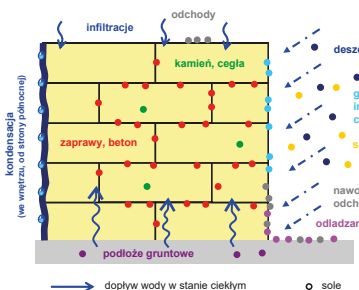


ODDZIAŁYWANIE SOLI NA ELEMENTY BUDYNKU

mgr inż. Franciszek Wołoch
 dr inż. Mariusz Gaczek
 mgr inż. Sławomir Fiszer
 Politechnika Poznańska

Sole mogą doprowadzać do zniszczenia zarówno murów ceglanych, jak i z kamienia naturalnego, wyrobów betonowych, tynków, powłok malarskich i innych elementów budynków, które często mają charakter zabytkowy. Występujące sole mogą być pochodzenia naturalnego, mogą być także efektem działalności człowieka [1]. Akumulacja soli w elementach budynku, a zwłaszcza w ścianach, spowodowana jest obecnością jonów pochodzących z materiałów skalnych oraz z wielu wyrobów wytwarzanych przez człowieka, jakie stosowane są w budownictwie. Jony w strukturze materiałów mogą pochodzić także ze środowiska naturalnego (mórz i oceanów, pustyń, gleby), antropogenicznych zanieczyszczeń atmosferycznych (wywołujących np. smog, kwaśne deszcze), usuwania oraz gromadzenia odchodów i nieczystości, nawożenia gruntów i ochrony roślin, odładzania dróg i ulic, procesów budowlanych i konserwatorskich, procesów metabolicznych organizmów [1], [2]. Główne źródła soli i wody przenoszącej sole pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Główne źródła wody i soli w budynkach [3]

Praktycznie wszystkie ściany zawierają sole rozpuszczalne w wodzie, które są albo rozproszone w materiałach porowatych, albo skoncentrowane lokalnie. Sole te mogą występować w postaci wykwitów (eflorescencji) tworzących na powierzchni rozmaite skupiska kryształów o różnych formach i pokroju, subflo-

Uszkodzenia elementów budynku spowodowane solami mogą mieć różny charakter, w zależności od cech materiałów budowlanych, rodzaju soli i miejsca ich krystalizacji albo rozpuszczania, panujących warunków zewnętrznych, przebiegu procesów fizykochemicznych.

scencji tworzących agregaty krystaliczne pod powierzchnią, jak i substancji rozpuszczonych w roztworach wodnych znajdujących się na i w ścianach [2].

Mechanizmy szkodliwego działania soli

Wyróżnia się kilka mechanizmów mogących w różnym stopniu wpływać na uszkodzenia materiałów budowlanych spowodowane solami. Należą do nich [4]:

- ciśnienie krystalizacji, do którego zalicza się: hydrostatyczne ciśnienie krystalizacji, ciśnie-

- nie hydratacji (często wyodrębniane jako oddzielny proces), ciśnienie liniowego wzrostu,
 - reakcje rozpuszczania,
 - reakcje strącania,
 - rozciąganie w wyniku zmian wilgotności,
 - ciśnienie osmotyczne,
 - efekty dynamiczno-synergiczne,
 - efekty chemomechaniczne,
 - korozja naprężeniowa,
- a także [2]:
- rozszerzalność cieplna kryształów.
- Oddziaływania i skutki wystąpienia wymienionych mechanizmów podano w tablicy 1.

Mechanizm	Działanie i skutki
Ciśnienie krystalizacji • hydrostatyczne ciśnienie krystalizacji albo • ciśnienie hydratacji albo • ciśnienie liniowego wzrostu	Narastanie ciśnienia, gdy dalszy wzrost kryształów jest uniemożliwiony przez ścianki porów albo inne kryształy. Ciśnienie hydratacji oznacza ciśnienie powstające wskutek zwiększenia objętości podczas przechodzenia soli w fazy bardziej uwodnione. Ciśnienie liniowego wzrostu występuje zwłaszcza w przypadku kryształów igiełkowych albo słupkowych i jest powodowane przez ich wzrost w kierunku uprzywilejowanym pod względem krystalograficznym. Osłabienie wewnętrznych powiązań w materiale i osłabienie jego struktury w wyniku cyklicznego występowania ciśnienia krystalizacyjnego.
Reakcje rozpuszczania	Wypłukiwanie przez wodę rozpuszczalnych związków chemicznych [5] albo wpływ roztworu soli na rozpuszczalność składników materiałów budowlanych (efekt działania jonów własnych soli oraz obcych). Poluzowanie i osłabienie struktury materiałów lub uszkodzenie spoiwa.
Reakcje strącania	Wytrącanie substancji w rezultacie oddziaływania składników roztworu solnego z materiałem budowlanym, zazwyczaj w połączeniu ze zwiększeniem objętości tej substancji. Wzrost strukturalnego obciążenia materiału.
Rozciąganie w wyniku zmian wilgotności	Zmiana objętości materiału budowlanego w wyniku obecności soli higroskopijnych. Wystąpienie naprężeń rozciągających i osłabienie struktury materiału.
Ciśnienie osmotyczne	Ruch osmotyczny roztworów o mniejszym stężeniu do roztworów o stężeniu większym, które oddzielone są od siebie półprzepuszczalną membraną (jej rolę mogą odgrywać fazy koloidalne w obszarach międzykryształicznych). Zwiększenie objętości roztworów o wyższym stężeniu, a przez to pojawienie się ciśnienia.
Efekty dynamiczno-synergiczne	Pozostawanie, podczas wysychania roztworów soli, porowatych powłok, które przynajmniej punktowo pokrywają powierzchnie ścianek porów. Zmiana strukturalna w solach przy cyklicznych zmianach wilgotności i wystąpienie naprężeń ścinających osłabiających strukturę materiału.
Efekty chemomechaniczne	Zmiana potencjału zeta mineralnych materiałów budowlanych przez jony soli. Ponieważ potencjał zeta związany jest z właściwościami mechanicznymi materiału, zmiana potencjału będzie wpływać przykładowo na twardość, odporność na pękanie i zdolność przenoszenia sił.

Tablica 1. Wybrane mechanizmy i skutki szkodliwego oddziaływania soli na materiały i elementy budowlane [4]

Krystalizacja i hydratacja – główne przyczyny zniszczeń

Głównym skutkiem obecności w murze soli rozpuszczalnych są procesy krystalizacyjne oraz hydratacyjne. W bardzo dużym skrócie można powiedzieć, że powodują one przyrost objętości materiału znajdującego się w porach. Zjawisko to można porównać chociażby do zamkniętej butelki z wodą wystawionej na mroź. Aby zrozumieć negatywne działanie soli oraz istotę powstawania wykwitów oraz zniszczeń strukturalnych, należy przybliżyć pokrótce mechanizm krystalizacji.

Roztwór soli znajdujący się w porach materiału zwiększa swoją objętość i doprowadza do zniszczenia kamienia, betonu, cegły czy też zaprawy. W wielu przypadkach trudno stwierdzić, jaki dokładnie proces spowodował obserwowany efekt końcowy. Może to być liniowy wzrost kryształów, hydrostatyczne ciśnienie krystalizacyjne, ciśnienie hydratacji lub ciśnienie wywołane rozszerzalnością termiczną kryształów [5, 6], w powiązaniu z innymi mechanizmami niszczenia przedstawionymi w tabelicy 1.

W 1949 roku Correns sformułował możliwe do praktycznego wykorzystania równanie ciśnienia wzrostu kryształów, określając ilościowo wietrzenie solne na pustyni. Bazował on na regule Riecke'a, która mówi, że kryształy pod dużym ciśnieniem są łatwiej rozpuszczalne, niż przy małym ciśnieniu [7]. Zależność ta została opisana następującym równaniem:

$$P = \frac{RT}{V_s} \ln \frac{C}{C_s}$$

gdzie:

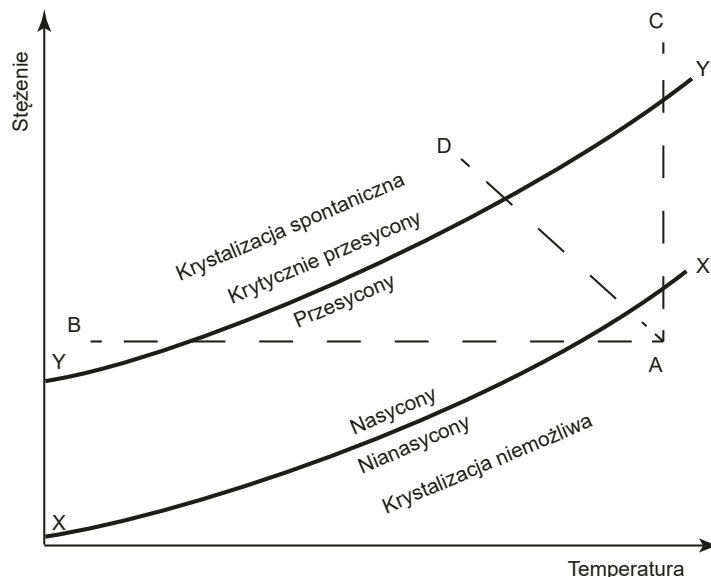
P – ciśnienie spowodowane wzrostem kryształów [atm];

R – stała gazowa [atm·dm³/(mol·K)];

T – temperatura [K];

V_s – molowa objętość soli [dm³/mol];

C/C_s – stosunek stężenia soli w stanie przesylenia do stężenia soli w stanie nasycenia.



Rys. 2. Wykres zależności stężenia roztworu od temperatury. Przesylenie można uzyskać następująco: poprzez przejście z A do B – wskutek samego chłodzenia; przejście z A do C – wskutek zwiększania stężenia; albo też przejście z A do D – wskutek kombinacji przejść z A do B i z A do C [6]

Na podstawie równania Corrensa możliwe jest wyznaczenie wartości obliczeniowych ciśnienia krystalizacji dla konkretnych soli, w zadanych temperaturach i stopniach przesylenia roztworu. W ten sposób można określić szkodliwość danej soli w odniesieniu do poszczególnych materiałów budowlanych.

Aby doszło do krystalizacji, niezbędny jest stan przesylenia. Na wykresie (rys. 2.) pokazana jest zależność temperatury T roztworu od stosunku stężeń roztworu C/C_s . Krystalizacja może wystąpić tylko między stanami nasycenia i przesylenia. Krystalizacja nie może wystąpić, jeśli roztwór nie jest nasycony. Na tym wykresie przedstawione są również trzy teoretyczne sytuacje, w których może dojść do krystalizacji soli. Podążając ścieżką od punktu A do punktu B, temperatura spada przy stałym stężeniu, na przykład

w czasie dobowego cyklu zmiany temperatury. Zostaje osiągnięte przesylenie, roztwór staje się niestabilny i może dojść do krystalizacji. Należy zwrócić uwagę, że przy wyższych stężeniach procesy krystalizacyjne będą przebiegać szybciej. Z kolei przy niższym stężeniu i przez to wolniejszym tempie krystalizacji powstające kryształy są większe. Rozpatrując odcinek pomiędzy punktami A i C, mamy do czynienia ze wzrostem stężenia przy stałej temperaturze, wywołanym na przykład odparowaniem wody z roztworu. Jest to proces odwracalny. Proces zobrazowany ścieżką pomiędzy punktami A i D jest kombinacją dwóch poprzednich, gdzie zarówno zmiana temperatury, jak i stężenia prowadzi do przesylenia roztworu, przy którym dochodzi do krystalizacji [6].

Hydratacja obok krystalizacji jest przyczyną zwiększania objętości soli. Polega ona na przyłączaniu cząsteczek wody przez kryształy soli, które budują sole uwodnione [9]. Podstawowymi parametrami sterującymi procesem uwodnienia są wilgotność i temperatura. Sole mogą być stabilne zarówno w stanie bezwodnym, jak i uwodnionym, w zależności od temperatury i wilgotności. Wzrost wilgotności i spadek temperatury powoduje uwodnienie kryształów, czyli hydratację, zaś spadek wilgotności względnej lub wzrost temperatury powoduje proces odwrotny, nazywany dehydratacją [10]. Należy zauważyć, że część soli posiada zdolność do hydratacji, jak np. siarczan sodu czy węglan sodu, inne zaś, jak np. chlorek sodu, nie posiadają takiej zdolności [11].

Procesowi hydratacji towarzyszy zwiększenie objętości soli, które pociąga za sobą wystąpienie ciśnienia hydratacyjnego. Może to być istotną przyczyną zniszczeń w strukturze elementów budowlanych.

Sól	Objętość molowa [cm ³ /mol]	Ciśnienie krystalizacyjne [MPa]			
		$C/C_s = 2$		$C/C_s = 10$	
		w 0°C	w 20°C	w 0°C	w 20°C
Anhydryt CaSO ₄	46	34,2	36,7	113,6	121,9
Gips CaSO ₄ · 2H ₂ O	54	29,1	31,3	96,8	103,9
Halit NaCl	28	56,5	60,6	187,7	201,4
Tenardyt Na ₂ SO ₄	53	29,7	31,9	98,6	105,8
Mirabilit Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	220	7,2	7,7	23,8	25,5
Epsomit MgSO ₄ · 7H ₂ O	147	10,7	11,5	35,6	38,2
Siedmiohydrat [heptahydrat] węglanu sodu Na ₂ CO ₃ · 7H ₂ O	154	10,2	11,0	34,0	36,4
Heksaohydrat MgSO ₄ · 6H ₂ O	130	12,1	13,0	30,2	43,1
Kizeryt MgSO ₄ · H ₂ O	57	27,6	29,6	91,7	98,4
Natron [Natrij] Na ₂ CO ₃ · 10H ₂ O	199	7,9	8,5	26,3	28,2
Termonatryt Na ₂ CO ₃ · H ₂ O	55	28,6	30,7	95,0	102,0

Tablica 2. Wartości obliczeniowe ciśnienia krystalizacyjnego wybranych soli, na podstawie [5], [8]

Sól pierwotna	Sól hydratyzowana	Zwiększenie objętości [%]
CaCl ₂ · 2H ₂ O	CaCl ₂ · 4H ₂ O	35
CaCl ₂ · 4H ₂ O	CaCl ₂ · 6H ₂ O	24
MgSO ₄ · H ₂ O	MgSO ₄ · 6H ₂ O	145
MgSO ₄ · 6H ₂ O	MgSO ₄ · 7H ₂ O	11
Na ₂ CO ₃ · H ₂ O	Na ₂ CO ₃ · 10H ₂ O	148
Na ₂ SO ₄	Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	311
C ₃ AlH ₆ + 3CaSO ₄	3CaO · Al ₂ O ₃ · 3CaSO ₄ · 32H ₂ O	227

Tablica 3. Zwiększenie objętości soli krystalizujących z wodą krystaliczną [12]

Ciśnienie hydratacyjne bywa opisywane różnymi zależnościami. Jedną z nich, wg [6], podano poniżej:

$$P = \frac{nRT}{V_h - V_a} 2,3 \log \frac{P_w}{P_w'}$$

gdzie:

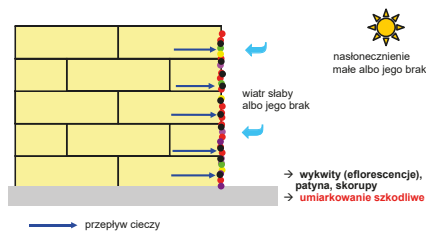
- P – ciśnienie hydratacji [atm],
- n – liczba moli wody uzyskanej podczas hydratacji,
- R – stała gazowa [atm·ml/(mol·K)],
- T – temperatura bezwzględna [K],
- V_h – objętość hydratu [cm³/(g·mol)],
- V_a – objętość soli pierwotnej przed hydratacją [cm³/(g·mol)],
- P_w – ciśnienie pary wodnej [mm Hg] w danej temperaturze,
- P_w' – ciśnienie pary uwodnionej soli [mm Hg] w danej temperaturze.

Istotne informacje w określaniu ogółu destrukcyjnych efektów powodowanych przez poszczególne rodzaje soli dostarcza przebieg hydratacji. Dla przykładu hydratacja siarczanu sodu siedmiowodnego do dziesięciowodnego może powtórzyć się kilka razy w ciągu jednego dnia. Fakt ten został odkryty w 1965 roku przez Wellmana i Wilsona [11]. O poziomie destrukcyjności danej soli decyduje również tempo hydratacji. Okazuje się bowiem, że substancje mniej „agresywne” w laboratorium, poddane procesom hydratacji przebiegających w warunkach terenowych z dużą prędkością, powodują o wiele większe zniszczenia.

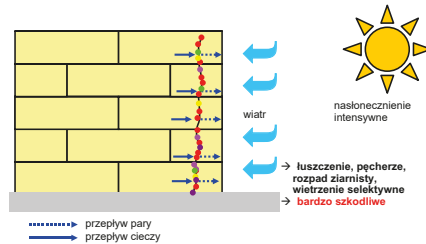
Skutki krystalizacji soli

Efektom krystalizacji soli rozpuszczalnych w wodzie są zjawiska powierzchniowe oraz podpowierzchniowe. Pierwsze z nich określa się mianem wykwitów i optycznie mogą być mylone z przebarwieniami. Drugi typ ma charakter zniszczeń strukturalnych i zachodzi pod powierzchnią muru, osłabiając materiał budowlany. O typie występującego zjawiska może decydować szybkość wysychania obciążonego solami elementu (rys. 3 i 4).

Wykwity solne mają w większości przypadków postać białych, cienkich, niemal mglistych nalotów soli na powierzchni porowatego materiału budowlanego. Często pojawiają się na muryowanych fasadach, wykonanych z cegły, bloczków betonowych lub kamiennych. W zależności od intensywności wykwitów przybierają jednak różne kolory i umacniają się na powierzchni materiału lub elewacji, tworząc jedną całość [13].

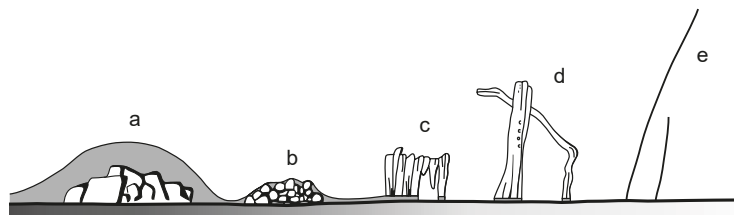


Rys. 3. Przemiany i migracja wody i soli w przypadku powolnego wysychania [3]



Rys. 4. Przemiany i migracja wody i soli w przypadku szybkiego wysychania [3]

Znane są przypadki, kiedy wykwitki pojawiają się bezpośrednio po wzniesieniu danej partii budynku. W wielu sytuacjach pojawiają się one kilka, a nawet kilkaset lat po wzniesieniu obiektu. Zawsze powstanie wykwitów rodzi pytania o przyczyny i sposoby zabezpieczenia budynku przed negatywnym działaniem soli. Najczęściej wykwitki uważa się jedynie za problem natury estetycznej. Zjawisko może mieć jednak szerszy zakres i prowadzić do złożeń krystalizacyjnych blisko powierzchni, mogących być przyczyną poważniejszych zniszczeń natury strukturalnej, wśród których wymienia się luszczanie, rozpad ziarnisty, wietrzenie selektywne.



Rys. 5. Związek pomiędzy morfologią kryształów a wilgotnością podłoża z materiału porowatego [2]
 (a) Duże kryształy, wykazujące się charakterystycznymi postaciami równowagowymi, wyrastają całkowicie zanurzone w warstewce roztworu na mokrym podłożu.
 (b) Ziaźnista skorupa utworzona z mniejszych i izometrycznych kryształów wyrasta na mokrym podłożu. Kryształy są ledwo przykryte warstewką roztworu.
 (c) Włóknista skorupa wyrasta w otaczającym powietrzu z powierzchni podłoża pokrytego cienką warstewką roztworu.
 (d) Słupkowe oraz grube nitkowe kryształy wyrastają z lekko wilgotnego podłoża; warstewka roztworu nadal tworzy małe punkty na powierzchni podłoża.
 (e) Bardzo cienkie nitkowe kryształy (wąsy) wyrastają w otaczającym powietrzu z niemal suchej powierzchni z ograniczonymi miejscowo zasobami roztworu.

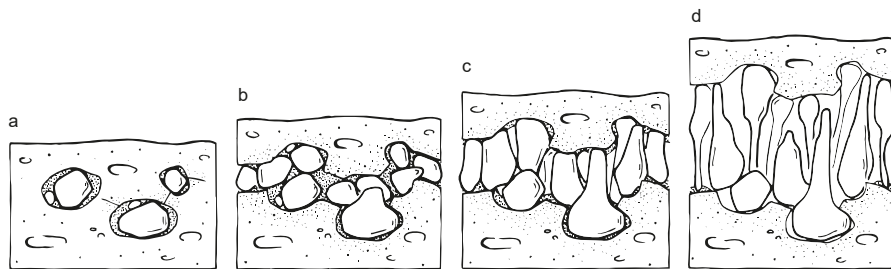
Wykwity mogą czasami zakrywać pęknięcia o charakterze konstrukcyjnym, np. w ścianach fundamentowych, w ścianach oporowych; nie są zatem czynnikiem sprzyjającym w zakresie monitorowania stanu budowli [14].

Innym negatywnym skutkiem wykwitów jest potencjalne zagrożenie dla zdrowia. Chociaż zasadniczo wykryształizowane sole nie stanowią bezpośredniego zagrożenia dla ludzi, to mogą występować łagodne podrażnienia przy wdychaniu czy kontakcie z oczami. Dlatego też w styczności z wykryształizowanymi solami należy zachować ostrożność i zdrowy rozsądek. Sole nierzadko powstają wskutek działania czynników pochodzenia przemysłowego, przez co nigdy nie można wykluczyć ich bardziej szkodliwego działania na człowieka. Z pewnością jednak większym zagrożeniem od wykwitów mogą być środki służące do ich usuwania [15].

Jeśli się rozpatruje powstawanie wykwitów solnych w sensie chemicznym, jest to zjawisko dotyczące krystalizacji i hydratacji, przeważnie siarczanów lub węglanów sodu, wapnia i potasu, rzadziej magnezu. Wyróżnia się następujące typy wykwitów ze względu na ich genezę: opóźnione wykwitki gipsu na murze ceglany, wczesne wykwitki siarczanów na murze ceglany, wykwitki związków wapnia na murze, wykwitki siarczanów na blokach betonowych oraz wykwitki związków wapnia na podłożu betonowym [13]. Bez względu jednak na genezę, aby doszło do pojawienia się wykwitów, muszą zostać spełnione jednocześnie trzy warunki [16]:

- w ścianie muszą być obecne sole rozpuszczalne,
- musi zostać doprowadzona dostateczna ilość wilgoci potrzebna do transportu soli na powierzchnię,
- musi istnieć ścieżka umożliwiająca transport soli na powierzchnię ściany i ich powierzchniową krystalizację.

Krystalizacja powierzchniowa może mieć różne formy. Zależą one zarówno od wieku wykwitki jak i składu chemicznego. Wpływ mają również warunki samej krystalizacji, np. wilgotność podłoża (rys. 5.). Przy większej jego wilgotności dochodzić może do rekrystalizacji, która



Rys. 6. Model niszczącego działania soli [2]

prowadzi do powstawania bardziej trwałych form, takich jak skorupy ewoluujące z bardziej luźnych postaci wykwitów [2].

Uwarunkowania dotyczące krystalizacji podpowierzchniowej są podobne jak dla wykwitów. Istotną różnicą jest jednak to, że skutki zniszczeń mogą być o wiele bardziej inwazyjne. Angielska nazwa zjawiska: *subflorescence*, *crypto efflorescence* albo *cryptoflorescence* wskazują, że ma ono charakter wykwitów, ale powstających pod powierzchnią muru, w porach materiału [17]. Kryptowykwity mogą być zatem etapem zniszczenia konstrukcji murewej, który następuje wskutek zignorowania pojawiających się wcześniej wykwitów i doprowadza do znaczącej dezintegracji muru, odspojenia lica cegiel czy też znaczących jego ubytków. Zniszczeniom strukturalnym ulegają z reguły budynki zabytkowe, szczególnie te starożytne. Za przykład może tu służyć kompleks Angkor Wat w Kambodży, doprowadzony do ruiny przez odchody nietoperzy [18] czy Ozyrejon w Abydos, w Egipcie, zniszczony przez zasoloną wodę [19].

Model niszczących procesów krystalizacji soli w materiale porowatym (rys. 6.) oparty jest na obserwacjach krystalizacji azotanu sodowego oraz innych soli na silnie porowatej (30%) ceramice i tynkach wapiennych pokrytych malowidłami freskowymi. Model ten ma zastosowanie we wszystkich materiałach średnioporowatych, dla większości rodzajów soli, chociaż niektóre mogą wykazywać odmienne zachowanie [2].

W pierwszej fazie (rys. 6a) krysztaly soli tworzą się głównie w porach o średnicy 1–10 μm. Mniejsze pory, jak również większe pustki, pozostają przeważnie niewypełnione. Przypuszczalnie wynika to z rozkładu roztworu, ponieważ obliczono na podstawie procesu wysychania materiału porowatego, że woda najpierw wyparowuje z dużych pustek, skąd wycofuje się następnie do mniejszych. Można założyć, że pory w tej fazie w danym miejscu wypełnione są w znacznym stopniu roztworem w stanie nasyconym albo przesyconym.

W drugiej fazie (rys. 6b) krysztaly przekroczyły już rozmiary porów i nakładają się na sąsiednie. Sól obecnie tworzy skupiska zbite, przypominające szklivo (przynajmniej w przypadku azotanu sodowego). Ze względu na to, że rozmiary krysztalu są większe od porów, można założyć, że na ścianki porów działają znaczne naciski, których efektem jest naprężenie

nie rozciągające prostopadle do zewnętrznej powierzchni materiału. W rezultacie siła ta niszczy strukturę materiału, przeważnie wskutek powstawania rys równoległych do zewnętrznej powierzchni wzdłuż strefy, gdzie pory wypełnione krysztalami soli usytuowane są blisko siebie, a w szczególności tam, gdzie spójność materiału jest mniejsza, np. w miejscach nieciągłości, takich jak powierzchnia graniczna między materiałem a powłoką farby, występujące wtrącenia materiałowe, istniejące wcześniej rysy itp.

W trzeciej fazie (rys. 6c) krystalizacja skoncentrowana jest w rysach, ponieważ parowanie jest przyspieszone wzdłuż otwartej i poszerzającej się struktury. Dopóki krysztaly są całkowicie pokryte docierającym roztworem, dopóty rosną one nadal izometrycznie. Krysztaly rozrastające się u swych podstaw wywierają na ściany rysy siłę dostatecznie dużą, aby poszerzać tę rysę.

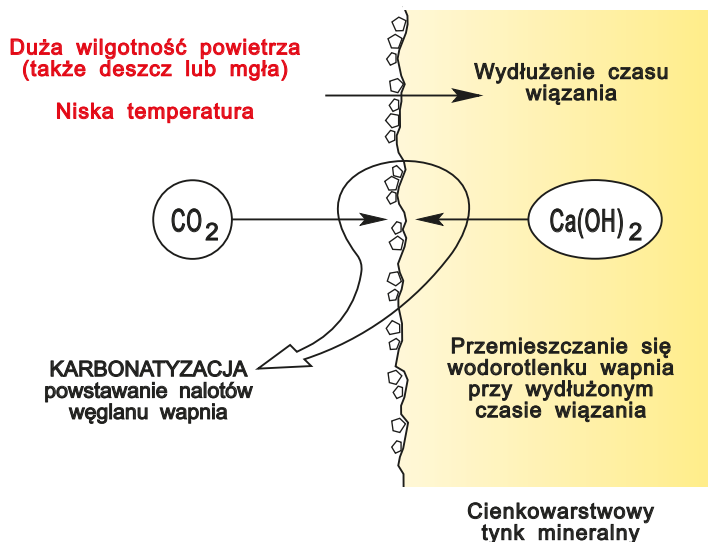
W czwartej fazie (rys. 6d), w miarę jak rysy się rozszerzają, a roztwór się wycofuje, zmniejszają się coraz bardziej obszary kontaktu krysztalów z roztworem. W rezultacie słupkowy wzrost krysztalu przechodzi we wzrost nitkowy, krysztal staje się coraz cieńszy, w miarę jak zasoby roztworu się zmniejszają, a podłoże wysycha. Nitki (wąsy) rosną tak długo, dopóki ich czubki wzrostu pozostają w kontakcie z roztworem. Nitki te są w stanie podnosić odłamki, warstwy farby oraz skorupy [2].

Przebarwienia

Przebarwienia w odróżnieniu od wykwitów nie są skutkiem procesów krystalizacyjnych lub hydratacyjnych. Różnią się one genezą i ich rozpoznanie jest kluczowym krokiem do dobru skutecznego rozwiązania naprawczych.

Naloty wapienne na ścianach to złogi węgla wapnia, mające postać białych nacieków. Występują miejscowo i sprawiają wrażenie, jakby spływały w dół. Powstają one w pobliżu pęknięć lub małych otworów na powierzchni muru. Przyczyną jest wypłukiwanie związków wapnia przez wodę, która wędruje na powierzchnię muru. Tam roztwór, reagując z dwutlenkiem węgla, tworzy twarde skorupy węgla wapnia. W swojej istocie proces ten jest zbliżony do formowania stalaktytów w jaskiniach. Przyczyną nie jest zatem wapno znajdujące się w zaprawie, ale woda, która je wypłukuje. Co więcej, wapno w zaprawie ogranicza proces, ponieważ pełni funkcję uszczelniającą.

Podobny przebieg ma tworzenie się przebarwień na mineralnych, pocienionych wyprawach tynkarskich. Powłoki te, wykonane z zapraw barwionych w masie, są ze względu na obecność w nich związków wapnia wrażliwe na zawilgocenie bezpośrednie (deszcz, mżawka, osiadająca mgła) lub pośrednie (wysoka wilgotność powietrza – powyżej 80%) w początkowym okresie po ich ułożeniu na ścianie. Okres ten, w zależności od warunków atmosferycznych, może trwać od 2, 3 dni (przy temperaturze otoczenia 20°C i wilgotności powietrza 50%) do tygodnia, a nawet dłużej (przy obniżonej temperaturze albo podwyższonej wilgotności powietrza). Te niekorzystne wpływy mogą spowodować lokalne zmiany stężenia pigmentu w świeżo nałożonej wyprawie oraz sprzyjać powstawaniu szarobiałych nalotów z węgla wapniowego na skutek łączenia się niezwiązanego wodorotlenku wapniowego i dwutlenku węgla z atmosfery (rys. 7). Zjawisko to jest naturalną cechą wypraw mineralnych, pogarsza-



Rys. 7. Mechanizm tworzenia się nalotów węgla wapnia na wewnętrznej powierzchni cienkowarstwowego tynku mineralnego [20]



Fot. 1–3. Przykłady występowania nalotów solnych na powierzchni mineralnego tynku cienkowarstwowego (fot. Bartosz Polaczyk)



jącą w znaczącym stopniu estetykę elewacji (fot. 1–3), o ile nie zastosuje się odpowiedniego środka zapobiegawczego. Nierozpuszczalny węgiel wapniowy, wychwytyjąc w dalszym ciągu dwutlenek węgla i parę wodną z atmosfery, przekształca się co prawda w rozpuszczalny kwaśny dwuwęgiel wapniowy, który z czasem (1–2 lata) może zostać całkowicie splukany z elewacji przez wodę opadową, ale dotyczy to oczywiście wypraw na elewacjach wystawionych na równomierne działanie opadów atmosferycznych.

Białe lub szare przebarwienia w postaci kożuchów to naloty krzemianowe. Przebarwienia te mogą być obecne na całej powierzchni muru lub mogą ograniczać się do mniejszych obszarów o nieregularnym kształcie. Naloty mogą również przylegać do elementów wykończenia, takich jak prefabrykaty betonowe czy też duże połączenia szklane. Przyczyną ich powstawania jest z reguły czyszczenie powierzchni muru ceglano-kwasem solnym lub niedostatecznym zwilżaniem albo splukiwaniem podczas czyszczenia.

Na cegle czerwonej, piaskowej lub białej mogą występować plamy koloru zielonego lub żółtego. Pojawiają się zazwyczaj po kontakcie z wodą lub kwasem solnym. Przebarwienia tego typu są z reguły osadem soli wanadu. Pochodzą one z surowców użytych do produkcji cegieł. To właśnie sole wanadu, składające się z siarczanów i chlorków lub ich hydratów, są koloru zielonego lub żółtego.

Plamy wanadu występują w sposób podobny do wykwitów soli, z tym że tlenek wanadu i siarczany rozpuszczają się i tworzą roztwór, który może być bardzo kwaśny. Po wyparowaniu wody sole wanadu tworzą osad na powierzchni muru. Chlorkowe sole wanadu, jak np. chlorek wanadyliu, mogą powstawać na skutek stosowania kwasu solnego lub nadmiernej ekspozycji na wilgoć.

Zapobieganie nalotom wanadowym jest o tyle ważne, że są one trudne do usunięcia, a niewłaściwie przeprowadzone działania czyszczące mogą prowadzić do powstania nierozpuszczalnego osadu o kolorze brązowym.

W pewnych warunkach w spoinach murów ceglanych mogą pojawiać się ciemnobrunatne, brązowe lub rzadziej szare przebarwienia. Czasem te brązowe przebarwienia mogą „rozchodzić się” w dół, po powierzchni cegły. Ten typ przebarwień jest skutkiem obecności tlenu magnezu, stosowanego jako barwnik w ce-

glach o kolorze brązowym, czarnym lub szarym i jego reakcji z kwasem.

W procesie wypalania cegły manganowe składniki koloryzujące przechodzą określone zmiany chemiczne, które doprowadzają do tego, iż składniki te stają się nierozpuszczalne w wodzie. Są one jednak w różnym stopniu rozpuszczalne w słabych kwasach. Po rozpuszczeniu takie związki mogą migrować ku powierzchni muru. Dzieje się tak przy zastosowaniu kwasu solnego do czyszczenia muru [21].

Negatywne oddziaływanie soli może przejawiać się nie tylko wykwitami, przebarwieniami czy zniszczeniami strukturalnymi. Sole, które krystalizują, czy to na powierzchni, czy to w porach materiału, mają często właściwości higroskopijne, co prowadzi do podwyższenia wilgotności muru. Może to z kolei stwarzać korzystniejsze warunki do rozwoju pleśni i grzybów [22], a także przyczyniać się do obniżenia właściwości termicznych przegrody [23]. Ponadto przewodność cieplną materiałów mogą zwiększać sole wykrystalizowane w porach, wpływając na zwiększenie strat ciepła z pomieszczeń [24]. Wśród innych zagrożeń można też wymienić obniżenie wytrzymałości muru, zarówno na skutek jego podwyższonej wilgotności, jak i korozji naprężeniowej w wyniku występowania krystalizacji podpowierzchniowej wewnątrz porów materiału [23].

Właściwa diagnoza i zapobieganie działaniu soli na budynek jest zatem ważne nie tylko ze względów estetycznych, ale też w dalszej perspektywie ze względów bezpieczeństwa budowlanego. Bieżąca konserwacja i reagowanie na pojawiające się symptomy krystalizacji soli są najlepszym sposobem na uniknięcie poważnych uszkodzeń spowodowanych przez sole w dłuższym czasie.

Bibliografia

[1] Woloch F., Gaczek M., Źródła soli w murach i tynkach budynków. „Builder”, 10/2016, 90–93.
 [2] Arnold A., Zehnder K., Monitoring Wall Paintings Affected by Soluble Salts. The Conservation of Wall Paintings: Proceedings of a symposium organized by the Courtauld Institute of Art and the Getty Conservation Institute, London, July 13–16, 1987, red. S. Cather.
 [3] Rousset B., Lecture: The soluble salts in the built heritage. Conservation Science Consulting Sàrl, <http://www.csc-sarl.ch/> (dostęp: 20.10.2017).
 [4] Rauch P., Schadensmechanismen von Mauersalzen – Kristallisationsdruck u. a., <http://www.ib-rauch.de/Beratung/salz-1.html> (dostęp: 20.10.2017).
 [5] Frössel F., Osuszanie murów i renowacja piwnic. Wydawnictwo Polcen, Warszawa, 2007.

[6] Winkler E. M., Stone in Architecture: properties, durability. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1997.
 [7] Encyclopædia Britannica, Rieckes' principle, <https://www.britannica.com/science/Rieckes-Principle> (dostęp: 20.10.2017).
 [8] Baufeuchtigkeit prüfen und beheben. Verfahrenstechniken. ILS NRW Ratgeber 6, Institut für Landes- und Stadtentwicklungsforschung und Bauwesen des Landes Nordrhein-Westfalen (ILS NRW).
 [9] Scherer G.W., Crystallization in pores, „Cement Concr. Res.”, 29 (1999), 1347–1358.
 [10] Espinosa R. M., Franke L., Deckelmann G., Phase changes of salts in porous materials: Crystallization, hydration and deliquescence, „Construction and Building Materials”, 22 (2008), 1758–1773.
 [11] Obika B., Freer-Hewish R. J., Newell D., Physico-chemical aspects of soluble salt damage of thin bituminous surfacing. Pre-Conference Proceedings of International Conference on the Implications of Ground Chemistry and Microbiology for Construction, University of Bristol, 29 June – 1 July 1992.
 [12] Nawrot W., Osuszanie budowli: teoria i praktyka. Agencja Informacyjno-Promocyjna „Raport”, Kraków, 2009.
 [13] Brocken H., Nijland T. G., White efflorescence on brick masonry and concrete masonry blocks, with special emphasis on sulfate efflorescence on concrete blocks. „Construction and Building Materials”, 18 (2004), 315–323.
 [14] Efflorescence, ASPEC Residential Services, LLC, www.aspecresidential.com/uploads/Efflorescence.pdf (dostęp: 20.10.2017).
 [15] Efflorescence, Fact sheet 55-022-0211, U.S. Army Public Health Command (Provisional) Industrial Hygiene Field Services (USAPHC), <https://phc.amedd.army.mil/PHC%20Resource%20Library/Efflorescence%20FS%20Feb%2011.pdf> (dostęp: 20.10.2017).
 [16] Efflorescence: Cause and Control. Masonry Institute of America.
 [17] Derlyun H., Salt transport and crystallization in porous limestone: Neutron – X-ray imaging and poromechanical modeling. Doctoral Thesis, Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, Nr. 20673, 2012.
 [18] Siedel H., v. Pehle-Leisen E., Leisen H., Salt load and deterioration of sandstone at The Temple Of Angkor Wat, Cambodia. 11th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Torun, Poland 2008. Proceedings vol. 1, red. J.W. Łukaszewicz & P. Niemcewicz, 267–274.
 [19] El-Gohary M., Chemical deterioration of Egyptian limestone affected by saline water. „International Journal Of Conservation Science”, Vol. 2, Issue 1, 2011, 17–28.
 [20] Gaczek M., Fiszler S., Tynki. XVIII Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, Ustroń 2003. Nowe rozwiązania konstrukcyjno-materiałowo-technologiczne, budownictwo ogólne, t. III, 323–383.
 [21] Efflorescence – Causes and Prevention. BIA Technical Notes 23A, Brick Industry Association, Reston, 2006.
 [22] Mniszek W., Rogiński J., Wady konstrukcyjne przyczyną zagrzybienia pomieszczeń, „Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Zarządzania Ochroną Pracy w Katowicach”, 1(3)/2007, 31–44.
 [23] Hola J., Matkowski Z., Wybrane problemy dotyczące zabezpieczeń przeciwwilgociowych ścian w istniejących obiektach murowanych. XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna „Awarie Budowlane”, Szczecin-Międzyzdroje, 26-29 maja 2009, 73–92.
 [24] Wyrwał J., Wpływ soli na efektywną przewodność cieplną ścian budowli zabytkowych. „Roczniki Inżynierii Budowlanej”, zeszyt 9, Komisja Inżynierii Budowlanej, Oddział Polskiej Akademii Nauk w Katowicach, 2009.