

Laboratoryjne badania procesu deterioracji trawertynowych elementów konstrukcyjnych

Joanna Pinińska¹, Alicja Bobrowska¹, Cagatay Pamukcu²



J. Pinińska

A. Bobrowska

C. Pamukcu

Laboratory testing of deterioration of travertine building stone.

Prz. Geol., 58: 879–885.

Abstract. Aging of masonry objects results in deterioration of strength parameters and building and decorative value of stone. This slowly developing process can be modeled in laboratory, which makes possible direct observation of destructive impact of atmospheric pollution and salty water or acid rains in the course of artificial seasoning. The paper presents results of analysis of artificial aging of travertine under influence of frost, high temperature and crystallization of salt solutions. The tests were carried out on fresh samples of travertine collected in quarries at Raciszyn in Poland and Hierapolis in Turkey. Travertine extracted from in these quarries was used in

the past and is still used as building and decorative stone in masonry works. Comparative method of detecting micro-structural metamorphose was performed with the application of microscopic analysis (SEM) and the strength and ultrasonic diagnostic analyses. The quantitative characteristics of deterioration state of travertine is described by the proposed deterioration index (I), based on nondestructive determination of wave propagation velocity in fresh rock sample (V_{po}) and in the same sample under influence of sequential stages of modeled deterioration (V_{pm}) with respect to subsequent changes of compressive strength (R_c). According to test results, resistance of the Raciszyn travertines to frost, high temperature and crystallization of salt is about 2 times higher than in the case of those from Hierapolis.

Keywords: deterioration, travertines, historical object, ultrasonic diagnoses

Naturalne pogarszanie się walorów dekoracyjnych i wytrzymałościowych materiałów kamiennych wskutek długotrwałego oddziaływania otaczającego środowiska zwane jest procesem starzenia (*aging*) lub deterioracji (ICOMOS-ISCS, 2008). W geologii są to powszechnie znane procesy związane z wietrzeniem materiału skalnego (Dragowski, 1981). Podatność kamienia na ten proces zależy od właściwości fizyczno-mechanicznych i strukturalnych użytego materiału, warunków środowiskowych oraz czasu użytkowania i funkcji, jaką element kamienny spełnia w budowlu.

Dynamikę starzenia trudno bezpośrednio obserwować w warunkach naturalnych ze względu na długotrwałość procesu. Korzystne rezultaty w prognozowaniu tego zjawiska uzyskuje się natomiast na drodze laboratoryjnych badań geomechanicznych w warunkach przyspieszonego sezonowania.

W pracy zanalizowano odporność na procesy deterioracji trawertynow z Hierapolis (Turcja) i Raciszyna (Polska) oraz porównano wpływ warunków środowiskowych klimatu śródziemnomorskiego i umiarkowanego na przebieg ich starzenia.

Trawertyn to skała osadowa pochodzenia chemicznego, powstająca przez wytrącenie węgla wapnia z wód źródłanych pod wpływem gwałtownego spadku ciśnienia lub temperatury. Jest to skała jasna i porowata, lokalnie gąbczasta; zawiera ślady struktur roślinnych. Dzięki powszechnemu występowaniu w warunkach ciepłego klimatu śródziemnomorskiego (ryc. 1) była często stosowana jako materiał konstrukcyjny antycznych obiektów architektury greckiej i rzymskiej (ryc. 2).

Mniej powszechny w strefie klimatu umiarkowanego trawertyn występuje lokalnie jako górnojurajska odmiana wapieni skalistych i jest obecnie wykorzystywany jako cenny dekoracyjny materiał okładzin zewnętrznych i wewnętrznych.



Ryc. 1. Pokrywy trawertynowe w południowej Turcji. Wszystkie fot. J. Pinińska

Fig. 1. Travertine covers in southern Turkey. All photos by J. Pinińska

¹Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; joanna.pininska@uw.edu.pl, a.bobrowska@uw.edu.pl

²Wydział Inżynierii Górniczej, Politechnika w Izmirze, 35100 Bornova, Izmir, Turcja; cagatay.pamukcu@deu.edu.tr

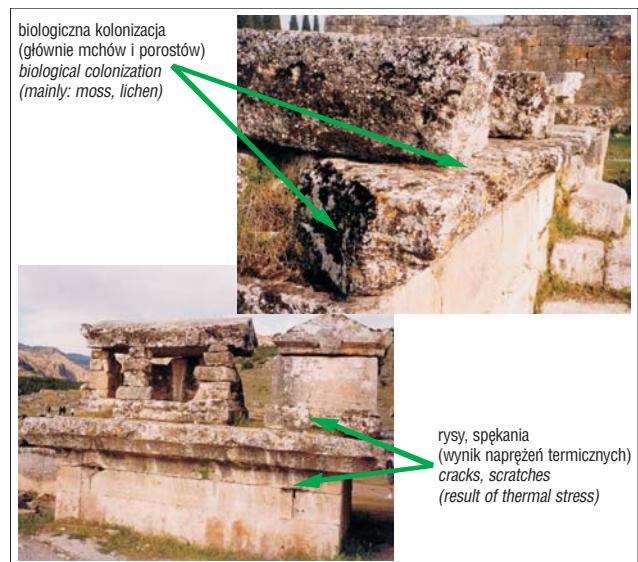
Jak każda skała trawertyn podlega procesowi deterioracji w stopniu zależnym od lokalnego nasilenia destrukcyjnych czynników chemicznych, mechanicznych i biologicznych oraz czasu ich działania (Espinosa-Marzal & Scherer, 2008). W klimacie śródziemnomorskim analizowano procesy i mechanizmy deterioracji trawertynów w kamiennych konstrukcjach zabytkowych obiektów antycznej architektury południowo-zachodniej Turcji, a w klimacie umiarkowanym – na wewnętrznych i zewnętrznych elewacjach obiektów architektonicznych w Polsce. Na podstawie obserwacji jakościowych stwierdzono, że w rejonie śródziemnomorskim konstrukcje trawertynowe niszczejają głównie w wyniku termicznego rozluźnienia struktury kamienia oraz eksfoliacji w strefie powierzchniowej. Umożliwia to postęp erozji eolicznej (usuwania rozdrobnionych, słabszych fragmentów z odsłoniętych powierzchni), która



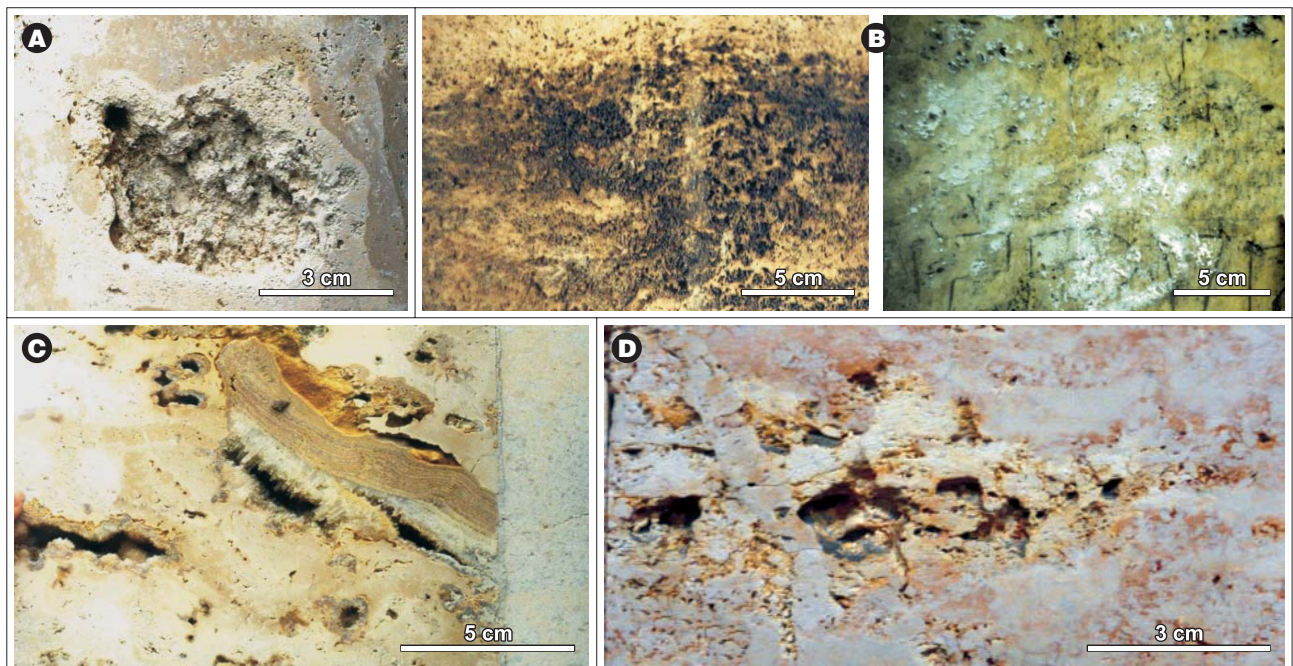
Ryc. 2. Współczesne i zabytkowe elementy trawertynowe mostu w Belkis (Turcja)
Fig. 2. Modern and ancient travertine elements in construction of the bridge at Belkis (Turkey)

powoduje, że faktura murów budowli antycznych zbudowanych z trawertynów staje się silnie chropowata. W warunkach ograniczonego zawilgocenia skorodowane powierzchnie może objąć biochemiczna agresja mchów i porostów (ryc. 3).

W warunkach klimatu umiarkowanego głównym czynnikiem destrukcyjnym jest zmróz. Powoduje on lokalne rozszerzanie już istniejących kawern i wykruszanie się materiału. W naruszonych i skorodowanych wnętrzach kawern, przy podwyższonej wilgotności, dochodzi do migracji roztworów (ryc. 4A–D) i – w wyniku ich rekrystalizacji



Ryc. 3. Antyczne grobowce wykonane z trawertynu w rejonie Hierapolis (Turcja)
Fig. 3. Ancient travertine tombs in the Hierapolis necropolis (Turkey)



Ryc. 4. Deterioracja okładzin trawertynowych wskutek zamrozu; **A** – wykruszanie i rozszerzanie pierwotnych kawern – elewacja Muzeum Początków Państwa Polskiego w Gnieźnie; **B, C** – naskorupienia i wykwyty krystalizujących soli – wnętrze Dworca PKP Warszawa Śródmieście; **D** – szczotki kalcytowe wykrystalizowane w kawernach – teatr w Kielcach
Fig. 4. Deterioration of travertine veneer due to frost action; **A** – widening of original caverns and crevisses due to fall out of rock grains from weathered wall surfaces – front elevation of the Museum of the Origins of the Polish State in Gniezno; **B, C** – encrustations of salt crystallising on travertine surfaces – interior of the Warszawa Śródmieście railway station; **D** – internal crystal formations of calcite in travertine cavities – theatre building in Kielce

– do rozszerzania szczelin stanowiących drogi wzmożonej infiltracji.

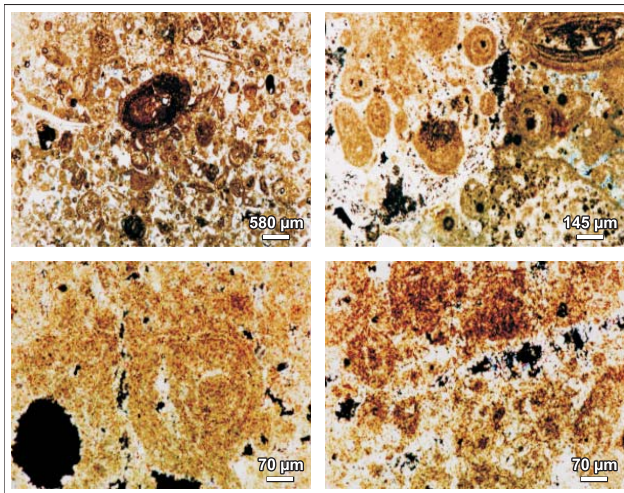
Degradacja wytrzymałości i walorów dekoracyjnych w obu strefach klimatycznych jest uwarunkowana silnie porowatą strukturą trawertynu (Pinińska & El-Metwalli, 2008). Zależnie od klimatu różne są jednak mechanizmy niszczenia kamienia, kolonizacji biologicznej oraz pogłębiania korozji w długim przedziale czasowym, które uwiadcniają się w warunkach laboratoryjnej analizy tych procesów (Pinińska, 2008a).

Laboratoryjne badania odporności na deteriorację

Analizą laboratoryjną objęto monolity świeżej skały pobranej z czynnych kamieniołomów trawertynu w Raciszynie (RA) i Hierapolis (HO) oraz materiału pobranego z antycznego odsłonięcia w Hierapolis (HA), gdzie w blokach skalnych stwierdzono silnie zaawansowane procesy starzenia, zbliżone do stanu obserwowanego w sąsiadujących obiektach architektonicznych.

Analiza makroskopowa i mikroskopowa materiału skalnego. Barwa materiału świeżego z obu odsłonięć była od kremowej po żółtawą. Materiał zwietrzały cechowała barwa szara. Makroskopowo wszystkie rodzaje trawertynu charakteryzowała drobnokrystaliczna budowa szkieletu skalnego z wyraźnymi porami i kawernami. Analiza mikroskopowa wykazała jednak znaczące różnice. Materiał z Raciszyna (RA – ryc. 5) to pakston wapienisty z ooidami, zbudowany z licznych, bezładnie ułożonych, stykających się ze sobą składników ziarnistych. W skale dominują owalne ooidy o rozmiarach od 0,10 do ponad 1,5 mm. W mniejszej ilości występują natomiast bioklasty sparytowe (fragmenty muszli małżów, kolonii mszyciwołów, szkarłupni oraz wielokomorowych otwornic).

Materiał z Hierapolis to trawertyny zbudowane ze słabo zdiagenezowanego osadu węglanowego, składającego się z różnokrystalicznych, ząbwiąjących się kryształów kalcytu o zróżnicowanej wielkości (0,10–0,50 mm). Kryształy charakteryzują się w większości wydłużonym, grubolistewkowym pokrojem (ryc. 6A) i ułożeniem kierunkowym. Obserwuje się także formy naciekowe, rozetkowe oraz stożkowe, związane ze specyficznym sposobem kry-



Ryc. 5. Obraz mikroskopowy płytek cienkich trawertynu z Raciszyna (RA)

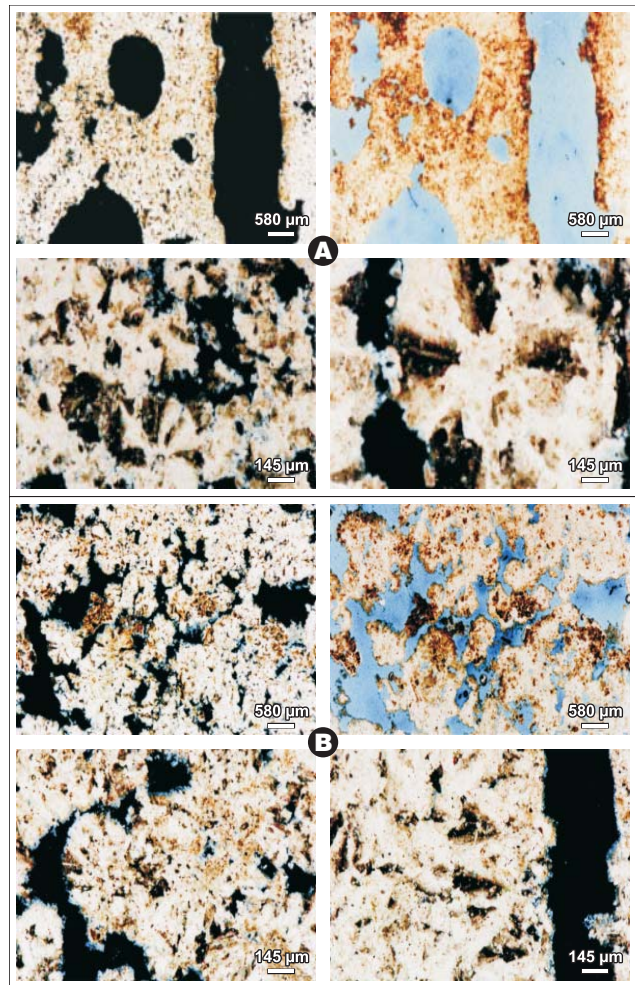
Fig. 5. Microscopic image of thin sections of travertine from Raciszyn (RA)

stalizacji z wód źródłanych (ryc. 6B). Widoczne są także ślady po składnikach ziarnistych – bioklastach i drobnych fragmentach roślin.

Analiza powierzchni wygładzonych i mikroskopowa analiza płytek cienkich wykazują różnice w porowatości materiału – od mało porowatych trawertynów z Raciszyna (ryc. 7A), poprzez średnio porowate świeże trawertyny z Hierapolis (HO – ryc. 7B), do bardzo porowatych, zwietrzałych trawertynów z kamieniołomu antycznego (HA – ryc. 7C).

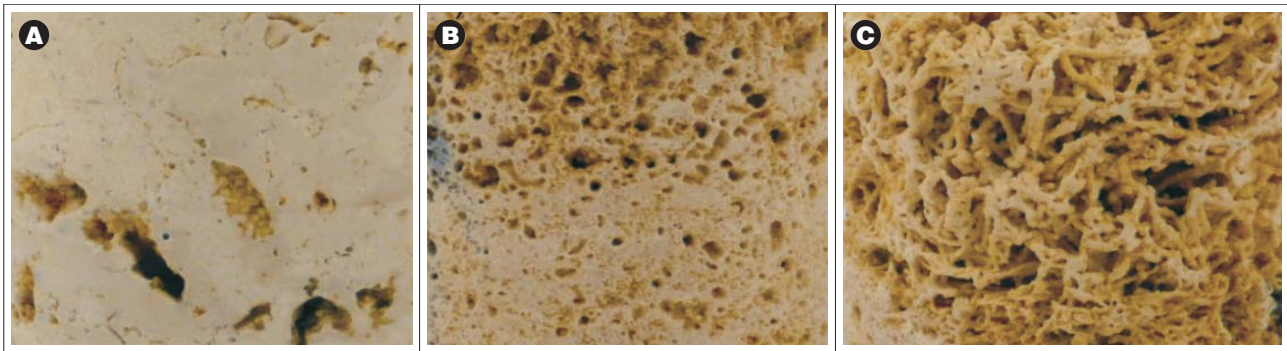
Z analizy płytek cienkich oraz w elektronowym mikroskopie skaningowym SEM wynika, że w zwietrzałym materiale z Hierapolis (HA) nieregularne makropory zajmują ponad 40% obrazu, podczas gdy w świeżym materiale z Hierapolis (HO) i Raciszyna (RA) odpowiednio ok. 20 i 10% (ryc. 8). Laboratoryjne badania porowatości potwierdzają ilościowo to zróżnicowanie. Porowatość, a w ślad za nią nasiąkliwość świeżych trawertynów z Raciszyna jest praktycznie dwukrotnie niższa niż z Hierapolis i trzykrotnie niższa niż trawertynu zwietrzałego (tab. 1).

Badania ultradźwiękowe wskazują, że trawertyny, mimo niejednorodności struktury i kawernistości, są materiałem izotropowym. Prędkości fal mierzone w dwóch prostopadłych kierunkach nie wykazują większego zróżnicowania (tab. 2). Wytrzymałość świeżych trawertynów z Raciszyna jest ok. dwukrotnie wyższa niż trawertynów z Hierapolis (HO), a materiał zwietrzały z antycznego



Ryc. 6. Obraz mikroskopowy płytek cienkich trawertynów z Hierapolis: A – materiał świeży (HO); B – materiał antyczny (HA)

Fig. 6. Microscopic image of thin sections of Hierapolis travertines: A – fresh material (HO); B – ancient material (HA)



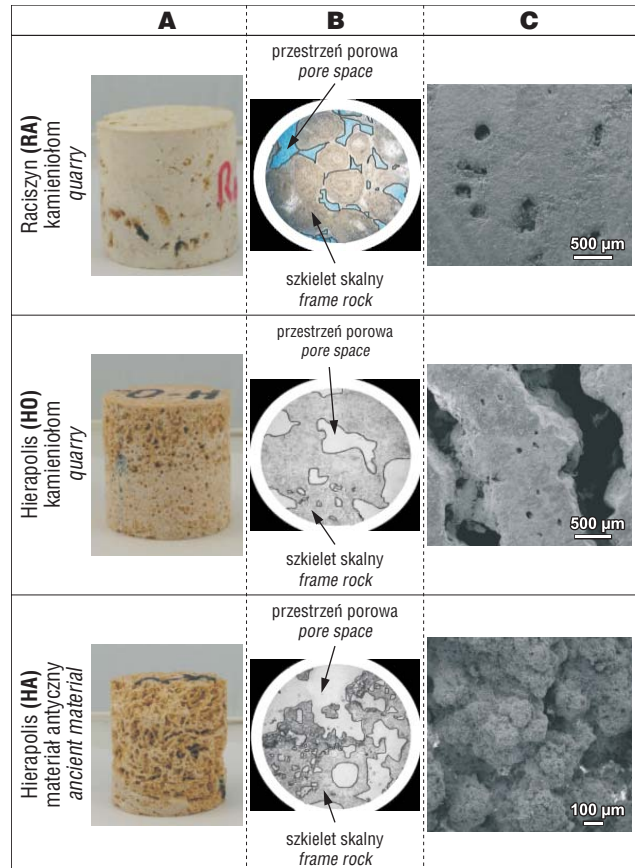
Ryc. 7. Makropory w trawertynie; **A, B** – materiał świeży – Raciszyn (RA) i Hierapolis (HO); **C** – materiał antyczny z Hierapolis (HA)
Fig. 7. Macropores in travertine; **A, B** – fresh material from Raciszyn (RA) and Hierapolis (HO); **C** – ancient material from Hierapolis (HA)

kamieniołomu (HA) wykazuje dwukrotne obniżenie wytrzymałości w stosunku do materiału świeżego.

Geomechaniczne wskaźniki procesu deterioracji. Jedną z najskuteczniejszych metod pomiaru zmian właściwości materiałów kamiennych wskutek deterioracji są badania nieniszczące. Pomiaru te doskonale nadają się do rejestracji zmian zachodzących w próbkach poddanych w laboratorium sztucznym, przyspieszonym procesom starzenia. Dzięki nieniszczącemu charakterowi pomiarów można w sposób ciągły analizować zmiany właściwości w czasie sezonowania i wyznaczać ich trendy, a następnie korelować z badaniami wytrzymałościowymi uzyskiwanymi z badań niszczących (Robinson, 2000; Pinińska, 2008b). Podatność trawertynów na procesy deterioracji oparto zatem na nieniszczących badaniach laboratoryjnych próbek sezonowanych w różnych warunkach środowiskowych oraz obserwacjach zmian makroskopowych i mikroskopowych ich struktury podczas sezonowania.

Z monolitów trawertynu świeżego (RA i HO) oraz z materiału zwiertzałego (HA) wycięto 59 standardowych próbek cylindrycznych o średnicy $\phi = 50 \pm 3$ mm i wysokości $h = 50 \pm 3$ mm do badań wytrzymałościowych i oznaczono cechy fizyczne, anizotropię prędkości propagacji fali ultradźwiękowej podłużnej w kierunku prostopadłym (V_{\perp}) i równoległym (V_{\parallel}) do osi próbek oraz wytrzymałość materiału świeżego (w stanie początkowym).

Próbki skalne z Raciszyna i Hierapolis o znanych parametrach początkowych sezonowano w warunkach cyklicznego działania mrozu (25 cykli w temperaturze -25°C), cyklicznego działania podwyższonej temperatury (15 cykli 40°C) oraz cyklicznego działania roztworu soli, a próbki z Raciszyna dodatkowo w środowisku działania kwaśnych zanieczyszczeń atmosferycznych (roztwór H_2SO_4). W ba-



Ryc. 8. Obraz makroskopowy, mikroskopowy i skaningowy struktury badanego materiału skalnego; **A** – obraz makroskopowy próbki do badań wytrzymałościowych; **B** – obraz mikroskopowy płytek cienkich; **C** – obraz SEM

Fig. 8. Macroscopic, microscopic and scanning images of rock structure; **A** – a macroscopic view of sample for strength tests; **B** – microscopic image of thin sections; **C** – SEM image

Tab. 1. Właściwości fizyczne trawertynów (w stanie początkowym)

Table 1. Physical properties of travertines (initial state)

| Materiał skalny Rock material | Gęstość pozorna Density [g/cm ³] | Porowatość Porosity [%] | Nasiąkliwość objętościowa Absorption [%] |
|--|--|---|--|
| | min.–maks. (śr.) min.–max. (average) | min.–maks. (śr.) min.–max. (average) | min.–maks. (śr.) min.–max. (average) |
| RA – kamieniołom w Raciszynie RA – quarry at Raciszyn | 2,20–2,38 (2,30) | 2,19–17,59 (9,89) | 2,78–10,21 (6,51) |
| HO – kamieniołom w Hierapolis HO – quarry at Hierapolis | 1,32–2,14 (1,79) | 14,48–37,40 (23,70) | 8,33–13,42 (10,63) |
| HA – materiał antyczny z Hierapolis HA – ancient material from Hierapolis | 1,34–1,93 (1,57) | 12,90–39,40 (29,00) | 21,15–30,17 (26,80) |

Tab. 2. Prędkość fali podłużnej ($V_{po,II}$) oraz wartości wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie R_{co} – w stanie początkowym
 Table 2. Longitudinal wave velocity ($V_{po,II}$) and single-axis-compression strength R_{co} – initial state

| Materiał skalny Rock material | Prędkości fali podłużnej Longitudinal wave speed V_{pII} [m/s] | Prędkość fali podłużnej Longitudinal wave speed V_{pI} [m/s] | Wytrzymałość na ściskanie Compression strength R_{co} [MPa] |
|--|--|--|---|
| | min.–maks. (śr.) min.–max. (average) | min.–maks. (śr.) min.–max. (average) | min.–maks. (śr.) min.–max. (average) |
| RA – kamieniołom w Raciszynie RA – quarry at Raciszyn | 4700–5603 (5151) | 3925–5105 (4050) | 37,6–65,48 (44,11) |
| HO – kamieniołom w Hierapolis HO – quarry at Hierapolis | 3102–4876 (3953) | 3192–4594 (3951) | 9,49–17,52 (12,70) |
| HA – materiał antyczny z Hierapolis HA – ancient material from Hierapolis | 1883–3429 (2559) | 1913–3719 (2530) | 4,09–9,49 (6,79) |

daniach stosowano zalecenia norm PN-85/B-04102 oraz PN-EN 12370:2001.

Po 25 cyklach zamrażania i odmrażania stwierdzono, że wytrzymałość (R_c) trawertynów z Raciszyna (RA) obniża się średnio o 20%, a o ok. 22% pod wpływem dodatniej temperatury (ok. 40°). W trawertynach świeżych z Hierapolis (HO) zamrażanie wywołało obniżenie wytrzymałości o ok. 25%, zaś pod wpływem wysokich temperatur – w granicach 20%. W trawertynach zwietrzałych z antycznego kamieniołomu z Hierapolis (HA) pod działaniem mrozu wytrzymałość obniżyła się o ponad 50% lub nawet nastąpił całkowity rozpad próbki, zaś pod działaniem wysokich temperatur – obniżyła się o 60% (ryc. 9A, B). Kry-

stalizująca z roztworu sól obniżyła wytrzymałość trawertynów z Raciszyna o blisko 15%, z Hierapolis (HO) o ok. 16%, a materiału antycznego (HA) – o 35% (ryc. 9C).

Rezultaty badań

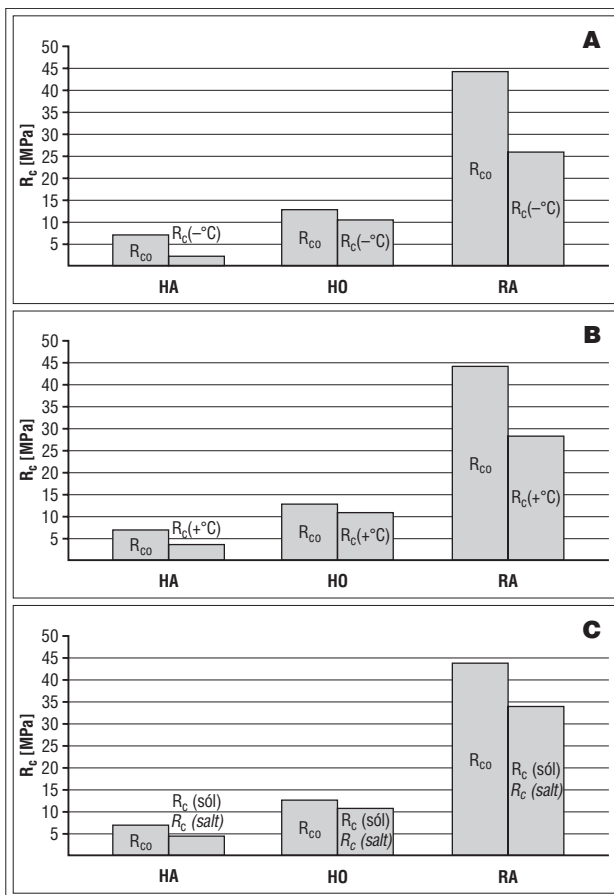
Badania wykazują, że materiał świeży w obu klimatach na skutek wahań temperatury w relatywnie krótkim czasie traci ok. 20% wytrzymałości pierwotnej, a słaby materiał zwietrzały może ulec całkowitemu rozpadowi. Wyrazem przemian strukturalnych materiału podczas sezonowania są zmiany prędkości fali ultradźwiękowej od początkowej (V_{po}) do finalnej (V_{pn}), związane z procesami rekryształizacji przestrzeni porowej wskutek krystalizacji soli lub ługowania wtórnych wypełnień. Początkowo pod wpływem zasolenia może wystąpić efekt wzrostu prędkości V_{pn} , bowiem kryształy soli spajają mikroszczeliny. Efekt ten ustępuje, gdy sole zostają wylugowane, a materiał staje się bardziej porowaty i osłabiony strukturalnie. Im starszy materiał, tym bardziej porowaty i słabsza jest jego struktura, co rejestrowane jest obniżeniem prędkości fali.

Fakt ten potwierdzają badania mikroskopowe, które wykazują, że pod wpływem sezonowania w warunkach kwaśnego roztworu H_2SO_4 w trawertynach z Raciszyna ozdobne ziarna kalcytu w większych porach są korodowane, a substancje rozpadu – ługowane. Powoduje to zwiększenie porowatości kamienia – szczególnie w strefie powierzchniowej (ryc. 10). Pojawiają się charakterystyczne zagłębienia i wżery, a granice ziaren stają się coraz mniej wyraźne (ryc. 11A–C). Na powierzchni ziaren pelitowych dochodzi do krystalizacji faz potomnych, związanych z reagowaniem H_2SO_4 z $CaCO_3$, najprawdopodobniej reprezentowanych przez gips. Osłabienie wytrzymałości trawertynu z Raciszyna pod wpływem roztworu H_2SO_4 i ługowania substancji rozpadu węglanów wynosi średnio 45%.

Nieco inny jest charakter deterioracji pod wpływem roztworów solnych. Krystalizując, sole początkowo w niewielkim stopniu uszkadzają porowatą strukturę trawertynu (Stefanidou & Papayianni, 2008; Pinińska i in., 2009). Do znacznego spękania dochodzi dopiero w zaawansowanych fazach sezonowania (ryc. 12).

Monitorowanie zmian za pomocą pomiaru fali podłużnej, zależnie od działającego czynnika, pozwala wyznaczyć ich zróżnicowaną dynamikę w trakcie sezonowania (ryc. 13), którą można odnieść do zmian wytrzymałości (ryc. 14).

Ilościowo stan zaawansowania procesu deterioracji można określić na podstawie wskaźnika zwięzłości I (od ang. *integrity*). Określa on stan dezintegracji na danym poziomie sezonowania (n) w stosunku do wartości początkowej. Określenie wskaźnika zwięzłości przy zastosowaniu badań nieniszczących oparto na formule:



Ryc. 9. Zakresy zmienności wytrzymałości na ściskanie (R_c) pod wpływem: **A** – zamrozu; **B** – podwyższonej temperatury; **C** – roztworu soli

Fig. 9. Variation of compressive strength (R_c) under the influence of: **A** – frost factor; **B** – high temperatures; **C** – crystallisation of salt

$$Integrity (I_{Vp}) = (V_{pn}/V_{po})^2,$$

gdzie:

V_{po} – prędkość fali podłużnej w materiale świeżym (początkowa),

V_{pn} – prędkość fali podłużnej po cyklu sezonowania.

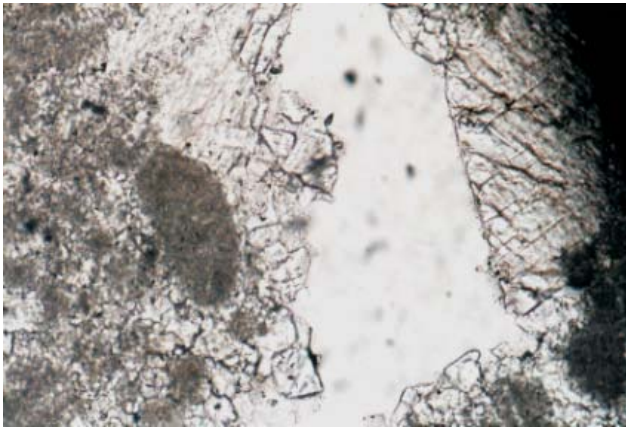
Zmiany te porównano ze zmianami wytrzymałości wyznaczonej dla finalnego cyklu sezonowania. Stwierdzono zaawansowaną deteriorację trawertynów z antycznego kamieniołomu (HA) oraz silnie destruktywne dla jego struk-

tury oddziaływanie ujemnych temperatur. Dla monitorowania procesu deterioracji przy zastosowaniu badań wytrzymałościowych wskaźnik I_{Rc} oparto na formule:

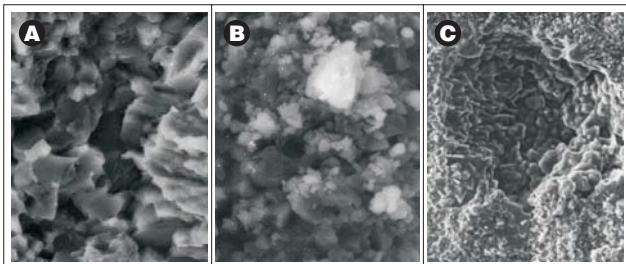
$$Integrity (I_{Rc}) = (R_{cn}/R_{co})^2,$$

gdzie:

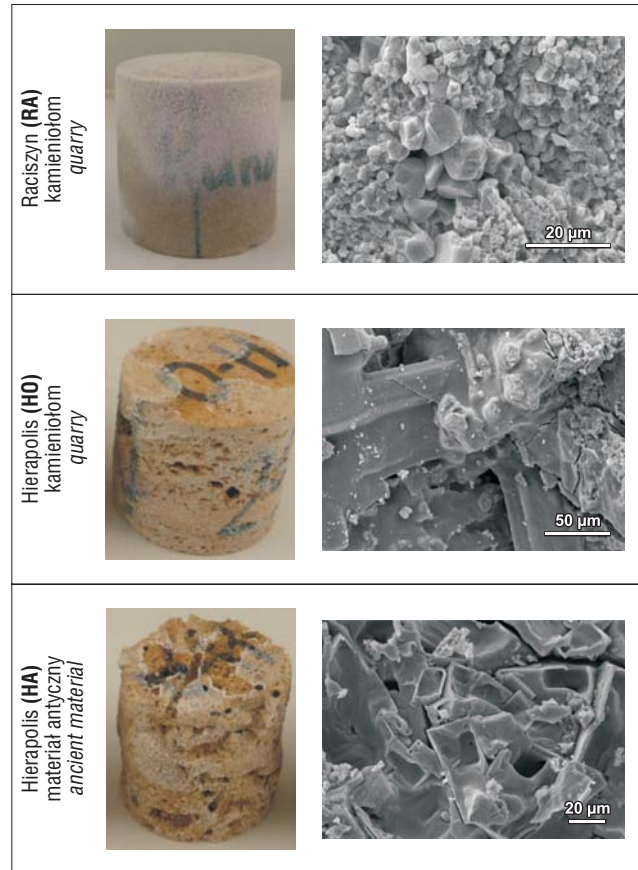
R_{co} – wytrzymałość materiału skalnego (początkowa),
 R_{cn} – wytrzymałość materiału skalnego po zakończeniu sezonowania.



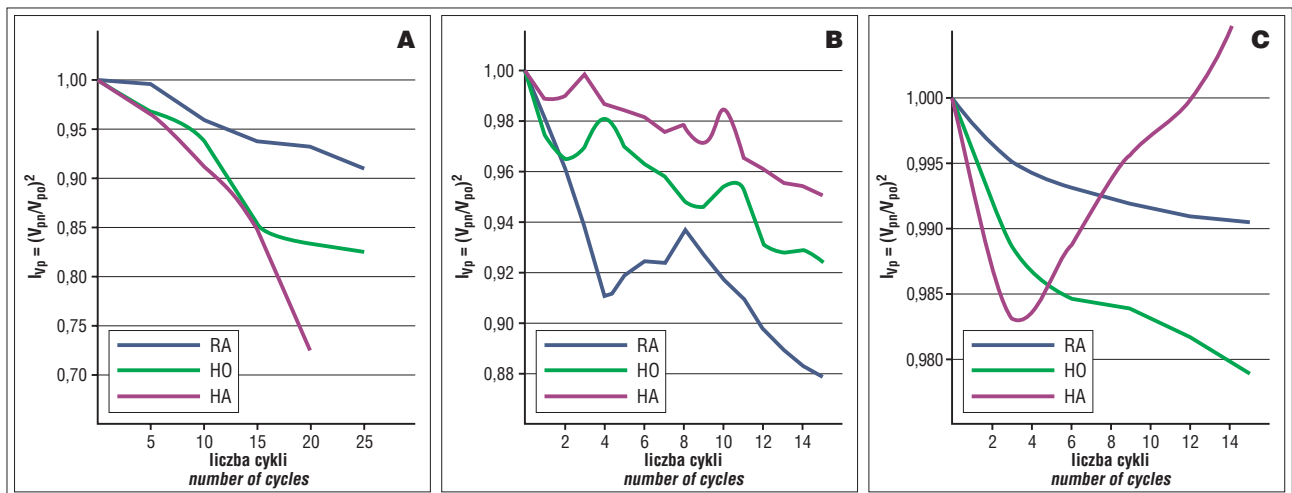
Ryc. 10. Nadżeranie ziaren kalcytu w trawertynach z Raciszyna. Obraz w świetle przechodzącym w 40-krotnym powiększeniu
Fig. 10. Corrosion of calcite grains in Raciszyn travertine. Image in transmitted light, 40x



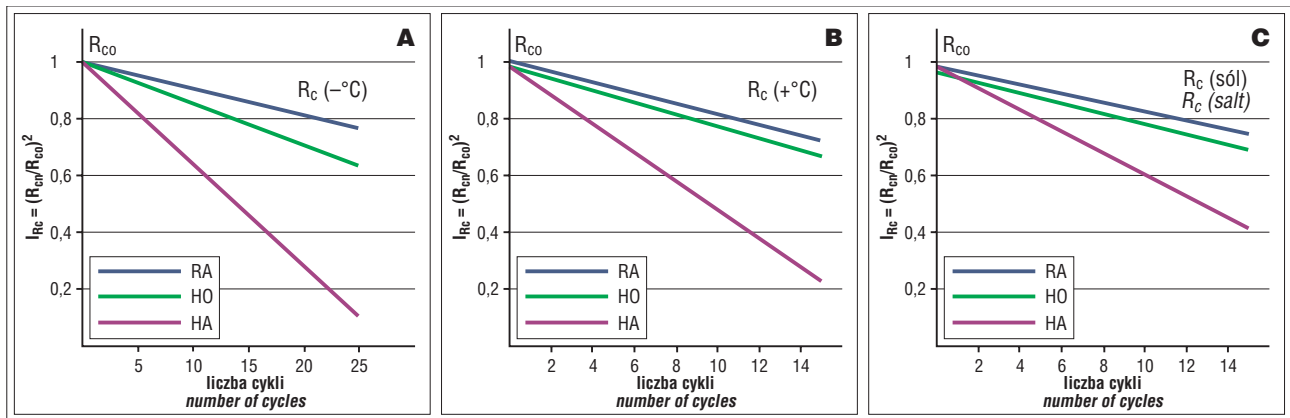
Ryc. 11. Nadżeranie ziaren kalcytu w trawertynach z Raciszyna – obraz SEM
Fig. 11. Corrosion of calcite grains in Raciszyn travertine – SEM image



Ryc. 12. Obraz makroskopowy próbek trawertynów oraz w obrazie SEM po finalnym cyklu krystalizacji soli
Fig. 12. Macroscopic view and SEM image of travertine samples after salt crystallisation



Ryc. 13. Wskaźnik zwięzłości (*Integrity* I_{Vp}) pod działaniem: **A** – (-t°C); **B** – (+t°C); **C** – roztworu soli
Fig. 13. Deterioration index (*Integrity* I_{Vp}) of longitudinal wave velocity under the influence of: **A** – (-t°C); **B** – (+t°C); **C** – salt



Ryc. 14. Wskaźnik zwięzłości (*Integrity* I_{Rc}) pod działaniem: A – (-10°C); B – ($+10^{\circ}\text{C}$); C – roztworu soli
 Fig. 14. Deterioration index (*Integrity* I_{Rc}) under the influence of: A – (-10°C); B – ($+10^{\circ}\text{C}$); C – salt

Sezonowanie w warunkach zamrozu wywołuje w świeżych trawertynach obu typów spadek wartości I_{Vp} w przedziale 0,98 do 0,72, a I_{Rc} – od 0,78 do 0,12, zaś w dodatniej temperaturze wartość I_{Vp} maleje w przedziale od 0,99 do 0,82, a I_{Rc} – od 0,73 do 0,24. W materiale zwietrzałym (HA) I_{Vp} na koniec sezonowania w warunkach zamrozu wskazuje wartości bliskie 0, a I_{Rc} – 0,12, co świadczy o bardzo zaawansowanej deterioracji.

Mylące mogą być natomiast wartości wskaźnika I_{Vp} ustalone na podstawie badań ultradźwiękowych pod wpływem działania roztworów solnych. Pomiar prędkości fali rejestrują w początkowym okresie starzenia efekt zasklepienia porów wskutek krystalizacji soli w pustkach; prędkość fali wzrasta tym bardziej, im bardziej porowaty jest materiał. Nie odpowiada to zatem rzeczywistemu osłabieniu wytrzymałości, które wykazano na podstawie badań wytrzymałościowych. Wskaźnik I_{Rc} pod działaniem soli waha się od 0,76 do 0,74 w materiale świeżym, a w materiale zwietrzałym wynosi 0,44.

Wnioski

Trawertyny, jak każdy kamienny materiał konstrukcyjny i dekoracyjny narażony na działanie czynników zewnętrznych, ulegają procesowi deterioracji (starzenia). Przebieg tych procesów oraz ich mechanizm można analizować i prognozować na podstawie badań geomechanicznych nieniszczących (ultradźwiękowych) i niszczących (wytrzymałościowych) prowadzonych w warunkach laboratoryjnego sezonowania materiału.

Badania próbek trawertynów z Raciszyna (Polska) oraz Hierapolis (Turcja) wykazują, że – niezależnie od wieku skały, struktury i cech fizyczno-mechanicznych – główną przyczyną utraty pierwotnych walorów materiału jest termiczne rozszerzanie i skurcz oraz ługowanie substancji węglanowej i szczątków organizmów ze skał osłabionych przez agresywne roztwory.

Pod wpływem deterioracji materiał traci jasną barwę, staje się bardziej porowaty, a w kawernach i porach gromadzą się słabo zwięzłe produkty wtórnej krystalizacji. Po wyprzeżowaniu słabszych cząstek w wyniku erozji eolicznej zewnętrzne ściany budowli stają się chropowate i matowe.

Z obserwacji antycznych i współczesnych budowli oraz laboratoryjnych badań porównawczych wynika, że przez długi czas elementy trawertynowe zachowują pierwotną strukturę i rezydualną wytrzymałość. W poddanych wielowiekowej deterioracji trawertynach z antycznego kamieniołomu w Hierapolis nastąpiło 60-procentowe

zwiększenie porowatości oraz 50-procentowe obniżenie wytrzymałości w stosunku do materiału świeżego. W tak zaawansowanym stanie wielowiekowej deterioracji trawertyny stał się bardzo podatny na dalsze cykliczne działanie zmiennej temperatury i uległ kruszeniu i rozpadowi. Charakteryzuje go wskaźnik odporności na deteriorację I_{Rc} rzędu 0,12, podczas gdy materiał świeży cechuje $I_{Rc} = 1$. W tych samych warunkach świeże trawertyny z Hierapolis oraz mocniejsze trawertyny z Raciszyna przyjmują wartości I_{Rc} rzędu 0,72–0,94.

Warto podkreślić, że trawertyny są w stosunku do innych materiałów skalnych mniej podatne na działanie roztworów soli, gdyż może ona swobodnie krystalizować w ich porowatej strukturze skalnej. Powoduje to jednak, że oceny zmian deterioracyjnych monitorowane za pomocą badań nieniszczących mogą być niejednoznaczne.

Literatura

- DRĄGOWSKI A. 1981 – Inżyniersko-geologiczna charakterystyka niszczenia skał masyficznych Wyżyny Lubelskiej w wyniku pęcznienia i skurczenia. *Biul. Geol.*, 29: 1–125, Warszawa.
- ESPINOSA-MARZAL R.M. & SCHERER G.W. 2008 – Study of the pore clogging induced by salt crystallization in Indiana limestone. *Proc. 11th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, 1: 81–88, 15–20.09.2008, Toruń. Wyd. Nauk. UMK.
- ICOMOS-ISCS 2008 – Illustrated glossary on stone deterioration patterns. [W:] Verges-Belmin V. (red.) *Monuments and sites: XV. Champigny/Seine, France*.
- PINIŃSKA J. 2008a – The Lublin siliceous carbonate rocks – a medieval building material, its geological setting, specific properties and deterioration processes. *Proc. 11th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, 1: 725–732, 15–20.09.2008, Toruń. Wyd. Nauk. UMK.
- PINIŃSKA J. 2008b – Models of rock deformation under uniaxial compression conditions. *Geologija*, 50: S108–S115, Vilnius.
- PINIŃSKA J. & EL-METWALLI H. 2008 – Geomechanical study of building materials of the Hawara pyramid (Fayoum, Egypt). *Geologija*, 50: S126–S130, Vilnius.
- PINIŃSKA J., BOBROWSKA A. & PAMUKCU C. 2009 – Badania ultradźwiękowe w ocenie deterioracji skał. *Kwart. AGH Geologia*, 35: 633–639, Kraków.
- PN-85/B-04102 – Materiały kamienne. Oznaczanie mrozoodporności metodą bezpośrednią.
- PN-EN 12370:2001 – Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie odporności na krystalizację soli.
- ROBINSON R. 2000 – Mine gas hazards in the surface environment. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Mining Technology*, 109: A228–A236.
- STEFANIDOU M. & PAPAYIANNI I. 2008 – The porosity of limestone and its behaviour to salt cycles. *Proc. 11th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, 1: 283–290, 15–20.09.2008, Toruń. Wyd. Nauk. UMK.

Praca wpłynęła do redakcji 31.06.2010 r.

Po recenzji akceptowano do druku 26.07.2010 r.