

Dariusz Cebulski, Andrzej Urbaniec

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

Katarzyna Kasprzyk

PETROGEO Przedsiębiorstwo Usług Laboratoryjnych i Geologicznych Sp. z o.o.

Obrazowanie wybranych własności utworów solnych za pomocą różnych metod badawczych

Artykuł przedstawia wyniki przeprowadzonych analiz materiału rdzeniowego z wybranych utworów solnych, reprezentujących cechsztyńską i mioceńską formację solonośną. W celu określenia charakterystycznych parametrów i własności badanych skał solnych wykorzystano następujące metody: rentgenowską tomografię komputerową (CT), analizę w skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM), analityczne oznaczenia składu chemicznego, fluorescencję rentgenowską (XRF) oraz dyfrakcję rentgenowską (XRD). Zastosowane metody badawcze pozwoliły określić zróżnicowanie najbardziej charakterystycznych cech analizowanych utworów.

Słowa kluczowe: sól kamienna, halit, komputerowa tomografia rentgenowska, skaningowy mikroskop elektronowy.

Defining selected salt rocks properties using various research methods

The article presents the results of well core analysis from salt rocks, representing the Zechstein and the Miocene salt formations. The following methods were applied in order to determine the characteristic parameters and properties of the analyzed salt rock: X-ray computer tomography (CT), scanning electron microscopy (SEM), methods of the chemistry identification, X-ray fluorescence (XRF) and X-ray diffraction (XRD). The applied research methods helped to identify the diversity of the most characteristic features of the tested rocks.

Key words: salt rocks, halite, X-ray computer tomography, scanning electron microscopy.

Wprowadzenie

Ewaporaty są skałami stosunkowo pospolitymi i występują powszechnie w wielu rejonach świata w seriach osadowych różnego wieku. Na terenie Polski skały ewaporatowe rozpowszechnione są przede wszystkim w obrębie dwóch dużych formacji skalnych, tj. w profilu utworów górnego permu, występujących na obszarze Niżu Polskiego [np. 2, 4–6, 14, 15], oraz w utworach neogenu zapadliska przedkarpacciego [np. 1, 3, 7–13]. Wśród wspomnianych skał znajdują się przede wszystkim anhydryty, gipsy, sole kamienne oraz sole potasowo-magnezowe. Sole kamienne i potasowo-magnezowe, będące głównym przedmiotem badań, występować mogą w szerokim spektrum odmian, w zależności od rodzaju i ilości zawartych w nich domieszek. Do najważniejszych cech opisujących i pozwalających na rozróżnienie poszczególnych typów litologiczno-strukturalnych soli należą:

tekstura, struktura, barwa, przezroczystość, a także skład mineralny. Ponadto duże znaczenie przy definiowaniu odmian soli mają takie cechy jak: wielkość i sposób rozmieszczenia kryształów, wtrącenia innych minerałów (np. anhydrytów), stopień zailenia, obecność deformacji i inne.

Do badań wybrano materiał rdzeniowy z trzech otworów wiertniczych, z czego dwa reprezentują cechsztyńską formację solonośną, a jeden mioceńską formację solonośną.

Z otworu H-1, zlokalizowanego we wschodniej części zapadliska przedkarpacciego, przebadano serię soli kamiennej z cienkimi wkładkami skał klastycznych, której wiek przypada najprawdopodobniej na dolny miocen (seria ta nie posiada dokumentacji biostratygraficznej). Dla utworów cechsztyńskich przedstawiono wyniki badań z dwóch otworów. Otwór C-3 zlokalizowany jest na obszarze antyklinorium pomorskiego

i reprezentuje ogniwo soli starszej wraz z solą potasową $\text{Na2} + \text{K2}$ cyklotemu Z2. Otwór S-1 umiejscowiony jest natomiast na wysadzie solnym znajdującym się w obrębie synklinorium mogileńsko-lódzkiego. W otworze tym rozpozna-

no utwory dwóch ogniw stratygraficznych, tj. nierozdzielonego kompleksu młodszej soli kamiennej i potasowej wraz z ogniwem najmłodszej soli kamiennej ($\text{Na3} + \text{K3} + \text{Na4}$) oraz ogniwo starszej soli kamiennej (Na2) cyklotemu Z2.

Zastosowane metody badawcze

Rentgenowska tomografia komputerowa (CT)

Rentgenowska tomografia komputerowa to nieinwazyjna metoda obrazowania przedmiotów pozwalająca na uzyskanie w pełni trójwymiarowego obrazu badanych obiektów. Obraz taki jest efektem zmiennej absorpcji promieniowania rentgenowskiego, bezpośrednio związanej ze zróżnicowaniem gęstościowym badanego materiału skalnego [19]. Obrazy tomograficzne rdzeni mogą być pomocne w opisie sedymentologicznym [18] (zwłaszcza w zakresie szczegółowej analizy litologicznej) oraz w analizie cech teksturalnych, które niekiedy mogą być słabo widoczne lub wtórnie zamaskowane na powierzchni samego rdzenia. Metodę tę można więc traktować jako uzupełnienie makroskopowego opisu rdzeni wiertniczych.

Skaningowy mikroskop elektronowy (SEM)

Skaningowy mikroskop elektronowy to nowoczesne urządzenie umożliwiające obserwację topografii badanych obiektów, charakteryzujące się wysoką rozdzielczością i dużą głębią ostrości obrazu. Umożliwia on obserwację detali obiektu w skali od nanometrycznej do mikrometrycznej, a przeglądanie odbywa się poprzez skupianie wiązki elektronów na próbce i jej odchylenie lub też poprzez przemieszczanie ostrza emitującego wiązkę nad próbką. Tym samym strumień elektronów zachowuje się w polu elektrycznym lub magnetycznym niczym promienie świetlne w soczewkach.

Badania wykonano przy pomocy elektronowego mikroskopu skaningowego (SEM) oraz współpracującego z nim mikroanalyzera rentgenowskiego EDS, pozwalającego na wykonanie chemicznej analizy punktowej, jak również powierzchniowej, co umożliwia identyfikację nawet drobniejszych faz mineralnych obecnych w składzie matrycy skalnej lub spoiwie, a także ich powierzchniowe rozmieszczenie w obrębie skały (tzw. *mapping*).

Wykonane badania dostarczają istotnych informacji dotyczących przede wszystkim składu mineralnego, wykształcenia poszczególnych minerałów, a także morfologii, stopnia zachowania i relacji przestrzennych pomiędzy masą kryształów budujących podstawowy szkielet skalny badanych skał solnych. Ponadto wnoszą one wiele dodatkowych informacji na temat pozostałych minerałów wchodzących w skład analizowanych próbek skalnych, a także historii procesów diagenetycznych.

Analityczne oznaczenia składu chemicznego

W badaniach soli istotną rolę pełniły analizy chemiczne pozwalające określić zawartość pierwiastków oraz związków chemicznych. Dla badanych prób ustalono zawartości następujących anionów: bromków (Br^-), chlorków (Cl^-), siarczianów (SO_4) oraz metali: sodu, glinu, wapnia, magnezu i potasu, a ponadto krzemu. Oznaczenia przeprowadzono różnymi metodami analitycznymi. W przypadku chlorków posłużono się klasyczną metodą miareczkowania azotanem srebra (metoda Mohra). Zawartość bromu określono techniką chromatografii jonowej (IC). Siarczany zostały oznaczone na podstawie analizy wagowej osadu siarczanu baru otrzymanego metodą strącania anionów siarczanowych z barem. Pierwiastki: sód (Na), glin (Al), potas (K), krzem (Si), wapń (Ca) oraz magnez (Mg) określono techniką atomowej spektrometrii emisyjnej w plazmie indukowanej ICP-OES (*Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry*).

Fluorescencja rentgenowska (XRF)

Fluorescencja rentgenowska (XRF) to czuła metoda analityczna polegająca na wtórnej emisji promieniowania rentgenowskiego (fluorescencji) z materii, która została wzbudzona za pomocą bombardowania wysokoenergetycznym promieniowaniem rentgenowskim. Istotą tej metody jest fakt, że każdy pierwiastek zawarty w danej próbce na skutek wzbudzenia promieniami X emituje charakterystyczne dla siebie widmo, które stanowi podstawę do analizy jakościowej i ilościowej. Opisywana metoda znajduje obecnie szerokie zastosowanie ze względu na jej nieinwazyjność (nie niszczy próbki) oraz szybkość wykonywanej analizy. Pomiary przeprowadzono przy pomocy przenośnego spektrometru S1 TITAN firmy Bruker, wykorzystującego metodę rentgenowskiej analizy fluorescencyjnej z dyspersją energii (EDXRF). Spektrometr pozwala analizować zawartości pierwiastków z zakresu od magnezu (Mg) do uranu (U). Pomiary można wykonywać zarówno na próbkach skał bezpośrednio w terenie, jak i na materiale zmielonym w laboratorium [16].

Analiza składu mineralnego metodą dyfrakcji rentgenowskiej (XRD)

Jakościowe określenie składu mineralnego wykonano metodą dyfrakcji rentgenowskiej, z wykorzystaniem dyfraktometru X'Pert PRO firmy Panalytical z lampą miedzianą.

W metodzie tej wykorzystywane jest zjawisko odbicia promieniowania rentgenowskiego od płaszczyzn krystalograficznych pod różnymi kątami. Poszczególne minerały iden-

tyfikowane są w oparciu o zestaw refleksów odpowiadających zbiorowi charakterystycznych dla nich odległości międzypłaszczyznowych.

Charakterystyka soli kamiennych dolnego miocenu

Sole kamienne nawiercone otworem H-1 zalegają w obrębie głęboko pogrążonego bloku tektonicznego, prawdopodobnie o charakterze rowu tektonicznego, w podłożu utworów jednostki stebnickiej. Interpretacja geologiczna wskazuje, że utwory te znajdują się najprawdopodobniej w pozycji *in situ* [17]. Stan zachowania opisywanych soli, biorąc pod uwagę znaczne głębokości ich zalegania (rzędu 5000 m), jest zadziwiająco dobry, a ich profil cechuje się dość dużym zróżnicowaniem, przejawiającym się przede wszystkim występowaniem licznych wkładek utworów drobnoklastycznych (głównie iłowców i mułowców), partiami gęsto rozmieszczonych (rysunek 1), przechodzących lokalnie w ily solne. W obrębie rdzenia stwierdzono też wkładki brekcji solnych z dużymi klastami soli i spoiwem ilastym. W trakcie makroskopowej obserwacji rdzenia wyróżniono szereg typów strukturalnych soli, w tym sól różnokrystaliczną, równokrystaliczną, masywną i zailoną, a lokalnie wtórną sól wielokrystaliczną. Dominującą barwą jest kolor biały i szary (rysunek 2), lokalnie pojawia się również odcień beżowy lub bru-



Rys. 1. Wkładki utworów drobnoklastycznych w obrębie dolnomioceńskiej soli kamiennej

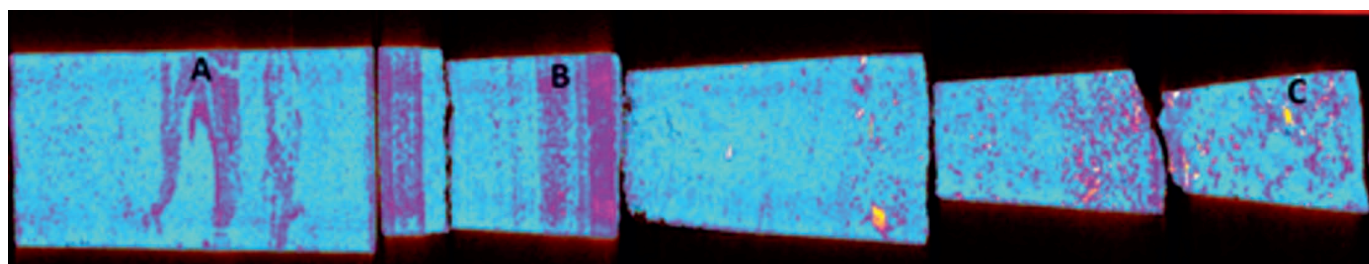


Rys. 2. Dolnomioceńska sól grubokrystaliczna

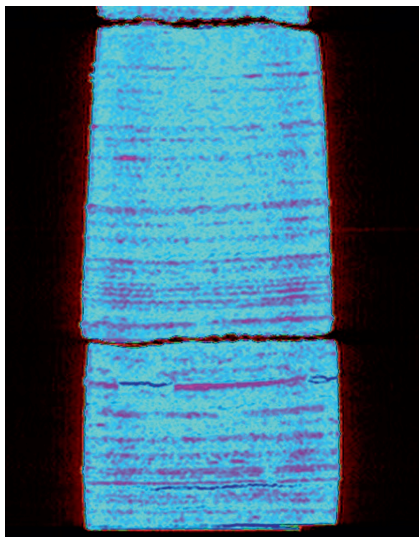
natny. W partiach laminowanych iłowcem charakterystyczna jest laminacja równoległa, która miejscami uległa wyraźnemu plastycznemu zaburzeniu.

Obserwowana w rdzeniach laminacja równoległa jest doskonale odzwierciedlona w obrazie uzyskanym z rentgenowskiej tomografii komputerowej (CT) (rysunki 3B, 4). Warto również zwrócić uwagę na zanotowane w trakcie obserwacji makroskopowych rdzenia plastyczne zaburzenia warstw ilastych w niektórych partiach profilu (rysunki 3A, 5), jak również wkładki brekcji solnych z rozproszonymi mikroagregatami anhydrytów (rysunek 3C). Anhydryt ze względu na różnicę w gęstości bardzo dobrze odznacza się w obrazie tomograficznym (w przedstawionym poniżej odtworzeniu kolorystycznym widoczny jest w postaci żółtych plam – rysunek 3C).

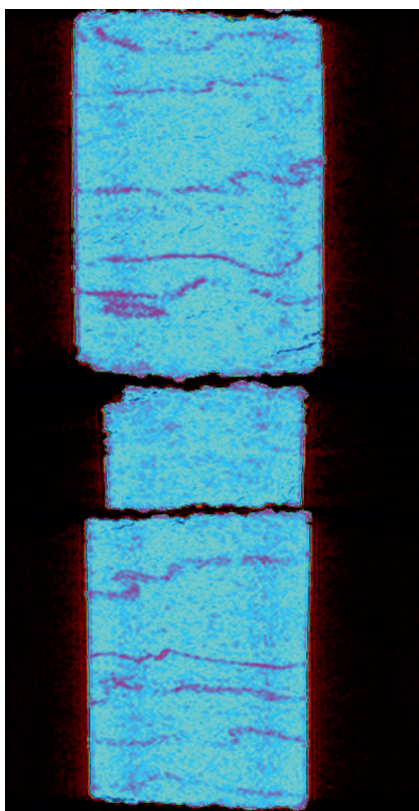
Analiza wykonana przy zastosowaniu skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) pozwala stwierdzić, że badane utwory solne dolnego miocenu zbudowane są głównie z grubokrystalicznego halitu o pokroju kryształów automorficznych lub hipautomorficznych (rysunek 6). Często występują polewy w postaci plastycznej masy halitowej (rysunki 6, 8).



Rys. 3. Sole dolnomioceńskie w obrazie tomograficznym (CT), na którym widoczne są odkształcenia plastyczne wkładek iłasto-mułowcowych (A), laminacja równoległa (B), strefa brekcji solnej (C)



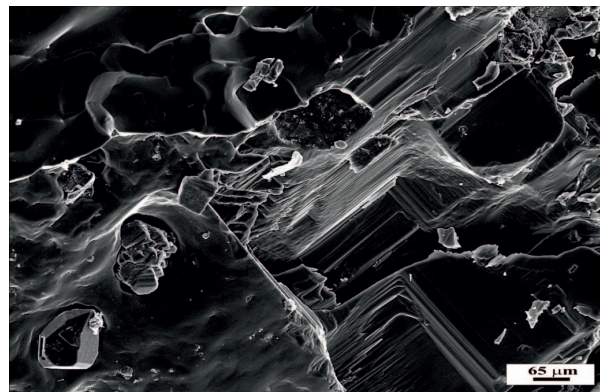
Rys. 4. Liczne wkładki ilasto-mułowcowe w obrębie soli kamiennych (obraz tomograficzny CT)



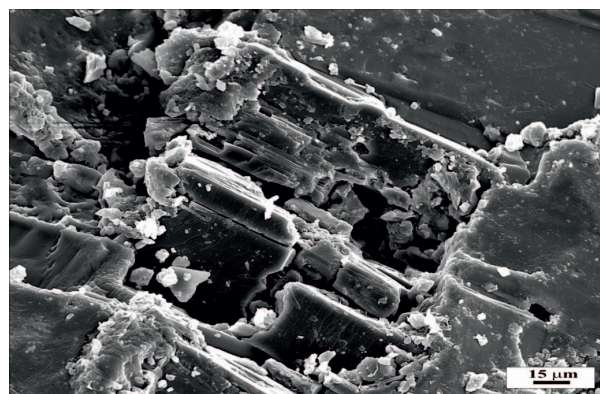
Rys. 5. Plastyczna deformacja lamin ilastych występujących w obrębie soli kamiennej (obraz tomograficzny CT)

Lokalnie obok halitu pojawiają się również skupienia tabliczkowych kryształów anhydrytu (rysunek 7), ziarna kwarcu terygenicznego (rysunek 8), a także nagromadzenia substancji ilastej w postaci drobnych blaszek, niekiedy przemieszanych z kryształkami anhydrytu (rysunek 9).

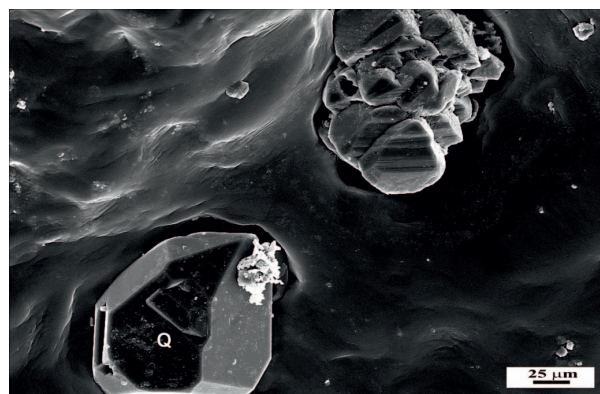
Wyniki analizy obrazu uzyskanego za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) znalazły potwierdzenie w badaniach przeprowadzonych metodami wykorzystującymi promieniowanie rentgenowskie (XRD, XRF), jak



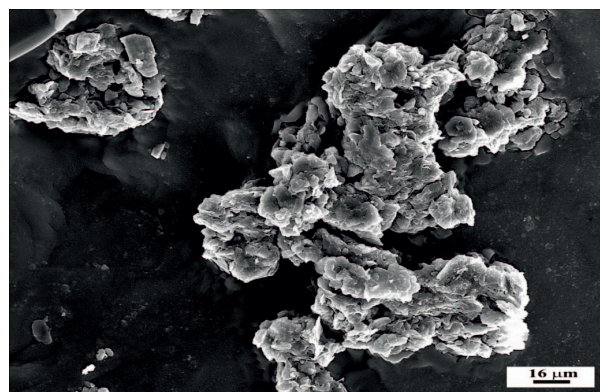
Rys. 6. Kryształy halitu grubokrystalicznego wraz z polewami halitowymi (obraz SEM)



Rys. 7. Tabliczkowe kryształy anhydrytu tkwiące pomiędzy kryształami halitu (obraz SEM)



Rys. 8. Ziarno kwarcu terygenicznego (Q) tkwiące na powierzchni pokrywy halitowej (obraz SEM)



Rys. 9. Skupienia substancji ilastej wraz z drobnymi okruchami anhydrytu na powierzchni kryształu halitu (obraz SEM)

również w analizie składu chemicznego. Poza obecnością halitu, będącego głównym składnikiem mineralnym badanych utworów, powszechnie stwierdzono występowanie minerałów siarczanowych (głównie anhydrytu). Ich obecność wykazano dzięki zastosowaniu analiz chemicznych, na podstawie których oznaczono aniony siarczanowe w ilości od 12 400 do 23 200 ppm, jak również przy wykorzystaniu metody fluore-

scencji rentgenowskiej (XRF), gdzie oznaczono zawartość siarki w ilości od 0,15 do 8,13% wag. Obecność kwarcu potwierdziły badania dyfraktometryczne (XRD) oraz analizy chemiczne (zawartość krzemu maksymalnie do 668 ppm). Wszystkie stosowane metody udowodniły występowanie minerałów ilastych, wśród których na podstawie badań XRD stwierdzono obecność chlorytu i kaolinitu.

Charakterystyka soli kamiennych i potasowych cechsztynu w wybranych otworach

Próbki pobrane z odwiertu C-3, zlokalizowanego na obszarze antyklinorium pomorskiego, reprezentują utwory soli starszej wraz z solą potasową ($\text{Na}_2 + \text{K}_2$) cyklotemu Z2. Utwory te charakteryzują się dość dużą zmiennością pod względem litofacjalnym. Generalnie w analizowanej części profilu dominuje półprzezroczysta sól różnokrystaliczna, partiami zailona, o barwach: od czerwonej i brunatnej – w wyższej części (rysunek 10), po beżowo-szarą, lokalnie brunatną – w niższej części profilu (rysunek 11). Wielkość kryształów przeciętnie waha się w granicach 5÷15 mm. Ponadto partiami sól przybiera charakter bardziej masywny, bezstrukturalny, a w pojedynczych przypadkach stwierdzono obecność półprzezroczystej lub nieprzezroczystej, szarej i szaro-beżowej soli równokrystalicznej. Praktycznie w całym interwale występują rozproszone gruzły, drobne skupienia lub nieregularne gniazda drobnokrystalicznego anhydrytu (rysunek 12). Nieregularnie pojawiają się również wkładki ilaste o miąż-

szości lamin do 2 mm, a lokalnie spotykane są przerosty lub gniazda substancji ilastej.

Analiza obrazu uzyskanego metodą tomografii komputerowej (CT) pozwoliła na pewną detalizację cech tekstural-



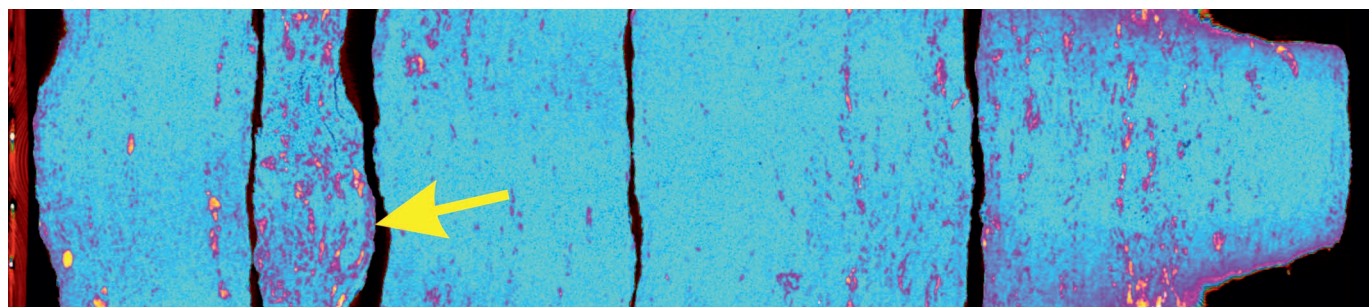
Rys. 11. Sól krystaliczna o zabarwieniu beżowo-szarym ($\text{Na}_2 + \text{K}_2$)



Rys. 10. Sól krystaliczna o zabarwieniu czerwono-brunatnym ($\text{Na}_2 + \text{K}_2$)



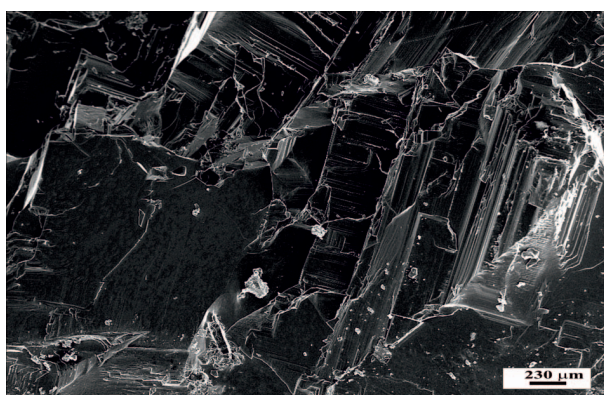
Rys. 12. Sól krystaliczna z gniazdami anhydrytu – strefa wtórnie zmieniona ($\text{Na}_2 + \text{K}_2$)



Rys. 13. Przykład obrazu tomografii rentgenowskiej (CT) dla utworów ogniwa $\text{Na}_2 + \text{K}_2$ (wyróżniona strefa omówiona została w tekście)

nych, opisanych w trakcie badań makroskopowych rdzeni, w tym zwłaszcza wkładki soli z licznymi gniazdami anhydrytu i iłowcami, w obrębie której stwierdzono obecność plastycznych deformacji (strefa wskazana strzałką na rysunku 13).

Na podstawie analiz SEM można stwierdzić, że badane utwory zbudowane są przede wszystkim z kryształów halitu o bardzo zróżnicowanej wielkości i różnym stanie zachowania. Halit występuje w postaci dużych, dobrze wykształconych i najczęściej ciasno upakowanych kryształów (rysunek 14). Często kryształy halitu budujące skałę zazębiają się ze sobą mozaikowo, co widoczne jest na rysunku 15. Rozmiary kryształów osiągają zazwyczaj wielkość kilku milimetrów, miejscami jednak przekraczają nawet 10 mm; ich pokrój określić można jako automorficzny lub hipautomorficzny.



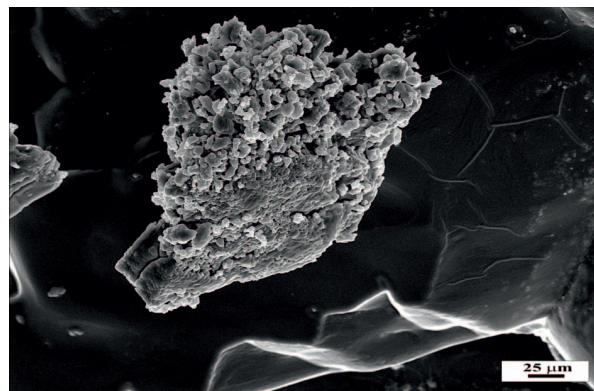
Rys. 14. Halit grubokrystaliczny (obraz SEM)



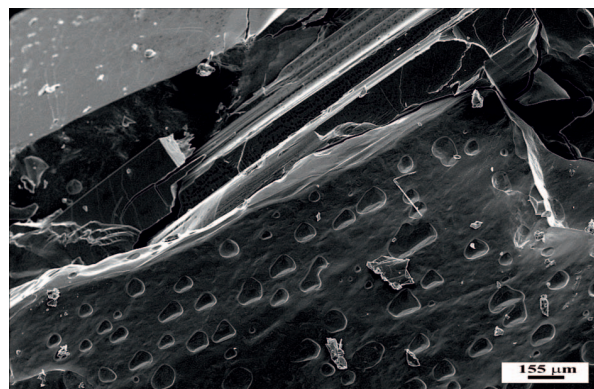
Rys. 15. Duże zazębiające się kryształy halitu (obraz SEM)

Obok występującego powszechnie halitu grubokrystalicznego spotykane są również inne formy tego minerału. Może on występować w postaci niewielkich gromiastych lub promienistych skupień o wielkości kryształów do 10 mikrometrów (rysunek 16). Powszechnie w analizowanych próbkach pojawiają się również bezstrukturalne polewy halitowe, najczęściej rozwinięte na powierzchni kryształów halitu krystalicznego (rysunek 17).

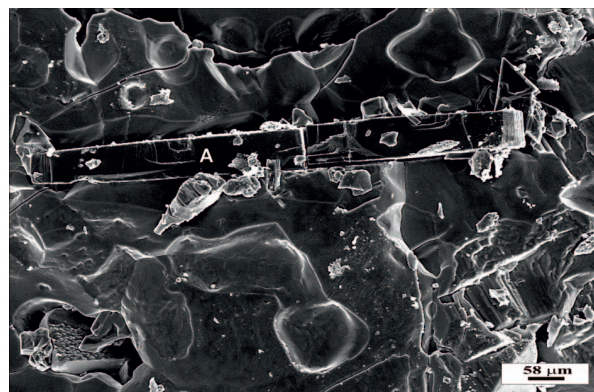
Kolejnym minerałem, poza halitem, stwierdzanym dość często w analizowanych utworach solnych jest anhydryt. Występuje on najczęściej w postaci pojedynczych kryszta-



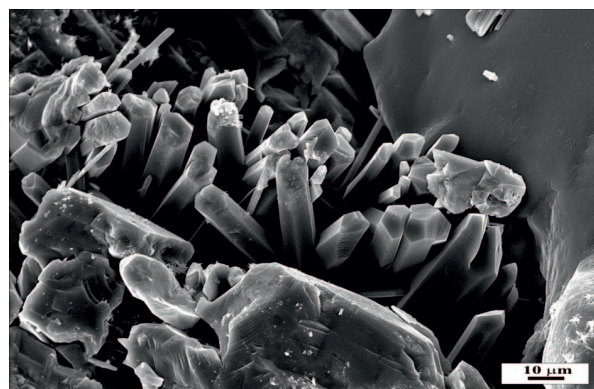
Rys. 16. Niewielkie skupienia drobnokrystalicznego halitu na powierzchni polewy halitowej (obraz SEM)



Rys. 17. Polewa halitowa o strukturze „siatkowej” pokrywająca kryształy halitu (obraz SEM)



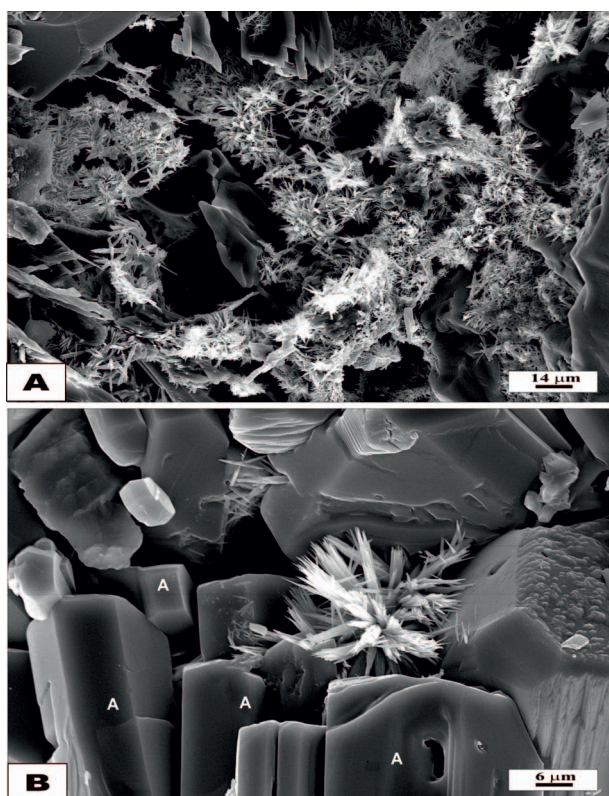
Rys. 18. Wydłużony kryształ anhydrytu tkwiący w obrębie kryształów halitu (obraz SEM)



Rys. 19. Cienkosłupkowe automorficzne kryształy anhydrytu tkwiące pomiędzy kryształami halitu grubokrystalicznego (obraz SEM)

łów o kształcie wydłużonych tabliczek (rysunek 18) lub też w postaci skupień drobniejszych kryształów o automorficznym, cienkosłupkowym kształcie (rysunek 19).

Ponadto w omawianym otworze stwierdzono obecność dobrze wykształconych listewkowych kryształów celestynu, tworzących skupienia w postaci swego rodzaju rozelek (rysunek 20). Występują one pośród większych rozmiarem kryształów anhydrytu o pokroju grubosłupkowym (rysunek 20B) lub też w pustkach pomiędzy kryształami halitu (rysunek 20A).



Rys. 20. Skupienia kryształów celestynu wypełniające przestrzeń pomiędzy kryształami halitu (A) oraz anhydrytu (B) (obraz SEM)

Rezultaty uzyskane na podstawie analiz SEM zostały potwierdzone w badaniach XRF i XRD. Podobnie jak w przypadku utworów miocenu powszechnie stwierdzono obecność minerałów siarczanowych (głównie anhydrytu). Koncentracja anionów siarczanowych wahała się w przedziale od 13 800 do 25 400 ppm, podczas gdy zawartość siarki, oznaczona metodą XRF, wynosiła od 0,33 do 26,84% wag. Dodatkowo w wyższej części analizowanego profilu na podstawie wspomnianych metod zidentyfikowano minerały charakterystyczne dla soli potasowo-magnezowych, tj.: sylwin, karnalit, polihalit. Stwierdzony na podstawie analizy SEM celestyn został również wykryty metodą XRF w ilości do 1,18% wag.

W odwiercie S-1, zlokalizowanym w obszarze synklinorium mogileńsko-łódzkiego, przeanalizowano utwory

dwóch kompleksów, tj. nierozdzielonego ogniwa młodszej soli kamiennej i potasowej wraz z najmłodszą solą kamienną ($\text{Na}_3 + \text{K}_3 + \text{Na}_4$) oraz ogniwa starszej soli kamiennej (Na_2). Kompleks wyższy w opisywanym otworze reprezentowany jest głównie przez nieprzezroczystą lub półprzezroczystą sól równokrystaliczną (rysunek 21), o zmiennych barwach: czerwonej, brunatnej, różowej, miodowej, a miejscami szarej. Partiami sól przybiera strukturę masywną, jednocześnie cechując się w tych interwałach większym stopniem zailenia. Dominującym litotypem starszej soli kamiennej (Na_2) jest półprzezroczysta różowa sól różnokrystaliczna (rysunek 22) o wielkości kryształów od 2 do 20 mm, miejscami zailona. W niektórych interwałach na powierzchni rdzenia widoczne są efekty plastycznej deformacji utworów solnych, związane z tektoniką i prawdopodobnie częściowym rozpuszczaniem soli pod ciśnieniem.

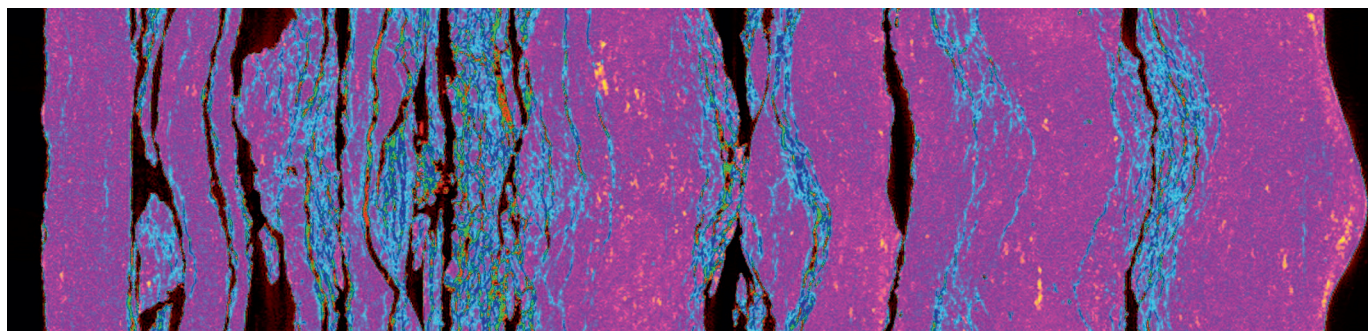


Rys. 21. Sól równokrystaliczna kompleksu $\text{Na}_3 + \text{K}_3 + \text{Na}_4$



Rys. 22. Sól różnokrystaliczna ogniwa Na_2

Obraz tomograficzny (CT) uzyskany dla utworów solnych nierozdzielonych ogniw $\text{Na}_3 + \text{K}_3 + \text{Na}_4$ w omawianym otworze zasadniczo różni się od opisów makroskopowych. Utwory te są bardzo silnie zmienione pod wpływem wyciskania ich z pierwotnej pozycji i mają cechy wyraźnej plastycznej deformacji, co w dużym stopniu widoczne jest w obrazie tomograficznym. Uwagę zwraca tutaj obecność licznych stref, które przypuszczalnie podlegały procesom rozpuszczania i rekrytalizacji (strefy w kolorze niebieskim na rysunku 23). Wśród tych stref wskazać można co najmniej kilka wyraźnie zarysowanych powierzchni oddzielności, będących najprawdopodobniej drogami migracji

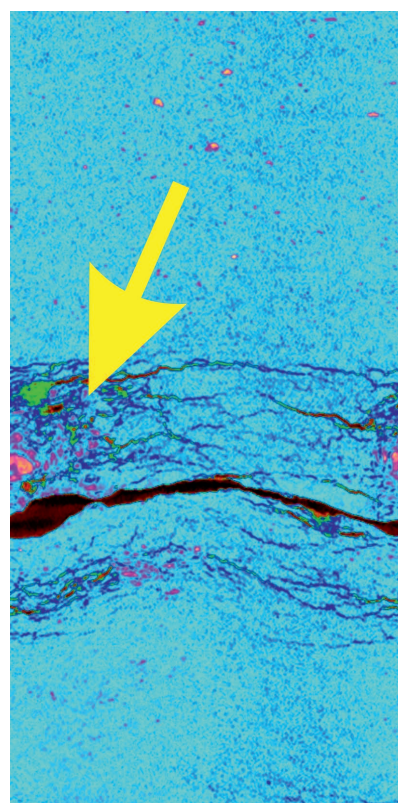


Rys. 23. Przykład obrazu tomografii rentgenowskiej (CT) silnie zmienionych utworów kompleksu $\text{Na}_3 + \text{K}_3 + \text{Na}_4$

roztworów. W trakcie obserwacji makroskopowych rdzenia w tym interwale nie stwierdzono tak wyraźnego zróżnicowania, gdyż cały rdzeń zbudowany jest z soli krystalicznej o nierozróżnialnych makroskopowo cechach. Ponadto niejednorodny, stwarzający wrażenie „chropowatości” obraz wewnętrzny soli (kolory różowe i fioletowe na rysunku 23) wskazuje na dosyć znaczny stopień jej zailenia, co potwierdziły również wyniki badań wykonanych przy pomocy innych metod w ramach prezentowanego opracowania (XRD, XRF, analizy chemiczne).

Obraz tomograficzny w obrębie starszej soli kamiennej (Na_2) w omawianym otworze wydaje się znacznie bardziej jednorodny, niemniej jednak uwagę zwraca strefa przypuszczalnie również związana z zachodzącymi procesami rozpuszczania i rekrytalizacji (strefa wskazana strzałką na rysunku 24). Można zestawiać ją z interwalem, w obrębie którego w trakcie makroskopowej obserwacji rdzenia zanotowano obecność gniazdowych skupień beżowo-szarych ilów solnych o charakterze wypełnień szczelin. Elementy te znalazły odzwierciedlenie również w obrazie tomograficznym (rysunek 24).

Analiza wykonana przy zastosowaniu skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) pozwala stwierdzić, że wykształcenie głównych minerałów (halit, anhydryt) jest analogiczne do opisanego powyżej przykładu soli cechsztyńskich z otworu C-3, nie stwierdzono jedynie obecności celestynu. Jednak badania metodą XRD wykazały występowanie tego minerału w pojedynczych próbkach. Na podstawie analiz chemicznych udowodniono obecność siarczanów w zróżnicowanej ilości, od 1190 do 34 900 ppm. W próbce pobranej z wyższego kompleksu ($\text{Na}_3 + \text{K}_3 + \text{Na}_4$) stwierdzono występowanie potasu w ilości 323 ppm. Również analizy wy-



Rys. 24. Przykład obrazu tomografii rentgenowskiej (CT) silnie zmienionych utworów ognia Na_2

konane metodą XRD potwierdziły obecność minerałów typowych dla soli potasowo-magnezowych, takich jak: sylwin, karnalit, polihalit. Wspomniana metoda pozwoliła również na wykrycie minerałów ilastych, w tym chlorytu i kaolinitu. Z kolei na podstawie analiz XRF stwierdzono podwyższoną zawartość krzemionki (SiO_2), w ilości od 0,99 do 10,05% wag.

Wnioski

1. Analiza obrazu rentgenowskiej tomografii komputerowej (CT) pozwoliła potwierdzić wiele cech obserwowanych makroskopowo, np. doskonale odwzorowujące się wkładki i laminy ilaste, jak również ujawniła dodatkowe elementy budowy wewnętrznej, które nie zostały dostrzeżone makroskopowo, takie jak obecność stref, które przypuszczalnie podlegały procesom rozpuszczania i rekrytalizacji, o wyraźnie zarysowanych powierzchniach oddzielności;
2. Analiza obrazu w skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM) dostarczyła szczegółowych informacji dotyczących przede wszystkim składu mineralnego, wykształcenia poszczególnych minerałów, a także morfologii,

stopnia zachowania i relacji przestrzennych pomiędzy masą kryształów budujących podstawowy szkielet badanych skał solnych oraz informacji odnośnie historii procesów diagenetycznych;

3. Analiza metodą dyfrakcji rentgenowskiej (XRD) pozwoliła na identyfikację obecności minerałów głównych zarówno w solach kamiennych (halit, anhydryt), jak i potasowych (sylwin, polihalit, karnalit), jak również minera-

łów dodatkowych (kwarc oraz domieszki minerałów ilastych) i akcesorycznych (celestyn).

4. Zastosowane metody dyfrakcji rentgenowskiej (XRD), fluorescencji rentgenowskiej (XRF) oraz analizy obrazu przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM), pozwoliły na zgromadzenie pełnego комплекtu, wzajemnie uzupełniających się danych na temat składu mineralnego badanych utworów solnych.

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2017, nr 4, s. 227–235, DOI: 10.18668/NG.2017.04.02

Artykuł nadesłano do Redakcji 9.12.2016 r. Zatwierdzono do druku 7.03.2017 r.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt.: *Badania własności fizycznych utworów budujących struktury solne* – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW; nr zlecenia 0004/SW/16, nr archiwalny DK-4100-4/16.

Literatura

- [1] Bukowski K.: *Badeńska sedymentacja salinarna na obszarze między Rybnikiem a Dębicą w świetle badań geochemicznych, izotopowych i radiometrycznych*. Rozprawy i monografie, nr 236. Wydawnictwa AGH. Kraków 2011.
- [2] Czapowski G.: *Ocena głębokości zbiornika solnego i czasu depozycji chlorków sodu na przykładzie utworów najstarszej soli kamiennej (NaI) cyklu PZ1 cechsztynu w rejonie Zatoki Puckiej*. Przegląd Geologiczny 2007, vol. 55, nr 7, s. 573–581.
- [3] Czapowski G.: *The Middle Badenian rock salts in the Carpathian Foredeep – characteristic, origin and economic value*. Geological Quarterly 1994, vol. 38, nr 3, s. 513–526.
- [4] Czapowski G., Bukowski K.: *Geology and resources of salt deposits in Poland: the state of the art*. Geological Quarterly 2010, vol. 54, nr 4, s. 509–518.
- [5] Czapowski G., Bukowski K.: *Złoża soli w Polsce*. Przegląd Geologiczny 2009, vol. 57, nr 9, s. 798–811.
- [6] Czapowski G., Tomassi-Morawiec H., Toboła T., Tadych J.: *Geology, geochemistry and petrological characteristics of Potash Salt Units from PZ2 and PZ3 Zechstein (late Permian) cycles in Poland*. Geology, Geophysics & Environment 2012, vol. 38, nr 2, s. 153–188.
- [7] Garlicki A.: *Autochtoniczna seria solna w miocenie Podkarpacia między Skawiną a Tarnowem*. Biuletyn Instytutu Geologicznego 1968, vol. 215, s. 5–78.
- [8] Garlicki A.: *Formalne jednostki litostratygraficzne mioceanu – formacja z Wieliczki (fm)*. Przegląd Geologiczny 1994, vol. 42, nr 1, s. 26–28.
- [9] Garlicki A.: *Porównanie osadów solnych Górnego Śląska i okolic Wieliczki*. Przegląd Geologiczny 1994, vol. 42, nr 9, s. 752–753.
- [10] Garlicki A.: *Sedymentacja soli miocennych w Polsce*. Prace Geologiczne PAN, nr 119. Kraków 1979, s. 1–66.
- [11] Garlicki A.: *Z rozważań sedymentologicznych nad profilem autochtonicznej formacji solonośnej okolicy Wieliczki i Bochni*. Rocznik Polskiego Towarzystwa Geologicznego 1968, vol. 38, nr 2–3, s. 219–223.
- [12] Peryt T.M.: *Sedymentacja ewaporatów badeńskich w zbiorniku przedkarpackim*. Przegląd Geologiczny 2006, vol. 54, nr 5, s. 438–444.
- [13] Peryt T.M.: *The beginning, development and termination of the Middle Miocene Badenian salinity crisis in Central Paratethys*. Sedimentary Geology 2006, s. 188–189, 379–396.
- [14] Podemski M.: *Cechsztyńskie sole kamienne i potasowe cyklotomów Z2, Z3 w okolicach Nowej Soli*. Biuletyn Instytutu Geologicznego 1972, vol. 260, s. 5–62.
- [15] Podemski M.: *Sedymentacja cechsztyńska zachodniej części monokliny przedsudeckiej na przykładzie okolic Nowej Soli*. Prace Instytutu Geologicznego 1973, nr 71, s. 1–101.
- [16] Skupio R.: *Wykorzystanie przenośnego spektrometru XRF do pomiarów składu chemicznego skał*. Nafta-Gaz 2014, nr 11, s. 771–777.
- [17] Urbaniec A.: *Nowe spojrzenie na interpretację geologiczną Karpat i ich podłoża w rejonie Fredropol–Huwniki*. Archiwum Instytut Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego, Kraków 2017.
- [18] Wolański K., Zarudzki W., Kiersnowski H., Dohnalik M., Drabik K.: *Wykorzystanie tomografii komputerowej w badaniu rdzeni skał*. Nafta-Gaz 2016, nr 12, s. 1035–1042, DOI: 10.18668/NG.2016.12.04.
- [19] Zalewska J., Dohnalik M., Sikora G.: *Możliwości rentgenowskiej tomografii komputerowej w rozpoznawaniu, obrazowaniu i szacowaniu wielkości szczelin*. Nafta-Gaz 2009, nr 4, s. 296–303.



Mgr Andrzej URBANIEC
Główny specjalista inżynierjno-techniczny
w Zakładzie Sejsmiki
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: andrzej.urbaniec@inig.pl



Mgr inż. Dariusz CEBULSKI
Główny specjalista inżynierjno-techniczny
w Zakładzie Geofizyki Wiertniczej
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: dariusz.cebulski@inig.pl



Mgr inż. Katarzyna KASPRZYK
Specjalista ds. badań petrofizycznych i petrograficznych
PETROGEO Przedsiębiorstwo Usług Laboratoryjnych i Geologicznych Sp. z o.o.
ul. Wileńska 51B/206
05-200 WOŁOMIN
E-mail: kasprzyk@petrogeo.pl