniesione szczególnie do trwałości zostało sformułowane przez R.K. Mehta już w 1994 r. w sposób następujący [2]:

"The most serious problem in concrete technology today is the premature deterioration of concrete structures that are subjected to harsh environments. There is overwhelming evidence from field experience that many of the durability problems, such as sulphate attack, carbonation, alkali-silica reaction, and corrosion of reinforcing steel in concrete would not have occurred had the concrete been impermeable during the intended service life. Therefore, to address the durability related issues in selecting materials, mix proportions and construction practice for concrete, we must develop new, comprehensive models on concrete deterioration showing the effect of environmental influences on the permeability of concrete".

Uzbrojenie tradycyjne prętami lub cięgnami, a także kompozytowymi elementami niemetalowymi, nie jest tu rozpatrywane jako składnik struktury.

2. STRUKTURA BETONU

Struktura betonu jest rozpatrywana na różnych poziomach, które można umownie określić w sposób następujący:

- poziom molekularny, na którym uwzględniane są atomy i cząsteczki, przy czym charakterystyczne rozmiary są rzędu 10^{-12} - 10^{-10} m; (10^{-10} m = 0,1 nm = 1 Å),
- poziom mikro, na którym rozpatrywana jest zwykle struktura stwardniałego betonu (rozmoszczenie jonów, cząsteczek, mikrodefektów), a pojedyncze kryształy mogą osiągać rozmiary rzędu $1 \mu\text{m} = 10^{-6}$ m,
- poziom mezo, na którym głównymi charakterystycznymi elementami struktury są duże pory, rysy i ziarna (inkluzje) o wymiarze co najwyżej $1 \text{ mm} = 10^{-3}$ m,
- poziom makro, na którym beton jest traktowany jako ośrodek jednorodny, a charakterystyczne rozmiary są zawarte między 10^{-3} a 10^{-2} m.

Obserwacje i pomiary prowadzone są często także na poziomach pośrednich między wymienionymi. Wybór odpowiedniego poziomu analizy i obserwacji struktury danego materiału betonopodobnego decyduje o uzyskanych wynikach i jest zależny przede wszystkim od celu rozważań. Na każdym poziomie różne elementy są obserwowane i różne procesy są rozpatrywane, podczas gdy inne są pomijane. Co więcej, bez uwzględnienia niższych poziomów, niektórych zjawisk i zależności nie można wyjaśnić ani przedstawić w postaci modeli.

W strukturach betonów można rozróżnić następujące elementy, które są bardziej szczegółowo opisane w następnych rozdziałach:

- stwardniały zaczyn cementowy, o złożonej budowie zależnej od różnych domieszek, wpływających na wszystkie właściwości,
- ziarna kruszywa o różnym pochodzeniu mineralnym i rozmaitych rozmiarach, a także cząstki różnego rodzaju mikrowypełniaczy,
- pory i pustki, spowodowane wyparowaniem wody, a także układy porów wprowadzone celowo przy użyciu środków napowietrzających, albo utworzone przez powietrze przypadkowo schwytane ("załapane") podczas mieszania i układania betonu,
- uzbrojenie różnych rodzajów: stalowe lub kompozytowe pręty, ciężna i kable, przypadkowo lub regularnie rozmieszczone krótkie i długie włókna, mikrowłókna, maty i siatki,
- rysy i pęknięcia spowodowane różnymi przyczynami i powstałe podczas procesów hydratacji, a także później podczas twardnienia i eksploatacji, np. na skutek działania zmiennej temperatury i wilgotności otoczenia.

Składnikiem kompozytów cementowych są również międzyfazowe strefy kontaktowe oraz różnego rodzaju fazy przejściowe (ang. *interface transition zone - ITZ*):

- między zianami kruszywa a zaczynem cementowym,
- między uzbrojeniem (włóknami, siatkami) a zaczynem cementowym,
- między starym a nowym betonem (naprawy i rekonstrukcje).

3. ZACZYN CEMENTOWY

Struktura stwardniałego zaczynu cementowego powstaje podczas przechodzenia ze stanu ciekłego w stan stały. Proces ten jest wynikiem postępującej hydratacji składników cementu. Orientacyjne proporcje składników w stwardniałym zaczynie cementowym podane są w tablicy 1; poszczególne składniki można rozpoznać w znanych obrazach struktur zaczynu.

Tablica 1. Składniki zaczynu cementowego przy w/c = 0,5; wg. [3], [4]
Table 1. Components of hardened cement paste w/c=0.5, according to [3], [4]

Składnik	Procent objętości (przybl.)	Uwagi
C-S-H $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 1,7\text{H}_2\text{O}$	55	faza ciągła - matryca,
CH $\text{Ca}(\text{OH})_2$	20	duże kryształy (0,01 ÷ 1,0) mm
Uwodnione glinokrzemiany wapnia	10	małe kryształy (1 ÷ 10) μm
Pory kapilarne	15	zależnie od ilości wody i stosunku w/c

Jeżeli beton jest rozpatrywany między poziomami mikro- a mezo-, to wówczas stwardniały zaczyn jest traktowany jako ciągła i jednorodna matryca, w której rozmieszczone są inkluzje, wymienione powyżej.

Struktura zarysowania powstała w zhydratyzowanym zaczynie cementowym, utworzona jest z rys i mikrorys, spowodowanych skurczem i zmianami temperatury podczas hydratacji; pojedyncze mikrorysy mają zwykle rozwarłość mniejszą niż 10 μm . Strukturę mikrorys można obserwować i rejestrować na specjalnie przygotowanych próbkach betonu, na tzw. cienkich szlifach (ang. *thin sections*). Na płaskich przekrojach betonu, obserwowanych w świetle odbitym trudno jest je badać pojedynczo i ocenić ilościowo, ale możliwa jest rejestracja oraz analiza jakościowa i ilościowa ich struktury.

4. STRUKTURY UTWORZONE Z INKLUZJI – ZIAREN KRUSZYWA I MAŁYCH CZĄSTEK

W ciągłej matrycy, utworzonej ze stwardniałego zaczynu, ziarna kruszywa różnego rodzaju są traktowane jako inkluzje. Pomiedzy większymi ziarnami kruszywa są upakowane mniejsze ziarna i cząstki różnych mikrowypełniaczy.

Kilka rodzajów drobnych cząstek zestawiono w tablicy 2, pokazując jak licznie są te cząstki upakowane w objętości 1 cm^3 . Niezhydratyzowane ziarna cementu portlandzkiego należą również do tej kategorii i pełnią rolę twardych cząstek. Zadaniem drobnych cząstek jest wypełnienie przestrzeni między ziarnami piasku i utworzenie sztywnej struktury, aby powiększyć gęstość betonu, poprawić szczelność i zwiększyć wytrzymałość. Drobne cząstki wpływają przy tym poważnie na właściwości reologiczne mieszanki betonowej, której odpowiednią urabialność trzeba zwykle zapewnić przy użyciu domieszek chemicznych.

Tablica 2. Małe ziarna w betonie
Table 2. Small grains in concrete

Materiał	Średnia wielkość	Powierzchnia właściwa	Objętość jednego ziarna	Masa jednego ziarna	Liczba ziaren w 1 cm^3 betonu przy zawartości składnika ziarnistego:		
	μm				m^2/kg	mm^3	g
średnica	gęstość						
μm	g/cm^3						
Cement portlandzki	50	250 - 450	$6,5\text{E}-05$	$2,03\text{E}-07$	1970 000	-	-
1 - 100	3,1						
Popiół lotny	45	130 - 230	$4,8\text{E}-05$	$1,10\text{E}-07$	-	1090 000	360 000
1 - 150	2,3						
Pył krzemionkowy	0,2	18000 - 24000	$4,2\text{E}-12$	$9,30\text{E}-15$	-	$12,9\text{E}+12$	$4,3\text{E}+12$
0,1 - 0,3	2,2						

Struktura utworzona z ziaren kruszywa nazywana jest szkieletem betonu. W przypadku betonów o wysokiej jakości (BWW) rozkład wielkości ziaren musi być starannie zaprojektowany, a następnie sprawdzony doświadczalnie. W stwardniałym betonie rozkład ziaren powinien być jednorodny, aby uniknąć obszarów pozbawionych ziaren lub obszarów bez wypełnienia zaprawą i zaczynem, ponieważ są to miejsca słabsze, które mogą być przyczyną powstawania rys i lokalnych uszkodzeń.

Przykłady struktur utworzonych w betonie z ziaren kruszywa pokazane są na rysunku 1. Każda z nich jest wynikiem albo starannego zaprojektowania i wykonania betonu, albo popełnionych błędów.

Kompozycja grubego i drobnego kruszywa, uzupełniona w miarę potrzeby mikro-wypełniaczami, musi być starannie zaprojektowana, aby otrzymać gęste wypełnienie

przestrzeni ziarnami, np. według tzw. krzywych Fullera. Przy takiej strukturze, można ograniczyć objętość wypełnienia zaczynem cementowym i uzyskać odpowiednią urabialność mieszanki betonowej przy zachowaniu niskiej wartości współczynnika wodno-cementowego (w/c). W przypadku betonów wysokowartościowych konieczne jest użycie superplastyfikatorów, aby zapewnić wymaganą urabialność.

Rys.1. Przykłady struktur utworzonych z ziaren kruszywa:

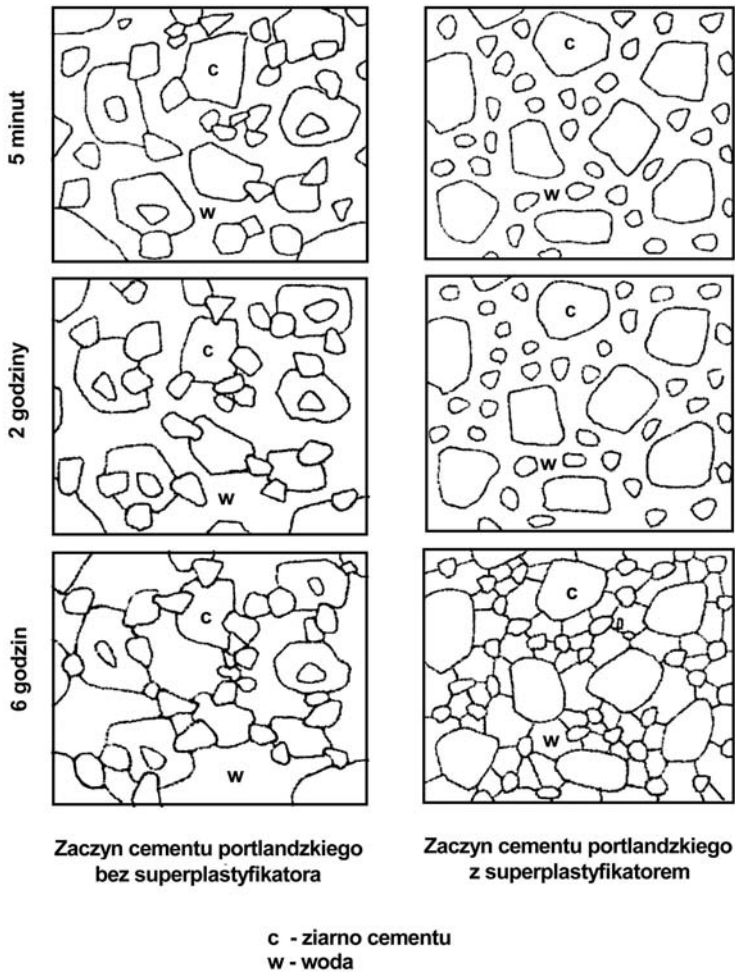
- a) ziarna o podobnej wielkości, duży udział objętościowy pustek, tylko częściowo wypełnionych matrycą,
- b) brak drobnych ziaren i nadmiar matrycy,
- c) ciągły rozkład wielkości ziaren, w większości przypadków betony są projektowane, aby otrzymać taką strukturę,
- d) struktura pozbawiona większych ziaren,
- e) brakuje ziaren o pośredniej wielkości, tzw. kruszywo o uziarnieniu nieciągłym,
- f) segregacja ziaren, w górnej części zaprawa, a nie beton [5]

Fig.1. Examples of the aggregate grain structures:

- a) similar size grains, large volume fraction of voids, only partly filled with matrix,
- b) more paste and also lack of smaller grains,
- c) continuous distribution of grains, most of concretes are designed to obtain such a structure,
- d) structure without the biggest grains,
- e) no intermediary size grains, so-called "gap-grading",
- f) segregation of grains and upper part is rather a mortar [5]

Działanie superplastifikatora na strukturę utworzoną z cząstek cementu podczas hydratacji pokazane jest schematycznie na rysunku 2. Odpowiednio po 5 minutach, a następnie po 2 i 6 godzinach w wyniku hydratacji cząstki przyciągają się wzajemnie wskutek odmiennych ładunków elektrycznych (lewy rysunek). Jeżeli dodany jest superplastifikator do mieszanki (prawy rysunek), wówczas dzięki odpychaniu ziaren

nie tworzą się ich aglomeraty i następuje równomierne rozmieszczenie, które powinno być zachowane podczas twardnienia. Struktura cząstek podczas twardnienia w obu tych przypadkach jest zupełnie odmienna. Mechanizmy dyspersji cząstek cementu przez działanie różnych superplastifikatorów zostało opisane przez wielu autorów, np. w [6].



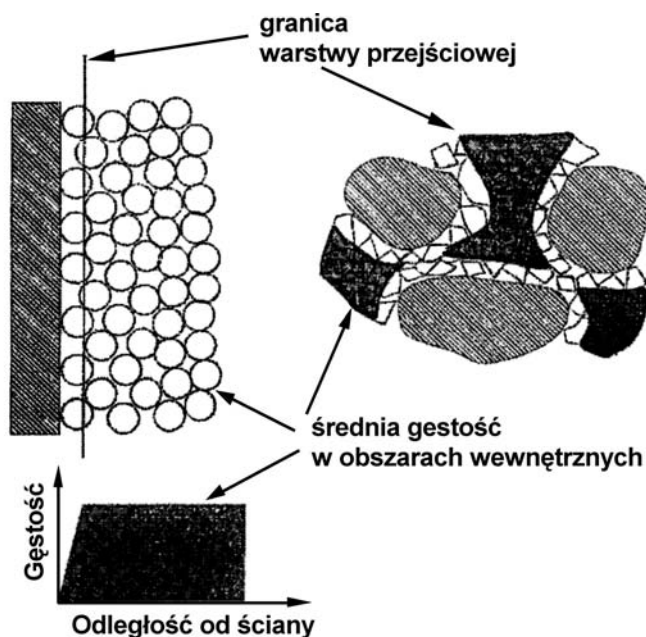
Rys.2. Rozproszenie ziaren cementu na skutek działania superplastyfikatora [7]

Fig.2. Defloculation of cement grains due to action of a superplasticizer [7]

Ziarna kruszywa jako elementy struktury-szkieletu betonu można charakteryzować określając ich kształt, rodzaj powierzchni, porowatość, wytrzymałość, odporność na zamrażanie, itp.

Na płaskich przekrojach próbek, rdzeni lub elementów betonowych, prawidłowo przygotowanych i oglądanych w świetle odbitym, można rozróżnić rozmaite rodzaje struktur utworzonych z ziaren kruszywa. Sposoby przygotowania powierzchni i ich analizy, zarówno jakościowej jak ilościowej są opisane w innych pracach, np. w [8].

Struktura ziaren kruszywa może ulegać zakłóceniu na etapie płynnej mieszanki betonowej przez wpływ nieprzenikalnych przegród i ścian; jest to tzw. efekt ściany. Wpływ ten można zaobserwować na różnych poziomach: modyfikacji układu grubych ziaren przez ścianki form i deskowań, ziarna piasku i inne drobne cząstki mogą podlegać wpływowi powierzchni grubszych ziaren podczas mieszania i zagęszczania betonu. Podobne jest oddziaływanie powierzchni prętów uzbrojenia, a nawet włókien w stosunku do najmniejszych cząstek. Jednym z głównych "efektów ściany" jest mniejsza gęstość upakowania w pobliżu ścian, rysunek 3.



Rys.3. Schemat "efektu ściany" [9]

Fig.3. Schematic presentation of the wall effect [9]

Duże ziarna kruszywa powodują powstanie koncentracji naprężeń, co może mieć poważne skutki dla zachowania się betonu pod obciążeniem. Takie koncentracje pokazał doświadczalnie P. Dantu już w 1957 roku [10]. Okazało się, że rzeczywiste naprężenia lokalne w narożach ziaren są wielokrotnie większe od wartości naprężeń średnich, obliczanych ze wzorów, opartych na upraszczających założeniach o rozkładzie naprężeń. Na rysunkach 4 i 5 pokazane są rezultaty tych badań. Okazuje się więc, że

wszystkie rysy i mikrorysy powstają właśnie w wyniku lokalnych koncentracji naprężeń, wywołanych różnymi przyczynami. Struktura utworzona z dużych ziaren kruszywa decyduje o zapoczątkowaniu procesu pęknięcia i zniszczenia w elementach betonowych. Z tego właśnie powodu w betonach wysokowartościowych zwykle używane są drobnoziarniste kruszywa.

Rys.4. Struktura utworzona z dużych ziaren kruszywa w próbce badanej metodą warstwy elastoptycznej [10]

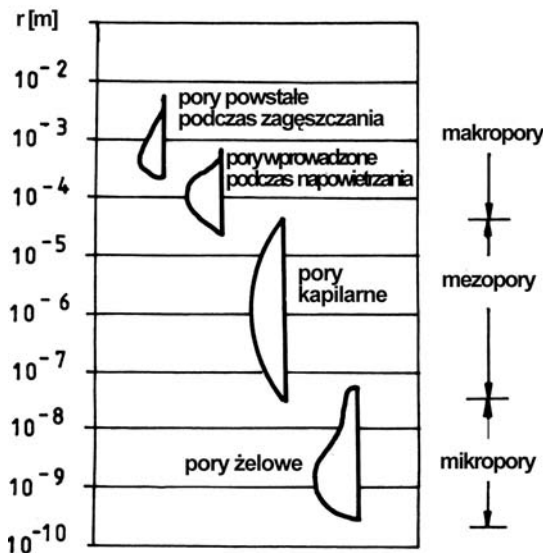
Fig.4. Structure of large aggregate grains analysed with a photoelastic layer [10]

Struktura materiału utworzona z kruszyw różnego rodzaju ma poważny wpływ na wytrzymałość i odkształcalność betonu. Badania próbek, w których sztucznie utworzono rozmaite struktury betonu, przeprowadził Glinicki [11], wykazując jak różne jest ich zachowanie przy różnych prędkościach obciążania mimo takich samych wytrzymałości, określonych w badaniach statycznych.

Fig.5. Koncentracje naprężeń, spowodowane obecnością twardych ziaren kruszywa w betonie [10]
 Fig.5. Stress concentrations produced by the structure of hard aggregate grains in the hardened concrete [10]

5. STRUKTURY PORÓW I PUSTEK

W betonie występują różne rodzaje porów, które można klasyfikować według rozmiarów i przyczyn powstawania, tablica 3. Schematycznie rozkład porów według rozmiarów pokazany jest na rysunku 6, a przykłady objętości różnego rodzaju porów w zaczynach, zaprawach i betonach zestawione są w tablicy 4 według [12].



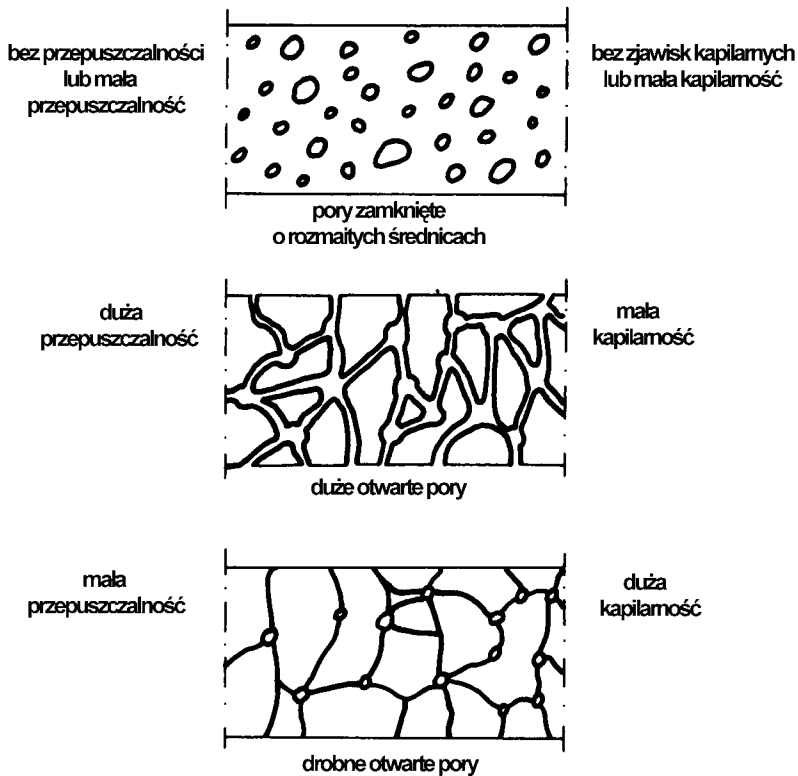
Rys.6. Schemat rozkładu wielkości porów w zwykłym betonie, według [13]
 Fig.6. Pore-size distribution in ordinary PC concrete, after [13]

W zhydratyzowanym zaczynie cementowym można odróżniać dwa podstawowe rodzaje porów: żelowe w przestrzeniach między krystalicznymi, oraz kapilarne. Pory żelowe stanowią część fazy C-S-H i są znacznie mniejsze od porów kapilarnych; ich charakterystyczny rozmiar zawiera się między 1 a 2 nm. Są zbyt małe, aby mogły być wypełniane przez produkty hydratacji cementu i wpływać na zjawiska kapilarne. Pory żelowe zajmują około 55% całej objętości żelu; jest to związane z jakością cementu i zasadniczo nie zależy ani od współczynnika w/c ani od stopnia hydratacji. Nie uczestniczą w zjawiskach przenikania wilgoci przez beton i nie wpływają na wytrzymałość betonu, natomiast decydują o skurczu i pęcznieniu.

Tablica 3. Pory w zaczynie cementowym
Table 3. Pores in cement paste

Klasyfikacja	Rozmiary	Metody badania	Przyczyny powstania	Znaczenie
Duże pory	$> 500\mu\text{m}$	mikroskopia optyczna	sztuczne napowietrzanie, albo niedostateczne zagęszczenie lub brak właściwej pielęgnacji, nadmiar wody zarobowej	zmniejszają wytrzymałość
Pory wprowadzone w wyniku działania środka napowietrzającego	$(50 \div 1250)\mu\text{m}$ zwykle $< 500\mu\text{m}$	mikroskopia optyczna	sztuczne napowietrzanie	niewielko zmniejszona wytrzymałość, podwyższona odporność na cykliczne zamrażanie
Makropory	$> 50 \text{ nm}$	porozymetria rtęciowa	pozostałości przestrzeni wypełnionych wodą w zaczynie	decydują o przepuszczalności i trwałości
Mezopory	$(2,5 \div 50) \text{ nm}$	porozymetria rtęciowa, adsorpcja-desorpcja gazów	pozostałości przestrzeni wypełnionych wodą, mniejsze pory rozmieszczone w C-S-H	zjawiska kapilarne powodują naprężenia podczas wysychania betonu
Mikropory	$< 2,5 \text{ nm}$	adsorpcja-desorpcja gazów	rozmieszczone w C-S-H	zjawiska kapilarne mogą występować podczas nawilżania i wysychania

Pory kapilarne są częściowo wypełnione wodą, która nie została zużyta do hydratacji cementu, a ich objętość zależy bezpośrednio od współczynnika w/c i stopniowo zmniejsza się w miarę postępu hydratacji. Pory kapilarne są połączone, a ich wpływ na przepuszczalność betonu jest decydujący. Trzy przykłady struktur porów w zaczynie cementowym pokazane są na rysunku 7; różnią się połączeniami i zdolnością do przepuszczania wody i do podciągania kapilarnego.



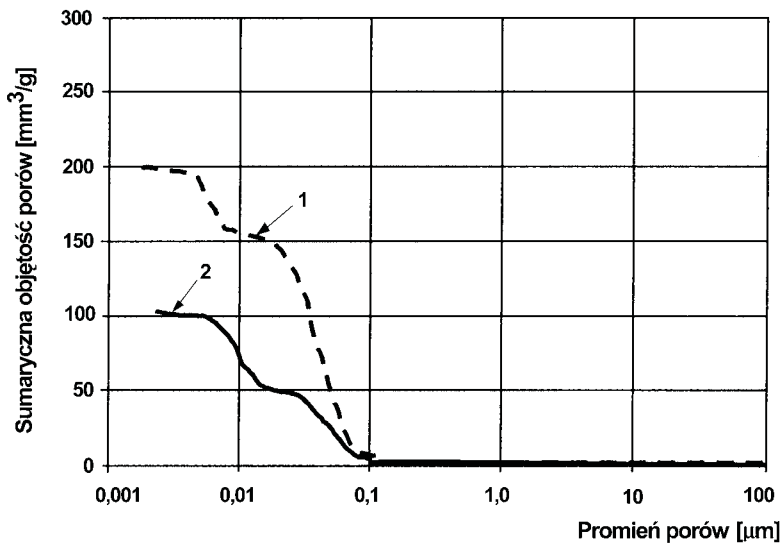
Rys.7. Przykłady struktur porów, ich przepuszczalności wilgoci i zdolności do podciągania kapilarnego [14]

Fig.7. Examples of pore structures, their permeability and capillarity [14]

Zawartość, wielkość i rozkład wielkości porów w stwardniałym zaczynie cementowym można wyznaczyć za pomocą porozymetrii rtęciowej (ang. *Mercury Intrusion Porosimetry - MIP*). Ze względu na konieczność stosowania dużych ciśnień i małych próbek zaczynu otrzymane wyniki są niekiedy kwestionowane. Istnieją inne metody określania rozkładu wielkości porów w zaczynie, np. absorpcji azotu, opisane w licznych publikacjach.

Użycie różnego rodzaju mikrowypełniaczy powoduje segmentację porów, redukcję przepuszczalności betonu w trakcie eksploatacji. Stosowanie dwu- i trój-składnikowych cementów jest uzasadnione zamiarem utworzenia mikrostruktury sprzyjającej nieprzepuszczalności betonu. W szczególności, zastosowanie pyłów krzemionkowych, popiołów lotnych i innych mikrowypełniaczy pozwala na uzyskanie bardzo drobnych średnic porów: łączna objętość porów jest mniejsza, a także mniejsza jest przeciętna średnica pora. Prowadzi to do większej gęstości kompozytu i do poprawienia trwałości elementów betonowych.

Na rysunkach 8 i 9 pokazane są przykłady rozkładów wielkości porów w zaczynie w betonie zwykłym i betonach wysokowartościowych. Zarówno średnie rozmiary porów, jak i ich łączna objętość w tych betonach zależy przede wszystkim od wartości współczynnika w/c.



Rys.8. Rozkład wielkości porów w zaczynach dwóch różnych betonów:

- 1 - z czystego cementu portlandzkiego przy w/c = 0,5;
- 2 - przy zastąpieniu 55% cementu przez mielony żużel wielkopiecowy, według [15]

Fig.8. Pore size distribution in two concretes:

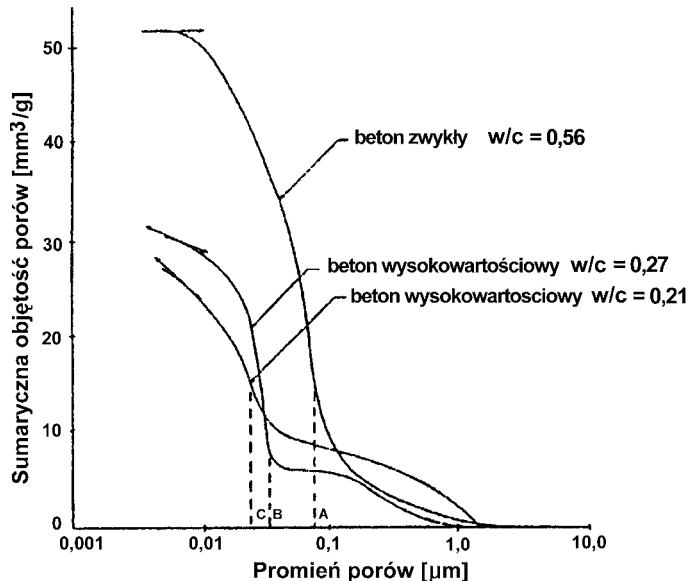
- 1 - with pure portland cement and w/c = 0.5;
- 2 - with 55% replacement of portland cement by GGBS, after [15]

W tabelicy 4 przedstawione są przykładowo objętości porów w różnych przypadkach zaczynów, zapraw i betonów, przy rozmaitych wartościach współczynnika w/c.

Odporność na wpływ cyklicznego zamrażania można znacznie poprawić przez wytworzenie w strukturze betonu licznych drobnych porów powietrznych, równomiernie rozmieszczonych także po stwardnieniu. W tym celu stosowane są specjalne domieszki, dodawane podczas mieszania składników. Skuteczna struktura porów powietrznych w betonie charakteryzowana jest następującymi parametrami:

- całkowita zawartość powietrza, zwykle między 4 a 7%, zależnie od wielkości ziaren kruszywa,
- średni rozstaw porów (ang. *spacing factor*), który odpowiada średniej odległości dowolnego punktu w zaprawie od najbliższego pora powietrznego, poniżej (0,2 ÷ 0,22) mm,
- powierzchnia właściwa porów powietrznych, powyżej (15 ÷ 20) mm²/mm³,
- procentowa objętość porów mniejszych od 0,3 mm, tzw. A₃₀₀, powyżej (1,5 ÷ 1,8) %.

Średni rozstaw porów osiąga niskie wartości, jeżeli całkowita zawartość powietrza jest dostatecznie duża, a pojedyncze pory są małe i równomiernie rozmieszczone w matrycy. Pory o średnicy > 5 μm mogą być rozpoznawane przy użyciu mikroskopu optycznego na powierzchniach specjalnie przygotowanych przekrojów próbek betonu, policzone i zarejestrowane ręcznie lub przy użyciu komputerowej analizy obrazu, w obu przypadkach korzystając z powszechnie stosowanej normy amerykańskiej ASTM C 457. Do betonów w konstrukcjach eksploatowanych w rozmaitych warunkach stosowane są różne wymagania w odniesieniu do wymienionych powyżej parametrów, charakteryzujących strukturę porów. Współczesne metody analizy struktury napowietrzenia betonu oparte są przeważnie na wykorzystaniu komputerowej analizy obrazu i prowadzą do szybkiego uzyskania wyników, umożliwiającą bezpośrednią ocenę spełnienia wymagań.



Rys.9. Wykresy rozkładu wielkości porów w betonie wysokowartościowym (BWW) w porównaniu do betonów zwykłych [16]

Fig.9. Pore size distribution curves of a High Performance Concrete in comparison with a normal (ordinary) concrete [16]

Tablica 4. Objętości porów w stwardniałym zaczynie, zaprawie i betonie [12]
 Table 4. Pore volume in hardened cement paste, mortar and concrete [12]

Wiek materiału	w/c	Materiały o podobnej urabialności			Jednakowy stosunek w/c				Metody pomiarowe ****							
		zaczyn	zaprawa	beton	zaczyn	zaprawa	beton	zwykły								
		0,30	0,55	0,60	0,50	0,50	0,50	0,50								
		** *** **	** *** **	** *** **	** *** **	** *** **	** *** **	** *** **								
	1mm -10mm	27,4	29,0	54,5	19,1	61,1	40,6	28,0	40,0	18,7	65,8	14,6	51,4	1+2+3+4		
	Objętość porów żelowych	7,5	4,1	7,7	3,1	9,9	11,9	11,9	4,0	5,7	2,0	7,0	2,1	7,4	1	
	Objętość porów żelowych	4,6	2,4	4,5	0,6	2,0	4,6	4,6	1,5	2,1	0,5	1,8	1,1	3,9		
	Pory wypełnione wodą	10,4	9,3	17,5	4,7	15,0	15,8	15,8	10,9	15,6	4,3	15,1	4,2	14,8		
	Pustki	0,8	3,6	6,9	1,6	5,1	3,0	3,0	4,9	7,0	1,9	6,7	1,5	5,3	2	
	100mm-2µm	1,9	1,9	8,1	15,2	7,8	24,9	4,9	4,9	6,3	9,0	5,8	20,4	4,2	14,9	
	3mm-2µm	17,7	17,7	23,4	44,1	14,7	47,0	28,3	28,3	23,6	33,7	12,5	44,0	11,0	38,7	
	Łączna objętość porów wypełnionych wodą	25,2	25,2	27,5	51,8	17,8	56,9	40,2	40,2	27,6	39,4	14,5	51,0	13,1	46,1	1+2
	Pory powietrzne	1,7	1,7	0,6	1,1	0,4	1,3	0,4	0,4	0,4	0,6	2,1*	7,4*	0,4	1,4	3
	(Powietrze "załapane")	0,5	0,5	0,9	1,6	0,9	2,9	0	0	0	0	2,1	7,4	1,1	3,9	4
	Łączna objętość porów powietrznych	2,2	2,2	1,5	2,7	1,3	4,2	0,4	0,4	0,4	0,6	4,2	14,8	1,5	5,3	3+4

Wiek materiału	Materiały o podobnej urabialności	Jednakowy stosunek w/c	Metody pomiarowe
	zaczyn zaprawa beton S/C=2	zaczyn zaprawa beton S/C=0,9	zwykły
	w/c	0,50	0,50
	1mm-10mm	** *** ** *** **	** *** ** *** **
	Całkowita objętość porów	24,2 24,2 26,0 47,9 19,2 61,3	37,5 37,5 23,0 32,3 20,4 71,7 15,9 56,0
	Objętość porów żelowych	8,2 8,2 7,1 13,4 4,6 14,7	14,7 14,7 5,4 7,7 4,1 14,4 3,9 13,7
	Objętość porów żelowych	2,8 2,8 3,6 6,7 0,8 2,6	5,8 5,8 3,7 5,3 1,5 5,2 1,3 4,6
	Pory wypełnione wodą	10,0 10,0 5,8 11,0 5,6 17,8	15,6 15,6 8,8 12,6 4,7 16,5 4,1 14,4
28 dni	Pustki	0,3 0,3 1,3 2,5 1,6 5,1	0,2 0,2 1,4 2,0 0,7 2,5 0,8 2,8
	100mm-2mm	0,7 0,7 6,7 12,6 5,3 16,9	0,8 0,8 3,3 4,7 5,2 18,3 4,3 15,2
	3mm-2mm	13,8 13,8 17,4 32,8 13,3 42,4	22,4 22,4 17,2 24,6 12,1 42,5 10,5 37,0
	Łączna objętość porów wypełnionych wodą	22,0 22,0 24,5 46,2 17,9 57,1	37,1 37,1 22,6 32,3 16,2 56,9 14,4 50,7
	Pory powietrzne	1,7 1,7 0,6 1,1 0,4 1,3	0,4 0,4 0,4 0,6 2,1* 7,4* 0,4 1,4
	(Powietrze "załapanie")	0,5 0,5 0,9 1,6 0,9 2,9	0 0 0 0 2,1 7,4 1,1 3,9
	Łączna objętość porów powietrznych	2,2 2,2 1,5 2,7 1,3 4,2	0,4 0,4 0,4 0,6 4,2 14,8 1,5 5,3
	* - objętość porów wprowadzonych, ** - objętość porów w % objętości zaczynu, zaprawy i betonu; *** - objętość porów w % objętości zaczynu, zaprawy i betonu		
	**** - metody pomiarowe: 1 - pomiar metodą adsorpcji i desorpcji N ₂ , 2 - pomiar przy użyciu porozymetrii ręczowej, 3 - pomiar przy użyciu optycznego mikroskopu i analizy obrazu,		
	4 - pomiar rentgenowskiej tomografii komputerowej i analizy obrazu.		
	w/c-stosunek wody do cementu, s/c-stosunek piasku do cementu.		

6. WARSTWY PRZEJŚCIOWE (ANG. INTERFACIAL TRANSITION ZONES – ITZ)

Zagadnienie czy warstwy przejściowe między zaczynem cementowym a ziarnami kruszywa mogą być uważane za specjalne fazy betonu nie jest całkowicie rozstrzygnięte. Od przeszło 40 lat badacze reprezentują różne poglądy na temat znaczenia tych warstw, ich grubości i właściwości odmiennych od innych regionów zaczynu [17]. Niektóre wątpliwości można uważać za wyjaśnione w wyniku nowszych prac, m.in. Diamonda i Huanga [18], którzy przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego badali obrazy warstw o grubości 10 μm wokół pojedynczych ziaren, wykonując ilościowe analizy ich składu w zależności od odległości od powierzchni ziaren.

Istnieje wiele przyczyn, powodujących odmienność składu i struktury zaczynu w warstwach przejściowych wokół ziarn kruszywa i w obszarach odległych od powierzchni tych ziarn. Są to m.in.:

- efekt ściany, to znaczy odmienny układ drobnych cząstek i pustek w sąsiedztwie powierzchni niemal nieprzenikalnych dla zaczynu cementowego (rys. 3),
- drgania ziaren podczas zagęszczania mieszanki betonowej,
- odmienny przepływ wilgoci w obszarach w pobliżu ziaren.

Wyjaśnienie znaczenia tych efektów i ich wpływu w różnych rodzajach betonu prowadzi do pytań, na które różni badacze proponują nieco odmienne odpowiedzi. Zgodnie z poglądami bardziej tradycyjnymi, każde ziarno jest otoczone przez rodzaj powłoki, utworzonej z zaczynu cementowego o zasadniczo różnej strukturze i kompozycji: jest to materiał bardziej porowaty i słabszy. Właściwości warstw pośrednich są zależne od ich odległości od powierzchni ziaren, a grubość ich może osiągać w przybliżeniu 40-60 μm .

Według Diamonda i Huanga warstwa przejściowa odróżnia się od pozostałej matrycy przez:

- większą objętość porów,
- mniejszą zawartość niezhydratyzowanych ziaren cementu,
- większą zawartość wodorotlenku wapnia,

przy czym lokalna zmienność składu warstwy jest tak wysoka, że może być nawet wyższa niż zmienność wraz z odległością od powierzchni ziarna kruszywa. Wobec tego, znaczenie warstw przejściowych bywa przeceniane, zwłaszcza w przypadku betonów wysokowartościowych (BWW), w których ziarna grubego kruszywa są małe.

Wpływ warstw zależy od jakości betonu: im mniejsze wartości ma współczynnik w/c , tym mniejszy wpływ warstw przejściowych można stwierdzić, przy czym jako graniczna wartość zwykle przyjmowana jest $w/c = 0,4$. Grubość warstwy przejściowej zmienia się od 10 do 40 μm , zależnie od tego, jaka właściwość jest rozpatrywana, np. zawartość porów, fazy CH lub niezhydratyzowanych ziaren cementu.

Nierozwiązanym w pełni zagadnieniem jest również wpływ pyłów krzemionkowych. Po dodaniu w ilości 5 - 10 % masy cementu urabialność mieszanki betonowej ulega poprawie, ale według badań Goldmana i Bentura [19] betony wykazywały wyższą wytrzymałość niezależnie od tego, czy dodatkiem był pył krzemionkowy czy sadza; cząstki są w przybliżeniu tej samej wielkości, lecz sadza jest chemicznie objęta. Wyniki tych obserwacji i poglądy były podważane przez Darwina [20], który dowodził, że oba te rodzaje mikrowypełniaczy zmniejszają średnice porów w zaczynie i wobec tego odporność na propagację rys ulega zwiększeniu, jeżeli przyjąć założenia mechaniki pękania. Zgodnie z takim poglądem, o właściwościach zaczynu cementowego decydują obszary odległe od powierzchni ziaren, a nie tylko warstwy przejściowe. Pytanie w jakim stopniu pyły krzemionkowe wpływają właśnie na warstwy przejściowe, a nie na całą objętość zaczynu, nie jest rozstrzygnięte.

W warstwie przejściowej następuje przenoszenie sił wewnętrznych z jednej fazy na drugą. Przy zniszczeniu, propagacja rys następuje albo przez ziarna kruszywa, albo rysy przechodzą wokół ziaren, tzn. przez warstwę przejściową; zależy to od wytrzymałości ziaren i jakości przyczepności matrycy do ziaren. Nie tylko wytrzymałość ziaren ma tu znaczenie, ale także inne ich właściwości: czy są mniej lub bardziej porowate, przepuszczalne, nasiąknięte wodą, itd.

Uważa się ogólnie, że właściwości warstwy przejściowej decydują o przepuszczalności betonu, a zjawiska perkolacji odbywają się właśnie w połączonych ze sobą warstwach wokół ziaren.

Struktura warstwy przejściowej wokół stalowych włókien w betonie była badana doświadczalnie przez Potrzebowskiego [21] ze względu na jej wpływ na przekazywanie sił przez przyczepność i tarcie. Okazało się m.in., że po zerwaniu przyczepności między włóknem a zaczynem (matrycą) siły są przekazywane przez tarcie w sposób ciągły, a spadek wartości tych sił następuje dopiero po znacznym rozwarciu rysy.

7. STRUKTURY UZBROJENIA WŁÓKNAMI

Głównym zadaniem struktur utworzonych z regularnych lub przypadkowo rozproszonych włókien jest kontrola powstawania rys i ich propagacji. Na rysunkach 10 i 11 pokazano schematycznie jak włókna wpływają na rysy i jaki może być ich wpływ na kształt wykresu naprężenie – rozwarcie rys.

Jako uzbrojenie rozproszone stosowane są włókna różne co do materiału i kształtu; mogą to być oddzielne włókna w matrycy, wiązki włókien, maty wykonane z włókien lub nawet regularne siatki. W większości zastosowań są to pojedyncze włókna, rozproszone w sposób przypadkowy, ale w razie potrzeby włókna mogą być linearyzowane, aby lepiej dostosować ich strukturę do przewidywanych pól naprężeń i odkształceń, jeżeli są dane do takich przewidywań. Charakterystykę kilku rodzajów włókien i mikrowłókien i utworzonych z nich struktur podano w tablicy 5. Okazuje

się, że zwłaszcza w przypadku mikrowłókien są one bardzo liczne, co ma wpływ na ich skuteczność w hamowaniu propagacji mikrorys.

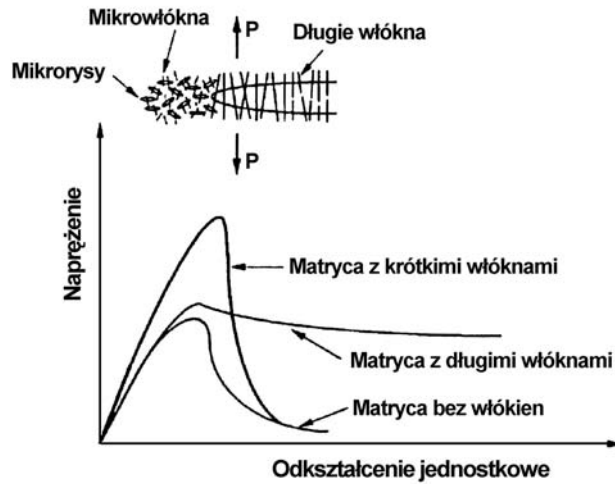
Tablica 5. Mikrouzbrojenie betonów i zapraw
Table 5. Fibre reinforcement for concrete and mortar

Włókna	Średnie rozmiary	Liczba włókien w 1 cm ³ przy zawartości:			
	Objętość pojedynczego włókna	0,5%	1,0%	2,0%	3,0%
Włókna azbestowe	0,1 μm × 4 mm	1,59 E+08	3,18 E+08	6,36 E+08	9,55 E+08
	3,14E-08 mm ³				
Włókna węglowe typu PAN	6 μm × 3 mm	59 000	118 000	236 000	354 000
	8,5E-05 mm ³				
Włókna węglowe typu pitch	14,5 μm × 3 mm	10 100	20 200	40 400	60 600
	0,000495 mm ³				
Włókna PVA	24 μm × 7 mm	1580	3160	6320	9480
	0,00317 mm ³				
Mikro-włókna stalowe	0,15 mm × 6mm	49	94	189	283
	0,106 mm ³				
Włókna stalowe	0,4 mm × 30mm	1,33	2,65	5,31	7,96
	3,77 mm ³				

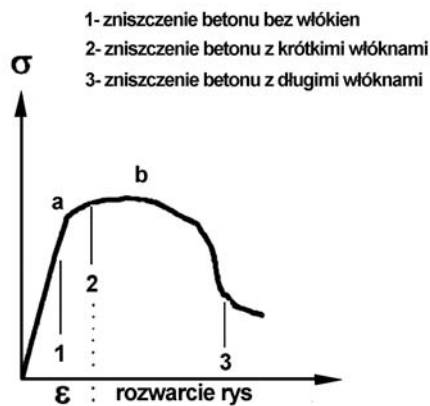
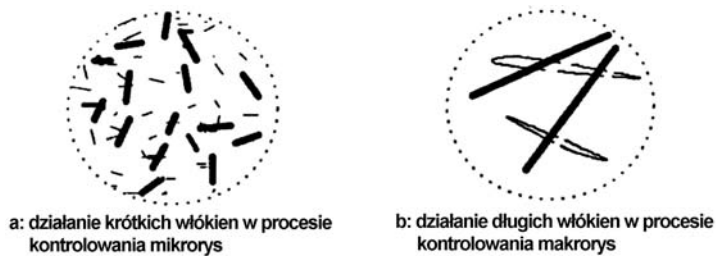
Przykład regularnej struktury włókien ciągłych pokazany jest na rysunku 12. Rozproszenie krótkich włókien w matrycy zależy w znacznym stopniu od stosunku ich długości do rozmiarów ziaren kruszywa; jest to schematycznie pokazane na rysunku 13.

Można odróżnić trzy idealne struktury, utworzone z pojedynczych rozproszonych włókien (rys. 14):

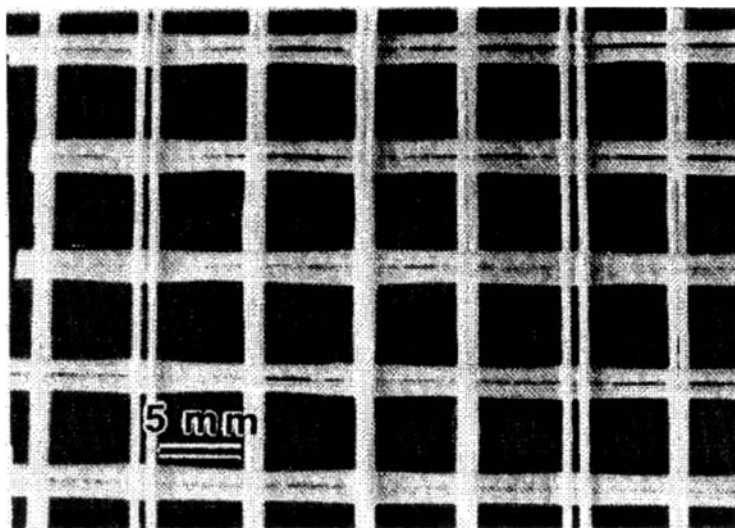
- włókna linearyzowane, tzn. że poszczególne włókna są w przybliżeniu równoległe do obranej osi; taką strukturę oznacza się przez 1D,
- przypadkowe rozmieszczenie włókien równoległe do obranej płaszczyzny; oznaczenie 2D,
- włókna rozmieszczone przypadkowo w przestrzeni; oznaczenie 3D.



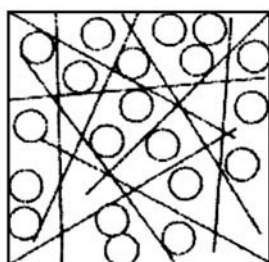
Rys.10. Struktury utworzone z długich i krótkich włókien, które kontrolują propagację rys [22]
 Fig.10. Structures of long and short steel fibres controlling the crack propagation [22]



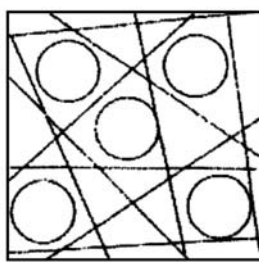
Rys .11. Działanie krótkich i długich włókien oraz ich wpływ na kształt wykresu napężenie – rozwarcie rys [23]
 Fig.11. Action of short and long fibres and their influence on the stress-crack opening curve [23]



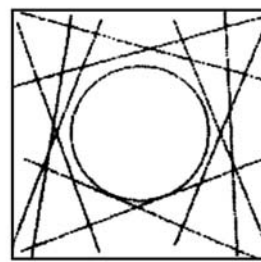
Rys.12. Przykład regularnej struktury ciągłych włókien szklanych [24]
 Fig.12. Example of regular structure of continuous glass fibres [24]



5 mm
Ziarna kruszywa



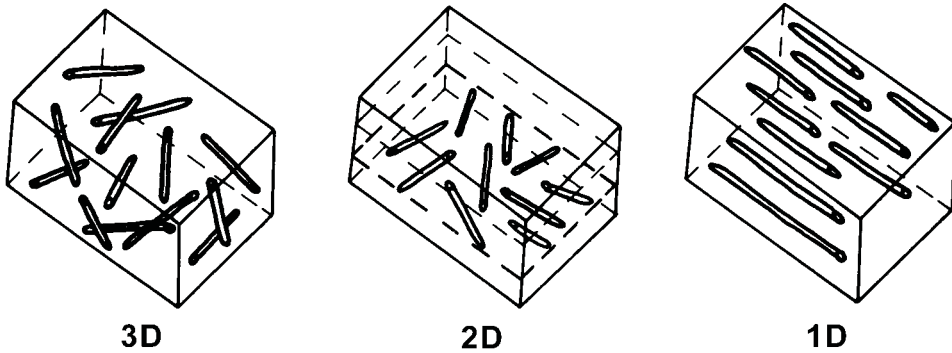
10 mm
Ziarna kruszywa



20 mm
Ziarna kruszywa

Rys.13. Wpływ wielkości ziaren na rozkład włókien w kwadracie o boku równym długości włókna (40 mm) [25]

Fig.13. Effect of aggregate size on fibre distribution within a square of side length equal to fibre length (40 mm) [25]



Rys.14. Struktury idealne utworzone z krótkich rozproszonych włókien
 Fig.14. Ideal structures of short dispersed fibres

W większości przypadków, kierunki głównych sił wewnętrznych nie są znane, więc przypadkowe rozmieszczenie włókien (3D) jest najbardziej właściwe. W rzeczywistych konstrukcjach jednak, odchylenia od idealnych struktur są nieuniknione, np. w elementach poziomych jak płyty czy warstwy wierzchnie stalowe włókna mają tendencję do układania się poziomo. Podobnie w przypadku cienkich warstw, włókna układają się równoległe do powierzchni warstwy i powstaje wówczas struktura pośrednia 2D-3D.

Rzeczywistą strukturę włókien w matrycy można określić doświadczalnie, analizując przekroje rdzeni lub innych próbek, wyciętych z badanych elementów.

Ślady włókien na przekrojach można policzyć ręcznie lub automatycznie, stosując komputerową analizę obrazu. Dostarcza to wiarygodnych informacji niezbędnych do określenia rzeczywistej struktury uzbrojenia włóknistego w elemencie (rys. 15).

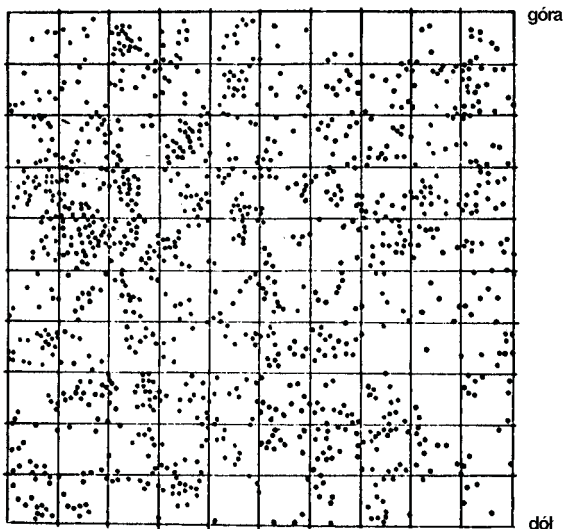
Jednorodność struktury utworzonej z włókien można oszacować na przykład z porównania liczby włókien w górnej i dolnej części przekroju badanego elementu, albo w innych obszarach. Całkowitą liczbę włókien przypadającą na jednostkę przekroju poprzecznego można obliczyć na podstawie wzorów wyprowadzonych przez Avestona i Kelly'ego [26] i Kasperkiewicza [27] w przypadku trzech idealnych struktur (rys. 16):

$$\begin{aligned}
 \text{przy } 1D & \quad N^{1D} = 4V_f / \pi d^2 \quad , \\
 \text{przy } 2D & \quad N^{2D} = 8V_f / \pi^2 2d^2 \quad , \\
 \text{przy } 3D & \quad N^{3D} = 2V_f / \pi d^2 \quad ,
 \end{aligned}$$

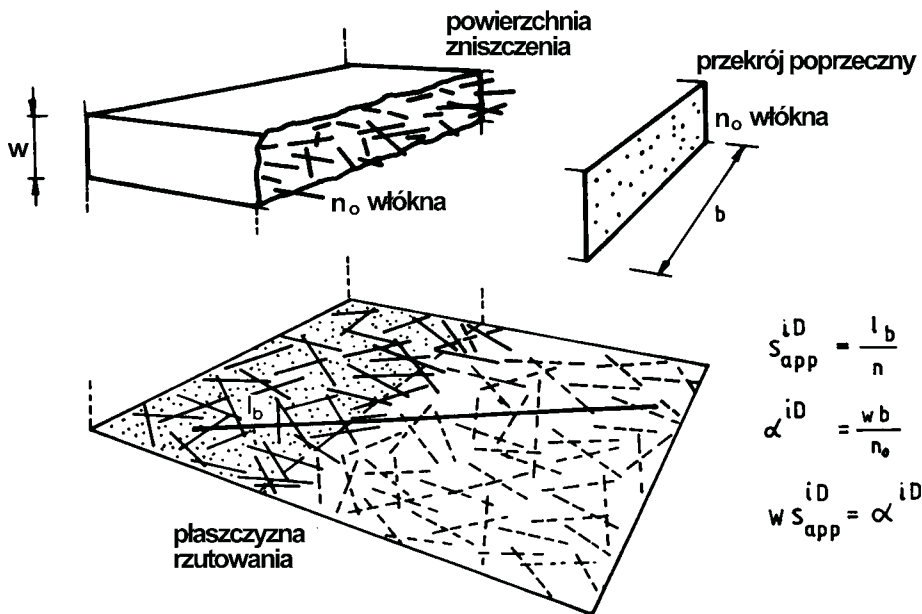
w których:

V_f - procentowa objętość włókien, d – średnica włókna.

Wartości otrzymane z powyższych wzorów dla struktur idealnych i ze zliczania włókien w przekrojach próbek lub elementów można porównywać celem oszacowania rzeczywistej struktury uzbrojenia włóknami.

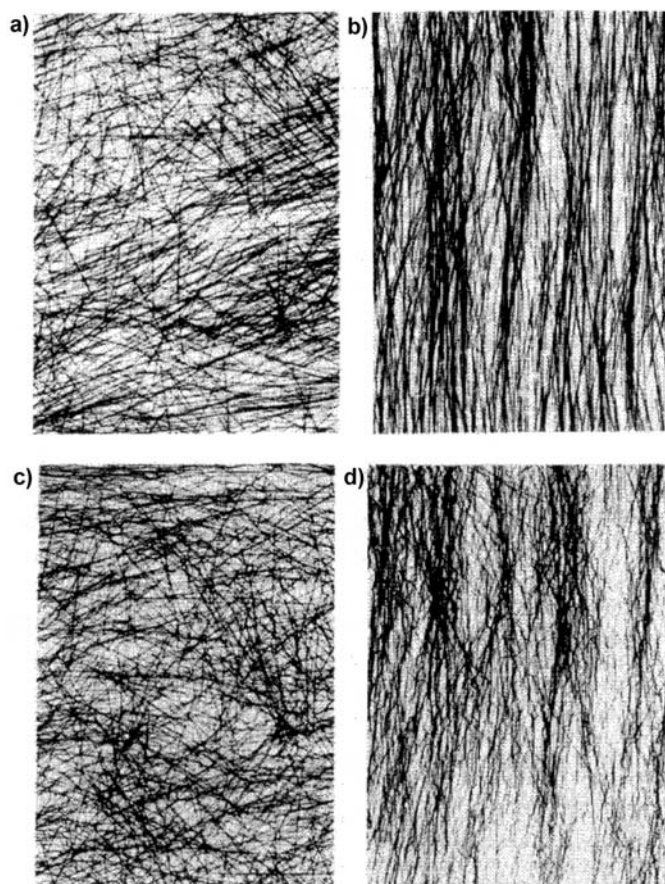


Rys.15. Układ punktów, pokazujących ślady włókien na przekroju poprzecznym, przygotowanym do komputerowej analizy obrazu [5]
Fig.15. System of points representing traces of fibres in a cross-section, prepared for analysis in a computer image analyser [5]



Rys.16. Parametry opisujące strukturę utworzoną z pojedynczych włókien [27]
Fig.16. Parameters describing the fibre structure made with single fibres [27]

Przykłady struktur utworzonych ze stalowych włókien pokazano na rysunku 17. Na radiogramach widać cztery różne struktury, przy czym można zauważyć wyraźne odchylenia od struktur idealnych. W przypadku struktur przypadkowych 2D, występują obszary o mniejszym lub większym zagęszczeniu włókien (rys. 17a i c). Przy włóknach linearyzowanych (rys. 17b i d), widać że pojedyncze włókna są odchylone od głównego kierunku i nie są równoległe do pozostałych.



Rys.17. Przykłady radiogramów płyt z zaprawy cementowej uzbrojone włóknami stalowymi, przy $V_f = 2\%$,

- a) gładkie proste włókna 2D,
- b) gładkie proste włókna linearyzowane 1D,
- c) włókna z haczykami 2D,
- d) włókna z haczykami 1D [5]

Fig.17. Examples of X-radiograms of cement mortar plates reinforced with steel fibres, $V_f = 2\%$,

- a) plain straight fibres 2D,
- b) plain straight fibres linearized 1D,
- c) fibres with hooks 2D,
- d) fibres with hooks 1D [5]

8. USZKODZENIA I DEFEKTY W STRUKTURACH BETONU

Wytrzymałość i trwałość elementów konstrukcyjnych z betonu jest w znacznej mierze określona przez defekty i uszkodzenia w strukturze stwardniałego betonu, dotyczy to w rezultacie bezpieczeństwa i użyteczności konstrukcji, a także elementów niekonstrukcyjnych, np. płyt elewacyjnych. Słabsze miejsca w betonie, lokalne zwiększenie porowatości, przypadkowe pustki i raki powodują bowiem koncentrację naprężeń i ułatwiają działanie różnych czynników zewnętrznych. W tych miejscach otwierają się i propagują rysy, prowadzące do zmniejszenia wytrzymałości, lokalnego zniszczenia materiału i końcowej awarii. Rysy i inne defekty powiększają przepuszczalność betonu, przez co różnorodne procesy korozyjne, wymywanie, karbonizacja i in. są rozpoczęte lub przyspieszone. Również możliwość uszkodzeń od działania mrozu jest znacznie powiększona, zwłaszcza jeżeli w porach i rysach otwartych na zewnątrz konstrukcji woda jest poddawana powtarzanym cyklom zamrażania i odmrażania.

Rysy i mikrorysy stanowią najczęściej badany rodzaj defektów w strukturze betonu. Ich układ, rozwartość, długość, gęstość (sumaryczna długość przypadająca na jednostkę powierzchni), łączność pojedynczych rys i inne właściwości można określać metodami komputerowej analizy obrazu. Stanowi to podstawę do całościowej analizy jakości betonu, jego wytrzymałości i trwałości, a także do oceny przyczyn stwierdzonych uszkodzeń [28].

Jednym z głównych celów analizy struktury stwardniałego betonu, przeprowadzanej różnymi metodami, jest obserwacja i rejestracja rys, defektów i lokalnych uszkodzeń. Analiza ich wielkości i rozkładu pozwala na oszacowanie stopnia zagrożenia dla bezpieczeństwa i trwałości konstrukcji. Można wówczas próbować określić przyczyny i źródła uszkodzeń, którymi mogą być np.:

- niska jakość składników betonu, bądź niezgodności zachodzące między nimi,
- niewłaściwa kompozycja betonu, tzn. nieodpowiednie proporcje składników, ustalone podczas projektowania materiału,
- błędy popełnione podczas przygotowania betonu, jego mieszania, transportu, zagęszczania, itp.,
- nieodpowiednia pielęgnacja betonu i zakłócenia w procesie hydratacji cementu,
- nie przewidziane obciążenia i oddziaływania zewnętrzne, np. w wyniku błędnej konstrukcji elementów lub nieodpowiedniej eksploatacji.

Defekty w strukturze betonu można niekiedy wykryć przez badanie próbek, zabetonowanych wraz z konstrukcją, ale najpewniejszym źródłem informacji jest badanie rdzeni, wyciętych z konstrukcji. Metody analizy struktury betonu na podstawie badania płaskich przekrojów, ograniczone do oceny stanu napowietrzenia, są szczegółowo opisane m.in. w pracy [29].

9. ZAKOŃCZENIE

Analiza struktury pozwala na wyjaśnienie podstawowych zależności właściwości materiału od parametrów jego struktury. Jest to skuteczna metoda postępowania, zwłaszcza odkąd dzięki komputerowej analizie obrazu można stosunkowo łatwo otrzymywać ilościowe wyniki w odniesieniu do podstawowych własności materiału.

Struktura i mikrostruktura materiału decydują o wszystkich właściwościach mechanicznych i trwałości betonu. Tradycyjne metody charakterystyki struktury materiałów betonowych obejmowały studia opisowe i różne ręczne metody analizy układu porów. Jednakże te metody miały takie oczywiste niedogodności, że dopiero zastosowanie ilościowej komputerowej analizy obrazu pozwala na uzyskanie istotnie przydatnych wyników.

Komputerowa analiza obrazu została rozwinięta pierwotnie do badania tkanek organicznych i struktur metali, a także do analizowania zdjęć satelitarnych do celów militarnych. Okazała się bardzo skuteczna także do badania kompozytów cementowych na różnych poziomach: od najniższego poziomu nanometrów przy użyciu zaawansowanych urządzeń, poprzez badanie tzw. cienkich szlifów, aż do makroskopowych obrazów płaskich przekrojów rdzeni i próbek betonowych, obserwowanych w świetle odbitym. Znaczenie ilościowej analizy struktury w wielu rodzajach badań betonu i określania jego jakości w konstrukcjach [17], [4], trudno jest obecnie przecenić.

Szczegóły metod badania struktury kompozytów o matrycach cementowych oraz przykłady ich zastosowań podane są m.in. w materiałach Seminarium AMAS [1].

BIBLIOGRAFIA

- [1] Int. Workshop on Structural Image Analysis in Investigations of Concrete. IFTR PAS, Centre of Excellence for Advanced Materials and Structures (AMAS), Warsaw 2002
- [2] *Mehta P.K.*: Concrete technology at the crossroads – problems and opportunities, w: P.K. Mehta Symposium on Durability of Concrete, Nice 1994
- [3] *Young J.F.*: Hydraulic Cements for Concrete. ACI, Detroit, MI, USA 1983
- [4] *Young J.F., Mindess S., Gray R.J., Bentur A.*: The science and technology of civil engineering materials, 382, Prentice-Hall, N. Jersey 1998
- [5] *Brandt A.M.*: Cement-based Composites: Materials, Mechanical Properties and Performance. E & FN Spon, 470, London 1995
- [6] *Kucharska L.*: Domieszki upłynniające w betonie, przykłady zastosowań. Beton na Progu Nowego Milenium, Polski Cement, 55-72, Kraków 2000
- [7] *Uchikawa H.*: Effect of blending component on hydration and structure formation. Proc. 8th Int. Congr. on Chemistry of Cement, 77, Rio de Janeiro 1986

- [8] *Zalocha D., Kasperkiewicz J.*: Zastosowanie ilościowej analizy obrazu do oceny struktury porów w betonie napowietrzanym. *Drogi i Mosty*, **2**, 107-118, 2002
- [9] *Johanse V., Andersen P.J.*: Particle packing and concrete properties. *Materials Science of Concrete II*, eds. *J. Skalny* and *S. Mindess*, The Amer.Cer.Soc., 111-147, Westerville OH 1991
- [10] *Dantu P.*: Étude des contraintes dans les milieux hétérogènes. Applications au béton. *Annales de l'ITBTP*, **11 (121)**, 55-67, 1957
- [11] *Glinicki M.A.*: Wpływ prędkości obciążenia na wytrzymałość i odkształcalność kompozytów z matrycą cementową. *Prace IPPT PAN*, nr 1, 239, Warszawa 1992
- [12] *Uchikawa H.*: Similarities and discrepancies of hardened cement paste, mortar and concrete from the standpoints of composition and structure. *J.of Research of the Onoda Cement Company*, **40**, No.119, 1-24, 1988
- [13] CEB Bulletin. *Durable Concrete Structures, Design Guide 2nd ed.*, No. 182, Lausanne 1989
- [14] *Venuat M.*: Adjuvants et traitements, 830, Paris 1984
- [15] *Wee T.H. et al.*: Performance of blended cement concretes in a marine environment. *Proc.Int. Seminar "Extending Performance of Concrete Structures"*, red.: *R.K. Dhir I P.A.J.Tittle*, 261-271, Dundee 1999
- [16] *Moranville-Regourd M.*: Microstructure des bétons à hautes performances, in: *Les Bétons à Hautes Performances*, red. *Y.Malier*. Presses de l'ENPC, 25-44, Paris 1992
- [17] *Materials Research Society MRS. Microstructure of Cement-Based Systems/Bonding and Interfaces in Cementitious Materials*, red.: *S. Diamond, S. Mindess, F.P. Glasser, L.W. Roberts, J.P. Skalny, L.D. Wakeley*, **370**, 577, Pittsburgh 1995
- [18] *Diamond S., Huang J.*: The interfacial transition zone: reality or myth? *The Interfacial Transition Zone in Cementitious Composites*, red.: *A. Katz, A. Bentur, M. Alexander, G. Arligui*, RILEM, *Proc.35*, 3-42, 1998
- [19] *Goldman A., Bentur A.*: Bond effects in High-Strength Silica-Fume Concretes. *ACI Materials Journal*, **86**, No.5, 440-447, 1989
- [20] *Darwin D.*: The interfacial transition zone: "Direct" evidence on compressive response. *Mat.Res.Soc.Symp.Proc.*, **370**, 419-427, 1995
- [21] *Potrzebowski J.*: Procesy odspajania i wywleknięcia stalowych włókien z matrycy cementowej, *Prace IPPT PAN*, nr 15, 199, Warszawa 1991
- [22] *Betterman L.R., Ouyang C., Shah S.P.*: Fiber-matrix interaction in microfiber-reinforced mortar. *Adv.Cem.Bas.Mat.* nr 2, 52-61, 1995
- [23] *Rossi P.*: Ultra-high-performance fiber-reinforced concretes. *Concrete International*, December, 46-52, 1982
- [24] *Bentur A., Mindess S.*: *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. Elsevier Applied Science, 449, London 1990

- [25] *Hannant D.J.: Fibre Cements and Fibre Concretes*. John Wiley&Sons, 219, Chichester 1978
- [26] *Aveston J., Kelly A.:* Theory of multiple fracture of fibrous composites. *J. of Materials Science*, 8, 3, 152-162, 1973
- [27] *Kasperkiewicz J.:* Struktura wewnętrzna a procesy pęknięcia w kompozytach z kruchą matrycą. *Prace IPPT PAN*, nr 39, 239, Warszawa 1983
- [28] *Wittmann H.F.:* Structure of concrete with respect to crack formation. *Fracture Mechanics of Concrete*, red. *F.H. Wittmann*, 43-74, Elsevier 1983
- [29] *Kasperkiewicz J., Zallocha D.:* Automatyczna analiza obrazu w ocenie napowietrzenia betonu. 46-ta Konferencja KILiW PAN i KN PZITB, 2, 199-206, Krynica 2000

MATERIAL STRUCTURES OF CEMENT – BASED COMPOSITES

Abstract

The term “structure of a material” covers the distribution of its components in space and the set of relations between them that are characteristic for the whole structure. The characterization of a material structure is also completed by data on the properties of the components.

The description of a material structure may be based either on assumptions related to an idealized perfect structure or on an analysis of a real structure. In most cases, both approaches are considered and their results are combined. The differences between these two approaches are caused by deviations from ideal models and by local imperfections. The homogeneity of a material is often assumed as an approximation at a given level of analysis and when a material at lower level is considered then its heterogeneous nature becomes obvious. When the models of materials at various levels are built, they are interrelated in a systematic way, or more precisely, the models on a considered level are deduced from the results observed at a lower level. All composite materials, including concrete, are heterogeneous by definition.

There is no one generally accepted classification of composites according to their structures. Composites used for construction may be described in terms of the matrix that is the continuous phase, and inclusions – which are embedded in the matrix. Usually, the structures are composed of inclusions strengthen the matrix (reinforcing inclusions: grains, fibres), but also fillers of low strength are used to enhance other properties e.g., thermal insulation, lower weight, etc.

The main aim of analysis of the structure of the hardened concrete by all methods is to record the structural defects. Their analysis allows to define how serious and dangerous the defects are with respect to safety and serviceability of the concrete construction. It is also possible to determine the origin and reasons of the defects..

The paper presents a survey of the structures of cement-based composites. Structure determines the final material properties. The analysis of structure of a hardened concrete is the basic approach to satisfy the requirements for Quality Assurance and Quality Control of civil engineering constructions made of ordinary and high performance concretes.

PODZIĘKOWANIA

Niniejsza praca powstała w ramach Projektu Badawczego Nr. 97.1888, realizowanego w Programie NATO "Science for Peace" w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN w latach 1999-2003.