

WPŁYW WYBRANYCH PROCESÓW NISZCZĄCYCH NA TRWAŁOŚĆ PIASKOWCÓW GODULSKICH Z BRENNY

THE INFLUENCE OF THE SELECTED DETERIORATION PROCESSES ON DURABILITY OF THE GODULA SANDSTONES FROM BRENNA

Dominik Łukasiak - Wydział Geologii, Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, Zakład Geomechaniki, Uniwersytet Warszawski

Artykuł podejmuje problematykę trwałości piaskowców godulskich z Brennej, które wykorzystywane są jako elementy konstrukcyjne w licznych obiektach budowlanych na terenie Europy. Tak szerokie wykorzystanie tego surowca skalnego wymusza ocenę jego odporności na działanie czynników niszczących w danych warunkach klimatycznych i funkcjonalnych. Pozwala to rozpoznać trwałość materiału skalnego w długiej skali czasowej oraz przeciwdziałać procesowi deterioracji, czyli pogarszaniu jakości i właściwości fizyko-mechanicznych danego surowca skalnego.

Ocenę trwałości przeprowadzono na materiale pozyskanym z kamieniołomu Głębiec z dwóch stref rozpoznanego profilu wietrzeniowego. Były to piaskowce o charakterystycznym dla tego kamieniołomu, szaroniebieskim i szarozielonym zabarwieniu. W warunkach laboratoryjnych przeprowadzono modelowanie oddziaływania wybranych procesów niszczących na strukturę analizowanego materiału skalnego. Rozpoznano wpływ roztworów wodnych, zamrozu, krystalizacji soli oraz dwutlenku siarki. Dodatkowo podjęto próbę oceny odporności tego materiału na proces ścierania.

Przeprowadzone badania pozwalają stwierdzić, iż eksploatacja analizowanych piaskowców powinna być prowadzona z selektywnym doбором ich przeznaczenia, gdyż charakteryzują się one zróżnicowaną odpornością na deteriorację, zależnie od stopnia zwiędzenia. Jednocześnie uwzględniać należy podatność analizowanego materiału skalnego na destrukcyjne działanie krystalizujących minerałów siarczanowych, co szczególnie widoczne jest w przypadku piaskowców szarozielonych. Powstałe w tym procesie spękania przebiegają najczęściej równolegle do powierzchni stropowej warstw piaskowców. Powyższe uwagi powinny być zatem uwzględniane podczas projektowania przeznaczenia badanych surowców skalnych jako elementów konstrukcyjnych, funkcjonujących w zmiennych warunkach geosrodowiskowych.

Słowa kluczowe: Brenna, piaskowce godulskie, deterioracja

The article deals with durability problems of the Godula sandstones from Brenna, which are used as construction elements in numerous building objects in Europe. So extensive use of this rock material forces evaluation of its resistance to destructive factors under given climatic and functional conditions. This allows to recognize the durability of rock material in a long time scale as well as prevent the process of deterioration that worsens the quality and physio-mechanical properties of the given rock material.

The durability evaluation was carried out on the material acquired from the quarry Głębiec, from two zones of recognized weathering profile. The sandstones had typical colors for this quarry – grey-blue and grey-green. The modeling of the influence of selected deterioration processes on the structure of the analyzed rock material was carried out under laboratory conditions. The influence of water solutions, frost, crystallization of salt and sulfur dioxide were recognized. In addition, attempts to assess the resistance of the material to the process of attrition were taken.

The studies lead to a conclusion that the use of the analyzed sandstones should include selective choice of their destination, because they are characterized by variable resistance to deterioration depending on the weathering degree. At the same time the susceptibility of the analyzed rock material to destructive actions of crystallizing sulfate minerals should be taken into account, which is particularly evident in the case of grey-green sandstones. The cracks resulting from this process usually run parallel to the top tills' surface of the sandstone layers. Therefore the abovementioned observations should be taken into account in the design of the destination of studied rock materials as construction elements, functioning under variable geo-environmental conditions.

Key words: Brenna, Godula sandstones, deterioration

Wstęp

Kamień wykorzystywany jest w architekturze i sztuce ze względu na swoje piękno i trwałość. Jednak z upływem czasu, nawet tak trwałe materiały „starzeje się” i ulega procesowi deterioracji. Przejawia się to stopniowym spadkiem jego walorów dekoracyjnych oraz zmianami właściwości fizyko-mechanicznych [9, 13, 24, 32, 33, 34]. Wahania klimatyczne oraz rozwój cywilizacji, a przede wszystkim przemysłu przyspieszają proces degradacji nawet bardziej odpornych skał. Z punktu widzenia inżynierii skalnej istotne jest zatem ustalenie dominującego czynnika niszczącego oraz prognoza, które procesy będą decydowały o dalszym postępie deterioracji w wymiarze długotrwałym. Podstawowe znaczenie ma więc określenie litogenetycznej podatności skały na działanie czynników niszczących w danych warunkach klimatycznych oraz funkcjonalnych. Jako przykład analizy ukierunkowanej na ocenę deterioracji wybrano karpackie piaskowce godulskie z Brennej, które eksploatowane są w kamieniołomie Głębiec z przeznaczeniem m. in. na elementy okładzinowe. Materiał ten o szarozielonym i szaroniebieskim zabarwieniu wykorzystywany jest zarówno lokalnie w obiektach architektonicznych zlokalizowanych w Beskidzie Śląskim, jak również globalnie, w wybranych aglomeracjach europejskich [4, 16, 21, 30, 35]. Tak szerokie zastosowanie tego surowca skalnego związane jest przede wszystkim z jego właściwościami fizyko-mechanicznymi, które zostały rozpoznane w licznych pracach dotyczących właściwości geomechanicznych karpackich surowców skalnych [3, 11, 14, 22, 23]. Brak jest natomiast kompleksowego opracowania opisującego wytrzymałość długotrwałą tych szczególnych utworów fliszowych w zmiennych warunkach geosrodowiskowych.

Charakterystyka materiału skalnego

Piaskowce godulskie eksploatowane w kamieniołomie Głębiec są utworami fliszowymi powstałymi w środowisku głębokomorskim basenu śląskiego. Skały te występują m. in. w Beskidzie Śląskim stanowiąc element tektoniczny płaszczowiny śląskiej, gdzie ich miąższość przekracza 2000 m. W warstwach godulskich wyróżniono trzy poziomy: dolny, środkowy i górny [5], w których występują piaskowce o zróżnicowanych właściwościach fizyko-mechanicznych [14]. W kamieniołomie Głębiec pozyskiwany jest materiał skalny z poziomu środkowego, który to surowiec został zaliczony do kamieni blocznych o wysokich walorach dekoracyjnych [21].

Cechą charakterystyczną piaskowców z kamieniołomu Głębiec jest ich szarozielone i szaroniebieskie zabarwienie, które jest efektem procesów wietrzeniowych zachodzących w masywie skalnym [17]. W warunkach naturalnych na skutek procesu wietrzenia, zostaje wykształcony charakterystyczny dla danej skały profil wietrzeniowy, uzależniony od cech strukturalnych masywu skalnego. W kamieniołomie Głębiec profil wietrzeniowy, określony na podstawie zasad wg Dragowskiego [6], charakteryzuje się strefą: monolityczną (V), zgruzowania (IV), gruzu grubego (III), gruzu drobnego (II) oraz gliniastą (I). Proces wietrzenia prowadzi zatem do przeobrażenia litej skały macierzystej w rozdrobniony grunt zwietrzelinowy, powodując pogorszenie właściwości geomechanicznych analizowanego surowca skalnego [17]. Spośród rozpoznanych stref profilu wietrzeniowego eksploatacja odbywa się głównie

w strefie monolitycznej i zgruzowania, z których uzyskuje się odpowiednio piaskowce szaroniebieskie – niezwiertzałe oraz szarozielone – zwiertzałe.

Skład mineralogiczny obu analizowanych typów piaskowca jest do siebie zbliżony. Szkielet budują głównie ziarna kwarcu oraz duża ilość fragmentów skalnych [10, 11]. Litoklasty te utworzone są głównie ze skał metamorficznych [24]. Pozostałe składniki występują w mniejszym udziale, w skład których wchodzi skalenie, łyszczyki oraz glaukonit [10]. Spoiwo piaskowców składa się przede wszystkim z krzemionki oraz substancji ilastej, podrzędnie z węglanów. Cechą charakterystyczną dla obu typów piaskowca jest zróżnicowana zawartość substancji ilastej. Zdecydowanie więcej występuje jej w spoiwie piaskowców szarozielonych i jest to efekt dużego zaawansowania procesu wietrzenia w tych piaskowcach. Naturalne procesy niszczące nie wpływają natomiast znacząco na przebudowę tekstury piaskowców ze strefy zgruzowania w odniesieniu do szkieletu materiału ze strefy monolitycznej. W obu typach widoczne jest, w obrazie mikroskopowym, warstwowanie materiału skalnego podkreślone równoległym ułożeniem minerałów łyszczykowych. Taka charakterystyczna tekstura utworów fliszowych determinuje anizotropię właściwości geomechanicznych [17].

Dotychczasowe badania pozwalają stwierdzić, iż właściwości fizyko-mechaniczne analizowanego materiału skalnego w stanie naturalnym sprzyjają wykorzystywaniu go jako zewnętrznych elementów okładzinowych obiektów inżynierskich [24]. Należy jednak przy tym uwzględnić zróżnicowanie właściwości wytrzymałościowych, wynikające z zaangażowania wietrzeniowego badanych piaskowców, jak również z ich cechy strukturalno-teksturalnych [17]. Istotą oceny przydatności danego materiału skalnego jest oprócz charakterystyki właściwości geomechanicznych w stanie naturalnym, ocena zmian tych właściwości w długiej skali czasowej. Dlatego też dla prawidłowej prognozy zachowania się danych surowców skalnych pod presją czynników niszczących niezbędne jest przeprowadzenie laboratoryjnego modelowania procesu deterioracji.

Metodyka badań procesu deterioracji

Proces deterioracji prowadzi do pogorszenia jakości, właściwości materiału skalnego eksploatowanego w obiektach architektonicznych. Ocena tego procesu często jest utrudniona ze względu na kulturową, historyczną czy też zabytkową wagę danego obiektu. Uniemożliwia to scharakteryzowanie i prognozowanie zmian prowadzących do degradacji obiektu. Niezbędne jest zatem tworzenie modeli matematycznych czy też modeli laboratoryjnych mających na celu odtworzenie procesu niszczenia i oceny jego oddziaływania na materiał skalny. Rodzaj modelowania uzależniony jest od funkcji obiektu, czynników zewnętrznych zarówno naturalnych jak i wywołanych działalnością człowieka.

Elewacje obiektów architektonicznych często narażone na oddziaływanie roztworów wodnych, ulegając degradacji na skutek rozpuszczania i wymywania minerałów oraz spoiwa [36]. Dodatkowo migrująca w przestrzeniach porowych woda wpływa na zmianę objętości minerałów pęczniejących [6] oraz pogarsza właściwości geomechaniczne [2, 6, 18, 19, 24], co w konsekwencji może prowadzić do zniszczenia materiału skalnego. Niezbędna jest zatem ocena wpływu zwiększonej wilgotności na trwałości surowców skalnych. Ocenę tę prze-

prowadzono zgodnie z zaleceniami normy PN-85/B04101 [27] na podstawie 20 próbek walcowych.

W strefie klimatu umiarkowanego istotną rolę odgrywa również niszczenie materiału skalnego w wyniku ciśnienia krystalizacyjnego kryształów lodu wywołanego cyklicznymi zmianami temperatury w granicach 0°C. Metoda bezpośrednia oznaczania mrozoodporności skał polega na poddawaniu ich kolejnym cyklom zamrażania i odmrażania i obserwowaniu zachodzących w nich zmian. Miarą mrozoodporności badanego materiału jest stwierdzenie makroskopowo defektów powstałych w wyniku modelowanego zamrozu. Oznaczenie mrozoodporności analizowanych piaskowców wykonano w oparciu o normę PN-85/B04102 [28] wykonując 25 cykli zamrażania i odmrażania. Badanie to przeprowadzono na 20 próbkach walcowych.

Dotychczasowe badania informują, że piaskowce w zewnętrznej wystawie architektonicznej ulegają niszczeniu głównie w wyniku krystalizacji siarczanów z roztworów [12] lub w wyniku procesu usuwania cementu węglanowego i zastępowania go cementem gipsowym [36] na skutek oddziaływania dwutlenku siarki. Procesy te zostały szczegółowo rozpoznane w warunkach laboratoryjnych na tle zmiennej litologii surowców skalnych [1, 7, 8, 15, 31]. Oznaczenie odporności na starzenie analizowanych piaskowców spowodowane działaniem dwutlenku siarki w obecności wilgoci przeprowadzono na 20 próbkach walcowych w oparciu o normę PN EN 13919 [25]. Badanie to polega na umieszczeniu wysuszonych w temperaturze 70°C, a następnie zawilgoconych (mokrych) próbek skalnych w szczelnym pojemniku z roztworem dwutlenku siarki na okres 21 dni. Natomiast badanie odporności skał na krystalizację soli siarczanowych przeprowadzono na 20 próbkach walcowych w oparciu o normę: PN-EN 12370 [26]. Oznaczenie polega na cyklicznym 15-krotnym umieszczeniu wysuszonych w temperaturze 70°C próbek skalnych w 14% dziesięciowodnym roztworze siarczanu sodu. Temperaturę suszenia zmodyfikowano (w odniesieniu do zaleceń powyższej normy) do 70°C, gdyż w warunkach natural-

nych w strefie klimatu umiarkowanego, powierzchnia kamienia eksponowana na działanie promieniowania słonecznego może osiągnąć temperaturę 60-80°C [29].








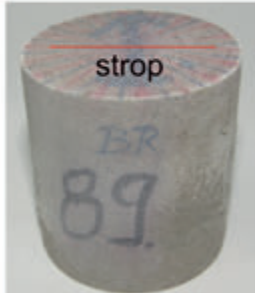
Zewnętrzne elementy okładzinowe narażone są również na abrazję eoliczną oraz ścieranie wywołane działalnością człowieka. Szczególnie podatne są te elementy konstrukcyjne obiektu, które poddawane są antropogenicznemu ścieraniu np. powierzchnie płyt chodnikowych, powierzchnie stopni schodów. W celu oceny odporności na takie mechaniczne czynniki zewnętrzne wykonano oznaczenie ścieralności zgodnie z zaleceniami normy PN-84/B-04111 [29]. Badanie to przeprowadzono na podstawie 18. próbek sześciennych, oceniając stratę ich wysokości po 440 obrotach tarczy szlifierskiej.

Powyższe badania przeprowadzono na próbkach walcowych o średnicy 50 mm i smukłości 1 oraz na próbkach sześciennych o krawędzi 71 mm uwzględniając stopień zaangażowania wietrzeniowego analizowanych piaskowców. Przeprowadzona ocena na 49. próbkach piaskowców szarzielonych i na 49. próbkach piaskowców szaroniebieskich pozwoliła określić trwałość analizowanych piaskowców uwzględniając naturalne i antropogeniczne procesy niszczące.

Wyniki badań

Proces deterioracji prowadzący do degradacji materiału skalnego następuje w wyniku przemian mineralno-strukturalnych skały. Tempo oraz charakter przeobrażeń zależne są od zewnętrznych czynników niszczących oraz od budowy wewnętrznej materiału skalnego. W przypadku utworów klastycznych istotny wpływ na proces deterioracji ma charakter sedymentacji, który warunkuje teksturę skały.

Laboratoryjne modelowanie oddziaływania wody, zamrozu, dwutlenku siarki, krystalizacji soli oraz mechanicznego czynnika ścierającego, pozwala prognozować charakter i tempo zniszczeń w analizowanym materiale skalnym. Po przeprowadzeniu modelowania wpływu wody oraz zamrozu

	stan powietrznosuchy	modelowanie krystalizacji soli Na ₂ SO ₄	stan po cyklach krystalizacji soli	
	obraz makroskopowy próbki		obraz makroskopowy próbki po 12-tym cyklu	obraz makroskopowy próbki po 15-tym cyklu
piaskowiec szarzielony		15 cykli  roztwór: Na ₂ SO ₄ x 10H ₂ O (14g) woda dejonizowana (86g) 1 cykl czas nasączenia: 2h temp. roztworu: 20°C czas suszenia: 12h temp. suszenia: do 70°C		
piaskowiec szaroniebieski		15 cykli  roztwór: Na ₂ SO ₄ x 10H ₂ O (14g) woda dejonizowana (86g) 1 cykl czas nasączenia: 2h temp. roztworu: 20°C czas suszenia: 12h temp. suszenia: do 70°C		

Rys. 1. Zmiany w piaskowcu godulskim powstałe w wyniku laboratoryjnego modelowania krystalizacji soli
Fig. 1. Changes in Godula sandstone due to laboratory test of salt crystallization

nie stwierdzono makroskopowo zmian na powierzchni próbek, zarówno w materiale zwietrzałym jak i niezwiertzałym. Badanie oddziaływania dwutlenku siarki w obecności wilgoci również nie wywołało zmian świadczących o zniszczeniu struktury analizowanych piaskowców. Widoczne są jedynie przebarwienia na powierzchni próbek, które wpływają negatywnie na walory dekoracyjne. Zjawisko to dotyczy w równym stopniu piaskowców szarozielonych i szaroniebieskich.

Spośród analizowanych czynników niszczących największy destrukcyjny wpływ na badany surowiec skalny odnotowano podczas modelowania krystalizacji soli na podstawie uwodnionego siarczanu sodu. W wyniku tego procesu doszło do zniszczenia struktury piaskowców szarozielonych już po 12-tym cyklu krystalizacji soli siarczanowych. Piaskowce szaroniebieskie nie uległy destrukcji nawet po 15-tu cyklach badawczych (rys. 1). Krystalizacja siarczanu sodu oprócz widocznych makroskopowo uszkodzeń mechanicznych prowadzi do tworzenia się kryształów soli na powierzchni materiału skalnego obniżając tym samym jego wartość dekoracyjną. Większą podatność na taką deteriorację charakteryzują się również piaskowce szarozielone.

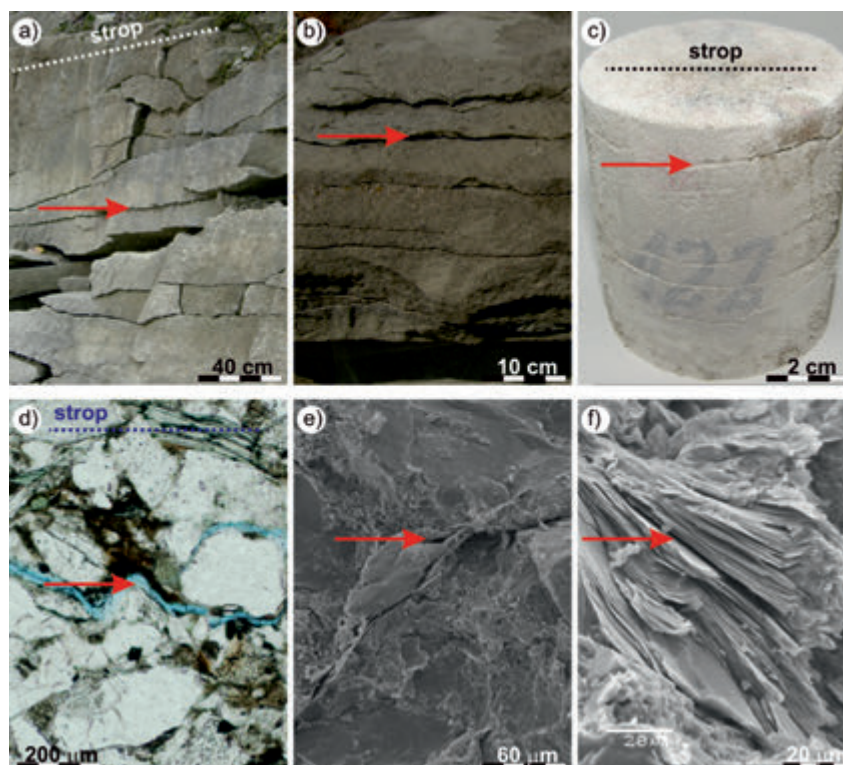
Pozniszczeniowe defekty struktury charakteryzujące mechanizmy towarzyszące procesom pękania zostały opisane w płytkach cienkich, w których zastosowanie odpowiednich niebieskich barwników wypełniających szczelinę utrwalało i eksponowało kształt i charakter defektu (rys. 2). W wyniku przeprowadzonych testów krystalizacji siarczanu sodu stwierdzono, że nacisk spowodowany nukleacją kryształów soli z roztworu w trakcie powtarzającej się hydratacji i dehydratacji siarczanów (mirabilit-tenardyt-mirabilit), spowodował rozluźnienie struktury i powstanie defektów wewnętrznych materiału

skalnego. Mechanizm niszczenia struktury związany jest z krystalizacją izometrycznych kryształów siarczanu sodu, tworzących większe agregaty w przestrzeni porowej analizowanych piaskowców [13].

Analiza zniszczeń powstałych w wyniku krystalizacji soli pozwala stwierdzić, iż uszkodzenia piaskowców ze strefy zgruzowania wystąpiły w postaci spękań równoległych do stropu warstw piaskowców, co ma związek z ich warstwowaniem, które widoczne jest jedynie w obrazie mikroskopowym. Liczba spękań dla uszkodzonych próbek jest zmienna i zwiększa się wraz z kolejnymi cyklami krystalizacji soli. Efekty zniszczenia w wyniku laboratoryjnego modelowania krystalizacji soli są analogiczne do zniszczeń widocznych zarówno w elementach okładzinowych jak również w strefie zgruzowania w kamieniołomie Głębiec (rys. 2).

Wynika zatem, że rozróżnienie piaskowców godulskich pod kątem stopnia ich zwietrzania ma duże znaczenie dla celów surowcowych, gdyż materiał ze strefy zgruzowania charakteryzuje się mniejszą odpornością na proces deterioracji wywołany krystalizacją soli. Podobne zróżnicowanie odnotowano podczas badania ścieralności analizowanych piaskowców. Materiał skalny zwietrzały charakteryzuje się ścieralnością rzędu 0,35 – 0,54 cm, średnio 0,45 cm, natomiast piaskowce niezwiertzałe są bardziej odporne na działanie mechanicznego zewnętrznego czynnika ścierającego. Ścieralność dla tego materiału skalnego waha się w granicach 0,21 – 0,40 cm i średnio wynosi 0,31 cm.

Na podstawie przedstawionych wyników laboratoryjnego modelowania wybranych czynników niszczących należy stwierdzić, że piaskowce eksploatowane w kamieniołomie Głębiec powinny być bezwzględnie analizowane z uwzględnieniem



Rys. 2. Defekty piaskowców godulskich: a) w maszywie skalnym kamieniołomu Głębiec; b) w elemencie okładzinowym obiektu budowlanego w Brennej; c) w próbce po modelowaniu krystalizacji siarczanu sodu; d) w obrazie mikroskopowym materiału zniszczonego w wyniku krystalizacji siarczanu sodu; e); f) w materiale zwietrzałym (SEM)

Fig. 2. Defects of the Godula sandstones: a) in the rock mass of the Głębiec quarry; b) in the cladding element of a building object in Brenna; c) in the sample after modeling the crystallization of sodium sulfate; d) in the photomicroscopy of thin-section of the material destroyed as a result of the crystallization of sodium sulfate; e); f) in the weathered material (SEM)

naturalnego zaangażowania wietrzeniowego. Jest to szczególnie istotne w pracach dotyczących możliwości zastosowania tych piaskowców jako elementów konstrukcyjnych w określonych warunkach środowiskowych, jak również w pracach podejmujących problematykę procesów niszczących, które nie zostały uwzględnione w niniejszym opracowaniu.

Podsumowanie

Piaskowce godulskie z Brennej pozyskiwane w kamieniołomie Głębiec są materiałem skalnym szeroko wykorzystywanym jako materiał budowlany w obiektach architektonicznych w Polsce i Europie. Jego walory dekoracyjne i właściwości fizyko-mechaniczne w stanie naturalnym sprzyjają wykorzystaniu go jako zewnętrznych elementów okładzinowych obiektów inżynierskich. Przeprowadzona w niniejszej pracy ocena wpływu procesów niszczących w długim przedziale

czasowym na właściwości geomechaniczne wykazuje jednak, że odporność piaskowców godulskich z Brennej zmienia się pod wpływem procesów naturalnych oraz antropogenicznych.

Przeprowadzone badania pozwalają stwierdzić, iż eksploatacja analizowanych piaskowców powinna być prowadzona z selektywnym doбором ich przeznaczenia, gdyż charakteryzują się one zróżnicowaną odpornością na deteriorację, zależnie od stopnia zwietrzenia. Jednocześnie uwzględniać należy podatność analizowanego materiału skalnego na destrukcyjne działanie krystalizujących minerałów siarczanowych, co szczególnie widoczne jest w przypadku piaskowców szarozielonych. Powstałe w tym procesie spękania przebiegają najczęściej równoległe do powierzchni stropowej warstw piaskowców. Powyższe uwagi powinny być zatem uwzględniane podczas projektowania przeznaczenia badanych surowców skalnych jako elementów konstrukcyjnych, funkcjonujących w zmieniających warunkach geosrodowiskowych.

Literatura

- [1] Angeli M., *Multiscale study of stone decay by salt crystallization*. Université de Cergy-Pontoise Département des Sciences de la Terre et Environnement. PhD. 2008
- [2] Bromowicz J., *Zmiany właściwości fizyczno-mechanicznych piaskowców magurskich wywołane procesem kruszenia w: Metodyka rozpoznawania i dokumentowania złóż kopalin oraz geologicznej obsługi kopalń*. Kraków. 1998
- [3] Bromowicz J., Gucik S., Magiera J., Moroz-Kopczyńska M., Nowak T. W., Peszat Cz., *Piaskowce karpackie, ich znaczenie surowcowe i perspektywy wykorzystania*. Zeszyty Naukowe Akademii Górniczo-Hutniczej. Geologia. t. 2, z.2. 1976
- [4] Buciak R., *Wietrzenie piaskowców w środowisku miejskim na przykładzie obserwacji okładzin ścian w wyjściach z metra warszawskiego*. Przegląd Geologiczny, vol. 60, nr 10, 2012
- [5] Burtan, J., *Objaśnienia do szczegółowej mapy geologicznej Polski w skali 1 50 000*. Arkusz Wisła. Warszawa. 1973
- [6] Drągowski A., Glazer Z., Kaczyński R., Pinińska J., *Właściwości geotechniczne wybranych gruntów Polski*. Przegląd Geologiczny Nr 2, Warszawa, 1989
- [7] Fahey B. D., *A comparative laboratory study of salt crystallization and salt hydration as potential weathering agents in deserts*. Geografiska Annaler Vol. 68A, Stockholm, 1968
- [8] Flatt R. J., *Salt damage in porous materials: how high supersaturations are generated*. Journal of Crystal Growth. 242. 2002
- [9] Jarząbkiewicz A., *Deterioration processes of historical stone elements and methods of conservation of monuments based on the example of the Powązki Cemetery in Warsaw*. W: Proceedings of the International Symposium Stone consolidation in culture heritage research and practice. Lisbon, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2008
- [10] Jonczy I., *Uwagi o charakterystyce petrograficznej piaskowców godulskich ze złóż w Brennej*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej: Górnictwo 2000
- [11] Kamiński M., Peszat C., Rutkowski J., *O wykształceniu i własnościach technicznych piaskowców godulskich*. Zeszyt naukowy nr 12, Kraków AGH, 1968
- [12] Kasperowicz E., Słaby E., Kościński M., *Wstępne wyniki badań nad pochodzeniem siarki z wykwitów gipsowych powstających w budowlach zabytkowych Warszawy*. Przegląd Geologiczny Tom 52, Nr 3, 2004
- [13] Kłopotowska A., Łukasiak D., *Zmienność wytrzymałościowa piaskowców w warunkach krystalizacji siarczanu sodu oraz oddziaływania dwutlenku siarki*. Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego Tom 446 (2), 2011
- [14] Kozłowski S., *Surowce skalne Polski*. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1986
- [15] Labus M., *Zastosowanie metod modelowania hydrochemicznego w ocenie wietrzenia skał klastycznych na przykładzie piaskowca kredowego ze złoża Radków*. Gospodarka surowcami mineralnymi Tom 26, Nr 1, 2010
- [16] Labus M., *Metody geologiczne w ocenie stanu zachowania kamiennych elementów budowlanych*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2008
- [17] Łukasiak D., *Zmienność wytrzymałościowa piaskowców godulskich z Brennej w warunkach jednoosiowego ściskania*. Kwartalnik Akademii Górniczo-Hutniczej. Górnictwo i Geoinżynieria, rok 34, zeszyt 2, 2010
- [18] Łukasiak D., *Geomechaniczne właściwości margli górnokredowych w rejonie Rejowca Fabrycznego*. W: Budowa geologiczna regionu lubelskiego i problem ochrony litosfery. Wydawnictwo Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej, Lublin 2007

- [19] Łukasiak D., *Geomechaniczna ocena osuwiskowości skał fliszowych w rejonie zbiornika Wisła-Czarne*. Geotechnika w budownictwie i górnictwie, Wrocław 2007
- [20] Łukaszewicz J. W., *Badania i zastosowanie związków krzemooorganicznych w konserwacji zabytków kamiennych*. Wydawnictwo Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń 2002
- [21] Natkaniec-Nowak L., Heflik W., *Kamienie szlachetne i ozdobne Polski*. Wydawnictwo AGH, Kraków 2000
- [22] Peszat C., *Własności techniczne i przydatność przemysłowa piaskowców karpaccich*. Gór. Odkryw. 1976
- [23] Pinińska J., *Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał*. Część IV, Karpaty fliszowe. Zakład Geomechaniki Wydział Geologii UW, Warszawa 2003
- [24] Pinińska J., Attia H.R., *Use of geomechanical researches in the conservation of the stone monuments (Madi Town Temple, Fayoum, Egypt)*. Geol. Quart. 47, 2003.
- [25] Polska Norma PN-EN 13919. Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie odporności na starzenie spowodowane działaniem SO₂ w obecności wilgoci. PKNiM Warszawa
- [26] Polska Norma PN-EN 12370. Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie odporności na krystalizację soli. PKNiM, Warszawa
- [27] Polska Norma PN-85/B-04101, Materiały kamienne. Oznaczenie nasiąkliwości wodą
- [28] Polska Norma PN-85/B04102 Materiały kamienne. Oznaczenie mrozoodporności metodą bezpośrednią
- [29] Polska Norma PN-84/B-04111, Oznaczanie ścieralności na tarczy Boehmego
- [30] Rajchel J., *Z czego zbudowano Kraków*. Wszechświat, t. 108, nr 4-6/2007, Kraków 2007
- [31] Rembiś M., Smoleńska A., *Odporność wybranych piaskowców karpaccich na krystalizację soli i zmiany ich mikrostruktur*. Gospodarka surowcami mineralnymi. Tom 26. Nr 1, 2010
- [32] Rembiś M., Smoleńska A., *Wpływ antropogenicznych zanieczyszczeń atmosfery na zmiany skał użytych do budowy wybranych obiektów zabytkowych Krakowa*. Biul. Inform. Konserwatorów Dzieł Sztuki 9, 3, (34), 1998
- [33] Siegesmund S., Snethlage R., *Stone in Architecture*. Springer, 2011
- [34] Słaby E., Galbarczyk-Gąsiorowska L., Trzciński J., Górka H., Łukaszewski P., Dobrowolska A., *Mechanizm rozpadu piaskowców wywołany krystalizacją soli*. Przegl. Geol. 49. 2, 2001
- [35] Tołkanowicz E., *O brejniu zdań kilka*. Świat Kamienia. nr 6 (31), 2004
- [36] Wilczyńska-Michalik W., Michalik M., *Deterioracja materiałów skalnych w budowlach Krakowa*. Przegląd Geologiczny Tom 43. Nr 3, 1995



fot. Renata S-K

Z cyklu: bogactwo struktury geologicznej skał