

TECHNIKI REFLEKTOMETRYCZNE TDR W POMIARACH PODCIĄGANIA KAPILARNEGO MURÓW Z KAZIMIERSKIEJ OPOKI

© Danuta Barnat-Hunek, Zbigniew Suchorab, 2011

У статті подано дослідження моніторингу фізичних параметрів вапняної опоки з регіону Казімежа Дольного у Польщі. Використано рефлексометричні техніки ТДР (Time Domain Reflectometry) як один з методів дослідження вологості. Дослідженням охоплено камені з замку в Яновці над Віслою, мури якого найкраще демонструють прогресуючу корозію, що залежить від зовнішнього впливу та віку murів, а також камінь з каменоломні в Казімежі Дольному. Дослідження порозиметричні вапняної опоки з південного та північного фасадів замку в Яновці та каменоломні в Казімежі показали відмінність у змінах структури каменю. Ця відмінність спричинюється різним збереженням опоки в процесах капілярного підтягування вологи і розчинів солей. Висвітлено дослідницьку техніку ТДР як добру альтернативу до вимірювань міграції води в пористих будівельних матеріалах, а також інших водних параметрів, які характеризують цей матеріал.

Ключові слова: вапниста опока, дослідження вологості, корозія каменю.

W referacie przedstawiono badania obejmujące monitoring parametrów fizycznych opoki wapiastej z regionu Kazimierza Dolnego. Wykorzystano między innymi techniki reflektometryczne TDR (Time Domain Reflectometry) jako jedno z badań wilgotnościowych. Badaniom poddano kamień z Zamku w Janowcu nad Wisłą, którego mury najlepiej odzwierciedlają postępującą korozję zależną od ekspozycji zewnętrznej i wieku murów oraz kamień z kamieniołomu w Kazimierzu Dolnym. Badania porozymetryczne opoki wapiastej z elewacji południowej i północnej Zamku w Janowcu oraz kamienia z kamieniołomu wykazały różnice w zakresie zmian struktury kamieni. Różnice te przyczyniają się do odmiennego zachowania opoki w procesach podciągania kapilarnego wody i roztworów soli. W artykule przedstawiono technikę pomiarową TDR jako dobrą alternatywę do pomiarów transportu wody w porowatych materiałach budowlanych oraz innych parametrów wodnych charakteryzujących dany materiał.

Słowa kluczowe: opoka wapiasta, badania zawiłgocenia, korozja kamienia.

Wstęp

Istotnym problemem konserwatorskim i technologicznym jest ochrona obiektów wystawionych na działanie czynników atmosferycznych, zwłaszcza wody. W wyniku oddziaływań środowisk korozyjnych na kamienne mury następują zmiany własności fizycznych i mechanicznych kamienia i zapraw. Bardzo niekorzystną cechą opoki wapiastej z regionu Kazimierza Dolnego i Nasiłowa jest porowata struktura, która przekłada się na jej niską odporność na działanie wody. W praktyce wyrażone jest to przede wszystkim niską mrozoodpornością oraz dużą nasiąkliwością. Nieodporny na wodę i mróz kamień ulega przyspieszonej destrukcji zwłaszcza, gdy znajdują się w nim sole rozpuszczalne w wodzie, które dodatkowo potęgują procesy jego niszczenia. Opoka wapiasta jest kamieniem o niejednorodnej, porowatej strukturze w związku z tym źródło pochodzenia kamienia, jego ekspozycja w budynku, wiek wbudowania mogą mieć istotny wpływ na skuteczność przeprowadzanych zabiegów konserwatorskich tj. odsalanie, wzmocnienie, hydrofobizację kamienia.

W artykule zaproponowano między innymi technikę reflektometryczną TDR (Time Domain Reflectometry), jako perspektywiczną alternatywę w badaniach wilgotnościowych.

Cel referatu

Cel referatu: przedstawić wyniki badań obejmujących monitoring parametrów fizycznych opoki wapienistej z regionu Kazimierza Dolnego, wykonanych z wykorzystaniem techniki reflektometrycznej TDR (Time Domain Reflectometry).

Problemy wilgotnościowe murów Zamku w Janowcu

Pierwsze mury Zamku w Janowcu nad Wisłą zostały wzniesione w latach 1508–1526. Jego fundatorem był Mikołaj Firlej hetman wielki koronny. Rozbudowany w ciągu następnych wieków, stał się jedną z najpiękniejszych rezydencji magnackich w ówczesnej Polsce. Autorami tych zmian byli wybitni rzeźbiarze i architekci działający w Polsce, m.in. Santi Gucci Fiorentino, Giovanni Battista Falconi, Tylman z Gameren. Obecnie Janowiecki zamek wraz z parkiem tworzy wyjątkowy zespół zabytkowy (rys. 1).

Kamieniem użytym do budowy Zamku w Janowcu była opoka wapienista potocznie zwana wapieniem kazimierskim. Niejednorodny wapień kazimierski reprezentuje skałę o strukturze bioorganicznej, w której mocno pokruszone fragmenty igieł gąbek i znacznie rzadziej otwornic są scementowane mikrytowo – krzemionkowym spoiwem o charakterze masy wypełniającej.

Zamek szczególnie narażony jest na działanie wody opadowej, gdyż brak właściwych zabezpieczeń korony muru. Brak pionowych i poziomych izolacji przeciwwilgociowych powoduje podciąganie kapilarne wody z gruntu. Specyfika materiału z jakiego zbudowano obiekt jest niewątpliwie jedną z przyczyn destrukcji zabytkowych murów.

Przykładowe zniszczenia murów Zamku w Janowcu spowodowane przez wahania temperatury, naprężenia termiczne, wielokrotne cykle zamarzania i odmarzania przedstawiono na (rys. 2, 3). Wieloletni efekt procesów korozyjnych porowatej opoki wapienistej jest odmienny w zależności od ekspozycji w stosunku do stron świata. XVI-wieczny mur od strony południowej wykazuje liczne zniszczenia kamienia i zaprawy, ubytki kamienia, brak zespolenia zaprawy z kamieniem. Natomiast mur od strony północnej jest jednolity, stabilny, z licznymi szarymi nawarstwieniami.

Analizując agresywność czynników środowiskowych, wydawać by się mogło, iż ekspozycja kamienia w murze ma istotny wpływ na jego parametry fizyczne. Od intensywności i częstotliwości procesów nawilżania – wysychania, zamarzania – odmarzania, hydratacji – dehydratacji soli, czy innych mechanizmów zniszczeń zależy struktura kamienia tj. porowatość otwarta, rozmiar, kształt i powierzchnia wewnętrzna porów.

Badania parametrów wilgotnościowych kamieni przy wykorzystaniu technik reflektometrycznych TDR pozwolą na głębszą analizę wpływu powyższych czynników na stan zawilgocenia i transport wody w murach z opoki wapienistej.

Badania porozymetryczne

Na wysokość podciągania kapilarnego w murze ma wpływ struktura materiału, czyli promień porów, kapilar oraz gęstość transportowanej cieczy. Im kapilary mają większą średnicę, a ciecz posiada mniejszą gęstość, tym podciąganie jest większe. Należy podkreślić fakt, iż ruch kapilarny zachodzi tylko w kapilarach o określonej średnicy. Według prof. Klemma [8] transport wody następuje jedynie w porach w zakresie 0,1 mm – 10^{-4} mm. Poniżej tej średnicy zachodzi wyłącznie dyfuzja par i gazów. Powyżej 1mm następuje swobodny przepływ cieczy, nie występują już zjawiska kapilarne.

Badania porozymetrii rtęciowej wykonano na 3 próbkach dla każdego rodzaju kamienia. Badania wykazały zbliżoną porowatość kamieni, której średnia wartość wynosi odpowiednio: K1 – 36,87 %; K2 – 39,26 %; K3 – 37,27 % (Tab. 1). Gęstość właściwa wynosi od 2,36 do 2,72 g/cm³, zaś gęstość pozorna od 1,52 do 1,63 g/cm³. W kamieniu K2 dominująca średnica porów to $1,961 \cdot 10^{-3}$ mm, która uczestniczy w intensywnym ruchu kapilarnym. Zgodnie z klasyfikacją IUPAC są to wielkości charakterystyczne dla makroporów. W kamieniach K1 i K3 nie można jednoznacznie określić dominującej średnicy porów, gdyż waha się ona od $6 \cdot 10^{-6}$ mm do $1,26 \cdot 10^{-3}$ mm [1].



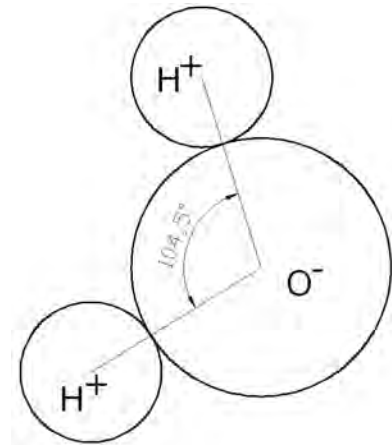
Rys. 1. Makieta Zamku w Janowcu



Rys. 2. Skorodowany mur na elewacji południowej Zamku. Miejsce pobrania kamienia K2 [1]



Rys. 3. Elewacja północna Zamku w Janowcu. Miejsce pobrania kamienia K3 [1]



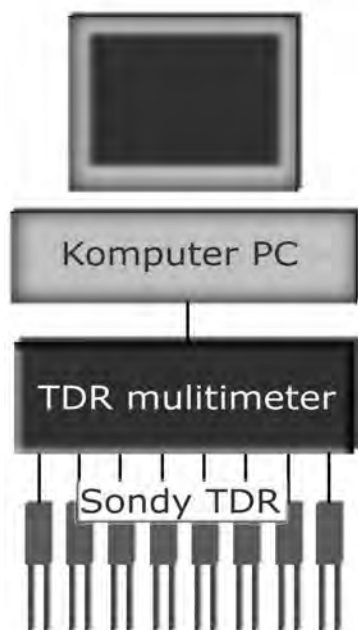
Rys. 4. Niesymetryczna budowa cząsteczki wody



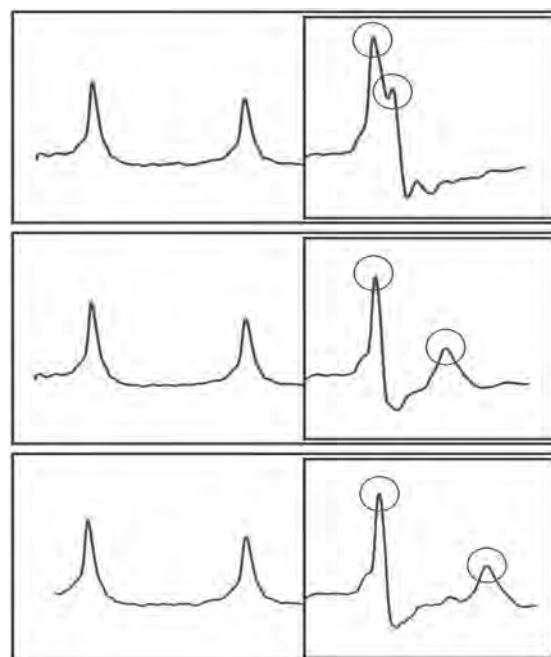
Rys. 5. Stanowisko pomiarowe TDR



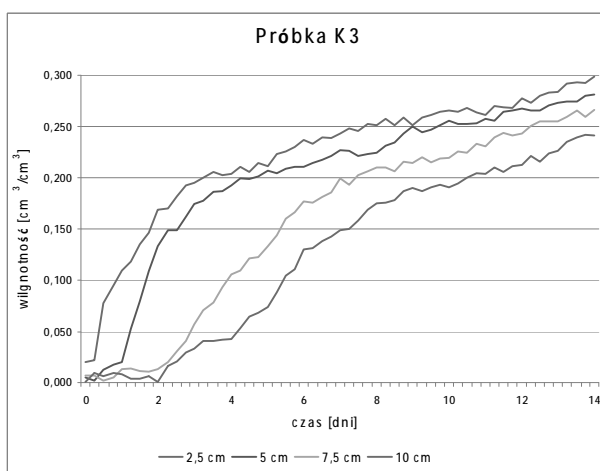
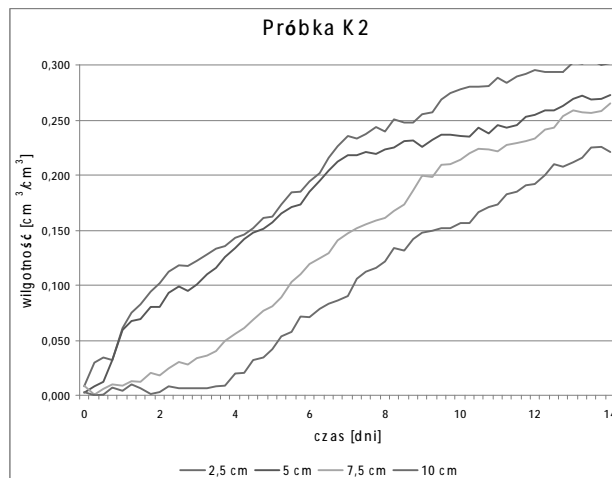
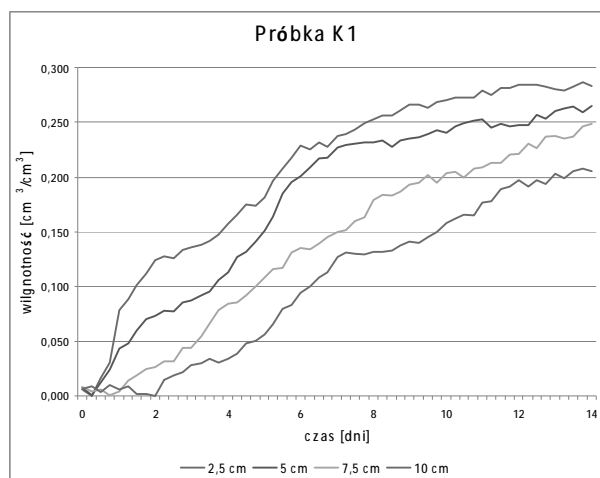
Rys. 6. Przebieg badania – próbki z sondami



Rys. 7. Typowy zestaw pomiarowy TDR



Rys. 8. Reflektogramy TDR w zależności od zawartości wody w układzie. Górny reflektogram wskazuje na materiał suchy, środkowy stany nienasycone, a dolny jest charakterystyczny dla wody (kółkiem oznaczono odbicie powracające z badanego materiału)



Rys. 9. Proces podciągania kapilarnego w kamieniach z kazimierskiej opoki wapińskiej zbadany techniką TDR

Wyniki badań porozymetrycznych opoki wapiastej [1]

Rodzaj kamienia	Porowatość [%]	Całkowita objętość porów [cm ³ /g]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość właściwa [g/cm ³]	Dominująca średnica porów [nm]
K1	36,87	0,2319	1,594	2,533	3,8; 28
K2	39,26	0,2477	1,591	2,626	1961
K3	37,27	0,2340	1,592	2,540	6; 28; 805

Na podstawie wyników badań porozymetrii ręciowej można wnioskować, że kamień K2 będzie wykazywać większą tendencję do podciągania kapilarnego wody niż kamień z kamieniołomu i elewacji północnej. Kamień ten charakteryzuje się największą porowatością, w jego strukturze dominują makropory właściwe (39,26 %, 0,2477 cm³/g, 1,961·10⁻³ mm), które biorą udział w procesach nasączenia i wysychania kamienia.

Nasuwa się przypuszczenie, że struktura kamienia uległa zmianie pod wpływem długotrwałego działania czynników korozyjnych, tj. wielokrotne zamarzania i odmarzania, naprężenia termiczne w wyniku intensywnego nasłonecznienia. Właściwości fizyczne kamienia z elewacji północnej (K3) nie różnią się istotnie od parametrów kamienia K1, pomimo iż od XVI wieku stanowił on element muru Zamku w Janowcu.

Badania wilgotnościowe opoki wapiastej przy wykorzystaniu technik reflektometrycznych

Opis metody TDR (Time Domain Reflectometry)

Opoka wapiasta poddana analizie laboratoryjnej jest materiałem charakteryzującym się dużą porowatością, która z kolei ma znaczny wpływ na właściwości wodne tego ośrodka. Tak jak każdy ośrodek porowaty opoka zbudowana jest z trzech faz – stałej, gazowej oraz ciekłej. Traktując ją jako dielektryk należy zauważyć, iż największy wpływ na zewnętrzne pole elektryczne wykazuje woda, co wynika z jej niesymetrycznego rozkładu ładunków (rys. 4). Taka cząsteczka ma charakter dipola elektrycznego o wartości momentu dipolowego 6,216·10⁻³⁰ C·m.

Parametrem mierzonym techniką TDR jest przenikalność dielektryczna ϵ , będąca miarą zachowania cząstek materii po przyłożeniu zewnętrznego, zmiennego pola elektrycznego [4]. Na skutek przyłożenia zmiennego pola elektrycznego cząsteczki wody obracają się zgodnie z kierunkiem przyłożonego pola. Konsekwencją takiego porządkowania dipoli jest gromadzenie energii, która zostaje wyzwolona gdy pole elektryczne znika. Energia ta jest wyrażona w postaci rzeczywistej części względnej przenikalności elektrycznej ośrodka ϵ' i stanowi ona podstawę przy pomiarach wilgotności ośrodków porowatych. Z kolei urojona część zespolonej przenikalności dielektrycznej (ϵ'') reprezentuje straty energii zewnętrznego pola elektrycznego wywołane przewodnictwem jonowym ośrodka zależnym od koncentracji soli. Przenikalność dielektryczna takiego ośrodka o niezerowym przewodnictwie elektrycznej wyraża się równaniem zespolonym:

$$\epsilon_w = \epsilon'_w - i \left(\epsilon''_w + \frac{\sigma_0}{\omega \epsilon_0} \right). \quad (1)$$

Gdzie: ϵ'_w – rzeczywista część przenikalności dielektrycznej ośrodka w danej częstotliwości ω , ϵ''_w – urojona część przenikalności dielektrycznej w danej częstotliwości ω , i – jednostka urojona, σ_0 – przewodnictwo elektryczne, ϵ_0 – przenikalność dielektryczna próżni ($\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m), ω – częstotliwość kołowa zewnętrznego przyłożonego pola elektrycznego. Straty energii pola związane z jonowym przewodnictwem elektrycznym (urojona część przenikalności dielektrycznej) obserwuje się przy niskich częstotliwościach. Biorąc pod uwagę zakres częstotliwości stosowanych dla techniki TDR, uważa się, że nie mają one znacznego wpływu na wartość całkowitą przenikalności dielektrycznej ϵ i w pomiarach mogą być pomijane.

Ze względu na polarną budowę cząsteczki wody jej przenikalność dielektryczna zasadniczo różni się od przenikalności dielektrycznej fazy stałej oraz gazowej (tab. 2). Dla wody wynosi ona około 80, dla powietrza 1, zaś dla szkieletu fazy stałej waha się ona w przedziale od kilku do kilkunastu w zależności od materiału.

Tabela 2

Wartości przenikalności dielektrycznej w zależności od rodzaju ośrodka [2]

Ośrodek	Przenikalność dielektryczna (20 °C)
Powietrze	1
Woda	80
Bazalt	12
Granit	7–9
Piaskowiec	9–11

Należy tutaj podkreślić, iż przenikalność dielektryczna jest wartością zależną od wielu parametrów (pomimo, iż powszechnie określa się ją mianem stałej dielektrycznej – jest niezależna od natężenia pola). Zależy natomiast od temperatury, gęstości, składu chemicznego i co najistotniejsze w pomiarach dielektrycznych od częstotliwości przyłożonego pola [6].

Dla częstotliwości poniżej 10 GHz, w tym w zakresie częstotliwości właściwym dla techniki TDR (ok. 1 GHz), wartość przenikalności dielektrycznej jest w zasadzie stała i jak to wynika z tabeli 2 wynosi 80.

Wartości przedstawione w tabeli 2 dla minerałów tworzących szkielec fazy stałej, jak i dla powietrza świadczą o tym, iż przenikalność dielektryczna materiału powietrznie suchego lub o niewielkiej zawartości wolnej wody jest niska, zaś przenikalność dielektryczna ośrodka o dużej zawartości wody (na przykład w stanach całkowitego nasycenia, kiedy faza gazowa jest całkowicie wyparta przez wodę) jest duża. Zatem mierząc wartość stałej dielektrycznej takiego trójfazowego ośrodka można przy zastosowaniu właściwej kalibracji empirycznej określić wilgotność badanego ośrodka, w opisywanym przypadku opoki wapniastej.

W technice TDR stałą dielektryczną wyznacza się w oparciu o prędkość propagacji impulsu elektromagnetycznego wzdłuż falowodu jakim są pręty sondy TDR, a wynosi ona:

$$\epsilon = \left(\frac{c}{V} \right)^2, \quad (2)$$

gdzie ϵ – względna stała dielektryczna ośrodka porowatego, c – prędkość światła w próżni ($3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), V – prędkość propagacji impulsu wzdłuż prętów sondy TDR (m/s), przy czym $V = 2L/t_p$ (t_p – czas propagacji sygnału wzdłuż prętów sondy oraz L – długość prętów sondy wprowadzonych w ośrodek porowaty).

Zestaw badawczy TDR zbudowany jest z trzech podstawowych elementów (rys. 5, 6) – miernika, sondy oraz komputera PC funkcjonującego jako stacja sterująca oraz jako magazyn danych.

Miernik TDR generuje szpilkowy impuls elektromagnetyczny o prędkości narastania i opadania ok. $300 \cdot 10^{-12} \text{ s}$ [5]. Propaguje on następnie wzdłuż kabla koncentrycznego o określonej, stałej impedancji do sondy pomiarowej, będącej falowodem z materiałem dielektrycznym o stałej dielektrycznej, która jest w tym przypadku parametrem mierzonym. Wskutek zmian impedancji na granicy koncentryk-sonda oraz na końcu sondy do miernika powraca echo wysłanego impulsu, które jest następnie odbierane przez rejestrator monitorujący, a uzyskany sygnał powrotny wyrażany jest w postaci zmiany napięcia w czasie, w formie tzw. reflektogramu. Interpretacja reflektogramu, a konkretnie odbicie impulsu elektromagnetycznego w sondzie jest podstawą pomiaru wilgotności metodą TDR. Można jej dokonać metodą wizualną przy pomocy oscyloskopu, lub co jest powszechnie wykorzystywane w badaniach monitoringowych – automatycznie przy pomocy właściwych algorytmów, dzięki którym możliwe jest jednoznaczne określenie stałej dielektrycznej ośrodka.

Przy założeniu automatycznej interpretacji powracającego echa (na czym opiera się idea funkcjonowania techniki TDR) cykl badawczy powtarzany jest wielokrotnie z częstotliwością żądaną przez użytkownika. Umożliwia to ciągły pomiar wilgotności przegrody lub materiału budowlanego w różnych punktach i różnym czasie, dzięki czemu zapewniona jest możliwość ciągłego monitoringu stanów wilgotnościowych jak i obserwacji ich zmian.

Sondy TDR są właściwie zakończeniem kabla koncentrycznego, różniącym się od niego nie tylko kształtem, ale również materiałem, z którego wykonano dielektryk pomiędzy przewodami. Dla kabla koncentrycznego materiałem dielektrycznym jest polietylen natomiast dla sondy jest to badany materiał. Stała dielektryczna polietylenu jest znana i w zasadzie niezmienna na całej długości kabla i nie ma wpływu na uzyskany wynik pomiaru. Stała dielektryczna badanego materiału zależy od jego budowy oraz, co tutaj najbardziej istotne,

od zawartości wody w ośrodku. Każda zmiana impedancji w układzie przewód-sonda wywołuje częściowe, bądź całkowite odbicie sygnału. Stąd jedno odbicie pojawia się w miejscu przejścia kabla w sondę, własności ośrodka gwałtownie się zmieniają, co pociąga za sobą zmiany impedancji. Kolejne odbicie pojawia się na końcu falowodu, gdzie impedancja zmierza w kierunku impedancji wolnej przestrzeni i fala jest odbijana.

Rysunek 8 przedstawia reflektogramy TDR dla trzech układów różniących się między sobą zawartością wody (stałą dielektryczną). Dwa pierwsze piki w każdym reflektogramie posiadają kontrolny charakter i są pomijalne z punktu widzenia realizowanych pomiarów. Są one rezultatem celowego zaburzenia ciągłości przewodu i są niezależne od warunków, w jakich wykonywane są pomiary, służą zatem za wzorzec czasu.

Znając prędkość propagacji impulsu elektromagnetycznego (lub jego czas) można wyznaczyć wartość stałej dielektrycznej ośrodka porowatego w oparciu o fundamentalną formułę (2) dla techniki TDR.

W oparciu o zmierzoną przy pomocy techniki TDR, wartość stałej dielektrycznej ośrodka trójfazowego można określić jego wilgotność. Istnieje wiele modeli umożliwiających określenie tego parametru. Ogólnie dzielą się one na fizyczne oraz empiryczne modele mieszanin materiałów dielektrycznych [4, 6].

Do najpopularniejszych metod empirycznych zaliczamy formuły zaproponowane przez Topp'a [7] oraz Malickiego [3], które wiążą stałą dielektryczną z zawartością wody w ośrodku. W realizowanych badaniach do ustalenia wartości wilgotności materiału wykorzystano empiryczną formułę Malickiego, która poza stałą dielektryczną uwzględnia również gęstość materiału w stanie suchym, dzięki czemu możliwe jest uzyskanie większej precyzji wyników:

$$q = \frac{(e^{0.5} - 0.819 - 0.168r - 0.159r^2)}{7.17 + 1.18r}, \quad (3)$$

gdzie ρ jest gęstością fazy stałej w stanie suchym [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$].

Przeprowadzone badania

1. Techniki reflektometryczne pomiaru przyrostu wilgotności kamienia.

W celu zbadania właściwości wodnych opoki wapnistej wykorzystano miernik TDR produkcji polskiej firmy Easy Test. Do pomiarów wykorzystano sondy laboratoryjne LP/ms, które wprowadzono w porowatą strukturę materiału poprzez nawiercane otwory. W celu minimalizacji nieszczelności na granicy falowód-ośrodek porowaty pustki wypełniono pyłem wiertniczym.

Badania laboratoryjne przeprowadzono na trzech próbkach w kształcie prostopadłościanów wyciętych z odpowiednich kamieni. Wymiary próbek – 5 cm x 12 cm x 12 cm. Próbki wysuszono do stałej masy w temperaturze 65 °C (temperaturę obniżono ze 105 °C ze względu na możliwość wystąpienia gipsu w kamieniu), a następnie sezonowano w warunkach laboratoryjnych przez okres jednego miesiąca. Wszystkie powierzchnie próbek, które nie podlegały badaniu uszczelniono przed wodą, nakładając dwie warstwy żywicy epoksydowej. Próbki umieszczono na ruszcie w kuwecie z czystą wodą wodociągową o temperaturze 23 °C, tak, aby badana powierzchnia znajdowała się 1cm poniżej lustra wody (rys. 6). Sondy TDR (LP/ms) zainstalowano odpowiednio na wysokościach 2,5; 5; 7,5 oraz 10 cm nad powierzchnią wody. Odczytane wartości rejestrowane były na właściwych kanałach z odstępem czasowym 6 godzin (0,25 doby).

Na podstawie pomiarów wilgotnościowych metodą TDR wykonano wykresy przedstawiające proces podciągania kapilarnego wody w badanych próbkach w czasie. Wykresy przedstawiają jak zmieniała się wilgotność objętościowa [cm^3/cm^3] próbki wyznaczana techniką TDR. Wilgotność wyznaczono w oparciu pomiar czasu propagacji impulsu wzdłuż falowodu, jaki stanowiły pręty sondy LP/ms. Następnie na podstawie pomiarów czasu propagacji obliczono względną stałą dielektryczną badanego ośrodka wg formuły (2), zaś wilgotność oszacowano wg empirycznej formuły Malickiego (3) [3].

Pomiary przebiegu podciągania kapilarnego wody przez opokę wapnistą zbadaną metodą TDR wykazuje największe powinowactwo do wody przez skorodowany kamień z elewacji południowej (K2). Kamień ten charakteryzuje się największą zdolnością kapilarną, która jest widoczna już w pierwszym dniu, zaś po upływie dwóch tygodni wilgotność jego jest największa z wszystkich analizowanych próbek i przekracza 30 % vol zmierzone na wysokości 2,5 cm nad lustrem wody. Natomiast na wysokości 10cm jego wilgotność5. wyznaczona metodą TDR wynosi po 14 dniach ok. 22 % vol.

Z kolei kamień K3 z elewacji północnej wykazuje zbliżoną dynamikę podciągania kapilarnego wody, lecz jego maksymalna wilgotność zmierzona sondą TDR na wysokości 2,5cm nad lustrem wody po upływie 14 dni jest

mniejsza od kamienia K2 i nie przekracza 30 % vol. Na 10cm powyżej zwierciadła wody wilgotność jest większa od odpowiedniej w kamieniu K2 i wynosi ponad 24 % vol.

Kamień K1 pochodzący bezpośrednio z kamieniołomu charakteryzuje się natomiast najmniejszą zdolnością do podciągania kapilarnego, proces ten przebiega najwolniej i po upływie okresu pomiarowego (14 dni) maksymalna wilgotność zmierzona techniką TDR nie przekracza w nim wielkości 28 % vol w odległości 2,5 cm od zwierciadła wody oraz 23 % vol w odległości 10cm od powierzchni wody.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania porozymetryczne i wilgotnościowe opoki wapnistej z elewacji południowej i północnej Zamku w Janowcu oraz kamienia z kamieniołomu wykazały różnice w zakresie zmian struktury kamieni. Wpływ oddziaływań środowisk korozyjnych najmniej widoczny jest w miejscach o ustabilizowanych warunkach mikroklimatycznych, czyli na murach północnych.

Natomiast różnice te przyczyniają się do odmiennego zachowania opoki w procesach podciągania kapilarnego wody i roztworów soli. Ma to znaczący wpływ na trwałość budowli oraz dalszy proces korozji. Związane jest to również z odpowiednim doborem ochrony konserwatorskiej tj. preparatów zabezpieczających mur, których rodzaj i aplikacja zależą w głównej mierze od cech porozymetrycznych podłoża.

W artykule przedstawiono możliwość pomiaru wilgotności przy zastosowaniu techniki TDR. Technika ta posiada duży potencjał pomiarowy, a w szczególności monitoringowy w odniesieniu do ośrodków porowatych. Obecnie jest w fazie wdrażania w przodujących laboratoriach zajmujących się fizyką budowli.

Zaletą tej metody jest jej niska czułość na zasolenie ośrodka (w zakresie częstotliwości, w których pracuje nie uwzględnia ona urojonej części stałej dielektrycznej) w rezultacie czego pomiar nie jest obciążony błędem wywołanym przewodnictwem elektrycznym spowodowanym koncentracją jonów zawartych w materiałach budowlanych.

Dodatkowo warto podkreślić fakt, iż TDR to technika, którą łatwo przenieść w warunki polowe w celu prowadzenia badań wilgotnościowych na obiektach rzeczywistych, co w przeciwieństwie do powszechnie stosowanych obecnie metod grawimetrycznych daje możliwość długoterminowego monitoringu procesów kondensacji wody w przegrodach budowlanych, minimalizację skutków niszczonego jej działania, poprawę jakości tych przegród, co w szerszym aspekcie przynosi oszczędności finansowe i ekologiczne.

Obecnie trwają badania nad zastosowaniem nowej konstrukcji powierzchniowej sondy TDR, która umożliwi pomiary wilgotności materiałów oraz przegród budowlanych o znacznej twardości, dla których użycie klasycznej, dwuprętowej sondy (omówionej w artykule), wymagającej wprowadzenia stalowych prętów w badany ośrodek jest trudne do zrealizowania. Sonda powierzchniowa umożliwi skuteczne pomiary wilgotności bez konieczności naruszania konstrukcji przegrody, co ma istotne znaczenie w badaniach obiektów zabytkowych.

1. Barnat – Hunek D., *praca doktorska: Ocena skuteczności hydrofobizacji murów z opoki wapnistej na podstawie analizy parametrów wilgotnościowych*. Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury. Maj 2008r. 2. Curtis H.L., Defandorf F.M.: *Dielectric constant and dielectric strength of elementary substances, pure inorganic compounds, and air*. [in:] E.D. Washburn (ed.), *International Critical Tables of Numerical Data, Physics, Chemistry and Technology*, vol. 6. McGraw-Hill, New York 1929, 73–107. 3. Malicki M.A., Plagge R., Roth. C.H.: *Reduction of soil matrix effect on TDR dielectric moisture determination by accounting for bulk density or porosity*. *European J. of Soil Science*, vol. 47(3), 1996. – P. 357–366. 4. Skierucha W., *Wpływ temperatury na pomiar wilgotności gleby metodą reflektometryczną*, *Rozprawy i Monografie Instytutu Agrofizyki im. Bohdana Dobczyńskiego PAN w Lublinie*, Lublin 2005 (5). 5. Skierucha W., Malicki M.A., *TDR Method for the Measurement of Water Content and Salinity of Porous Media*, *Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences*, Lublin 2004. 6. Sobczuk H., Plagge R., *Time Domain Reflectometry Method in Environmental Measurements*, *Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk*, Vol. 39, Lublin 2007. 7. Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P.: *Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines*. *Water Resources Research*, vol. 16, 1980. –P. 574–582. 8. Klemm P., *praca zbiorowa*. 2005: *Budownictwo ogólne. T. 2. Fizyka budowli*. Arkady. Warszawa 2005.