

STUDIA I MONOGRAFIE

z. 280

Volodymyr Boychuk

Właściwości materiałów cementowych
przy oddziaływaniu zewnętrznego
pola elektromagnetycznego



POLITECHNIKA OPOLSKA

ISSN 1429-6063

Opole 2011 ISBN 978-83-62736-05-8

POLITECHNIKA OPOLSKA

KOMITET REDAKCYJNY

Andrzej KNAPIK, Jan KUBIK,
Tadeusz ŁAGODA – przewodniczący,
Mariusz MIGAŁA, Iwona MULICKA,
Jan SADECKI, Małgorzata WRÓBLEWSKA

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Taras NAHIRNY
dr hab. inż. Mirosław DYT CZAK, prof. Politechniki Opolskiej

Redaktor:

Małgorzata WRÓBLEWSKA

Komitet Redakcyjny Wydawnictw Politechniki Opolskiej
ul. S. Mikołajczyka 5

Opracowanie redakcyjne: Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej.
Nakład 105 egz. Ark. wyd. 4,0. Ark. druk. 4,0.
Druk i oprawa: Sekcja Poligrafii Politechniki Opolskiej.

Spis treści

Wprowadzenie	5
Rozdział 1. Przepływ prądu elektrycznego w materiałach cementowych	9
1.1. Klasyfikacja materiałów przewodzących prąd elektryczny	9
1.1.1. Rezystywność materiałów wieloskładnikowych	9
1.1.2. Parametr kształtu	10
1.2. Przewodność elektryczna materiałów cementowych	11
1.2.1. Struktura materiałów cementowych	12
1.2.2. Wieloskalowy model ośrodka wieloskładnikowego	16
1.2.3. Transport masy	17
1.2.4. Transport ładunku elektrycznego	17
1.2.5. Wymiana ciepła i procesy mechaniczne	17
1.2.6. Założenia modelowe	18
1.3. Związki fizyczne w materiałach przewodzących prąd elektryczny . .	19
1.3.1. Bilans masy	21
1.3.2. Bilans ładunku elektrycznego	23
1.3.3. Bilans pędu	25
1.3.4. Bilans energii	25
1.3.5. Nierówność wzrostu entropii	26
1.4. Współczynnik przewodności elektrycznej	26
1.5. Przewodność elektryczna betonów	29
1.5.1. Wpływ składu cementu	29
1.5.2. Wpływ zawartości cementu i współczynnika wodno-cementowego	31
1.5.3. Wpływ zawartości kruszywa	32
1.5.4. Wpływ zawartości dodatków mineralnych do cementu . . .	35
1.5.5. Wpływ zawilgocenia	35
Rozdział 2. Pomiary właściwości elektrycznych materiałów cementowych	37
2.1. Układ pomiarowy	37
2.2. Opis stanowiska badawczego	39
2.3. Zmiany przewodności elektrycznej dojrzewającego zaczynu	41
2.3.1. Charakterystyczne zmiany przewodności elektrycznej w różnych warunkach twardnienia materiału cementowego .	41

2.3.2.	Zestawienie wyników pomiaru przewodności elektrycznej dla materiałów z różnymi cementami	42
2.4.	Przemiany strukturalne w twardniejących materiałach cementowych	44
2.4.1.	Koncepcja perkolacji w odniesieniu do materiału cementowego	46
2.4.2.	Powiązanie zmian przewodności elektrycznej ze zmianami spójności materiału	48
2.4.3.	Korelacja przewodności elektrycznej z ciepłem hydratacji cementu	49
	Podsumowanie	53
	Bibliografia	55
	Streszczenia	59
	Streszczenia	60

Wprowadzenie

Badanie właściwości elektrycznych materiałów budowlanych jest ważnym elementem, uzupełniającym wiedzę o procesach, które mają miejsce przy ich wytwarzaniu i obróbce. Zmiany składu materiału na skutek zachodzących przemian fazowych, chemicznych oraz strukturalnych są przyczyną zmian właściwości makroskopowych w tym także elektrycznych.

Działanie wilgoci, czynników agresywnych chemicznie, temperatury, obciążeń mechanicznych i innych wywołują procesy, które mają wpływ na strukturę, skład i właściwości materiałów wieloskładnikowych. Współczesne metody badania właściwości takich materiałów bazują na wykorzystaniu opisów ich zachowania się przy różnego rodzaju oddziaływaniach zewnętrznych, w tym także pola elektromagnetycznego. Dla opisu zachowania się materiałów przy tego typu oddziaływaniach wykorzystywane są coraz bardziej zaawansowane modele, które ujmują w opisie zachodzące w nich przemiany. Procesy takie są między sobą sprzężone i wymagają coraz dokładniejszych technik pomiaru właściwości materiałów (współczynników materiałowych).

Problem opisu oddziaływania pola elektromagnetycznego z ośrodkiem materialnym wieloskładnikowym jest bardzo obszerny. Klasyfikacja typów materiałów ze względu na ich właściwości elektryczne pozwala na ujęcie wpływu pola elektromagnetycznego na procesy w ośrodkach różnego rodzaju. Badanie budowy takich materiałów oraz procesów przemian w nich zachodzących pod wpływem różnych czynników wiąże się z poznaniem właściwości elektrycznych i ich ilościowym ujęciem w modelach opisujących zachodzące w nich procesy termomechaniczne. Szczególnie ważne znaczenie ma badanie właściwości elektrycznych ośrodków wieloskładnikowych, których struktura wewnętrzna ma istotny wpływ na zachowanie się takich materiałów.

Jednym z najbardziej rozpowszechnionych podejść do klasyfikacji materiałów ze względu na ich właściwości elektryczne jest podział materiałów z uwagi na ich przewodność elektryczną [1, 4, 35]. Przewodność elektryczna jest wielkością fizyczną, która charakteryzuje materiał ze względu na proces przenoszenia ładunku elektrycznego. Cząstki naładowane elektrycznie

są obecne we wszystkich ośrodkach materialnych. Jednak tylko materiały, w których przy działaniu zewnętrznego pola elektrycznego wynika uporządkowany i ukierunkowany, zgodnie z natężeniem tego pola, przepływ takich cząstek nazywamy przewodnikami.

Dla ujęcia wzajemnego oddziaływania ośrodka materialnego z polem elektromagnetycznym wykorzystywane jest podejście fenomenologiczne bazujące na wprowadzeniu parametrów opisujących takie pole oraz jego zmiany w przestrzeni i czasie. Takimi parametrami jest natężenie składowych elektrycznej oraz magnetycznej pola oraz ich indukcja [17, 39, 53]. Przy budowaniu modeli ośrodków materialnych opartych na podejściu fenomenologicznym [38, 52, 56], formułowane są równania elektrodynamiki wraz ze związkami fizycznymi pozwalającymi sformułować zagadnienia brzegowo-początkowe dla wyznaczania charakterystyk pola, tak w ośrodku materialnym jak i w otoczeniu. Równania te są sprzężone z układem zależności ujmujących termomechaniczne zachowanie się ośrodka materialnego.

Dla opisu pola elektromagnetycznego oraz jego zmian w ośrodku materialnym, w literaturze naukowej istnieje wiele podejść, wśród których można wyróżnić takie, zgodnie z którym pole, powstające w medium, jest czynnikiem zewnętrznym [34, 43, 48]. Jednym z procesów, który przy tym ma miejsce jest przepływ prądu elektrycznego (transport cząstek naładowanych). Innymi przejawami działania pola elektromagnetycznego na ośrodek materialny są procesy termomechaniczne przejawiające się w redystrybucji składników ośrodka oraz powstaniu w materiale nierównomiernych rozkładów temperatury, odkształceń i naprężeń wewnętrznych [34, 48].

Ośrodki materialne mogą istotnie różnić się między sobą pod względem własności elektrycznych. Teorie opisujące wzajemne oddziaływanie pola elektromagnetycznego i medium materialnego są bardzo rozbudowane, co czyni celowym opracowanie wariantów opisów procesów dostosowanych do węższych klas materiałów, które uwzględniają szczegółowo ich właściwości elektryczne i magnetyczne oraz parametry działającego pola elektromagnetycznego.

W materiałach wieloskładnikowych, do których odnieść możemy szeroką klasę materiałów budowlanych na bazie cementu, charakterystyki elektryczne są czułe zarówno na zmiany ich składu, jak i warunki oddziaływań ze strony otoczenia, takich jak wilgoć, temperatura, czynniki mechaniczne i inne. Szczególnie w szerokim zakresie zmienna jest przewodność elektryczna, której pomiary mają duże znaczenie w opracowaniu rekomendacji do wytwarzania takich materiałów, ich obróbki i zastosowań.

Cechy użytkowe betonowych i żelbetowych elementów budowlanych istotnie zależne są od właściwości użytych cementów. Zarówno przy formowa-

niu takich elementów jak i w czasie ich użytkowania struktura materiału i jego skład ulegają ciągłej zmianie [36, 44, 55]. Prognozowanie właściwości materiałów wieloskładnikowych jakimi są materiały budowlane na bazie cementu opiera się na modele opisujących związek parametrów materiałowych ze strukturą elementu oraz jej zmianach w czasie wiązania i twardnienia. Warunkuje to ważność opracowania i rozwoju takiego podejścia i jest celem niniejszej pracy.

Badanie oporności elektrycznej materiałów cementowych, w szczególności betonów, jest ważnym elementem badania ogniw korozyjnych w stali zbrojeniowej żelbetu [44, 50, 58]. Przy tym wysoka rezystywność elektrolitu (w tym przypadku betonu) redukuje prądy korozyjne i spowalnia prędkość procesów korozyjnych. Przewodność elektryczna jest zasadniczo związana z przenikalnością cieczy i dyfuzją jonów przez materiały porowate. Oprócz tego, pomiary przewodności elektrycznej wykorzystywane są do pośredniego pomiaru odporności betonu na penetrację roztworów soli chlorkowych powodujących korozję stali. Z drugiej strony, w niektórych zastosowaniach materiałów cementowych wymagana jest ich niska rezystywność stawiana przepływowi ładunku elektrycznego. Przykładami tu mogą być podłogi sal operacyjnych lub katodowe systemy ochronne zbrojenia, gdzie ważne jest efektywne odprowadzenie gromadzącej się elektryczności statycznej.

Praca składa się z wprowadzenia, dwóch rozdziałów i podsumowania. Rozdział pierwszy przedstawia podejście do klasyfikacji materiałów (w tym także cementowych) ze względu na ich właściwości elektryczne. W rozdziale tym przedstawione zostały podejścia do modelowania procesów, zachodzących w przewodnikach pod wpływem zewnętrznego pola elektromagnetycznego. W kolejnych podrozdziałach podane wyjściowe relacje termomechaniki będące ograniczeniami na postać równań fizycznych opisujących procesy w materiałach wieloskładnikowych, przedstawione schematy doświadczalne wyznaczania przewodności elektrycznej w materiałach cementowych i wyniki jej pomiaru dla materiałów o różnym składzie i strukturze. Dokonano również analizy porównawczej z danymi literaturowymi. Przedstawiono także podstawy teoretyczne badania wpływu zewnętrznego pola elektromagnetycznego na zachowanie się materiałów cementowych. Jako wyjściowy przyjęto opis termomechaniczny, który pozwala rozpatrywać procesy fizyczne w materiałach wieloskładnikowych w sprzężeniu i otrzymać równania fizyczne procesów. Rozważno również znane z literatury fakty powiązania procesów w takich materiałach na etapie ich wytwarzania i eksploatacji. W rozdziale drugim przedstawiono wyniki badań doświadczalnych właściwości materiałów cementowych, które otrzymano z wykorzystaniem pomiarów z udziałem zewnętrznego pola elektromagnetycznego. Zaprezen-

towano zbudowane dla celów badawczych stanowisko laboratoryjne do pomiarów właściwości elektrycznych materiałów cementowych oraz przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań. Pokazano powiązanie właściwości elektrofizycznych (w szczególności przewodności elektrycznej) materiału z ważnymi z punktu widzenia eksploatacji wyrobów z materiałów cementowych właściwościami konstrukcyjnymi.

Rozdział 1

Przepływ prądu elektrycznego w materiałach cementowych

1.1. Klasyfikacja materiałów przewodzących prąd elektryczny

W celu wyjaśnienia mechanizmów przewodności elektrycznej materiałów wieloskładnikowych do których odnosimy materiały cementowe, opracowano szereg teorii [14, 21, 50]. Możemy je podzielić na następujące kategorie. Pierwsza kategoria bazuje na modelowaniu materiału jako kompozytu, bez uwzględnienia fizycznej natury ośrodka. W tej teorii próbuje się wyrazić przewodnictwo elektryczne jako funkcję przewodności każdego składnika, jego udziału objętościowego, zaś w niektórych sformułowaniach kształtu i rozmiarów cząstek z których składa się kompozyt. W większości podejść kompozyt jest jednak traktowany jako materiał, składający się z ciągłej, przewodzącej matrycy oraz neutralnego wypełniacza, który zajmuje część rozważanej przestrzeni przewodnika. Przykładowo przewodność elektryczna betonu jest determinowana przez przewodnictwo zaczynu, a kruszywo, wypełniające część objętości nie ma udziału w przenoszeniu prądu elektrycznego [49]. W przypadku zapraw takim elementem neutralnym jest piasek.

W innym podejściu ustalane są empiryczne zależności między przewodnictwem elektrycznym materiału jako całości i przewodnictwem faz przewodzących. Przez dostosowanie danych doświadczalnych do pewnych prostych zależności można ustalić współczynniki przewodności elektrycznej dla poszczególnych materiałów. W ten sposób przewodność materiału może być prognozowana na podstawie znanych przewodności i udziału objętościowego fazy przewodzącej [50].

1.1.1. Rezystywność materiałów wieloskładnikowych

Jedną z pierwszych prób wyjaśnienia elektrycznych właściwości materiałów wieloskładnikowych była opracowana w XIX wieku teoria Makswella

[41]. Wprowadzone przy wykorzystaniu pojęcia przewodności elektrycznej składników, relacje Maxwella, wyrażone przez wartości rezystywności mają postać:

$$\frac{\rho_m - \rho}{\rho_m + 2\rho} = V_a \frac{\rho_m - \rho_a}{\rho_m + 2\rho_a} \quad (1.1)$$

gdzie ρ_m — rezystywność matrycy, ρ — rezystywność kompozytu, ρ_a — rezystywność składników wypełniacza, V_a — udział objętościowy składników wypełniacza.

W większości przypadków rezystywność wypełniacza jest większa niż $10^3 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$, przy czym dla matrycy wartość ta jest znacznie poniżej $10 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$. W praktycznych zastosowaniach rezystywność wypełniacza może być przyjęta jako nieskończoność w porównaniu z rezystywnością matrycy. Wtedy V_a można wyrazić jako $1 - V_m$, gdzie V_m jest udziałem objętościowym "matrycy", i równanie (1.1) redukuje się do następującej postaci:

$$\rho = \rho_m \frac{3 - V_m}{2V_m} \quad (1.2)$$

Należy przy tym zauważyć, iż założeniem podejścia Maxwella było to, że udział objętościowy wypełniacza jest na tyle mały, iż nie zakłóca on przepływu prądu w otoczeniu jego sąsiadujących cząstek. Inne sformułowania teorii uwzględniających geometrię i rozmieszczenie cząstek wypełniacza były opracowane przez Kellera i Kellera, Whittingtona [51]. Fricke i Sławinski [15, 46] pokazali dobrą zgodność otrzymanych wzorów z danymi doświadczalnymi dla zapraw przygotowanych z nieabsorbującym wilgoć piaskiem, wymiary ziarna którego były do siebie zbliżone. Takie podejście nie ujmuje jednak dokładnie właściwości elektryczne bardziej skomplikowanych struktur materiałów wieloskładnikowych, w szczególności betonów. Dla takich materiałów opracowywane są inne podejścia.

1.1.2. Parametr kształtu

W badaniach porowatych skał wykonanych przez Archie [1] zaproponowano relację między rezystywnością nasyconych skał (głównie piaskowców) i opornością właściwą wypełniającej przestrzeń porową cieczy. Zależność ta, znana jako prawo Archie'ego, wyraża się przez wprowadzony parametr kształtu F :

$$F = \frac{R_0}{R_w} = \varphi^{-m} \quad (1.3)$$

gdzie R_0 — rezystywność materiału nasyconego cieczą, R_w — rezystywność cieczy wypełniającej przestrzeń porową, φ — udział objętościowy cieczy w materiale, m — współczynnik kształtu.

Podstawowym celem wprowadzenia zależności Archie’ego jest otrzymanie zależności między mierzoną rezystywnością i porowatością (lub zawartością cieczy) materiałów. Zależność (1.3) jest czysto empiryczna i nie jest oparta o prawa i modele fizyczne. Była ona później uogólniona przez Atkinsona i Smitha [2], Jacksona [32] do postaci:

$$F = A\varphi^{-m} \quad (1.4)$$

gdzie F i φ definiowane jak wcześniej, a A jest dodatkową stałą. Whittington [51] zastosował tę zależność do betonów, definiując F jako iloraz mierzonej rezystywności betonu i zaczynu cementowego, a φ – udział objętościowy zaczynu w betonie.

1.2. Przewodność elektryczna materiałów cementowych

Jak wspomniano wyżej, przewodniki wieloskładnikowe, do których odnosić będziemy również materiały cementowe, różnią się zasadniczo mechanizmem przenoszenia ładunku elektrycznego. Materiały takie tworzą złożony układ cząstek o różniących się między sobą właściwościach. Między składnikami zachodzą wzajemne oddziaływania, co przejawia się przede wszystkim w zachodzących w takich materiałach procesach fizyko-chemicznych, cieplnych oraz mechanicznych [3, 49, 56]. Zachodzą procesy wymiany masy między składnikami układu oraz procesy jej przenoszenia (procesy dyfuzyjne). Niektóre ze składników mieszaniny posiadają ładunek elektryczny i procesy jego przenoszenia zachodzą nawet przy braku oddziaływania pola zewnętrznego. W materiale również zachodzą przemiany strukturalne i szkielet fazy stałej materiału doznaje przemian. Przejawia się proces ten zwykle jako twardnienie materiału. Towarzyszy mu zmiana struktury porowatej materiału, co ma wpływ na procesy dyfuzyjne oraz towarzyszące im procesy cieplne oraz mechaniczne. Nałożenie oddziaływania zewnętrznego pola elektromagnetycznego jeszcze bardziej komplikuje opis procesów zachodzących w rozważanych ośrodkach.

Szczególne miejsce wśród składników ośrodka wieloskładnikowego zajmuje obecna w nich wilgoć. Rozpuszczanie się w wodzie składników, tworzących rozważany układ, jest przyczyną pojawienia się swobodnych nośników ładunku elektrycznego i materiały takie stają się przewodnikami elektryczności. Proces przenoszenia (transportu) ładunku elektrycznego w takich materiałach powiązany jest z transportem masy i procesami przemian zachodzącymi w układzie cząstek, tworzących strukturę ośrodka wieloskładnikowego.

Ośrodki wieloskładnikowe i ich opis zachowania przy oddziaływaniach różnej natury fizycznej przyciągają pilną uwagę badaczy, szczególnie w ostatnim czasie. Zadanie to stanowi wielkie wyzwanie tak z punktu widzenia poznania właściwości materiałów wieloskładnikowych, jak i zastosowań takich materiałów w konstrukcjach. Materiały wieloskładnikowe mają szerokie zastosowanie również w budownictwie (miały od zawsze), dlatego poznanie właściwości materiałów budowlanych ma ważne znaczenie z punktu widzenia prognozowania ich trwałości i niezawodności.

Istnieje szereg modeli, ujmujących właściwości ośrodków wieloskładnikowych i opisujących ich cechy przy oddziaływaniach wilgoci, ciepła, mechanicznych i innych dla przypadków szczególnych [18, 23, 48, 58]. Brak jednak w literaturze kompleksowego ujęcia wzajemnego wpływu pola elektromagnetycznego i procesów termomechanicznych w porowatych ośrodkach wieloskładnikowych. Opis zachowania się wieloskładnikowych materiałów porowatych, a w szczególności materiałów budowlanych, oraz zbudowanie modelu opisującego wpływ zewnętrznego pola elektromagnetycznego na takie materiały jest przedmiotem niniejszego rozdziału.

1.2.1. Struktura materiałów cementowych

Do wyjaśnienia i zrozumienia zachowania się materiału wieloskładnikowego przy oddziaływaniach zewnętrznych konieczne jest modelowanie jego struktury wewnętrznej. Przy podejściu do takiego modelowania ważnym elementem jest opis struktury i oddziaływań między poszczególnymi elementami. Nie jest możliwe prześledzenie ruchu poszczególnych cząstek mikroskopowych, tworzących materiał wieloskładnikowy, a nawet utrudniłoby to ujęcie matematyczne takiego opisu. Oprócz tego w ośrodkach wieloskładnikowych zachodzą procesy przekształcenia poszczególnych składników oraz tworzenie się nowych. Przykładami takich przemian jest wbudowywanie się cząsteczek wody w strukturę materiału porowatego lub rozpuszczanie się w wodzie cząstek fazy stałej, etc.

Przy tworzeniu się stałego materiału wieloskładnikowego na skutek szeregu przemian chemicznych oraz fizycznych tworzy się struktura szkieletu materiału. W stanie wyjściowym materiał wykazuje właściwości cieczy lepkiej, i stopniowo tworzy się w nim struktura szkieletu o malejącej porowatości i coraz wyraźniejszych właściwościach ciała stałego. Proces ten jest nazywany zwykle procesem wiązania i twardnienia (ang. *setting and hardening*) materiału porowatego. Dla opisu takiej przemiany wprowadzimy charakterystyki ujmujące zmiany właściwości jak poszczególnych składników, tak i materiału jako całości.

Rozważymy tworzenie się struktury typowych materiałów porowatych, jakimi są cementowe materiały budowlane. Podstawowym składnikiem takich materiałów, który zapewnia utworzenie się struktury ciała stałego jest cement. Cement jest mineralnym materiałem hydraulicznym, i po zmieszaniu z odpowiednią ilością wody zachodzi proces finalizowany tworzeniem się nierozpuszczalnych w wodzie związków, które łącząc się między sobą oraz ze składnikami wypełniacza, tworzą szkielet przyszłego elementu w fazie stałej.

Opisowi technologii otrzymania materiałów budowlanych na bazie cementu poświęcono wiele publikacji naukowych, w których przedstawiane badania wpływu poszczególnych składników, dodatków, domieszek oraz warunków oddziaływania zewnętrznego na właściwości gotowych materiałów [20, 36, 44]. Materiały cementowe w budownictwie wykorzystywane są bardzo szeroko i zatem konieczność prowadzenia badań pozwalających poznać ich właściwości jest rzeczą naturalną. Dużo uwagi w tych badaniach poświęcono opisowi przemian chemicznych oraz fizycznych i analizowany wpływ tych przemian na materiał końcowy.

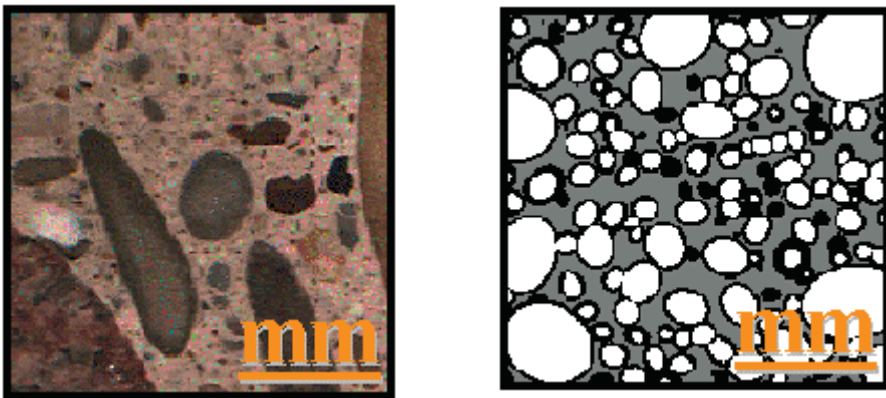
Mimo szerokiego zainteresowania badaczy właściwościami materiałów cementowych obecnie nie można stwierdzić, iż procesy te zostały w pełni poznane i opisane. Wciąż wynikają problemy właściwego doboru składników materiału; jak również wymagania poszczególnych elementów konstrukcyjnych narzucają różne, czasami sprzeczne między sobą ograniczenia na skład kompozytu, jakim jest materiał cementowy.

Opis struktury materiału oraz jej zmian w czasie wiązania i twardnienia jest kluczem do zbudowania teorii zachowania się takich materiałów tak na etapie wytwarzania, jak i w czasie eksploatacji. Jak wspomniano wyżej, struktura materiału cementowego tworzy się w wyniku przemian fizyko-chemicznych. Jednak przemiany te nie ustają z chwilą utworzenia się szkieletu materiału (związania), a trwają w ciągu całego "życia" elementu budowli. Przemiany te zachodzą tak na skutek procesów wzajemnego oddziaływania między składnikami kompozytu, jak i oddziaływania z otoczeniem (działanie wilgoci, temperatury, obciążeń mechanicznych, czynników agresywnych powodujących korozję itp.). Oznacza to, że struktura i budowa materiału wieloskładnikowego ulega stałej zmianie.

Teoretyczne zrozumienie właściwości mikrostruktury materiałów cementowych przekładających się na jego właściwości makroskopowe komplikuje duży rozrzut wymiarów cząstek składników (komponentów). W skali milimetrowej, w ciągłej strukturze materiału, tworzonej przez zaczyn cementowy, możemy obserwować nieciągłość na granicach podziału z przestrzenią porową, która jest wypełniona roztworem wodnym składników rozpuszczal-

nych lub powietrzem. Do tego dochodzą strefy przejściowe na granicach podziału ze składnikami, pełniącymi rolę wypełniacza. W skali mikrometrowej zaczyn cementowy jest również niejednorodnym medium, składającym się z nieprzereagowanych składników cementu, produktów hydratacji mających krystaliczną lub amorficzną budowę i tworzy mikro-kapilarną strukturę. I wreszcie same produkty hydratacji, będąc materiałami o strukturze porowatej mają wymiary w skali nanometrów, co jest na pograniczu możliwości wykorzystania opisu z pominięciem cząsteczkowej budowy materii.

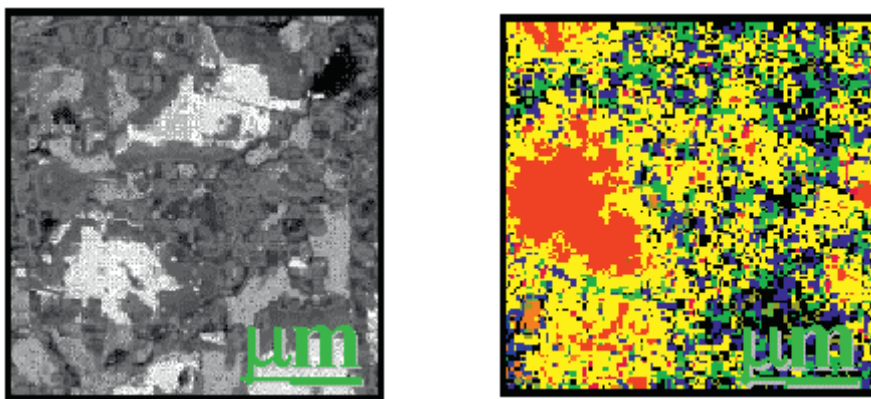
Do modelowania kompozytu cementowego zastosowano podejście wieloskalowe [18, 19, 47], istota którego polega na wprowadzeniu wielkości, które charakteryzują materiał wieloskładnikowy w różnych skalach rozmiarów cząstek, z których składa się materiał. W skali makroskopowej możemy obserwować wyraźne granice podziału między kruszywem a otaczającym jego zaczynem cementowym. Przyjęte jest w tej skali założenie, że przy tworzeniu się takiej struktury kruszywa (piasek, żwir) wykonują rolę wypełniacza, a matrycę składa zaczyn, który w miarę postępu reakcji hydratacji cementu tworzy zwartą całość. Przestrzeń między ziarnami kruszywa jest wypełniona coraz bardziej zwartym twardniejącym zaczynem cementowym i materiał nabiera cechy ciała stałego. Ziarna kruszywa w takim materiale są zwykle albo izolowane, albo stykają się ze sobą po powierzchni, która jest bardzo mała w porównaniu z powierzchnią podziału matryca–kruszywo. Procesy wymiany masy między kruszywem a matrycą zwykle są pomijalne. Zaczyn, tworzący matrycę jest materiałem porowatym i przy granicy podziału z ziarnami kruszywa tworzy się strefa przejściowa o właściwościach odmiennych od masy zaczynu.



Rysunek 1.1. Materiał wieloskładnikowy w skali milimetrowej (makro)

Rysunek 1.1 ilustruje schematycznie makroskopową strukturę materiału cementowego. Po lewej stronie pokazane jest zdjęcie przekroju elementu betonowego. Wyraźnie widoczne granice podziału między składnikami struktury materiału. W podejściu modelowym struktura obszaru przestrzennego, zajętego przez materiał jest przedstawiana w postaci zwartej matrycy zaczynu (szare tło) a jaśniejsze oraz ciemniejsze podobszary ilustrują w tej matrycy izolowane elementy kruszywa.

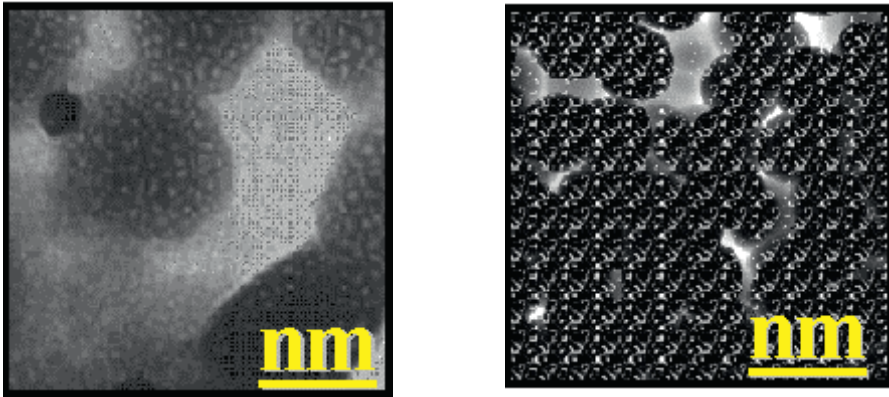
Jeżeli przyjrzeć się bliżej matrycy, którą w skali makroskopowej można byłoby uważać za ośrodek ciągły, to w skali wymiarów rzędu rozmiarów ziaren cementu mamy strukturę bardzo podobną do omówionej wyżej. Mianowicie, ziarna cementu po oddziaływaniu z wodą tworzą rolę wypełniacza w matrycy żelu cementowego. Woda zarobowa przenika w ziarna cementu na głębokość rzędu kilku dziesiątych mikrona, i po rozpuszczeniu zewnętrznych jego warstw tworzy żel, z którego w wyniku hydratacji tworzona jest struktura matrycy. Ziarna jak by "rosną" w wymiarach i są częściowo nałożone na siebie na skutek pojawienia się coraz większej ilości produktów hydratacji. Przy tym blokowane jest dojście wody do głębszych warstw ziaren cementu, którego większa ilość nie ulega połączeniu z wodą. Tworzy się przestrzeń międzyziarnowa w żelu cementowym (mikrokapilary) wypełniona cieczą, będącą roztworem rozpuszczonych składników cementu (elektrolit).



Rysunek 1.2. Struktura zaczynu cementowego (skala mikrometrów)

Na rysunku 1.2 schematycznie pokazana jest struktura zaczynu cementowego. Po lewej stronie na zdjęciu mikroskopowym pokazana jest mikrostruktura zaczynu cementowego. Granicy podziały podobszarów na tym zdjęciu nie są wyraźne i przy modelowaniu konieczne jest ujęcie stref przejściowych między składnikami mieszaniny.

Rozważenie poszczególnych ziaren struktury w skali nanometrów wymagałoby ujęcia rozkładów poszczególnych molekuł i atomów. Niektóre ze składników takiej struktury tworzą sieć krystaliczną, a niektóre pozostają w formie amorficznej [18]. Ziarna struktury w tej skali rozważań nie są już elementami zwartymi, a tworzą niejednorodny ośrodek porowaty. Również granice podziału ziaren są rozmyte co jest dodatkowym utrudnieniem przy opisie procesów w takich strukturach.



Rysunek 1.3. Fazowa struktura żelu (skala nanometrów)

Kolejny schemat na rysunku 1.3 przedstawia zdjęcie struktury żelu cementowego wykonane z mikroskopu skaningowego (po lewej) oraz ujęcie modelowe jego struktury.

Opis procesów fizykalnych, zachodzących w każdej z wymienionych skali oraz ich powiązanie z procesami na innych poziomach jest konieczny, chcąc przewidywać zachowanie się takich materiałów jak na etapie ich wytwarzania, tak i eksploatacji konstrukcji z nich wykonanych. Choć tak szeroki rozrzut skal wymiarów nie może być ujęty w jednym modelu łączącym charakterystyki mikroskopowe i makroskopowe, możliwe jest zbudowanie kompleksowego podejścia do ujęcia właściwości przenoszonych z jednej skali na inną. Wprowadzone w rozważanie różne skale wymiarów są charakteryzowane przez wprowadzenie odrębnych parametrów opisujących procesy w nich zachodzące.

1.2.2. Wieloskalowy model ośrodka wieloskładnikowego

Celem modelowania procesów w materiałach cementowych jest zbudowanie teorii, ujmującej specyfikę właściwości takich materiałów oraz wie-

lopoziomowość skał charakteryzujących wymiary cząstek składników. Rozważymy przy tym następujące procesy:

- przenoszenie wilgoci
- przenoszenie ładunku elektrycznego
- przewodzenie ciepła
- procesy mechaniczne

Należy zaznaczyć, iż taki podział procesów jest bardzo umowny i przy rozważaniu konkretnego modelu ośrodka brane jest pod uwagę sprzężenie odpowiednich rozkładów wielkości charakterystycznych.

1.2.3. Transport masy

Wymiana masy w materiale wieloskładnikowym jest w skali makroskopowej interesująca z punktu widzenia opisu zawilgocenia takich materiałów i rozkładu wilgoci w materiale, w zależności od warunków otoczenia i oddziaływań zewnętrznych. Przy tym możemy dla uproszczenia przyjąć, iż materiał matrycy z zaczynu cementowego jest materiałem porowatym i przenikalnym dla transportu wilgoci, a kruszywo tworzy wtrącenia w strukturze materiału, będące przeszkodami w ich transporcie. Między kruszywem a matrycą jest strefa przejściowa, opis której wiązany jest z matrycą materiału. Procesy wymiany między matrycą a kruszywem nie zachodzą, a na powierzchniach zewnętrznych ciała możliwe są procesy wymiany masy z otoczeniem.

1.2.4. Transport ładunku elektrycznego

Przenoszenie ładunku elektrycznego w ośrodku jest powiązane z transportem jonów w roztworze wypełniającym sieć porów matrycy. Wymiana ładunku elektrycznego zachodzi między składnikami cieczy porowej, będącej elektrolitem. Na powierzchni podziału między matrycą zaczynu oraz kruszywem możliwe utworzenie się stref powierzchniowego rozkładu ładunku elektrycznego oraz zjawiska polaryzacyjne. Na zewnętrznych powierzchniach ciała odbywa się ponadto wymiana ładunku elektrycznego z otoczeniem. Przyjmuje się, że ośrodek początkowo elektrycznie neutralny pozostaje takim w każdym punkcie materialnym.

1.2.5. Wymiana ciepła i procesy mechaniczne

Procesom zachodzącym w materiałach wieloskładnikowych towarzyszy wymiana energii między składnikami układu (w tym także między kruszywem i matrycą) oraz z otoczeniem. Możliwa jest produkcja ciepła w układzie, tak

na skutek oddziaływania z otoczeniem, jak i od procesów wymiany energii między składnikami.

Niejednorodność rozkładu temperatury oraz oddziaływania między składnikami w układzie wieloskładnikowym są przyczyną powstania stanu odkształceń i naprężeń. Układ może być obciążony również siłami zewnętrznymi, zadanymi zarówno na zewnętrznej powierzchni ciała tak i jako siły masowe lub objętościowe.

1.2.6. Założenia modelowe

Do tworzenia podobnych wielopoziomowych modeli ujmujących mikrostrukturę materiału wykorzystywana jest teoria perkolacji [47]. Podstawową koncepcją tej teorii jest idea spójności. Struktury pewnego rodzaju są wbudowane w obszar istniejącego rdzenia. Teoria ta próbuje dać odpowiedź na pytanie: przy jakim udziale objętościowym pewien obszar zostanie wypełniony? Inna forma tego pytania brzmi: kiedy dla struktury wypełniającej pewien obszar w przypadkowy sposób usuwane elementy powodują jej rozdzielenie? Próg perkolacyjny może być definiowany jako punkt zmiany spójności struktury. W zastosowaniu do materiałów cementowych, podejście takie jest przydatne do ujęcia zmian właściwości materiału od wymieszania do tworzenia się finalnej struktury. Zaraz po wymieszaniu, składniki będące w fazie stałej w zaczynie cementowym, nie są połączone między sobą lub związki te są nietrwałe (tzw. kłaczkowate połączenia) i dlatego świeżo otrzymany materiał jest cieczą lepłą. Struktura fazy stałej jest budowana poprzez wzrost udziału nierozpuszczalnych produktów reakcji i w pewnej chwili osiągana jest ciągłość, odpowiadająca utworzeniu się ciągłej struktury szkieletu materiału. Próg ten jest definiowany jako punkt stwardnienia materiału. Po stwardnieniu zaczynu cementowego następuje utrata ciągłości przestrzeni porowej co ma wpływ na procesy kinetyczne w materiale. Część przestrzeni porowej staje się zamknięta i zredukowane są drogi przenoszenia dla takich procesów. Kontynuacja utraty przestrzeni porowej doprowadza do stopniowej zamiany stosunkowo "szybkiego" transportu roztworu czy też jonów w względnie dużej przestrzeni porowej na "powolny" transport regulowany małymi porami żelowymi. W pracach E.J.Garbocki i D.P.Bentz [18, 19] dokonano cyfrowych symulacji wpływu porowatości na próg perkolacyjny dla zaczynów cementowych o różnych współczynnikach wodno cementowych. Przy tym zakładano, że wypełnienie obszaru następuje wtedy, kiedy znikają połączone między sobą ścieżki porowe zajmujące całą objętość. Otrzymano, iż praktycznie dla wszystkich zaczynów o współczynniku wodno-cementowym poniżej 0,6 taki perkolacyjny próg istnieje. Przyjęto na podstawie takich symulacji, że w przypadku współczynników

wodno-cementowych powyżej 0,6-0,7 zawsze istnieje zwarty system porowy. Taki wynik jest w dobrej zgodności z danymi doświadczalnymi [18].

Perkolacja odgrywa istotną rolę również w skali milimetrowej przy rozważaniach zapraw i betonów. W tym przypadku wypełnienie przejściowych stref między zaczynem cementowym a kruszywem w materiale determinuje procesy przenoszenia w materiale. Charakterystycznym jest to, że strefa przejściowa ma wyższą porowatość (tak z punktu widzenia makroskopowych porów, jak i mikro-porowatości). Jest to charakterystyczne dla objętości zaczynu cementowego w odległości rzędu $50 \mu\text{m}$ od powierzchni kruszywa. Jednak w betonach z kruszywem o bardzo niskiej porowatości procesy przenoszenia jonów jak i przenikalność cieczy są znacznie niższe niż w odpowiednich zaczynach cementowych. W niektórych pracach [23, 57] podane są informacje o znacznym zwiększeniu efektywnych współczynników przenoszenia przy dodaniu ilości kruszywa powyżej pewnej krytycznej granicy. Pokazano przy tym, że przenikalność betonu wzrasta o dwa rzędy w porównaniu z zaczynem cementowym, z którego jest on wykonany. Jedynym możliwym wytłumaczeniem takiego zachowania oprócz znacznego wzrostu mikrospekań jest efekt transportu cieczy oraz jonów przez strefy przejściowe. Pory w strefie przejściowej mają większy wymiar niż właściwe zaczyn. Jednak, jeżeli strefy przejściowe nie tworzą struktury zwartej, to dominującym mechanizmem transportu jest transport przez masę zaczynu.

1.3. Związki fizyczne w materiałach przewodzących prąd elektryczny

Przewidywanie zachowania się materiałów porowatych (wieloskładnikowych) przy zewnętrznych oddziaływaniach różnej natury fizycznej stanowi obecnie ważne zagadnienie. W literaturze naukowej znacząca ilość publikacji poświęcona jest zbudowaniu teorii procesów, zachodzących w materiałach o złożonej strukturze wewnętrznej przy oddziaływaniach zewnętrznych, w szczególności w polu elektromagnetycznym. Materiały porowate mają strukturę, w której występuje bardzo rozwinięta powierzchnia wewnętrzna, na której zachodzą istotne zmiany lokalnych właściwości fizycznych i mają miejsce procesy wymiany masy, ładunku elektrycznego, energii oraz mechaniczne, które powodują zmianę struktury i makroskopowych właściwości fizycznych. Dla ujęcia tych przemian, w rozważaniach teoretycznych konieczne jest zbudowanie takich modeli, które opisują wymienione procesy i pozwalają zbudować schematy obliczeń uwzględniające oddziaływania między składnikami materiału porowatego. Wśród właściwości materiałów wieloskładnikowych właściwości elektryczne stanowią te, które

mają znaczenie w różnych zastosowaniach [50, 58]. Wymienić tu można zastosowanie katodowej ochrony zbrojenia konstrukcji żelbetowych, gdzie wymagana jest wysoka rezystywność betonu; z drugiej zaś strony w pomieszczeniach, w których możliwe jest nagromadzenie ładunku statycznego, konieczne jest efektywne jego odprowadzenie, co wymaga zwiększenia przewodności materiału. Z przepływem prądu elektrycznego przez materiał porowaty powiązane są techniki osuszania za pomocą pola elektromagnetycznego lub też usuwania szkodliwych domieszek w cieczy porowej materiału kapilarno-porowatego. Materiały budowlane są typowymi przedstawicielami wieloskładnikowych kapilarno-porowatych wielofazowych materiałów. W stanie wilgotnym wykazują właściwości przewodnika elektryczności, ale jako materiał suchy mogą być bardzo dobrymi izolatorami. W literaturze naukowej wielu badaczy dosyć szeroko analizowało procesy oddziaływania pola elektromagnetycznego na ośrodek materialny. Jednak poszukiwania modelu, który by ujmował sprzężone procesy transportu masy, ładunku elektrycznego (prąd elektryczny) i ciepła oraz wpływ takich procesów na stan mechaniczny ośrodka kończyły się niepowodzeniem, co było przyczyną podjęcia się tego tematu w niniejszym opracowaniu. Natomiast istnieje wiele publikacji poświęconych wyjaśnieniu właściwości elektrycznych materiałów wieloskładnikowych.

Zewnętrzne, stałe lub zmienne w czasie, pole elektromagnetyczne wywołuje procesy elektryczne, cieplne oraz mechaniczne w ośrodku wieloskładnikowym, z którym powiązane są zmiany energetyczne [48, 53, 55, 58]. Procesy te są powiązane między sobą i istnieje szereg modeli ich opisu. Przy tym punktem wyjścia jest cząsteczkowa budowa materii i założenie, że określone rodzaje cząstek przenoszą ładunek elektryczny. Wymienione cząstki tworzą między sobą wiązania, które są trwałe lub nie i które w określonych warunkach mogą ulegać zmianom. Skutkiem tego są procesy termomechaniczne w takich materiałach.

Uwzględnienie jednak oddziaływań między osobnymi cząstkami w ciałach makroskopowych nie jest możliwe jak również nie jest potrzebne. Dla makroskopowego opisu zachowania materiałów budowane są modele z wykorzystaniem podejścia ciągłego rozkładu materii i wprowadzania parametrów polowych. Pozwala to na wykorzystanie aparatu matematycznego stosowanego przy opisie ośrodka ciągłego (model kontinuum materialnego). Modele, oparte na takim ujęciu, charakteryzuje mniejsza liczba niezależnych parametrów opisujących właściwości rozpatrywanych ośrodków i są one bardziej przydatne do opisu zachowania się ośrodka materialnego poddanego oddziaływaniom zewnętrznym. Przejście jednak od opisu cząsteczkowego do kontinuum wymaga procedur uśredniania właściwości materiałowych

oraz parametrów jednoznacznie ujmujących procesy fizyczne, zachodzące pod wpływem działania zewnętrznego. Rozważania tego typu wymagają szczególnej ostrożności przy opisie ośrodków wieloskładnikowych, czyli takich, które zbudowane z cząstek różnego rodzaju oddziałujących między sobą. Wymaga to wprowadzenia w ujęciu modelowym szeregu parametrów, które nie występują w typowych opisach kontinuum materialnego. Z drugiej strony zaś większość technik pomiarowych bazująca na rozważaniach makroskopowych dla kontinuum materialnego pozwala szacować charakterystyki uśrednione dla ośrodka jako całości. Ujęcie modelowe pozwala na oszacowanie wpływu procesów zachodzących w poszczególnych składnikach oraz na granicach ich podziału na właściwości makroskopowe materiału wieloskładnikowego. Dodatkowym utrudnieniem jest tu fakt, iż w rozważanych procesach ulega zmianie zarówno skład rozważanego ośrodka jak i jego struktura wewnętrzna, co skutkuje zmianami jego właściwości makroskopowych.

Ujęcie modelowe oddziaływania pola elektromagnetycznego na ośrodek wieloskładnikowy jest zagadnieniem złożonym i kompleksowym, i wymaga podejścia interdyscyplinarnego. Formułowanie odpowiednich zależności matematycznych opisujących rozważane związki fizyczne tak w materiale jak i na powierzchni oddzielającej go od otoczenia prowadzi do sprzężonych układów równań różniczkowych cząstkowych, które w połączeniu z warunkami brzegowymi i początkowymi tworzą wyjściowe zagadnienia modelu. Otrzymanie równań modelu wymaga analizy odpowiednich równań bilansowych.

1.3.1. Bilans masy

Ośrodek wieloskładnikowy jest superpozycją n składników o gęstościach ρ^α ($\alpha = \overline{1, n}$) poruszających się z prędkościami \mathbf{v}^α . Przy oddziaływaniu na rozpatrywany ośrodek wieloskładnikowy czynników zewnętrznych zachodzą w nim procesy zmiany struktury i składu oraz przenoszenia masy [38, 56]. Dalej zostaną przeprowadzone rozważania opisujące bilansowanie masy. Wykorzystane przy tym zostanie podejście opisu przestrzennego.

W rozważanym medium, w otoczeniu dowolnego punktu wewnętrznego obszaru (V), który on zajmuje wybieramy podobszar (ΔV). Obszar ten zawiera cząstki rozważanego ośrodka o łącznej masie Δm . Wówczas obszar ten zawiera składniki rodzaju α masa których wynosi Δm^α i zachodzi oczywisty związek

$$\sum_{\alpha=1}^n \Delta m^\alpha = \Delta m \quad (1.5)$$

przy tym

$$\Delta m^\alpha = \int_{(\Delta V)} \rho^\alpha dV \quad \text{oraz} \quad \sum_{\alpha=1}^n \rho^\alpha = \rho \quad (1.6)$$

Wprowadzone wielkości ρ^α oznaczają udział cząstek rodzaju (α) w mieszaninie i charakteryzują ich ilościowy udział w punkcie materialnym rozważanego medium. Fizyczny sens gęstości masowej ma przy tym tylko wielkość ρ . Proponowany opis jest powszechnie stosowany dla ośrodków wieloskładnikowych. Z każdym punktem materialnym \mathbf{x} przestrzennego obszaru zajętego przez medium powiązane są pola skalarowe $\rho = \rho(\mathbf{x}, t)$ oraz $\rho^\alpha = \rho^\alpha(\mathbf{x}, t)$, $\alpha = \overline{1, n}$, które opisują gęstość ośrodka wieloskładnikowego oraz udziały masowe poszczególnych składników w punkcie \mathbf{x} w chwili czasu t .

Cząstki ośrodka wieloskładnikowego są w ciągłym ruchu oraz zachodzą zmiany jego składu, gęstości i udziały jego komponentów. Wprowadzając w rozważania wielkości \mathbf{v}^α prędkości poruszania się składników, otrzymamy następujący bilans:

$$\frac{d}{dt} \int_{(\Delta V)} \rho^\alpha dV = \int_{(\Delta S)} \rho^\alpha \mathbf{v}^\alpha d\mathbf{S} + \int_{(\Delta V)} \rho^\alpha R^\alpha dV \quad (1.7)$$

W zależności tej wyrażenie $\rho^\alpha \mathbf{v}^\alpha$ oznacza strumień składnika (α) przez powierzchnię (ΔS) ograniczającą obszar (ΔV) , a $\rho^\alpha R^\alpha$ - źródło masy składnika.

Wykorzystując dowolność wyboru obszaru (ΔV) po zamianie całki powierzchniowej w równaniu (1.7) na objętościową otrzymamy równanie bilansowe w postaci lokalnej:

$$\frac{\partial \rho^\alpha}{\partial t} + \operatorname{div} \rho^\alpha \mathbf{v}^\alpha = \rho^\alpha R^\alpha \quad \alpha = \overline{1, n} \quad (1.8)$$

Po zsumowaniu zależności (1.8) po wszystkich składnikach układu otrzymamy bilans masy całej mieszaniny

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \sum_{\alpha=1}^n \rho^\alpha \mathbf{v}^\alpha = 0. \quad (1.9)$$

Wykorzystano przy tym fakt, iż zmiana masy ośrodka jako całości może nastąpić tylko na skutek przepływu masy przez powierzchnię, a suma źródeł masy składników $\sum_{\alpha=1}^n R_\alpha = 0$. Sumaryczny strumień masy w ośrodku

wyrazimy wykorzystując prędkość barycentryczną \mathbf{w} (prędkość chwilowego środka ciężkości mieszaniny) następująco

$$\mathbf{J} = \rho \mathbf{w} = \sum_{\alpha=1}^n \rho \mathbf{v}^{\alpha} \quad (1.10)$$

Po wprowadzeniu prędkości ruchu dyfuzyjnego $\mathbf{u}^{\alpha} = \mathbf{w} - \mathbf{v}^{\alpha}$ równanie (1.8) przyjmie postać:

$$\frac{\partial \rho^{\alpha}}{\partial t} + \operatorname{div} \rho^{\alpha} \mathbf{w} = \rho^{\alpha} R^{\alpha} - \operatorname{div} \mathbf{J}^{\alpha} \quad \alpha = \overline{1, n}, \quad (1.11)$$

gdzie $\mathbf{J}^{\alpha} = \rho^{\alpha} \mathbf{u}^{\alpha}$ – strumień dyfuzyjny składnika (α), a równanie (1.9) odpowiednio —

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{J} = 0. \quad (1.12)$$

Zależność (1.11) oraz (1.12) wyrażają bilans masy poszczególnych składników mieszaniny oraz całości ośrodka wieloskładnikowego i wyrażają prawo zachowania masy i nierozdzielność takiego ośrodka oraz służą do zbudowania rozwiązującego układu równań opisujących procesy transportu masy. Przy formułowaniu konkretnych modeli ośrodków wieloskładnikowych wprowadzone wartości strumieni dyfuzyjnych \mathbf{J}^{α} , które ujmują gęstości strumieni przepływających w ośrodku składników są wyrażane przez wielkości fizyczne opisujące czynniki zewnętrzne i zależne są od struktury rozważanego medium. Odpowiednie zależności otrzymywane z równań konstytutywnych wyrażających ograniczenia na kinetykę opisywanych procesów i omówione zostaną przy formułowaniu modeli konkretnych klas materiałów.

1.3.2. Bilans ładunku elektrycznego

Zgodnie z przyjętym opisem niektóre ze składników rozważanego ośrodka wieloskładnikowego przenoszą ładunek elektryczny. Występujące w takich materiałach przepływy składników są przyczyną jego transportu co przejawia się jako przepływający prąd elektryczny. Przepływ taki jest możliwy jeżeli występujące w mieszaninie składniki naładowane elektrycznie mają możliwość swobodnego przemieszczania się pod wpływem zewnętrznego oddziaływania elektromagnetycznego.

Zaznaczmy, iż naładowane cząstki występują w każdym materiale. Większość teorii ujmujących cząsteczkową budowę materii oparta jest na opisie oddziaływań elektrycznych między atomami i skutecznie służy do wyjaśnienia właściwości tak na poziomie cząsteczkowym, jak i w opisach makroskopowych. Składniki naładowane elektrycznie wytwarzają pole elektromagnetyczne w swoim otoczeniu. Jeżeli materiał znajduje się w warun-

kach naturalnych, ilość ładunków pozytywnych i negatywnych jest jednako-
kowa. Więc ładunki elektryczne i wytwarzane przez nich pola znoszą się i
w materiale zachowana jest elektryczna neutralność. Wniesienie w obszar
ośrodka materialnego dodatkowego ładunku elektrycznego lub umieszcze-
nie go w wytworzone zewnętrznymi czynnikami pole elektromagnetyczne
jest przyczyną zmiany rozkładu składników naładowanych i jako skutek ich
przepływ (transport ładunku elektrycznego i przepływ prądu). Przepływy
takie wywołują procesy termomechaniczne, opis których sprowadza się do
formułowania modeli ośrodków z udziałem pola elektromagnetycznego.

Równania, wyrażające bilans ładunku elektrycznego przy jego przepły-
wach w ośrodku wieloskładnikowym otrzymamy w sposób analogiczny do
bilansu masy. Niech $e^{\gamma+}$ oraz $e^{\gamma-}$ oznaczają ładunki elektryczne jednostki
masy obecnych w mieszaninie kationów oraz anionów. Wtedy mamy nastę-
pujący ich bilans w podobszarze (ΔV) przestrzennego obszaru, zajmowa-
nego przez ośrodek:

$$\frac{d}{dt} \int_{(\Delta V)} \rho^\alpha e^\alpha dV = \int_{(\Delta S)} \rho^\alpha e^\alpha \mathbf{v}^\alpha d\mathbf{S} + \int_{(\Delta V)} \rho^\alpha e^\alpha R^\alpha dV, \quad (1.13)$$

gdzie $\alpha = \gamma+ = \overline{1, n_1}$, $\alpha = \gamma- = \overline{1, n_2}$, a n_1, n_2 — ilości składników o
ładunku dodatnim oraz ujemnym odpowiednio.

Lokalną postać bilansu ładunku elektrycznego otrzymujemy po zamianie
całki powierzchniowej na objętościową z wykorzystaniem dowolnego wyboru
podobszaru (ΔV) . Wówczas otrzymamy

$$\frac{\partial \rho^\alpha e^\alpha}{\partial t} + \text{div}(\rho^\alpha e^\alpha \mathbf{v}^\alpha) = \rho^\alpha e^\alpha R^\alpha. \quad (1.14)$$

Po zsumowaniu po składnikach mieszaniny i wykorzystaniu oznaczeń wpro-
wadzonych w poprzednim podrozdziale otrzymamy równanie

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \text{div} \mathbf{j} = 0 \quad (1.15)$$

które wyraża bilans ładunku elektrycznego. W powyższej zależności ozna-
czono $\mathbf{j} = \mathbf{j}^* + \rho e \mathbf{w}$; $\rho e = \sum_{\gamma+=1}^{n_1} \rho^{\gamma+} e^{\gamma+} + \sum_{\gamma-=1}^{n_2} \rho^{\gamma-} e^{\gamma-}$, \mathbf{j}^* - strumień ładunku
elektrycznego związany z działaniem zewnętrznego pola elektromagnetycz-
nego (prąd przewodności).

Równanie (1.15) jest wyrażeniem prawa zachowania ładunku elektrycz-
nego w rozważanym ośrodku przy jego makroskopowej elektrycznej neutral-
ności [37].

1.3.3. Bilans pędu

Makroskopowa cząstka rozpatrywanego ośrodka wieloskładnikowego składa się ze składników, z których każdy ma własną kinematykę. Dla każdego z nich możemy zatem sformułować bilans pędu, który w zapisie lokalnym przyjmuje postać

$$\frac{\partial \rho^\alpha v_i^\alpha}{\partial t} + (\rho^\alpha v_i^\alpha v_j^\alpha - \sigma_{ij}^\alpha)_{,j} = \rho^\alpha f_i^\alpha + P_i^\alpha, \quad (1.16)$$

gdzie σ_{ij}^α - parcjalny tensor naprężenia, f_i^α - siła masowa działająca na składnik, P_i^α - źródło pędu składnika na skutek oddziaływania z pozostałymi składnikami, $\sum_\alpha P_i^\alpha = 0$.

Na skutek oddziaływania pola elektromagnetycznego, na naładowane elektryczne cząstki działa siła masowa (siła Coulomba) mająca postać:

$$f_i^\alpha = e^\alpha E_i \quad (1.17)$$

Globalny bilans pędu rozważanego ośrodka, otrzymany na drodze sumowania po wszystkich składnikach, ma postać równania ruchu [?, ?, ?]:

$$\frac{\partial \rho w_i}{\partial t} + (\rho w_i w_j - \sigma_{ij})_{,j} = \sum_\alpha \rho^\alpha f_i^\alpha \quad (1.18)$$

gdzie $\sigma_{ij} = \sum_\alpha (\sigma_{ij}^\alpha - \rho^\alpha u_i^\alpha u_j^\alpha)$ - tensor naprężenia w ośrodku.

1.3.4. Bilans energii

W wyniku zachodzących w ośrodku wieloskładnikowym procesów ma miejsce zarówno wymiana energii między składnikami, jak i między ośrodkiem a otoczeniem. Bilansując energię składnika zapiszemy rezultat w postaci lokalnej [?, 56]

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho^\alpha \left(U^\alpha + \frac{1}{2} v_k^\alpha v_k^\alpha \right) \right] + \left[\rho^\alpha \left(U^\alpha + \frac{1}{2} v_k^\alpha v_k^\alpha \right) v_i^\alpha + q_i^\alpha - \right. \\ \left. - v_j^\alpha \sigma_{ji} \right]_{,i} = \rho^\alpha v_k^\alpha f_k^\alpha + \rho^\alpha Q^\alpha + E^\alpha, \end{aligned} \quad (1.19)$$

gdzie U^α - energia wewnętrzna składnika, q_i^α - strumień ciepła, E^α - źródło energii, związane z oddziaływaniem na składnik pozostałych składników mieszaniny, $\sum_\alpha E^\alpha = 0$.

Po zsumowaniu po składnikach mieszaniny otrzymujemy bilans globalny:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(U + \frac{1}{2} w_k w_k \right) \right] + \left[\rho \left(U + \frac{1}{2} w_k w_k \right) w_i + q_i - w_j \sigma_{ji} \right]_{,i} \\ = w_k \sum_\alpha \rho^\alpha f_k^\alpha + \rho Q \end{aligned} \quad (1.20)$$

gdzie $\rho U = \sum_{\alpha} \rho^{\alpha} (U^{\alpha} + \frac{1}{2} u_k^{\alpha} u_k^{\alpha})$, $\rho Q = \sum_{\alpha} \rho^{\alpha} (Q^{\alpha} + f_k^{\alpha} u_k^{\alpha})$, a zależność:

$$Q^{\alpha} = J_i^{\alpha} E_i + W \quad (1.21)$$

wyraża moc źródeł ciepła w składniku mieszaniny jest sumą ciepła przemiany fazowej oraz ciepła od przepływu prądu elektrycznego (ciepła Joule'a) [?, ?, ?, ?].

1.3.5. Nierówność wzrostu entropii

Z drugiej zasady termodynamiki, wykorzystanej w przypadku ośrodka wieloskładnikowego, wynika następującą lokalną nierówność wzrostu entropii [38, 52, 53, 56]

$$\frac{\partial(\rho S)}{\partial t} + (\rho S w_k + h_k)_{,k} - \rho r_S \geq 0 \quad (1.22)$$

gdzie $\rho S = \sum_{\alpha} \rho^{\alpha} S^{\alpha}$, $h_k = \sum_{\alpha} (h_k^{\alpha} + \rho^{\alpha} S^{\alpha} u_k^{\alpha})$, $\rho r_S = \sum_{\alpha} \rho^{\alpha} r_S^{\alpha}$, r_S^{α} - źródło entropii w jednostce masy w konfiguracji aktualnej. Nierówność ta została otrzymana przy założeniu istnienia gęstości parcjtalnej entropii S^{α} oraz jej strumienia h_k^{α} . Nierówność (12) stanowi ograniczenie na postać równań fizycznych procesu.

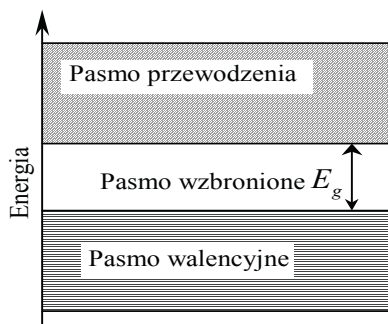
W celu otrzymania związków opisujących rozważany proces termodynamiczny przyjmuje się założenie, iż występujące w układzie pole elektromagnetyczne powoduje powstanie źródeł ciepła i sił, które inicjują proces termomechaniczny. Z kolei zaniedbywany jest wpływ zachodzących procesów termomechanicznych na znane źródło tegoż pola. Założenie powyższe ma charakter empiryczny i przyjęte zostało w celu uproszczenia modelu opisującego procesy zachodzące w ośrodku wieloskładnikowym. W takim podejściu zagadnienie wyznaczania pola elektromagnetycznego i określenia pól termomechanicznych rozwiązywane są niezależnie.

Równania bilansów oraz nierówność wzrostu entropii wyrażają prawa fizyczne, które nakładają na równania konstytutywne ograniczenia, które w opisie matematycznym właściwości materiałów należy uwzględnić przy formułowaniu konkretnych empirycznych zależności.

1.4. Współczynnik przewodności elektrycznej

Rozróżniane są dwa zasadnicze rodzaje przewodników elektryczności: elektronowe oraz jonowe. Właściwości przewodników elektronowych opisywane są przez pasmowy model ciała stałego [37]. Elektrony w izolowanych

atomach wypełniają pewne poziomy energetyczne, które mają wartości dyskretne zgodnie z regułami mechaniki kwantowej. Gdy zachodzi oddziaływanie między poszczególnymi cząstkami, położenie poszczególnych poziomów energetycznych ulega zmianie. W sieci krystalicznej pierwotne poziomy energetyczne łączą się w pasma energetyczne. Na rys. 1.4 przedstawiony



Rysunek 1.4. Model pasmowy

schemat pasmowej struktury ciała stałego. Elektrony walencyjne są związane z atomem (tworzą pasmo walencyjne). Tak zwane pasmo przewodnictwa tworzą najwyższe częściowo obsadzone poziomy energetyczne. Między pasmem walencyjnym a pasmem przewodnictwa znajduje się tzw. pasmo wzbronione. Różnicę energii między najwyższym poziomem pasma walencyjnego a najniższym poziomem pasma przewodnictwa nazywa się szerokością pasma wzbronionego E_g . W kryształach przewodzących elektrony pasma przewodzenia są luźno związane z atomami i tworzą tzw. gaz elektronowy. Pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego ruch swobodnych elektronów przyjmuje orientację zgodną z kierunkiem pola i następuje przepływ prądu elektrycznego. Jeżeli wszystkie pasma energetyczne są całkowicie obsadzone przez elektrony i nie nakładają się na siebie, wówczas substancja jest izolatorem. Przeniesienie ładunku elektrycznego w takiej strukturze jest możliwe na skutek przeskoku elektronu z jednego pasma do drugiego, co wymaga znacznego nakładu energii. Szczególną grupę przewodników elektryczności stanowią półprzewodniki. Są to materiały, w których elektrony walencyjne są oddzielone od nieobsadzonego pasma przewodnictwa pasmem wzbronionym. W wyniku doprowadzenia energii z zewnątrz, mogą one zostać przeniesione do pasma przewodnictwa (przejście w stan wzbudzony). Transport ładunków elektrycznych jest możliwy z jednej strony przez wzbudzone elektrony w paśmie przewodnictwa, z drugiej zaś przez

tak zwane "dziury" pozostawiane przez wzbudzone elektrony w wyższych poziomach pasma przewodnictwa.

Teoriom przewodnictwa elektronowego poświęcona jest bardzo duża liczba publikacji naukowych. Przepływ prądu elektrycznego przez materiały, będące przewodnikami elektronowymi, charakteryzowany jest tzw. współczynnikiem przewodnictwa właściwego σ_e będącego współczynnikiem proporcjonalności między natężeniem pola elektrycznego \mathbf{E} wywołującego przepływ prądu a gęstością strumienia \mathbf{j} przepływającego ładunku elektrycznego (prawo Ohma):

$$\mathbf{j} = \sigma_e \mathbf{E} \quad (1.23)$$

Współczynnik przewodności właściwej jest wielkością charakterystyczną dla materiału i zależy jest od jego stanu termomechanicznego. Przykładowo, wielkość ta zmienia się przy zmianie temperatury materiału lub naprężeń wewnętrznych, wywołanych oddziaływaniami mechanicznymi.

Zasadniczo innym rodzajem przewodników elektryczności są przewodniki jonowe. Przewodzenie jonowe jest charakterystyczne dla ośrodków wieloskładnikowych, jakimi są roztwory elektrolitów, sole stopione, układy koloidalne, gazy zjonizowane. Ośrodek wieloskładnikowy jest mieszaniną składników obojętnych elektrycznie o gęstości $\rho^{(0)}$ oraz zawartych w mieszaninie n_1, n_2 rodzajów składników naładowanych dodatnio oraz ujemnie z udziałami masowymi $\rho^{\gamma+}, \rho^{\gamma-}$. Przy tym $\rho = \rho^{(0)} + \sum_{\gamma+=1}^{n_1} \rho^{\gamma+} + \sum_{\gamma-=1}^{n_2} \rho^{\gamma-}$ - jest gęstością rozważanej mieszaniny.

W rozważanym medium na składniki naładowane elektrycznie (jony) ze strony pola elektromagnetycznego działa siła objętościowa wyrażona następująco:

$$\rho^\alpha \mathbf{F}^\alpha = \rho^\alpha e^\alpha \mathbf{E} \quad (1.24)$$

która powoduje przyspieszony ruch składnika równoważony oporem środowiska ciekłego:

$$\rho^\alpha e^\alpha \mathbf{E} = \eta \mathbf{v}^\alpha \quad (1.25)$$

gdzie η - współczynnik oporu, zależny od lepkości cieczy. Dlatego możemy przyjąć, że średnia prędkość poruszania się cząstek naładowanych jest proporcjonalna do natężenia pola elektrycznego

$$\mathbf{v}^\alpha = u^\alpha \mathbf{E} \quad (1.26)$$

Współczynnik proporcjonalności jest nazywany ruchliwością jonów [37]. Został on wprowadzony w elektrochemii i wyznacza zdolność składnika do przenoszenia ładunku elektrycznego. Przy tym

$$\mathbf{j}^\alpha = \rho^\alpha e^\alpha u^\alpha \mathbf{E} \quad (1.27)$$

jest strumieniem ładunku elektrycznego związanego z transportem składnika α . Sumaryczny strumień ładunku elektrycznego (prąd elektryczny) wyznaczmy jako sumę strumieni parcjalnych:

$$\mathbf{j} = \sum_{\alpha} \mathbf{j}^{\alpha}, \quad \text{lub} \quad \mathbf{j} = \sum_{\gamma+} \rho^{\gamma+} e^{\gamma+} u^{\gamma+} \mathbf{E} + \sum_{\gamma-} \rho^{\gamma-} e^{\gamma-} u^{\gamma-} \mathbf{E} \quad (1.28)$$

Oznaczmy przez $e^{\gamma+}$ oraz $e^{\gamma-}$ ładunek elektryczny jednostki masy obecnych w ośrodku kationów oraz anionów. Możemy przy tym wprowadzić globalny współczynnik

$$\sigma_e = \sum_{\gamma+} \rho^{\gamma+} e^{\gamma+} u^{\gamma+} + \sum_{\gamma-} \rho^{\gamma-} e^{\gamma-} u^{\gamma-} \quad (1.29)$$

będący odpowiednikiem współczynnika przewodności elektrycznej dla rozważanego ośrodka wieloskładnikowego. Jak wynika z przytoczonych rozważań, wielkość ta jest zależna od stężenia składników ośrodka oraz parametrów wyznaczających ich ruchliwość. Z przedstawionych rozważań wynika, iż w materiałach będących przewodnikami elektryczności, mimo zasadniczo odmiennych mechanizmów przenoszenia ładunku elektrycznego, można wprowadzić w rozważaniach wielkość σ_e , która charakteryzuje przepływ prądu. W ośrodkach, w których mechanizm przenoszenia ładunku elektrycznego powiązany jest z przepływem jonowym, jednocześnie z przepływem prądu zachodzi przenoszenie masy co prowadzi do redystrybucji składników rozważanego ośrodka wieloskładnikowego.

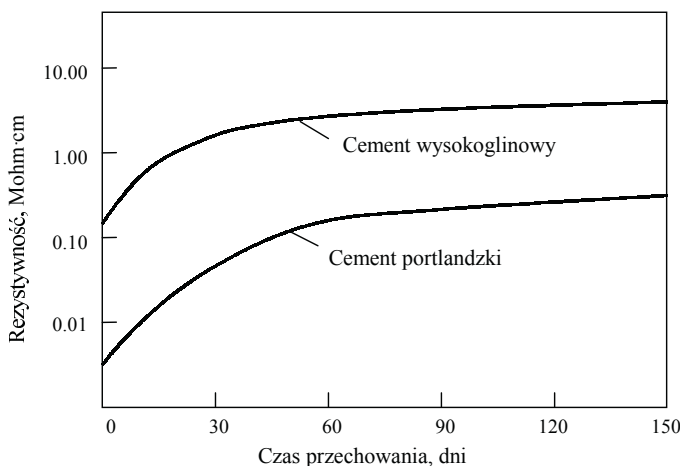
1.5. Przewodność elektryczna betonów

Przewodność właściwa betonu zależy od mikrostruktury, porowatości i rozkładu wymiarów porów. Jest ona również w zależności funkcyjnej od stężenia jonów w roztworze porowym oraz ich ruchliwości. Skład cementu, jego ilość w mieszance, współczynnik wodno-cementowy (W/C), użyte domieszki i dodatki oraz sposób otrzymania mieszanki są czynnikami mającymi wpływ na strukturę betonu i skład cieczy porowej, co w efekcie wyznacza jego opór elektryczny (przewodność).

1.5.1. Wpływ składu cementu

Typ cementu, zawartość alkaliów i jego skład chemiczny ma wpływ na skład mieszanki uwodnionej i stąd jego wpływ na rezystywność betonu. Hammond i Robson [24] w roku 1955 studiowali wpływ rodzaju użytego

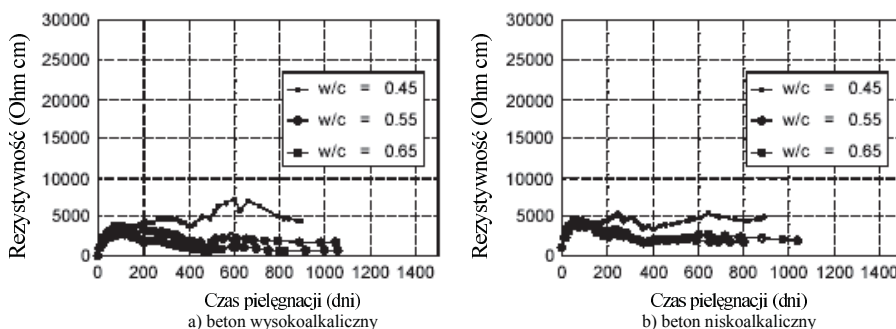
cementu na rezystywność betonu. Badania przeprowadzono dla trzech typów cementu: cementu portlandzkiego (*OPC*), cementu o wczesnej wytrzymałości (*RHC*) i cementu wysokoglinowego (*HAC*). Współczynnik wodno-cementowy dla badanych mieszanek był przyjęty równym 0,49. Pomiar przeprowadzono w ciągu 150 dni od 24 godziny po otrzymaniu mieszanek. W początkowej fazie doświadczenia betony z użyciem cementu wysokoglinowego (*HAC*) była znacznie wyższa od betonów z cementu portlandzkiego (nawet 100-krotnie). Z upływem czasu różnica miała tendencję spadkową i po upływie 150 dni była rzędu od 10 do 1, osiągając przy tym wartości 0,3 - 3 $MOhm \cdot cm$, czyli materiał taki był dobrym izolatorem (rys. 1.5). Autorzy tego badania objaśniają to zjawisko przyspieszonym uwodnieniem HAC w porównaniu do OPC, co prowadzi do tego, że stężenie jonów w cieczy porowej HAC jest niższe i jako wynik — większa rezystywność. Jednak z upływem czasu w OPC również zachodzi uwodnienie i różnica rezystywności cementów zanika.



Rysunek 1.5. Przewodność elektryczna betonów z różnymi cementami

W opracowaniu Monfore [42] przedstawione wyniki badania wpływu zawartości alkaliów w mieszankach cementowych na ich rezystywność. Pomiar zostały przeprowadzone na próbkach zaczynu cementowego. Sumaryczna zawartość K_2O była 0,12% dla cementów niskoalkalicznych oraz 13% dla wysokoalkalicznych. Otrzymano, że cementy niskoalkaliczne mają niższą rezystywność (wyższa przewodność) od wysokoalkalicznych zaczynów. Jednak różnica ta nie ma większego znaczenia praktycznego. Przykładowo dla próbek w wieku 28 dni rezystywność przy współczynniku $W/C = 0.4$

dla cementu niskoalkalicznego wynosiła $11.70\Omega \cdot m$ w porównaniu do $13.70\Omega \cdot m$ do cementu wysokoalkalicznego w tych samych warunkach. W tej samej pracy przedstawione wyniki badania wpływu warunków pielęgnacji betonu na jego opór elektryczny. Badania przeprowadzono na mieszankach betonowych z zawartością cementu $335\text{kg}/\text{m}^3$ i $W/C = 0.41$. Przy tym nie stwierdzono istotnych różnic w rezystywności nisko- i wysokoalkalicznych cementów.



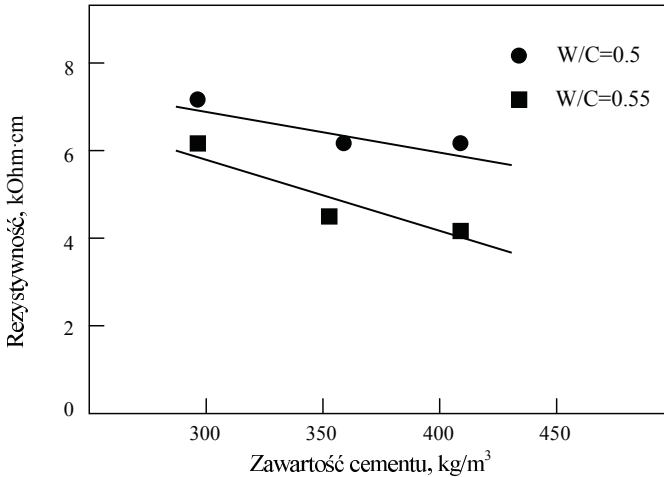
Rysunek 1.6. Wpływ zawartości C_3A oraz czasu pielęgnacji na rezystywność betonu

Przeprowadzając program badań związanych z poznaniem procesów korozyjnych, Baweja [] (1996) monitorował wpływ zawartości tricalcium aluminatu (C_3A) na rezystywność betonu. Wykorzystano przy tym zwykle cementy portlandzkie (OPC) z wysokim – 9% oraz niskim – 4.9% udziałem C_3A . Rezystywność mierzona w ciągu około 1000 dni. Wyniki pomiarów przeprowadzone dla różnych współczynników ilustrują rys. 1.6a) i 1.6b) pokazując podobne trendy zmian dla badanych cementów.

1.5.2. Wpływ zawartości cementu i współczynnika wodno-cementowego

Jak już wspomniano wyżej, opór właściwy betonu zależny jest od właściwości matrycy cementowej (zaczynu cementowego). Dlatego wszystkie zmiany udziału objętościowego zaczynu w mieszance betonowej skutkują zmianami jego rezystywności. Ilość cementu wykorzystanego w betonie wyznacza udział w nim zaczynu cementowego i dlatego ma wpływ na rezystywność. Badanie tego efektu przeprowadzono Hughes [26] (1985). W tej pracy podane wyniki badania rezystywności elektrycznej dla mieszanek betonowych z różnymi ilościami zużytego cementu, które wynosiły 300, 350 i $400\text{kg}/\text{m}^3$, a wskaźnik wodno-cementowy był przyjęty równym 0.5 oraz

0.55. W wyniku pomiarów wykazano zmniejszenie rezystywności wraz ze zwiększeniem zawartości cementu w mieszance. Obrazują ten fakt wykresy pokazane na rys. 1.7.

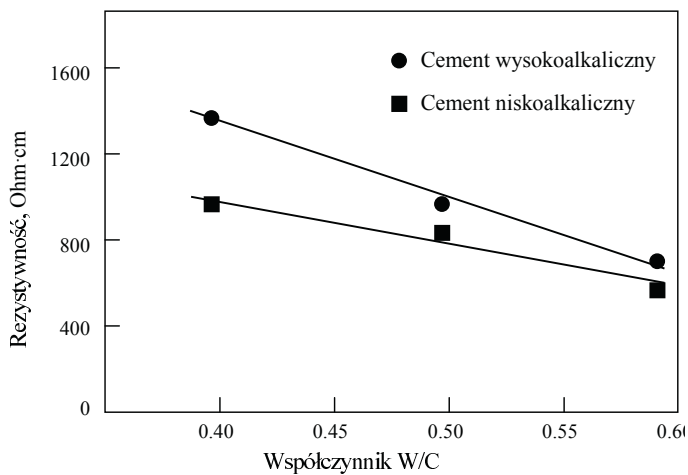


Rysunek 1.7. Porównanie przewodności elektrycznej betonów z różnymi zawartościami cementu

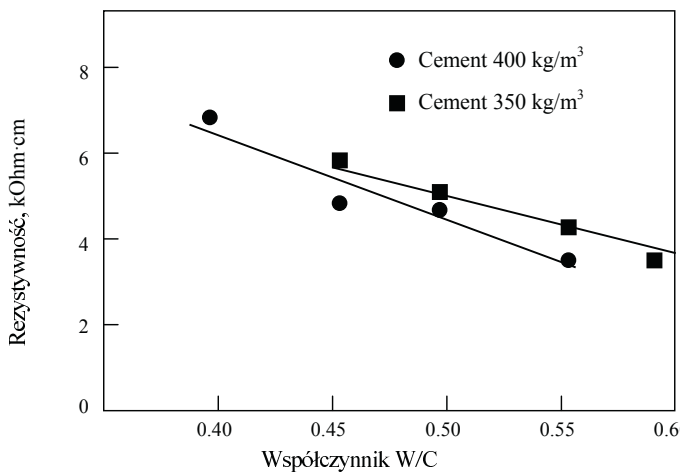
Wskaźnik wodno-cementowy jest podstawowym parametrem, określającym nasycenie mieszanki wilgocią jak na etapie wytwarzania mieszanki, tak i w materiale stwardniałym. Odgrywa on istotną rolę przy formowaniu mikrostruktury zaczynu cementowego oraz jego skład jonowy. To z kolei ma wpływ na rezystywność betonu. Monfore [42] (1968) oraz Hughes [26] (1985) poddali badaniom zależności między wskaźnikiem wodno-cementowym i rezystywnością zaczynów cementowych. Otrzymano, że rezystywność zaczynu cementowego wzrasta wraz ze zmniejszeniem wskaźnika wodno-cementowego i przy $w/c = 0.4$ jest około 2 razy większa niż przy $w/c = 0.6$. Rys. 1.8 i ilustruje tendencję zależności zmiany rezystywności betonów otrzymanych z wykorzystaniem różnych cementów, zaś rys. 1.9 — wpływ zmiany tego parametru wraz ze zmianą zawartości cementu w mieszance betonowej.

1.5.3. Wpływ zawartości kruszywa

Kruszywo zawarte w mieszance betonowej jest kolejnym elementem, który wyznacza strukturę i właściwości mieszanki betonowej. Zwykle rezystywność materiału kruszywa jest znacznie większa niż zaczynu cementowego. W pracy Monfore [42] podane wyniki pomiarów rezystywności niektó-



Rysunek 1.8. Porównanie przewodności elektrycznej zaczynów cementowych po 7 dniach (Monfore, 1968) przy różnych współczynnikach W/C



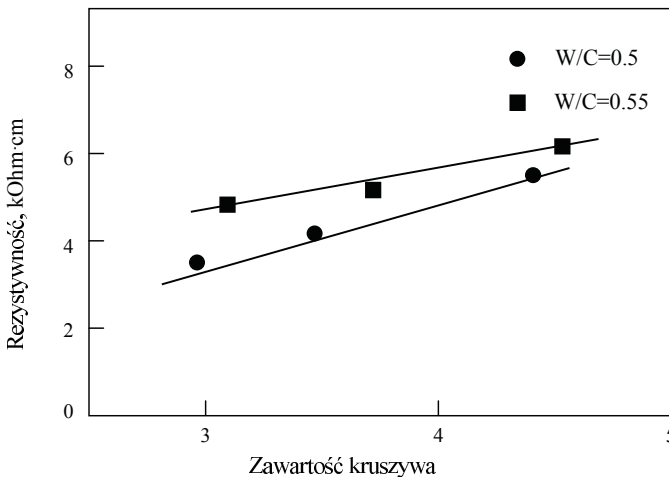
Rysunek 1.9. Porównanie przewodności elektrycznej zaczynów cementowych (Hughes, 1985) przy różnych współczynnikach W/C

rych minerałów, wykorzystywanych jako wypełniaczy w betonie. Wartości te podane w tabeli 1.1.

Tablica 1.1. Rezystywność niektórych minerałów (Monfore [42])

Mineral	Rezystywność
Piaskowiec	18000
Wapiennik	30000
Marmur	290000
Granit	880000

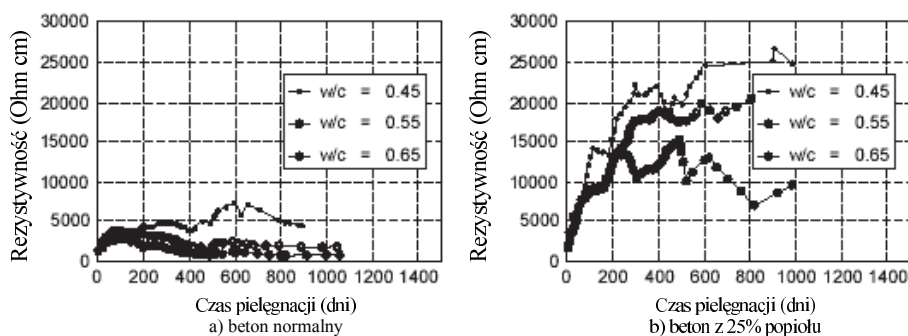
Z przedstawionych danych wynika iż rezystywność wypełniaczy jest znacznie wyższa od zaczynu cementowego (o kilka rzędów) i zawarte w mieszance również zwiększają jej opór elektryczny. Oczywistym jest również fakt że zwiększenie ilości słabo przewodzącego wypełniacza zwiększa opór mieszanki wraz ze wzrostem jego zawartości przy innych jednakowych warunkach. Na rysunku 1.10 przedstawiono zależności rezystywności betonu od zawartości wypełniacza, wyrażonej jako wielokrotność wykorzystanego cementu. Tak, przy $W/C = 0.5$ zwiększenie zawartości wypełniacza (kruszywa) w stosunku do ilości cementu od 2.95 do 4.36 rezystywność zwiększa się od 4.36 do 5.73 $k\Omega \cdot cm$ [50].



Rysunek 1.10. Wpływ zawartości kruszywa w mieszance betonowej

1.5.4. Wpływ zawartości dodatków mineralnych do cementu

We współczesnych technologiach wykonania materiałów cementowych wykorzystywane różnorodne dodatki mineralne do cementu, które pozwalają znacznie zmodyfikować właściwości mieszanek betonowych. Przy tym najczęściej stosowane są popioły lotne, mikrokrzemionka, żużel wielkopiecowy dodawane do cementu w stosunkowo dużych ilościach dla uzyskania podwyższonej urabialności świeżego betonu, zwiększenia odporności termicznej i chemicznej a także podwyższenia wytrzymałości betonu stwardniałego. Dodatki mineralne pozwalają znacznie zmniejszyć zawartość cementu w betonie z zachowaniem jego podstawowych cech użytkowych. Z uwagi na swoje właściwości fizyczne materiały te mają wpływ na mikrostrukturę matrycy zaczynu cementowego w betonie, a zatem i na stężenie i ruchliwość zawartych w roztworze porowym jonów. Skutkiem tego jest zmiana rezystywności betonu (rys. 1.11).



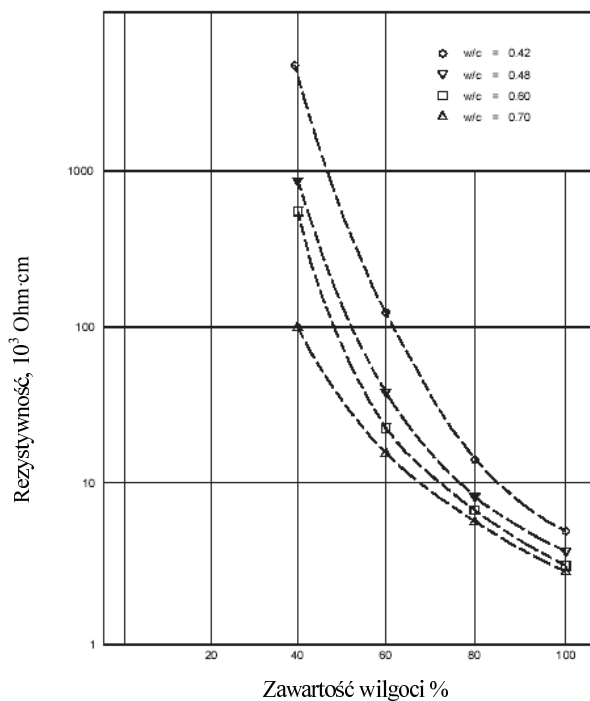
Rysunek 1.11. Wpływ zawartości popiołu lotnego w mieszance betonowej

W przeważającej większości wpływ ten przejawia się w tworzeniu struktury bardziej drobnoporowatej i w efekcie do wyższej oporności elektrycznej betonu niż otrzymanych w zwykłych betonach z cementu portlandzkiego.

1.5.5. Wpływ zawilgocenia

Ze wszystkich czynników mających wpływ na rezystywność betonu najbardziej znacznym jest zawartość w nim wilgoci. Jest to skutkiem tego że nośnikiem przepływu prądu elektrycznego przez materiał jest ciecz porowa (elektrolit). W miarę zmniejszenia cieczy porowej zmniejsza się zawartość nośników ładunku elektrycznego i zatem wzrasta rezystywność (zmniejsza się przewodnictwo). W pracach Hunkelera [27, 28] pokazano iż przewodność

elektryczna betonu zmniejsza się prawie do zera przy zawartości wilgoci bliskiej 40%. Mimo że zaczyn cementowy jeszcze zawiera znaczną ilość wilgoci, to ciecz porowa traci swoje właściwości przewodności. Wyniki pomiarów zależności przewodności elektrycznej od procentowej zawartości wilgoci w betonie otrzymane w pracy [21] przedstawiają wykresy na rysunku 1.12.



Rysunek 1.12. Wpływ zawartości wilgoci w betonie

Można stwierdzić iż dla betonu nasyconego wilgocią (zawartość bliska 100% opór jest w granicach 3000 – 6000 Ohm · cm, wtedy jak przy niskich zawartościach wilgoci (około 40%) opór wzrasta do wielkości rzędu 100 do 6000 kOhm · cm, co odpowiada materiałom dielektrycznym.

Rozdział 2

Pomiary właściwości elektrycznych materiałów cementowych

Zmiany właściwości elektrycznych dojrzewającego betonu posiadają zarówno znaczenie poznawcze jak i praktyczne związane z diagnostyką przebiegu procesów wiązania i twardnienia. W pierwszym okresie po zaformowaniu mieszanki, która jest złożonym układem zawierającym elementy fazy stałej, ciekłej i gazowej rozpoczyna się skomplikowany zespół reakcji chemicznych, który prowadzi do zmian ilości jonów w układzie. To powoduje zmiany przewodnictwa elektrycznego roztworu. Ich oszacowanie jest celem badania. W pierwszej kolejności jednak badane są zmiany wymienionych własności w zaczynach cementowych.

Zaproponowany w poprzednim rozdziale model procesu ujmuje opis przepływu ładunku elektrycznego i masy w zaczynie cementowym, będącym wieloskładnikowym ośrodkiem, składającym się z elektrycznie neutralnego szkieletu (dielektryka) i naładowanych cząstek (jonów) - produktów dysocjacji rozpuszczalnych składników cementu. Pod wpływem zewnętrznego pola elektromagnetycznego w ośrodkach takich zachodzą procesy transportu ładunku elektrycznego (prąd elektryczny) oraz masy (dyfuzja, konwekcja). W procesie wiązania cementu skład fazowy zaczynu zmienia się co ma wpływ na jej właściwości. Proces wiązania zależy od składu zaczynu wyjściowego oraz warunków zewnętrznych. Dla identyfikacji procesów zachodzących w wymienionym medium dokonywany jest pomiar przewodności elektrycznej zaczynu.

2.1. Układ pomiarowy

W przyjętym układzie pomiarowym wielkość mierzona jest rozumiana jako opór sześciianu o jednostkowych wymiarach [50]. Zasadę pomiaru ilustruje tu rys. 2.1 (por. [4]).

Pojemnik z materiału izolacyjnego wypełniony jest badaną substancją. Napięcie wywoływane jest przez przyłożenie do przeciwległych ścian czołowych elektrod z różnicą potencjałów, co wywołuje w próbce zmienny prąd

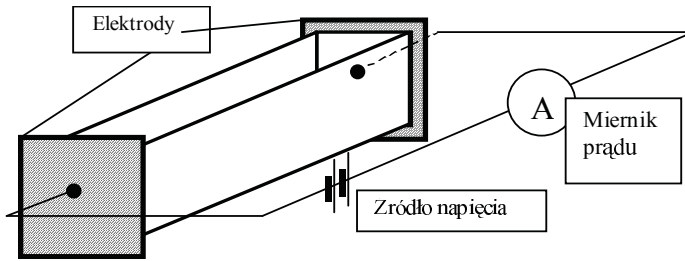
elektryczny o zadanej częstotliwości ω . Przy tym mierzone jest natężenie przepływającego prądu. Opór właściwy jest obliczany ze wzoru

$$\rho = \frac{RA}{L}, \quad (2.1)$$

gdzie A — pole przekroju, L — długość próbki, U — napięcie, I — natężenie przepływającego prądu. Odwrotnością oporu jest przewodność:

$$\sigma_e = \frac{1}{\rho} \quad (2.2)$$

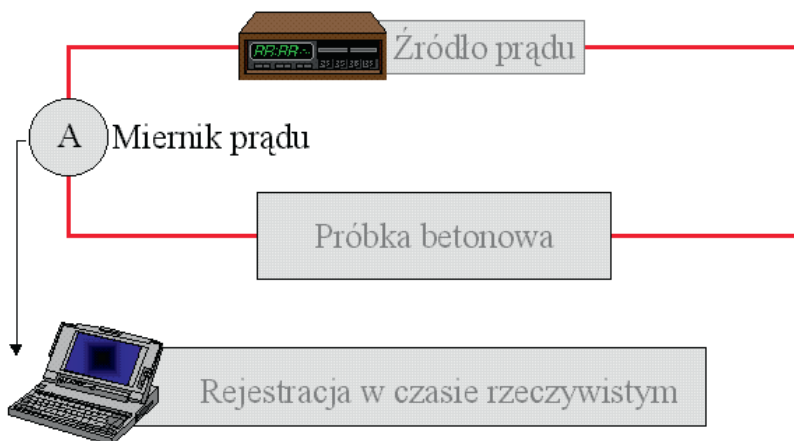
Zależność (2.2) stanowi podstawę do przeprowadzenia pomiaru przewodności elektrycznej materiału.



Rysunek 2.1. Układ pomiarowy

Pomiary przewodności elektrycznej materiałów cementowych przeprowadzono na stanowisku doświadczalnym, schemat którego przedstawiono na rysunku 2.2. Przy tym dla możliwości porównania właściwości różnych cementów przygotowane zostały próbki zaczynu cementowego z wykorzystaniem produkowanego cementu z oferty handlowej o różnym składzie, w których podstawowym składnikiem jest klinkier portlandzki.

Pomiarowy obwód elektryczny zawierał generator zasilający z którego na elektrody doprowadzające umieszczone na ściankach czołowych pojemnika w kształcie prostopadłościanu, w którym umieszczona próbka badanego materiału. Natężenie przepływającego przez próbkę prądu elektrycznego mierzone za pomocą amperomierza cyfrowego włączanego w obwód szeregowo i przekazywane do komputera dokonującego rejestracje w równych (zadanych) odstępach czasu. Otrzymane zatem wartości z wykorzystaniem zależności (2.1) przeliczane na opór właściwy materiału oraz przewodność elektryczną właściwą zgodnie z wyrażeniem (2.2). Przy tym długość próbki wynosiła $L = 150\text{mm}$, szerokość i wysokość odpowiednio $a \times b = 38\text{mm} \times 30\text{mm}$. Pojemnik dla próbki po jej umieszczeniu był



Rysunek 2.2. Stanowisko pomiarowe

szczelnie zamykany dla uniknięcia odparowania wody zarobowej. Celem takiego zabiegu jest otrzymanie próbki materiału o możliwie najbardziej jednorodnych właściwościach. Kolejnym zabiegiem umożliwiającym porównanie właściwości otrzymanych z różnych pomiarów było zapewnienie jednakowych warunków cieplnych co zostało osiągnięte przez umiejscowienie pojemnika z badanym materiałem w komorze do badań cieplnych, w której podtrzymywana była stała temperatura w czasie przeprowadzenia pomiaru.

Próbki badanego zaczynu cementowego otrzymano przez wymieszanie odważonych ilości cementu i wody dla otrzymania zadanego w przeprowadzonym pomiarze wskaźnika wodno–cementowego. Pomiar zaczynał się od razu po umieszczeniu otrzymanej mieszaniny w pojemniku i był przerywany po upływie około 100 godzin.

2.2. Opis stanowiska badawczego

Dla pomiaru właściwości elektrycznych materiałów, będących przewodnikami elektryczności, istnieje szereg technik, podstawowym elementem których jest obserwacja procesów zachodzących w próbce badanego materiału przy działaniu zewnętrznego pola elektromagnetycznego [40, 50]. Pole takie może być wywołane także rozmaitymi sposobami, wśród których można wyszczególnić dwa podstawowe: kontaktowy oraz bezkontaktowy. Pierwszy sposób przewiduje podłączenie próbki badanego materiału do obwodu elektrycznego i obserwacji przepływającego prądu elektrycznego. Bezkontak-

towa metoda pomiaru bazuje na próbce umieszczonej w polu generowanym przez znane źródło i pośrednie wyznaczanie cech elektrycznych na podstawie efektu wynikowego działania takiego pola. I pierwszy, i drugi sposób mają wspólne cechy wynikające z konieczności ujęcia wpływu zewnętrznego oddziaływania elektromagnetycznego na materiał. Problem ujęcia wzajemnego oddziaływania medium materialnego z polem elektromagnetycznym opisywany jest w literaturze naukowej bardzo szeroko [4, 48, 58]. Punktem wyjścia tych opisów jest klasyfikacja materiałów ze względu na ich właściwości elektryczne. Klasyfikacja taka opiera się na budowie ośrodka materialnego oraz prawach fizycznych determinujących zachowanie się cząstek materialnych pod wpływem pola oraz jego zmian. Pole elektromagnetyczne generowane w ośrodku materialnym wprowadza cząsteczki medium w ruch i jest przyczyną szeregu procesów przenoszenia. Z makroskopowego punktu widzenia procesy takie przejawiają się jako przepływy masy oraz ładunku elektrycznego. Na procesy tego typu mają wpływ również inne czynniki zewnętrzne, takie jak oddziaływania termiczne oraz mechaniczne. W ośrodkach wieloskładnikowych niektóre ze składników niosą ładunek elektryczny, dlatego skutkiem oddziaływania pola elektromagnetycznego jest przepływ ładunku, czyli prąd elektryczny. Właściwość przenoszenia ładunku elektrycznego w ośrodkach jest cechą charakterystyczną wszystkich materiałów i pozwala na ich klasyfikację ze względu na przewodność.

Przyłożenie do próbki różnicy potencjałów wywołuje powstanie w niej pola elektromagnetycznego. Naładowane elektrycznie składniki mieszaniny na skutek działania na nie sił pochodzenia elektrycznego wprowadzane są w uporządkowany ruch i przez próbkę płynie prąd. Podstawą do wyznaczenia oporności układu jest pomiar natężenia przepływającego prądu. Zastosowanie przy tym prądu stałego nie jest możliwe. Na elektrodach doprowadzających napięcie do próbki (powierzchnia kontaktowa) zachodzi oddziaływanie polaryzacyjne z materiałem próbki. Wytwarza się siła elektromotoryczna na powierzchni kontaktu, która uniemożliwia dokładne pomiary przepływającego prądu. W pracach Hammond i Robson [24], Monfore [42], dotyczących pomiaru oporności próbek betonowych, wykorzystano źródło niskiego napięcia ze zmianą polarności dwa razy na sekundę. Problem obejścia wpływu efektów polaryzacyjnych rozwiązany został przez Hanssona [25], Hughes [26] przez wprowadzenie funkcji ujmującej zależność przepływającego prądu od stosowanego napięcia. Przeprowadzane były pomiary z szeregiem niskich napięć (4, 6, 8 Volt) i analizowane ustalone przepływy prądu. W większości pomiarów stosowany jest obecnie przepływ prądu zmiennego, co pozwala minimalizować, a przy zastosowaniu wyższych częstości, wyeliminować wpływ efektów polaryzacyjnych. Przewodniki wieloskładnikowe są

strukturami niejednorodnymi, dlatego istotny wpływ na dokładność przeprowadzanego pomiaru ma kształt próbki oraz sposób włączenia jej w obwód elektryczny. Przy pomiarach wykorzystywane są próbki w kształcie pryzm, kostek, czy też cylindrów. Wybór kształtu próbki podyktowany jest łatwością podłączenia doprowadzających elektrod, zapewniający dobry kontakt elektryczny oraz możliwie najbardziej dokładne zapewnienie jednokierunkowego przepływu nośników elektryczności. Kontakt elektrod doprowadzających napięcie ze względu na niejednorodność materiału ma zachodzić na możliwie większej powierzchni. Z drugiej strony wymóg jednokierunkowości przepływu prądu elektrycznego wymaga zmniejszenia pola przekroju poprzecznego próbek. Elektrody wykorzystywane w pomiarach są również różnego typu. Najczęściej są miedziane. Ale w niektórych przypadkach stosowane są elektrody stalowe lub z innych materiałów przewodzących. Dobry kontakt próbki z przewodnikiem doprowadzającym zapewnia wykorzystanie farb lub past przewodzących. Elkey i Sellevold [14, 45] wykazali, iż wyniki pomiarów zależne są od ciągłości kontaktu między elektrodami i próbka.

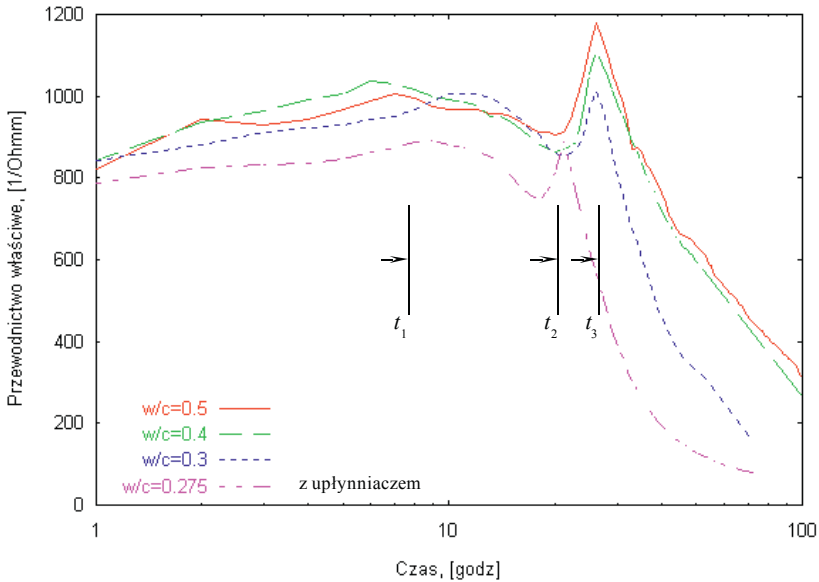
2.3. Zmiany przewodności elektrycznej dojrzewającego zaczynu

Typowa zależność przewodności elektrycznej w czasie wiązania zaczynu cementowego przedstawiona na rys. 2.3 linią ciągłą możemy podzielić na kilka etapów. Na pierwszym etapie ($t < t_1$) obserwowany jest stopniowy wzrost przewodności elektrycznej, będący skutkiem zwiększenia w roztworze ilości swobodnych jonów w wyniku rozpuszczania się cementu. Maksimum przewodnictwa odpowiada nasyceniu roztworu. W następnym etapie szybkość tworzenia się nierozpuszczalnych produktów hydratacji jest większa od szybkości dostarczania produktów rozpuszczania i przewodność maleje. W miarę przenikania wody w głąb ziaren cementu zwiększa się udział fazy ciekłej i przy $t_2 < t < t_3$ obserwujemy ponowny wzrost przewodności elektrycznej. Drugie maksimum przewodności ($\approx 20 - 25$ godzin po wymieszaniu) odpowiada zakończeniu wstępnej fazy wiązania. Przy $t > t_3$ obserwowany spadek przewodności można wyjaśnić zmniejszeniem ilości wody swobodnej w mieszaninie i postępującym tworzeniem się nierozpuszczalnej fazy stałej (szkieletu materiału).

2.3.1. Charakterystyczne zmiany przewodności elektrycznej w różnych warunkach twardnienia materiału cementowego

Zauważono, że przy obniżeniu ilości wody (mniejszy współczynnik w/c) w betonie, drugie maksimum przewodności elektrycznej następuje wcześniej

i podobnie wartość przewodnictwa jest mniejsza (rys. 2.4). Ten sam efekt występuje w próbce w której ma miejsce odparowywanie wilgoci w otoczenie (rys. 2.5).

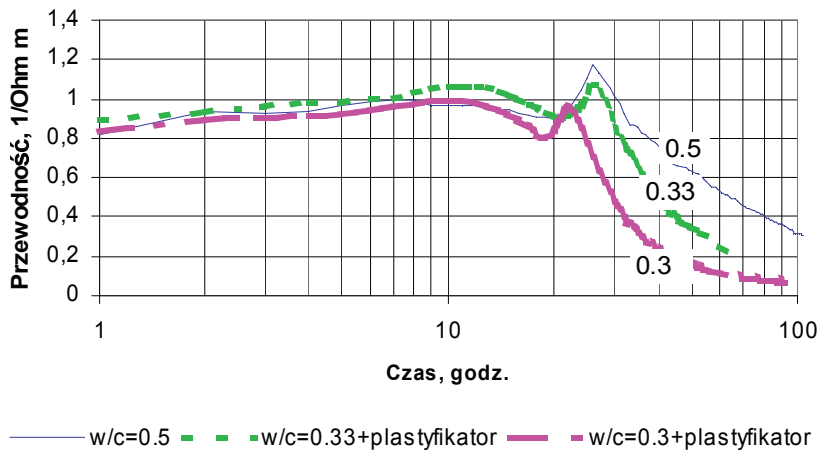


Rysunek 2.3. Zależności od czasu przewodności elektrycznej zaczynu cementowego przy różnych stosunkach wodno-cementowych

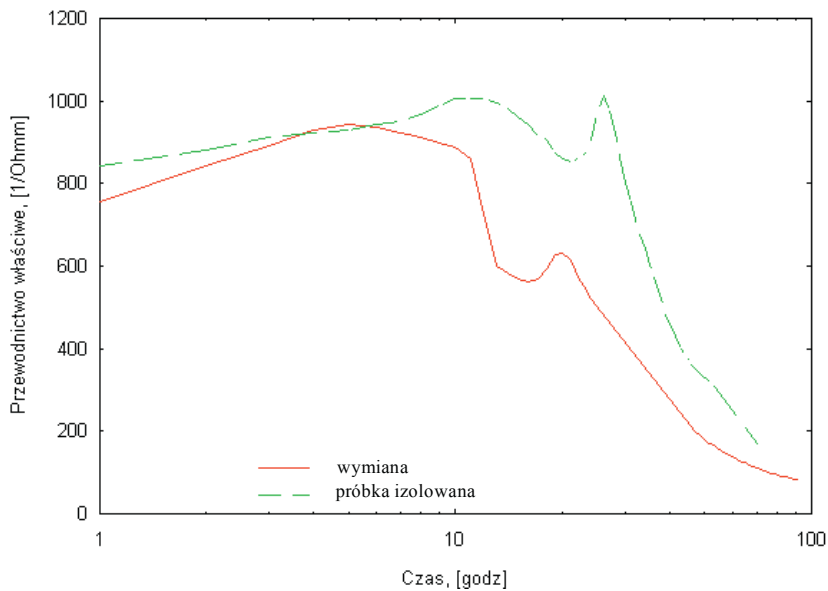
Od chwili uformowania próbki przewodność właściwa materiału rośnie, osiągając wartość maksymalną, po czym zachodzi jej stopniowe zmniejszenie, aż do osiągnięcia pewnej wielkości, charakterystycznej dla materiału stwardniałego. W materiale stwardniałym większość przestrzeni zajmuje nierozpuszczalny szkielet, który jest dobrym izolatorem. Zawartość cieczy porowej oraz ilość rozpuszczonych w niej składników znacznie obniża się, co jest przyczyną istotnego spadku przewodności elektrycznej zaczynu.

2.3.2. Zestawienie wyników pomiaru przewodności elektrycznej dla materiałów z różnymi cementami

Pomiary przewodności elektrycznej przeprowadzone zostały dla zaczynów wykonanych z cementów portlandzkich CEM I oraz cementów z dodatkami hydraulicznymi CEM II i CEM III. Zaczyny do pomiarów przygotowane zostały przy jednakowym współczynniku wodno-cementowym — $W/C=0,35$. Na rys. 2.6 przedstawiono wyniki zmian przewodności właściwej w czasie wiązania i twardnienia zaczynu z cementów portlandzkich CEM



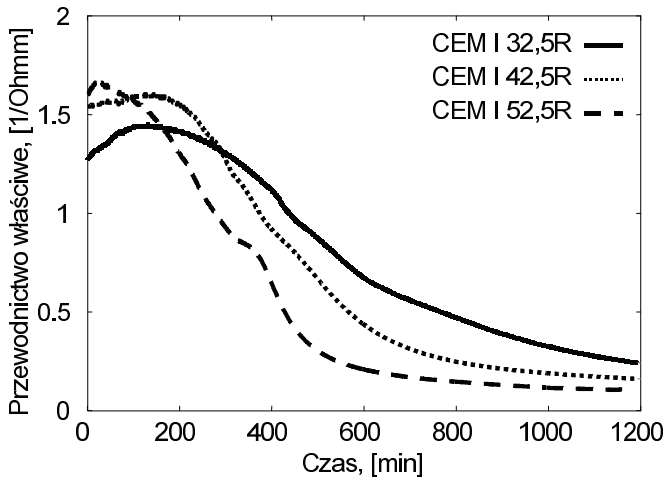
Rysunek 2.4. Zależności zmiany od czasu współczynnika przewodności elektrycznej mieszanek z dodatkami



Rysunek 2.5. Współczynnik przewodności zaczynu cementowego przy $w/c=0.33$ w zależności od warunków wymiany wilgoci z otoczeniem

I w pierwszych 24 godzinach. Natomiast rys 2.7 ilustruje podobną zależność dla zaczynów cementowych wykonanych z cementów zawierających dodatek granulowanego żużla wielkopieczowego (cementy portlandzki żużlowy CEM II/B-S 32,5R oraz cementy hutnicze CEM III/A,B 32,5N NA/HSR/LH).

Dla każdego rodzaju cementu przeprowadzono pomiar dla serii próbek. Należy zaznaczyć dobrą powtarzalność uzyskanych wyników z odchyłkami nie przekraczającymi błędu przyrządów pomiarowych.

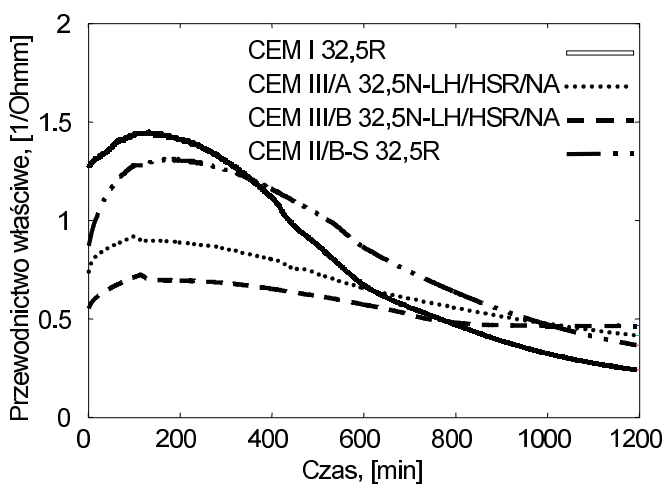


Rysunek 2.6. Cementy portlandzkie

Zestawienie wyników pomiaru przewodności elektrycznej dla wszystkich badanych zaczynów cementowych z różnymi rodzajami cementów przedstawia tablica 2.1. W zestawieniu tym podano początkową przewodność elektryczną (od razu po uformowaniu) oraz osiągniętą w czasie pomiaru maksymalną wartość przewodności elektrycznej.

2.4. Przemiany strukturalne w twardniejących materiałach cementowych

Cechy użytkowe betonowych i żelbetowych elementów budowlanych istotnie zależne są od właściwości użytych cementów. Zarówno przy formowaniu takich elementów jak i w czasie ich użytkowania struktura materiału i jego skład ulegają ciągłej zmianie. Prognozowanie właściwości materiałów wieloskładnikowych jakimi są materiały budowlane na bazie cementu opiera się na badaniach ujmujących związek parametrów materiałowych ze strukturą



Rysunek 2.7. Cementy z dodatkami hydraulicznymi

Tablica 2.1. Porównanie wyników pomiaru przewodności elektrycznej [1/Ohm·m] zaczynów z różnych cementów

Cement	Przewodność początkowa	Przewodność maksymalna
CEM I 32,5R	1,23	1,35
CEM I 42,5R	1,29	1,47
CEM I 52,5R	1,55	1,63
CEM II/B-M (V-LL) 32,5R	0,86	1,21
CEM II/B-S 32,5 R	0,77	1,17
CEM II/ B-V 32,5 R	0,93	1,17
CEM II/ B-S 42,5 N	1,15	1,29
CEM III/A 32,5N-NA/HSR/LH	0,69	0,86
CEM III/A 42,5N-NA	0,81	0,95
CEM III/B 32,5N-NA/HSR/LH	0,61	0,74
Spoivo żuźlowe	0,11	0,14

elementu oraz jej zmianach w czasie wiązania i twardnienia. Warunkuje to ważność opracowania i rozwoju takiego podejścia.

2.4.1. Koncepcja perkolacji w odniesieniu do materiału cementowego

Typowy materiał budowlany wykorzystywany w zaprawach, tynkach, betonach jest rozważany jako porowaty ośrodek wieloskładnikowy [18, 20, 44]. Wolorów użytkowych taki materiał nabiera w procesie wiązania i twardnienia, w których tworzy się spójna struktura fazy stałej. Skład oraz struktura tworzącego się szkieletu, a także wypełniający sieć kapilar szkieletu roztwór, wyznaczają właściwości fizyczne materiału oraz zmiany tych właściwości w czasie. Po wymieszaniu z wodą materiał taki jest cieczą lepłą, w której cząstki stałe nie tworzą spójnej struktury. W miarę postępującego procesu hydratacji zawartego w mieszance cementu, polegającego na połączeniu jego cząstek z wodą i tworzeniu się w konsekwencji związków nierozpuszczalnych, zwiększa się objętość cząstek stałych i tworzy się spójna struktura szkieletu materiału porowatego. Skład i właściwości użytych w materiale komponentów wyznacza przebieg procesu hydratacji, co możemy obserwować rejestrując zmiany szeregu właściwości materiału, w szczególności jego przewodności elektrycznej właściwej.

Mikrostruktura materiału cementowego jest zbyt skomplikowana i losowa by można było znaleźć dokładne analityczne przejście ujmujące opis makroskopowych właściwości materiału. Jednak w niektórych przypadkach można uzyskać szczególnie uproszczone modele pozwalające wykonać takie przejście. Jednym z takich podejść jest wykorzystanie symulacji komputerowych mikrostruktury w celu opisu i prognozowania właściwości takich materiałów oraz bardziej dokładnego wyjaśnienia procesów w nich zachodzących. Niestety, dokładne ujęcie struktury wszystkich składników materiału cementowego jednocześnie z losowym ich rozkładem jest poza granicami możliwości obliczeniowych nawet bardzo wydajnych komputerów.

Propozycją rozwiązania tego problemu jest wprowadzenie modelowego podejścia z wykorzystaniem wielopoziomowego modelowania struktury materiałów [18, 47]. Przy użyciu technik obliczeniowych prowadzone są symulacje termomechanicznego zachowania się materiałów i określa się ich właściwości na podstawie analizy struktury. Dla materiałów cementowych wprowadza się następujące skale wymiarów:

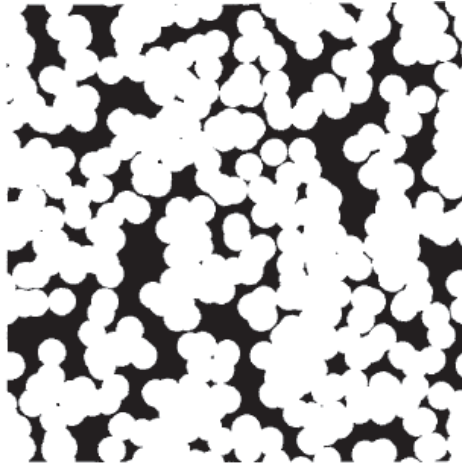
1. Skala milimetrów: w tej skali materiał cementowy jest modelowany jako kontinuum zaczynu cementowego zawierający stałe nie pokrywające się sferyczne lub elipsoidalne cząstki kruszywa, wymiary i rozkład których odpowiada realnej mieszaninie.

2. Skala mikrometrów: dla modelowania zaczynu cementowego wykorzystuje się dyskretny model, w którym cząstki cementu przedstawia się jako sfery o wymiarach od 1 do 40 mkm. Proces hydratacji polega na dyskretnych cyklach rozpuszczanie – dyfuzja – wytrącanie. Otrzymywane ilości produktów obliczane w odniesieniu do objętościowej stechiometrii zachodzących reakcji. Wygenerowane struktury są analizowane dla wyznaczenia spójności odpowiednich faz w zależności od wskaźnika wodno-cementowego i stopnia hydratacji cementu.
3. Skala nanometrów: w tej skali porowaty żel C-S-H jest modelowany jako dwupoziomowa struktura częściowo nakładających się sferycznych cząstek o wymiarach od 5 nm do 40 nm. Przy tym wymiary cząstek oraz porowatość takiej struktury ustalane są doświadczalnie z wykorzystaniem metodyki rozpraszania neutronów w połączeniu z pomiarami sorpcyjnymi.

Wykorzystanie podejścia wielopoziomowego modelowania pozwala po przeanalizowaniu właściwości elementów struktury na niższym poziomie wymiarów wykorzystać wyniki w modelu wyższego poziomu, dokonując w taki sposób symulacji termomechanicznego zachowania się rozważanych złożonych materiałów.

Do wyjaśnienia właściwości struktur losowych, jakim jest materiał cementowy, wykorzystywana jest teoria perkolacji. Podstawowym elementem tej teorii jest pogląd spójności. Teoria ta daje odpowiedź na pytanie: przy jakim udziale objętościowym elementy struktury wypełnią zadany obszar? Przy tym definiowany jest próg perkolacyjny określający wartość udziału objętościowego przy którym następuje zmiana spójności rozpatrywanej struktury.

W zastosowaniu do opisu zmian właściwości struktury dojrzewającego zaczynu cementowego proponowana teoria ma następane zastosowanie. Po wymieszaniu cementu z wodą faza stała w otrzymanym zaczynie jest nieciągła, lub słabo połączona, a więc mieszanka jest cieczą lepłą. W wyniku zachodzących przemian faza stała jest wytrącana z roztworu jako produkty reakcji i w pewnym momencie tworzy się z nich sieć ciągła. Jednocześnie struktura fazy ciekłej w zaczynie ulega pofragmentowaniu, co jest obserwowane pośrednio jako zmiany właściwości materiału, w szczególności jego przewodności elektrycznej. Przewodność elektryczna jako zdolność materiału do przenoszenia pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego ładunków jest uwarunkowana obecnością ciągłej struktury sieci porów, wypełnionych roztworem elektrolitu. Osiągnięcie ciągłego rozkładu fazy stałej powoduje zmniejszenie udziału objętościowego porów kapilarnych, tworzą-



Rysunek 2.8. Przykład spójnej dwuskładnikowej struktury

cych ścieżki ciągle przez objętość zaczynu, co przejawia się zmniejszeniem jego przewodności elektrycznej.

2.4.2. Powiązanie zmian przewodności elektrycznej ze zmianami spójności materiału

Spójność struktury fazy stałej w materiale cementowym wpływa na jego przewodność elektryczną [18, 50]. Utworzeniu spójnej struktury tej fazy (szkieletu materiału) towarzyszy częściowe lub całkowite fragmentowanie fazy ciekłej (cieczy porowej) i tworzenie się sieci kapilar, wypełnionych przewodzącą elektryczny prąd cieczą. Podstawowym nośnikiem ładunków elektrycznych w materiałach cementowych są zawarte w cieczy porowej jony zaś ich przepływ jest możliwy tylko w zwartej strukturze sieci kapilar. Pozwala to stwierdzić, że tworzeniu się spójnej struktury fazy stałej materiału towarzyszy znaczne obniżenie przewodności elektrycznej. Daje to możliwość określenia spójności szkieletu materiału oraz identyfikacji czasu wiązania cementu.

Przemiany struktury materiału cementowego przy jego wiązaniu i twardnieniu przejawiają się w zmianach jego właściwości elektrycznych, co z powodzeniem może być wykorzystane do identyfikacji tych procesów. Zmiana spójności struktury identyfikowana jest na podstawie zmian przewodności elektrycznej, pomiar której dokonywany jest doświadczalnie metodami elektrotechnicznymi. Na poniższym rysunku przedstawiono wyniki pomiarów

zmian w czasie przewodności elektrycznej zaczynów cementowych wykonanych na próbkach z różnych cementów portlandzkich.

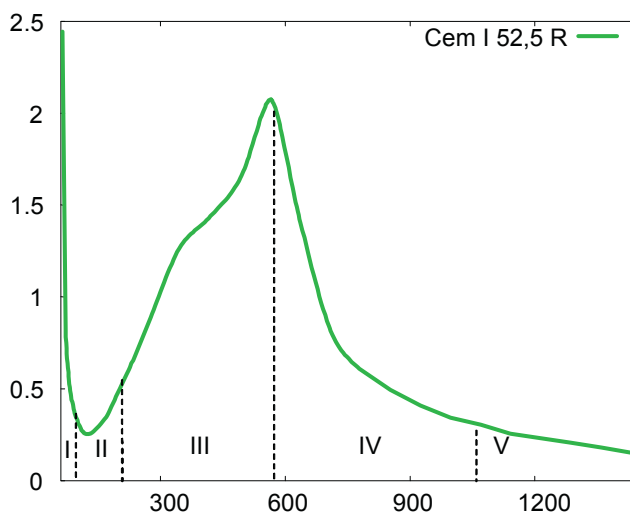
Wykorzystane w badanych próbkach cementy różniły się czasem wiązania, od najdłuższego dla cementu C I 32,5R do najkrótszego dla cementu C I 52,5R (rys. 2.6), a co za tym idzie czasem uzyskania spójnej struktury fazy stałej z produktów hydratacji cementu. Wyraźnie przy tym jest zauważalne skrócenie czasu osiągnięcia niskiego poziomu przewodności elektrycznej dla próbek z cementu szybko twardniejącego. Fakt ten pozwala stwierdzić powiązanie zmian właściwości elektrycznych z zmianami struktury twardniejącego materiału na bazie cementu. Wówczas pomiary właściwości elektrycznych, w szczególności przewodnictwa właściwego może być wykorzystane dla zbudowania metodyki ilościowej oceny i prognozowania zmian w strukturze twardniejących materiałów z użyciem cementu.

Zaproponowane w pracy podejście do szacowania właściwości elektrycznych zaczynów cementowych podyktowane jest próbą powiązania tych właściwości z innymi parametrami charakterystycznymi, takimi jak porowatość materiału, wilgotność, właściwości mechaniczne, wytrzymałość, trwałość. Przeprowadzone badanie traktujemy jako wstępne i wskazujące na charakter tego powiązania. Zmieniany w tej serii badań jest tylko rodzaj cementu, który jednak ma istotny wpływ na strukturę i właściwości materiału stwardniałego. Należy również podkreślić, że w procesach dojrzewania zaczynów cementowych mamy do czynienia również z przemianami energetycznymi, które nie są ujęte w proponowanym krańcowo uproszczonym modelu procesu.

2.4.3. Korelacja przewodności elektrycznej z ciepłem hydratacji cementu

Egzotermiczny charakter procesu twardnienia cementu wynika z wielu elementarnych reakcji hydratacji jego poszczególnych składników mineralnych. Między wartością ciepła twardnienia cementu i wartością ciepła twardnienia poszczególnych składników mineralnych jest zależność addytywna. Oznacza to możliwość przewidywania ciepła twardnienia cementu, gdy znany jest jego skład i ciepło twardnienia poszczególnych faz. Opis zmian wydzielania się ciepła w czasie twardnienia ma istotne znaczenie w początkowym etapie przebiegu procesu. Problem takiego podejścia komplikuje fakt, że poza składem mineralnym, na szybkość wydzielania ciepła przy twardnieniu cementu na jego wartości całkowite mają wpływ:

- *rozdrobienie spoiwa*
- *wartość wskaźnika wodno-cementowego*
- *zawartość dodatków hydraulicznych i pucolanowych*



Rysunek 2.9. Typowy przebieg funkcji źródeł twardniejącego cementu

- zawartość gipsu
- zawartość domieszek
- temperatura twardniejącego zaczynu

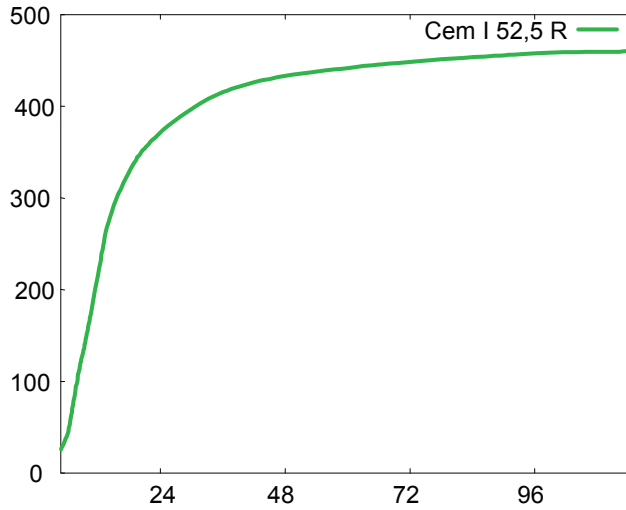
Ciepło twardnienia cementu z uwagi na omówiony wpływ różnych czynników i zjawisk, towarzyszących hydratacji, można wyznaczyć dostatecznie dokładnie jedynie w oparciu o dane doświadczalne.

Określenie ciepła twardnienia Q_τ materiału wymaga znajomości funkcji W_τ , nazywanej funkcją źródeł i która stanowi moc ciepła twardnienia. Przy tym całkowite ciepło twardnienia określa zależność:

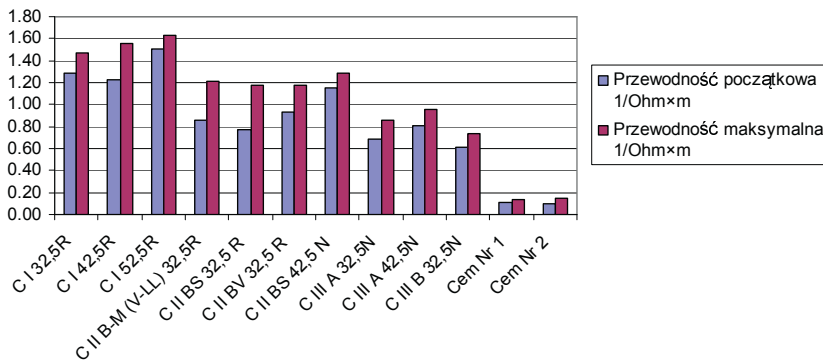
$$Q_\tau = \int_0^\tau W_\tau d\tau$$

Można przy tym wydzielić następujące charakterystyczne okresy hydratacji spoiwa:

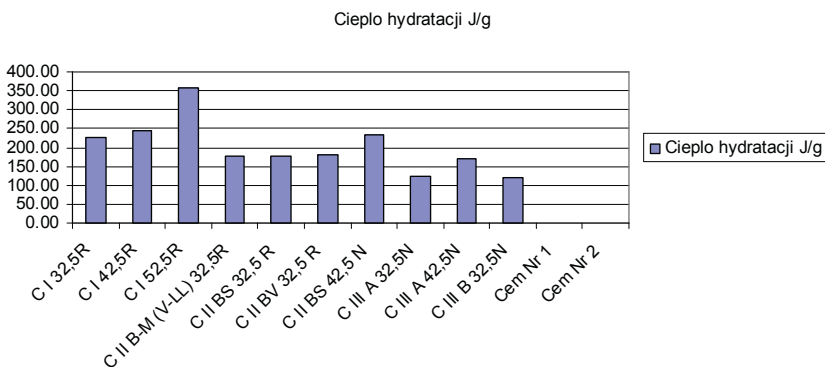
1. Funkcja osiąga dużej wartości i następnie gwałtownie spada do wartości bardzo małej. Efekt cieplny jest wiązany z ciepłem zwilżania ziaren, uwodnieniem wolnego CaO, tworzeniem żelu.
2. Okres indukcji, nazywany okresem spokoju. Czas trwania tego okresu wynosi 1-2 godziny. Przyczyną zahamowania szybkości reakcji w tym okresie uważa się tworzenie bezpostaciowych otoczek żelowych produktów wokół ziaren cementu oraz przesylenie roztworu.



Rysunek 2.10. Ilość wydzielania ciepła w funkcji czasu



Rysunek 2.11. Porównanie wyników pomiaru przewodności elektrycznej zaczynów z różnych cementów



Rysunek 2.12. Porównanie wyników pomiaru ciepła hydratacji różnych cementów

3. Ponowny wzrost funkcji $W\tau$. W okresie tym następuje intensywne tworzenie się żelu $C - S - H$, fazy AF_t , oraz krystalicznego CH .
4. Funkcja ma prawie symetryczny przebieg do okresu 3 i spada. Dla niektórych cementów występuje jeszcze jedno maksimum funkcji, co jest tłumaczone jako efekt tworzenia się fazy AF_m . W pracach z chemii cementu powstanie tego zjawiska jest tłumaczone jako efekt hydratacji końcowych porcji $C3A$ z utworzeniem heksagonalnych glinianów.
5. Wyróżnia się niewielkim i stale słabnącym wydzielaniem ciepła, przy czym ono nigdy nie ustaje.

Pomiary przewodności elektrycznej przeprowadzone zostały dla zaczynów z cementów portlandzkich różnych klas wytrzymałości oraz cementów z dodatkami hydraulicznymi. Na rys. 2.6 przedstawiony wyniki zmian przewodności właściwej w czasie wiązania zaczynu w pierwszych 24 godzinach od uformowania próbek dla cementów CEM I. Rys. 2.7 ilustruje takie zależności dla zaczynów z cementów z dodatkami mineralnymi z tej samej klasy wytrzymałościowej.

Stwierdzić można współzależność między otrzymanymi wynikami pomiarów przewodności elektrycznej i ciepła hydratacji cementu. Wynika to z podobieństwa do odpowiednich krzywych zależności zmiany w czasie ciepła hydratacji (rys. 2.9 oraz rys. 2.10) Fakt ten daje możliwość wykorzystania wyników pomiaru przewodności elektrycznej do oceny zaawansowania procesu wiązania i twardnienia materiałów cementowych (por. zależności na zestawieniach przedstawionych na rys. 2.11 i 2.12). Wymaga to jednak przeprowadzenia dodatkowych badań zarówno doświadczalnych jak i teoretycznych ze względu na empiryczny charakter otrzymanej zależności.

Podsumowanie

W proponowanym opracowaniu zbudowano modelowe podejście do opisu procesów, zachodzących w materiałach cementowych, poddanych działaniu zewnętrznego zmiennego w czasie pola elektromagnetycznego. Podstawowym celem takiego opisu było ujęcie powiązanych między sobą procesów przenoszenia masy, wymiany energii oraz wywołanych przez nich zmian mechanicznych. Dążono przy tym do uzyskania stosunkowo prostych relacji matematycznych, pozwalających znaleźć prawidłowości przebiegu takich procesów. Jest to użyteczne przy prognozowaniu zmian zachodzących w materiałach budowlanych przewodzących prąd elektryczny o różnej strukturze wewnętrznej zarówno w trakcie ich produkcji jak i w czasie eksploatacji konstrukcji z nich wykonanych. Przy tym szczególną uwagę przydzielono interpretacji fizycznej odpowiednich prawidłowości.

Przedstawiono także modelowe ujęcie materiałów wieloskładnikowych i doświadczalne metody wyznaczania ich efektywnej przewodności elektrycznej. Pozwala to przy zastosowaniu opisanego podejścia identyfikować termomechaniczne procesy zachodzące w takich materiałach pod wpływem zewnętrznego oddziaływania elektromagnetycznego, wykorzystując zbudowane stanowisko badawcze.

Przedstawiony w pracy model procesu przepływu prądu elektrycznego w zaczynach cementowych pozwala na analizę procesów termomechanicznych, zachodzących w czasie wiązania. Rozwiązania otrzymanych sprzężonych zagadnień brzegowych procesu otrzymywane z wykorzystaniem numerycznej metody elementów skończonych. W opracowaniu jest szereg procedur które umożliwią ilościową ocenę wzajemnego wpływu poszczególnych mechanizmów zachodzących w procesie dojrzewania zaczynów cementowych jak również typowych materiałów budowlanych na bazie cementu (betony, zaprawy, tynki etc.).

Opracowanie stanowiska badawczego oraz przeprowadzenie pomiaru przewodności elektrycznej świeżych zaczynów cementowych o różnym składzie cementów pozwala na stwierdzenie faktu, iż współczynnik ten istotnie zależy od rodzaju i ilości dodatków mineralnych. Jest to skutkiem odmiennego

charakteru przebiegu uwodnienia cementu i towarzyszących jemu reakcji chemicznych. Badania właściwości elektrycznych w zaczynach uzupełniają charakterystykę własności cementu. Należy również odznaczyć, że zmiany właściwości elektrycznych korelują z własnościami mechanicznymi. Tak cemeny wyższych klas wytrzymałości wczesnej wykazują szybsze osiągnięcie maksymalnej wartości przewodności oraz wcześniejszy jej spadek na skutek tworzenia się w materiale zwartej struktury fazy stałej. Może to być wykorzystane do oceny procesu wiązania i twardnienia materiałów cementowych.

Przeprowadzone badania przewodności elektrycznej materiałów cementowych pozwoliły stwierdzić powiązanie zmian właściwości elektrycznych z procesami przemian strukturalnych w czasie wiązania i twardnienia. Przewodność elektryczna zaczynów wykonanych z różnych cementów wykazują odmienne przebiegi w czasie przewodności elektrycznej, co jest skutkiem różnorodności składu poszczególnych cementów, jak zarówno odmienności procesów przemian przy ich wiązaniu i twardnieniu. W materiałach z cementu o przyspieszonym wiązaniu struktura szkieletu fazy stałej charakteryzuje się mniejszą porowatością, co utrudnia transport zawartości przestrzeni porowej, w tym przepływy jonowe, będące nośnikami przepływu prądu elektrycznego w materiale wieloskładnikowym. Czas, w którym przewodność elektryczna osiąga niską wartość odpowiada utworzeniu się w materiale zwartej struktury szkieletu i dlatego czasowe przebiegi zmian przewodności materiału cementowego mogą być wykorzystane do oceny przebiegu procesu jego wiązania i twardnienia. Przewodność elektryczna materiałów cementowych zależy również od szeregu innych czynników [36, 44] (temperatura, zawartość dodatków mineralnych oraz domieszek). Dlatego badanie właściwości elektrycznych materiałów cementowych wydaje się być obiecującym sposobem rozszerzenia wiedzy o właściwościach cementów i materiałów na ich bazie.

Bibliografia

- [1] **Archie, G.E.:** *The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics*, Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, Vol. 146, 1942. p. 54 – 62.
- [2] **Atkins, E.R. and Smith, G.H.:** *The Significance of Particle Shape in Formation Resistivity Factor-Porosity Relationships*, Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, Vol. 222, 1961. P. 285 – 291.
- [3] **Baranowski B.:** *Nierównowagowa termodynamika w chemii fizycznej*. Warszawa: PWN, 1974.
- [4] **Boychuk V.:** *Procesy termomechaniczne w przewodnikach niemetalowych przy oddziaływaniu pola elektromagnetycznego*. Opole: OWPO, Studia i Monografie, z. 219, 1988.
- [5] **Boychuk V.:** *Przepływy elektroosmotyczne w murach*. Sbornik vedeckich prací V Konferencie "Aktualni problémy hornictví", VSB - T.U.Ostrava, 1997.
- [6] **Boychuk V.:** *Numeryczne rozwiązanie quasilineowego zagadnienia początkowo-brzegowego dla równania typu parabolicznego*. Zesz. Nauk. Politechniki Opolskiej, Ser.: Matematyka. Z.17, 2001, s. 113 – 118.
- [7] **Boychuk V.:** *Przepływ prądu elektrycznego przez zaczyny cementowe*. Roczniki Inżynierii Budowlanej. Z. 4, 2004, s. 95 – 101.
- [8] **Boychuk V.:** *Wpływ przemian strukturalnych na własności elektryczne twardniejącego materiału cementowego*. Materiały Polsko-Czeskiego Sympozjum Naukowo-Technicznego «Aktualne zagadnienia trwałości materiałów», Opole 31.03-1.04.2006, s. 133 – 136.
- [9] **Boychuk V., Bogdanowicz E.:** *Zagadnienie brzegowe dyfuzji w polu elektrycznym*, Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, Ser.: Matematyka, Fizyka, Chemia, z.16, nr kol. 259/2000, s. 94 – 101.
- [10] **Boychuk V., Giergiczny Z.:** *Przewodność elektryczna świeżych zaczynów cementowych*, Mat. VII Sympozjum naukowo-technicznego: „Reologia w technologii betonu”, Gliwice, 2005, S. 107 – 112.
- [11] **Boychuk V., Kubik J.:** *Pomiar przewodności elektrycznej zaczynów cementowych*. IV Konferencja Naukowo-Techniczna: „Zagadnienia materiałowe w inżynierii lądowej MATBUD’2003”, 25-27 czerwca 2003, Kraków.
- [12] **Bojczuk W., Gaczkiewicz A., Sołdiak M.:** *Model matematyczny termodyfuzji elektrolitów w ośrodku porowatym z udziałem pól mechanicznych*. ZNPO, Ser.: Bud., z. 42, nr 239/98.

- [13] **Boychuk V., Solodiak M.:** *Thermal stresses in ferromagnetic conductor by acting of electromagnetic field*, 2nd International Conference on "New Trends in Statics and Dynamics of Buildings", 16-17 Oktober 2003, Bratislava. P. 215 – 218.
- [14] **Elkey W., Sellevold E.J.:** *Electrical Resistivity of Concrete*, Norwegian Road Research Laboratory, Oslo, 1995 Publication No. 80.
- [15] **Fricke, H.:** *A Mathematical Treatment of the Electrical Conductivity and Capacity of Disperse Systems. The Electrical Conductivity of a Suspension of Homogeneous Spheroids*, Physics Review - Vol. 24, 1924. P. 678 – 681.
- [16] **Gachkewich A.R., Boichuk V.Ya.:** *Termomechanical behaviour of non-metallic electrical conductors during high-temperature treatment*, Journal of Mathematical Sciences, 86 (1997), no. 2, Plenum Publishing Corporation. P. 2585 – 2589.
- [17] **Gachkewich A.R., Boichuk V.Ya.** *Initial-value Boundary Problems by Mathematical Modelling Thermomechanical Processes in Nonmetallic Electroconductive Bodies by Inductive Treatment*. International Conference dedicated to J.P.Schauder Nonlinear Partial Differential Equations Lviv, 1999. P. 72.
- [18] **Garboczi E.J. and Bentz D.P.:** *The microstructure of cement-based materials: Computer simulation and percolation theory*, in Computational and Mathematical Models of Microstructural Evolution, edited by J.W. Bullard, L.-Q. Chen, R.K. Kalia, and A.M. Stoneham (Materials Research Society, Pittsburgh, 1998). P. 89 – 100.
- [19] **Garboczi E.J. and Bentz D.P.:** *Computer simulation of the diffusivity of cement based materials*, J. Mater. Sci. 27, (1992). P. 2083 – 2092.
- [20] **Giergiczny Z., Małolepszy J., Szwabowski J., Śliwiński J.:** *Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji*. Opole: Górażdże Cement, 2002. — 193 s.
- [21] **Gjorv O.E., Vennesland O., El-Busiady A.H.S.:** *Electrical Resistivity of Concrete in the Oceans*, Proceedings – 9th Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, May 2-5, 1977. P. 581 – 588.
- [22] **Hachkevych A., Boychuk V., Boychuk T.:** *Thermomechanical Behaviour Of Electroconductive Layer Structures Under The Influence Of Electromagnetic Impulse*. III slovensko-polsko-czeske sympozium o mechanike s temou "Nelinearna mechanika", 3. Oktobra 2000. P. 217 – 220.
- [23] **Halamickova P., Detwiler R.J., Bentz D.P., Garboczi E.J.:** *Water permeability and chloride ion diffusion in Portland cement mortars: relationship to sand content and critical pore diameter*. Cem. Concr. Res., 1995, 25. P. 790 – 802.
- [24] **Hammond, E. and Robson, T.D.:** *Comparison of Electrical Properties of Various Cements and Concretes*, The Engineer, Vol. 199, No. 5156, pages. 78 to 80, January 21, 1955, and No. 5166, January 28, 1955. P. 114 – 115.
- [25] **Hansson I.L.H., Hansson C.M.:** *Electrical resistivity measurement of Portland cement Based Materials*, Cement and Concrete Research, Vol. 13, No. 5, P. 675 – 683.
- [26] **Hughes B.P., Soleit A.K.O., Brierly R.W.:** *New Technique for Deter-*

- mining the Electrical Resistivity of Concrete*, Magazine of Concrete Research, Vol. 37, No. 5, 1985. P. 133 – 243.
- [27] **Hunkeler, F.:** *The Resistivity of Pore Water Solution – A Decisive Parameter of Rebar Corrosion and Repair Methods*, Construction and Building Materials, Vol. 10, No. 5, 1996. P. 381 – 389.
- [28] **Hunkeler, F.:** *The Resistivity of Pore Water Solution - A Decisive Parameter of Rebar Corrosion and Repair Methods*, Construction and Building Materials, Vol. 10, No. 5, 1996. P. 381–389.
- [29] **Hutter K., Pao Y.H.:** *A dynamical theory of magnetizable elastic solids with thermal and electrical conduction* . — J.Elast., 1974. — Vol. 4. P. 89 – 114.
- [30] **Hutter K., van de Ven A.A.:** *Field-matter interaction in thermoelastic solids* . — Lecture Notes in Physics. — 88. — Berlin: Springer-Verlag, 1978. — 234 p.
- [31] **Hutter K.:** *On thermodynamics and thermostatics of viscous thermoelastic solids in the electromagnetic fields. A Lagrangian formulation.* — Arch. Rat. Mech. Anal, 1975. — Vol. 58. P. 339 – 368.
- [32] **Jackson P.D., Taylor-Smith D., and Stanford P.N.:** *Resistivity-Porosity-Particle Shape Relationships for Marine Sands*, Geophysics, Vol. 43, 1978. P. 1250 – 1268.
- [33] **Jędrzejczyk-Kubik J., Bojczuk W.:** *Zmiana własności dielektrycznych materiałów budowlanych w trakcie przemiany fazowej*. ZNPO, Ser.: Bud. Z. 42, nr. 239/98.
- [34] **Kaliski S.:** *Equation of a combined elektromagnetic, elastic and spin field and coupled drift-type amplification effects.* — Proc. Vibr. Probl., 1963, 4, no 1. — P. 7 – 15.
- [35] **Keller, G.V.:** *Electrical properties of Rocks and Minerals*, Chapter 2 in Handbook of Physical Properties of Rocks, Vol. 1, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1982, P. 217 – 293.
- [36] **Kiernożycki W.:** *Betonowe konstrukcje masywne: Teoria, Wymiarowanie, Realizacja*. Kraków: Polski Cement, 2003. — 320 s.
- [37] **Koryta J., Dvorak J., Bohackova V.:** *Elektrochemia*. Warszawa: PWN, 1980.
- [38] **Kubik J.:** *Thermodiffuzion flows in a solid with a dominant constituent*. Mittailungen aus dem Institut fur Mechanik. Nr 44, Ruhr Universitat Bochum, 1985.
- [39] **Kubik J., Bojczuk W.:** *Przepływy jonowe w materiałach kapilarno-porowatych w zewnętrznym polu elektromagnetycznym*. VI Konferencja naukowa „Fizyka budowli w praktyce”, Łódź, 1997.
- [40] **Lisowski M.:** *Pomiary rezystywności i przenikalności elektrycznej dielektryków stałych*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2004. — 239 s.
- [41] **Maxwell C.:** *Treatise on Elasticity and Magnetism*, Vol.1, Clarendon Press, Oxford, 1873.
- [42] **Monfore G.E.:** *The electrical resistivity of Concrete*, Journal of the RSA Research and Development Laboratories, Vol. 10, No. 2, P. 35 – 48.

- [43] **Moon F.C.:** *Problems in magneto-solids mechanics*. Mechanics Today, 1978. P. 307 – 390.
- [44] **Newille A.M.:** *Właściwości betonu*. Kraków: Polski Cement, 2000.
- [45] **Sellevold E.J., Larsen C.K., Blankvoll A.A.:** *Moisture State of Concrete in a Coastal Bridge*, Proceedings Fourth CANMET/ACI International Conference on Concrete Durability, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1997. — P. 825–833.
- [46] **Slawinski, A.:** *Conductibilite. d.un Electrolyte Content des Sphere Dielectriques*, Journal de Chimie Physique - Vol. 23 - (8)-(10), 1926, P. 710 – 727.
- [47] **Stauffer D.:** *Introduction to Percolation Theory*, Taylor and Francis, London, 1985.
- [48] **Stefaniak J.:** *Wpływ pola elektromagnetycznego na termodyfuzję w ośrodku izotropowym*. Warszawa – Poznań: PWN, 1982.
- [49] **Torquato S.:** *Random heterogeneous media: Microstructure and improved bounds on effective properties*, Appl. Mech. Rev. 44, 1991. P. 37 – 76.
- [50] **Whiting, David A., and Nagi, Mohamad A.:** *Electrical Resistivity of Concrete-A Literature Review*, R&D Serial No. 2457, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 57 p.
- [51] **Whittington H.W., McCarter J., Forde M.C.:** *The Conduction of Electricity Through Concrete*, Magazine of Concrete Research, Vol. 33, No. 114, 1981. P. 48–60.
- [52] **Wilmański K.:** *Podstawy termodynamiki fenomenologicznej*. Warszawa: PWN, 1974.
- [53] **Wilmański K.:** *Modele termodynamiczne ośrodków ciągłych*. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 1985.
- [54] **Wiśniewski S., Staniszewski B., Szymanik R.:** *Termodynamika procesów nierównowagowych*. Warszawa: PWN, 1973.
- [55] **Witakowski P.:** *Termodynamiczna teoria dojrzewania: zastosowanie do konstrukcji maszynowych z betonu*. Politechnika Krakowska, z. nr 1, Kraków, 1998. — 204 s.
- [56] **Wyrwał J.:** *Termodynamiczne podstawy fizyki budowli*. Opole, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, 2004.
- [57] **Young J.F.:** *A review of the pore structure of cement paste and concrete and its influence on permeability*. In Permeability of concrete, ed. D.Whittig and A.Walitt, ACI SP-108, American Concrete Institute, Detroit, 1988.
- [58] **Zybura A.:** *Zabezpieczanie konstrukcji żelbetowych metodami elektrochemicznymi*. Gliwice: Wyd. Politechniki Śląskiej, 2003. — 160 s.

WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁÓW CEMENTOWYCH PRZY ODDZIAŁY- WANIU ZEWNĘTRZNEGO POLA ELEKTROMAGNETYCZNEGO

W pracy przedstawione zostały podejścia do modelowania procesów, zachodzących w materiałach cementowych pod wpływem zewnętrznego pola elektromagnetycznego. Podano wyjściowe relację termomechaniki będące ograniczeniami na postać równań fizycznych opisujących procesy w materiałach wieloskładnikowych, przedstawione schematy doświadczalne wyznaczania przewodności elektrycznej w materiałach cementowych i wyniki jej pomiaru dla materiałów o różnym składzie i strukturze. Dokonano również analizy porównawczej z danymi literaturowymi. Przedstawiono także podstawy teoretyczne badania wpływu zewnętrznego pola elektromagnetycznego na zachowanie się materiałów cementowych. Jako wyjściowy przyjęto opis termomechaniczny, który pozwala rozpatrywać procesy fizyczne w materiałach wieloskładnikowych w sprzężeniu i otrzymać równania fizyczne procesów. Rozważno również znane z literatury fakty powiązania procesów w takich materiałach na etapie ich wytwarzania i eksploatacji. Przedstawiono wyniki badań doświadczalnych właściwości materiałów cementowych, które otrzymano z wykorzystaniem pomiarów z udziałem zewnętrznego pola elektromagnetycznego. Zaprezentowano zbudowane dla celów badawczych stanowisko laboratoryjne do pomiarów właściwości elektrycznych materiałów cementowych oraz podano wyniki przeprowadzonych badań. Pokazano powiązanie właściwości elektrofizycznych (w szczególności przewodności elektrycznej) materiału z ważnymi z punktu widzenia eksploatacji wyrobów z materiałów cementowych właściwościami konstrukcyjnymi.

PROPERTIES OF CEMENTITIOUS MATERIALS UNDER INFLUENCE OF EXTERNAL ELECTROMAGNETIC FIELD

An approach to modeling processes, occurring in cementitious materials under the influence of external electromagnetic field is presented. Output thermomechanics relationship being restrictions to the equations describing physical processes in multicomponent materials, presented schemes of the experimental determination of the electric conductivity cementitious materials and the results of its measurement for materials of different composition and structure are given. Were also examined comparison with literature data. The theoretical study of the impact of external electromagnetic fields on the behavior of cement-based materials also are presented.

As the initial description of the thermomechanical is adopted consideration, which allow to consider the physical processes in multicomponent materials in combination, and obtain physical equations of the processes in conjugation. Are considers the well-known from the literature facts linking processes in such materials during their manufacture and ekspoatation. Experimental results of the properties measurement for cement-based materials, which were obtained with using of an external electromagnetic field. Is presented built environment for research purposes for measurement of electrical properties of cementitious materials and the results of the tests are analysed. Showing linkage elektro-physical properties (in particular the electrical conductivity) with important structural characteristics of cementitious materials.