

Grażyna Łykowska
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

Trójwymiarowa wizualizacja szczelin metodą mikrotomografii rentgenowskiej

Wstęp

Najbardziej interesującym typem porowatości w skałach węglanowych jest porowatość szczelinowa, a jej przestrzenny rozkład jest kluczowym czynnikiem oceny poprawnych wartości przepływu mediów złożowych. Określanie parametrów geometrycznych szczelin jest możliwe między innymi w wyniku zastosowania takich metod bezpośrednich jak laboratoryjna analiza rdzeni [2]. Jedną z najlepszych i najnowocześniejszych metod badawczych jest rentgenowska mikrotomografia komputerowa (micro-CT). Jest to technika obrazowania pozwalająca

na wnikliwą analizę struktury wewnętrznej skał. Na jej podstawie otrzymujemy duże ilości równoległych dwuwymiarowych przekrojów próbki skalnej, które umożliwiają trójwymiarowe odwzorowanie jej wewnętrznej struktury. Obrazy 3D dostarczają informacji o objętości, strukturze, lokalizacji, ilości i wielkości porów oraz pozwalają na zinterpretowanie szczelin wraz z ich szczegółami geometrycznymi, takimi jak szerokość, długość oraz rozwartość. Technologia ta charakteryzuje się wysoką rozdzielczością obrazów, co wiąże się z ich bardzo wysoką jakością.

Metodyka prowadzenia badań

W niniejszym eksperymencie do skanowania szczelin zastosowano mikrotomograf rentgenowski Benchtop 160 CT, który składa się z trzech podstawowych elementów: źródła promieniowania rentgenowskiego, manipulatora, w którym umieszczana jest próbka, oraz detektora rejestrującego tłumienie promieniowania X w próbce. Ta aparatura badawcza została szczegółowo omówiona we wcześniejszych pracach, m.in. w pracy zbiorowej pod kierunkiem J. Zalewskiej [6].

W mikrotomografii, aby przejść od rzeczywistego obiektu do jego przestrzennego komputerowego obrazu, konieczne są do wykonania 3 etapy: akwizycja danych, rekonstrukcja projekcji oraz trójwymiarowa wizualizacja obrazu.

Akwizycja danych wykonywana jest za pomocą programu Inspect-X i polega na poprawnym umieszczeniu próbki w uchwycie za pomocą jednego z dostępnych elementów mocujących. Bardzo istotne jest, aby oś obrotu próbki pokrywała się (lub była jak najbliżej) osi obrotu uchwytu,

gdyż pozwala to uzyskać największe możliwe powiększenie dla danej próbki. Po ustaleniu wymaganej pozycji należy sprawdzić, czy podczas wykonywania obrotu o 360° próbka cały czas znajduje się w polu widzenia. Następnym krokiem jest ustawienie odpowiednich parametrów skanowania (energii i natężenia promieniowania oraz czasu ekspozycji). Za pomocą tych parametrów można ustawić kontrast obrazu. Ważne przy tym jest, aby nie przesycić obrazu bielą. Skanowanie próbek zostało przeprowadzone przy napięciu lampy 40 kV i natężeniu prądu 110 μA . Stolik próbki obracany był co 1° w zakresie do 360° . Czas ekspozycji jednej próbki wynosił 3 godziny. Podczas pomiaru próbka została prześwietlona promieniowaniem rentgenowskim (wykorzystuje się różnice we własnościach absorpcyjnych materiałów, które w zależności od składu mineralnego w różny sposób pochłaniają promieniowanie). Proces akwizycji generował prawie 3 000 projekcji. Dane pomiarowe gromadzi się w pamięci komputera, a następnie poddaje rekonstrukcji. Szczegóły metody pomiarowej

zostały przedstawione w pracy statutowej 15/SW z 2009 r. – G. Łykowska: *Opracowanie metodyki rozpoznawania, obrazowania i szacowania wielkości oraz rozwartości szczelin metodą mikrotomografii rentgenowskiej* [3].

Rekonstrukcja projekcji odbywa się za pomocą programu CT-Pro, dostarczonego przez producenta wraz z aparatem Benchtop. W celu uzyskania wyniku końcowego należy krok po kroku wykonać pewne operacje. Po wykonaniu rekonstrukcji uzyskano obrazy o rozdzielczości 6 μm będące przestrzenną wizualizacją skanowanego obiektu. W pierwszym etapie wyniki rekonstrukcji można przedstawić w formie serii dwuwymiarowych przekrojów obiektu (rysunek 1). Na tak otrzymanych danych można wykonać wizualizacje oraz jakościowe i ilościowe analizy badanego obiektu.

Po wykonaniu rekonstrukcji pliki importowane są do programu Avizo, opracowanego przez Mercury Computer Systems, Inc. Podstawowe funkcje tego programu pomagają poznać wewnętrzną strukturę próbki przez wydzielenie elementów o różnych wartościach pochłaniania promieniowania rentgenowskiego. Za ich pomocą można wyróżnić dowolną ilość obiektów z danego przedziału absorpcji promieniowania rentgenowskiego. Oprogramowanie to umożliwia przedstawienie przestrzennego rozkładu porów w próbce skały oraz struktury szkieletu skalnego. Jednym ze

sposobów zapoznania się z wewnętrzną strukturą badanego obiektu jest przeglądanie go w postaci trzech rzutów na prostopadłych względem siebie płaszczyznach, co umożliwia funkcja *orthoslice*. Pozwala ona szybko „przeszukać” trójwymiarowy obraz, oglądając pojedyncze lub wielokrotne, prostopadle bądź skośne przekroje. W każdym z kierunków, w zależności od rozdzielczości, z jaką zostały wykonane projekcje, znajduje się od kilkudziesięciu do paru tysięcy takich przekrojów. Grubość każdej z tych warstw jest równa rozmiarowi woksela uzyskanego w danym kierunku. Po wykonaniu wszystkich wyżej przedstawionych czynności można przystąpić do obrazowania szczelin, rozpoczynając od wydzielenia obszarów, dla których generuje się powierzchnię. Na wygenerowanych powierzchniach dokonuje się pomiarów wielkości poszczególnych obiektów czy rozwartości kątów w przestrzeni. Po wydzieleniu przestrzeni porowej można przystąpić do szczegółowej analizy wewnętrznej struktury porowej skał. Na tak otrzymanych danych można wykonać wizualizacje oraz jakościowe i ilościowe analizy badanego obiektu. Możliwe jest dokonanie dokładnego pomiaru szerokości szczeliny i kąta nachylenia szczeliny względem płaszczyzny próbki. Dla powyższych obrazów, po zdefiniowaniu rozmiaru woksela, program podaje rzeczywisty rozmiar obiektu z dokładnością do 0,01 μm oraz wartość kąta z dokładnością 0,1° [1].

Wyniki badań

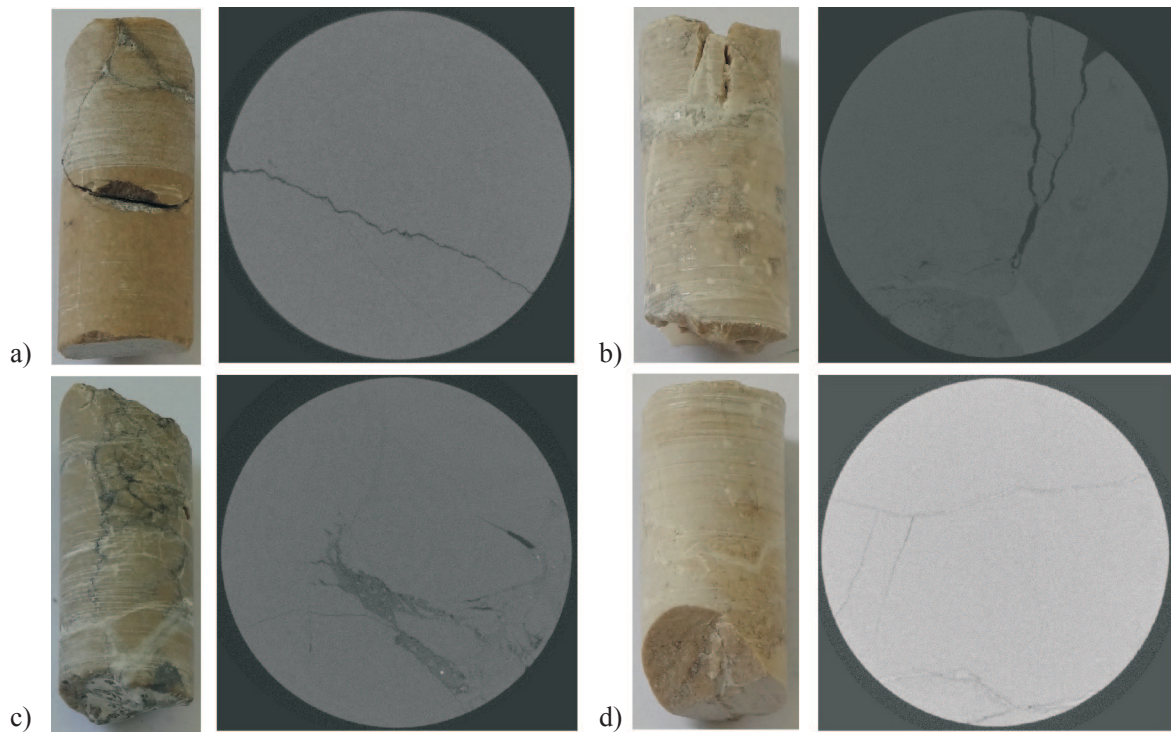
Badaniom poddano 20 próbek skał węglanowych pochodzących z dwóch otworów wiertniczych: A-1 oraz Ł-4. Pomiary wykonano na próbkach o średnicy 15 mm i wysokości ok. 30 mm. Na podstawie analizy rentgenowskiej stwierdzono, że próbki reprezentowały niemal czyste wapienie (średnia zawartość kalcytu zawierała się w przedziale 87÷100%). Rysunek 1 przedstawia zdjęcia niektórych analizowanych próbek w oglądzie rzeczywistym oraz zrekonstruowane przekroje poprzeczne w obrazie mikrotomograficznym, na którym widoczna jest obecność i lokalizacja pustek. Obszary jasne odpowiadają rejonom o wysokiej gęstości, a obszarom ciemnym przypisane są niskie gęstości.

W programie Avizo dla badanych próbek została wygenerowana izopowierzchnia (charakteryzująca się tą samą wartością absorpcji promieniowania). Wyniki przedstawiono na rysunku 2.

Obrazy mikrotomograficzne przekroju przez szczeliny poszczególnych próbek zostały zaprezentowane na rysunku 3. Rysunek ten przedstawia układ trzech współrzędnych (X , Y , Z) i zorientowaną w nich szczelinę. Oś Z (oznaczona

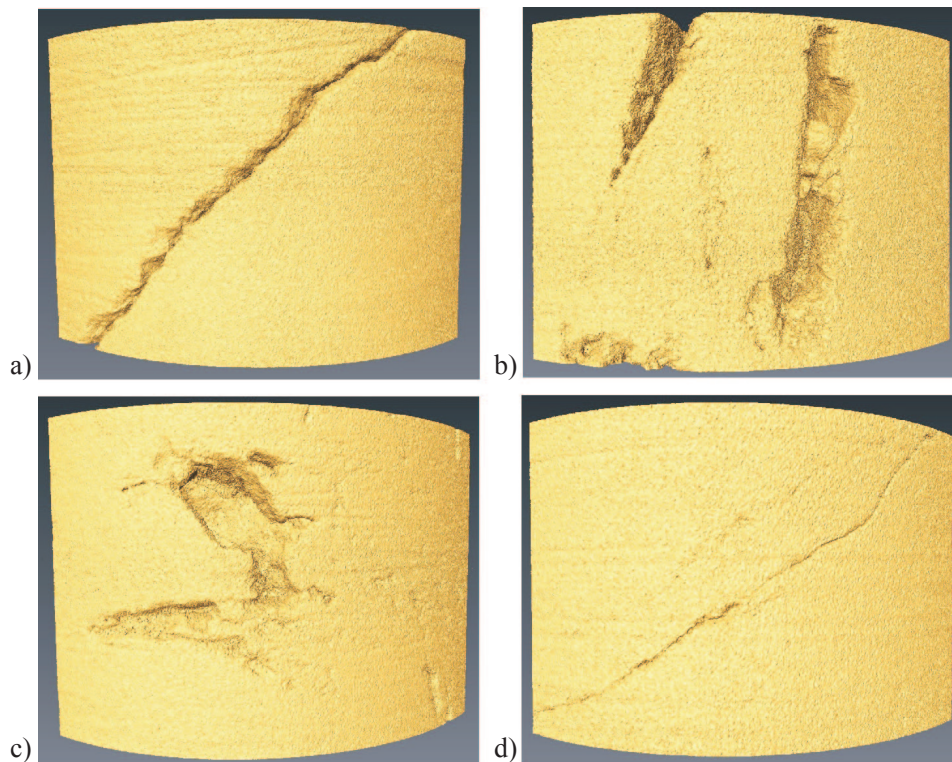
kolorem niebieskim) jest równoległa do osi próbki. Następnie wykonano pomiar kąta nachylenia szczeliny do płaszczyzny przekroju próbki oraz zmierzono rozwartość zobrazowanej szczeliny.

- próbka nr 12135 – na obrazie tomograficznym widnieje jedna wyraźna szczelina, której szerokość w płaszczyźnie YZ zmienia się od 11,31 μm do 18,87 μm , a długość w płaszczyźnie XZ wynosi 899,04 μm ; kąt nachylenia szczeliny do płaszczyzny XY wynosi 35,0°,
- próbka nr 13280 – w analizowanej próbce zaobserwowano dwie szczeliny przecinające się pod kątem 22,6°, których szerokości mieszczą się w zakresie od 34,23 μm do 90,09 μm ; kąty nachylenia szczelin względem płaszczyzny XY wynoszą 68,3° i 80,7°,
- próbka nr 12123 – obrazy przedstawiają sieć szczelin o szerokości od 6,32 μm do 23,41 μm , kąty przecięcia szczelin wynoszą od 51,3° do 74,5°; kąt nachylenia jednej ze szczelin względem płaszczyzny XY wynosi 59,2°,
- próbka nr 13279 – w wyniku badań tomograficznych zaobserwowano występowanie dwóch szczelin, pomie-



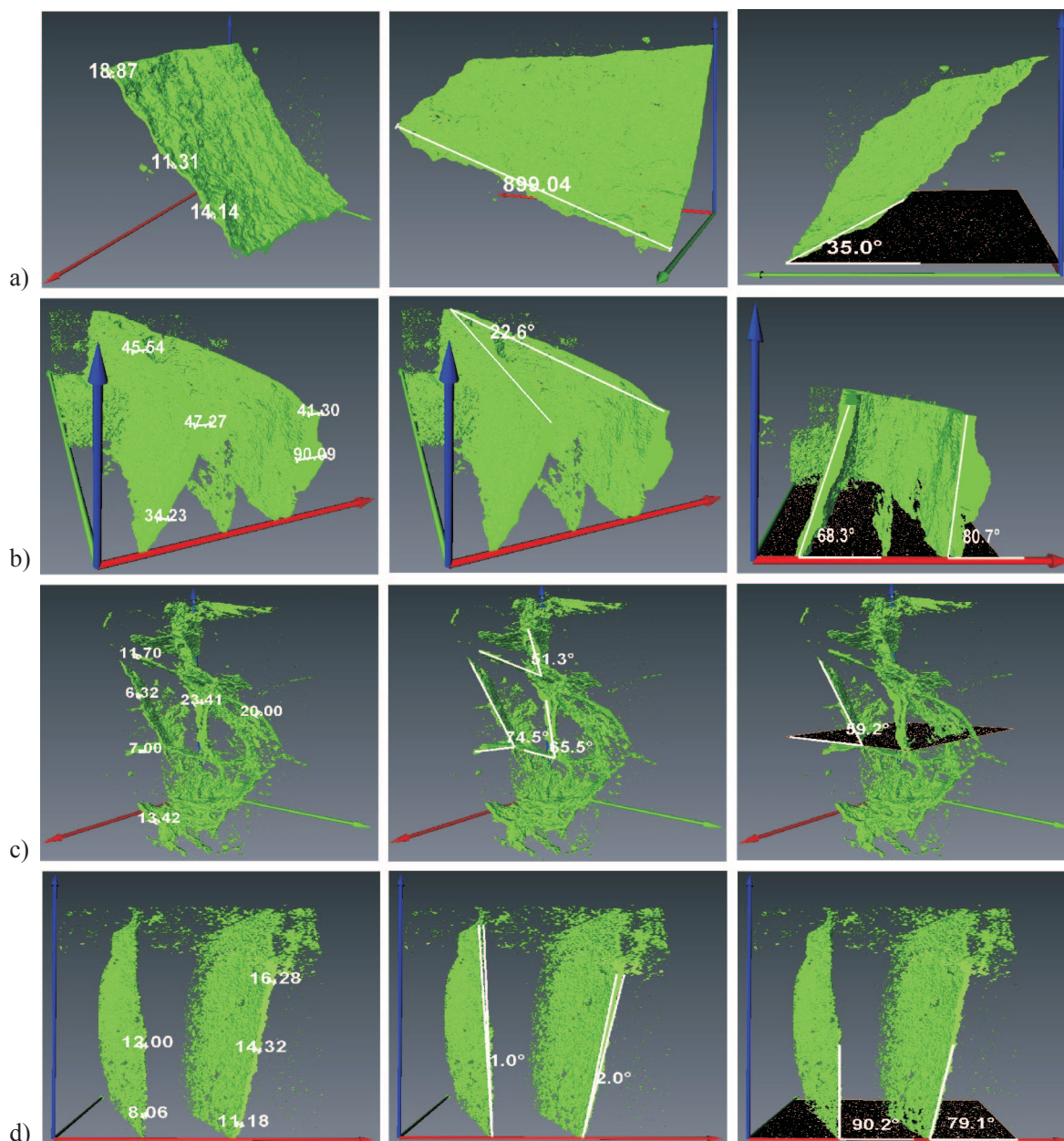
Rys. 1. Zdjęcia badanych próbek w oglądzie rzeczywistym oraz zrekonstruowane przekroje poprzeczne w obrazie mikrotomograficznym

- a) próbka nr 12135, otwór Ł-4, interwał pobrania rdzenia 1794÷1803 m sk. VI, 90÷100 cm
 b) próbka nr 13280, otwór A-1, interwał pobrania rdzenia 2084÷2093 m sk. VI, 35÷45 cm
 c) próbka nr 12123, otwór Ł-4, interwał pobrania rdzenia 1776÷1785 m sk. II, 25÷35 cm
 d) próbka nr 13279, otwór A-1, interwał pobrania rdzenia 2084÷2093 m sk. I, 40÷55 cm



Rys. 2. Wygenerowana izopowierzchnia:

- a) próbka nr 12135, b) próbka nr 13280, c) próbka nr 12123, d) próbka nr 13279



Rys. 3. Obrazy mikrotomograficzne przekroju przez szczeliny dla poszczególnych próbek

oś X – kolor czerwony, oś Y – kolor zielony, oś Z – kolor niebieski

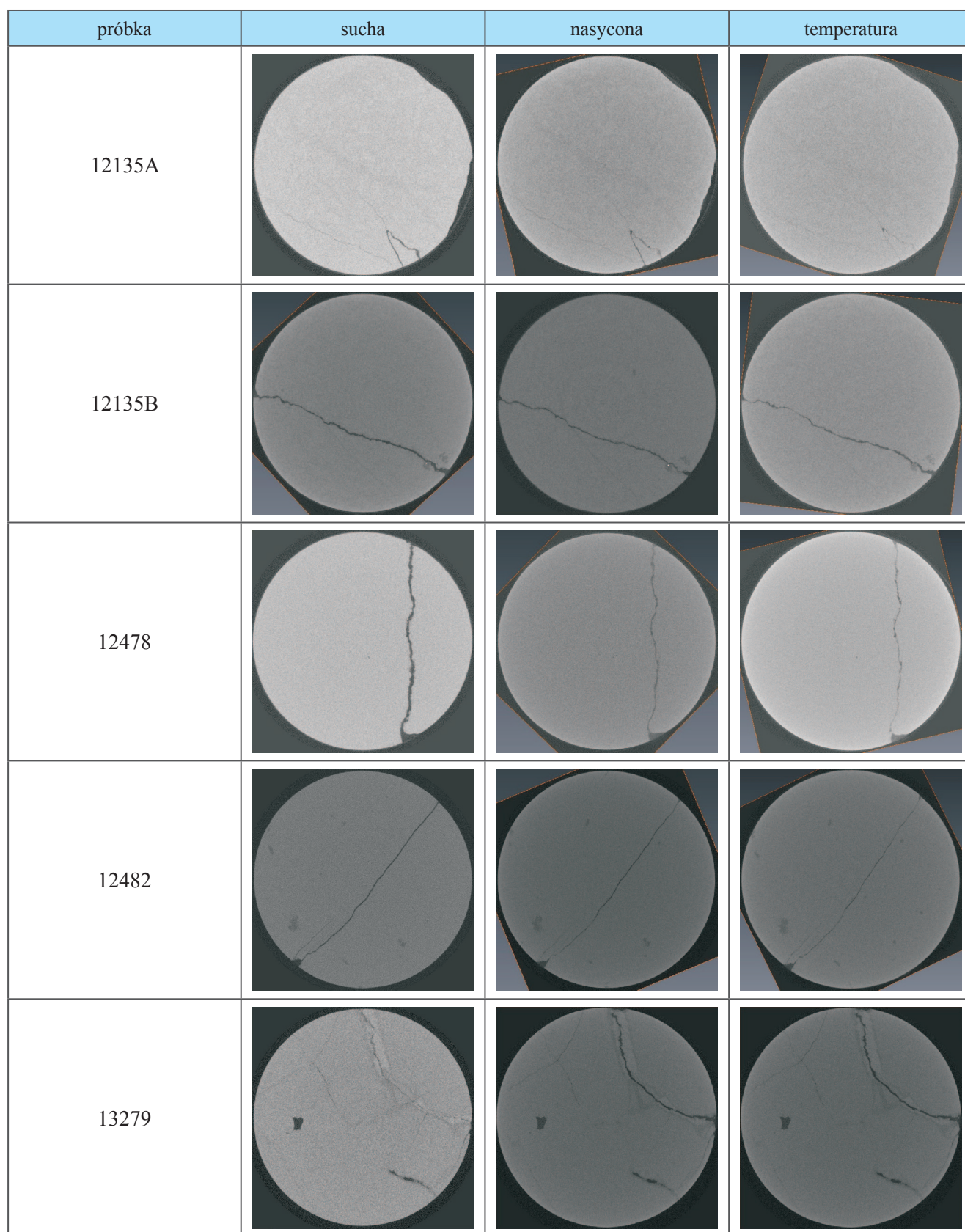
rzne szerokości tych szczelin są zmienne i mieszczą się w zakresie od 8,06 μm do 16,28 μm ; kąty rozwarcia analizowanych szczelin w płaszczyźnie XZ wynoszą 1,0° i 2,0°, natomiast kąty nachylenia względem płaszczyzny XY wynoszą odpowiednio 90,2° i 79,1°.

Generalnie na analizowanych obrazach mikrotomograficznych próbek skał węglanowych występowały pojedyncze wyraźne szczeliny lub sieci szczelin. Ich płaszczyzny były bardzo dobrze widoczne i nie budziły wątpliwości w interpretacji.

W kolejnym etapie badań analizowane próbki poddano nasycaniu solanką o stężeniu 50 g/l, a następnie wygrzewaniu do temperatury ok. 80÷90°C. Przy każdym etapie

wykonano obrazowanie mikrotomograficzne, a zebrane dane umożliwiły przeprowadzenie porównania obrazów szczelin widocznych na przekrojach mikrotomograficznych. Przykładowe wyniki obserwacji przedstawiono na rysunku 4.

W wyniku porównania tych samych przekrojów mikrotomograficznych stwierdzono, że w analizowanej grupie skał węglanowych są przykłady, w których wpływ nasycenia i temperatury na szerokość i rozwartość szczelin był wyraźnie wyeksponowany. Na zaprezentowanych przykładach można zaobserwować zmniejszanie się (zamykanie) szczelin (próbki nr 12135A, 12135B, 12478, 12482). Prezentowane dwuwymiarowe przekroje przedstawiają rów-



Rys. 4. Przekroje mikrotomograficzne próbek suchych, nasyconych i poddanych działaniu temperatury

niez przykłady, w których pod wpływem działania wody i temperatury zaobserwowano rozpuszczanie minerałów wypełniających szczelinę (próbka nr 13279).

Zaprezentowane wyniki doświadczalne ilustrują wpływ procesu nasyconia oraz działania temperatury na wielkość szczelin. Metoda mikrotomografii rentgenowskiej

daje możliwość obserwacji zachowania się skanowanego obiektu w wyniku działania różnych czynników zewnętrznych [4, 5]. Mikrotomografia komputerowa pozwala obrazować różne własności fizyczne powierzchni cienkich warstw i przestrzeni między warstwami. Jest to metoda, która z serii dwuwymiarowych przekrojów próbek

skalnych generuje trójwymiarowy obraz wewnętrznej mikrostruktury próbki z uwzględnieniem jej szczelinowości i określeniem czynników wpływających na zmianę rozwartości szczelin. Otrzymane wyniki potwierdzają dużą przydatność mikrotomografii rentgenowskiej w badaniu skał węglanowych.

Podsumowanie

Celem artykułu było zaprezentowanie możliwości metody rentgenowskiej tomografii komputerowej w rozpoznawaniu, obrazowaniu i szacowaniu wielkości oraz rozwartości szczelin. W niniejszej pracy badano możliwość zastosowania rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej do oceny wpływu czynników zewnętrznych (takich jak nasycenie i temperatura) na rozwartość szczelin w skałach węglanowych. Jedną z wielu zalet tej metody jest możliwość obrazowania szczelin w trójwymiarowej przestrzeni i dokumentowania tych obrazów jako biegu szczelin w objętości próbki i zmian ich roz-

wartości. Uzyskane rezultaty pozwolą na zwiększenie dokładności ilościowych ocen właściwości skał oraz umożliwią bardziej wiarygodną interpretację materiałów geologiczno-geofizycznych, służąc praktycznemu ich wykorzystaniu przez różnych specjalistów, np. geologów, sedymentologów, petrografów i geofizyków. Poszerzenie zakresu wiedzy na temat podstawowych właściwości zbiornikowych skał węglanowych wniesie istotny wkład do dziedziny badań petrofizycznych i przyczyni się do rozwoju metod interpretacyjnych materiałów geofizycznych.

Literatura

- [1] Avizo 6.1 documentation, 2009.
- [2] Kiełt M.: *Szczelinowatość skał a geofizyka wiertnicza – przegląd problemów i możliwości*. „Geofizyka. Biuletyn Informacyjny” 2006, nr 1. Przedsiębiorstwo Badań Geofizycznych, Warszawa.
- [3] Łykowska G.: *Opracowanie metodyki rozpoznawania, obrazowania i szacowania wielkości oraz rozwartości szczelin metodą mikrotomografii rentgenowskiej*. Praca statutowa 2009, 15/SW, s. 1–116.
- [4] Polak A., Elsworth D., Liu J., Grader A.: *Spontaneous switching of permeability changes in a limestone fracture under net dissolution*. „Water Resources Research” 2004, vol. 40, W03502, s. 1–10, doi:10.1029/2003WR002717.
- [5] Polak A., Yasuhara H., Elsworth D., Liu J., Grader A., Hallock P.: *The evolution of permeability in natural fractures – the competing roles of pressure solution and free-face dissolution*. Elsevier Geo-Engineering Book Series 2004, vol. 2, s. 721–726.
- [6] Zalewska J.: *Rentgenowska mikrotomografia komputerowa w badaniu skał węglanowych*. Prace Naukowe Instytutu Nafty i Gazu 2010, nr 171, s. 1–263.



Mgr inż. Grażyna ŁYKOWSKA – absolwentka Wydziału Inżynierii i Technologii Chemicznej Politechniki Krakowskiej, na kierunku Inżynieria Chemiczna i Procesowa, specjalizacji Inżynieria Procesów Technologicznych. Pracownik Zakładu Geofizyki Wiertniczej INiG w Krakowie. Zajmuje się analizą rentgenowską składu mineralnego skał oraz badaniem ich właściwości petrofizycznych.