

# Diagnostyka betonu na podstawie badania struktury

Prof. Andrzej M. Brandt, Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa

## 1. Wprowadzenie

Diagnostyka może dotyczyć różnych dziedzin, od biologicznego stanu zdrowia przez sytuację ekonomiczną lub społeczną, aż do zagadnień technicznych, np. stanu konstrukcji czy maszyny. Przyjęto rozumieć znaczenie tego słowa jako identyfikację objawów i obecnego stanu przedmiotu zainteresowania oraz poznanie przyczyn i skutków tego stanu. W diagnostyce betonu można odróżnić różne przyczyny wad lub uszkodzeń: pochodzenia mechanicznego, np. w wyniku nadmiernego obciążenia, także lokalne skutki działań chemicznych (korozja, reakcja alkalia-kruszywo i in.) lub fizycznych, np. zmian termicznych, cykli zamrażania. Niektóre uszkodzenia mają źródło w procesach zachodzących w zaczynie cementowym lub w warstwie kontaktowej, a inne wynikają z warunków użytkowania konstrukcji. Diagnoza może obejmować także przewidywanie zakresu i rodzaju oddziaływania stwierdzonych defektów na dalsze zmiany właściwości betonu. Rozwijane obecnie metody sztucznej inteligencji wnioskowania na podstawie wyników badań materiałów nie są tu rozważane. Diagnostyka ograniczona do samego betonu wiąże się z oceną wpływu stwierdzonego stanu na konstrukcję betonową, żelbetonową czy sprężoną i na jej zachowanie się w czasie eksploatacji. Nie można jednak przeceniać wpływu jakości materiału na awarie i katastrofy budowlane. Według analizy przeprowadzonej na podstawie

licznych źródeł i zestawień awarii budowlanych tylko między 7 a 15% przypadków było wynikiem wad betonów, [1]. Odmienne sytuacja przedstawia się w odniesieniu do trwałości konstrukcji – okazuje się, że niedostateczna trwałość obiektów betonowych związana jest najczęściej z niedostosowaniem jakości betonu do warunków jego pracy i z procesami niszczenia materiału, a więc betonu i uzbrojenia. W rezultacie, większość przypadków koniecznych napraw, wzmocnienia lub wymiany konstrukcji betonowych wynika z uszkodzeń i utraty przydatności materiału. Jako rodzaje uszkodzeń betonu zwykle występują: ubytki, odpryski, rysy, pęknięcia, usterki wyglądu. Przyczyny tych uszkodzeń to w kolejności znaczenia przede wszystkim korozja uzbrojenia na skutek karbonatacji w betonie i dyfuzji chlorków, uszkodzenia od cykli zamrażania i rozmrażania, korozja chemiczna, lokalne przeciążenie m.in. na skutek odkształceń termicznych i skurczowych, rzadziej – obciążeń użytkowych. Wszystkie wymienione procesy powinny być uwzględnione przy projektowaniu i wykonaniu betonu.

Analiza obrazów struktury staje się jedną z głównych metod w diagnostyce ale stosuje się wiele innych metod, prowadzących do oceny jakości i stanu betonu. Oprócz normowych oznaczeń (gęstość, nasiąkliwość, porowatość, przepuszczalność, mrozoodporność), można określić skład fazowy i chemiczny, wartość stosunku wody do spoiwa lub cementu,

poziom alkaliczności, oporność elektryczną, sorpcyjność, odporność na migrację jonów chlorkowych itd.

Referat obejmuje zagadnienia diagnozy betonu jako materiału konstrukcyjnego, ocenianego na podstawie analizy obrazów jego struktury. Struktura obserwowana może być na różnych poziomach i różnymi metodami. Bardzo przydatne są metody mikroskopii optycznej, zastosowane do zglądów oglądanych w świetle odbitym i do cienkich szlifów, obserwowanych w świetle przechodzącym. Badania takie polegają na odróżnianiu układów ziaren, porów, włókien, rys itd., a następnie analizowaniu tych obiektów jakościowo i ilościowo. Zastosowanie komputerowej analizy obrazu przynosi istotne informacje ilościowe, które stanowią podstawę diagnozy, [2].

## 2. Struktura betonu

### 2.1. Właściwości zależne i niezależne od struktury

Większość właściwości betonu zależy od jego struktury. Są to np. wytrzymałość, przepuszczalność cieczy i gazów, mrozoodporność, sorpcyjność. Wynikają one bezpośrednio ze składu betonu i rozmieszczenia elementów w strukturze materiału. Niezależne od struktury, są właściwości wynikające z budowy chemicznej składników: gęstość, rozpuszczalność, ognioodporność, kruchość, barwa, przewodność cieplna itd. Z tych powodów prawo mieszanin ma tylko ograniczone znaczenie



przy określaniu właściwości betonu, podobnie jak i innych kompozytów, [3].

### 2.2. Elementy struktury

Strukturę betonu można obserwować, rejestrować i badać począwszy od poziomu atomowego, przez mikro- i mezo- aż do poziomu makro-, w którym beton jest traktowany jako ośrodek jednorodny. Nazwy te są przyjmowane konwencjonalnie, a najczęściej obserwacje i badania struktury dotyczą poziomów od mikro- do makro-, w których rozmiary odróżnianych elementów zawarte są między 1  $\mu\text{m}$  a 10 mm.

Na różnych poziomach można odróżnić matryce i inkluzje, np. ziarna piasku są inkluzjami w zaczynie cementowym, a zaprawa jest matrycą, w której znajdują się ziarna kruszywa. Wyjaśnienia jakościowego i tym bardziej ilościowego procesów i zależności na danym poziomie zwykle trzeba szukać na poziomach niższych. Elementami tworzącymi strukturę betonu są ziarna kruszywa o rozmaitych rozmiarach, produkty hydratacji i niehydratyzowane ziarna cementu i dodatków mineralnych, wchodzących w skład spoiwa. Istotnym składnikiem struktury są pory różnych rozmiarów, wytworzone przez napowietrzenie oraz pustki powietrzne, powstałe podczas mieszania i układania betonu. Składnikami struktury mogą być rozproszone włókna z różnych materiałów i o różnym kształcie. Elementami struktury są również warstwy przejściowe pomiędzy matrycą, zaczynem lub zaprawą a ziarnami kruszywa, włóknami i mikrowłóknami.

Istotną cechą struktury betonu, w odróżnieniu od struktury innych materiałów, jest zmienność w czasie, począwszy od ciekłej mieszanki do stwardniałego betonu, dojrzewającego i reagującego na otoczenie przez cały czas.

### 2.3. Badanie struktury betonu

Metody badania struktury betonu

są liczne i polegają na wykorzystaniu rozmaitych procesów fizycznych i chemicznych. Pomiar podstawowych właściwości (wytrzymałość, gęstość, sprężystość) betonu w różnych obszarach i rejestracja wyników, a następnie ocena ich wpływu na wartości użytkowe w konstrukcji to zwykle początek badania, poprzedzający analizę struktury betonu.

Metody badań struktury betonu można klasyfikować według kilku kryteriów. Odróżniane są np. metody niszczące od nieniszczących i póniszczących, metody optyczne z wykorzystaniem mikroskopów optycznych i elektronowych, w świetle odbitym i przechodzącym, różnego rodzaju metody akustyczne, wreszcie badania tomograficzne.

Podstawową metodą badania struktury dojrzalego betonu jest jakościowa analiza obrazów struktury, a następnie komputerowa analiza obrazu, prowadząca do wyników ilościowych. Obraz musi odpowiadać celowi badania, a więc powinien przedstawiać badaną strukturę w sposób najbardziej czytelny i w odpowiedniej skali. Wybór i przygotowanie próbek, aby uzyskać prawdziwy i reprezentatywny obraz, niezakłócony przypadkowymi wpływami, i nadający się wnioskowania, jest podstawą poprawnego badania. W wielu przypadkach przygotowanie warunków do otrzymywania prawidłowych obrazów jest bardziej pracochłonne niż przeprowadzenie samych pomiarów.

Obserwacje trójwymiarowej struktury betonu są trudne wobec nieprzejrzystości składników, a metody tomograficzne nie są jeszcze dostatecznie rozwinięte mimo licznych prób w tym kierunku. Korzystając z praw stereologii można uzyskać informacje o budowie przestrzennej na podstawie płaskich obrazów, uzyskanych na odpowiednio przygotowanych powierzchniach próbek (zglądach, plane sections) lub na cienkich szlifach (thin sections). Obrazy

płaskie zawierają też interesujące informacje, a otrzymane na różnych głębokościach, pozwalają ocenić przestrzenny rozkład badanych obiektów.

Ilościowe wyniki pozwalają na prowadzenie analizy i wnioskowanie o wartości badanego materiału z różnych punktów widzenia: kontroli składu betonu i jakości składników, zaawansowania procesów twardnienia lub niszczenia w postaci uszkodzeń, przewidywanej trwałości w określonych warunkach użytkowania itp. Na podstawie ilościowej oceny struktury można określić zależności między parametrami struktury a technicznymi właściwościami i składem betonu, użytymi dodatkami i domieszkami, procesem wytwarzania, skutkami użytkowania i starzenia i in. Przykłady zastosowania analizy obrazu znaleźć można w publikacjach wielu znanych autorów:

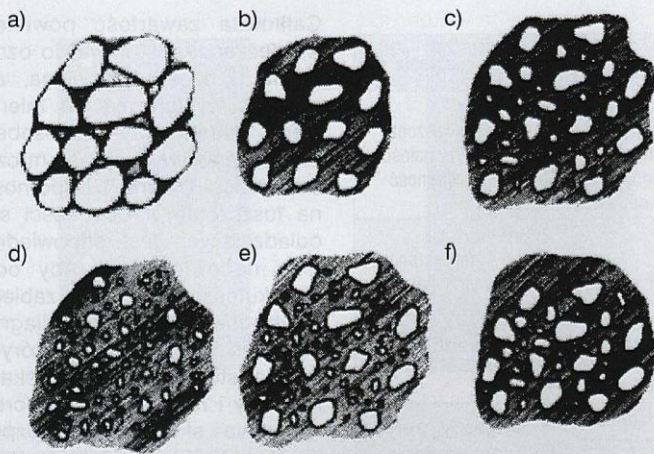
- analiza uziarnienia i rozmieszczenia kruszywa, [4];
  - analiza struktury zbrojenia rozproszonego, [5];
  - analiza stref przejściowych między zaczynem cementowym a kruszywem oraz między zaczynem a włóknami uzbrojenia rozproszonego, [6];
  - analiza ilości i struktury zarysowań i defektów, [7];
  - analiza struktury porów, [8];
  - określenia zasięgu karbonatyzacji, [9];
- a także oszacowanie wartości współczynnika w/c lub w/s, [10].

### 3. Struktury utworzone z ziaren kruszywa

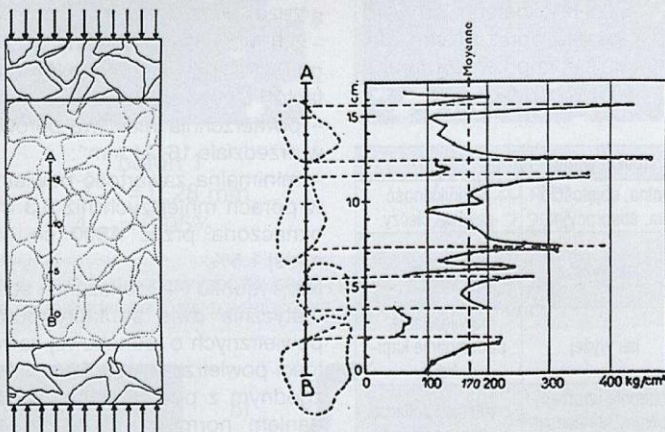
Ziarna kruszywa tworzą strukturę, która przenosi obciążenia. Ocena struktury utworzonej przez ziarna pozwala na wnioski o zawartości ziaren poszczególnych frakcji, procentowym udziale w całej objętości materiału i prawidłowości rozmieszczenia (rys. 1).

Ocena kruszywa w betonie polega na analizie obrazów struktury kruszywa uzyskanych ze zglądów lub cienkich szlifów. Na takim obrazie





**Rys. 1.** Schematy struktur utworzonych z ziaren kruszywa; a) ziarna o jednolitej wielkości, duży udział pustek, b) brak drobnych ziaren i nadmiar matrycy, c) ciągły rozkład wielkości ziaren, d) brak większych ziaren, e) brakuje ziaren pośredniej wielkości, f) możliwa segregacja ziaren, [3]



**Rys. 2.** Obraz struktury ziaren kruszywa uzyskany na powłoce fotoelastycznej i koncentracje naprężeń wzdłuż linii A-B, według [11]

można określić ilościowo, stosując komputerową analizę, rozmieszczenie ziaren i ich rozmiary, procentowy udział kruszywa, udział i jakość warstwy stykowej ziarnozaczyn itp. Uzupełniające badanie powinno dotyczyć rodzaju kruszywa, ewentualnej porowatości, zanieczyszczeń itd.

W zależności od rozkładu rozmiarów ziaren w wyniku obciążenia powstają większe lub mniejsze koncentracje sił wewnętrznych,

które wywołują naprężenia wielokrotnie przekraczające wartości średnie (rys. 2). Te właśnie naprężenia powodują lokalne przekroczenie wytrzymałości na rozciąganie i pęknięcia, i rysy pod stosunkowo niewielkimi obciążeniami. Podstawowa cecha betonu – wytrzymałość betonu na ściskanie – jest zależna od struktury utworzonej przez ziarna, obok wytrzymałości zaprawy i jej przyczepności do ziaren kruszywa, a zmniejszenie

koncentracji naprężeń powoduje wzrost wytrzymałości elementów betonowych, [11].

#### 4. Struktura porów w zaczynie cementowym

Pory i pustki w betonie mają różne pochodzenie i znaczenie, a ocena rozkładu, rozmiarów i kształtu porów ma decydujący wpływ m.in. na wnioski o trwałości betonu. Przykład klasyfikacji porów w betonie pokazany jest w tabeli 1.

Objętość zajmowana przez pory może być dostępna całkowicie, częściowo lub całkowicie zamknięta dla gazów i roztworów. Zależy to od struktury porowatości, której opis obejmuje:

- całkowitą zawartość porów;
- zawartość porów otwartych, dostępnych dla mediów, którą wyznacza się mierząc nasiąkliwość objętościową;
- zawartość porów zamkniętych;
- kształt, tzn. sferyczny – z napowietrzania, nieregularny – z załapanego powietrza i w mikrorysach, kapilary jednostronnie otwarte lub tworzące sieć połączonych naczyń, także pory o kształcie „butelkowym”, czyli o ograniczonym wejściu;
- rozkład rozmiarów porów.

Od całkowitej porowatości zależy wytrzymałość i moduł sprężystości. Od porowatości otwartej w kapilarach połączonych i średnicy < 50 nm zależy skurcz, pęcznienie i ogólnie zmiany objętości. Woda w porach > 50 nm zachowuje się jako wolna i ma istotny wpływ na trwałość betonu. Inny przykład klasyfikacji porów o rozmiarach do 1 mm pokazano w tabeli 2, ponieważ różne systemy klasyfikacji ułatwiają ocenę przyczyn i skutków porów zaobserwowanych podczas diagnostyki.

Rozkład rozmiarów porów można określać metodą porozymetrii rtęciowej, chociaż otrzymany obraz jest zniekształcony przez wpływ kształtu porów i ich połączenia. Strukturę porowatości należy raczej badać analizując komputerowo obrazy mikroskopowe, uzyskiwa-



Tabela 1. Pory w betonie, według [3]

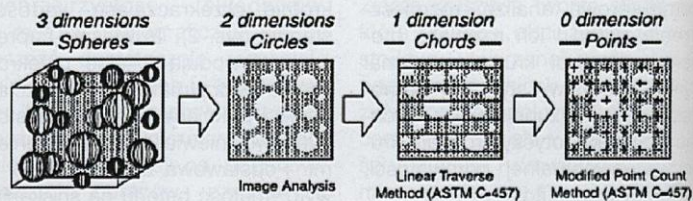
Klasyfikacja	Rozmiary	Metody badania	Przyczyny powstania	Znaczenie
Duże pory	> 500 μm	mikroskopia optyczna, obserwacja bezpośrednia	niedostateczne zagęszczenie lub brak właściwej pielęgnacji, nadmiar wody zarobowej	zmniejszona wytrzymałość i szczelność
Pory wprowadzone w wyniku działania środka napowietrzającego	10 μm – 1250 μm, optymalnie < 300 μm	mikroskopia optyczna	sztuczne napowietrzanie	zmniejszona wytrzymałość, odporność na cykle zamrażania
Pory kapilarne i żelowe według klasyfikacji IUPAC				
Makropory	> 50nm	porozymetria rtęciowa, SEM	pozostałości przestrzeni wypełnionych wodą w zaczynie	decydują o przepuszczalności i trwałości
Mezopory, pory żelowe	2–50 nm	porozymetria rtęciowa, adsorpcja-desorpcja gazów	pozostałości przestrzeni wypełnionych wodą, mniejsze pory rozmieszczone w C-S-H	procesy kapilarne powodują naprężenia podczas wysychania betonu
Mikropory	< 2 nm	sorpcja BET, NMR	rozmieszczone w C-S-H	procesy kapilarne

Tabela 2. Klasyfikacja porów w betonie

Nazwa	R*	Charakterystyka	Rodzaj wody	Efekt
Makropory-makrokapilary	1 mm	wypełniają się wodą w czasie < 1 s	wolna, objętościowa, absorpcyjna	przenikalność gazów i cieczy
Mezopory (pośrednie mezokapilary)	25 μm	wypełniają się wodą w czasie od minut do dziesiątek godzin	jak wyżej	jak wyżej
Mikropory (mikrokapilary)	1 μm	nie ustala się równowaga	jak wyżej	nawilgacanie, podciąganie kapilarne
Pory mezożelowe	25 nm	przejście od zjawisk związanych z objętością do fizyki powierzchni	wstępnie uporządkowany kondensat pary + woda adsorpcyjna	ciśnienie kapilarne, skurcz, pęcznienie, pęcznienie
Pory mikrożelowe	1 nm	fizyka powierzchni	unieruchomiona, adsorbowana	jak wyżej

\*promień hydrauliczny R, stosunek powierzchni przekroju do długości obwodu przekroju

ne ze szlifów próbek betonowych (rys. 3). Badanie takie naśladuje w zasadniczy sposób tradycyjną metodę wprowadzoną pierwotnie w zaleceniu ASTM C 457. Pory powstałe przypadkowo w wyniku nieodpowiedniego doboru składników lub technologii mieszania i układania mieszanki betonowej wpływają negatywnie na wytrzymałości, szczelność i mrozoodporność betonu.

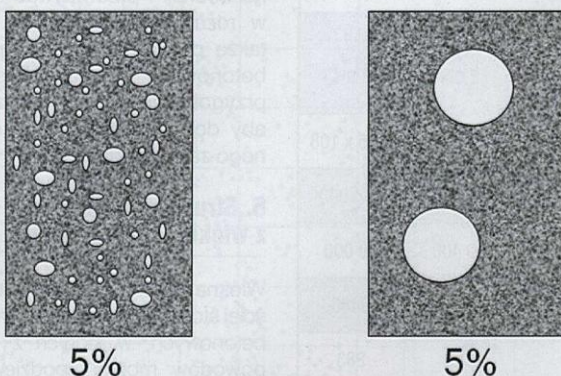


Rys. 3. Schemat uzyskiwania ilościowej analizy rozkładu porów powietrznych w betonie, [8]

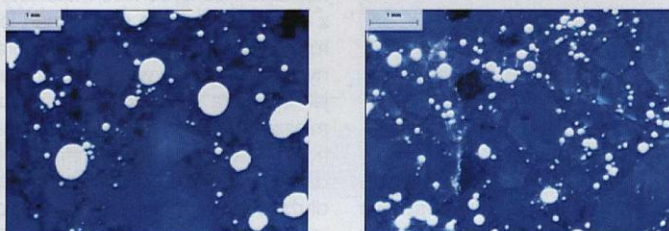
Całkowita zawartość powietrza w mieszance jest łatwa do oznaczenia i często określana, ale nie jest wystarczającym miernikiem. Podstawowym sposobem zapewnienia wymaganej mrozoodporności betonu i odporności na tuszzenie w obecności soli odladzających jest odpowiednie jego napowietrzanie. Aby ocenić skuteczność takiego zabiegu niezbędne są badania diagnostyczne, na podstawie których można stwierdzić czy uzyskane rozmiary i rozmieszczenie porów zapewnia skuteczne zabezpieczenie. Struktura takich porów powinna odpowiadać kilku warunkom, aby stały się skuteczną ochroną; są to według [2]:

- całkowita zawartość powietrza w betonie A zawarta między 4 a 7%;
  - średnia odległość do najbliższego pora powietrznego (spacing factor)  $\bar{L}$  poniżej 0,2 lub 0,22 mm;
  - powierzchnia właściwa porów  $\alpha$  w przedziale 16–24 mm<sup>2</sup>;
  - minimalna zawartość powietrza w porach mniejszych niż 0,3 mm oznaczona przez A300 co najmniej 1,5%.
- Na rysunku 4 pokazano schematycznie dwie struktury porów powietrznych o jednakowej zawartości powietrza (około 5%), to jest zgodnym z podstawowym wymaganiem normowym. Jest zrozumiałe, że tylko w przypadku jednej z tych struktur można oczekiwać zabezpieczenia betonu od uszkodzenia w warunkach cyklicznego zamrażania i odmrażania, stąd





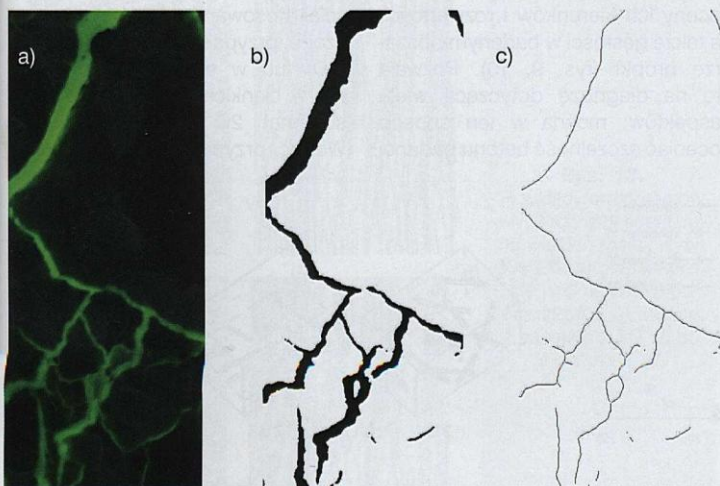
**Rys. 4.** Dwa schematyczne obrazy struktur porów powietrznych w betonie, według [13]



beton 1  
 $\bar{L} = 0,28 \text{ mm}$   
 $A_{300} = 0,95\%$

beton 2  
 $\bar{L} = 0,20 \text{ mm}$   
 $A_{300} = 2,27\%$

**Rys. 5.** Dwa przykłady rzeczywistych struktur porów powietrznych; widać różnice odpowiadające różnym wartościom wskaźnika  $\bar{L}$ , według [14]

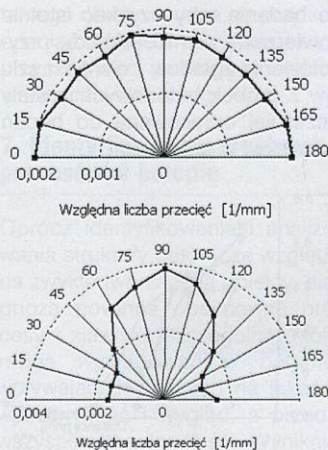


**Rys. 6.** Obróbka obrazu rys: a) oryginalny obraz kolorowy, b) obraz po binaryzacji, c) obraz binarny po szkieletyzacji, [2]



**Rys. 7.** Schemat układu siecznych nałożonych na analizowaną powierzchnię i wyniki zliczania przecięć, [2]

konieczność spełnienia pozostałych warunków. Dlatego ograniczenie wymagania do zawartości powietrza w mieszance nie jest wystarczające do postawienia prawidłowej diagnozy, [12]. Na kolejnym (rys. 5) pokazano obrazy dwóch rzeczywistych struktur porów, powstałych w wyniku różnic w procesie napowietrzania. Tylko jedna z tych struktur spełnia wymagania i z dużym prawdopodobieństwem tak napowietrzony beton okaże się trwały. Badanie struktury porów powietrznych umożliwia określenie odporności betonu na cykle mrożenia, zwłaszcza w obecności roztworu soli odładzających. Warunkiem jest jednak bardzo staranne zabez-

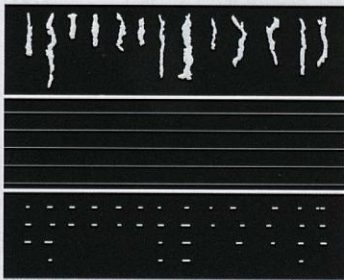


**Rys. 8.** Przykłady rys rozłożonych w sposób jednorodny i z przewagą jednego kierunku, [15]



**Tabela 3.** Przykłady uzbrojenia matrycy betonowej włóknami rozproszonymi, [2]

Rodzaje włókien	Rozmiary		Liczba włókien w 1 cm <sup>3</sup> = 10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup>			
	objętość pojedynczego włókna		0,5%	1,0%	2,0%	3,0%
Włókna azbestowe	0,1 μm x 4 mm		1,59 x 108	3,18 x 108	6,36 x 108	9,55 x 108
	3,14 · 10 <sup>-9</sup> mm <sup>3</sup>					
Włókna węglowe PAN	6 μm x 3 mm		59 000	118 000	236 000	354 000
	8,5 · 10 <sup>-5</sup> mm <sup>3</sup>					
Włókna węglowe „pitch”	14,5 μm x 3 mm		10 100	20 200	40 400	60 000
	0,000495 mm <sup>3</sup>					
Włókna PVA	24 μm x 7 mm		1580	3160	6320	9480
	0,00317 mm <sup>3</sup>					
Stalowe mikrowłókna	0,15 x 6 mm		49	98	189	283
	0,106 mm <sup>3</sup>					
Stalowe włókna	0,4 x 30 mm		1,33	2,65	5,31	7,96
	3,77 mm <sup>3</sup>					
	0,8 x 50 mm					
	25,13 mm <sup>3</sup>					

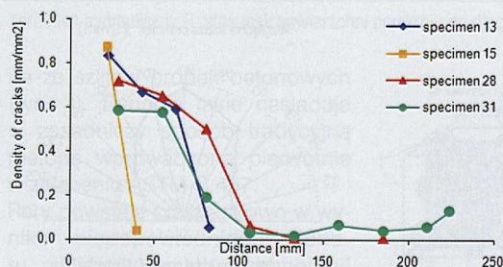


**Rys. 9.** Układ uporządkowany rys przygotowany do zliczania rozwartości, [15]

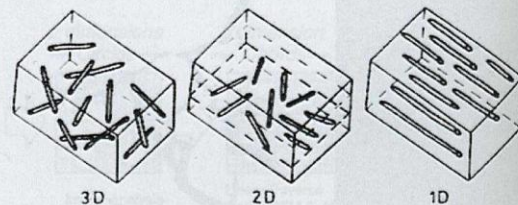
pieczenie i przygotowanie próbek do badania, aby uzyskać istotnie powtarzalne wyniki. Metody przygotowania zglądów i cienkich szlifów z próbek betonowych zostały wcześniej opracowane do badań minerałów w petrografii.

### 5. Struktura rys w betonie

Struktura rys może być analizowana na podstawie obrazów zglądów w świetle odbitym, [15], [16] lub obrazów cienkich szlifów w świetle przechodzącym. Procedura przeprowadzenia analizy ilościowej na podstawie obrazu układu rys pokazana jest na rysunku 6. W wyniku można uzyskać także rozkład kierunków rys (rys. 7, 8). Przygotowanie obrazów rys i przeprowadzenie komputerowej analizy stwarza podstawy do ilościowej oceny ich kierunków i rozwartości, a także gęstości w badanym obszarze próbki (rys. 9, 10). Pozwala to na diagnozę dotyczącą wielu aspektów; można w ten sposób oceniać szczelność betonu badanej



**Rys. 10.** Przykłady obliczonych gęstości rys w różnych próbkach i na różnych poziomach od powierzchni górnej, [15]



**Rys. 11.** Struktury idealne utworzone z krótkich rozproszonych włókien, [2]

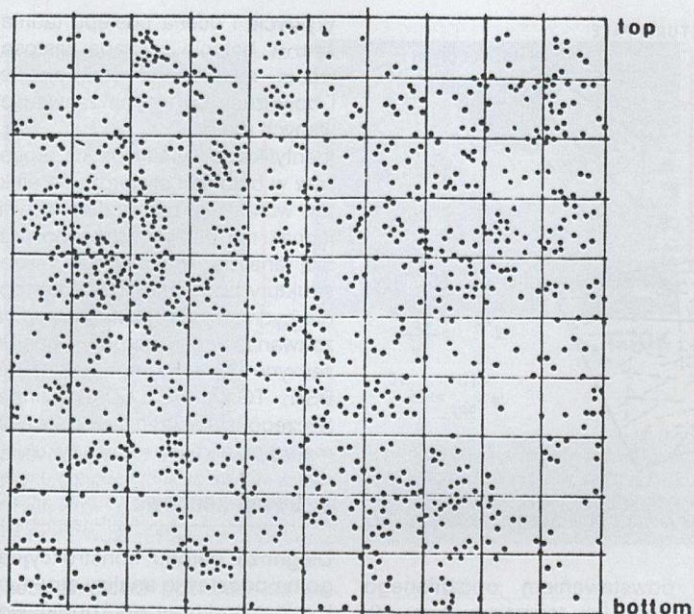
konstrukcji i przewidywać trwałość w rozmaitych warunkach, można także porównywać rysoodporność betonów o różnym składzie przygotowanych w laboratorium, aby dobrać najlepszy do określonego zastosowania, [2].

### 6. Struktury utworzone z włókien rozproszonych

Włókna rozproszone są coraz częściej stosowane w takich elementach betonowych, w których z różnych powodów można spodziewać się występowania lokalnych naprężeń rozciągających o znacznych wartościach i nie w pełni określonych kierunkach. Różnorodność materiałów, z których wykonane są włókna i ich rozmiarów pokazano na kilku wybranych przykładach w tabeli 3. Widać jak struktura drobnych i gęsto rozmieszczonych włókien może przyczynić się do lokalnego rozciągania i przeciwdziałać powstawaniu mikrorys, zaś dłuższe włókna są w stanie kontrolować rozwój rys i wzmacniać element fibrobetonowy. Uzbrojenie włóknami i mikrowłóknami jest skuteczne jedynie przy prawidłowym rozmieszczeniu, co jest często przedmiotem diagnozy w przypadkach wystąpienia lokalnych uszkodzeń.

Na rysunku 11 pokazano idealne struktury włókien, przy czym najczęściej stosowane są włókna rozproszone przypadkowo w przestrzeni (3D) lub w elementach płaskich, np. w cienkich płytach, i wówczas schemat 2D jest przyjmowany. Wobec przypadkowego rozmiesz-

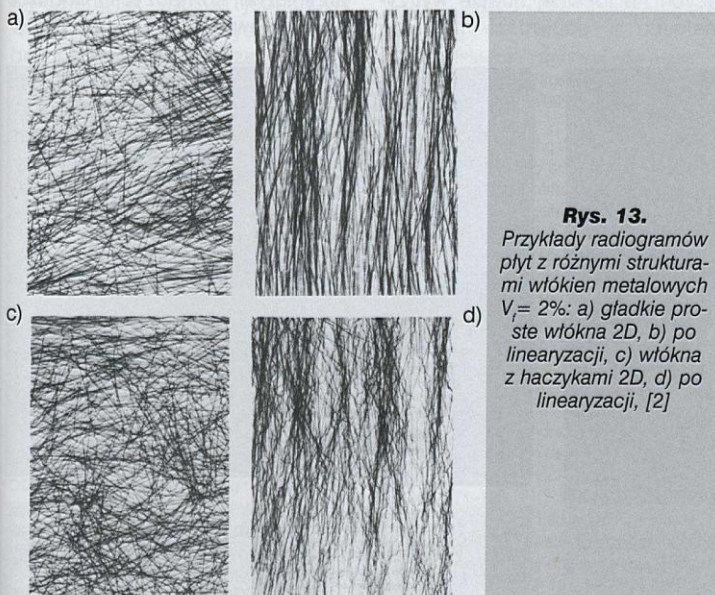




**Rys. 12.** Ślady pojedynczych włókien stalowych na przekroju poprzecznym próbki, przygotowanym do komputerowej analizy obrazu, [2]

czenia i ukierunkowania włókien, należy te określenia traktować jako przybliżone, tzn. dotyczące sytuacji, w których znaczna większość włókien odpowiada idealnemu ułożeniu. W przypadku włókien stalowych, obrazy struktur utworzonych

przez włókna w stwardniałej matrycy cementowej można uzyskać pośrednio przez zliczanie śladów włókien na odpowiednio wykonanych szlifach (rys. 12), bądź bezpośrednio z rentgenogramów cienkich próbek (rys. 13).



**Rys. 13.**

Przykłady radiogramów płyt z różnymi strukturami włókien metalowych  $V_f = 2\%$ : a) gładkie proste włókna 2D, b) po linearyzacji, c) włókna z haczykami 2D, d) po linearyzacji, [2]

Poza szczególnymi zastosowaniami, zawartość włókien zwykle nie przekracza 3% objętościowo ze względów technologicznych i ekonomicznych, a ich rozmieszczenie w przestrzeni najczęściej odpowiada schematowi 3D.

Analiza obrazów prowadzi do oceny rzeczywistej ilości włókien wprowadzonych do matrycy, przez zliczenie śladów pojedynczych włókien, a następnie przy wykorzystaniu prostych zależności wprowadzonych w pracy [5] i podanych także w [2], można uzyskać kwalifikacje rzeczywistych struktur włókien do jednej z pokazanych na rysunku 11. Często zdarza się, że deklarowana przez wykonawcę zawartość włókien jest w rzeczywistości znacznie mniejsza lub włókna są wadliwie ułożone, co pozwala na wyjaśnienie nadmiernych zarysowań. Szczegółowy opis takiej analizy podany jest m.in. w pracy [9].

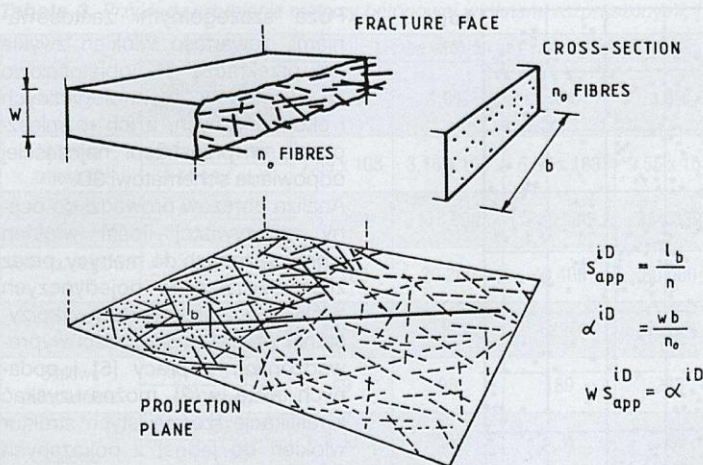
Określenie struktury innych włókien, które nie zostawiają tak wyraźnych śladów jak stalowe, możliwe jest tylko przez analizowanie odpowiednio przygotowanych obrazów, na których takie włókna są widoczne.

Na rysunku 15 widać strukturę wiązki włókien szklanych w zaczynie cementowym. Na podstawie takiego obrazu można na przykład oceniać różnice między warunkami przyczepności do matrycy włókien wewnętrznych i brzegowych.

## 7. Identyfikacja szczególnych procesów w betonie

Oprócz identyfikowania i analizowania struktury betonu ze względu na zwykle tworzące ją obiekty, diagnoza powinna obejmować procesy i zjawiska szczególne, które mogą występować w betonie, wpływając decydująco na jakość, wytrzymałość i wygląd, a przede wszystkim na trwałość. Wynikają one często z procesów lub wydarzeń znanych przed przystąpieniem do formułowania diagnozy, co w pewnym zakresie może



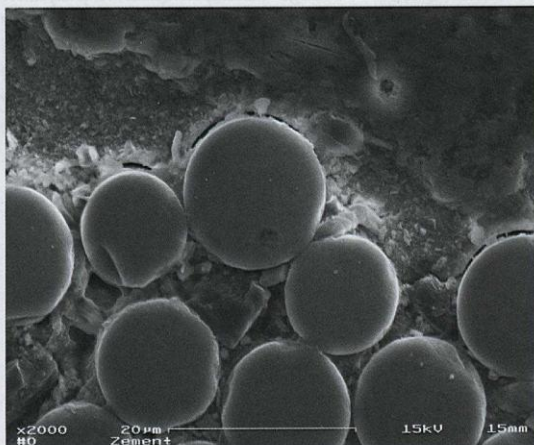


Rys. 14. Parametry opisujące strukturę utworzoną z pojedynczych włókien, [5]

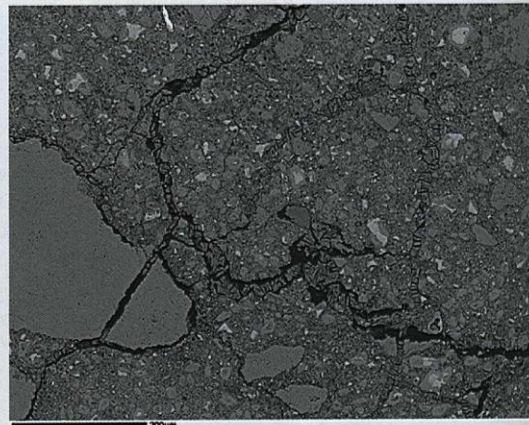
ułatwiać zadanie, np. w przypadku oceny przydatności betonu po pożarze, po wczesnym zamrożeniu lub betonowych konstrukcji zabytkowych.

Oddzielnym zagadnieniem, związanym z diagnostyką betonu jest analiza przyczyn stwierdzonych uszkodzeń, przy czym najczęściej występuje kilka przyczyn o różnym znaczeniu, a ich skutki sumują się w postaci łącznych efektów. Znane są przypadki łącznego występowania reakcji alkalia-kruszywo (krzemianowe, węglanowe)

z powstawaniem opóźnionego ettringitu lub taumazytu (rys. 16, 17). Rozwój opóźnionego ettringitu może powodować pojawienie się spękań (mikrorys i rys.), podobnie jak produkty reakcji AKR, a efektem jest postępujące uszkodzenie elementów betonowych. Analiza zjawisk w strefach kontaktowych ma tu szczególne znaczenie, [23]. Występowanie taumazytu może prowadzić do szczególnie groźnych uszkodzeń betonu, polegających na lokalnej utracie wytrzymałości i spójności matrycy.



Rys. 15. Struktura wiązki pojedynczych włókien szklanych z matrycy cementowej, [17]



Rys. 16. Obraz uzyskany z mikroskopu skaningowego (BSE). Widać na wygładzonej powierzchni próbki szczeliny wokół ziaren kruszywa, wypełnione przez ettringit, [21]

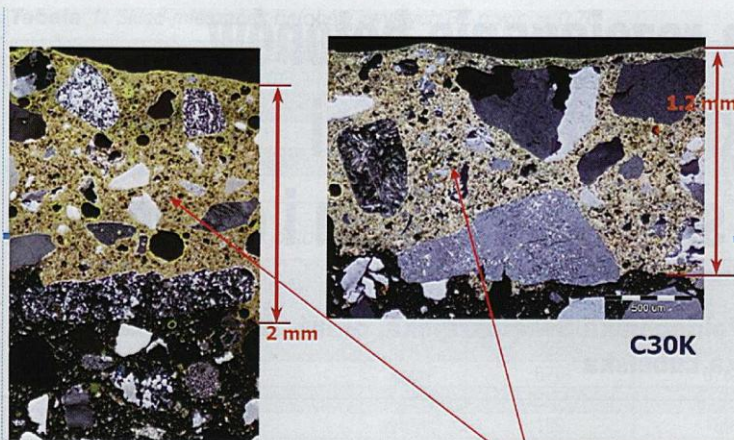
Wykrycie i ocena postępu taumazytu w betonie wymaga zastosowania mikroskopii elektronowej i optycznej lub innych zaawansowanych metod.

Identyfikacja wymienionych procesów w betonie i stwierdzenie efektów wchodzi w zakres diagnostyki, jednak nie polega na bezpośredniej analizie struktury lub mikrostruktury, podobnie jak ocena stopnia hydratacji, [18]. Stosowane są zaawansowane metody badania zaczynu cementowego, jak: SEM, BSE, TGA, XRD, EDXA i inne. Szczegółowe przedstawienie tych metod przekracza ramy artykułu.

## 8. Uwagi końcowe

Diagnoza betonu konstrukcyjnego na podstawie analizy struktury i mikrostruktury ma podstawowe znaczenie zarówno przy ocenie stanu istniejącej konstrukcji, jak również przy wyborze i składzie betonu do podejmowanego zadania, [19]. W pierwszym przypadku badania prowadzone są na próbkach pobranych podczas betonowania lub części z próbek wyciętych z badanych elementów. W drugim – próbki wykonane są w laboratorium przy różnej kompozycji i doborze składników.





**Rys. 17.** Obrazy warstw skarbonatyzowanych w próbkach dwóch betonów, uzyskane metodą cienkich szlifów. Obraz z lewej strony: beton z cement portlandzkiego. Obraz z prawej strony: 30% cement portlandzkiego zastąpiono popiołem fluidalnym, [22]

Niezależnie od pochodzenia badanych próbek, niezmiernie ważna jest ich reprezentatywność w stosunku do badanego elementu i właściwe przechowanie, a następnie odpowiednie przygotowanie do badania. Zastosowanie różnych metod badawczych wymaga specjalnych sposobów przygotowania próbek, od wykonania zglądów, przez cienkie szlify aż do napyłania powierzchni. Każda z tych operacji musi być wykonana w sposób jednakowy w odniesieniu do wszystkich próbek badanej partii, przez wykwalifikowany i doświadczony personel, zachowując sprawdzoną technikę i stosując gwarantowane materiały pomocnicze. Wszystkie te uwagi mają na celu zmniejszenie znaczenia efektów przypadkowych i zakłóceń, aby otrzymać jak najlepsze obrazy.

Uzyskane obrazy struktury i mikrostruktury mogą być oceniane wizualnie, ale zasadnicze metody wchodzą do zakresu komputerowej analizy obrazu. Uzyskane wyniki jakościowe w postaci identyfikacji obiektów na otrzymanych obrazach oraz wyniki ilościowe dotyczące rozmiarów, powierzchni, kierunków, gęstości i innych wskaźników, są istotnym elementem diagnozy jakości betonu.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Kucharska L., Katastrofy, awarie i uszkodzenia a beton i jego rozwój. XX Konf. „Awarie Budowlane”, 2001, 89–118
- [2] Metody diagnozowania betonów i betonów wysokowartościowych na podstawie badań strukturalnych, A.M.Brandt, J.Kasperkiewicz red., IPPT-NATO, Sc. Aff. Div., Warszawa 2003, s. 218
- [3] Brandt A. M., Cement based composites. Materials, mechanical properties and performance (2nd ed.), Taylor & Francis, London 2009, s. 526
- [4] Jensen A. D., Eriksen K., Chatterji, S., Thaulow N., Brandt I., Petrographic analysis of concrete. Beton-Teknik, Aalborg Portland, 1985, p. 12
- [5] Kasperkiewicz J., Struktura wewnętrzna a procesy pęknięcia w kompozytach z kruchą matrycą. Prace IPPT PAN, nr 39, Warszawa 1983, s. 239
- [6] Diamond S., Huang J., The interfacial transition zone: reality or myth? w: Proc. Int. RILEM Conf. "The Interfacial Transition Zone in Cementitious Composites", Haifa 1998, 3–39
- [7] Ringot E., Automatic quantification of microcracks network by stereological method of total projections in mortars and concretes, Cem. & Concr. Res., 18, 1988, 35–43
- [8] Pleau R., Pigeon M., Laurecot J. L., Some findings on the usefulness of image analysis for determining the characteristics of the air-void system on hardened concrete. Cem. & Concr. Comp., 23, 2001, 237–246
- [9] Sanjuán M. A., Andrade C., Cheyrez M., Concrete carbonation depth in natural and accelerated conditions. Adv. in Cem. Res., 15, 4, 2003, 171–180
- [10] Jacobsen U. H., Laugesen P., Thaulow N., Determination of water to cement ratio in hardened concrete by optical fluorescence microscopy. A.C.I., SP-191, 1999, 27–42
- [11] Dantu P., Etude des contraintes dans les milieux hétérogènes. Applications au béton. Annales de l'ITBTP, 11 (121), 1957, 55–67
- [12] Dequiedt A.S., Coster M., Chermant L., Chermant J. L., Distances between air-voids in concrete by automatic methods. Cem. & Concr. Comp., 23, 2001, 247–254
- [13] Kurgan G. J., Air Void Analyzer: An American Perspective, w: Seminar on Advanced NDT Techniques for Concrete Structures, Warsaw, 20 May 2007
- [14] Józwiak-Niedźwiedzka D., Kowalska D., Ocena parametrów struktury napowietrzenia betonów w nawierzchniach lotniskowych, w: Konf. „Dni betonu”, Wisła 2008, Stow. Prod. Cem. Kraków, 719–727
- [15] Litorowicz A., Identification and quantification of cracks in concrete by optical fluorescent microscopy. Cem. & Concr. Res., 36, 2006, 1508–1515
- [16] Ammouche A., Breyse D., Hornain H., Didry O., Marchand J., A new image analysis technique for the quantitative assessment of microcracks in cement-based materials Cem. & Concr. Res., 30, 2000, 25–35
- [17] Glinicki M. A., Brandt A. M., Quantification of glass fibre-cement interfacial properties by SEM-based push-out test, w: Proc.Int. Workshop on HPRCC, A.E. Naaman i H.W. Reinhardt red., Mainz 2007, RILEM Publ., 343–350
- [18] Feng X., Garboczi E. J., Bentz D. P., Stutzman P. E., Mason T. O., Estimation of the degree of hydration of blended cement pastes by a scanning electron microscope point-counting procedure. Cem. & Concr. Res., 34, 2004, 1787–1793
- [19] Walker H. N., Lane D. S., Stutz P. E., Petrographic methods of examining hardened concrete: A petrographic manual. Fed. Highway Adm., July 2006, s. 351
- [21] Thomas M., Folliard K., Drimalas T., Ramlochan T., Diagnosing delayed ettringite formation in concrete structures. Cem. & Concr. Res., 38, 2008, 841–847
- [22] Józwiak-Niedźwiedzka D., badania niepublikowane, 2010
- [23] Diamond S., Considerations in image analysis as applied to investigations of the ITZ in concrete. Cem. & Concr. Comp., 23, 2001, 171–178

Autor dziękuje Paniom prof. dr hab. inż. Leokadii Kucharskiej i dr inż. Darii Józwiak-Niedźwiedzkiej za życzliwą dyskusję przygotowującego tekstu i wniesione cenne uwagi.