

Mechanizm powstawania uszkodzeń mrozowych zawilgoconych elementów konstrukcji murowych o kapilarno-porowatej strukturze

Mgr inż. Jacek Partyka, doktorant, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Uniwersytet Zielonogórski

1. Wprowadzenie

W niniejszej pracy przedstawiono zagadnienia dotyczące uszkodzeń mrozowych elementów o kapilarno-porowatej strukturze, tworzących konstrukcję murową wybranych obiektów budowlanych.

Zniszczenia mrozowe to uszkodzenia, które powodują częściową utratę właściwości użytkowych, jakie zostały określone dla normalnych, czyli założonych przy projektowaniu, warunków eksploatacji.

Uszkodzenia mrozowe spowodowane są głównie przez zwiększenie objętości wody, która zamarza w porach materiału i eskalację zawartego w strukturze tych porów, lodu. Oddziaływanie mrozu na zawilgocone w znacznym stopniu elementy budynków i budowli o kapilarno-porowatej strukturze może przyczynić się do zmniejszenia parametrów technicznych i użytkowych tych obiektów.

W konsekwencji zamarzająca woda w materiale kapilarno-porowatym może doprowadzić do zmniejszenia wytrzymałości materiału lub jego zniszczenia.

W związku z tym analiza poznawcza zjawiska zamarzania wody w wilgotnych porowatych elementach konstrukcyjnych obiektów budowlanych stworzy możliwość opracowania i zastosowania metod skutecznego przeciwdziałania niekorzystnym następstwom, spowodowanym przez uszkodzenia mrozowe.

2. Zniszczenia mrozowe zawilgoconych ścian obiektów budowlanych

2.1. Zawilgocenia murów o kapilarno-porowatej strukturze – zasadniczym ogniwem procesu ich niszczenia

Woda we wszystkich jej postaciach: pary, cieczy i lodu jest największym wrogiem wielu materiałów i konstrukcji, zwłaszcza obiektów murowanych. Zawilgocenie struktury murów stanowi początkowy etap procesu ich

zniszczenia, zwłaszcza gdy woda zawiera szkodliwe lub agresywne domieszki, na przykład sole rozpuszczalne. Wówczas mogą zachodzić wewnątrz muru i na jego powierzchni negatywne procesy fizyczne, chemiczne lub biologiczne, występujące często we wzajemnym powiązaniu.

W przypadku braku izolacji przeciwwilgociowych stopień zawilgocenia murów zależy od wielu czynników, między innymi od: ukształtowania terenu, rodzaju i uwarstwienia gruntu w otoczeniu i pod obiektem, poziomu wody gruntowej i zmian w czasie tego poziomu, usytuowania i poziomu posadowienia obiektu, jak również od właściwości fizykochemicznych materiałów, z jakich wykonane są mury. W wielu przypadkach podciąganie kapilarne wody z gruntu w murach może sięgać kilku metrów ponad poziom terenu.

Zbyt duże zawilgocenie ma wpływ na obniżenie parametrów wytrzymałościowych zarówno cegły jak i zaprawy oraz na zmniejszenie trwałości murów i na pogorszenie warunków eksploatacyjnych w obiekcie [1].

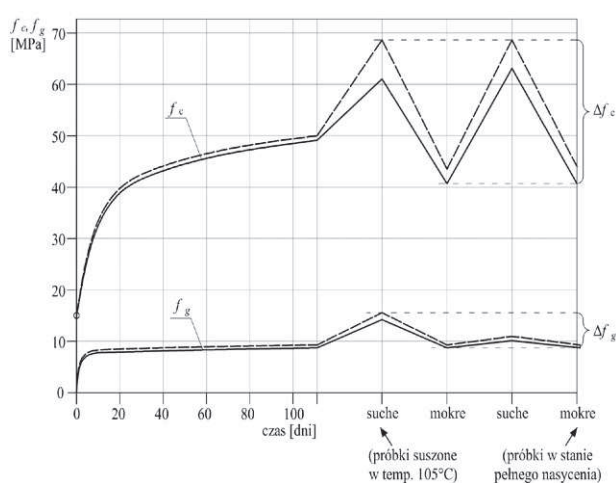
Mury mogą być również niszczone przez wody opadowe w sposób mechaniczny, czego dowodem są właśnie szkody mrozowe, szczególnie widoczne na elewacjach południowych, gdyż tam częstotliwość cykli zamarzania i odmrażania jest największa. Wraz z obniżeniem temperatury wzrasta ciśnienie rozsadzające lodu, które wynosi $21,15 \text{ kN/cm}^2$ w temperaturze -22°C [2].

Na rysunku 1 przedstawiono typowe uszkodzenia muru z cegły spowodowane brakiem odporności na mróz.

Ceglany mur, chociaż był pokryty okładziną gresów o bardzo niskiej absorpcji wody, po kilku latach został zniszczony w tych miejscach, w których występowało narażenie na bezpośrednie działanie wody opadowej. Najmniej odporne na działanie mrozu są kamienie drobno-porowate wykazujące dużą nasiąkliwość, ponieważ kapilary o małych średnicach wypełniają się całkowicie wodą. Ciśnienie lodu wzrasta wraz z obniżeniem



Rys. 1. Uszkodzenia mrozowe muru z cegły z odspojeniem okładzin



Rys. 2. Zależność wytrzymałości na ściskanie i zginanie zaprawy cementowej w stanie suchym i mokrym [5]

temperatury np. przy temperaturze 0°C wynosi 60 N/cm^2 , a przy -20°C wynosi $19\ 700\text{ N/cm}^2$ [2].

Zgromadzona w murach stwarza niekorzystny mikroklimat w pomieszczeniach, pogarsza właściwości termoizolacyjne i akustyczne przegród, przyczynia się do stopniowej destrukcji muru, odspajania tynków i powłok malarskich. Duża wilgotność ścian oraz duża wilgotność względna powietrza wewnątrz pomieszczeń, podwyższona także w wyniku braku odpowiedniej wentylacji, sprzyjają rozwojowi grzybów domowych właściwych i grzybów pleśniowych, mających negatywny wpływ na zdrowie ludzi.

Ważnym skutkiem nadmiernego zawilgocenia ścian jest obniżenie wytrzymałości na ściskanie zarówno cegły, jak i zaprawy.

Szczególnie zaprawa wapienna, wykonana na spoiwie „powietrznym”, a nie hydraulicznym, pod wpływem dużego zawilgocenia traci swoje właściwości konstrukcyjne.

Wg [3, 4] spadek wytrzymałości na ściskanie następuje przede wszystkim wskutek częściowego rozpuszczenia się więzi między kryształkami sieci strukturalnej. Więzy te częściowo rozpuszczają się, po czym rozpuszczone związki wytrącają się z powrotem w porach.

W rezultacie masa materiału nie zmienia się, a wytrzymałość na ściskanie stopniowo maleje.

Zjawisko to jest częściowo odwracalne i po wysuszeniu materiał odzyskuje wytrzymałość zbliżoną do wytrzymałości w stanie suchym, ale pod warunkiem, że w międzyczasie nie doszło do destrukcji spowodowanej korozją mrozową.

Spadek wytrzymałości spowodowany zawilgoceniem charakteryzuje współczynnik rozmiękczenia, oznaczony jako stosunek wytrzymałości na ściskanie materiału w stanie nasycenia wodą do wytrzymałości w stanie suchym.

Dla większości materiałów kapilarno-porowatych współczynnik ten zawiera się w przedziale 0,6–0,9.

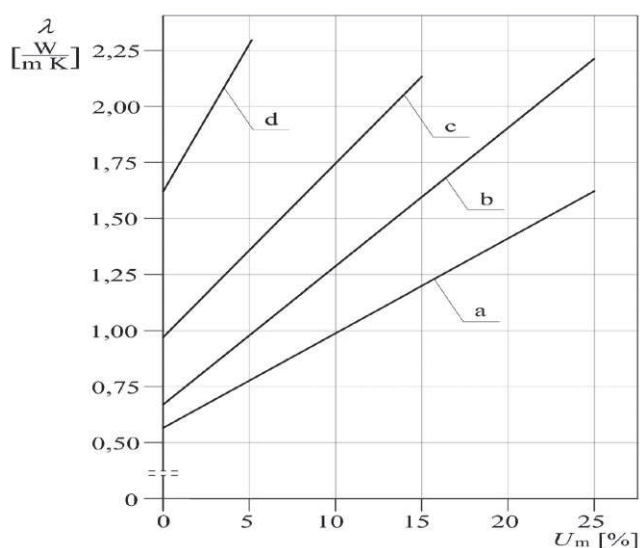
Przykładowo na rysunku 2 przedstawiono wpływ zawilgocenia na wytrzymałość na ściskanie i zginanie zaprawy cementowej [5], której współczynnik rozmiękczenia, wyznaczony z tego rysunku, wynosi około 0,64.

W obiektach murowanych poważny problem stanowią zazwyczaj rozpuszczalne w wodzie sole, gromadzące się w murach w wyniku zachodzącego przez długi czas transportu kapilarnego wody z gruntu [6, 7, 8]. Obecność soli w murach powoduje zwiększenie zdolności higroskopijnego wchłaniania wilgoci. Wzrost zawilgocenia murów wskutek sorpcji wilgoci z powietrza, może być w przypadku mocno zasolonych murów porównywalny z zawilgoceniem spowodowanym innymi przyczynami.

Nadmierne zawilgocenie murów wpływa także ujemnie na ich właściwości cieplne. Szczególnie ważne jest to w zewnętrznych przegrodach budowlanych.

Wilgotność w istotny sposób wpływa na wartość współczynnika przewodności cieplnej λ materiału (rys. 3).

Tłumaczy się to istnieniem tzw. mostków cieplnych, powstających na skutek wypełnienia porów wodą [9].



Rys. 3. Wpływ zawilgocenia na przewodność cieplną wybranych materiałów budowlanych [4,5]: a – cegła ceramiczna o gęstości 1694 kg/m^3 , b – cegła ceramiczna o gęstości 1807 kg/m^3 , c – wapień o gęstości 1942 kg/m^3 , d – cegła klinkierowa

Warto w tym miejscu wyjaśnić, że wg [5, 10] współczynnik przewodności cieplnej suchego powietrza w porach rośnie ze wzrostem średnicy porów i wynosi przykładowo w temperaturze 0°C – 0,025 W/m×K przy średnicy 0,1 mm i 0,031 W/m×K, przy średnicy 2 mm.

W przypadku zawilgocenia materiałów kapilarno-porowatych część przestrzeni porów wypełniona zostaje wodą, której współczynnik λ wynosi 0,58 W/m×K, a zatem jest około dwudziestokrotnie wyższy od współczynnika przewodności cieplnej powietrza.

Oprócz nadmiernego zawilgocenia murów, które pogarsza izolacyjność termiczną tych konstrukcji, również szkodliwe jest oddziaływanie soli, głównie chlorków, azotanów i siarczanów, objawiające się wykwitami, przebarwieniami oraz krystalizacją w przypowierzchniowej strefie muru i na powierzchni.

Proces krystalizacji powoduje zwiększenie objętości soli i powstanie między innymi znacznego ciśnienia krystalizacyjnego w przypowierzchniowej strefie muru, przez co powstają naprężenia rozciągające powodujące destrukcję muru.

Ma to istotny wpływ na zmniejszenie jego trwałości [1].

2.2. Ogólna charakterystyka powstawania uszkodzeń mrozowych w zawilgoconych elementach porowatych budynków i budowli

Uszkodzenia mrozowe powstają zawsze wtedy, gdy zawartość wody w chwili ochłodzenia poniżej 0°C jest większa, niż wartość graniczna zawartości wody w materiale budowlanym, wpływająca na powstanie takiej szkody, tzn., gdy naprężenia powstające przy przechodzeniu występującej wody w lód, przekraczają wytrzymałość materiału. Początkowo pojawiają się najczęściej mikroskopijne zmiany w strukturze porowej, które do widocznych uszkodzeń prowadzą dopiero po wielokrotnych cyklach zamrażania i rozmrażania. Sole mogą przyspieszyć proces powstawania uszkodzeń albo wręcz stać się ich inicjatorem. Pozostałe ciała obce, jak np. naloty mikrobiologiczne lub zabrudzenia przyczyniają się do powstawania szkód mrozowych raczej pośrednio o tyle, o ile podnoszą zawartość wody w materiale budowlanym.

Istotnym czynnikiem są tu występujące w danej sytuacji warunki pogodowe i to zarówno makro-, jak i mikroklimatyczne. Badania wykazały, że szkody mrozowe występują częściej w klimatach względnie łagodnych, gdy po długotrwałych opadach deszczu następują krótkie okresy mrozu. Orientacja względem stron świata i usytuowanie elementu budowlanego mają również wpływ na prawdopodobieństwo pojawienia się tego typu szkód, ponieważ zarówno zagrożenie wilgocią, jak i promieniowanie słoneczne mogą być czynnikami wpływającymi na proces ich powstawania. Nawet wtedy, gdy temperatura znajduje się poniżej punktu zamarzania, silne nasłonecznienie prowadzi do topnienia lodu w strukturze porowej, co zwiększa liczbę cykli zamrażania i rozmrażania.

Współoddziaływanie czynników powodujących szkody mrozowe jest bardzo złożone. Stąd bardzo trudno jest

Liczba cykli	Wytrzymałość aktualna próbek cylindrycznych odniesiona do wytrzymałości 7-dniowej [%]	
	Beton mokry	Beton suchy
0	100	100
10	141	165
30	119	201
50	67	220
60	0	228

Rys. 4. Wpływ zamrażania i rozmrażania na beton mokry i suchy [13]

ryzykować podawanie precyzyjnych danych liczbowych obrazujących prawdopodobieństwo ich powstawania. Jednak przy dokładnej analizie z pewnością możliwa jest prezentacja danych choćby porównawczych, jak np. czy dzięki określonym zabiegom renowacyjnym ryzyko szkód mrozowych na danym elemencie budowlanym w porównaniu do stanu pierwotnego wzrasta, czy maleje.

Działanie mrozu na nadmiernie zawilgocone elementy budowli i budynków o strukturze porowatej, jak nawierzchnie drogowe, tynki, okładziny ścian i podłóg, itp., może spowodować zmniejszenie ich wytrzymałości oraz postępującą destrukcję i zniszczenie, zwłaszcza w przypadku, gdy zjawisko to ma charakter cykliczny [12].

Niskie temperatury i mróz są nie tylko szkodliwe dla budynków, ale często zagrażają ich eksploatacji.

W niskich temperaturach materiały budowlane mogą się kruszyć, pękać i rozpadać, czyli mróz i lód czynią je nietrwałymi w tych warunkach.

Udowodniono w praktyce, że porowate materiały jamiaste, takie jak kamień, cegła, zaprawa, dachówka, beton i wszystkie materiały prefabrykowane, mogą być stabilne, ale także niestabilne w niskich temperaturach, w zależności od składu i struktury oraz ich środowiska.

Różne czynniki są przyjmowane jako kryterium dla określenia, czy materiał jest wrażliwy na mróz, czy nie. Niektóre uwzględniają porowatość i absorpcję wody, inne zmiany objętościowe, inne jeszcze liczbę cykli zamrażania i rozmrażania materiału, itp. [14].

Panuje uzasadniony pogląd, iż z oceną zniszczeń mocno zawilgoconych budynków należy poczekać do najbliższej wiosny, aż ujawnią się szkody wywołane przez zamarzanie wody porowej w ścianach. Istotnie, z pozoru wyschnięte ściany i tynki zalanych budynków na wiosnę nadają się najczęściej ponownie do suszenia. Dodatkowo ujawniają się spękania, jako skumulowany efekt rozrostu kryształów lodu w sieci kapilar oraz wywieranego przez nie nacisku na ścianki porów i kapilar. O intensywności tego procesu decyduje też duża różnica temperatur między wnętrzem budynku a otoczeniem. Ta różnica, szczególnie znaczna w zimie, intensyfikuje przepływy wilgoci w ścianie [15].

Mury mokre i mocno zawilgocone oraz zasolone, narażone są na przyspieszoną destrukcję spowodowaną korozją mrozową (rys. 5).

Niebezpieczne może się okazać również zbyt szybkie osuszenie takich murów. Przy wysychaniu muru

następuje stopniowa dehydratacja poszczególnych składników. W wyniku tego powstaje zjawisko skurczu przyczyniające się do powstania zbyt dużych naprężeń skurczowych, w rezultacie których dochodzi do pęknięcia, rozwarstwiania, odpadania i łuszczenia tynków i polichromii [1].



Rys. 5. Widok muru ceglanego uszkodzonego wskutek korozji mrozowej [1]

3. Krzepnięcie wody w kapilarach porowatych materiałów budowlanych

3.1. Podstawy fizyczne przemiany fazowej woda-lód w kapilaro-porowatych materiałach budowlanych

Krzepnięcie jest jednym z najbardziej powszechnie obserwowanych zjawisk w naszym otoczeniu. W zastosowaniu inżynierskim procesy krzepnięcia są spotykane w materiałach i procesach, gdzie technologie kontrolujące proces krzepnięcia są przełomowe, decydujące o wytwarzaniu wysokiej jakości produktów i rozwoju nowych materiałów [16, 17].

Problematyka krzepnięcia cieczy w materiale porowatym może znaleźć zastosowanie w inżynierii, jak na przykład wilgotne fundamenty w budownictwie, wilgotne izolacje, materiały włókniste i także w wilgotnych materiałach zmienofazowych (PCM) podczas akumulacji ciepła [18].

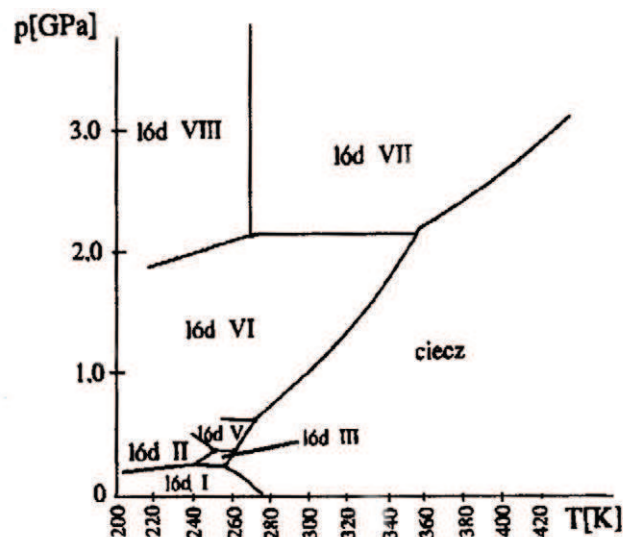
Decydującym motywem podejmowania się analizy i badań procesu krzepnięcia zawilgoconych budowlanych materiałów kapilaro-porowatych jest zainteresowanie zjawiskami związanymi ze zwiększaniem objętości zamrożonej wody w tych materiałach porowatych z jednoczesnym określeniem skutków ekspansji lodu, co może być zniwelowane migracją wilgoci zawartej w porach materiału budowlanego.

Przemiana wody w lód w sieci kapilar typowych materiałów budowlanych jest podstawowym mechanizmem ich destrukcji. Powstające kryształy lodu zwiększają swoją objętość o około 9%, naciskają na ścianki kapilary, wywołując w niej naprężenia rozciągające. Proces ten wielokrotnie powtarzany, zwłaszcza na wiosnę (zamarzanie/odtajanie) jest zasadniczą przyczyną zniszczeń warstwy wykończeniowej ściany. Destrukcja wywołana przez wilgoć w materiałach budowlanych wynika

z właściwości wody jako cieczy polarnej, natomiast badania wody w zależności od ciśnienia i temperatury, przedstawia wykres fazowy lodu (rys. 6).

Interesujący przedział z punktu widzenia rozpatrywanych zagadnień dotyczy wartości temperatur od -25°C do 0°C [19].

Z wykresu wynika również fakt, że w niskich temperaturach woda przechodzi w lód w coraz wyższych ciśnieniach [19].



Rys. 6. Wykres fazowy lodu [2]

Główne problemy, jakie pojawiają się przy opisach przemiany wody w lód, wynikają z wpływu tego procesu na trwałość muru oraz potrzeby brania pod uwagę bardzo intensywnych wzajemnych oddziaływań wilgoci i lodu na szkielet, jakie występują w trakcie trwania przemiany fazowej.

Podobne problemy pojawiają się z powodu współistnienia różnych faz wilgoci, przepływów ciepła i innych składników opisywanego zjawiska, a w tym wilgoci zaabsorbowanej na ściankach kapilar, pary wodnej i dyfundujących kryształów lodu.

Przy opisie przemiany wody w lód przyjętą można następujące założenia:

- ośrodek ciągły jest wieloskładnikowy, w którym wyróżniamy szkielet, wilgoć i lód, wypełniający kapilary szkieletu,
- w trakcie obniżania temperatury nastąpi oddziaływanie pomiędzy tworzącym się lodem, wodą a ścianką materiału kapilaro-porowatego.

Rezultatem takich założeń będzie relacja, która połączy promień kapilary R z temperaturą zamarzania wody w jej wnętrzu T i napięciem powierzchniowym σ , co określa następujący wzór:

$$R = - \frac{k\sigma}{T} \quad (1)$$

Idealizując, otrzymany wzór pozwala na ocenę stanu naprężeń we wnętrzu kryształu w zależności od napięcia powierzchniowego σ i promienia kapilary R .

Z powyższej zależności temperatury zamarzania wody od promienia kapilar wynika również, że w cienkich kapilarach woda zamarza w coraz niższych temperaturach. Ponadto wartość stałej k uzyskamy z połączenia dwóch prostych zależności fizycznych, a mianowicie:

- warunku określającego granicę fazową wody i lodu typu I w przedziale temperatur $-22^{\circ}\text{C} < T < 0^{\circ}\text{C}$; ma on postać $p = -(2T/k)$, co wynika z diagramu przedstawionego na rysunku 6;
 - rozrastające się w kapilarze kryształy lodu upraszczając traktujemy jako kule wypelniające całą kapilarę [15].
- Podsumowując, stwierdzić należy, że mechanizm degradacji materiału z powodu mrozu wydaje się stosunkowo prosty, choć występuje około wspomnianych zmian, w następujący sposób:
- chłonny i porowaty materiał jest nasycony wodą oraz w temperaturze poniżej zera tworzy się lód;
 - zamarznięta woda w postaci lodu zwiększa swoją objętość i poprzez spowodowanie zwiększenia ciśnienia zachodzi wzrost naprężeń w materiałach, a dalsze obniżenie temperatury powoduje wzrost ciśnienia, co może doprowadzić do wystąpienia degradacji materiału [14, 20].

3.2. Krystalizacja lodu w sieci kapilar materiałów porowatych

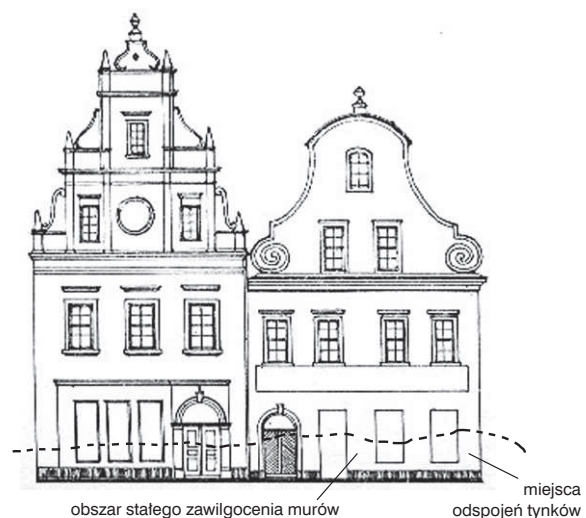
Analiza rozkładów pól temperatur i wilgoci jest wstępnym etapem wyjaśniania warstwowego mechanizmu zniszczeń warstw tynku. Kolejny jest związany z anormalnym procesem krystalizacji lodu w sieci kapilar. Z diagramu przedstawiającego różne formy przemian fazowych wody wynika, iż przy rosnącym ciśnieniu woda przechodzi w lód w temperaturach niższych od zera ($-28 < T < 0^{\circ}\text{C}$), przy czym w największych kapilarach zawsze pozostanie w fazie ciekłej, ponieważ tam kryształy lodu mogą powstać tylko przy wysokim ciśnieniu. Zagadnienia związane z tworzeniem się lodu warto rozpatrywać w różnych, typowych miejscach przekroju poprzecznego przegrody budowlanej, a mianowicie:

- w zewnętrznej warstwie przegrody, gdzie panuje najniższa temperatura oraz stosunkowo najmniejsze zawilgocenie
 - w warstwie pośredniej przegrody, przy umiarkowanym jej zawilgoceniu i temperaturze;
 - w warstwie środkowej przegrody, przy dużym zawilgoceniu, ale stosunkowo wysokiej temperaturze.
- Mechanizm powstawania lodu charakteryzuje się tym, że w pierwszej kolejności wypełnione są wodą mikrokapilary, a następnie coraz szersze pustki i kapilary. W przypadku zewnętrznej warstwy przegrody, słabe wypełnienie cieczą nie powoduje zniszczeń, ponieważ brak jest wilgoci zdolnej do wystąpienia przemiany fazowej. W przypadku warstwy środkowej przegrody obserwuje się z kolei, duże wypełnienie sieci kapilar, ale ta część znajduje się poza zasięgiem oddziaływania temperatur ujemnych. Natomiast w przypadku pośredniej lokalizacji tworzenia się lodu w przegrodzie, występuje wyższa

temperatura, niż w warstwie brzegowej przegrody, ale za to dużo wilgoci zdolnej do przemiany w lód. Tam też wystąpią największe naprężenia związane z 9% przyrostem objętości. Na tej podstawie wnioskować można więc, że zniszczenia występują między powierzchnią zewnętrzną przegrody a wnętrzem przegrody budowlanej, na pewnej grubości g . Z uwagi na cykliczne powtarzanie się opisanego procesu, dochodzi do uszkodzeń w określonej warstwie muru, znajdującej się w bezpośrednim sąsiedztwie zewnętrznych warstw tynku. Po pewnym czasie odspaja się od podłoża, odsłaniając elementy konstrukcyjnego ustroju nośnego danej przegrody budowlanej. Na rysunku 7 przedstawiono ściany szczytowe budynków, z zaznaczeniem miejsc występowania odspojeń warstw zewnętrznych i obszar stałego zawilgocenia tych ścian [15]. Przedstawiony jakościowy opis mechanizmu narastania kryształów lodu w materiale prowadzi do zniszczeń warstwowych tynków i pozbawia przegrodę skutecznego zabezpieczenia jej powierzchni przed działaniem czynników atmosferycznych, zanieczyszczeń zawartych w powietrzu, wodą opadową i uszkodzeniami mechanicznymi, a także wpływa na pogorszenie estetyki obiektu.

4. Podsumowanie

Przedstawione zagadnienia dotyczące uszkodzeń mroźnych elementów o kapilarno-porowatej strukturze, tworzących konstrukcję murową wybranych obiektów budowlanych, są ważne dla oceny trwałości i eksploatacji tych obiektów. Proces zamarzania wody w wilgotnych budowlanych materiałach kapilarno-porowatych wpływa na własności techniczne tych materiałów, a nawet może prowadzić do ich destrukcji. Dlatego też problem zamarzania wody w materiałach kapilarno-porowatych w połączeniu z migracją wilgoci ma duże znaczenie naukowe i techniczne. Wymienione w treści opracowania



Rys. 7. Odspojenia tynków i strefa zawilgocenia ścian budynków [15]

spostrzeżenia i uwagi, dotyczące problematyki zamrażania wody w kapilarno-porowatych elementach konstrukcyjnych obiektów budowlanych, wskazują na stałą potrzebę prowadzenia dalszych badań tego złożonego procesu fizycznego, mającego podstawowe znaczenie dla oceny trwałości tych obiektów.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Hoła J., Matkowski Z., Wybrane problemy dotyczące zabezpieczeń przeciwwilgociowych ścian w istniejących obiektach, *Awarie budowlane*, XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna Szczecin-Międzyzdroje, 26-29 maja, 2009
- [2] Zbigniew Suchorab¹, Danuta Barnat-Hunek², Henryk Sobczuk³ Pomiary wilgotności murów z kazimierskiej opoki wapiastej przy zastosowaniu metody TDR, *Budownictwo i Architektura* 2 (2008) 125-140
- [3] Rebinder P.A., *Fizyko-chemiczna mechanika kak osnova zakreplenija gruntov v dorosnom stroitelstwie o proizvodstvie stroitelnych materialov na osnove gruntov*. MGU. Moskwa, 1961
- [4] Wyrwał, J. Świrski J., *Problemy zawilgoczenia przegród budowlanych*. Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, *Studia z zakresu Inżynierii* nr 44, 1998
- [5] Płoński W., *Problemy wilgoci w przegrodach budowlanych*, Arkady, Warszawa, 1968
- [6] Adamowski J., Hoła J., Matkowski Z., *Problemy remontowe zawilgoconych monumentalnych obiektów barokowych*, *Renowacje i Zabytki*, nr 1 (13), 2005
- [7] Adamowski J., Hoła J., Matkowski Z., *Probleme und Lösungen beim Feuchtigkeitsschutz des Mauerwerks von Baudenkmalern am Beispiel zweier grosser Barockbauten in Wrocław*, *Bautechnik*, 2005
- [8] Skibiński S., *Sole rozpuszczalne w wodzie*. *Renowacje* nr 10, 2000
- [9] Cammerer J.S., *Izolacje ciepłochronne w przemyśle*. Arkady, Warszawa 1967

- [10] Wójcik R., *Metody osuszania murów*. Izolacje nr 9, 2000
- [11] Künzel H. M., *Uszkodzenia mrozowe tynku i muru – przyczyny i zapobieganie*, Raport Badawczy, Instytut Fizyki Budowlanej Fraunhofera (IBP), Stuttgart, 2004
- [12] Wyrwał J., *Podstawy fizyczne procesu zamrażania wody w porowatych materiałach budowlanych*, Politechnika Opolska, Komisja Inżynierii Budowlanej Oddział Polskiej Akademii Nauk w Katowicach *Roczniki Inżynierii Budowlanej – Zeszyt 6/2006*
- [13] Collins A.L., *The destruction of concrete by Frost*, *J.Inst. Civil Engineering*, 23, 1944-45, 29-41
- [14] Zdravković S., Stojić D, Turnić, D., *Rehabilitation of Buildings in Winter conditions*; University of Nis, The Faculty of Architecture and Civil Engineering, Serbia; *FACTA UNIVERSITATIS Series: Architecture and Civil Engineering Vol. 9, No 3, 2011*
- [15] Kubik J., *Trwałość zabytków*, Opole, 2005
- [16] Derek, B., Ingham, Pop.I.J., *Transport Phenomena in porous media III*, 2005
- [17] Kimura S., *2005 Dinamic Solidification in a water saturated porous medium cooled from above*, Institute of Nature and Environmental Technology, Kanazawa University, Japan
- [18] Lipnicki Z., Weigand B., 2008. *Natural convection flow with solidification between two vertical plates filled with a porous medium*. *Heat Mass Transfer*, 44, 1401-1407
- [19] Kubik J., *Podstawy fizyki budowli*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, 2008, s.66
- [20] Tufejdžić V., *Građevinski materijali-II, ponašanje materijala u različitim sredinama*, Naučna knjiga, Beograd, 1975

WYKORZYSTANE MATERIAŁY

- [1] <http://all4architect.com/articles/item/72-frost-damaged-bricks.html>; ilustracja uszkodzenia mrozowego muru z cegły z odspojeniem okładzin przykłady
- [2] <http://www.chem.uw.edu.pl/people/AMyslinski/cw3/h2oa.htm>; ilustracja wykresu fazowego lodu

INNOWACJE W BUDOWNICTWIE | DESIGN | ARANŻACJA OGRODÓW

NAJWIĘKSZE NA DOLNYM ŚLĄSKU
TARGI BUDOWNICTWA I WYPOSAŻENIA WNĘTRZ

TARBUD

27-29 MARCA 2015

HALA STULECIA | WROCŁAW

WYJDZIESZ ZBUDOWANY

INNOWACJE
W BUDOWNICTWIE



ARANŻACJA
WNĘTRZ



ARANŻACJA
OGRODÓW



HALA STULECIA