

WPŁYW CECH PETROLOGICZNYCH NA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE SOLI KAMIENNEJ Z LGOM (LEGNICKO-GŁOGOWSKIEGO OKRĘGU MIEDZIOWEGO)

EFFECT OF PETROLOGICAL FEATURES ON MECHANICAL PROPERTIES OF ROCK SALT FROM THE LGOM (LEGNICA-GŁOGÓW COPPER DISTRICT)

KATARZYNA CYRAN¹, TOMASZ TOBOŁA², PAWEŁ KAMIŃSKI¹

Abstract. W pracy podjęto próbę oceny wpływu zawartości i rodzaju domieszek na parametry wytrzymałościowe soli kamiennej z obszaru LGOM (Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego) (rejon szybu SW4). Badania przeprowadzono w trzech etapach: testy wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie, analiza ilościowa i jakościowa części nierozpuszczalnych oraz obserwacje mikroskopowe soli i badania ramanowskie. Wyniki badań wykazały, że w przypadku soli kamiennych w niewielkim stopniu zanieczyszczonych (zawartość części nierozpuszczalnych 0,13–2,11% wag.), nie stwierdzono korelacji między zawartością części nierozpuszczalnych w wodzie a parametrami wytrzymałościowymi. Natomiast zauważono, że właściwości wytrzymałościowe zależą od cech petrologicznych skał solnych, takich jak sposób rozmieszczenia zanieczyszczeń oraz obecność inkluzji i węglowodorów na granicach kryształów halitu. Ponadto badania wykazały, że rozmieszczenie anhydrytu w formie otoczek na granicach kryształów halitu może powodować wzrost wytrzymałości skały. Z kolei, występowanie inkluzji fluidalnych i węglowodorów na kontakcie kryształów halitu wpływa na obniżenie wytrzymałości skały solnej.

Słowa kluczowe: parametry wytrzymałościowe, petrologia soli, zawartość części nierozpuszczalnych, inkluzje fluidalne, mikrospektroskopia ramanowska, materia organiczna.

Abstract. The paper presents the attempt to find a correlation between the content of impurities and mechanical parameters of rock salt from the LGOM. Research was carried out in three steps: uniaxial compressive strength tests, determination of the content of insoluble minerals (impurities), and observations under the microscope and Raman microspectroscopy. The research results reveal that the rock salt which is characterized by low content of insoluble minerals (0.13–2.11% wt.) shows no correlation between the mechanical properties and the content of impurities. However, it was found that mechanical properties depend on both the distribution of impurities in halite crystals and the presence of fluid inclusions and hydrocarbons along the crystal boundaries. Moreover, the distribution of anhydrite at the edges of halite crystals may influence an increase of rock salt strength. On the contrary, the presence of fluid inclusions and hydrocarbons along the halite crystal boundaries may reduce the rock salt strength.

Key words: mechanical parameters, rock salt petrology, content of insoluble minerals, fluid inclusions, Raman microspectroscopy, organic matter.

WSTĘP

Zainteresowanie właściwościami mechanicznymi soli kamiennej oraz mechanizmem deformacji halitu (Carter, Hansen, 1983; Drury, Urai, 1990; Carter i in., 1993; Schlöder, Urai, 2005, 2007; Berest i in., 2012; Desbois i in., 2012) jest

związane z problematyką magazynowania m.in. paliw kopalnych, odpadów, dwutlenku węgla czy innych mediów (Langer, 1993; Hunsche, Hampel, 1999; Perry, 2005; Düsterloh, Lux, 2010) w strukturach solnych. Geneza, skład mineralny,

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; e-mail: keyran@agh.edu.pl, pkamin@agh.edu.pl.

² AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; e-mail: tob@geolog.geol.agh.edu.pl.

głębokość położenia czy historia geologiczna formacji solonośnych przyczyniają się do zróżnicowania petrologicznego soli kamiennych. Z kolei, zmienność petrologiczna, w tym zawartość, rodzaj i forma występowania domieszek, wpływają na właściwości mechaniczne soli kamiennych (Pouya, 1991; Hunsche i in., 1996; Popp, Kern, 2000; Popp i in., 2001; Zong i in., 2012; Liang i in., 2012; Jie i in., 2015). Ilościowe i jakościowe zdefiniowanie tej zależności, jak również wpływ domieszek na mechanizm i rodzaj deformacji wymaga dalszych badań.

ZARYS BUDOWY GEOLOGICZNEJ POKŁADU NAJSTARSZEJ SOLI KAMIENNEJ W REJONIE LGOM

Obszar LGOM obejmuje południowo-zachodnią część monokliny przedsudeckiej (fig. 1A) zbudowanej z utworów permu i triasu pokrytych niezgodnie występującymi osadami kenozoicznymi. Utwory permu wykazują wyraźną dwudzielność – dolną część stanowią osady terygeniczne czerwonego spągowca z wkładkami skał wulkanicznych (m.in. Ryka, 1978; Pokorski, Wagner, 1995; Peryt, Oszczepalski, 2007), natomiast górną ewaporaty cechsztynu, które, podobnie jak w pozostałej części basenu sedimentacyjnego, zostały podzielone na cztery cyklotemy (Kłapciński, 1964a, b; Szybist, 1976; Peryt, 1981). W rejonie LGOM w pełni są rozwinięte osady cyklotemu PZ1, które zawierają pokład soli kamiennych (fig. 2). Pozostałe trzy cyklotemy są wykształcone na tym obszarze w facji siarczanowej.

W pracy podjęto próbę opisanie korelacji pomiędzy parametrami wytrzymałościowymi a wykształceniem petrologicznym soli kamiennych. W badaniach wykorzystano próbki soli z Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego (LGOM) z rejonu szybu SW4. Analizowane sole makroskopowo wykazywały podobne cechy petrologiczne, natomiast pomierzone wartości parametrów wytrzymałościowych były zróżnicowane.

Pokład najstarszej soli kamiennych w rejonie LGOM leży na głębokości 20–120 m nad łupkiem miedzionośnym. Sól występuje (fig. 1B) w rejonie środkowej i północnej części obszaru kopalni Sieroszowice oraz na północnym skraju obszaru kopalń Rudna i Głogów Głęboki-Przemysłowy (Banaszak i in., 2007; Garlicki i in., 2007).

Najstarsza sól kamienna (Na1) tworzy nieregularny, monoklinalnie zapadający pokład o rozciągłości w kierunku WNW–ESE i zapadaniu pod kątem 3–8° (lokalnie do 15°) ku NE (Banaszak i in., 2007; Garlicki i in., 2007; Markiewicz, 2007). Monoklinalne zapadanie pokładu jest zaburzone przy powierzchni spągowej, gdzie występują deniwelacje 27–172 m. Strop pokładu soli charakteryzuje mniejsze zróżnicowanie morfologiczne, a deniwelacje sięga-

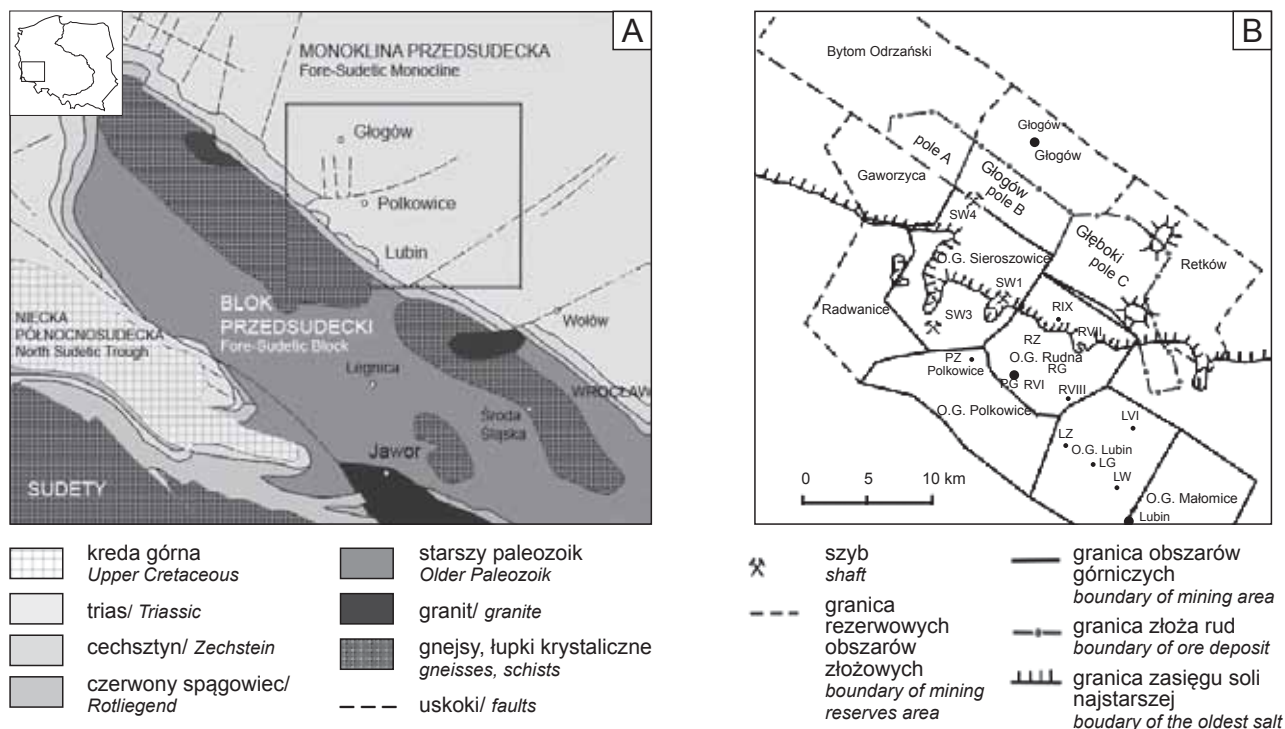


Fig. 1. Lokalizacja obszaru badań (wg Dadleza i in., 2000, zmieniony; Markiewicza i in., 2002)

A – budowa geologiczna, B – granica występowania soli kamiennych

Study area (after Dadlez *et al.*, 2000, modified; Markiewicz *et al.*, 2002)

A – geological structure, B – rock salt occurrence area

ją 20 m (Markiewicz, 2007). Zróżnicowanie morfologiczne powierzchni stropu i spągu pokrywa się ze zmianami miąższości pokładu, która waha się od 0 na południu do 295,5 m w północno-zachodniej części obszaru LGOM. Na obszarze górniczym Sieroszowice I i Głogów Głęboki-Przemysłowy miąższość pokładu wynosi maksymalnie 186 m (Banaszak i in., 2007; Garlicki i in., 2007; Markiewicz, 2007).

Kontakt najstarszej soli kamiennej z warstwami anhydrytu dolnego jest ostry i wyraźny, a powierzchnia anhydrytu jest nachylona średnio pod kątem 3–6°, natomiast sól kamienna od położonego nad nią anhydrytu górnego oddzielona jest warstwą brekcji anhydrytowej o średniej miąższości ok. 3 m (Kijewski, 1986).

Najstarsza sól kamienna charakteryzuje się znacznym zróżnicowaniem petrologicznym. Biorąc pod uwagę wielość kryształów halitu oraz formy i ilości zanieczyszczeń, wyróżniono siedem typów soli kamiennej (Szybist, 1976). W złożu najczęściej są spotykane sole średnio- i grubokrystaliczne, miejscami nierównoziarniste i porfiropodobne. W spągowej części pokładu przeważa sól laminowana, średniokrystaliczna, szara masywna, natomiast w środkowej i górnej sól różnokrystaliczna o większej czystości. Zanieczyszczenia soli stanowią najczęściej anhydryt i substancja ilasta, które występują w formie równomiernie rozproszonej lub w postaci skupień i okruchów zróżnicowanej wielkości i kształtu. W podrzędnych ilościach spotykane są także kalcyt, tlenki żelaza i kwarc (Szybist, 1976; Kijewski, Salski, 1978; Kijewski, 1986).

Z kolei przewarstwienia w obrębie pokładu najstarszej soli kamiennej tworzą warstwy anhydrytu, którym często towarzyszą brekcje anhydrytowo-solne (Toboła, 2014). Na podstawie analizy petrograficznej wyróżniono cztery typy makroskopowe skał anhydrytowych. W obrazie mikroskopowym stwierdzono występowanie pięciu odmian kryształów różniących się wielkością, kształtem, sposobem ułożenia itp. Opisane zróżnicowanie jest związane z zaangażowaniem tektonicznym utworów. Ponadto występowanie brekcji jest efektem tektonicznego mieszania się anhydrytu i soli kamiennej (Toboła, 2014).

Pokład soli najstarszej charakteryzuje się wewnętrznymi zaburzeniami tektonicznymi, zmianami kątów upadu, komplikacjami w ułożeniu poszczególnych warstw oraz powtarzaniem się tych samych utworów w profilu. Występują

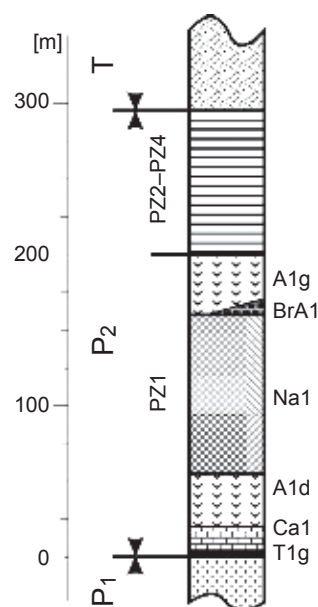


Fig. 2. Profil litostratygraficzny osadów cechsztynu w rejonie LGOM (wg Kłapcińskiego, 1964a)

A1g – anhydryt górny, BrA1 – brekcja ilowo-anhydrytowa, Na1 – sól najstarsza, A1d – anhydryt dolny, Ca1 – wapień cechsztyński, T1 – łupek miedzionośny

Lithostratigraphic section of Zechstein sediments in the LGOM area (after Kłapciński, 1964a)

A1g – Upper Anhydrite, BrA1 – clayey-anhydrite breccia, Na1 – Oldest Halite, A1d – Lower Anhydrite, Ca1 – Zechstein Limestone, T1 – Kupferschiefer

także struktury świadczące o wtórnych zmianach geodynamicznych pod wpływem naprężeń tektonicznych, np. żyły i gniazda z solą wtórną, kierunkowe ułożenie wydłużonych kryształów (Poborski, 1976; Szybist, 1976; Kijewski, Salski, 1978; Markiewicz, Żelaźniewicz, 1990; Toboła, Markiewicz, 2009). Ponadto, sole laminowane i warstwowane domieszką iłu i anhydrytu są często zafałdowane. Zafałdowania te mają amplitudy od kilku centymetrów do kilku metrów i formy od symetrycznych po obalone (Markiewicz, Mantke, 1990; Markiewicz i in., 2002). W obrębie soli stwierdzono również spękania tensyjne i ścięciowe, częściej występujące w solach zailonych (Markiewicz, Żelaźniewicz, 1990; Markiewicz, 2007).

ZMIENNOŚĆ PARAMETRÓW WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH SOLI KAMIENNEJ Z POLSKICH FORMACJI GEOLOGICZNYCH

Proces deformacji soli składa się z dwóch faz oddzielonych granicznym naprężeniem, przy którym pojawia się względny przyrost objętości, nazwany dylatacją. W pierwszej fazie procesu deformacji objętość próbki stopniowo spada w wyniku kompaktacji. Następnie, po fazie deformacji sprężystych, dochodzi do rozwoju mikrospękań i ich propagacji, w wyniku czego objętość próbki zaczyna wzrastać (próg mikro-dylatacji). W kolejnym etapie następuje nie-

kontrolowana propagacja spękań (próg makro-dylatacji) aż do zniszczenia próbki (Fossum i in., 1993; Hunsche, Hampel, 1999; Schulze i in., 2001; Moriya i in., 2006; Liang i in., 2012; Jie i in., 2015). Opisany przebieg deformacji jest charakterystyczny dla wszystkich rodzajów soli, jednak wartość granicy dylatacji różni się dla poszczególnych serii solnych.

Charakterystyki odkształceniowo-naprężeniowe dla soli kamiennej ze złóż cechsztyńskich wykazują nieliniowość w prawie całym zakresie naprężeń (Flisiak, 2004, 2008; Grzybowski i in., 2008). Próg względnego przyrostu objętości dla soli kamiennej z formacji cechsztyńskiej pojawia się średnio przy naprężeniach osiowych odpowiadających ok. 20% wartości wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie (Flisiak, 2004; 2008). Poszczególne, zróżnicowane petrologicznie próbki charakteryzują się odmiennymi wartościami granicy dylatacji, np. dla soli z wysadu Mogilno granica dylatacji wahają się między 5,13–43,97% wartości wytrzymałości (Grzybowski i in., 2008). Z kolei średnią granicę makrodylatacji dla soli kamiennej ze złoża Kłodawa określono na poziomie ok. 55% wytrzymałości. Natomiast wartości dla poszczególnych próbek wahają się między 28,57–73,36% wytrzymałości (Flisiak, Kolano, 2012; Kolano, Flisiak, 2013). Próg dylatacji dla soli kamiennej z mioceńskiej formacji solonośnej określono na poziomie ok. 35% wartości wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie (Cyran, 2008; Flisiak, Cyran, 2008).

Wartości wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie (R_c) dla soli kamiennej ze złóż formacji cechsztyńskiej wahają się między 25,43–41,43 MPa. Podobnie wartości modułu sprężystości podłużnej (E – moduł Younga), określone w zakresie liniowości charakterystyk naprężeniowo-odkształceniowych, są zróżnicowane w zakresie 0,77–5,95 MPa (tab. 1). Należy podkreślić, że wartości współczynników odkształcalności podłużnej są wyższe dla soli ze złoża pokładowego LGOM w porównaniu do wartości określonych dla soli ze złóż wysadowych (tab. 1). Z kolei, wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie dla soli z formacji mioceńskiej kształtuje się na podobnym poziomie jak w przypadku formacji cechsztyńskiej, przy czym wartości modułu Younga są niższe (tab. 2). Wartości modułu odkształcalności poprzecznej (ν – liczba Poissona) są bardziej zróżnicowane dla soli z formacji mioceńskiej.

Wszystkie opisane powyżej parametry charakteryzują znaczne zróżnicowanie wartości związane z wielkością i ułożeniem kryształów soli, zawartością domieszek, głębokością występowania i historią geologiczną.

Tabela 1

Parametry wytrzymałościowe soli kamiennej ze złóż formacji cechsztyńskiej (wg Flisiaka, 2004, 2008; Grzybowski i in., 2008; Kleczka i Zeljaś, 2012)

Mechanical parameters of Zechstein rock salt (after Flisiak, 2004, 2008; Grzybowski *et al.*, 2008; Kleczek, Zeljaś, 2012)

Złoże	Opis petrologiczny	Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie R_c [MPa]	Moduł Younga E [GPa]	Liczba Poissona ν
Góra	sól biała drobno- i średnioziarnista	33,69	0,87	0,23
	sól biała gruboziarnista	28,23	0,77	0,34
	sól różowa drobnoziarnista	41,43	1,08	0,28
Dębina	sól jasnoszara, średnio- i gruboziarnista	25,43	4,67	0,25
Mogilno	sól biała średnioziarnista	26,91	1,42	0,35
	sól szara średnio- i gruboziarnista	30,30	1,27	0,32
LGOM	sól drobno i średniokrystaliczna biała i ciemnoszara	30,78	3,17	0,24
	sól gruboziarnista jasnoszara i szara	26,03	1,99	0,28
	Sól grubo- i średnioziarnista biała	34,08	5,95	0,25

Tabela 2

Parametry wytrzymałościowe soli kamiennej ze złóż formacji mioceńskiej wg Cyran, 2008; Flisiaka, Cyran, 2008)

Mechanical parameters of Miocene rock salt (after Cyran, 2008; Flisiak, Cyran, 2008)

Złoże	Opis petrologiczny	Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie R_c [MPa]	Moduł Younga E [GPa]	Liczba Poissona ν
Siedlec	sól średnioziarnista szara i biała	29,69	1,31	0,17
	sól średnioziarnista szara	25,93	2,29	0,23
	sól kryształowa	23,33	1,63	0,22
	sól drobnoziarnista szara i biała	26,22	1,81	0,35
Łęzkowice	sól średnioziarnista szara i biała	37,96	2,02	0,15
	sól szara od średnio- do gruboziarnistej	33,57	1,14	0,10
	sól drobnoziarnista, szara	32,49	0,83	0,30
	sól pasiasta drobno- i średnioziarnista	36,36	2,85	0,10

METODY BADAŃ

Ocenę wpływu zawartości i rodzaju domieszek na parametry wytrzymałościowe soli kamiennej z obszaru LGOM (rejon szybu SW4) przeprowadzono w następujących etapach:

- etap 1 – testy wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie, określenie modułów odkształcalności podłużnej i poprzecznej;
- etap 2 – określenie zawartości części nierozpuszczalnych w próbkach poddanych testom wytrzymałościowym w etapie 1;
- etap 3 – obserwacje mikroskopowe i badania ramanowskie.

Próby jednoosiowego ściskania zostały przeprowadzone w maszynie wytrzymałościowej o napędzie hydraulicznym z automatycznym posuwem tłoka i rejestracją siły. Przygotowano 16 próbek walcowych o wymiarach 5×10 cm. Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie, zgodnie z zaleceniami ISRM – the International Society for Rock Mechanics, określono na podstawie stosunku maksymalnej siły niszczącej, otrzymanej przy jednoosiowym ścisaniu próbki w prasie, do pola przekroju poprzecznego. Prędkość przyrostu obciążenia wynosiła 1 MPa/s.

Próbki soli po badaniach wytrzymałości rozpuszczono w wodzie. Substancje nierozpuszczalne oddzielono z roztworu wodnego na sączku membranowym o rozmiarach porów poniżej $0,45 \mu\text{m}$. W celu określenia rodzajów i formy występowania zanieczyszczeń do badań mineralogiczno-

-petrograficznych wytypowano próbki z grup charakteryzujących się najwyższymi i najniższymi wartościami wytrzymałości na ściskanie. W pierwszej kolejności z soli kamiennych wymienionych grup wycięto prostopadłościany o boku 5 cm. Następnie wykonano preparaty mikroskopowe (płytki cienkie polerowane dwustronnie) o grubości ok. 2 mm. Pozostałe części prostopadłościanów poddano szlifowaniu i polerowaniu, przygotowując do obserwacji z wykorzystaniem lupy binokularnej i do badań ramanowskich. Obserwacje mikroskopowe przeprowadzono przy użyciu lupy binokularnej MONTIC SMZ168 z powiększeniem od 0,75 do 5 razy oraz mikroskopu polaryzacyjnego do światła przechodzącego BA310 Pol wyposażonego w obiektywy o powiększeniu 4-, 10-, 40- i 60-krotnym.

Badania ramanowskie przeprowadzono na spektrometrze Thermo Scientific™ DXR używając lasera 532 nm (Nd-YAG). Ponadto spektrometr był wyposażony w mikroskop konfokalny Olympus BX51 z obiektywami o powiększeniu 10-, 50- i 100-krotnym. W przypadku analizy inkluzji organicznych stosowana moc lasera wynosiła 1–2 mW, natomiast dla inkluzji ciekło-gazowych oraz wzrostków stałych – 5 mW. Analizę wykonano przy aperturze $25 \mu\text{m}$ i siatce 900 linii/mm. Średnica skupienia wiązki lasera w punkcie pomiarowym wynosiła ok. $1 \mu\text{m}$, a otrzymane widmo ramanowskie charakteryzowało się rozdzielczością ok. 1cm^{-1} .

WYNIKI BADAŃ

CHARAKTERYSTYKA PARAMETRÓW WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH

Do badań wytrzymałościowych wybrano próbki soli kamiennej z przedziału głębokości 1078–1135 m p.p.t. Na podstawie cech makroskopowych skał solnych wydzielono następujące grupy (fig. 3):

- 1) grupa 1 – sól kamienna białoszara, średnioziarnista, miejscami drobnoziarnista, pojedyncze ziarna z domieszką prawdopodobnie iłowca, widoczne pojedyncze, nieregularne smugi prawdopodobnie iłowca;
- 2) grupa 2 – sól kamienna białoszara, średnio- i drobnoziarnista, pojedyncze ziarna z domieszką prawdopodobnie iłowca;
- 3) grupa 3 – sól kamienna białoszara, średnioziarnista, miejscami gruboziarnista, pojedyncze ziarna z domieszką prawdopodobnie iłowca;
- 4) grupa 4 – sól kamienna szara, grubo-, miejscami średnioziarnista, widoczne pojedyncze, nieregularnie przebiegające smugi prawdopodobnie iłowca.

Badania laboratoryjne wykazały, że najwyższą wartość wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie zarejestrowano dla próbek z grupy czwartej (w przedziale 30,57–33,63 MPa), natomiast najniższą dla soli kamiennej z grupy trzeciej

(16,31–19,38 MPa). Pozostałe grupy (grupa 1 i 2) charakteryzują się wytrzymałością na podobnym poziomie (20,87–27,52 MPa).

Wartości modułu Younga, określone w zakresie liniowości charakterystyk naprężeniowo-odkształceniowych, dla badanych próbek wahają się między 3,80–8,15 GPa. Średnia wartość modułu Younga dla próbek z grupy czwartej jest najwyższa (7,23 GPa), natomiast najniższą wartość odnotowano dla próbek z grupy pierwszej (4,03 GPa). Na zbliżonym poziomie (4,56 GPa) kształtują się wartości modułu Younga dla próbek z grupy trzeciej. Z kolei, wartości liczby Poissona dla badanych próbek, obliczone w zakresie liniowości charakterystyk naprężeniowo-odkształceniowych, zawierają się w zakresie 0,22–0,44. Próg makrodylatacji jest zróżnicowany dla poszczególnych próbek, wynosi 32–57% wartości wytrzymałości na ściskanie (fig. 4).

Ponadto próbki soli z grup trzeciej i czwartej, po przeprowadzeniu próby wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie, charakteryzują się odmiennymi cechami makroskopowymi. Sole z grupy czwartej nie rozpadły się w wyniku przeprowadzenia testu, jakkolwiek są widoczne spękania na granicach kryształów. Próbki z grupy trzeciej uległy natomiast dezintegracji.

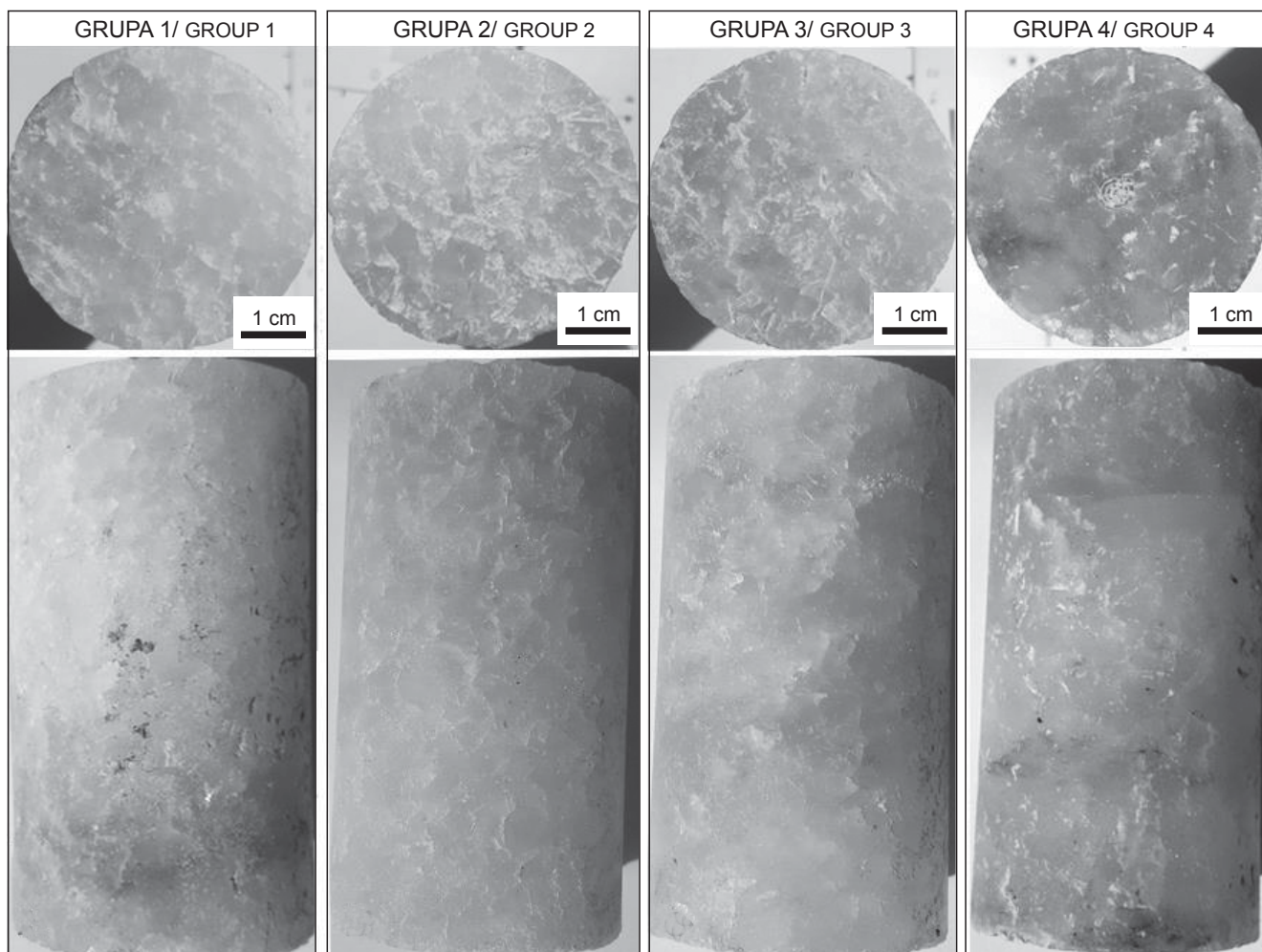


Fig. 3. Makroskopowe wykształcenie badanych próbek soli kamiennej

Macroscopic features of rock salt samples

Zawartość części nierozpuszczalnych we wszystkich badanych próbkach utrzymuje się na podobnym poziomie od 0,13 do 2,11% wag. Najwyższą średnią zawartość części nierozpuszczalnych zanotowano w grupie czwartej – 1,43% wag., a najniższą w grupie drugiej – 0,58% wag.

Porównując ze sobą powyższe parametry nie stwierdzono korelacji pomiędzy wartością wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie badanych próbek, a zawartością części nierozpuszczalnych (współczynnik korelacji wynosi 0,24) (fig. 5). W związku z tym, zróżnicowanie parametrów wytrzymałościowych badanych soli nie jest lub jedynie w małym stopniu jest związane z ilością zanieczyszczeń.

CHARAKTERYSTYKA MIKROSKOPOWA SKAŁ SOLNYCH O SKRAJNYCH PARAMETRACH WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH

Badania mikroskopowe próbek soli przeprowadzono dla skał charakteryzujących się najwyższymi (grupa 4) i najniższymi (grupa 3) wartościami wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie. Wspólną cechą obu grup soli jest występowanie kryształów anhydrytu o rozmiarach od ok. 0,1 mm do ponad

0,7 mm (fig. 6A) i wykształceniu automorficznym, rzadziej hipautomorficznym. Spotykane są także kryształy o obłych kształtach i rozmiarach około kilkudziesięciu mikrometrów (fig. 6B).

Charakterystyczną cechą kryształów anhydrytu, stanowiącego główną domieszkę w badanych próbkach, jest obecność na jego powierzchni ciemnobrunatnych skupień (fig. 6A, B). Analiza ramanowska (fig. 6C) wykazała, że brunatne skupienia stanowi substancja organiczna o pewnym stopniu uporządkowania budowy wewnętrznej (Beysac i in., 2002, 2003; Rahl i in., 2005; Aoya i in., 2010; Lahfid i in., 2010; Kouketsu i in., 2014; Lünsdorf i in., 2014; Lünsdorf, 2016). W widmie ramanowskim pierwszego rzędu (w zakresie 1000–1800 cm^{-1}) jest widoczne wyraźne, wyższe i węższe pasmo GL (ok. 1600 cm^{-1}) oraz szersze i niższe D1 (ok. 1350 cm^{-1}). Widma są rozdzielone stosunkowo wysokim siodłem (pasmo D3 ok. 1500 cm^{-1}). Opisany rozkład przypomina widmo dla bardzo słabo uwęglonej substancji organicznej (Kouketsu i in., 2014) lub bituminów stałych o niewielkim stopniu dojrzałości (Jehlička i in., 1997, 2003, 2007). W większości analizowanych próbek jest widoczne także pasmo w zakresie 1400–

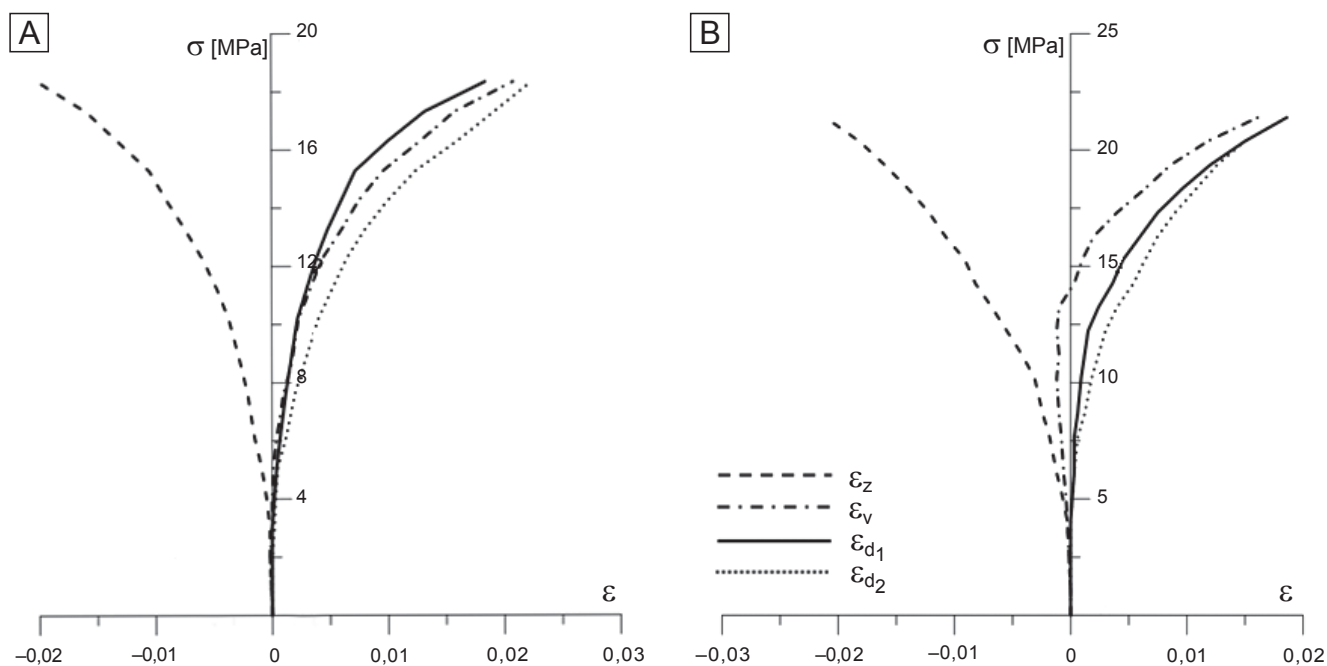


Fig. 4. Charakterystyka naprężeniowo-odkształceniowa badanych grup próbek

A – grupa 3; B – grupa 4; ϵ_z – odkształcenia podłużne; ϵ_v – odkształcenia objętościowe; ϵ_{d1} , ϵ_{d2} – odkształcenia poprzeczne

Stress-strain characteristics of samples

A – group 3; B – group 4; ϵ_z – axial strain; ϵ_v – volumetric strain; ϵ_{d1} , ϵ_{d2} – transverse strain

1440 cm^{-1} , którego pochodzenie wiązane jest z drganiami charakterystycznymi dla wiązań CH_2 (Orange i in., 1995; Jehlička i in., 2007).

Rozkład widm ramanowskich dla poszczególnych fragmentów materii organicznej jest zróżnicowany (fig. 6C) przede wszystkim pod względem wysokości siodła. Rozkła-

dy z wyżej położonym siodłem mają wyraźniejsze pasmo 1400–1440 cm^{-1} oraz bardzo niesymetryczne pasmo D1. Natomiast pasmo GL posiadające bardziej połogie skrzydło jest charakterystyczne dla wyższych wartości przesunięcia ramanowskiego (powyżej 1600 cm^{-1}). Rozkłady o niższym siodle charakteryzują się bardziej symetrycznymi pasmami

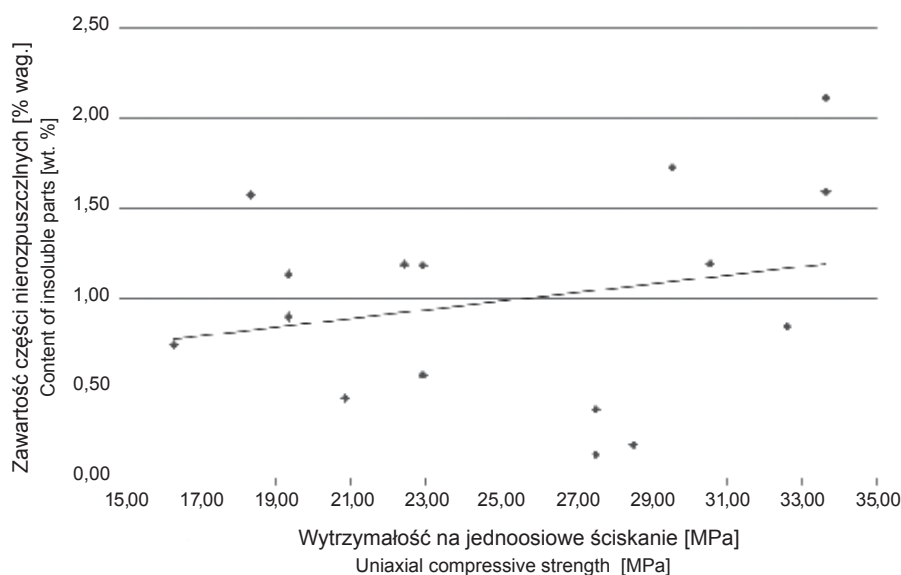


Fig. 5. Korelacja między zawartością części nierozpuszczalnych a wytrzymałością na ściskanie

Correlation between the content of insoluble parts and the uniaxial compressive strength

D1 i GL (fig. 6C) oraz niewidocznym lub słabo zaznaczającym się pasmem 1400–1440 cm^{-1} . Opisane różnice sugerują różny stopień przeobrażenia materii organicznej.

Rozkłady widm ramanowskich na cztery podstawowe pasma według procedury zaproponowanej przez Kouketsu i in. (2014) wykazały, że dla widm o wysokim siodle są one niejednoznaczne i trudne do przeprowadzenia. W przypadku widm o niższym siodle i symetrycznych pasmach GL i D1 rozkłady są bardziej jednoznaczne, a obliczone temperatury mieszczą się w przedziale 74–154°C (tab. 3).

W omawianych grupach próbek soli zawartość części nierozpuszczalnych w wodzie jest na podobnym poziomie. Próbkę różni się sposobem rozmieszczenia zanieczyszczeń, głównie anhydrytu i inkluzji fluidalnych. Rozmieszczenie anhydrytu w grupie skał o najniższej wytrzymałości jest równomierne, tworzy on smugi luźno ułożonych kryształów (fig. 6D). Z kolei w grupie skał o najwyższych parametrach wytrzymałościowych anhydryt jest skupiony na granicach

kryształów halitu, tworząc otoczkę, podczas gdy wewnętrzne części kryształów halitu są czyste (fig. 7A).

W obu grupach skał nie stwierdzono występowania nawet reliktyw zespołów inkluzji pierwotnych a jedynie wtórnych, które są częściej spotkane w grupie 3 niż 4. Zespoły te są zbudowane z inkluzji o różnych kształtach i rozmiarach od kilku do ponad 100 μm . Kształt mniejszych inkluzji jest regularny, sześcienny i tworzą one zespoły o krótkich przebiegach, często nieco falistych (fig. 7B). Większe inkluzje o zarysach nieregularnych, obłych, wchodzą w skład zespołów o dłuższych, bardzo nieregularnych przebiegach, często gwałtownie zanikających (fig. 7B). Opisane inkluzje należą do grupy gazowych lub ciekło-gazowych z wyraźną przewagą gazu.

Najrzadziej spotykane są zespoły inkluzji bardzo silnie wydłużonych, rurkowatych o długościach dochodzących do ponad 200 μm (fig. 7C). Inkluzje tego typu są ze sobą połączone w formie sieci. Przeważnie są ciekłe lub ciekło gazowe o zmiennych proporcjach faz. Przebiegi tego typu

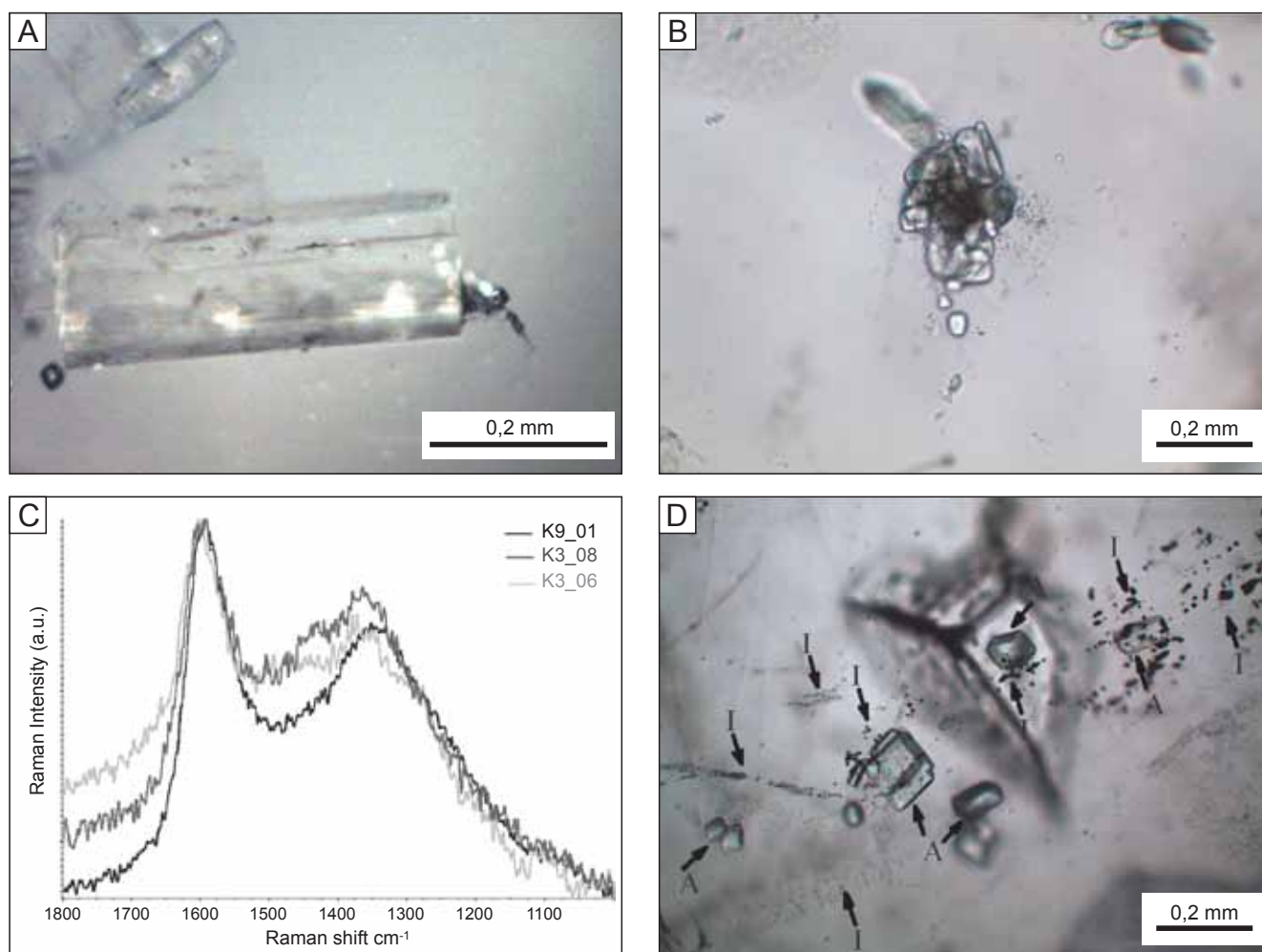


Fig. 6. A. Automorficzne kryształy anhydrytu z brązowymi skupieniami na powierzchni. B. Skupienie kryształów anhydrytu o obłych zarysach. C. Przykładowe widma ramanowskie brązowych skupień na granicach kryształów anhydrytu.

D. Kryształy anhydrytu (A) i zespoły inkluzji fluidalnych (I) w solach z grupy 3

- A. Automorphic anhydrite crystals with brown accumulations on the surface. B. Accumulations of anhydrite crystals rounded in shape. C. Selected Raman spectra of brown accumulations along anhydrite crystal boundaries. D. Anhydrite (A) crystals and groups of fluid inclusions (I) in salt from group 3

Tabela 3

Wartości szerokości połówkowych i obliczona temperatura przeobrażeń materii organicznej wg procedury Kouketsu i in. (2014)

Values of full width at half maximum (FWHM) and calculated temperature of organic matter according to Kouketsu *et al.* (2014)

Nr próbki	Szerokość połówkowa (FWHM)				Temp. [°C]
	D4 (ok. 1250 cm ⁻¹)	D1 (ok. 1350 cm ⁻¹)	D3 (ok. 1500 cm ⁻¹)	G (ok. 1600 cm ⁻¹)	
K3_04	162,94	173,35	192,66	62,21	105,30
K3_06	197,15	159,57	225,25	67,66	134,93
K3_07	131,91	150,71	261,04	58,75	153,97
K3_08	122,50	187,87	300,00	58,76	74,09
K3_09	100,48	172,06	247,14	64,93	108,07
K3_10	86,77	185,45	140,96	71,92	79,28
K3_11	96,71	181,79	205,91	67,96	87,15
K3_29	145,75	159,40	188,90	65,96	135,28

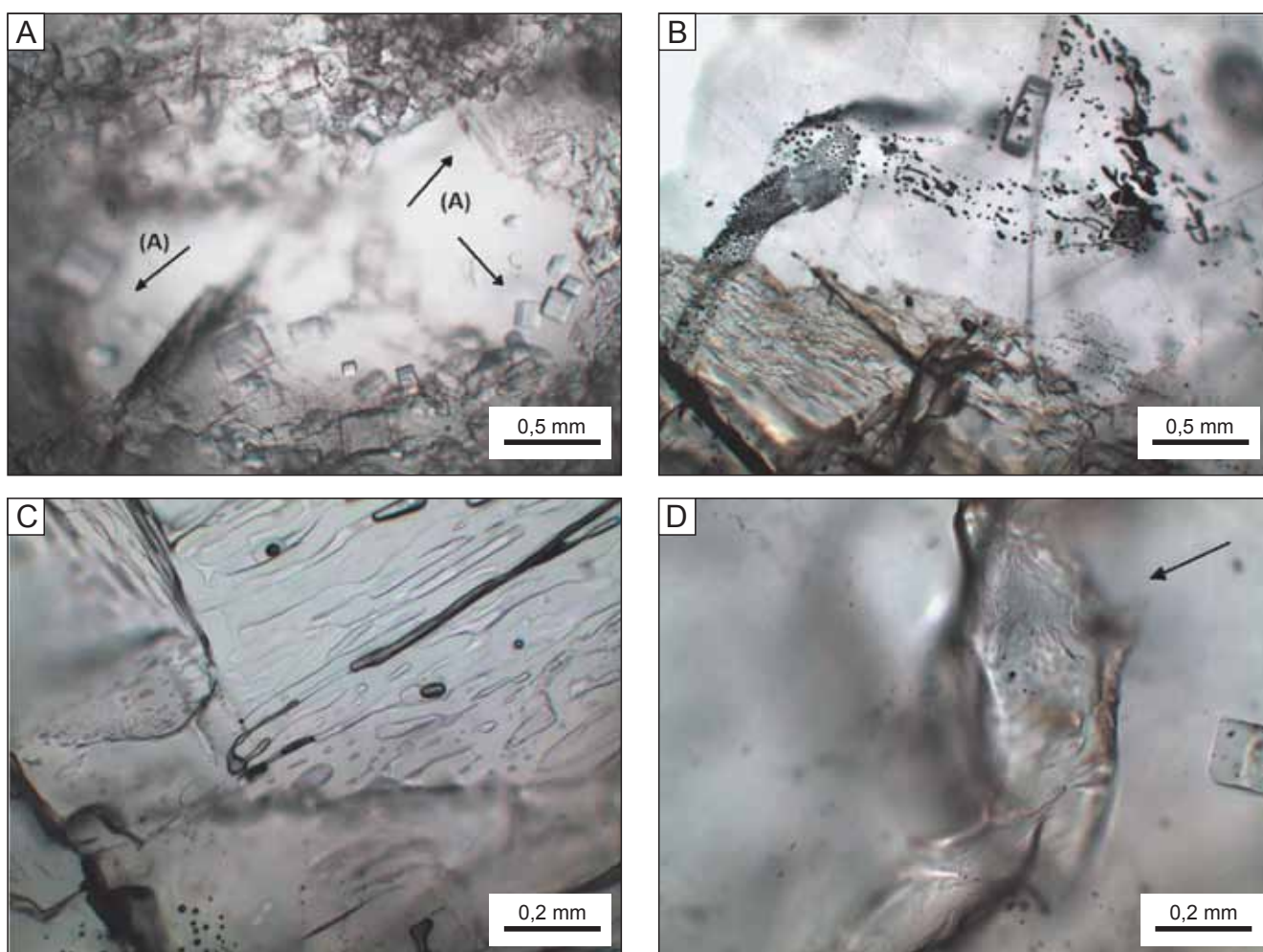


Fig. 7. A. Nagromadzenia anhydrytu (A) rozmieszczone na granicach kryształów halitu. B. Zespoły inkluzji fluidalnych złożone z bardzo małych inkluzji oraz większych o nieregularnych zarysach. C. Zespół rurkowatych inkluzji o różnych proporcjach fazy gazowej do ciekłej. D. Inkluzje na granicach kryształów halitu

A. Accumulations of anhydrite (A) distributed along halite crystal boundaries. **B.** Groups of fluid inclusions consisting of small inclusions and larger irregular inclusions. **C.** Group of tube shaped inclusions with different ratios of gas to liquid phase.

D. Inclusions along halite crystal boundaries

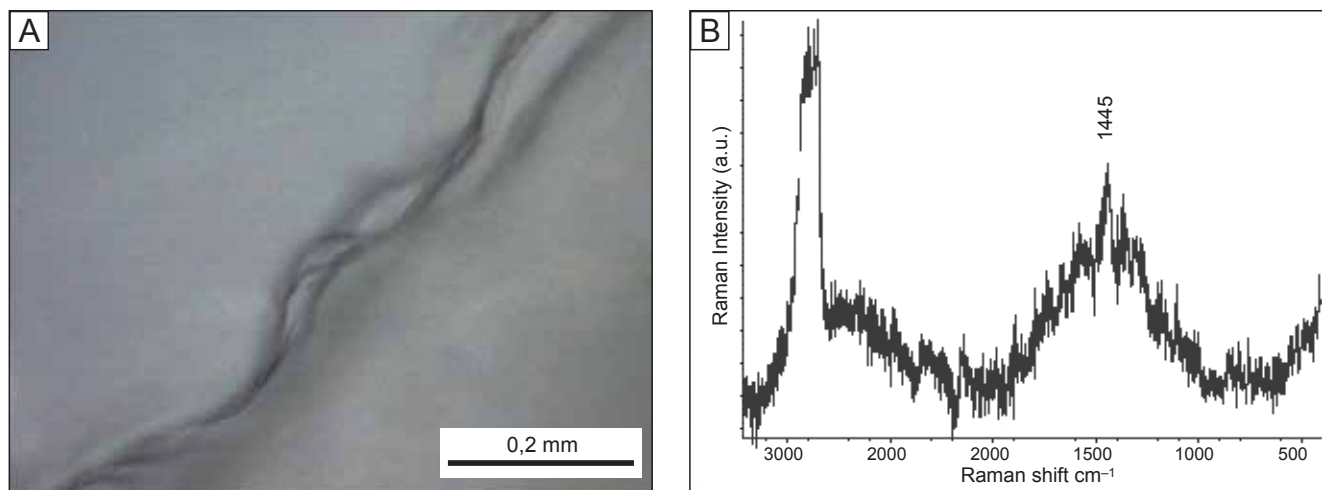


Fig. 8. A. Granica kryształów halitu z węglowodorami. B. Widmo ramanowskie węglowodorów z granicy kryształów halitu

A. Hydrocarbons along halite crystal boundaries. **B.** Raman spectrum of hydrocarbons which occur along crystal boundaries

zespołów są prostoliniowe i przecinającą cały kryształ halitu.

W grupie 3 także przeważają inkluzje zgromadzone na granicach kryształów halitu (fig. 7D). Posiadają one zarysy nieregularne i są one silnie spłaszczone. Są to inkluzje ciekłe, rzadziej ciekło-gazowe o zmiennych proporcjach faz.

W próbkach z grupy 3 analiza ramanowska wykazała obecność węglowodorów w formie cienkich błon rozmiesz-

czonych wzdłuż granic kryształów halitu (fig. 8A). W widmie ramanowskim wspomniane węglowodory charakteryzują się intensywną grupą pasm w zakresie 2800–3000 cm^{-1} (fig. 8B) pochodzących od symetrycznych i asymetrycznych drgań grup CH_2 , CH_3 (Orange i in., 1996; Larkin, 2011). Widoczne jest także szerokie pasmo ok. 1445 cm^{-1} , które jest przypisywane drganiom nożycowym grupy CH_2 w alkanach i cykloalkanach (Orange i in., 1996).

WNIOSKI I Dyskusja

Analizowane próbki można sklasyfikować jako sole o wyższej (grupa 4) i niższej (grupa 3) wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie w porównaniu z solami kamiennymi formacji cechsztyńskiej. Wyższe wartości wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie (niż pomierzone dla próbek soli z grupy 4) zanotowano dla soli drobnoziarnistych ze złóż Góra i Lubień Kujawski (Flisiak, 2008; Grzybowski i in., 2008). Natomiast wartości na tym samym poziomie lub niższe zarejestrowano dla soli grubokrystalicznych z wysadów Góra i Mogilno (Flisiak, 2008; Grzybowski i in., 2008). Wartości modułu Younga czy liczby Poissona dla wymienionych soli są zróżnicowane. Przeprowadzone badania soli cechsztyńskich mogą wskazywać na związek (tab. 1 i 2) między wielkością ziaren a zawartością zanieczyszczeń z parametrami wytrzymałościowymi (Flisiak, 2004, 2008; Grzybowski i in., 2008; Kłeczek, Zeljaś, 2012).

Przeprowadzone wstępne obserwacje soli kamiennych z LGOM wskazują, że w przypadku soli o niewielkim stopniu zanieczyszczenia (zawartość domieszek 0,13–2,11% wag.) nie obserwuje się korelacji między zawartością części nierozpuszczalnych w wodzie a parametrami wytrzymałościowymi. Stwierdzono natomiast związek właściwości wytrzymałościowych z cechami petrologicznymi, tj. sposobem rozmieszczenia zanieczyszczeń oraz obecnością inklu-

zji fluidalnych i węglowodorów. Występowanie anhydrytu w formie otoczek na granicach kryształów halitu może powodować wzrost wytrzymałości skały. W testach wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie spękania i odspojenia tworzą się na granicach kryształów, ponieważ poślizgi wzdłuż tych granic są jednym z głównych mechanizmów deformacji soli kamiennej (Liang i in., 2012). Z kolei występowanie inkluzji fluidalnych i węglowodorów na granicach kryształów halitu może przyczyniać się do obniżenia wytrzymałości badanych próbek. Natomiast obecność anhydrytu w obrębie kryształów halitu może wpływać na powstawanie mikrospeknań, których propagacja przyczynia się do zniszczenia próbki (Jie i in., 2015).

Analizowane sole wykazują wiele cech soli zrekrystalizowanych. Podstawową cechą wskazującą na znaczne przeobrażenia jest brak inkluzji pierwotnych, powszechnie występujących w formie szewronów czy hopper kryształów w halicie powstającym na drodze sedymentacyjnej (Roedder, 1984; Galamay i in., 1997; Kovalevich, 1997; Kovalevich, Petrichenko, 1997; Kovalevich i in., 2000; Kovalevich, Vovnyuk, 2010;). Brak inkluzji pierwotnych wskazuje, że sole te uległy całkowitej rekrytalizacji, a pierwotne solanki zawarte w inkluzjach zostały wyciśnięte i uruchomione, sprzyjając tym samym rozpuszczaniu i ponownej krystalizacji ha-

litu. Charakterystycznie wykształcone inkluzje występujące na granicach kryształów halitu świadczą, że proces migracji granic ziarn (Den Brok i in., 1999) miał także istotne znaczenie dla rozwoju skał solnych i wraz z procesem rekryształizacji zachodził pod znacznym ciśnieniem.

Innym czynnikiem, który wpłynął na cechy skał solnych był udział fluidów zewnętrznych migrujących przez formację solonośną. O ich oddziaływaniu świadczy obecność materii organicznej występującej głównie na kryształach

anhidrytu i wykazującej niewielki stopień przeobrażenia. Temperatura oszacowana w oparciu o stopień uporządkowania materii organicznej (Kouketsu i in., 2014) była zmienna i sięgała do 150°C, co sugeruje udział niskotemperaturowych roztworów hydrotermalnych.

Praca została wykonana w ramach badań statutowych Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie nr 11.11.140.320 i 11.11.100.197

LITERATURA

- AOYAM., KOUKETSU Y., ENDO S., SHIMIZU H., MIZUKAMI T., NAKAMURA D., WALLIS S., 2010 — Extending the applicability of the Raman carbonaceous-material geothermometer using data from contact metamorphic rocks. *J. Metamorph. Geol.*, **28**: 895–914.
- BANASZAK A., GARLICKI A., MARKIEWICZ A., 2007 — Budowa geologiczna złoża najstarszej soli kamiennej Kazimierzów w OG Sieroszowice I (kopalnia Polkowice-Sieroszowice). *Gosp. Sur. Miner.*, **23**: 9–20.
- BEREST P., GHOREYCHI M., HADJ-HASSEN F., TIJANI M. (red.), 2012 — Mechanical Behavior of Salt VII. Taylor & Francis Group, London.
- BEYSSAC O., GOFFÉ B., CHOPIN C., ROUZAUD J.N., 2002 — Raman spectra of carbonaceous material in metasediments: a new geothermometer. *J. Metamorph. Geol.*, **20**: 859–871.
- BEYSSAC O., GOFFÉ B., PETITETB J.-P., FROIGNEUX E., MOREAUC M., ROUZAUD J.N., 2003 — On the characterization of disordered and heterogeneous carbonaceous materials by Raman spectroscopy. *Spectrochim. Acta, Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, **59**, 10: 2267–2276.
- CARTER N.L., HANSEN F.D., 1983 — Creep of rock salt. *Tectonophysics*, **92**: 275–333.
- CARTER N.L., HORSEMAN S.T., RUSSEL J.E., HANDIN J., 1993 — Rheology of rock salt. *J. Struct. Geol.*, **15**: 1257–1271.
- CYRAN K., 2008 — Tektonika miocennskich złóż soli w Polsce [pr. doktor.]. Archiwum AGH, Wydział GGiOŚ.
- DADLEZ R., MAREK S., POKORSKI J., 2000 — Mapa geologiczna Polski bez utworów kenozoiku. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- DEN BROK B., ZAHID M., PASSCHIER C.W., 1999 — Stress induced grain boundary migration in very soluble brittle salt. *J. Struct. Geol.*, **21**: 147–151.
- DESBOIS G., URAI J.L., DE BRESSER J.H.P., 2012 — Fluid distribution in grain boundaries of natural fine-grained rock salt deformed at low differential stress (Qom Kuh salt fountain, central Iran): Implications for rheology and transport properties. *J. Struct. Geol.*, **43**: 128–143.
- DRURY M., URAI J., 1990 — Deformation-related recrystallization processes. *Tectonophysics*, **172**: 235–253.
- DÜSTERLOH U., LUX K.H., 2010 — Some geomechanical aspects of compressed air energy storage (CAES) in salt caverns. *W: SMRI Fall 2010 Technical Conference, 3–6 October 2010, Leipzig, Germany.*
- FLISIAK D., 2004 — Przydatność prób krótkotrwałego pełzania soli kamiennej z wysadu Dębiny do zagadnień praktycznych. *W: Problematyka zagrożeń naturalnych w górnictwie węgla brunatnego* (red. E. Pilecka). Bełchatów, 2–4 czerwca 2004: 623–632. Wydaw. IGSMiE PAN, Kraków.
- FLISIAK D., 2008 — Laboratoryjne badania właściwości geomechanicznych soli kamiennej z wybranych złóż cechsztyńskich. *Gosp. Sur. Miner.*, **24**, 3/2: 121–240.
- FLISIAK D., CYRAN K., 2008 — Wpływ petrologii i zaangażowania tektonicznego na własności mechaniczne miocennskich soli kamiennych. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **429**: 3–14.
- FLISIAK D., KOLANO M., 2012 — Research on geo-mechanical properties of rock salt in Kłodawa diapir. *AGH Journal of Mining and Geoengineering*, **36**, 2: 145–152.
- FOSSUM A.F., BRODSKY N.S., CHAN K.S., 1993 — Experimental evaluation of a constitutive model for inelastic flow and damage evolution in solids subjected to triaxial compression. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, **30**: 1341–1344.
- GALAMAY A.R., BUKOWSKI K., PRZYBYŁO J., 1997 — Chemical composition and origin of brines in the Badenian evaporite basin of the Carpathian Foredeep: fluid inclusion data from Wieliczka (Poland). *Slovak Geol. Mag.*, **3**, 2: 165–171.
- GARLICKI A., KIJEWSKI P., SZYBIST A., JAMRÓZ J., MARKIEWICZ A., 2007 — Sól kamienna na obszarze przedsubdeckim. *W: Monografia KGHM Polska Miedź S.A.: 269–277.* Lubin.
- GRZYBOWSKI Ł., WILKOSZ P., FLISIAK D., 2008 — Właściwości mechaniczne cechsztyńskich skał solnych z wysadu Mogilno. *Gosp. Sur. Min.*, **24**, 3/2: 141–157.
- HUNSCHE U., HAMPEL A., 1999 — Rock salt — The mechanical properties of the host rock material for a radioactive waste repository. *Eng. Geol.*, **52**: 271–291.
- HUNSCHE U., MINGERZAHN G., SCHULZE O., 1996 — The influence of textural parameters and mineralogical composition on the creep behavior of rock salt. *W: The Mechanical Behavior of Salt III, Proc. Third Conf., Palaiseau (France) 1993* (red. M. Ghoreychi et al.): 143–151. Trans Tech Publications, Clausthal.
- JEHLIČKA J., BÉNY C., ROUZAUD J.N., 1997 — Raman Microspectrometry of Accumulated Non-Graphitized Solid Bitumens. *J. Raman Spectrosc.*, **28**: 717–724.
- JEHLIČKA J., URBAN O., POKORNÝ J., 2003 — Raman spectroscopy of carbon and solid bitumens in sedimentary and metamorphic rocks. *Spectrochim. Acta, Part A*, **59**: 2341–2352.
- JEHLIČKA J., EDWARDS H.G.M., VILLAR S.E.J., 2007 — Raman spectroscopy of natural accumulated paraffins from rocks: Evenkite, ozokerite and hatchetine. *Spectrochim. Acta, Part A*, **68**: 1143–1148.
- JIE C., ZHANG J., REN S., LI L., YIN L., 2015 — Determination of damage constitutive behaviour for rock salt under uniaxial compression condition with acoustic emission. *The Open Civil Engineering Journal*, **9**: 75–81.
- KIJEWSKI P., 1986 — Budowa i właściwości soli kamiennej najstarszej w cechsztynie monokliny przedsubdeckiej [pr. doktor.].

- Archiwum Instytutu Górnictwa, Politechnika Wrocławska, Wrocław.
- KIJEWSKI P., SALSKI W., 1978 — Cechsztyńska sól kamienna cyklotemu Z1 w południowo-zachodniej części monokliny przedsudeckiej. *Geol. Sudet.*, **13**, 1: 97–134.
- KŁAPCIŃSKI J., 1964a — Paleogeografia cechsztynu monokliny przedsudeckiej (Paleogeographical characteristics of the Zechstein of the Fore-Sudetic Monocline (in Polish with English summary). *Rocz. Pol. Tow. Geol.*, **34**, 4: 551–577.
- KŁAPCIŃSKI J., 1964b — Stratygrafia cechsztynu okolic Lubina, Sieroszowic i Wschowy (Stratigraphy of the Zechstein in the areas of Lubin, Sieroszowice and Wschowa). *Rocz. Pol. Tow. Geol.*, **34**, 1/2: 65–93.
- KŁECZEK Z., ZELJAŚ D., 2012 — Naukowe podstawy i praktyczne zasady budowy w Polsce podziemnego składowiska odpadów niebezpiecznych. Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice.
- KOLANO M., FLISIAK D., 2013 — Comparison of geomechanical properties of white rock salt and pink rock salt in Kłodawa salt diapir. *Studia Geotechnica et Mechanica*, **35**, 1: 119–127.
- KOVALEVICH V.M., 1997 — Inkluzje fluidalne w soli kamiennej z Bochni. *Prz. Geol.*, **45**, 8: 822–825.
- KOVALEVICH V.M., PETRICHENKO O.I., 1997 — Chemical composition of brines in Miocene evaporite basins of the Carpathian region. *Slovak Geol. Mag.*, **3**, 3: 173–180.
- KOVALEVYCH V., VOVNYUK S., 2010 — Fluid inclusions in halite from marine salt deposits: are they real micro-droplets of ancient seawater? *Geol. Quart.*, **54**, 4: 401–410.
- KOVALEVYCH V.M., CZAPOWSKI G., HAŁAS ST., PERYT T.M., 2000 — Chemiczna ewolucja solanek cechsztyńskich basenów ewaporatowych Polski: badania inkluzji fluidalnych w halicie z poziomów soli Na1-Na4. *Prz. Geol.*, **48**, 5: 448–454.
- KOUKETSU Y., NISHIYAMA T., IKEDA T., ENAMI M., 2014 — Evaluation of residual pressure in an inclusion–host system using negative frequency shift of quartz Raman spectra. *Amer. Miner.*, **99**: 433–442.
- LAHFIDA A., BEYSSAC O., DEVILLE E., NEGRO F., CHOPIN C., GOFFÉ B., 2010 — Evolution of the Raman spectrum of carbonaceous material in low-grade metasediments of the Glarus Alps (Switzerland). *Terra Nova*, **22**: 354–360.
- LANGER M., 1993 — Use of solution-mined caverns in salt for oil and gas storage and toxic waste disposal in Germany. *Eng. Geol.*, **35**: 183–190.
- LARKIN P., 2011 — Infrared and Raman Spectroscopy. Elsevier, San Diego, USA.
- LIANG W., ZHANG C., GAO H., YANG X., XU S., ZHAO Y., 2012 — Experiments on mechanical properties of salt rocks under cycling loading. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, **4**, 1: 54–61.
- LÜNSDORF N.K., DUNKL I., SCHMIDT B.C., RANTITSCH G., VON EYNATTEN H., 2014 — Towards a higher comparability of geothermometric data obtained by Raman spectroscopy of carbonaceous material. Part I: evaluation of biasing factors. *Geostand. Geoanal. Res.*, **38**: 73–94.
- LÜNSDORF N.K., 2016 — Raman spectroscopy of dispersed vitrinite: Methodical aspects and correlation with reflectance. *Int. J. Coal Geol.*, **153**: 75–86.
- MARKIEWICZ A., 2007 — Naskórkowa struktura południowej części monokliny przedsudeckiej a zagospodarowanie utworów najstarszej soli kamiennej (Na1). *Gosp. Sur. Miner.*, **23**: 36–48.
- MARKIEWICZ A., MANTKE M., 1990 — Spawozdanie z badań geologicznych w trakcie zgłębiania szybu SG 1. Prace ZBiPM „Cuprum” (archiwum), Wrocław.
- MARKIEWICZ A., ŻELAŻNIEWICZ A., 1990 — Wewnętrzna tektonika pokładu soli kamiennej dla potrzeb stateczności wyrobisk górniczych i mechaniki górotworu. Prace ZBiPM „Cuprum” (archiwum), Wrocław.
- MARKIEWICZ A., CZAPOWSKI G., TOMASSI-MORAWIEC H., KOZULAR., PIÓREWICZ R., KUDEŁKO J., KORZEKWA W., 2002 — Określenie zakresu zmian w projekcie geologicznych prac rozpoznawczych w złożu soli kamiennej „Kazimierzów” w celu realizacji koncepcji jego zagospodarowania. Prace CBPM „Cuprum” (archiwum), Wrocław.
- MORIYA H., FUJITA T., NIITSUM H., 2006 — Analysis of fracture propagation behaviour using hydraulically induced acoustic emissions in the Bernburg salt mine, Germany. *Int. J. Rock Mech. Min.*, **43**, 6: 49–57.
- ORANGE D., KNITILE E., FARBER D., QUENTIN W., 1996 — Raman spectroscopy of crude oils and hydrocarbon fluid inclusions: A feasibility study. *W: Mineral spectroscopy – A tribute to Roger G. Burns (red. M.D. Dyar et al.). Geochemical Society Special Publication*, **5**: 65–81.
- PERRY K.F., 2005 — Natural gas storage industry experience and technology: potential application to CO₂ geological storage. *W: Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geologic Formations: 815–825. Elsevier Science, Amsterdam.*
- PERYT T.M., 1981 — Zechstein in the neighbourhood of the Fore-Sudetic Block (in Polish with English summary). *Kwart. Geol.*, **25**, 1: 75–91.
- PERYT T.M., OSZCZEPALSKI S., 2007 — Stratygrafia serii złożowej. *W: Monografia KGHM Polska Miedź S.A. (red. A. Piestrzyński) 108–115. Lubin.*
- POBORSKI J., 1976 — Możliwości drążenie wyrobisk chodnikowych w pokładzie solnym pod złożem „Sieroszowice”. Archiwum Zakładu Złóż Soli i Surowców Chemicznych AGH, Kraków.
- POKORSKI J., WAGNER R., 1995 — Sedimentary and development of the Polish Basin. *W: Upper Rotliegend – Zechstein: Terrestrial – Marine Sedimentary Succession in Polish Permian Basin. XIII International Congress on Carboniferous and Permian Series, August 28 – September 2, 1995, Guide to Excursion A3 (red. J. Małecką): 7–22. Kraków, Poland.*
- POPPT., KERN H., 2000 — Monitoring the state of microfracturing in rock salt during deformation by combined measurements of permeability and P- and S- wave velocities. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, **2**: 149.
- POPP T., KERN H., SCHULZE O., 2001 — Evolution of dilatancy and permeability in rock salt during hydrostatic compaction and triaxial deformation. *J. Geoph. Res.*, **106**, doi. 10.1029/2000JB900381.
- POUYA A., 1991 — Correlation between mechanical behaviour and petrological properties of rock salt. *W: Proceedings of 32nd US symposium on rock mechanics (red. J.C. Roegiers): 385–92. Balkema, Rotterdam.*
- RAHL J.M., ANDERSON K.M., BRANDON M.T., FASSOULAS C., 2005 — Raman spectroscopic carbonaceous material thermometry of low-grade metamorphic rocks: Calibration and application to tectonic exhumation in Crete, Greece. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **240**: 339–354.
- ROEDDER E., 1984 — The fluid in salt. *Amer. Miner.*, **69**: 413–439.

- RYKA W., 1978 — Rotliegendes volcanic rocks in Poland. *Prz. Geol.*, **26**, 12: 694–697.
- SCHLÉDER Z., URAI J.L., 2005 — Microstructural evolution of deformation-modified primary halite from the Middle Triassic Röt Formation at Hengelo, The Netherlands. *Int. J. Earth Sci.*, **94**: 941–955.
- SCHLÉDER Z., URAI J.L., 2007 — Deformation and recrystallization mechanisms in mylonitic shear zones in naturally deformed extrusive Eocene Oligocene rock salt from Eyvanekey plateau and Garmsar hills (central Iran). *J. Struc. Geol.*, **29**: 241–255.
- SCHULZE O., POPP T., KERN H., 2001 — Development of damage and permeability in deforming rock salt. *Eng. Geol.*, **61**: 163–180.
- SZYBIST A., 1976 — Złoże soli kamiennej w Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym. *Prz. Geol.*, **24**, 10: 572–576.
- TOBOŁA T., 2014 — The influence of tectonics on petrological characteristics of anhydrite and anhydrite-halite intercalations in the Oldest Halite (Na1) (Zechstein, Upper Permian) of the Bądźów area (SW Poland). *Geol. Quart.*, **58**, 3: 531–542.
- TOBOŁA T., MARKIEWICZ A., 2009 — Wstępne wyniki badań inkluzji fluidalnych z najstarszej soli kamiennej Na1 w rejonie Głogowa (SW Polska). Fluid inclusions in Oldest Halite (Na1) in Głogów area (SW Poland) – preliminary results. *Kwartalnik AGH Geologia*, **35**, 3: 349–371.
- ZONG X., YANG C., ZUO J., XU J., JI G., 2012 — Effect of impurity content on elastic modulus and Poisson ratio of salt rock. *Appl. Mech. Mater.*, **204**: 467–470.

SUMMARY

Different petrological features, including the type and content of impurities, have an impact on mechanical properties of rock salt. However, detailed description of this impact as well as the influence of impurities on the deformation mechanism have not been determined and require further research.

In this paper, an attempt to find a correlation between the impurities content and mechanical parameters of rock salt from the LGOM area was undertaken. In order to determine this correlation the research was carried out in three steps:

- Stage 1 – uniaxial compression tests, elastic parameters calculation (Young's modulus, Poisson's ratio);
- Stage 2 – determination of the content of insoluble minerals (impurities) in samples tested in stage 1;
- Stage 3 – observations under the microscope, and Raman microspectroscopy.

Salt samples (taken near the SW-4 shaft, depth 1078–1135 m b.g.l.) selected for uniaxial compression tests were divided into four groups based on macroscopic features such as grain size, colour and presence of impurities:

- Group 1 – white-grey rock salt, medium-grained, locally fine-grained, single grains contain impurities of (probably) claystone; single (probably) claystone laminae occur;
- Group 2 – white-grey rock salt, medium- to fine-grained, single grains contain impurities of (probably) claystone;
- Group 3 – white-grey rock salt, medium-grained, locally coarse-grained, single grains contain impurities of (probably) claystone;

- Group 4 – grey rock salt, coarse-grained, locally medium-grained, single (probably) claystone laminae occur.

In laboratory tests, the highest value of uniaxial compressive strength was recorded for samples from group 4 (30.57–33.63 MPa). The lowest value was measured for samples from group 3 (16.31–19.38 MPa). Samples from groups 1 and 2 are characterized by uniaxial compressive strength at a similar level (20.87–27.52 MPa).

Studied samples are characterized by a low content of insoluble minerals (0.13–2.11% wt). The highest average content of insoluble parts was determined for samples from group 4 (1.43% wt) and the lowest one for samples from group 2 (0.58% wt). Consequently, the results revealed that there is no correlation between the mechanical properties and the content of impurities in these samples.

In the third step, samples from the groups distinguished by the highest and the lowest values of uniaxial compressive strength (recorded in stage 1) were selected for microscopic observations and Raman microspectrometry. These observations show that mechanical properties of the salt depend on both the distribution of impurities in halite crystals and presence of fluid inclusions and hydrocarbons along the crystals boundaries. Moreover, the distribution of anhydrite along the edges of halite crystals may influence an increase of the rock salt strength. On the contrary, the presence of fluid inclusions and hydrocarbons along the halite crystal boundaries may reduce the rock salt strength.

