

## ZMIENNOŚĆ WYTRZYMAŁOŚCIOWA PIASKOWCÓW W WARUNKACH KRYSZTAŁIZACJI SIARCZANU SODU ORAZ ODDZIAŁYWANIA DWUTLENKU SIARKI

### CHANGEABILITY OF RESISTANCE OF SANDSTONES UNDER CONDITIONS OF CRYSTALLIZATION OF SODIUM SULFATE AND UNDER INFLUENCE OF SULFUR DIOXIDE

AGNIESZKA KŁOPOTOWSKA<sup>1</sup>, DOMINIK ŁUKASIAK<sup>1</sup>

**Abstrakt.** Praca podejmuje problematykę zmian właściwości wytrzymałościowych piaskowców szydłowieckich i godulskich w toku modelowania procesu krystalizacji siarczanu sodu z roztworu oraz oddziaływania dwutlenku siarki w obecności wilgoci. Charakterystykę wytrzymałościową wykonano na podstawie badania wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie piaskowców niezwiędniętych z kamieniołomów Śmiłów i Głębiec. Stwierdzono, że analizowane piaskowce wykazują większą podatność na obniżenie wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie w wyniku krystalizacji siarczanu sodu z roztworu aniżeli w wyniku oddziaływania SO<sub>2</sub> w obecności wilgoci.

**Słowa kluczowe:** wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie, piaskowce szydłowieckie, piaskowce godulskie, siarczan sodu, dwutlenek siarki.

**Abstract.** The purpose of this study was to determine changes in geomechanical properties of two kinds of sandstones (Szydłowiec and Godula) during modeling of salt crystallization process as well as SO<sub>2</sub> action in the presence of humidity. The estimation of resistance was based on uniaxial compressive strength tests. The unweathered samples were taken from two quarries in Poland – Śmiłów and Głębiec (in Brenna). The results indicate that the analyzed sandstones are more susceptible to reduction of uniaxial compressive strength during the crystallization of sodium sulphate rather than as a result of SO<sub>2</sub> action in the presence of humidity.

**Key words:** uniaxial compressive strength, Szydłowiec sandstones, Godula sandstones, sodium sulfate, sulfur dioxide.

### WSTĘP

Krystalizacja soli w kamiennych elementach architektonicznych, zachodząca szczególnie intensywnie w silnie zanieczyszczonym środowisku aglomeracji miejskiej (Wilczyńska-Michalik, 2004), prowadzi niejednokrotnie do częściowej lub całkowitej deterioracji materiału skalnego (Rembiś, Smoleńska 1998, 2010; Smoleńska, Rembiś, 1999; Słaby i in., 2001; Pinińska, Attia, 2003; Pinińska, Dziedzic 2006; Pinińska i in., 2010). Ocena wykwitów solnych na kamiennych elementach budowlanych wskazuje, że jednym z głównych czynników degradujących są związki siarczanowe zawarte w opadach atmosferycznych (Kasperowicz i in., 2004). W związku z powyższym oznaczenie odporności piaskow-

ców na agresywne środowisko aglomeracji miejskiej przeprowadzono na przykładzie krystalizacji siarczanu sodu z roztworu oraz oddziaływania dwutlenku siarki w obecności wilgoci. Ocena zmiany właściwości geomechanicznych analizowano pod kątem utraty wytrzymałości długotrwałej, oznaczonej na podstawie badań wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie. Do analiz wybrano dwa powszechnie stosowane w budownictwie piaskowce o odmiennej porowatości i składzie mineralnym: piaskowiec szydłowiecki z kamieniołomu w Śmiłowie i piaskowiec godulski z kamieniołomu Głębiec w miejscowości Brenna (dalej zwanym piaskowcem z Brennej).

<sup>1</sup> Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii, Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; a.jarzabkiewicz@student.uw.edu.pl; dominik.lukasziak@uw.edu.pl

## CHARAKTERYSTYKA PETROGRAFICZNA

Piaskowiec szydłowiecki odznacza się drobnoziarnistą strukturą, dobrym wysortowaniem i charakterystycznym spoiwem kwarcowym w postaci regeneracyjnych obwódek, a także lokalnie występującym spoiwem krzemionkowo-ilasnym w formie niewielkich skupień (fig. 1). Niemal monomineralnym składnikiem skały są słabo obtoczone ziarna kwarcu (97%) o pokroju w większości izometrycznym i rozmiarach w zakresie 0,08 do 0,15 mm (Kłopotowska, 2011). Ponadto w skale zaznacza się również obecność niewielkich ilości ziaren polikrystalicznego kwarcu i okruchów skał kwarcowych. Sporadycznie pojawiają się też ziarna cyrkonu i żółtawego turmalinu. Przestrzenne rozmieszczenie składników ziarnowych determinuje porowatość piaskowców na poziomie 22,5%.

Piaskowiec godulski z Brennej jest natomiast polimineralną skałą składającą się z ziaren kwarcu, których zawartość określono średnio na 57,9% (Kamieński i in., 1968) oraz 50,2% (Jonczy, 2000), a także dużej ilości fragmentów skalnych, średnio 13,3% (Kamieński i in., 1968) oraz 10,9% (Jonczy, 2000). Litoklasty te utworzone są głównie ze skał metamorficznych (Pinińska, 2003). Pozostałe składniki występują w mniejszym udziale, są to skalenie oraz łyszczyki i glaukonit. Spoiwo piaskowca buduje głównie krzemionka oraz substancja ilasta, podrzędnie węglany. W stosunku do piaskowca szydłowieckiego materiał z Brennej charakteryzuje się mniejszą porowatością (7%).

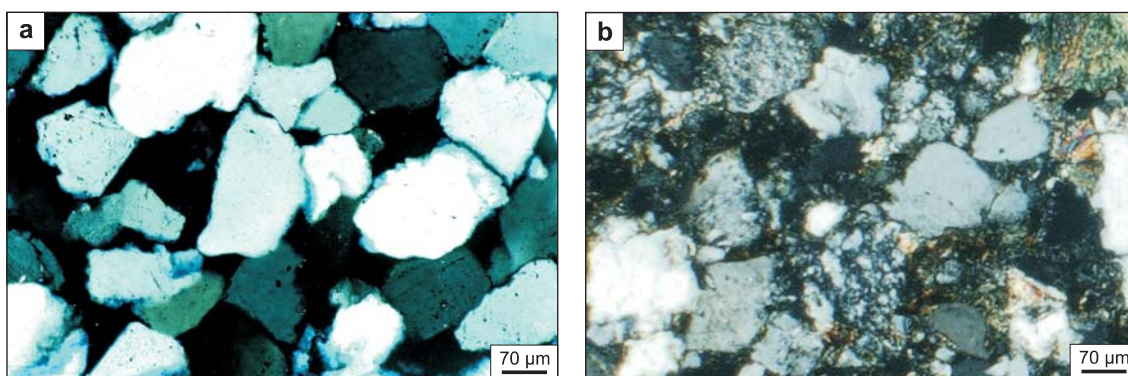


Fig. 1. Obraz mikroskopowy piaskowców przy skrzyżowanych nikolach: a – szydłowieckiego ze Śmiłowa, b – godulskiego z Brennej

Photomicroscopy of thin sections of sandstones under transmitted light with crossed polarizers: a – Szydłowiec sandstone from Śmiłów, b – Godula sandstone from Brenna

## METODYKA BADAŃ

Ocena zmienności wytrzymałości piaskowców została określona na materiale skalnym pozyskanym z kamieniołomów Śmiłów i Głębiec, uwzględniając jego podatność na naturalne procesy wietrzenia. Oznaczenie wpływu zanieczyszczonego środowiska miejskiego na wytrzymałość piaskowców przeprowadzono na „świeżym”, niezwiędłym materiale skalnym za pomocą modelowania laboratoryjnego krystalizacji soli oraz oddziaływania dwutlenku węgla w obecności wilgoci.

Badanie odporności skał na krystalizację soli siarczanowych przeprowadzono zgodnie z normą: PN-EN 12370: 2001 na 4 próbkach piaskowca szydłowieckiego i 6 próbkach piaskowca godulskiego. Oznaczenie polega na cyklicznym, 15-krotnym umieszczeniu wysuszonych w temperaturze 70°C próbek skalnych w 14% dziesięciowodnym roztworze siarczanu sodu. Temperaturę suszenia zmodyfikowano z normowych 105°C do 70°C, gdyż w warunkach naturalnych w strefie klimatu umiarkowanego powierzchnia kamie-

nia ekspozowana na działanie promieniowania słonecznego może osiągnąć temperaturę 60–80°C (Łukaszewicz, 2002).

Oznaczenie odporności na starzenie spowodowane działaniem SO<sub>2</sub> w obecności wilgoci przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 13919: 2004 na 4 próbkach piaskowca szydłowieckiego i 6 próbkach piaskowca godulskiego. Badanie 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.

Po zakończeniu modelowania zanieczyszczonej atmosfery próbki skalne poddano badaniu wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie. Przeprowadzono je w prasie sztywnej MTS-815, zgodnie z procedurą stosowaną w badaniach właściwości wytrzymałościowych i odkształceniowych skał (Pinińska, 2003) oraz z normą PN-84/B-04110. Na podstawie uzyskanych wartości wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie wyznaczono współczynniki odporności ( $w_x$ ) na kry-

talizację soli i na działanie  $\text{SO}_2$  w obecności wilgoci, zgodnie z poniższą formułą:

$$w_x = R_{c_x} / R_{c_{ps}}$$

gdzie:

- $w_x$  – współczynnik odporności na: krystalizację soli ( $w_{\text{Na}_2\text{SO}_4}$ ), starzenie spowodowane działaniem  $\text{SO}_2$  w obecności wilgoci ( $w_{\text{SO}_2}$ ) [-],  
 $R_{c_x}$  – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie próbki po zakończeniu badania odporności na: krystalizację

soli ( $R_{c_{\text{Na}_2\text{SO}_4}}$ ), starzenie spowodowane działaniem  $\text{SO}_2$  w obecności wilgoci ( $R_{c_{\text{SO}_2}}$ ) [MPa],

$R_{c_{ps}}$  – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie próbki w stanie powietrznosuchym [MPa].

Współczynniki odporności ( $w_x$ ) określają ilościowe zmiany wytrzymałości w stosunku do wartości wytrzymałości dla materiału w stanie powietrznosuchym, oznaczonej w wyniku badań wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie.

## WYNIKI BADAŃ

### ODPORNOŚĆ NA KRYSZTAŁIZACJĘ SOLI

W wyniku przeprowadzonych testów krystalizacji siarczanu sodu stwierdzono, że nacisk wywołały nukleację 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 (fig. 2). Proces ten prowadzi do obniżenia wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie zarówno w przypadku piaskowca szydłowieckiego, jak i godulskiego w odniesieniu do wytrzymałości tych skał w stanie powietrznosuchym.

Piaskowiec szydłowiecki w stanie powietrznosuchym charakteryzuje się wytrzymałością 81–87 MPa (średnio 85 MPa) (Kłopotowska, 2011), natomiast modelowanie krystalizacji soli różnicowało wytrzymałość materiału skalnego w zakresie 43–91 MPa (średnio 65 MPa). W przypadku piaskowca godulskiego wytrzymałość w stanie powietrznosuchym waha się w granicach 155–182 MPa (średnio 165 MPa) (Łukasiak, 2010), podczas gdy zmiany strukturalne determinowane krystalizacją siarczanów obniżyły wytrzymałość do wartości 139–163 MPa (średnio 148 MPa).

Zmniejszenie wytrzymałości piaskowców w wyniku modelowania krystalizacji siarczanów występuje dla obu grup badawczych. Jednakże piaskowiec szydłowiecki ze względu na wyższą porowatość i nasiąkliwość charakteryzuje się większą podatnością na zmiany wytrzymałości niż piaskowiec


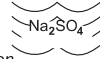

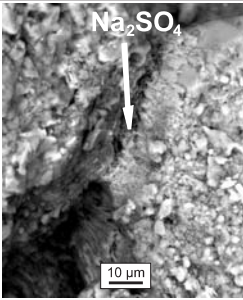

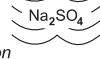

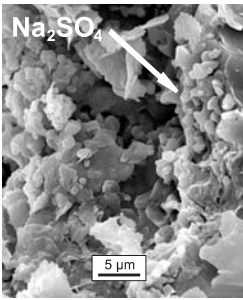
	stan powietrznosuchy <i>air-dry state</i>	modelowanie krystalizacji soli $\text{Na}_2\text{SO}_4$ <i>modelling of salt crystallization <math>\text{Na}_2\text{SO}_4</math></i>	stan po krystalizacji $\text{Na}_2\text{SO}_4$ <i>state after crystallization <math>\text{Na}_2\text{SO}_4</math></i>	
	obraz makroskopowy <i>macroscopic image</i>		obraz makroskopowy <i>macroscopic image</i>	obraz mikroskopowy (SEM) <i>microscope image (SEM)</i>
piaskowiec szydłowiecki <i>Szydłowiec sandstone</i>		15 cykli <i>15 cycles</i>  roztwór / <i>solution</i> $\text{Na}_2\text{SO}_4 \times 10\text{H}_2\text{O}$ (14 g) woda dejonizowana (86 g) <i>deionized water</i> 1 cykl / <i>1 cycle</i> temperatura roztworu 20°C <i>temperature of solution</i> czas suszenia 12h <i>drying time</i> temp. suszenia 70°C <i>drying temperature</i>		
piaskowiec godulski <i>Godula sandstone</i>		15 cykli <i>15 cycles</i>  roztwór / <i>solution</i> $\text{Na}_2\text{SO}_4 \times 10\text{H}_2\text{O}$ (14 g) woda dejonizowana (86 g) <i>deionized water</i> 1 cykl / <i>1 cycle</i> temperatura roztworu 20°C <i>temperature of solution</i> czas suszenia 12h <i>drying time</i> temp. suszenia 70°C <i>drying temperature</i>		

Fig. 2. Zmiany w piaskowcach szydłowieckim i godulskim powstałe w wyniku laboratoryjnego modelowania krystalizacji soli

Changes in Szydłowiec and Godula sandstones due to laboratory tests of salt crystallization




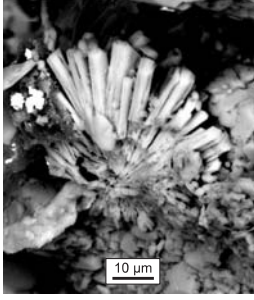



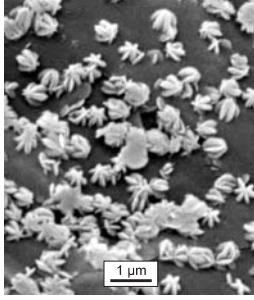
	stan powietrznosuchy <i>air-dry state</i>	modelowanie działania SO <sub>2</sub> obecności wilgoci <i>modelling of sulphur dioxide action with humidity</i>	stan po działaniu SO <sub>2</sub> <i>state after action SO<sub>2</sub></i>	
	obraz makroskopowy <i>macroscopic image</i>		obraz makroskopowy <i>macroscopic image</i>	obraz mikroskopowy (SEM) <i>microscope image (SEM)</i>
piaskowiec szydlowiecki <i>Szydłowiec sandstone</i>		czas 21 dni <i>time 21 days</i>  roztwór/solution kwas siarkowy (IV) <i>sulphuric acid (IV)</i> (500 ml) woda demineralizowana <i>demineralized water</i> (150 ml) temperatura 20°C <i>temperature</i>		
piaskowiec godulski <i>Godula sandstone</i>		czas 21 dni <i>time 21 days</i>  roztwór/solution kwas siarkowy (IV) <i>sulphuric acid (IV)</i> (500 ml) woda demineralizowana <i>demineralized water</i> (150 ml) temperatura 20°C <i>temperature</i>		

Fig. 3. Zmiany w piaskowcach szydlowieckim i godulskim powstałe w wyniku laboratoryjnego modelowania oddziaływania SO<sub>2</sub> w obecności wilgoci

Changes in Szydłowiec and Godula sandstones due to laboratory tests of the SO<sub>2</sub> action

godulski, co obserwowane jest podczas kolejnych cykli badawczych. Opisuje to współczynnik odporności na krystalizację soli ( $w_{Na_2SO_4}$ ), który dla piaskowca szydlowieckiego wynosi 0,77, a 0,90 dla piaskowca godulskiego.

#### ODPORNOŚĆ NA STARZENIE SPOWODOWANE DZIAŁANIEM SO<sub>2</sub> W OBECNOŚCI WILGOCI

Badanie wpływu atmosfery zanieczyszczonej związkami SO<sub>2</sub>, modelowanej w warunkach laboratoryjnych, wykazało nieznaczne przeobrażenia struktury analizowanych piaskowców. Zmianie uległa barwa większości badanych próbek na skutek obecności siarki i węgla na ich powierzchni. W kilku przypadkach wewnątrz przestrzeni porowej w obrazie mikroskopowym (SEM) rozpoznano nowe fazy mineralne w postaci kryształów gipsu, które pojawiły się w wyniku reakcji związków siarczanowych z substancją węglanową w obecności wilgoci (fig. 3).

Nieznaczna krystalizacja gipsu w przestrzeni porowej nie wpłynęła na właściwości wytrzymałościowe piaskowców, gdyż w obu typach litologicznych wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie pozostała na zbliżonym poziomie w odniesieniu do wytrzymałości piaskowców w stanie powietrznosuchym. Dla piaskowca szydlowieckiego wytrzymałość po oddziaływaniu SO<sub>2</sub> waha się od 83 do 86 MPa (średnio 85 MPa), zaś dla piaskowca godulskiego w granicach 155–171 MPa (średnio 164 MPa) – figura 4. Współczynnik odporności na działanie SO<sub>2</sub> ( $w_{SO_2}$ ) wyniósł 1,00 dla piaskowca szydlowieckiego oraz 0,99 dla piaskowca godulskiego.

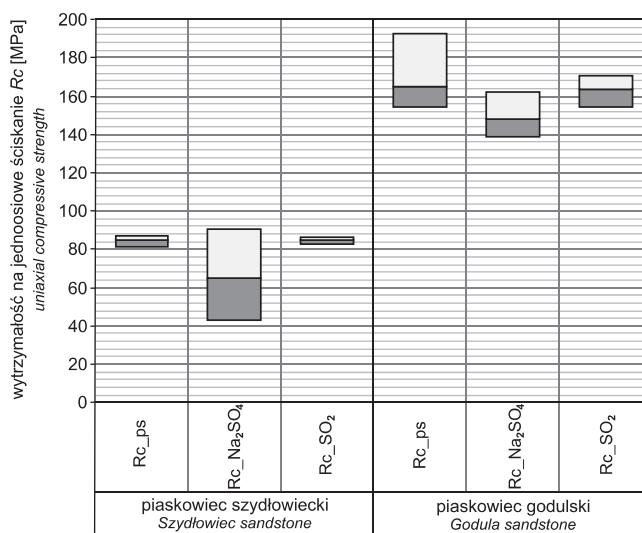


Fig. 4. Zakresy wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie piaskowców szydlowieckiego i godulskiego poddanych krystalizacji soli oraz działaniu SO<sub>2</sub> w obecności wilgoci w odniesieniu do materiału w stanie powietrznosuchym

Ranges of uniaxial compressive strength of Szydłowiec and Godula sandstones subjected to salt crystallization and SO<sub>2</sub> action in the presence of humidity in relation to the material in the air-dry state

## PODSUMOWANIE

Symulacje laboratoryjne procesów starzeniowych umożliwiły wyróżnienie wyraźnych tendencji zachowania się badanych piaskowców pod wpływem wybranych zewnętrznych czynników niszczących. Zmiany, jakie zaszły w wyglądzie i strukturze próbek poddanych działaniu niekorzystnych wpływów krystalizującej soli oraz dwutlenku siarki, można podzielić na jakościowe oraz ilościowe.

Krystalizujący siarczan sodu z roztworu nie powoduje istotnych zmian w wyglądzie zewnętrznym piaskowców godulskich, podczas gdy w piaskowcu szydłowieckim w znacznym stopniu obniża estetykę tych skał, niszcząc ich powierzchnię zewnętrzną na skutek dezintegracji granularnej. Jednakże ciśnienie generowane krystalizacją soli w przestrzeni porowej powoduje rozluźnienie struktury zarówno w piaskowcach z Brennej, jak i ze Śmiłowa, powodując obniżenie odporności mechanicznej na działanie sił zewnętrznych. Z zestawienia obserwacji makroskopowych z testami wytrzymałościowymi wynika, że piaskowce szydłowieckie

charakteryzują się brakiem odporności na krystalizujący siarczan sodu.

Modelowanie oddziaływania zanieczyszczonej atmosfery związkami  $\text{SO}_2$ , dowodzi, że materiał szydłowiecki i godulski nie jest podatny na zmiany właściwości wytrzymałościowych w wyniku reakcji ze szkodliwymi związkami  $\text{SO}_2$ . Pomimo dużej porowatości piaskowców szydłowieckich, umożliwiającej migrację dwutlenku siarki w strukturę skały, nie dochodzi do znaczącej liczby reakcji dwutlenku siarki ze składnikami spoiwa, o czym świadczą nieliczne, nowo powstałe kryształy gipsu. Związane jest to ubogą zawartością substancji węglanowej, która jest niezbędna do powstania nowych faz mineralnych, wywierających nacisk na szkielet skały.

Wynika zatem, że analizowane piaskowce wykazują większą podatność na krystalizację siarczanu sodu z roztworu aniżeli w wyniku oddziaływania  $\text{SO}_2$  w obecności wilgoci.

## LITERATURA

- JONCZY I., 2000 — Uwagi o charakterystyce petrograficznej piaskowców godulskich ze złóż w Brennej. *Zesz. Nauk. PŚl., Górnictwo*, **246**, 1.
- KAMIENSKI M., PESZAT C., RUTKOWSKI J., 1968 — O wykształceniu i własnościach technicznych piaskowców godulskich. *Zesz. Nauk. AGH*, **12**.
- KASPEROWICZ E., SŁABY E., KOŚCIŃSKI M., 2004 — Wstępne wyniki badań nad pochodzeniem siarki z wykwitów gipsowych powstających w budowach zabytkowych Warszawy. *Prz. Geol.*, **52**, 3: 223–228.
- KŁOPOTOWSKA A., 2011 — Odporność piaskowca szydłowieckiego na krystalizację soli w aspekcie wzmacniania strukturalnego. *Górnictwo i Geoinżynieria, Kwart. AGH*, **35**, 2: 341–347.
- ŁUKASIAK D., 2010 — Zmienność wytrzymałościowa piaskowców godulskich z Brennej w warunkach jednoosiowego ściskania. *Górnictwo i Geoinżynieria, Kwart. AGH*, **34**, 2: 43–441.
- ŁUKASZEWICZ J., 2002 — Badania i zastosowanie związków krzemooorganicznych w konserwacji zabytków kamiennych. UMK, Toruń.
- PINIŃSKA J., 2003 — Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał. Cz. IV, Karpaty fliszowe. Katalog. Zakład Geomechaniki Wydziału Geologii UW, Warszawa.
- PINIŃSKA J., ATTIA H.R., 2003 — Use of geomechanical researches in the conservation of the stone monuments (Madi Town Temple, Fayoum, Egypt). *Geol. Quart.*, **47**, 1: 1–12.
- PINIŃSKA J., BOBROWSKA A., PAMUKCU C., 2010 — Laboratoryjne badania procesu deterioracji trawertynowych elementów konstrukcyjnych. *Prz. Geol.*, **58**, 9/2: 879–885.
- PINIŃSKA J., DZIEDZIC A., 2006 — Zakład Geomechaniki Wydziału Geologii UW, Warszawa.
- PN-EN 12370: 2001. Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie odporności na krystalizację soli. PKNiM, Warszawa.
- PN-EN 13919: 2004. Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie odporności na starzenie spowodowane działaniem  $\text{SO}_2$  w obecności wilgoci. PKNiM, Warszawa.
- PN-84/B-04110. Oznaczanie wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie. PKNiM, Warszawa.
- REMBIŚ M., SMOLEŃSKA A., 1998 — Wpływ antropogenicznych zanieczyszczeń atmosfery na zmiany skał użytych do budowy wybranych obiektów zabytkowych Krakowa. *Biul. Inf. Konserw. Dzieł Sztuki*, **9**, 3: 30–37.
- REMBIŚ M., SMOLEŃSKA A., 2010 — Odporność wybranych piaskowców karpaccich na krystalizację soli i zmiany ich mikrostruktur. *Gosp. Sur. Min.*, **26**, 1: 39–59.
- SŁABY E., GALBARCZYK-GĄSIOROWSKA L., TRZCIŃSKI J., GÓRKA H., ŁUKASZEWSKI P., DOBROWOLSKA A., 2001 — Mechanizm rozpadu piaskowców wywołany krystalizacją soli. *Prz. Geol.*, **49**, 2: 124–133.
- SMOLEŃSKA A., REMBIŚ M., 1999 — Zmiany mikrostrukturalne wapieni jurajskich, użytych w wybranych obiektach zabytkowych, jako efekt antropogenicznych zanieczyszczeń atmosfery. *Ochrona Zabytków*, **1**: 34–38.
- WILCZYŃSKA-MICHALIK W., 2004 — Influence of atmospheric pollution on the weathering of stones in Cracow monuments and rock outcrops in Cracow-Częstochowa Upland and the Carpathians. Wyd. Nauk. Akad. Pedagog., Kraków.

## SUMMARY

The paper takes the issue of the resistance of stone material exposed to crystallization of salt and sulphur dioxide. Two types of sandstones with different structure were chosen as samples of stones used in architecture. The first type is the monomineral Szydłowiec sandstone from Śmiłów, which is characterized by fine-grained structure, well sorted quartz grains and typical quartz cement in the form of regenerative rims as well as locally occurring siliceous-clayey cement in the form of little concentrations. The second lithological type is Godula sandstone from Brenna with polymineral grain composition, characterized by low porosity (7%) in comparison to Szydłowiec sandstones (23%).

The evaluation of Szydłowiec and Godula sandstones under conditions of crystallization of salt and under influence of sulfur dioxide was carried out through modeling of effects of deteriorating factors under laboratory conditions. On one hand, the examination of stone resistance to crystallization of sulfate salt was based on the PN-EN 12370:2001 standard. On the other hand, the evaluation of resistance to aging caused by SO<sub>2</sub> action in the presence of humidity was based on the PN-EN 13919:2004 standard. After the modeling of polluted atmosphere had been finished, stone samples were tested on uniaxial compressive strength. It was carried out in a rigid press MTS-815, according to the procedure used in studies of strength and deformation properties of stones (Pinińska, 2003) as well as on the basis of the PN-84/B-04110 standard.

As a result of crystallization of sodium sulfate tests it was stated, that the pressure caused by nucleation of crystals of salt from solution during repeated hydration and dehydration of sulfates (mirabilite–thenardite–mirabilite), caused loosening of the structure and formation of internal defects of stone material. The reduction of resistance of sandstones by modeling of sulfate crystallization occurs in both studied groups. However, Szydłowiec sandstone was observed during consecutive study cycles to be more susceptible to resistance changes than Godula sandstone, because of larger porosity and water absorption.

The study of influence of atmospheric pollution by SO<sub>2</sub> compounds showed insignificant transformations of structures of analyzed sandstones. Colours of most of the samples changed as a result of the presence of sulphur and coal on their surfaces. New mineral phases in the form of gypsum crystals were observed under scanning by electron microscope (SEM) inside the porous space. They appeared as a result of reaction between sulphate compounds and carbonate substance in the presence of humidity. Insignificant crystallization of gypsum in porous space did not influence strength properties of sandstones, because in both lithological types uniaxial compressive strength stayed at similar level in comparison to uniaxial compressive strength of sandstones under dry conditions.