

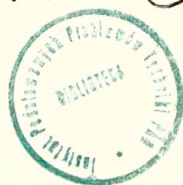
**3.10. – akustyka, badania materiałowe**

**J. Hoła, Z. Ranachowski,**

**WYKORZYSTANIE METODY  
EMISJI AKUSTYCZNEJ  
W OCENIE WPŁYWU CZYNNIKÓW  
TECHNOLOGICZNYCH I EKSPLOATACYJNYCH  
NA PROCES NISZCZENIA BETONU**

**37/1992**

P.269



**W A R S Z A W A 1 9 9 2**

<http://rcin.org.pl>

ISSN 0208-5658

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 30 listopada 1992 r.



56700



Na prawach rękopisu

---

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN  
Nakład 100 egz. Ark.wyd. 1,30 Ark.druk. 1,6  
Oddano do drukarni w grudniu 1992 r.

---

Wydawnictwo Spółdzielcze sp. z o.o.  
Warszawa, ul.Jasna 1

Jerzy HOŁA  
Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej

Zbigniew RANACHOWSKI  
IPPT Warszawa

WYKORZYSTANIE METODY EMISJI AKUSTYCZNEJ  
W OCENIE WPŁYWU CZYNNIKÓW, TECHNOLOGICZNYCH  
I EKSPLOATACYJNYCH, NA PROCES NISZCZENIA BETONU

W pracy zaprezentowano rezultaty badań dotyczące oceny wpływu kilku istotnych czynników technologicznych na proces niszczenia betonu, z wykorzystaniem emisji akustycznej jako metody badawczej. Szczególną uwagę zwrócono na takie czynniki jak uziarnienie kruszywa, wilgoć i obróbkę termiczną. Omówiono także znaczenie naprężeń krytycznych w betonie oraz sposób ich wyznaczania przy wykorzystaniu pomiarów emisji akustycznej. Wskazano bibliografię zawierającą szczegółowe informacje dotyczące omawianego problemu.

## 1. WPROWADZENIE

Beton jest materiałem wieloskładnikowym, powstałym z zespolenia ziarn stosu okruszowego w sztuczny kamień w wyniku stwardnienia zaczynu cementowego. Do najważniejszych składników tworzących strukturę stwardniałego betonu należy kruszywo, spoiwo, warstwy kontaktowe łączące powyższe składniki, pory oraz nieprzekryształizowane ziarna cementu. Ta wieloskładnikowość powoduje, że struktura tego materiału jest wyraźnie heterogeniczna i anizotropowa, zawierająca szereg różnych defektów i nieciągłości powstałych już na etapie jej tworzenia się. Podstawowe właściwości mechaniczne betonu uzależnione są od wzajemnych propor-

cji, przestrzennego rozmieszczenia i współpracy między sobą wymienionych składników. Jego własności użyteczne powodują, że jest to podstawowy materiał konstrukcyjny stosowany do wznoszenia najprzeróżniejszych konstrukcji budowlanych i inżynierskich. Z uwagi na niejednorodność struktury betonu i równoczesną powszechność jego stosowania w budownictwie, szczególnie istotne są badania dotyczące poznania procesu niszczenia tego materiału w wyniku działania obciążenia zewnętrznego. Chodzi zwłaszcza o potrzebę znajomości wpływu na ten proces wielu ważnych czynników technologicznych i eksploatacyjnych, który to fakt jest podkreślany między innymi w pracach [1,2,3,4,5,6,7,8,9]. Potrzeba ta wynika przede wszystkim z dążenia zarówno projektantów jak i wykonawców do optymalnego doboru składu betonu oraz technologii jego wykonania, odpowiednio do przewidywanego przeznaczenia i warunków panujących podczas eksploatacji. Wiąże się to z koniecznością zapewnienia konstrukcjom wykonanym z tego materiału żądanej trwałości i bezpieczeństwa.

W pracy niniejszej zamieszczono przede wszystkim rezultaty badań dotyczące oceny wpływu na proces niszczenia betonu tak istotnych czynników technologicznych i eksploatacyjnych jak uziarnienie kruszywa, wilgoć i obróbka termiczna.

## 2. PRZEBIEG PROCESU NISZCZENIA STRUKTURY BETONU W ŚWIETLE LITERATURY

W wyjaśnieniu zjawisk związanych z rozwojem i przebiegiem mikrozarzysowania struktury betonu szczególną rolę odegrały zwłaszcza prace [1,10,11]. Zamieszczone zostały w nich rezultaty bezpośrednich obserwacji procesu powstawania i rozwoju mikrokręty w obciążonym betonie, uzyskane w wyniku zastosowania metod mikroskopowej i mikroskopowo-rentgenograficznej. Źródłem istotnych danych, także przyczyniających się do wyjaśnienia tego zjawiska są między innymi prace [2,4,5,6,7,12,13,14,15], zawierające rezultaty badań uzyskane w wyniku stosowania metody pomiaru odkształceń oraz metod ultradźwiękowej i elektrooporowej. W oparciu o rezultaty badań zawarte w wymienionych wyżej pracach przyjmuje się aktualnie za udowodnione, że przebieg

procesu niszczenia betonu ma charakter trójstadialny. Zgodnie z opisem zawartym w wyżej wymienionych pracach, stadium pierwsze tego procesu zwane jest stadium stabilnej inicjacji rys. Charakteryzuje się ono lokalizowaniem mikrorys zapoczątkowanych już na etapie tworzenia się materiału, w postaci mikroszczelin i porów. Charakterystycznym jest, że na tym etapie niszczenia betonu istniejące mikrorysy nie rozwijają się, zachodzi natomiast zjawisko ich pomnażania. Wzrost obciążenia powoduje, że proces niszczenia betonu wchodzi w stadium stabilnej propagacji rys. W stadium tym następuje propagacja mikrorys już istniejących oraz tworzenie się nowych stabilnych mikrorys, zwłaszcza wskutek niszczenia przyczepności między ziarnami kruszywa i zaczynem oraz ziarnami kruszywa i zaprawą jak i samego zaczynu i zaprawy. Przy dalszym wzroście obciążenia proces niszczenia betonu wchodzi w stadium niestabilnej propagacji rys. Tworzą się wyraźne szerokie rysy rozprzestrzeniające się w sposób niestabilny do tego stopnia, że struktura betonu zaczyna wykazywać cechy ciała zdylatowanego. Stadium to kończy się całkowitym zniszczeniem betonu. Omówiony trójstadialny charakter przebiegu niszczenia betonu został także potwierdzony w badaniach, które zrealizowane zostały z wykorzystaniem metody emisji akustycznej [8,16,17].

Charakterystyczne poziomy obciążenia będące granicami dla jakościowo różnych stadiów niszczenia betonu przyjęto w literaturze nazywać naprężeniami krytycznymi  $\sigma_I$  i  $\sigma_{II}$  [1,2,12,13,6,7], przy czym naprężenia  $\sigma_I$  rozgraniczają stadium stabilnej inicjacji rys od stadium stabilnej propagacji rys, natomiast naprężenia  $\sigma_{II}$  rozgraniczają stadia stabilnej i niestabilnej propagacji rys. Warto nadmienić, że zwłaszcza w literaturze anglojęzycznej naprężenia krytyczne  $\sigma_I$  oznaczane są przez  $\sigma_i$  i zwane inicjującymi natomiast naprężenia krytyczne  $\sigma_{II}$  oznaczane są przez  $\sigma_{cr}$  i zwane krytycznymi [1,2,12,13].

### 3. ZNACZENIE NAPRĘŻEŃ KRYTYCZNYCH W BETONIE I SPOSÓB ICH WYZNACZANIA PRZY WYKORZYSTANIU POMIARÓW EA

Zagadnieniu znaczenia oraz określania wartości naprężeń krytycznych w betonie poświęcono szereg prac [1,2,12,13,6,7,15, 17,18,19,20]. Uznaje się, że naprężenia krytyczne  $\sigma_I$  stanowią górną granicę strefy względnie sprężystej pracy betonu przy obciążeniach krótkotrwałych i liniowego pełzania przy obciążeniach długotrwałych. Osiągają one podobne wartości jak trwała wytrzymałość zmęczeniowa betonu i mogą być definiowane jako dolna granica zniszczenia tego materiału. Z kolei uważa się, że naprężenia krytyczne  $\sigma_{II}$  stanowią górną granicę odkształceń plastycznych drugiego rzędu przy obciążeniach krótkotrwałych oraz nieliniowego pełzania betonu przy obciążeniach długotrwałych. Są one także utożsamiane z długotrwałą wytrzymałością betonu.

Zainteresowanie zagadnieniami związanymi z określaniem wartości naprężeń krytycznych w betonie związane jest przede wszystkim z tym, że uważa się je za podstawowe mierniki pozwalające wnioskować o aktualnym stanie struktury obciążonego betonu. Ich znajomość może być wykorzystana między innymi w przewidywaniu odporności danego rodzaju betonu na zarysowanie, może ona stanowić istotną wskazówkę w projektowaniu składu i technologii wykonania betonu w kontekście warunków jakie mogą wystąpić podczas użytkowania, może ona także być pomocna w uściśleniu wartości współczynników bezpieczeństwa dla betonu. Uważa się także, że znajomość wartości naprężeń krytycznych jest istotna z punktu widzenia oceny trwałości i bezpieczeństwa zwłaszcza tych elementów lub konstrukcji betonowych, które obciążane są w sposób wielokrotnie zmienny lub podlegają przeciążeniom.

W ocenie jakościowego znaczenia naprężeń krytycznych  $\sigma_I$  i  $\sigma_{II}$  poglądy większości badaczy są zbieżne. Występuje również zbieżność poglądów w twierdzeniu, że wartości tych naprężeń uzależnione są od wielu czynników technologicznych i eksploatacyjnych mających związek ze składem betonu, technologią jego wykonania oraz warunkami w jakich beton jest eksploatowany.

W wyznaczaniu wartości naprężeń krytycznych w betonie przydatne są przede wszystkim takie metody badawcze jak metoda pomiaru odkształceń [14,6,7,15,18], metoda ultradźwiękowa [6,18,19,20], a

także metoda emisji akustycznej [7,17,18,19,20,21]. W przypadku metody emisji akustycznej należy w tym celu dokonać pomiaru sumy zliczeń emisji akustycznej podczas niszczenia betonu, na przykład w próbie ściskania osiowego lub rozciągania metodą brazylijską, a następnie określić przebieg zmienności tej sumy w funkcji przyrostu obciążenia lub naprężenia. Na tej podstawie określa się następnie intensywność przyrostu sumy zliczeń emisji akustycznej, także w funkcji przyrostu obciążenia lub naprężenia według zależności

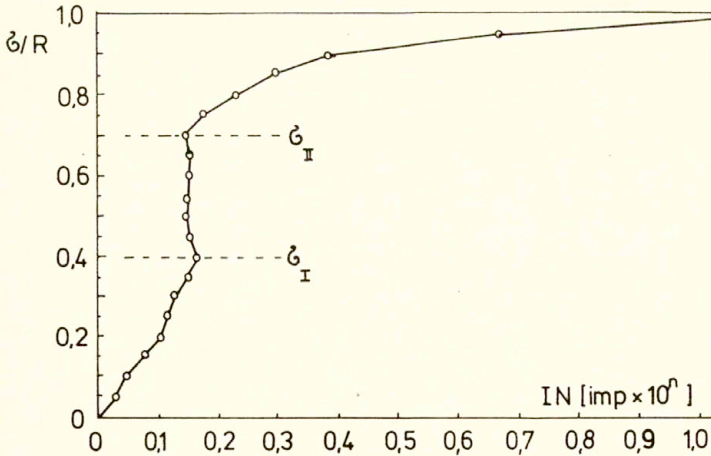
$$(1) \quad IN = \sum N_{n+1} - \sum N_n$$

gdzie:  $IN$  - intensywność przyrostu sumy zliczeń,

$\sum N_{n+1}$  - suma zliczeń emisji akustycznej zarejestrowana do poziomu obciążenia lub naprężenia "n+1",

$\sum N_n$  - suma zliczeń emisji akustycznej zarejestrowana do poziomu obciążenia lub naprężenia "n".

Na rysunku 1 pokazano przykładowo graficzną ilustrację przebiegu tak określonej intensywności, w funkcji przyrostu naprężenia. W przebiegu tym obserwuje się trój etapowość, to znaczy jest wyraźnie widoczny etap stałego przyrostu sumy zliczeń emisji akustycznej, etap stabilnego oraz gwałtownego przyrostu tej sumy. Jak wynika z rysunku 1, naprężenia krytyczne  $\sigma_I$  odpowiadają takiemu poziomowi naprężeń, przy którym obserwuje się wyraźne rozgraniczenie etapów stałego i stabilnego przyrostu sumy zliczeń emisji akustycznej. Natomiast naprężenia krytyczne  $\sigma_{II}$  są równoznaczne z takim poziomem naprężeń, przy którym obserwuje się wyraźne rozgraniczenie etapów stabilnego i gwałtownego przyrostu tej sumy. Znaczne zmniejszenie pracochłonności w określaniu intensywności przyrostu sumy zliczeń emisji akustycznej w obciążonym betonie, a tym samym zmniejszenie pracochłonności wyznaczania naprężeń krytycznych, uzyskuje się w przypadku sprzężenia aparatury do pomiaru emisji akustycznej z komputerem [9,22].



Rys.1. Graficzna ilustracja sposobu wyznaczania naprężeń krytycznych w betonie, za pomocą emisji akustycznej [18].

#### 4. BADANIA WPŁYWU UZIARNIENIA KRUSZYWA NA PROCES NISZCZENIA BETONU

Uznaje się, że uziarnienie kruszywa jest jednym z ważniejszych czynników technologicznych wpływających na przebieg procesu niszczenia betonu [2,3,5,6,17,21,23]. Potrzeba znajomości wpływu tego czynnika na proces niszczenia betonu wynika przede wszystkim z tego, że ma on związek z trwałością i bezpieczeństwem tych konstrukcji betonowych do wykonania których stosowane są coraz częściej mieszanki betonowe, w których udział drobnych frakcji kruszywa jest zwiększony. Chodzi zwłaszcza o frakcje piaskowe. Obecnie stosowanie tych frakcji powodowane jest między innymi względami ekonomicznymi, uwarunkowanymi ich dostępnością, przy równoczesnym lokalnym wyczerpywaniu się zasobów kruszyw naturalnych o frakcjach grubszych. Wagę problemu podnosi dodatkowo fakt, że udział kruszywa w całkowitej objętości wszystkich składników wchodzących w skład betonu jest zdecydowanie największy.



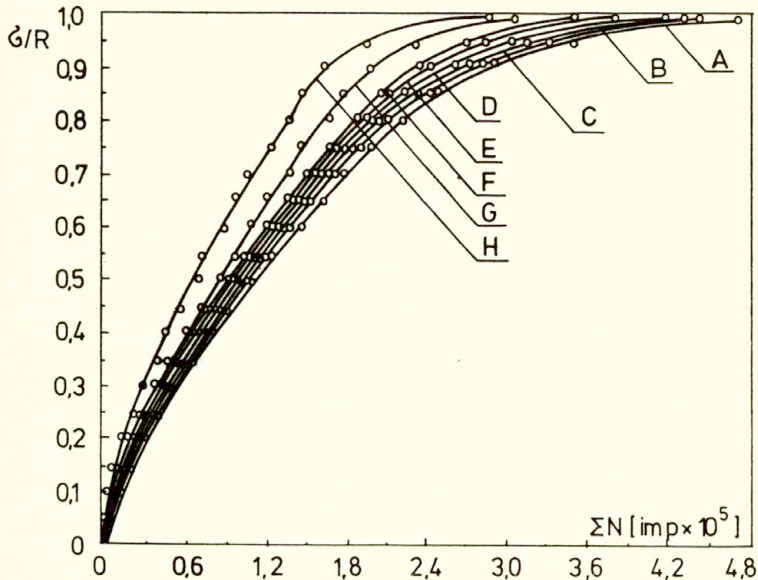
Pełne wyjaśnienie omawianego zagadnienia, z wykorzystaniem metody emisji akustycznej, zawarte jest w pracach [21,23]. W tym celu badano kilka serii betonu oznaczonych kolejno literami od "A" do "H", posiadających zbliżoną wytrzymałość na ściskanie, ale zdecydowanie różniących się uziarnieniem zastosowanego kruszywa. Do wykonania betonu użyto naturalne kruszywo otoczkowe o maksymalnej średnicy ziaren 20 mm. W projektowaniu składu za punkt wyjścia przyjęto beton o wytrzymałości na ściskanie mieszczącej się w klasie B25, w którym zwiększano udział frakcji piaskowych począwszy od 20%, aż do całkowitego wyeliminowania ze stosu okruszowego frakcji żwirowych. Dzięki temu uzyskano struktury betonowe, istotnie różniące się między sobą wartościami charakteryzujących je parametrów materiałowych [21,23]. Przykładowo, w tabelicy 1 zamieszczono wartości niektórych z obliczonych parametrów.

Tablica 1. Zestawienie wartości wybranych parametrów materiałowych charakteryzujących badane betony [21,23]

Oznaczenia serii betonu	Rodzaj parametru		
	Punkt piaskowy pp [%]	Całkowita powierzchnia kruszywa w 1m <sup>3</sup> betonu, $F_k$ [m <sup>2</sup> ]	Umowna grubość otulenia kruszywa grubego zaprawą $z_k$ [μm]
1	2	3	4
A	20	3180	657,9
B	25	3755	746,8
C	30	4340	885,9
D	37,5	5180	1137,3
E	47,5	6116	1585,9
F	60	7186	2467,0
G	85	8763	9571,9
H	100	9768	-

Po 90 dniach dojrzewania badanych betonów w komorze klimatycznej w temperaturze powietrza  $18^{\circ}\text{C}$  i wilgotności względnej powietrza 95% poddano je działaniu obciążeń doraźnych w próbie ściskania osiowego. Podczas trwania tego eksperymentu rejestrowano równocześnie sumę zliczeń emisji akustycznej i napięcie skuteczne RMS.

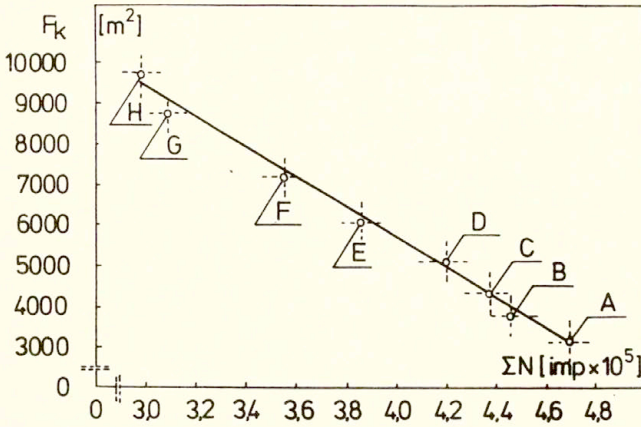
Stwierdzono, że charakter zmienności sumy zliczeń emisji akustycznej, w funkcji przyrostu naprężeń, jest podobny we wszystkich badanych seriach betonu. Mimo tego podobieństwa zauważa się jednak występowanie różnic w wielkościach tej sumy, wydzielonej na poszczególnych poziomach naprężenia. Fakt ten ilustruje przykładowo rysunek 2.



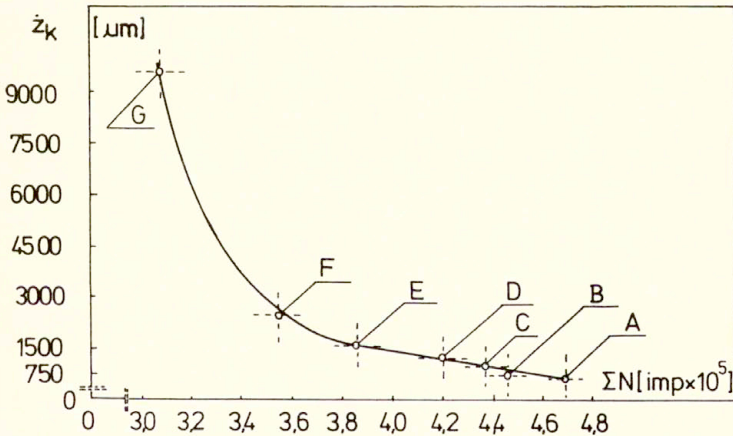
Rys.2. Przebieg zmienności sumy zliczeń emisji akustycznej w ściskany osiowo betonie serii "A", "B", "C", "D", "E", "F", "G" i "H" w funkcji przyrostu naprężeń [23].

Różnice te są szczególnie widoczne, jeśli porówna się sumy zliczeń emisji akustycznej zarejestrowane podczas całego procesu niszczenia badanych betonów. Zauważa się również występowanie

ściślego związku między sumą zliczeń emisji akustycznej zarejestrowaną w całym procesie niszczenia badanych betonów, a charakteryzującymi te betony parametrami materiałowymi. Powyższe stwierdzenie ilustrują przykładowo rysunki 3 i 4.



Rys. 3. Zależność między całkowitą powierzchnią kruszywa a sumą zliczeń emisji akustycznej [21,23].

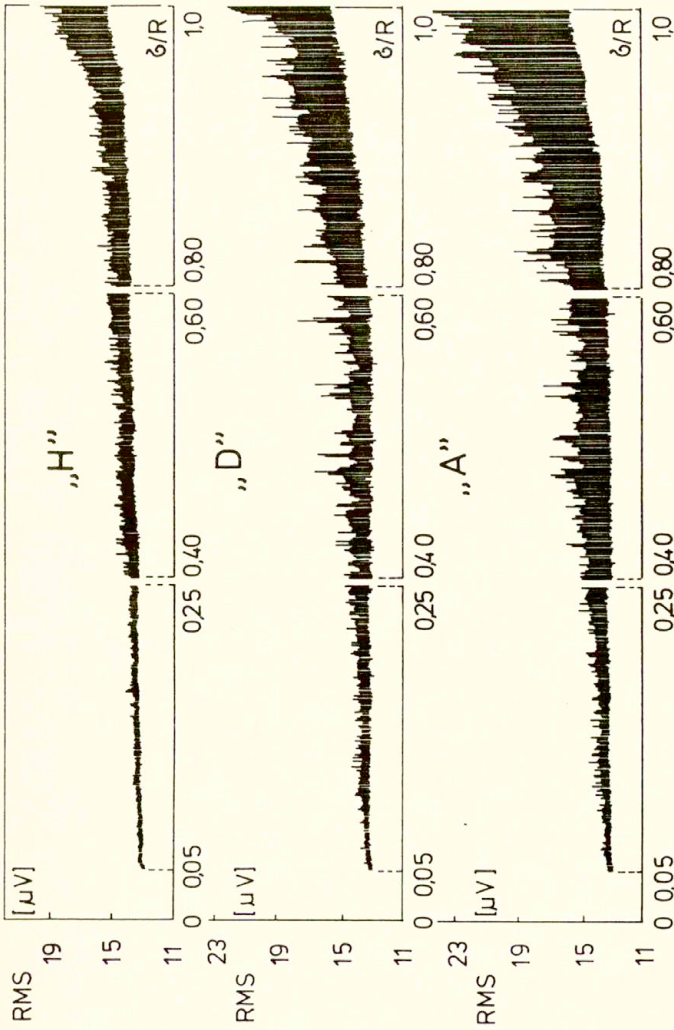


Rys. 4. Zależność między umowną grubością otulenia kruszywa grubego zaprawą a sumą zliczeń emisji akustycznej [21,23].

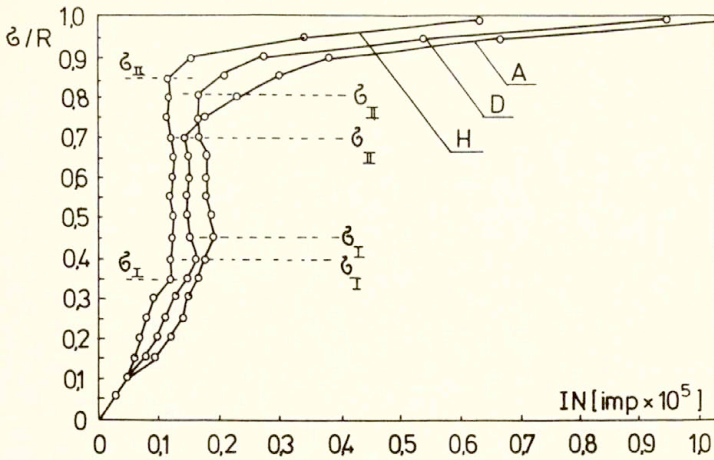
Z rysunków tych wynika, że suma zliczeń emisji akustycznej jest tym większa im mniejsza jest całkowita powierzchnia kruszywa w betonie i im mniejsza jest umowna grubość otulenia kruszywa z prawą. Uzyskane zależności wskazują na to, że uziarnienie kruszywa wpływa na przebieg niszczenia betonu. Potwierdzają to stwierdzenie także obserwacje zapisu wartości napięcia skutecznego RMS. Przykładowo na rysunku 5 zamieszczono fragmenty takich zapisów, uzyskane podczas osiowego ściskania betonu serii "A", "D" i "H".

Celem pełniejszego zobrazowania zmian w przebiegu niszczenia badanego betonu, w zależności od uziarnienia kruszywa, określono intensywność przyrostu sumy zliczeń emisji akustycznej w funkcji przyrostu naprężeń. Uzyskane w tym zakresie rezultaty ilustruje przykładowo, także dla serii "A", "D" i "H" rysunek 6. Z rysunku tego wynika prawidłowość, że przebieg zmienności intensywności sumy zliczeń emisji akustycznej w zależności od przyrostu naprężeń jest trój etapowy, a "długość" poszczególnych etapów jest w badanych seriach betonu zróżnicowana. Zauważona prawidłowość świadczy o tym, że w procesie niszczenia badanego betonu można odróżnić trzy charakterystyczne stadia, których "długość" jest uzależniona od uziarnienia kruszywa. Jak już wcześniej nadmieniono, te poziomy naprężeń przy których obserwuje się wyraźne rozgraniczenia etapów stałego i stabilnego oraz stabilnego i gwałtownego przyrostu sumy zliczeń emisji akustycznej odpowiadają naprężeniom krytycznym  $\sigma_I$  i  $\sigma_{II}$  w betonie. Przykładowo na rysunku 7 pokazano przebieg zmienności wartości tych naprężeń w badanych seriach betonu, w zależności od całkowitej powierzchni kruszywa.

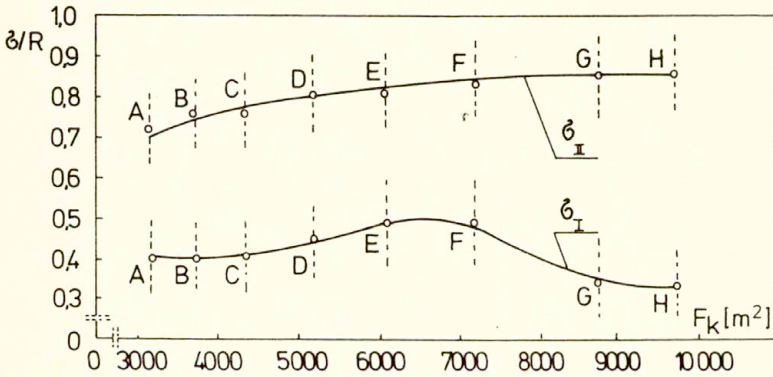
Obserwowane na rysunku 7 prawidłowości w zakresie kształtowania się wartości naprężeń krytycznych w badanych betonach można tłumaczyć między innymi tym, że zwiększanie w strukturze betonu całkowitej powierzchni kruszywa, poprzez zwiększanie ilościowego udziału kruszywa drobnego, wpływa bezpośrednio na ilość zawartej w nim zaprawy, a tym samym na wielkość umownej grubości otulenia kruszywa grubego zaprawą. Zwiększanie tej grubości daje w konsekwencji strukturę bardziej jednorodną, o mniejszej ilości koncentratorów naprężeń jakimi są ziarna kruszywa grubego. Tym samym występuje w strukturze betonu mniejsza ilość po-



Rys.5. Fragmenty zapisów wartości napięcia skutecznego RMS podczas ściskania osiowego betonu serii "A", "D" i "H" [23].



Rys.6. Przebieg zmienności intensywności przyrostu sumy zliczeń emisji akustycznej w ściszanym osiowo betonie serii "A", "D" i "H", w funkcji przyrostu naprężeń [23].



Rys.7. Zmienność wartości naprężeń krytycznych  $\sigma_I$  i  $\sigma_{II}$  w zależności od całkowitej powierzchni kruszywa w betonie [21,23].

tencjonalnych miejsc, gdzie naprężenia zwłaszcza na styku kruszywa grubego z zaprawą mogą być przekroczone. Stąd beton serii "E" i "F" charakteryzuje się wyższymi wartościami naprężeń krytycznych  $\sigma_{I}$ , w porównaniu do betonu "A" i "B". Nawiązując do uzyskanych rezultatów badań należy podkreślić, że przedstawiona wyżej argumentacja wydaje się być słuszna do momentu, gdy zawartość kruszywa drobnego w betonie nie przekracza 60 % całości kruszywa. Wprawdzie, przy dalszym zwiększaniu zawartości tego kruszywa w betonie umowna grubość otulenia kruszywa grubego zaprawą także rośnie, należy jednak sądzić, że ten "pozytywny" wpływ niwelowany jest z kolei przez negatywny wpływ skurczu. Stąd na przykład, wartości naprężeń krytycznych  $\sigma_{I}$  w betonie serii "G" i "H" są wyraźnie niższe, niż w betonie serii "E" i "F".

Na podstawie uzyskanych rezultatów badań nasuwa się uwaga, że całkowite wyeliminowanie lub znaczne zmniejszenie ilości kruszywa grubego w składzie betonu, powoduje wyraźne obniżenie trwałej wytrzymałości zmęczeniowej betonu, mającej znaczenie w elementach i konstrukcjach obciążonych w sposób wielokrotnie zmienny.

Jak wynika z rysunku 7, w przypadku naprężeń krytycznych  $\sigma_{II}$  uzyskana zależność ma przebieg odmienny, niż w przypadku naprężeń krytycznych  $\sigma_{I}$ , to znaczy wartości tych naprężeń rosną wraz ze wzrostem zawartości kruszywa drobnego w badanym betonie. Biorąc ten fakt pod uwagę należy nadmienić, że z punktu widzenia bezpieczeństwa konstrukcji wysokie wartości naprężeń krytycznych  $\sigma_{II}$  w betonie niekoniecznie świadczą o korzystnych cechach wytrzymałościowych tego materiału. Chodzi o nagłe pojawienie się rys w takim betonie, najczęściej od razu o dużej rozwartości, przy wysokich poziomach obciążenia. Jest to równoznaczne z brakiem wcześniejszych oznak poprzedzających zniszczenie betonu, na co zwracają również uwagę autorzy prac [24,25].

## 5. BADANIA WPLYWU WILGOCI NA PROCES NISZCZENIA BETONU

Ponieważ konstrukcje wykonane z betonu w zależności od przeznaczenia eksploatowane są w różnych warunkach wilgotnościowych, ważnym zagadnieniem jest określenie wpływu wilgoci znajdującej się w tym materiale na przebieg jego niszczenia pod obciąż-

zeniem. Sugestie o znaczącej roli wilgoci w przebiegu tego procesu zawarte są między innymi w pracach [2,4]. Istotne jest także określenie wpływu wilgoci zawartej w betonie na parametry mierzone metodą emisji akustycznej, na podstawie których wnioskuje się o stopniu czy przebiegu niszczenia struktury tego materiału pod obciążeniem.

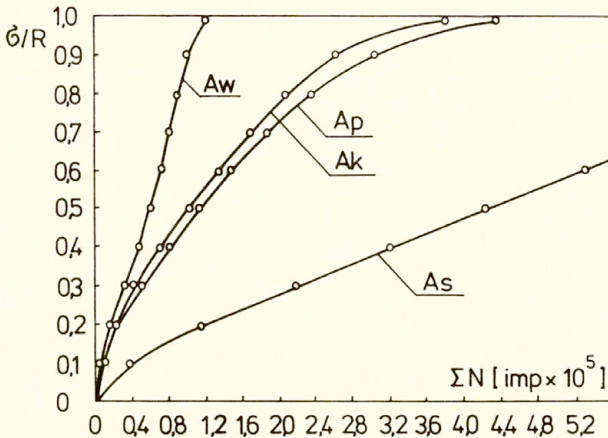
Wyjaśnienie powyższych zagadnień zawarte jest między innymi w pracach [19,20,26]. W tym celu badano kilka serii betonu o różnej wilgotności, poddanego działaniu obciążeń doraźnych w próbie ściskania osiowego. Badaniom poddano po 90 dniach dojrzewania beton powszechnie stosowany w konstrukcjach betonowych, o wytrzymałości na ściskanie mieszczącej się w klasie B20. Szeroki przedział wilgotności badanego betonu uzyskano poprzez odpowiednie jego przechowywanie, które zapewniło, że w chwili badania materiał ten znajdował się w stanie wilgotnościowym suchym, stanie wilgotności sorbcyjnej, stanie maksymalnej wilgotności sorbcyjnej oraz w stanie pełnego nasycenia. W tablicy 2 zamieszczono podstawowe informacje dotyczące między innymi przyjętych oznaczeń badanych serii oraz wilgotności i stanu wilgotnościowego

Tablica 2. Zestawienie przyjętych oznaczeń, wilgotności i stanu wilgotnościowego badanego betonu [19,20].

Oznaczenie serii betonu	Wilgotność betonu w [%]	Stan wilgotności betonu
1	2	3
$A_s$	0,00	suchy
$A_p$	2,28	wilgotności sorbcyjnej
$A_k$	2,56	maksymalnej wilgotności sorbcyjnej
$A_w$	5,84	pełnego nasycenia wodą

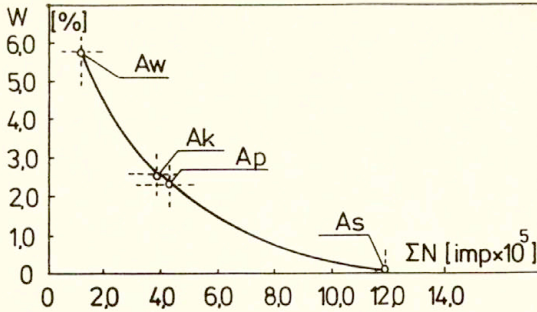


wego betonu. Szczegółowe warunki przechowywania betonu do czasu badania zawarte są w pracach [19,20]. Podczas trwania eksperymentu rejestrowano sumę zliczeń emisji akustycznej. Stwierdzono, że suma ta jest wyraźnie uzależniona od wilgotności betonu. Zależność ta charakteryzuje się tym, że suma zliczeń emisji akustycznej wydzielona na poszczególnych etapach niszczenia jest tym mniejsza im beton jest wilgotniejszy co ilustruje rysunek 8. Dodatkowo na rysunku 9 pokazano zależność między wilgotnością badanego betonu a całkowitą sumą zliczeń emisji akustycznej, wydzieloną podczas próby ściskania osiowego.



Rys.8. Przebieg zmienności sumy zliczeń emisji akustycznej w ściskanym osiowo betonie serii "A<sub>s</sub>", "A<sub>p</sub>", "A<sub>k</sub>" i "A<sub>w</sub>" w funkcji przyrostu naprężeń [19, 20].

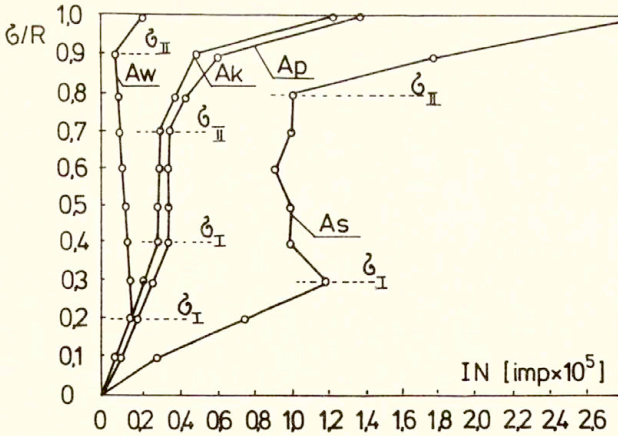
Należy sądzić, że stwierdzony w badaniach wpływ zawilgocenia betonu na wartość sumy zliczeń emisji akustycznej wydzielonej podczas jego niszczenia związany jest przede wszystkim z osłabieniem połączeń między kryształami sieci strukturalnej. Połączenia te przy zwiększonym zawilgoceniu materiału częściowo rozpuszczają się, powodując stopniowe zmniejszenie wytrzymałości betonu na ściskanie. Rozmiękczenie struktury betonu oraz towarzyszący mu spadek wytrzymałości na ściskanie bezpośrednio rzu-



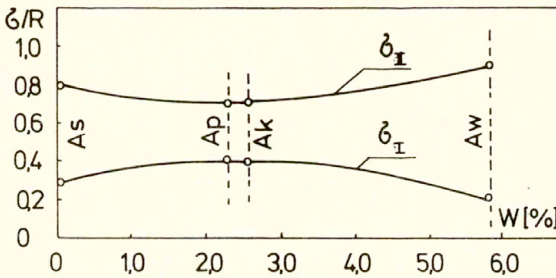
Rys.9. Zależność między wilgotnością betonu a całkowitą sumą zliczeń emisji akustycznej wydzieloną podczas próby ściskania osiowego [19,26].

tuje na liczbę potencjalnych miejsc, gdzie może nastąpić uszkodzenie struktury oraz na charakter przebiegu jej niszczenia, co objawia się w postaci liczby rejestrowanych sygnałów emisji akustycznej.

Pełniejsze zobrazowanie zmian w przebiegu niszczenia betonu, w zależności od wilgotności, jest szczególnie widoczne po określeniu intensywności przyrostu sumy zliczeń emisji akustycznej w funkcji przyrostu naprężeń. Przebieg tej zmienności w badanych betonach pokazano na rysunku 10. Rezultaty badań zamieszczone na tym rysunku pozwalają odróżnić w procesie niszczenia zawilgoczonego w różnym stopniu betonu trzy charakterystyczne stadia, których długość jest uzależniona od wilgotności betonu. Jak już wspomniano wcześniej, granice między poszczególnymi stadiami niszczenia betonu określają naprężenia krytyczne  $\hat{\sigma}_I$  i  $\hat{\sigma}_{II}$ . Na rysunku 11 pokazano zbiorcze zestawienie, ukazujące przebieg zmienności wartości tych naprężeń, w zależności od wilgotności betonu. Z rysunku tego wynika, że w miarę wzrostu wilgotności betonu wartości naprężeń krytycznych  $\hat{\sigma}_I$  początkowo rosną, a gdy wilgotność betonu osiąga wartość około 2,60 % co odpowiada stanowi maksymalnej wilgotności sorbcyjnej, maleją. Dla naprężeń krytycznych  $\hat{\sigma}_{II}$  zależność ta ma przebieg odwrotny. Świadczy to



Rys.10. Przebieg zmienności intensywności przyrostu sumy zliczeń emisji akustycznej w ściskany betonie serii "A<sub>s</sub>", "A<sub>p</sub>", "A<sub>k</sub>" i "A<sub>w</sub>" w funkcji przyrostu naprężeń [19,26].



Rys.11. Zmienność wartości naprężeń krytycznych  $\zeta_I$  i  $\zeta_{II}$  w zależności od wilgotności betonu [19,20,26].

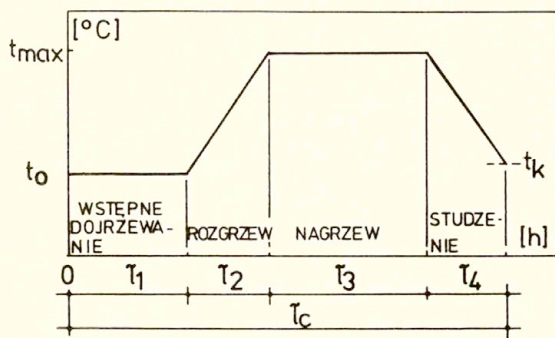
o tym, że zarówno trwałość wytrzymałości zmęczeniowa betonu jak również długotrwała wytrzymałość betonu uzależniona jest od warunków wilgotnościowych w jakich materiał ten lub wykonana z niego konstrukcja jest eksploatowana.

## 6. BADANIA WPŁYWU OBRÓBKİ TERMICZNEJ NA PROCES NISZCZENIA BETONU

Obecnie, w przemysłowej produkcji prefabrykatów betonowych, powszechnie stosowanym zabiegiem technologicznym jest obróbka termiczna betonu w parze niskoprężnej. Szacuje się, że około 50% produkowanego betonu poddawane jest właśnie takiemu zabiegowi technologicznemu, celem przyspieszenia uzyskania przez ten materiał żądanej wytrzymałości. Czas trwania tego zabiegu wynosi zazwyczaj od kilku do kilkunastu godzin, podczas którego następuje szybka hydratacja spoiwa i tworzenie się szkieletu stwardniałego kamienia cementowego. Do negatywnych efektów tego zabiegu zalicza się przede wszystkim występowanie w twardniejącym betonie naprężeń termicznych, wywołanych dużymi gradientami temperatury i nakładającymi się z nimi naprężeniami wywołanymi niejednakowymi zmianami objętości poszczególnych składników betonu. Naprężenia te są przyczyną powstawania w strukturze obrabianego termicznie betonu różnego rodzaju defektów, na przykład mikro-pęknięć i podwyższonej porowatości [27,28,29]. Między innymi w wymienionych pracach wnioskuje się, że struktura betonu dojrzewającego w warunkach niskoprężnej obróbki termicznej jest w większym stopniu nasycona mikrorysami i innymi defektami, w porównaniu ze strukturą betonu dojrzewającego normalnie. Uważa się również, że przebieg procesu niszczenia takiego betonu jest zróżnicowany, w stosunku do betonu dojrzewającego normalnie. Przypuszczenie to wynika również z faktu, że w badaniach obserwuje się zwiększoną podatność prefabrykowanych konstrukcji betonowych na zarysowanie.

Celem wyjaśnienia powyższego zagadnienia przeprowadzone zostały badania kilku serii betonu, o wytrzymałości na ściskanie mieszczącej się w klasie B25, z których trzy oznaczone symbolami "N1", "N2" i "N3" poddano obróbce termicznej w parzy niskoprężnej. Zabieg ten realizowano w komorze naporzalniczej, z automatyczną regulacją dopływu pary wodnej niskoprężnej. Beton serii czwartej oznaczonej symbolem "S1" dojrzewał normalnie i traktowany był jako porównawczy [30,31,32]. Obróbkę termiczną każdej z trzech naporzanych serii betonu realizowano według innego cyklu temperaturowo-czasowego. Cykle zostały jednak zaprojektowane tak, aby po zakończeniu obróbki termicznej beton każdej serii posiadał

zbliżoną wytrzymałość na ściskanie. Na rysunku 12 pokazano schemat według którego prowadzony był ten zabieg, natomiast w tablicy 3 zamieszczono warunki jego realizacji. Badania zrealizowano z wykorzystaniem metody emisji akustycznej, po 90 dniach dojrzewania betonu, w próbie ściskania osiowego. Należy nadmienić, że począwszy od momentu zakończenia obróbki termicznej aż do czasu badania wszystkie serie betonu były przechowywane w komorze klimatycznej, w temperaturze powietrza 18<sup>o</sup>C i wilgotności względnej powietrza 95 %.

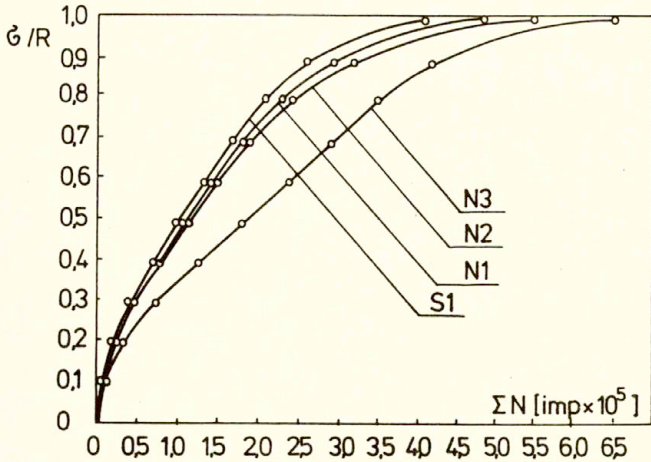


Rys.12. Schemat obróbki termicznej betonu [30,31].

Tablica 3. Warunki obróbki termicznej betonu

Oznaczenie serii betonu	Czas trwania danej fazy [h]					Temperatura [°C]		
	$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$\tau_4$	$\tau_c$	$t_0$	$t_{max}$	$t_k$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
N1	2,0	2,0	4,0	2,5	10,5	20	60	30
N2	2,0	2,0	3,0	1,5	8,5	20	80	30
N3	2,0	1,5	3,0	1,5	8,0	20	95	30

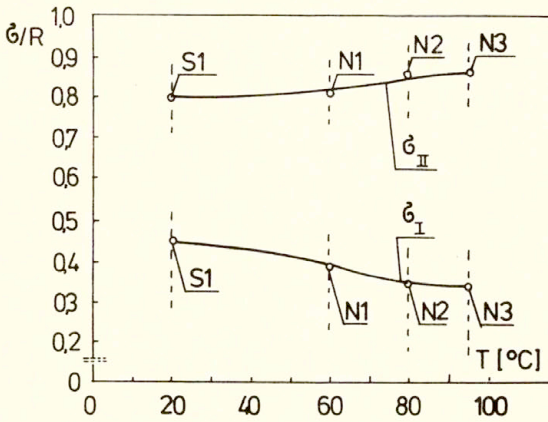
Badania wykazały, że suma zliczeń emisji akustycznej zarejestrowana podczas całego procesu niszczenia betonu poddanego obróbce termicznej jest wyraźnie większa w porównaniu do sumy zliczeń emisji akustycznej zarejestrowanej w betonie dojrzewającym normalnie. Fakt ten ilustruje rysunek 13.



Rys.13. Przebieg zmienności sumy zliczeń emisji akustycznej w ściskany osiowo betonie serii "N1", "N2", "N3" i "S1" w funkcji przyrostu naprężeń [30,31].

Należy sądzić, że na charakter przebiegu zależności pokazanej na rysunku 13 ma między innymi wpływ to, że powstające w podwyższonej temperaturze produkty hydratacji cementu mają bardziej grubokrystaliczną budowę, niż ma to miejsce w przypadku tych produktów powstałych w normalnej temperaturze. Nie bez znaczenia jest również zwiększona porowatość strukturalna tych produktów oraz, jak już wcześniej nadmieniono, mikrorysy powodowane naprężeniami termicznymi. Oznacza to, że w wyniku stosowania niskoprężnej obróbki termicznej uzyskuje się struktury betonowe bardziej niejednorodne, zawierające więcej potencjalnych miejsc stanowiących źródła emisji akustycznej podczas ich niszczenia, w porównaniu do struktury betonu dojrzewającego normalnie.

Określone w badanym betonie naprężenia krytyczne  $\sigma_I$  i  $\sigma_{II}$  wskazują na to, że beton poddany obróbce termicznej w parze niskoprężnej charakteryzuje się niższą trwałą wytrzymałością zmęczeniową w porównaniu do betonu dojrzewającego normalnie. Świadczą o tym obniżone wartości naprężeń krytycznych  $\sigma_I$ , które w betonie obrabianym termicznie osiągają niższe wartości niż w betonie dojrzewającym normalnie. Jest to widoczne na rysunku 14.



Rys.14. Zmienność wartości naprężeń krytycznych  $\sigma_I$  i  $\sigma_{II}$  w zależności od temperatury nagrzewu betonu [32].

Obniżenie wartości tych naprężeń rośnie wraz z temperaturą nagrzewu betonu. Fakt ten powinien być uwzględniany przy obliczaniu tych betonowych konstrukcji prefabrykowanych, dla bezpieczeństwa których ta wytrzymałość jest decydująca. Jak wynika z rysunku 14, w betonie poddanym obróbce termicznej zauważa się podwyższenie wartości naprężeń krytycznych  $\sigma_{II}$ , w porównaniu do wartości tych naprężeń określonych w betonie dojrzewającym normalnie. Nasuwa się w tym przypadku uwaga, że oceniając konstrukcje wykonane z betonu poddanego obróbce termicznej w parze niskoprężnej, należy liczyć się z brakiem wyraźnych oznak poprzedzających ich zniszczenie. Fakt ten powinien być również

uwzględniany w obliczeniach, na etapie projektowania tych konstrukcji.

Przedstawione wyniki badań pozwalają na sformułowanie ogólnego wniosku, że stosowana powszechnie w przemysłowej produkcji prefabrykatów betonowych niskoprężna obróbka termiczna betonu bazująca na powierzchniowym dostarczaniu ciepła jest niekorzystna, przede wszystkim z punktu widzenia trwałej wytrzymałości zmęczeniowej betonu. Jak wynika z pracy [29] korzystne byłoby z tego względu stosowanie zabiegów bazujących na skrośnym dostarczaniu ciepła do betonu. Przykładem takiego zabiegu może być obróbka termiczna betonu w polu mikrofalowym. Zamieszczone w pracy [29] rezultaty badań, także uzyskane w wyniku stosowania metody emisji akustycznej świadczą o tym, że wartości naprężeń krytycznych  $\sigma_I$  i  $\sigma_{II}$  określone w betonach poddanych temu zabiegowi technologicznemu osiągają podobne wartości, jak w porównawczych betonach dojrzewających normalnie.

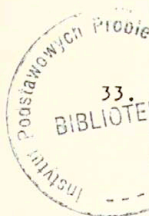
## 7. LITERATURA

1. HSU T.T.C., SLATE F.O., STURMAN G.M., WINTER G., Microcracking of Plain Concrete and the Shape of the Stress-Strain Curve, Journal ACI, 60, 2, 1963, 209-224.
2. SHAH S.P., CHANDRA S., Critical stress, volume change and microcracking of concrete, Journal ACI, 65, 9, 1968, 770-781.
3. MCCABE W.M., KOERNER W., Acoustic emission behaviour of concrete laboratory specimens, Journal ACI, 73, 7, 1976, 367-371.
4. WITTMANN F.H., The structure of hardened cement paste. A basis for a better understanding of the materials properties. Proceedings of a Conference held at University of Sheffield, Cement and Concrete Association, London, 1976, 96-117.
5. PERRY C., GILLOTT E., The influence of mortar-aggregate bond strength on the behaviour of concrete in uniaxial compression, C.C.R., 5, 1977, 553-564.
6. FLAGA K., FURTAK K., Wpływ rodzaju kruszywa na poziomy naprężeń krytycznych w betonie ściskanym, Arch. Inż. Łąd., 27, 4, 1981, 653-666.



7. FLAGA K., FURTAK K., Wpływ jakości kruszywa na zarysowanie belek żelbetonowych, Arch. Inż. Łąd., 28, 1-2, 1982, 113-133.
8. DIDERISCH D., SCHNEIDER W., TERRIEN H., Fracture Mechanics of Concrete, ed. F.H. Wittman, Elsevier Science Pub. B.V., Amsterdam, 1993.
9. HOŁA J., RANACHOWSKI Z., Metoda emisji akustycznej w zastosowaniu do badania betonu, Prace IPPT PAN, Warszawa, 26, 1991.
10. HSU T.C., Mathematical analysis of shrinkage stress in a model of hardened concrete, Journal ACI, 60, 3, 1963, 371-390.
11. HSU T.C., SLATE F.O., Tensile bond strength between aggregate and cement paste or mortar, Journal ACI, 60, 4, 1963, 465-486.
12. MEYERS B.L., SLATE F.O., WINTER G., Relationship between time - dependent deformation and microcracking of plain concrete, Journal ACI, 66, 1, 1969, 60-68.
13. NEWMAN K., NEWMAN I.B., Failure theories and design criteria for plain concrete, Proceedings of the Southampton, 1969, Civ. Eng. Mat. Conf., London, 1971, 963-995.
14. BRANDT A.M., i inni, Mechanizm zarysowania i zniszczenia w kompozytach betonowych, w: Właściwości mechaniczne i struktura kompozytów betonowych, PAN, Wrocław - Warszawa - Kraków - Gdańsk, 1974, 163-209.
15. FURTAK K., Wytrzymałość betonu poddanego obciążeniom wielokrotnie powtarzalnym, Arch. Inż. Łąd., 30, 4, 1984, 677-698.
16. WEIGLER H., FEINEIS N., „Anwendung der Schallemissionsanalyse bei Beton, Materialprüfung, 3, 1983, 70-75
17. HOŁA J., MOCZKO A., Evaluation of the effect of aggregate grading on the cracking behaviour of plain concrete, Brittle matrix composites, red. A.M. Brandt, I.H. Marshall, Elsevier Appl. Sci. Publ., London, 1986, 527-535.
18. HOŁA J., MOCZKO A., PYSZNIAK J., Możliwości wykorzystania metody emisji akustycznej w badaniach betonu, Przegląd Budowlany, 11, 1988, 477-479.
19. HOŁA J., PYSZNIAK J., Wpływ wilgotności betonu na przebieg niszczenia ocenianego metodami akustycznymi, Arch. Inż. Łąd., 36, 4, 1990, 423-435.
20. PYSZNIAK J., HOŁA J., Application of acoustic methods to assessment of concrete humidity influence on the process of concrete destruction, Archives of Acoustics, 16, 2, 1991, 155-165.

21. HOŁA J., Influence of aggregate graining on the destruction process in compressed concrete, w: Fracture Behaviour and Design of Materials and Structures, ed. D. Firrao, Engineering Materials Advisory Services LDT, London, 1990, vol. 2, 595-598.
22. RANACHOWSKI Z., Application of acoustic emission method to determine the limit of proportionality and the static strength in concrete, w: Brittle Matrix Composites 3, ed. A.M. Brandt and I.H. Marshall, Elsevier Applied Science Publishers, London and New York, 1991, 234-239.
23. HOŁA J., Badania wpływu uziarnienia kruszywa na destrukcję naprężeniową ściskanego betonu, Arch. Inż., Łąd., 39, 1-2, 1-2, 1992, 85-102.
24. RUPPERT J., LIBURA W., ZAREBSKA W., Stan graniczny zarysowania belek żelbetowych z betonu na kruszywie węglowym, I i B, 9-10, 1980, 326-327.
25. FLAGA K., FURTAK K., Propagacja rys w belkach żelbetowych poddanych działaniu wzrastających obciążeń doraźnych, I i B, 3, 1983, 116-118.
26. HOŁA J., The influence of concrete humidity on its destruction process, w: Fracture Processes in Concrete Rock and ceramics, ed. J.G.M. van Mier, J.G. Rots, A. Bakker, Chaman and Hall, London - New York - Tokyo - Melbourne - Madras, 1991, 859-868.
27. FLAGA K., Energetyczne podstawy wzrostu wytrzymałości betonu tężejącego w warunkach obróbki termicznej, Zeszyt Naukowy PK, 40, Kraków, 1971.
28. ODLER I., ZELLERFELD C., Über die Rissbildung bei der Warmbehandlung des Betons, Beton, 6, 1985, 235-237.
29. KUŚNIERZ A., FLAGA K., Obróbka termiczna betonu w polu mikrofalowym, XXXIII Konf. Nauk. KILiW PAN, Krynica, 4, 85-90.
30. HOŁA J., Wybrane zagadnienia z zakresu mechaniki niszczenia betonu poddanego przyspieszonemu dojrzewaniu, Cement-Wapno-Gips, 10-11, 1990, 230-232.
31. HOŁA J., Spannungsbedingte zerstörung des Warmbehandelten Betons beurteilt anhand des Schallemissionsverfahrens, Wiss. Berichte TH Zittau, 24, Zittau, 1990.
32. HOŁA J., PSZONKA A., The influence of heat treatment on stress-evoked destruction in concrete, w: Brittle Matrix Composites 3, ed. A.M. Brand and I.M. Marshall, Elsevier Applied Science Publishers, London and New York, 1991, 52-61.
33. HOŁA J., Emisja akustyczna podczas obróbki termicznej betonu, w: Problemy technologii i badania materiałów budowlanych, Prace Naukowe Instyt. Bud. PWR., 64, Wrocław, 1991, 41-46.



56700