

dr hab. inż. Teresa Stryszewska, prof. PK^{1*)}

ORCID: 0000-0003-1984-4425

dr inż. Stanisław Kańka¹⁾

Woda jako główny czynnik procesów degradacji cegły ceramicznej

Water as the main factor in the degradation processes of clay brick

DOI: 10.15199/33.2022.09.10

Streszczenie. W artykule scharakteryzowano podstawowe czynniki mające istotny wpływ na trwałość murów ceglanych, a przede wszystkim cegły ceramicznej. Najważniejszym z nich jest woda, która nie tylko stanowi zagrożenie dla muru, ale również umożliwia inne procesy korozyjne, zmienia teksturę cegły, co powoduje pogorszenie jej właściwości mechanicznych, a także umożliwia transport soli, które krystalizując, powodują utratę zwięzłości materiału. Ponadto zamarzając w porach materiału, prowadzi do jego zniszczenia. Woda jest również niezbędna do rozwoju organizmów i mikroorganizmów żywych, będących przyczyną biodeterioracji.

Słowa kluczowe: trwałość; cegła; woda; zasolenie; biodeterioracja; destrukcja mrozowa.

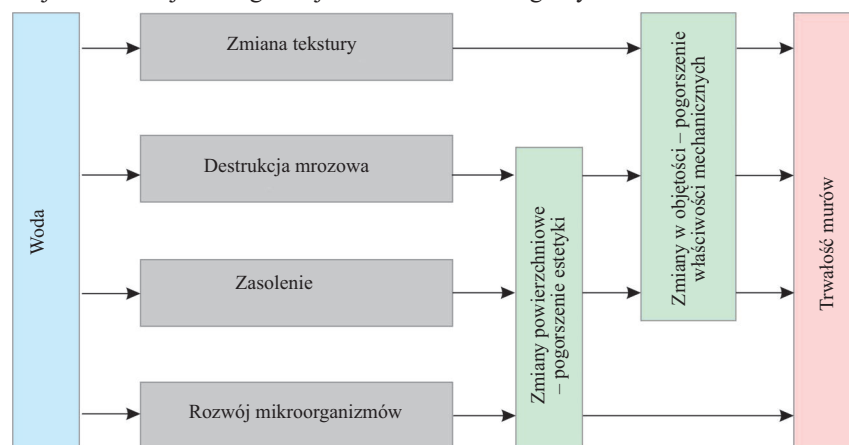
Abstract. The article characterizes the basic factors significantly affecting the durability of brick masonry, especially clay brick. The most significant of these is water, which itself poses a threat to the masonry, as well as enabling other corrosive processes. Water also changes the texture of the brick, which causes deterioration of its mechanical properties. It allows the transport of salts, which crystallize causing the material to lose its compactness. Also in frost destruction, freezing in the pores of the material leads to its destruction. Water is also necessary for the growth of living organisms and microorganisms, which are the cause of biodeterioration.

Keywords: durability; brick; water; salinity; biodeterioration; frost freeze destruction.

Trwałość obiektu budowlanego to cecha konstrukcji wyrażająca się jej zdolnością do zachowania stateczności i nośności w założonym czasie użytkowania, bez wyraźnego pogorszenia właściwości użytkowych albo wystąpienia nieprzewidzianych kosztów utrzymania konstrukcji [1 ÷ 4]. Cegła ceramiczna uznawana jest za jeden z najtrwalszych materiałów budowlanych, ale podlega oddziaływaniu środowiska naturalnego i pod jego wpływem ulega niszczeniu. Do podstawowych czynników zewnętrznych, które powodują niszczenie murów ceglanych, zalicza się **oddziaływanie fizyczne**, będące wynikiem zamarzania wody, **oddziaływanie chemiczne** związane z obecnością soli oraz **biologiczne**. W warunkach rzeczywistych oddziaływania zewnętrzne, jak również procesy korozyjne mają zazwyczaj charakter synergiczny. Mechanizmy, które prowadzą do niszczenia obiektów, przenikają się nawzajem i potęgują. Czasami skutki jednego oddziaływania umożliwiają zainicjowanie kolejnego procesu, np. zmia-

na pH podłoża lub wzrost jego zasolenia w wyniku korozji chemicznej umożliwia i sprzyja inicjacji i rozwojowi mikroorganizmów powodujących korozję biologiczną. Warunkiem zaistnienia wszystkich procesów korozyjnych jest obecność wody (rysunek 1). Jej wpływ można podzielić na bezpośredni i pośredni. Bezpośredni polega na zmianie tekstury materiału, natomiast w mechanizmie pośrednim woda pełni rolę czynnika, który umożliwia występowanie określonych procesów korozyjnych. Jak wspomniano, dotyczy to destrukcji mrozowej, korozji chemicznej i biologicznej.

Skutkiem zmiany tekstury materiału może być pogorszenie właściwości mechanicznych [6], natomiast w wyniku korozji chemicznej powstają wysolenia typu efflorescence i subflorescence, skutkujące odpowiednio pogorszeniem estetyki i utratą zwięzłości cegły. Ponadto podczas agresji mrozowej woda, zamarzając, zwiększa swoją objętość, czemu towarzyszy ciśnienie krystalizacji, będące źródłem naprężeń rozciągających w materiale. Należy podkreślić, że rozwój organizmów i mikroorganizmów możliwy jest jedynie w środowisku wilgotnym.



Rys. 1. Czynniki kształtujące trwałość murów [5]

Fig. 1. Determining factors of masonry durability [5]

¹⁾ Politechnika Krakowska; Wydział Inżynierii Lądowej

^{*)} Adres do korespondencji: teresa.stryszewska@pk.edu.pl

Wpływ wody na właściwości mechaniczne cegieł

Materiały murowe należą do grupy kapilarno-porowatych, które cechuje porowatość otwarta wynosząca od kilku do kilkudziesięciu procent. Mineralne materiały ceramiczne o strukturze kapilarno-porowatej wykazują naturalną tendencję do zwilżania w obecności wody i/lub wilgoci. Niezależnie od rodzaju badanych cegieł przy krótkotrwałym (ok. miesiąca) nasycaniu wodą obserwuje się spadek wytrzymałości na ściskanie o ok. 10% [7]. Z kolei długotrwałe nasycanie wodą może powodować zmniejszenie wytrzymałości nawet o 20% i więcej [7], ale zależy to od składu cegły [8], np. obecność popiołu lotnego istotnie przyczynia się do pogorszenia cech mechanicznych przy dłuższej ekspozycji w wodzie.

Do oceny wpływu wody na właściwości mechaniczne cegieł może być pomocny **współczynnik redukcji wytrzymałości na ściskanie η_f** zdefiniowany jako stosunek wytrzymałości w stanie suchym do wartości tej cechy wyznaczonej po krótkotrwałym lub długotrwałym sezonowaniu w wodzie. W przypadku cegły współcześnie produkowanej wynosi on ok. 0,79 [7]. Przyczyną pogorszenia właściwości mechanicznych cegieł pod wpływem wody jest zwiększenie porowatości materiału ceramicznego oraz degradacja sieci krzemotlenowej przez zerwanie mostków Si-O-Si [7 ÷ 8]. Jak zaobserwowano, proces ten dotyczy przede wszystkim fazy amorficznej, która dominuje w cegle [7]. Ponadto za pogorszeniem cech mechanicznych w wyniku ekspozycji w wodzie odpowiedzialne są procesy hydrolizy glinokrzemianów i powtórnej hydratacji, które sprzyjają rozluźnieniu wiązań strukturalnych, a także obecność soli rozpuszczających się.

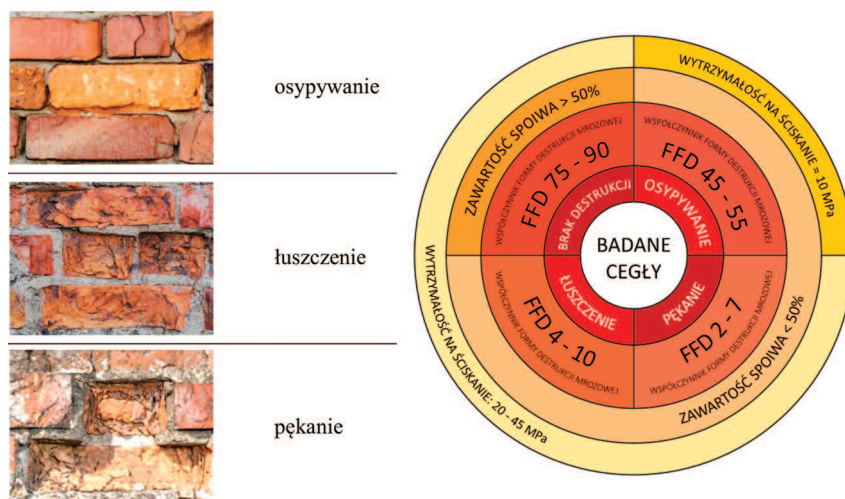
Destrukcja mrozowa

Kolejną przyczyną niszczenia murów niezabezpieczonych przed działaniem wody, szczególnie w obiektach historycznych, jest zamarzanie wody znajdującej się w porach materiałów. Czynniki, które determinują mrozoodporność cegieł, są znane i często opisywane w literaturze. Są to przede wszystkim wy-

trzymałość na rozciąganie [9 ÷ 10], skład fazowy cegły wypalanej i stopień zeszklenia tekstury [11], przepuszczalność, która umożliwia i warunkuje swobodny ruch wody w materiale porowatym bez zniszczenia tekstury oraz porowatość i struktura porowatości [9 ÷ 12]. Natomiast **mało rozpoznanym zagadnieniem jest forma destrukcji mrozowej cegieł**. Jak zaobserwowano, w wyniku cyklicznego zamrażania i rozmrażania cegły ulegają różnym formom zniszczenia. Może to być osypywanie, łuszczenie lub pęknięcie. Osypywanie cegły prowadzi do powstania drobnego pyłu ceramicznego, który systematycznie usuwa się samoczynnie z powierzchni materiału. Proces niszczenia rozpoczyna się na powierzchni i stopniowo postępuje w głąb. Drugą formą niszczenia, postępującą również od powierzchni, jest łuszczenie. W tym przypadku na powierzchni tworzą się niestabilne warstwy, które w miarę upływu czasu odpadają się i odpadają. Z kolei pęknięcie związane jest z powstawaniem ostrych kawałków o wielkości od kilku do kilkunastu mm. Proces ten przebiega nie tylko na powierzchni, ale obejmuje również głębsze warstwy. W zależności od struktury porowatości, składu mineralnego oraz przestrzennego ułożenia składników tekstury, cegły ulegają zniszczeniu przez osypywanie, łuszczenie oraz pęknięcie [13]. Na rysunku 2 przedstawiono współzależność cech materiałowych (struktury porowatości FFD,

składu mineralnego i fazowego, wytrzymałości) wpływających na formę destrukcji mrozowej badanych cegieł.

Wydaje się, że **najważniejszym parametrem mającym wpływ na formę destrukcji mrozowej jest struktura porowatości**. Zaobserwowano wyraźną korelację formy destrukcji mrozowej w zależności od zawartości porów o średnicy 3 – 10 μm do sumarycznej zawartości porów o średnicy 0 – 10 μm . Tę zależność określono jako **współczynnik formy destrukcji mrozowej FFD** (ang. *form of frost damage*) [13]. W przypadku próbek bez oznak destrukcji mrozowej współczynnik ten wynosi 75 – 90, natomiast próbki łuszczące się mają współczynnik FFD 4 – 10, pękające 2 – 7, a osypujące 45 – 50. **Drugim, istotnym czynnikiem mającym wpływ na formę destrukcji mrozowej jest skład mineralny i fazowy cegieł oraz przestrzenne rozmieszczenie elementów tekstury** (faz składowych, tj. spoiwa i ziaren). W ceglach, które uległy destrukcji mrozowej, udział spoiwa (osnowy) wynosi ok. 40%, natomiast w ceglach bez oznak zniszczenia 50% i więcej. Brak odpowiedniej objętości osnowy może być przyczyną osłabienia tekstury materiału, słabego zakotwienia ziaren i złego otulenia, co w konsekwencji czyni materiał bardziej podatnym na destrukcję mrozową. Kolejnym, pokazanym na rysunku 2, parametrem charakteryzującym badane cegły jest **wytrzymałość na ściskanie**. Próbkki bez



Rys. 2. Formy destrukcji mrozowej cegieł oraz graficzna ilustracja czynników kształtujących formę destrukcji mrozowej [13]

Fig. 2. Forms of frost destruction of bricks and graphic illustration of factors shaping the form of frost destruction [13]

oznak destrukcji mrozowej oraz charakteryzujące się łuszczeniem i pękaniem mają zbliżoną wytrzymałość na ściskanie, która wynosi 20 – 45 MPa. Nie zaobserwowano bezpośredniej zależności pomiędzy wytrzymałością a formą destrukcji mrozowej. Wyjątkiem są cegły osypujące się, które charakteryzują się wytrzymałością na poziomie 10 – 15 MPa. Można zatem wnioskować, że występowanie tej formy destrukcji mrozowej jest warunkowane niską wytrzymałością cegieł, nieprzekraczającą 20 MPa.

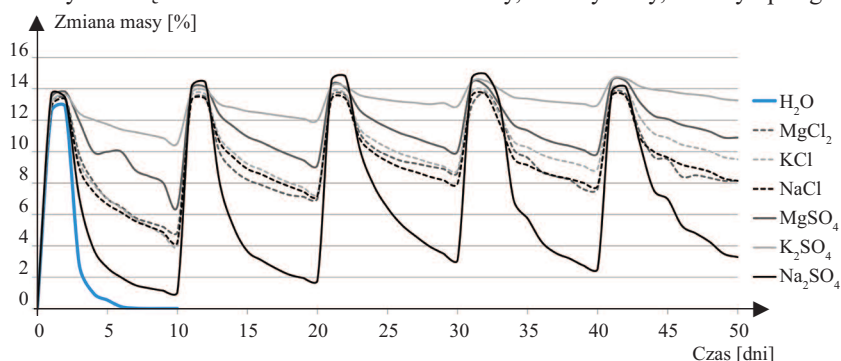
Zasolenie

Zasolenie obiektów murowanych jest częstą przyczyną ich stopniowej degradacji [14, 15]. Ze względu na pochodzenie można wyróżnić sole pierwotne, wynikające ze składu samych surowców i procesu produkcji oraz sole wtórne pochodzące ze środowiska zewnętrznego, np. sole pochodzące z gruntów, z zanieczyszczonego powietrza, z bryzy i mgły morskiej, ze środków odładzających, z kwaśnych deszczy, będące wynikiem biologicznego metabolizmu oraz sole wprowadzone w strukturę muru z nowoczesnymi materiałami naprawczymi w czasie prac remontowych lub konserwatorskich. Dodatkowo **rodzaj soli może wskazywać na główną przyczynę zasolenia danego obiektu**, np. duże ilości chlorków i/lub azotanów świadczą o wilgoci pochodzącej z gruntu, a wysokie stężenie siarczanów wskazuje na wilgoć pochodzącą z kwaśnych deszczy. Z kolei azotany, azotyny oraz związki amonu mogą wskazywać na problemy z korozją biologiczną wywołaną mikroorganizmami.

Czynnikiem uaktywniającym negatywne działanie soli jest obecność wody w materiale, ponieważ w jej obecności rozpuszczają się i mogą być transportowane [16]. Następnie w sprzyjających warunkach krystalizują [5, 6]. Miejsce krystalizacji soli uzależnione jest od szybkości nasycania i szybkości suszenia. W warunkach o dużej wilgotności, kiedy szybkość parowania jest niewielka, strefa odparowywania może znajdować się blisko powierzchni lub nawet na powierzchni materiału. Powstałe na powierzchni wysolenia określane są jako **efflorescence**. Ich obecność nie ma szkodliwego wpływu na

trwałość materiału. Natomiast, kiedy szybkość parowania jest znacznie większa, strefa parowania pozostaje wewnątrz i sole krystalizują w porach materiału. Takie zjawisko jest określane jako **subflorescence**. Siła wywierana przez szybko krystalizujące sole jest bardzo duża i wystarcza do zniszczenia materiałów murowych nawet o dużej wytrzymałości [14, 16]. Wzrost kryształów powoduje rozluźnienie tekstury w całej objętości, a nie tylko w warstwach powierzchniowych. Jest to niebezpieczne, ponieważ powoduje destrukcję materiałów nie tylko na powierzchni, ale i wewnątrz.

Obecność soli również istotnie zmienia proces osuszania murów [5]. W zależności od rodzaju soli efektywność suszenia jest wyraźnie zróżnicowana. Na rysunku 3 przedstawiono krzywe suszenia i nasycania cegieł roztworami soli siarczanowych, chlorkowych i azotanowych o stężeniu 10%.



Rys. 3. Krzywe nasycania i suszenia cegieł w funkcji czasu [5]

Fig. 3. Curves of saturation and drying of bricks as a function of time [5]

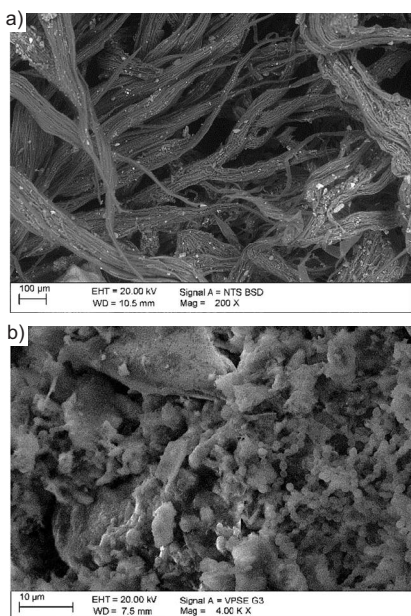
Cegły nasycano roztworami soli w cyklach obejmujących 2 dni nasycania przez podciąganie kapilarne i 8 dni suszenia w warunkach laboratoryjnych. W celu porównania, w analogiczny sposób wykonano cykl nasycania wodą destylowaną. Cegła nasycana wodą destylowaną traci całkowitą zawartość wody w procesie suszenia i jej wilgotność po zakończeniu każdego cyklu jest bliska zero. Natomiast zaobserwowano, że suszenie cegieł zawierających sole jest wyraźnie utrudnione i w zależności od rodzaju soli jest bardziej lub mniej efektywne. Najsilniej proces suszenia zostaje ograniczony w przypadku cegły nasycanej roztworem siarczanu potasu, a najslabiej nasycanej siarczanem sodu. Pozostałe sole chlorkowe oraz siarczan

magnezu mają porównywalny wpływ na proces suszenia cegły, przy czym wpływ soli chlorkowych jest niemalże identyczny, a więc nie zależy od kationu obecnego w roztworze.

Rozwój mikroorganizmów

Niszczenie obiektów murowych może być wynikiem oddziaływania czynników biologicznych, takich jak organizmy i mikroorganizmy żywe oraz produkty ich procesów życiowych. W grupie organizmów należy wymienić mszaki, porosty i glony, natomiast do grupy mikroorganizmów należą grzyby i bakterie (fotografia). Grupa organizmów powoduje przede wszystkim uszkodzenia mechaniczne będące wynikiem rozrostu korzeni i obrastania powierzchni. Często powodują one chwilowy lub trwały wzrost wilgotności podłoża. Ponadto niektóre z nich wytwarzają kwasy organiczne (kwas mlekowy, szczawiowy, bursztynowy, octowy i pirogro-

nowy), które mogą prowadzić do erozji i degradacji podłoża. Inaczej zachodzą procesy korozji biologicznej (mikrobiologiczna deterioracja) wywołanej przez mikroorganizmy, takie jak grzyby i bakterie, które powodują w przypadku podłoża organicznego jego rozkład na potrzeby żywieniowe mikroorganizmów. Natomiast w przypadku podłoża nieorganicznego proces degradacji następuje w wyniku oddziaływania wydzielonych produktów metabolizmu, które są przyczyną typowych procesów korozji m.in. chemicznej. Niszczenie materiałów pod wpływem działania organizmów i mikroorganizmów powoduje uszkodzenia mechaniczne, obrastanie powierzchni i chemiczną asymilację i dysymilację [17]. Skutki rozkładu bio-



Obraz SEM: a) mchów – powiększenie 200x; b) bakterii – powiększenie 4000x na podłożu ceramicznym

SEM image of: a) mosses, mag.200x; b) bacteria, mag. 4000x, on the ceramic substrate

logicznego [18] obejmują zmiany makroskopowe (przebarwienia, powierzchniowy rozwój organizmów, wżery, ubytki, kruchość, zniekształcenia, rozkład struktury), zmianę właściwości fizycznych (wzrost nasiąkliwości, pogorszenie wytrzymałości) oraz zmiany właściwości chemicznych (składu, zmiana odczynu) itp.

Do czynników, które determinują rozwój organizmów i mikroorganizmów, należy zaliczyć przede wszystkim dostępność wody. Grzyby, które stanowią grupę najważniejszych szkodników materiałów budowlanych, mogą rozwijać się już przy wilgotności względnej powietrza na poziomie ok. 60%, natomiast bakterie do rozwoju wymagają wilgotności względnej powietrza na poziomie powyżej 85% [19]. Ponadto ważny jest odczyn podłoża, klimat, obecność i dostępność substancji odżywczych oraz skład chemiczny podłoża. W przypadku materiałów mineralnych, takich jak kamień, cegła, zaprawa, beton, istotnym parametrem jest skład mineralogiczny, porowatość, rodzaj spoiwa i przepuszczalność względem wody [20]. Obecność niektórych soli w materiałach budowlanych może również sprzyjać rozwojowi bakterii halofilnych [21]. Analizując zagrożenie biologiczne organi-

zmami i mikroorganizmami, warto również zwrócić uwagę na odczyn zasiedlanego podłoża. Sprzyjające rozwojowi mikroorganizmów, tj. grzybów i bakterii, pH wynosi $5 \div 11$, ale są też bakterie kwasolubne zasiedlające podłoża o bardziej kwaśnym odczynie.

Podsumowanie

Oddziaływania zewnętrzne, które prowadzą do niszczenia obiektów, przenikają się nawzajem i potęgują. Czasami skutki jednego oddziaływania umożliwiają zainicjowanie rozwoju kolejnego, np. zmiana pH podłoża, którym jest cegła i zaprawa, umożliwia w wyniku korozji chemicznej rozwój biodeterioracji. Innym przykładem jest zamarzanie wody gruntowej, która powoduje ruch płytko posadowionych fundamentów, efektem czego jest deformacja ścian i obecność licznych rys i pęknięć. Na trwałość obiektu lub grupy obiektów ma zatem wpływ wiele wzajemnie przenikających się procesów. Czynnikiem łączącym wszystkie procesy korozyjne jest woda. Jej długotrwały kontakt z materiałem sam w sobie może stanowić zagrożenie, ponieważ pod jej wpływem zmiana ulega tekstura materiału, a w konsekwencji pogorszenie właściwości mechanicznych. Ponadto, jej obecność jest warunkiem koniecznym w procesie korozji chemicznej, w wyniku której powstają wysolenia typu efflorescence i subflorescence, skutkujące odpowiednio pogorszeniem estetyki i wytrzymałości materiału. Woda ma również priorytetowe znaczenie dla korozji biologicznej. Rozwój zarówno organizmów, jak i mikroorganizmów możliwy jest jedynie w środowisku wilgotnym.

Literatura

- [1] Ajdukiewicz A. Konstrukcje betonowe projektowane na okres użytkowania – badania a nowe ujęcie normatywne. Problemy naukowo-badawcze budownictwa, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej. Białystok; 2007.
- [2] Bijen J. Durability of engineering structures. Woodhead Publishing Ltd., Cambridge; 2003.
- [3] Broniewski T, Fiertak M. Metodologiczne problemy oceny trwałości materiałów budowlanych. II Konferencja Naukowo-Techniczna, Zagadnienia Materiałowe w Inżynierii Lądowej. MATBUD'98, Kraków-Mogilany; 1998.
- [4] Czarnecki L, Emmons PH. Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych. Wydawnictwo Polski Cement, Kraków; 2002.

[5] Stryzewska T. Czynniki determinujące trwałość murów ceglanych. Politechnika Krakowska; 2017.

[6] Matysek P, Witkowski M. Ocena wpływu wilgotności na wytrzymałość murów ceglanych. Materiały Budowlane. 2013; 5: 10 – 12.

[7] Matysek P, Stryzewska T, Kańka S, Witkowski M. The influence of water saturation on mechanical properties of ceramic bricks – tests on 19th-century and contemporary bricks. Mater. Construcc. 2016. <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2016.07315>.

[8] Stryzewska T, Kańka S. Influence of exposed in water on reduce compressive strength of brick with addition fly ash. Ochrona przed korozją. 2016; DOI: 10.15199/40.2016.6.3

[9] Maage M. Frost resistance and pore size distribution in bricks. Mater Constr/Mater Struct. 1984; 17 (101): 345 – 50.

[10] Perrin B, Vu a NA, Multon S, Voland T, Ducroquet C. Mechanical behaviour of fired clay materials subjected to freeze-thaw cycles. Construction and Building Materials. 2011; DOI: 10.1016/J. CONBUILDMAT. 2010.06.072.

[11] Elert K, Cultrone G, Carlos Navarro R, Pardo ES. Durability of bricks used in the conservation of historic buildings – influence of composition and microstructure. Journal of Cultural Heritage. 2003; [https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(03\)00020-7](https://doi.org/10.1016/S1296-2074(03)00020-7).

[12] Winslow D. Predicting the durability of paving bricks. JTEVA. 1991; DOI: 10.1520/JTE-12526J.

[13] Stryzewska T, Kańka S. Forms of damage of bricks subjected to cyclic freezing and thawing in actual conditions. Materials 2019; <https://doi.org/10.3390/ma12071165>.

[14] Yakovlev I, Gailys A. Salt corrosion of ceramic brick. Glas and Ceramic. 2005; DOI: 10.1007/S10717-005-0104-3.

[15] Foraboschi P, Vanin A. Experimental investigation on bricks from historical Venetian buildings subjected to moisture and salt crystallization. Eng Fail Anal. 2014; <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.06.019>

[16] Koronthalyova O, Bagel L. Moisture transport in salt free and salt contaminated ceramic brick. Energy Procedia 2015; DOI: 10.1016/J. EGYPRO. 2015.11.161.

[17] Morton LHG, Surman SB. Biofilms in Biodeterioration – a review, International Biodeterioration and Biodegradation. 1994; [https://doi.org/10.1016/0964-8305\(94\)90083-3](https://doi.org/10.1016/0964-8305(94)90083-3).

[18] Gaylarde CC, Morton LHG, Deteriogenic biofilms on buildings and their control: a review. Biofouling. 1999; DOI: 10.1080/08927019909378397.

[19] Zyska B. Zagrożenia biologiczne w budynku. Arkady; 1999.

[20] Cwalina B, Dzierżewicz Z. Czynniki sprzyjające biologicznej korozji konstrukcji żelbetonowych. Przegląd Budowlany. 2007; 7: 52 – 59.

[21] Adamiak J, Bonifay V, Otlewska A, Sunner J, Beech I, Stryzewska T, Kańka S, Oracz J, Żyżelewicz D, Gutarowska B. Untargeted metabolomics approach in halophiles: understanding the biodeterioration process of building materials. Frontiers in Microbiology. 2017; <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02448>.

Przyjęto do druku: 19.08.2022 r.