

Deterioracja kamiennych obiektów budowlanych – główne czynniki i procesy

Michał Ruszkowski¹, Janina Wiszniewska²



M. Ruszkowski



J. Wiszniewska

Deterioration of stone buildings – main factors and processes. *Prz. Geol.*, 67: 703–709; doi: 10.7306/2019.40

A b s t r a c t. The condition of stone building objects is determined by many physicochemical factors and destructive processes. All stone materials are subject to natural aging, losing many of their primordial properties. The destructive processes and decline of the stone quality are termed the “deterioration” (Latin: deterior – worse). This definition is close to that of rock weathering. However, weathering and deterioration are two different concepts. Weathering is a large-scale process related to large rock masses located in a geological environment. By contrast, deterioration refers to processes destroying a stone material, which has already been treated with stonework. The most known field of research for the deterioration processes are all historical old monuments. It is assumed that the deterioration reaches such a depth as those

influenced by changes that take place on the stone object surface during the adsorption of solar radiation and deep penetration of oxygen and carbonated water, coming from infiltration of atmospheric precipitation or surface water. The most prominent factors of deterioration are caused by temperature changes, crystallization pressure of salts dissolved in water, gaseous pollutants and dust contained in the air, wind, hail and snow action, adsorption of acidic chemical substances, and dust particles, activity of microorganisms, fungi and lichens living on surfaces of monuments.

Keywords: deterioration, stony monuments, aerial and water corrosion, chemical corrosion, biodeterioration

Skały od wieków są symbolem trwałości, niezmienności i w wielu kulturach – niezniszczalności. Taka ich symbolika wynika z obserwacji przyrody. Pokolenia ludzkie przemijają, a skały pozostają w niezminionej formie, ale czy rzeczywiście ich stan jest niezmienny? Wszystkie materiały skalne podlegają naturalnemu starzeniu, tracąc wiele swoich właściwości, którymi charakteryzowały się zaraz po powstaniu. Intensywność procesów niszczących, wpływających na stan zachowania obiektów skalnych, zależy od wielu czynników fizykochemicznych i biologicznych.

Procesy niszczące i obniżające jakość materiałów określa się terminem *deterioracja* (łac. *deterior* – gorszy) (Labus, 2008). Najlepszym polem badań tych procesów są wszelkie zabytki. Definicja ta jest bliska definicji *wietrzenia* skał. Jednak wietrzenie i deterioracja to dwa różne pojęcia. Wietrzenie jest procesem wielkoskalowym, dotyczącym wielkich mas skalnych zlokalizowanych w środowisku geologicznym. Termin deterioracja odnosi się do procesów niszczących materiał skalny już poddany obróbce kamieniarskiej. Mniej znanym i rzadziej stosowanym pojęciem jest również *korozja* (ryc. 1). Określenie to powinno się stosować do pojedynczych elementów obiektów architektonicznych takich jak bloki. Przyjmuje się, że procesy deterioracji docierają na taką głębokość, jak głęboko sięgają wpływy zmian termicznych zachodzących na powierzchni obiektu podczas adsorpcji promieniowania słonecznego i tak głęboko, jak dociera nasycona tlenem i dwutlenkiem węgla woda, która pochodzi z infiltracji opadów atmosferycznych lub wód przypowierzchniowych.

Intensywność działania czynników destrukcyjnych jest ściśle związana z klimatem, w jakim dane obiekty się znajdują. W historii muzealnictwa odnotowano wiele przypadków przeniesienia antycznych zabytków z klimatu pus-

tynego lub śródziemnomorskiego do krajów północnej Europy, gdzie, w konsekwencji działania klimatu morskiego, bardzo szybko ulegały zniszczeniu (Wagner, 2009). Jak wykazują wieloletnie doświadczenia konserwatorskich zespołów badawczych, zajmujących się badaniami i reparacją uszkodzeń kamiennych obiektów zabytkowych, istnieje pięć głównych czynników prowadzących do niszczenia materiału skalnego. Są to (Ruszkowski, Wiszniewska, 2017):

- gwałtowne wahania temperatury,
- krystalizacyjne ciśnienie soli, wzrastające w strefach porowych, krystalizacja soli w przestrzeniach porowych,
- rozkład lub przemiany składników mineralnych skały przy udziale zanieczyszczeń gazowych i pyłów zawartych w powietrzu,
- erozja powierzchni kamiennych wskutek adsorpcji substancji chemicznych o odczynie kwaśnym, cząstek smolistych i pyłów, rozumianych jako zanieczyszczenia atmosferyczne,
- działanie mikroorganizmów, grzybów i porostów.

Na niszczenie skał stosowanych w architekturze i rzeźbie wpływają liczne czynniki, które mogą działać równocześnie, przyspieszając proces niszczenia skały. Niektóre z nich są związane z rodzajem skały i jej historią geologiczną, inne zaś zachodzą pod wpływem zmiennego środowiska lub są wywołane działalnością człowieka.

Szybkość i intensywność procesów deterioracji zależy od stopnia nasłonecznienia i wzrostu temperatury strefy przypowierzchniowej obiektu. Silne nasłonecznienie i rozgrzanie powierzchni powoduje bardzo nierównomierne i gwałtowne procesy rozszerzania się struktur krystalicznych wchodzących w skład skały. Takie gwałtowne zmiany mogą zwiększyć propagację naturalnych szczelin i przekształcić je w siatkę spękań. Równie niszczące mogą być

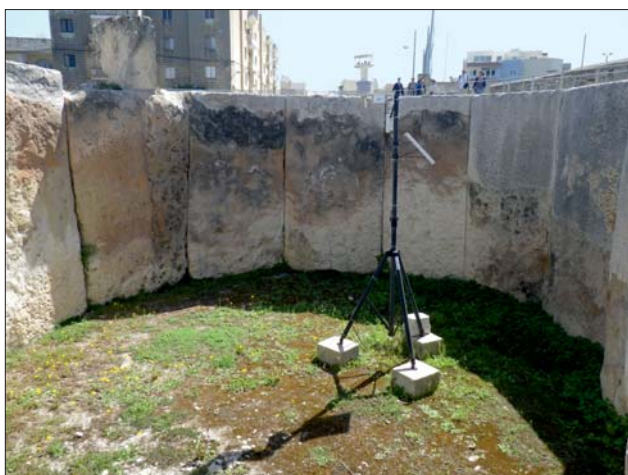
¹ Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; ruszkowskimichal@wp.pl

² Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; janina.wiszniewska@pgi.gov.pl



Ryc. 1. Proces deterioracji bloków i wietrzenia w klimacie morskim warstwowanej skały węglanowej, obudowanej murem z bloczków tej samej skały w Agrigento, Sycylia. Obudowany fragment skały ulega wietrzeniu, a ściana deterioracji. Fot. J. Wiszniewska

Fig. 1. The process of deterioration of blocks and weathering in a marine climate of layered limestone rock faced with a wall composed of small blocks of the same rock in Agrigento Sicily. The surrounded fragment of rock undergoes weathering whereas the wall is affected by deterioration. Photo by J. Wiszniewska



Ryc. 2. Świątynia Tarxien na Malcie – widoczny proces deterioracji termicznej i biologicznej. Wyraźne ślady łuszczenia wapienia globigerynowego u podstawy i pokrycia górnej części bloków porostami. Fot. M. Ruszkowski

Fig. 2. Tarxien temple of Malta – a visible process of thermal and biological deterioration. Distinct traces of Globigerine limestone scaling at the base and covering the top of blocks with lichens. Photo by M. Ruszkowski

znaczne wahania temperatury strefy przypowierzchniowej w wyniku jej zmian dobowych, nagrzewania i stygnięcia powierzchni skały. Tego typu zagrożenia są szczególnie niszczące w klimacie śródziemnomorskim (ryc. 2), natomiast w kontynentalnym – działanie mrozu powoduje rozpychanie szczelin i siatki porów przez zamarzającą wodę i kryształy lodu.

Przyczyny deterioracji materii skalnej są różnorodne. Jeżeli środowisko, w którym znajdują się obiekty skalne, jest czyste, właściwości skał ulegają naturalnemu, powolnemu procesowi starzenia. Intensywność tego procesu znacząco wzrasta w środowisku zanieczyszczonym, wzbogaconym w agresywne substancje chemiczne, gazy, pyły. Czas życia kamiennych obiektów zabytkowych ulega wówczas

gwałtownemu skróceniu i może być zatrzymany tylko przez intensywne działania ochronne.

KOROZJA CHEMICZNA

Zgodnie ze znanym przysłowiem, że *kropla drąży skałę* należy zdawać sobie sprawę, iż woda jest jednym z istotnych czynników degradujących ośrodek skalny. Jest ona jednocześnie rozpuszczalnikiem i nośnikiem reaktywnych substancji chemicznych. Stanowi również idealne środowisko rozwoju dla mikroorganizmów. Zawilgocenie w strukturze skały może pochodzić z różnych źródeł. Najbardziej niszczącymi są: deszcz, mgła, śnieg i grad, jednak są to przykłady ogólne i nieprecyzyjne. Nie można zapominać o takich czynnikach niszczących jak bryza morska, mżawka czy sadz.

Silnie nasycona tlenem woda opadowa i aerozolowa, pochodząca z mgieł, wzmacnia procesy utleniania pierwiastków związanych wcześniej z minerałami beztlenowymi, jak np. siarczki metali: piryt, chalkopiryt i inne. Siarka pochodząca z tych minerałów przechodzi w związki tlenowe (siarczany), powodując rozpad pierwotnej sieci krystalicznej. Współcześnie efekty tych procesów są najbardziej widoczne na fasadach obiektów pokrytych okładzinami piaskowcowymi. Na terenie Warszawy można znaleźć liczne przykłady budynków, na których okładziny są poddawane wybiórczym procesom utlenienia żelaza dwuwartościowego, o zielonkawej barwie, w związki żelaza trójwartościowego, o barwach od żółto-brązowej do brunatnej. Proces ten może zachodzić intensywnie i w sposób wybiórczy, w wyniku czego pojawiają się przebarwienia. Początkowo jednolita kolorystycznie fasada obiektu zaczyna się dzielić na łaciatą mozaikę różnobarwnych płyt.

W wielu opracowaniach pomija się jednak zjawisko podciągania kapilarnego wody przez obiekty skalne. Pobierana w czasie tego procesu woda jest niezwykle szkodliwa dla struktury wewnętrznej obiektu zabytkowego. Zawiera ona związki mineralne obecne w podłożu oraz duże ilości cząstek biologicznych. Roztwór przenika do struktury skały na skutek jej właściwości sorpcyjnych (higroskopijności) oraz w wyniku kondensacji pary wodnej, zachodzącej przy zmiennej temperaturze i wilgotności (ryc. 2). Wody gruntowe migrują w obręb struktury kamiennej budowli, zabytku lub elementu architektonicznego wieloma drogami (Sylwestrzak, Kachnic, 2010; Ruszkowski, Wiszniewska, 2017):

- podciągania kapilarnego przez samą skałę z gruntu,
- podciągania kapilarnego przez zaprawy murarskie,
- pobierania z pobliskich zbiorników wodnych.

Woda jako związek chemiczny stanowi jeden z najbardziej uniwersalnych rozpuszczalników. W przypadku bardzo małej zdolności rozpuszczania niektórych minerałów, w połączeniu z długimi okresami czasu i stałej obecności w odpowiednich ilościach może doprowadzić do powstawania dużych i nieodwracalnych zniszczeń, zwłaszcza w strefie kontaktu elementu skalnego z podłożem.

Jak powszechnie wiadomo, w przypadku skał magmowych, piaskowców o lepszemu krzemionkowym i skał metamorficznych, powstałych w wyniku przemian termobarometrycznych, działanie wody jest nieznaczne, z uwagi na bardzo niewielką porowatość lub jej całkowity brak oraz niską rozpuszczalność minerałów skałotwórczych. Brak wewnętrznej porowatości sprawia, że niszczące działanie rozpuszczalnika jest ograniczone jedynie do odsłoniętej powierzchni obiektów (ryc. 3). W takich skałach najbar-



Ryc. 3. Deterioracja chemiczna wapiennej podstawy fontanny w Valletcie na Malcie. Związki żelaza są nanoszone na zabytek przez wodę ze skorodowanej instalacji wodociągowej. Fot. J. Wiszniewska
Fig. 3. Chemical deterioration of the calcareous fountain base in Valletta, Malta. Iron compounds are deposited on the monument as a result of corroded water-pipe systems. Photo by J. Wiszniewska

dziej podatne na wietrzenie są minerały z grupy skaleni i łuszczaków. Ze skaleni w wyniku reakcji z roztworami wody i dwutlenku węgla powstają bardzo nietrwałe minerały takie jak kaolinit (proces kaolinizacji) i serycyt (proces serycytyzacji).

Woda nie tylko osłabia skały na drodze rozpuszczania, ale może też niszczyć kamienie w sposób mechaniczny. Odpowiedzialne za to są przede wszystkim minerały ilaste, które chłoną wodę, pod jej wpływem pęcznią i stają się plastyczne. Naprzemienne nasycanie wodą i wysychanie powoduje rozluźnienie spoiwości skały. Proces ten przyczynia się do dużego spadku wytrzymałości mechanicznej wapieni i piaskowców, zawierających minerały ilaste.

Wśród skał najbardziej podatnych na działanie wody są skały węglanowe zarówno osadowe, jak i metamorficzne (marmury) oraz piaskowce o lepiszczu wapiennym. Rozpuszczalność CaCO_3 w czystej wodzie jest bardzo mała. Jednak na niekorzyść zabytków działa czas. Wieloletnie i długotrwałe oddziaływanie opadów może rozpuszczać oraz nieodwracalnie usuwać ze skały dużą ilość CaCO_3 . Rozpuszczalność tego związku zaczyna wzrastać w roztworach soli kwaśnych.

Dwutlenek węgla – CO_2

Najbardziej niebezpieczny związek chemiczny rozpuszczony w wodzie gruntowej, opadowej i wodach płynących jest dwutlenek węgla (CO_2), z pozoru nieszkodliwy i powszechny. Tworzy on z wodą roztwór słabego kwasu węglowego, który ma charakterystyczną cechę szybkiego przekształcania węglanów w wodorowęglan wapnia $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ (Rembiś, Smoleńska, 2002; Labus, 2008). Jest on substancją trwałą jedynie w roztworach wodnych i po wyschnięciu ulega dekarbonatyzacji, przekształcając się ponownie w obojętny CaCO_3 (Sylwestrzak, Kachnic, 2010). Opisane procesy zachodzą w przyrodzie bardzo często. To właśnie te reakcje są odpowiedzialne za procesy krasowe. W ich efekcie powstają struktury jaskiniowe takie jak stalagmity i stalaktyty.

W skałach węglanowych wykorzystywanych w architekturze i rzeźbie, dzięki nadanym im polerom i zgładom, niszczenie powierzchni może zachodzić w dwojaki sposób, wg następujących reakcji (Sylwestrzak, Kachnic, 2010):

– przejście CaCO_3 w $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ i usunięcie go z obiektu. Proces ten zachodzi w przypadku przepływu wody z zawartością rozpuszczonego CO_2 po powierzchni (niszczenie ilościowe);

– przejście CaCO_3 do pierwotnej postaci węglanu. Efektem tego procesu są nacieki (niszczenie jakościowe).

Omawiane reakcje mogą wywołać różne skutki w obiektach zabytkowych wykonanych z skał węglanowych oraz z porowatych piaskowców o lepiszczu wapiennym. Kwas węglowy jest kwasem bardzo słabym i reakcja tworzenia się wodorowęglanu wymaga długotrwałego nasycania roztworu, który może przenikać w głąb porów i spękań skały. W połączeniu z podciąganiem przez skałę wody gruntowej, wymieszanej z czynnikami biologicznymi, np. kwasami humusowymi, tworzy się mieszanka, która może reagować z CaCO_3 w wewnętrznych partiach obiektów. W takim scenariuszu reakcja przemiany zachodzi w całej objętości skały nasyconej wodą.

Tlenki siarki – SO_2 i SO_3

Oprócz dwutlenku węgla, stałymi składnikami atmosfery mogącymi wywołać przemiany w minerałach skałotwórczych są: para wodna, tlen, tlenki siarki i azotu, siarkowodór, chlorowodór i cząstki stałe. Ich źródłem są procesy spalania paliw oraz pyły unoszone z powierzchni ziemi przez wiatr. Pod wpływem agresywnych gazów lub ich roztworów wodnych przebiegają reakcje utleniania, redukcji, hydrolizy, karbonatyzacji, hydratacji i dehydratacji, które w rezultacie powodują znaczącą deteriorację skał (Sylwestrzak, Kachnic, 2010).

W dymach i gazach przemysłowych powszechny jest dwutlenek siarki (SO_2). Powstaje on podczas spalania węgla kamiennego zanieczyszczonego związkami siarki. Zawartość procentowa siarki spalanej wraz z węglem kamiennym nie przekracza kilku procent, paliwa płynne, takie jak np. oleje opałowe, zawierają zbliżone, a niekiedy jeszcze większe ilości siarki. Część powstającego tlenku siarki (IV) pozostaje w popiele w postaci siarczanów, a pozostała ilość w formie gazu przedostaje się do atmosfery. Opisany powyżej gaz (SO_2) tworzy kwaśny roztwór z wodą i może z nią opaść na ziemię pod postacią *kwaśnego deszczu*, mgły, wody kondensacyjnej oraz śniegu. Szczególnie niebezpieczne są śnieg oraz mgła obecne przez długie okresy zimowe, stale nasycane opadającymi zanieczyszczeniami z atmosfery. Kumulują je w sobie, a w czasie odwilży oddają kamieniarce w postaci stężonej. Im dłużej utrzymuje się mgła, tym intensywniej działa na kamień. Tlenek siarki (IV) tworzy kwas siarkowy (IV), który wchodzi w reakcję ze składnikami kamieni, bądź bezpośrednio, bądź po uprzednim utlenieniu do silnego kwasu siarkowego (VI) (Sylwestrzak, Kachnic, 2010). Tak jak w przypadku kwasu węglowego, węglany nie mają szans oprzeć się stężonym kwasom siarkowym. Kwasy te są silniejsze chemicznie, powodując wzmoczone procesy niszczące, które zachodzą nie w cyklach wieloletnich, lecz sezonowych. Przyjmuje się prostą zależność – im większe jest zanieczyszczenie

powietrza produktami spalania i im wilgotniejsza zima, tym szybciej zachodzą procesy niszczące (ryc. 4).

Sole i pyły rozpuszczalne w wodzie

Sole rozpuszczane w wodzie zawarte w pyłach mogą przenikać w pory kamieni i niszczyć je w wyniku powtórnej krystalizacji. Ich wpływ na skały jest znacznie większy. W znacznym stopniu ułatwiają one proces kondensacji pary wodnej. Nagromadzana na nich woda jest nasycona substancjami agresywnymi atakującymi kamienie. W pyłach zachodzi także reakcja utleniania siarczku żelaza, w wyniku której powstają FeSO_4 i H_2SO_4 (Rembiś, Smoleńska, 2002; Labus, 2008; ryc. 4).

W wyniku osiadania pyłów powstają nieestetyczne nawarstwienia zewnętrzne, które nie tylko szpecą obiekty skalne, ale stanowią dla nich obcą, destrukcyjną warstwę, także w przypadku pokrywania porowatych i skonsolidowanych elementów. Intensywność tworzenia się nawar-



Ryc. 4. Wyraźne procesy deterioracyjne na fasadzie wapienna naw bocznych Katedry w Wiedniu i oczyszczona dzwonnica północna. Fot. M. Ruszkowski

Fig. 4. The distinct deterioration processes undergoing on limestone façade of the Vienna Cathedral side naves and the cleaned northern belfry. Photo by M. Ruszkowski

stwień jest uzależniona od rodzaju powierzchni obiektu. Na powierzchniach zawilgoconych, gładzonych i polerowanych nawarstwienia i naskorupienia tworzą się trudniej niż na powierzchni ścieranej lub skrawanej.

Pod wpływem działania wody na różne minerały zawarte w skale zachodzi również bardzo destrukcyjny proces hydratacji. Jest on szczególnie silny w miastach, gdzie potęguje go kwaśny odczyn powietrza i silne nasycenie CO_2 i SO_2 (Sylwestrzak, Kachnic, 2010).

Uszkodzenia spowodowane procesami chemicznymi nazywamy *korozją chemiczną*. Deterioracja chemiczna obserwowana na zabytkowych elementach architektonicznych jest znacznie intensywniejsza w miastach niż na obszarach wiejskich, gdzie dominuje głównie deterioracja biologiczna.

Procesy niszczące są wywołane bezpośrednim bądź pośrednim działaniem wody i temperatury. Warto jednak zwrócić uwagę na działanie czynników mechanicznych. Zaliczamy do nich wszystkie negatywne procesy, które powodują powstawanie ubytków w skałach na drodze ścierania bądź jego pęknięcia i rozpadania się.

Tu na uwagę zasługuje woda w postaci gradu, która powoduje pospolite, mechaniczne zniszczenia wskutek uderzenia gradzin w kamienne obiekty budowlane. Najbardziej podatne na zniszczenia w wyniku gradobicia są zwłaszcza osłabione partie skalne w strefach powierzchniowych okładzin budowli. Wielkość stref uderzeniowych jest związana z wielkością i intensywnością gradobicia. Jeśli opad lodu jest wystarczająco silny, to może spowodować znaczne odkształcenia w skałach miękkich, np. w alabastrach i węglanach.

KOROZJA POWIETRZNA

Czynnikiem niszczącym obiekty kamienne jest również wiatr. Porywa on drobne osady i pyły z powierzchni ziemi i niszczy powierzchnię obiektu przez ścieranie lub szlifowanie. Uszkodzenia spowodowane wiatrem nazywamy *korozją wiatrową* (Sylwestrzak, Kachnic, 2010). Na tego typu korozję szczególnie narażone są okładziny wykonane z kamieni miękkich, takich jak: gipsy, alabastry, wapienie, i skały o słabym spoiwie. Pyły ścierające posiadają zazwyczaj o wiele większą twardość (ziarna kwarcu) i są przeważnie ostrokrawędziste. Wietrzenie wiatrowe będzie niszczyło obiekty w dwojaki sposób.

Powierzchnie płaskie są drażnione w formy kuliste, w wyniku czego powstają dziury i wgłębienia. Z chropowatej powierzchni skalnej o naruszonej teksturze są usuwane minerały o małej spoistości. Jeśli takiej korozji podlegają rzeźby, to zacierane bywają szczegóły i ostre krawędzie, stając się spłaszczone i zaokrąglone. Najbardziej znanym przykładem zniszczonych w ten sposób zabytków są dwa posągi faraona Amenhotepa III (nazywane kolosami Memnona) w Egipcie. Deterioracja tego typu jest uzależniona od siły wiatru. Do czynników natury mechanicznej zalicza się wszystkie te, które powodują powstawanie ubytków w masie skalnej na drodze ścierania, pęknięcia i rozpadania po przyłożeniu siły fizycznej. W dużych miastach na terenach półotwartych i otwartych znaczące szkody może spowodować wiatr niosący pyły i większe drobiny cząstek stałych. Unoszone pyły i porywane cząstki zalegające na ulicach działają jak agregat do piaskowania. Szczególnie wrażliwe na tego typu oddziaływania są skały węglanowe i osadowe, które charakteryzują się niewielką wytrzyma-

łością. Znaczące ubytki powstają w sytuacji, gdy są one niszczone przez materiał rozdrobniony o większej twardości, np. ziarna kwarcu lub pył metalowy o ostrych krawędziach. Procesy te są oczywiście uzależnione od siły wiatru i ilości pyłów (Sylwestrzak, Kachnic, 2010). Ekstremalnym przykładem tego typu zjawiska są bardzo groźne burze piaskowe. Nie występują one w naszym klimacie, jednak w miastach nadmorskich są widoczne szkody spowodowane pyłami kwarcu wzbijanymi z pobliskich plaż.

Niektóre rodzaje skał posiadają cechy własne, które mogą się przyczynić się do szybkiego przebiegu procesów niszczących. Zalicza się do nich obecność w skale regularnych spękań ciosowych lub spękań tektonicznych. Jeśli występują one w jednakowych odstępach, to umożliwiają łatwiejszą obróbkę skały w czasie jej eksploatacji w kamieniołomie.

Na stan zachowania skał wpływa także ich budowa wewnętrzna i sposób wykorzystania w budowlach. Często spękania ujawniają się podczas działania sił konstrukcyjnych obiektu na dany rodzaj elementu skalnego. Jako przykład mogą posłużyć piaskowce i wapienne okładziny. W wyższych partiach ścian budynków są zachowane w dobrym stanie, podczas gdy te stykające się z poziomem ulicy – są w znacznym stopniu spękane, pokruszone lub zniekształcone.

KOROZJA BIOLOGICZNA

Organizmy żywe wpływają na zabytki w sposób bezpośredni poprzez rozsadzanie skał przez korzenie roślin wyższych, wytrawianie przez wydzieliny grzybów i porostów oraz pośrednio przez zwiększanie zawartości tlenu, dwutlenku węgla i kwasów humusowych w środowisku wodnym. Na przebieg deterioracji biologicznej znaczący wpływ mają: ukształtowanie terenu, obecność dużych kompleksów leśnych, głębokość strefy nasyconej wodą i wysokość zwierciadła wód podziemnych w gruncie. Uszkodzenia spowodowane działaniem organizmów żywych nazywamy *korozją biologiczną* (ryc. 5–7).

Rodzaj i forma deterioracji biologicznej zależy od grupy organizmów bytujących na lub w bezpośredniej bliskości obiektu zabytkowego.



Ryc. 5. Deterioracja biologiczna pozostałości opactwa Holyrood Abbey w Edynburgu. Wapienne i bazaltowe bloki pokryte glonami, porostami i mchami. Fot. M. Ruszkowski

Fig. 5. Biological remodeling of the remains of the Holyrood Abbey in Edynburg. Limestone and basalt monuments covered with algae, lichens and mosses. Photo by M. Ruszkowski



Ryc. 6. Sanktuarium – klasztor Ta Prohm w Angkor, Kambodża. Ogromne drzewo ceiba pentandra niszczy swoimi korzeniami kamienne mury, wciskając się we wszystkie szczeliny budowli i rozpierając ogromne mury. Fot. C. Rudziński (Otwarty Przewodnik Krajoznawczy)

Fig. 6. Sanctuary-monastery Ta Prohm in Angkor, Cambodia. Enormous ceiba pentandra tree roots destroying the stony walls, squeezing into all crevices of the building structure and pushing off the huge walls. Photo by C. Rudziński (Open Tour Guide)



Ryc. 7. Rzeźba z brązu wojownika indiańskiego na cokole wapiennym z Kongens Have w Kopenhadze. Tył pomnika pokryty glonami i porostami. Fot. M. Ruszkowski

Fig. 7. Sculpture of an Indian warrior from Kongens Have in Copenhagen. The back of the monument is covered with algae and lichens. Photo by M. Ruszkowski

Rośliny

Termin *rośliny wyższe* prowadzi nas do dużych organizmów roślinnych: drzew, krzewów czy paprotników, które mogą niszczyć obiekty budowlane. Najbardziej niszczącymi częściami roślin są korzenie, ponieważ wpływają na strukturę obiektu na wielu płaszczyznach (Sylwestrzak, Kachnic, 2010):

- biochemiczne działanie bezpośrednie – wydzielanie kwasów organicznych trawiących skałę;
- biochemiczne działanie pośrednie – działanie mikroorganizmów żyjących na powierzchni korzeni;
- biofizyczne działanie bezpośrednie – rozsadzanie struktury skały w wyniku przyrostu obwodowego korzeni;
- biofizyczne działanie pośrednie – rozrost systemu korzeniowego, który sprzyja poszerzeniu szczelin w strukturze skały i gromadzeniu się w nich wody.

Najbardziej spektakularna deterioracja materii skalnej w obiektach zabytkowych przez rośliny wyższe odbywa

się w klimacie tropikalnym. Widowiskowym przykładem tego procesu są świątynie i piramidy w Meksyku i świątynie buddyjskie na Półwyspie Indochińskim niszczone przez drzewa tropikalne (ryc. 6). Tego rodzaju korozję biologiczną można również obserwować w klimacie umiarkowanym. Jest ona szczególnie widoczna na cmentarzach miejskich, gdzie korzenie drzew są zdolne do unoszenia pomników lub rozsadzania grobowców. Stan zaniedbanych nagrobków kamiennych na cmentarzach jest wymownym przykładem niszczyielskiej działalności organizmów roślinnych. O penetrujących zdolnościach korzeni roślin w głąb materiałów budowlanych można się przekonać obserwując rozwój pnączy roślinnych na fasadach budynków.

Pomimo spektakularnych rozmiarów i często finezyjnych form wzrostów drzew ze skalnymi obiektami budowlanymi, to nie rośliny wyższe są główną grupą organizmów niszczących materię skalną. W tej dziedzinie zdecydowanie dominują porosty i inne rośliny niższe, takie jak glony i mchy. Inwazja tych grup jest procesem długotrwałym oraz złożonym. Powszechnie przyjmuje się, że na obiekt skalny działa tyle procesów deteriorujących ile gatunków go skolonizowało. W wielu opracowaniach geotechnicznych i konserwatorskich zwraca się uwagę na fakt, że rośliny niższe mają bardziej bezpośredni kontakt z powierzchnią materiału skalnego, a ich bytowanie jest podtrzymywane przez niedostępne dla innych organizmów jony, pobierane bezpośrednio ze skał. Rośliny niższe i mikroorganizmy w naturze działają w dużych skupiskach, wykazując wszelkie formy koegzystencji takie jak: symbioza, mutualizm czy komensalizm. Należy również pamiętać, że relacje pomiędzy poszczególnymi grupami są uzależnione od pory roku, rodzaju skały, jej porowatości, nasłonecznienia, wilgotności oraz czasu pozostawania wody w porach i spękaniach. Spośród mikroorganizmów najaktywniejsze są grzyby.

Grzyby

Grzyby należą do grupy organizmów szybko rozwijających się na powierzchniach kamiennych. Na materii skalnej występują głównie gatunki o nitkowatej formie, tworzące rozrastające się kolonie. Ich ciała zwane grzybniami pokrywają się olbrzymią ilością zarodników pomnażających kolonie (Sylwestrzak, Kachnic, 2010). Dzięki swojej złożonej budowie wewnętrznej i wielowarstwowym powłokom zewnętrznym są one zdolne do kolonizacji w skrajnie niekorzystnych warunkach. Jedną z ich najważniejszych cech jest duża tolerancja na zmiany temperatury i składu gazów w atmosferze. Dzięki temu zyskują znaczącą przewagę nad bakteriami i glonami. Grzyby wytwarzają przede wszystkim kwasy organiczne, np. kwas szczawiowy, mlekowy lub cytrynowy. Wydzieliny grzybów powodują obniżenie pH środowiska, prowadząc do nadtrawiania powierzchni oraz uwalniania podczas tych procesów jonów Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , które stanowią podstawę mineralną ich egzystencji (Sylwestrzak, Kachnic, 2010). Jony te reagują z kwasami produkowanymi przez grzyby lub są wbudowywane w strukturę nowo powstałych soli, osłabiających właściwości skały na jej powierzchni. Rozwój grzybów wiąże się z powstawaniem na powierzchni skał różnokolorowych plam, powierzchniowych przebarwień, których obecność bardzo obniża estetykę obiektów. Grzyby, wydzielając kwasy, są zdolne do nadtrawiania wypolerowanych obiektów skalnych. Kamień traci nadany mu tzw. poler lub połysk. Z biegiem czasu ten proces może się pogłębiać, powodując powstawanie nadżerek. Często jest zjawiskiem towarzyszącym

nadtrawianiu powierzchni skalnej są wysaliny na krawędziach nadżerek w formie wypukłych nalotów lub powstałych w ich wyniku zagłębień. Grzyby powodujące takie zjawiska deterioracji są określane jako epifity (Sylwestrzak, Kachnic, 2010).

Glony

Określenie *glony* jest potoczne, dotyczy organizmów fotosyntetyzujących, takich jak zielenice, chryzolity i inne (ryc. 7). Organizmy te występują powszechnie na ścianach, posadzkach, murach i powierzchniach pomników, na ceglach i drewnianych elementach. Ich niszczące działanie wiąże się głównie ze zmianą kolorystyki obiektu, zacieraaniem granic elementów zdobień i napisów. Wykazują one naturalną tendencję do gromadzenia się w miejscach wyeksponowanych na działanie światła słonecznego i bogatych w wilgoć. W skomplikowanych procesach oddychania glony produkują w znacznych ilościach kwasy organiczne: octowy, szczawiowy, mlekowy, glikolowy, bursztynowy, pirogronowy i in. (Sylwestrzak, Kachnic, 2010). Glony to grupa organizmów, która opanowała środowiska z wysokimi zmianami temperatur, np. w krajach tropikalnych, a także w krajach arktycznych, gdzie temperatura nie przekracza kilku stopni. Jednak swoje optimum posiadają w warunkach klimatu umiarkowanego. Na skałach o niskich odczynach pH (kwaśnych $\text{pH} < 7$), np. na granitach, gnejsach, pegmatytach, żyją glony określane mianem acidofilnych, czyli silikotroficznymi, a na skałach o wysokim pH (zasadowe $\text{pH} > 7$), np. marmury, wapienie – żyją glony alkalifilne, czyli kalcytroficzne. Glony wykazują również dużą odporność na wysychanie. Wiele gatunków jest w stanie przetrwać kilkutygodniowe okresy skrajnej suszy (Domasławski, 1975).

Porosty

Szczególnym przykładem współpracy organizmów w przyrodzie jest symbioza glonów i grzybów. Jest tak ścisła, że tworzą one odrębne organizmy klasyfikowane jako porosty. Organizmy te posiadają skomplikowaną budowę wewnętrzną i tworzą się dzięki również złożonym procesom biochemicznym. Łączą one w sobie zarówno cechy glonów, jak i grzybów. Dlatego konserwatorzy sztuki uważają je za organizmy najbardziej szkodliwe dla zabytków kamiennych. Porosty często współwystępują z glonami na powierzchniach dobrze oświetlonych i wilgotnych (Sylwestrzak, Kachnic, 2010). Spotkać je można na pomnikach w parkach miejskich, grobowcach i fasadach domów od strony północnej (ryc. 6, 7). Grzyby wchodzące w skład porostów zaopatrują symbionty w wodę i sole mineralne, a także zapewniają bezpieczeństwo i przytwierdzenie struktury do podłoża. Glony pełnią rolę żywicieli, dostarczając symbiotycznym grzybom wysokoenergetyczny pokarm. Organizmy te stwierdzono na różnych typach skał: wapieniach, marmurach, granitach i piaskowcach. W procesach biochemicznych porosty wytwarzają kwas szczawiowy, który łatwo wiąże wapń z węglanów. Powstała w wyniku tego procesu sól (szczawian wapnia) jest gromadzona na zewnątrz ciał porostów w formie wykwitów. Porosty produkują również charakterystyczne tylko dla siebie substancje biochemiczne, zwane kwasami porostowymi. Substancje te są klasyfikowane jako pochodne kwasów tłuszczowych i fenoli. Znanych jest kilkadziesiąt tego typu kwasów, a wiele z nich to substancje barwiące (Labus, 2008), np. czerwony

kwas rodokladowy, żółty kwas usninowy (posiada on również właściwości bakteriobójcze i bakteriostatyczne), pomarańczowa parietyna. Są to związki silnie toksyczne i trujące.

Zaniedbywane, nie konserwowane odpowiednio przez wiele lat obiekty skalne, np. zewnętrzne elementy architektoniczne, posadzki, pomniki, fasady budowli i in., pokrywają się bogatą i urozmaiconą florą mikroorganizmów, która w znaczącym stopniu przyczynia się do pogłębiania degradacji materii skalnej (Sylwestrzak, Kachnic, 2010). Wszystkie wymienione rodzaje i grupy mikroorganizmów wzajemnie się wspierają, konkurują ze sobą lub wpływają na siebie, potęgując swoje destrukcyjne działania na obiektach zabytkowych.

ODDZIAŁYWANIE ELEMENTÓW METALOWYCH NA MATERIAŁ SKALNY

Na zakończenie należy wspomnieć o pomijanych czynnikach mechanicznych i rzadko wzmiankowanych negatywnych oddziaływaniach elementów metalowych na materię skalną. Obiekty kamienne i zamontowane na nich elementy metalowe oddziałują na siebie bezpośrednio lub pośrednio. Oddziaływanie tych elementów jest potrójne: odbywa się na drodze chemicznej, mechanicznej oraz fizycznej. Zawilgocone, porowate skały, powoli oddające wodę stają się długotrwałym źródłem zawilgocenia metalu, nawet w okresach suchych. Wilgotne skały przyczyniają się do powstania i rozwoju korozji elektrochemicznej, która jest zliczana do oddziaływań bezpośrednich. Niszczenie elementów metalowych jest stymulowane przez sole rozpuszczalne w wodzie, przemieszczające się na drodze kapilarnej wraz z zaciekami. Najaktywniejszą z soli jest powszechnie występująca sól kamienna NaCl. Również niektóre minerały skałotwórcze i powstałe z ich wietrzenia agresywne roztwory wchodzi w reakcje z metalami, np. roztwór wodorotlenku wapnia z cynkiem, glinem (Sylwestrzak, Kachnic, 2010; ryc. 8).

Wyjątkowo niebezpieczne dla okładzin kamiennych są elementy metalowe wykonane ze stali węglowej, która w wyniku procesów korozyjnych zwiększa swoją objętość. Skorodowane elementy, takie jak kotwy, dyble, bolce itp., wywierają na otaczające je ściany parcie prowadzące do powstawania spękań i ubytków. Stan zachowania konstrukcji stalowej, np. stanowiącej szkielet sztukaterii, poważnie wpływa na stan zachowania całego obiektu (Rembiś, Smoleńska, 2002; Domasławski, 2011). Korozja znacznie obniża wytrzymałość i spójność obiektu. Narastająca z biegiem czasu ilość niekorzystnych produktów reakcji korozji osłabia elementy skalne, powodując ich pękanie, rozwarstwianie się i złuszczenie. Niekorzystne zjawiska mogą być w prosty sposób wyeliminowane lub powstrzymane. Najtańszym i najprostszym sposobem jest zastosowanie farb izolujących. Droższą formą ochrony elementów metalowych jest proces galwanizacji metali przed ich zamontowaniem na kamieniu.

Analizowane dotychczas procesy deterioracji ośrodków skalnych były wywoływane bezpośrednim lub pośrednim działaniem powietrza i wody, reakcji chemicznych, działalnością organizmów żywych i wahaniami temperatury. Wszystkie te czynniki najczęściej oddziałują wspólnie na obiekty skalne, potęgując proces deterioracji kamienia.

Podsumowując, istnieje wiele przyczyn wietrzenia powierzchni kamieni (rozpuszczania, spęczniania i wymywania elementów skałotwórczych). Trudno chronić i zapo-



Ryc. 8. Niszczenie elementów żelaznych stymulowane przez sole rozpuszczalne w wodzie, które powodują powstawanie zacieków na powierzchni granitu. Fot. M. Ruszkowski

Fig. 8. Destruction of iron elements stimulated by water-soluble salts, causing stains on the surface of granite. Photo by M. Ruszkowski

biegać wszystkim procesom. Ich rozmieszczenie w strukturze skały jest zależne nie tylko od miejsca przenikania wody do kamienia, ale także od rodzaju powierzchni, z której odparowuje.

Autorzy pragną podziękować Recenzentom za cenne uwagi i wskazówki, które wpłynęły na jakość artykułu.

LITERATURA

- DOMASŁAWSKI W. (red.) 2011 – Zabytki kamienne i metalowe ich niszczenie i konserwacja profilaktyczna. Wyd. Nauk. UMK, Toruń.
 DOMASŁAWSKI W. 1975 – Profilaktyczna konserwacja kamiennych obiektów zabytkowych. UMK, Toruń.
 LABUS M. 2008 – Metody geologiczne w ocenie stanu zachowania kamiennych elementów budowlanych. Wyd. PŚI., Gliwice.
 REMBIŚ M., SMOLEŃSKA A. 2002 – Deterioracja oraz rekonstrukcja piaskowców i wapieni z obiektów zabytkowych. Świat Kamienia, 3: 108–110.
 RUSZKOWSKI M., WISZNIEWSKA J. 2017 – Deterioracja materii skalnej. Cz. I. Nowy Kamieniarz, 1 (100)/2017: 86–90.
 SYLWESTRZAK H., KACHNIC J. 2010 – Kamienne towarzystwo sztuki. Wyd. Nauk. UMK, Toruń.
 WAGNER B. 2009 – Badania obiektów zabytkowych. Chemia w Szkole, 6: 6–12.